

Національний авіаційний університет
Житомирський військовий інститут імені С.П.Корольова

ГОРШЕНІН О.Є., ДУБИНА О.Ф., КОНДРАТЕНКО С.О.,
БОЛОБАН С.І.

ЦИФРОВА ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ ТА ОСНОВИ ФОТОГРАММЕТРІЇ

Затверджено начальником інституту як навчальний
посібник для курсантів 1-го факультету

Житомир, 2007

УДК 628.8:528.914, 528.7, 600.1

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор Ребрін Ю.К.,
кандидат технічних наук, доцент Омельчук В.В.

Горшенін О.Є., Дубина О.Ф., Кондратенко С.О., Болобан С.І.
/ Під ред. О.Є.Горшеніна. Цифрова обробка зображень та основи
фотограмметрії. Навчальний посібник – Житомир: ЖВІРЕ, 2007
- 240с.

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

В посібнику розглядаються принципи та методи цифрової обробки космічних знімків та аерознімків земної поверхні на сучасних обчислювальних засобах, а також особливості застосування методів та прийомів цифрової обробки при переддешифрувальної та фотограмметричної обробці. 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 **Болобан С.І.**

В книзі всього пронумеровано 260 с.

ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник розроблено відповідно до програми дисципліни “Цифрова обробка зображень та основи фотограмметрії”. Він призначений для курсантів четвертого курсу, які навчаються за спеціальністю “Комплекси, системи та засоби автоматизації управління військами та озброєнням” по відповідній спеціалізації.

У посібнику розглядаються основні алгоритми, методи та прийоми цифрової обробки при переддешифрувальній та фотограмметричній підготовці космічних знімків та аерознімків земної поверхні на сучасних обчислювальних засобах. Детально розглядаються принципи поліпшення якості знімків. Особлива увага приділяється практичним аспектам застосування різних методів фільтрації та радіометричних перетворень.

Окремо розглядаються принципи геометричного корегування та геореференціювання знімків. У цій частині викладено як теоретичний підхід щодо основних принципів геометричного трансформування знімків, так і практичні прийоми фотограмметричної обробки.

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 у 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. 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.

У наш час здобування корисної інформації із космічних та повітряних знімків земної поверхні здійснюють за допомогою автоматизованих робочих місць (АРМ) обробки знімків, які побудовані на базі графічних робочих станцій чи звичайних персональних обчислювальних машин (ПЕОМ). Це потребує подання знімків у цифровому вигляді. Сучасні космічні засоби знімання саме у такій формі подають отримувані знімки.

В той же час знімки земної поверхні та допоміжні зображення (карти, плани) подавалися раніше і зараз подаються не тільки у цифровому вигляді. Тому для використання знімків на традиційних носіях (папері,

фотопапері та фотоплівках) потрібно їх перетворити у цифрову форму для обробки в АРМ.

Перший розділ посібника присвячений загальним принципам цифрового подання зображень та перетворення фотознімків у цифрову форму.

Основну роботу по здобуванню корисної інформації із знімка здійснює людина-дешифрувальник. Але, на жаль, якість космічних знімків, що безпосередньо отримуються з космічного апарата не завжди відповідає вимогам. Тому часто приходиться проводити попередню обробку отриманих знімків з метою покращання їх якості та підготовки до розглядання дешифруванимиком.

У другому розділі розглядаються основні принципи покращання якості зображень. Розглядаються як загальні принципи цифрової фільтрації зображень, так і застосування методів фільтрації для покращання якості знімків: усунення завад і лінійних викривлень, препарування об'єктів на зображеннях. У розділі детально подані принципи радіометричного претворення зображень з метою їх контрастування, корегування радіометричних спотворень та поелементного препарування. Приділена увага методам колірного синтезування багатозональних та спектрозональних знімків. Перший і другий розділи написані Горшеніним О.Є.

Третій розділ містить детальне описання принципів геометричного корегування та геореференціювання знімків земної поверхні. Крім роботи з цифровими зображеннями, в розділі розглядається робота із знімками і картами в традиційній формі, що дозволяє читачам навчитися працювати із знімками та картами на папері та фотопапері. Цей розділ написаний сумісно Горшеніним О.Є. (підрозділи 3.2, 3.3, 3.7.), Кондратенком С.О. (підрозділи 3.1, 3.8), Дубиною О.Ф. (підрозділи 3.4 - 3.6,3.11), Болобаном С.І. (підрозділи 3.9, 3.10).

РОЗДІЛ 1

ЦИФРОВЕ ПОДАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ПОЕЛЕМЕНТНІ ОПЕРАЦІЇ

1.1. ДИСКРЕТИЗАЦІЯ РАСТРУВАННЯМ ТА ТЕОРЕМА ВІДЛІКІВ

1.1.1. Особливості зображень як сигналів

Розподіл енергії відбитого від об'єктів випромінювання за просторовими координатами x , y і довжинами хвиль λ може бути описаний математично функцією $E(x,y,\lambda)$. Енергія випромінювання пропорційна квадрату амплітуди електричного поля і тому являє собою дійсну позитивну величину. У системах, що створюють зображення, максимальна енергія зображення завжди обмежена.

Розміри зображення обмежені формуючою системою і середовищем, на яке воно записується. З метою спрощення будемо вважати, що всі значення енергії точок зображення відмінні від нуля тільки у визначеній прямокутній області $[X, Y]$. Таким чином, величина E є обмеженою функцією трьох обмежених перемінних: $E(x,y,\lambda)$. Будемо вважати цю функцію безперервною в області її визначення.

Відчуття *світлоти*, що виникає в зоровій системі людини, визначається *миттєвою яскравістю* колірного поля, тобто величиною

$$I(x, y) = \int E(x, y, \lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

де $S(\lambda)$ - спектральна чутливість людського зору. На рис.1.1,а наведений приблизний графік функції $S(\lambda)$.

Слід зауважити, що саме відчуття світлоти нелінійно пов'язане з миттєвою яскравістю. Функціональна залежність зміни відчуття світлоти людиною від зміни яскравості наведена на рис.1.1,б.

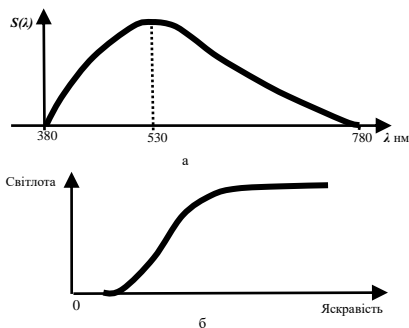


Рис.1.1. Спектральна чутливість людського зору (а) та залежність зміни відчуття світлоти людиною від зміни яскравості (б)

Для панхроматичної системи спостереження функція $I(x,y)$ являє собою розподіл яскравості чи будь-якої іншої фізичної величини, зв'язаної з яскравістю (оптичною щільністю, відбивною здатністю та такими іншими). Вона може бути описана виразом

$$I(x, y) = \int E(x, y, \lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

де $S(\lambda)$ - спектральна чутливість датчика.

У багатозональних системах спостереження зображення для n -ної спектральної зони описується виразом

$$I_n(x, y) = \int E(x, y, \lambda) S_n(\lambda) d\lambda,$$

де $S_n(\lambda)$ - спектральна чутливість датчика n -го діапазону.

Колірні відчуття можна описати набором так званих координат кольору $\{I_R(x,y), I_G(x,y), I_B(x,y)\}$, які є пропорційними інтенсивностям червоного, зеленого і синього кольорів, суміш яких дає заданий колір. Можна використовувати інші системи колірних координат.

1.1.2. Загальний підхід до цифрування зображень

Для обробки безперервних зображень у цифрових процесорах необхідно насамперед перетворити їх у цифрову форму. Це перетворення являє собою перший етап обробки, що

виконується за допомогою спеціальних пристроїв - перетворювачів аналог-код.

Принциповим питанням є обсяг цифрового подання безперервних сигналів. Від нього безпосередньо залежить складність цифрової системи обробки. Цей зв'язок особливо наочно виявляється при кодуванні сигналів для їхнього запам'ятовування в цифрових запам'ятовуючих пристроях. Ясно, що за інших рівних умов необхідно прагнути до того, щоб мінімізувати обсяг цифрового подання [Л8].

Перетворення безперервних сигналів у цифрові здійснюють найчастіше у вигляді послідовності процедур - *дискретизації по просторі і квантування за значеннями*. Дискретизація відноситься до класу лінійних перетворень сигналу, поелементне квантування - до класу поелементних нелінійних перетворень.

1.1.3. Дискретизація сигналу та відновлення зображень

Дискретизація сигналу зображення - це заміна безперервного в просторі (x,y) сигналу яскравості $I(x,y)$ послідовністю дискретних значень $F(i,j)$.

Найбільш зручним, з погляду організації обробки, і природним способом дискретизації є подання сигналів у вигляді вибірок їхніх значень (*відліків*) в окремих, регулярно розташованих точках $(x=i\Delta x, y=j\Delta y)$. Щоб виділити цей спосіб дискретизації серед безліч інших можливих, будемо називати його *раструванням*. Послідовність точок $(x=i\Delta x, y=j\Delta y)$, у яких беруться відліки, називається *растром*.

Практично операція растрування здійснюється шляхом виміру значень сигналу за допомогою датчика, дію якого можна описати як *згортку* сигналу зображення з деякою двовимірною функцією $A_D(u,v)$

$$F(i, j) \approx \iint I(i\Delta x - u, j\Delta y - v) \cdot A_D(u, v) dudv. \quad (1.1)$$

Функція $A_D(u,v)$ являє собою характеристику розподілу чутливості елементарного приймача за полем зору. Її перетин

площиною $A_D(u,v)=0$ задає *миттєве поле зору* елементарного дискретного фотоприймача.

Набір одержуваних значень $F(i,j)$ складає дискретне подання сигналу. Сукупність цих значень зазвичай подається у вигляді матриці $F(i,j)$ відліків значень яскравості зображення в точках вузлів растра (рис.1.2).

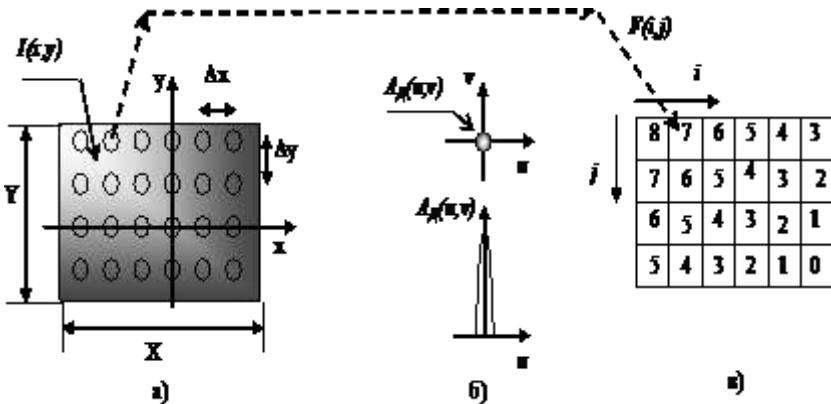


Рис.1.2. Вихідне зображення $I(x,y)$ з растром - (а), апертура дискретизації зображення $A_D(u,v)$ - (б) і результат дискретизації $F(i,j)$ - (в)

Функція $A_D(u,v)$ називається *апертурою дискретизації* [8]. У пристроях дискретизації зображень апертура дискретизації $A_D(u,v)$ описує чутливість датчика відеосигналу як функцію координат у рухливій системі координат з початком у точці $(i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y)$. При раструванні апертура дискретизації, як правило, така, що величини $F(i,j)$ близькі до значень сигналу $I(x,y)$ у точках растра дискретизації. Іншими словами, апертуру дискретизації часто можна вважати прагнучою до дельта-функції.

Відновлення безперервного сигналу з отриманої послідовності його наближених значень $F(i,j)$ виконується шляхом *інтерполяції* його за цими значеннями

$$I(x,y) \approx \sum_i \sum_j F(i,j) \cdot A_B(u + i\Delta x, v + j\Delta y) \quad (1.2)$$

за допомогою *інтерполюючої функції* $A_B(u,v)$. Ця функція називається *апертурою відновлення* [8]. Наприклад, в

електронно-променевих пристроях запису і телевізійних дисплеях апертюра відновлення - це розподіл яскравості світлової плями люмінофора в рухливій системі координат з початком у точці $(i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y)$.

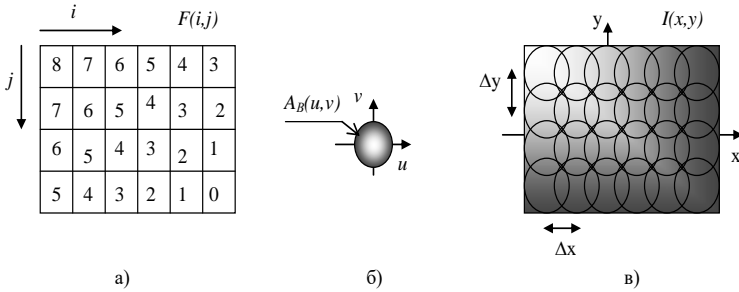


Рис.1.3. Дискретизоване зображення $F(i,j)$ - (а), апертюра відновлення $A_B(\mathbf{u},\mathbf{v})$ (б) і відновлене зображення $I(x,y)$ (в)

Колами на рис1.3,в показано положення апертюри відновлення. $\Delta x, \Delta y$ – крок растра відновлення по горизонталі і вертикалі.

1.1.4. Теорема відліків

Якщо виходити тільки з точності відновлення, то існує важливий клас сигналів (зображень), для яких вищенаведені подання є абсолютно точними. Це *сигнали з обмеженим просторовим спектром*. До них можна віднести і реальні зображення. Просторовий спектр Фур'є зображень, одержуваних в оптичних системах, обмежений через обмеженість розмірів лінз об'єктивів і взагалі через обмеженість розмірів найдрібнішої деталі зображення.

Нехай просторовий спектр сигналу відмінний від нуля на інтервалі $[-W, W]$. Для таких сигналів формули (1.1) і (1.2) переходять у точні рівності:

$$F(i, j) = \iint I(i\Delta x - u, j\Delta y - v)\delta(u, v)dudv, \quad (1.3)$$

$$I(x, y) = \sum_i \sum_j F(i, j) \frac{\sin(u + i\Delta x, v + j\Delta y)}{(u + i\Delta x, v + j\Delta y)}. \quad (1.4)$$

Ці співвідношення, що означають можливість точного відновлення сигналів з обмеженим спектром по послідовності відліків, узятих на растрі з кроком $(\Delta x, \Delta y)$, називаються *теоремою відліків*[8].

Рівність (1.3) означає, що відліками сигналу є його значення в точках $(x, y) = (i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y)$, які отримані після пропущення сигналу через ідеальний фільтр нижніх частот з частотами зрізу $W_x = 2/(\Delta x)$; $W_y = 2/(\Delta y)$.

Практично крок дискретизації повинний вибиратися з умови, щоб у найменшу деталь зображення потрапляло не менше двох точок растра по кожній координаті [1].

Рівність (1.4) означає, що ідеально дискретизоване зображення може бути відновлене без втрат шляхом інтерполяції на растрі відновлення з кроком $(\Delta x, \Delta y)$ за допомогою відновлюючого променя з розподілом виду $\sin(x)/x$ і шириною рівною $(\Delta x/2, \Delta y/2)$. Практично це означає, що для ідеального пристрою, що відновлює, крок відновлення (крок переміщення відновлюючого променя) повинний обиратися як половина ширини променя відновлення в площині відновлюваного зображення.

1.1.5. Ефекти дискретизації і відновлення

Слід зазначити, що на практиці дискретизацію і відновлення за теоремою відліків здійснити неможливо.

Перше: жоден фотоприймач не має спрямованості по просторі порівняної з дельта-функцією. Іншими словами, реальний фотоприймач бере не значення сигналу в точці растра, а середнє значення сигналу за деяким околom цієї точки.

Реальна апертура дискретизації має цілком реальний розмір, що не дозволяє нескінченно зменшувати крок дискретизації без перекриття апертур. Це, у свою чергу, реально збільшує величину мінімально можливого кроку дискретизації, а значить,

і реальну роздільну здатність апаратури оцифровки до величини порядку ширини апертури дискретизації (розміру миттєвого поля зору одиничного фотоприймача). Звичайно, конструкція фотоприймача і раструючого пристрою обираються так, що найменший крок дискретизації дорівнює приблизно напівширині миттєвого поля зору фотоприймача в площині зображення. Тому у першому наближенні можна вважати, що *реальна роздільна здатність* пристрою дискретизації дорівнює подвоєному мінімальному кроку дискретизації цього пристрою.

Друге: жодний пристрій, що відновлює (електронно-променева трубка монітора, друкуючий пристрій, фоторегістратор), не в змозі створити відновлюючу апертуру (відновлюючий промінь) з розподілом енергії у просторі виду $\sin(x)/x$. Реально апертура відновлення (розподіл енергії в промені, що відновлює) має розподіл у виді унімодалної функції (наприклад, гаусоїди). З цієї причини строге виконання на практиці рівності (1.4) неможливо. Тобто реальні пристрої, що відновлюють, забезпечують трохи гірше відновлення при тій же растровій сітці відновлення і ширині відновлюючого променя. Звичайно це виявляється у вигляді деякої *втрати різкості* відновленого зображення в порівнянні з вихідним (тим, що було до цифрування).

Для зображень періодичної структури, якщо крок растрування Δx більше величини зворотної довжини спектра зображення, то виникає так званий *строб-ефект* [8]. Цим пояснюється явище зворотного обертання, що спостерігається часто, у телебаченні на обертових об'єктах. Для двовимірних сигналів (зображень) строб-ефект виявляється в зменшенні просторової частоти періодичних структур, просторова частота яких близька до частоти дискретизації (рис. 1.4).

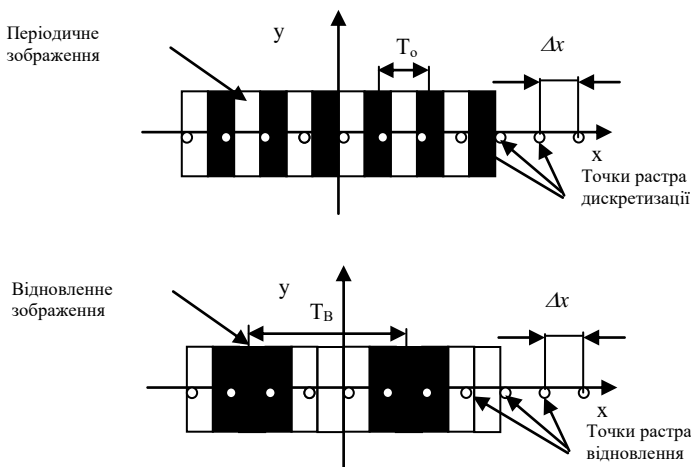


Рис.1.4. Утворення строб-ефекта при дискретизації періодичних зображень з кроком дискретизації трохи більшим, ніж потрібно за теоремою відліків

Практично строб-ефект можна зустріти при скануванні поліграфічних растрових зображень – журнальних та газетних фотографій. Поліграфічна машина або друкуючий пристрій формує зображення з регулярно розташованих растрових елементів (рис.1.5) [2].

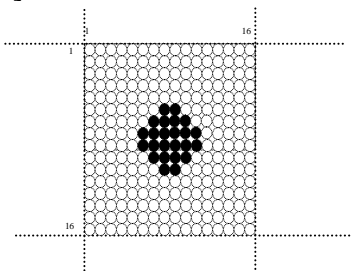


Рис. 1.5. Один елемент растру друкуючого пристрою при друці піктограм з 256 градаціями яскравості

Поточне зворотне значення яскравості (значення оптичної щільності) кожного елемента растру – це кількість зафарбованих елементів фізичного растру друкуючої голівки. Форма зафарбованої плями для різних друкуючих пристроїв та різних способів розташування елементів у растрі може бути різною. На рис.1.6 показане гексагональне розташування елементів растру,

яке забезпечує найкращу розрізненість на поліграфічних зображеннях при фіксованому кроці растру та при зафарбованій плямі еліптичної форми [2].

Крок, з яким розташовані растрові елементи, визначається *лінеатурою растра*. Типові значення кроку поліграфічного растра (у міліметрах) приблизно можна визначити за формулою $25,3/L$, де L може приймати значення: 25 – газетне фото; 75 – для високоякісних видань; 150 – надякісна поліграфія.

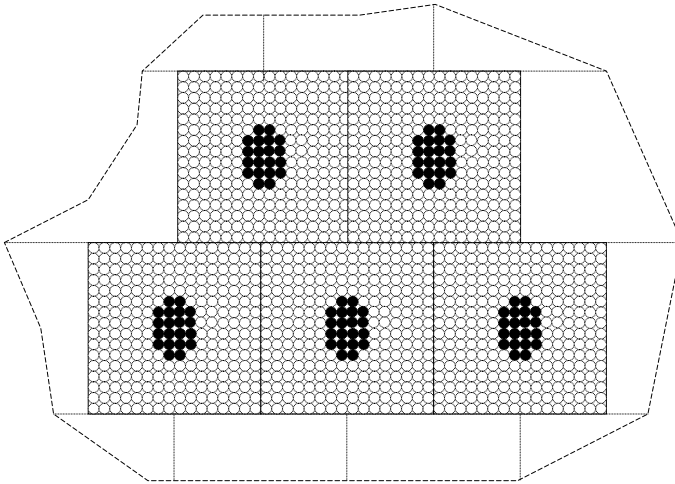


Рис.1.6. Гексагональне розташування елементів растру друкуючого пристрою

На рис.1.7. наведений приклад появи строб-ефекту, який проявляється у вигляді періодичних плям з кроком, пропорційним різниці між кроком дискретизації при скануванні (задається програмою управління сканером) та кроком елементів поліграфічного растру.



Рис.1.7. Приклад зображення із строб – ефектом внаслідок невірно обраного кроку дискретизації при скануванні поліграфічного зображення

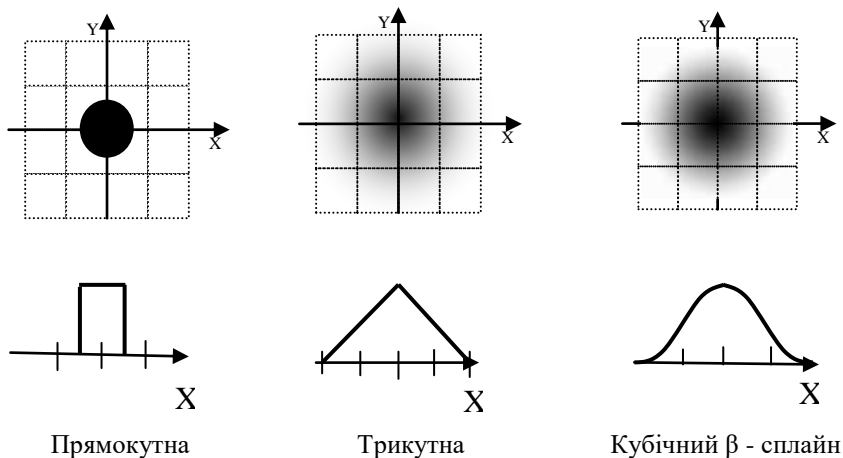
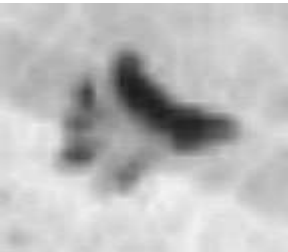


Рис.1.8. Апертури відновлення та відповідні інтерполяційні функції

При відновленні зображень з цифрового подання перевертання виникають, якщо ефективна ширина апертури, що відновлює (ширина променя, що відновлює), стає менше кроку растра відновлення. Таке відбувається, наприклад, при

збільшуванні зображення на екрані монітора. У цьому випадку у відновленому після растрування зображенні з'являються помітні сітки й інші періодичні компоненти. Це явище називають *муар-ефектом* [8].

Відновлення зображень



Відновлення одновимірних сигналів

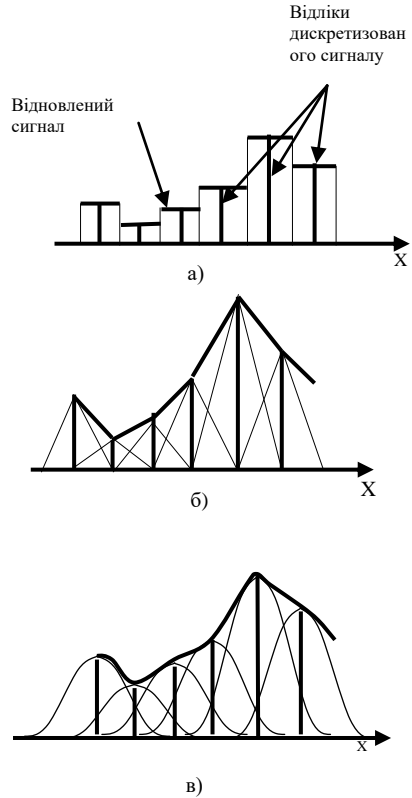


Рис.1.9. Відновлення зображень та одновимірних сигналів різними апертурами відновлення

Практично муар-ефект для різних пристроїв відображення виглядає по-різному. Так, для монітора, якщо не застосовувати інтерполяцію, зображення складається з окремих роздільних точок. Якщо використати при відновленні інтерполяцію першого порядку («найближчий сусід» або квадратний піксел),

тоді муар-ефект проявляється у вигляді так званої «пiкселiзацiї» зображення – воно складається з помiтних прямокутних елементiв. Напiвтоновi межi об’єктiв стають у виглядi «сходинок» (aliasing).

Практично апаратура вiдеопроектора при збiльшеннi завжди виконує iнтерполяцiю першого або бiльш високого порядку (тобто розширює апертуру вiдновлення до квадрата або кола вiдповiдного розмiру), тому зображення на екранi монiтора нiколи не стає точковим. Чiм бiльший порядок iнтерполяцiї, тiм менше помiтний муар-ефект, але й рiзкiсть напiвтонових меж об’єктiв на зображеннях стає гiршою. На рис.1.8 показанi можливи апертури вiдновлення (iнтерполяцiйнi функцiї).

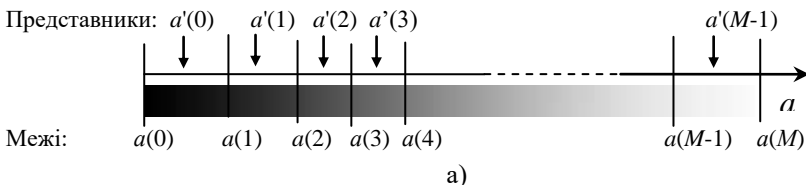
Приклади вiдновлення зображень та одновимiрних сигналiв наведенi на рис.1.9.

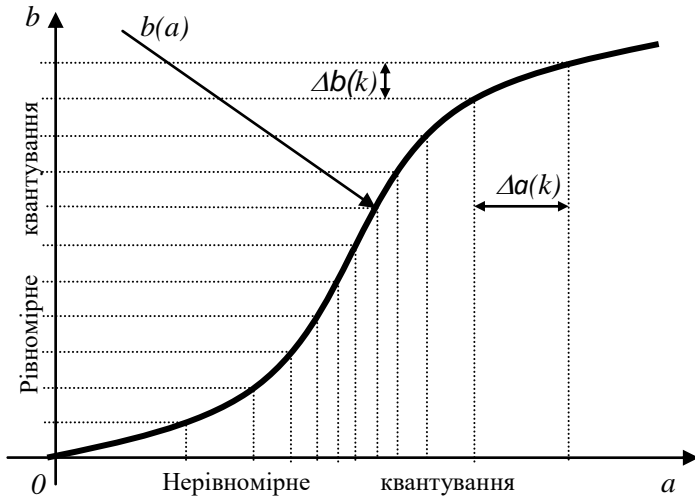
1.2. КВАНТУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

1.2.1. Поелементне квантування

Поелементне квантування полягає в тому, що в області значень сигналу вибирається вiдрiзок кiнцевої довжини, котрий розбивається на iнтервали квантування (рис.1.10,а). Значення, що попадають у кожен iнтервал, позначаються одним числом - номером iнтервалу $k \in [0, \dots, M-1]$.

При вiдновленнi сигналу номер замiняється значенням, що є представником даного iнтервалу. Спосiб розбивки на iнтервали i значення-представники iнтервалiв вибираються так, щоб задовольнялися вимоги до точностi представлення безперервного сигналу цифровим.





б)

Рис.1.10. Нерівномірне квантування: а) схема розташування границь і представників інтервалів квантування; б) нерівномірне квантування за допомогою нелінійного викривлення

Нехай a - коефіцієнт дискретного подання сигналу, $a'(k)$ - значення-представник k -го інтервалу квантування області значень a . Помилка квантування на k -тому інтервалі може характеризуватися величиною $E(k) = a - a(k)$.

Вимоги до точності квантування звичайно формулюють у термінах обмежень, що накладаються на (k) . Найбільш загальний підхід до формулювання цих обмежень полягає в тому, що величину a , а значить і $\Delta(k)$, вважають випадковою і вводять деяку функцію втрат $D\{E(k)\}$, зв'язаних з відмінністю a від його квантованого подання $a(k)$. При такому підході точність подання характеризується середнім за розподілом ймовірностей $p(a)$ значенням функції втрат $D\{E(k)\}$:

$$Q = \sum_{k=0}^{M-1} \int_{a(k)}^{a(k+1)} p(a) D\{E(r)\} da ,$$

де $a(k)$, $a(k+1)$ - межі k -го інтервалу квантування;

M - число інтервалів (рівнів) квантування.

Оптимальним вважається такий вибір інтервалів квантування і їхніх представників, при якому Q мінімальне і не перевищує заданого граничного значення [8].

Слід зазначити, що задача поелементного квантування виникає в цифровій обробці сигналів не тільки при перетворенні безперервних сигналів у цифрові, але і на різних стадіях обчислень у цифрових процесорах при переході від однієї форми представлення чисел до іншої (наприклад, від формату чисел з плаваючою комою до байтового формату для збереження їх в архівних запам'ятовуючих пристроях).

Описаний підхід до оптимального квантування дозволяє одержати чисельні рішення, найкраще погоджені саме з задачею квантування в цифровому процесорі. При виборі ж оптимального квантування безперервного сигналу для введення в цифровий процесор зручніше трохи видозмінити постановку задачі, щоб одержати її аналітичне рішення, яке можна було б втілити в пристрої перетворення аналогового сигналу в цифровий.

Справа в тім, що існуючі пристрої квантування (АЦП) звичайно здійснюють рівномірне квантування сигналів, при якому границі інтервалів квантування розміщуються рівномірно в заданому діапазоні значень сигналу, а представники рівнів квантування розташовуються посередині між цими границями. При відновленні безперервного сигналу з квантованого, також звичайно використовують цифро-аналогові перетворювачі з рівномірно квантованим вхідним сигналом.

Використовуючи такі пристрої, оптимальне (нерівномірне в загальному випадку) квантування можна забезпечити, якщо перед квантуванням сигнал піддати відповідним чином обраному нелінійному перетворенню (попередньому викривленню) (рис.1.11,а). При відновленні безперервного сигналу сигнал на виході пристрою, що відновлює, з рівномірним квантуванням необхідно піддати відповідній нелінійній корекції (рис.1.11,б).

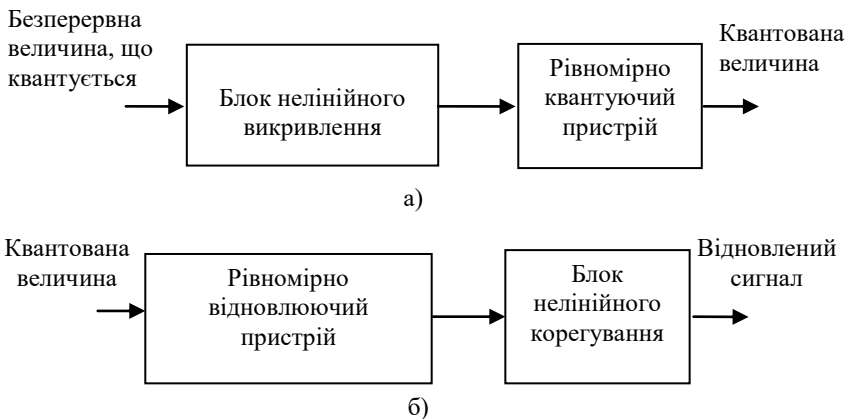


Рис.1.11. Схеми оптимального квантування - (а) і відновлення - (б) з нелінійним попереднім викривленням і корекцією

При відновленні квантованих зображень можуть спостерігатися наступні викривлення. Якщо рівнів квантування не достатньо, на відтвореному зображенні замість плавних переходів напівтонів будуть спостерігатися скачкоподібні переходи. Межі ланок сусідніх напівтонів будуть помітними (рис.1.12). Ці межі називаються *хвибними контурами* [8]. Одночасно об'єкти на зображенні, які мали *слабкий контраст* (невелику різницю напівтонів фону і об'єкту) взагалі не будуть спостерігатися на відновленому після квантування зображенні (будуть втрачені).

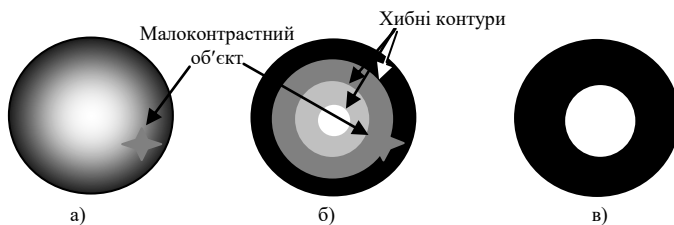


Рис.1.12. Спотворення відновлених після квантування зображень при недостатньому числі рівнів квантування: а) безперервне зображення; б) відновлене зображення після квантування на 4 рівні; в) відновлене зображення після квантування на 2 рівня

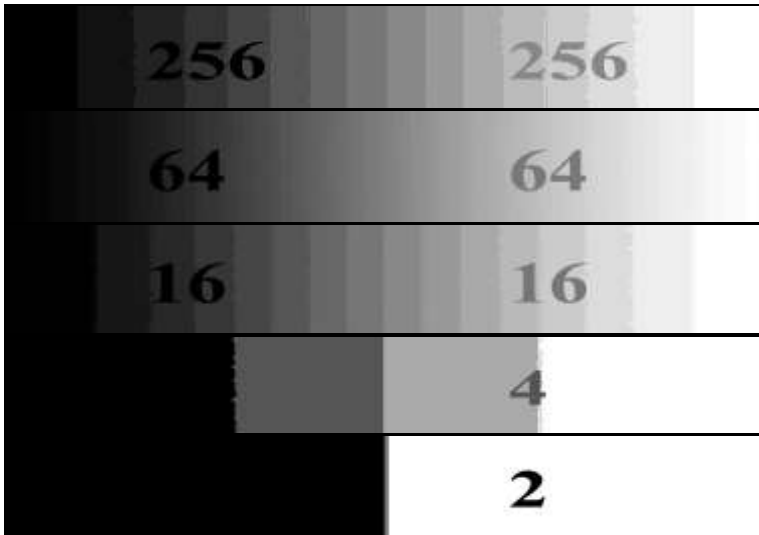


Рис.1.13. Зображення «Шкала сірого» при різному числі рівнів квантування

Рис.1.13 демонструє передачу напівтонів при різному числі рівнів квантування. Цифри на рисунку показують застосоване число рівнів квантування. Невеликий контраст цифр приводить до втрати їх зображення при малому числі рівнів.

1.2.2. Квантування з урахуванням шуму датчика

При визначенні вимог до способу квантування безперервних оптичних сигналів необхідно враховувати, що реальні датчики безперервного сигналу (фотоплівка, фотопомножувачі, передаючі телевізійні трубки, напівпровідникові світлочутливі датчики та такі інші) мають власні шуми, у результаті чого відсутня абсолютно точна відповідність між сигналом і об'єктом випромінювання.

При розрахунку оптимального нелінійного попереднього викривлення при квантуванні можна вважати, що цей шум, перерахований на вхід рівномірно квантуючого пристрою, складається із шумом квантування. У такий спосіб можна врахувати можливу залежність інтенсивності шуму від рівня сигналу (так, дисперсія шуму фотоелектронних помножувачів пропорційна величині сигналу). Критерій точності квантування при цьому повинний бути сформульований з урахуванням спільної дії шуму датчика і шуму квантування.

Важливою особливістю взаємодії цих двох видів викривлень є рандомізація шуму квантування, руйнування його кореляційних зв'язків із корисним сигналом. У результаті, вимоги до припустимої величини шуму квантування можуть бути трохи знижені. Так, випадковий шум датчика відеосигналу руйнує помилкові контури при грубому квантуванні яскравості зображення, зменшуючи тим самим їхню помітність. При відновленні зображення цей шум віднімається з квантованого сигналу.

Очевидно, що добротина дія випадкового шуму датчика сигналу на шуми квантування позначається тільки до визначеного ступеня. Існують деякі оптимальні співвідношення між цими видами шумів. У більшості випадків випадковий шум датчика повинний мати приблизно ту ж інтенсивність (дисперсію), що і шум квантування. Рекомендується, щоб середньоквадратичне значення випадкового шуму було приблизно в три рази менше ширини інтервалу квантування ,

якщо вважати шум квантування рівномірно розподіленим в інтервалі квантування [8].

1.2.3. Колірні координати

Колірна модель має на увазі метод для визначення кольорів.

Найбільш часто використовуються три колірні моделі: RGB (червоний, зелений, синій) і CMYK (блакитний, пурпурний, жовтий, чорний). HSB (тон, насиченість, яскравість).

Модель RGB будується за принципом сполучення червоного (Red), зеленого (Green) і синього (Blue) кольорів різної яскравості та використовується при виводі зображення на екран монітору. Ці компоненти називаються *первинними адитивними* і дозволяють одержати більшість кольорів видимого спектра, а при додаванні дають білий колір (додаток, рис.Д1).

При обробці кольорових RGB-об'єктів графічна програма привласнює кожному елементу зображення (пікселу) значення інтенсивності, що може змінюватися в межах від 0 (чорний) до 255 (білий). Причому, чим більше значення байта колірної складової, тим яскравіше цей колір. При накладенні однієї складової на іншу яскравість сумарного кольору також збільшується.

Адитивні кольори використовуються в системах висвітлення, слайд-рекордерах (пристроях запису на фотоплівку), відеосистемах і моніторах. У режимі RGB здійснюється сканування зображень, ця ж модель покладена в основу конструкції екрана монітора.

Модель CMYK використовується для підготовки зображень до чотириколірного друку (із застосуванням блакитного, пурпурного, жовтого і чорного кольорів). Ці фарби називаються *тріадними* (чи *субтрактивними*) і в сумі дають чорний колір. Графічний редактор кожному пікселу CMYK-зображення надає значення, що визначає процентний уміст тріадних компонентів. Причому найясніші тони характеризуються їх низьким вмістом, а найбільш темні (тіні) — відповідно більш високими значеннями. Чистому білому кольору відповідають нульові

значення всіх чотирьох складових.

У той час як відтворення кольорів за допомогою моделі RGB залежить від джерела світла, в основі моделі СМΥК лежить здатність друкувальних фарб до *світлопоглинання* (абсорбції). При проходженні білого світла через світлопроникну фарбу частина спектра поглинається. Не поглинений колір відбивається і трапляє назад в око людини.

Як правило, перехід до формату СМΥК виконується на завершальній стадії обробки зображення.

В основі *моделі HSB* лежить сприйняття кольорів людським оком (додаток, рис.Д2). У ній усі кольори визначаються трьома базовими параметрами:

Колірний тон (hue) — це довжина світлової хвилі, яка пройшла через об'єкт чи була відбита від нього. Він займає визначене положення на стандартному колірному колі, для його опису використовується назва кольору, і він характеризується величиною кута в діапазоні 0...360 градусів.

Насиченість (saturation), чи хроматичність — це ступінь чистоти кольору. Насиченість визначає співвідношення сірого кольору і поточного колірному тону; вона виражається у відсотках від 0% (сірий) до 100% (цілком насичений). На стандартному колірному колі насиченість збільшується від центра до його границь.

Яскравість (brightness) характеризує відносну світлоту кольору. Звичайно вона вимірюється у відсотках у діапазоні від 0% (чорний) до 100% (білий).

Модель HSB зручно застосовувати при створенні (малюванні) зображення, а по закінченні роботи зображення можна перетворити в модель RGB чи СМΥК.

Типовим прикладом колірної моделі такого типу є CIE (Commission Internationale de l'Eclairage — Міжнародна комісія з освітленості). Вона заснована на реакції людського ока на RGB і спроектована таким чином, щоб точно представляти сприйняття кольору людиною. Ця модель використовується для того, щоб визначати так звані *апаратно-незалежні кольори*, що можуть

правильно сприйматися та відтворюватися пристроями будь-якого типу: сканерами, моніторами і принтерами.

Моделі такого типу широко застосовуються, тому що вони описують широкий діапазон кольорів.

Поширено наступні моделі: CIE-XYZ, CIE-L*a*b і CIE-LUV.

Кольори CIE-L*a*b* найбільш сумісні з кольорами, сприйнятими людським оком. Крім того, у цій моделі колірна яскравість (L), колірний тон і насиченість (a,b) можуть розглядатися роздільно і представляються числовими значеннями. У результаті загальний колір зображення можна змінювати без зміни самого зображення чи його яскравості.

Оскільки CIE-L*a*b* не залежить від пристрою, то при зміні RGB на CMYK чи CMYK на RGB програмне забезпечення вимагає, щоб зміна спочатку була оброблена через колірну модель CIE-L*a*b*.

1.2.4. Колірні охоплення

Колірним охопленням називають усе різноманіття кольорів, що може бути відтворено монітором чи вивідним пристроєм. Видимий спектр електромагнітного випромінювання містить у собі величезну безліч кольорів, що здатне розрізнати людське око. Колірне охоплення будь-якого пристрою є лише підмножиною видимого спектра. Серед усіх колірних моделей найбільш широке колірне охоплення має модель RGB. Колірне охоплення моделі RGB містить у собі підмножину кольорів, що можуть бути відтворені на екрані телевізора чи монітора. Деякі кольори, такі як “чистий блакитний” чи “чистий жовтий”, не можуть бути точно відтворені на екрані.

Самим вузьким колірним охопленням характеризується модель CMYK вона відтворює тільки ті кольори, що можуть бути надруковані за допомогою тріадних фарб (рис.Д3 в додатку).

1.3. СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Зображення у машинному поданні - двовимірний масив $N \times M$, де N - його ширина, M - висота. При скануванні звичайно використовують розділення від 72 до 2400 dpi (dots per inch - точок на дюйм). Найбільше часто - 300 dpi. Якщо взяти лист папера 21/29 см. із зображенням і відсканувати його в RGB Truecolor, то нестисненне зображення буде займати ~ 27300000 байтів чи 26 Мбайт.

Аерокосмічні зображення можуть бути подані в набагато більших обсягах. Так смуга огляду датчика МСУ-ЕУ подається 2048 елементами розділення в трьох частинах видимого діапазону світлових хвиль. Кодування в кожному піддіапазоні – 8 біт. Приймаючи кадр квадратним, отримаємо, що зображення кадра буде займати $2048 \times 2048 \times 3 = 12582912$ байт = 12 Мбайт. Зображення, яки можуть бути отримані від КА “Konas”, “LandSat” можуть бути розміром до декількох сотен мегабайтів.

У даному розділі розглянемо методи стиснення. Вони застосовуються для будь-яких масивів даних, а не тільки для зображень. Будемо розглядати статичне стиснення, тобто масив даних для стиснення цілком сформований. Методи статичного стиснення часто підрозділяють на послідовне і ентропійне. Послідовний стиснення використовує в роботі наявність повторюваних ділянок даних. Ентропійне використовується з метою скорочення до мінімуму надмірності інформації. Послідовне застосування цих методів дозволяє одержати гарний результат.

1.3.1. Послідовне стиснення

Найбільше часто застосовують метод RLE, суть якого розглянемо на зображенні. Майже в будь-якому зображенні зустрічаються послідовності однакових байтів. Наприклад, у ділянці зображення, у якому намальована частина неба, йдуть підряд кілька значень блакитного кольору. Для ділянки виду:

«рідких» байтів ми «стискаємо» один байт у три. Перевага - простота реалізації, велика швидкість декодування.

Алгоритм LZSS - створює при роботі вектори виду (прапор, С) і (прапор, А, В). Якщо бітовий прапор=0, то наступний за ним С трактується як одиничний байт і видається в масив, що декодується. Інакше, коли прапор=1, то в масив, що декодується, видається ланцюжок довжиною В по зсуві А. LZSS кодує набагато більш ефективно, у порівнянні з LZ77, тому що використовує бітові прапори і мало програє при кодуванні поодиноких символів. При кодуванні будується *словник ланцюжків*, що зустрічаються, у виді *двійкового упорядкованого дерева*. Швидкість і простота алгоритму декодування масиву в LZSS також висока.

Алгоритм LZMX (спрощений LZM) - даний алгоритм призначений для швидкісного кодування і по ефективності уступає LZSS, помітно обганяючи його по швидкості роботи. При роботі кодер LZMX формує кілька векторів виду:

1. (0, А, нестиснений потік) - де 00 - двобітовий прапор ознаки даного блока, А (7 біт з діапазоном у [1..127]) - довжина наступного за ним нестисненого потоку в байтах..
2. (0, 0000000, А, В) - де, А - кількість повторень байта В, тобто код RLE.
3. (1, А, В) - де А(7 біт з діапазоном у [1..127]) - довжина ланцюжка, що декодується, В - її зсув.

Декодування проводиться в наступний спосіб:

читається біт - прапор,

якщо він є 0 і наступні за ним 7 бітів також нуль, читаємо наступні два байти - А і В і копіюємо у вихідний масив байт В А разів;

якщо при прапорі = 0 наступні 7 бітів (А) більше нуля, то у вихідний масив копіюємо А байтів наступних за А, тобто А байтів нестисненого потоку.

І, нарешті, якщо прапор встановлений в одиницю, то читаємо А і наступний за ним байт В і копіюємо у вихідний масив ланцюжок довжиною А байт зі зсуву В.

Існують і інші модифікації алгоритму LZ (LZW, LZS, LZ78). Загальна властивість LZ - висока швидкість декодування. Загальна проблема - ефективність пошуку ланцюжків, що кодуються. Модифікація даного алгоритму використовується в графічному форматі GIF.

1.3.3. Ентропійне стиснення

Ентропійне стиснення на відміну від послідовного як інформацію про вхідний масив використовує тільки *частоти зустрічальності в ньому окремих байтів*. Цю інформацію він використовує як при кодуванні, так і при декодуванні масиву. Її представляють у виді 256 - компонентного вектора, значення елементів якого $a(i)$ містять інформацію скільки разів байт зі значенням i зустрічається у вихідному масиві. Даний вектор займає невеликий простір і майже не впливає на ступінь компресії. Багато методів ентропійного кодування видозмінюють даний вектор відповідно до використовуваного алгоритму. Розглянемо два найбільш часто використовувані методи.

Метод Хаффмана. Даний метод скорочує надмірність масиву, створюючи при кодуванні перемінну бітову довжину його елементів. Основний принцип такий: байту, що найбільш часто зустрічається, призначають найменшу довжину; байту, що зустрічається найменшу кількість разів, призначають найбільшу довжину. Розглянемо найпростіший приклад кодування методом Хаффмана - *спосіб кінцевого нуля*. Будь-який елемент кодується ланцюжком бітів, що складається з одних одиниць і закінчується нулем. Таким чином, найчастіший елемент закодуємо одним бітом - 0, що є наступним за ним по частоті як 10, далі - 110, 1110, 11110 і т.д. Процедура декодування також очевидна.

Розглянемо вищесказане на прикладі. Нехай надана частина зображення довжиною 80 бітів - десять кольорів і кожний з них закодований одним байтом (індексоване 256 кольорами зображення): ЧЗСГЧСЧБСЧ (де Ч – червоний, З - зелений і т.д.).

Закодуємо його. Побудуємо таблицю частоти зустрічальності кольору з відповідним йому кодом (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Частота зустрічальності кольору з відповідним йому кодом

Колір	Частота	Код
Ч	4	0
З	1	110
С	3	10
Г	1	1110
Б	1	11110

Таким чином, ми закодували вихідний масив як

0 110 10 1110 0 10 0 11110 10 0.

Разом: довжина вихідного повідомлення - 22 біта. Ступінь компресії ~4.

Метод арифметичного кодування. Даний метод з'явився пізніше. Його принцип - кодування вихідного масиву *одним числом*. Часто вхідний масив розбивають на однакові невеликі ділянки і кодують їх окремо, одержуючи в результаті послідовність кодових чисел. Закодуємо попередній приклад числом, що лежить в одиничному діапазоні.

Схема кодування наступна.

Будуємо таблицю частот, кожному елементу таблиці ставимо у відповідність *діапазон*, рівний його частоті, поділений на довжину вхідного масиву (у прикладі 10). Установлюємо верхню границю ВГ у 1, нижню НГ у 0. Далі N раз виконуємо наступну послідовність дій (де N - довжина ділянки чи всього масиву, що кодуються):

1. Читаємо з масиву черговий символ.
2. Установка поточного інтервалу. Інтервал $I = ВГ - НГ$.
3. $ВГ = НГ + I * ВГ$ символу (беремо з таблиці).
4. $НГ = НГ + I * НГ$ символу (беремо з таблиці).

Розглянемо на прикладі: ЧЗСГЧСЧБСЧ. Побудуємо необхідну таблицю (табл.1.2).

Таблиця 1.2

Частота зустрічальності кольору з відповідними кодами границь

Колір	Частота	Нижня границя НГ	Верхня границя ВГ
-------	---------	------------------	-------------------

Ч	4	0	0.4
З	1	0.4	0.5
С	3	0.5	0.8
Г	1	0.8	0.9
Б	1	0.9	1

Тепер, власне, сама процедура кодування (табл.1.3).

Таблиця 1.3

Процедура арифметичного кодування

Крок	Символ	НГ	ВГ	Інтервал
0		0	1	1
1	Ч	0	0.4	0.4
2	З	0.16	0.2	0.04
3	С	0.18	0.192	0.012
4	Г	0.1896	0.1908	0.0012
5	Ч	0.1896	0.19008	0.00048
6	С	0.18984	0.189984	0.000144
7	Ч	0.18984	0.1898976	0.0000576
8	Б	0.18989184	0.1898976	0.00000576
9	С	0.18989472	0.189896448	0.000001728
10	Ч	0.18989472	0.1898954112	0.0000006912

Таким чином, будь-яке число в діапазоні [0.18989472 .. 0.1898954112] однозначно кодує вихідний масив. У двійковому дробовому виді як 0.XXXXXXXXXX... Для збереження такого числа вистачить n бітів (розмірність XXXXXXXXXXX...), де n - найближче ціле, що задовольняє нерівності:

$$2^n > (\text{Інтервал})^{-1} = 0.0000006912^{-1}.$$

Шукане n дорівнює 21. Тобто ми можемо закодувати вихідний масив 21 бітом. У даному прикладі - 00110000100111011111. Процедура декодування зворотна і складається у виконанні n раз наступного (табл. 1.4):

1. Шукаємо в таблиці інтервал, у який попадає наше число \mathcal{C} , і видаємо символ, який належить до цього інтервалу, у масив, що декодується.

2. Інтервал $I = \text{ВГ}$ символу - НГ символу (обоє значення - з таблиці).

3. $\mathcal{C} = (\mathcal{C} - \text{НГ}) / I$.

Таблиця 1.4

Процедура декодування

Крок	Число	Символ	НГ	ВГ	Інтервал
1	0.18989472	Ч	0	0.4	0.4
2	0.4747368	З	0.4	0.5	0.1
3	0.747368	С	0.5	0.8	0.3
4	0.82456	Г	0.8	0.9	0.1
5	0.2456	Ч	0	0.4	0.4
6	0.614	С	0.5	0.8	0.3
7	0.38	Ч	0	0.4	0.4
8	0.95	Б	0.9	1	0.1
9	0.5	З	0.5	0.8	0.3
10	0	Ч	0	0.4	0.4

У даному прикладі арифметичний кодер «обігнав» метод Хаффмана на 1 біт. На відміну від методу Хаффмана трудомісткість алгоритму значна. У чому ж тоді «корисність» алгоритму?

Розглянемо послідовність КККККККС. При кодуванні методом Хаффмана одержимо вихідну послідовність довжиною в 9 бітів (можна й у 8, тому що масив складається з 2 різних байтів). При арифметичному кодуванні дану послідовність можна закодувати числом 0.4375 чи в двійковому виді як 0111, що займає 4 біти. Тобто при арифметичному кодуванні можливо одержувати щільність кодування менше біта на символ. Ця властивість виявляється, коли у вхідному масиві частоти деяких символів значно вище інших.

1.4. ФОРМАТИ ФАЙЛІВ ЗОБРАЖЕНЬ

Формати файлів визначають тип інформації, що зберігається у файлі, сумісність цього файла з різними програмами і можливості обміну даними з іншими користувачами. Вибір найкращого формату для збереження файла після сканування залежить від декількох факторів — програми, застосовуваної для наступної обробки зображення, вільного місця на диску, необхідності обміну даними з іншими користувачами і способу кінцевого виводу даних.

Багато програм обробки зображень — Adobe Photoshop, ENVI, Erdas Imagine — дозволяють зберігати зображення в *оригінальному форматі*, що розпізнається тільки самими цими програмами. Оригінальні формати файлів зручні, тому що файли мають менший розмір і є можливість зберігати складні типи даних. Наприклад, у Photoshop — це растрові шари, маски, векторні шари і канали. У ENVI оригінальним форматом є формат IMG. У форматі IMG зберігається інформація геоприв'язки, смуги спектральних каналів, векторна анотаційна інформація.

Часто зручніше зберігати зображення в оригінальному форматі, особливо якщо виведення зображення буде здійснюватися безпосередньо з цієї програми. Якщо потім виникне необхідність компонувати зображення сторінки, перенести його в інше середовище чи передати замовнику, то завжди можна перезаписати його у форматі, зручному для наступного користувача.

Зберігайте файл у *стандартному форматі*, що читається більшістю програм: для виводу на друк зручні TIFF чи EPS; для обробки — PICT і BMP; для збереження — TIFF чи PICT.

Якщо файл напевно буде передаватися з однієї програми в іншу і є можливість вибору між різними сумісними форматами, то зберігайте файл у форматі, що містить найбільш повну інформацію про зображення.

Якщо зображення використовується як для друку, так і для обробки, краще створити принаймні дві копії файла — одну у форматі TIFF чи EPS для друку, а іншу у форматі, найбільш придатному для середовища обробки.

1.4.1. Загальна структура файлів растрових зображень

Растрові файли, відрізняючись один від одного деталями, мають загальну структуру. Тут будуть розглянуті компоненти типового растрового файла. Розглянемо загальну структуру растрових файлів.

Растрові файли містять заголовок, растрові дані й іншу інформацію, у тому числі і про колірну палітру.

Основними компонентами простого растрового файла є:

- заголовок;
- растрові дані.

Програмову інформацію, що не міститься в заголовку, розміщують у кінцівці файла. Якщо застосовується палітра (набір кольорів, присутніх у зображенні), то її можна зберегти в заголовку файла, але зручніше розмістити її в середині файла, після заголовка. Крім того, палітру можна зберігати після даних зображення на місці кінцівки файлу чи безпосередньо в її складі. Таблиці рядків розгорнення і таблиці колірної корекції можуть розташовуватися після заголовка як перед даними зображення, так і після них:

- заголовок;
- палітра;
- (таблиця рядків розгорнення);
- (таблиця колірної корекції);
- растрові дані;
- (таблиця рядків розгорнення);
- (таблиця колірної корекції);
- кінцівка.

Тепер розглянемо компоненти растрового файлу більш докладно.

Ідентифікатор файлу
Версія файлу
Кількість рядків у зображенні
Кількість пікселів у рядку
Кількість бітів у пікселі
Кількість колірних площин
Тип стиснення
X-координата початку зображення
У-координата початку зображення
Текстовий опис

Рис. 1.14. Приклад заголовка файла

Заголовок — це розділ двійкових чи символьних даних. Звичайно він розташовується на початку файлу і зберігає загальну інформацію про растрові дані, що у цьому файлі містяться. Усі растрові файли мають заголовки, структура і вміст яких визначаються конкретним форматом. Звичайно заголовок растрового файлу складається з фіксованих полів. Жодне з цих полів не є обов'язковим, але визначений набір полів типовий для більшості популярних на сьогоднішній день форматів. На рис.1.14 приведена інформація, що звичайно міститься в заголовку.

Звичайно заголовок починається з визначеного унікального ідентифікуючого значення, названого *ідентифікатор формату файлу*. Ідентифікатор дозволяє програмі визначити формат графічного файлу, з яким вона працює.

Ідентифікатори форматів часто називають магічними числами, припускаючи під цим, що вони вибиралися розроблювачем формату довільно. Як ідентифікатор може використовуватися послідовність символів ASCII (наприклад, VM чи 01D), або дво- чи чотирибайтове слово (наприклад, 4242H чи 596AA695B), або довільна послідовність даних, зрозуміла тільки розроблювачу формату. Передбачається, що ідентифікатор повинний бути унікальним навіть для форматів, використовуваних на різних платформах, але ця умова далеко не завжди дотримується. Як правило, якщо значення, прочитане з визначеного місця у файлі, збігається з очікуваним ідентифікаційним значенням, то програма, що читає заголовок файлу, припускає, що їй відомий даний формат.

Після ідентифікатора в заголовку файлу звичайно розташовується поле *версії файлу*. Природно, версії того самого формату можуть мати різні характеристики (розмір заголовка, підтримувані дані і кольори). Тому після ідентифікації формату програма звичайно перевіряє номер версії, щоб визначити, чи зможе вона обробити дані, що містяться в цьому файлі.

Після полів ідентифікатора і версії файла впливають кілька полів, що описують *саме зображення*. Як правило, растри фізично чи логічно організовані в рядки пікселів. Поле *кількоісті рядків* у растровому зображенні (також назване довжиною зображення, висотою зображення чи кількістю рядків розгорнення) визначає кількість рядків у реальних растрових даних. *Кількість пікселів у рядку* (також назване шириною зображення чи шириною рядка розгорнення) визначає кількість пікселів, збережених у кожному рядку.

Кількість бітів на піксел визначає розмір даних, необхідних для опису кожного пікселя в колірній площині. Іноді в цьому полі в дійсності зберігається інформація про кількість байтів на піксель. Це поле характеризує *піксельну глибину*. Якщо растрові дані були записані у виді послідовності площин, то поле кількості колірних площин визначає кількість використовуваних колірних площин. Найчастіше його значення дорівнює одиниці, що свідчить про тенденцію збереження растрів в одноплощинному форматі. У той же час багатоплощинні формати продовжують застосовуватися для підтримки спеціального обладнання й альтернативних колірних моделей.

Якщо з метою зменшення обсягу файла формат підтримує будь-який вид кодування, то в заголовок повинне бути включене поле *«тип стиснення»*. Деякі формати підтримують кілька алгоритмів стиснення, включаючи неопрацьовані і нестиснені дані. Часто модифікації форматів — це головним чином доповнені чи змінені уже використовувані схеми стиснення.

Поля *«x-координата початку зображення»* й *«у-координата початку зображення»* визначають координати точки початку зображення на пристрої виводу. Найчастіше вони мають значення (0,0), що дозволяє сполучати початок зображення з точкою відліку системи координат пристрою. Якщо ж застосовуються інші координати, то при візуалізації зображення почне відтворюватися з іншої точки.

Більшість растрових форматів здавна спроектовані для різного роду пристроїв виводу. Растровий формат можна розглядати як модель реального чи віртуального пристрою, що

має так звану *поверхню відображення*. Така поверхня містить неявну точку відліку, щодо якої визначається розміщення початкової точки зображення, і неявну орієнтацію, що задає напрямок креслення ліній при його відтворенні. Різні формати і різні пристрої відображення по-різному визначають позицію точки відліку й орієнтацію. У багатьох випадках точку відліку системи координат пристрою поміщають у лівий верхній кут поверхні відображення, хоча є варіанти, коли ця точка знаходиться в центрі чи в лівому нижньому куті. Значно рідше точка відліку розміщується в правому верхньому або в правому нижньому куті поверхні відображення.

Координатні моделі, у яких точка початку координат розміщується в лівому верхньому куті поверхні відображення, історично склалися як засіб підтримки відтворюючого обладнання. Люди, що володіють математичними і природно-науковими знаннями, віддають перевагу застосуванню координатних моделей, у яких початок координат знаходиться в лівому нижньому куті чи в центрі поверхні відображення. Деякі формати вимагають явного завдання точки відліку й орієнтації.

Іноді в заголовок включають поле текстового опису растра. Це поле являє собою коментар, що містить довільні символічні дані, наприклад назву зображення, ім'я файла, ім'я автора зображення і/чи ім'я програми, використаної для його створення. Щоб забезпечити можливість переносити інформацію заголовка на інші платформи, це поле містить тільки 7-бітові дані у форматі ASCII.

Реальні *растрові дані* звичайно займають більшу частину растрового файла. У більшості форматів растрових файлів растрові дані розташовуються безпосередньо після заголовка, але можуть розміщатися й у будь-якому іншому місці файла. Разом з ними можуть зберігатися палітра й інші дані. У такому випадку в заголовку в полі зсуву даних зображення (або в документації) указується місце розташування початку даних зображення у файлі. Структура растрових даних у більшості форматів досить проста. Як згадувалося раніше, растрові дані складаються з піксельних значень. На пристрої виводу пікселі

звичайно виводяться у виді рядків розгорнення по всій ширині поверхні відображення, і цей факт, як правило, визначає порядок розташування даних у файлі.

Рядки розгорнення поєднують піксельні дані в двовимірну сітку, що дозволяє нам розглядати місце розташування кожного піксела растра в заданих логічних координатах. Растр може бути представлений і у виді послідовності значень, що логічно відображають у файлі растрові дані, які відповідають зображенню на поверхні відображення пристрою виводу.

Записані у файл растрові дані звичайно організовані одним із двох способів: у виді рядків розгорнення чи у виді площин.

Першим і найпростішим є спосіб організації піксельних значень у виді *рядків розгорнення*. Якщо розглянути будь-яке зображення, побудоване з рядків розгорнення, то піксельні дані у файлі будуть являти собою послідовності наборів значень, де кожен набір буде відповідати рядку зображення. Кілька рядків представляються декількома наборами, записаними у файлі від початку до кінця. Цей метод є загальним при збереженні даних зображення, організованих у рядки. Організацію піксельних даних у виді рядків розгорнення ілюструє рис.1.15.

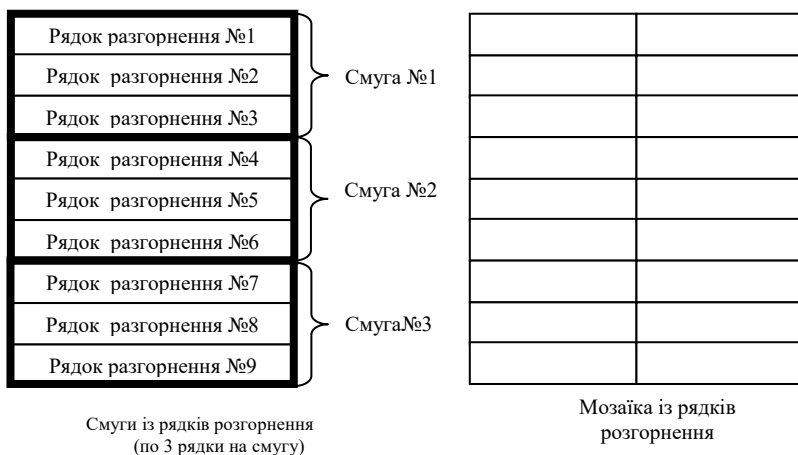


Рис. 1.15. Організація піксельних даних у виді рядків розгорнення

Другим способом організації піксельних значень є поділ даних зображення на дві і більше площин. Файли, у яких растрові дані організовані таким чином, називаються *площинними файлами*. Для зображень, що використовують багато кольорів, будемо застосовувати термін *складене зображення* (тобто не монохромне, не напівтонове і не одноколірне). Виходячи з цього визначення, більшість звичайних кольорових зображень є складеними.

Складене зображення може бути представлено трьома блоками растрових даних, причому кожен блок буде містити одну з кольірних складових, використовуваних у даному зображенні. Конструювання кожного блока подібно фотографічному процесу поділу, що використовує фільтри для розкладання кольорової фотографії на набір кольірних складових (звичайно трьох).

Зображення-оригінал може бути відновлено за допомогою об'єднання цих трьох складових. У кожному блоці поєднуються рядки, розташовані послідовно (як і в найпростішому методі збереження, розглянутому вище), але в цьому випадку для відновлення всього зображення буде потрібно більше одного блока. Блоки можуть бути збережені у файлі фізично послідовно чи роздільно. Організація піксельних даних у виді кольірних площин ілюструється рис.1.16.



Рис.1.16. Організація піксельних даних у виді кольорних площин

Піксельні дані, що представляють зображення у послідовному запису (в файлі), можуть бути збережені трьома способами: у виді безупинних даних, смуг чи фрагментів.

Метод організації растрових даних, коли всі дані зображення записуються у файл *безупинно*, рядок за рядком, є найпростішим. При відтворенні цих даних рядки читаються з файла в тому порядку, у якому вони були записані. Дані, організовані за такою схемою, подібні двомірному масиву. Їх можна індексувати у файлі, знаючи ширину рядка в пікселях, формат збереження і розмір піксельного значення. Дані, збережені у виді безупинних рядків розгорнення, можуть бути швидко (великими порціями) прочитані і порівняно легко зібрані в пам'яті.

У файлах, організованих другим способом, зображення зберігаються у виді *смуг*, кожна з яких містить безупинно

записані рядки. Загальне зображення представляється декількома смугами, кожна з яких може зберігатися у файлі окремо від інших. Смуги розділяють зображення на кілька сегментів, кожний з яких завжди має ту ж ширину, що й оригінальне зображення. Смуги полегшують керування даними зображення на комп'ютерах з обмеженою пам'яттю чи при обробці великих зображень.

Третім способом організації растрових даних є їхня фрагментація. *Фрагменти* подібні смугам, але кожен фрагмент відповідає прямокутній області зображення. Піксельні дані, які відповідають одному фрагменту, мають обсяг від 4 до 64 Кб, а їхня висота і ширина кратні 16. Це дозволяє підвищити ефективність буферизації і декодування даних зображення. Якщо дані зображення організовані у виді фрагментів, то звичайно усі вони мають однаковий розмір, фрагментується все зображення, фрагменти не перекриваються і стискаються з застосуванням однієї схеми.

1.4.2. Особливості зберігання космічних знімків

Для того щоб правильно відтворити зображення по цифрових записах, що поставляються пунктами прийому інформації, необхідно знати формат запису (структуру даних). Космічні знімки можуть мати декілька растрових площин. У кожній площині зберігається масив растрових даних, який був отриманий датчиком одного частотного діапазону – дані однієї смуги (або зони). Використовують три основні способи подання растрових даних [7]:

- 1) послідовність смуг (Band Sequential, BSQ);
- 2) смуги, що чергуються по рядках (Band Interleaved by Line, BIL);
- 3) смуги, що чергуються по пікселях (Band Interleaved by Pixel, BIP).

В BSQ-форматі кожен зональний знімок утримується в окремому файлі (рис. 1.17).

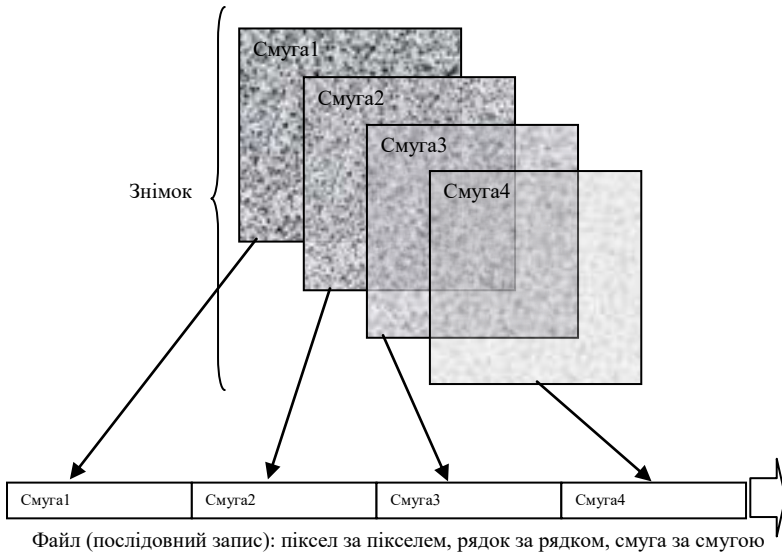


Рис.1.17. Формат зберігання даних у вигляді послідовності смуг (BSQ)

Це зручно, коли немає необхідності працювати відразу з усіма частотними смугами спектру випромінювань (зонами), одну зону легко зчитувати й візуалізувати, зональні знімки можна завантажувати в будь-якому порядку за бажанням.

В BIL-форматі зональні дані записуються в один файл рядок за рядком, при цьому зони чергуються по рядках: 1 рядок 1 зони, 1 рядок 2 зони,... 2 рядок 1 зони, 2 рядок 2 зони,... і т.д. (рис. 1.18). Такий запис зручний, коли виконується аналіз одночасно всіх зон.

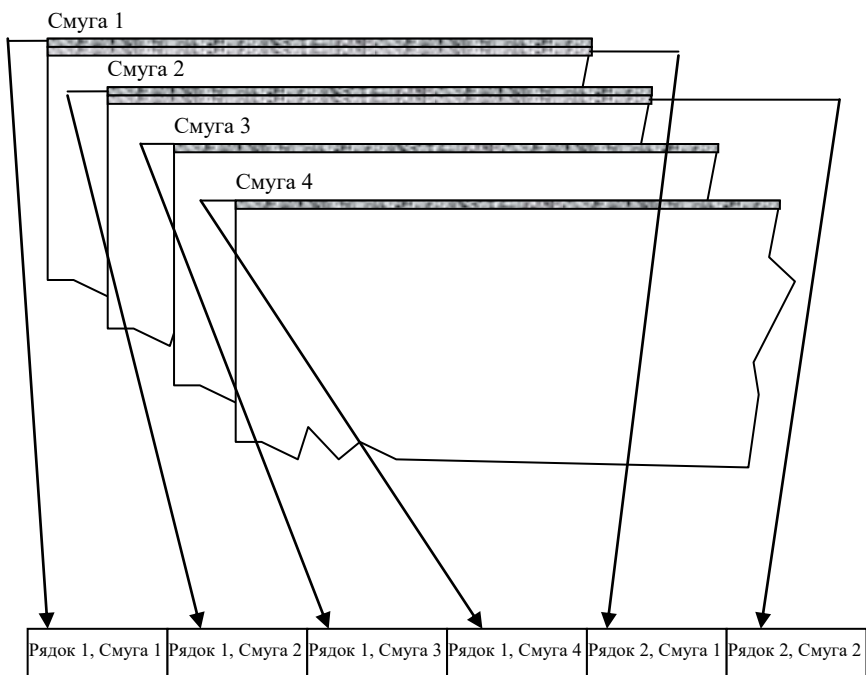


Рис. 1.18. Формат зберігання даних у вигляді смуг, що чергуються по рядках (BIL)

В ВР-форматі зональні значення яскравості кожного пікселя зберігаються послідовно (рис. 1.19). Такий формат називають сполученим. Він зручний при виконанні попиксельної обробки багатозонального знімка, наприклад, в алгоритмах класифікації.

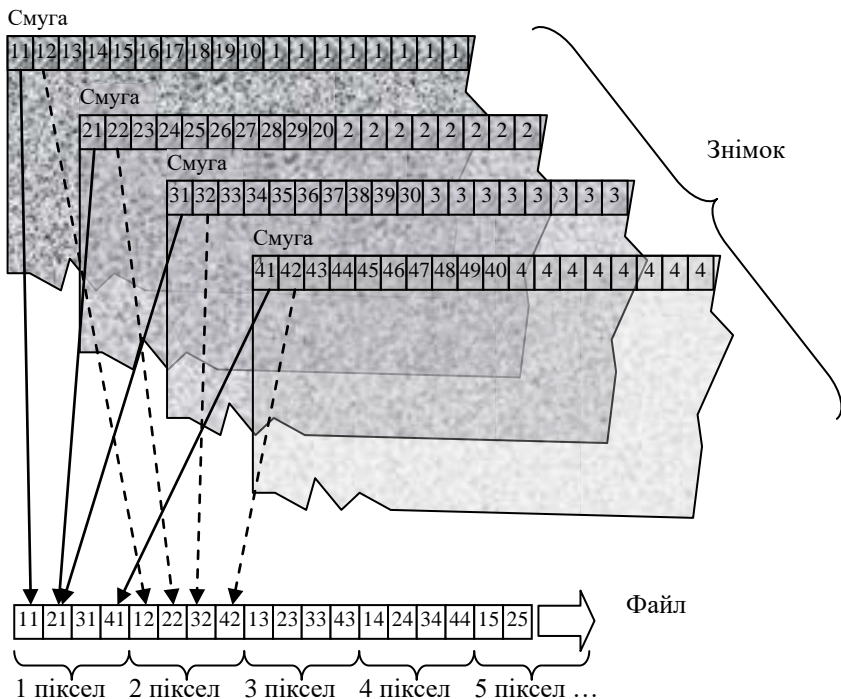


Рис. 1.19. Формат зберігання даних у вигляді смуг, що чергуються по пікселях (VIP)

Файли зображень звичайно супроводжуються додатковою інформацією, що стосується знімків, наприклад:

- опис файла даних (формат, число рядків і стовпців, розрізнення і т.п.);

- статистичні дані (наприклад, характеристики розподілу яскравості - мінімальне, максимальне й середнє значення, дисперсія);

- дані про картографічну проекцію.

Ця додаткова інформація міститься в заголовку файла зображення (як, наприклад, у файлах пакета Erdas Imagine) або в окремому текстовому файлі з ім'ям, що збігається з ім'ям файла зображення (як у пакеті ENVI).

1.4.3. Характеристики форматів представлення зображень

Нижче приводяться характеристики форматів представлення зображень, які найчастіше застосовуються в практиці обробки аерокосмічних зображень. Формати, які використовуються в інших застосуваннях та мають алгоритми стиснення з втратами (JPG, GIF та такі інші), в книзі не розглядаються за браком місця.

Формат TIFF (Tagged Image File Format) був розроблений спеціально для використання в програмах, зв'язаних з компонуванням зображення. Він підтримується всіма основними графічними пакетами і пакетами редагування зображень і читається на багатьох платформах. Існує кілька варіантів TIFF, але більшість програм підтримують останню версію 6.0. У файлі формату TIFF можна зберігати чорно-білі і напівтонові зображення, кольорові зображення систем RGB, CMYK і CIE-LAB (але не двоколірні).

Формат TIFF має кілька переваг. Він дозволяє:

1. Зберегти інформацію про альфа-канал у підтримуючих його програмах.
2. Стиснути файл без втрат інформації, використовуючи метод LZW. Можна стиснути дані тільки до 2-х разів.
3. Зберегти файл для використання на конкретній платформі (версії формату TIFF для комп'ютерів PC і Macintosh розміщують дані в різному порядку).

Більшість основних програм, що працюють з компонуванням зображення, читають файли формату TIFF, створені на будь-якій платформі. У сумнівних випадках зберігайте файл у форматі TIFF для тієї платформи, на якій працює ваша програма. При збереженні зображення системи CMYK у форматі TIFF воно вважається уже кольороподілений (для друку). Зараз більшість основних програм для компонування сторінки підтримують автоматичний поділ кольорів в імпортованих зображеннях формату CMYK TIFF. Однак, перш ніж переводити зображення з формату RGB TIFF у CMYK, переконайтеся, що ви правильно установили інформацію про поділ кольорів(UCR, GCR і

генерацію чорного), що відповідає умовам друку вашої роботи. У протилежному випадку можливе псування кольорів при друці.

В практиці обробки космічних знімків широко застосовується розширення формату TIFF – GEOTIFF. Тегі – описувачі блоків даних у форматі GEOTIFF містять додаткову інформацію про датчик, за допомогою якого був отриманий знімок, та інформацію геодезичного референціювання знімка.

Ще один стандартний формат, застосовуваний на комп'ютерах різних платформ, — це EPS (Encapsulated PostScript). Як і TIFF, формат EPS добре підходить для друку.

Попередження: На відміну від векторних зображень формату EPS, растрові зображення цього формату неможливо збільшувати до нескінченності без утрати якості.

Доцільно зберігати файл у форматі EPS, якщо необхідно зберегти наступну інформацію:

1. Криві перетворення кольорів.
2. Альфа-канали (можливо й у TIFF).
3. Кольороділення (можливо й у TIFF).
4. Лінії вирізу.
5. Інформацію про спеціальне напівтонове маскування і тонову криву, що відноситься до конкретного зображення.

Формат PICT, застосовуваний по більшій частині в програмах для комп'ютерів Macintosh, є стандартним для програм цифрової обробки (включаючи Microsoft PowerPoint). Доцільно збереження зображення в цьому форматі, якщо передбачається експортувати їх в одну з програм обробки чи виводити будь-куди, крім принтера. Файли у форматі PICT можуть містити як векторні, так і растрові дані. Формат підтримує чорно-білий, напівтоновий і кольоровий режими системи RGB (але не систему кольорів CMYK чи двоколірні зображення). У деяких програмах є можливість стискання файлів у форматі PICT за допомогою методу JPEG.

Формат Windows Bitmap (BMP) розроблявся як сумісний із усіма програмами Windows. Для програм в операційній системі OS/2 є власна версія BMP. Файли формату BMP розпізнаються

багатьма програмами цифрової обробки на платформах PC і Macintosh. У форматі BMP можна зберігати чорно-білі, напівтонові, індексні кольорові і кольорові зображення системи RGB (але не двоколірні чи кольорові зображення системи CMYK).

1.4.4. Формати підтримувані ENVI

- 1) Програмний комплекс обробки аерокосмічних зображень ENVI автоматично ідентифікує і виконує операції введення-виводу для наступних груп растрових файлів [7]:
 - 2) файли власного формату (.img);
 - 3) файли стандартних графічних форматів: ASCII, BMP, HDF, JPEG, PDS, PICT, SRF, TIFF/GeoTIFF;
 - 4) файли формату відомих програмних засобів: ArcView Raster(.bil), ERDAS-7.5(.lan), ERDAS-8.x(.img), ER Mapper, PCI(.pix)
 - 5) файли форматів відомих супутникових систем:
 - Landsat (Fast, GeoTIFF, HDF, NLAPS, MRLC, ACRES CCRS, ESA, CEOS),
 - Spot (SPOT, GeoSPOT, ACRES SPOT, Vegetation),
 - IKONOS (GeoTIFF, NITF),
 - IRS (Fast),
 - AVHRR (KLM/рівень 1b, SHARP),
 - SeaWiFS (HDF, CEOS, ATSR, DMSP (NOAA)),
 - TIMS (MASTER),
 - Radar (RADARSAT, ERS, JERS, TOPSAR).

Щоб відкрити файли внутрішнього формату ENVI, необхідно вибрати в головному меню “Файл > Відкрити файл даних ENVI” [7].

Щоб відкрити файли зовнішніх форматів, включаючи формати обраних датчиків, формати цифрових моделей рельєфу,

оброблених іншими пакетами зображень і універсальні формати зображень, необхідно вибрати в головному меню “Файл > Відкрити зовнішній файл”. На рис.1.20. приведені меню команд відкриття зовнішніх растрових файлів.

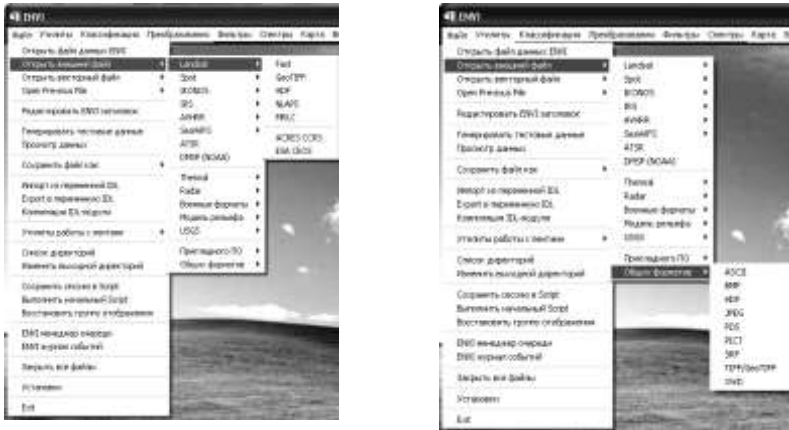


Рис.1.20. меню команд відкриття зовнішніх растрових файлів

Обраний файл з'являється в “списку доступних смуг даних” (Available Bands List) (ABL); на рисунку 1.21 приведені приклади списку доступних смуг даних і завантаження чорно-білих (ліворуч) і кольорових зображень (праворуч) для відображення на дисплеї.

ABL використовується для доступу до файлів і конкретних смуг даних кожного файла зображення. За допомогою ABL можна одержати зображення як напівтонове (Gray Scale) чи кольорове (RGB Color), відкрити його в нових переглядових вікнах (Display#), відкрити нові файли (File...), закрити файли, переглянути компоненти метафайла й інформацію про смуги.

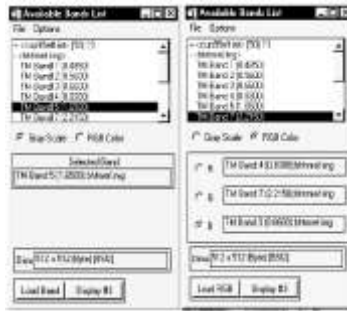


Рис.1.21. Вікно списку доступних смуг даних

Якщо файл відкривається вперше протягом сеансу зв'язку, ENVI автоматично розміщує в ABL ім'я файла з усіма перерахованими смугами.

Після завантаження смуги (чи смуг даних) (натисканням кнопки "Load ***") на екрані відображається зображення в декількох вікнах різного масштабу (Image, Scroll, Zoom).

За замовчуванням ENVI відображає зображення в трьох вікнах одночасно: Scroll - повне зображення, Image – квадратна область зображення, позначена у вікні Scroll, Zoom - квадратна область зображення, позначена у вікні Image (рис.1.22).

Вікно Main Image відображає частину зображення в повному розділенні. Змінити розмір вікна Main Image можна динамічно, розтягнувши до потрібного розміру, чи змінивши установки системи.

Вікно Scroll - маленьке вікно виводу зображення на екран, що з'являється тільки в тому випадку, коли розмір зображення більше, ніж може бути відображене в основному вікні Image у повному розділенні.

При виводі занадто великих зображень можна скористатися з можливості виділення за допомогою середньої кнопки миші прямокутної області зображення, що буде відображена у вікні Scroll; для повернення до попереднього режиму – натисніть праву кнопку миші в цьому вікні і виберіть скидання ("reset scroll range").

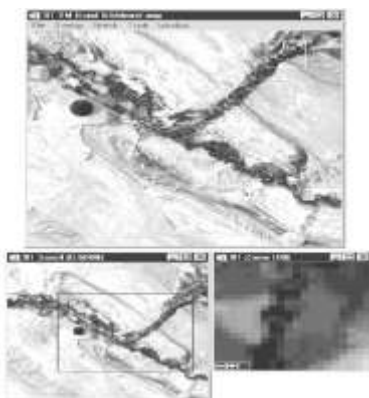


Рис.1.22. Графічний інтерфейс: головне вікно роботи з зображенням - вікно Image; вікно повномасштабного відображення зображення - вікно Scroll; вікно масштабування – вікно Zoom

Вікно Zoom - маленьке вікно виводу зображення на екран, що відображає частину зображення головного вікна Image в обумовленому користувачем масштабі. Вікно Zoom забезпечує можливість необмеженої зміни масштабу зображення.

Можна скористатися контекстним меню по правій кнопці миші в границях вікон Main Image і Zoom. Меню дозволяє переключати режим виділення рамки, курсора, методу інтерполяції, прийнятого при масштабуванні й ін.

У нижньому куті Zoom-вікна розташовані графічні маркери масштабування (-, +) і маркер курсора, за допомогою якого можна переміщатися по зображенню. Використання середньої кнопки миші на маркерах масштабування дозволяє масштабувати у кратне число раз (2, 4, 6 і т. д.).

1.4.5. Векторні зображення й робота з ними

Векторні зображення являють собою списки об'єктів, що мають координати в загальній системі координат. Об'єкти зображуються графічними примітивами (крапкою, лінією, прямокутником, колом, ...), які характеризуються стилем

зображення, до якого, в свою чергу, відносяться різні види заливання, штрихування, товщина ліній, колір, типи символів й ін. Використовуючи загальну систему координат, об'єкти відображаються у вигляді *графічних примітивів* на площині зображення з використанням стилів.

Крім геометричних і стильових характеристик об'єктам присвоюються їхні атрибутивні характеристики, які властиві даним типам об'єкта й унікальні для даного об'єкта. Для запису атрибутивних характеристик об'єкта використовують бази даних. Це дозволяє робити аналіз, селекцію об'єкта за різними критеріями фактично векторне зображення являє собою *бази даних*, де об'єкти мають ще й свій вигляд (рис.1.23).

Ідент. №	Висота	Адреса	Кільк.поверхів	Власник
00001	8	вул. Богунська, 56	1	Приватний
00002	25	пр. Миру, 23	6	Державний
...

Рис. 1.23. База даних об'єктів (у вигляді таблиці)

Векторне зображення являє собою списки наступного виду:

1. Заголовок: тип формату, яка версія й т.д.
2. Об'єкт 1, тип, тіло об'єкта.
3. Об'єкт 2, тип, тіло об'єкта.

.....

N. Об'єкт N, тип, тіло об'єкта.

Тіла можуть винесені окремо й у списку вказується лише місце розташування кожного тіла у файлі.

Якщо необхідно виділити якісь групи об'єктів окремо, то раціонально створювати зображення в окремих таблицях бази даних - шарах. Можуть бути ще й підшари, як показано на рис.1.24.

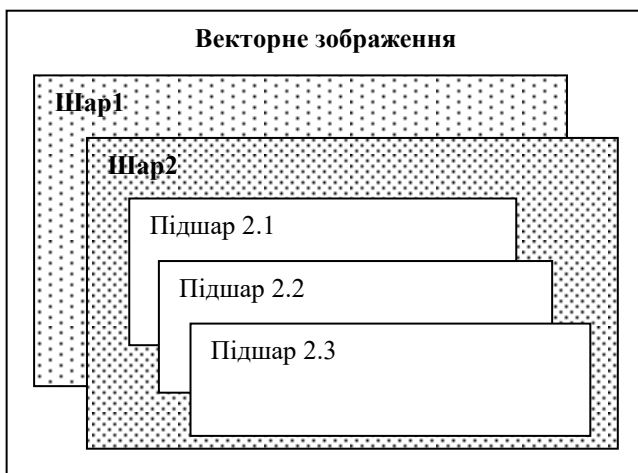


Рис.1.24. Структура векторного зображення з шарами та підшарами

Векторні графічні примітиви, які відображаються як певні об'єкти, бувають трьох основних типів: площинні, лінійні та точкові.

Точкові об'єкти - це символи, надписи та згруповані об'єкти. Точкові об'єкти за параметри мають тільки координати (x,y). Стиль символів описується розміром, кольором, видом набору (алфавітом). До стилю надписів відноситься також напрямок (горизонтальний - вертикальний).

Лінійні об'єкти (одновимірні) – це відрізок, полілінія, полісплайн, дуга, стандартні об'єкти (окружність, незаповнені еліпси, прямокутник).

Відрізок має координати початку й кінця. *Полілінія* складається з відрізків, приєднаних до початку наступних і до кінця попередніх. *Сплайн* – це закруглена гнучка лінія (гнучкий відрізок) характеризується координатами крайніх точок фіксації (точок з'єднання сусідніх сплайнів у полісплайні). В полісплайні сусідні відрізки – сплайни з'єднуються крайніми точками та вигинаються таким чином, щоб у точці з'єднання не було зміни першої похідної. Виконання цієї умови робить полілінію суцільною, без помітних перегинань.

Існують різні стилі проведення ліній: суцільна, точкова, штрихова і т.ін.

Площинні об'єкти (двовимірні) – це полігони та заповнені стандартні площинні фігури (прямокутники, еліпси, кола).

Полігон – це багатокутник. Полігоном загального виду називаються об'єкти, описувані зовнішніми й внутрішніми границями (рис.1.25).

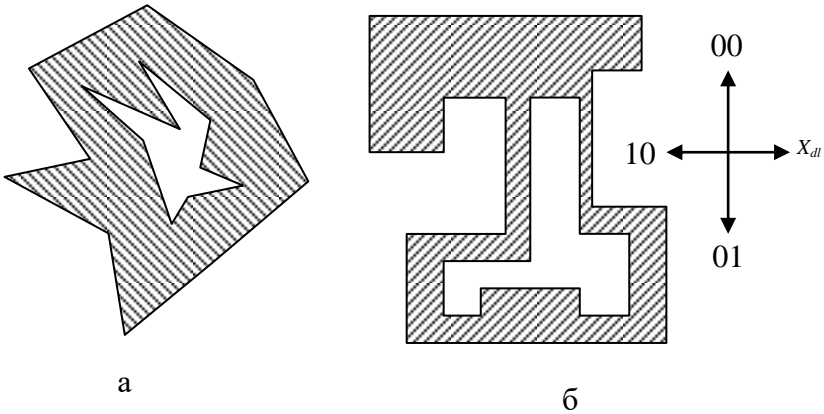


Рис.1.25. Полігон загального виду - (а) та полігон спеціального виду - (б)

Границі описуються у вигляді замкнутих ламаних: наборами координат точок меж відрізків ламаної. Полігонами спеціального виду називають такі полігони, де границя записана ланцюжковим кодом. Це полігони із взаємно ортогональними ділянками границь. Такі полігони більше компактні в записі.

Тіло полігону загального виду записується таким чином:

- зовнішня границя $(x_0, y_0; x_1, y_1; \dots x_n, y_n; x_0, y_0)$;
- внутрішня границя $(x_0, y_0; x_1, y_1; \dots x_n, y_n)$.

Однакові координати на початку та у кінці запису зовнішньої границі кажуть про те, що полігон замкнутий. Внутрішня границя може бути не замкнена. Зовнішня границя із внутрішньою не перетинаються.

Коло може задаватися набором параметрів: координатами центру (x, y) та радіусом R .

Стилями двовимірних об'єктів можуть бути: заливання (або штрихування), його кольори, товщина границі, її кольори, пунктирні границі й т.ін.

Тіло *групових об'єктів* (рис.1.26) містить у собі посилання тих тіл, які в нього входять. Не забороняється поєднувати (групувати) групові об'єкти.

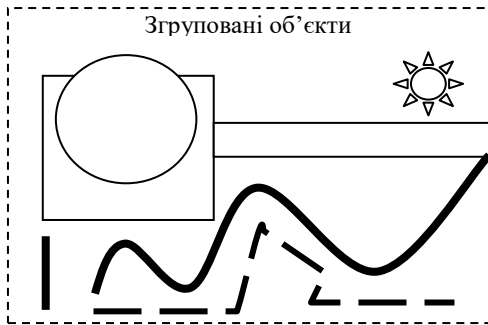


Рис.1.26. Груповий об'єкт

Інтегрування в одній системі двох типів даних - растрових і векторних – основна перевага програм обробки космічних знімків і *географічних інформаційних систем* (ГІС). Спільне використання растрових і векторних шарів сприяє:

більш вірогідному визначенню ознак об'єктів, що зобразилися на знімку;

додаванню до зображення інших атрибутів об'єктів при оформленні звітних документів;

сумісному використанню знімка і векторної карти.

Векторні дані можуть бути застосовані для виділення точкових, лінійних та площинних об'єктів на знімку; для вибору еталонів при класифікації об'єктів; для виділення границь областей, що представляють інтерес (region of interes – ROI).



Рис.1.27. Сумісне використання растрового і векторного зображень у програмному комплексі ENVI

На рис. 1.27. наведений приклад сумісного використання растрового зображення (космічного знімка) і векторного зображення (позначки анотації) в програмному комплексі обробки космічних знімків ENVI.

Питання для самоконтролю

1. За якими принципами обирається роздільна здатність сканера при скануванні фотознімків?
2. За якими принципами обирається роздільна здатність сканера при скануванні поліграфічних растрових зображень ?
3. За якими принципами обирається роздільна здатність знімка для наступного друку на принтері з обмеженою роздільною здатністю та необмеженим розміром носія?
4. За якими принципами обирається роздільна здатність знімка для наступного друку на принтері з обмеженою роздільною здатністю та обмеженим розміром носія?
5. За якими принципами обирається глибина передачі кольору при скануванні з метою збереження та з метою обробки зображень?
6. Яким чином подається колір у системах кодування RGB, HSB, CMYK?
7. Яким чином растрові зображення зберігаються у файлах?
8. Яким чином векторні зображення зберігаються у файлах?
9. У чому полягають розбіжності у застосуванні растрових і векторних зображень?

РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ ОПЕРАЦІЇ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ОБРОБЦІ ЗОБРАЖЕНЬ

2.1. ПОЕЛЕМЕНТНІ РАДІОМЕТРИЧНІ ОПЕРАЦІЇ

2.1.1. Коректування яскравісної поелементної нелінійності датчиків

У більшості зображувальних систем зображення можна представити у вигляді роздільних просторової і поелементної складових [8]. Зображення описується функцією відповідно до роздільної моделі

$$F_0(x, y) = Q_p \{c, Q\{x, y, \lambda, c(x, y, \lambda)\}\},$$

де $c(x, y, \lambda)$ - спектральна щільність енергії вхідного світлового поля (несе зображення); $Q_p\{*\}$ - поелементна характеристика передачі рівнів датчика; $Q\{*\}$ - оператор, обумовлений просторовою і спектральною характеристиками датчика та атмосфери.

Щоб зробити компенсацію яскравісної нелінійності датчика, (радіометричні викривлення) пропустимо зображення через коригувальну систему, описувану оператором реставрації Q_R (рис.2.1).

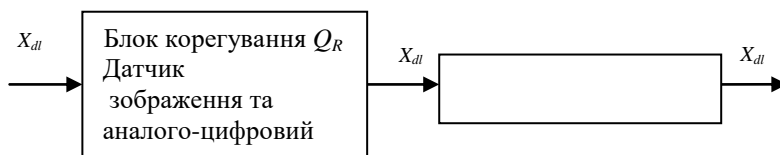


Рис.2.1. Корекція яскравісної поелементної нелінійності датчика

Оператор реставрації має бути таким, щоб він задовольняв умові $Q_R \{Q_p \{*\}\} = 1$.

Корекція зображень, представлених у виді аналогових електричних сигналів, виконується за допомогою нелінійних

підсилювачів. Корекція оцифрованих зображень здійснюється за допомогою цифрових засобів – звичайних арифметичних пристроїв, що реалізують *таблиці відповідності рівнів*.

Можна вважати, що для кожної точки зображення на вході датчика зображень існує точкове джерело світла з яскравістю C , що перетвориться датчиком в двійкове число F (рис.2.2).

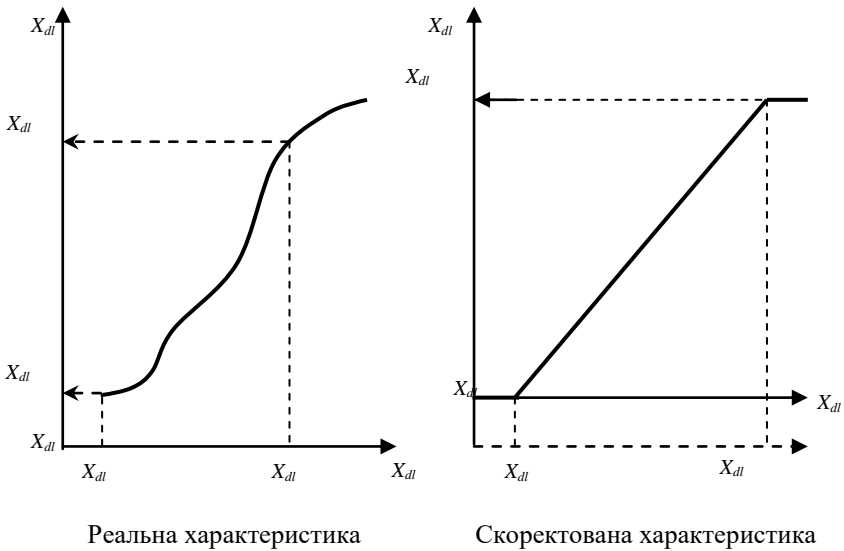


Рис.2.2. Світлові характеристики датчика

Для створення оператора корегування Q_R необхідно мати *світлову характеристику датчика $F(C)$* . Реальну світлову характеристику конкретного датчика можна одержати користаючись зображенням іспитової таблиці, яка складається з полів відомих яскравостей c_i (рис.2.3). В такій таблиці для кожного яскравісного рівня c_i з інтервалу значень $[0, c_{max}]$ визначається відповідне двійкове число F_{ki} з інтервалу значень $[0, F_{kmax}]$, яке повинен формувати ідеальний датчик.

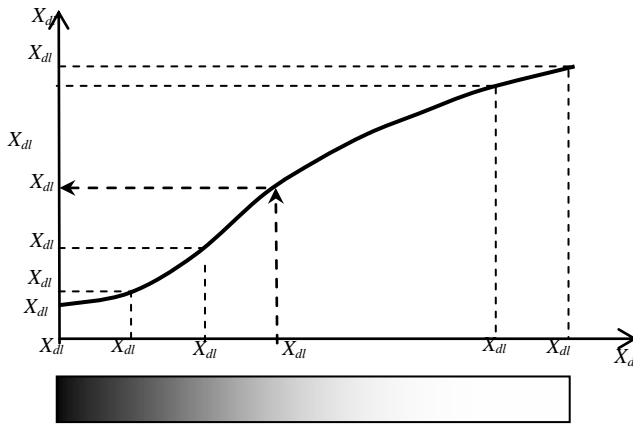


Рис.2.3. Оцінка характеристики передачі датчика

Визначивши ряд точок для різних рівнів яскравості c_i , будують по них гладку аналітичну криву $c(F)$ (рис.2.4). За звичай використовують математичні методи інтерполяції.

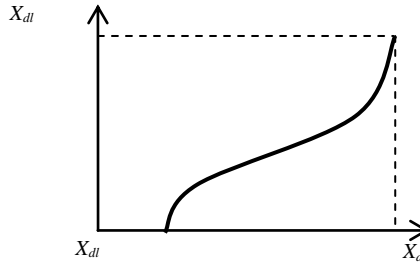


Рис.2.4. Коригувальна крива

У результаті одержуємо вираз для корегувальної функції $F_k = Q_R\{F\}$:

$$F_k = F_{\max} \frac{c(F) - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}}.$$

Гістограма розподілу значень F , що присутні у цифровому поданні зображення одразу після датчика за звичай є суцільною. Тобто у сигналі не коригованого зображення можуть бути присутні всі можливі значення F . Гістограма розподілу значень

F_k , що побудована для скоректованого зображення, може мати пропуски, які спричинені збільшенням контрастів в деяких ланках шкали рівнів квантування F (рис.2.5). Щоб мінімізувати цей ефект, число рівнів квантування значень F_k повинне бути менше числа рівнів квантування значень F . На практиці, перед застосуванням будь-яких операції радіометричного корегування, потрібно збільшити бітову глибину подання сигналу F до максимально можливої. Після закінчення перетворень сигналу, для подальшого збереження сигналу зображення в файлі, бітову глибину подання сигналу F_k можна зменшити до мінімально припустимої з точки зору запобігання втрат інформації.

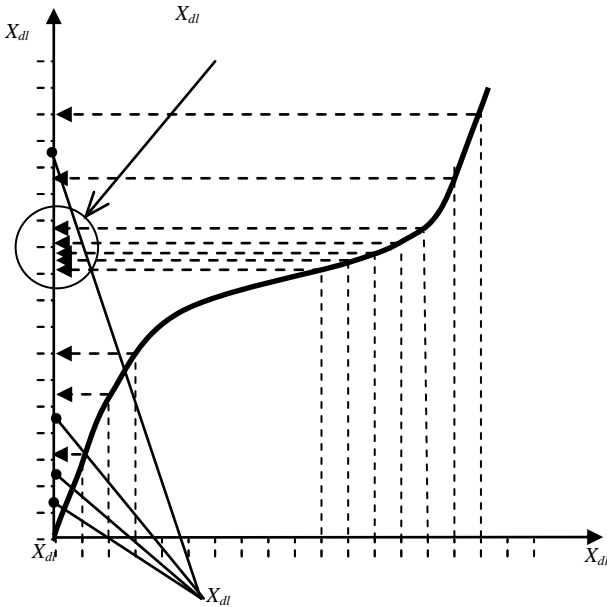


Рис.2.5. Зміння кількості використовуваних значень сигналу при нелінійному перетворенні

Не всі ланки характеристики датчика можуть бути скореговані. Такими є горизонтальні ланки характеристики датчика. За звичай вони присутні на початку і у кінці характеристики. Ці ланки часто називають зоною нечутливості

(на початку характеристики або «у темному») та зоною насичення (у кінці або «у світлому»).

Реальний сигнал переключений не тільки нелінійним перетворенням, але і містить випадкові викривлення чи шум. Корекція може компенсувати нелінійне переключування, але одночасно підсилити шум. Тому коригувальну функцію вибирають такою, щоб вона мінімізувала відмінність сигналу, що корегується.

При цифровій корекції головне джерело шуму – шум квантування. Розташування рівнів квантування в процесорі фіксовано його розрядною сіткою і формою подання чисел. Внаслідок нелінійного перетворення квантованого сигналу при його корекції можуть вийти значення, незбіжні зі шкалою квантування, що приводить до збільшення шуму квантування.

2.1.2. Зміна контрасту, яскравості та поелементне препарування зображень

Слабкий контраст - найбільш розповсюджений дефект аерокосмічних зображень, обумовлений обмеженістю діапазону відтворених яскравостей, що нерідко сполучається з нелінійністю характеристики передачі рівнів. У багатьох випадках контраст можна підвищити, змінюючи яскравість елементів зображення.

Рис.2.6 ілюструє характеристику передачі рівнів, що потрібно для підвищення контрасту типових безперервних малоконтрастних зображень. Корекцію таких зображень можна здійснити користуючись фотографічними методами, однак реалізувати довільну характеристику передачі рівнів з високою точністю, звичайно важко. У випадку цифрових зображень одержати необхідну характеристику передачі рівнів відносно просто. Однак при відшуканні нелінійного оператора варто враховувати помилки квантування.

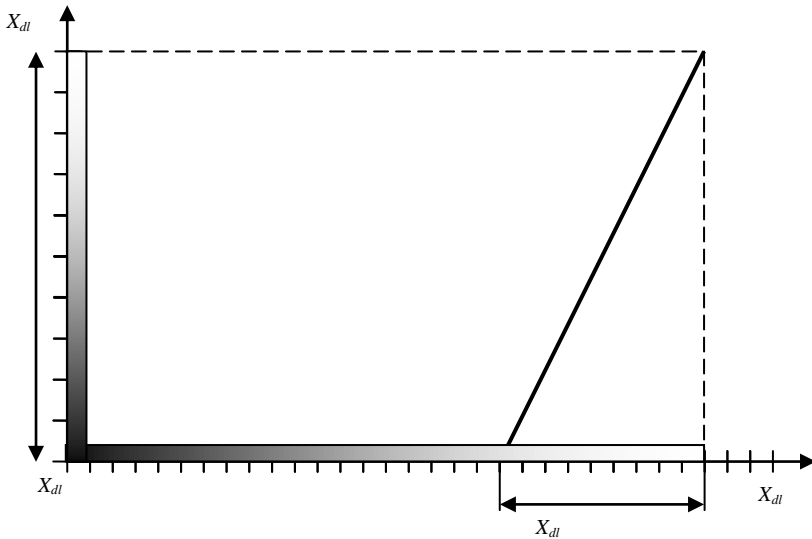
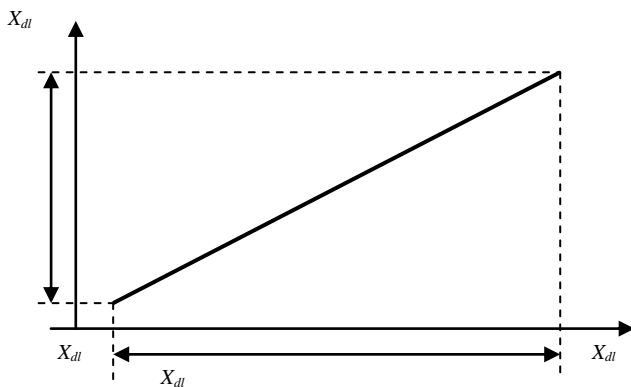


Рис.2.6. Перетворення контрасту

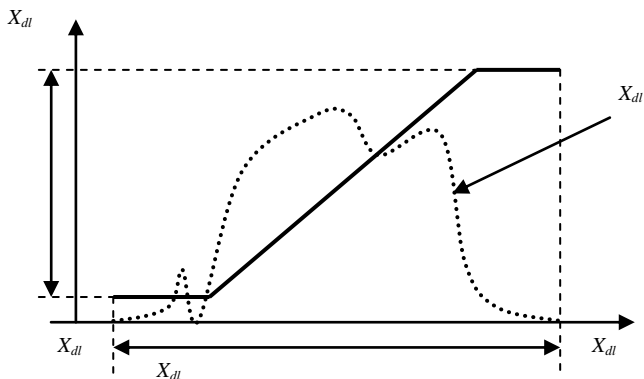
Очевидно, що в діапазоні яскравостей вихідного зображення деякі рівні не будуть використовуватися, тому окремі перепади яскравості вихідного зображення будуть перевищувати відповідні перепади вхідного зображення. Унаслідок цього можуть виникнути помітні хибні контури [8]. Якщо вихідне зображення квантувати з більшим числом рівнів, чим вхідне, то можна одержати рівномірне розміщення вихідних рівнів і завдяки цьому зменшити ефект появи помилкових контурів.

Діапазон яскравостей вихідного зображення, підданого цифровій обробці, може відрізнятись від діапазону яскравостей вхідного зображення. Більше того, у діапазоні числових значень яскравості обробленого зображення можуть виявитися негативні значення, що не можуть мати прямої відповідності з фізичними яскравостями.

Рис.2.7 ілюструє два можливих способи приведення діапазону яскравостей вихідного зображення у відповідність з діапазоном яскравостей вхідного зображення. Відповідно до першого з них, оброблене зображення лінійно відображається таким чином, щоб цілком охопити відведений йому діапазон яскравостей.



а)



б)

Рис.2.7. Масштабування діапазону контрасту: а) лінійне масштабування діапазонів; б) масштабування діапазонів з обмеженням

Другий спосіб передбачає обмеження екстремальних значень яскравості обробленого зображення максимальним і мінімальним граничними рівнями. Цей спосіб часто забезпечує більш високу суб'єктивну якість зображення, особливо якщо оброблене зображення містить відносно мало елементів з перевищенням рівнів обмеження. У програмах і системах підвищення контрасту нерідко передбачається можливість

введення обмеження для фіксованого відсотка значень яскравості на обох краях шкали яскравостей.

У розглянутих прикладах підвищення контрасту використовувалася монотонно зростаюча характеристика передачі рівнів. У ряді випадків обробки зображень доцільніше користатися монотонно спадаючою чи немонотонною характеристикою. На рис.2.8,а показана характеристика передачі рівнів, що забезпечує обернення шкали яскравостей. Таку характеристику доцільно застосовувати, наприклад, якщо дисплей має істотну нелінійність в області чорного. Тоді темні ділянки вхідного зображення будуть переведені у світлі, котрі відповідають лінійній ділянці шкали яскравостей дисплея. На рис.2.8,б приведена характеристика передачі рівнів, призначе-

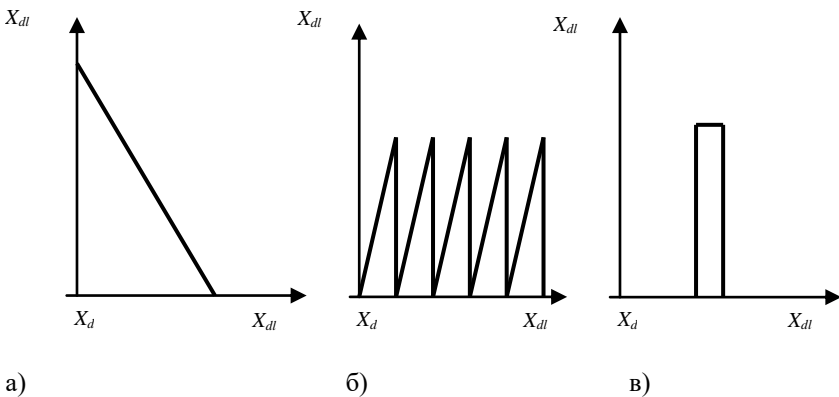


Рис.2.8. Спеціальні перетворення контрасту: а) звернене контрастне масштабування; б) пилкоподібне контрастне масштабування; в) яскравісний зріз

на для пилкоподібного контрастного масштабування. Таке перетворення часто використовують з метою одержання зображення із широким динамічним діапазоном на екрані дисплея, що має обмежений динамічний діапазон.

Характеристика передачі рівнів для яскравісного зрізу зображення приведена на рис.2.8,в. Це перетворення дозволяє виділити визначений інтервал діапазону яскравостей вхідного зображення.

При наявності кольорового дисплея з'являється можливість відображення в якомусь яскравому кольорі (наприклад, у червоному) ділянок одноколірного зображення, яскравість яких знаходиться в довільному вузькому інтервалі; інші ділянки цього зображення відображаються звичайним способом. Кожне зображення має два значення яскравості, які відповідають даному розряду кодового слова, що представляє яскравість. Метод яскравісних зрізів виявляється винятково ефективним при візуальному аналізі зображень у тому випадку, коли оператор користується дисплеєм у діалоговому режимі.

2.1.3. Алгоритми видозміни гістограм

Гістограма розподілу яскравостей типового зображення природного походження після лінійного квантування звичайно має яскраво виражений перенос у бік малих рівнів. Яскравість більшості елементів зображення звичайно нижче середньої. На темних ділянках подібних зображень деталі часто виявляються нерозрізненими. Одним з методів поліпшення таких зображень є видозміна гістограми [8].

Цей метод передбачає перетворення яскравостей вихідного зображення для того, щоб гістограма розподілу яскравостей зображення прийняла бажану форму.

Рис 2.9 ілюструє процедуру вирівнювання гістограми в тому випадку, коли число рівнів на виході складає менше половини числа рівнів на вході.

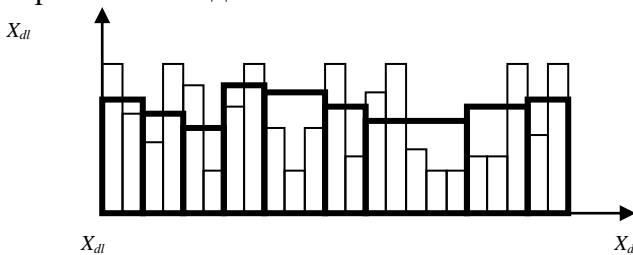


Рис.2.9. Приклад наближеного вирівнювання гістограми

Тут $h(F)$ - гістограма вихідного зображення (гістограма показує відносну кількість елементів зображення, квантована яскравість яких відповідає F -му рівню)

$$h(F) = \frac{1}{K}, \text{ де } F = 0, 1, 2, \dots, K-1.$$

Метою процедури вирівнювання гістограми є формування вихідного зображення Q , нормована гістограма якого наближалася до рівномірної.

Алгоритм перетворення реалізується в такий спосіб.

1. Починаючи з найменшого рівня яскравості вихідного зображення, поєднують елементи сусідніх інтервалів квантування таким чином, щоб сумарний результат найменш відрізнявся від величини $1/K$.

2. Всі об'єднані елементи приводяться до першого нового рівня, що розташовується точно в середині першого інтервалу квантування обробленого зображення.

3. Цю процедуру повторюють для більш високих рівнів яскравості.

При великому числі рівнів квантування вхідного зображення вдається одержати майже рівномірну гістограму.

Розглянута процедура приводить до збільшення помилок квантування, тому розглянемо інший метод вирівнювання гістограм, який працює навіть при однаковому числі рівнів квантування вихідного й обробленого зображень. Цей метод заснований на випадковому перерозподілі яскравості елементів зображення при формуванні вихідних інтервалів квантування з вхідних.

Процедуру видозміни гістограми можна розглядати як монотонне нелінійне поелементне перетворення $Q = T\{F\}$ вхідної інтенсивності $F_0 \leq F \leq F_{K-1}$ у вихідну інтенсивність $Q_0 \leq Q \leq Q_{K-1}$. У результаті цього перетворення вихідний розподіл ймовірностей $P\{F\}$ переходить у розподіл ймовірностей $P\{Q\}$, який має бажану форму. (Згадаємо, що гістограма - є оцінка розподілу ймовірностей).

Очевидно, що сума ймовірностей появи всіх рівнів повинна дорівнювати 1

$$\sum_{F=0}^{K-1} P\{F\} = 1, \quad \sum_{Q=0}^{K-1} P\{Q\} = 1.$$

В [8] детально розглянуті такі перетворення.

2.2. ЦИФРОВІ ФІЛЬТРИ

Одним з найважливіших у обробці сигналів є клас лінійних перетворень, для яких аргументи сигналу до і після перетворення збігаються. Такі перетворення називаються лінійною фільтрацією, а їхнє цифрове подання називається цифровими фільтрами. Найпоширенішими і найбільш простими в реалізації є фільтри інваріантні до зсування. Їхня імпульсна реакція залежить тільки від різниці аргументів.

2.2.1. Загальні відомості про лінійну фільтрацію

Дія фільтра на вхідний сигнал $f(x)$ (зображення $F(x,y)$) описується згорткою вхідного сигналу й імпульсної реакції фільтра $h(x)$ (імпульсною реакцією оптичної системи $H(x,y)$), яка цілком описує властивості фільтра (рис.2.10,а,б).

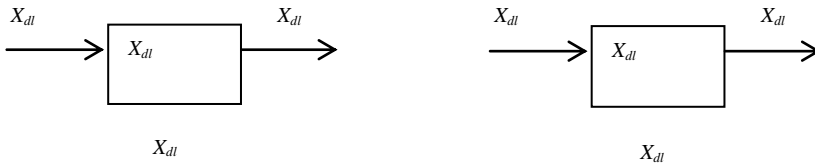


Рис.2.10. Фільтри сигналів: а) фільтр одномірних сигналів;
б) фільтр двовимірних сигналів (зображень)

Інтеграл згортки вхідного сигналу $f(x)$ та імпульсної реакції фільтра $h(x)$ в одномірному випадку записується в такий спосіб:

$$f_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z) \cdot h(x-z) dz.$$

Для двовимірного сигналу (зображення) дія двовимірного фільтра (оптичного пристрою) описується двовимірною згортокою

$$F_1(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(z, s) \cdot H(x - z, y - s) dz ds.$$

Тут функція $F(x, y)$ – описує вхідний двовимірний сигнал (зображення), $F_1(x, y)$ – описує вихідний двовимірний сигнал (зображення), $H(x, y)$ – описує імпульсну реакцію (властивості) двовимірного фільтра (оптичного пристрою).

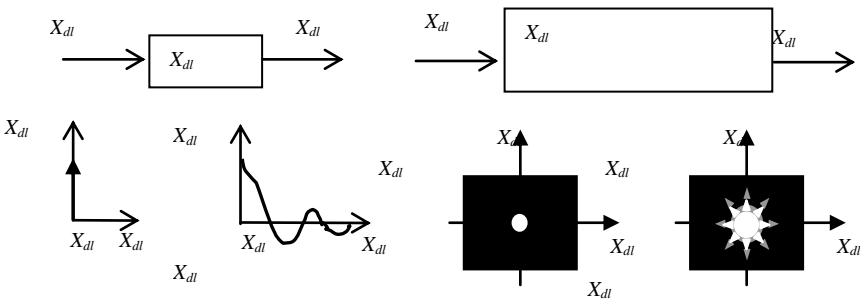


Рис.2.11. Способи одержання імпульсної реакції фільтрів:
а) для одномірних фільтрів; б) для двовимірних фільтрів (оптичних пристроїв)

Імпульсна реакція фільтра (лінійної просторово інваріантної системи) визначається як відгук фільтра на дельта-функцію (див. рис.2.11.). Для оптичних систем роль дельта-функції може виконувати зображення нескінченно яскравої точки на абсолютно чорному фоні.

Крім імпульсної реакції властивості лінійного фільтра можуть бути описані його *частотною характеристикою* $h(w)$ ($H(w_x, w_y)$ у двовимірному випадку), які зв'язані з імпульсними реакціями парою *перетворень Фур'є*

$$h(w) = FT\{h(x)\},$$

$$h(x) = FT^{-1}\{h(w)\} \text{ - для одномірних фільтрів і}$$

$$H(w_x, w_y) = FT\{H(x, y)\},$$

$$H(x, y) = FT^{-1}\{H(w_x, w_y)\} \text{ - для двовимірних фільтрів.}$$

Тут $FT\{*\}$ і $FT^{-1}\{*\}$ – оператори відповідно прямого і зворотного перетворень Фур'є; w_x і w_y – горизонтальна і вертикальна *просторові частоти*.

Стосовно до напівтонових зображень просторова частота - це кількість циклів зміни яскравості елементарних точок зображення від найяскравішого (білого) до найтемнішого (чорного) і навпаки уздовж одного з напрямків (координатних осей) за одиницю виміру координат. Одиниця виміру просторової частоти - 1/метр.

Іноді використовують поняття *нормованої просторової частоти*: кількість циклів зміни яскравості точок зображення від білого до чорного і навпаки уздовж координатної осі на всій довжині зображення. Далі під позначеннями w_x і w_y буде використовуватися саме це поняття, а розміри всіх зображень будуть вважатися однаковими. На рис.2.12 приведено приклади зображень, що заповнені гармоніками з різними частотами. На рис.2.12,а і рис.2.12,б $w_x = w_y$, причому зображення на рис.2.12,б заповнено більш високочастотним сигналом, чим

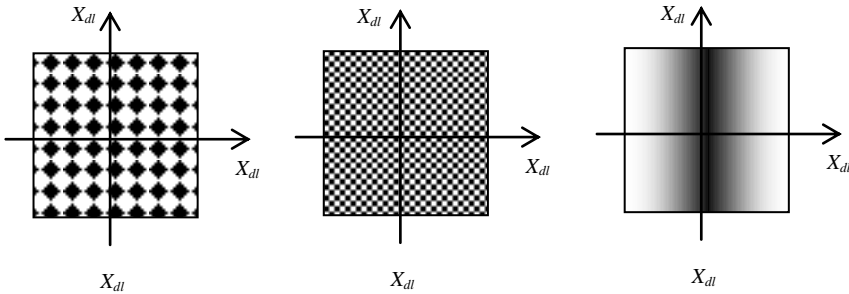


Рис.2.12. Приклади зображень просторових гармонік:
а) та б) $w_x = w_y$; в) $w_x = 1, w_y = 0$

зображення на рис.2.12,а. На рис.2.12,в показане зображення заповнене просторовою гармонікою з частотами $w_x = 1, w_y = 0$.

2.2.2. Цифрова згортка

Цифрові фільтри повинні виконувати ті ж операції над масивами відліків зображень $F(i,j)$, що і звичайні фільтри (оптичні пристрої) над зображеннями $F(x,y)$.

Цифрове подання лінійних фільтрів будується через їхнє дискретне подання. Їхнє дискретне подання повинне описуватися з урахуванням впливу дискретизації вихідного сигналу і відновлення результуючого зображення.

Для цифрових фільтрів можна записати наступний алгоритм їхньої роботи:

$$f_1(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n) \cdot h(k-n), \quad (2.1)$$

де $f(n)$ - відліки вхідного сигналу; $f_1(k)$ - відліки вихідного сигналу; $h(k-n)$ - відліки імпульсної реакції фільтра $h(x)$, узяті з тим же кроком Δx , що і при дискретизації вхідного сигналу.

При цифровій обробці кількість доданків у (2.1) повинна бути обмеженою. Це зв'язано з обмеженням числа відліків вхідного сигналу $f(n)$ і імпульсної реакції фільтра $h(n)$, яка, як правило, коротше сигналу. Обмежимо кількість відліків імпульсної реакції фільтра числом N . Тоді (2.1) запишеться як

$$f_1(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cdot h(k-n), \quad (2.2)$$

Ця формула називається *формулою цифрової згортки*. Вона є й алгоритмом роботи одномірного цифрового фільтра й аналогом інтеграла згортки для безперервного фільтра.

Для двовимірного цифрового фільтра формула цифрової згортки приймає вид

$$F_1(i,j) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{N-1} H(l,n) \cdot F(i-l,j-n), \quad (2.3)$$

де $F_1(i,j)$ - вихідний відгук двовимірного дискретного фільтра; $F(i,j)$ - відліки вхідного зображення; $H(l,n)$ - імпульсна реакція двовимірного цифрового фільтра.

2.2.3. Дискретні частотні й імпульсні характеристики фільтрів

Дискретизація вихідного сигналу і необхідної імпульсної реакції фільтра не може не позначитися на властивостях цифрового фільтра. Варто розглянути ці особливості [8]. Для цього за аналогією з безупинною формою запису дискретного сигналу можна увести функцію

$$h_{\text{д}}(x) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \cdot \delta(x - n \cdot \Delta x), \quad (2.4)$$

залежну тільки від відліків імпульсної реакції цифрового фільтра (рис.2.13).

Ця функція описує тільки сам дискретний фільтр. Назвемо її *дискретною імпульсною реакцією цифрового фільтра* (2.2), заданого своїми коефіцієнтами $h(n)$. Перетворення Фур'є цієї функції назвемо *дискретною частотною характеристикою цифрового фільтра*

$$h_{\text{д}}(w) = FT\{h_{\text{д}}(x)\}.$$

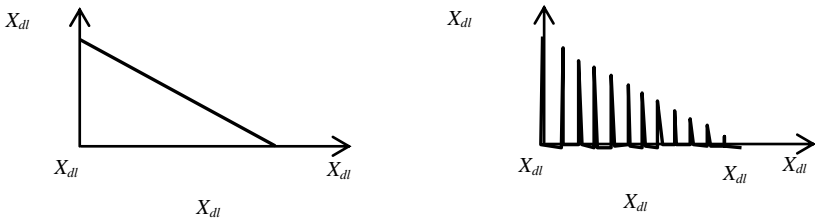


Рис. 2.13. Імпульсна реакція фільтра (а) і дискретна імпульсна реакція аналогічного цифрового фільтра (б)

Знання частотних характеристик цифрових фільтрів необхідно для їхнього синтезу і зіставлення їх з безупинними фільтрами, які вони апроксимують.

Розглянемо як приклад часто використовуваний в обробці зображень фільтр, що обчислює поточне середнє послідовності відліків по околі $(2N+1)$ відліків (усереднюючий фільтр)

$$f_1(k) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N f(k-n). \quad (2.5)$$

Для цього фільтра

$$h(n) = 1/(2N+1). \quad (2.6)$$

Підставивши (2.6) у (2.4), знайдемо, що його дискретна частотна характеристика визначається виразом

$$h(w) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \exp\{i \cdot 2\pi \cdot n \cdot w \cdot \Delta x\} = \frac{\sin[(2N+1) \cdot \pi \cdot w \cdot \Delta x]}{(2N+1) \cdot \pi \cdot w \cdot \Delta x}.$$

Ця частотна характеристика, побудована для $N=2$, показана на рис.2.14.

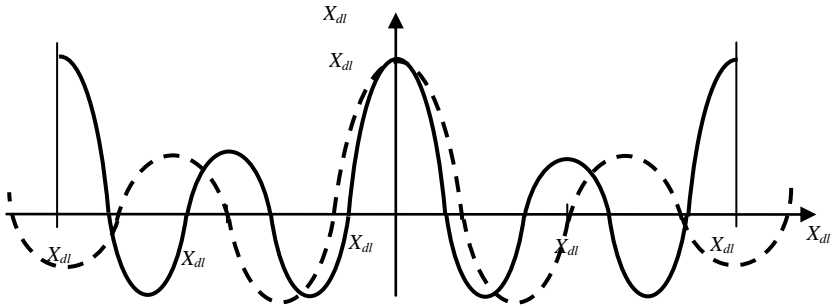


Рис.2.14. Дискретна частотна характеристика цифрового усереднюючого фільтра (суцільна лінія) і частотна характеристика відповідного безперервного фільтра (пунктир)

Штриховою лінією на рисунку показана частотна характеристика $h(w)$ безперервного фільтра з такою імпульсною реакцією, що відліками її є вагові коефіцієнти $h(n)$ дискретного фільтра (2.5). Неважко бачити, що при малому N розходження між цими характеристиками може бути помітним. Ці характеристики більше збігаються, якщо інтервал підсумовування τ для безперервного фільтра буде ширше інтервалу підсумовування дискретного фільтра $(2N+1)\Delta x$ на половину інтервалу дискретизації Δx в обидва боки [Л8].

Усі розглянуті співвідношення узагальнюються на двовимірний випадок заміною аргументів і індексів на відповідні пари індексів і аргументів для растрування в прямокутній системі координат. Дискретна частотна характеристика двовимірного цифрового фільтра зв'язана з

відліками його імпульсної реакції дискретним перетворенням Фур'є

$$H(w_x, w_y) = \sum_{l=0}^{l=L-1} \sum_{n=0}^{n=N-1} H(l, n) \exp\{i2\pi(w_x \cdot l \cdot \Delta x + w_y \cdot n \cdot \Delta y)\}.$$

2.3. ПРИНЦИПИ РЕАЛІЗАЦІЇ ДВОВИМІРНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Нижче будуть розглянуті алгоритми, реалізуючі цифрову фільтрацію зображень і об'єднані ідеєю фільтрації ковзним вікном чи апертурою. Термін "локальна" підкреслює факт, що розміри ковзного вікна (апертури) по обох осях менше розмірів зображення, що фільтрується.

Мета локальної фільтрації звичайно є в поліпшенні якості зображення; найчастіше це усунення перешкод, підвищення різкості чи підкреслення контурів. Локальна фільтрація представляє для цього досить широкий арсенал засобів обробки.

2.3.1. Постановка задачі двовимірної локальної фільтрації зображень

Фільтрація зображень має багато спільного з добре відомою в радіотехніці фільтрацією сигналів. Відмінність полягає в тому, що замість "одномірного" фільтра, який призначений для фільтрації сигналу однієї перемінної (звичайно часу), для фільтрації зображень застосовуються двовимірні фільтри, що відповідають двовимірній природі самого зображення.

Двовимірний фільтр улаштований у такий спосіб. Береться невелика, звичайно прямокутна, ділянка площини цифрового зображення (масиву чисел) і на ньому визначається деяка функція, яка визначає його імпульсну реакцію. Ця ділянка називається *апертурою*, чи *вікном*, а задана на ньому функція - *ваговою функцією*, чи *функцією вікна*. Таким чином, кожному елементу апертури (масиву) відповідає визначене число, назване *ваговим множником*. Сукупність усіх вагових множників і складає вагову функцію. Апертура разом із заданою на ній ваговою функцією часто називається *маскою фільтра* (рис.2.15).

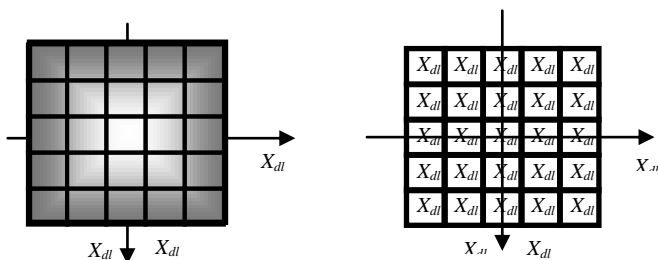


Рис.2.15. Імпульсна реакція двовимірного фільтра $H(z,s)$ і відповідна маска цифрового фільтра $H(k,l)$

Апертура звичайно має невеликий розмір, наприклад 3×3 чи 5×5 елементів. Лінійні розміри апертури звичайно беруться непарними, щоб можна було однозначно вказати її центральний елемент.

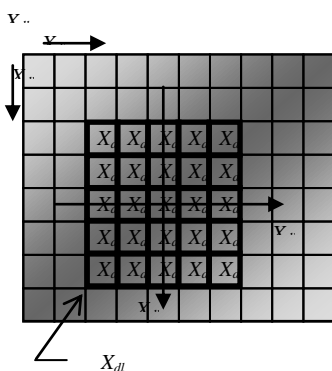


Рис.2.16. Цифровий масив відліків зображення $F(i,j)$ з розташованою на ньому маскою фільтра $H(k,l)$

Іноді застосовують "одномірну" апертуру, розмір якої по одному з напрямків дорівнює 1. "Одномірна" апертура, розташування якої не відповідає осям координат, може бути сформована завданням відповідної функції на звичайній, прямокутній апертурі.

Фільтрація здійснюється переміщенням апертури фільтра по зображенню (див.рис.2.16). Переміщення здійснюється щораз на один відлік. У кожному положенні апертури виконуються однотипні дії, що і визначають відгук фільтра. Один відлік вихідного зображення $F_1(i,j)$ виходить шляхом обробки всіх

елементів вхідного зображення, що потрапили «під вікно фільтрації», з урахуванням вагових значень елементів вікна. Для одержання деякого відліку вихідного зображення $F_I(p,q)$ необхідно перемістити вагове вікно так, щоб його умовний центр потрапив на відлік $F(p,q)$ вхідного зображення.

Вагова функція в процесі переміщення вікна залишається незмінною. Тому фільтрацію ковзним вікном відносять до просторово-інваріантних операцій.

2.3.2. Принципи локальної фільтрації зображень

Характерним прикладом служить *алгоритм лінійної фільтрації*, що полягає загалом у наступному. При кожному положенні апертури вагова функція поелементно помножується на значення відповідних елементів вхідного зображення; добутки підсумовуються. Сума поділяється на нормуючий коефіцієнт і отримана величина, що є відгуком фільтра, привласнюється тому елементу нового зображення, що відповідає положенню центра апертури.

Нормуючий коефіцієнт звичайно береться рівним сумі всіх елементів вагової функції (вагових множників). Якщо сума вагових множників дорівнює нулю, то нормуючий коефіцієнт приймається рівним одиниці.

Відгук лінійного фільтра лінійним чином залежить від оброблюваного зображення. Розглянемо фільтри, у яких для кожного положення апертури здійснюється поелементне перемножування вагової функції $H(k,l)$ на значення елементів зображення $F(p,q)$, які потрапили під неї, підсумовування і нормування отриманої суми.

Уведемо необхідні позначки. Нехай апертура має розмір $(K \times L)$ елементів; поточний елемент апертури позначимо через (k,l) , де l - поточний рядок; k - поточний стовпець.

Визначимо спосіб, за допомогою якого вказується положення апертури на зображенні. Виділяється деяка опорна точка апертури (звичайно це центр). Тепер досить задати положення цієї опорної точки в системі координат зображення, щоб тим

самим визначити положення всієї апертури. Цю опорну точку називають умовним центром апертури. Координати умовного центра позначимо (k_0, l_0) (у системі координат апертури!).

Умовний центр може (але не зобов'язаний) збігатися з дійсним геометричним центром апертури. Узагалі, за умовний центр можна взяти будь-яку точку апертури; більше того, умовний центр не зобов'язаний навіть знаходитися у її середині. Однак визначимо умовний центр так, щоб при непарних розмірах апертури він збігався з її центральним елементом: $k_0 = [(K+1)/2]$; $l_0 = [(L+1)/2]$, де квадратні дужки позначають цілу частину числа.

Поточне положення умовного центра на вихідному зображенні $F(i, j)$ позначимо через (i, j) . Відгук фільтра привласнюється тій же точці (i, j) нового, профільованого зображення $F_1(i, j)$ (рис.2.17).

Позначимо тепер через $h(k, l)$ функцію вікна. Масив вихідного зображення формується шляхом дискретної згортки вхідного поля $F(i, j)$ і функції вікна $h(k, l)$

$$F_1(i, j) = \frac{1}{K \cdot L} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} h(k, l) \cdot F(i - k_0 + k, j - l_0 + l). \quad (2.7)$$

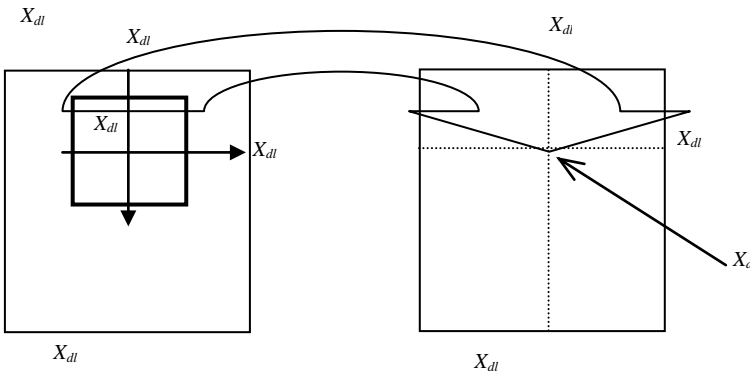


Рис.2.17. Робота нерекурсивного фільтра

Точно кажучи, формула справедлива лише за умови, що функція вікна не виходить за межі зображення.

Поряд з лінійними фільтрами існують і нелінійні. Характер фільтра залежить від операцій, виконуваних у кожному положенні вікна. У лінійних фільтрах відгук є лінійною функцією багатьох перемінних, роль яких грають елементи вихідного зображення, що потрапили у вікно. Вагові множники - це коефіцієнти лінійної функції. Фільтри, у яких відгук не може бути виражений лінійною функцією від значень елементів зображення, є по визначенню нелінійним.

Залежно від того, куди (у яке поле пам'яті) записується відгук фільтра, розрізняють прості і *рекурсивні* фільтри. Якщо в простих (*нерекурсивних*) фільтрах відгук записується у вихідне зображення $F_1(i,j)$, то в рекурсивних він записується назад у початкове зображення $F(i,j)$, змінюючи значення елементів початкового зображення безпосередньо в процесі фільтрації (рис.2.18). Тому в рекурсивних фільтрах вже оброблені елементи зображення впливають на результат фільтрації наступних.

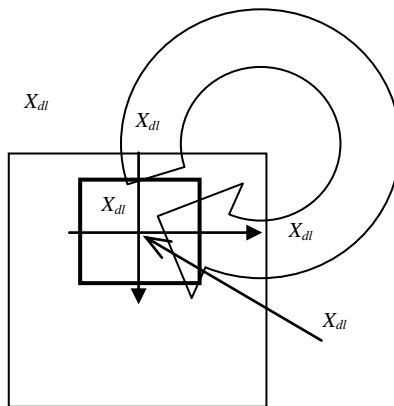


Рис.2.18. Робота рекурсивного фільтра

Іноді виявляється корисним багаторазове повторення процедури *нерекурсивної* фільтрації; у цих випадках говорять

про ітеративне застосування фільтрів (не плутати з рекурсивною фільтрацією).

2.3.3. Особливості руху вікна фільтра

Фільтрація вимагає переміщення вікна. Звичайно використовується тип руху, аналогічний прогресивному телевізійному розгорненню. Апертура переміщується уздовж рядка ліворуч праворуч із кроком в один елемент; дійшовши до кінця одного рядка, переходить до початку наступного. Узагалі говорячи, для нерекурсивних фільтрів траєкторія переміщення вікна може бути будь-якою, потрібно лише, щоб центр вікна відвідав по одному разу всі елементи вихідного зображення.

Розглянемо тепер інший аспект руху вікна. Мова йде про так званий *крайовий ефект* і про способи обробки пікселів поблизу границь поля зображення.

Вплив крайових ефектів особливо відчутно на невеликих зображеннях. Якщо розмір зображення багато більше розміру вікна, то частка площі, на якій помітні крайові ефекти, мала, і крайовими ефектами можна зневажити.

При фільтрації центральної зони будь-яка схема обробки дає однакові результати. Звичайно застосовується три схеми обробки зображення поблизу границь:

P-схема обробки відповідає випадку, коли вікно не може виходити за межі поля зображення, яке фільтрується. Межі зображення (шириною в половину вікна) залишаються неопрацьованими.

S-схема дозволяє вихід країв вікна за межі поля зображення, яке фільтрується. Потрібно тільки, щоб центр вікна завжди знаходився усередині поля. Елементи апертури, що виходять за границі поля, в обробці не беруть участі. Іншими словами, поблизу країв зображення фактичний розмір вікна зменшується. *Крайовий ефект* зберігається, хоча й в ослабленому виді.

T-схема обробки відповідає фільтрації на тороподібній поверхні. *T-схема* виходить, якщо представити, що зображення визначене не на площині, а на тороподібній поверхні. Тобто лівий край зображення примикає до правого, а верхній край до

нижнього. Замість тора можна представити нескінченну площину, на якій задане зображення періодично повторюється. Тут крайовий ефект полягає в тому, що об'єкти, що знаходяться на одному краї зображення, впливають на обробку і залишають свій слід на протилежному краї, що непогано в статистичному змісті, але може показатися протиприродним.

2.3.4. Алгоритм рекурсивної фільтрації

Рекурсивним називається фільтр, у якому відгук визначається не тільки через вхідні значення, але і через вихідні. У рекурсивних фільтрах можуть використовуватися ті ж функції, що й у нерекурсивних.

З загальної теорії лінійних систем відомо, що лінійні системи зі зворотним зв'язком (рекурсивні фільтри) мають нескінченну імпульсну реакцію незважаючи на те, що вікно обробки (апертура) має кінцевий розмір. Через нескінченність імпульсної реакції частотна характеристика рекурсивних фільтрів обмежена. Це буває корисно, коли потрібно створити ідеальний цифровий фільтр низьких частот із крутим зрізом частотної характеристики. З другого боку, наявність зворотного зв'язку в рекурсивних цифрових фільтрах високих частот потенційно може привести до нестійкості фільтра. Нестійкий цифровий фільтр на деяких зображеннях може сам почати генерувати вихідний сигнал, не зв'язаний із вхідним.

У нерекурсивних фільтрів імпульсна реакція завжди обмежена розмірами апертури. Тому їхня частотна характеристика завжди простирається до нескінченності. Відсутність зворотного зв'язку приводить до того, що ці фільтри стійкі завжди, але одержати нерекурсивний фільтр із крутими спадами частотної характеристики не вдасться ніколи. Щоб хоч якось наблизити частотну характеристику нерекурсивного фільтра низької частоти до ідеального, приходиться збільшувати його порядок (розмір апертури). Для двовимірних цифрових фільтрів це приводить до квадратичного росту числа арифметичних операцій в алгоритмі фільтрації i , відповідно, до квадратичного росту часу виконання.

Алгоритм лінійної рекурсивної фільтрації ґрунтується на рекурентному співвідношенні між вхідними і вихідними перемінними системи. Для одномірних сигналів подібне рекурентне співвідношення має вид

$$r(m) = \sum_{j=1}^J a(j) \cdot f(m-j+1) - \sum_{k=2}^K b(k) \cdot r(m-k+1), \quad (2.8)$$

де $f(n)$, $n=1,2,\dots,N$ - відліки вхідної послідовності; $r(m)$, $m=1,2,\dots,M$ - відліки вихідної послідовності; $b(k)$, $a(j)$ - вагові множники.

Ключовий момент тут у тому, що m - тий елемент вихідної послідовності залежить не тільки від останнього і $(J-1)$ передостанніх елементів вхідної послідовності, але і від $(K-1)$ попередніх елементів вихідної послідовності.

Іноді вагові множники $a(j)$ приймають рівними одиниці і $J=1$, тоді такий фільтр називають рекурсивним фільтром першого роду, на відміну від більш загальної форми (2.8), що називається рекурсивним фільтром другого роду. Фактично відгук фільтра (2.8) є зважена сума відгуків звичайного нерекурсивного фільтра (перша частина різниці (2.8)) і рекурсивного фільтра першого роду (друга частина (2.8)). Керуючи співвідношенням вагових множників $a(j)$ і $b(k)$, можна плавно змінювати характеристику фільтра.

Якщо покласти $b(k)=0$, тоді (2.8) відповідає простому нерекурсивному фільтру.

Усе сказане вище про лінійну рекурсивну фільтрацію справедливо і для нелінійної рекурсивної.

2.3.5. Застосування локальної лінійної фільтрації для згладжування і підкреслення границь

Одне з найбільш розповсюджених застосувань лінійних фільтрів - згладжування шуму. Для цього застосовуються вагові функції наступного виду:

$$H(m,n) = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ (а);} \quad H(m,n) = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ (б).}$$

При частотній інтерпретації процесів фільтрації такий фільтр називається *фільтром нижніх частот*.

Для підкреслення ліній визначеного напрямку використовуються вагові функції виду:

$$H(m,n) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \text{ (в);} \quad H(m,n) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 1 & 4 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \end{bmatrix} \text{ (г).}$$

Вагова функція (в) підкреслює горизонтальні і вертикальні лінії вихідного зображення, (г) - діагональні лінії.

Фільтри, що виділяють границі (у частотній інтерпретації - це *високочастотні фільтри*), використовують наступні три вагові функції:

$$H(m,n) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \text{ (д);} \quad H(m,n) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \text{ (е);}$$

$$H(m,n) = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \text{ (ж).}$$

Слід звернути увагу на те, що сума вагових множників тут дорівнює одиниці. Тому на результуючих зображеннях зберігаються фонові області з постійною яскравістю. Границі виділяються незалежно від їхнього напрямку.

Для виділення перепадів яскравості визначеної орієнтації використовуються залежно від необхідного напрямку вагові функції, що називаються *курсовими градієнтними масками*:

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \text{ (з) - "північ";}$$

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ (и) - "північний схід";}$$

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ (к) - "схід";}$$

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ (л) - "південний схід";}$$

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ (м) - "південь";}$$

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ (н) - "південний захід";}$$

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \text{ (о) - "захід";}$$

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \text{ (п) - "північний захід".}$$

Назва курсу говорить про напрямок перепаду яскравості, що викликає максимальний відгук фільтра.

Для виділення перепадів без указівки їхньої орієнтації використовуються наступні три види вагових функцій (оператори Лапласа):

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \text{ (р);} \quad H(m, n) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \text{ (с);}$$

$$H(m, n) = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \text{ (т).}$$

Ці оператори відрізняються від масок виду (д, е, ж) тим, що сума вагових множників у них дорівнює нулю. Це говорить про те, що на результуючому зображенні залишаються тільки виділені границі без тла.

Вагові функції виду (з-п) і (р, с, т) дозволяють здійснювати операцію двовимірного диференціювання. Вагові функції для диференціювання повинні володіти тією властивістю, що сума їхніх елементів дорівнює нулю.

2.3.6. Особливості реалізації лінійних алгоритмів фільтрації

Іноді важливим питанням застосування лінійної фільтрації є її обчислювальна реалізація з застосуванням обмежених можливостей засобів обробки. Одним з найбільш швидкодіючих способів реалізації оптимальної фільтрації є використання однократної або багаторазової паралельної або послідовної (каскадної) фільтрації сигналу двовимірним роздільним рекурсивним фільтром виду

$$F(i, j) = \frac{1}{(2N + 1)(2M + 1)} \sum_{n=-M}^M \sum_{n=-N}^N F(i - m, j - n). \quad (2.9)$$

Форма імпульсної реакції такого фільтра прямокутна, і він, таким чином, є оптимальним для виділення прямокутних за формою й орієнтованих по растру об'єктів. Багаторазовою паралельною фільтрацією можна сформувати довільно орієнтовану імпульсну реакцію, що відповідає орієнтації деталей зображення. Схема організації паралельної обробки за допомогою рекурсивних фільтрів виду (2.9) може бути представлена в такий спосіб.

Імпульсна реакція цифрового фільтра нібито квантується і подається у виді суми з N прямокутних функцій різних розмірів. Це ілюструється на рис.2.19.

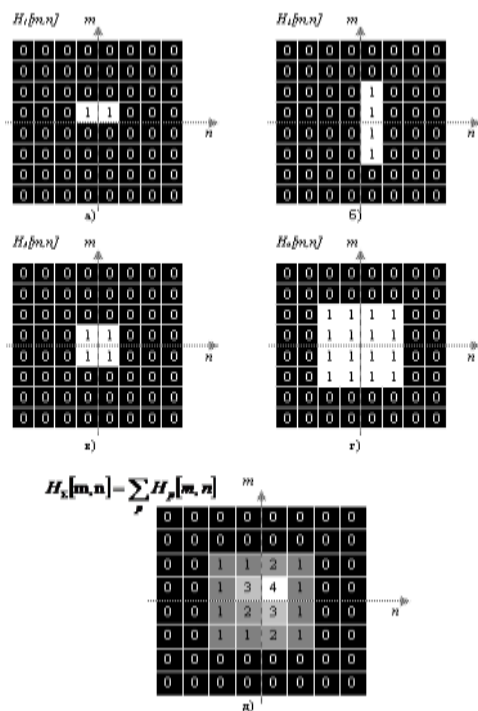


Рис.2.19. Отримання довільної імпульсної реакції фільтру шляхом додавання імпульсних реакції простіших фільтрів

Здійснюється роздільна фільтрація вхідного зображення кожним з N фільтрів із прямокутною імпульсною реакцією.

Результуючі зображення додаються із заданими вагами (рис.2.20).

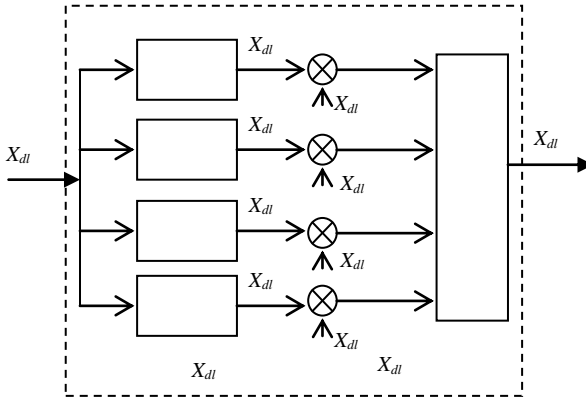


Рис.2.20. Створення фільтра з довільною імпульсною реакцією шляхом додавання результатів фільтрації простішими фільтрами

Зрозуміло, що така апроксимація імпульсної реакції має кінцеву точність, що залежить від кількості паралельно працюючих фільтрів N і складності імпульсної реакції, що представляється.

2.4. НЕЛІНІЙНА ФІЛЬТРАЦІЯ

Основні поняття теорії локальної фільтрації, розглянуті раніше, справедливі і для локальної нелінійної фільтрації. Маються на увазі поняття процесу фільтрації, апертури, способи й алгоритми переміщення апертури по зображенню; вагова функція застосовується не завжди. Головна відмінність полягає в тому, що вихід нелінійного фільтра формується нелінійним чином від даних вхідного зображення.

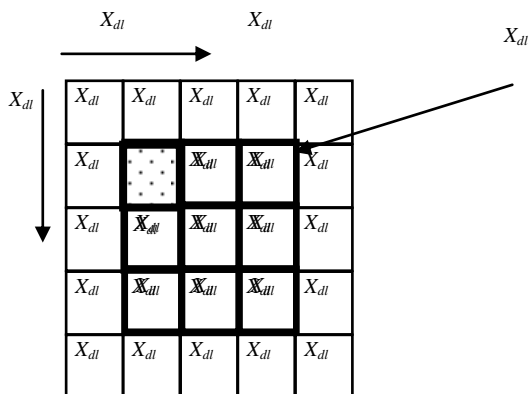
Тут будуть розглянуті два класи нелінійних фільтрів, використовуваних для досягнення в деякому змісті протилежних цілей. Це медіанні фільтри, застосовувані для згладжування зображень, і фільтри, що підкреслюють перепади яскравості. До останніх відносяться фільтри Робертса і Собела, спорідненні в ідейному плані. Крім цього, розглянемо фільтр, що виявляє локальні максимуми зображення.

2.4.1. Медіанні фільтри

Медіанна фільтрація - метод нелінійної обробки сигналів. *Медіанний фільтр* являє собою ковзне вікно, що охоплює непарне число елементів зображення по рядку і стовпцю. Відгук медіанного фільтра дорівнює медіані даних, що знаходяться в апертурі. *Медіана* являє собою центральний елемент у *варіаційному ряді*, вишикуваному з даних, що знаходяться в межах апертури (рис 2.21). *Ранг*, значення і координати в апертурі медіанного елемента позначені штрихуванням.

Для дискретної послідовності a_1, a_2, \dots, a_N і непарної довжини варіаційного ряду N медіаною є той її елемент, для якого існують $(N-1)/2$ елементів, більших чи рівних йому по величині і $(N-1)/2$ елементів, менших чи рівних йому по величині. У силу того, що для операції знаходження медіани не виконується одна з аксіом лінійності, медіанний фільтр є нелінійним.

Медіанні фільтри застосовуються для згладжування зображень і для придушення шуму. Раніше розглянуті лінійні низькочастотні фільтри, застосовувані для тих же цілей. Медіанні фільтри по своїх властивостях відрізняються від них. По-перше, медіанні фільтри зберігають різкі перепади, тоді як лінійні низькочастотні фільтри їх змазують. По-друге, медіанні фільтри дуже ефективні при згладжуванні імпульсного шуму, але можуть приводити до повного зникнення дрібних деталей зображення при неадекватному виборі параметрів фільтра.



Ранг R	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$F(i+k, j+l)$	4	6	7	8	10	12	13	15	16
(k,l)	-1,1	1,1	-1,0	1,0	0,0	0,1	1,-1	0,-1	0,0

Рис.2.21. Варіаційний ряд елементів зображення, що потрапили в апертуру фільтра

Медіанні фільтри використовуються також для виявлення границь і виділення об'єктів.

Для формування апертур довільної форми (хрестоподібних, кільцевих і т.д.) використовується бінарна вагова функція, що приймає значення 0 чи 1 (рис.2.22).

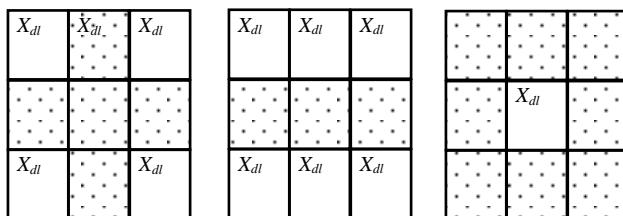


Рис.2.22. Апертури медіанного фільтра довільної форми.

Медіанні фільтри нерідко застосовуються *ітеративно*, причому фільтрація повторюється доти, поки на профільтованому зображенні не припиняться зміни. В іншому варіанті ітеративного застосування від кроку до кроку ітерації міняється апертура фільтра. У так званому роздільному

медіанному фільтрі одномірний медіанний фільтр застосовується спочатку до кожного рядка, а потім – до кожного стовпця зображення.

Різновидом медіанного фільтра є *зважено-медіанний фільтр*. У такому фільтрі використовується вагова функція, але інтерпретується вона інакше, чим у лінійних фільтрах. Тут вагові коефіцієнти показують, скільки разів потрібно враховувати елементи зображення, що потрапили в апертуру.

Якщо виходу фільтра привласнювати значення не медіани даних, що знаходяться в апертурі, а значення, відповідне будь-якому заданому місцю у варіаційному ряді, то можна одержати фільтри, що називаються *процентільними* [8]. Вони також є нелінійними.

Розглянутий метод придатний не тільки для напівтонових, але і для бінарних зображень (чорно-білих). Для них доцільно використовувати інше, спрощене правило формування відгуку, не потребує побудови варіаційного ряду. Це правило полягає в наступному. Якщо на ділянці поля, що попало в апертуру, кількість одиниць перевищує кількість нулів, то відгук фільтра покладається рівним одиниці, у протилежному випадку - нулю. Дане правило допускає узагальнення на випадок бінарного процентільного фільтра. У такому фільтрі відгук покладається рівним одиниці, якщо в межах апертури знаходиться принаймні R одиниць.

2.4.2. Нелінійні методи контрастування меж

Раніше були розглянуті лінійні методи підкреслення перепадів яскравості і виділення контурів. Відомі і нелінійні методи контрастування меж [8].

Один з таких методів запропонований Робертсом (рис.2.23) і складається у використанні операції двовимірного дискретного диференціювання

$$G(i, j) = \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (2.10)$$

де $U = F(i, j) - F(i+1, j+1)$; $V = F(i, j+1) - F(i+1, j)$.

Подібні результати дає інший аналогічний оператор, що вимагає меншого обсягу обчислень:

$$G(i, j) = |U| + |V|. \quad (2.11)$$

З формул (2.10) і (2.11) видно, що застосовується квадратна апертура розміром 2×2 . Вагова функція не задається (вважається, що вона дорівнює одиниці).

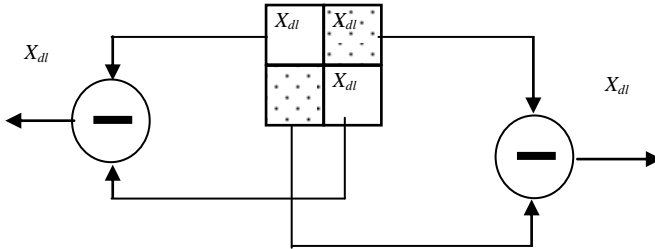


Рис.2.23. Обробка елементів зображення у фільтрі Робертса

Інший нелінійний оператор контрастування, що використовує апертуру розміром 3×3 , запропонований Собелом (рис.2.24)

$$G(i, j) = \sqrt{X^2 + Y^2},$$

де

$$X = [F(i-1, j+1) + 2F(i, j+1) + F(i+1, j+1)] - [F(i-1, j-1) + 2F(i, j-1) + F(i+1, j-1)],$$

$$Y = [F(i-1, j-1) + 2F(i-1, j) + F(i-1, j+1)] - [F(i+1, j-1) + 2F(i+1, j) + F(i+1, j+1)].$$

За аналогією з (2.11) запрошується спрощений варіант, що не вимагає операцій зведення в квадрат і обчислення квадратного кореня: $G(i, j) = |X| + |Y|$.

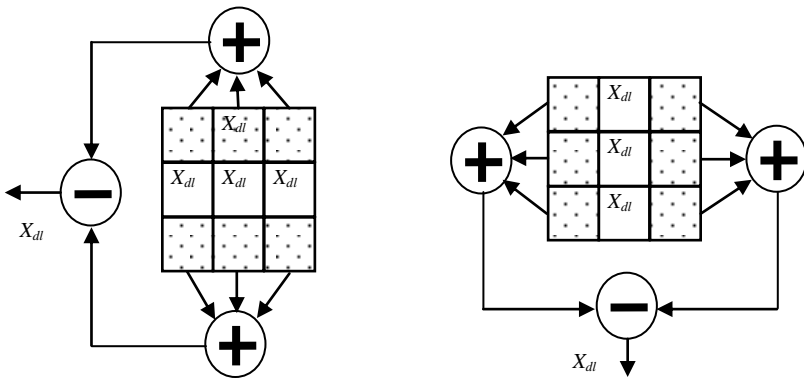


Рис.2.24. Обробка елементів зображення у фільтрі Собела

Методи нелінійної обробки надзвичайно різноманітні. Ще за один приклад приведемо алгоритм, що виявляє на зображенні локальні максимуми (вершини).

Алгоритм нескладний. По зображенню переміщається вікно заданого розміру. Елементи, що потрапили у вікно, порівнюються по величині з елементом, розташованим у центрі вікна. Якщо центральний елемент більше чи дорівнює своєму оточенню, то він без зміни переноситься у вихідне зображення. Якщо хоча б один елемент у вікні перевищує центральний, у вихідне зображення записується нуль.

2.4.3. Особливості реалізації алгоритмів нелінійної фільтрації

При реалізації алгоритмів медіанної фільтрації звичайно використовується *S-схема* руху вікна. Це приводить до того, що довжина варіаційного ряду (число елементів зображення, що попали у вікно) змінюється поблизу границь зображення. При непарному числі цих елементів вибір медіани не викликає труднощів. При парному числі елементів варіаційного ряду на роль медіани претендує відразу два центральних елементи. Отже, прийдеться жорстко визначити, який з елементів (правий чи лівий) буде братися як медіана.

У випадку процентільного фільтра для *S-схеми* руху вікна задавати номер порядкової статистики при перемінній довжині варіаційного ряду - не краще рішення. Зручніше задати частку процентільності, тобто відносний рівень, визначений у відсотках від числа членів варіаційного ряду (табл.2.1). Частка процентільності, рівна 50, відповідає медіанному фільтру.

Таблиця 2.1

Варіаційний ряд з рівними процентільності									
Процентільність	0%	13%	25%	37%	50%	63%	75%	87%	100%
Ранг R	0	1	2	3	4	5	6	7	8
F(i+k,j+1)	4	6	7	8	10	12	13	15	16
(k,l)	-1,1	1,1	-1,0	1,0	-1,-1	0,1	1,-1	0,-1	0,0

При реалізації алгоритму фільтрації по Робертсу і Собелу краї зображення (шириною в 1 елемент) залишаються неопрацьованими. Для алгоритму виділення локальних максимумів ширина неопрацьованих країв дорівнює $[M/2]-1$, де M - розмір обраного вікна. Квадратні дужки означають цілу частину числа.

2.5. ДВОВИМІРНЕ ДИСКРЕТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є В ОБРОБЦІ ЗОБРАЖЕНЬ

2.5.1. Двовимірне дискретне перетворення Фур'є та його особливості

Двовимірне дискретне перетворення Фур'є (ДДПФ) матриці $N*N$ відліків зображення визначається як масив $N*N$ комплексних відліків спектра у виді ряду

$$\dot{Z}(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} F(j, k) \cdot \exp \left\{ -\frac{2\pi \cdot i}{N} (uj + vk) \right\}, \quad (2.12)$$

де $i = \sqrt{-1}$, а дискретне зворотне перетворення має вид

$$\dot{F}(j, k) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} \dot{Z}(u, v) \cdot \exp \left\{ \frac{2\pi \cdot i}{N} (uj + vk) \right\}. \quad (2.13)$$

За аналогією з термінологією безперервного перетворення Фур'є перемінні u, v називають просторовими частотами.

Оскільки ядра перетворення симетричні і роздільні по координатах, двовимірне перетворення можна виконати у виді послідовних одномірних перетворень по рядках і стовпцях матриці зображення. Базисними функціями перетворення є експоненти з комплексними показниками, які можна розкласти на синусну і косинусну складові. Таким чином,

$$A(j, k; u, v) = \exp\left\{-\frac{2\pi \cdot i}{N}(uj + vk)\right\} = \\ = \cos\left\{-\frac{2\pi \cdot i}{N}(uj + vk)\right\} - i \sin\left\{-\frac{2\pi \cdot i}{N}(uj + vk)\right\},$$

$$B(j, k; u, v) = \exp\left\{\frac{2\pi \cdot i}{N}(uj + vk)\right\} = \\ = \cos\left\{\frac{2\pi \cdot i}{N}(uj + vk)\right\} + i \sin\left\{\frac{2\pi \cdot i}{N}(uj + vk)\right\}.$$

Для низьких частот ці функції є грубими апроксимаціями синусоїд. З підвищенням частоти подібність базисних функцій із синусоїдами губиться. Для найвищої частоти базисна функція являє собою меандр.

Спектр зображення має багато цікавих структурних особливостей[3, 8, 13].

1. Спектральна складова на початку координат частотної площини

$$\dot{Z}(0,0) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} F(j, k)$$

дорівнює збільшеному в N раз середньому (по вихідній площині) значенню середньої яскравості зображення. Підставивши в рівність (2.12) $u=u+m$ і $v=v+n$, де m і n – постійні і цілі числа, одержимо

$$\dot{Z}(u + mN, v + nN) = \\ = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} F(j, k) \cdot \exp\left\{-\frac{2\pi \cdot i}{N}(uj + vk)\right\} \cdot \exp\{-2\pi \cdot i \cdot (mj + nk)\},$$

(2.14)

При будь-яких цілочисельних значеннях m і n другий експонентний множник рівності (2.14) перетворюється в одиницю. Таким чином, при $m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$$\dot{Z}(u + mN, v + nN) = \dot{Z}(u, v), \quad (2.15)$$

що свідчить про періодичність частотної площини. Рис.2.25 ілюструє цей результат.

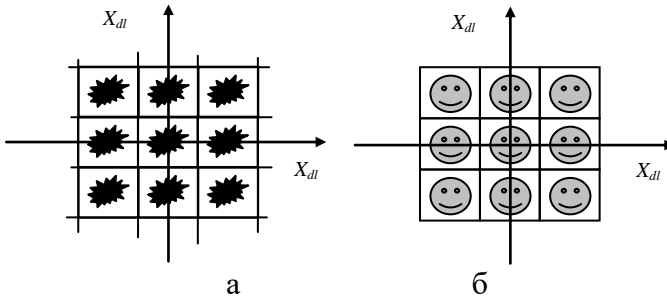


Рис. 2.25. Періодичне продовження зображення і спектра Фур'є:
а) спектр; б) початкове зображення

Двовимірний спектр Фур'є зображення є представленням двовимірного поля у виді ряду Фур'є. Для того щоб таке представлення було справедливим, вихідне зображення також повинне мати періодичну структуру, тобто мати малюнок, що повторюється по вертикалі і горизонталі.

Таким чином, правий край зображення примикає до лівого, а верхній - до нижнього. Через розриви значень яскравості в цих місцях у спектрі зображення виникають додаткові складові, які лежать на координатних осях частотної площини. Ці складові не зв'язані зі значеннями яскравості внутрішніх точок зображення, але вони необхідні для відтворення його різких границь.

Якщо масив відліків зображення описує поле яскравості, то числа $F(j, k)$ будуть дійсними і позитивними. Однак спектр Фур'є цього зображення в загальному випадку має комплексні значення. Оскільки спектр містить $2Nx$ компонент, що представляють дійсну і мниму частини або фазу і модуль спектральних складових для кожної частоти, може здаватися,

що перетворення Фур'є збільшує розмірність зображення. Це, однак, не так, оскільки $Z(u, v)$ має симетрію щодо комплексного сполучення. Якщо в рівності (2) покласти m і n рівними цілим числам, то після комплексного спряження вийде рівність

$$\dot{Z}(u + mN, v + nN) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} F(j, k) \exp \left\{ \frac{2\pi i}{N} (uj + vk) \right\}.$$

За допомогою підстановки $u = -u$ і $v = -v$ можна показати, що

$$\dot{Z}(u, v) = \dot{Z}(-u + mN, -v + nN)$$

при $m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Через наявність комплексно-спряженої симетрії майже половина спектральних складових є надлишковою, тобто їх можна сформувати з інших складових.

При візуальному представленні Фур'є - спектрів зображень також є деякі особливості.

Почнемо з того, що на поле зображувального пристрою розмірності $N \times N$ можна відобразити або тільки реальну або мниму частини спектра Фур'є. Звичайно цікавляться іншим представленням: у виді модуля й аргументу спектра. І в цьому випадку на стандартному полі відображення розмірності $N \times N$ можна відобразити яку-небудь одну з частин представлення. Найчастіше при аналізі буває потрібно відобразити модуль спектра Фур'є, тому що він являє собою розподіл енергії зображення по просторово-частотних компонентах.

При відображенні модуля спектра Фур'є в пристрої, що відображає, варто враховувати, що звичайно динамічний діапазон складових спектра набагато ширше динамічного діапазону пристрою, що відображає. Щоб мати наочну картину спектра, необхідно попередньо піддавати спектри стиску по амплітуді просторових гармонік. Стиск динамічного діапазону можна здійснити шляхом обмеження великих спектральних складових чи логарифмуванням усіх складових відповідно до співвідношення

$$D(u, v) = \log \left\{ a + b \left| \dot{Z}(u, v) \right| \right\},$$

де a і b - масштабні постійні.

При математичному аналізі безперервних сигналів початок координат частотної площини звичайно поміщають у її геометричному центрі. Тобто, низькочастотні складові спектра повинні потрапити в центр частотної площини, а високочастотні - на її краї. Таке розташування частотних осей для масиву результату ДДПФ можна одержати, якщо всі відліки вихідного зображення попередньо помножити на коефіцієнти виду

$$W(j, k) = (-1)^{j+k} .$$

Тоді квадранти спектра, розрахованого відповідно до формули (2.12), у процесі обчислення автоматично міняються місцями (рис.2.26).

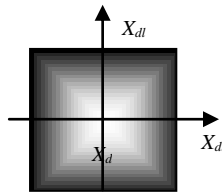


Рис.2.26. Розташування осей просторових частот у масиві ДДПФ після множення на коефіцієнт

Двійка перетворень Фур'є може бути представлена в матричній формі: $\dot{Z} = \dot{A}_C \cdot F \cdot \dot{A}_R$, $F = \dot{A}_C^* \cdot \dot{Z} \cdot \dot{A}_R^*$,

де $\dot{A} = \dot{A}_C \dot{A}_R$ - матриця перетворення, причому

$$\dot{A}_C = \dot{A}_R = \begin{bmatrix} \dot{W}[0] & \dot{W}[0] & \dots & \dot{W}[0] \\ \dot{W}[0] & \dot{W}[1] & \dots & \dot{W}[N-1] \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \dot{W}[0] & \dot{W}[N-1] & \dots & \dot{W}[(N-1)(N-1)] \end{bmatrix} ,$$

де $\dot{W}[s] = \exp(-2\pi \cdot i \cdot s / N)$.

Для двовимірного дискретного перетворення Фур'є цілком зберігаються усі властивості безупинного двовимірного перетворення Фур'є: властивості лінійності, функціональні властивості, інваріантність до зрушення модуля спектра, теорема про згортку, теорема Парсеваля і т.д.

Хоча в перетворенні Фур'є багато корисних властивостей, у нього є і два істотних недоліки: по-перше, всі обчислення приходиться проводити не з дійсними, а з комплексними числами, і по-друге, ряди сходяться повільно, що приводить до появи в спектрі великих складових з високими просторовими частотами. Поява цих складових, у свою чергу, обумовлена стрибками зображення при переходах від правого краю до лівого і від верхнього до нижнього [3, 8, 13].

2.5.2. Властивості двовимірного перетворення Фур'є

Функціональні властивості. Якщо функція $F(x,y)$ роздільна по просторових координатах так що, $F(x,y)=f_x(x,y)f_y(x,y)$, то її спектр є роздільним по просторових координатах $Z(w_x,w_y) = z_x(w_x,w_y) \cdot z_y(w_x,w_y)$, де $z_x(w_x,w_y)$, $z_y(w_x,w_y)$ - одновимірні Фур'є - спектри функцій $f_x(x,y)$, $f_y(x,y)$. Якщо $Z(w_x,w_y) \in$ Фур'є - спектр функції $F(x,y)$, то $Z^*(w_x,w_y) \in$ Фур'є - спектром функції $F^*(x,y)$. (Зірочка позначає комплексну спряженість.)

Лінійність. Оператор перетворення Фур'є є лінійним: $Q_F\{aF_1(x,y)+bF_2(x,y)\}=aF_1(w_x,w_y) + bF_2(w_x,w_y)$, де a, b - постійні.

Зміна масштабу. Зміна масштабу просторових змінних приводить до зворотної зміни масштабу просторових частот і пропорційних змін значень спектра

$$Q_F\{F(a \cdot x, b \cdot y)\}=Z(w_x/a, w_y/b)/|a \cdot b|.$$

Отже, стиск уздовж однієї з осей площини (x,y) приводить до розтягання уздовж відповідної осі частотної площини і навпаки. Відбувається також пропорційна зміна значень спектра.

Зсув. Зсув (зміна координат) на вихідній площині приводить до фазових змін на частотній площині

$$Q_F\{F(x-a, y-b)\}=Z(w_x,w_y) \exp\{-i(w_x \cdot a + w_y \cdot b)\}.$$

Навпаки, зсув на частотній площині викликає фазові зміни вихідної функції

$$Q^{-1}_F\{Z(w_x-a, w_y-b)\}=F(x,y) \exp\{i(w_x \cdot a + w_y \cdot b)\}.$$

Згортка. Фур'є - спектр функції, отриманий у результаті згортки двох функцій, дорівнює добутку спектрів вихідних функцій

$$Q_F\{F(x,y)*H(x,y)\}=Z(w_x,w_y)\cdot H(w_x,w_y).$$

Зворотна теорема стверджує, що

$$Q_F\{F(x,y)\cdot H(x,y)\}=Z(w_x,w_y)*H(w_x,w_y)/(4\pi^2).$$

Теорема Парсеваля. Два представлення енергії зображення - через функцію $F(x,y)$ і її Фур'є - спектр $Z(w_x,w_y)$ - зв'язані в такий спосіб:

$$\iint_{\infty} |F(x,y)|^2 dx dy = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{\infty} |Z(w_x,w_y)|^2 dw_x dw_y.$$

Теорема про спектр автокореляційної функції. Фур'є - спектр двовимірної автокореляційної функції зображення дорівнює квадрату модуля Фур'є - спектра цього зображення

$$Q_F \left\{ \iint_{\infty} F(a,b) \cdot F^*(a-x,b-y) da db \right\} = |Z(w_x,w_y)|^2.$$

У наш час в засобах обробки зображень широко використовується дуже ефективна процедура обчислення згортки (фільтрації) масиву зображення $F(i,j)$ з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Вона складається з наступних етапів [8].

1. Записати масив початкового зображення у верхньому лівому куті нульової матриці J -го порядку F_E . Розмір матриці J повинен бути не меншим за більший розмір масиву зображення. Оскільки для обчислення перетворення Фур'є використовуються швидкі алгоритми з проріджуванням, доцільно обирати J як ступінь двійки. Виконати двовимірне перетворення Фур'є розширеної матриці вихідного зображення

$$Z_E = A_J \cdot F_E \cdot A_J.$$

В масиві Z_E маємо дискретний аналог спектра початкового зображення.

2. Записати матрицю імпульсного відгуку $H(m,n)$ в лівому верхньому куті нульової матриці J -го порядку H_E , причому $J > N$. Виконати двовимірне перетворення Фур'є розширеної матриці імпульсного відгуку

$$H = A_J \cdot H_E \cdot A_J.$$

В масиві H маємо дискретний аналог частотної характеристики фільтра.

3. Виконати скалярне множення

$$Z_I(k,l) = H(k,l) \cdot Z_E(k,l)$$

для всіх $k \in [1, J]$ і $l \in [1, J]$.

В масиві Z_I маємо дискретний аналог спектра обробленого зображення.

4. Зробити зворотне перетворення Фур'є

$$F_{IE} = (A_J)^{-1} \cdot Z_I \cdot (A_J)^{-1}.$$

5. Сформувати шуканий масив обробленого зображення $F_I(i,j)$ з елементів верхнього лівого кута розширеної матриці F_{IE} .

Важливо, щоб порядок J розширених матриць F_E , H_E , Z задовольняв відповідним нерівностям.

Якщо для різних зображень використовується той самий фільтр, тоді другий етап алгоритму (обчислення H) достатньо виконати тільки один раз.

2.6. ВИКОРИСТАННЯ ЛІНІЙНОЇ І ГОМОМОРФНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ УСУНЕННЯ ШУМУ

Зображення може ушкоджуватися шумами і перешкодами різного походження, наприклад шумом відеодатчика і помилками в каналі передачі. Їхній вплив можна мінімізувати, користуючись класичними методами статистичної фільтрації. Інший можливий підхід заснований на використанні евристичних, у тому числі і нелінійних методів просторової фільтрації.

2.6.1. Придушення адитивного шуму за допомогою лінійної фільтрації

Найпростішим засобом придушення адитивного шуму є лінійна фільтрація зашумленого сигналу. Параметри необхідного фільтра (частотну характеристику) звичайно

знаходять, користуючись принципами теорії оптимальної фільтрації. При цьому фільтри є оптимальними в середньому по всіх можливих зображеннях, а не для конкретно оброблюваного зображення. Крім того, для знаходження оптимальних імпульсних характеристик фільтрів потрібно апріорне знання статистичних характеристик сигналу і шуму на зображенні, що в реальних умовах не завжди здійснено. Тому часто застосовують прості згладжувальні фільтри з жорстко заданими імпульсними реакціями. Таке відходження від оптимальності приводить до деякої непередбачуваності результатів згладжування і невиправдано великого дефокусування зображення.

Якщо ж при формуванні імпульсної реакції оптимального фільтра скористатися оцінками статистичних характеристик сигналу і шуму, одержуваними по оброблюваному зображенню, то такий фільтр стає адаптивним (тим, який самостійно прилаштовується) до конкретного зображення. Однак слід зазначити, що одержання гарної оцінки статистичних характеристик стає дуже проблемним при малому числі елементів у зображенні чи при нестационарності характеристик у різних ділянках зображення.

Частотна характеристика оптимального адаптивного лінійного фільтра визначається співвідношенням

$$G^2(u,v) = (\langle \{F^2(u,v)\} \rangle - \{E(u,v)\}) / \langle \{F(u,v)\} \rangle, \quad (2.16)$$

де $F(u,v)$ - відліки спектра зображення, що спостерігається; $E(u,v)$ - відліки спектра реалізації шуму на зображенні; $G(u,v)$ - відліки частотної характеристики оптимального фільтра; $\langle * \rangle$ - означає усереднення по об'єктах на зображенні (при деталізації); $\{ * \}$ - означає усереднення по ансамблі шуму [13].

У цій формулі в чисельнику усереднення спектральних коефіцієнтів шуму по параметрах об'єктів на зображенні не здійснюється, тому що шум звичайно не залежить від сигналу. Спектральна щільність потужності шуму однакова для всіх об'єктів. Формула (2.16) припускає, що спектральна щільність потужності шуму відома. Якщо ж вона не відома, то її варто

оцінити, користуючись розглянутими нижче в параграфі 2.7 методами.

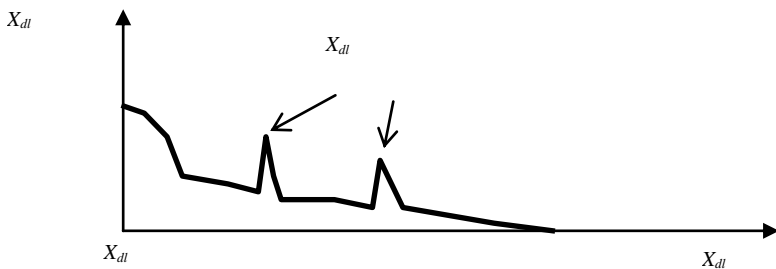
Усереднення по параметрах об'єктів $\langle * \rangle$ спектра оброблюваного зображення $F(u,v)$ має сенс лише тоді, коли площа об'єктів мала в порівнянні з площею зображення. У цьому випадку можна думати, що

$$\langle \{|F^2(u,v)|\} \rangle = \{|F^2(u,v)|\} + D^2,$$

де D^2 - величина, рівна відношенню площі об'єктів до площі зображення.

Усереднення спектра $F(u,v)$ по реалізаціях шуму можна виконати двома способами: або прямо усереднюючі спектри, отримані при різних реалізаціях шуму (якщо такі існують), або згладжуючи спектр одним з розглянутих раніше методів [13].

Одним із практично важливих випадків, коли спосіб лінійної фільтрації дає гарні результати, є фільтрація сильно корельованого (вузькосмугового) шуму. Прикладом вузькосмугового шуму можуть служити періодичні перешкоди у виді різного роду сіток. Фільтр, побудований по алгоритму (2.16) для придушення вузькосмугової перешкоди, буде пропускати ті компоненти спектра $F(u,v)$, де інтенсивність перешкоди дорівнює нулю, і значно послабляти ті компоненти спектра, де інтенсивність перешкоди велика (рис.2.27.).



a)

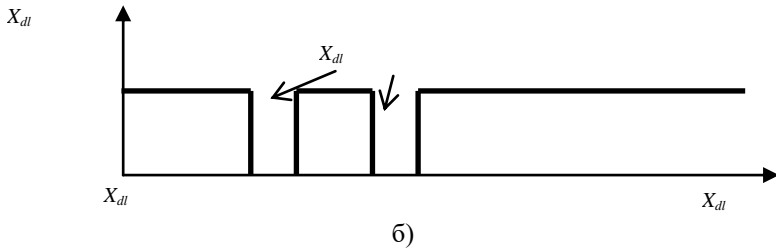


Рис.2.27. Ослаблення вузькосмугової перешкоди: а) спектр зображення, що спостерігається; б) частотна характеристика фільтра

При великій інтенсивності окремих компонентів шуму $X(u, v)$ у порівнянні із сигналом фільтр (1) добре апроксимується режекторним фільтром:

$$G(u, v) = \begin{cases} 1, \{E(u, v)\}^2 = 0; \\ 0, \{E(u, v)\}^2 = \langle F^2(u, v) \rangle. \end{cases}$$

Режекторний фільтр ще простіший в обчислювальному відношенні. При режекторній фільтрації спектральні компоненти сигналу з "відбракованими" на етапі виявлення номерами (u, v) просто прирівнюються нулю. Інший варіант передбачає обчислення окремих відзначених при виявленні компонентів сигналу і віднімання їх із сигналу.

При режекторній фільтрації особливу увагу слід приділяти боротьбі з крайовими ефектами. Крім того, наявність на зображенні дуже контрастних деталей з різкими границями (глибокі тіні) при режекторній фільтрації може привести до появи періодичних викривлень у районі цих границь. У цих випадках приходиться вдаватись до спеціальних заходів для видалення контрастних деталей зі знімків перед фільтрацією і відновленні їх після фільтрації.

Іншим прикладом адитивних перешкод із зосередженим спектром, що добре піддається лінійній фільтрації, є перешкоди типу смуг і нерівномірності фону у виді великих ділянок із плавно змінюваною яскравістю. Їхній дискретний спектр Фур'є зосереджений в області дуже низьких просторових частот.

Придушення цих перешкод доцільно робити обробкою не в спектральній області, а за допомогою дворазової цифрової фільтрації сигналу одновимірними рекурсивними фільтрами по наступних формулах:

$$F_1(j, i) = F(j, i) - \frac{1}{2N_1 + 1} \sum_{m=-N_1}^{N_1} F(j + m, i) + F_s;$$

$$F_2(j, i) = F_1(j, i) - \frac{1}{2N_2 + 1} \sum_{n=-N_2}^{N_2} F_1(j, i + n) + F_s,$$

де F_s - константа, рівна половині максимального значення відеосигналу, що використовується як оцінка невідомого середнього по кадру значення сигналу. Частотна характеристика такого фільтра показана на рис.2.28

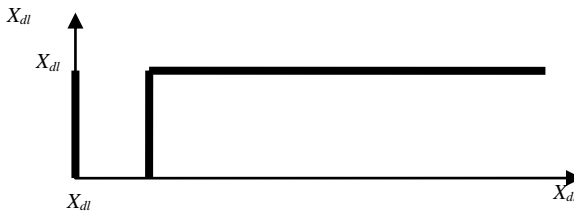


Рис.2.28. Частотна характеристика фільтра для придушення плям

Кожний з одновимірних фільтрів придушує смуги у відповідному напрямку. При цьому параметри $N1$ і $N2$ вибираються відповідно до розміру плями фону інтерактивно. Недоліком цього методу в порівнянні з частотною фільтрацією є труднощі автоматичного визначення параметрів $N1$ і $N2$.

Якщо потрібно придушувати тільки тонкі лінії, доцільно застосовувати інший метод фільтрації в просторовій області, що допускає автоматичне переналаштування параметрів:

$$F'[j, i] = F[j, i] - (S[i] - S_{oc}[i]), \quad (2.17)$$

де $S[i]$ - середнє значення сигналу уздовж рядка k (напрямок рядків збігається з напрямком смуг) (рис.2.29); $S_{oc}[i]$ - оцінка цього середнього значення.

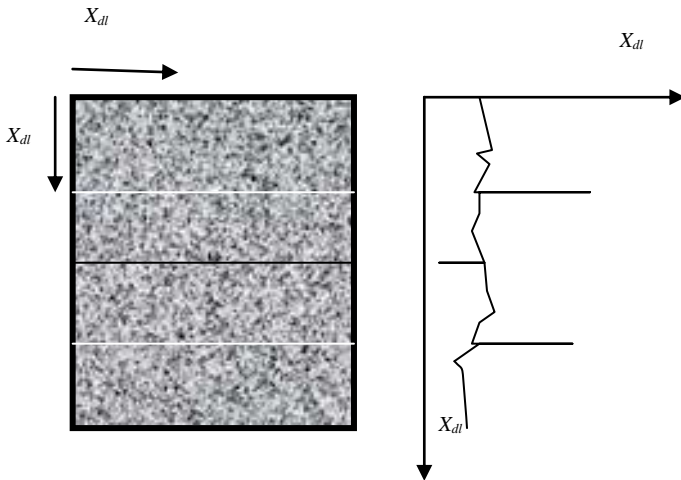


Рис.2.29. Виявлення тонких ліній на зображенні

На тих рядках, де виявлений викид,

$$S_{oc}[i] = (S[i-1] + S[i+1]) / 2.$$

На тих рядках, де викид не виявлений, $S_{oc}[i] = S[i-1]$.

Для видалення вертикальних і горизонтальних смуг фільтр застосовується двічі: по вертикалі і по горизонталі.

2.6.2. Придушення мультиплікативного шуму за допомогою гомоморфної фільтрації

Якщо зображення уражене мультиплікативною перешкодою, його доцільно реставрувати методом гомоморфної фільтрації [8], суть якого ілюструється на рис.2.30.

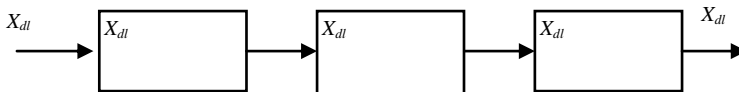


Рис.2.30. Реставрація зображень за допомогою гомоморфної фільтрації

Нехай масив відліків зображення, що спостерігається, $F[i,j]$ виходить як результат множення масиву відліків ідеального зображення $F_0[i,j]$ на масив $E[i,j]$

$$F[i,j]=F_0[i,j] \cdot E[i,j]. \quad (2.18)$$

Масив $E[i,j]$ може описувати мультиплікативний шум, наприклад, нерівномірність висвітлення по поля (нерівномірну по поля контрастність). Логарифмування співвідношення (2.18) приводить до адитивних перешкод

$$\log(F[i,j]) = \log(F_0[i,j]) + \log(E[i,j]). \quad (2.19)$$

Оцінку логарифма $F_0[i,j]$ можна знайти, користуючись звичайними методами лінійної фільтрації. Наступне антилогарифмування дає оцінку ідеального зображення.

Варто враховувати, що для успішного усунення мультиплікативної перешкоди необхідно спочатку придушити адитивні перешкоди.

2.7. ВИМІР ШУМУ НА ЗОБРАЖЕННЯХ

2.7.1. Принципи оцінки параметрів перешкод

Задача виміру параметрів випадкових перешкод при обробці зображень звичайно виникає при корекції перекручувань цих сигналів у системах, що зображують. Знання цих параметрів необхідно для побудови відповідних коригувальних перетворень. Іноді потрібні дані можна одержати, знаючи конструктивні характеристики відповідних систем, наприклад відношення сигнал, параметри зернистості фотоматеріалів при відомих умовах експонування і фотохімічної обробки і т.п. Але найчастіше на практиці такі дані відсутні, і параметри перешкод і перекручувань приходиться визначати безпосередньо по вже перекрученому сигналу.

Опишемо два просто реалізованих при цифровій обробці й у той же час досить універсальних методи виявлення, засновані на загальній апріорній передумові про гладкість характеристик неспотвореного сигналу: «передбачення» і «голосування» [13].

Метод «передбачення» полягає в тому, що для кожного даного елемента аналізованої послідовності знаходиться відмінність його значення від значення, передбачуваного по попередніх вже обстежених елементах. Якщо відмінність перевищує деякий заданий поріг, приймається рішення про наявність аномального викиду. Глибина передбачення, спосіб визначення передбачуваного значення і поріг повинні при цьому задаватися апіорі для даного класу сигналів.

Метод «голосування» є узагальненням відомого методу медіанного згладжування і варіантом рангових алгоритмів виявлення. Він полягає в тому, що кожен елемент аналізованої послідовності розглядається одночасно з деякою кількістю $2n$ його найближчих сусідніх елементів. Ця вибірка з $2n+1$ значень упорядковується по зростанню чи убутанню і перевіряється, чи не потрапило значення даного елемента в задане число k крайніх (тобто найбільших чи найменших) значень упорядкованої вибірки. При позитивній відповіді приймається рішення про наявність аномального великого (чи, відповідно, малого) значення в даному елементі. Метод "голосування" заснований на припущенні, що "нормальна" аналізована характеристика, як правило, локально монотонна, і відхилення від локальної монотонності, якщо вони є, невеликі.

2.7.2. Оцінка параметрів адитивного незалежного від сигналу флукуаційного широкосмугового шуму на зображенні

Найважливішою характеристикою адитивного і статистично незалежного від сигналу флукуаційного шуму є його стандартне відхилення і кореляційна функція. Якщо, як це часто буває, шум є некорельованим чи слабо корельованим, для визначення його дисперсії і кореляційної функції можна побудувати наступний простий алгоритм, заснований на вимірі аномалій у коваріаційній функції зображення, що спостерігається.

Завдяки адитивності і незалежності шуму коваріаційна функція $C_n(x,y)$, обмірювана по Q зображеннях, що спостерігаються є сумою коваріаційної функції незашумленого зображення $C_o(x,y)$, коваріаційної функції шуму $C_{ш}(x,y)$ і реалізації деякого випадкового процесу $\varepsilon(x,y)$, що характеризує помилку виміру коваріаційної функції шуму по його реалізації кінцевих розмірів :

$$C_n(x,y) = C_o(x,y) + C_{ш}(x,y) + \varepsilon(x,y). \quad (2.20)$$

Як відомо, дисперсія випадкового процесу обернено пропорційна обсягу вибірки, по якій здійснювався вимір $C_n(x,y)$. Цей обсяг звичайно перевищує сотні тисяч відліків. Тому випадкова помилка $\varepsilon(x,y)$ у (2.20) мала, так що $C_{ш}(x,y)$ можна оцінити як $C_{ш}(x,y) = C_n(x,y) - C_o(x,y)$.

Розглянемо спочатку випадок некорельованого шуму, коли

$$C_{ш}(x,y) = \sigma^2 \delta(x,y),$$

де σ^2 - дисперсія шуму; $\delta(x,y)$ - дельта-функція.

У цьому випадку коваріаційна функція зображення, що спостерігається, відрізняється від коваріаційної функції незашумленого зображення тільки на початку координат $(0,0)$, і ця відмінність дорівнює дисперсії шуму

$$\sigma^2 = C_n(0,0) - C_o(0,0).$$

Для всіх інших значень величина $C_n(x,y)$ може служити оцінкою $C_o(x,y)$, тобто $C_n(x,y) \approx C_o(x,y)$.

Як показують виміри кореляційних функцій зображень, поблизу початку координат $(x=0, y=0)$ вони є дуже повільно мінливими функціями x і y . Тому величину $C_o(0,0)$, необхідну для обчислення дисперсії некорельованого шуму, можна з високою точністю оцінити екстраполяцією за значеннями $C_n(x,y) \approx C_o(x,y)$ у точках (x,y) поблизу нуля. Таким чином, для визначення дисперсії адитивного некорельованого шуму на зображенні досить виміряти коваріаційну функцію $C_n(x,y)$ зображення, що спостерігається, у малому околі поблизу точки $(0,0)$, знайти екстраполяцією оцінку $C_\varepsilon(0,0)$ величини $C_o(0,0)$ і застосувати як оцінку дисперсії величину

$$\sigma^2 = C_n(0,0) - C_\varepsilon(0,0).$$

Експерименти показують, що гарна оцінка виходить навіть при екстраполяції по одномірних перетинах коваріаційної функції [13].

Подібний підхід можна використовувати і для оцінки дисперсії і коваріаційної функції слабко корельованого шуму, тобто шуму з функцією коваріації $C_{Ш}(x,y)$, відмінної від нуля лише в невеликій області поблизу початку координат, де значення коваріаційної функції незашумленого зображення можна задовільно екстраполювати за значеннями $C_H(x,y)$ у тих точках, де $C_{Ш}(x,y)$ свідомо дорівнює нулю. Зразкові розміри області, у межах якої зосереджені ненульові значення $C_{Ш}(x,y)$, і гладкість $C_H(x,y)$ в околі цієї області вибираються апріорно.

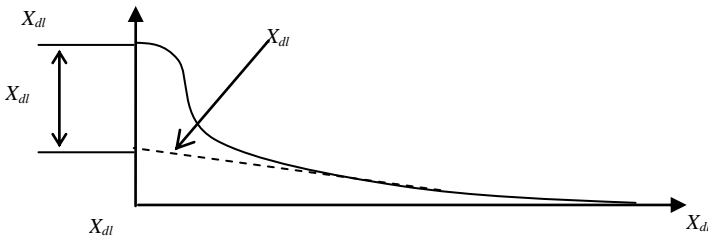


Рис. 2.31. Коваріаційна функція реального зображення

Для ілюстрації на рис.2.31 показана в напівлогарифмічному масштабі коваріаційна функція реального зображення. На графіку добре помітний злам коваріаційної функції і штриховою лінією дані значення коваріаційної функції зображення поблизу нуля, отримані шляхом екстраполяції по інших точках. Унизу на цьому малюнку приведена різниця вихідної й екстрапольованої функцій, що служить оцінкою коваріаційної функції шуму на зображенні.

2.7.3. Оцінка інтенсивності і частоти гармонійних складових періодичних та інших вузькосмугових перешкод

Періодичні (муарові) перешкоди виникають найчастіше в телевізійних і фототелевізійних системах з передачею

відеосигналу по радіоканалу. Іноді вони з'являються внаслідок дискретизації зображень, що містять деталі з високочастотними періодичними структурами, чи як інтерференційні ефекти для зображень, одержуваних у когерентно-оптичних системах.

Характерною рисою таких перешкод є те, що їхній спектр у базисі Фур'є містить тільки невелике число помітно відмінних від нуля компонентів. У той же час просторовий спектр "незашумлених" зображень у базисі Фур'є і ряді інших базисів (наприклад, у базисах Уолша, косинусного перетворення) є звичайно більш-менш гладкою і монотонною функцією. Тому наявність вузькосмугового шуму виявляється у виді аномально великих і локалізованих відхилень, чи викидів, у спектрі викривлених зображень (рис.2.32.). Розташування цих

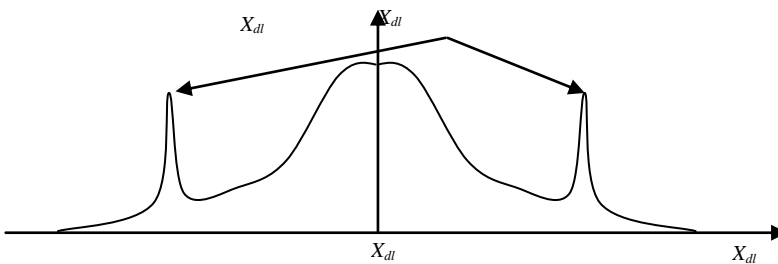


Рис.2.32. Перетин модуля спектра зображення, ураженого вузькосмуговою перешкодою

викидів на відміну від розглянутого вище випадку флуктуаційного шуму, що давав викиди кореляційної функції в нулі, у даному випадку звичайно не відомо. Локалізувати викиди можна, застосовуючи описані вище методи передбачення чи "голосування".

Для цього усередненням по всіх зображеннях, що спостерігаються, з однотипними періодичними перешкодами знаходиться середнє значення квадрата модуля спектральних компонентів "зашумленого" сигналу $\langle |Z_H(u,v)|^2 \rangle$ по обраному базису. Якщо здійснюється одномірна фільтрація, наприклад уздовж рядків зображення, то й усереднення може здійснюватися по всіх рядках зображення, що підлягають

фільтрації. Потім методами "голосування" чи передбачення здійснюється виявлення локалізованих компонент шуму. Тобто відзначаються ті спектральні компоненти $\langle |Z_H(u,v)|^2 \rangle$ сигналу, що спостерігається, які перекручені шумом.

У силу адитивності шуму величини $\langle |Z_H(u,v)|^2 \rangle$, дорівнюють сумі інтенсивності спектральних компонентів "незашумленого" сигналу $\langle |Z_O(u,v)|^2 \rangle$ і шуму $\langle |Z_{Ш}(u,v)|^2 \rangle$.

Отже, $\langle |Z_{Ш}(u,v)|^2 \rangle = \langle |Z_H(u,v)|^2 \rangle - \langle |Z_O(u,v)|^2 \rangle$.

Використовуючи апріорну гладкість спектра "незашумленого" сигналу, необхідні значення $\langle |Z_O(u,v)|^2 \rangle$ можна знайти інтерполяцією по найближчих до точки (u,v) не відзначених як перекручені шумом значення $\langle |Z_H(u,v)|^2 \rangle$.

2.7.4. Оцінка параметрів імпульсного шуму, шуму квантування і смугастості

Основною статистичною характеристикою імпульсного шуму є ймовірність перекручування відліків сигналу. Цю ймовірність можна оцінити, підрахувавши відносну кількість елементів зображення, викривлених викидами шуму. Для виявлення викидів шуму можуть бути використані описані методи передбачення і "голосування", якщо застосовувати їх для аналізу послідовності значень найбільш "зашумленого" відеосигналу в невеликому околі даного зображення. Таким чином, оцінка параметрів імпульсного шуму сполучається з процедурою його фільтрації.

Шум квантування визначається числом рівнів квантування сигналу. Для визначення числа рівнів квантування сигналу досить побудувати гістограму розподілу його значень і підрахувати кількість значень сигналу, для яких гістограма відмінна від нуля. У такий же спосіб, виявляючи методами передбачення чи "голосування" провали в гістограмі, побудованій по досить великому наборі зображень, і вимірюючи їхню глибину, можна оцінити ймовірність характерних для деяких цифрових систем збоїв окремих рівнів квантування.

Перешкоди типу смуг на зображеннях являють собою звичайно випадкові викиди середнього значення відеосигналу, обчисленого в напрямку смуг. Перешкоди такого типу характерні для багатьох видів зображувальних систем з рядковим скануванням. Природною характеристикою зображень, по аномальних викидах якої можна виміряти параметри такого шуму, є послідовність середніх значень відеосигналу в напрямку уздовж смуг, наприклад послідовність середніх значень уздовж рядків розгортки, знайдених для кожного рядка, якщо смуги розташовані уздовж рядків. Знайти і виміряти аномальні викиди можна також методами передбачення і "голосування", опираючись на припущення, що на невикривленому зображенні середні значення відеосигналу уздовж рядків від рядка до рядка не можуть зазнавати значних змін.

На закінчення відзначимо, що описані методи діагностики перекручувань сигналів опираються на апріорні припущення про "нормальне" поведіння тих чи інших характеристик сигналу. Це поведіння необхідно вивчати окремо для різних видів сигналів. У даний час кількісні дані про "нормальні" характеристики зображень як сигналів ще недостатні.

2.8. УСУНЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕШКОД І ЗБОЇВ

Дія імпульсних перешкод позначається не на всьому зображенні, а у випадково розташованих точках чи ділянках зображення, де значення сигналу замінюються випадковою величиною. До цього ж класу відносяться так звані збої, що приводять до того, що на окремих ділянках сигнал зображення пропадає і замість справжнього значення спостерігається інше, обумовлене причиною збою: подряпиною емульсії фотоматеріалу, збоями радіоканалу чи спеціальними службовими мітками, внесеними конструкцією датчика. Тому будь-який алгоритм фільтрації таких перешкод складається з

двох етапів: виявлення викидів шуму і виправлення перекручених відліків сигналів.

2.8.1. Алгоритм виявлення збоїв

У системах для аерокосмічного знімання іноді передбачається експонування зображення через спеціальні маски, що містять непрозорі реперні марки у вигляді перехресть. Ці марки використовуються для геометричного калібрування зображень. Однією з задач автоматичної обробки зображень є виявлення і виділення цих марок. Оскільки марки і збійні ділянки зображення являють собою малорозмірні контрастні об'єкти, їхнє виявлення можливе за допомогою спрощеного фільтра

$$F_1(i, j) = F(i, j) - \frac{1}{(2N+1)(2M+1)} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} F(i-n, j-m). \quad (2.21)$$

Такий фільтр придушує нижні просторові частоти зображення.

Параметри N і M (розміри апертури) можна підібрати так, щоб апроксимувати частотну характеристику оптимального фільтра, налаштованого на виявлення об'єктів з рівномірним спектром. Практично виявляється, що N і M варто вибирати порядку половини розміру виділюваних марок і збійних ділянок зображення. Таке наближення в принципі знижує надійність виявлення, але зате дає можливість шляхом простого порівняння сигналу на виході фільтра з порогом виділяти марки і збійні ділянки практично без перекручування їхньої форми.

2.8.2. Ітеративний та рекурсивний алгоритми фільтрації імпульсних перешкод

Імпульсні перешкоди являють собою об'єкти розміром в один елемент зображення. Тому для їхнього виявлення може бути використаний фільтр (2.21) з $N=M=1$ [13]. Якщо сигнал на

виході такого фільтра перевищує по модулю деякий заданий поріг Δ , то приймається рішення про наявність викиду шуму. Усі виявлені в такий спосіб перекручені відліки зображення відзначаються, після чого вони виправляються шляхом заміни значеннями, усередненими по сусідніх відліках.

Відліки сигналу зображення, які попадають в апертуру фільтра (2.21) та використовуються при виявленні збоїв, у свою чергу можуть бути перекручені. Тому алгоритм фільтрації повинний бути ітеративним зі зниженням порога виявлення в процесі ітерацій. Таким чином, фільтрація імпульсних перешкод відповідно до цього алгоритму здійснюється за кілька ітерацій. Кожна ітерація здійснюється за два проходи по зображенню: один - для виявлення викидів шуму, другий - для виправлення виявлених перекручених відліків. Експерименти показують, що досить не більше трьох-чотирьох ітерацій.

Ітеративний алгоритм фільтрації імпульсних перешкод має досить високу ефективність фільтрації. Але він дуже складний, тому що він вимагає декількох проходів по зображенню. Його можна спростити і здійснювати фільтрацію за один прохід. Для цього у фільтрі для обчислення локального середнього використовуються не всі вісім сусідніх відліків зображення, а тільки вже оброблені чотири відліки, які передують поточному при русі вікна ліворуч-праворуч і зверху вниз (рис.2.33.).

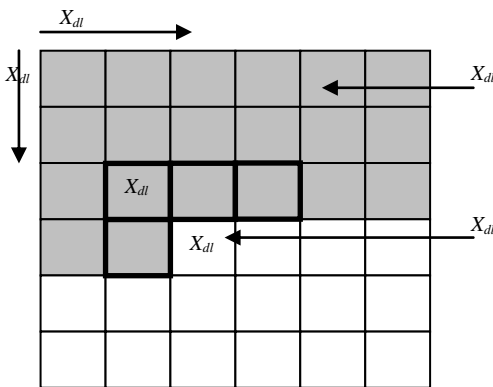


Рис.2.33. Вікно фільтра виявлення для рекурсивного алгоритму

У результаті приходимо до виявлення викидів шуму методом передбачення. Побудований на цьому методі рекурсивний алгоритм фільтрації можна описати наступним співвідношенням:

$$A(i, j) = \begin{cases} F(i, j), & \text{если } |\delta| < \Delta_1, \\ F_{CP}(i, j) + \Delta_2 \text{sign}(\Delta), & \text{если } |\delta| \geq \Delta_1. \end{cases}$$

де $\delta = A(i, j) - F_{CP}(i, j)$,
 $F_{CP}(i, j) = [F(i-1, j) + F(i-1, j-1) + F(i, j-1) + F(i+1, j-1)]/4$.

Поріг виявлення Δ_1 визначається дисперсією помилки передбачення значення відеосигналу по околі $d(k, l) = F(k, l) - F_{CP}(k, l)$ і ймовірністю появи імпульсних перешкод на елемент зображення. Звичайно ці параметри заздалегідь не відомі. Однак їх і величину Δ_1 можна оцінити по зображенню, що спостерігається, вимірявши гістограму розподілу значень модуля різницевого сигналу $d(k, l)$ по неопрацьованому зображенню.

Ця гістограма звичайно має дві ділянки: швидко спадаюча ділянка і ділянка, де значення гістограми міняються значно повільніше (рис.2.34).

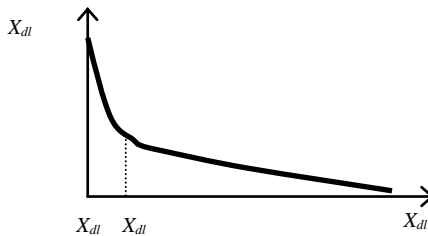


Рис.2.34. Гістограма розподілу модуля різницевого сигналу

Вузька, швидко спадаюча ділянка визначається природними змінами сигналу. Повільна, спадаюча майже по прямій ділянка гістограми зобов'язана своїм походженням імпульсним перешкодам. Тому координата границі між цими ділянками (злам гістограми) є гарною оцінкою порога Δ_1 .

Поріг Δ_2 уводиться для того, щоб забезпечити стійкість алгоритму і вибирається рівним 3-4% від розмаху значень сигналу.

2.8.3. Згладжування імпульсних перешкод ранговими алгоритмами

Вище було відмічено, що алгоритми згладжування імпульсних перешкод повинні бути двопроходовими, з розміткою перекручених елементів на першому проході й оцінкою їхніх згладжених значень на другому проході. Але все ж можна зробити алгоритм однопрохідним, сполучаючи операції виявлення й оцінювання в одному проході [13].

Розмітка елементів зображення на перекручені шумом і неспотворені (виявлення викидів) може бути виконана на підставі перевірки гіпотези про приналежність центрального елемента вікна статистично тій же вибірці, що і більшість інших елементів вікна. Це досить типова задача математичної статистики, і для її рішення звичайно рекомендуються алгоритми, засновані на рангових статистиках (рангові алгоритми виявлення).

Найбільш простим способом перевірки гіпотези про приналежність центрального елемента вікна до вибірки з більшості інших елементів вікна є голосування, тобто перевірка влучення рангу $R_s(F(i,j))$ у так названу ε_r - околицю медіани.

ε_r - околиця задається в залежності від імовірності появи імпульсних перешкод на елемент зображення: якщо $|R_s(F(i,j)) - (N_s+1)/2| < \varepsilon_r$, те приймається рішення про відсутність перешкоди, у противному випадку елемент (i,j) позначається як перекручений перешкодою (рис.2.35).

Такий спосіб виявлення перешкоди припускає, що імпульсна перешкода, як правило, приймає екстремальні значення.

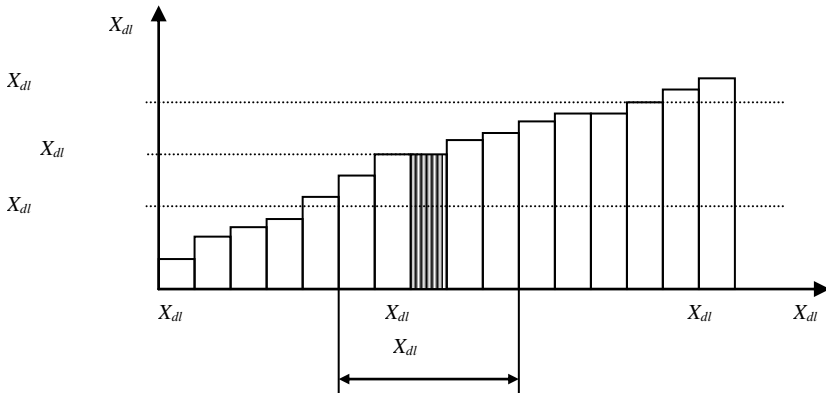


Рис.2.35. Варіаційний ряд з порогамі виявлення по ε_r і ε_v -околах

Перевірку гіпотези про наявність чи відсутність викиду перешкоди в центральному елементі вікна можна робити також шляхом порівняння не по його рангу, а по його значенню. Наприклад, критерієм може служити знак різниці

$$\Delta = \varepsilon_v - |F(i,j) - SMTH(F(i,j))|,$$

де $SMTH(F(i,j))$ - згладжене значення $F(i,j)$, отримане одним з алгоритмів згладжування для адитивної моделі, а ε_v підбирається залежно від розподілу значень перешкоди і розкиду значень самого сигналу. Цей спосіб краще погоджений з особливостями зображень, оскільки значення сигналу яскравості в геометрично сусідніх елементах звичайно мають близькі значення. Як алгоритм згладжування може бути застосований, наприклад, алгоритм медіанної фільтрації:

$$SMTH(F(i,j)) = MED(S).$$

Поріг ε_v може бути обраний відразу для всього зображення, але його можна й адаптивно підлагоджувати залежно від локального розкиду значень сигналу.

Як оцінку локального розкиду можна використовувати квазірозкид по ε_r -околу:

$$QDISP = V_s((N_s+1)/2 + \varepsilon_r) - V_s((N_s+1)/2 - \varepsilon_r),$$

де $V_s(r)$ - значення елемента варіаційного ряду з номером r .

Така оцінка є стійкою до виду розподілу.

Після етапу виявлення елементи зображення, які відзначені як викиди імпульсного шуму, повинні бути замінені їх оцінкою.

Як оцінку можна використовувати значення, отримані за допомогою згладжування по околу цих елементів. Причому з цього околу повинні виключатися елементи, які були відзначені при виявленні викидів шуму.

Характерними помилками при згладжуванні імпульсних перешкод є помилки хибного виявлення і помилки пропуску. Помилки хибного виявлення приводять до небажаного згладжування деталей зображення. Помилки пропуску приводять до того, що на зображенні залишаються незгладжені викиди перешкоди. Частка цих помилок залежить від порогів виявлення: зі збільшенням порогів частка помилкових виявлень падає, а частка пропусків зростає.

Варто враховувати, що число помилкових виявлень і пропусків зростає також через можливу наявність у вікні не одного, а декількох великих викидів перешкод. Тому для підвищення якості згладжування імпульсних перешкод його доцільно проводити ітеративно, починаючи з великих значень порогів, і в міру видалення великих викидів перешкоди знижувати порогові на кожному кроці ітерації.

2.8.4. Алгоритм “згладжування залишку”

Більш складний ранговий алгоритм придушення шумів використаний у фільтрі «згладжування залишку» [7].

Фільтр «згладжування залишку» використовується для поліпшення зображення, для якого яскравість пікселя $F(i,j)$ може бути представлена у вигляді $F(i,j) = S(i,j) + N(i,j)$, де $S(i,j)$ – відносно повільно мінливий сигнал; $N(i,j)$ – шум.

Оскільки сигнал міняється повільно, то його оцінку в першому наближенні можна представити у вигляді:

$$F_1(i,j) = MED_k(F(i,j)) \approx S(i,j),$$

де $MED_k(F(i,j))$ – результат медіанної фільтрації у вікні $K \times K$ елементів ($K > 3$ – розмір апертури).

Залишок

$$R(i,j) = F(i,j) - MED_k(F(i,j))$$

виділяє дрібні об'єкти та шум відносно фону.

Для придушення шумового компонента в $R(i,j)$ використовуємо медіанну фільтрацію залишку $R(i,j)$ з розміром апертури, рівним 3:

$$Z(i,j) = \text{MED}_3(R(i,j)).$$

Остаточно відновлений сигнал визначається за формулою

$$\begin{aligned} S(i,j) &= F_1(i,j) + Z(i,j) = \\ &= \text{MED}_k(F(i,j)) + \text{MED}_3[F(i,j) - \text{MED}_k(F(i,j))], \end{aligned}$$

а шум

$$N(i,j) = |R(i,j) - Z(i,j)|.$$

Процедура "згладжування залишку" може використовуватися для незалежної оцінки якості системи спостереження по параметру "співвідношення сигнал/шум". Для проведення такої оцінки доцільно використовувати однорідні ланки (морська поверхня, пустеля, сніжний, льодовий чи хмарний покрив). Також процедура може використовуватися для попередньої оцінки якості вихідного зображення при аналізі гістограм, статистичних даних, виділених збійних пікселів і шуму.

2.9. ЗГЛАДЖУВАННЯ ШУМУ АДАПТИВНИМИ АЛГОРИТМАМИ

Одним з найбільш відомих способів обробки є лінійна фільтрація сигналів. Вона знаходить широке застосування при цифровій обробці сигналів, де вона ґрунтується на використанні швидких алгоритмів згортки в частотній площині. Параметри необхідних фільтрів звичайно знаходять, користуючись принципами оптимальної фільтрації, розробленої для середньоквадратичного критерію якості фільтрації. При цьому фільтри є оптимальними в середньому по всіх можливих зображеннях і, отже, не адаптивними.

2.9.1. Поняття про оптимальні адаптивні лінійні фільтри

Сформулюємо критерій якості фільтрації [13]. При цьому будемо вважати, що випадкова природа оброблюваних зображень визначається трьома факторами: шумом датчика відеосигналу, випадковою фоною частиною і випадковими параметрами об'єктів. За міру відмінності результату обробки від «ідеального» зображення будемо використовувати квадратичну міру.

Нехай $F(i,j)$ - (NxN) - мірний масив відліків оброблюваного сигналу;

$F_0(i,j)$ - (NxN) - мірний масив відліків сигналу «ідеального» зображення;

$F_1(i,j)$ - (NxN) - мірний масив відліків сигналу, отриманого в результаті обробки.

Загадаємо, щоб значення квадратів модулів поелементних різниць «ідеального» і обробленого зображень усереднених по ансамблі шуму датчика відеосигналу (горизонтальна лінія), по випадковому фоні (квадратні дужки) і випадкових параметрах об'єктів інтерпретації (кутові дужки) у розрахунку на один відлік сигналу (підсумовування по i,j) було мінімальним. Цей критерій будемо називати *критерієм МСКП*

$$\delta^2 = \left\langle \left[\sum_i \sum_j |F_0(i,j) - F_1(i,j)|^2 \right] \right\rangle. \quad (2.22)$$

При лінійній фільтрації в загальному випадку над оброблюваним сигналом виконується перетворення виду згортки. Лінійна фільтрація в такому виді вимагає N^4 операцій на N^2 відліків оброблених сигналів, що неефективно в обчислювальному відношенні. Тому лінійну фільтрацію зображень проводять у частотній області з використанням перетворення Фур'є.

З урахуванням цих особливостей обчислювальної реалізації лінійної фільтрації критерій якості фільтрації (2.22) можна виразити через відліки спектрів $Z_1(k,l)$, $Z_0(k,l)$ обробленого і «ідеального» сигналів :

$$\delta^2 = \left\langle \left[\sum_i \sum_j |Z_0(k,l) - Z_1(k,l)|^2 \right] \right\rangle. \quad (2.23)$$

Для скалярного лінійного фільтра відліки спектра сигналу $Z_l(k,l)$ на виході фільтра зв'язані з відліками спектра сигналу на вході фільтра $Z(k,l)$ співвідношенням

$$Z_1(k,l) = H(k,l) \cdot Z(k,l), \quad (2.24)$$

де $H(k,l)$ — коефіцієнти, що описують фільтр (відліки дискретної частотної характеристики лінійного фільтра).

Оптимальні значення коефіцієнтів лінійного фільтра, який мінімізує середньоквадратичну помилку фільтрації (2.23), визначаються виразом

$$H(k,l) = \frac{\langle [Z_0(k,l) \cdot Z^*(k,l)] \rangle}{\langle [|Z(k,l)|^2] \rangle}. \quad (2.25)$$

У цю формулу ввійшли всі усереднення по випадкових факторах, закладені в критерій фільтрації (2.22): усереднення по випадковому шумі датчика відеосигналу, по випадкових параметрах об'єктів і по випадковому фону.

Якщо в критерії (2.23) відмовитися від усереднення по випадковому фону, одержимо

$$H(k,l) = \frac{\langle Z_0(k,l) \cdot Z^*(k,l) \rangle}{\langle |Z(k,l)|^2 \rangle}. \quad (2.26)$$

Іншим корисним критерієм оптимізації параметрів лінійних фільтрів є критерій мінімуму середньоквадратичної помилки відновлення енергетичного спектра сигналу в заданому базисі. Будемо називати цей критерій *ВСС-критерієм*.

Оптимальний за цим критерієм коригувальний фільтр буде визначатися співвідношенням

$$H(k,l) = \sqrt{\frac{\langle |Z_0(k,l)|^2 \rangle}{|Z(k,l)|^2}}. \quad (2.27)$$

Для такого фільтра полягає в тому, що він заміняє модуль спектра оброблюваного зображення модулем спектра «ідеального» зображення, усередненого по параметрах об'єктів. Особливістю фільтрів цього типу є те, що їхні характеристики

не залежать від характеристик зображувальної системи, що впливають на енергетичний спектр відеосигналу.

Характеристики фільтрів (2.26) і (2.27) залежать від спектрів оброблюваних зображень. Тому ці фільтри є *адаптивними*. Залежно від глибини усереднення помилки фільтрації в критерії (2.23) фільтри будуть *глобально- або локально-адаптивними*.

Якщо помилка усереднюється по всьому оброблюваному зображенню, у формули (2.26) і (2.27) ввійде енергетичний спектр усього зображення і фільтри будуть глобально-адаптивними. Якщо помилка усереднюється в межах окремих фрагментів зображення, у формули ввійдуть енергетичні спектри відповідних фрагментів, і фільтри будуть локально-адаптивними.

Адаптація до фонові частини зображень — це тільки один аспект бажаної при обробці зображень адаптації. Інший аспект — адаптація до невідомих параметрів перешкод і перекручувань сигналів. Вона припускає автоматичне визначення параметрів перешкод і перекручувань безпосередньо по оброблюваному зображенню.

Формули (2.26) і (2.27) є вихідними для визначення лінійних фільтрів, що адаптуються до фону і перешкод на зображеннях [13].

2.9.2 Загальний підхід до згладжування адитивного шуму адаптивними алгоритмами

Адитивний незалежний шум є звичайно одним з головних видів перекручувань зображень, що виникають у зображувальних системах. Лінійна фільтрація зашумленого сигналу є найбільш відомим способом придушення такого шуму.

Дію на сигнал адитивного незалежного шуму можна виразити співвідношенням

$$Z_1(k,l) = Z_0(k,l) + N(k,l), \quad (2.28)$$

де $N(k,l)$ — відліки спектра реалізації шуму, $Z_0(k,l)$, $Z_1(k,l)$ - відліки спектрів неспотвореного й оброблюваного сигналів.

Характеристика оптимального адаптивного лінійного фільтра, що забезпечує мінімум середньоквадратичної помилки між сигналом на виході фільтра $F_1(i,j)$ і неспотвореним сигналом $F_0(i,j)$, визначається співвідношенням [13]:

$$H(k,l) = \frac{\langle |Z(k,l)|^2 \rangle - \overline{|N(k,l)|^2}}{\langle |Z(k,l)|^2 \rangle}. \quad (2.29)$$

У цій формулі в чисельнику усереднення спектральних коефіцієнтів шуму по параметрах об'єктів на зображеннях не здійснюється, тому що за умовою шум не залежить від сигналу зображення. Величини $|N(k,l)|^2$ є відліками спектральної щільності потужності адитивного шуму. Формула (2.29) записана у виді, який припускає, що *спектральна щільність потужності шуму відома*. Вона може бути відома з конструктивних характеристик зображувальної системи, наприклад з величини відношення сигнал-шум у системі, де ці параметри можна виміряти, користуючись спеціальними тестовими сигналами. У тих випадках, коли вона не відома, її можна оцінити, користуючись відомими методами (див. п.2.7.2.).

Для того, щоб визначити характеристику оптимального фільтра, (2.29) необхідно також визначити спектр оброблюваного зображення $\langle |Z(k,l)|^2 \rangle$ (або його фрагментів при пофрагментній обробці для локальної адаптації), усереднений по випадкових параметрах об'єктів, а також по реалізаціях шуму. Усереднення по параметрах об'єктів мало впливає на енергетичний спектр зображення, що спостерігається, оскільки розподіл зображення на фон й об'єкти інтерпретації має сенс тоді, коли розміри об'єктів по площі малі в порівнянні з площею всього оброблюваного зображення. Тому можна приблизно вважати, що

$$\langle |Z(k,l)|^2 \rangle \approx \overline{|Z(k,l)|^2} + \varepsilon^2,$$

де ε^2 - величина, рівна відношенню площі об'єктів до площі фонового зображення. З урахуванням цього спрощення характеристика оптимального в розумінні МСКП- критерію фільтра визначиться виразом

$$H(k,l) = \frac{|Z(k,l)|^2 + \varepsilon^2 - \overline{|Z(k,l)|^2}}{|Z(k,l)|^2 + \varepsilon^2}. \quad (2.30)$$

Усереднення спектра $|Z(k,l)|^2$ по реалізаціях шуму можна виконати, згладжуючи спектр зображення, що спостерігається, згладжувальним фільтром [13].

2.9.3. Практична реалізація адаптивних фільтрів

На теперішній час адаптивні статистичні фільтри у спрощеному вигляді використовуються для зменшення шумів шляхом згладжування зображень при збереженні чітких границь. На відміну від типового низькочастотного згладжувального фільтра такі адаптивні фільтри зберігають різкість зображення і детальність при придушенні шуму [7].

Локально-статистичні фільтри засновані на припущенні рівності між середнім і дисперсією оброблюваного пікселя та локальним середнім і дисперсією всіх пікселів у межах встановленого користувачем ковзного вікна. У статистичних адаптивних фільтрах у межах вікна обчислюється стандартне відхилення значень яскравості пікселів від значення в центральному пікселі. Яскравість у центральному пікселі замінюється середнім зі значень інших пікселів, якщо стандартне відхилення вище заданого користувачем порога, і не замінюється, якщо відхилення нижче.

Можна припустити, що шуми на знімках мають нормальний розподіл, для якого 95,5% випадкових вибірок перебуває в межах області 2 стандартних відхилень (2-х сигм). Фільтр придушення такого шуму замінює оброблюваний піксел на середнє значень всіх пікселів ковзного вікна тільки за умови, що він попадає в межі заданого діапазону. Варто ввести специфічний для цього зображення коефіцієнт варіації (або СКВ) й установити, скільки

стандартних відхилень потрібно (2, 1 або 0,5) для визначення прийнятого діапазону. Побудований у такий спосіб фільтр називають *сигма-фільтром*.

Параметрами фільтра локальної сигми є розмір апертури фільтра та значення порогу – кількість СКВ (*Sigma Factor*).

У *модальному фільтрі* значення в центрі вікна замінюється на те, що найчастіше зустрічається в межах вікна (відповідне піку або моді локальної гістограми). До цієї групи методів фільтрації відносять спосіб, у якому центральному пікселю привласнюється мінімальне або максимальне значення яскравості у вікні.

Фільтр Квана (Kuan) перетворює спочатку мультиплікативну шумову модель у модель адитивного шуму. Поточний піксел замінюється значенням, яке розраховане на підставі локальної статистики елементів у вікні. Такий фільтр широко використовується при придушенні спекл-шумів на радіолокаційних знімках [7].

Параметрами фільтра Квана є розмір апертури фільтра (*Filter Size*), середнє шуму (*Multiplicative Noise Mean*) та дисперсія шуму (*Noise Variance*).

Фільтри Лі згладжують різнорідні дані з перешкодами адитивного чи мультиплікативного компонента. Цей фільтр подібний фільтру Квана, але використовує іншу вагову функцію.

Перелік параметрів аналогічний описаному для попереднього фільтра. Додатково задаються: шумова модель адитивна, мультиплікативна чи обидві відразу, середні адитивного шуму та окремо мультиплікативного шуму [7].

Фільтр помилки розряду (Bit Error) використовується для видалення шумової помилки, що є звичайно результатом «піків» у даних, викликаних ізольованими пікселами, що мають екстремальне значення, не зв'язане зі сценою зображення. Пікові пікселі замінюються середнім значень сусідніх пікселів [7].

Параметрами фільтра помилки розряду є: розмір апертури фільтра. Поріг у кількості СКВ (*Sigma Factor*); значення допуску (*tolerance*) - пікселі вважаються «поганими», якщо вони мають значення більші, ніж допуск; мінімальні і максимальні

значення, що будуть розглянуті як дані для визначення середнього значення (*Valid Data Min* і *Valid Data Max*).

Піксел класифікується як помилка, якщо значення піксела мінус середнє значення блоку фільтра більше *Sigma Factor* і більше допуску. «Погані» пікселі будуть замінені усередненими значеннями навколишніх пікселів за замовчуванням. Фільтр дозволяє щоб «поганим» пікселам було надане нульове значення (*Zero Bit Errors*) замість заміни їх усередненим значенням.

Фільтри Фроста (Frost) використовуються, щоб зменшити зернистість при збереженні границь у радарних зображеннях. Поточний піксел заміняється значенням, що розраховується на підставі відстані від центра фільтра, коефіцієнта демпфірування і локальної дисперсії[7].

Параметрами фільтра Фроста є: розмір апертури фільтра; коефіцієнт демпфірування (*Damping Factor*) - визначає кількість загасань показової функції і має значення за замовчуванням, рівне 1, якого досить для більшості радарних зображень. При великих значеннях демпфірування зберігаються грані краще, але згладжування менше. А значення демпфірування, рівне 0, приводить до того ж самого результату, що і фільтр низьких частот.

Локально-регіональний фільтр застосовують також для поліпшення радіолокаційних зображень. Він підрозділяє ковзне вікно на вісім складових (регіонів) на підставі їхнього розташування стосовно центрального піксела: північ (Пн), південь (Пд), захід (З), схід (С), ПнЗ, ПнС, ПдЗ, ПдС. На рис. 2.36 показано ковзне вікно розміром 5x5 пікселів і три регіони фільтра.



Рис. 2.36. Локально-регіональна фільтрація

Для кожного регіону розраховуються варіації, далі алгоритм порівнює їхні значення, і оброблюваний центральний піксел заміняється середнім значенням всіх пікселів у межах регіону з найменшою дисперсією, тобто з найбільш однорідними значеннями яскравості. Такий регіон приблизно містить піксели, мінімально піддані впливу з боку інтерференції хвиль і схожі на оброблюваний піксел. У результаті вихідне зображення буде складатися із численних однорідних областей, розмір яких визначається розміром ковзного вікна.

Гамма-фільтр припускає, що дані будуть гамма-розподіленими. Поточний піксел заміняється значенням, обчисленим на підставі локальної статистики [7].

Параметрами гамма-фільтра є: розмір апертури фільтра; число переглядів (*Number of Looks*). Параметр *Number of Looks* використовується для обчислення шумової дисперсії як $1/(\text{число переглядів})$.

2.10. КОРЕКТУВАННЯ ЛІНІЙНИХ ВИКРИВЛЕНЬ

2.10.1. Поняття лінійних викривлень та задача їх коректування

Більшість систем, що створюють зображення, можна, в першому наближенні, розглядати як лінійні, інваріантні до зсуву. Тоді їх можна розглядати як звичайні просторові фільтри. Однією з основних характеристик таких систем є імпульсна реакція чи її перетворення Фур'є - частотна характеристика, яка показує, як у цій системі передаються просторові гармоніки зображення. Ідеальною можна назвати таку систему, яка не змінює просторовий спектр сигналу, тобто систему з рівномірною частотною характеристикою в межах ланки просторових частот, зайнятих спектром зображень. Характеристики реальних оптичних систем, фотографічних, телевізійних відрізняються від ідеальних. У результаті зображення на виході таких систем зазнають перекручувань. Їх називають лінійними перекручуваннями. Найчастіше ці

перекручування полягають у тому, що зображувальна система послабляє верхні просторові частоти зображення. Візуально це приводить до погіршення різкості зображення.

Для оптико-електронних систем зйомки земної поверхні найбільш характерні лінійні перекручування, викликані турбулентністю атмосфери, обмеженнями та аберраціями об'єктива, геометрією фотоприймачів і рухом космічного апарата [7, 8, 9].

Турбулентність атмосфери викликає випадкове дефокусування зображення, яке звичайно моделюється гауссівською моделлю (рис.2.37). Рух космічного апарата-носія викликає лінійні перекручування типу "змазування" - розмивання зображення шляхом зсуву і накладення зображення самого на себе у визначеному напрямку. З огляду на те, що рух космічного апарата можна вважати рівномірним і прямолінійним за час зйомки сцени, модель змазування може бути отримана у виді згортки неспотвореного зображення з прямокутною просторовою функцією, протяжною в напрямку змазування. При

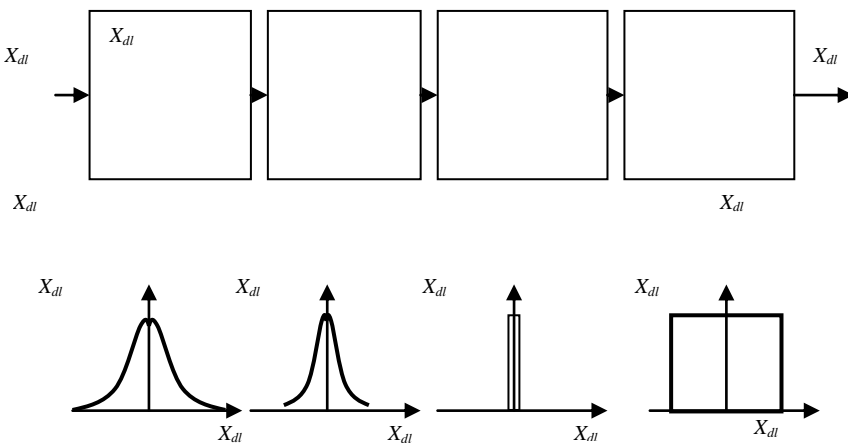


Рис.2.37. Складові оптичної системи, Які впливають на різкість зображення та їх еквівалентні просторові імпульсні відгуки

відсутності шумів задача корекції лінійних перекручувань зводиться до відшукування лінійного фільтра з частотною

характеристикою, яка є зворотною до частотно-контрастної характеристики (ЧКХ) системи. Якщо система послабляє якісь просторові частоти, то відновлювальний фільтр повинен ці частоти підсилювати тим сильніше, чим більше ослаблення.

Однак звичайно сигнал зображення містить шуми. Дія зворотного фільтра може привести до посилення цих шумів, тим більше значному, чим більше необхідна корекція ослаблених спектральних складових зображення. Тому зворотна фільтрація, поліпшуючи якість зображення по одному показнику - різкості, може погіршити його по іншому - зашумленості. Очевидно, існує оптимальний ступінь корекції, коли різкість у достатньому ступені відновлюється, а шум ще не занадто великий [8].

Майже всі методи реставрації зображень засновані на використанні *априорної інформації* про перекручування, внесені в зображення; передбачається, що відомо поелементну характеристику передачі рівнів і просторовий імпульсний відгук. Просторовий імпульсний відгук ще називають *функцією розсіяння точки* (ФРТ). Замість ФРТ можна використовувати ЧКХ, яка пов'язана з ФРТ перетворенням Фур'є [9].

У багатьох випадках така інформація недоступна. Може виявитися, що перекручування або важко виміряти, або воно зазнає непередбачуваних змін в часі. В усіх таких випадках інформацію про перекручування приходиться «витягати» з зображення, що спостерігається, користуючись прямими чи непрямыми методами. Реставрація зображень у таких умовах називається сліпою [8].

Відомі два основних підходи до рішення задачі сліпої реставрації зображень: прямий вимір і непряме оцінювання. Застосовуючи методи першої групи, насамперед оцінюють імпульсний відгук нерізкості і рівень шуму на основі обмірюваних параметрів зображення, що реставрується; отримана інформація використовується потім при реставрації зображення. Методи непрямого оцінювання засновані на процедурі тимчасового чи просторового усереднення, причому одержувані дані використовують або для здійснення реставрації зображення, або для визначення ключових елементів

реставраційного алгоритму. Це дуже складні методи, і в сучасній практиці обробки космічних знімків земної поверхні вони не знайшли широкого застосування. Тому основну увагу в цій книзі приділено методу на основі прямих вимірів.

2.10.2. Цифрове коректування лінійних викривлень

Сліпа реставрація нерізкого зашумленого зображення звичайно пов'язана з виміром імпульсного відгуку нерізкості й енергетичного спектра шуму чи коваріаційної функції зображення, що спостерігається.

Імпульсний відгук нерізкості (ФРТ) звичайно вимірюють, ізолюючи ділянку зображення, що відповідає приблизно відомому об'єкту.

За визначенням, імпульсний відгук є зображення точкового джерела. Отже, будь-який точковий об'єкт зображення, що спостерігається, надає пряму інформацію про імпульсний відгук нерізкості. Найчастіше імпульсний відгук нерізкості може бути апроксимований у вигляді функції Гаусса [9]:

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_x \sigma_y} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{4\sigma_x^2 \sigma_y^2}}, \quad (2.31)$$

де σ_x, σ_y - параметри двовимірного закону Гаусса, які показують ширину ФРТ по рівню 0,606. Функція $F(x,y)$ є роздільною за координатами, тому в подальшому розглядатимемо її в одновимірному випадку

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (2.32)$$

Використовуючи перетворення Фур'є та беручи модуль, отримаємо ЧКХ системи, що спричиняє лінійні викривлення:

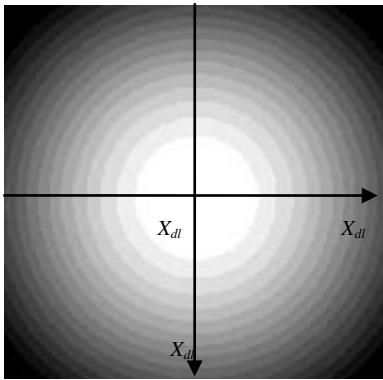
$$H(w_x) = e^{-2\pi^2 w_x^2 \sigma_x^2}. \quad (2.33)$$

Дана формула показує, що ЧКХ гауссівської нерізкості однозначно визначається одним параметром - σ_x . Вираз для нормованої функції розсіювання має вигляд

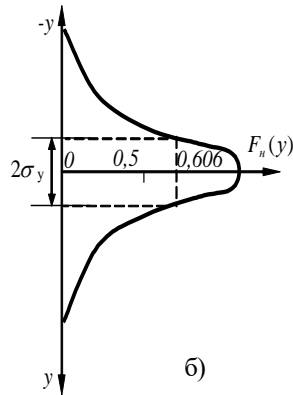
$$F_n(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}}$$

При $x = \sigma_x$ $F_n = e^{-1/2} = 0,606$.

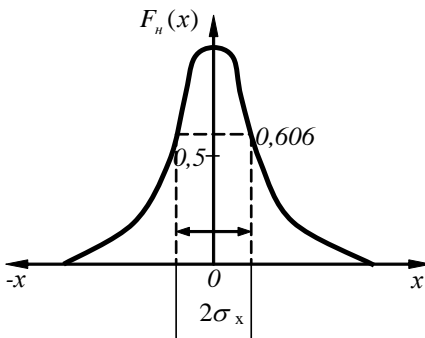
Значення σ можна визначити, якщо відома ФРТ. Як видно з рис.2.38, постійна σ відповідає половині ширини функції розсіювання на рівні 0,606 максимуму [9].



а)



б)



в)

Рис.2.38. Зображення точкового об'єкта (а) і графіки нормованої функції розсіяння точки (ФРТ) по координатах x, y (б,в)

Зображення різкого перепаду яскравості також може бути основою для визначення параметра σ (рис.2.39).

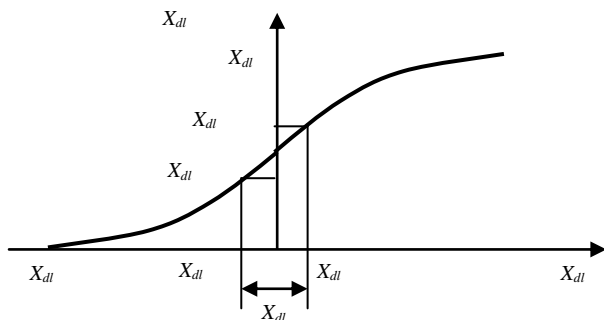
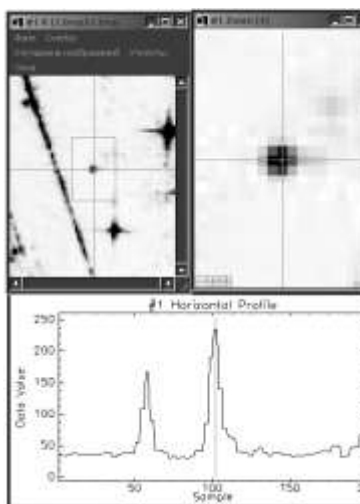
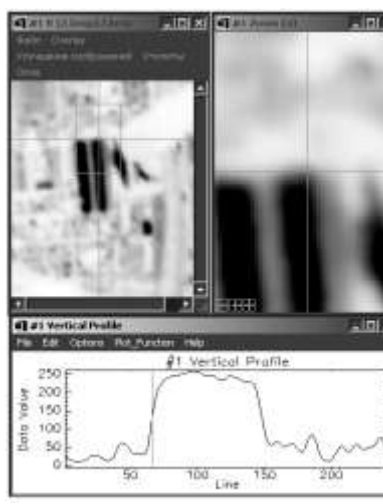


Рис.2.39. Визначення параметра σ гауссівської ФРТ по перепаду яскравості

Усереднення декількох рядків зображення, перпендикулярних напрямку перепаду, забезпечує істотне зниження впливу шуму. Практичне визначення параметра σ в програмному комплексі ENVI [7] показано на рис.2.40.



а)



б)

Рис.2.40. Практичне визначення параметра σ в програмному комплексі ENVI по точковому об'єкту (а) та по перепаду яскравості (б)

Спектральну щільність потужності шуму на зображенні у вигляді двовимірною масиву відліків $P_{ш}(w_x, w_y)$ можна отримати в такий прийом. Обираємо на зображенні ділянку з відносно постійною фоною яскравістю та копіюємо її як окреме зображення. Створюємо пустий масив зображення з такими саме розмірами, як і оброблюване зображення. Заповнюємо цей масив зображеннями обраної ділянки. Арифметичними перетвореннями зменшуємо постійну складову (середню яскравість) створеного зображення до нуля. За допомогою перетворення Фур'є створеного зображення отримаємо масив спектральної щільності потужності шуму.

Будемо усувати лінійні викривлення за допомогою лінійного фільтра, який буде мати частотну характеристику майже зворотну для ЧКХ нерізкості, але він повинен враховувати і наявність шумів. Для створення такого фільтра потрібно знайти його частотну характеристику. Вона повинна знаходитись на основі ЧКХ нерізкості (2.33) та вимірної спектральної щільності потужності шуму. У спрощеному варіанті фільтрації замість спектральної щільності потужності шуму оцінюється і враховується при коригуванні тільки відношення енергії шуму до енергії зображення.

Але спочатку потрібно визначитися, який саме фільтр ми будемо вважати оптимальним: потрібно визначити критерій оптимальності.

Якщо розбіжність відновленого зображення від ідеального оцінювати за середньоквадратичним критерієм, частотна характеристика $H_k(w_x, w_y)$ оптимального відновлювального фільтра визначається по ЧКХ системи, що має корегуватися $H(w_x, w_y) = H(w_x) \cdot H(w_y)$ виразом

$$H_k(w_x, w_y) = \frac{H^*(w_x, w_y)}{|H(w_x, w_y)|^2 + E^2}, \quad (2.34)$$

де * - знак комплексного сполучення; E^2 - виправлення, рівне відношенню енергетичного спектра Фур'є шуму $P_{ш}(w_x, w_y)$ до енергетичного спектра ансамблю зображень $P_c(w_x, w_y)$.

Можливі два способи цифрової реалізації коригувального фільтра: за допомогою обробки дискретного спектра Фур'є з використанням алгоритму ШПФ чи за допомогою цифрових фільтрів. У другому випадку частотна характеристика (2.34) використовується для відшукування імпульсної реакції цифрового фільтра.

Якщо коригувальний фільтр може бути апроксимований роздільним і рекурсивним, то корекція може бути виконана за допомогою простого роздільного рекурсивного цифрового фільтра, що перетворить відліки відеосигналу $F(i, j)$ по формулі

$$F_1(i, j) = F(i, j) + g \cdot \left| F(i, j) - \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F(i+m, j+n) \right|. \quad (2.35)$$

Коефіцієнт підсилення різницевого сигналу g і розміри околу ($M \times N$), по якому здійснюється усереднення, вибираються з умови апроксимації необхідної частотної характеристики коригувального фільтра частотною характеристикою фільтра (2.35).

На рис.2.41 суцільною лінією показаний перетин частотної характеристики системи, що підлягала корекції, а пунктирною лінією частотна характеристика коригувального фільтра (2.35) для $g=4$, $I=J=3$. Крива 3 на цьому рисунку – наскрізна частотна характеристика, що отримана в результаті корекції.

Таким чином, у результаті цифрової корекції смуга пропущення просторових частот за рівнем 0,7 (рівень половинної потужності) збільшилася. Відповідно, високочастотні компоненти зображення (дрібні деталі та різкі напівтонові межі) збільшили свій контраст. Відчуття різкості покращується [8].

Використання для корекції роздільного рекурсивного фільтра виявилось можливим тільки тому, що ЧКХ системи має досить простий вид. Цей фільтр дає не цілком закінчену корекцію. Так, на "середніх" частотах він приводить до деякої перекорекції. Але обробка зображення за допомогою такого фільтра займає в

кілька десятків разів менше часу, чим треба було б при обробці в спектральній області за допомогою алгоритмів ШПФ.

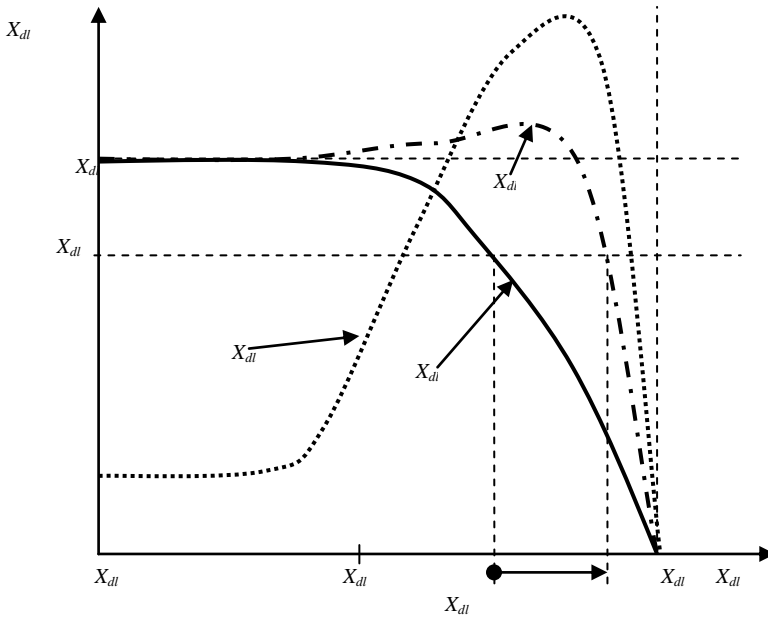


Рис.2.41. Перетин частотних характеристик системи

Слід зауважити, що якщо на зображенні високочастотні компоненти повністю втрачені, ніяким високочастотним фільтром їх збільшити не можна. Високочастотна фільтрація в такому випадку приведе тільки до значного підвищення шуму на зображенні. Підвищення різкості не відбудеться. Саме з цієї причини в реальній практиці обробки знімків значно покращити різкість не вдасться.

Описані прості методи дають можливість відновлювати зображення при порівняно невеликому дефокусуванні і, саме головне, невеликому шумі в сигналі, що корегується.

2.11. ПРЕПАРУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

При аналізі зображень земної поверхні часто виявляється недостатнім представити спостерігачу об'єкт за допомогою ідеальної системи, що зображує. При рішенні задач, що вимагають скрупульозного аналізу зображень (пошук, ідентифікація об'єктів, визначення кількісних характеристик і т.д.), бажано дати спостерігачу засоби і методи, що полегшують розпізнавання об'єктів на зображеннях. Таку обробку, що виступає як допоміжний засіб, називають *препаруванням зображень* [8].

Основною задачею препарування зображень є обробка ознак об'єктів - це витяг, вимір і візуалізація тих характеристик сигналу, що найбільш інформативні для зору в конкретній задачі аналізу. Ознакою зображення об'єкта називається його найпростіша відмітна характеристика чи властивість. Деякі ознаки є природними в тому розумінні, що вони установлюються візуальним аналізом зображення, тоді як інші, так звані штучні ознаки, виходять у результаті спеціальної обробки чи вимірів. До природних ознак відносяться світлота (яскравість) і текстура різних областей зображення, форма контурів об'єктів. Гісторами розподілу яскравості і спектри просторових частот дають приклади штучних ознак [8].

Гарною зоровою ознакою для упізнавання об'єктів на зображеннях є границі об'єктів, що окреслюють його форму. При безпосередньому візуальному аналізі зображень часто буває необхідно виділити об'єкти визначеної форми, розмірів і орієнтації на фоні інших об'єктів. Виділення можна здійснити або за рахунок підвищення контрастів потрібних об'єктів, або шляхом підкреслення їх форми – виділенням обрису.

Розглянемо два найбільш придатних методи виділення контурних ознак об'єктів на зображеннях: підвищення локальних контрастів і адаптивне квантування мод.

2.11.1. Лінійні методи препарування зображень

Багато методів лінійної фільтрації, що використовуються при обробці зображень з метою препарування, добре відомі і

розглянуті раніше. Для підкреслення дрібних деталей зображень досить часто використовується придушення нижніх і посилення верхніх просторових частот спектра Фур'є сигналу. Для придушення дрібних деталей, що заважають, рекомендується низькочастотна фільтрація - придушення верхніх просторових частот зображення.

Підвищення контрасту є широко застосовуваним стандартним способом обробки зображень. Однак навіть кероване збільшення контрастності діє одразу на весь кадр. З багатьох міркувань цей підхід не є доцільним. Наприклад, при вивченні прибережних ланок деталі у межах водних поверхонь відображаються в дуже вузькому діапазоні низької яскравості, а об'єкти на суші проявляються в діапазоні набагато більших значень яскравості. У таких випадках для поліпшення зображення краще застосовувати фільтр, що "адаптує" контраст області в межах переміщеного вікна, - адаптивний фільтр.

Жоден фільтр із фіксованими параметрами не може відповідати такій широкій розмаїтості умов. Крім того, багатозональні зображення можуть вимагати використання різних параметрів для кожної зони спектру. Без застосування адаптивних фільтрів варто було б поліпшити однозональні файли й потім скомбінувати в кольорове зображення.

Для того щоб забезпечити розумну основу для вибору параметрів лінійних фільтрів, їх доцільно трактувати як оптимальну у визначеному змісті лінійну фільтрацію корисного сигналу на тлі перешкод. Такий підхід був розглянутий при постановці задачі адаптивної лінійної фільтрації завод (п.2.9). Але в даному випадку під корисним сигналом розуміються деталі зображення, які необхідно виділити, а завадами - фонові частини зображення, що заважає інтерпретації потрібних деталей [13].

Усереднення будемо проводити по всіх можливих варіаціях сигналу корисних об'єктів (їх положенню на зображенні, формі, орієнтації і т.д.) і по реалізаціях шуму датчика сигналу. Обмежимося тільки найбільш просто реалізованими фільтрами, а сигнал, що спостерігається, будемо для спрощення розглядати

як адитивну суміш об'єкта, що виділяється, і фонового зображення. Крім того, будемо вважати, що площа виділюваного об'єкта набагато менша за площу всього зображення.

Тоді в результаті синтезу одержимо наступну формулу для опису частотної характеристики оптимального за МСКП-критерієм скалярного фільтра препарування [13]:

$$H(k, l) = \frac{\sqrt{\langle |Z_0(k, l)|^2 \rangle}}{|Z(k, l)|^2 + \varepsilon^2}, \quad (2.36)$$

де $Z_0(k, l)$ – відліки спектра виділюваного об'єкта; $Z(k, l)$ – відліки спектра зображення, що спостерігається; ε^2 – величина, рівна відношенню площі об'єктів до площі фонового зображення.

Риска зверху означає усереднення по реалізаціях, квадратні дужки означають усереднення по всіх можливих положеннях об'єкта в площині зображення, кутові дужки означають усереднення за іншими випадковими параметрами (орієнтація, масштаб і т.д.). Такий фільтр будемо називати фільтром МСКП.

Якщо замість умови МСКП використовувати критерій найкращого відновлення енергетичного спектра (ВСС) сигналу виділюваного об'єкта, то одержимо частотну характеристику фільтра ВСС

$$H(k, l) = \sqrt{\frac{\langle |Z_0(k, l)|^2 \rangle}{|Z(k, l)|^2}}. \quad (2.37)$$

Такий фільтр, на відміну від фільтра МСКП, не руйнує енергетичний спектр, а значить, і форму виділюваного об'єкта.

Нарешті, якщо задатися метою одержати в результаті фільтрації максимум відношення величини сигналу на шуканому об'єкті в точці його розташування до середньоквадратичного значення сигналу на фоні зображення, то прийдемо до фільтра з частотною характеристикою

$$H(k, l) = \frac{\langle Z_0^*(k, l) \rangle}{|Z(k, l)|^2 + \varepsilon^2}. \quad (2.38)$$

Такий фільтр можна назвати фільтром за максимум відношенням сигнал-шум (МВСШ). Зрозуміло, що МВСШ фільтр щонайкраще виділяє місця розташування об'єкта, але руйнує згладжуванням форму об'єкта. Такий фільтр часто використовується для автоматичного виявлення об'єктів заданих розмірів і форми.

Отже, отримане сімейство адаптивних фільтрів, які можна використовувати при препаруванні для виділення об'єктів на фоні, що заважає.

Розглянуті фільтри охоплюють як окремі випадки і фільтрацію з придушенням вищих і нижчих частот. Дійсно, спектр реальних зображень це, як правило, функція, що швидко убуває з ростом просторової частоти. Таким чином, (2.36-2.38) - це фільтри, положення максимуму пропускання яких міняється залежно від розміру виділюваних об'єктів, що впливає на чисельники формул. Якщо це малорозмірні об'єкти, тоді максимум пропускання фільтра знаходиться в області високих просторових частот. Якщо виділяються деталі великих розмірів, максимум зміщується в область низьких просторових частот.

Найчастіше фільтрацію зручніше робити в спектральній області. Так доцільно робити, якщо необхідно приглушити або підсилити окремі спектральні компоненти в спектрі зображення або вузькі ділянки спектра.

2.11.2. Препарування підкресленням меж об'єктів

Збільшення детальності зображень - поняття, протилежне згладжуванню. Якщо при згладжуванні стираються розходження деталей зображення, то при збільшенні детальності вони повинні, навпаки, підсилюватися. Тому збільшення детальності зображень називають також підвищенням локальних контрастів. Це, власне кажучи, основна операція при препаруванні зображень.

Зображення з підкресленими або контрастованими напівтоновими переходами на межах об'єктів часто виявляється суб'єктивно більш зрозумілим, ніж фотометрично точне зображення. Психофізично складається враження, що зображення є більше різким. Одним з найпоширенішим простим методом підкреслення меж об'єктів на зображення є *нерізка маскування*.

Початкове зображення $F_0(i,j)$ піддається згладжуванню. У результаті одержують відповідно масив згладженого зображення $F_3(i,j)$. Потім формують масив зображення за формулою

$$\begin{aligned} F(i, j) &= CF_0(i, j) + (1 - C)F_3(i, j) = \\ &= F_3(i, j) + C(F_0(i, j) - F_3(i, j)) \end{aligned} \quad (2.39)$$

де C – коефіцієнт.

Звичайне значення C знаходяться в межах від 1 до 3. Неважко помітити, що друга частина другого виразу(2.39) є те саме, що результат лінійної високочастотної фільтрації з метою виділення меж. Виділені межі з коефіцієнтом C додаються до згладженого зображення з метою їхнього контрастування. Цей процес послідовно показаний на рис.2.42а,б,в.

Сигнал, отриманий у результаті маскування, має два викиди, що відповідають положенню напівтонових меж у початковому сигналі. Довжина переходів залишилася майже тією самою, але за рахунок викидів з боку темного та з боку світлого контраст меж збільшився. Суб'єктивна різкість маскованого зображення підвищується.

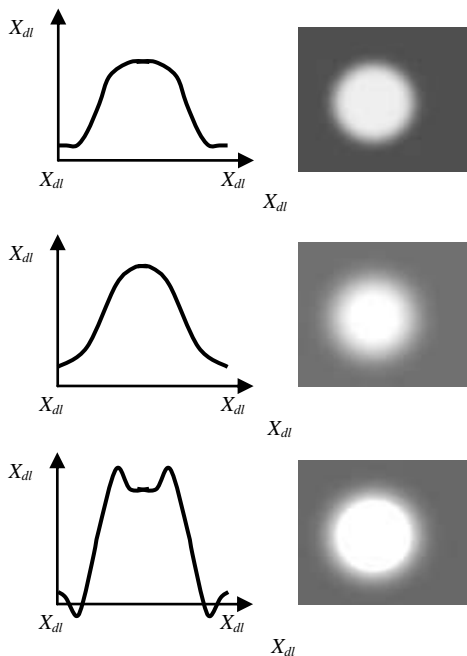


Рис.2.42. Нерізке маскуваня: початковий сигнал (а); нерізке зображення (б); зображення після додавання різницевого сигналу (в)

Замість лінійного згладжування низькочастотними фільтрами в алгоритмі нерізкого маскуваня можна використати рангове згладжування (наприклад медіанним фільтром). Переваги нерізкого маскуваня з ранговим згладжуванням замість лінійного - адаптивність і менша просторова інерційність - впливають з переваг рангового згладжування. У такому випадку межі будуть ще більше різкими, але слід пам'ятати про знищення медіанним фільтром дрібних контрастних об'єктів.

2.12. НЕЛІНІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ КОНТРАСТІВ

2.12.1. Гістограмні методи підвищення локальних контрастів

Інший шлях підвищення локальних контрастів зв'язаний з використанням ковзної *еквалізації гістограм* і її узагальнення - *ступеневої інтенсифікації* [13].

"Рангове" трактування еквалізації дозволяє запропонувати деякі її природні узагальнення, зв'язані зі зміною виду околу: еквалізацію по ε_v і еквалізацію по KNV - околах.

При еквалізації по ε_v -околу

$$F_1(i,j) = R_{\varepsilon_v}(F(i,j)).$$

При еквалізації по KNV-околу

$$F_1(i,j) = R_{kNV}(F(i,j)).$$

Тобто проходить заміна значення сигналу $F(i,j)$ зображення його рангом R по заданому околу цього значення у варіаційному ряду.

Еквалізація по M - околу дозволяє уникнути впливу деталей, що належать іншому кластеру в S - околі. Вибір між ε_v - і KNV-околами, як і при згладжуванні, визначається апріорною інформацією про розкид значень сигналу і розмірах деталей зображення, контраст яких підлягає посиленню.

Інша можливість узагальнення процедури еквалізації складається в заміні величини сигналу не його рангом по тому чи іншому околу, а деякою функцією рангу. Прикладом такої обробки може служити алгоритм *гіперболізації гістограм*

$$F'(i,j) = \exp\{Rs(F(i,j))\}.$$

При цьому $\ln(F'_{cp}(i,j))$ (це відповідає значенням світлоти) буде мати рівномірний розподіл, що і потрібно при гіперболізації.

2.12.2. Препарування методом адаптивного квантування мод гістограми

Один з напрямків препарування зображень - застосування *вирішальних алгоритмів* [13]. Зображення, що виходять з

допомогою таких алгоритмів, являють собою *поля рішень* по деяких ознаках. Вирішальні алгоритми використовуються, коли на зображенні необхідно виділити ділянки з визначеними властивостями і потім візуально проаналізувати форму цих ділянок, їхнє розташування, знайти розміри, площу і т.д.

Факт групування елементів зображення за ознаками виявляється в тому, що в гістограмі розподілу елементів за величиною ознаки навколо деяких значень утворюються згущення, чи моди (їх ще називають кластерами) (рис.2.43). Виділивши ці моди, можна знайти поділяючі їхні границі, тобто граничні значення ознак по яким можна зробити поділ зображення на ділянки (рис.2.44).

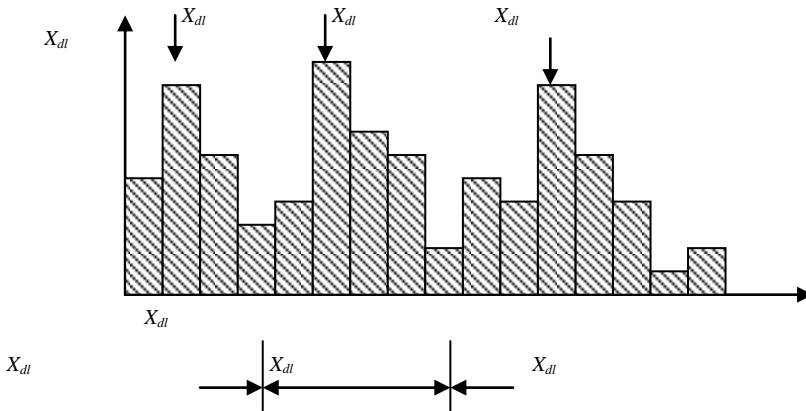


Рис. 2.43. Гістограма розподілу ознаки q на вихідному зображенні з окремими модами

Поділ мод у розподілі значень ознак можна назвати адаптивним квантуванням мод. Якість адаптивного квантування мод залежить від того, наскільки добре розділяються моди. Поділ мод залежить від того, наскільки близько розташовані моди в гістограмі і наскільки вони розмиті.

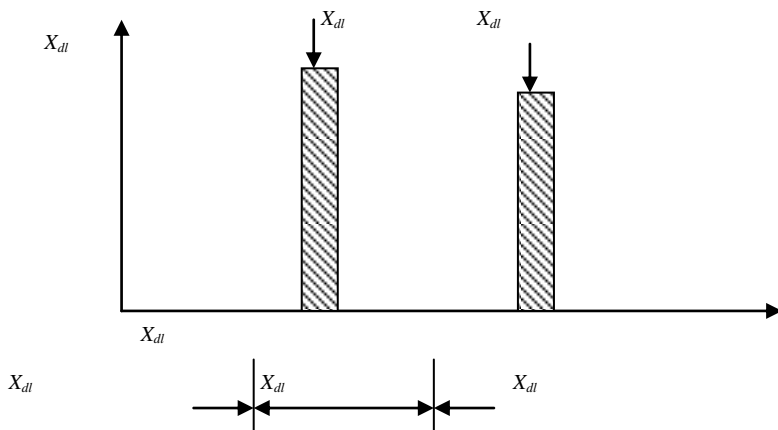


Рис.2.44. Гістограма розподілу ознаки q на зображенні, обробленому з метою виділення ділянок з ознаками «($q=5$) чи ($q=11$)»

Кількість мод у гістограмі звичайно залежить від ступеня детальності зображення. Тому варто вибрати розмір аналізованого фрагмента так, щоб кількість мод у локальній гістограмі була не великою. Інакше зростає ризик зливання близько розташованих мод за рахунок їхнього розмивання.

Розмивання мод у гістограмі звичайно зв'язують із впливом операторів лінійного згладжування на зображення і наявністю на зображенні адитивних і мультиплікативних шумів. Однак створити адекватну реальним зображенням модель розмивання мод не завжди представляється можливим. Тому застосовують додаткові прийоми [13]:

1. Обмеження розмірів аналізованих зображень. Зображення розбивається на фрагменти, у межах яких моди розмиваються не значно. Обробка ведеться по фрагментах.

2. Поділ по типах розмивання мод. Обробка фрагментів з розмиванням мод за рахунок зашумлення ведеться іншими алгоритмами, чим фрагментів, де розмивання мод відбулося через згладжування лінійними операторами.

3. Відбраковування мод по "заселеності". Ігнорують моди з малим числом елементів. Поріг вибирається з розуміння

мінімально припустимої площі виділюваних ділянок зображення.

4. Відбраковування дрібних деталей. Якщо елементи зображення утворюють ділянки з площею, менше заданого порога, то їх приєднують не до своєї моди, а до моди оточуючих елементів.

2.12.3. Препарування зображень за гістограмними і яскравісними ознаками

Найбільш важливою ознакою зображення є світлота. Світлота виражається через такі величини, як яскравість, спектральна інтенсивність випромінювання, координати кольору і таке інше, що будуть називатися яскравісними ознаками. Вимір яскравісних ознак можна проводити або в окремих точках зображення, або в їхніх околах (наприклад, після згладжування). Виділення об'єктів за яскравісними ознаками може бути здійснене за допомогою поелементних операцій спеціальних перетворень контрасту (див. п.2.1.2).

Форма гістограми розподілу частот дає багато відомостей про властивості зображення. Наприклад, вузька гістограма вказує на низький контраст, а бімодальна гістограма припускає наявність областей різної яскравості. Використовуються наступні характеристики, що описують форму гістограм першого порядку:

Середнє
$$\bar{f} = \sum_{f=0}^{N-1} f \cdot h(f).$$

Дисперсія
$$\sigma_f^2 = \sum_{f=0}^{N-1} (f - \bar{f})^2 \cdot h(f).$$

Коефіцієнт асиметрії
$$f_s = \frac{1}{\sigma_f^3} \sum_{f=0}^{N-1} (f - \bar{f})^3 \cdot h(f).$$

Коефіцієнт ексцесу
$$f_K = \frac{1}{\sigma_f^4} \sum_{f=0}^{N-1} (f - \bar{f})^4 \cdot h(f) - 3.$$

Енергія $E_f = \sum_{f=0}^{N-1} h^2(f).$

Ентропія $E_n = -\sum_{f=0}^{N-1} h(f) \cdot \log_2(h(f)).$

У наведених формулах f – значення елементів зображень, N – кількість рівнів квантування сигналу зображення. Доданок - 3, введений у вираження для коефіцієнта ексцесу, нормалізує величину f_k так, що вона дорівнює нулю для квантованої гауссової щільності ймовірності при прагнучому до нуля кроці квантування.

Гістограмні ознаки *другого порядку* засновані на визначенні спільного розподілу ймовірностей пари елементів зображення. Розглянемо два елементи $F(i,j)$ і $F(m,n)$ з координатами відповідно (i,j) і (m,n) . Тоді спільний розподіл значень яскравості має вид

$$P(a,b) = P_r\{ F(i,j)=a, F(m,n)=b \},$$

де a і b – квантовані значення яскравості.

Розподіл частот, що оцінює розподіл другого порядку, визначається формулою

$$h(a,b) = N(a,b)/M,$$

де M - повне число елементів у вікні, а $N(a,b)$ - число випадків, коли $F(i,j) = a$ і $F(m,n) = b$.

Характеристиками другого порядку є наступні:

Автокореляція $B_A = \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{b=0}^{N-1} a \cdot b \cdot h(a,b).$

Коваріація $B_C = \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{b=0}^{N-1} (a - \bar{a}) \cdot (b - \bar{b}) \cdot h(a,b).$

Момент інерції $B_I = \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{b=0}^{N-1} (a - b)^2 \cdot h(a,b).$

Середня абсолютна різниця $B_V = \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{b=0}^{N-1} |a - b| \cdot h(a,b).$

"Зворотна різниця"

$$B_D = \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{b=0}^{N-1} \left[\frac{h(a,b)}{1 + (a-b)^2} \right].$$

Енергія

$$E_{ab} = \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{b=0}^{N-1} h^2(a,b).$$

Ентропія

$$E_n = - \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{b=0}^{N-1} h(a,b) \cdot \log_2(h(a,b)).$$

При препаруванні за будь-якою гістограмною ознакою потрібно спочатку перетворити початковий масив відліків зображення $F(i,j)$ в масив значень відповідної ознаки $O(i,j)$ з такими самими розмірами. Потім отриманий масив розподілу ознаки по простору $O(i,j)$ можна препарувати вищеописаними методами. Препарований масив значень ознак $O_1(i,j)$ після відповідного нормування можна використати як масив коефіцієнтів контрастування для кожного пікселя початкового зображення $F(i,j)$. Контрастоване таким чином зображення буде мати локальні контрасти залежно від значень ознак, які вже мають чітке розділення по об'єктах.

2.13. ХИБНІ КОЛЬОРІ І ПСЕВДОКОЛЬОРОВЕ КОНТРАСТУВАННЯ

2.13.1. Хибні кольори

Хибні кольори утворюються при поелементному перетворенні координат кольору вихідного кольорового зображення чи набору компонент спектронального зображення, у результаті якого виходять координати відтвореного кольору [8]. Це перетворення застосовується для того, щоб одержати зображення, об'єкти якого мають змінені чи хибні кольори, що відрізняються від очікуваних. Наприклад, блакитне небо в природному сюжеті може стати червоним, а зелена трава -

синьою. Одна з можливих цілей такого колірною перетворення - помістити звичайні об'єкти у світ незвичайних кольорів, щоб спостерігач стежив за ними більш уважно, чим у випадку їхнього нормального фарбування. Повільна зміна перетворення дозволяє запобігти адаптації спостерігача до нового колірною світу. Користь такого застосування хибних кольорів зв'язана зі складними психологічними явищами.

Хибні кольори можуть застосовуватися також для кращого використання можливостей зорової системи людини. Як відомо, яскравісна чутливість паличок і колбочок сітківки ока максимальна в зеленій області видимого спектра. Таким чином, якщо об'єкт червоного кольору перефарбувати в хибний зелений колір, його буде легше знайти.

Інша психофізична властивість колірною зору, якою можна скористатися, полягає в підвищеній контрастній чутливості ока в синьому світлі. При визначених обставинах доцільно перетворювати природні кольори об'єктів із дрібними деталями в градації синього кольору.

Для розкриття замаскованих цілей розроблені нові види космічної зйомки - спектрональні і багатональні. Вони полягають у проведенні зйомки одночасно в декількох зонах спектра, у результаті виходить якісно нова в порівнянні зі звичайною панхроматичною зйомкою інформація. Спектрональна зйомка - це зйомка земної поверхні одночасно в різних спектральних зонах. Зйомка земної поверхні в чотирьох і більшому числі спектральних зон називається багатональною зйомкою.

Різка збільшення яскравості живих рослин в інфрачервоних променях оптичного спектра послужило приводом до появи спектрональних методів зйомки, при яких один із фотоприймачів датчика зображення сприймає інфрачервоне випромінювання. Практика показала, що в більшості випадків спектрональна зйомка для дешифрування ефективніша звичайної кольорової.

При спектрональній зйомці одержуване багатобарвне зображення є зображенням не в реальних, а в умовних кольорах.

Передача кольору зображень в окремих спектральних ділянках повинна лише забезпечувати максимум колірного контрасту, а правильність її може бути порушена.

Для спектральної зйомки сучасними оптико-електронними засобами використовується адитивний спосіб. Він припускає одночасну зйомку в декількох зонах спектра (звичайно в двох – видимій та інфрачервоній). 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.

Після спектральної зйомки на два приймачі (один чуттєвий до видимої області спектра, а іншої до інфрачервоного) і наступного кольоросинтезованого додавання виходить кольоророздільне зображення. Зображення видимого діапазону представляється в градаціях яскравості одного кольору (наприклад синього), а зображення ІЧ діапазону в градаціях іншого кольору, найбільше кольороконтрастного до першого (наприклад жовтого).

Така зйомка дуже інформативна для розпізнавання технічних об'єктів (техніки, будівель і ін.), 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 ближньої ІЧ області штучні об'єкти, якщо їхня температура вище, мають значно більше власне випромінювання, чим природні, і виглядають на їхньому фоні контрастно.

Виходячи з практичних розумінь найбільш доцільне створення трьох -, чотирьох -, і шестидіапазонних

багатозональних датчиків. Для правильної фотометричної обробки знімків у кожен кадр уставляється 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 у всіх каналах. Геометрична точність зображення, суворона 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.

Виходячи з вищесказаного, третє застосування хибних кольорів зв'язано з відтворенням у природних кольорах спектрозональних зображень. При цьому деякі компоненти спектрозонального зображення можуть формуватися датчиками, спектральні характеристики яких знаходяться поза видимою областю спектра, наприклад в інфрачервоній області або у радіодіапазоні.

При утворенні хибних кольорів червона, зелена і синя координати відтворених кольорів зв'язані з координатами вихідних кольорів чи значеннями F_I компонент спектрозональних зображень наступними виразами:

$$\begin{aligned}R_D &= Q_R[F1, F2, \dots], \\G_D &= Q_G[F1, F2, \dots], \\B_D &= Q_B[F1, F2, \dots],\end{aligned}$$

де $Q_R[*]$, $Q_G[*]$, $Q_B[*]$ - функціональні оператори загального виду.

Розглянемо простий приклад, коли вихідні червона, зелена і синя координати кольору ($R_S=F_1$, $G_S=F_2$, $B_S=F_3$) міняються місцями відповідно до співвідношення

$$\begin{bmatrix} R_D \\ G_D \\ B_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_S \\ G_S \\ B_S \end{bmatrix}.$$

Зелені об'єкти вихідного зображення будуть відтворюватися як червоні, сині - як зелені, а червоні - як сині. Загальний вираз для лінійного перетворення в хибні кольори природних кольорових зображень можна визначити як

$$\begin{bmatrix} R_D \\ G_D \\ B_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_S \\ G_S \\ B_S \end{bmatrix}.$$

Варто помітити, що це співвідношення описує лінійне перетворення координатної системи основних кольорів датчика вихідного зображення в координатну систему деяких нових основних кольорів.

2.13.2. Псевдокольори

Псевдоколірне відображення є ще одним методом підвищення здібності до виявлення зображених об'єктів людиною-спостерігачем [8]. Однак при використанні псевдокольорів вихідне зображення не є кольоровим, а представляється двовимірним масивом величин, відображуваних у заданий колірний простір. Псевдоколірне відображення елемента $F(i,j)$ вихідного масиву в загальному виді визначається як

$$R(i,j) = Q_R\{F(i,j)\},$$

$$G(i,j) = Q_G\{F(i,j)\},$$

$$B(i,j) = Q_B\{F(i,j)\},$$

де $R(i,j)$, $G(i,j)$, $B(i,j)$ - координати кольору відтворених кольорів, $Q_R(\bullet)$, $Q_G(\bullet)$, $Q_B(\bullet)$ - лінійні чи нелінійні функціональні оператори.

Це відображення параметрично визначає деяку траєкторію в тривимірному кольорному просторі, причому параметром є значення елемента $F(i,j)$.

На рис.2.45 показані кольірний RGB-простір і два псевдоколірних відображення, траєкторії яких починаються в точці чорного і кінчаються в точці білого. Відображення A представляється ахроматичною траєкторією, що проходить через усі градації сірого; воно є звичайним представленням чорно-білого зображення. Відображення B представляється деякою спіральною траєкторією в кольорному просторі.

Інший клас псевдоколірних відображень складають відображення, що не охоплюють градацій сірого. Прикладом може

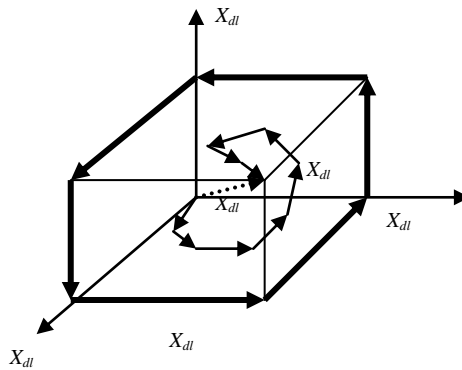


Рис.2.45. Псевдоколірні відображення

служити відображення C , траєкторія якого проходить уздовж ребер кольорного RGB-куба. Це відображення відповідає просуванню по периметрі трикутника відтворених кольорів на рівноконтрастному кольорному графіку.

При заданій лінії псевдокольорів у колірному просторі необхідно вибрати масштабний коефіцієнт, що зв'язує значення $F(j,k)$ з відстанню уздовж цієї лінії. На рівноконтрастному колірному графіку рівним збільшенням відстані відповідають суб'єктивно майже однакові зміни колірного відчуття. Це дає підставу поділяти всю довжину лінії псевдокольорів на рівні відрізки.

2.14. ЛОКАЛІЗАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННЯХ

Поняття *локалізація* має на увазі процедуру спільного виявлення об'єктів і виміру їхніх координат на зображенні [13]. Один з основних способів виявлення об'єктів на зображеннях і визначення їхнього місця розташування складається в зіставленні з еталоном. При цьому еталонове зображення об'єкта, що цікавить, порівнюється послідовно з усіма ділянками зображення, де може перебувати потрібний об'єкт. Якщо розмір об'єкта на зображенні відомий, можна використовувати ковзне по зображенню вікно аналізу. У кожному положенні вікна з координатами (i,j) буде прийматися рішення про наявність або відсутність у цьому місці розшукуваного об'єкта: $A(i,j)=1$ (у вікні об'єкт є) або $A(i,j)=0$ (об'єкта у вікні немає). Якщо об'єкт виявлений ($A(i,j)=1$), то по поточному положенню вікна аналізу (i,j) можна в першому наближенні визначити положення об'єкта.

Для рішення цього завдання необхідно виконати наступні дії.

Перше. Необхідно визначити, чим саме повинен відрізнятися шуканий об'єкт від інших об'єктів і фону. Іншими словами, потрібно визначити *простір характерних відмітних ознак* об'єкта P_n . У найпростішому випадку необхідна єдина відмітна ознака P . Зрозуміло, що з безлічі ознак необхідно вибрати таку ознаку, що давала б найбільші розходження для потрібного об'єкта й фонових об'єктів. На рис.2.46 представлений графічно двовірний простір ознак P_1, P_2 . Можливі сполучення ознак для шуканого об'єкта показані у вигляді круглої області з радіусом Δ .

Друге. Після визначення простору ознак зображення $F(i,j)$ необхідно перетворити зі значень яскравості (кольору) у значення ознак $P_n(i,j)$. Це перетворення може бути зроблене відразу для всього зображення або здійснюватися під час руху вікна. Очевидно, що еталон повинен являти собою деяку множину припустимих значень ознак для заданого об'єкта.

Третє. Якщо ознака не одна, потрібно визначити спосіб порівняння розбіжностей у різних ознаках. Звичайно для цього визначають один показник, що залежить від розбіжностей у всіх ознаках обраного простору. Такий показник називають *метрикою простору ознак*. Способи визначення метрики можуть бути різними й залежать від розподілу ймовірностей розбіжностей ознак. Наприклад, часто використовують метрику

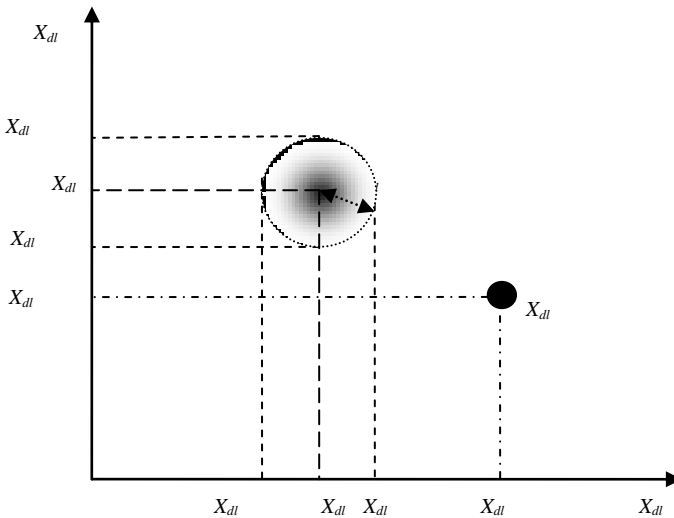


Рис. 2.46. Простір ознак

у вигляді вагової суми квадратів різниць значень ознак у вікні аналізу $P_n(i,j)$ і еталонних значень ознак P_n^e

$$\delta^2 = \sum_n a_n (P_n^e - P_n(i,j))^2.$$

Вагові коефіцієнти a_n звичайно вибирають обернено пропорційними значимості (чутливості) ознаки P_n . У випадку виявлення по одній ознаці як метрика виступає нормована різниця обмірюваного $P(i,j)$ і еталонного P^e значень характерної ознаки. Повний збіг еталона з якою-небудь частиною зображення буває рідко через дію шумів і перекручувань, а також внаслідок відсутності точної апріорної інформації щодо ознак об'єкта, який потрібно виявити.

Якщо подібність між невідомим об'єктом і еталонном досить велика, то цей об'єкт позначається як відповідний еталонному. Звичайне значення метрики розбіжностей порівнюють із заданим порогом розбіжностей Δ . Якщо значення метрики для даного положення вікна менше значення порога, то приймається рішення про наявність зображення об'єкта у вікні аналізу $A(i,j)=1$, і навпаки. Як правило, поріг вибирається постійним для всіх точок зображення.

Вибір порога є одним із ключових питань виявлення. При занадто високому рівні порога не будуть виявлені об'єкти з низьким контрастом у відмітних ознаках. Навпаки, занадто низький рівень порога буде причиною того, що шум або фон буде хибно прийнятий за об'єкт. Для оптимального вибору порога використовують досягнення статистичної теорії перевірки гіпотез на основі апріорних припущень про характер і параметри імовірнісних розподілів значень ознак для ділянок зображень із об'єктом і без нього.

2.15. ОЗНАКИ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННІ

Ознакою зображення об'єкта називається його найпростіша відмітна характеристика або властивість. Деякі ознаки є природними в тому розумінні, що вони встановлюються візуальним аналізом зображення, тоді як інші, так звані штучні ознаки, виходять у результаті його спеціальної обробки або вимірів. До природних ознак ставляться світлота (яскравість) і текстура різних областей зображення, форма контурів об'єктів.

Гістограми розподілу яскравості й спектри просторових частот дають приклади штучних ознак.

Яскравісні ознаки

Найбільш важливою ознакою об'єкта на зображенні є розподіл по простору світлоти або пов'язаних з нею величин: яскравості, спектральної інтенсивності випромінювання, координат кольору й т.д. Ці величини називаються яскравісними ознаками. Вимір яскравісних ознак можна проводити або в окремих точках зображення, або на ділянках простору зображення.

При використанні значень яскравості точок у деякій області, де приблизно перебуває об'єкт, мова найчастіше йде про порівняння безпосередньо зображення ділянки аналізу й зображення еталонного об'єкта. У такому випадку для виділення характерної ознаки використовують лінійний фільтр, апертура якого більше або дорівнює розміру об'єкта виявлення. Вихідний ефект такого фільтра пропорційний схожості ділянки зображення під вікном фільтра й еталонного зображення об'єкта. Він буде максимальним тоді, коли зображення об'єкта у вікні в точності збіжиться із зображенням еталона.

Оскільки інформацію про положення шуканих об'єктів несуть максимуми на результаті фільтрації, то їх можна виділити в масиві значень $P(i,j)$ яким-небудь алгоритмом виявлення (наприклад ранговим голосуванням або нелінійним алгоритмом виділення максимумів). Звичайно, для прийняття рішення $A(i,j)$ отриманий з виходу фільтра сигнал (значення ознаки $P(i,j)$) порівнюється із заданим порогом Δ .

Частотна характеристика такого фільтра визначається зображенням еталонного об'єкта й статистичними параметрами шуму й фону. Якщо задатися метою мінімізувати помилки хибного виявлення, оптимальним буде фільтр, що має частотну характеристику

$$H(w_x, w_y) = \frac{Z_0^*(w_x, w_y)}{\langle |Z_\phi(w_x, w_y)|^2 \rangle}.$$

Тут у чисельнику $Z_0(w_x, w_y)$ – спектр еталонного зображення об'єкта, * - позначка комплексного спряження. Знаменник - це усереднений по невідомим параметрах енергетичний спектр тієї частини зображення, що не містить об'єкт і виступає в як "шум" (енергетичний спектр фону) [13]. Позначки усереднень такі самі, як у параграфі 2.11.

Звичайно на космічних знімках земної поверхні площа, займана шуканим об'єктом на зображенні, набагато менша площі самого зображення. Тому на практиці часто можна користуватися наближеною оцінкою знаменника

$$\left\langle \left| Z_\phi(w_x, w_y) \right|^2 \right\rangle = \left| Z(w_x, w_y) \right|^2 + \delta,$$

де $Z(w_x, w_y)$ - спектр реального зображення, на якому здійснюється пошук. Усереднення енергетичного спектра доцільно замінити на згладжування; δ - мале виправлення. Відношення δ до середнього квадрата модуля спектра дорівнює величині відношення площі об'єкта до площі зображення.

При реалізації такого алгоритму природніше усього використовувати обробку сигналу в частотній області, оскільки частотна характеристика оптимального фільтра ґрунтується на вимірах спектра спостережуваного зображення.

Істотний недолік методу безпосереднього зіставлення зображення об'єкта із зображенням еталона полягає в залежності виходу фільтра від енергії конкретної ділянки зображення. Він частково усувається шляхом переходу до аналізу контурних препаратів зображень. Еталон у цьому випадку також представляється контурним препаратом. При такому підході говорити про яскравісні ознаки не доводиться. Цей підхід ближче до ознак форми.

Головний недолік порівняння безпосередньо зображень полягає в необхідності використання величезної кількості еталонів для врахування змін об'єктів, що виникають при їхніх геометричних трансформаціях (повороті й зміні розмірів). Із цієї причини бажано обмежитися ознаками, які менше залежать від змін розміру й форми об'єкта при геометричних викривленнях.

Контурні ознаки

Різкі зміни (розриви) яскравості або параметрів текстури є важливими найпростішими ознаками, оскільки вони часто визначають форму зображених об'єктів. Локальні розриви значень яскравості називають яскравісними перепадами, або контурами. Вихідне зображення, представлене масивом чисел $F(i,j)$, піддається лінійній або нелінійній обробці для того, щоб підсилити перепади яскравості. У результаті утвориться масив чисел, що описує зображення з підкресленими змінами яскравостей. Для позначення положення перепадів на зображенні часто формують контурний препарат. Ідеальний детектор перепаду повинен указувати на наявність перепаду в єдиній точці, розташованій у центрі переходу яскравості.

Ознаки плям

Плямою називається відносно маленька ланка зображення, яскравість якої значно відрізняється від яскравості її околу [8]. Для виявлення плями спочатку здійснюється згладжування зображення фільтром низьких частот з маскою розміром $N \times N$ елементів. Потім рівень кожного елемента усередненого зображення порівнюється із середнім значенням рівнів його чотирьох сусідів (праворуч, ліворуч, зверху й знизу), які віддалені від центрального елемента на відстань в N елементів. Пляма виявляється, якщо ця різниця досить велика. Інший подібний підхід передбачає формування різниці між середньою яскравістю у вікні розміром $N \times N$ і середньою яскравістю навколишньої кільцевої області шириною N .

Ознаки ліній.

Можна припустити, що лінії й смуги є локальними фрагментами більших структур. Один з підходів до виділення лінії полягає в тому, що виконується просторове об'єднання відгуків детектора перепаду усередині локального околу. Лінії одиначної ширини можна виявити шляхом згортки зображення з набором лінійних масок, за допомогою яких виконується контрастування вертикальних, горизонтальних і діагональних відрізків лінії (рис.2.47).

Текстурні ознаки

Більша частина природних сцен позбавлена істотних деталей на більших просторах. У цих областях сцену часто можна

охарактеризувати як прояв повторюваної структури (малюнка). Текстуру можна розділити на штучну й природну. Штучні текстури - це структури із графічних знаків, розташованих на нейтральному фоні. Природні текстури - це зображення природних сцен, що містять майже періодичні структури. Прикладами можуть служити зображення черепиці дахів, піску, трави й т.д.

$$\begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Рис.2.47. Маски фільтрів для виділення ознаки ліній

У завданнях автоматичної обробки знімків земної поверхні бажано визначати границі текстурних областей і розмір зерен текстури усередині кожної області. Розмір зерна пов'язаний з періодом просторової повторюваності локальної структури. Великий період відповідає великій текстурі, а малий - дрібній. Розмір зерна недостатній для кількісного виміру текстури, але його можна принаймні використовувати для оцінки напрямку, у якому повинні змінюватися текстурні ознаки, тобто малі чисельні значення ознак повинні відповідати дрібній структурі, а більші значення - великій. Потрібно враховувати, що текстура - це властивість околу точки зображення. Отже, текстурні ознаки по своїй природі залежать від розміру вікна аналізу.

За основну характеристику текстури можна використовувати просторову автокореляційну функцію. Розмір зерна текстури пропорційний ширині автокореляційної функції. Однією з можливих мір ширини автокореляції є другий момент [8].

Гістограмні ознаки

Форма гістограми розподілу частот дає багато відомостей про властивості зображення. Наприклад, вузька гістограма вказує на низький контраст, а бімодальна гістограма припускає наявність областей різної яскравості. Характеристики, що описують форму гістограм, описані в параграфі 2.11.

Питання для самоконтролю

1. За якими принципами здійснюється радіометричне корегування і перетворення зображень?
 2. Як змінюються гістограми зображень після поелементних перетворень?
 3. За якими принципами здійснюється локальна фільтрація зображень?
 4. Які маски фільтрів використовуються для згладжування та підкреслення меж?
 5. Які переваги мають нелінійні методи підкреслення меж?
 6. За якими принципами здійснюється медіанна та процентільна фільтрація (erode, dilate, opening, closing)?
 7. Які особливості та властивості має двовимірне дискретне перетворення Фур'є?
 8. Як здійснюється фільтрація зображень на основі двовимірного дискретного перетворення Фур'є?
 9. Як здійснюється придушення адитивного шуму ?
 10. Як здійснюється придушення мультиплікативного шуму?
 11. Як здійснюється придушення імпульсних перешкод?
 12. У чому полягають принципи згладжування адитивного шуму адаптивними алгоритмами?
 13. Чому на космічних знімках завжди присутні лінійні викривлення?
 14. У чому полягають принципи цифрового коректування лінійних викривлень?
 15. За якими принципами здійснюється препарування зображень лінійними методами?
 16. Які принципи покладено в підвищення локальних контрастів зображень нелінійними методами?
 17. За якими принципами здійснюється адаптивне квантування мод гістограми?
 18. Як здійснюється препарування зображень за яскравісними, гістограмними та текстурними ознаками?
 19. Як за допомогою колірного забарвлення можна покращити сприйняття зображення дешифрувальником?
 20. Які принципи покладено в основу алгоритмів автоматичного виявлення об'єктів на зображеннях?
10. Яким чином враховуються розбіжності об'єктів на зображенні та еталону за декількома ознаками?

РОЗДІЛ 3 ОСНОВИ ФОТОГРАММЕРТІЇ

3.1. Картографічні проєкції і координати

3.1.1. Поняття про картографічні проєкції та їх перекручування

Для зображення земної поверхні на плані чи на карті спочатку фізичну поверхню Землі проєктують на математичну поверхню. За математичну поверхню звичайно приймається так названий еліпсоїд Красовського: еліпсоїд з розмірами по осі обертання (мала піввісь)- 6356863м, по екваторіальній осі (велика піввісь) -6378245м. З причини невеликої різниці у величинах півосей (близько 21км) у деяких випадках форму Землі приймають за кулю з радіусом, рівним 6371км.

Потім математичну поверхню всієї земної кулі чи її окремої частини зображують на площині. З цією метою на площині будують по тому чи іншому математичному законі лінії паралелей і меридіанів, що представляють собою картографічну сітку, на яку переносять окремі об'єкти і контури земної поверхні [Л12].

Умовне зображення на поверхні сітки меридіанів і паралелей називають картографічною проєкцією. Існує велика кількість різних видів картографічних проєкцій, що розрізняються по способі геометричної побудови, а також по характері їх перекручувань. При цьому, чим більша частина поверхні Землі зображується на карті, тим більші виходять перекручування на ній.

Зображення земної поверхні без перекручувань можна одержати тільки на глобусі.

Основними видами перекручувань картографічних проєкцій є перекручування довжин, площ, кутів і форм об'єктів. Немає таких картографічних проєкцій, у яких збереглися б одночасно і рівність площ, і подоба фігур, і масштаб ліній.

Проекції розрізняють по способу побудови. Зображення сітки спочатку одержують на допоміжній геометричній поверхні, а потім з неї переносять на площину.

Допоміжними поверхнями можуть бути:

- дотичні до кулі чи січні його площини;
- бокова поверхня дотичного чи січного циліндра в циліндричних проекціях;
- бокова поверхня дотичного чи січного конуса - у конічних чи поліконічних проекціях.

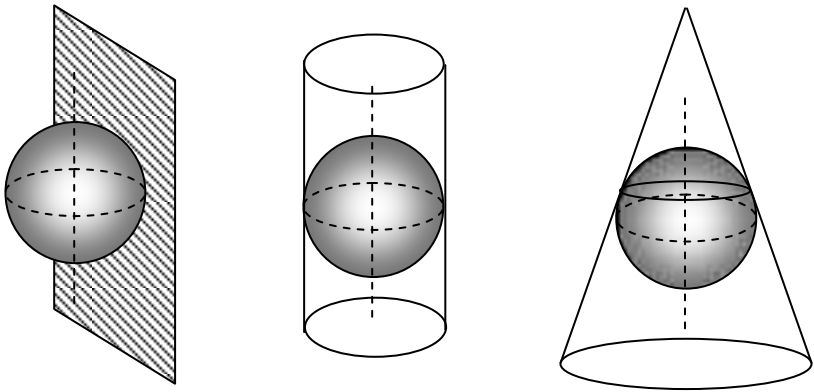


Рис.3.1. Допоміжні геометричні поверхні, які є дотичними до еліпсоїда Красовського

Від способу побудови залежить вид картографічних сіток, тобто форма паралелей і меридіанів і величина проміжків між паралелями і меридіанами.

Головний масштаб у проекціях зберігається тільки в точках (лініях) торкання чи перетину. Такі місця на картах називаються точками чи лініями нульових перекручувань. В інших місцях карти застосовують приватні масштаби, що виражають у частках до головного. У кожній точці карти існують два взаємно перпендикулярних напрямки, по одному з яких масштаб найбільший, по іншому - найменший. Вони називаються головними напрямками.

Для наочного показу напрямку і величини перекручувань служить еліпс перекручувань, велика піввісь якого відбиває найбільший масштаб, а мала найменший (рис.3.2.).

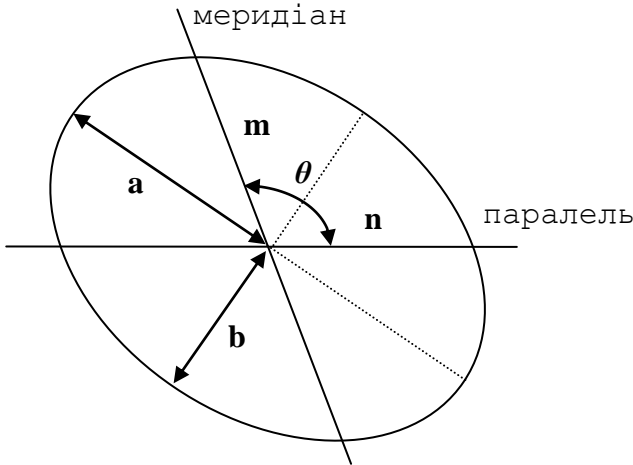


Рис.3.2. Еліпс перекручувань і його елементи

Якщо в проекції паралелі і меридіани взаємно перпендикулярні, то осі еліпса (і головні напрямки) збігаються з меридіанами і паралелями.

Масштаби по меридіанах (m) і паралелям (n) визначають наступним шляхом [л12]:

1. вимірюють дуги меридіанів і паралелей у заданих місцях карти;
2. поділяють отримані величини на довжини відповідних дуг еліпсоїда з таблиць;
3. переводять обчислені масштаби в частки головного масштабу.

Для визначення масштабу площ, величини перекручування кутів, найбільшого і найменшого масштабів надходять у такий спосіб:

1. у заданих місцях карти вимірюють кут θ між меридіанами і паралелями;
2. обчислюють кут $\varepsilon = \theta - 90$ град.;

3. по формулах обчислюють масштаб площі $p = m \cdot n \cdot \cos(\varepsilon)$,
 4. найбільший масштаб (a) і найменший масштаб (b):

$$\begin{cases} a + b = \sqrt{m^2 + 2p + n^2}, \\ a - b = \sqrt{m^2 - 2p + n^2}. \end{cases}$$

Найбільше перекручування кутів (w) знаходиться як

$$w = 2 \arcsin\left(\frac{a - b}{a + b}\right);$$

перекручування форм оцінюється величиною $k = a/b$.

Коли меридіани і паралелі на карті взаємно перпендикулярні, то $a = m$ (чи $a = n$); $b = n$ (чи $b = m$) і формули мають вид:

$$p = m \cdot n; \quad w = 2 \arcsin\left(\frac{m - n}{m + n}\right).$$

3.1.2. Поперечно-циліндрична конформна проекція Гауса і відповідна їй система координат

Топографічні карти складають в основному в конформній поперечно-циліндричній проекції Гауса. Сутність цієї проекції полягає в наступному.

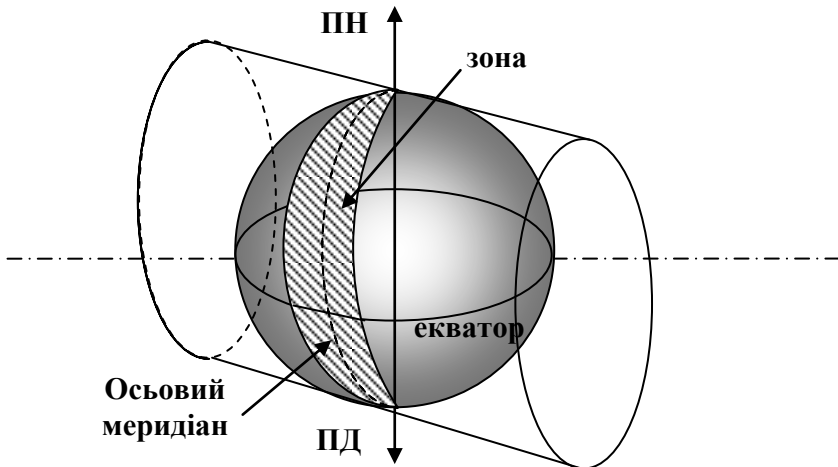


Рис.3.3. Схема переносу зони на поперечний дотичний

циліндр

Поверхня земної кулі меридіанами поділяють на шостиградусні зони, рахунок яких ведеться від Гринвичеського - нульового меридіана з заходу на схід з 1 по 30 - у східній півкулі і з 31 по 60 у західній. Середній меридіан кожної зони називається осьовим. Для планів масштабу 1:5000 і крупніше, з метою зменшення перекручувань, беруть триградусні зони[Л12, Л4].

Кожну зону у визначеній закономірності проєктують на свій циліндр, що торкається математичної поверхні Землі по осьовому меридіані (рис.3.3).

Розгорнувши потім бокову поверхню циліндра на площину, одержують на ній зображення зони. Осьовий меридіан і екватор у проєкції зображуються взаємно перпендикулярними прямими лініями, а інші меридіани - кривими лініями, що сходяться на полюсах.

Паралелі зображуються кривими лініями, опуклостями зверненими до екватора.

Проєкція Гауса є конформної, на якій зберігаються подоби фігур і головний масштаб на осьовому меридіані. Приватні масштаби поступово зростають від осьового меридіана до країв зони.

Найбільше перекручування ліній на краях шостиградусній зони досягає 1/1200 їхньої довжини, що практично припустимо при зйомках у масштабах 1:10000 і дрібніше.

Перекручування довжин, кутів і площ на топографічних планах і картах великого масштабу, що відбуваються від кривизни Землі, настільки малі, що не мають практичного значення. На таких картах можна робити будь-які виміри так, начебто перекручувань немає зовсім.

3.1.3. Географічні і прямокутні координати

Координати різних об'єктів (у тому числі й опорних точках місцевості) можна визначити по топографічних картах за допомогою нескладних графічних побудов і обчислень.

Географічні координати (широта φ і довгота λ) кутів внутрішньої рамки листа підписані на карті. Паралельно внутрішній рамці побудована хвилинна рамка, що має розподіли на відрізки, які відповідають хвилині широти (на західній і східній рамках) і довготи (на північній і південній рамках).

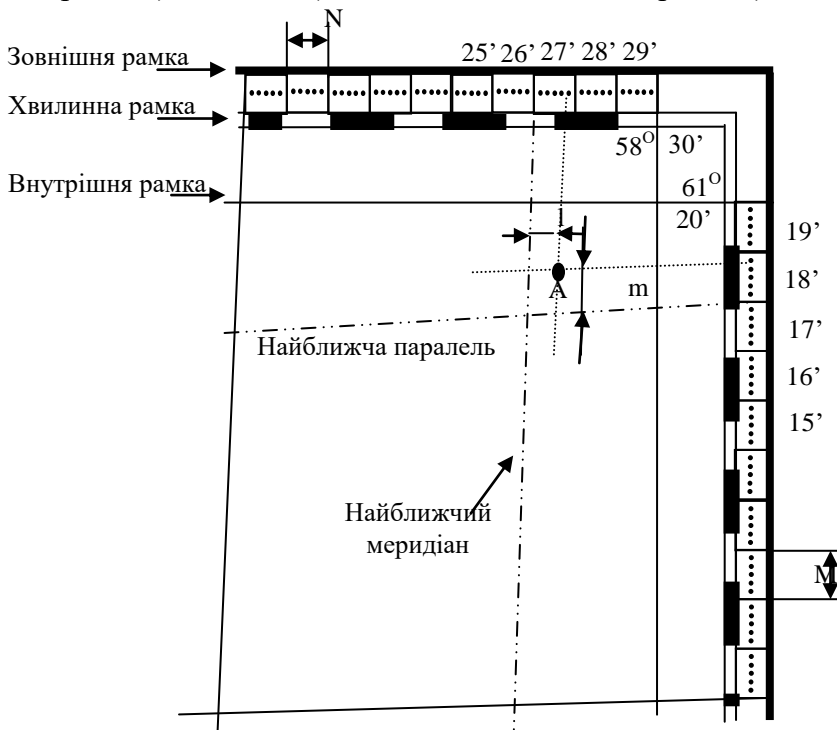


Рис.3.4. Визначення географічних координат точки по топографічній карті

Для визначення по карті географічних координат точки проводять найближчу до неї з півдня паралель і найближчий із заходу меридіан. Шукана широта буде складатися із широти проведеної паралелі і збільшення широти точки відносно цієї паралелі. Аналогічно можна одержати і довготу точки. Збільшення широти і довготи знаходять методом інтерполяції, виміривши на карті довжину однієї хвилини і відстань від точки до найближчої з півдня паралелі (для широти) чи найближчого з заходу меридіана (для довготи). По цим даним складається

пропорція і визначається збільшення координат з точністю до 0,1' [Л4].

Якщо, наприклад, точка А (рис.3.4) розташована небагато північніше паралелі 61°18' і на схід меридіана 58°27', то її координати будуть $\varphi_A = 61^{\circ}18' + \Delta\varphi$, $\lambda_A = 58^{\circ}27' + \Delta\lambda$, де $\Delta\varphi$ і $\Delta\lambda$ - збільшення географічних координат точки А.

Щоб визначити збільшення, точно вимірюють лінійні величини однієї хвилини широти (М) і довготи (L), а також збільшення широти (m) і довготи (l) точки А. Склавши і вирішивши пропорції, знайдемо $\Delta\varphi$ і $\Delta\lambda$: $\Delta\varphi = \frac{m}{M}$ [кутових хвилин широти]; $\Delta\lambda = \frac{n}{N}$ [кутових хвилин довготи].

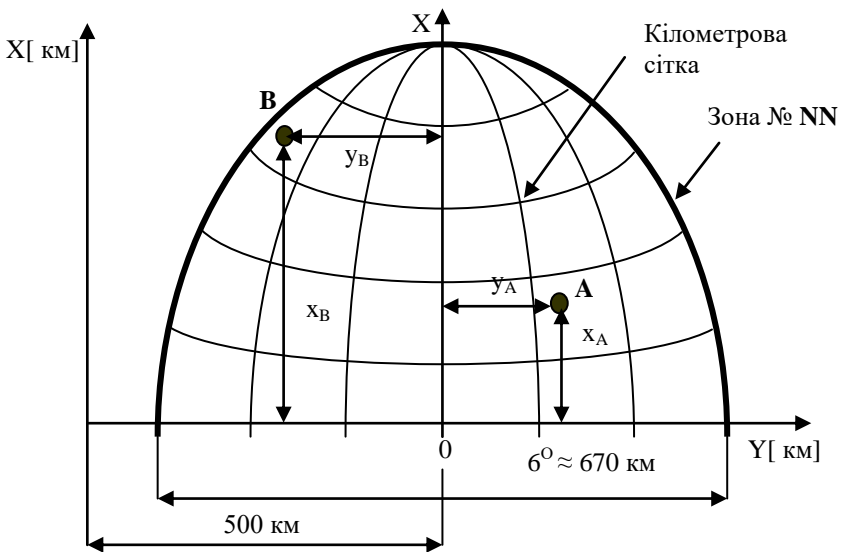


Рис.3.5. Положення координатної (кілометрової) сітки на листі карти

Для нанесення точки по заданих географічних координатах необхідно провести на карті відповідні найближчі паралель і меридіан, від яких потім відкласти лінійні величини, що відповідають часткам хвилини.

Для визначення прямокутних координат об'єктів на листі топографічної карти нанесена сітка квадратів, лінії якої проведені паралельно осям координат (екватору й осьовому меридіану зони) через визначену кількість кілометрів (рис.3.5).

Ширина будь-якої шостиградусної координатної зони на екваторі складає приблизно 670 км. У північній частині зони координати X додатні. Для того, щоб не мати від'ємних значень координати Y , в точці початку координат кожної зони значення Y_0 приймається рівним 500км. Для зв'язку координат Y між зонами, зліва від запису ординати точки приписують номер зони.

Відповідні повні координати точок A і B визначаються наступним чином: $Y_A = (NN)500 \text{ км} + y_A$, $X_A = x_A$; $Y_B = (NN)500 \text{ км} - y_B$, $X_B = x_B$.

Наприклад, координати $X = 2\ 567\ 845$, $Y = 35\ 376\ 450$ означають, що відповідна точка знаходиться в 2567 кілометрах 845 метрах від екватору та в 35 зоні і в 123 кілометрах 550 метрах на захід від осьового меридіану.

Координати ліній підписані між внутрішньою і хвилинною рамками (цілком - тільки біля кутів рамки). За допомогою такої координатної (кілометрової) сітки можна швидко знаходити координати об'єктів, наносити точки, указувати місце розташування зображених об'єктів (рис.3.6).

Для вказівки місця розташування об'єктів прийнято називати скорочені координати південно-західного кута того квадрата сітки, у якому розташовується об'єкт, даючи спочатку дві цифри для горизонтальної лінії, потім - для вертикальної. Так, на рис. 5 точка A знаходиться в квадраті 7600. Повні прямокутні координати точки A одержують як суму повних координат південно-західного кута квадрата і збільшень координат по осях X і Y (Δx і Δy): $X = X_{\text{пд.з.кута}} + \Delta x$, $Y = Y_{\text{пд.з.кута}} + \Delta y$.

Для нанесення точки по прямокутних координатах спочатку визначають квадрат, у якому ця точка повинна знаходитися. Потім на нижній горизонтальній лінії відкладають у масштабі збільшення ординати ΔY , що складають частину кілометра. На ліній вертикальній лінії квадрата відкладають у масштабі

збільшення абсциси ΔX . Перпендикуляри, побудовані з цих точок, у перетинанні дадуть шукану точку [Л4].

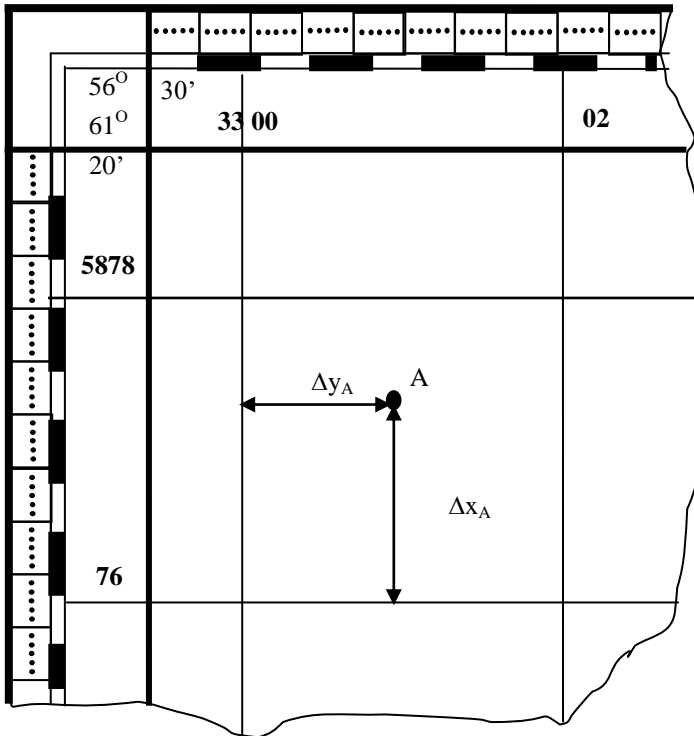


Рис.3.6. Визначення прямокутних координат точки

3.2. Цифрові карти і робота з ними

3.2.1. Географічні інформаційні системи і їхнє використання

Географічна інформаційна система (ГІС) - це сучасна комп'ютерна технологія для картування й аналізу об'єктів реального світу, також подій, що відбуваються. Ця технологія

поєднує традиційні операції роботи з базами даних, такими як запит і статистичний аналіз, з перевагами повноцінної візуалізації і географічного (просторового) аналізу, що надає карта. Технологія ГІС надає новий, більш ефективний, зручний і швидкий підхід до аналізу і рішення задач. Вона автоматизує процедуру аналізу і прогнозу. Цю технологію застосовують практично у всіх сферах людської діяльності.

Працююча ГІС містить у собі п'ять ключових складових: апаратні засоби, програмне забезпечення, дані, виконавці і методи.

Апаратні засоби. Це комп'ютер, на якому запущена ГІС.

Програмне забезпечення ГІС містить функції й інструменти, необхідні для збереження, аналізу і візуалізації географічної (просторової) інформації. Ключовими компонентами програмних продуктів є:

- інструменти для введення й оперування географічною інформацією;
- система керування базою даних (DBMS чи СКБД);
- інструменти підтримки просторових запитів, аналізу і візуалізації (відображення);
- графічний користувальницький інтерфейс (GUI чи ГІК) для легкого доступу до інструментів.

Дані. Це ймовірно найбільш важливий компонент ГІС. Дані про просторове положення (географічні дані) і зв'язані з ними табличні дані можуть збиратися і підготовлятися самим користувачем, або здобуватися в постачальників. У процесі керування просторовими даними ГІС інтегрує просторові дані з іншими типами і джерелами даних, а також може використовувати СКБД, застосовувані багатьма організаціями для упорядкування і підтримки наявних у їхньому розпорядженні даних.

Виконавці. Широке застосування технології ГІС неможливо без людей, що працюють із програмними продуктами і розробляють плани їхнього використання при рішенні реальних задач. Користувачами ГІС можуть бути як технічні фахівці, що розробляють і підтримують систему, так і звичайні

співробітники (кінцеві користувачі), яким ГІС допомагає вирішувати поточні щоденні справи і проблеми.

Методи. Успішність і ефективність (у тому числі економічна) застосування ГІС багато в чому залежить від правильно складеного плану і правил роботи, що складаються у відповідності зі специфікою задач і роботи кожної організації.

ГІС зберігає інформацію про реальний світ у виді набору тематичних шарів, що об'єднані на основі географічного положення. Будь-яка географічна інформація містить зведення про просторове положення, будь то прив'язка до географічних чи інших координат, чи посилання на адресу, назву дороги і т.п. При використанні подібних посилань для автоматичного визначення місця розташування об'єкта застосовується процедура, називана геокодуванням. З її допомогою можна швидко визначити і подивитися на карті де знаходиться цікавлячий вас об'єкт чи явище.

3.2.2. Векторні і растрові дані в ГІС

ГІС може працювати з двома типами даних - векторними і растровими. У векторній моделі інформація про точки, лінії і полігони кодується і зберігається у виді набору координат X, Y . Місце розташування точки (точкового об'єкта), наприклад свердловини, описується парою координат (X, Y) . Лінійні об'єкти, такі як дороги, ріки чи трубопроводи, зберігаються як набори координат X, Y . Полігональні об'єкти, типу річкових водозборів, земельних ділянок чи областей обслуговування, зберігаються у виді замкнутого набору координат. Векторна модель особливо зручна для опису дискретних об'єктів і менше підходить для опису безупинно мінливих властивостей, таких як типи ґрунтів чи приступність об'єктів. Растрова модель оптимальна для роботи з безупинними властивостями. Растрове зображення являє собою набір значень для окремих елементарних складових (осередків), воно подібно відсканованій карті. Обидві моделі мають свої переваги і

недоліки. Сучасні ГІС можуть працювати як з векторними, так і з растровими моделями.

3.2.3. Задачі, що вирішує ГІС

ГІС загального призначення, у числі іншого, звичайно виконує п'ять процедур (задач) з даними: уведення, маніпулювання, керування, запит і аналіз, візуалізацію.

Уведення. Для використання в ГІС дані повинні бути перетворені в придатний цифровий формат. Процес перетворення даних з паперових карт у комп'ютерні файли називається цифруванням. У сучасних ГІС цей процес може бути автоматизований із застосуванням сканерної технології, що особливо важливо при виконанні великих проектів, або, при невеликому обсязі робіт, дані можна вводити за допомогою дигитайзера (планшету). Багато даних вже переведені у формати, прямо сприймані ГІС-пакетами.

Маніпулювання. Часто для виконання конкретного проекту наявні дані потрібно додатково видозмінити відповідно до вимог конкретної системи. Наприклад, географічна інформація може бути в різних масштабах. Для спільної обробки і візуалізації всі дані зручніше представити в єдиному масштабі. ГІС - технологія надає різні способи маніпулювання просторовими даними і виділення даних, потрібних для конкретної задачі.

Керування. У невеликих проектах географічна інформація може зберігатися у виді звичайних файлів. Але при збільшенні обсягу інформації і росту числа користувачів для збереження, структурування і керування даними ефективніше застосовувати системи керування базами даних (СКБД). У ГІС найбільше зручно використовувати реляційну структуру, при якій дані зберігаються в табличній формі. При цьому для зв'язування таблиць застосовуються загальні поля. Цей простий підхід досить гнучкий і широко використовується в багатьох ГІС.

Запит і аналіз. При наявності ГІС і географічної інформації користувач в змозі одержувати відповіді на запити. Запити можна задавати як простим натиском мишею на визначеному

об'єкті, так і за допомогою розвинутих аналітичних засобів. За допомогою ГІС можна виявляти і задавати шаблони для пошуку, програвати сценарії по типі “що буде, якщо...”... Сучасні ГІС мають безліч могутніх інструментів для аналізу, серед них найбільш значимі два: аналізи близькості й аналіз накладення.

Для проведення аналізу близькості об'єктів відносно один одного в ГІС застосовується процес, називаний буферизацією.

Процес накладення включає інтеграцію даних, розташованих у різних тематичних шарах. У найпростішому випадку це операція відображення, але при ряді аналітичних операцій дані з різних шарів поєднуються фізично. Накладення, чи просторове об'єднання, дозволяє, наприклад, інтегрувати дані про ґрунти, ухил, рослинність і землеволодінні зі ставками земельного податку.

Візуалізація. Для багатьох типів просторових операцій кінцевим результатом є представлення даних у виді карти. Карта - це дуже ефективний і інформативний спосіб збереження, представлення і передачі географічної (яка має просторову прив'язку) інформації. ГІС надає нові інструменти, що розширюють і розвивають мистецтво і наукові основи картографії. З її допомогою візуалізація самих карт може бути легко доповнена звітними документами, тривимірними зображеннями, графіками і таблицями, фотографіями й іншими засобами.

3.2.4. Зв'язані з ГІС технології

ГІС тісно зв'язана поруч інших типів інформаційних систем. Її основна відмінність полягає в здатності маніпулювати і проводити аналіз просторових даних. Хоча і не існує єдиної загальноприйнятої класифікації інформаційних систем, приведений нижче опис повинний допомогти відокремити ГІС від настільних картографічних систем (desktop mapping) і технології глобального позиціонування (GPS).

Системи настільного картографування використовують картографічне представлення для організації взаємодії

користувача з даними. У таких системах усе засновано на картах, карта є базою даних. Більшість систем настільного картографування має обмежені можливості керування даними, просторового аналізу і настроювання.

Картам у ГІС відведене особливе місце. Процес створення карт у ГІС набагато більш простий і гнучкий, чим у традиційних методах ручного чи автоматичного картографування. Він починається зі створення бази даних. Як джерело одержання вихідних даних можна користатися й цифруванням звичайних паперових карт. Засновані на ГІС картографічні бази даних можуть бути безупинними (без розподілу на окремі аркуші і регіони) і не зв'язаними з конкретним масштабом. На основі таких баз даних можна створювати карти (в електронному виді чи як тверді копії) на будь-яку територію, будь-якого масштабу, з потрібним навантаженням, з її виділенням і відображенням необхідними символами. У будь-який час база даних може поповнюватися новими даними (наприклад, з інших баз даних), а наявні в ній дані можна коректувати в міру необхідності. У великих організаціях створена топографічна база даних може використовуватися як основу іншими відділами і підрозділами, при цьому можливо швидке копіювання даних і їхнє пересилання по локальних і глобальних мережах.

Дистанційне зондування і GPS. Методи дистанційного зондування - це науковий напрямок для проведення вимірів земної поверхні з використанням різних датчиків на борті літальних апаратів, таких як різні камери та приймачі системи глобального позиціонування. Ці датчики збирають дані у виді зображень і забезпечують спеціалізовані можливості обробки, аналізу і візуалізації отриманих зображень. Через відсутність засобів керування даними і аналізом навряд такі системи можна віднести до ГІС.

3.3. Прив'язка космічних знімків до географічних координат по орбітальним даним

3.3.1. Загальний підхід до рішення задачі прив'язки

космічних знімків до географічних координат

Під прив'язкою отриманих апаратурою КА зображень до географічних координат розуміється установлення відповідності границь відбитих на знімках ділянок місцевості границям заданих ланок карт цієї місцевості.

Задачу прив'язки зображень до географічних координат можна розділити на два етапи. На першому етапі здійснюється ідентифікація району зйомки (груба прив'язка). Ідентифікація має на меті визначити географічні координати центра (або кутових точок) ділянки, що відображена на знімку, і порівняти їх з урахуванням допусків точності з координатами центра (кутових точок) необхідного району. На другому етапі (при позитивному результаті першого) здійснюється уточнення границь ділянки огляду і прив'язка цих границь до робочих і еталонних карт місцевості.

На першому етапі спочатку розраховуються географічні координати підсупутникових точок у моменти часу початку і часу кінця перегляду смуги огляду. Ці моменти часу (бортового часу) фіксуються на борту КА і передаються на Землю під час сеансу зв'язку разом із знімками. Знаючи параметри орбіти КА і моменти часу початку і кінця зйомки району, можна розрахувати координати КА відносно земної поверхні під час знімання.

Уточнення границь відбитої на зображенні ділянки місцевості проводиться виходячи з інформації ідентифікації району, координат КА і параметрів знімальної апаратури.

Для знімка оптико-електронного або фотографічного датчика зображень такими параметрами є так названі елементи орієнтування. Де-які елементи орієнтування відомі з часу наземних випробувань (фокусна відстань об'єктиву, розміри фотоприймача, положення центрів строк та такі інші). Другі елементи орієнтування знімальної апаратури на час знімання передаються в складі спеціальної інформації під час сеансу зв'язку. До таких елементів орієнтування відносяться кути нахилу оптичної вісі об'єктиву відносно рухомої системи

координат. Для оптичних датчиків більш характерним маневром в орієнтуванні є поворот оптичної вісі датчика вбік від напрямку польоту КА (по крену). При цьому кут нахилу знімка α (поперечний кут нахилу) за звичай не повинен перебільшувати $\pm 30^{\circ}$. Це пов'язано із збільшенням розсіювання та поглинання світлових промінів атмосферою. Повздожні кути нахилу (по тангажу та рисканню) звичайно стабілізуються системою орієнтації та стабілізації платформи КА та сталому рівні.

Для знімка що отриманий радіолокаційним датчиком бокового огляду аналогами елементів орієнтування є параметри зондувального сигналу радіолокатора бокового огляду (РЛБО) та обмеження по роздільній здатності. Параметри для радіолокаційного датчика цілком відомі ще до початку знімання: вони задаються під час сеансу управління КА. Але система стабілізації КА працює завжди, тому фазові центри синтезованої апертури коливаються. Положення фазових центрів потрібно враховувати при первинній обробці даних космічного радіолокатора бокового огляду синтезованою апертурою РЛБО СА.[Л5]

Урахування елементів орієнтування датчика (параметрів РЛБО) здійснюється шляхом геометричних розрахунків відносно підсупутникової лінії меж району знімання та побудови їх на карті.

Слід зауважити, що точність прив'язки знімків по орбітальним даним не дуже висока з-за наявності реальних помилок в оцінці параметрів. Однак, вона є цілком достатньою для вирішення задачі ідентифікації району знімання, що відображений на знімку. До того ж, іноді немає альтернативи для прив'язки знімка до координат більш точними способами (по характерним або опорним точкам), оскільки на знімку може не бути достатньої інформації (наприклад, на знімку морського району).

3.3.2. Розрахунок географічних координат підсупутникової точки

За початкові дані для розрахунку географічних координат підсупутникової точки (ПТ) береться вектор із шести орбітальних параметрів КА [Л5]:

a [км]- велика піввісь еліпса орбіти;

e – ексцентриситет еліпса орбіти;

w [рад] - аргумент перигею орбіти;

i [рад] - нахилення орбіти;

Ω [рад] - початкове значення інерціальної довготи висхідного вузла орбіти;

t_n [с] - земний час проходження КА через точку перигею з указівкою дати.

Вектор орбітальних параметрів формується звичайно на основі траєкторних вимірів у сталому режимі польоту КА.

З рівняння Кеплера можна знайти значення ексцентричної аномалії E для заданого моменту часу t [с]:

$$E - e \cdot \sin E = \sqrt{\frac{\mu_0}{a^3(t-t_0)}}, \quad [\text{рад}] \quad (3.1)$$

де $\mu_0 = 398600$ [км³/с²] - постійна Землі.

Рівняння (3.1) трансцендентно, тому виразити E у чистому виді не можливо. Для рішення трансцендентних рівнянь мається кілька наближених чисельних методів рішення. Постановка задачі рішення рівняння виду (3.1) полягає в наступному: необхідно знайти такі значення E , щоб при підстановці їх у ліву частину (3.1) виконувалася тотожність.

Чисельне рішення трансцендентних рівнянь проводять звичайно в два етапи. На першому етапі необхідно відокремити корені рівняння, тобто знайти такі інтервали зміни перемінної E , де розташований тільки один корінь. Рівняння (3.1) має один корінь, тому що права частина (3.1) являє собою монотонно зростаючу на інтервалі $[0...2\pi]$ функцію. Іншими словами, на підставі фізичного змісту величини E можна затверджувати, що корінь рівняння (3.1) лежить в інтервалі $[0...2\pi]$. На другому етапі необхідно провести послідовне, крок за кроком (ітеративне) уточнення значення кореня, звужуючи на кожному кроці інтервал.

Відомо досить багато чисельних методів рішення трансцендентних рівнянь: табличний (графічний) спосіб, метод дихотомії (половинного ділення), метод хорд, метод Ньютона (метод дотичних), метод січних і т.д. Найвищу швидкість збіжності забезпечує метод Ньютона: абсолютна точність рішення 0.00001 досягається вже за 5-6 ітерацій.

Після знаходження ексцентричної аномалії положення КА на орбіті (E) необхідно розрахувати істину аномалію v на момент часу t :

$$v = 2 \arctg \left(\sqrt{\frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon}} \operatorname{tg} \frac{E}{2} \right) \quad [\text{рад}].$$

Аргумент широти на момент часу t можна одержати склавши аргумент перигею w і отримане значення істинної аномалії на момент t :

$$U = w + v \quad [\text{рад}].$$

Географічна широта підсупутникової точки φ_z у момент часу t може бути розрахована по формулі:

$$\varphi_T = \arcsin(\sin\{U\} \cdot \sin\{i\}).$$

Довгота підсупутникової точки λ_T у момент часу t визначається як

$$\lambda_T = \Omega + \arctg(\operatorname{tg}\{U\} \cdot \cos\{i\}) - w_3 \cdot (S_0 + t - t_{S_0}) + \psi_\Omega \frac{t}{T},$$

де

$w_3 = 7.29211 \cdot 10^{-5}$ [1/с] - кутова швидкість обертання Землі;

t_{S_0} - місцевий польотний час настання гринвичеської півночі;

S_0 - зоряний час на гринвичеському меридіані;

ψ_Ω - прецесія довготи висхідного вузла орбіти КА за один виток;

$$T - \text{період обертання КА: } T = \sqrt{\frac{a^3}{\mu_0}} \quad [\text{с}].$$

На наш час існує багато комп'ютерних програм для проведення балістичних розрахунків КА з можливістю прогнозування положення КА відносно точок на земній поверхні: WinOrbit, Orbitron, VxTrack та інші. Для роботи цих

програм потрібно задати параметри орбіти КА шляхом вводу двохрядкових TLE – елементів, задати поточний місцевий час і епоху та положення точки земної поверхні. Програми можуть проводити покрокові розрахунки по часу, що дозволяє проводити планування знімання. До того ж ці програми розраховують кути Сонця (освітлення) на заданий час.

Слід зауважити, що точки на земної поверхні задаються в цих програмах не як точки району знімання, а як положення деякого радіотехнічного засобу прийому інформації з КА (Tracking Server), тому поперечний кут відхилення датчика α слід розраховувати як додатковий до кута піднесення ϵ (Elevation).

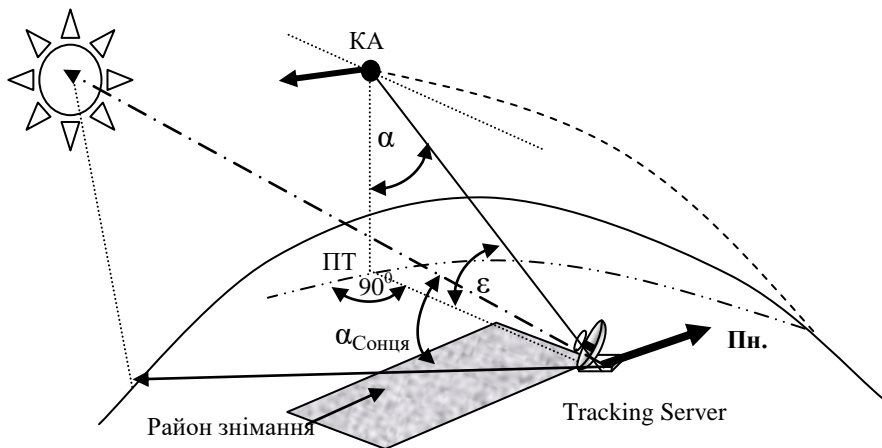


Рис.3.7. Геометричні особливості розрахунків підсупутникових точок в програмах

Після розрахунків географічних координат двох під супутникових точок (на момент початку та момент кінця знімання) їх положення слід зафіксувати на топографічній карті потрібного масштабу. Масштаб топографічної карти доцільно визначати таким чином, щоб район знімання разом із відрізком під супутниковою лінією розміщувався не більш ніж на чотирьох сусідніх аркушах карти. При використанні цифрових карт це положення не є суттєвим.

3.3.3. Визначення меж району знімання

Визначивши на етапі ідентифікації району зйомки географічні координати підсупутникових точок у моменти часу початку і кінця перегляду району можна нанести ці точки на робочу карту. З'єднавши ці точки на карті прямою лінією, визначимо під супутникову трасу КА. Побудувавши з початкової і кінцевої точки центральної лінії перпендикуляри, одержимо лінії північної і південної границі зони огляду.

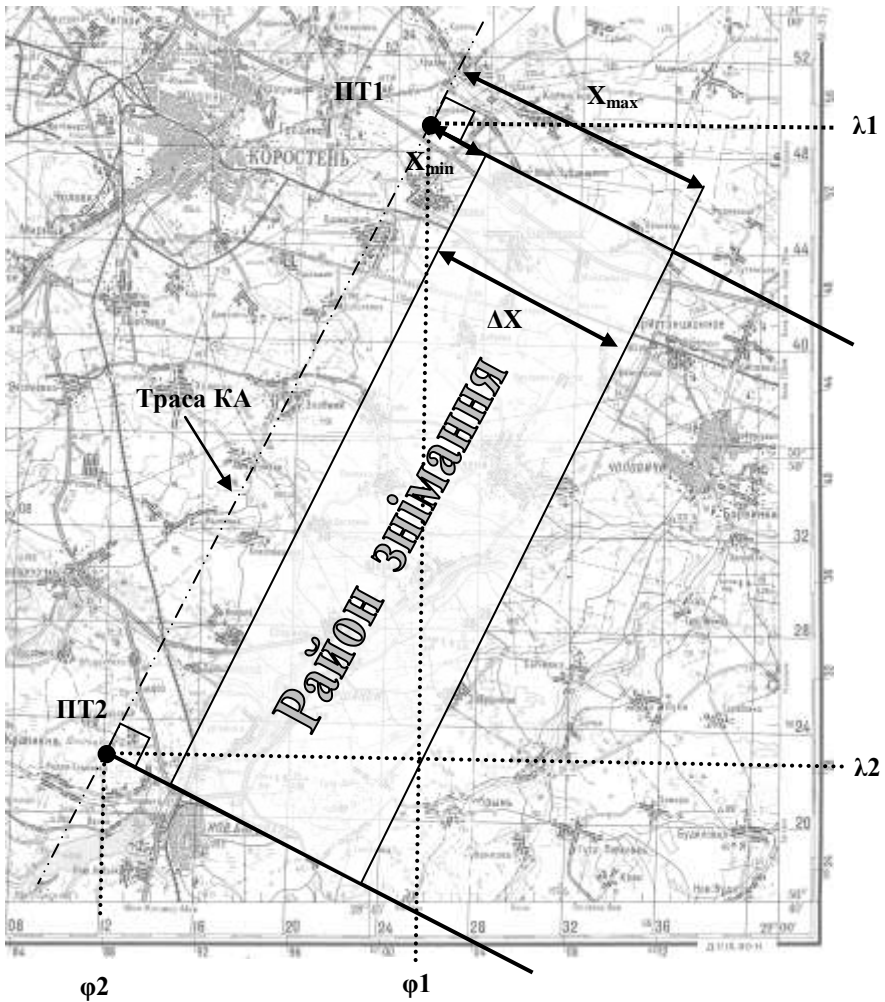


Рис.3.8. Визначення району знімання відносно підсупутникових точок

Визначення західної і східної границь потребує розгляду особливостей одержання зображення окремо для оптико-електронних датчиків і радіолокатора бокового огляду.

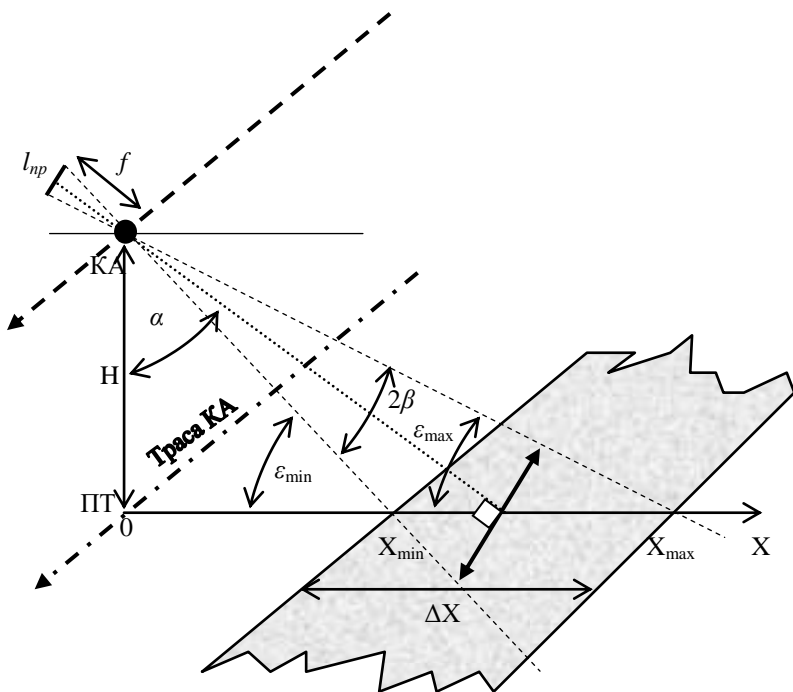


Рис.3.9. Визначення ближньої та дальньої меж смуги огляду оптико-електронних сканерних датчиків відносно підсупутникової точки

Геометричні умови визначення меж району знімання для оптико-електронного датчика з лінійкою фотоприймачів на ПЗЗ показані на рис.3.9. Оскільки для вирішення задачі ідентифікації району великої точності не потрібно, вважаємо поверхню Землі в районі знаходження КА та ланки знімання плоскою. Це припустимо тільки для відносно не великих висот КА (200-800км) та кутів відхилення оптичної вісі не більше $\pm 30^{\circ}$.

Вихідними даними для розрахунку є висота КА над землею поверхнею H , кут відхилення оптичної вісі α , фокусна відстань об'єктиву f , та довжина лінійки фотоприймачів l_{np} .

З початку знаходимо кут полю зору датчика вздовж напрямку лінійки фотоприймачів 2β по формулі

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{l_{np}}{2f}\right).$$

Далі знаходимо відстань між ПТ та ближньою межею району знімання X_{\min} :

$$X_{\min} = H \cdot \operatorname{ctg}(\varepsilon_{\min}) = H \cdot \operatorname{ctg}(\alpha - \beta),$$

де ε_{\min} – кут піднесення КА для спостерігача, що знаходиться на лінії ближньої межі.

Наступний крок - знаходимо відстань між ПТ та дальньою межею району знімання X_{\max} :

$$X_{\max} = H \cdot \operatorname{ctg}(\varepsilon_{\max}) = H \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \beta),$$

де ε_{\max} – кут піднесення КА для спостерігача, що знаходиться на лінії дальньої межі.

Відстані і відкладаються на перпендикулярах к трасі КА в під супутникових точках. По краях цих відрізків проводять дальню та ближню межу району знімання (рис.3.8).

Для визначення ширини поля спостереження та смуги огляду радіолокатора бокового огляду доцільно задатися найгіршою роздільною здатністю з поперечній дальності δx і потенційною роздільною здатністю з шляховій дальності δy .

Оскільки процес синтезування апертури в РЛБО СА вимагає рівномірного прямолінійного руху на ділянці синтезування, приймемо швидкість КА постійної: $V_{КА}=7.9\text{км/с}$.

Зона огляду імпульсних РЛБО СА по дальності визначається періодом повторення зондувальних імпульсів T_{Π} . У когерентних РЛБО СА бокового огляду величина T_{Π} обмежується припустимою величиною побокових викидів функції невизначеності уздовж азимутальної осі [Л10]. Для усунення кутової неоднозначності період повторення імпульсів РЛБО СА повинен вибиратися з умови

$$T_{\Pi} \leq \frac{\delta y}{2V_{КА}}$$

де $V_{ка}$ — лінійна швидкість супутника.

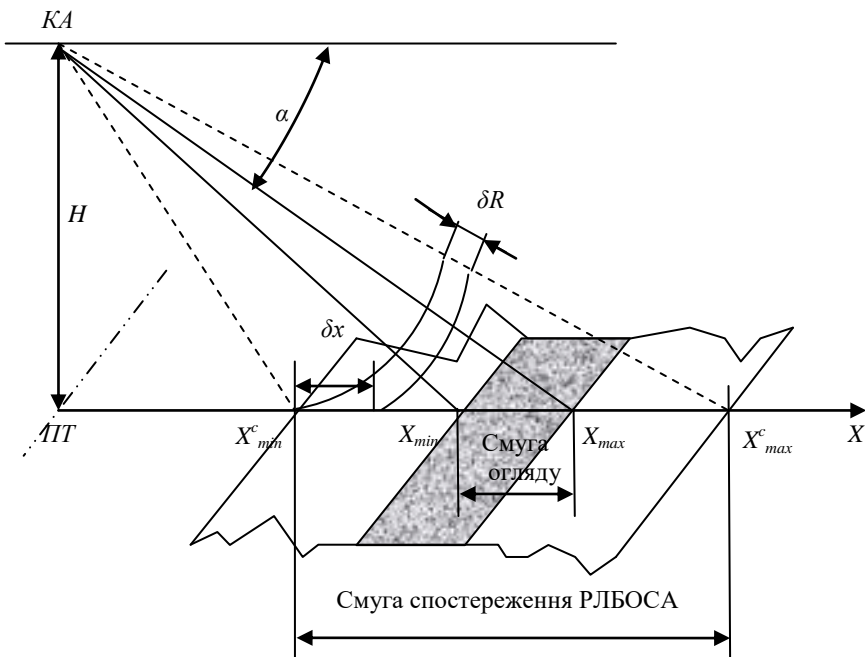


Рис.3.10. Визначення ширини поля спостереження РЛБО СА

При цьому обмеженні зона огляду РЛБО СА по дальності визначається співвідношенням

$$X_{\max} = \frac{c \cdot T_{\Pi}}{2 \cdot \cos(\alpha)},$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - швидкість поширення радіохвиль;
 α - кут візування на дальню межу зони огляду.

Тоді
$$X_{\max} \leq \frac{c \cdot \delta y}{4 \cdot V_{KA} \cdot \cos(\alpha)}.$$

При високих вимогах до розрізнення уздовж лінії шляху зона огляду поперек напрямку польоту для супутникових РЛБО СА буде мати ширину не більше декількох десятків кілометрів.

Для повного використання можливостей бокового огляду з КА радіолокаційна станція здійснює вибір зони огляду в межах значно більшої смуги земної поверхні, паралельної лінії шляху супутника, чим кілька десятків кілометрів. Ця смуга називається

смугою спостереження. Отже, радіолокаційна станція сконструйована таким чином, щоб антенний промінь у вертикальній площині міг перебувати в будь-якому напрямку в межах поля спостереження. Ця зона з одного боку, (ближнього до супутника) обмежується погіршенням потенційної здатності поперечної дальності, а з іншого боку (дальнього) - дальністю дії РЛБО СА.

У випадку перенацілювання смуги огляду в межах смуги спостереження дальня межа смуги огляду X_{\max} визначається як

$$X_{\max} = \frac{H}{\operatorname{tg}(\alpha)}.$$

В такому випадку ближня межа смуги огляду X_{\min} задається виходячи з конструктивних особливостей РЛБО СА: кількості елементів в рядку зображення N_x та середньої роздільної здатності з поперечної дальності $\delta x_{cp}(\alpha)$ для даного кута візування:

$$X_{\min} = X_{\max} - N_x \delta x_{cp}(\alpha) = X_{\max} - N_x \cdot \delta R \cdot \cos(\alpha).$$

Таким чином, зона огляду РЛБО СА визначається як смуга, що знаходиться збоку від підсупутникової лінії на відстані X_{\min} і шириною $X_{\max} - X_{\min}$.

Зі збільшенням кута візування α погіршується роздільна здатність з поперечної дальності $\delta x_{cp} = \delta R \cdot \cos(\alpha)$, де δR - роздільна здатність РЛБО СА з нахильної дальності.

При зменшенні кута візування збільшується дальність дії РЛБО СА $R = \frac{H}{\sin(\alpha)}$. Та при обмеженому розмірі синтезованої антени L_c погіршується розрізнення уздовж лінії шляху:

$$\delta y = \frac{\lambda \cdot H}{2L_c \sin(\alpha)},$$

де λ – довжина хвилі передавача РЛБО СА.

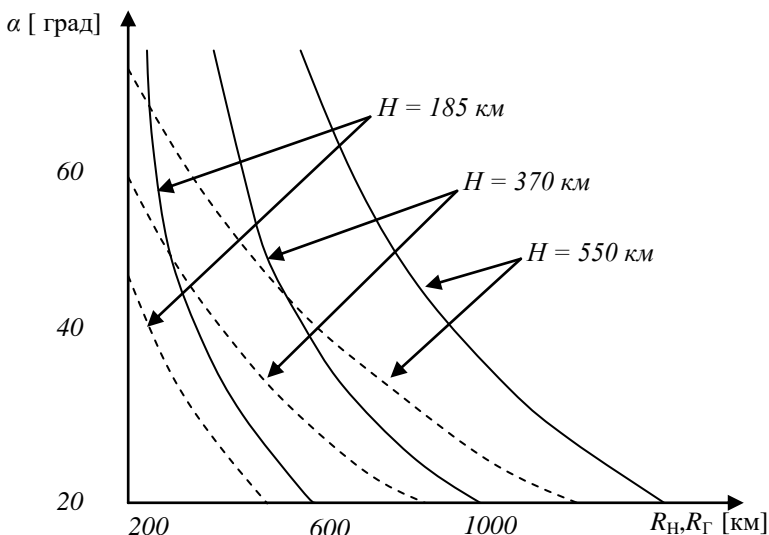


Рис.3.11. Нахильна й горизонтальна дальності як функцій висоти орбіти КА.

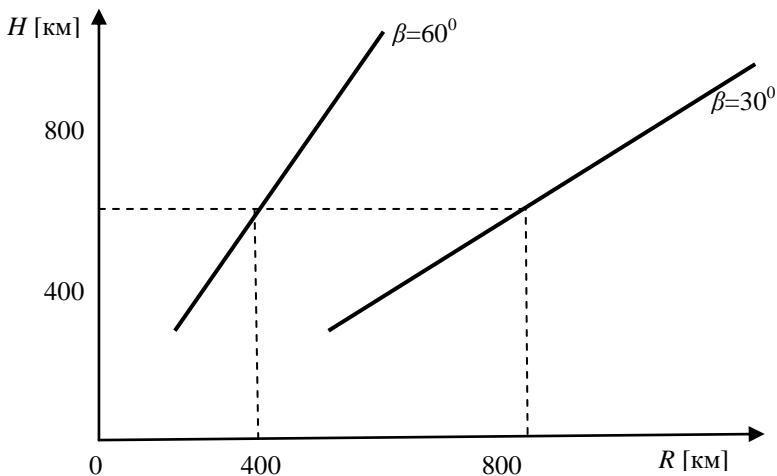


Рис.3.12. Залежність поля спостереження від висоти орбіти

Якщо прийняти як граничні значення погіршення розрізнення у два рази в порівнянні з максимальним, то поле радіолокаційного спостереження із супутника буде обмежено кутами α приблизно від 30° до 60° [Л10]. Оскільки

спостереження із супутника може вестися по обидва боки, то поле спостереження має розрив, розташований в області безпосередньо під траєкторією КА.

На рис.3.11,3.12 наведені графіки [Л10], що характеризують залежність нахильної й горизонтальної дальностей і розмірів поля спостереження від висоти польоту КА при круговій орбіті. Так, наприклад, для висоти орбіти, рівної 600 км, поле спостереження простирається на дальності від 300 до 800км, відлічуваної уздовж поверхні Землі.

Довжина зони огляду визначається як і для оптико-електронних скануючих датчиків:

$$Y = 2\pi \cdot R_3 \cdot \arccos(\cos\{\Delta\varphi\} \cdot \cos\{\Delta\lambda\}),$$

де R_3 – радіус Землі на широті спостереження; $(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$ – різниці географічних координат під супутникових точок.

Більш точна прив'язка знімків до координат здійснюється в процесі усунення геометричних перекручувань по опорних (характерних) точках місцевості або по елементам орієнтування датчика зображення фотограмметричними методами.

3.4. Аналітичні основи фотограмметрії

3.4.1. Елементи знімка як центральної проекції

Одержуваний при зйомці Землі з КА знімок являє собою перспективне зображення ділянки місцевості. Кожна точка місцевості геометрично будується на площині зображення відповідним променем за законами лінійної перспективи.

Необхідною умовою побудови лінійної перспективи є наявність центра проектування, через який проходять промені, що проектують. При аналізі і вимірі знімка звичайно приймають, що об'єктів - ідеальний (ортоскопічний). Тоді центром проектування є точка яку називають центром проекції S' (рис.3.13).

Згідно рис.3.13. промені світла від точок об'єктів по прямих лініях, що проходять через центр проекції S' , попадають на площину знімка P' і після фіксації датчиками утворюють знімок.

Одержуване на площині P' в такий спосіб зображення є зворотним

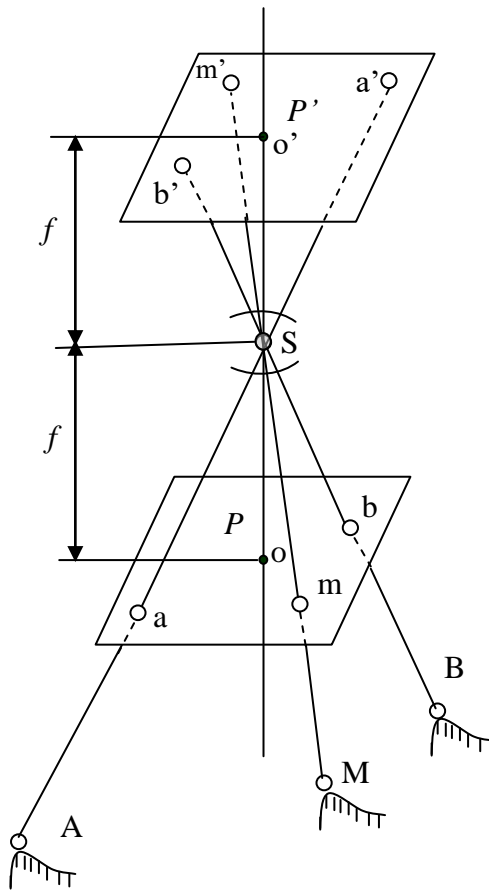


Рис.3.13. Хід променів, що проєктують, через центр проєкції у знімальній камері

Якщо центр проєкції й об'єкт розташовані по різні сторони від площини проєкцій, то виходить пряме зображення. Надалі будемо користатися в основному прямим зображенням.

Основні елементи знімка як центральної проєкції зображені на рис.3.14.

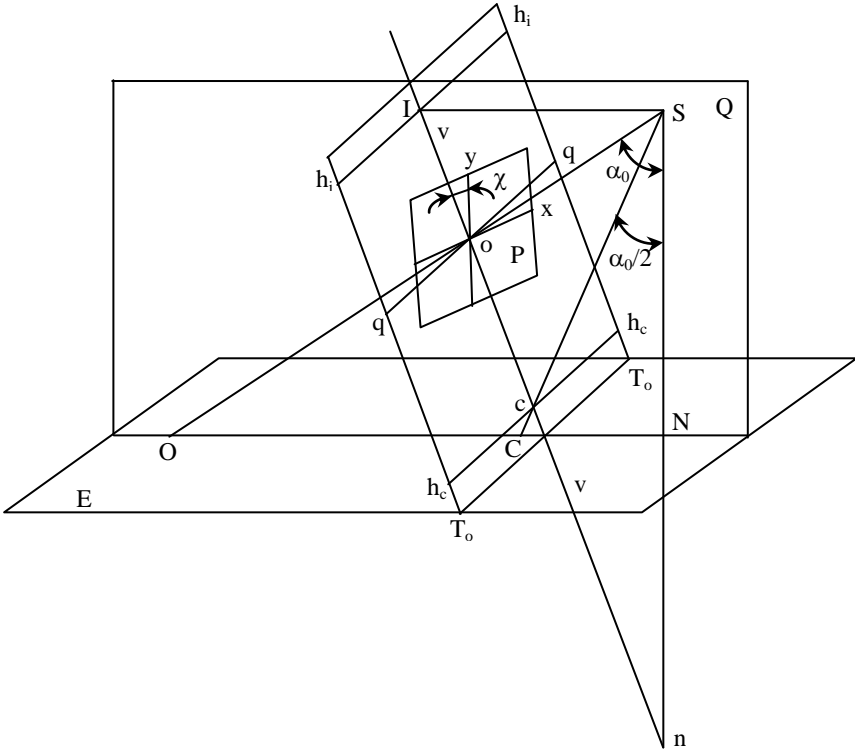


Рис.3.14. Основні елементи знімка як центральної проєкції

На рисунку позначене:

E - горизонтальна площина, що проходить через яку-небудь точку об'єкта і називана предметної;

P - площина зображення об'єкта (знімок);

S - центр проєкції;

S_0 - головний промінь, чи пряма, що проходить через центр проєкції перпендикулярно до площини знімка;

O - головна точка знімка, чи точка перетинання головного променя зі знімком;

α_0 - кут нахилу знімка - кут між головним променем і прямою, що проходить через центр проєкції;

T_0T_0 - вісь перспективи - лінія перетинання площини знімка з предметною площиною;

Q - площина головного вертикала - вертикальна площина проходяча через головний промінь;

N_0 - лінія напрямку зйомки - перетинання площини головного вертикала з предметною площиною.

vv - головна вертикаль - перетинання площини головного вертикала з площиною знімку;

n - точка надира - перетинання прямовисної лінії, що проходить через центр проекції, із площиною знімка;

qq - головна горизонталь - пряма на знімку, що проходить через головну точку знімка перпендикулярно головній вертикалі;

$h_iS_ih_i$ - площина дійсного об'єру - горизонтальна площина, що проходить через центр проекції;

h_ih_i - лінія дійсного об'єру - перетинання площини дійсного об'єру з площиною знімка;

I - головна точка сходу - перетинання лінії дійсного об'єру з головною вертикаллю;

c - точка нульових перекручувань - перетинання бісектриси кута нахилу знімка з площиною знімка;

C - точка в предметній площині, що відповідає точці нульових перекручувань;

N - точка в предметній площині, що відповідає точці надира.

У камерах головну оптичну вісь об'єктива сполучають з головним променем, променем відрізок S_0 дорівнює фокусній відстані об'єктива f , тобто $S_0=f$. Відстань SN від центра проекції до предметної площини дорівнює висоті зйомки H , тобто $SN=H$.

Крім головної горизонталі, на знімку є інші горизонталі; одна з них - лінія $h_c h_c$ проходить паралельно лінії qq через точку нульових перекручувань c і зветься лінії неспотвореного масштабу. По цій лінії перетинаються нахильний і горизонтальний знімки, отримані з одного центра проекції S . Таким чином, лінія неспотворених масштабів належить одночасно нахильному і горизонтальному знімкам і внаслідок ці масштаби обох знімків по цій лінії рівні.

Необхідно відзначити деякі загальні властивості центральної проєкції:

- прямі лінії зображуються на знімку прямими;
- якщо лінія проходить через центр проєкції, то вона зображується у виді точки;
- пересічні лінії зображуються пересічними.

3.4.2. Системи координат, застосовувані у фотограмметрії

При вимірі знімків, визначенні місця розташування точок об'єктів і місцевості у фотограмметрії використовуються різні системи координат.

Положення точки чи об'єктива місцевості може визначатися:

- 1) у лівій геодезичній системі прямокутних координат Гауса $O_{\Gamma}X_{\Gamma}Y_{\Gamma}Z_{\Gamma}$ (рис.3.15,а);
- 2) у правій прямокутній системі координат $OXYZ$, називаної фотограмметричною системою (рис.3.15,б);
- 3) у правій геоцентричній системі координат $O'_{\Gamma} X'_{\Gamma}Y'_{\Gamma}Z'_{\Gamma}$ (рис.3.16).

Ліва геодезична система прямокутних координат Гауса є розширенням на тривимірний випадок системи координат Гауса, застосовуваної при роботі з картою.

Початок і напрямки осей фотограмметричної системи координат можна вибирати довільно. В окремому випадку початок сполучають з якою-небудь точкою місцевості, наприклад, із точкою A (рис.3.15,б) чи з центром проєкції S , а площину XU установлюють горизонтально.

При рішенні фотограмметричних задач на великі відстані застосовують праву геоцентричну систему координат. Початок цієї системи - у центрі земного еліпсоїда, вісь Z'_{Γ} сполучена з полярною віссю, вісь X'_{Γ} встановлена в площині початкового (гринвичського) меридіана (рис.3.16).

Положення точки на знімку визначається в плоскій прямокутній системі координат $(O'xu)$ (рис.5). Початок координат знаходиться звичайно в головній точці знімка, тобто точки (0) і

(0') збігаються. Вісь (0) сполучають із прямої, що з'єднує координатні мітки 1-2, проводять паралельно стороні рамки кадру.

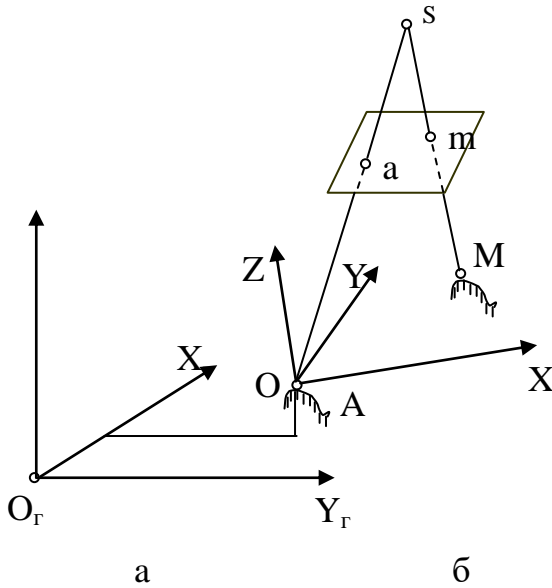


Рис.3.15. Геодезична (а) і фотограмметрична(б) системи координат

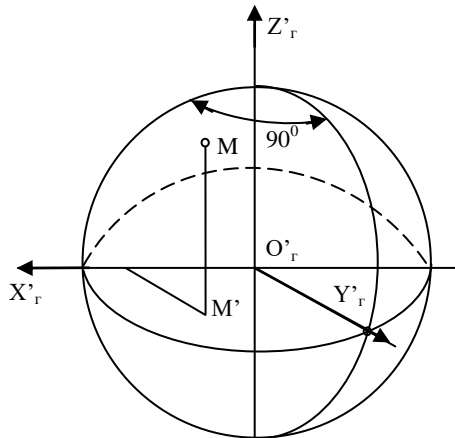


Рис.3.16. Геоцентрична система координат

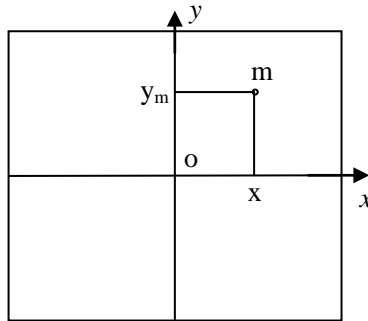


Рис.3.17. Система координат на знімку

Координати точки зображення об'єкта на знімку виражаються парою чисел, наприклад для точки m на рис.3.17 маємо пару (x_m, y_m) . Щоб знайти координати цього об'єкта на місцевості, необхідно знати величини, що визначають просторове положення знімка з зображенням об'єкта в момент зйомки. Ці величини називаються елементами орієнтування знімка. Розглянемо ці елементи стосовно до знімка.

3.4.3. Елементи орієнтування знімка

Елементи орієнтування поділяються на елементи внутрішнього і зовнішнього орієнтування.

Елементи внутрішнього орієнтування визначають положення центра проекції щодо знімка. Вони містять у собі координати головної точки O знімка в плоскій прямокутній системі координат $o'xy$ і фокусну відстань об'єктива знімальної камери f . Знаючи елементи внутрішнього орієнтування, можна по координатах точок зображень на знімку відновити пучок променів, що існував в момент зйомки відповідних точок місцевості.

Елементи зовнішнього орієнтування знімка визначають положення пучка променів у момент зйомки щодо геодезичної чи фотограмметричної системи координат. Вони містять у собі координати точки зйомки (у який знаходився центр проекції S) і

кути, що визначають орієнтування в просторі знімальної камери (плоскої прямокутної системи координат знімка).

Щоб пояснити, як використовуються елементи орієнтування, знайдемо залежність між просторовими і плоскими координатами точки знімка[Л6]. З цією метою введемо просторову систему координат $SXYZ$ з початком у центрі проєкції S (рис.3.17). Координатні осі цієї системи паралельні відповідним осям фотограмметричної системи $OXYZ$.

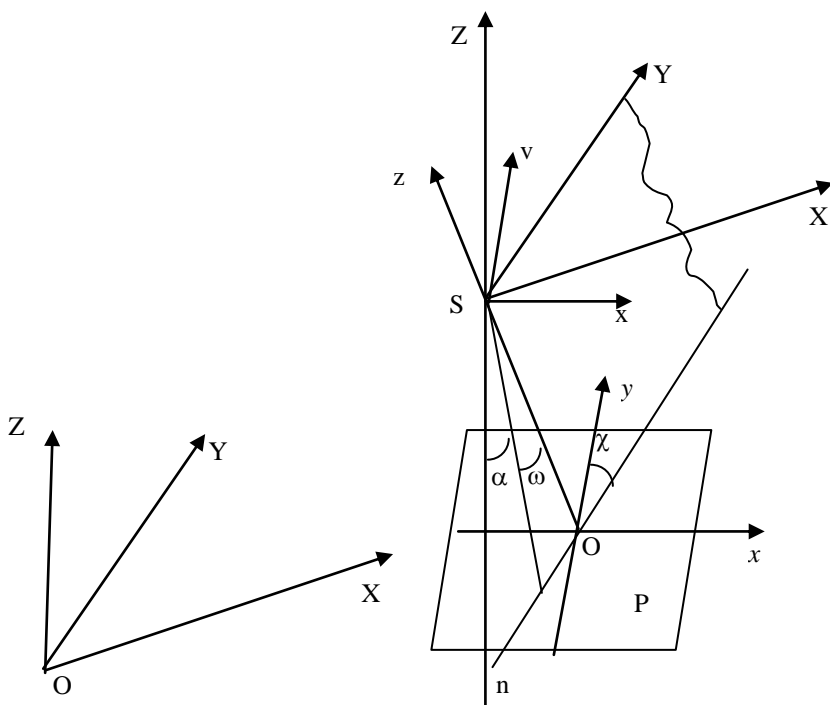


Рис.3.17. Друга система елементів орієнтування

Крім того, введемо допоміжну систему координат $Sxyz$, осі x і y якої паралельні відповідні осям плоскої системи координат oxy , а вісь z збігається з головним променем S_0 . Координати будь якої точки знімка в цій системі будуть x, y і $z=-f$.

Використовуючи формули перетворення координат, одержуємо

$$\begin{aligned}
 X &= a_{11}(x - x_0) + a_{12}(y - y_0) + a_{13}f \\
 Y &= a_{21}(x - x_0) + a_{22}(y - y_0) - a_{23}f \\
 Z &= a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) - a_{33}f,
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

де a_{11}, a_{12}, a_{13} - косинуси кутів, складених віссю X з осями хуз;
 a_{21}, a_{22}, a_{23} - косинуси кутів, складених віссю Y з осями хуз;
 a_{31}, a_{32}, a_{33} - косинуси кутів, складених віссю Z з осями хуз;
 $f = S_0$ - фокусна відстань.

Косинуси, що входять у формули перетворення координат, називаються *направляючими косинусами*.

Відповідно до формул (3.2) перехід від плоских координат точки знімка до просторових координат можливий при наявності відомих елементів орієнтування.

3.4.4 Дві системи елементів орієнтування

Параметри, якими визначаються направляючі косинуси, входять до складу елементів зовнішнього орієнтування знімків. Для визначення положення зв'язування променів у момент фотографування у фотограмметрії служать дві системи елементів зовнішнього орієнтування.

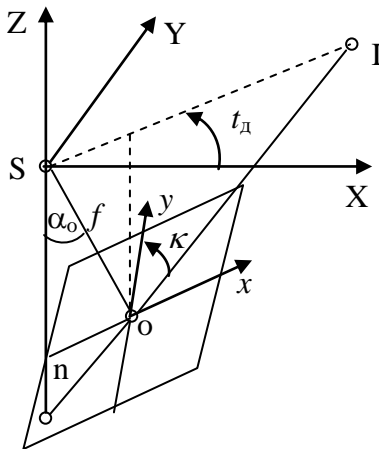


Рис.3.18. Перша система елементів орієнтування
 До першої системи (рис.3.18) відносяться:

X_S, Y_S, Z_S - координати точки фотографування, у якій знаходився центр проєкції S ;

α_0 - кут нахилу знімка, чи кут відхилення оптичної осі об'єктива фотоапарата від прямовисної лінії;

t_d - дирекційний кут оптичної осі об'єктива - кут між віссю X і проєкцією головного променя на площину XU ;

χ - кут повороту знімка - кут на знімку між головною вертикаллю і віссю u .

Друга система елементів зовнішнього орієнтування зображена на рис.3.17 і містить у собі:

X_S, Y_S, Z_S - координати точки фотографування;

α - подовжньої кут нахилу знімка, лежить між віссю Z і проєкцією головного променя на площину XZ ;

w - поперечний кут нахилу знімка, складений головним променем із площиною XZ ;

χ - кут повороту знімка - кут на знімку між віссю Y і слідом площини, що проходить через головний промінь і вісь Y .

Отже, із шести елементів зовнішнього орієнтування три - лінійні, вони визначають положення центра проєкції, а інші - кутове.

З них α_0 і t_d чи α і w фіксують напрямок головного променя, а χ - поворот знімка навколо головного променя.

Формули (3.3) виражають направляючі косинуси через кутові елементи (α_0, w, χ) другої системи зовнішнього орієнтування знімка [Л6].

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \alpha \cos \chi - \sin \alpha \sin \chi; \\ a_{12} &= -\cos \alpha \sin \chi - \sin \alpha \sin \omega \cos \chi; \end{aligned} \quad (3.3,a)$$

$$\begin{aligned} a_{13} &= -\sin \alpha \cos \omega; \\ a_{21} &= \cos \omega \sin \chi; \\ a_{22} &= \cos \omega \cos \chi; \end{aligned} \quad (3.3,b)$$

$$a_{23} = -\sin \omega;$$

$$\begin{aligned}
 a_{31} &= \sin \alpha \cos \chi - \cos \alpha \sin \omega \sin \chi; \\
 a_{32} &= -\sin \alpha \sin \chi + \cos \alpha \sin \omega \cos \chi; \\
 a_{33} &= \cos \alpha \cos \omega;
 \end{aligned}
 \tag{3.3,в}$$

Аналогічно можна вивести формули, що виражають направляючі косинуси через кутові елементи (α_0, t_d, χ) першої системи зовнішнього орієнтування [Л5]

3.4.5 Зв'язок координат відповідних точок місцевості і знімка

Нехай із точки S отриманий знімок P (рис.3.19). Точка M місцевості зобразилася в точці m . Знайдемо залежність між координатами цих точок:

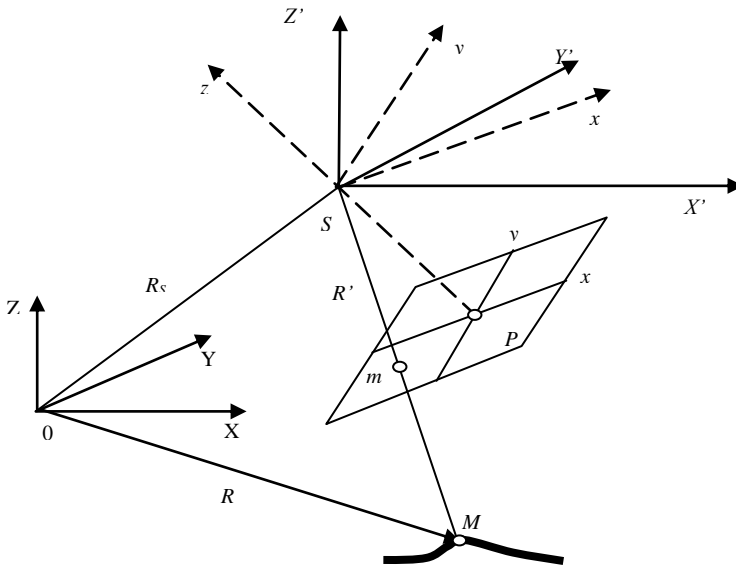


Рис.3.19. Схема зв'язку координат точок місцевості і знімка

$$X - X_S = (Z - Z_S) \frac{a_{11}(x - x_0) + a_{12}(y - y_0) - a_{13}f}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) - a_{33}f} .$$

$$Y - Y_S = (Z - Z_S) \frac{a_{21}(x - x_0) + a_{22}(y - y_0) - a_{23}f}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) - a_{33}f}$$

Отже, один знімок дозволяє скласти для кожної точки, що зобразилася на ньому, два рівняння з трьома невідомими координатами точки місцевості. Звідси випливає що даних одного знімка недостатньо для визначення положення точки місцевості. По одиночному знімку координати точки місцевості можна знайти лише в окремому випадку коли висота зйомки відома. На практиці це може бути, коли місцевість майже не відрізняється від горизонтальної площини.

$$x - x_0 = -f \frac{a_{11}(X - X_S) + a_{21}(Y - Y_S) + a_{31}(Z - Z_S)}{a_{13}(X - X_S) + a_{23}(Y - Y_S) + a_{33}(Z - Z_S)} .$$

$$Y - Y_S = -f \frac{a_{12}(X - X_S) + a_{22}(Y - Y_S) + a_{32}(Z - Z_S)}{a_{13}(X - X_S) + a_{23}(Y - Y_S) + a_{33}(Z - Z_S)}$$

3.4.6 Залежність між координатами відповідних точок горизонтального і нахильного знімків

Найбільша точність і простота вимірів досягаються по горизонтальних знімках, але одержати строго горизонтальні знімки звичайно неможливо. Однак можна перейти від координат точок, обмірюваних на нахильному (плановому, перспективному) знімку, до координат відповідних точок горизонтального знімка, якщо відомі кутові елементи зовнішнього орієнтування нахильного знімка. Цей процес називається *трансформуванням координат* [Л6].

Припустимо, з того самого центра проекції S виконано два знімки місцевості - горизонтальний P^0 і нахильний P (рис.3.20).

Нехай x^0 і y^0 - координати зображення m^0 точки M місцевості на горизонтальному знімку P^0 , а x та y - координати зображення m тієї ж точки місцевості на нахильному знімку P .

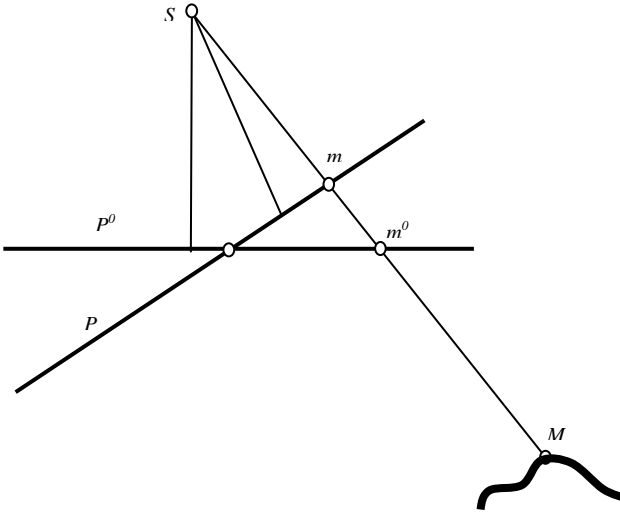


Рис.3.20. Схема залежності координат точок горизонтального і нахильного знімків

Застосувавши вищенаведені формули, одержимо

$$x^0 = -f \frac{a_{11}(x - x_0) + a_{12}(y - y_0) - a_{13}f}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) - a_{33}f}$$

$$y^0 = -f \frac{a_{21}(x - x_0) + a_{22}(y - y_0) - a_{23}f}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) - a_{33}f}$$

Формули придатні при будь-яких значеннях кутових елементів зовнішнього орієнтування знімка.

3.4.7. Загальна формула масштабу знімка

Зображення на знімку по своїх геометричних властивостях відрізняється від об'єкта зйомки - ландшафту. Ці відмінності визначаються, зокрема, масштабом знімка m_{zn} . Якщо на знімку відображається ділянка місцевості, що представляє собою горизонтальну площину, а кут нахилу оптичної осі об'єктива камери в момент зйомки дорівнює нулю (знімок -

горизонтальний) , то масштаб такого знімка величина, постійна по полю кадру.

На нахильному знімку внаслідок перспективних викривлень масштаб міняється від точки до точки й у довільній точці а кадру характеризується відношенням

$$\frac{1}{m_{zn}} = \frac{dl}{dL}, \quad (3.4)$$

де dl і dL - відповідні нескінченно малі відрізки знімку і місцевості., узяті по будь-якому заданому напрямку (рис.3.21).

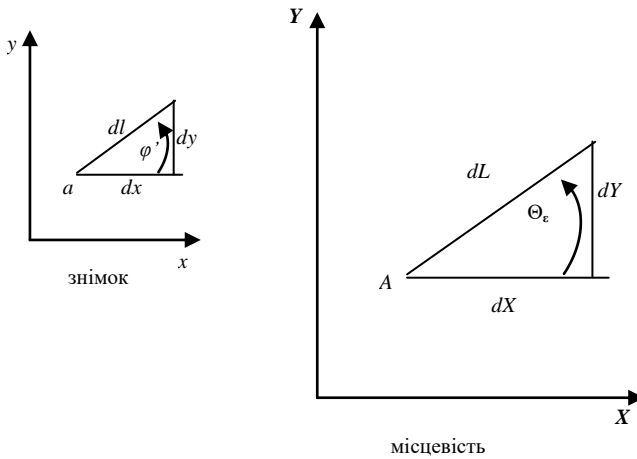


Рис.3.21. До визначення масштабу знімка

Грунтуючись на відношенні (3.4), можна знайти загальну формулу масштабу для кожної точки знімка по будь-якому напрямку.

$$\frac{1}{m_{zn}} = \frac{f}{H} \frac{g_1^2}{\sqrt{(g_1 \cdot \cos \varphi + g_2 \cdot \sin \varphi)^2 + \sin^2 \varphi}}, \quad (3.5)$$

де значення

$$g_1 = \cos \alpha_0 - \frac{y}{f} \sin \alpha_0 \quad \text{і} \quad g_2 = \frac{x}{f} \sin \alpha_0 \quad (3.6)$$

є постійними для даної точки знімка.

Аналіз виражень показує, що масштаб знімка залежить від

- висоти ведення розвідки H ,
- фокусної відстані об'єктива апарата f ,
- кута нахилу знімка α_0 ,
- положення точки a , з якої виходить нескінченно малий відрізок dl ,
- від напрямку φ' цього відрізка.

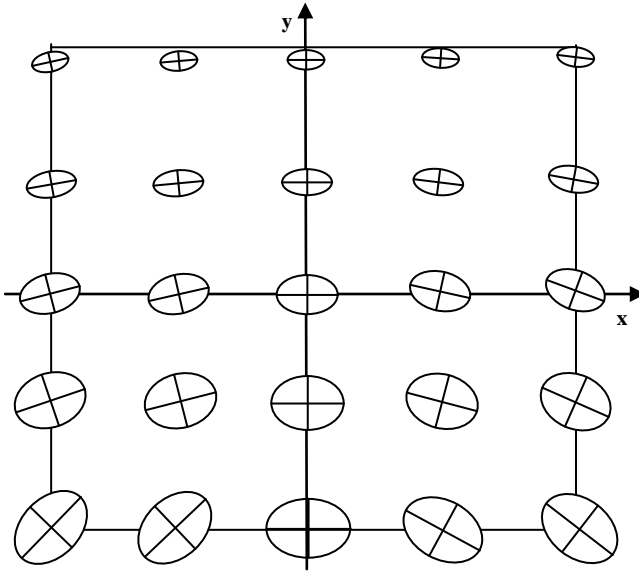


Рис.3.22. Картина розподілу масштабних викривлень на знімку

Наочне представлення про картину змін масштабу в межах знімка дає рис.3.22, де побудовані еліпси масштабних викривлень для нахиленого на 30^0 знімка.

Для знімків, що мають інші значення кута нахилу і фокусної відстані, розподіл масштабних викривлень по полю кадру трохи відрізняється від зображеного на рис.3.22, однак загальний характер розподілу викривлень зберігається [Л6].

3.4.8. Масштаби горизонтального, планового

і перспективного знімків

Розглянемо застосування формули (3.5) для визначення масштабів горизонтального і планового знімків.

Для горизонтального знімка $\alpha_0 = 0^0$. Тому формула (3.5) приймає вид

$$\frac{1}{m_{zn}} = \frac{f}{H}. \quad (3.7)$$

Звідси випливає, що масштаб горизонтального знімка плоскої місцевості - величина постійна.

Кут нахилу планового знімка не нульовий, однак звичайно не перевищує $\pm 3^0$. При малих значеннях кута нахилу вираження (3.6) можна представити у виді

$$g_1 = 1 - \frac{y}{f} \alpha_0; \quad g_2 = \frac{x}{f} \alpha_0.$$

Підставивши ці значення у формулу (3.5), одержимо масштаб планового знімка в довільній точці за напрямком, що задається кутом φ :

$$\frac{1}{m_{CH}} = \frac{f}{H} \left\{ 1 - \frac{\alpha_0}{f} \left[y \cdot (1 + \sin^2 \varphi) + \frac{x}{2} \sin 2\varphi \right] \right\}.$$

Якщо потрібно визначити середній по всім напрямкам масштаб $1/m_{CH}$, то

$$\frac{1}{m_{CH}} = \frac{f}{H} \left\{ 1 - \frac{3y}{2f} \alpha_0 \right\} = \frac{f}{H} - \frac{3y}{2H} \alpha_0. \quad (3.8)$$

По цій формулі і визначається середній масштаб у довільній точці планового знімка. У формулу входить тільки одна з двох координат довільної точки знімка - координата y . Звідси випливає, що геометричним місцем точок, у яких середній масштаб $1/m_{CH} = const$, є горизонталі.

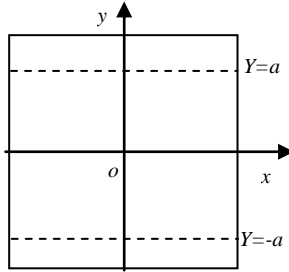


Рис.3.23. До визначення масштабу планового знімку в зоні між двома симетричними обр'ями

Розглянемо дві горизонталі на плановому знімку, які обумовлені значеннями координати $y = \pm a$ (рис.3.23). Як випливає з вираження (3.8), середній масштаб у точках першої горизонталі ($y = a$) відрізняється від середнього масштабу в точках другої горизонталі ($y = -a$) і від масштабу горизонтального знімка ($\alpha_0=0$).

Знайдемо, ґрунтуючись на формулі (3.5), значення масштабу нахильного знімка для різних окремих випадків.

1. Масштаб нахильного знімка в точці нульових викривлень можна визначити, якщо підставити значення координат цієї точки ($x = 0, y = -f \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_0}{2}\right)$) у рівності (3.6). Одержимо, що після обчислень формула (3.5) приводить до вираження (3.7), тобто масштаб нахильного знімка в точці нульових викривлень дорівнює масштабу горизонтального знімка. Тому масштаб у точці нульових викривлень називається головним масштабом знімка.

2. Масштаб нахильного знімка в головній точці ($x=y=0$)

$$\frac{1}{m_{CH}} = \frac{f}{H} \frac{\cos^2 \alpha_0}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0 \cdot \cos^2 \varphi}} .$$

Звідси випливає, що масштаб у головній точці дрібніше головного масштабу.

3. Масштаб нахильного знімка в точці надира ($x=0, y=-f \cdot \operatorname{tg}(\alpha_0)$):

$$\frac{1}{m_{CH}} = \frac{f}{H \cdot \cos \alpha_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0 \cdot \sin^2 \varphi}}.$$

Рівність показує, що масштаб у точці надира крупніше головного масштабу.

4. Масштаб у точці нахильного знімка по напрямку горизонталі ($\varphi=0$):

$$\frac{1}{m_{CH}} = \frac{f}{H} \left(\cos \alpha_0 - \frac{y}{f} \sin \alpha_0 \right).$$

Масштаб кожної горизонталі - величина постійна.

Масштаб головної горизонталі ($y=0$):

$$\frac{1}{m_{CH}} = \frac{f}{H} \cos \alpha.$$

5. Масштаб по напрямку головної вертикалі ($x=0, \varphi=90^0$):

$$\frac{1}{m_{CH}} = \frac{f}{H} \left(\cos \alpha_0 - \frac{y}{f} \sin \alpha_0 \right)^2.$$

т.е. змінюється при переході від однієї точки цієї лінії до іншої.

3.4.9. Залежність між кутами на місцевості і на знімку

При дешифруванні складних об'єктів, переносі їхніх зображень зі знімка на карту, при орієнтуванні знімка щодо сторін світу і місцевості, а також при рішенні інших задач за допомогою знімків необхідно робити кутові виміри. Думаючи, що місцевість рівнинна, знайдемо значення кута на місцевості, що відповідає куту на знімку (рис.3.21):

$$\operatorname{tg} \Theta_E = \frac{dY}{dX} = \frac{f \cdot \operatorname{tg} \varphi}{f \cdot \cos \alpha_0 + x \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \alpha_0 - y \cdot \sin \alpha_0}.$$

Криві рівних граничних викривлень являють собою дві симетричні параболи, що перетинаються на головній вертикалі vv . Фокуси парабол збігаються з точкою нульових викривлень s .

Відстань від точки c до вершин параболи дорівнює r , а відстані до точок перетинання парабол з головною вертикаллю рівні $2r$.

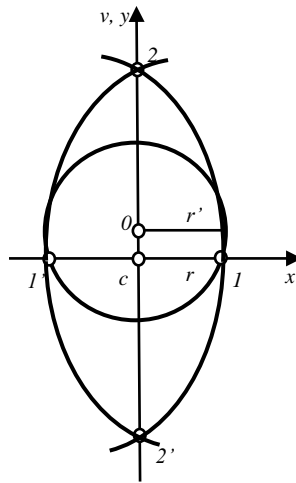


Рис.3.24. Криві рівних кутових викривлень на знімку

Якщо граничне кутове викривлення задане, те $r = f \frac{x}{\alpha_0}$.

Симетричні параболи обмежують на плановій знімку зону граничних кутових викривлень. Положення головної вертикалі і точки нульових викривлень на плановому знімку звичайно невідомо. Тому замість парабол використовують окружність з центром у головній точці і радіусом r .

У будь-якій точці знімка, що не виходить за межі, позначені цією окружністю, кутове викривлення не перевищує заданих значень.

3.5. Геометрія знімків, отриманих різними датчиками

3.5.1. Геометрія сканерного знімка

Для одержання інформації про супротивника і місцевість методом видової розвідки використовуються оптико-електронні скануючі системи [Л9]. Ці системи в змозі реєструвати власне чи (і) відбите випромінювання земної поверхні й об'єктів на ній

і формувати яскравісну монохроматичну, кольорову чи багатозональну картину місцевості, що знімається. Зображення, яке отримане шляхом сканування місцевості й оптико-електронного перетворення сигналів, що реєструються, називається сканерним знімком. Сканерний знімок подається в цифровому виді як масив відліків значень яскравості чи випромінювальної здатності.

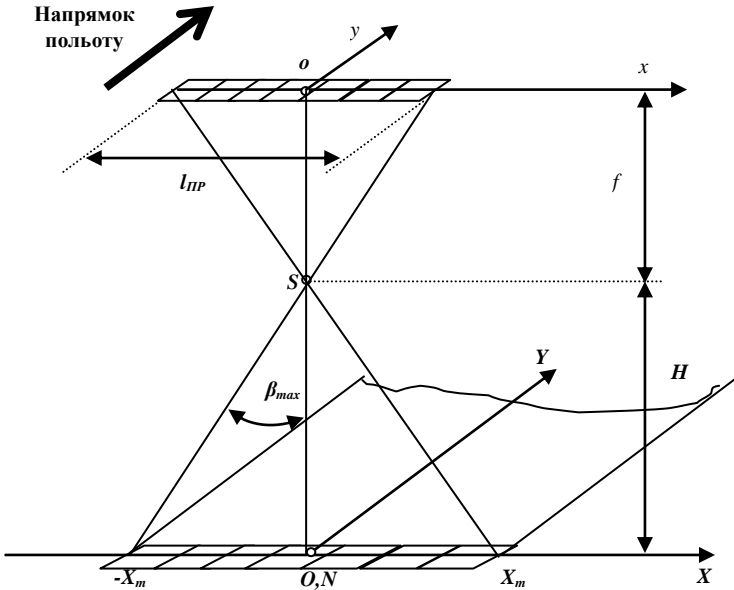


Рис.3.25. До визначення координат і масштабу сканерного знімка

Проведемо аналіз геометрії сканерного знімка, одержуваного оптико-електронною системою з багатоеlementним лінійним ПЗЗ - приймачем випромінювання, у якому огляд місцевості в напрямку, перпендикулярному напрямку польоту носія, здійснюється одночасно всією лінійкою фотоприймачів, а сканування місцевості уздовж напрямку польоту забезпечується власним рухом системи разом з носієм.

Покладемо, що носій рухається уздовж осі Y з постійною шляховою швидкістю V_y , а одночасний огляд місцевості ведеться по осі X (рис.3.25). За початок координат на знімку виберемо точку надира n , а на місцевості - точку N , що

відповідає положенню скануючого луча в надирі. Повна довжина рядка сканування місцевості дорівнює $2X_M$, її кутовий розмір складає $2\beta_{\max}$.

Координата x сканерного знімка

$$x = \frac{H}{m_{0x}} \operatorname{arctg} \frac{X}{H}, \quad (3.9)$$

де m_{0x} - масштабний коефіцієнт, що визначає масштаб горизонтального знімка по рядку уздовж осі X

$$\frac{1}{m_{0x}} = \frac{f}{H}.$$

Якщо скористатися наближенням, то вираження (3.9) запишеться як

$$x = \frac{H}{m_{0x}} \left(X - \frac{X^3}{H^2} \right). \quad (3.10)$$

Формулою (3.10) можна користатися для приблизних розрахунків, її погрішність при $\beta_{\max} < 30^\circ$ не перевищує декількох відсотків.

Як видно з виражень (3.9, 3.10), координата x є поліноміальною функцією відповідної точки місцевості і, отже, масштаб сканерного знімка уздовж рядка не постійний. Щоб визначити масштаб варто узяти відношення довжин відповідних відрізків на знімку і місцевості.

Для визначення справжнього масштабу необхідно спрямувати довжину відрізка до нуля. Тоді одержимо

$$\frac{1}{m_x} = \frac{1}{m_{0x}} \cdot \frac{H^2}{X^2 + H^2}.$$

Для наближених розрахунків знайдемо

$$\frac{1}{m_x} \approx \frac{1}{m_{0x}} \cdot \left[1 - 3 \left(\frac{X}{H} \right)^2 \right]. \quad (3.11)$$

Підставивши у формулу (3.11) значення X з вираження (3.9), одержимо

$$\frac{1}{m_x} \approx \frac{1}{m_{0x}} - \cos^2 \left(\frac{m_{0x} \cdot x}{H} \right).$$

Таким чином, масштаб по рядку сканерного знімка залежить від координати x точки рядка і висоти польоту H носія. Масштаб різко падає ("дрібніше") при русі до країв знімка.

При фотограмметричній обробці й оформленні матеріалів видової розвідки прийнято вказувати середній масштаб знімка. Середній масштаб рядка сканерного знімка може бути визначений по формулі

$$\frac{1}{m_{XCP}} = \frac{1}{m_{0X}} \cdot \frac{\beta_{X \max}}{X_{MAX}} = \frac{1}{m_{0X}} \cdot \frac{\beta_{X \max}}{\operatorname{tg} \beta_{X \max}}.$$

Зсув контурних точок уздовж рядка сканерного знімка в порівнянні з відповідним кадровим горизонтальним знімком запишеться у виді

$$\delta_x = \frac{H}{m_{0x}} \left(X - H \cdot \operatorname{arctg} \frac{X}{H} \right).$$

Неважно одержати наближену формулу: $\delta_x \approx \frac{1}{3 \cdot m_{0x}} \cdot \frac{X^3}{H^2}$.

Відносна погрішність положення точки уздовж рядка

$$\frac{\delta_x}{X} = 1 - \frac{m_{0x} \cdot x/H}{\operatorname{tg} \left(m_{0x} \cdot x/H \right)}.$$

Аналіз формули показує:

1) у центральній зоні рядка, де значення x досить малі, викривлення мінімальні;

2) в міру руху по рядку сканерного зображення до її країв відбувається монотонне зменшення довжин відрізків у порівнянні з плановим зображенням місцевості.

3.5.2. Геометричні викривлення знімка, викликані рельєфом місцевості та кутовими коливаннями носія

Оскільки у вираженні для координати x входять значення висоти польоту, то варто очікувати, що будуть спостерігатися викривлення, зв'язані зі зміною висоти. Для космічного апарата висота вимірюється сотнями кілометрів, що значно більше можливих за час зйомки змін висоти орбіти над земним еліпсоїдом і коливань висоти рельєфу місцевості. Тому коливання висоти носія для космічних знімків несуттєві. Для літака, особливо при виконанні завдання на малих висотах ці зміни значні і повинні бути враховані при аналізі геометрії знімків [Л6].

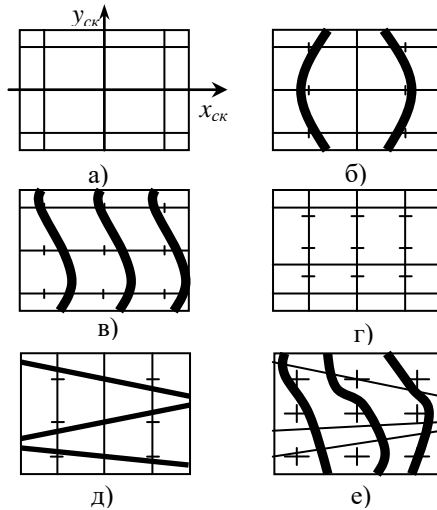


Рис.3.26. Сканерне зображення сітки: ідеальне (а); при коливаннях висоти польоту (б); кута крену (в); тангажа (г) і нищпорення (д); сумарні викривлення (е).

Позначимо ΔH - зміна висоти польоту. Нехай h - перевищення точки місцевості над горизонтальною площиною поверхнею. Щирий масштаб уздовж рядка сканерного зображення з урахуванням впливу рельєфу запишеться як

$$\frac{1}{m_x} = \frac{H}{m_{0x}} \cdot \frac{H + \Delta H - h}{x^2 + (H + \Delta H - h)^2} .$$

Вплив змін висоти польоту на геометрію сканерного знімка наочно ілюструється рис.3.26, де показані ідеальне зображення сітки (а) і зображення, утворюються при коливаннях висоти.

Відзначимо, що вплив рельєфу на геометрію сканерного знімка позначається менше, ніж на геометрію кадрових знімків.

Кутові коливання носія викликають додаткові геометричні викривлення сканерного знімка.

Як відомо, що кутове положення носія знімальної апаратури (космічного апарата, літака) описується кутами крену, тангажу і нишпорення.

Зміни крену космічного апарата зв'язані з деякою неточністю роботи системи орієнтації-стабілізації. При перенацілюванні оптичної осі знімальної апаратури на об'єкт розвідки для деяких космічних апаратів здійснюється розворот усього апарату по крені. Система орієнтації-стабілізації не встигає за короткий час заспокоїти в достатній мері обертальні коливання по крені.

Крен носія знімальної апаратури впливає на координати точок уздовж рядка. При крені на кут $\gamma_{кр}$, відбувається відхід надира. У результаті координата X деякої точки виражається формулою

$$x_{СК} = \frac{H}{m_{0X}} \left(\arctg \frac{x}{H} \pm \gamma_{кр} \right). \quad (3.12)$$

Колівання носія по крену приводять до відповідного зсуву контурних точок на знімку (рис.2,в).

У формулі (3.12) кут крену входять у виді додатку, тому він не спотворює довжину відрізків і масштаб уздовж рядка X . Характеристики сканерного зображення уздовж осі y при крені не змінюються.

Космічний апарат при русі по орбіті для забезпечення орієнтації знімальної апаратури на Землю постійно обертається по тангажу. Коливання космічного апарата по тангажу викликані неточностями роботи системи орієнтації-стабілізації. При кінцевому куті тангажу координата X виражається по формулі

$$x_{СК} = \frac{H}{m_{0X}} \operatorname{arctg} \frac{x}{H \sec \nu_T},$$

де ν_T - кут тангажу.

Коливання носія по куті тангажу приводять до того, що рядки сканування місцевості або накладаються один на одного, або утворюють пропуски. Сканерне зображення сітки при коливаннях кута тангажу показане на рис.3.26,г.

Нишпорення - обертання носія навколо вертикальної осі - приводить до веєроподібного розвороту рядків, який супроводжується пропусками і накладеннями їхніх кінцівок. При цьому зсув координат точок знімка, особливо вилучених від центра, може бути досить великим. У результаті чого форма контурів об'єкта розвідки помітно спотворюється. Кутове обертання космічного апарата навколо вертикальної осі стабілізується дуже точно ще на етапі його виведення. Тому для космічного сканерного знімка такі викривлення не властиві. З іншого боку, аеродинамічним носіям властиві помітні коливання по куті нишпорення, викликані неоднорідністю атмосфери. Сканерне зображення сітки при нишпоренні носія показане на рис.3.26, д.

Сканерне зображення сітки з обліком усіх перерахованих факторів викривлень показане на рис.3.26, е.

Помітимо, що кутові коливання носія не тільки порушують геометрію сканерного знімка, але і знижують його роздільну здатність і інформаційну ємність.

3.5.3. Геометрія радіолокаційного знімка

Схема проведення зйомки за допомогою радіолокаційної бокового огляду (РЛБО) зображена рис.3.27. Тут прийнято, що носій, на якій установлена РЛБО, летить на висоті H зі швидкістю V_y .

кожному рядку масиву відповідає рядок місцевості, що зондується одним зондувальним імпульсом. Наступний рядок – результат дискретизації й цифрування прийнятих сигналів при другому зондуванні.

Виберемо яку-небудь точку місцевості в межах зони опромінення - точку M , що знаходиться на відстані X_M від лінії шляху (осі Y) і на видаленні R_M від носія (точніше - від приймально-передавальної антени РЛБО). Зондувальний імпульс поширюється в просторі зі швидкістю світла c . Проміжок часу з моменту посилки зондувального імпульсу і до моменту прийому відбитого від точки M сигналу складе

$$\Delta t_M = \frac{2R_M}{c} .$$

Відповідно до принципу роботи РЛБО, реєстрація прийнятих сигналів починається не відразу після посилки зондувального імпульсу, а через деякий час t_0 . Якщо запис уздовж рядка почався в момент часу t_0 і здійснюється з постійною швидкістю v , то координата x_M точки M запишеться як

$$x_M = v_x (\Delta t_M - t_0) = v_x \left(\frac{2R_M}{c} - t_0 \right) = \frac{2v_x}{c} \left(\sqrt{X_M^2 + H^2} - \frac{ct_0}{2} \right). \quad (3.13)$$

Якщо огляд місцевості ведеться від лінії шляху, а реєстрація сигналів починається пізніше на t_0 , то утвориться так називана "неробоча" смуга місцевості з лінійним розміром X_0 від лінії польоту.

$$X_0 = \sqrt{\left(\frac{ct_0}{2} \right)^2 - H^2} .$$

Виразення (3.13) перепишеться у виді

$$x_M = \frac{2v_x}{c} \left(\sqrt{X_M^2 + H^2} - \sqrt{X_0^2 + H^2} \right) .$$

Уведемо позначення $\frac{2v_x}{c} = \frac{1}{m_{0X}}$.

Величина $1/m_{0x}$ являє собою масштабний коефіцієнт, який характеризує масштаб по рядку знімка. З урахуванням введеного позначення

$$x_M = \frac{1}{m_{0x}} \left(\sqrt{X_M^2 + H^2} - \sqrt{X_0^2 + H^2} \right).$$

Отримана формула [Л6] дозволяє зробити наступні висновки:

1. координата x не є лінійною функцією координати X_M відповідної точки місцевості, що свідчить про мінливість масштабу по рядку запису;

2. масштабом по рядку радіолокаційного знімка можна керувати, змінюючи швидкість запису.

Максимальна ширина смуги охоплюваної при радіолокаційній зйомці ділянки місцевості в принципі залежить від роздільної здатності по координаті "азимут" (у напрямку осі y). Нехай роздільна здатність на місцевості дорівнює δY . Час польоту носієм відрізка δY

$$t = \frac{\Delta Y}{V_Y}.$$

За цей час повинний повернутися сигнал, відбитий від самої далекої точки смуги, розташованої на відстані X_{MAX} від лінії шляху. Тоді

$$X_{MAX} = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c \Delta Y}{2V_Y}.$$

Для обчислення справжніх масштабів у довільній області радіолокаційного знімка використовують формулу [Л6]

$$\frac{1}{m_x} = \frac{1}{m_{0x}} \sqrt{1 - \left(\frac{H}{m_{0x} \cdot x + \frac{ct_0}{2}} \right)^2}. \quad (3.14)$$

Отримані формули показують, що масштаб по рядку радіолокаційного знімка залежить від координати x , швидкості реєстрації v , висоти польоту H і часу затримки t_0 . Ці залежності нелінійні: найбільші викривлення дійсного масштабу

спостерігаються при малих значеннях x . При збільшенні x масштаб по рядку змінюється усе менше і прагне до $2v_x/c$

Координата і масштаб уздовж азимутального напрямку на радіолокаційному знімку (уздовж осі y) визначаються аналогічно, як для сканерного знімка.

3.6. Трансформування знімків

Для цілей видової повітряно-космічної розвідки застосовуються не тільки кадрові камери в плановій установці, але і кадрові - у перспективній установці і панорамні камери. Однак для складання звітних документів і вимірювальних цілей найбільш придатні горизонтальні знімки. Для приведення знімків до цієї проекції застосовується їхнє трансформування.

3.6.1. Сутність трансформування знімків

Трансформуванням знімка називають перетворення зображення в інше, геометрично з ним зв'язане [Л6].

У залежності від вимірювальних цілей і призначення робіт трансформування може виконуватися

- тільки зміною масштабу знімка;
- приведенням зображення нахильного знімка до горизонтального чи панорамного - до планового;
- перетворенням центральної проекції знімка в ортогональну (ортотрансформування, *ortorectification*);
- приведенням зображення нахильного знімка до заданої картографічної проекції.

Ці задачі можуть виконуватися як окремими процесами, так і одночасно.

Трансформування знімків можна виконувати різними способами: графічним, графомеханічним, фотомеханічним, оптико-графічним, аналітичним, електронним.

Графічний спосіб полягає в побудові на знімку й основі взаємно проєктивних сіток і перенесенні по них контурів зі

знімка на план. В наш час цей спосіб практично не застосовують.

Графомеханічний спосіб заснований на одержанні графічного трансформованого зображення за допомогою приладів механічного типу: перспектографа, пантографа і т.д.

Фотомеханічний спосіб (фототрансформування) заснований на застосуванні спеціальних оптико-механічних приладів - фототрансформаторів, що дозволяють перетворювати одну центральну проекцію в іншу. Фототрансформування було дотепер основним способом трансформування знімків. При цьому способі трансформоване зображення фіксується на фотопапір чи фотоплівку.

Оптико-графічне трансформування засноване на застосуванні приладів типу фототрансформаторів, звичайно спрощених конструкцій (оптичні проектори і т.д.), у яких потрібні контури одержуваного трансформованого зображення обводять олівцем.

Аналітичне трансформування здійснюють шляхом обчислення координат точок горизонтального знімка по вимірних координатах нахильного знімка.

Електронне трансформування засноване на застосуванні електронних фототрансформаторів, де трансформоване зображення формується на екрані ЕЛТ.

В усіх розглянутих способах трансформування можна виконувати по відомих елементах зовнішнього і внутрішнього орієнтування чи за опорними точками.

3.6.2. Фотомеханічний спосіб трансформування

Розглянемо умови, яки треба виконати при фотомеханічному способі трансформування на прикладі нахильного знімка. Щоб одержати горизонтальний знімок, потрібно зробити наступне:

1. по нахильному знімку P (рис.3.28) відновити пучок проекційних променів, який існував в момент фотографування;

2. установити його відносно екрана E в таке положення, у якому він знаходився відносно горизонтальної площини під час фотозйомки;
3. зафіксувати зображення, побудоване на екрані.

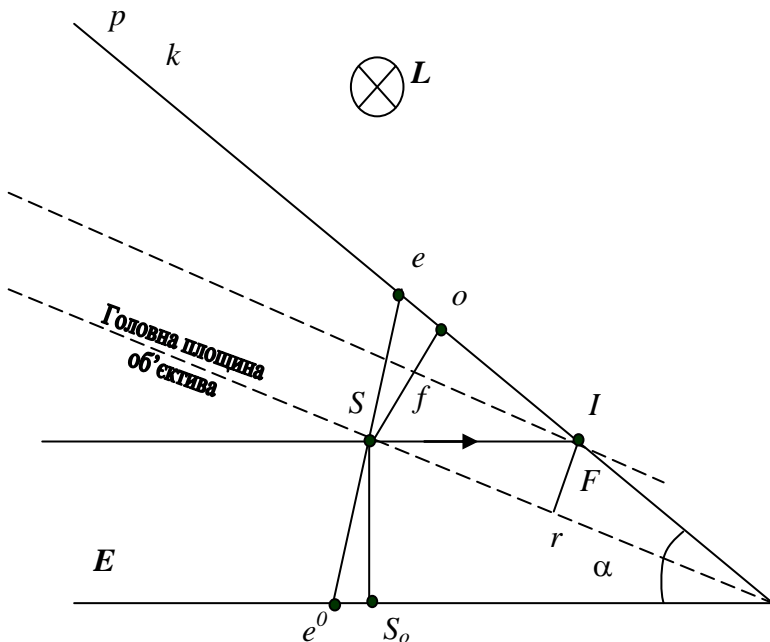


Рис.3.28. Схема трансформування нахильного знімка в фототрансформаторі першого роду

Основні частини з яких складається фото трансформатор: об'єктив, касета, екран E и джерело світла L .

Фототрансформатор, у якому будується пучок променів, подібний тому, що існував в момент фотографування, називається *фототрансформатором першого роду*.

Щоб зображення, отримане на екрані фототрансформатора першого роду, відповідало горизонтальному знімку і було

досить різким, необхідно виконати геометричні й оптичні умови.

До *геометричних умов* відносяться:

1. Відрізок, що з'єднує задню вузлову точку фототрансформатора з головною точкою знімка, повинний бути перпендикулярний до площини знімка і дорівнювати фокусній відстані об'єктива f .

2. Кут між знімком і екраном α повинен дорівнювати куту нахилу знімка α_0 , що існував в момент фотографування.

3. Головна вертикаль знімка повинна знаходитися в площині кута α .

4. Відстань від передньої вузлової точки об'єктива до екрана повинна дорівнювати висоті фотографування вираженої в заданому масштабі трансформованого знімка :

$$f_t = \frac{1}{t} H = \frac{m}{t} f = nf,$$

де $1/m$ - головний масштаб нахильного знімка; n - коефіцієнт трансформування знімка, дорівнює відношенню масштабів трансформованого і нахильного знімків.

Щоб зображення на екрані було різким необхідно виконати дві *оптичних умови*:

I. Відстань від задньої точки об'єктива по головній оптичній осі до знімка і відстань від передньої вузловий точки до екрана повинні задовольняти основному рівнянню оптики

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{F},$$

де F - фокусна відстань об'єктива фототрансформатора.

2. Головна площина об'єктива повинна проходити через лінію перетинання площини знімка з площиною екрана.

Визначимо потрібну величину фокусної відстані об'єктива фототрансформатора. Зображення нескінченне вилученої точки екрана повинне бути в головній фокальній площині об'єктива. Отже, головна фокальна площина повинна проходити через точку сходу перпендикулярно до головної оптичної осі. З рис.3.28 можна визначити, що:

$$F = fn[1 + n^2 + 2n \cos \alpha]^{-1/2}$$

З цього вираження випливає, що фототрансформатор першого роду повинний бути оснащений *набором об'єтивів* для трансформування знімків з різними коефіцієнтами n , що ускладнює конструкцію приладу і роботу на ньому.

В даний час застосовуються *фототрансформатори другого роду*, що дозволяють трансформувати знімки з різними коефіцієнтами за допомогою одного об'єктива. Ця задача зважується шляхом побудови в приладі не подібного а перетвореного пучка променів у порівнянні з пучком, що існував в момент фотографування.

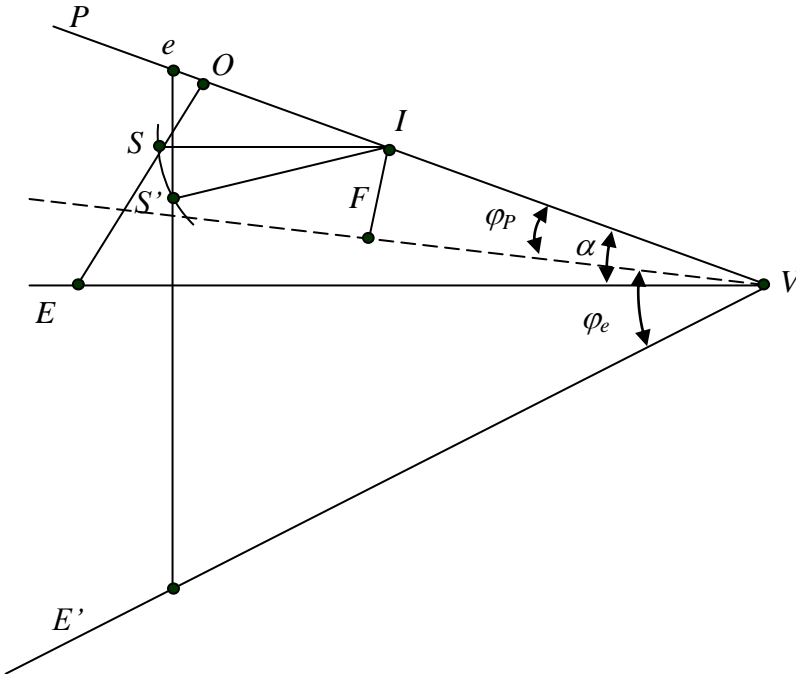


Рис.3.29. Схема трансформування нахильного знімка у фототрансформаторі другого роду

Для одержання трансформованого знімка в даному фототрансформаторі *центр проекції повинний переміщатися по*

окружності радіуса F з центром у головній точці сходу I (рис.3.29) а екран обертається навколо лінії підстави , залишаючись увесь час паралельним прямої $[SI]$.

У фототрансформаторі другого роду необхідно виконати три геометричних умови:

1. Центр проектування повинний знаходитися на окружності, описаної з головної точки сходу радіусом $F = [SI]$ у площині SOI .

2. Відстань від головної точки сходу до лінії перетинання, площини нахильного знімка з екраном повинне бути $[IV]=H \cdot (t \cdot \sin \alpha)^{-1}$.

3. Екран повинний бути встановлений паралельно лінії SI И перпендикулярно до площини SOI .

Оптичні умови для фототрансформаторів першого і другого роду загальні.

3.7. Корегування просторових викривлень, аналітичне трансформування та прив'язка цифрових знімків

3.7.1. Загальний підхід до корекції просторових викривлень

Можна вказати наступні класи задач, що вимагають геометричних перетворень зображень:

- складання фотокарт і фотомозаїк по аерознімках і космічних знімках поверхні Землі і планет;
- корекція геометричних викривлень, внесених датчиками зображень (об'єктивами);
- зіставлення фотографій тривимірних об'єктів, знятих при різному положенні знімальної апаратури;
- сполучення різних знімків того самого об'єкта, знятих у різних спектральних діапазонах чи у різний час, для одержання кольорових зображень чи виявлення змін.

Крім того, геометричне трансформування зображень може входити як етап при корекції аберацій оптичних систем коли перед лінійною фільтрацією знімок піддають геометричним перетворенням, що перетворюють систему у просторово-

однорідну, а після фільтрації роблять зворотне перетворення, що відновлює колишню систему координат.

У принципі задача геометричних перетворень зводиться до тому щоб по заданому зображенню $F(x,y)$ визначити значення відеосигналу в кожній точці зображення в нових координатах $u(x,y)$, $v(x,y)$. Помітимо, що, оскільки мова йде про зображення на площині безупинних об'єктів, закон перетворення координат $u(x,y)$ і $v(x,y)$ задається звичайно в безупинному представленні. У залежності від виду зображень і способу завдання закону перетворення координат можливі два підходи до рішення цієї задачі.

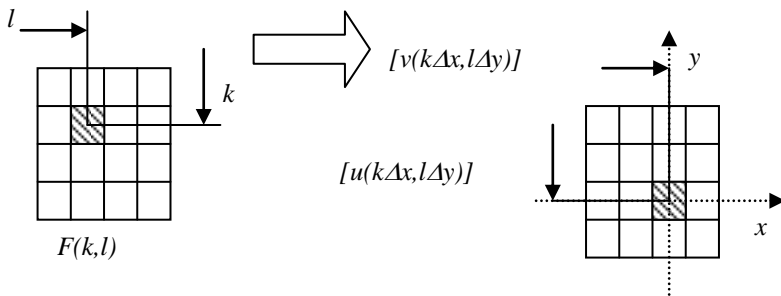


Рис.3.30. Пряме перетворення координат точок

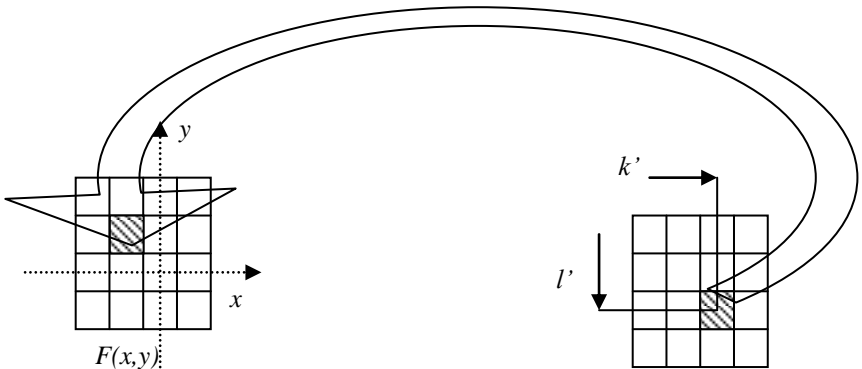


Рис.3.31. Зворотнє перетворення координат точок

1. Пряме перетворення координат точок. Для кожного елемента вихідного зображення з координатами (k,l) знаходити

його координати в новій системі координат $u(k\Delta x, l\Delta y)$, $v(k\Delta x, l\Delta y)$ і привласнювати значення відеосигналу в цьому елементі елементу перетвореного зображення з координатами $\{[u(k\Delta x, l\Delta y)/\Delta u], [(v(k\Delta x, l\Delta y)/\Delta v)]\}$, де Δx , Δy , Δu , Δv – крок дискретизації зображень по координатах x , y , u , v , а квадратні дужки означають цілу частину від величин.

2. *Зворотне перетворення координат точок.* Для кожного елемента перетвореного зображення з координатами (κ', l') знаходити його координати $\{x(\kappa'\Delta u, l'\Delta v), y(\kappa'\Delta u, l'\Delta v)\}$ у вихідному зображенні $F(x, y)$ і привласнювати цьому елементу значення відеосигналу, рівне $F(x(\kappa'\Delta u, l'\Delta v), y(\kappa'\Delta u, l'\Delta v))$. Оскільки при цифровій обробці вихідне зображення задане тільки в точках відліку $(k\Delta x, l\Delta y)$, величину $F(x(\kappa'\Delta u, l'\Delta v), y(\kappa'\Delta u, l'\Delta v))$ потрібно знаходити за допомогою тих чи інших способів інтерполяції дискретного сигналу $\{F_{kl}\}$.

Перший спосіб зручний у тих випадках, коли перетворюване зображення слабке заповнено, тобто містить мало ненульових елементів (наприклад, складається з ліній, як у задачі нанесення координатної сітки).

Якщо його використовувати для перетворення звичайних заповнених зображень, відмінних від нуля в кожному елементі, то, по-перше, буде велика помилка в передачі координат за рахунок їхнього округлення при перерахуванні і, по-друге на перетвореному зображенні напевно залишаться порожні (незаповнені) місця, які потрібно буде заповнювати інтерполяцією. Оскільки вони будуть розташовуватися нерегулярно, те така інтерполяція може виявитися трудомісткою операцією.

Другий спосіб застосовується для перетворення "заповнених" зображень. При цьому іноді можна відмовитися від інтерполяції на вихідному зображенні й округлити перетворені координати. Це зменшує точність, досягнути при вимірах координат об'єктів на перетвореному зображенні через деформації форми об'єктів за рахунок округлення. Але якщо скривлення координат невелике, на таке викривлення можна піти, тому що відмовлення від точної інтерполяції значно

спрощує процедуру перетворень. Для більш точного перетворення може виявитися необхідним робити інтерполяцію значень відліків вихідного зображення.

3.7.2. Корекція відхилень скануючої системи

У процесі зйомки скануюча система вносить геометричні викривлення в створюване зображення. Ці викривлення носять детермінований характер оскільки зв'язані вони з конструктивними особливостями скануючої системи. Іншими словами, ці викривлення для кожного елемента зображення постійні і не міняються від знімка до знімка. Цей факт дає можливість до початку експлуатації скануючої системи вимірити ці викривлення для кожного (i,j) елемента створюваного зображення і запам'ятати їх у виді масивів відхилень положення елементів реального знімка від положення цих елементів у випадку ідеального сканера (рис.3.32.).

Положення елемента $F(1,3)$
ідеального зображення

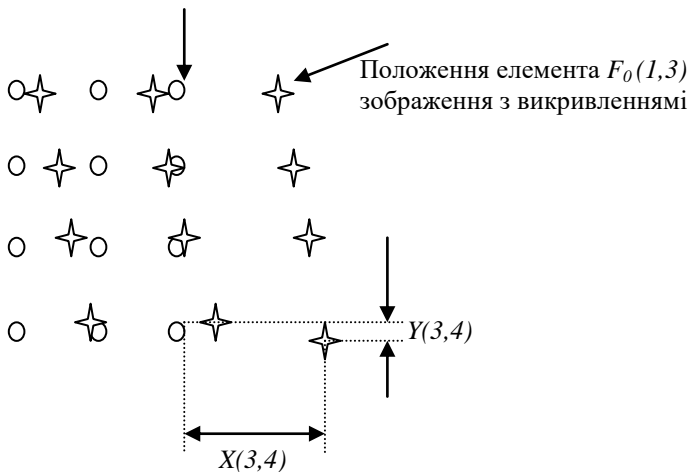


Рис.3.32. Просторові викривлення скануючої системи

Отримані масиви відхилень $X(i,j)$ і $Y(i,j)$ (для горизонтальної і вертикальної координати відповідно) можуть бути використані для корекції положення елементів реального зображення. Для цього застосовується наступний алгоритм [Л8].

На першому етапі алгоритму здійснюється груба корекція відхилень елементів. Вона полягає в створенні зображення, елементи якого зміщені стосовно положення елементів вихідного зображення на цілі частини величин $X(i,j)$, $Y(i,j)$:

$$F'(i, j) = F_0(i - \text{Int}[X(i, j)], j - \text{Int}[Y(i, j)]),$$

де $F'(i,j)$ - зображення після грубої корекції;

$F_0(i,j)$ - вихідне зображення (з викривленнями);

$\text{Int}[S]$ - оператор узяття цілої частини числа S .

У результаті такої корекції положення елементів зображення $F'(i,j)$ відрізняється від ідеального на величину дробових частин чисел $X(i,j)$ і $Y(i,j)$ (Рис.3.33).

Положення елемента $F(1,3)$
ідеального зображення

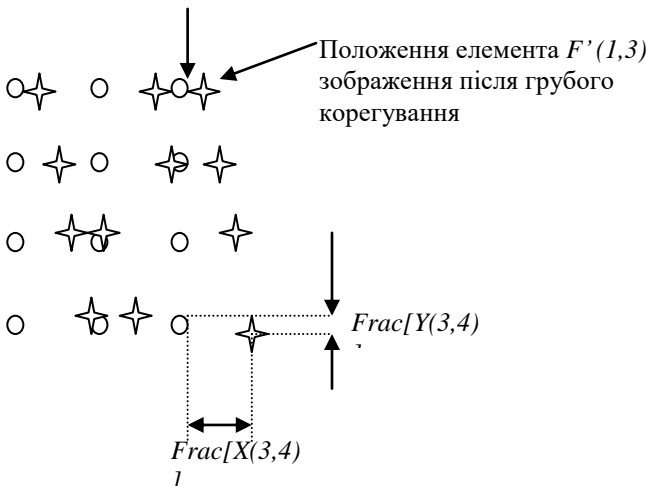


Рис.3.33. Положення елементів зображень після грубої корекції

Для точної корекції змінюється вже не положення елементів, а значення елементів зображення. Тобто, значення яскравості елемента $F(i,j)$ виходить шляхом білінійної інтерполяції значень яскравості чотирьох сусідніх елементів зображення F' з урахуванням величин відхилень $b = \text{Frac}\{X(i,j)\}$ і $a = \text{Frac}\{Y(i,j)\}$, де $\text{Frac}(S)$ - означає узяття дробової частини числа S .

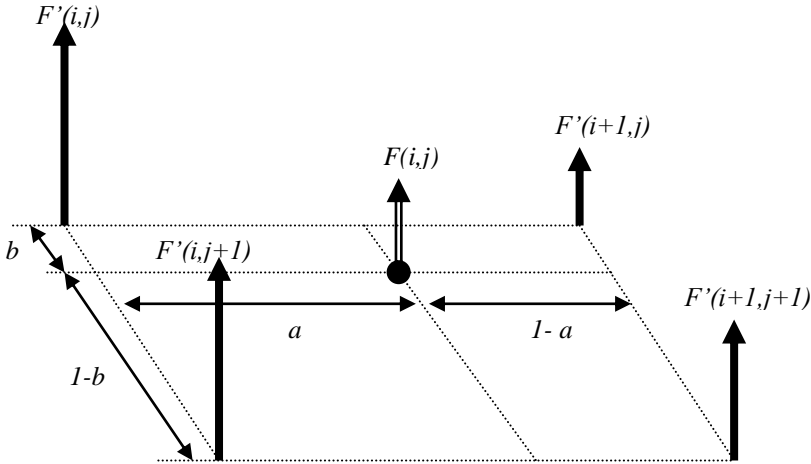


Рис.3.34. Принцип білінійної інтерполяції відліків зображення

Принцип білінійній інтерполяції відліків показаний на рис.3.34. Розрахунок інтерпольованого значення відліку $F(i,j)$ ведеться по формулі:

$$F(i, j) = (1 - a)[(1 - b)F'(i, j) + bF'(i, j + 1)] + a[(1 - b)F'(i + 1, j) + bF'(i + 1, j + 1)] \quad (3.15)$$

3.7.3. Корекція геометричних викривлень методом просторових скривлень

Багато систем, що зображують, вносять геометричні викривлення. У практиці корекції знімків з космосу широко застосовується апостеріорна корекція, заснована на поліноміальній апроксимації кожної горизонтальної і

вертикальної лінії перекрученого растра. Дані апроксимації використовуються потім для обчислення зворотних коригувальних функцій для кожного осередку сітки. Метод просторового скривлення [Л8] дозволяє також коректувати перспективні викривлення. Зображення протяжного об'єкта, що спостерігається збоку, можна скривити таким чином, що буде отримане зображення, що відповідає спостереженню цього об'єкта під прямим кутом.

Інше важливе застосування цього методу - випрямлення парних зображень однієї і тієї ж сцени, отриманих при різних кутах спостереження. Таким чином, метод зворотних коригувальних функцій може усувати геометричні викривлення знімка отримані як за рахунок перспективної проекції, так і за рахунок нелінійних викривлень зв'язаних з рельєфом місцевості і дисторсією системи, що зображує.

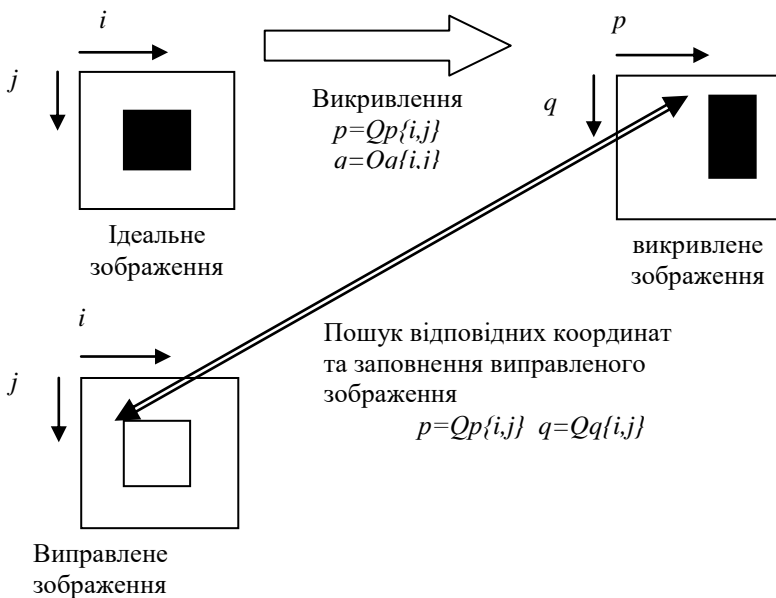


Рис.3.35. Принцип геометричної корекції скривленням

В ідеальне зображення вноситься просторове геометричне викривлення, яке можна описати відображенням точки (j,k) ідеального зображення в точку (p,q) зображення, що спостерігається, відповідно до виражень

$$p = Q_p\{i, j\}, \quad q = Q_q\{i, j\}, \quad (3.16)$$

де $Q_p\{*\}$ і $Q_q\{*\}$ - монотонні функції загального виду, що відображають.

Процедуру коригувального скривлення можна розбити на два етапи. Спочатку визначають координати точки (p,q) , що відображається в точку розміщення скоректованого елемента зображення. Потім знаходять оцінку яскравості зображення в точці (p,q) , інтерполюючи значення яскравості сусідніх елементів, що спостерігаються, і приписують отриману оцінку скоректованому елементу зображення.

3.7.4. Побудова поліноміальної моделі викривлень по опорних точках місцевості

Якщо функції просторових викривлень $Q_p\{*\}$ і $Q_q\{*\}$ відомі, то координати (p,q) можна обчислити безпосередньо по формулах (3.16), підставляючи в них координати (i,j) , де i і j - цілі числа. Як правило, така інформація відсутня, тому необхідно користатися деякою математичною моделлю реальних викривлень. Часто застосовують поліноміальні моделі. Як приклад розглянемо оцінку просторового викривлення у виді полінома другого порядку:

$$\hat{p} = a_0 + a_1i + a_2j + a_3i^2 + a_4ij + a_5j^2, \quad (3.17 \text{ а})$$

$$\hat{q} = b_0 + b_1i + b_2j + b_3i^2 + b_4ij + b_5j^2, \quad (3.17 \text{ б})$$

де a_k і b_k - постійні коефіцієнти. Ці коефіцієнти звичайно вибирають таким чином, щоб мінімізувати середньоквадратичну помилку апроксимації координат, що фактично спостерігаються, (p_m, q_m) їх (\hat{p}_m, \hat{q}_m) поліноміальною оцінкою для набору відомих точок (i_m, j_m) , названих вузлами ($1 < m < M$). Координати в площині зображення, що спостерігається, зручно виразити у виді векторів

$$p^T = [p_1, p_2, \dots, p_M], \quad (3.18 \text{ а})$$

$$q^T = [q_1, q_2, \dots, q]. \quad (3.18 \text{ б})$$

Аналогічно коефіцієнти поліномів можна представити у векторній формі:

$$a = [a_0, a_1, \dots, a_5], \quad (3.19 \text{ а})$$

$$b = [b_0, b_1, \dots, b_5]. \quad (3.19 \text{ б})$$

Тепер середньоквадратичну помилку оцінювання можна записати в компактній формі:

$$E = (p - Aa)^T (p - Aa) + (q - Ab)^T (q - Ab),$$

де

$$A = \begin{bmatrix} 1 & i_1 & j_1 & i_1^2 & i_1 j_1 & j_1^2 \\ 1 & i_2 & j_2 & i_2^2 & i_2 j_2 & j_2^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & i_M & j_M & i_M^2 & i_M j_M & j_M^2 \end{bmatrix}$$

Помилка E мінімальна при

$$\begin{cases} a = A^- p, \\ b = A^- q, \end{cases}$$

де A^- - узагальнена зворотна матриця для A . Якщо число вузлів перевищує число поліноміальних коефіцієнтів, то

$$A^- = (A^T A)^{-1} A^T.$$

Користаючись цією методикою можна без праці обчислити коефіцієнти a_k і b_k , а потім по формулах (3.17) визначити в площині зображення координати, що спостерігається, усіх точок, відображуваних у точки з цілочисельними координатами, що відповідають скоректованим елементам зображення.

Тепер, знаючи координати (p, q) у площині зображення, що спостерігається, і рівні яскравості елементів, що спостерігаються, потрібно оцінити рівень яскравості елемента з координатами (j, k) у площині скоректованого зображення. Цю задачу можна вирішити методом інтерполяції. Інтерпольоване

безупинне зображення в площині зображення, що спостерігається, можна описати функцією

$$G(x, y) = \sum_m \sum_n G(m\Delta x, n\Delta y) \cdot R(x - m\Delta x, y - n\Delta y),$$

де $R(x, y)$ - функція, що інтерполює,
 $\Delta x, \Delta y$ - крок дискретизації.

Оцінка скоректованого зображення запишеться як

$$\hat{F}(i, j) = G(p\Delta x, q\Delta y),$$

де (p, q) - не цілочисельний індекс інтерпольованого елемента. Теоретично оптимальну інтерполяцію забезпечують *sinc* - функції чи функції Бесселя. На практиці, однак, звичайно користаються функціями, що інтерполюють, реалізація яких сполучена з меншими труднощами. Це прямокутні, трикутні і β -сплайн функції. У деяких системах із просторовим скривленням використовують навіть інтерполяцію по околиці елемента зображення.

Строгі рекомендації з правильної інтерполяції дати важко, тому що поки важко описати зв'язок між точністю перетворення координат і точністю наступних вимірів за допомогою перетвореного зображення. Операції по перерахуванню координат і інтерполяції значень відеосигналу є, узагалі говорячи, досить громіздкими. Якщо їх проробляти для всіх відліків зображення, це зажадає великих витрат машинного часу. Для зменшення цих витрат можна використовувати методи скороченого опису, що можуть перетворити "заповнене" зображення в "слабко заповнене".

Такі, наприклад, методи кодування зображень, засновані на передачі контурів чи перепадів сигналу на зображеннях. Дійсно, оскільки перетворення координат є топологічними, досить виділити на зображенні тільки деякі опорні точки, по яких можна відновити зображення з достатньою точністю, і піддати перетворенню тільки їхній, а інше зображення відновити по цих опорних точках.

Як такі опорні точки можуть бути використані контури, що виникають при виділенні у вихідному зображенні елементів, квантоване значення яких відрізняється від значення

попередніх по розгорненню елементів. Координати виділених елементів піддаються перетворенню, а інших - не перетворюються, а знаходяться за допомогою лінійної інтерполяції між опорними точками.

Якщо обмежитися лінійною інтерполяцією, то необхідно подбати, щоб виділені елементи не знаходилися занадто далеко друг від друга. При цьому можна керуватися наступним правилом: крива може бути замінена прямої в новій системі координат, якщо її відхилення від прямої не перевищує половини відстані між елементами перетвореного зображення. Було з'ясовано, що для меркаторської проекції, цьому критерію в більшості випадків задовольняють точки, що відстоять друг від друга на відстань від 6 до 16 елементів. Таким чином, виявляється можливим приблизно на порядок знизити кількість операцій, необхідних безпосередньо для обчислення перетворених координат.

Як показує аналіз задачі про вимір положення об'єктів на площині, є підстави очікувати, що при точній передачі координат швидких змін сигналу і грубої - інших елементів зображення досяжна точність вимірів по перетвореному зображенню не повинна сильно постраждати.

3.8. Вимірювання та кількісні розрахунки на цифрових зображеннях

Вихідні знімки земної поверхні не є планами, а є зображеннями місцевості в перекрученому виді. Знімки виходять різномасштабними і з проекційними викривленнями. Тому виміри відстаней, площ і кутів по вихідних знімках проводити не можна через неминучі помилки.

Для складання планових проекцій (фотопланів) кожен знімок необхідно трансформувати, тобто перетворити в план. У результаті трансформування на знімках усуваються викривлення, викликані нахилом оптичної осі датчика (або кутом огляду в РЛБО). Одночасно знімки приводяться до заданого масштабу. Викривлення знімків, обумовлені нерівностями місцевості, при оптико-механічному трансформуванні фотознімків (фотонегативів) не усуваються.

Для цифрових знімків при машинній обробці трансформування здійснюється разом з усуненням геометричних викривлень та геореференцюванням.

При зніманні невеликого району земної поверхні з центром у підсупутникової точці відразу виходять горизонтальні знімки, які майже не потребують подальшого трансформування (можливо тільки зміна масштабу). Масштаб такого планового знімка земної поверхні визначається зі співвідношення $1/m = f/H$, де f - фокусна відстань об'єктива датчика, H - висота зйомки.

Якщо параметри трансформування і знімальної апаратури невідомі, то масштаб знімка можна оцінити шляхом порівняння довжин відрізків на знімку з довжинами відповідних відрізків на карті:

$$1/m = [ab]/[AB],$$

де $[ab]$ - довжина відрізка на знімку, $[AB]$ - довжина відповідного відрізка на місцевості, яка визначена по карті.

Варто пам'ятати, що через погрішності трансформації і, можливо, неврахованих нахилів оптичної осі масштаб знімка в різних напрямках може бути різним. Відзначимо також, що через рельєф місцевості масштаб у різних частинах знімка може трохи відрізнитися від головного масштабу. Тому варто визначати місцеві масштаби на ділянках проведення необхідних вимірів у двох перпендикулярних напрямках.

Для зменшення помилок визначення місцевого масштабу варто провести кілька вимірів розташованих в одному напрямку контрольних відрізків на знімку і на карті. Потім отримані результати усереднюються.

Для зображень земної поверхні в цифровому виді використовують їхнє представлення на прямокутному растрі. Як наслідок, виміри відстаней периметрів і площ проводяться спочатку в елементах растра, а потім уже, у процесі обчислень переводяться у фізичні одиниці. Тому необхідно ввести поняття растрових масштабних коефіцієнтів M_x і M_y , під якими ми будемо розуміти відстані на місцевості між точками, що відповідають двом сусіднім точкам растра дискретизації відповідно по горизонталі і вертикалі знімка. Треба помітити,

що для цифрового знімка горизонтальний і вертикальний растрові масштабні коефіцієнти можуть бути не рівними.

Дуже важливо відзначити, що тут і надалі під растровими координатами розуміються координати точок у прямокутному растрі дискретизації зображення, але не в якому випадку не координати точок растра відображення (на екрані монітора, на папері після друку).

Визначення масштабних коефіцієнтів растра по знімку і карті здійснюється ще на етапах геометричної корекції і географічної прив'язки (геореференцювання) первинних знімків, тому тут це питання розглядати не будемо.

Вимір відстаней і кутів на планових звичайних фотознімках здійснюється як і на картах місцевості за допомогою циркуля-вимірника, лінійки, трикутника і транспортира. Оскільки це питання вивчається в курсі топографії й інженерної графіки, те тут він розглядатися не буде.

Для цифрових зображень відстані між двома точками місцевості вимірюють по растрових координатах відповідних їм точок зображення з урахуванням растрових масштабних коефіцієнтів. Для цього цифровий масив значень елементів зображення відтворюється у великому масштабі на екрані монітора з високим розрізненням. Масштаб відображення та спосіб інтерполяції при відновленні обирають такими, щоб було можливо легко відрізнити окремі піксели.

За допомогою графічного маркера відзначаються на зображенні дві точки, між якими на місцевості потрібно вимірити відстань. Програма зчитує растрові координати цих точок (i_0, j_0) , (i_1, j_1) та обчислює відстань на місцевості між ними по формулі:

$$r = \sqrt{[M_x (i_1 - i_0)]^2 - [M_y (j_1 - j_0)]^2},$$

де M_x , M_y - масштабні коефіцієнти растра по горизонталі і вертикалі відповідно.

Для виміру кутів на цифрових зображеннях також використовується аналітичний метод з оцінкою точок у растрових координатах. Маркером відзначаються три точки: вершина A кута з координатами (i_0, j_0) , точка B з координатами (i_1, j_1) у напрямку відносно якого буде вимірятися кут і точка C з координатами (i_2, j_2) у напрямку до якого вимірюється кут. Пари точок $[AB]$ і $[AC]$ визначають дві прямі, між якими, власне, і

виміряється кут. Координати відзначених точок фіксуються програмою і здійснюється розрахунок кута по формулі:

$$u = \arccos \left(\frac{M_Y^2(j_1 - j_0)(j_2 - j_0) + M_X^2(i_1 - i_0)(i_2 - i_0)}{\sqrt{[M_X^2(i_1 - i_0)^2 + M_Y^2(j_1 - j_0)^2] \cdot [M_X^2(i_2 - i_0)^2 + M_Y^2(j_2 - j_0)^2]}} \right).$$

Для визначення периметрів площинних об'єктів при візуальній обробці знімків на фотопапері використовують вимір курвиметром або циркулем-вимірником аналогічно вимірам на карті.

При визначенні периметра площинного об'єкта по цифровому знімку використовується методика аналогічна виміру відстаней. Периметр об'єкта розбивається на окремі ділянки, які можна б було з припустимою точністю апроксимувати відрізками прямої і виміряється довжина кожного відрізка. Оскільки кожен наступний відрізок зчеплений з попереднім, те позначаючи маркером відрізки точка за точкою і вимірюючи послідовно відстані між ними, можна оцінити сумарну довжину кривої. Зрозуміло, що чим більше точок розбивки, тим точніше результат.

Іноді растрові координати точок (i_k, j_k) границь відрізків ламаної, котра утворить апроксимуючий периметр багатокутник, початково задані (наприклад, автоматичним алгоритмом сегментації зображення). Тоді периметр багатокутника може бути обчислений по формулі:

$$P = \sum_{k=1}^{K-1} \sqrt{M_X^2(i_{k+1} - i_k)^2 + M_Y^2(j_{k+1} - j_k)^2}.$$

Точність результату залежить від ступеня наближення багатокутника до заданої фігури периметра.

Для обчислення площі по звичайному фотознімку можна використовувати механічний графо-аналітичний прилад - полярний планіметр. При відсутності такого на дрібномасштабних зображеннях можна застосувати графічний метод обчислення площ. Для цього ділянку розбивають на найпростіші геометричні фігури, найчастіше на трикутники. За

масштабом вимірюють їхні елементи (основи і висоти), роблять необхідні обчислення і підсумовують площі окремих фігур, що вийшли. Для контролю усі виміри й обчислення повторюють, змінюючи основи і висоти в кожному трикутнику. За остаточний результат беруть середній з двох.

Визначення площі ділянки на фотознімку можна виконати за допомогою палетки. Палетка являє собою прозору пластинку, на якій нанесена сітка квадратів зі стороною 2 мм. Для визначення площі палетку накладають на знімок з відзначеною ділянкою, і лічать, скільки квадратиків займає ділянка, оцінюючи на око частки квадратиків. Потім отримане число множать на площу квадрата з урахуванням масштабу.

При визначенні площ ділянок на цифрових знімках земної поверхні периметр ділянки апроксимують ламаною лінією, що утворить багатокутник. Растрові координати вершин (i_k, j_k) фіксують. Потім роблять обчислення площі багатокутника по формулі:

$$S = \frac{M_x M_y}{2} \sum_{k=1}^{K-1} x_k y_1 - x_{k+1} y_k + x_N y_1 - x_1 y_N .$$

3.9. Робота з фотознімками

3.9.1. Орієнтування і прив'язка знімків

Щоб користатися знімком, необхідно *орієнтувати його щодо місцевості і сторін світу*. Орієнтування звичайне здійснюється по топографічній карті визначенням загальних точок на знімку і карті, нанесенням на знімок напрямку дійсного меридіана і підписуванням назв нанесених пунктів, залізничних станцій, рік, озер, напрямків доріг і т.п.

Для успішного орієнтування знімків необхідно добре знати район зйомки. Вивчення його варто починати після одержання задачі. Спочатку місцевість вивчається по картах масштабу 1:200000 - 1:500000, потім по картах більш великого масштабу. Процес вивчення складається у відшуванні і запам'ятовуванні

взаємного розташування найбільш помітних з космосу характерних орієнтирів. У першу чергу варто відзначити орієнтири, не піддані швидким змінам, наприклад ріки, озера, залізні і шосейні дороги, великі населені пункти і т.п. Істотно допомагають у вивченні місцевості раніше виконані знімки.

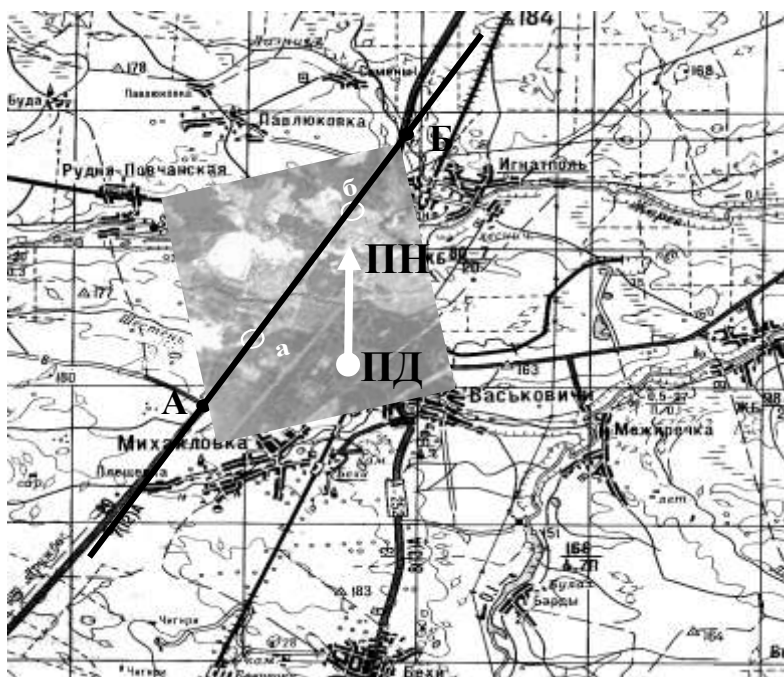


Рис.3.36. Нанесення на знімок дійсного меридіана по карті за допомогою прямої лінії

Вихідними даними для орієнтування знімків є орбітальні дані КА – носія датчика на момент зйомки. Визначення напрямку меридіана можна робити по карті, по зображеннях тіней на знімку і по величині нахилення орбіти КА.

Нанесення на знімок *напряму дійсного меридіану*. Напрямок дійсного меридіана по карті можна нанести за допомогою прямої лінії (рис.3.36):

- пізнають на знімку, і карті по двох загальні точки і через них проводять прямі лінії;
- накладають знімок на карту так, щоб прокреслений напрямок на знімку сполучилося з цим же напрямком на карті;
- зберігаючи таке положення знімка, прокреслюють на ньому лінію, паралельну однієї з бокових сторін рамки карти; ця лінія і буде напрямком дійсного меридіана.

Для перспективних знімків точність цього способу невисока, оскільки не враховуються перекручування кутів на знімку.

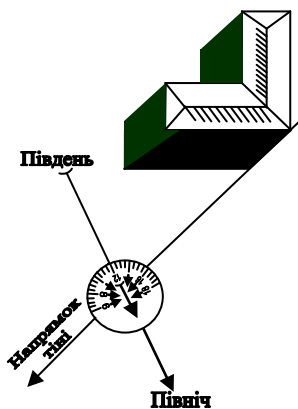


Рис.3.37. Орієнтування знімка по приладу ПОССТ

Орієнтування знімків щодо сторін світу по тінях можливо тільки в тому випадку, якщо тіні від місцевих предметів чітко видні на знімках і відомий час знімання. В 12 годин дня (13 годин по місцевому "зимовому" декретному часу) Сонце знаходиться на півдні і тіні спрямовані на північ, у 6 годин тіні спрямовані на захід, у 13 годин - на схід. Тут приведений *місцевий* для району знімання час! За одну годину Сонце проходить по обрії 15° .

При орієнтуванні по тінях на знімку проводять напрямок тіні, після чого обчислюють величину кута β між меридіаном і даним напрямком. Для цього модуль різниці між місцевим

часом зйомки (у годинах) і цифрою 12 множать на 15° . Отриманий кут β відкладають від лінії тіні: при зйомці до полудня - вправо по ходу годинної стрілки, при зйомці після полудня - уліво проти ходу годинної стрілки. У результаті визначається напрямок на північ.

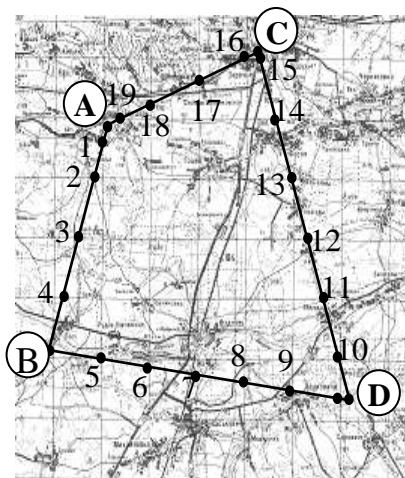
Для більш швидкого орієнтування знімків по тінях служить прилад оцінювання сторін світу за тінями (ПОССТ) (рис.3.37.), що представляє собою целулоїдний кружок, на якому є стрілка "Північ - Південь", а по півколу нанесена шкала з цифрами від 6 до 16 (години знімання) і розподілами по 15 хвилин: стрілки від цифр показують напрямок тіней.

Точність у визначенні сторін світу по тінях складає $7...8^\circ$.

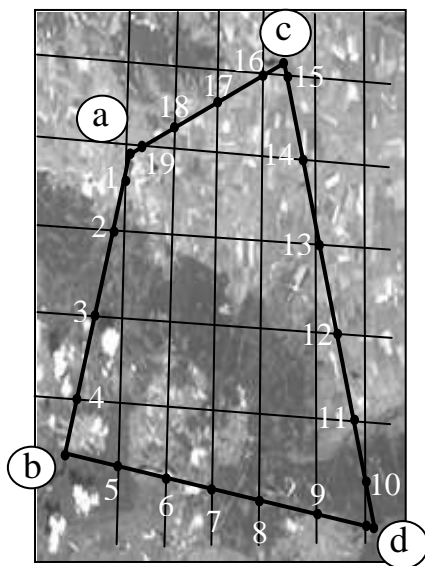
Орієнтування знімка по нахиленню орбіти КА і в момент зйомки полягає в нанесенні на знімок напрямку підсупутникової лінії відносно напрямку дійсного меридіану з урахуванням кутової орієнтації датчика щодо осей КА. Наприклад, якщо всі кути повороту датчика дорівнюють нулю (знімання «в надир»), напрямок дійсного меридіану дорівнює $(90^\circ - i)$ відносно вертикальній межі знімку. Так визначається напрямок на північ.

Орієнтування будь-якого фотодокумента завершується ототожненням з картою помітних орієнтирів і нанесенням біля них на знімку написів, що вказують назви населених пунктів, залізничних станцій, рік, озер, напрямків доріг і течії рік. На знімках, на яких зображені промислові підприємства, аеродроми, військово-морські бази і порти, указуються стрілками напрямки на основні орієнтири (міста, великі залізничні станції) і проставляються відстані до них.

Нанесення на знімок кілометрової сітки простіше всього виконується по контурах. Після прив'язки знімка до карти знаходять на ній чітко виражені контури (точки), через які проходять лінії кілометрової сітки. Пізнавши зображення цих контурів (точок) на знімку, проводять через них прямі лінії, що будуть відповідати лініям кілометрової сітки.



Карта



Знімок

Рис.3.38. Нанесення на знімок кілометрової сітки

Нанести на знімок кілометрову сітку можна і способом чотирикутника (рис.3.38). На знімку і карті вибирають чотири однойменні чітко виражені точки, що утворять чотирикутник, і з'єднують їх прямими лініями. Точки перетинання ліній кілометрової сітки карти зі сторонами чотирикутника (точки 1, 2, 3, 4, ..., 19) переносять на знімок. Для перенесення точок перетинання ліній послідовно вимірюють на карті відрізки A1, A2, A3, A19, A18, B3, B4, B5, B6, B7, D8, ..., C17, переводять їх у масштаб знімка і відкладають на сторонах чотирикутника від відповідних точок у ту ж сторону, що і на карті. З'єднавши перенесені точки попарно (16-15, 19-14, 2-13, ..., 1-5, 18-6, ..., 13-9), одержують положення ліній кілометрової сітки на знімку.

Визначення координат точок по знімку. Раніше було сказано, що масштаб знімка на відміну від карти нестандартний, тому визначати координати, користаючись циркулем-вимірником і лінійним масштабом, незручно[Л4].

3.9.2. Перенесення об'єктів зі знімка на карту

Іноді необхідно, об'єкти, пізнані на знімку, нанести на карту. Це робиться і для визначення координат об'єктів. Крім того, знімок містить більш свіжі дані про місцевість у порівнянні з картою, тому частина предметів, зображених на знімку, може на карті відсутня. У таких випадках також виникає необхідність перенести деякі місцеві предмети зі знімка на карту.

Перенесення об'єктів зі знімків на чи карту з карти на знімок здійснюється такими способами: розрахунковим і графічними - по контурних точках, зарубками за допомогою простого чи пропорційного циркуля, способом Болотова, побудовою сіток і ангармонічним способом.

Перенесення об'єктів *розрахунковим способом* здійснюється з використанням залежностей між координатами точки на місцевості і знімку. Це найбільш точний і універсальний спосіб, але потребує ЕОМ з відповідним програмним забезпеченням.

Найбільше просто перенести об'єкт зі знімка на карту *по контурах на око*. Для цього треба пізнати на знімку і на карті загальні контури, визначити положення об'єкта щодо цих контурів і нанести його на карту, позначивши відповідним умовним знаком. У цьому випадку місце розташування об'єкта на карту наносять з урахуванням масштабів знімка і карти, прив'язуючи до цього ж контуру чи орієнтиру.

Способи Болотова і переносу за допомогою циркулів засновані на тих же принципах, що і спосіб переносу по контурних точках, але при їхньому використанні вибираються дві і більш опорні точки, щодо яких визначається місце розташування об'єкта.

Перенесення об'єктів зі знімка на карту *побудовою сіток* дозволяє переносити значна кількість об'єктів. Вибирають на знімку і карті по чотирьох ідентичні опорні точки, з'єднують їх між собою прямими лініями, сторони отриманих чотирикутників поділяють на рівну кількість частин (тим

більше, чім точніше потрібно зробити перенос об'єктів); точки розподілу з'єднують між собою прямими і по побудованих сітках на око переносять положення об'єктів. Цей спосіб придатний для знімків, що мають кут нахилу до 10° .

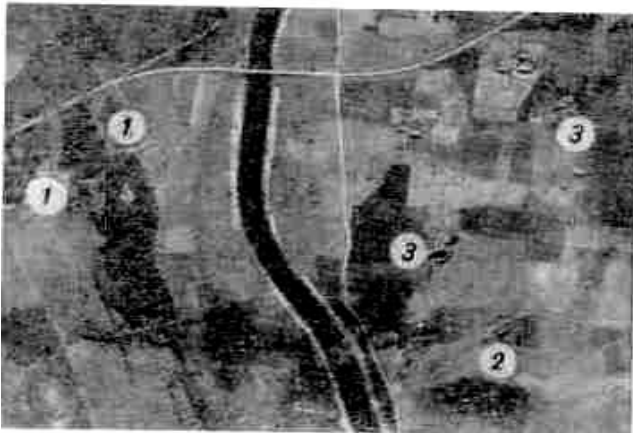
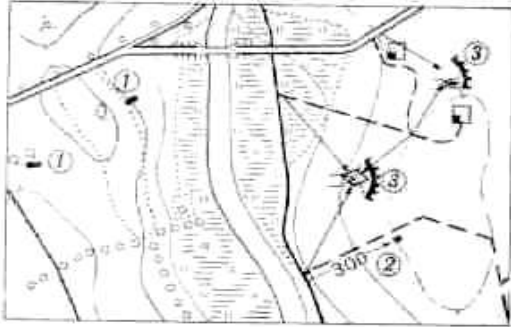


Рис.3.39. Перенос об'єктів зі знімка на карту:

1- по контурах на око; 2 – проміром; 3 –зарубкою

Якщо на знімок нанесена кілометрова сітка, то об'єкт може бути перенесений на карту по квадратах сітки, способом, застосовуваним при складанні схем місцевості по карті.

Часто для переносу об'єктів зі знімка на карту користаються *способом проміру*. Якщо об'єкт знаходиться на якому-небудь прямолінійному контурі, то, пізнавши на знімку і на карті загальну точку (міст на дорозі, кут лісу, перехрестя доріг і т.п.) контуру, визначають по знімку відстань від цієї точки до об'єкта.

Відклавши на карті обмірювана відстань уздовж прямолінійного контуру, одержують положення об'єкта на карті.

Коли перенести об'єкт на око чи проміром важко, застосовують *спосіб зарубки*. При цьому об'єкти зі знімка на карту переносяться в такій послідовності:

1. знаходять на знімку і на карті дві-три загальні точки, розташовані поблизу від потрібного об'єкта, і визначають по знімку відстані від точок до об'єкта;
2. на карті з цих точок проводять дуги радіусами, рівними відстані, обмірюваному по знімку, але в масштабі карти;
3. точка перетинання дуг і буде місцем розташування об'єкта на карті.

На рис.3.39. показано кілька прикладів переносу об'єкта зі знімка на карту [Л4].

При переносі зі знімка на карту лінійних об'єктів, наприклад нової дороги, рекомендується спочатку перенести одним із приведених вище способів два-три характерних вигину, а потім, користаючись положенням вигинів, на око вичертити іншу частину потрібного лінійного предмета.

Відстані, обмірювані на знімку, переводяться у відстані на карті за допомогою пропорційного масштабу (рис.3.40), що будується на чистому листі чи папера на зворотній стороні знімка. Для цього вибирають на знімку і карті по дві загальні точки (А і В). Вимірюють на знімку відрізок АВ і відкладають його на папері. Цей же відрізок вимірюють на карті, відкладають його від точки В перпендикулярно відрізку АВ і одержують точку С. Точку А і С з'єднують прямою. Пряму АВ поділяють на рівні частини і з кожної точки розподілу відновлюють перпендикуляр ж перетинання з прямою АС. Масштаб готовий.

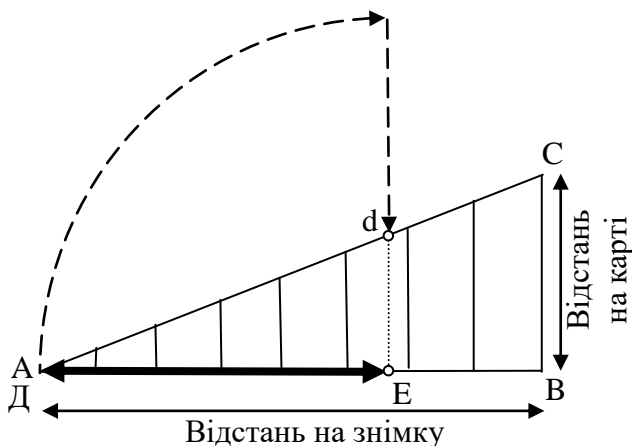
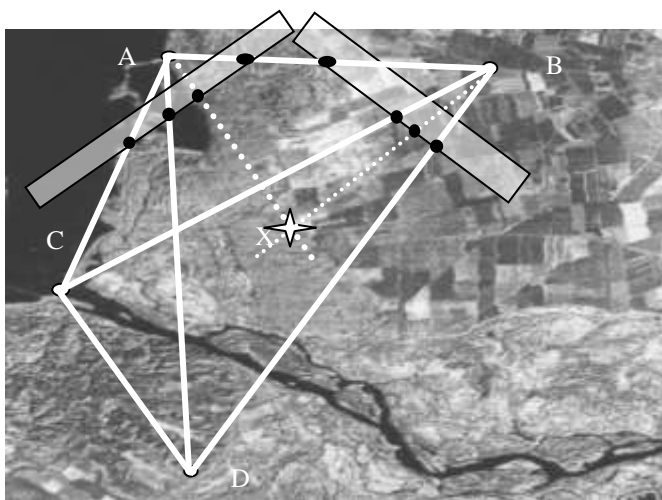


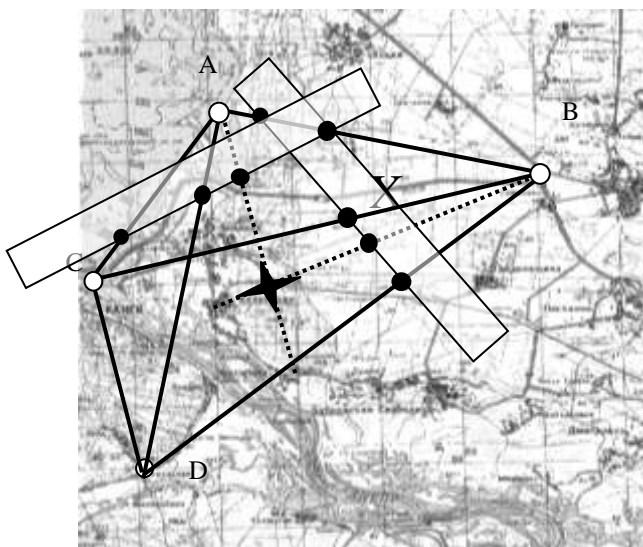
Рис.3.40. Пропорційний масштаб

На знімку вимірюють необхідний відрізок, наприклад DE, і відкладають його від точки A уздовж лінії AB. В отриманій точці E повертають розхил циркуля - вимірювача паралельно лінії BC і скорочують його до торкання лінії AC. Відрізок Ed відповідає відстані на карті між точками D і E на знімку.

Перенесення об'єктів зі знімка на карту ангармонійним методом дозволяє переносити на карту точки з перспективних знімків (у випадку слабо вираженого рельєфу). З цією метою на карті і знімку (рис.3.41) знаходять по чотирьох загальні точки A, B, C, D і a, b, c, d. Щоб нанести на карту точку X, що позначає об'єкт, із точок a й A проводять промені на інші точки і на точку X знімка. Накладають довільно на пучок променів, отриманий на знімку, смужку папера і штрихами на ній відмічають перетинання променів із краєм смужки. Переносять смужку папера на карту і сполучають однойменні штрихи з відповідними променями. Напрямок четвертого променя на точку X відзначають на карті. Повторюють побудову для пучків променів, що виходять із точок b і c і одержують новий напрямок на точку X. На перетинанні променів AX і BX визначиться шукана точка X. Для контролю повторюють побудову з точки d. Погрішність не повинна перевищувати 1 мм.



Знімок



Карта

Рис.3.41. Перенесення об'єктів зі знімка на карту ангармонійним способом

Сумарна помилка у визначенні координат по знімках рівнинної місцевості, що має досить велику кількість

характерних орієнтирів, при використанні описаних вище графічних способів перенесення положення об'єктів зі знімка на карту і при вимірі координат по карті складає в середньому 10 % масштабу карти (наприклад, 100 м для карти масштабу 1:100000). Для місцевості зі значними перевищеннями місцевості чи бідної орієнтирами, а також при великих (більше чим десятикратне) розходженнях між масштабами знімка і карти, точність у визначенні координат даним методом значно погіршується [Л4].

3.9.3. Вимір координат на знімку

За вимірювач координат для знімка будь-якого масштабу дуже зручно використовувати лінійку з міліметровими діленнями, 10 сантиметрів якої відповідають 1 км на місцевості (для сітки з кроком 1км) [Л4].

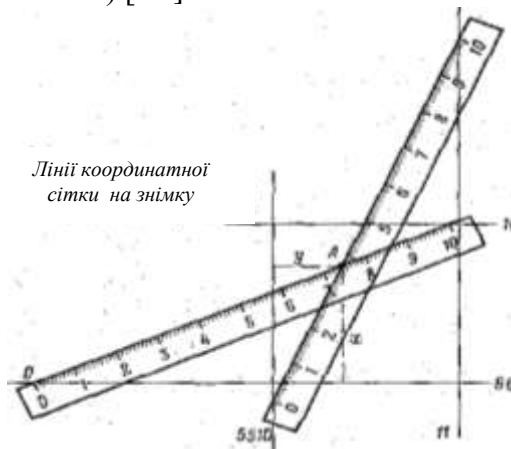


Рис.3.42. Визначення прямокутних координат точок по знімку за допомогою лінійки

Для визначення координати x точки А (рис.3.42) накладають лінійку на знімок так, щоб нульовий штрих її торкався горизонтальної лінії сітки, що лежить нижче точки А; штрих, що позначає 10 см, торкався верхньої лінії; одночасно край лінійки повинний проходити через дану точку. Відлік по лінійці проти точки А в міліметрах, помножений на 10, дасть величину

відрізка по осі x у метрах. Координату y (рис.3.42) визначають аналогічно, але лінійку накладають так, щоб нульовий штрих знаходився на вертикальній лінії, розташованій лівіше точки A ; штрих, що відповідає 10 см, торкався вертикальної лінії, що лежить правіше точки A , а край лінійки проходив через точку A . Координати точки A : $x=10740$; $y=10370$.

3.10. Створення фотосхем і фотопланів

Завершальним етапом обробки матеріалів знімання є складання й оформлення звітних документів. До них відносяться інформаційні повідомлення і фотодокументи. Найбільш інформативними вважаються фотодокументи. До оформлення фотодокументів пред'являються наступні основні вимоги:

1. вірогідність відображення розвідувальних даних;
2. строга відповідність завданню по повноті відображення інформації, що мається на знімках;
3. швидкість оформлення;
4. відповідність загальноприйнятим правилам оформлення бойових оперативних документів.

Фотодокумент – звітньо-інформаційний документ із зображенням місцевості і наявних на ній об'єктів, отриманий у результаті зйомки й оформлений відповідно до прийнятих правил і поставленої задачі.

До фотодокументів відносяться знімки (комплекти знімків), фотосхеми, фотоплани, а також фільми й окремі фотонегативи.

Вид фотодокумента в кожному конкретному випадку визначається об'єктом знімання, способом зйомки, розміром знімків і їхнім числом, часом, що відводиться на виготовлення фотодокумента, і спеціальними вимогами, що визначаються при постановці задачі.

Окремий знімок є доцільним при аналізі окремих характерних об'єктів, розташованих на невеликій площі, частіше в дрібному масштабі.

Знімки у виді комплекту кадрових знімків доцільні при зйомці місцевості в картографічних цілях, з метою вивчення

елементів ландшафту, у випадках, коли необхідно стереоскопічне вивчення знімків не тільки при дешифруванні, але і при їхньому безпосередньому використанні. Найбільш розповсюдженим фотодокументом є фотосхема.

3.10.1. Фотосхеми і способи їх виготовлення

Фотосхема - це інформаційний графічний документ; він складається з декількох знімків, з'єднаних у єдину картину місцевості з наклейкою на підкладку чи змонтованих з використанням липкої стрічки [Л6].

Використовуються фотосхеми при дешифруванні, рекогносцировках, виконанні вимірів, що не вимагають високої точності. Масштаб фотосхеми непостійний.

Знімки, використовувані для виготовлення фотосхеми, повинні відповідати наступним *вимогам*:

- повинні бути отримані по можливості при вертикальному положенні головної оптичної осі об'єктива датчика;
- повинні мати достатнє перекриття, тому що у фотосхему повинні ввійти по можливості центральні частини знімків, що мають найменшу помилку за рельєф місцевості;
- для швидкості підбора знімки повинні мати порядкову нумерацію. Кожен окремий кадр фільму одержує подвійний, дробовий номер: у чисельнику вказується порядковий номер фільму, а в знаменнику - порядковий номер кадру на фільмі. Цифри надписуються в одному з кутів кадру;
- знімки повинні бути вирівняні по середній яскравості (середньої оптичної щільності);
- друк, знімків повинен виконуватися з мінімальною деформацією (не більш 0,3 мм на 100 мм відстані).

Роботи з виготовлення фотосхеми підрозділяються на підготовчі й основні.

Підготовчі роботи складаються з наступного:

- а) підбора знімків по порядкових номерах кожного фільму;
- б) підбора знімків по маршрутах, якщо виконується монтування площі;
- в) обрізки країв знімків, що вийшли при друці.

Основні роботи містять у собі:

- а) монтування знімків;
- б) дешифрування;
- в) оформлення.

Монтування знімків полягає в з'єднанні їх між собою в одне ціле шляхом послідовних сполучень їх по загальних контурах місцевості в місцях перекриттів.

З метою скорочення термінів складання фотосхем монтування і дешифрування знімків звичайно організуються паралельно. Для цього з фільму друкують знімки відразу в двох екземплярах. Один комплект знімків здається на дешифрування, другий - надходить на монтування. У випадку монтування знімків у цифровому виді другий екземпляр друкується після монтування.

Спочатку виконується накідне (тимчасове) монтування, при якому знімки узагалі взаємно не закріплюються, або закріплюються тимчасово. Накідне монтування дає можливість установити послідовність знімків для монтування, необхідний розмір підкладки, на яку будуть монтуватися знімки, відібрати непотрібні для монтажу знімки.

Постійне монтування виконується одним з наступних способів:

- повною наклейкою знімків на підкладку;
- частковою наклейкою знімків на підкладку, при цьому ділянки знімків, що перекриваються, не обрізаються ("лускатий" спосіб);
- склейкою знімків липкою стрічкою.

Намазаний клеєм знімок накладають на підкладку спочатку одним кутом, після цього до картону притискається сторона знімка, що включає даний кут, а потім поступово від цієї сторони до протилежного - весь знімок. Фотознімки наклеюють після їхнього висихання; при терміновій роботі допускається наклейка злегка вологих фотознімків, у цьому випадку підкладка трохи жолобиться.

Звичайно *одномаршрутні фотосхеми* виготовляються способами індивідуальної чи спільної обрізки знімків.

У способі *індивідуальної обрізки* на суміжних знімках маршруту приблизно в середині їхнього подвійного перекриття наколюються голкою пари ідентичних контурних точок, що чітко зобразилися на обох знімках (рис.3.43)

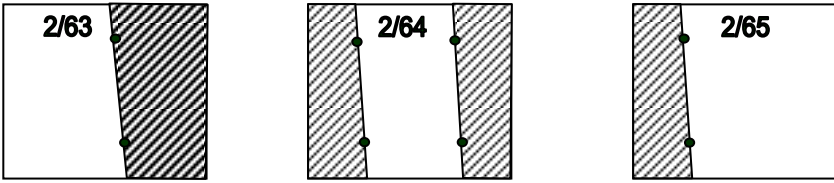


Рис.3.43. Розташування точок і порізів при монтажі фотосхем способом індивідуальної обрізки знімків

Кожен знімок окремо (індивідуально) розрізається скальпелем (ножем) по лінійці, що прикладається до пар наколотих точок. Частини знімків, що неперекриваються, наклеюються на основу (рис.3.43). Виникаючі на стиках несполучення елементів зображення розподіляються нарівно на верхню і нижню частини знімків, що з'єднуються.

При необхідності виготовлена в такий спосіб фотосхема контролюється по несполученню ідентичних точок зображення поблизу кожної лінії порізу. Для цього на фотосхему до кожного порізу послідовно накладається один з обрізків знімка так, щоб

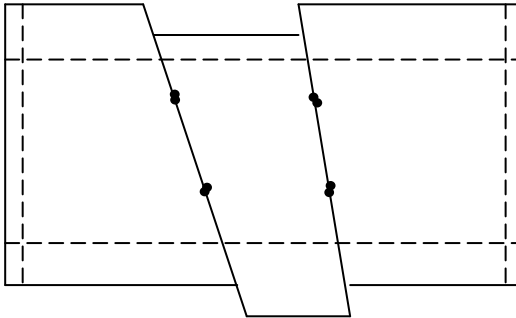


Рис.3.44. Монтаж фотосхеми

зображення на фотосхемі й обрізку збіглися. На обрізку поблизу порізу через 2...3 см вибираються опорні точки зображення і наколюються голкою. Потім на око оцінюються відхилення наколювання від відповідної точки зображення на фотосхемі по напрямку маршруту (рис.3.45а).

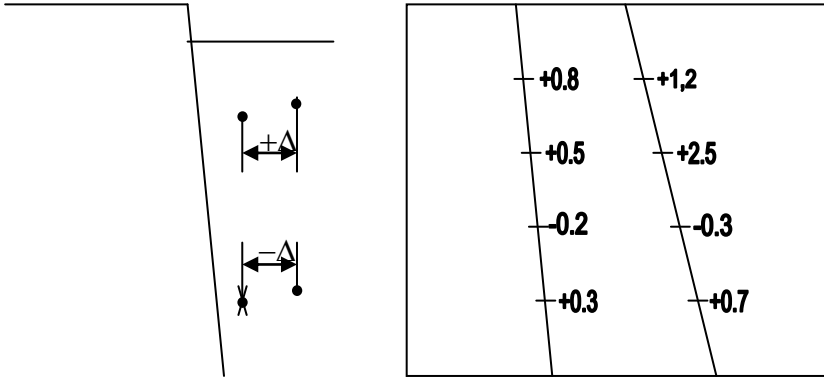


Рис.3.45. Розбіжність точок зображення на фотосхемі, змонтованій способом індивідуальної обрізки знімків: а - величина розбіжності; б - схема запису обмірюваних розбіжностей

Якщо наколювання вийшло між контрольованою точкою і порізом, то відхилення вважається позитивним (*дублет*), а якщо за точкою, те негативним (*виріз*).

Отримані відхилення показуються на схематичному кресленні - *коректурному листі* (рис.3.45,б). Величина дублета не обмежується. Виріз не повинний перевищувати 0.5 мм. Ступінь несполучення точок зображення залежить від кутів нахилу знімків, рельєфу місцевості, різниці висот зйомки і погрішностей монтажу.

Після контролю краї фотосхеми вирівнюються (на рис.3.44 лінія обріза позначена штрихами).

При використанні способу спільної обрізки суміжні знімки сполучаються шляхом мелькання чи по початкових напрямках. Перший варіант більш продуктивний, другий - більш точний але складний.

При виготовленні фотосхеми шляхом *мелькання* два суміжних знімки накладаються один на одного частинами, що перекриваються. Швидко і багаторазово піднімаючи й опускаючи частину верхнього знімка, що перекривається, і

переміщаючи його щодо нижнього, домагаються положення, при якому сприймане спарене зображення стабілізується. Після цього знімки тимчасово закріплюють і перевіряють точність сполучення зображень по всій площі перекриття шляхом накалювання голкою декількох чітких точок. Якщо усі виявлені зсуви точок спрямовані в одну сторону, то верхній знімок переміщається щодо нижнього убік, протилежну зсуву. Потім знімки спільно розрізаються гострим ножем приблизно по середині подовжнього перекриття. Лінія порізу повинна бути хвилеподібної чи ламаний. Бажано, щоб поріз перетинав лінійні елементи приблизно під прямим кутом, проходив по однотонному зображенні великих елементів місцевості, минаючи дрібні. Зображення потрібних об'єктів розрізати не можна.

Монтування *багатомаршрутної фотосхеми* звичайно починають із середини центрального маршруту. До нього монтують бокові маршрути. Монтування їх починається із середніх знімків, причому знімки погоджуються не тільки між собою в маршруті, але й одночасно зі знімками сусіднього маршруту. При цьому необхідно прагнути до точного сполучення контурів, розташованих поблизу лінії, що з'єднує головні точки знімків. Застосовується також і спосіб концентричного ув'язування, коли монтаж починають з укладання центрального знімка. До нього монтують по одному знімку ліворуч, праворуч і по трьох зверху і знизу. Потім підмонтують по три знімки ліворуч, праворуч і по п'ять знімків зверху і знизу і т.д. Після укладання й ув'язування всіх знімків їх спільно обрізають по подовжнім і поперечному перекриттях. Фотосхему контролюють по порізах. Результати контролю відзначають у коректурному листі.

Монтування перспективних знімків залежить від напрямку зйомки. При зйомці убік монтування знімків виконується шляхом сполучення контурів за переднім планом. В окремих випадках допускається монтування таких знімків по головній горизонталі чи по контурах заданого об'єкта, а також без обрізки і без сполучення контурів, уприугул, один за іншим.

При монтуванні перспективних знімків, отриманих у результаті зйомки вперед одним датчиком, сполучається, як правило, лише той лінійний орієнтир, уздовж якого виконується зйомка.

При зйомці вперед одночасно декількома датчиками отримані знімки монтуються у виді панорам, причому в цьому випадку групу знімків, отриманих при наступному експонуванні, монтувати по контурах зі знімками попередньої групи недоцільно: їх варто наклеювати на чи підкладку з'єднувати іншим способом поруч, одну групу над іншою, без обрізки частин, що перекриваються по горизонталях [Л6].

3.10.2. Фотоплани і технологія їх виготовлення

Фотопланом називається план місцевості, складений із групи трансформованих і змонтованих на загальній основі знімків.

Фотоплан відрізняється від топографічного плану тим, що всі контури місцевості зображені на ньому, а не позначені умовними знаками. По точності фотоплан не відрізняється від карти і придатний для вимірювальних цілей. Часто на фотоплані вичерчують по умовних знаках населені пункти, дороги й інші основні елементи місцевості і проводять горизонталі. Такий фотодокумент, що сполучить фотоплан з картою, називається фотокартою.

При складанні фотоплану монтування знімка здійснюється на основі, на якій у заданому масштабі нанесені точки тріангуляції (опорні точки). Перед монтуванням на трансформованих знімках пробиваються невеликі отвори на трансформаційних точках. Знімки з пробитими точками накладаються на основу так, щоб відповідні точки основи були видні в центрі пробитих отворів.

При монтуванні фотопланів допускається розбіжність трансформаційних точок до 0,6 мм, викликане непереборними помилками трансформування, впливом рельєфу місцевості і деформацією паперу.

Знімки монтують по маршрутах, починаючи з лівого знімка верхнього маршруту майбутнього фотоплану. Після того як усі знімки розміщені на основі, здійснюється обрізання загальних частин сусідніх знімків по тим же правилам, що і при монтажі фотосхем. Обрізані знімки наклеюються на основу, а обрізки використовуються для коректури фото плану [Л6].

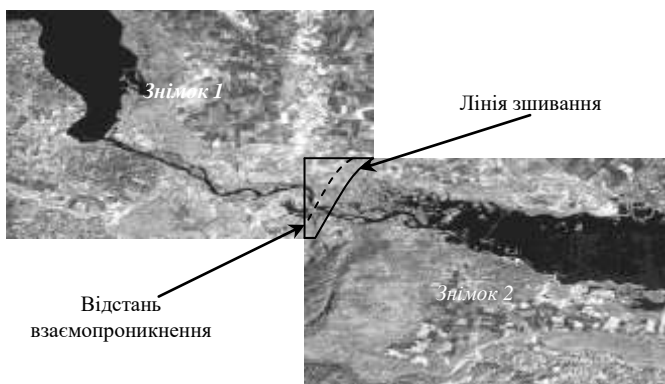


Рис.3.46. Складання цифрових знімків в мозаїку

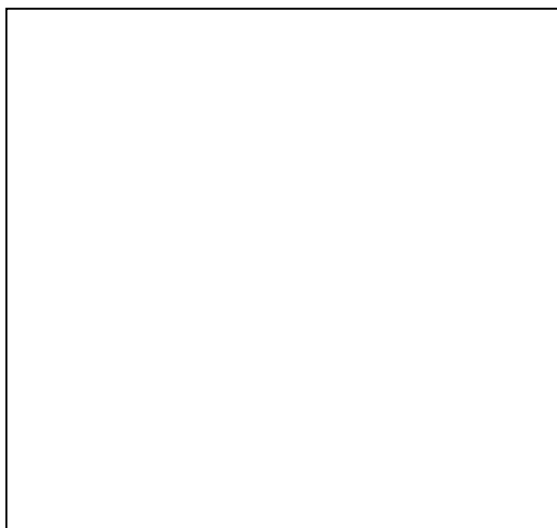


Рис.3.47. Приклад сучасної фотокарти

При роботі з цифровими геореференцьованими знімками складання фотоплану називається складанням *геореференцьованої мозаїки*. Складання геореференцьованих мозаїк не є складним при використанні сучасних програмних засобів АРМ. На рис. 3.46 показане складання цифрових знімків в мозаїку з визначенням лінії перерізу та смуги взаємопроникнення зображень. Лінія перерізу задається як векторний графічний об'єкт. Смуга взаємопроникнення задається числом пікселів.

Геореференцьована мозаїка може бути легко суміщена із зображенням карти, що надає нові можливості в поданні результатів дешифрування. На рис. 3.47 показаний приклад суміщення фотоплану з геореференцьованих цифрових знімків і карти. Це надає нове розуміння поняттю «фотокарта».

3.11. Основи стереофотограмметрії. Стереоприклади

Природою людині дана можливість сприймати навколишній світ двома очима, що має істотне значення для сприйняття просторових співвідношень розглянутих предметів. На цьому ж принципі засновані і стереофотограмметричні виміри в фотограмметрії.

3.11.1. Принципи побудови стереомоделі

При розгляданні предметів одночасно двома очима можна відчувати об'ємну форму предметів і їхнє просторове положення. Це явище називають *природним стереоефектом*.

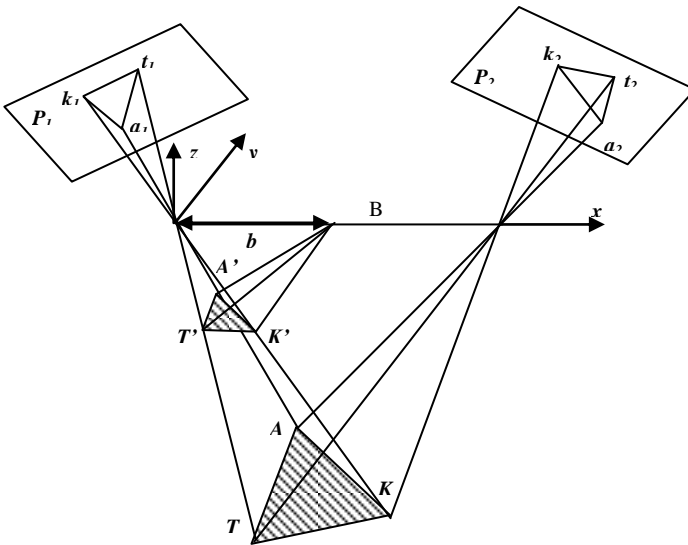


Рис.3.48. Схема побудови геометричної моделі місцевості

Стереоскопічний ефект може виникнути не тільки при безпосереднім розгляданні об'єкта, але і при розгляданні двох його перспективних зображень, отриманих із двох точок. Такий стереоефект називають штучним. Зокрема, його можна одержати по знімкам, отриманим з КА та літаків [Л6]

Припустимо, що ділянка місцевості AKT (рис.3.48) зобразилась на двох знімках, отриманих при різних положеннях центрів проектування J та J' . Якщо елементи внутрішнього і кутові елементи зовнішнього орієнтування кожного знімка точно відомі, то, використовуючи їх, можна установити ці знімки в положення, яке вони займали під час фотографування, скоротивши при цьому відстань між точками J та J' до розмірів базису проектування b .

У результаті такої установки знімків і зворотного проектування одержимо геометричну модель місцевості AKT , яка визначається як сукупність точок перетинання відповідних проектуючих променів, отриманих по стереопарі.

Таким чином, якщо установити знімки стереопари відповідно до елементів внутрішнього і кутових елементів зовнішнього

орієнтування (орієнтуючі їх взаємно) і *розділити зір*, тобто кожним оком розглядати тільки один з знімків, виникне *штучний стереоефект*, і спостерігач побачить *стереоскопічну модель місцевості*.

При розгляданні знімків у залежності від їх взаємного розташування можна одержати прямий, зворотний і нульовий стереоефекти.

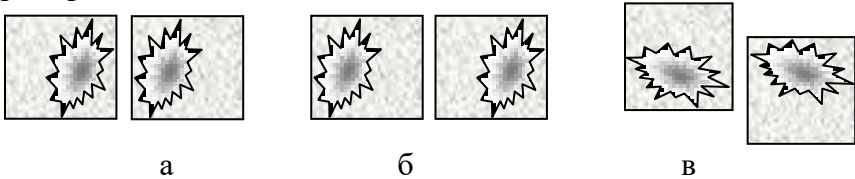


Рис.3.49. Розташування знімків при одержанні стереоефекта:
 а - прямого; б - зворотного; у – нульового

Якщо розташувати знімок перекриттям усередину (рис.3.49,а), то буде відчуватися *прямий стереоефект*, коли форма стереоскопічної моделі відповідає формі об'єкта в натурі (наприклад, лощина буде відчуватися як лощина, височина - як височина і т.д.).

Якщо знімки розташувати перекриттям у різні сторони, тобто поміняти місцями (рис.3.49,б), то буде спостерігатися *зворотний стереоефект*, коли форма стереоскопічної моделі буде зворотна до форми об'єкта в натурі (наприклад, лощина буде сприйматися як височина, височина - як лощина і т.д.).

Якщо знімки повернути на 90° у різні сторони (рис.3.49,в), то виникне *нульовий стереоефект*, при якому злине зображення двох знімків буде спостерігатися плоским.

Як указувалося вище, для одержання штучного стереоефекта необхідно розділити зір, наприклад лівим оком бачити тільки лівий знімок чи навпаки. Існують різні способи поділу зору для одержання штучного стереоефекта: оптичний, анаглифічний, поляроїдів і інші.

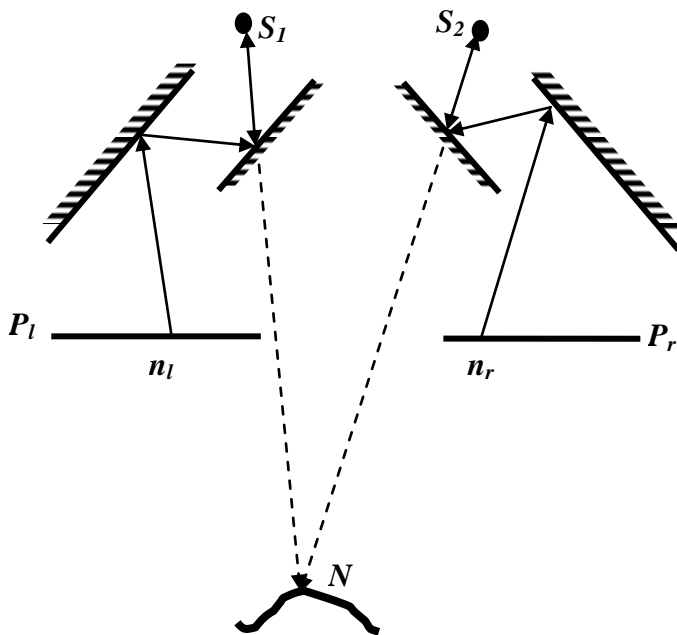


Рис.3.50.Одержання штучного стереоефекта в дзеркально-лінзовому стереоскопі

Оптичний спосіб полягає в поділі зору за допомогою оптичних систем. Найпростіша система здійснена в *дзеркальному стереоскопі*, де для цієї мети використовують дві пари дзеркал, розташованих під кутом 45° до площини знімків (рис.3.50). Спостерігач бачить *мниму стереоскопічну модель*, точки якої виходять у наслідок перетинання продовження зорових променів лівого і правого ока.

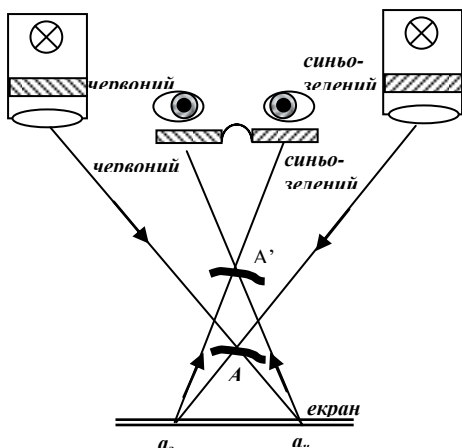


Рис.3.51. Анаглифічний спосіб одержання штучного стереоефекта

Анаглифічний спосіб полягає в одержанні штучного стереоефекта по двох зображеннях, пофарбованих у додаткові кольори (звичайно червоний і синьо-зелений), при розгляданні їх через кольорові окуляри - світлофільтри, які мають таке ж фарбування. При цьому, в залежності від розташування очей спостерігача з окулярами-світлофільтрами, може бути отриманий прямий, зворотний і нульовий стереоефекти. Нехай зображення знімків стереопари проєктуються на екран: один - через червоний світлофільтр, другий - через синьо-зелений (рис.3.51). Зображення лівого знімка на екрані буде пофарбовано в червоний колір (точка a_1), правого - у синьо-зелений (точка a_2). Однойменні промені, перетинаючи, утворять точку A - невидиму спостерігачем точку геометричної моделі.

Якщо зображення на екрані розглядають у темряві через окуляри - світлофільтри, то через червоний світлофільтр спостерігач побачить тільки червоне зображення (точка a_1), а через зелений - зелене (точка a_2). При цьому, якщо однойменні світлофільтри в проєкторах і окулярах мають однаковий колір,

то буде спостерігатися прями́й стереоефект, а якщо поміняти їх місце - те зворотний.

Відбиті від екрана і сприймані очима спостерігача промені перетинаються в просторі й утворюють *стереоскопічну модель* (точка A'), що у загальному випадку не збігається з *геометричної* по висоті і трохи відрізняється від її по формі в залежності від положення очей спостерігача.

Спосіб поляроїдів аналогічний анаглифічному, але в ньому замість кольорових світлофільтрів застосовують поляроїди з взаємно перпендикулярними площинами поляризації.

3.15.2. Вимір рельєфу місцевості по стереознімкам

Якщо відома геодезична висота будь-якої точки місцевості, зображеної на стереопарі, те висоту будь-якої іншої точки можна визначити, виміривши перевищення цієї точки над базисною.

Розглянемо ідеальний випадок знімання, коли базис кадрового знімання й обидва знімки в момент знімання горизонтальні (рис.3.52).

Прийmemo за початкову горизонтальну площину E , що проходить через *базисну точку* C . Подовжні *паралакси* для точок C и D , різниця висот між якими потрібно визначити, знаходяться з формул

$$p_c = x_{cl} - x_{cr}, \quad p_d = x_{dl} - x_{dr}.$$

По різниці подовжніх паралаксів можна обчислити перевищення одних точок над іншими. Як видно з рис.3.52,

$$p_c = x_{cl} - x_{cr} = \frac{Bf}{H},$$

$$p_d = x_{dl} - x_{dr} = \frac{Bf}{(H - h)},$$

де B - базис фотографування; b - базис фотографування в масштабі знімка.

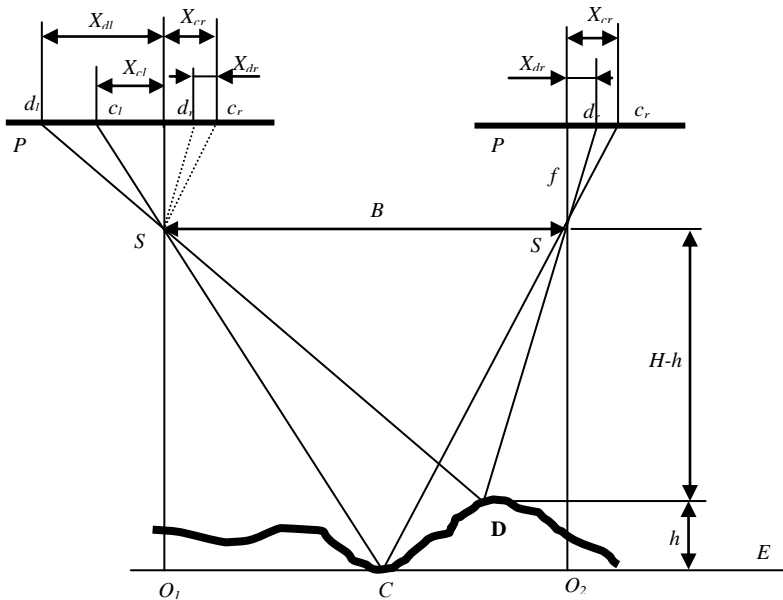


Рис.3.52. Схема визначення перевищень точок місцевості при ідеальному випадку знімання

Різниця паралаксів двох точок

$$\Delta p = p_d - p_c = b \cdot h / (H - h).$$

Звідси остаточно $h = H \cdot \Delta p / (b + \Delta p)$.

Реальні знімки навіть при гіростабілізації знімальної камери мають нахили. Крім того, істотний вплив на викривлення геометричних властивостей знімка роблять фізичні фактори. Ці явища значно ускладнюють техніку виміру рельєфу по стереопарах [Л6].

Питання для самоконтролю

1. Як визначені координати в проекції Гауса-Крюгера?
2. Якими можливості є у сучасних географічних інформаційних систем?
3. З яких шарів складається географічна карта?
4. Що є елементами центральної проекції на знімку?
5. Які системи координат застосовуються в фотограмметрії?
6. Що є елементами орієнтування знімку?
7. Як визначається масштаб планового, горизонтального та перспективного знімків?
8. Як пов'язані відповідні точки місцевості та знімка?
9. Як впливають на координати в нахил знімку?
10. Як визначаються координати точок земної поверхні з координат точок на сканерному знімку?
11. Які геометричні викривлення викликаються рельєфом місцевості та кутовими коливаннями носія.
12. Як визначаються координати точок земної поверхні з координат точок на радіолокаційному знімку?
13. Що є трансформування знімків?
14. Як корегуються корегування просторові викривлення на знімках земної поверхні?
15. Яким чином використовуються опорні точки місцевості при геореференцюванні знімків?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Айриг С., Айриг Э. Сканирование — профессиональный подход. - CompuServe, 1995.
2. Айриг С., Айриг Э. Подготовка цифровых изображений для печати. – CompuServe, 1999.
3. Ахмед Н.Д., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов: Пер. с англ./ Под ред. Н.Б. Фоменко.- М.: Связь, 1980.
4. Говорухин А.М., Куприн А.М. и др. Справочник по военной топографии. - М.: Воениздат, 1980.
5. Инженерный справочник по космической технике. Изд. 2-е перераб. и дополн./ Под ред. А.В.Солодова.-М.: Воен.издат., 1977.-430с.
6. Попов М.А., Моисеев В.Л. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование. Часть 1. - Киев: КВВАИУ, 1990. -223с.
7. Программное изделие «Обработка изображений высокой разрешающей способности».Руководство пользователя.- Днепропетровск: Днепрокосмос, 2002г.
8. Прэрт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ.в 2-х книгах. - М.: Мир, 1982. кн.1 - 312с., кн.2 - 480с., ил.
9. Ребрин Ю.К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. Учебник для инженерных вузов ВВС.-Киев: КВАИУ, 1988.-450.
10. Реутов А.П., Михайлов Б.А., Кондратенков Г.С. и др. Радиолокационные станции бокового обзора.- М.: Советское радио, 1970.-360с.
11. Обработка изображений и цифровая фильтрация. : Под ред. Т. Хуанга / Пер. с англ. - М.: Мир, 1979.- 318с., ил.
12. Сысоев К.А. Основы геодезии и картографии.-М.: Недра, 1976.-144 с., ил.
13. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: введение в цифровую оптику. - М.: Радио и связь, 1987. - 296с., ил.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРМ	- автоматизоване робоче місце
АЦП	- аналогово – цифровий перетворювач
ГІС	- географічна інформаційна система
ЕОМ	- електронно-обчислювальна машина
КА	- космічний апарат
ІЧ	- інфрачервоні
ПЕОМ	- персональна електронно-обчислювальна машина
ПЗЗ	- прилад з зарядовим зв'язком
РЛ	- радіолокаційний
РЛБО	- радіолокатор бокового огляду
РЛБО СА	- радіолокатор бокового огляду з синтезованою апертурою
ФРТ	- функція розсіювання точки
ЧКХ	- частотно-контрастна характеристика
ABL	- Available Bands List (список можливих спектральних каналів)
BIL	- Band Interleaved by Line, (перемежування спектральних каналів по рядках)
BIP	- Band Interleaved by Pixel (перемежування спектральних каналів по пікселях)
BSQ	- Band Sequential (перемежування спектральних каналів по черзі)
ENVI	-
GPS	- системи глобального позиціонування
ROI	- region of interes (область інтересів)

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Автокореляційна функція 95,
141, 153.

Адаптивний 96, 114-120, 133-
139.

Адаптивне квантування мод
137.

Багатозональні знімки
132, 142.

Векторні зображення 45, 50.
Відновлення 69, 99, 114, 129.

Вікно

аналізу 148,
фільтра 72, 150.

Геометричні викривлення
203.

ГІС 54

Гістограма зображення 58, 64,
107, 111, 138, 140.

Гомоморфна фільтрація 96.

Двовимірне перетворення
Фур'є 90.

Дискретизація 8.

Елементи орієнтування 170

Енергетичний спектр 117.

Згладжування 118

Згортка цифрова 68

Інфрачервоний 143

Квантування 8

Колір 7, 23

Контраст 21

Контрастування 87, 141, 142,
152.

Корегування викривлень
геометричних 204, 214
радіометричних 56

Локалізація 147

Масштаб 93, 95, 156.

Медіанна фільтрація 85.

Мультиплікативний шум
101.

Напівтонове зображення
17.

Ознаки 130, 137, 149.

Підкреслення меж 72, 80,
87, 132, 135.

Підсупутникова точка 170.

Препарування 131.

Прилад з зарядовим
зв'язком 201.

Прив'язка географічна 166,
171.

Проекція картографічна 157.

Просторова частота 68.

Просторово-частотні
спектри 90.

Псевдокольори 142.

Радіометричні

викривлення 56.

перетворення 60.

Радіометричне корегування
56.

Радіолокатор бокового огляду
171.

Растр 8.

Рекурсивний фільтр 76.

Роздільна здатність 179.

Сканер 18.

Сканерний датчик 176.

Спектрональні знімки 142.

Стерео 240, 248.

Стереопара 254.

Стиснення 25.

Трансформування 192.

Турбулентність 123.

Фільтр 65

Фільтрація зображень

лінійна 66,

локальна 72,

нелінійна 76,

рекурсивна 76,

гомоморфна 96.

Формати файлів 32.

Фотограмметрія 181.

Фотосхема 240.

Фото план 245.

Фотокарта 214, 247.

Функція розсіяння точки 125.

Хибні кольори 142.

Хибні контури 21.

Цифрові карти 164.

Частота просторова 68.

Частотна площа 93

Частотні характеристики
150.

Шум 22,

адитивний 97,

імпульсний 86,

квантування 59,

мультиплікативний 101.

Яскравість 7, 23.

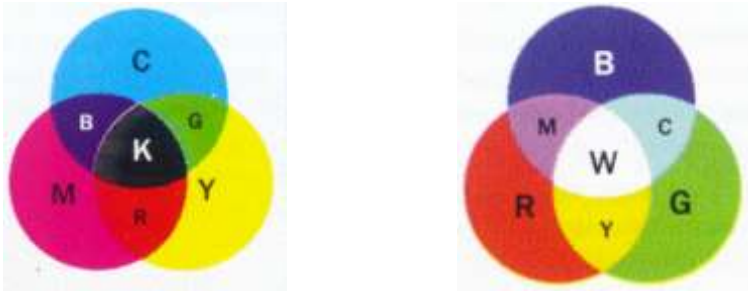


Рис.Д.1. Співвідношення кольорів у моделях колірних координат CMYK та RGB

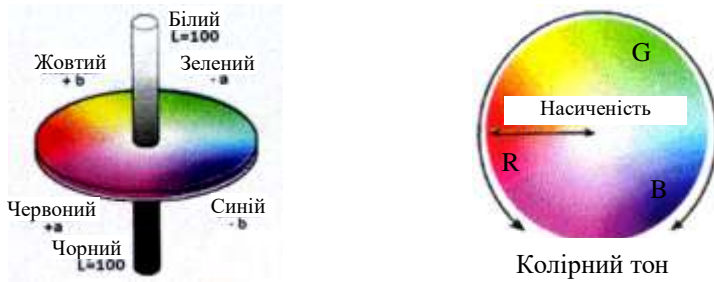


Рис.Д.2. Система колірних координат HSB

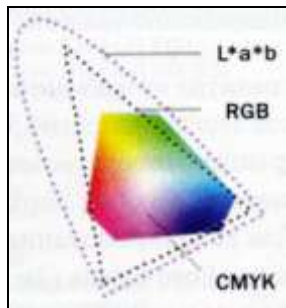


Рис.Д.3. Колірні охоплення різних колірних моделей

