

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПЕРЕЛИГІН Б.В.  
ГОР'ЄВ С.А.

ЦИФРОВА ОБРОБКА СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Конспект лекцій

Одеса  
Одеський державний екологічний університет  
2021

УДК 004.67:528.71:528.77

П 27

**Перелигін Б.В., Гор'єв С.А.**

**П27** Цифрова обробка супутникових зображень: конспект лекцій. Одеса, Одеський державний екологічний університет, 2021. 113 с.

ISBN 978-966-186-151-9

В конспекті лекцій розглянуті поняття про безперервне й цифрове зображення та про одержання цифрового зображення з безперервного, викладені принципи дії основних видів пристроїв, які дозволяють одержати цифрові зображення, наводяться способи і методи цифрової обробки зображень, докладно розглянуто цифрову обробку супутникових знімків.

Даний конспект лекцій призначений для магістрів спеціальності 122 Комп'ютерні науки які навчаються за освітньою програмою Комп'ютерний еколого-економічний моніторинг. Може використовуватися бакалаврами спеціальності 193 Геодезія та землеустрій для поглиблення знань в галузі моніторингу навколишнього середовища.

**УДК 004.67:528.71:528.77**

*Рекомендовано методичною радою Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України як конспект лекцій (протокол № 8 від 27.05.2021 р.)*

**ISBN 978-966-186-151-9**

© Перелигін Б.В., Гор'єв С.А., 2021

© Одеський державний екологічний університет, 2021

## ЗМІСТ

	стор.
<b>Вступ</b> .....	5
<b>1 Аналогове та цифрове зображення. Одержання цифрових зображень</b> .....	6
1.1 Модель безперервного зображення.....	6
1.2 Дискретизація безперервного зображення .....	8
1.3 Квантування безперервного зображення.....	10
1.4 Кодування й типи цифрових зображень.....	11
1.5 Елементарний сенсор.....	13
1.6 Одержання зображень за допомогою сканера.....	17
1.7 Одержання зображень за допомогою цифрових фотоапаратів.....	18
1.8 Одержання зображень за допомогою ультразвуку.....	20
1.9 Одержання рентгенівських зображень.....	21
1.10 Одержання томографічних зображень.....	23
1.11 Одержання зображень при дистанційному зондуванні Землі.....	26
<b>2 Обробка цифрових зображень на основі геометричних перетворень</b> .....	34
2.1 Класифікація методів цифрової обробки зображень.....	34
2.2 Геометричні перетворення зображень.....	37
<b>3 Перетворення зображень точкового типу</b> .....	51
3.1 Логічні операції над зображеннями.....	51
3.2 Лінійні перетворення яскравості напівтонових зображень.....	51
3.3 Арифметичні операції над зображеннями.....	56
3.4 Нелінійна корекція яскравості зображень.....	58
3.5 Перетворення яскравості на базі гістограми зображення.....	61
3.6 Локально-адаптивна обробка зображень.....	62
<b>4 Перетворення локального типу</b> .....	66
4.1 Типи шумів.....	67

4.2	Фільтрація зображень.....	69
4.3	Низькочастотні фільтри.....	72
4.4	Високочастотні фільтри.....	76
4.5	Нелінійна фільтрація.....	80
4.6	Внесення ефектів у зображення.....	84
<b>5</b>	<b>Цифрова обробка космічних знімків.....</b>	<b>88</b>
5.1	Особливості зображень на космічних знімках у різних ділянках спектра.....	88
5.2	Етапи і зміст обробки космічних знімків.....	94
	<b>Література.....</b>	<b>112</b>

## ВСТУП

Зображення – це відбиття природних, виникаючих у природі сигналів, тобто хвиль різної довжини, які можуть бути зареєстровані зоровою системою людини або приладами. Причому око людини сприймає хвилі в досить вузькій ділянці електромагнітного спектра, який називається видимим. Все видиме оком, а також реєстроване приладами, споконвічно являє собою безперервні сигнали, які утворюють аналогові зображення. Вони описуються безперервними функціями, а сучасні комп'ютери обробляють інформацію в цифровому виді. Тому обробка зображень є одним із самих затребуваних напрямків сучасної інформатики.

Інтерес до методів цифрової обробки зображення виростає із двох основних областей її застосування, якими є підвищення якості зображення для поліпшення його візуального сприйняття людиною й обробки зображення для їхнього зберігання, передачі й подання в автономних системах машинного зору.

Таким чином, цифрова обробка зображення тісно пов'язана з розвитком цифрової обчислювальної техніки. Для цифрових зображень потрібно таку велику пам'ять й обчислювальну потужність, що прогрес в області цифрової обробки зображень у значній мірі визначається розвитком комп'ютерів і допоміжних технологій для зберігання, відображення й передачі даних.

Перші комп'ютери з потужністю, достатньою для виконання завдань цифрової обробки зображень, з'явилися на початку 1960-х років. Народження того, що ми сьогодні називаємо цифровою обробкою зображення, простежується з моменту виникнення таких машин і початку вивчення Землі з космосу, зокрема з аналізу зображень поверхні. Паралельний прогрес у цих областях пустив у хід потужний потенціал ідей цифрової обробки зображення.

У всіляких галузях науки й техніки є безліч завдань, пов'язаних з обробкою зображень. Це, наприклад, аналіз й інтерпретація аерофотознімків і космічних знімків у науках про Землю, у метеорології, астрономії, дослідженні природних ресурсів; аналіз оптичних рентгенівських, теплових, радіографічних й інших зображень у медичній діагностики, промислової дефектоскопії, наукових дослідженнях. Аналіз зображення й полів, зареєстрованих методом оптичної, радіо- і акустичної

голографії.

У зв'язку із цим у вузівських програмах з'являються дисципліни, спрямовані на вивчення принципів обробки зображень, причому пріоритетна увага приділяється цифровим методам, які приваблюють своєю гнучкістю.

## **1 АНАЛОГОВЕ ТА ЦИФРОВЕ ЗОБРАЖЕННЯ. ОДЕРЖАННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

Зображення – це відбиття природних, виникаючих у природі сигналів, тобто хвиль різної довжини, які можуть бути зареєстровані зоровою системою людини або приладами. Причому око людини сприймає хвилі в досить вузькій ділянці електромагнітного спектра, що називається видимим. Все видиме оком, а також реєстроване приладами, споконвічно являє собою безперервні сигнали, що утворюють аналогові зображення. Вони описуються безперервними функціями, а сучасні комп'ютери обробляють інформацію в цифровому виді. Тому обробка зображень є одним із самих затребуваних напрямків сучасної інформатики.

Процес реєстрації відбитого безперервного сигналу й перетворення його в цифрове подання називається одержанням цифрового зображення. Перетворення також називають обробкою зображень, вона виконується за певними алгоритмами за допомогою програм, що реалізують ці алгоритми.

### **1.1 Модель безперервного зображення**

Будемо називати зображенням функцію двох змінних  $f(x,y)$ , визначену в деякій області  $S$  площини  $Oxy$  і яка має деяку множину своїх значень. Наприклад, звичайну чорно-білу фотографію можна представити як  $f(x, y) \geq 0$ ,  $0 \leq x \leq a$ ,  $0 \leq y \leq b$ , де  $f(x,y)$  – яскравість (іноді називана оптичною щільністю або ступенем білизни або тоном) зображення в точці  $(x, y)$ ;  $a$  – ширина;  $b$  – висота кадру.

З урахуванням особливостей функції  $f$  звичайно виділяють наступні класи зображень (рис. 1.1):

- 1) напівтонові,

- 2) бінарні,
- 3) лінійні,
- 4) точкові.

Прикладами напівтонових (сірих) зображень (рис. 1.1, а) можуть служити звичайні чорно-білі фотографії. Множина значень функції в  $S$  може бути дискретним ( $f \in \{f_0, \dots, f_l\}$ ,  $l > 1$ ) або безперервним ( $0 \leq f \leq f_{max}$ ). В один клас з напівтоновими звичайно поєднують кольорові фото- і телевізійні зображення.

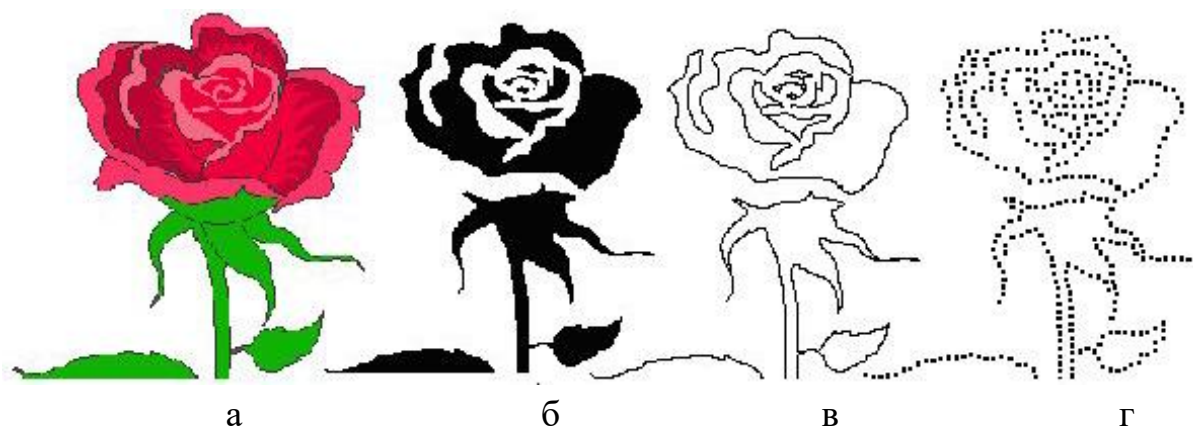


Рисунок 1.1 – Види зображень: а – напівтонове; б – бінарне; в – лінійне; г – точкове

Експериментально встановлено, що практично будь-які кольори, видимі людиною (але не всякий), можуть бути представлені як сума певних значень  $m_1, m_2, m_3$  трьох лінійно-незалежних так званих основних кольорів:

$$f = m_1 \cdot E_1 + m_2 \cdot E_2 + m_3 \cdot E_3.$$

Відповідно до прийнятої системи RGB основними є кольори, що відповідають монохроматичним випромінюванням з довжиною хвилі  $\lambda_1 = 0,7$  мкм (червоний – R),  $\lambda_2 = 0,5461$  мкм (зелений – G),  $\lambda_3 = 0,4358$  мкм (синій – B). Тут множина значень функції  $f$  являє собою тривимірний простір інтенсивності ( $m_1, m_2, m_3$ ) основних кольорів. Якщо  $m_1 = m_2 = m_3 = m$ , то залежно від величини  $m$  виходять різні відтінки сірих кольорів – від чорного до білого. Якщо  $m_1 \neq m_2 \neq m_3$ , то зображення пофарбоване в різні кольори.

При космічній й аерозйомці застосовують багатоспектральну фотографічну, телевізійну і сканувальну апаратуру, спектральні канали можуть лежати як у видимому, так й у невидимих УФ й ІЧ діапазонах

спектра; число таких каналів може досягати  $n = 5...10$  і більше. Тут множина значень функції  $f$  являє собою  $n$ -мірний простір інтенсивності ( $m_1, m_2, \dots, m_n$ ). При візуалізації таких зображень на моніторах ЕОМ кожному вектору із цього простору можна привласнити який-небудь видимий людським оком колір, не обов'язково основний. У результаті виходить аеро- або космічне зображення в умовних кольорах (говорять – у псевдокольорах).

Людське око не розрізняє відтінки сірого зображення, яскравість яких відрізняється друг від друга менш чим на 1...2 %, але добре розрізняє кольори. За допомогою комп'ютера різним рівням яскравості напівтонового зображення можна зіставити деяку кольорову шкалу й пофарбувати зображення в так називані неправдиві (псевдо) кольори. Правильно підібрана шкала дозволяє операторові візуально виділяти об'єкти, які мало відрізняються за яскравістю.

Бінарні (дворівневі) зображення (рис. 1.1, б). Тут множина значень функції  $f \in (0, 1)$ . Звичайно 0 – це чорні кольори, а 1 – білий. Прикладом бінарного зображення є карти водойм, карти плоских деталей на конвеєрі й т.д. Лінійні зображення (рис. 1.1, в). Типовий приклад – карта ізоліній, зображення берегової лінії, різні контури. Зображення являє собою одну криву або сімейство кривих. Точкові зображення (рис. 1.1, г). Типовий приклад – кадр ділянки зоряного неба. Зображення являє собою  $k$  точок з координатами  $(x_i, y_i)$  і яскравістю  $f_i, i = 1, \dots, k...$

## 1.2 Дискретизація безперервного зображення

У природі всі процеси протікають безупинно. Зорова система людини також сприймає безперервні сигнали. У сучасній техніці навпаки, всі частіше дані представлені в цифровій формі.

Процес перетворення аналогового сигналу, що описує зображення, у цифрову форму складається із трьох етапів: *дискретизації, квантування і кодування*. Сигнал, до якого застосовані операції дискретизації й квантування, називається цифровим. Після операції дискретизації, але без квантування одержуємо дискретний сигнал (його значення змінюються в безперервному діапазоні).

*Дискретизація* – це перетворення безперервної функції в дискретну, тобто значення функції визначені в окремих (дискретних) точках. При цьому самі значення можуть змінюватися в безперервній шкалі. Інакше кажучи, множина припустимих значень дискретної функції може бути



нескінченним (рис. 1.2, вертикальна вісь).

Заміну безперервного зображення дискретним можна виконати різними способами. Розглянемо основні особливості прямокутної дискретизації.

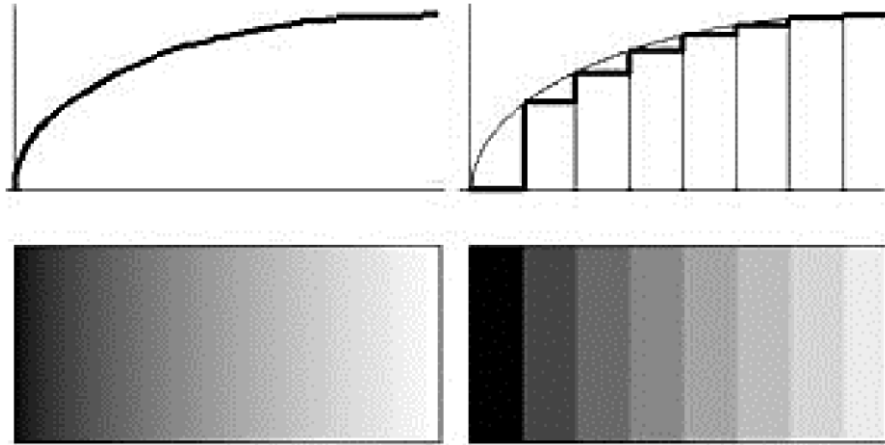


Рисунок 1.2 – Рівномірна дискретизація безперервної функції яскравості

Нехай  $x(t_1, t_2)$  – безперервне зображення, розглянуте як функція від двох змінних;  $x(i_1, i_2)$  – відповідне йому дискретне зображення, отримане з безперервного шляхом розбивки області, у якій визначена функція  $x$ , на фрагменти, як правило, прямокутної форми. Зв'язок між функціями визначається виразом

$$x(t_1, t_2) = x(i_1 \Delta t_1, i_2 \Delta t_2),$$

де  $\Delta t_1, \Delta t_2$  – вертикальний і горизонтальний інтервали дискретизації.

Нескінченна множина точок з координатами  $(t_1, t_2)$  області, у якій визначена безперервна функція яскравості, замінюється кінцевою множиною з координатами  $(i_1, i_2)$ . Звичайно  $\Delta t_1 = \Delta t_2$  і цей параметр  $\Delta t$  визначає відрізнення зображення. У техніці дискретизація визначається кількістю точок на дюйм (DPI) або пікселів на дюйм (PPI) і дорівнює цілому від ділення дюйма на  $\Delta t$ .

Основне питання при заміні безперервного зображення дискретним складається у визначенні умов, при яких така заміна мінімізує втрату інформації, що міститься в безперервному зображенні. Втрати відсутні, якщо, маючи у своєму розпорядженні дискретний сигнал, можна повністю відновити вихідний безперервний сигнал. З математичної точки зору

питання полягає у відновленні безперервного сигналу у двомірних проміжках між вузлами, у яких його значення відомі, тобто в здійсненні двомірної інтерполяції.

### 1.3 Квантування безперервного зображення

При цифровій обробці зображень безперервний діапазон значень функції яскравості поділяється на три піддіапазони і всі значення яскравості, які потрапили в один піддіапазон, округляються до єдиного значення, наприклад, середини цього діапазону. Така процедура називається **квантуванням за яскравістю**, і вона перетворить безперервну множину значень функції  $x$  у дискретну множину значень  $x_{кв}$ . Інакше кажучи, функція приймає кінцеву множину значень  $\{r_1, \dots, r_L\}$ . Ці значення називаються рівнями квантування. У загальному випадку перетворення виражається східчастою функцією (рис. 1.3).

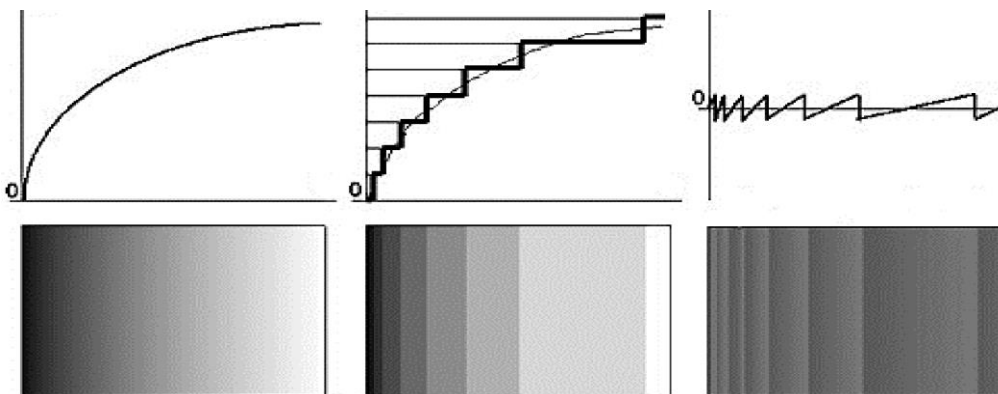


Рисунок 1.3 – Безперервний сигнал (ліворуч); функція, що описує його рівномірне квантування (у центрі); функція похибки квантування (праворуч)

Якщо значення яскравості  $x$  попадає в діапазон  $d_j < x \leq d_{j+1}$ , то воно замінюється на число, яке дорівнює рівню квантування  $r_j$ , де  $d_j, j = \overline{1, L + 1}$ , – пороги квантування. При цьому динамічний діапазон значень яскравості всього зображення обмежений і дорівнює  $[d_1, d_{+1}]$ . Для простоти кодування цифрового зображення замість значення  $r_j$  використовується цілочисельний номер діапазону  $j$ , починаючи з нуля. Таким чином, значення яскравості, використовувані в описі кольору, наприклад, у моделі RGB, є абстрактними безрозмірними величинами.

Не слід плутати процедури квантування й дискретизації та відповідно крок квантування із кроком дискретизації. При дискретизації виконується просторова розбивка області зображення, при квантуванні розбивається множина значень яскравості.

Квантування можна виконати різними способами. Простіший з них – алгоритм рівномірного квантування. Перевагою цього алгоритму є простота й висока швидкість. Недолік – малоконтрастні зображення будуть мати малу кількість відтінків, у місцях плавних переходів виникають помилкові контури.

Існують крім алгоритму рівномірного квантування й інші: квантування методом медіанного перетину (результатом його роботи є нерівномірне квантування, воно краще попереднього передає відтінки, при цьому швидкість роботи даного алгоритму висока), квантування зображень методами кластеризації (недоліком даного методу є те, що він здатний ефективно формувати лише опуклі кластери, перевагою – висока швидкість роботи; стосовно до квантування зображень даний метод показує дуже гарні результати).

#### 1.4 Кодування і типи цифрових зображень

У цифровій обробці зображень прийнято вважати, що зображення представляється матрицею цілих чисел розміром  $N \times M$ , де значення кожного елемента відповідає певному рівню квантування його енергетичної характеристики, або яскравості. Це так звана піксельна система координат.

У цьому випадку поняття піксель (англ. pixel – скорочено від picture cell – елемент зображення) має значення найменшого логічного елемента двомірного цифрового зображення.

Таким чином, *цифрове зображення* можна представити у вигляді *матриці*, елементи якої – пікселі – містять цілочисельні значення з деякої палітри. Нагадаємо, що ці значення безрозмірні, оскільки мають абстрактний характер.

За способом формування зображення діляться на *векторні й растрові*. Векторним називається зображення, описане у вигляді набору графічних примітивів, воно рисується лініями на графічних пристроях виводу. Растрове зображення являє собою двомірний масив, елементи якого містять інформацію про кольори. Воно орієнтовано на растрові пристрої відображення. У цифровій обробці використовуються растрові зображення,

тому векторні не розглядаємо.

Растрові зображення можна поділити на чотири типи: *бінарні, напівтонові, палітрові, повнокольорові*. Їхня основна характеристика – *глибина кольорів*. Цей термін означає кількість біт, використовуваних для опису кольорів одного пікселя, і в літературі він позначається як bpr (від англ. bits per pixel).

Вибір типу зображення залежить від розв'язуваної задачі. Основні типи цифрових зображень та їхніх характеристик представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні типи цифрових зображень

Тип зображення	Основний діапазон значень яскравості	Глибина кольорів, біт	Кількість відтінків
Бінарне	[0, 1]	1	2
Напівтонове	[0, 255]	8	4-256
Палітрове (індексоване)	[0, 255]	8	2-256
Повнокольорове	[0, 255] <sup>3</sup>	24	16 777 216

Елементи бінарного (дворівневого) зображення описуються одним бітом, що приймає значення 0 (чорний) і 1 (білий). Ці значення виходять у результаті обробки (бінарізації) напівтонових або кольорових зображень. Бінарні зображення зручні при передачі зображень документів у факсимільному зв'язку.

Напівтонове зображення складається з пікселів, які можуть приймати значення від 0 до  $N$ , де  $N=2^k$ . Це один з найпоширеніших типів зображень. У більшості випадків використовується значення  $k=8$  біт (тобто один байт) на піксель.

Повнокольорові зображення містять інформацію про яскравість кольорів (звичайно R, G, B), тобто його можна розглядати як три напівтонових зображення.

У палітрових (індексованих) зображеннях значення пікселя, тобто індекс, фактично є посиланням на осередок палітри, що являє собою таблицю значень RGB для цього індексу. Для опису таких зображень необхідно зберігати палітру (таблицю 256 кольорів) і, власно, зображення у вигляді матриці індексів (один байт на піксель). При використанні нерівномірних алгоритмів квантування кольорів зорова система людини практично не розрізняє зображення, представлені в повнокольоровому та індексованому варіантах.

## 1.5 Елементарний сенсор

Цифрові зображення можуть бути отримані за допомогою реєстрації не тільки звичних для ока картин у видимому діапазоні електромагнітного спектра, але й за допомогою реєстрації невидимих сигналів. Розглянемо основні типи пристроїв реєстрації та способи перетворення сигналів у цифрові зображення.

Принцип створення зображення однаковий й у цифровій камері, і в плівковій: обидві забезпечують фіксацію об'єкта зйомки, використовуючи енергію світла, який впливає на світлочутливий матеріал. Елементарна частка електромагнітного випромінювання називається фотоном. Розглянемо, як фотон стає електроном.

Пристрої реєстрації зображень в оптичному діапазоні спектра складаються з безлічі світлочутливих елементів, названих пікселями. Піксель складається з р-підкладки, покритої прозорим діелектриком, на який нанесений електрод, який пропускає світло. Світло формує потенційну яму (рис. 1.4).

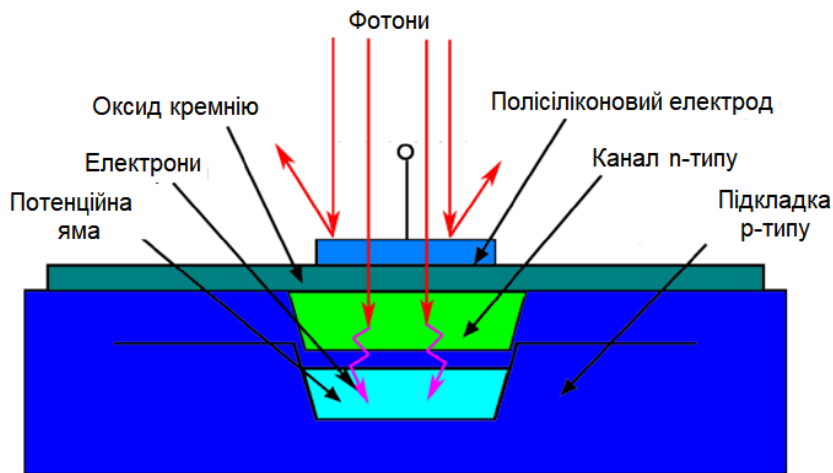


Рисунок 1.4 – Перетин пікселю ПЗЗ-матриці

Для фотона, який потрапив на піксель, можливі три варіанти розвитку подій: він зрикошетить від поверхні, буде поглинений товщею напівпровідника, проб'є наскрізь робочу зону напівпровідника. Розроблювачі прагнуть створювати сенсори, у яких втрати від рикошету й пробивання були б мінімальні.

У приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) перетворення фотона в електрон відбувається в результаті поглинання світлового кванта

кристалічною решіткою напівпровідника з виділенням електронів. Це може бути або пари «електрон+дірка», або одиничний електрон – останнє відбувається при використанні домішок у напівпровіднику. Носії, які утворилися, заряду до моменту зчитування необхідно зберегти. Для цього кремнієва підкладка р-типу оснащується каналами з напівпровідника n-типу, над якими з полікристалічного кремнію виготовляються прозорі для фотонів електроди. Після подачі на такий електрод електричного потенціалу в збідненій зоні під каналом n-типу створюється потенційна яма, призначення якої – зберігати заряд, що виникає в результаті внутрішнього фотоефекта. Чим більше фотонів упаде на світлочутливий елемент (піксель) і перетвориться в електрони, тим вище буде заряд, накопичений ямою. Даний заряд одержав назву фотострум, його значення досить мало й після зчитування вимагає обов'язкового посилення.

Не вся поверхня пікселю є світлочутливою, тому над ним часто встановлюється мікролінза для збільшення кількості накопичувальних фотонів. Розмір одного пікселя дорівнює 3...8 мкм.

Зчитування фотострумів світлочутливих елементів здійснюється так називаними послідовними регістрами зсуву, які перетворюють рядок зарядів на вході в серію імпульсів на виході. Дана серія являє собою аналоговий сигнал.

У техніці використовуються пристрої різного типу, у яких реалізовані два способи збору фотострумів з індивідуальних сенсорів:

ПЗЗ – прилади із зарядовим зв'язком;

КМОН – прилади на базі симетричних комплементарних металооксидних напівпровідників.

Перевагами ПЗЗ-приладів є:

- низький рівень шумів;
- високий коефіцієнт заповнення пікселів (до 100 %);
- висока ефективність (відношення числа зареєстрованих фотонів до числа, що потрапили на світлочутливу область сенсора) – 95%, а людське око має квантову ефективність порядку 1%;
- високий динамічний діапазон (відношення струму насичення до середнього квадратичного шумового струму, дБ);
- гарна чутливість в інфрачервоному діапазоні спектра.

До недоліків ПЗЗ-приладів ставляться:

- складна система зчитування сигналу;
- високий рівень енергоспоживання (до 2...5 Вт);

– дорожче КМОН у виробництві.

Переваги КМОН-приладів:

- висока швидкодія (реєстрація до 500 кадрів у секунду);
- низьке енергоспоживання (в 100 разів у порівнянні із ПЗЗ);
- дешевше й простіше ПЗЗ у виробництві;
- перспективність технології (на одному кристалі можна реалізувати всі необхідні додаткові схеми: аналого-цифрові перетворювачі, процесор, пам'ять, тобто фактично закінчену цифрову камеру на одному кристалі).

Недоліки КМОН-приладів:

- низький коефіцієнт заповнення пікселів, що знижує чутливість (ефективна поверхня пікселя до 75%, інше займають транзистори);
- високий рівень шуму (навіть при відсутності освітлення через фотодіод тече значний струм), боротьба з яким ускладнює технологію;
- невисокий динамічний діапазон.

У ПЗЗ-сенсорах сигнал зчитується послідовно з кожного осередку, рядок за рядком. Тому зробити наступний знімок можна лише тоді, коли попередній уже повністю сформований. КМОН улаштовані інакше: сигнал з кожного осередку зчитується індивідуально. Для кожного осередку задані координати в матриці й можна одержати індивідуальний доступ до окремого осередку.

Пікселі можна поєднувати в рядки (лінійки) або матриці. Кожен елемент уловлює різну кількість фотонів, формує аналоговий сигнал, який можна перетворити в масив, або матрицю цифрових значень. У такий спосіб формують напівтонові цифрові зображення.

Для одержання кольорових зображень використовують сенсори зі світлофільтрами. Найпоширенішим варіантом є використання мозаїки колірних фільтрів (мозаїки Байера), де світлочутливий елемент накритий фільтром, який пропускає фотони, що відповідають діапазонам спектра червоного, зеленого й синього кольорів. Найбільш відомим (але не єдиним варіантом) є мозаїка Байера (рис. 1.5). Із чотирьох сусідніх сенсорів два реєструють зелені кольори, інші два – червоні й сині (блоки RGGB).

У результаті матриця, що описує зображення, складається з мозаїки пікселів трьох основних кольорів різної інтенсивності. Зелених кольорів реєструється більше, тому що це відповідає особливостям людського зору. Для відновлення відсутніх кольорів у кожному пікселі застосовуються

спеціальні алгоритми інтерполяції мозаїчного зображення.

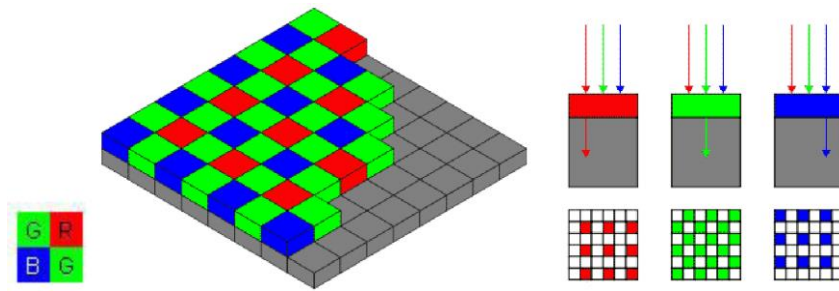


Рисунок 1.5 – Мозаїка фільтрів Байера

У КМОН-матриці світлофільтри не використовуються в принципі. Поділ світлового потоку на складові кольори відбувається за рахунок того, що світло з різною довжиною хвилі проникає в шар кремнію на різну глибину. Наприклад, хвилі синіх кольорів мають найменшу проникаючу здатність, а червоного – найбільшу. Фотоелемент кожного пікселя складається із трьох шарів (рис. 1.6).

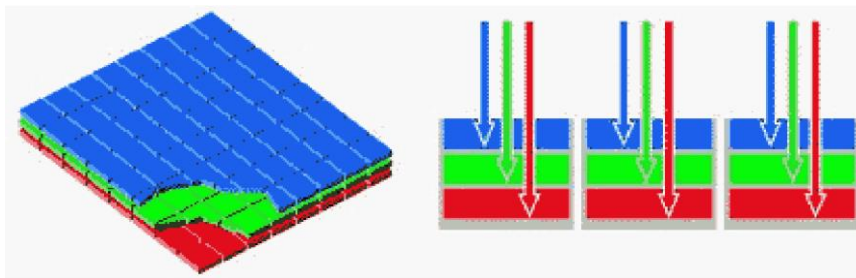


Рисунок 1.6 – Багатошарові сенсори

Товщина цих шарів розрахована так, що вони пропускають промені з довжинами хвиль певного діапазону. При цьому до нижнього шару доходять фотони з довжиною хвилі, що відповідає червоним кольорам, до середнього – зеленим, до верхнього – синім. Електрони, які утворюються при цьому, і «дірки» накопичуються в трьох потенційних ямах – по одній на кожен шар. Таким чином, для кожного з пікселів матриці є дані по кожному з кольорних діапазонів. Це дозволяє відмовитися від мозаїчних схем і пов'язаних з ними втрат даних про кольори. Однак при розподілі фотонів по шарах частина з них неминуче поглинається при переході з одного шару в інший. У результаті чутливість матриці послаблюється.



## 1.6 Одержання зображень за допомогою сканера

Сканер – це пристрій, який за допомогою аналого-цифрового перетворювача створює цифрове зображення деякого документа. Для цього використовуються штучне освітлення й відбиття у видимому діапазоні електромагнітного спектра. Процес одержання цього зображення називається скануванням. Сканери бувають ручні, рулонні, планшетні й проєкційні. Різновидом проєкційних сканерів виступають слайди-сканери, призначені для сканування фотоплівки. У високоякісній поліграфії використовуються барабанні сканери, як світлочутливий елемент у них застосовується фотоелектронний помножувач.

Головною особливістю сканера є формування зображення ПЗЗ-сенсорами, вбудованими в лінійку. В основному сканери відрізняються способом пересування ПЗЗ-лінійки або сканованого документа один відносно одного. Найпоширенішими є планшетні сканери.

Принцип роботи однопрохідного планшетного сканера (рис. 1.7) полягає в тому, що уздовж сканованого документа, розташованого на прозорому нерухомому склі, рухається сканувальна каретка із джерелом світла. Відбите світло через оптичну систему сканера (що складається з об'єктива й дзеркал або призми) попадає на ПЗЗ-сенсори, розташовані лінійно.

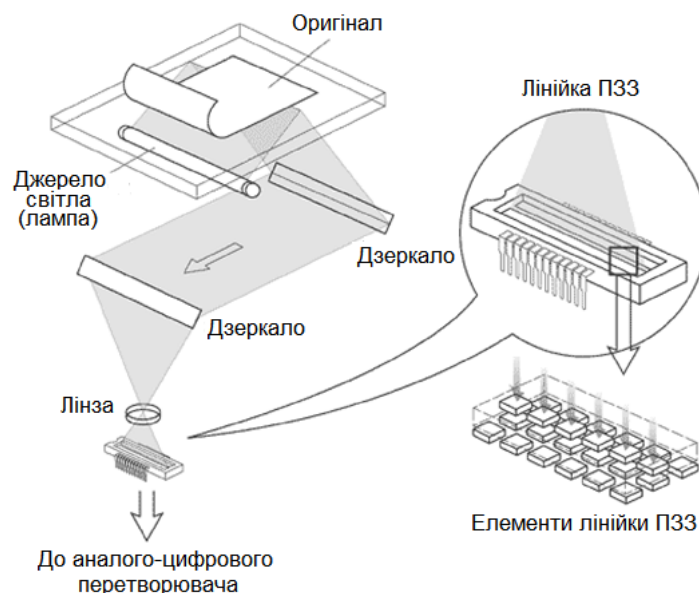


Рисунок 1.7 – Схема побудови планшетного сканера

При реєстрації використовується ПЗЗ-лінійка, яка створює один рядок зображення. Для одержання зображення у вигляді матриці каретка зміщається на фіксовану відстань і реєструє наступний фрагмент документа у вигляді рядка пікселів.

Розрізняють оптичне і механічне відрізнення сканера. Наприклад, якщо на ньому зазначене відрізнення  $300 \times 1200$  dpi то його оптичне відрізнення дорівнює 300 dpi, а механічне (крок зсуву каретки) – 1200 dpi.

## **1.7 Одержання зображень за допомогою цифрових фотоапаратів**

Цифровий фотоапарат за конструкцією схожий зі звичайним фотоапаратом, але замість фотоплівки, на якій фіксується зображення, у нього є спеціальні датчики (фотоматриці): матричні ПЗЗ або КМОН. Ці датчики перетворюють проєктоване на них об'єктивом зображення в цифрову форму.

Дві якісні характеристики, які безпосередньо впливають на результат зйомки, – це динамічний діапазон сенсора й розрядність подання кольорів. Перша із цих характеристик відбиває здатність матриці передавати світлові відтінки, друга відноситься не тільки до сенсора, але й до аналого-цифрового перетворювача, який переводить електричні сигнали з виходів матриці в цифровий код.

Динамічний діапазон визначає кількість відтінків сірого (рівнів яскравості), які здатний розрізнити сенсор цифрової камери між абсолютно чорним й абсолютно білим кольорами. Чим ширше динамічний діапазон, тим вище подібність реєстрованого зображення з оригіналом.

Слід зазначити, що дотепер самий широкий динамічний діапазон є у негативної фотоплівки. Тому, незважаючи на досягнення цифрових технологій, при демонстрації фільмів у кінотеатрах все ще використовуються плівкові проєктори.

Існує кілька варіантів конструкції цифрових фотоапаратів: камери із заднім розгорненням, трьохкадрові камери й однокадрові камери з однієї або трьома фотоматрицями. У поточний час в основному застосовуються однокадрові фотокамери. Розглянемо її докладніше.

Технологія, реалізована в однокадрових камерах з однією матрицею, забезпечує високу швидкість цифрування зображення, але характеризується більш низьким відрізненням і гіршою передачею кольору, чим «багатознімальна» технологія. Такі камери називаються також камерами з

обчисленням кольорів.

В однокадровій камері з однією матрицею (рис. 1.8) застосовується плоска матриця, але дані про кольори реєструються не через окремі фільтри, а через нанесений на поверхню матриці ПЗЗ плівковий фільтр, що складається із червоних, зелених і синіх елементів. Дані про кожен елемент зображення реєструються тільки в одному із трьох кольорів, наприклад, у червоному. Для додавання до нього належних часток зеленого й синього програма обробки інтерполює дані про кольори сусідніх точок. Оскільки потрібно всього одна експозиція, однокадрові камери забезпечують зйомку рухомих об'єктів.

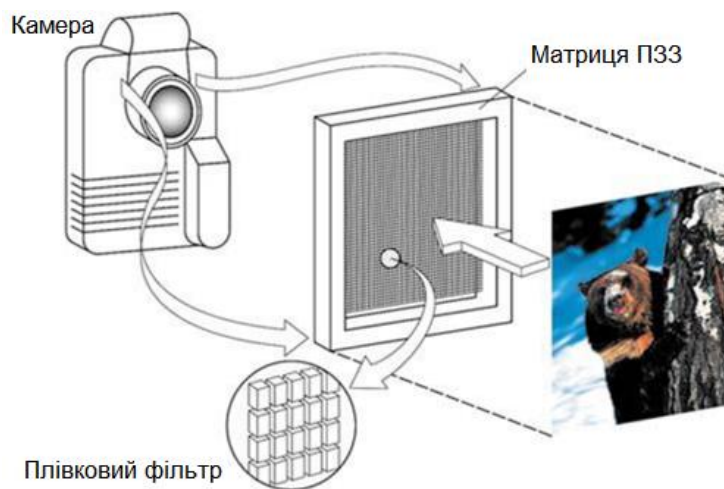


Рисунок 1.8 – Принцип дії однокадрової камери з однією матрицею

Принцип дії однокадрової камери із трьома матрицями (камери для однокадрової кольорової зйомки) полягає в оптичному поділі нахожого світла призмою на червону, зелену й синю складові, причому кожна з них направляється на свою матрицю. В одних моделях кожна матриця реєструє свій колір, в інших поєднуються плоска матриця, на поверхню якої нанесені червоні й синій плівкові фільтри, і дві додаткові матриці із зеленими фільтрами. У другому випадку інтерполяція проводиться тільки по двох кольорах, що приводить до підвищення якості зафіксованого зображення. Недолік цього способу реєстрації – відносно невелика розрізняльна здатність.

Для одержання якісної фотографії важливіше не кількість мегапікселів фотоапарата, а інші параметри: розміри активної області матриці, її чутливість, динамічний діапазон, точність передачі кольору.

Найбільше значення мають перші три параметри, причому в ПЗЗ-матриці всі вони нерозривно пов'язані один з одним.

Відзначимо, що поки цифрові фотоапарати не перевершують плівкові. Вони не можуть знімати в умовах низької освітленості без застосування джерел штучного світла, а професійна плівка світлочутливістю в 3200 одиниць ISO витягне знімок навіть при світлі звичайної свічі.

## **1.8 Одержання ультразвукових зображень**

Ультразвукове дослідження (УЗД) – це неінвазійне дослідження живого організму за допомогою ультразвукових хвиль. Фізичною основою УЗД є п'єзоелектричний ефект.

При деформації монокристалів деяких хімічних сполук під впливом ультразвукових хвиль на поверхні цих кристалів виникають протилежні за знаком електричні заряди, тобто прямий п'єзоелектричний ефект. При подачі на них змінного електричного заряду в кристалах виникають механічні коливання з випромінюванням ультразвукових хвиль. Той самий п'єзоелемент може бути поперемінно приймачем і джерелом ультразвукових хвиль.

У системах медичної ультразвукової діагностики звичайно використовують частоти від 2 до 10 МГц. Роздільна здатність сучасних ультразвукових апаратів досягає 1...3 мм. Будь-яке середовище, у тому числі й тканини організму, перешкоджає поширенню ультразвуку, тобто має різний акустичний опір, величина якого залежить від їхньої щільності й швидкості поширення звукових хвиль. Досягши границі двох середовищ із різним акустичним опором, пучок ультразвукових хвиль перетерплює зміни: одна його частина продовжує поширюватися в новому середовищі, частково поглинаючись нею, інша – відбивається. Коефіцієнт відбиття залежить від різниці величин акустичного опору суміжних тканин: чим більше це розходження, тим більше відбиття й амплітуда зареєстрованого сигналу, тим світліше і яскравіше він буде виглядати на екрані апарата.

Повним відбивачем є границя між тканинами й повітрям. Тому що на границі переходу ультразвуку з повітря на шкіру відбувається відбиття 99,99% коливань, то при ультразвуковому скануванні пацієнта необхідне змазування поверхні шкіри водним желе, яке виконує роль перехідного середовища. Відбиття залежить від кута падіння променя (найбільше при перпендикулярному напрямку) і частоти ультразвукових коливань (при

більш високій частоті більша частина відбивається). Для дослідження органів черевної порожнини, порожнини малого таза використовується частота 2,5...3,5 МГц, для щитовидної залози – 7,5 МГц.

Генератор працює в імпульсному режимі, посилюючи близько 1000 імпульсів у секунду. У проміжках між генеруванням ультразвукових хвиль пьезодатчик фіксує відбиті сигнали. Відбиті сигнали надходять у підсилювач і спеціальні системи реконструкції, після чого з'являються на екрані монітора у вигляді відбиття зрізу тіла, пофарбованого в різні відтінки чорно-білих кольорів, тобто напівтонового 2D-зображення (рис. 1.9). Оптимальним є наявність не менш 64 відтінків сірого.

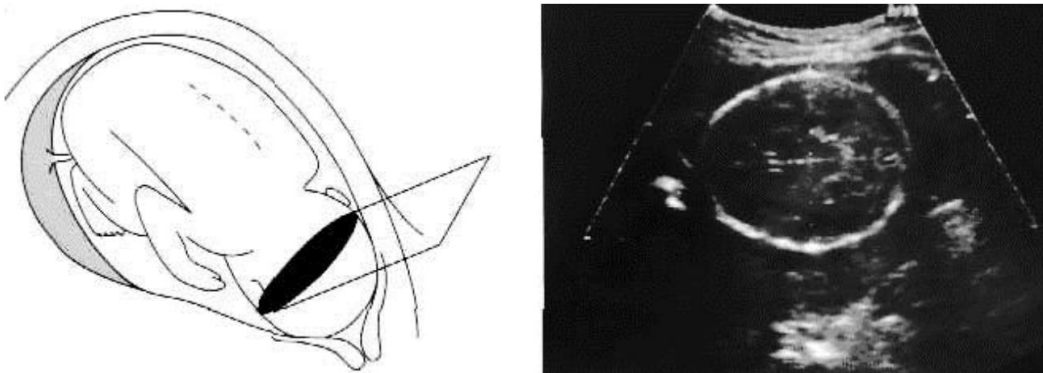


Рисунок 1.9 – Вимір розміру голівки плода: а) схема; б) зображення

У поточний час за допомогою УЗД можна одержати 3D-зображення (статичні тривимірні зображення) у результаті об'ємного сканування. УЗД 4D – це рухомі зображення у форматі 3D, які можна спостерігати в режимі реального часу. Як четвертий вимір виступає час.

### **1.9 Одержання рентгенівських зображень**

Рентгенівські промені охоплюють діапазон електромагнітного спектра з довжиною хвиль від 1 до 0,01 нм. Око людини їх не бачить, але вони здатні проникати через тверді предмети.

Ідея одержання рентгенівського зображення заснована на різному ослабленні випромінювання при проходженні через тканини з різною щільністю й наступною реєстрацією. У результаті виходить зображення всіх тканин, спроектоване на площину (рис. 1.10).

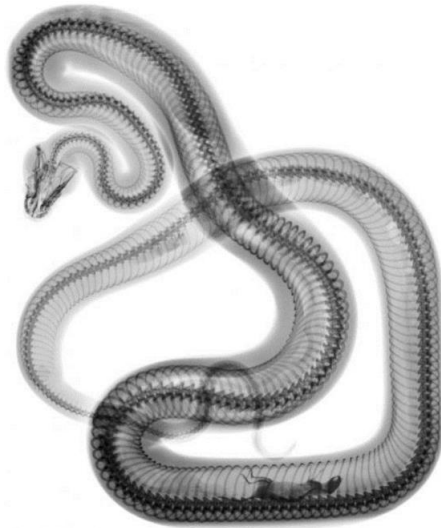


Рисунок 1.10 – Приклад рентгенівського цифрового знімка змії, що проковтнула мишу

У сучасних цифрових апаратах реєстрація вихідного випромінювання проводиться на спеціальну електронну матрицю. У ній накопичується заряд, створений при поглинанні рентгенівських променів і його порядковій передачі на підсилювачі заряду під час сканування. Перетворення рентгенівського випромінювання в заряд в аморфному кремнії з метою електронного зчитування може бути реалізовано трьома методами: прямим, методом фотопровідності й сцинтиляційним. Кожен метод має свої переваги й недоліки. У всіх методах заряд перед зчитуванням накопичується протягом періоду кадру.

У прямому методі рентгенівські промені попадають на діод із кремнію, в якому створюються пари «дірка-електрон». Пристрій, який використовує прямий метод перетворення, виготовляється із кристалічного кремнію, але на практиці застосовуються тільки решітки з однієї або двох ліній, при цьому навіть такі решітки відрізняються дорожнечою.

У методі фотопровідності використовуються матеріали з більш високою, чим у кремнію, здатністю поглинати рентгенівське випромінювання. Вони наносяться на безліч провідних пластин для збору заряду, що поставляють разом з накопичувальним конденсатором, а також створюють пари «дірка-електрон» при поглинанні рентгенівських променів. Однак генерований заряд зберігається за межами шару щоб уникнути перехресних перекручувань. Прикладене поле відокремлює заряд і направляє його на розташовану безпосередньо внизу пластину для збору заряду з метою збереження різкості зображення. У цей час селен є єдиним

використовуваним у виробництві фотопровідним матеріалом. Він має відносно низьку здатність поглинати рентгенівське випромінювання й вимагає приблизно 50 електрон-вольт для створення пари «дірка-електрон». Це обмежує як мінімально необхідну дозу, так і величину генерованого сигналу.

У сцинтиляційному методі використовується сполука, яка поглинає рентгенівські промені й перетворює їхню енергію у видиме світло. Ефективний сцинтилятор робить багато фотонів світла для кожного вступного рентгенівського фотона. Сцинтилятори можуть являти собою гранули (наприклад, люмінофори) або кристали (наприклад, йодид цезію).

Практично всі сучасні системи рентгенівської візуалізації використовують моделі з детекторами ПЗЗ. Якість отриманого рентгенівського зображення визначається трьома основними параметрами: напругою, яка подається на рентгенівську трубку, силою струму й часом роботи трубки. Залежно від досліджуваних анатомічних утворень, маси й розмірів об'єкта дослідження ці параметри можуть істотно змінюватися.

Звичайно роздільна здатність досягає 0,5 мм (одна пара ліній, що розрізняють, на міліметр відповідає двом пікселям на міліметр), але можна одержати й більш високе відрізнення – до 26 пар ліній на міліметр, що відповідає 0,02 мм. Кращий на сьогоднішній день ПЗЗ-детектор рентгенівського випромінювання має до 16 мегапікселів і дозволяє одержувати цифрове зображення області 43×43 см.

Недоліки рентгенографії: 1) інформативність класичної рентгенографії значно нижче таких методів візуалізації, як комп'ютерна томографія й магнітно-резонансна томографія. Звичайні рентгенівські зображення відбивають проєкційне нашарування складних анатомічних структур, тобто їх сумарну рентгенівську тінь на відміну від пошарових серій зображень, одержуваних томографічними методами; 2) без застосування речовин, що контрастують, рентгенографія практично неінформативна для аналізу змін у м'яких тканинах.

## **1.10 Одержання томографічних зображень**

Томографія – це метод одержання пошарового зображення внутрішньої структури деякого об'єкта. Томографію застосовують при виробництві деталей відповідального застосування (для авіації, космосу, автомобілебудування), в електроніці й мікроелектроніці, у

матеріалознавстві, але в основному в медицині. Томографічне зображення одержують за допомогою пристроїв двох типів: на базі рентгенівського випромінювання і ядерного магнітного резонансу.

#### *Магнітно-резонансна томографія*

Магнітно-резонансна томографія (МРТ) – це томографічний метод дослідження внутрішніх органів і тканин з використанням фізичного явища ядерного магнітного резонансу (ЯМР). Він заснований на вимірі електромагнітного відгуку ядер атомів водню на збудження їх певною комбінацією електромагнітних хвиль у постійному магнітному полі високої напруженості (рис. 1.11).

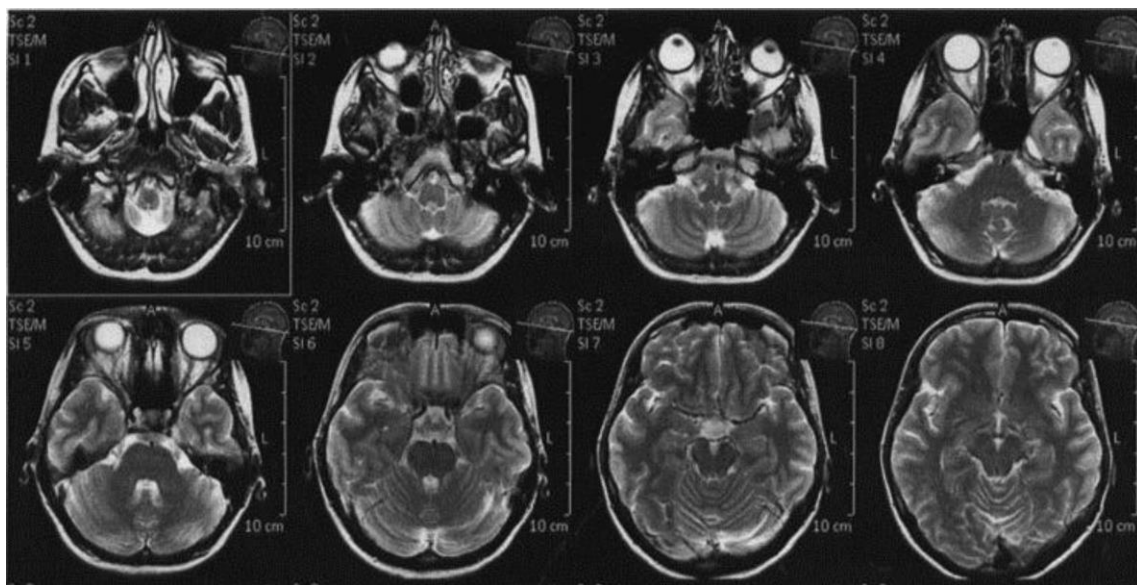


Рисунок 1.11 – МРТ-зображення голови людини

МРТ дозволяє візуалізувати із високою якістю головний, спинний мозок й інші внутрішні органи. Ефект ЯМР виникає при взаємодії між протонами біологічних тканин, постійним або змінним магнітним полем й енергією радіочастотних імпульсів, які випускають котушкою, поміщеної біля досліджуваної частини тіла. Під дією радіочастотних імпульсів протони атомів водню тимчасово переходять на більше високий енергетичний рівень. Повернення протонів до рівноважного стану супроводжується виділенням енергії у вигляді імпульсів певної (резонансної) частоти. Цю енергію можна виміряти за допомогою прийомної котушки. Для формування зображення отримані сигнали обробляються за допомогою перетворення Фур'є.

МРТ дозволяє одержувати зображення в різних площинах, не



змінюючи положення хворого. Зображення в кожній площині формується за 5...10 хв. На відміну від комп'ютерної томографії, зміна положення хворого під час дослідження спотворює всі зображення.

### *Комп'ютерна томографія*

Ідея комп'ютерної томографії (КТ) полягає в комп'ютерній реконструкції зображення поперечного зрізу тіла на підставі аналізу поглинання рентгенівського випромінювання.

Трубка випускає тонкий віялоподібний пучок рентгенівських променів перпендикулярно довгої осі тіла. Цей пучок може бути досить широким й охоплювати весь діаметр тіла. Товщину пучка можна регулювати від 1 до 10 мм, при цьому змінюється товщина досліджуваного зрізу тканини. Пучок рентгенівських променів, який пропускається через пацієнта, фіксується не плівкою, а системою спеціальних детекторів. Рентгенівські фотони генерують у детекторах електричні сигнали. Чим сильніше інтенсивність первинного променя, який досяг детектора, тим сильніше електричний сигнал.

Фіксуючи інтенсивність пропущеного випромінювання, можна розрахувати ослаблення первинного променя. КТ- детектори приблизно в 100 разів чутливіші за рентгенівську плівку при визначенні розходжень в інтенсивності випромінювання. Випромінювання реєструються за шкалою Хаунсфилда (HU) від -1024 до +3071.

Для одержання комп'ютерної томограми (зрізу) на обраному рівні необхідно виконати наступні операції: 1) формування рентгенівського променя необхідної ширини (колімація); 2) сканування пучком рентгенівського випромінювання, здійснюваного рухом (обертальним і поступальним) навколо нерухомого об'єкта пристрою «випромінювачі-детектори»; 3) вимір випромінювання й визначення його ослаблення з наступним перетворенням результатів у цифрову форму; 4) комп'ютерний синтез томограми по сукупності даних вимірів, які ставляться до обраного шару; 5) побудова зображення досліджуваного шару й відображення його на екрані монітора.

Повітря або газ (поза залежністю, де вони перебувають) мають значення біля -1000 HU і виглядають чорними, кістки (+400 HU і вище) – білими. Інші органи, тканини й ділянки патологічних змін відображаються відтінками сірого між цими двома крайностями (від 0 до +300). Оскільки відобразити й розрізнити 210 відтінків не можна, при візуалізації даних КТ вибирається діапазон певних значень (вікно) для аналізу потрібних тканин

(рис. 1.12).

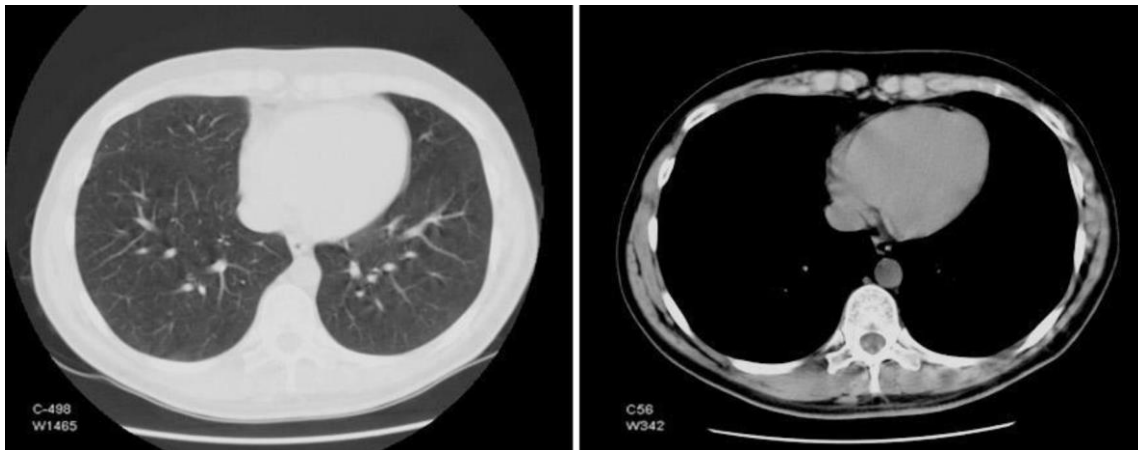


Рисунок 1.12 – Томограма грудної клітки в легеневому (ліворуч) і м'якотканому (праворуч) вікнах шкали Хаунсфілда

Якість зображення зростає при збільшенні числа детекторів і кількості реєстрованих проєкцій за один оберт трубки й при збільшенні первинної матриці. Однак збільшення кількості реєстрованих проєкцій веде до підвищення променевого навантаження, застосування більшої первинної матриці – до збільшення часу обробки зрізу або необхідності встановлювати додаткові спеціальні відеопроектори.

Сучасний томограф дозволяє одержувати зрізи товщиною 1...2, 5 й 10 мм зі швидкістю сканування шару 1...3 с, повне дослідження головного мозку займає 2...3 хв.

### **1.11 Одержання зображень при дистанційному зондуванні Землі**

Під дистанційним зондуванням Землі (ДЗЗ) розуміють одержання інформації про стан поверхні Землі по вимірах на відстані без безпосереднього контакту датчиків з поверхнею. Датчики встановлюються на супутниках, літаках і безпілотних літальних апаратах. Діапазон вимірюваних електромагнітних хвиль – від часток мікрометра (видиме оптичне випромінювання) до метрів (радіохвилі). Методи ДЗЗ можуть бути пасивні, тобто з використанням природного відбитого або вторинного теплового випромінювання об'єктів на поверхні Землі, обумовленого сонячною радіацією, і активні – які використовують відбиття, ініційоване штучним джерелом, установленому на літальному апараті. Одержання

інформації для ДЗЗ ґрунтується на тім, що об'єкти різних типів (ґрунт, вода, рослинність, будинки, техніка й ін.) по-різному відбивають і поглинають випромінювання в різних діапазонах електромагнітного спектра.

У цей час для ДЗЗ використовуються різні системи для формування зображення досліджуваної місцевості. Їх можна розділити на декілька класів, які розрізняються за спектральним діапазоном використовуваного електромагнітного випромінювання, за типом приймача реєстрованого випромінювання й за методом зондування (активний або пасивний):

- фотографічні системи;
- сканувальні системи видимого й інфрачервоного діапазону (телевізійні, сканувальні радіометри та багатоспектральні сканери);
- телевізійні оптичні системи;
- радіолокаційні системи бічного огляду;
- сканувальні надвисокочастотні (НВЧ) радіометри.

Атмосфера поглинає частину променів електромагнітного спектра, але в ній є кілька вікон прозорості (рис. 1.13), які пропускають електромагнітні хвилі з мінімальними перекручуваннями. Найчастіше в методах ДЗЗ використовується вікно прозорості, яке відповідає оптичному діапазону, що поєднує видиму (380...720 нм), ближню інфрачервону (720...1300 нм) і середню інфрачервону (1300...3000 нм) області.

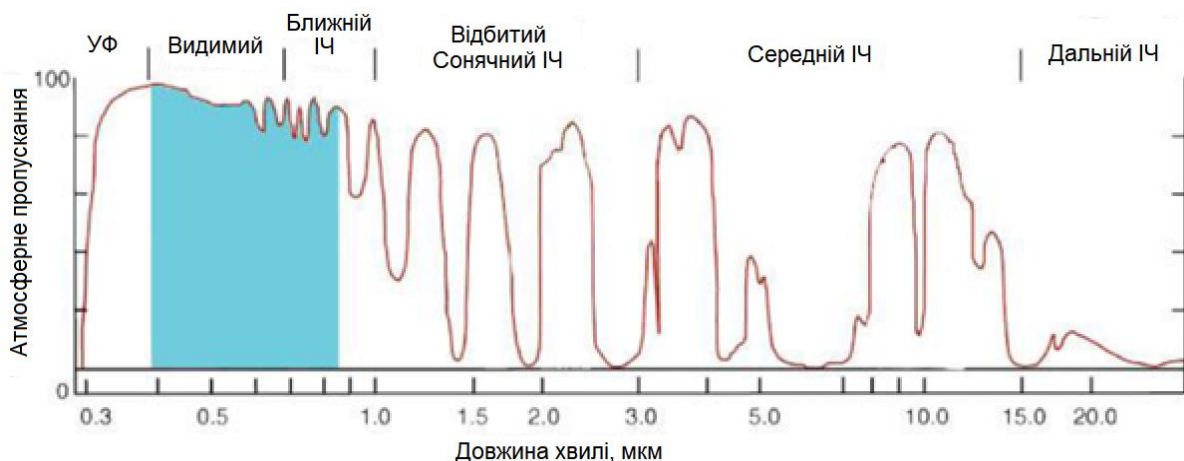


Рисунок 1.13 – Ступінь прозорості атмосфери для різних довжин хвиль спектра

Отримані знімки класифікуються за просторовим відрізненням (розміру ділянки місцевості, що відповідає одному пікселю):

- низьке (300...1000 м);

- середнє (50...200 м);
- відносно високе (20...40 м);
- високе (10...20 м);
- дуже високе (1...10 м);
- надвисоке (0,3...0,9 м).

Основні типи зображень, одержувані засобами ДЗЗ.

### *Мультиспектральні зображення*

Мультиспектральні камери – найпоширеніші види сенсорів, установлених на супутниках ДЗЗ. Відбиті хвилі проходять крізь світлофільтри, що виділяють певну ділянку електромагнітного спектра, потім через фокусувальні лінзи, дисперсний пристрій і попадають на ПЗЗ-лінійку, де реєструються у вигляді напівтонового зображення. Число фільтрів визначає кількість каналів мультиспектрального зображення (табл. 1.2). Як правило, всі зображення записуються в один файл у форматі GeoTIFF.

Як видно з табл. 1.2, у кожному каналі реєструється напівтонове зображення з великим динамічним діапазоном значень яскравості. Слід зазначити два факти: чим ширше спектральний діапазон відбиваного сигналу, тим вище відрізнєння (приклад: панхроматичний режим має відрізнєння в 2...4 рази вище спектральних); спектральні діапазони можуть не перетинатися й навпаки, все залежить від використовуваних типів фільтрів.

Таблиця 1.2 – Супутники зі знімальними системами високого відрізнєння

Супутник	Ран, мкм	В, мкм	G, мкм	R, мкм	NIR, мкм	Інші	Відрізн., м	Біт
WorldView-3	.45-.80	.4-5 фіолет. й .45-51	.51- 58 й .585-.625 жовтий	.63-.69 й .705-.745	.77-.895 й .86-1.04	Немає	.31; 1.24	11
WorldView-2	Те ж	Те ж	Те ж	Те ж	Те ж	Немає	.5; 2	11
GeoEye-2	.45-.90	.45-.52	.52-.60	.625-.695	.76-.90	Немає	.25; 1.65	11
Ikonos	Те ж	Те ж	.51-60	.63-.70	Те ж	Немає	1; 4	11
QuickBird	Те ж	Те ж	.52-.60	.63-.69	Те ж	Немає	.61; 2.44	11
OrbView-3	Те ж	Те ж	.52-.60	.625-.695	Те ж	Немає	1; 4	11
Spot-6 і 7	.45-.745	Те ж	.53-.59	.625-.695	.76-.89	Немає	2; 6	12
СІЧ-2 (Україна)	.50-.90	немає	.50-.60	.61-68	.80-.89	1.55-7 мкм	7.8; 39.5	8
БелКА і Канопус-В	.45-.85	.46-.52	.52-.60	.63- .69	.75-.86	Немає	2.1; 10.5	8

### *Гіперспектральні зображення*

Ключовим моментом при побудові гіперспектральних систем є спосіб формування тривимірної структури даних з двовимірного масиву (ПЗЗ-матриця) або одновимірного масиву (ПЗЗ-лінійки) фотоприймачів. Пристрій одержання таких зображень називається гіперспектрометром. Найпоширенішими на сьогоднішній день є гіперспектрометри, які в кожен момент часу реєструють вузьку смугу поверхні під собою (рис. 1.14).

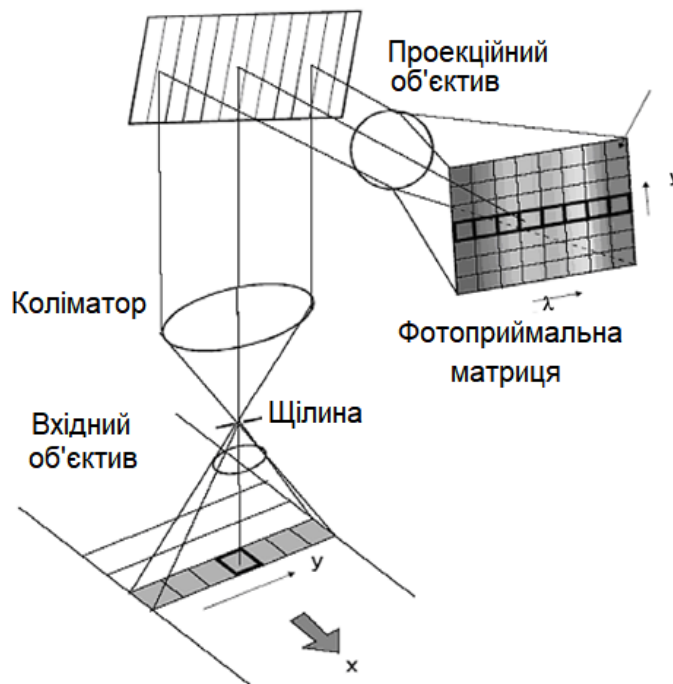


Рисунок 1.14 – Принципова схема гіперспектрометра

Формування зображення вузької ділянки поверхні поперек напрямку польоту виробляється за допомогою щілини на задній фокальній площині вхідного об'єктива.

Гіперкубом називають тривимірний масив даних, два виміри якого відповідають просторовим координатам ( $x$ ,  $y$ ), третє – спектральній координаті  $\lambda$  (рис. 1.15). Його одержують при зйомці кадру шляхом фіксації однієї з координат (або просторової, наприклад,  $x$ , або спектральної  $\lambda$ ). За один кадр фотоприймальна матриця формує двовимірний зріз гіперкуба з фіксованою третьою координатою.

Після колімуючого об'єктива, відбитий сигнал у паралельних променях попадає на призму. У призмі відбувається його розкладання на

хвилі різної довжини, а потім вони проектується на фотоприйомну матрицю. У такий спосіб на матриці формується зріз гіперкуба для фіксованої просторової координати  $x$ . Більшість спектрометрів реєструють 100...200 каналів шириною (спектральним відрізненням) по 0,4...2,5 нм кожний у діапазоні 400...2500 нм без проміжків і накладень.

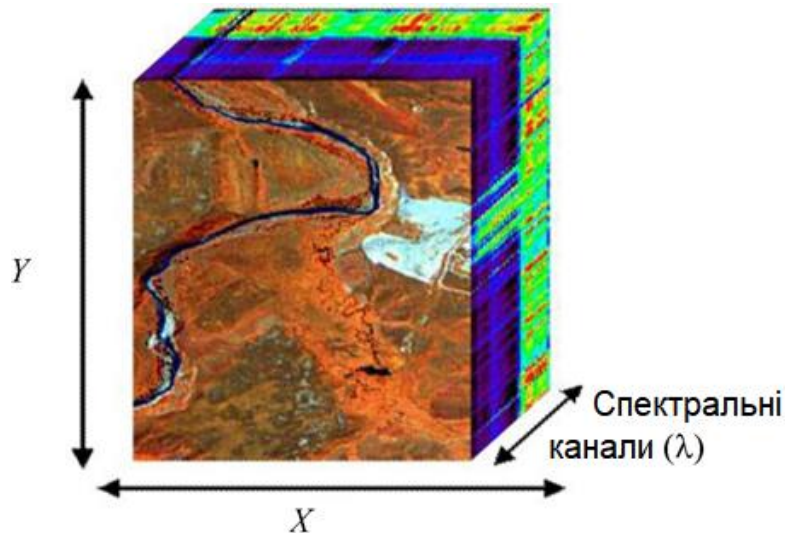


Рисунок 1.15 – Гіперспектрометр сканує простір уздовж осі  $X$  (або  $Y$ )

Мультиспектральні та гіперспектральні знімки можуть покривати однаковий спектральний діапазон, але відрізняються способами реєстрації зображень. Мультиспектральне є набором з напівтонових зображень однієї ділянки місцевості, зареєстрованих у декількох вузьких діапазонах спектра, виділених шляхом фільтрації. Гіперспектральне одержують шляхом розкладання за допомогою призми сонячного випромінювання, відбитого від ділянки Землі, що відповідає одному пікселю з координатами  $(x, y)$ , на лінійку сенсорів, кожний з яких реєструє сигнали у вузькому діапазоні спектра. Всі значення яскравості, зареєстровані лінійкою, привласнюються одному пікселю.

### ***Радіолокаційні зображення***

*Пасивне зондування.* Нагріті об'єкти випромінюють енергію й у радіодіапазоні, хоча радіотеплове випромінювання по інтенсивності значно уступає тепловому випромінюванню в інфрачервоному діапазоні. Радіотеплове випромінювання, як й інфратеплове, формується поверхневим випромінювальним шаром, товщина якого тим більше, чим довше хвиля випромінювання.

Інтенсивність радіотеплового випромінювання характеризується так

називаною радіояскравісною температурою – добутком абсолютної температури і коефіцієнта випромінювання. Величина коефіцієнта випромінювання в радіодіапазоні значно змінюється залежно від електричних властивостей (а виходить, від вологості й солоності), кристалічної структури та характеру поверхні об'єкта. Найбільше його значення має рослинність (0,9), потім ґрунти (0,8), водна поверхня (0,3) і, нарешті, металеві предмети. Таким чином, розходження в радіояскравісних температурах земних об'єктів визначається їхньою випромінювальною здатністю, а не фізичною температурою. Влітку найбільшу радіояскравісну температуру має рослинний покрив (300 К) і меншу – водні поверхні (100 К). Але самі «холодні» у радіодіапазоні – це металеві предмети.

*Активне зондування.* Радіолокаційна зйомка заснована на здатності об'єктів по-різному відбивати вузьконаправлені на них радіоімпульси сантиметрового діапазону (0,3...100 см).

Властивості матеріалів впливають на інтенсивність відбитого сигналу. Коефіцієнт діелектричної проникності характеризує здатність матеріалу поглинати електричну енергію й залежить від використовуваної частоти. Розходження значень коефіцієнтів для різних матеріалів обумовлює можливість їхнього виявлення за допомогою радарної зйомки (табл. 1.3). Реєструвати сигнали радарного діапазону та одержувати зображення можна в умовах хмарності й у темний час доби.

Таблиця 1.3 – Частоти і довжини хвиль, використовувані в радіолокації

Назва	Частота, МГц	Довжина хвилі, см
Ka-band	40,000...26,000	0,8...1...1,1
K-band	26,500...18,500	1,1...1...1,7
Ku-band	18,500...12,500	1,7...2...2,4
X-band	12,500...8,000	2,4...3...3,8
C-band	8,000...4,000	3,8...7...7,5
S-band	4,000...2,000	7,5...15...15,0
L-band	2,000...1,000	15,0...30...30,0
P-band	1,000...300	30,0...100,0

Активне зондування земної поверхні засновано на вимірі варіацій розсіяного випромінювання. Інформація про поверхні представлена відбитою електромагнітною хвилею. Радіолокатор випускає хвилю. Вона характеризується довжиною і частотою (яка дорівнює відношенню швидкості поширення в середовищі до довжини хвилі, у вакуумі швидкість

дорівнює швидкості світла).

На рис. 1.16, а чітко видні прояви поверхневих атмосферних і морських процесів, на рис. 1.16, б – відбиття від суден. Вертикально поляризована хвиля взаємодіє з вертикальними стеблами шару рослин, горизонтально поляризована проникає крізь шар. Комбінування різних видів поляризації може поліпшувати детальність класифікації, наприклад, дозволяє визначати різні класи рослинності.

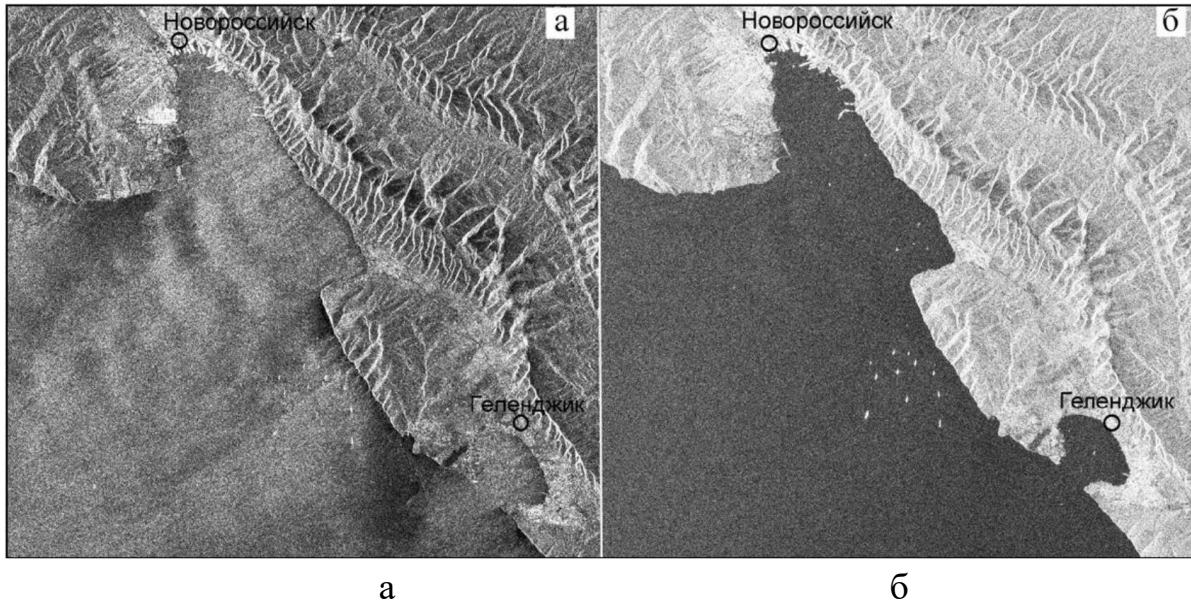


Рисунок 1.16 – Приклади зображень, отриманих методом синтезу апертури із супутника Envisat ASAR: поляризація типу VV (а), типу VG (б)

Відрізнення при радіолокації залежить від розміру антени і довжини хвилі зондувального сигналу. Радіолокатори, установлені на літаках при відстані до землі порядку 10 км і довжині хвилі 2 см, мають відрізнення близько 15 м. Якщо подібну апаратуру використати на супутнику, то відстань до Землі складе 500...1000 км і відрізнення зросте до 1000...2000 м.

Для підвищення розрізняльної здатності використовують метод синтезу апертури, тобто штучне збільшення розміру антени. У цьому методі виробляється когерентна (зі збереженням фази) обробка розсіяних сигналів протягом фіксованого проміжку часу, за який супутник пролітає деяку відстань. Ця відстань відіграє роль довжини синтезованої антени. Наприклад, при довжині хвилі 5 см і дальності до Землі 1000 км розрізняльна здатність складе 5 м. Подібні системи називають радіолокаторами із синтезованою апертурою (РСА).

На рис. 1.17 наведені для порівняння зображення однієї місцевості,



зареєстровані в різних спектральних діапазонах.

На лівому зображенні можна помітити спекл-шум, що представляє посилення яскравості світлих об'єктів у вигляді світлих вертикальних хрестів. Цей вид шуму з'являється тільки на радарних зображеннях у результаті випадкової інтерференції й накладення відбитих сигналів від різних об'єктів. Один з методів зменшення цього шуму – фільтрація, наприклад, медіанна.

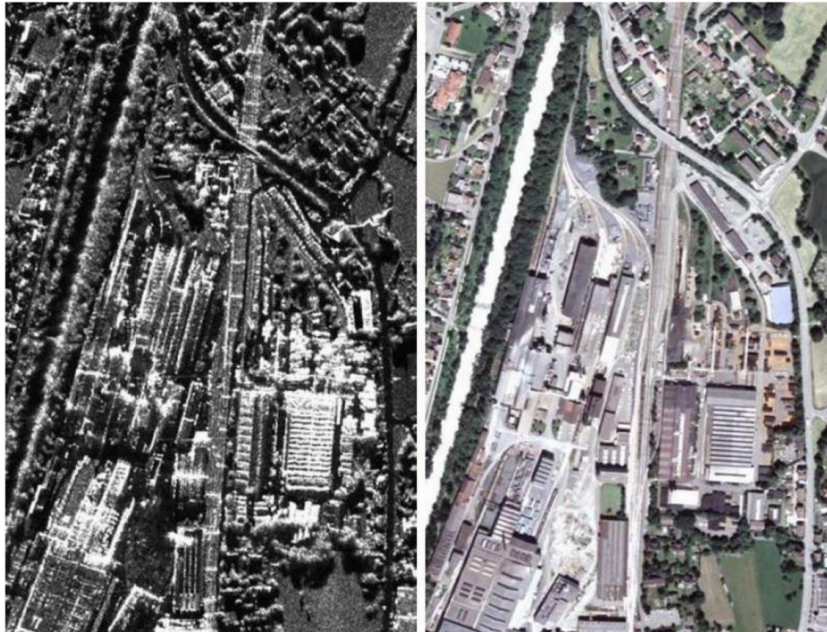


Рисунок 1.17 – Приклади зображень, отриманих методом синтезу апертури (ліворуч) і у видимому діапазоні (праворуч)

### Контрольні запитання

1. Що таке зображення ?
2. На які класи поділяються зображення ?
3. Що таке напівтонове зображення ?
4. Що таке бінарне зображення ?
5. Що таке лінійне зображення ?
6. Що таке точкове зображення ?
7. Що таке дискретизація зображення ?
8. Що таке квантування зображення ?
9. Що таке кодування зображення ?
10. Які існують способи формування зображення ?
11. Які існують типи растрових зображення ?

12. Як побудований і як працює елементарний чутливий елемент приладу із зарядовим зв'язком ?
13. Що таке мозаїка Байера ?
14. Як побудований і як працює елементарний чутливий елемент матриці комплементарних металооксидних напівпровідників ?
15. Що таке сканер ?
16. Як працює однопрохідний планшетний сканер ?
17. Які існують конструкції цифрових фотоапаратів ?
18. Як працює однокадрова цифрова фотокамера з однією матрицею ?
19. Як одержуються зображення за допомогою апарату ультразвукової діагностики ?
20. Як одержуються рентгенівські зображення ?
21. Як одержуються зображення за допомогою магнітно-резонансного томографа ?
22. Як одержуються зображення за допомогою комп'ютерного томографа ?
23. За допомогою яких спостережних систем проводиться дистанційне зондування Землі ?
24. Що таке мультиспектральне зображення ?
25. Що таке гіперспектральне зображення ?
26. Які існують види радіолокаційних зображень ?

## **2 ОБРОБКА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ**

### **2.1 Класифікація методів цифрової обробки зображень**

*Цифрова обробка зображень* – це будь-яка зміна даних, представлених у вигляді цифрових зображень. Результатом обробки також є цифрове зображення.

*Метою обробки зображень* є перетворення зображень, орієнтоване на візуальне сприйняття людиною (в основному підвищення якості, корекція кольорів і контрасту, виправлення дрібних перешкод або перекручування зображення) і їхній автоматизований аналіз (наприклад, фільтрація,

математична морфологія, сегментація на області певних класів, виділення об'єктів і т.п.).

Серед завдань обробки зображень можна виділити два основні: *покращення та відновлення зображень*.

*Головна мета покращення* полягає в такій зміні зображення, щоб результат виявився найбільш підходящим з погляду конкретного застосування. Загальної теорії покращення зображень не існує. Наприклад, метод, оптимальний для покращення рентгенівських зображень, як правило, не підходить для обробки кольорових фотографій і навпаки.

Якщо зображення обробляється для візуальної інтерпретації, то користувач буде судити, наскільки гарний застосований метод. Візуальне оцінювання якості зображення – це суб'єктивний процес, а поняття гарного зображення неможливо формалізувати або оцінити чисельно. Коли метою є обробка зображення для комп'ютерного аналізу, завдання оцінювання простіше. Наприклад, при рішенні завдання розпізнавання символів кращим буде той метод обробки зображення, завдяки якому будуть отримані більш точні результати машинного розпізнавання.

*При відновленні зображення* також виконується підвищення його якості, але відомий тип перетворення, яке спотворило зображення (наприклад, змазане зображення автомобіля на фотографії). Незважаючи на перетинання областей застосування методів обох класів, покращення зображень орієнтоване на суб'єктивне сприйняття результату, у той час як відновлення може бути оцінене більш об'єктивно. При відновленні виконується реконструкція зображення, яке було перекручено в процесі реєстрації (наприклад, змазане), за допомогою використання апріорної інформації про явище, яке викликало погіршення зображення. Тому методи відновлення засновані на моделюванні процесів перекручування, застосування зворотних процедур для відтворення вихідного зображення.

Таким чином, покращення зображень виконується як для візуального сприйняття результату людиною, так і для автоматичного аналізу й розпізнавання зображень. У чому різниця? Людське око не відрізняє на напівтоновому зображенні пікселі, що мають значення яскравості, наприклад, 10, 14 і 18, а при автоматичному аналізі треба вирішувати, утворюють ці пікселі одну однорідну область чи ні.

*Методи обробки зображень* можна класифікувати різними способами. Зокрема, можна виділити групи методів залежно від їхнього призначення.

*Виправлення дефектів зображення, обумовлених:*

- шумом (випадковими похибками кольорів в окремих пікселях зображення);
- недостатньою або надлишковою яскравістю;
- недостатньою контрастністю або вузьким динамічним діапазоном зображення;
- неправильним колірним тоном;
- нерізкістю (розфокусуванням);
- перекручуваннями через пил, подряпин на сканованому документі;
- дісторсії (скривленням);
- необхідністю ретуші фотопортретів: усунення прищів, подряпин, шрамів, синців, пор, ластовиння або зменшення їхньої кількості, розгладження зморшок; відбілювання зубів; заміна кольорів волосся, очей; корекція форми фігури й т.п.

*Структурне редагування зображень:*

- кадрування;
- створення панорам;
- усунення непотрібних деталей зображення;
- фотомонтаж – створення з декількох зображень нового зображення;
- вставка креслень, написів, символів, покажчиків та ін.;
- застосування спецефектів, фільтрів, тіней, текстур.

*Підготовка фотографій до публікації (у пресі, інтернеті):*

- різні пристрої виводу (монітор, принтер, офсетна друкована машина й т.п.) мають різні можливості колірної охоплення (не будь-які кольори можна відтворити). Виконується корекція кольорів для печатки на папері, визначається кількість фарби кожних кольорів.

Для усунення перекручувань, внесених у процесі реєстрації зображень, використовуються методи геометричної і яскравісної корекції. При обробці космічних знімків застосовують атмосферну корекцію зображень. Окреме місце займають методи обробки й аналізу зображень за допомогою математичної морфології.

*Методи обробки умовно розділяють на три рівні:*

- низький (не використовуються додаткові знання, моделі й інформація про об'єкти, представлених на зображенні);
- середній (частково використовуються додаткові відомості);
- високий (широко використовуються додаткові відомості й контекст

зображення, тобто інформація про зображені об'єкти).

Відповідно до обчислювальної складності, тобто з урахуванням кількості пікселів, що беруть участь в обчисленні значення яскравості одного пікселя нового зображення, методи ділять на *три класи*:

- точкові (в обчисленнях використовується значення одного пікселя вихідного зображення);
- локальні (в обчисленнях використовуються значення декількох сусідніх пікселів у заданій околиці);
- глобальні (при обчисленні значення пікселя використовуються всі пікселі вихідного зображення).

Обчислювальна складність алгоритмів пропорційна кількості пікселів, які беруть участь в обчисленні нового значення яскравості одного пікселя.

Всі методи обробки зображень можна розділити на лінійні та нелінійні. Лінійні методи допускають спрощення (і, отже, прискорення) обчислень, а також реалізацію за допомогою операції згортки.

Обробка зображень може здійснюватися рекурсивними й нерекурсивними методами. Рекурсивні методи використовують результат обробки частини сусідніх пікселів, нерекурсивні – не використовують. В обробці зображень більшість методів є нерекурсивними.

Багато методів обробки зображень адаптовані з різних галузей науки: обробки багатовимірних сигналів, математики, фізики, фотографії, поліграфії, картографії й ін.

## **2.2 Геометричні перетворення зображень**

Геометричні перетворення полягають у просторовій зміні розташування сукупності пікселів з однієї двовимірної системи координат в іншу. При цьому зображення зручно розглядати у вигляді пікселів, заданих у прямокутній системі координат. При виконанні геометричних перетворень вихідна множина пікселів із цілочисельними координатами ( $x$ ,  $y$ ) перетвориться в нову множину (сітка растра трансформується просторово) з координатами ( $x'$ ,  $y'$ ) і збереженням яскравості в цих пікселях. Оскільки цифрове зображення являє собою дискретну множину, коротко опишемо основи геометричних перетворень для безперервних множин, а потім адаптуємо їх для растрових зображень.

При вивченні геометричних перетворень плоских зображень (2D)

передбачається, що маємо евклідовий простір с ортонормованою декартовою системою координат із взаємно ортогональними осями. Тоді кожному пікселю зображення ставиться у відповідність пари  $(x, y)$  декартових координат. Їх можна інтерпретувати як двовимірний вектор  $\mathbf{X}$ , представлений відрізком із точки  $(0, 0)$  до точки  $(x, y)$ .

Двовимірні перетворення на площині можна представити, як рух точок, які відповідають множині пікселів. Виділимо лінійні перетворення, описувані матрицями, тобто перетворення, при яких нові координати точки лінійно залежать від вихідних координат цієї точки в такий спосіб:  $x' = Tx$ .

Для зручності матричного опису і комбінування геометричних перетворень в 2D-площині використовується формалізм «однорідні координати». Точки площини описуються тривимірними векторами виду  $(x, y, 1)$ , а перетворення – у матричному виді

$$\begin{bmatrix} \bar{x}' \\ \bar{y}' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ w \end{bmatrix}.$$

До лінійних перетворень можна віднести кусочно-лінійні, при яких зображення розбивається на частині, а потім до кожної з них застосовуються різні лінійні перетворення.

Нелінійні перетворення – це всі перетворення, які не задовольняють властивостям лінійності, наприклад, поліноміальні (виконувані за допомогою поліноміальних функцій), синусоїдальні й т.п.

### ***Афінне перетворення***

Основні типи афінних перетворень й їхніх матричних поданнях показані на рис. 2.1.

У цілому будь-яке афінне перетворення на площині описується рівняннями  $x' = ax+bx+c$ ,  $y' = dx+ey+f$  або представляється в матричному вигляді:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{Ax} + \mathbf{c}, \quad \text{де} \quad \mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix}.$$

В однорідних координатах це перетворення можна описати однією матрицею  $T$  або в такий спосіб:

$$[x' \ y' \ 1] = [x \ y \ 1] \cdot \begin{bmatrix} t_{11} & t_{21} & 0 \\ t_{12} & t_{22} & 0 \\ x'_0 & y'_0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

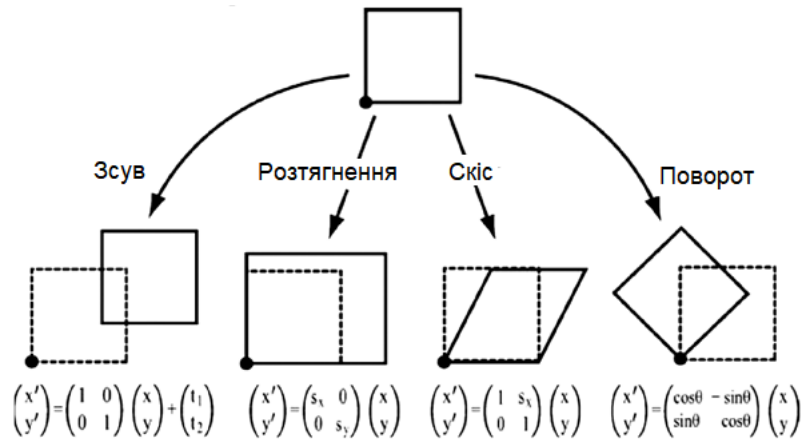


Рисунок 2.1 – Базові перетворення афінного типу

Опишемо параметри базових афінних перетворень.

Зсув зображення задається співвідношеннями

$$x' = x + c, \quad y' = y + f.$$

Матриця зсуву має вигляд

$$\mathbf{T}_{cd} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & c \\ 0 & 1 & f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Відбиття зображення щодо осі  $OY$  задається формулами

$$x' = x, \quad y' = -y.$$

Матриця відбиття має вигляд

$$\mathbf{T}_{om} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Масштабування (розтягнення) зображення задається у вигляді

$$x' = \alpha x, \alpha > 0, \quad y' = \beta y, \quad \beta > 0.$$

Матриця перетворення в однорідних координатах має вигляд

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Необов'язково  $\alpha = \beta$ . Якщо  $\alpha$  і  $\beta$  менше одиниці, зображення зменшується, якщо більше одиниці – збільшується. При збільшенні зображення кількість пікселів зростає, з'являються нові з невизначеним значенням яскравості. Їхні значення обчислюються шляхом інтерполяції, тобто локальними методами.

Скіс зображення уздовж осі OX описується формулами

$$x' = x + sy, \quad y' = y.$$

Матриця перетворення в однорідних координатах має вигляд

$$\mathbf{T}_{sk} = \begin{bmatrix} 1 & s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Поворот зображення навколо початку координат на кут  $\varphi$  описується формулами

$$x' = x \cos \varphi - y \sin \varphi, \quad y' = x \sin \varphi + y \cos \varphi.$$

Матриця обертання в однорідних координатах має вигляд

$$\mathbf{T}_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Відзначимо, що при повороті на  $90^\circ$   $\cos \varphi = 0$ ,  $\sin \varphi = 1$ , тому

$$x' = -y, \quad y' = x.$$



При повороті зображення координати пікселя можуть прийняти нецілі значення, у такому випадку потрібно їх округлити до цілих. Це створює в поверненому зображенні пікселі з невизначеною яскравістю (рис. 2.2).

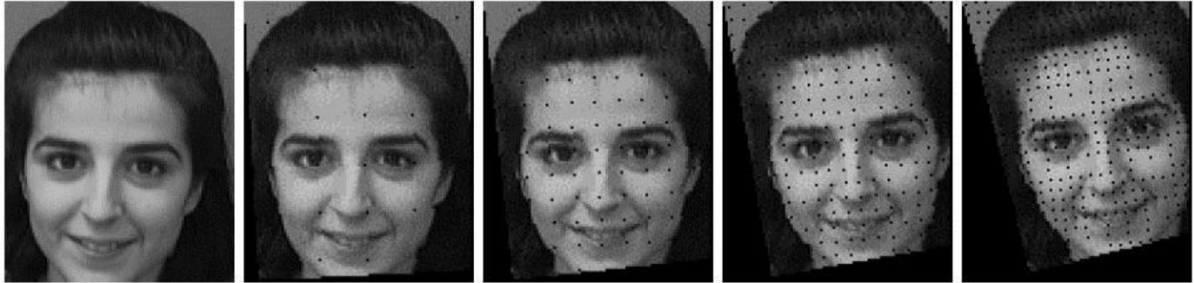


Рисунок 2.2 – Зображення повернене на 3, 6, 10 і 14° навколо верхнього лівого кута (у чорних пікселях яскравість не визначена)

Пікселям з невизначеною яскравістю можна привласнити значення яскравості найближчого пікселя.

Довільне афінне перетворення можна записати у вигляді композиції послідовно виконуваних базових перетворень. Суперпозиція афінних перетворень також є афінним перетворенням. Перевага суперпозиції: складне перетворення зображення можна описати шістьма параметрами, обчисленими один раз, і застосувати до координат всіх пікселів.

У безперервній геометрії будь-яке афінне перетворення має зворотне перетворення, що також є афінним. Добуток прямого і зворотного дає одиничне перетворення, що залишає всі точки на місці.

Деякі властивості афінних перетворень:

- пряма лінія переходить у пряму;
- паралельні прямі переходять у паралельні;
- зберігаються відношення довжин відрізків, які лежать на одній прямій або паралельних прямих;
- зберігаються відношення площ фігур.

Безліч афінних перетворень утворюють афінну групу. Відзначимо, що Афінна група є підгрупою проєктивної групи перетворень, а евклідова – частковим випадком афінної. Ці групи формують наступну ієрархію:

евклідове перетворення  $\subset$  афінне  $\subset$  проєктивне перетворення.

### ***Проективні перетворення***

Загальними лінійними перетвореннями  $T$  у однорідних координатах

описується група проєктивних перетворень

$$\begin{bmatrix} \bar{x}' \\ \bar{y}' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

При поданні у звичайних координатах співвідношення (2.2) буде мати нелінійний вигляд:

$$x' = \frac{t_{11}x + t_{12}y + t_{13}}{t_{31}x + t_{32}y + t_{33}}, \quad y' = \frac{t_{21}x + t_{22}y + t_{23}}{t_{31}x + t_{32}y + t_{33}}. \quad (2.3)$$

Проективні перетворення в загальному випадку не зберігають паралельності ліній. Властивістю, що зберігається при проективному перетворенні, є колінеарність точок: три точки, які лежать на одній прямій (колінеарні), після перетворення залишаються на одній прямій.

Проективне перетворення пов'язане з відображенням тривимірної візуальної інформації на двомірну площину. З математичної точки зору зручно розглядати світ як тривимірний проективний простір  $P^3$ , а площина зображення – включеної в проективний простір розмірності два –  $P^2$ . Точки на тривимірній сцені й на зображенні представляються в проективних просторах як вектори в однорідних координатах. Проективне перетворення з  $P^3$  у  $P^2$  (перспективна проєкція), що відображає евклідову Точку сцени  $p=(X,X,Z)'$  у точку зображення  $x=(x,y)'$  і виражене в однорідних координатах, задається рівняннями (2.2) або (2.3).

На рис. 2.3, б, в показані зображення, отримані проективними перетвореннями.

Зображення об'єктів на знімку, сформованому реєструвальною камерою, пов'язане із проектуванням за допомогою пучка прямих, оскільки кожна 2D-точка є проєкцією множини 3D-точок уздовж деякого променя проектування в площину знімка.

При розгляді геометричних перетворень використовується ідеальна модель камери. У дійсності формування зображень супроводжується різними нелінійними перекохуваннями (типу оптичної дісторсії лінзи). Приведення знімків до реального подання можна виконати нелінійною функцією геометричного перетворення. Для цього звичайно використовують поліноміальну апроксимуючу функцію перетворення:

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + \dots + a_px^m;$$

$$y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + \dots + b_py^m,$$

де  $(x, y)$  – координати точок ідеального зображення;  $(x', y')$  – відповідні їм координати на його проекції.

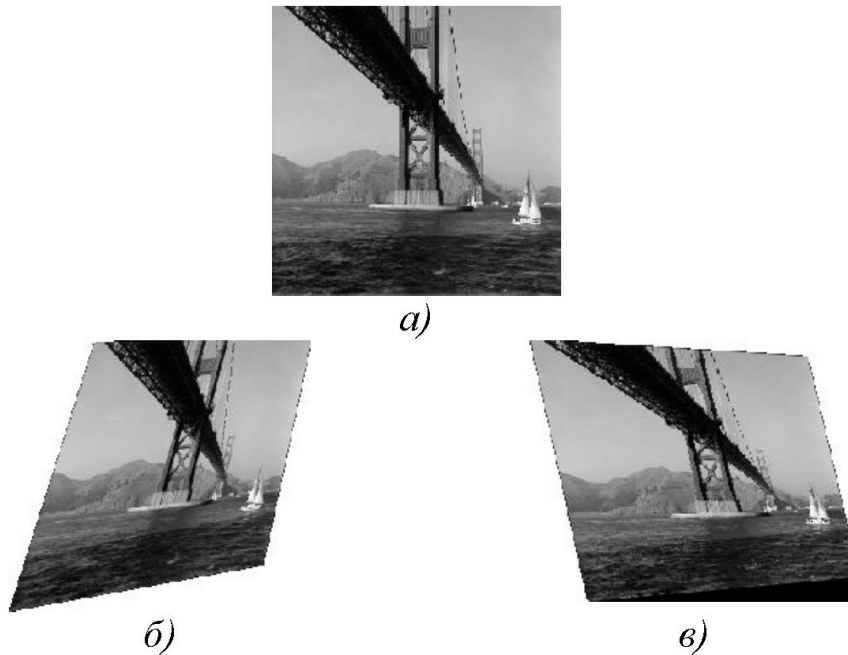


Рисунок 2.3 – Вихідне зображення (а) і два варіанти його проективного перетворення (б, в)

Результат застосування поліноміальної апроксимуючої функції перетворення для знімка представлений на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Приклад білінійного геометричного перетворення знімка

### ***Уточнення координат і значень яскравості пікселів після перетворення***

Після повороту або збільшення зображення часто виникає завдання уточнення нових координат пікселів (рис. 2.5) у цілочисельній системі координат. Вона вирішується шляхом округлення координат пікселів до цілих значень і двомірної інтерполяції значень яскравості в невизначених пікселях. Найбільш простою є інтерполяція методом найближчого сусіда, де значення координат округляються до найближчих точок дискретного растра.

Можливі два варіанти визначення яскравості пікселів при геометричних перетвореннях:

- **прямий** – для кожного пікселя обчислюються нові координати, вони округляються до найближчих цілих значень, потім невизначеним пікселям нового зображення привласнюється яскравість найближчого після геометричного перетворення пікселя з неокругленими координатами;
- **зворотний** – для кожного пікселя перетвореного зображення координати піддаються зворотному перетворенню в систему координат вихідного зображення, координати округляються до найближчих цілих значень і береться яскравість пікселя з такими координатами.

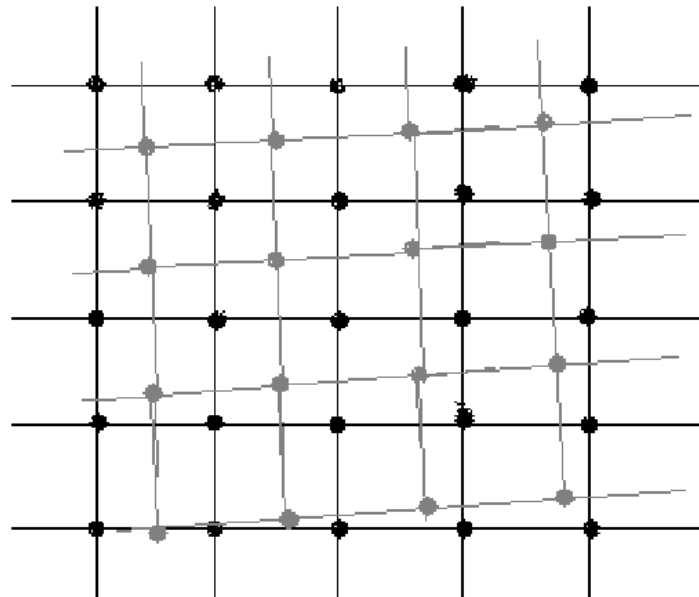


Рисунок 2.5 – При повороті координати пікселів (виділені сірим тоном) не збігаються з дискретною цілочисельною системою координат

## **Геометрична корекція зображень**

### *Побудова мозаїки із зображень*

Як можна використати геометричні перетворення, розглянемо на прикладі побудови мозаїки із двох зображень. Мозаїка, або зшивка, – це об'єднання двох або більше зображень у єдине зображення. Нехай два зображення отримані шляхом сканування вроздріб одного великого малюнка. Обов'язкова умова: на обох зображеннях частково присутні ті самі об'єкти, тобто зображення мають області перекриття.

Системи координат двох зображень будуть розрізнятися через різний ракурс зйомки, обертання камери й руху самого фотографованого об'єкта. Для зображень, які мають однакові освітлення, відстань до камери, оптичні системи, основним завданням обробки є приведення їх у загальну систему координат. Якщо зображення реєструвалися в різний час, необхідно врахувати зміни яскравості, що виникають через зміну висвітлення, сезонні й добові зміни, використання іншої оптичної системи.

Розглянемо завдання знаходження такого просторового перетворення, що дозволяє визначити пікселі обох зображень у єдиній системі координат таким чином, щоб точки, що відповідають однаковим об'єктам на двох зображеннях, збіглися. Як загальну систему координат можна використати систему лівого зображення, тоді потрібно знайти перетворення координат всіх пікселів другого зображення  $(x, y)$  у загальну систему координат  $(x', y')$ . Для спрощення завдання вважаємо, що в процесі реєстрації не відбулося скривлення прямих ліній, а лише афінні трансформації (поворот, зсув). Афінні перетворення є підмножиною поліноміальних перетворень першого порядку й описуються двома рівняннями:

$$\begin{aligned}x' &= a_0 + a_1x + a_2y, \\y' &= b_0 + b_1x + b_2y.\end{aligned}\tag{2.4}$$

На обох зображеннях (рис. 2.6) можна вибрати інтерактивно або знайти за допомогою спеціальних методів пікселі, які відповідають однаковим об'єктам. Позначимо через  $(x_i, y_i)$  координати таких пікселів на правому зображенні в системі координат цього зображення,  $(x'_i, y'_i)$  – координати в системі координат лівого зображення. Ці координати відомі (точки визначені), коефіцієнти  $a_0 \dots a_2$  і  $b_0 \dots b_2$  невідомі. Для рішення завдання обчислення шести коефіцієнтів  $a_0 \dots a_2$  і  $b_0 \dots b_2$  афінного перетворення мінімальна кількість загальних точок дорівнює  $n=3$ . Якщо

задати більше пікселів, то необхідно мінімізувати помилки їхнього завдання, які неминучі в силу неточного завдання й округлення координат до цілих значень.



Рисунок 2.6 – Приклад вибору пари відповідних пікселів

Таким чином, маємо шість невідомих, для їхнього пошуку потрібно три пари пікселів з відомими координатами до й після трансформації  $(x_1, y_1)$ ;  $(x_2, y_2)$ ;  $(x_3, y_3)$  і  $(x_1', y_1')$ ;  $(x_2', y_2')$ ;  $(x_3', y_3')$ . Підставимо координати  $(x, y)$  у рівняння (2.4), одержимо три пари рівнянь із невідомими  $a_1$  й  $b_1$ :

$$\begin{aligned} x_1' &= a_0 + a_1x_1 + a_2y_1, & y_1' &= b_0 + b_1x_1 + b_2y_1, \\ x_2' &= a_0 + a_1x_2 + a_2y_2, & y_2' &= b_0 + b_1x_2 + b_2y_2, \\ x_3' &= a_0 + a_1x_3 + a_2y_3, & y_3' &= b_0 + b_1x_3 + b_2y_3. \end{aligned}$$

Для обчислення коефіцієнтів  $a_i$  і  $b_i$  кожна частина матричного рівняння повинна бути помножена на зворотну матрицю.

Отриманий набір коефіцієнтів підставляється у вихідні рівняння, і нові координати обчислюються для кожного пікселя другого зображення. Залишилося визначити, яку частину другого зображення необхідно приєднати до першого.

До отриманого зображення можна приєднувати праворуч і знизу інші зображення. Результуюче зображення представлено на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Приклад мозаїки, складеної із двох зображень

### *Корекція проєктивних перекручувань*

Проективне перетворення описується рівняннями

$$x' = \frac{a_{01}x + a_{10}y + a_{00}}{c_{01}x + c_{10}y + 1}, \quad y' = \frac{b_{01}x + b_{10}y + b_{00}}{c_{01}x + c_{10}y + 1}$$

де  $x$  і  $y$  – точки ідеального зображення;  $x'$  й  $y'$  – точки проєктивно перекрученого зображення.

При корекції перспективних перекручувань вихідне зображення одне (рис. 2.8). Інтерактивно задаються кінці відрізків, які повинні бути вертикальними й горизонтальними на відкоректованому зображенні. Для визначення восьми невідомих коефіцієнтів мінімально необхідно задати вісім точок. За допомогою рішення системи лінійних рівнянь обчислюються невідомі параметри перетворення  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  й  $c_{ij}$ . Всі пікселі вихідного зображення трансформуються, і відзначені відрізки стають вертикальними та горизонтальними.

### *Нелінійна геометрична корекція*

Не завжди завдання геометричної корекції можна вирішити за допомогою лінійних перетворень. Нелінійні перетворення (другого й більше порядку) допомагають коректувати нелінійні перекручування зображення, які виникли в процесі його реєстрації (рис. 2.9).

Перетворення другого порядку можуть бути використані для перетворення даних з географічної системи координат (широта, довгота) у прямокутну, більших областей (для обліку кривизни Землі), для точної

прив'язки перекручених по тій або іншій причині (через перекручування лінз камери, погано відсканованих матеріалів) даних і т.п.

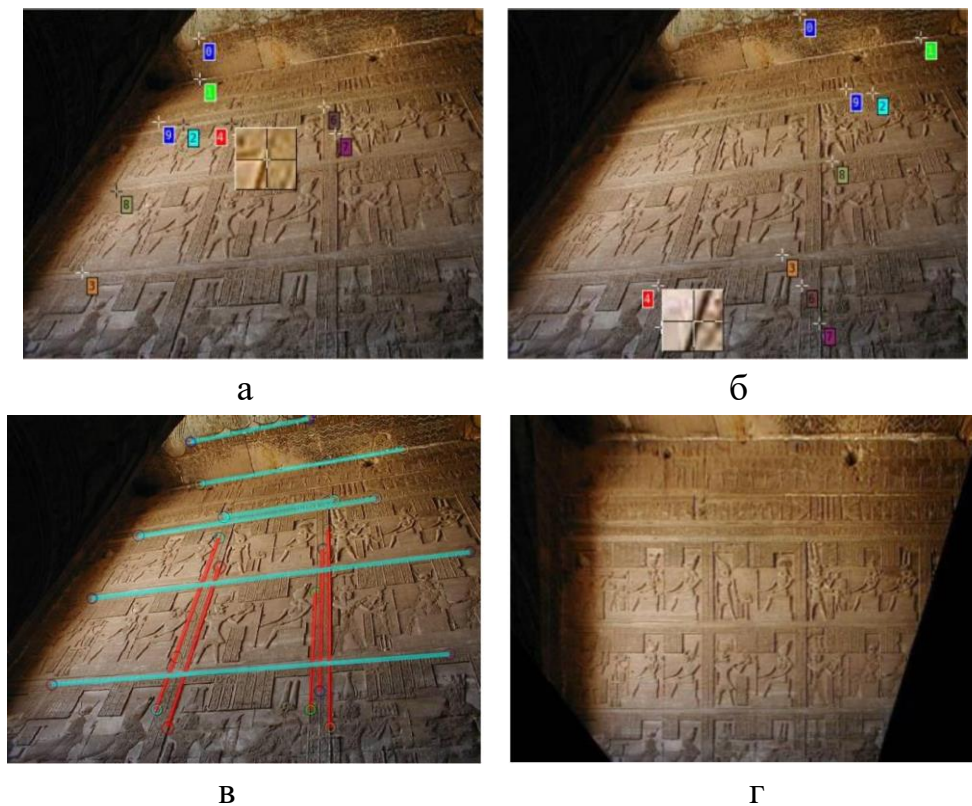


Рисунок 2.8 – Приклад перспективної корекції зображення: а) задані ліві кінці горизонтальних відрізків і верхні вертикальних; б) задані праві кінці горизонтальних відрізків і нижні вертикальних (кінці одного відрізка позначені однаковими цифрами); в) зазначені відрізки відображені; г) зображення відкоректоване

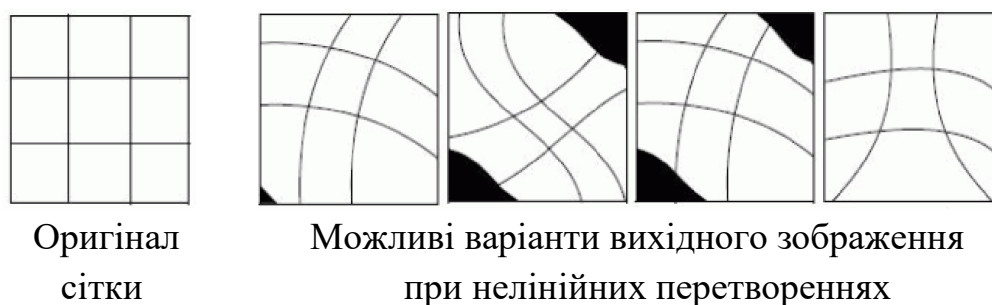


Рисунок 2.9 – Приклади нелінійних перекручувань

Спосіб рішення завдання трансформації аналогічний попередній і зводиться до знаходження коефіцієнтів системи рівнянь. Докладніше



рішення цього завдання представлено в лабораторній роботі, присвяченій топографічній прив'язці супутникового знімка.

### *Корекція дісторсії*

При фотографуванні на зображенні може виникнути перекручування, яке називається дісторсією. Дісторсія – це оптичне перекручування, що виражається в скривленні прямих ліній. Світлові промені проходять через центр лінзи й сходяться в точці, розташованій далі від лінзи, чим промені, які проходять через її краї (рис. 2.10).

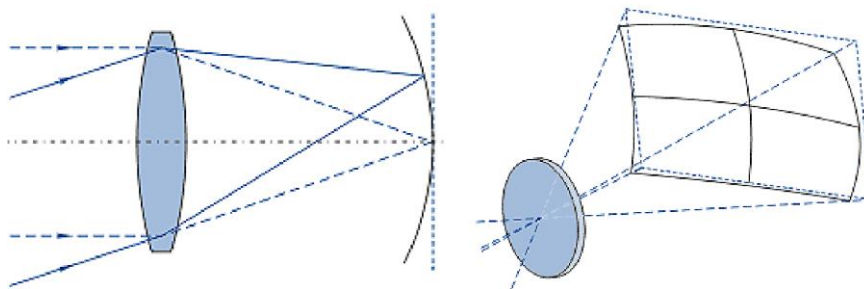


Рисунок 2.10 – Оптичні перекручування при реєстрації зображення породжують дісторсію

Дісторсія не порушує різкість й яскравість зображення, але вносить перекручування в його форму. Прямі лінії зображуються кривими, крім тих, які лежать в одній площині з оптичною віссю. Наприклад, зображення квадрата, центр якого перетинає оптична вісь, має вигляд подушки (подушкоподібна дісторсія) при позитивній дісторсії в ширококутних об'єктивів при зйомці на максимальній фокусній відстані й вид бочки (бочкоподібна дісторсія) при негативній дісторсії при зйомці телеоб'єктивом на мінімальній фокусній відстані (рис. 2.11). Це найпоширеніші варіанти дісторсії оптичних систем фотоапаратів з осьовою симетрією.

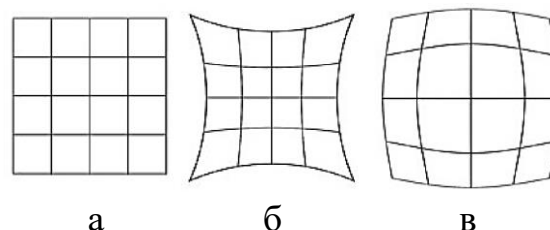


Рисунок 2.11 – Основні варіанти дісторсії фотооб'єктивів: а) дісторсія відсутня; б) подушкоподібна дісторсія; в) бочкоподібна дісторсія

Дісторсія об'єктива може бути скоректована оптично за рахунок особливої конструкції об'єктива, використання асферичних лінз або програмним шляхом. Як правило, така дісторсія має осьову симетрію, це значить, що горизонтальна й вертикальна осі, які проходять через центр зображення, не перекручені.

Якщо скривлення присутнє в цифровому зображенні, його можна виправити програмним методом.

Приклади виправлення дісторсії реальних зображень наведені на рис. 2.12.



Рисунок 2.12 – Приклади двох видів дісторсії й виправлене зображення

### Контрольні запитання

1. Що таке цифрова обробка зображення ?
2. Яка мета обробки зображень ?
3. Що таке покращення зображення ?
4. Що таке відновлення зображення ?

5. Чим обумовлене виправлення зображень ?
6. В чому полягає структурне редагування зображення ?
7. Які існують рівні обробки зображень ?
8. Які існують класи методів обробки зображень в залежності від обчислювальної складності ?
9. В чому полягають геометричні перетворення зображень ?
10. Які існують види афінних перетворень ?
11. На які класи поділяються зображення ?
12. З чим пов'язане проєктивне перетворення зображень ?
13. Яким чином уточнюються координати пікселів після перетворення зображення ?
14. Яким чином уточнюється яскравість пікселів після перетворення зображення ?
15. Як і для чого виконується мозаїка з зображень ?
16. Як здійснюється корекція проєктивних перекручувань ?
17. Що таке дісторсія зображення ?
18. Як здійснюється корекція дісторсії зображення ?

### **3 ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ТОЧКОВОГО ТИПУ**

#### **3.1 Логічні операції над зображеннями**

Яскравість бінарних зображень задається числами 0 й 1. Ці зображення можна інтерпретувати як множини чорних пікселів на білому тлі. До них можна застосовувати операції теорії множин AND, OR, NOT, XOR (рис. 3.1). Нехай  $L1$  й  $L2$  – два бінарних зображення рівних розмірів. Операції застосовуються до пікселів з однаковими координатами. У табл. 3.1 показано, як змінюються значення яскравості при застосуванні цих логічних операцій. Операція NOT створює негативне зображення, її можна описати функцією  $L=1 - L1$ .

#### **3.2 Лінійні перетворення яскравості напівтонових зображень**

Яскравісними перетвореннями зображення  $I(i,j)$  називаються

перетворення двомірних функцій яскравості, описувані формулою  $I'(i, j) = f(I(i, j))$ . Перетворення яскравості зображень відносять до точкового типу, якщо значення яскравості пікселя після перетворення залежить від яскравості однієї точки (пікселя) вихідного зображення й не залежить від її місця розташування. Нехай  $x = I(i, j)$  – функція яскравості вихідного зображення,  $y = J(i, j)$  – функція яскравості перетвореного зображення. Поелементна обробка означає, що зміну яскравості можна описати функцією  $y = f(x)$  незалежно від координат пікселя.

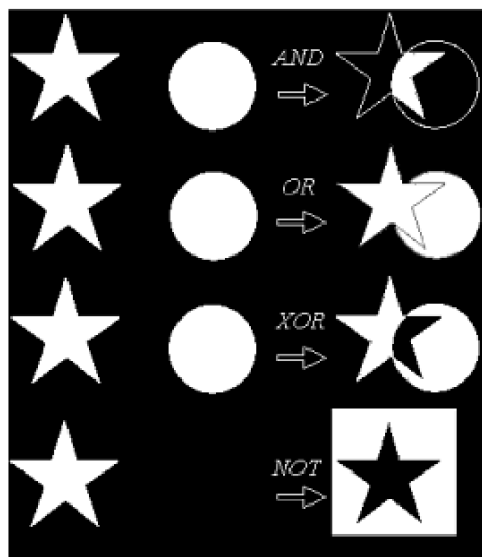


Рисунок 3.1 – Приклади логічних операцій над бінарними зображеннями

Таблиця 3.1 – Результати логічних операцій

$L_1$	$L_2$	$L_1 \text{ AND } L_2$	$L_1 \text{ OR } L_2$	$\text{NOT } L_1$	$L_1 \text{ XOR } L_2$
0	0	0	0	1	0
0	1	0	1	1	1
1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	0	0

### ***Препарування зображень***

За допомогою яскравісного зрізу зображення можна виділити області зображення з яскравістю з певного інтервалу. При цьому іншим областям можна привласнити чорні кольори й одержати бінарне зображення (рис. 3.2, *a*) або залишити незмінними (рис. 3.2, *б*). Переміщаючи виділений інтервал по шкалі яскравості й змінюючи його ширину, можна детально досліджувати зміст зображення. При цьому, пікселі, які мають яскравість,

що не потрапила в цей інтервал, відображаються чорними, з яскравістю 0 (рис. 3.2, а), або лінійно контрастуються (рис. 3.2, б). Такі перетворення використовуються, якщо інтервали яскравості можна визначити (обчислити або задати інтерактивно).

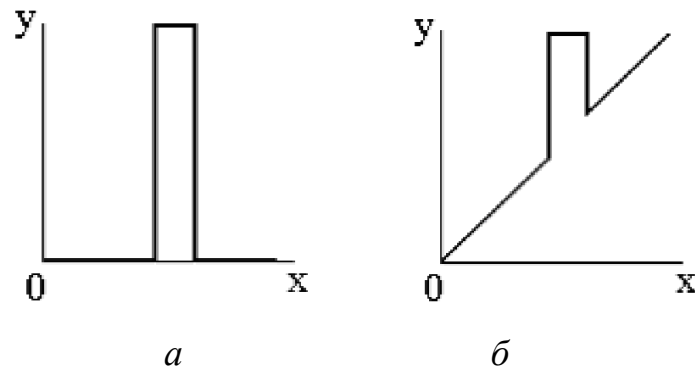


Рисунок 3.2 – Два варіанти графічного завдання функції яскравісного зрізу

Аналітично функція зрізу для першого варіанта (рис. 3.2, а) задається в такий спосіб (замість значення яскравості 1 використовується 255 для відображення на екрані):

$$y=255, \text{ якщо } T_1 < x < T_2, \text{ інакше } y=0.$$

Пилкоподібне контрастування – це лінійне контрастування, застосовуване до одного або декількох діапазонів яскравості (рис. 3.3). Воно також дозволяє підвищити детальність зображення в обраному інтервалі яскравості.

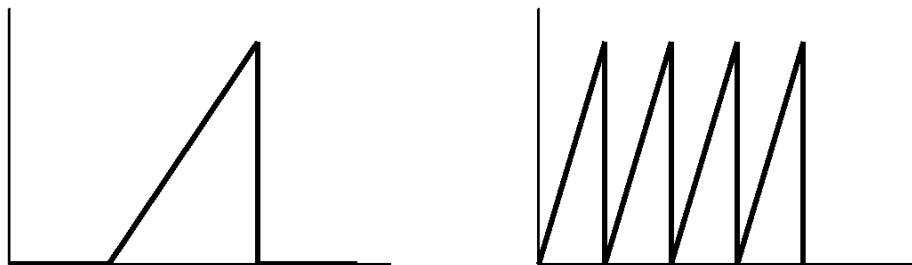


Рисунок 3.3 – Пилкоподібні варіанти яскравісного зрізу

### **Бінаризація зображень.**

Найпростішим методом препарування зображень є бінаризація. Вона

перетворить напівтонове зображення в бінарне (чорно-біле). Перетворення має єдиний параметр – поріг, щодо якого яскравість пікселів міняється на чорну або білу. Функція бінаризації із глобальним (тобто єдиним для всіх пікселів) порогом має вигляд

$$y=255, \text{ якщо } x > T, \text{ інакше } y=0,$$

а її графічне подання показано на рис. 3.4. Це перетворення використовують при виділенні темних об'єктів на світлому тлі або навпаки (рис. 3.5).

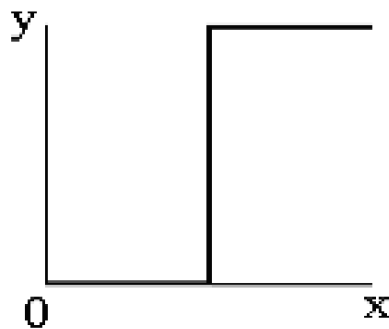


Рисунок 3.4 – Функція бінаризації із глобальним порогом



Рисунок 3.5 – Приклад бінаризації зображення

Для обчислення порогу існують різні методи. *Найбільш простий* з них полягає в знаходженні мінімального  $g_{min}$  і максимального  $g_{max}$  значень яскравості зображення й обчислення середнього значення між ними:

$$t=(g_{max}-g_{min})/2.$$

Застосовують також *метод Отсу* з використанням гістограми

розподілу значень яскравості зображення, який розділяє два класи пікселів (темні й світлі) і зменшує внутрішньокласову дисперсію та *алгоритм обчислення порога на основі градієнта яскравості*.

### **Лінійне розтягання контрасту зображень.**

Призначено для поліпшення узгодження динамічного діапазону зображення й екрана, на якому виконується візуалізація. Якщо для цифрового подання яскравості кожного пікселя зображення приділяється 1 байт (8 біт), то вхідне або вихідне зображення може приймати одне з 256 значень у діапазоні від 0 до 255. Нехай мінімальна й максимальна яскравості вихідного зображення рівні  $x_{min}$  й  $x_{max}$  відповідно. Якщо  $x_{min} \gg 0$  й  $x_{max} \ll 255$ , тобто динамічний діапазон вузький, то зображення виглядає сірим і малокоонтрастним.

При лінійному розтяганні контрасту використовується перетворення яскравості типу

$$y = ax + b,$$

де  $a$  й  $b$  визначаються бажаними значеннями мінімальної й максимальної яскравості результуючого зображення (звичайно  $y_{min} = 0$  для  $x_{min}$  й  $y_{max} = 255$  для  $x_{max}$ ). З урахуванням цього перетворення яскравості приймає вид

$$y = 255 \cdot (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \quad (3.1)$$

Графічне подання цієї функції й приклад лінійного розтягання контрасту представлені на рис. 3.6 й 3.7 відповідно.

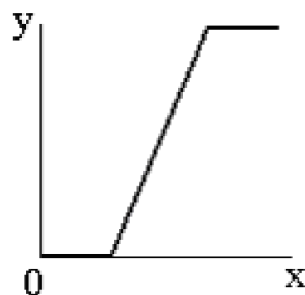


Рисунок 3.6 – Графічне подання функції лінійного контрастування зображення

Частковим випадком цієї лінійної зміни яскравості є перетворення зображення в негативне подання:  $y = 255 - x$ .

Контрастування можна виконати кусочно-лінійним способом. Нехай задані  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  – границі діапазонів зміни яскравості (рис. 3.8).



Рисунок 3.7 – Світле зображення (а) з діапазоном яскравості  $x_{min} = 180$ ,  $x_{max} = 240$  перетвориться за допомогою лінійного розтягання контрасту (б)

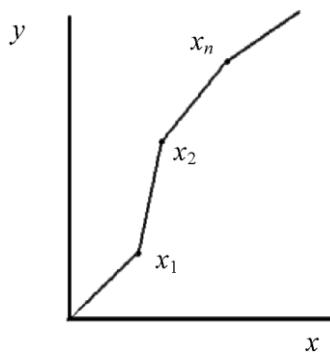


Рисунок 3.8 – Графічне подання функції кусочно-лінійного контрастування зображення

Тоді кусочно-лінійна функція зміни яскравості має вигляд

$$y = \begin{cases} a_0x + b_0, & \text{при } x < x_1 \\ a_1x + b_1, & \text{при } x_1 < x < x_2 \\ \dots \\ a_nx + b_n, & \text{при } x_n < x \end{cases}$$

### 3.3 Арифметичні операції над зображеннями

Арифметичні перетворення зображень відносять до точкового типу.



*Множення яскравості зображення на константу:*

$$y(i, j) = ax(i, j),$$

де  $a > 0$  – константа. Якщо  $y(i, j) > 255$ , замінити на  $y = 255$ .

*Збільшення яскравості на константу  $c$ :*

$$z(i, j) = x(i, j) + c.$$

*Додавання або віднімання рівних за розміром зображень (рис. 3.9):*

$$z(i, j) = ax(i, j) \pm (1 - a) v(i, j),$$

де  $x, y, z$  – цифрові зображення одного розміру,  $0 < a < 1$  – константа.



*а)*



*б)*



*в)*

Рисунок 3.9 – Приклад додавання двох зображень:  
а), б) – вихідні зображення; в) результат додавання

*Просторове маскування зображення (рис. 3.10):*

$$y(i, j) = a(i, j) x(i, j)$$

де  $a(i, j)$  – матриця (маска) з нулів й одиниць того ж розміру, що зображення  $x$ . Операція являє собою поелементний добуток двох матриць.



Рисунок 3.10 – Приклад маскуванню

### 3.4 Нелінійна корекція яскравості зображень

*Гама-корекція* – це операція корекції яскравості зображення  $I$ , використовується для однакового подання зображень на моніторах різних конструкцій з нелінійною яскравісною характеристикою. Звичайно використовується ступенева функція виду

$$I = c \cdot I^\gamma.$$

Історично введення  $\gamma$ -корекції було обумовлено тим, що в електронно-променевої трубці залежність між кількістю випущених фотонів і напругою на катоді близька до ступеневої формули. У результаті це ввійшло в стандарт і для сучасних рідкокристалічних моніторів, де залежність між напругою і яскравістю більше складна. Стандартне значення параметра  $\gamma$  для відеозображень NTSC дорівнює 2,2. Для більшості моніторів значення в становить від 1,8 до 2,4.

При обробці цифрових зображень із діапазоном яскравості від 0 до 255 це перетворення виконується за формулою

$$I = 255 \cdot (I/255)^\gamma.$$

Якщо зображення виглядає темним або бляклим,  $\gamma$ -корекція використовується для корекції цих недоліків.

Аналогічно виконується *логарифмічна зміна яскравості* ( $c$  – задана константа,  $b \leq 1$ ):

$$I = c \log(I+b).$$

Перетворення, називане *соляризацією зображення*, змінює яскравість за допомогою параболічної функції:

$$y = k \cdot x(x_{max} - x),$$

де  $x_{max}$  – максимальне значення яскравості вихідного зображення (звичайно 255), а  $k$  – константа, яка управляє динамічним діапазоном перетвореного зображення. Функція перетворення є квадратичною параболою, її графік при  $k = 1/64$  наведений на рис. 3.11.

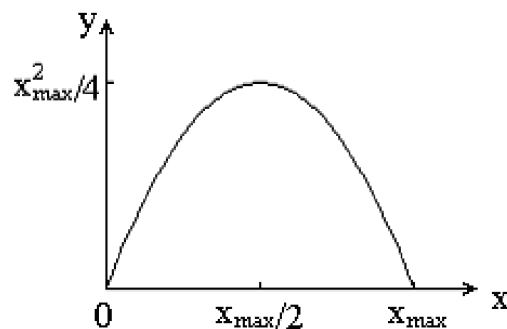


Рисунок 3.11 – Функція зміни яскравості при соляризації

Зміст перетворення полягає в тому, що ділянки вихідного зображення з яскравістю, близькою до білих кольорів, після обробки приймають значення яскравості ближче до чорного. При цьому темні ділянки залишаються темними. Значення, близькі до білого, здобувають ділянки, що споконвічно мали середні рівні яскравості.

Застосовується також *алгоритм корекції яскравості шляхом приведення середньої яскравості до заданого значення* (приклад перетворення зображення до середніх значень яскравості наведені на рис. 3.12) та *табличний метод зміни яскравості*. У перетвореннях точкового типу яскравість пікселя змінюється відповідно до деякої формули, однакової для всіх пікселів зображення. Нехай розмір зображення дорівнює

$N \times N$ , де  $N \gg 256$ . При нелінійних змінах яскравості значень буде потрібно  $N^2$  разів обчислити нові значення пікселів.

Від цих недоліків вільний табличний метод заміни яскравості (LookUpTable – LUT). Його суть полягає в тому, що попередньо обчислюються значення функції зміни яскравості  $f(x)$  для всіх  $x$  від 0 до 255 і створюється таблиця нових значень  $y = f(x)$  (табл. 3.2). Потім яскравість змінюється відповідно до цієї таблиці, при цьому вихідна яскравість  $x$  використовується як індекс в отриманій таблиці, а  $y$  – як нове значення яскравості.

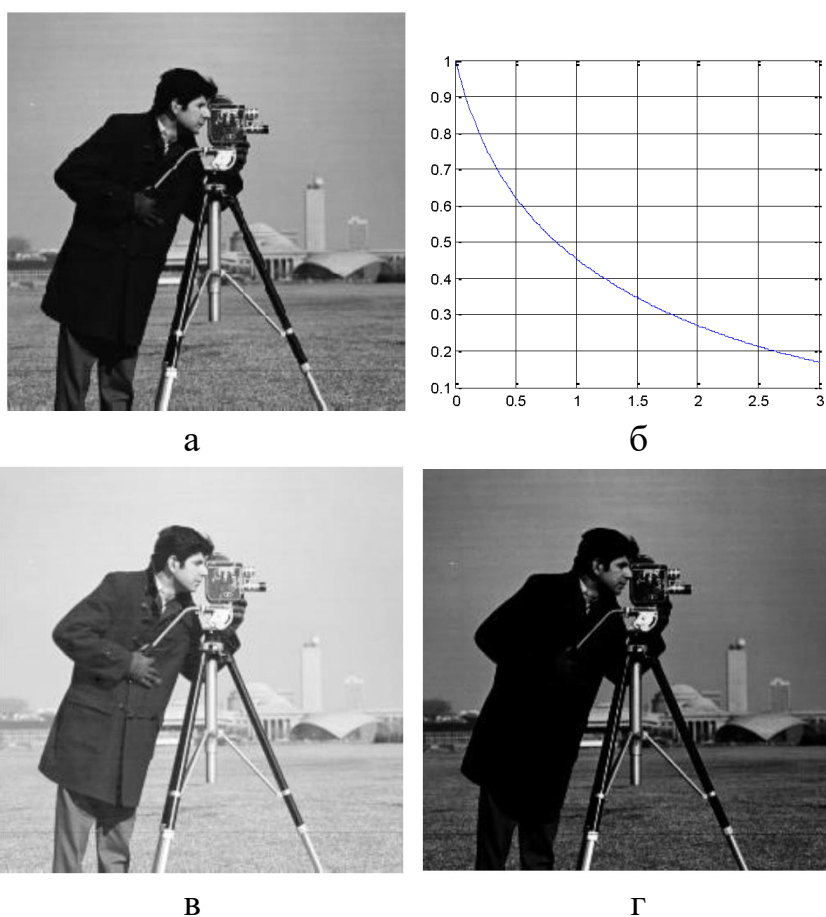


Рисунок 3.12 – Перетворення середньої яскравості до заданого значення: а) вихідне зображення із середньою яскравістю 119; б) графік функції  $K = f(a)$  при  $a = 1,85$ ; в) перетворене зображення із середньою яскравістю 177; г) перетворене зображення із середньою яскравістю 77

Таблиця 3.2 – Табличне завдання функції  $y = f(x)$

$x$	$x_1$	$x_2$	...	$x_{n-1}$	$x_n$
$y = f(x)$	$y_1$	$y_2$	...	$y_{n-1}$	$y_n$

Якщо вихідне зображення має діапазон яскравості  $[0, 255]$ , то таблиця LUT складається з 256 елементів. Наприклад, для перетворення соляризації по формулі  $y = 4x(255-x)/255$  таблиця описується одновимірним масивом:

0,4,8,12,16,20,23,27,....,198,199,201,203,....,254,255,255,255,....,12,8,4,0.

Нові значення яскравості при такому підході обчислюються 256 разів при формуванні таблиці. Якщо обчислювати її по формулі для кожного пікселя, то буде потрібно  $N^2$  обчислень, де  $N$  може дорівнювати декільком тисячам. Тому таблична зміна яскравості є дуже швидкою.

Виконують також *інтерактивну зміну функції яскравості зображення* (наприклад, реалізовану в графічному редакторі Photoshop).

### 3.5 Перетворення яскравості на базі гістограми зображення

Гістограма – це функція розподілу яскравостей напівтонового зображення. Нехай  $L$  – максимально можливе значення яскравості (звичайно 255). Обчислити гістограму означає побудувати масив  $H$  розміром в 256 елементів, значення яких дорівнюють кількості пікселів з яскравістю, рівної номеру елемента  $H(i)$ , тобто  $i$ . Обчислення виконуються проходом по всім пікселям зображення й додаванням одиниці до значення відповідного елемента масиву  $H$ .

У гістограмі типового зображення яскравість пікселів розподілена нерівномірно (рис. 3.13). У результаті часто на темних ділянках зображень деталі виявляються погано помітними.

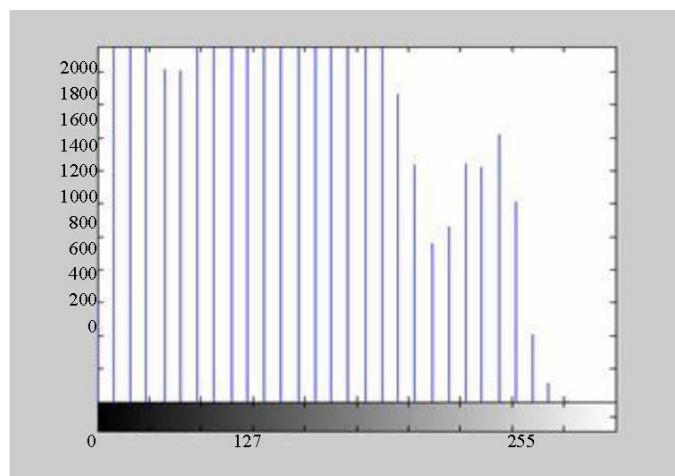


Рисунок 3.13 – Напівтонове зображення і його гістограма

Розроблено ряд методів поліпшення зображень на базі зміни гістограми. Найбільш простим з них є еквалізація (лінійне вирівнювання) гістограми. Це перетворення прагне змінити розподіл яскравостей зображення, роблячи графік гістограми максимально близьким до горизонтальної прямої. На рис. 3.14 показаний результат вирівнювання гістограми зображення. Якщо зображення має багато темних ділянок і мале число ділянок з високою яскравістю або навпаки, вирівнювання гістограми коректує яскравість зображення, вирівнюючи інтегральні площі ділянок з різними яскравостями.

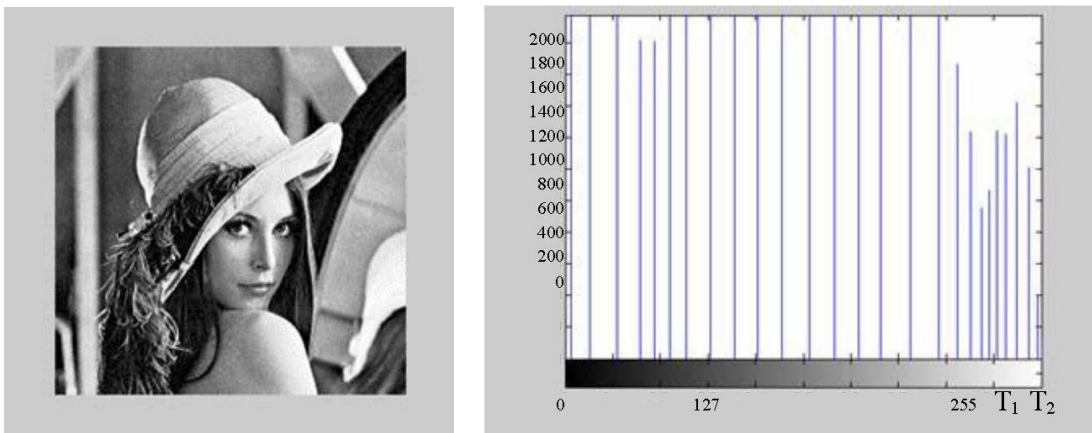


Рисунок 3.14 – Приклад вирівнювання гістограми зображення, представленого на рис. 3.13: перетворене зображення і його гістограма

Перетворення гістограми можуть бути й нелінійними, наприклад, наближені до кривої будь-якої форми (рис. 3.15).

Визначити бажану гістограму можна різними способами, наприклад обчисливши гістограму зображення-зразка або задавши  $h_z$  у вигляді функції. Якщо функція має вигляд  $h_z = 1/256$  для всіх  $i$ , результатом перетворення буде лінійне вирівнювання гістограми.

### 3.6 Локально-адаптивна обробка зображень

Середню яскравість зображення можна скорегувати глобально: збільшивши її, затемнені ділянки зображення можна зробити більше світлими, а зменшивши – світлі ділянки зображення затемнити. Однак якщо на зображенні присутні й темні, і світлі області, глобальна корекція погіршить візуальне сприйняття зображення. Статистичні характеристики,

необхідні для роботи алгоритмів обробки зображень, оцінюються по самих зображеннях. Якщо характеристики не змінюються по всьому зображенню, можна застосовувати алгоритми обробки з фіксованими параметрами, тобто глобальну обробку. Але в багатьох випадках яскравість, контраст, освітлення, тло не є однорідними. Тому глобальні методи обробки не дають бажаний результат. У таких випадках використовуються адаптивні, тобто перетворення, які підстроюють під локальні характеристики зображення (рис. 3.16).

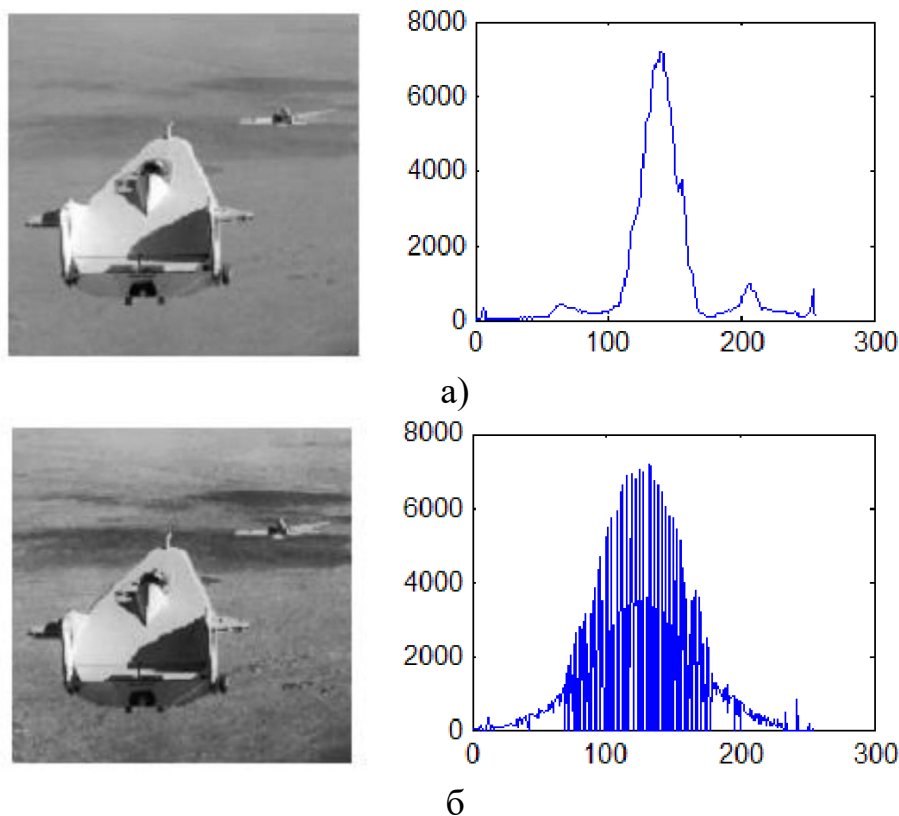


Рисунок 3.15 – Приведення гістограми до розподілу яскравостей за нормальним законом (функція Гауса): а) вихідне зображення і його гістограма; б) результуюче зображення і його гістограма

Найпростіший підхід до побудови адаптивних алгоритмів полягає в розбивці зображення на невеликі непересічні фрагменти, у них обчислюються характеристики й кожен фрагмент обробляється як окреме зображення. Перевагою такого підходу є простота, недоліком – погане стикування частин об'єктів на границях оброблених фрагментів, скачки яскравості.

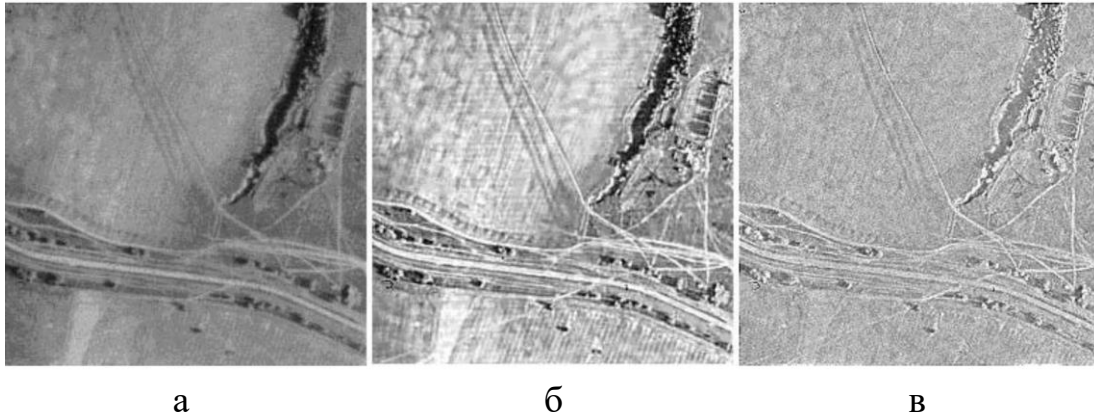


Рисунок 3.16 – Вихідне зображення (а), результати локального (б) і глобального (в) контрастування вихідного зображення

Для зниження небажаних ефектів на краях оцінки локальних характеристик обчислюють у пересічних фрагментах. У граничному випадку ці оцінки обчислюються й використовуються для корекції єдиного пікселя в центрі фрагмента. Це обробка методом «ковзного вікна», центр якого проходить всі пікселі вихідного зображення. Вона ставиться до перетворень локального типу.

Відзначимо, що значення параметрів  $\sigma$  і  $L_{loc}$  – залежать від розмірів і форми околиці пікселя, що робить цей метод адаптивним. Локальні зміни збільшуються за рахунок множення різниці між значенням яскравості пікселя вихідного зображення  $L_{in}(i, j)$  і локальним середнім  $\bar{L}_{loc}(i, j)$  на  $k \frac{\bar{L}}{\sigma(i, j)}$ .

Середньоквадратичне відхилення буде менше в малоконтрастних околицях і більше на околицях з більш високим контрастом, тому ділянки з низьким контрастом будуть мати більше посилення, чим ділянки з більшим контрастом. Доцільно обмежувати діапазон значень множника  $k \frac{\bar{L}}{\sigma(i, j)}$  щоб уникнути більших відхилень інтенсивностей на окремих ділянках.

На рис. 3.17 представлені результати адаптивного підвищення контрасту. Зменшення розміру локального вікна  $m$  приводить до збільшення детальності обробки. Зменшення коефіцієнта  $k$  приводить до усунення різких перепадів на зображенні й зниженню його контрастності. Таким чином, використовуючи різні значення параметрів  $m$  й  $k$ , можна управляти рівнем контрастності й детальності обробки зображень.





а

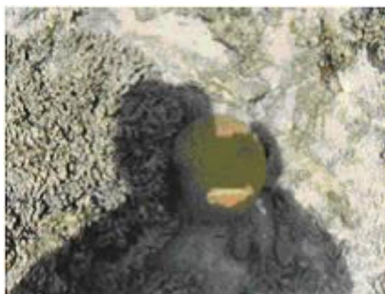
б

в

Рисунок 3.17 – Результати обробки зображення, отримані з використанням формули (5.5): а) вихідне зображення; б) результуюче зображення при  $k = 0,7, m = 35$ ; в) при  $k = 0,3, m = 35$

*Адаптивне перетворення гістограми.*

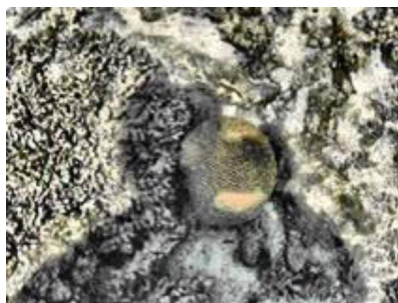
Цю операцію можна виконати аналогічно адаптивному підвищенню контрасту. Вона виконується так само, як і стандартне (глобальне) перетворення гістограми, але застосовується локально, тобто до фрагментів зображення. Наприклад, вирівнювання гістограми можна виконати в кожному вікні (рис. 3.18).



а



б



в

Рисунок 3.18 – Вихідне зображення (а), після глобального вирівнювання гістограми (б), після адаптивного вирівнювання гістограми компоненти  $L$  у просторі  $Lab$  (в), розмір вікна  $8 \times 8$

Основний недолік адаптивних методів обробки – збільшення обсягу обчислень. Для зменшення обчислень використовують рекурсивні процедури корекції статистичних характеристик поточного фрагмента при обчисленні характеристик сусіднього фрагмента. Наприклад, якщо фрагмент має форму прямокутника й у ньому обчислена гістограма яскравостей, при зсуві вправо на один піксель локальна гістограма коректується шляхом віднімання внеску пікселів, що утворюють лівий стовпець поточного фрагмента, і додавання пікселів, що утворюють правий стовпець сусіднього фрагмента.

### Контрольні запитання

1. Які логічні операції проводять з зображеннями ?
2. В чому полягають яскравісні перетворення зображення ?
3. В чому полягає препарування зображень ?
4. Що таке бінаризація зображення ?
5. Які існують методи обчислення порогу бінаризації ?
6. Для чого проводять лінійне розтягання контрасту зображення ?
7. Які арифметичні операції проводять з зображеннями ?
8. Для чого проводять нелінійну корекцію яскравості зображення ?
9. Що таке соляризація зображення ?
10. Що таке гістограма зображення ?
11. В чому полягає еквалізація гістограми зображення ?
12. В чому полягає нелінійне перетворення гістограми зображення ?
13. В чому полягає локально-адаптивна обробка зображення ?
14. Як здійснюється адаптивне підвищення контрасту зображення ?
15. Як здійснюється адаптивне перетворення гістограми зображення ?

## 4 ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ТИПУ

Цифрові зображення, сформовані різними оптико-електронними системами й зареєстровані різними приймачами, спотворюються під дією перешкод різного характеру. Так, перекручування зображення вносяться всіма компонентами пристрою відображення, починаючи з освітлювальної

системи (наприклад, нерівномірність освітленості предмета). Оптична система вносить перекручування, які називаються абераціями, а електронні приймачі випромінювання, наприклад ПЗЗ-матриці, – електронний шум. Всі перешкоди, внесені в цифрове зображення, прийнято називати шумом. Шум утрудняє як візуальний аналіз зображень людиною, так й їхню автоматичну обробку. Існує багато методів поліпшення зображень, які зменшують вплив шуму, внесеного в процесі формування цифрового зображення.

#### 4.1 Типи шумів

Шум, що з'являється на зображеннях, може бути класифікований різними способами. Він може бути корельований або некорельований, залежний або незалежний від самого реєстрованого сигналу й т.д. Знання щодо системи одержання зображень, візуальний аналіз зашумленого зображення допомагають у побудові моделі шуму й оцінці його статистичних характеристик. Математично певна модель шуму допомагає побудувати оптимальну для даного додатка систему поліпшення зображень.

Найчастіше використовуються наступні моделі шумів на зображеннях.

Під *імпульсним шумом* розуміють перекручування сигналу імпульсами, тобто викидами з дуже більшими позитивними або негативними значеннями й малою тривалістю. При обробці зображень імпульсний шум виникає, наприклад, внаслідок помилок декодування, які приводять до появи чорних і білих крапок на зображенні. Тому його часто називають точковим шумом. Викиди шуму особливо помітні на дуже темних або дуже світлих ділянках зображень.

Імпульсний шум моделюється в такий спосіб. Поява шумового викиду в кожному пікселі  $(i, j)$  зображення має ймовірність  $p$  і не залежить ні від наявності шуму в інших точках зображення, ні від якості вихідного зображення. Значення вихідної яскравості пікселя замінюється новим значенням  $d$  (від 0 до 255). Нехай  $\{x_{i,j}\}$  – перекручене зображення. Тоді

$$x_{i,j} = \begin{cases} d & \text{з вірогідністю } p \\ s_{i,j} & \text{з вірогідністю } (1 - p) \end{cases}$$

де  $s_{i,j}$  – значення яскравості вихідного зображення. Якщо нове значення  $d = 0$ , то вносяться чорні значення яскравості (шум типу «перець»), якщо  $d =$

255 – білі значення яскравості (шум типу «сіль»).

Параметр  $d$  може також приймати випадкові значення. Передбачається, що вони є незалежними випадковими величинами з гаусовим розподілом на інтервалі  $[0, 255]$ . Видалення такого шуму представляє більше складне завдання.

*Гаусів шум* (називаний також нормальним шумом) виникає на зображенні в результаті прояву таких факторів, як шум в електричних колах, шум сенсорів (через недолік висвітлення й/або високу температуру). Модель цього шуму широко застосовується при фільтрації зображень і сигналів, оскільки припускає незалежність і нульове математичне очікування перешкод.

Функція щільності розподілу ймовірностей гаусової випадкової величини  $z$  задається наступним вираженням (рис. 4.1):

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(z-\mu)^2 / 2\sigma^2},$$

де  $z$  визначає рівень яскравості із всіх можливих значень для зображення (наприклад, для восьмибітового зображення  $0 < z < 255$ );  $\mu$  – середнє значення (математичне очікування) випадкової величини  $z$ ;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення.

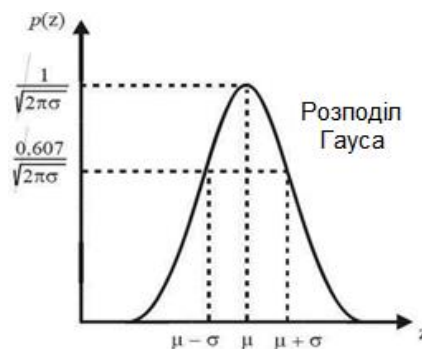


Рисунок 4.1 – Функція щільності розподілу ймовірностей гаусової випадкової величини  $z$  у формі дзвона

Величина, яка дорівнює квадрату середньоквадратичного відхилення, називається дисперсією  $\sigma^2$  і визначає потужність внесеного шуму.

Таким чином,  $p(x)$  визначає ймовірність того, що значення поточного

відліку шуму буде мати яскравість, рівну  $z$ . Якщо випадкова величина  $z$  описується функцією Гауса, то приблизно 67 % її значень зосереджено в діапазоні  $[(\mu - \sigma), (\mu + \sigma)]$  і близько 96% у діапазоні  $[(\mu - 2\sigma), (\mu + 2\sigma)]$ .

*Шум квантування* залежить від сигналу й обраного кроку квантування значень сигналу. Наприклад, у результаті бінаризації яскравість зображення описується двома значеннями, що відповідають чорному й білому кольорам. Такий шум може робити небажані артефакти, наприклад помилкові контури навколо об'єктів, або забирати низько контрастні деталі на зображенні. Він не усувається.

*Спекл-шум*, як і у всіх сканувальних системах з когерентним формуванням зображення, викликається енергетичними перешкодами через безладно розподілені відбивачі сигналу, занадто дрібних для того, щоб їх могла відобразити система. Це клас шумів, які залежать від самого сигналу зображення. Для об'єктів з низьким відрізненням звичайно є мультиплікативним. Спекл-шум з'являється при одержанні цифрових зображень за допомогою ультразвукових медичних сканерів і радарів. У результаті зображення виглядає «зернистим», а на радарних зображеннях з'являються перекручування у вигляді світлих хрестів.

*Адитивний шум* описується співвідношенням

$$g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y),$$

де  $f(x, y)$  – вихідне зображення;  $g(x, y)$  – зашумлене зображення;  $\eta(x, y)$  – адитивний і не залежний від сигналу шум з гаусовим або іншим розподілом функції щільності ймовірності.

*Мультиплікативний шум* описується співвідношенням

$$g(x, y) = f(x, y) \cdot \eta(x, y),$$

тобто шумова складова множить прийнятий сигнал. Прикладами такого шуму є: зернистість фотоплівки; зображення, які одержані за допомогою ультразвуку; радіолокаційні зображення.

## 4.2 Фільтрація зображень

Ослаблення перешкод досягається фільтрацією. Для цього зображення описується двомірною функцією, значення якої змінюються

повільніше, ніж значення двомірної функції, що описує шум. Різноманіття методів фільтрації зображень пов'язане з розмаїтістю математичних моделей сигналів, перешкод і критеріїв оптимальності фільтрації. Фільтрація проводиться в просторовій або частотній областях. Так, у частотній області зображення повинне бути перетворене в частотне подання, наприклад, за допомогою перетворення Фур'є, що відноситься до перетворень глобального типу.

Розглянемо основні методи поліпшення зображень у просторовій області на прикладі напівтонових зображень.

Перетворення, які для обчислення значення яскравості одного пікселя враховують значення пікселів у деякій околиці, називають *локальними*, а околиця – *вікном*. Форма й розміри вікна можуть бути довільними, положення центра вікна також може бути будь-яким, але для зручності обчислення частіше використовують прямокутні вікна.

Часто в операціях використовують значення деякої матриці, яка має ті ж розміри, що й околиця. Таку матрицю називають *маскою*, *фільтром*, *ядром фільтра*, а значення елементів матриці – коефіцієнтами. При лінійній фільтрації зображень форма й розмір використовуваної околиці визначають маску фільтра. *Маска фільтра* – це матриця вагових коефіцієнтів. Центр маски сполучається з аналізованим пікселем, її коефіцієнти множаться на значення яскравості пікселів, накритих маскою. На практиці в основному використовують маски симетричної форми, центри яких збігаються із центром околиці, тобто маски. Розповсюдженим видом околиці є квадрат розміром  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$  і т.п.

Фільтрація зображення  $f(x, y)$ , яке має розміри  $M \times N$ , за допомогою маски розмірами  $m \times n$  описується формулою

$$g(x, y) = \sum_s \sum_t w(s, t) f(x + s, y + t)$$

де  $s$  й  $t$  – координати елементів маски відносно до її центра (у центрі  $s=t=0$ ). Такого роду *перетворення називаються лінійними* і їх можна виконати за допомогою *операції згортки* (схематично ця операція надана на рис. 4.2).

Нехай  $f$  – функція яскравості зображення, а  $g$  – маска фільтра. Операція згортки зображення  $f$  за допомогою  $g$  позначається як  $f * g$  й описується в такий спосіб:

$$(f * g)(m, n) = \sum_{k, l} f(m - k, n - l) g(k, l) \quad (4.1)$$

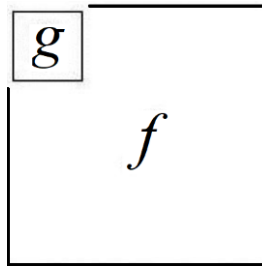


Рисунок 4.2 – Операція згортки зображення  $f$  з маскою  $g$

Якщо маска не симетрична, то її треба перетворити симетрично відносно її ж центра, а потім виконати множення за формулою (4.1).

Ідея фільтрації зображення ґрунтується на інтегральному використанні яскравості пікселів, що потрапили в задане вікно, з урахуванням коефіцієнтів маски фільтра (рис. 4.3).

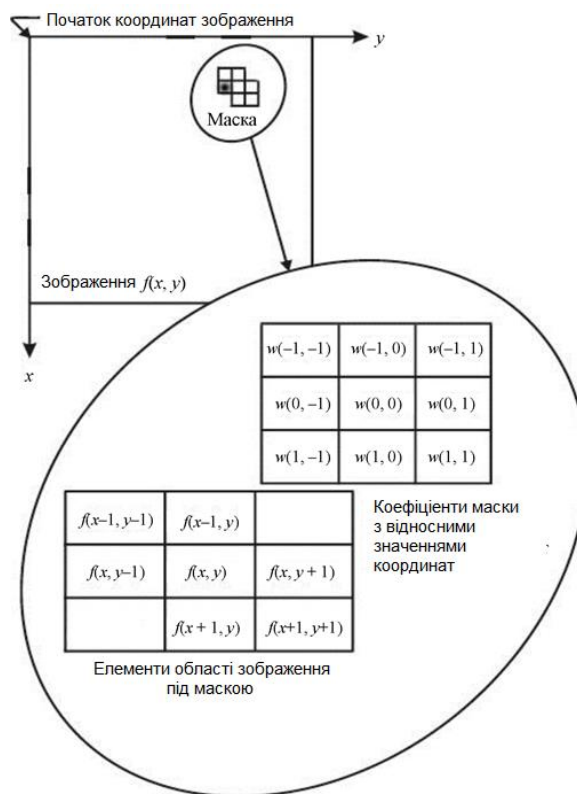


Рисунок 4.3 – Зображення, вікно фільтра, накладене на піксель (показаний темними кольорами), коефіцієнти ядра фільтра (причому  $w(1, -1) = w(-1, 1) = 0$ ), значення яскравості пікселів, які потрапили у вікно

У цьому складається головна відмінність фільтрації від розглянутих вище операцій обробки зображень точкового типу: фільтрація є процедурою обробки зображень локального типу. Після обчислення нового значення яскравості пікселя вікно, у якому описана маска фільтра, зсувається й обчислюється яскравість наступного пікселя. Тому подібне перетворення називають *фільтрацією в ковзному вікні*.

При реалізації операцій просторової фільтрації у вікні виникає невизначена ситуація, коли центр вікна близький до границі зображення й кілька елементів маски перебувають поза зображенням. Існує три способи, що враховують цю обставину:

- 1) обмеження переміщення центра вікна по зображенню (тобто не виходити вікном за краї зображення);
- 2) розширення зображення шляхом додавання рядків і стовпців з нульовими значеннями;
- 3) розширення зображення, повторюючи рядки й стовпці зображення симетрично границі.

Після обробки додані рядки й стовпці видаляються. Це дозволяє одержати оброблене зображення розміром з вихідне. Варто пам'ятати, що значення пікселів, які використалися для розширення зображення, впливають на результат фільтрації пікселя усередині граничної смуги, ширина якої залежить від розмірів околиці, використовуваної при фільтрації. Якщо околиця має розміри  $5 \times 5$  пікселів, то з кожної сторони додаються по два рядка і стовпця.

### **4.3 Низькочастотні фільтри**

*Низькочастотні просторові фільтри* залишають низькочастотні компоненти зображення (області із плавними змінами яскравості) недоторканими й послабляють високочастотні компоненти. Такі фільтри використовуються для зниження шуму, що втримується в зображенні, а також для видалення високочастотних компонентів із зображення для того, щоб можна було ретельніше досліджувати зміст низькочастотних компонентів. Результатом низькочастотної фільтрації є розмиття зображення. Відмітні ознаки низькочастотних фільтрів: не негативні коефіцієнти маски; сума всіх коефіцієнтів дорівнює одиниці.

Приклади ядер низькочастотних фільтрів:



$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Розглянемо основні варіанти низькочастотних фільтрів. Вони реалізуються лінійними операціями локального типу.

Більшу групу низькочастотних фільтрів становлять *усереднювальні (або що згладжувальні) фільтри*. В усереднювальних фільтрах застосовують різні способи знаходження середнього значення яскравості в околиці. Розрізняють арифметичні, геометричні, гармонійні й контргармонійні усереднювальні фільтри.

*Арифметичний усереднювальний фільтр* або усереднювальний *бох-фільтр* усереднюють значення яскравості пікселя по околиці шляхом використання маски з однаковими коефіцієнтами, наприклад, для маски розміром  $3 \times 3$  коефіцієнти рівні  $1/9$ , при  $5 \times 5$  –  $1/25$ . Таке нормування необхідне для того, щоб привести значення результату фільтрації до діапазону яскравості вихідного зображення. Графічне подання двомірної функції, що описує маску цього фільтра, схоже на коробку або паралелепіпед, звідси й англійська назва – *бох-фільтр*:

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N g(i, j) \quad (4.2)$$

де  $f(x, y)$  – значення пікселя вихідного зображення;  $g(i, j)$  – поточне значення пікселя вихідного зображення, що відповідає центру маски;  $M$  й  $N$  – ширина й висота маски відповідно.

Ця операція аналогічна операції лінійної фільтрації з коефіцієнтами маски, рівними  $1/(MN)$ . З формули (4.2) витікає, що арифметичний метод усереднення є частковим випадком алгоритму лінійної згортки й може застосовуватися для усунення високочастотних перешкод і згладжування зображень. Алгоритм арифметичного усереднення ефективний лише для слабо зашумлених зображень.

*Геометричний усереднювальний фільтр*. Геометричне усереднення може бути записане у вигляді наступної формули:

$$f(x, y) = \left[ \prod_{i=0}^M \prod_{j=0}^N g(i, j) \right]^{\frac{1}{MN}}.$$

При такому усередненні відбувається згладжування зображення,

аналогічне арифметичному усередненню, спостерігається погіршення різкості, властиве всім фільтрам із цього класу, але окремі об'єкти вихідного зображення спотворюються менше. Цей фільтр так само, як і усереднювальний арифметичний, може використовуватися для придушення високочастотного адитивного шуму, маючи при цьому кращі статистичні характеристики, хоча нові значення яскравості довше обчислюються.

*Гармонійний усереднювальний фільтр.* Фільтр на базі гармонійного усереднення ґрунтується на виразі

$$f(x, y) = \frac{MN}{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \frac{1}{g(i, j)}}.$$

Даний фільтр добре працює з імпульсними шумами типу «сіть» (білими крапками) і не працює із шумами типу «перець».

*Контргармонічний усереднювальний фільтр* являє собою узагальнення арифметичного й гармонійного усереднень. Цей фільтр міняє яскравість пікселя відповідно до функції

$$f(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N g(i, j)^{Q+1}}{M \cdot N \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N g(i, j)^Q},$$

де  $Q$  – порядок фільтра.

Контргармонічний фільтр ідеально підходить для зменшення або повного усунення імпульсних шумів типу «соль-і-перець», причому при додатних значеннях  $Q$  придушуються шуми «перець», а при від'ємних – «сіть». Однак одночасне видалення біполярного імпульсного шуму (білих і чорних крапок) неможливо. При  $Q = 0$  контргармонічний фільтр перетворюється в арифметичний, а при  $Q = -1$  – у гармонійний, тому даний фільтр можна вважати узагальненим фільтром із класу усереднювальних.

*Фільтр Гауса.* При завданні фільтрів можна використовувати маски з різними ваговими коефіцієнтами (рис. 6.3). Логічно припустити, що пікселі, розташовані ближче до аналізованого пікселя, впливають на яскравість обчислювану в процесі фільтрації. До такого типу фільтрів відносять фільтри, значення ваг яких описуються дзвоноподібною функцією Гауса

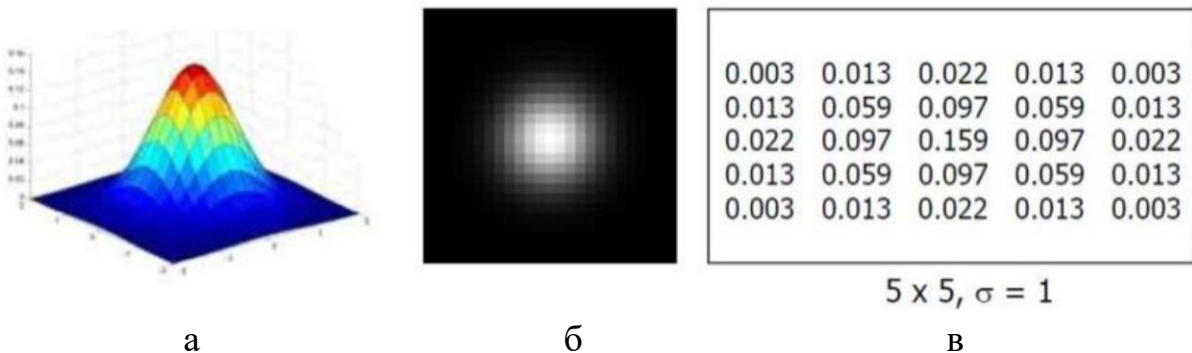
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

де  $\mu$  – координата центральної крапки;  $\sigma$  – дійсна константа, яка визначає ширину дзвона.

При фільтрації зображень використовується двовимірний фільтр Гауса

$$G_{\sigma} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}.$$

Інші варіанти подання цієї функції наведені на рис. 4.4.



а

б

в

Рисунок 4.4 – Різні подання функції Гауса у вигляді:

а) поверхні; б) напівтонового зображення; в) маски з коефіцієнтами

Чим більше  $\sigma$ , тим більше розмивається зображення при застосуванні фільтра. Значення даного параметра варто вибирати залежно від того, наскільки сильно необхідно розмити зображення. Звичайно радіус фільтра  $r$  вибирається рівним  $3\sigma$ . При цьому розмір маски дорівнює  $2r+1$ , тобто вона описується матрицею розміром  $(6\sigma+1) \times (6\sigma+1)$ . За межами цієї околиці значення функції Гауса будуть дорівнюють нулю або нехтувано малі.

Фільтр Гауса має важливі властивості:

1) є сепарабельним (роздільним). Це значить, що двовимірна функція Гауса може бути представлена у вигляді добутку двох одновимірних функцій:

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)\right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)\right)$$

що дозволяє знизити кількість обчислень із  $(2r+1)^2$  до  $2(2r+1)$  на кожен піксель, тобто приблизно в  $r$  раз, де  $(2r+1)$  – розмір маски;

2) згортка, виконана два рази з маскою фільтром радіуса  $r$ , дає той же результат, що й з маскою радіуса  $r\sqrt{2}$

#### 4.4 Високочастотні фільтри

*Високочастотні фільтри* використовуються для виділення перепадів яскравості. На їхній базі будуються алгоритми підкреслення границь і виділення невеликих об'єктів. Вони підсилюють різкі перепади на зображенні, у той же час як плавні придушуються. Після обробки високочастотним фільтром зображення стає більше різким.

Основний клас високочастотних фільтрів виділяє краї. Крайовим називається піксель, у якому різко змінюється локальна яскравість зображення. Методи виділення таких пікселів називають детекторами краю. Їхня зв'язна сукупність утворює границі об'єктів, представлених на зображенні. На зображенні можна виділити два основних типи країв: у вигляді сходинок (або ската) і у вигляді даху (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Основні типи країв

Як правило, різку зміну яскравості можна визначити, аналізуючи першу похідну функції яскравості (рис. 4.6). Похідна характеризує величину градієнта. Границя об'єкта на зображенні звичайно перпендикулярна вектору градієнта.

Для обчислення похідної застосовують високочастотні фільтри, які апроксимують обчислення похідних за напрямом. При цьому  $\Delta x$  дорівнює одиниці або двом. У масках високочастотних фільтрів частина коефіцієнтів має негативні значення, але сума всіх коефіцієнтів маски дорівнює нулю, що означає обчислення різниці значень яскравості сусідніх пікселів. Для прискорення обчислень всі коефіцієнти, як правило, цілочисельні.

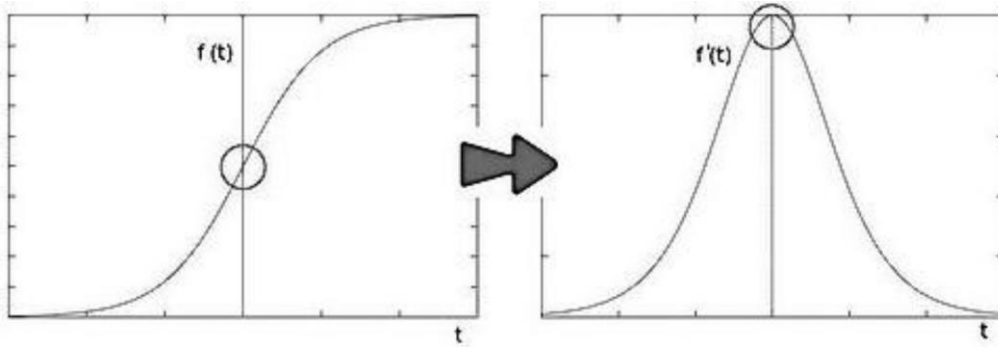


Рисунок 4.6 – Функція яскравості і її перша похідна, максимум похідної відповідає краю

*Фільтр Робертса.* Метод Робертса є найпростішим, швидким і досить ефективним. Він працює з найменшими можливими масками розміром  $2 \times 2$  (рис. 4.7).

У результаті згортки зображення з масками фільтра Робертса одержуємо оцінку градієнта (перепаду яскравості) за напрямками  $G_x$ ,  $G_y$ . Модуль градієнта (максимум перепаду) всіх детекторів краю обчислюється за формулою  $G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$  або спрощено  $G = |G_x| + |G_y|$ . Напрямок градієнта, тобто максимального перепаду яскравості, обчислюється за формулою  $\arctg(G_y/G_x)$ .

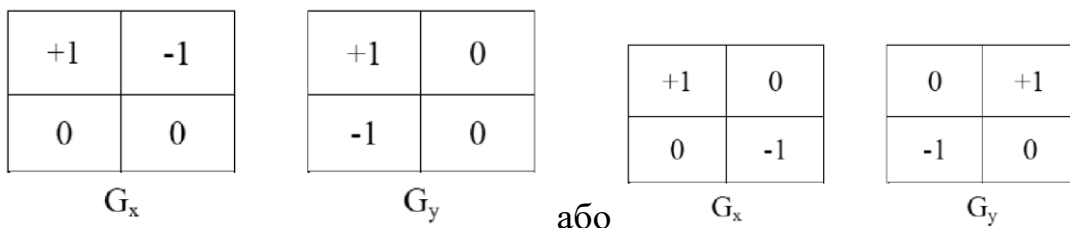


Рисунок 4.7 – Маски фільтра Робертса для обчислення похідних по X і по Y

*Фільтр Превіта.* Метод Превіта пропонує дві ортогональні матриці (маски Превіта) розмірністю  $3 \times 3$  для більш точного обчислення похідних по X і по Y:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}.$$

*Фільтр Собела* використовує різні ваги в масках. Класичним

варіантом цього фільтра є маски

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

*Фільтр Лапласа.* Попередні фільтри використовували апроксимацію першої похідної по осі  $X$  і по осі  $Y$ . У фільтрі Лапласа застосовується апроксимація других похідних по цих осях (рис. 4.8).

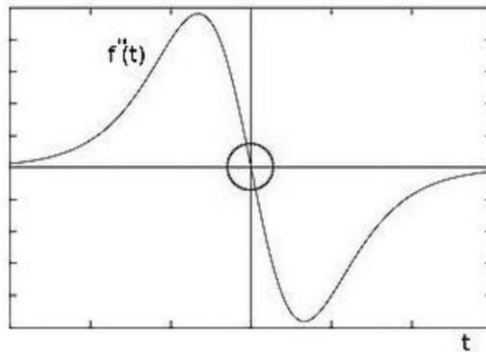


Рисунок 4.8 – Друга похідна функції яскравості міняє знак (проходить через нуль у точці, яка відповідає краю)

У цьому випадку градієнт обчислюється незалежно від напрямку й границі виділяються точніше, ніж у попередніх методах. Лапласіан від функції  $f(x, y)$  – це сума других похідних

$$L(f(x, y)) = \frac{d^2 f}{dx^2} + \frac{d^2 f}{dy^2}$$

Для дискретних функцій другі похідні можуть бути апроксимовані в такий спосіб:

$$L(f(x, y)) = [(f(x, y) - f(x - 1, y)) - (f(x + 1, y) - f(x, y))] + [(f(x, y) - f(x, y - 1)) - (f(x, y + 1) - f(x, y))] = -f(x, y - 1) - f(x - 1, y) - f(x, y + 1) - f(x, y - 1) + 4f(x, y).$$

Даний вираз дозволяє реалізувати фільтр Лапласа за допомогою згортки маски  $w(s, t)$  із зображенням  $f(x, y)$ :

$$w(s,t) = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & +4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

Після згортки близькі до нуля значення відповідають крайовим пікселям. Маска фільтра Лапласа може бути описана й іншими способами із цілочисельними вагами, наприклад:

$$\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix}$$

Виділення країв *методом Кенні*. Мета алгоритму Кенні – більш точне виділення не крайових пікселів, а зв'язних граничних ліній на зображенні (рис. 4.9). Він заснований на використанні двох порогів при аналізі матриці градієнтів. Пороги виділяють сильні й слабкі границі, причому слабкі відзначаються тільки в тих випадках, якщо вони з'єднані із сильними границями.

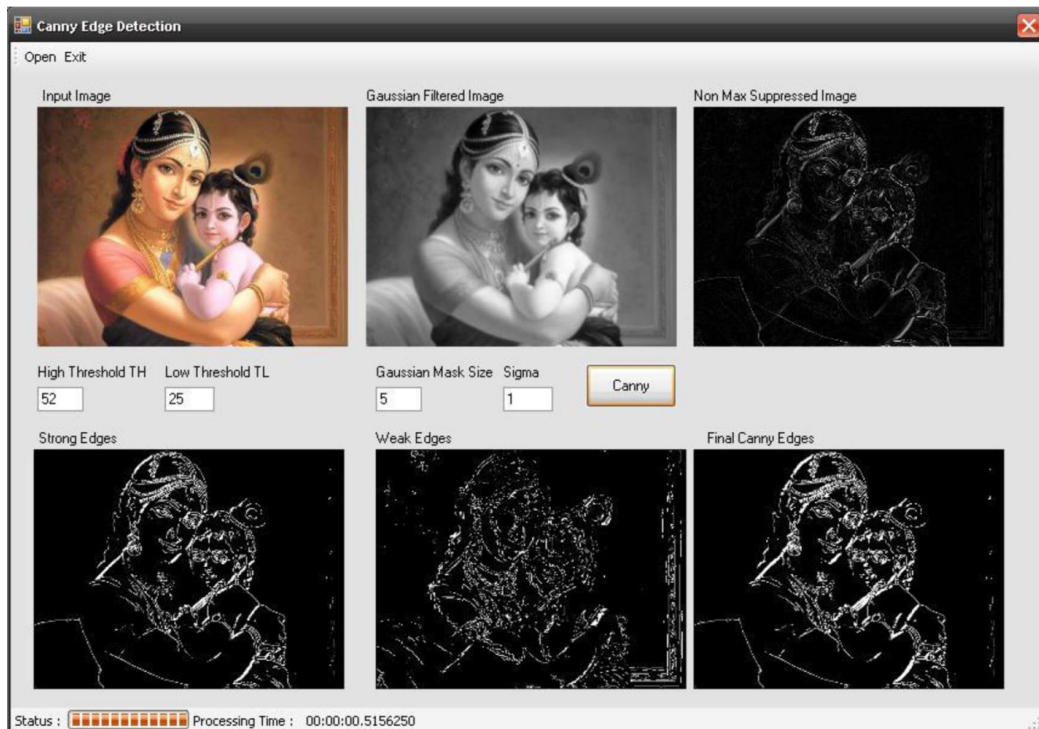


Рисунок 4.9 – Приклад послідовної реалізації алгоритму виділення границь методом Кенні

## 4.5 Нелінійна фільтрація

Низькочастотні методи фільтрації приводять до згладжування різких перепадів яскравості на зображенні. Вони лінійні й оптимальні при гаусовому розподілі перешкод у спостережуваних даних. На реальних зображеннях у районі границь різних об'єктів розподіл яскравості має інший вид. У таких випадках для фільтрації використовують нелінійні методи. Розглянемо їх докладніше.

*Медіанна фільтрація.* Перешкоди у вигляді білих або чорних крапок на зображенні – це шуми імпульсного типу. Лінійні фільтри не усувають їх повністю, а лише локально усереднюють їхнє значення. Шуми такого типу видаляються за допомогою нелінійних фільтрів, наприклад медіанних.

При класичній медіанній фільтрації використовується поняття околиці і її центра, але не задаються вагові коефіцієнти. Околиця може мати довільну форму й розмір, а центр розташовуватися довільно щодо околиці. При сполученні центра околиці з аналізованим пікселем околиця стає вікном, у яке попадає ряд сусідніх із центром пікселів. Значення яскравості пікселів, що потрапили у вікно, сортуються за зростанням, значення середнього в ряді (медіанного) елемента після сортування й буде результатом медіанної фільтрації в даному вікні. Потім вікно зсувається, і процедура повторюється для всіх пікселів вихідного зображення.

На практиці вікно часто має прямокутну форму з непарною кількістю елементів, а його центр розташовується в геометричному центрі. Наприклад, нехай у вікно розміром  $3 \times 3$  потрапили дев'ять пікселів, після сортування їхніх значень у результаті медіанної фільтрації центральний піксель приймає значення 6 (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Медіанна фільтрація у вікні  $3 \times 3$



Оскільки вікно може мати довільну форму, для його опису використовують прямокутну маску, елементи якої містять значення 0 й 1. Безліч одиниць описує вікно потрібної форми. У процесі фільтрації в сортуванні беруть участь тільки пікселі, які відповідають ненульовим елементам такої маски.

Існують алгоритми *зваженої медіанної фільтрації*. У масці, що відповідає вікну такого фільтра, крім 0 й 1 використовуються цілі числа 2, 3 й ін. Вони означають, скільки разів повторити яскравість відповідного пікселя перед сортуванням. Як правило, більші ваги розташовуються ближче до центра вікна для посилення впливу яскравості центральних пікселів на результат. Число значень яскравості  $N$ , які беруть участь у сортуванні, дорівнює сумі ваг маски. Номер медіанного елемента після сортування буде дорівнювати  $(N+1)/2$ .

Медіанний фільтр має наступні властивості:

- несепабельний;
- нелінійний;
- на напівтонових зображеннях не вносить нових значень яскравості, які відсутні у вихідному зображенні;
- якісно видаляє шуми імпульсного типу.

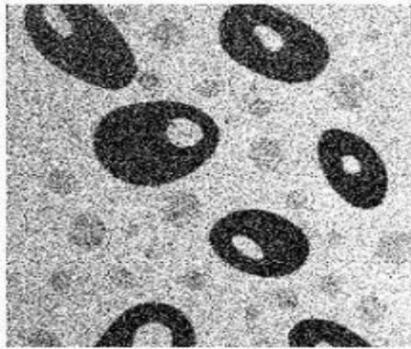
Медіанні фільтри успішно поліпшують відскановані старі паперові фотографії з білими смугами на місці згинів.

На рис. 4.11 наводяться приклади медіанної фільтрації напівтонового, зашумленого гаусовим адитивним шумом з різними розмірами вікна.

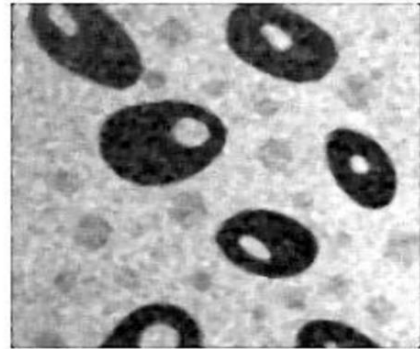
Медіанний фільтр добре справляється зі слабким і середнім ступенем зашумлення, але для придушення більш інтенсивних шумів необхідно використати медіанний фільтр із більшими розмірами вікна фільтрації. Відзначимо, що зі збільшенням розміру вікна росте здатність медіанного фільтра придушувати шумовий компонент. Однак збільшення розмірів вікна фільтра може привести до перекручування обрисів об'єктів. Крім того, малі за розміром об'єкти можуть бути цілком вилучені із зображення. Тому в кожному конкретному випадку параметри фільтра необхідно налаштувати залежно від ступеня перекручувань і характерних розмірів спостережуваних об'єктів. Іноді краще застосувати два рази фільтр із вікном  $3 \times 3$ , чим один раз із вікном  $5 \times 5$  (рис. 4.12).

Результат медіанної фільтрації не чутливий до щільності розподілу шуму. Це пов'язане з тим, що медіанний фільтр із площею вікна  $2M+1$  ефективно придушує шумові пікселі у вікні сумарною площею менш  $M$ . У

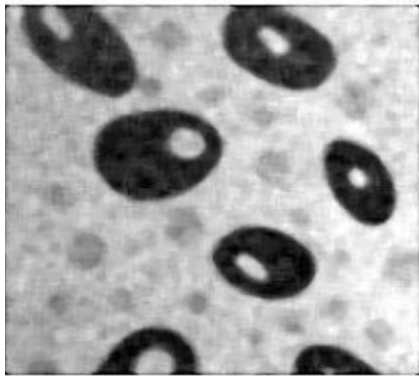
той же час, при фільтрації контрастних великорозмірних об'єктів медіанний фільтр не розмиває й не зміщає їхнього краю (точки перепаду яскравості).



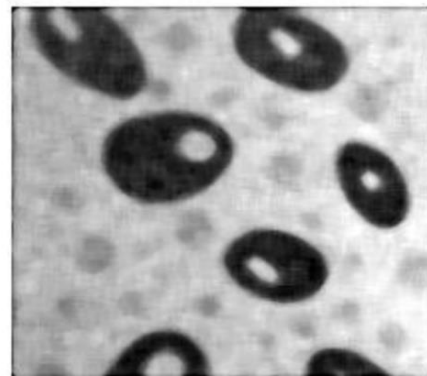
а)



б)

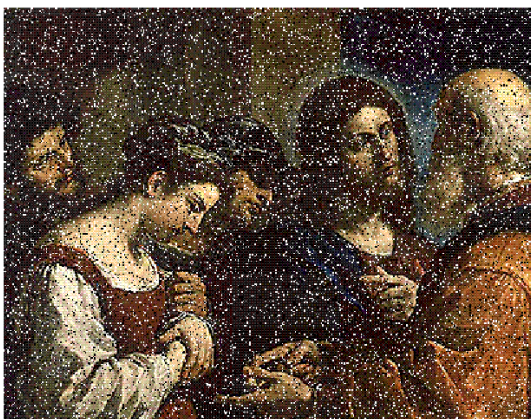


в)

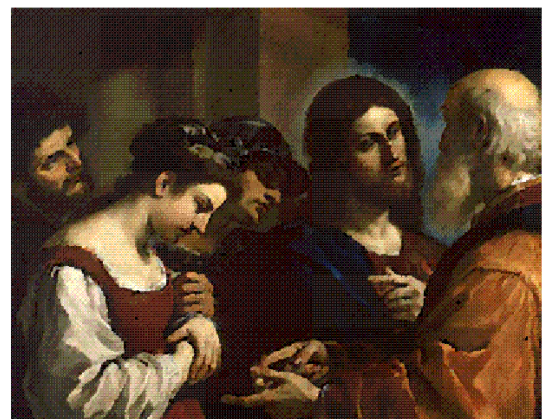


г)

Рисунок 4.11 – Приклади медіанної фільтрації: а) вихідне зображення з гаусовим шумом (сильний ступінь зашумлення); б) результат у вікні  $5 \times 5$ ; в)  $7 \times 7$ ; г)  $9 \times 9$



а)



б)

Рисунок 4.12 – Приклад трикратного застосування медіанного фільтра: а) шум займає 15 % площі зображення; б) відфільтроване зображення

Варіант *адаптивного медіанного фільтра* використовує прямокутне вікно розміром  $S \times S$ . Адаптація складається в збільшенні розміру вікна  $S$  у процесі фільтрації залежно від його локальних статистичних характеристик.

Якщо виявлений імпульсний шум, тоді збільшується розмір вікна й повторюються деякі кроки. Повтор відбувається доти, поки алгоритм не знаходить медіанне значення, яке не є імпульсним шумом, або поки не досягнутий максимальний розмір вікна (рис. 4.13). Якщо це так, то алгоритм повертає вихідне значення. Помітимо, немає гарантії, що це значення не є шумовим імпульсом. Чим менше ймовірність шуму  $p$ , тим вище ймовірність визначення підходящого значення яскравості. Для фільтрації шумів з високою щільністю потрібен більший розмір вікна.

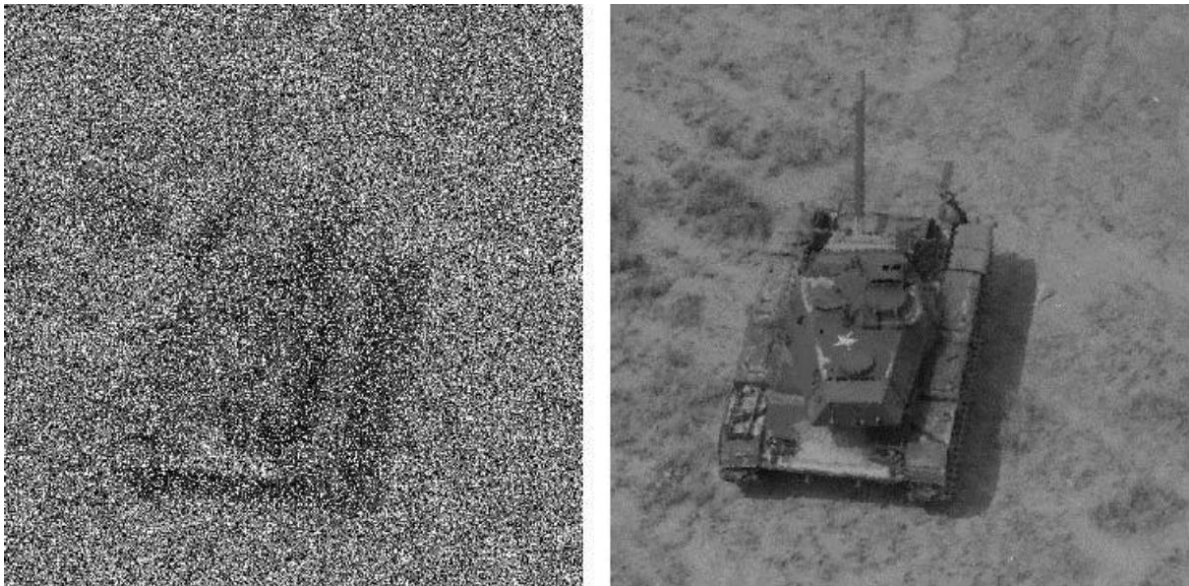


Рисунок 4.13 – Приклад фільтрації адаптивним медіанним фільтром: зображення з імпульсним шумом (ліворуч), результат фільтрації описаним алгоритмом (праворуч)

Таким чином, розглянута модифікація медіанного фільтра переслідує наступні цілі:

- оптимальне видалення імпульсних шумів;
- згладжування інших типів шумів;
- зменшення перекручувань у вигляді втрати дрібних деталей.

Основний недолік адаптивних методів обробки – збільшення обсягу обчислень. Для зменшення обчислень використовують рекурсивні процедури корекції статистичних характеристик поточного фрагмента при

обчисленні характеристик сусіднього фрагмента. Наприклад, якщо фрагмент має форму прямокутника й у ньому обчислена гістограма яскравості й, при зсуві вправо на один піксель локальна гістограма коректується шляхом віднімання внеску пікселів, що утворять лівий стовпець поточного фрагмента, і додавання пікселів, що утворять правий стовпець сусіднього фрагмента.

*Рангова фільтрація.* Медіанний фільтр є частковим випадком класу фільтрів, названих ранговими, або порядковими. Ранговий фільтр порядку  $r$  ( $1 < r < N$ , де  $N$  – число елементів в околиці) вибирає з отриманого ряду елемент із номером  $r$  і привласнює його значення як результат фільтрації пікселя вихідного зображення.

Якщо число  $N$  непарне й  $r = (N + 1)/2$ , фільтр стає медіанним. Якщо  $r = 1$ , фільтр вибирає мінімальне значення яскравості у вікні й називається *min-фільтром*. Якщо  $r = N$ , фільтр вибирає максимальне значення яскравості у вікні й називається *max-фільтром*.

Іноді ранг задається у відсотках. Тоді вибір мінімального значення відповідає 0 %, медіанного – 50 %, а максимального – 100 %.

#### **4.6 Внесення ефектів у зображення**

Одним зі способів обробки зображень є їхня зміна шляхом внесення різних ефектів. Опишемо деякі з них.

*Підвищення різкості зображення.* Якщо до центрального елемента маски Лапласа додати одиницю й виконати згортку зображення з такою маскою, фактично одержимо додавання до вихідного зображення градієнтної інформації. У результаті підвищиться різкість вихідного зображення. Для збільшення контрасту між центральним пікселем і сусідами використовуються від'ємні вагові коефіцієнти.

Приклад маски для збільшення різкості зображення:

$$G = \begin{bmatrix} -0,1 & -0,1 & -0,1 \\ -0,1 & 1,8 & -0,1 \\ -0,1 & -0,1 & -0,1 \end{bmatrix}$$

Сума коефіцієнтів маски дорівнює +1, але може й незначно відрізнятись за рахунок зміни значення центрального елемента маски.

*Створення ефекту тиснення.* Ефект тиснення можна додати

зображенню за допомогою фільтрів

$$T_4 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 \end{vmatrix} \quad T_5 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} \quad T_6 = \begin{vmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & +1 \\ 0 & +1 & 2 \end{vmatrix}$$

Коефіцієнти в масці антисиметричні щодо центра або осі, що проходить через центр, а їхня сума дорівнює нулю.

При зміні знаків у масці фільтра на протилежні змінюється напрямок підсвічування.

*Створення ефекту акварелізації.* У результаті застосування даного фільтра зображення буде виглядати так, начебто воно намальовано аквареллю.

На першому етапі згладжується яскравість редагованого зображення. Можна використати медіанний фільтр або низькочастотний, наприклад, з маскою

$$M = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$

На наступному етапі підвищується різкість переходів отриманого зображення для завершення створення ефекту акварелі, наприклад, високочастотним фільтром з маскою (рис. 4.14)

$$R = \begin{vmatrix} -0,5 & -0,5 & -0,5 \\ -0,5 & 5 & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & -0,5 \end{vmatrix}$$

*Перспективні алгоритми.* Вищезгадані алгоритми не враховують локальних особливостей зображень, і якщо зображення містить дуже темні й дуже світлі ділянки, то вони не можуть забезпечити якісного поліпшення зображення в цих ділянках. Для таких зображень застосовують так називані просунуті алгоритми, наприклад Retinex і його модифікації. Слово Retinex – композиція від слів retina (сітківка) і cortex (кора головного мозку). Едвін Н. Ленд в 1971 р. сформулював теорію ретінекса, що пояснює особливість колірної постійності людського зору, що полягає в тім, що людина сприймає

кольори об'єкта приблизно однаково при зміні кольорів освітлення (апелсин завжди виглядає жовтогарячим). Він же запропонував однойменний алгоритм Retinex і запатентував його (патент належить NASA).



Рисунок 4.14 – До вихідного зображення (ліворуч) застосували медіанний фільтр у вікні  $5 \times 5$  і згортку з маскою  $R$ ; результуюче зображення праворуч

Алгоритм Single-Scale Retinex (SSR) вирівнює освітленість зображення, зберігаючи локальний контраст у погано освітлених і яскраво освітлених областях (рис. 4.15). Корекція зображення  $I$  виконується за формулою

$$R(x, y, \sigma) = \log [I(x,y)] - \log [I(x,y)*G(x,y,\sigma)], \quad (4.3)$$

де  $G$  – гаусіан;  $\sigma$  – параметр розмиття;  $*$  – оператор згортки.



Рисунок 4.15 – Приклад застосування алгоритму Single-Scale Retinex при  $\sigma = 18$ : вихідне зображення (ліворуч), результат (праворуч)

Після застосування формули (4.3) більшість значень  $R$  перебуває в

діапазоні  $[-1; 1]$ . Для візуалізації  $R$  його значення необхідно перетворити в діапазон  $[0...255]$  і округлити до цілих значень за формулою  $I = \text{Int}(127,5 \cdot (R+1))$ .

Алгоритм SSR можна застосувати до вихідного зображення кілька разів з різними параметрами фільтра Гауса і обчислити зважену суму яскравості кожного пікселя, тоді одержимо алгоритм Multi-Scale Retinex (MSR) (рис. 4.16):

$$MSR = w_1 \cdot SSR_1 + w_2 \cdot SSR_2 + \dots + w_n \cdot SSR_n, w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1.$$

Звичайно  $n$  невелике, три або п'ять.



Рисунок 4.16 – Приклади застосування алгоритму Multi-Scale Retinex для значень  $Q=7, 480, 4\ 800$  (ліворуч) плюс лінійне розтягання контрасту (праворуч)

*Порівняння фільтрів.* Вибір конкретного фільтра і його параметрів залежить від завдання й умов її реалізації, наприклад швидкості обчислень. Арифметичний усереднювальний фільтр крім придушення шуму спотворює різкі границі й розмиває дрібні деталі зображення, але він найшвидший.

Фільтр Гауса менше розмиває дрібні деталі й краще вбирає шум, досить швидкий, якщо коефіцієнти обчислюються один раз.

Медіанний фільтр різких границь не спотворює, забирає дрібні деталі, зображення стає більше однорідним. Якщо маска велика, сортування сповільнює обчислення.

Адаптивний фільтр менше спотворює деталі, але залежить від більшого числа параметрів, які вимагають додаткових обчислень.

Перспективні фільтри краще зберігають деталі й менше розмивають контури на зображенні, але вони часто складні в реалізації й працюють повільніше.

## Контрольні запитання

1. Що таке імпульсний шум ?
2. Що таке шум типу «сіть» ?
3. Що таке шум типу «перець» ?
4. Що таке адитивний шум ?
5. Що таке гаусів шум ?
6. Що таке мультиплікативний шум ?
7. Що таке шум квантування ?
8. Що таке спекл-шум шум ?
9. Що таке глобальне перетворення зображення ?
10. Що таке локальне перетворення зображення ?
11. Що таке фільтр зображення ?
12. В чому полягає фільтрація зображення в ковзному вікні ?
13. Яку функцію виконує низькочастотний фільтр ?
14. Які існують види низькочастотних фільтрів ?
15. Яку функцію виконує високочастотний фільтр ?
16. Які існують види високочастотних фільтрів ?
17. Для чого призначається нелінійна фільтрація ?
18. Що таке медіанний фільтр зображення ?
19. В чому полягає адаптивна медіанна фільтрація ?
20. Які ефекти можуть вноситися у зображення ?

## 5 ЦИФРОВА ОБРОБКА КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

### 5.1 Особливості зображень на космічних знімках у різних ділянках спектра

Дешифрування космічних знімків, отриманих у різних діапазонах, відрізняються один від одного, як за формою, так і за змістом. Різний підхід до дешифрування знімків, у першу чергу, визначається відмінністю фізичних основ їх одержання.

*Видима ділянка спектра.* Основними об'єктами простежування із



спутників у видимій ділянці спектра є хмари та відкриті ділянки земної поверхні на освітленій стороні Землі.

Можливість виявлення хмарності на фоні підстильної поверхні полягає в їхній різній здатності відбивати падаючу на них пряму та розсіяну радіацію, завдяки чому на знімках, отриманих у видимій ділянці спектра, вони характеризуються різною яскравістю.

У свою чергу, яскравість поверхні об'єкта визначається інтенсивністю відбитого світлового потоку і залежить від його освітленості та коефіцієнта відбиття. Яскравість поверхні об'єктів, які мають однакові відбивні властивості, зростає при збільшенні освітленості і слабшає при її зменшенні. Природно, що яскравість об'єктів з різними відбивними властивостями різна при одній і тій же освітленості. Найважливішим фактором, що визначає освітленість поверхні об'єкта, є висота Сонця. Залежно від зміни висоти Сонця суттєво змінюється і освітленість поверхні. Серед інших не менш важливих факторів, які впливають на освітленість, необхідно вказати на прозорість атмосфери, на нахил поверхні, її шорсткість і ін.

Наявність в атмосфері аерозолів у вигляді крапель води, кристаликів льоду, пилу, димових часток і ін., помітно впливає на прозорість атмосфери. Зі збільшенням вмісту аерозолів зменшується освітленість прямим і зростає освітленість розсіяним світлом. Оскільки атмосфера практично завжди замутнена, то при низькому положенні Сонця відбуваються істотні втрати в загальній освітленості горизонтальної поверхні.

Верхня межа хмар, як це показують результати літакового зондування, нечасто буває однорідною по висоті. Тут можуть спостерігатися у вигляді величезних утворень потужні купчасті і купчасто-дощові хмари, які піднімаються, вертикальна протяжність яких декілька кілометрів, а горизонтальні розміри 10...15 км і більше. Обернені до Сонця похилі ділянки хмарного покриву і особливо бічні поверхні потужних купчастих і купчасто-дощових хмар на знімках, отриманих у видимій ділянці спектра, виглядають більш яскравими, ніж горизонтальні поверхні з такими ж відбивними властивостями.

Нерівність (шорсткість) верхньої межі суцільного хмарного покриву і відкритих ділянок поверхні приводить до створення великої кількості тіней. Кількість тіней визначається шорсткістю поверхні та кутом падіння сонячних променів. Чим більше шорсткість поверхні і менше кут падіння сонячних променів, тим більша кількість тіней може бути виявлена на знімку. У якості параметра, який характеризує здатність об'єкта відбивати

падаючу на нього радіацію, використовується коефіцієнт відбиття, або альbedo. Відомо, що альbedo різне для різних довжин хвиль падаючої радіації.

Установлено, що відбивні властивості хмар тісно пов'язані з їхньою поглинальною здатністю і пропущенням прямої і розсіяної сонячної радіації, а також з відбивною здатністю підстильної поверхні, яка перебуває під хмарами. Альbedo хмар в основному визначається їхньою вертикальною потужністю, водністю, фазовим станом, висотою Сонця. У табл. 5.1 наведені середні значення альbedo різних хмар, виміряні по зображеннях, отриманих у видимій ділянці спектра.

Таблиця 5.1 – Середнє альbedo різних хмар, виміряне по зображеннях, отриманих у видимій ділянці спектра (хмарами закрито більше 80% виділеної площі)

Форма хмар	A, %
Купчасті гарної погоди над сушею	29
Пір'ясто-шаруваті над сушею	32
Пір'ясті над сушею	36
Шаруваті (тонкі)	42
Масиви шарувато-купчастих (усередині суцільного хмарногопокриву над океаном)	60
Шаруваті (потужні)	64
Шарувато-купчасті (значні над сушею)	68
Купчасті і шарувато-купчасті (значні над сушею)	69
Пір'ясто-шаруваті (потужні, з хмарністю та опадами, що пролягають нижче)	74
Купчасто-дощові (дрібні, вершини на висоті 6 км)	86
Купчасто-дощові (великі і потужні)	92

Таким чином, у відповідності із середніми значеннями альbedo (і зі зростаючими значеннями водності), по відбивних характеристиках хмари можна розташувати в наступному порядку:

- пір'ясті,
- шаруваті,
- шарувато-купчасті та купчасті,
- купчасто-дощові.

На відміну від хмар об'єкти земної поверхні звичайно не відбивають помітної кількості радіації зі своїх внутрішніх областей у вигляді розсіяного світла.

Порівняльний аналіз альбедо хмар (табл. 5.1) та підстильної поверхні (табл. 5.2) показує, що розбіжності між ними коливаються в широких межах. Якщо альбедо хмар нижнього ярусу в середньому перевищує альбедо підстильної поверхні на 50...60 %, то значення цього параметра у хмар верхнього ярусу в середньому відрізняється від альбедо підстильної поверхні, порівняно мало, на 19...20%. Найменша відмінність (2...8%) між альбедо хмар верхнього ярусу підстильної поверхні, при великих висотах Сонця.

Таблиця 5.2 – Альбедо різних видів підстильної поверхні

Вид підстильної поверхні	A, %
Водна поверхня	2...6
Чорнозем	11
Деревна рослинність	10...18
Хвойний ліс	12
Трав'яний покрив	18...20
Забруднений вологий сніг	20...30
Поверхня глинистої пустелі	29...31
Пісок білий	34...40
Лід (залежно від згуртованості та засніженості)	30...70
Сніг, який щойно випав	80 ( в умовах Арктики 96...98)
Снігова поверхня Антарктиди (середнє значення за рік)	83...84

У зв'язку із цим можуть виникати більші труднощі у виявленні хмар верхнього ярусу над відкритими ділянками поверхні Землі по знімках, отриманих у видимому діапазоні спектра. У тому випадку, коли в хмарному покриві спостерігаються просвіти або розриви, загальне альбедо видимого з штучного супутника Землі (ШСЗ) хмарного покриву зменшується. Якщо хмарний покрив складається із дрібних хмарних елементів, розділених такими ж невеликими просвітами, то при загальному зниженні яскравості просвітина знімку видимого діапазону не виявляються.

**Інфрачервона ділянка спектра.** Поглинання інфрачервоної (ІЧ) радіації водяною парою, вуглекислим газом, озоном і іншими компонентами атмосфери відомо. Установлено, що найбільша прозорість атмосфери спостерігається у вікнах прозорості. На сучасних ШСЗ інфрачервона зйомка проводиться в довгохвильовому вікні прозорості 8...12 мкм. Відомо, що хмари (за винятком тонких шаруватих) непрозорі

для ІЧ променів з довжиною хвилі 8...12 мкм, тому радіометром вимірюється енергія, випромінювана поверхнею Землі в районах, вільних від хмар, або верхньою межею хмарного покриву. Інтенсивність радіації, яка надходить на супутник, вимірюється в межах елементарного кута зору супутника.

Отримані сигнали можуть перераховуватися в значення *еквівалентної температури* для кожного елемента відрізнення або за допомогою особливих пристроїв перетворюватися на зображення випромінюючих поверхонь.

Інфрачервоні зображення виходять завдяки наявності *енергетичних контрастів* між підстильною поверхнею та хмарами, тому ці знімки називаються тепловими. На таких теплових інфрачервоних знімках об'єкти, які мають більш високу температуру й, отже, що випромінюють більшу кількість променистої енергії, мають більш яскравий тон зображення, ніж об'єкти з меншою температурою.

Хмари в більшості випадків мають температуру нижчу, ніж підстильна поверхня, і на стандартних теплових знімках хмарність мала б більш темний тон зображення, ніж підстильна поверхня. Для того щоб наблизити зорове сприйняття теплових знімків до знімків у видимій ділянці спектра у практиці використовують негативні відбитки інфрачервоних знімків. На цих знімках більш холодна хмарність має світлий тон зображення, а тепла підстильна поверхня, – темний тон зображення. Найбільш яскраві ділянки на ІЧ знімках відповідають хмарам, що досягли найбільших висот, і які мають найбільш низьку температуру верхньої границі. Менш яскраві ділянки – відповідають хмарам з більш високою температурою верхньої границі або тонким хмарам верхнього та середнього ярусів і хмарним масивам із просвітами, випромінювання від яких змішується з випромінюванням від земної поверхні.

При потужних приземних інверсіях, які виникають уночі у холодну пору року внаслідок сильного вихолоджування, верхня границя шаруватої хмарності може мати більш високу температуру, ніж підстильна поверхня. У цьому випадку хмари на ІЧ знімках виглядають темніше безхмарного простору, їх прийнято називати чорними шаруватими хмарами.

На ІЧ зображеннях поверхня суші в основному має темно-сірий тон, але внаслідок її температурної неоднорідності виражена різними півтонами. Так, низинні ділянки місцевості за тоном зображення відрізняються від ділянок, розташованих більш високо над рівнем моря.

Наявність великого теплового контрасту між сушею і водною поверхнею дозволяє на знімках розрізняти берегові лінії морів, обриси озер і великих рік, зміну тону водної поверхні залежно від зміни дня і ночі.

**Мікрохвильова ділянка спектра.** Можливість виявлення хмарності нанадвисокочастотних (НВЧ) знімках, так само як і в ГЧ діапазоні, заснована на наявності контрастів, тобто різниці в потоках випромінювання різних об'єктів. Однак наявність цих контрастів на НВЧ зображеннях обумовлена не однією температурою випромінюючих поверхонь, як на ГЧ знімках, а сукупністю багатьох факторів, і, зокрема, коефіцієнта випромінювання.

У зв'язку з тим, що спектральний коефіцієнт випромінювання суші в 2,0...2,5 рази більше коефіцієнта випромінювання морської поверхні, на НВЧ знімках завжди чітко видна границя вода-суша, тобто обриси материків і островів. Суша характеризується яскраво-білим тоном зображення, морська вода (поверхня океану) – темно-сірим. Чітко на знімках видна і границя вода-лід, тому що коефіцієнт випромінювання льоду також значно більше коефіцієнта випромінювання води. У мікрохвильовому діапазоні випромінювання підстильної поверхні поглинається хмарністю лише частково, а власне випромінювання хмар формується у всій їх товщі і залежить, крім середньої температури хмарного шару, від його фізичного стану, зокрема від вмісту в ньому води і її хімічних властивостей. Цей факт має велике значення. Енергетичні контрасти між хмарами та сушею або негативні, або (у випадку потужної хмарності та опадів) близькі до нуля, а між морською поверхнею і хмарами завжди позитивні. Тому хмарні утворення виявляються невидимими на тлі „гарячої” суші і відмінно проглядаються над „холодною” морською поверхнею (при наявності певних енергетичних контрастів).

Оскільки кристалічні хмари прозорі для мікрохвильового випромінювання підстильної поверхні і самі не випромінюють електромагнітну енергію в цьому діапазоні, то на НВЧ знімках вони не видні, яким би щільним і потужним не був їхній шар. Інтенсивність випромінювання атмосфери і хмар, від якої залежить тон їх зображення на НВЧ знімках, на довжині хвилі 0,8 см пропорційна кількості водяної пари та вмісту води в атмосфері. Зі збільшенням вмісту води в атмосфері росте інтенсивність випромінювання. Тому чим більше вертикальна потужність рідинної частини хмари, тим світліше тон його зображення на НВЧ знімку. Самий яскравий тон зображення (за винятком материків) мають хмари, з яких випадають помірні та сильні опади. Ріст радіояскравісних температур

зі збільшенням вмісту води в атмосфері відбувається лише до певної межі, після якої, як би не збільшувався зміст води в атмосфері, зростання радіояскравісних температур припиняється. На довжині хвилі 0,8 см такою межею є значення радіояскравісної температури 255...260 К, яка спостерігається при інтенсивності випадання опадів близько 10 мм за годину.

## 5.2 Етапи і зміст обробки космічних знімків

У задачах вивчення Землі з космосу істотна роль приділяється багатозональним космічним зйомкам. Великий обсяг інформації, який у цьому випадку надходить з ШСЗ, приводить до необхідності створення і розвитку раціональних методів і засобів її обробки. По сучасних представленнях така обробка повинна полягати, принаймні, із **чотирьох етапів**:

- службової обробки,
- просторової прив'язки,
- радіаційної корекції,
- тематичної інтерпретації.

**Службова обробка** повинна полягати у введенні первинної інформації в електронну обчислювальну машину (ЕОМ), її анотуванні та проведенні апаратурних корекцій. Вихідними даними для останніх служать матеріали геометричних і радіометричних калібрувань знімальної апаратури.

У результаті **просторової прив'язки** повинні бути отримані трансформовані в проекцію карти зображення із вдрукованою в них координатною сіткою. Для вивчення динаміки природних утворень необхідні матеріали повторних зйомок з високою точністю просторової прив'язки (до декількох елементів відрізнєння). Одержати таку точність можливо лише на основі спільного використання апріорних даних про траєкторію і орієнтацію ШСЗ і апостеріорних даних про геодезичні координати контурних точок знімків.

**Радіаційна корекція** полягає в трансформації на борті ШСЗ потоку випромінювання до деяких стандартних умов вимірів (наприклад, до однакових умов освітленості на нижній границі атмосфери).

Метою **тематичної інтерпретації** є розпізнавання на зображеннях природних об'єктів або явищ. Тематична обробка у свою чергу може

містити в собі розв'язання задач конструювання нових зображень і їх інтерпретацію. При конструюванні нових зображень доцільні такі операції, як перетворення Фур'є, підкреслення контурів, складання зображень, що є комбінацією вихідних багатозональних зображень, і т.п. Основна мета таких операцій – підвищення образотворчих властивостей знімків.

Зазначені етапи обробки поєднують за змістом робіт в **2 групи**:

1) **попередня обробка** знімків полягає в корекції та покращенні супутникових зображень і містить:

- геометричну корекцію супутникових зображень,
- радіометричне калібрування знімків,
- радіометричну корекцію впливу атмосфери,
- відновлення пропущених пікселів,
- покращення зображення шляхом зміни контрасту,
- фільтрацію та ін.

Слід зазначити, що деякі методи покращення зображень (фільтрація, зміна контрасту) мають на увазі зміну спектральних характеристик знімка, тому після їхнього застосування не можна застосовувати методи тематичної обробки, які засновані на аналізі значень спектральної яскравості пікселів (класифікації, арифметичні перетворення каналів і ін.).

2) **тематична обробка** знімків містить:

- колірні перетворення,
- створення індексних зображень,
- аналіз головних компонентів,
- спектральний поділ,
- класифікацію та ін.

Необхідність *попередньої обробки* визначається особливостями дистанційного зондування.

При проведенні **просторової прив'язки** потрібно виконати операцію геометричної корекції.

**Геометрична корекція** – це усунення на зображенні геометричних викривлень (ортореєктифікація) і, власне, географічна прив'язка. Причин геометричних викривлень існує декілька і діють вони спільно. Для різних типів космічних знімків комбінація цих причин різна.

1) Кривизна поверхні Землі.

- геометричні викривлення знімків, спричинені кривизною поверхні Землі, виходять у результаті того, що точки сканованої місцевості не лежать в одній площині і спостереження ведеться не в надирі, а

під кутом до поверхні Землі. Тому при віддаленні від центральної лінії сканування (де зйомка ведеться в надирі) викривлення форми та розміру об'єктів збільшується. Це призводить до викривлення форми об'єктів. Цим типом викривлення можна знехтувати, якщо кут огляду сканера невеликий,

- викривлення масштабу. Для знімків, зроблених оптико-механічним сканером (MODIS, AVHRR, ETM і MSS–Landsat, Aster (TIR)), масштаб при віддаленні від центральної лінії знімка стає дрібнішим. Тобто, якщо взяти два пікселя знімка: один із центральної області знімка, а другий з бічної, то піксель із бічної області буде містити більшу площу Землі, хоча кутовий розмір їх однаковий. Для знімків, отриманих за допомогою ПЗЗ камери (супутники SPOT, IRS, Ikonos, датчик Aster (VNIR, SVIR)) масштаб при віддаленні від центральної лінії знімка незмінюється.

## 2) Нерівності рельєфу.

Нерівності рельєфу викликають ті ж викривлення, що й кривизна поверхні землі, але задача усунення їх складніше через те, що форми рельєфу складніші, ніж форма Землі, яка близька до сфери. Оскільки космічні знімки роблять із великої висоти, то вплив форм рельєфу незначний, тому даний тип викривлень ураховують лише для гірських областей.

## 3) Обертання Землі.

Оскільки сканування Землі з космосу відбувається не миттєво, як при фотозйомці, то за час сканування сцени обертання Землі викликає зміну умов зйомки ( за 1 хвилину Земля повертається на  $0,25^\circ$ ).

## 4) Рух космічного апарата в процесі формування зображення.

На якість і властивості знімків впливає форма та висота орбіти супутника. Наприклад, кругова орбіта забезпечує однакову висоту зйомки земної поверхні, а, отже, для однієї й тієї ж апаратури – однакове охоплення і відрізнення знімків.

**Радіометричне калібрування знімків.** Знімки, спочатку одержувані із супутників, записані у вигляді так званих „сірих значень” яскравості DN (Digital Number) або, як говорять, у вигляді RAW файлів (raw – сирий). Дані в такому форматі не можна адекватно зіставляти з даними інших зйомок. Завдання радіометричного калібрування полягає в перекладі цих значень у фізичні одиниці. Формула для калібрування багатозональних



знімків в оптичному діапазоні наступна:

$$V^*_{\lambda} = K_{\lambda} D_N + C_{\lambda} \quad (5.1)$$

де  $V^*_{\lambda}$  – енергетична яскравість для спектральної зони  $\lambda$ ;  $D_N$  – „сирі” значення яскравості;  $K_{\lambda}$  – калібрувальний коефіцієнт;  $C_{\lambda}$  – калібрувальна константа, відповідна до мінімальної величини реєстрованої яскравості.

**Радіометрична корекція впливу атмосфери на знімок.** При проходженні через атмосферу електромагнітні хвилі поглинаються та розсіюються. Причиною поглинання і розсіювання є озон, водяна пара, вуглекислий газ, кисень, метан, пил, дим. Хмарність також є перешкодою при зйомці в оптичному діапазоні.

Поглинання, розсіювання і хмарність викликають викривлення значень яскравості пікселів на знімках. Потрібна атмосферна корекція.

Способи атмосферної корекції.

- 1) Хмари та тумани добре видні на тлі води, тому що в червоній та ІЧ ділянках спектра поверхня води за своїми оптичними характеристиками близька до абсолютно чорного тіла. Тому вміст в атмосфері водяної пари і аерозолів (диму) можна оцінити по знімках, які включають ділянки морів і океанів.
- 2) Існують математичні методи побудови моделей стану атмосфери з урахуванням типів розсіювання в атмосфері, пори року, метеорологічних даних. Для уточнення таких моделей використовують наземний вимір відбивної здатності об'єктів під час польоту супутника.

**Відновлення пропущених пікселів.** „Пропущені пікселі” можуть виникнути під час зйомки або передачі даних. Також трапляється заміна значень яскравості цілого рядка значеннями сусіднього рядка. Такі явища можуть стати перешкодою при тематичній обробці знімка. Пропущені пікселі можна відновити шляхом інтерполяції з певною похибкою (рис. 5.1).

При обробці знімків часто **покращують зображення шляхом зміни контрасту.**

Контраст зображення – це різниця між максимальним і мінімальним значеннями яскравості.

Слабкий контраст – найпоширеніший дефект зображень (рис. 5.2).

Операція підвищення контрастності знімка може бути використана при візуальному дешифруванні знімків (наприклад, щоб підкреслити

границі об'єктів).

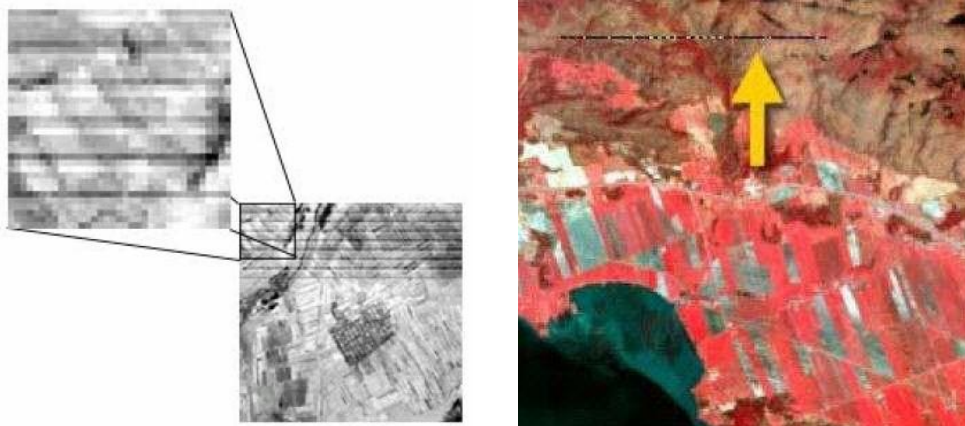


Рисунок 5.1 – Відновлення пропущених пікселів

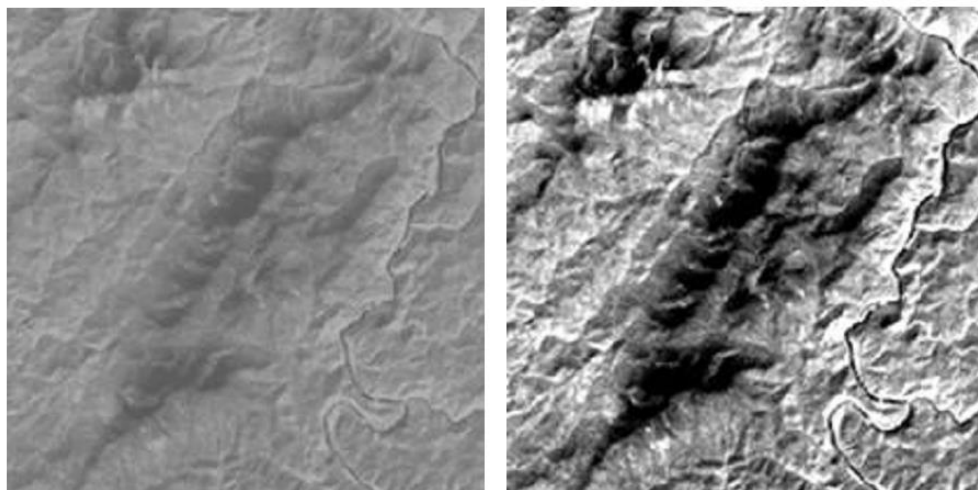


Рисунок 5.2 – Неконтрастне (ліворуч) і контрастне (праворуч) зображення

Для підвищення контрасту існує декілька методів цифрової обробки, які описані раніше:

1) *Лінійне розтягування гистограми.*

Усім значенням яскравості привласнюються нові значення з метою охоплення всього можливого інтервалу зміни яскравості (0, 255). Вихідний знімок: діапазон значень яскравості від 126 до 165, середнє = 140 (рис. 5.3).

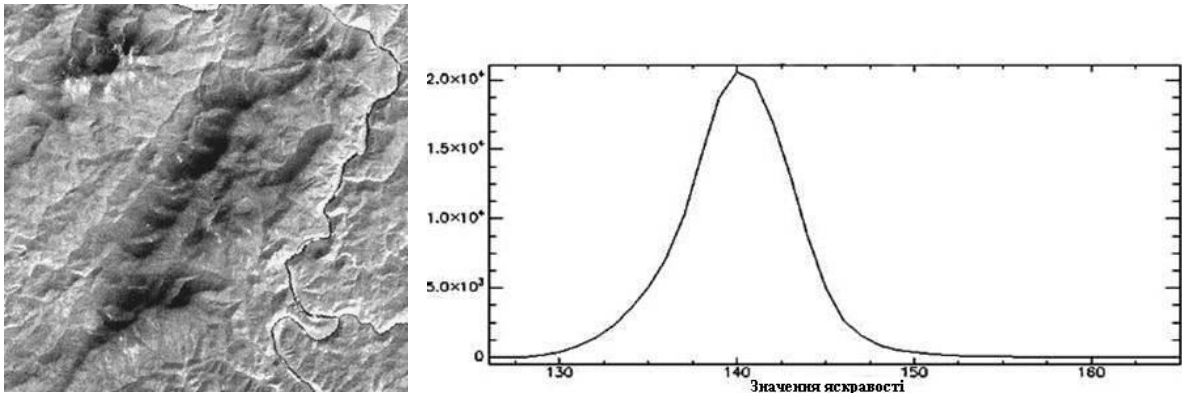


Рисунок 5.3 – Вихідний знімок для перетворення і його гистограма

Знімок після лінійного розтягування гистограми: діапазон значень яскравості від 0 до 255, середнє = 136,7 (рис. 5.4).

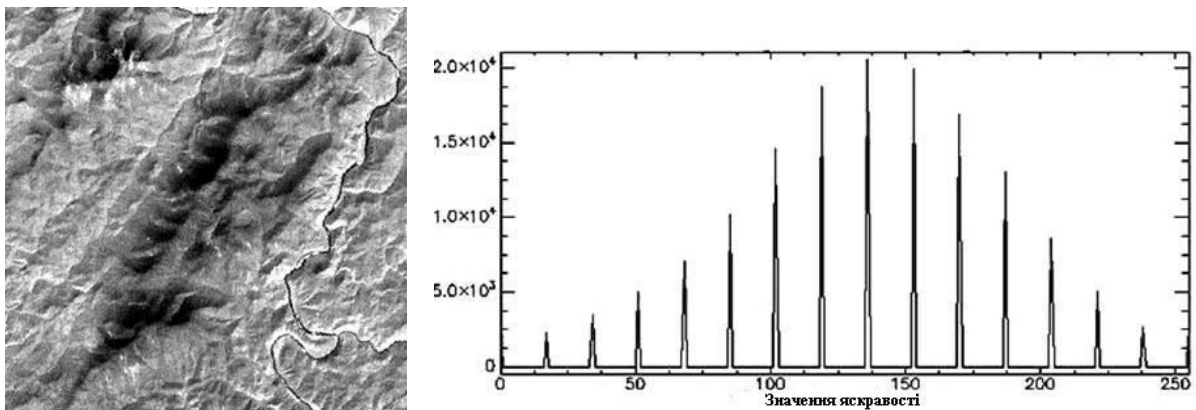


Рисунок 5.4 – Знімок після лінійного розтягування гистограми і його гистограма

## 2) Нормалізація гистограми.

На весь можливий інтервал зміни яскравості розтягується не вся гистограма, а її найбільш інтенсивна ділянка.

Знімок після нормалізації гистограми: діапазон значень яскравості від 0 до 255, середнє = 121,5. Причому розтягнута середня, найбільш інформативна частина гистограми (рис. 5.5).

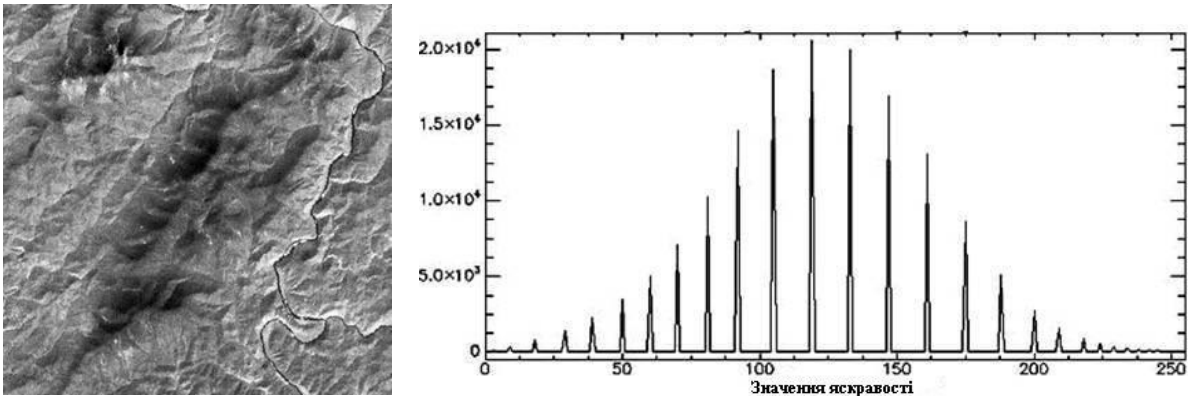


Рисунок 5.5 – Знімок після нормалізації гистограми і його гистограма

3) *Вирівнювання гистограми (лінеаризація, еквалізація).*

У процесі вирівнювання відбувається зміна значень яскравості пікселів таким чином, щоб для кожного рівня яскравості була однаковою або близькою кількістю пікселів.

Знімок після вирівнювання гистограми: діапазон значень яскравості від 0 до 255, середнє = 115,9 (рис. 5.6).

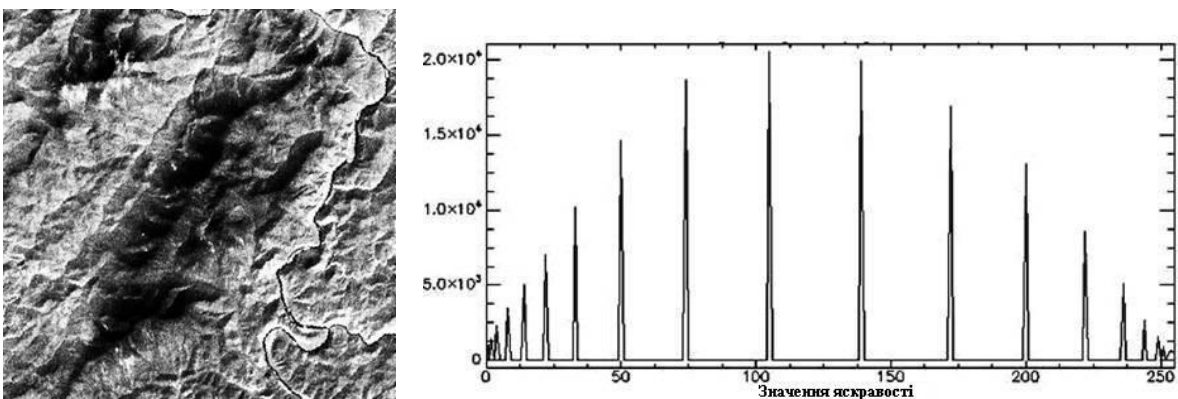


Рисунок 5.6 – Знімок після вирівнювання гистограми і його гистограма

При *покращенні зображень* часто застосовують *методи фільтрації*.

Фільтрація – це перетворення, яке дозволяє підсилити відтворення тих або інших об'єктів, придушити небажану вуаль на зображенні, усунути інші випадкові перешкоди (шум).

Один з найпростіших способів фільтрації – перетворення в ковзному вікні. При такому перетворенні перераховуються значення яскравості всіх пікселів зображення. Перерахування відбувається для кожного пікселя в такий спосіб: якщо даний піксель є центральним у вікні, яке „рухається” по

знімкові, йому дається нове значення, яке є функцією від значень оточуючих його у вікні пікселів. Розмір вікна може бути, наприклад, 3×3 або 5×5 пікселів. Щораз вікно зміщується на 1 піксель і рухається доти, поки не пройде весь знімок. Для всіх пікселів вікна встановлюються вагові коефіцієнти, виходячи із мети дешифрування.

Якщо вагові коефіцієнти всіх пікселів у вікні рівні, зображення буде згладжене (рис. 5.7).

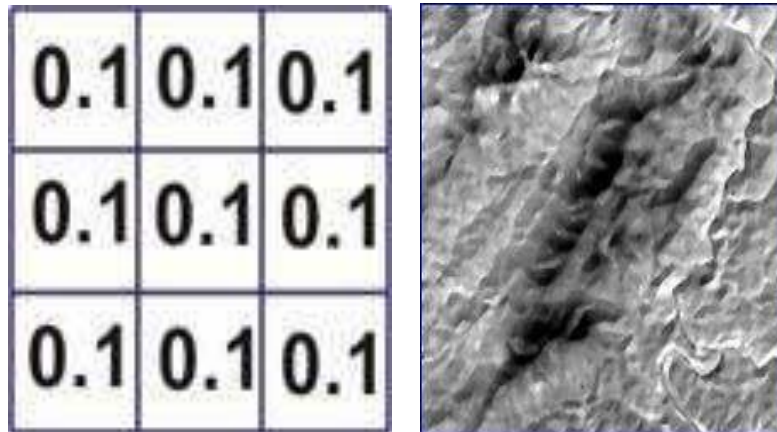


Рисунок 5.7 – Згладжений знімок

Якщо ваговий коефіцієнт центрального пікселя у вікні значно більший від інших, то зображення стане більш різким (рис. 5.8).

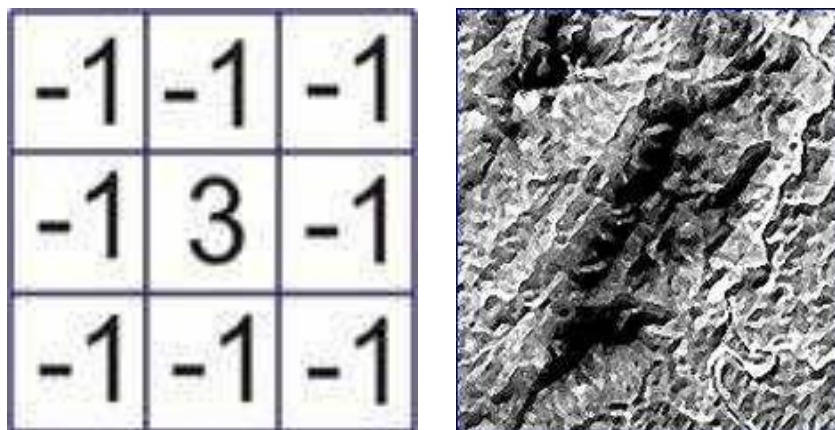


Рисунок 5.8 – Підвищення різкості знімка

Якщо вагові коефіцієнти вертикально розташованих пікселів у вікні будуть значно більші від інших, то на зображенні виділяться вертикальні лінії (рис. 5.9).

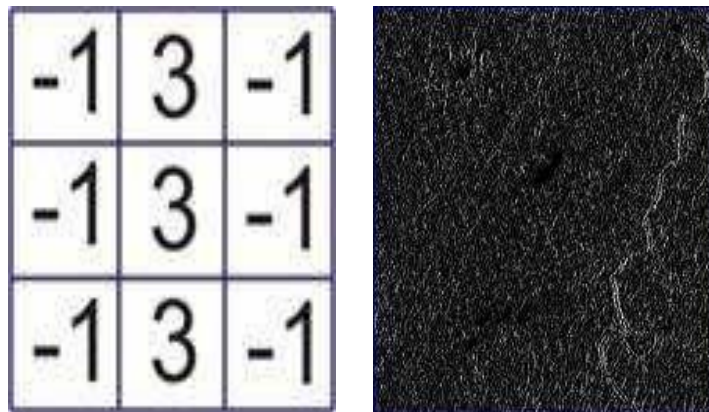


Рисунок 5.9 – Виділення ліній на знімку

*Методи інтерпретації* зображень прийнято підрозділяти на:

- візуальні,
- візуально-інструментальні,
- машинні.

У кожному разі розробка методів інтерпретації починається з вибору і вивчення *дешифрувальних ознак* природних утворень. Такими ознаками можуть бути: обмірювані радіаційні характеристики (або їх функції), рисунок зображення, непрямі ознаки, які впливають із ландшафтних особливостей зображеної території. Вибір дешифрувальних ознак здійснюється на основі відбивних характеристик систем природних утворень і умов трансформації цих характеристик атмосферою.

Безпосередньо інтерпретація містить у собі так звану *задачу ухвалення рішення*. При візуальному дешифруванні ухвалення рішення ґрунтується головним чином на знаннях і досвіді фахівця. При інтерпретації за допомогою ЕОМ звичайно використовуються критерії, які впливають із теорії оптимальних статистичних рішень. Для визначення параметрів (метеорологічних, екологічних, біометричних показників, швидкості стоку і т.п.) результати дешифрування повинні бути піддані спеціальній обробці.

Успіх інтерпретації багатозональних знімків суттєво залежить від оптимального вибору спектральних діапазонів зйомки відповідно до відбивних властивостей шуканих природних об'єктів і явищ. У той же час вибір цих діапазонів повинен базуватися на розв'язанні задач інтерпретації. *Дешифруванням* називається процес розпізнавання хмарності, снігу, льоду і об'єктів земної поверхні по космічних знімках. При дешифруванні необхідно, за можливістю, одержати оптимальне число

різноманітних характеристик, що дозволяють дати правильну якісну та кількісну оцінку об'єкта, зображеного на знімку.

**Тематична обробка** космічних знімків – це процес дешифрування або розпізнавання об'єктів і явищ на космічних знімках.

Велику роль при інтерпретації зображень відіграє **колір**. Кольорове зображення на моніторі комп'ютера виходить шляхом додавання трьох основних кольорів. За основні прийняті кольори, відповідні до монохроматичного випромінювання із довжиною хвилі 0,7 мкм (червоний – R); 0,5461 мкм (зелений – G); 0,4358 (синій – B). Це вже відоме представлення колірної моделі RGB.

Застосовуються й інші методи представлення кольорових зображень.

**Метод колірних перетворень.** Якщо вивести на екран дисплея зображення одного каналу багатоспектрального знімка, то воно буде пофарбовано в сірі тони (напівтонове зображення). Щоб одержати кольорове зображення потрібно скласти разом три канали багатоспектрального знімка, один з яких буде червоний (R), інший зелений (G), третій синій (B) (рис. 5.10).

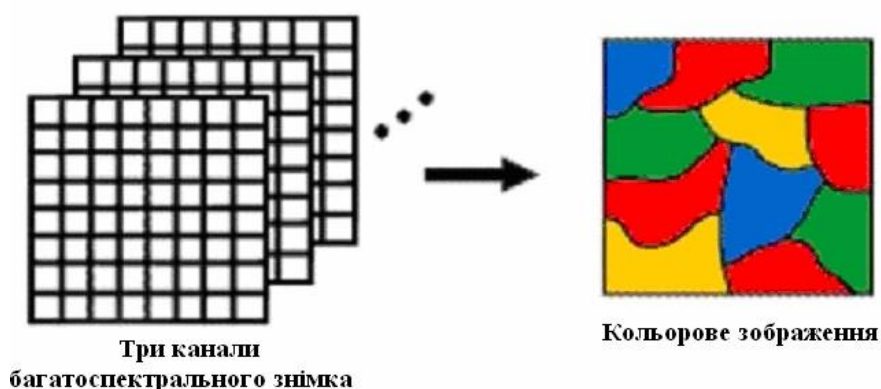


Рисунок 5.10 – Кольорове зображення

Часто фарбують зображення в натуральні та неправильні кольори або псевдокольори. Якщо в канали R, G, B зображення підставлені R, G, B канали знімка, то зображення представлено в натуральних кольорах (рис. 5.11).

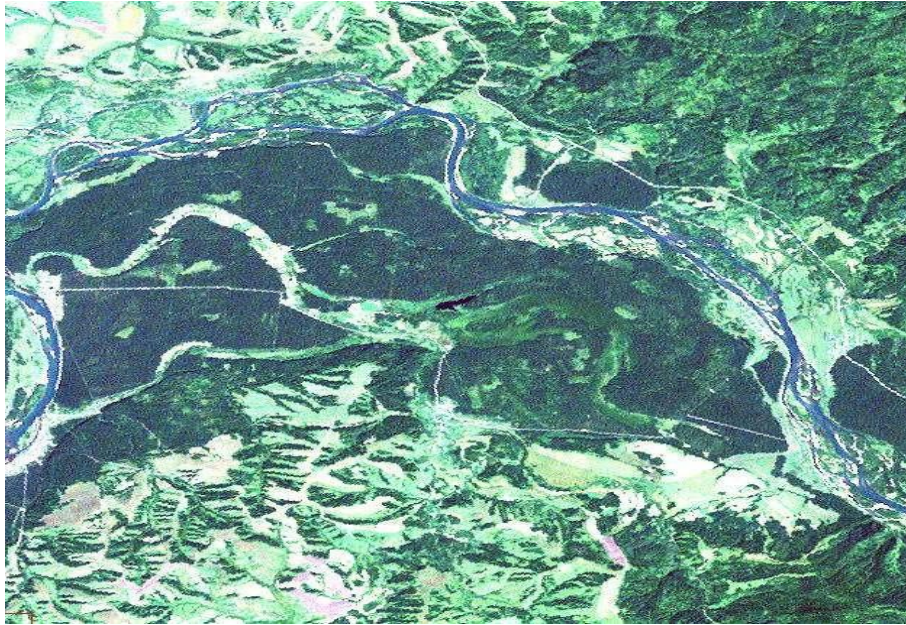


Рисунок 5.11 – Приклад фарбування зображення в натуральні кольори (коментарі в табл. 5.3)

Таблиця 5.3 – Характеристика зображення (рис. 5.11)

Канали зображення	Спектральні канали знімка	Колір води на зображенні	Колір рослинності на зображенні	Колір ґрунту на зображенні
R	Червоний	Синій	Зелений	Коричнево-сірий
G	Зелений			
B	Синій			

Якщо в канали R, G, B зображення підставлені інші канали знімка, то зображення представлено в неправильних або псевдокольорах (рис. 5.12). Механізм добору кольору зображення наступний. Якщо в канал зображення R підставити канал знімка, у якому значення яскравості пікселів високі, а в канали G і B канали з низькими значеннями яскравості, то зображення буде пофарбовано переважно в червоні тони і так далі.

Сутність об'єктів доцільно визначати на зображеннях у натуральних кольорах, а розділяти та оконтурювати об'єкти зручніше на зображеннях у псевдокольорах. Правильно підібрана шкала дозволяє операторові візуально виділяти об'єкти, які мало відрізняються за яскравістю на напівтоновому зображенні.



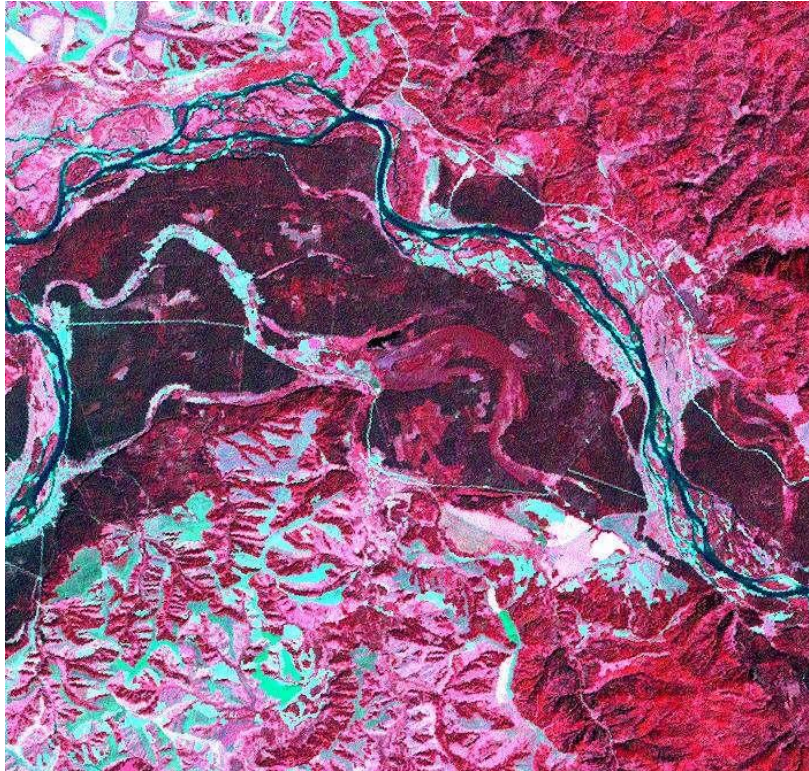


Рисунок 5.12 – Приклад фарбування зображення в неправильні (псевдо) кольори (коментарі в табл. 5.4)

Таблиця 5.4 – Характеристика зображення (рис. 5.12)

Канали зображення	Спектральні канали знімка	Колір води на зображенні	Колір рослинності на зображенні	Колір ґрунту на зображенні
R	Близький ІЧ	Чорний	Червоний	Сіро-блакитний
G	Червоний			
B	Зелений			

**Індексні зображення.** Для одержання індексного зображення, значення яскравості кожного пікселя обчислюється шляхом застосування арифметичних операцій над значеннями яскравості цього пікселя з різних каналів знімка. При вивченні об'єктів по багатозональних знімках часто важливі не абсолютні значення, а характерні співвідношення між значеннями яскравості об'єкта в різних спектральних зонах. На таких зображеннях більш яскравіше і контрастніше виділяються шукані об'єкти в порівнянні з вихідним знімком (рис. 5.13).

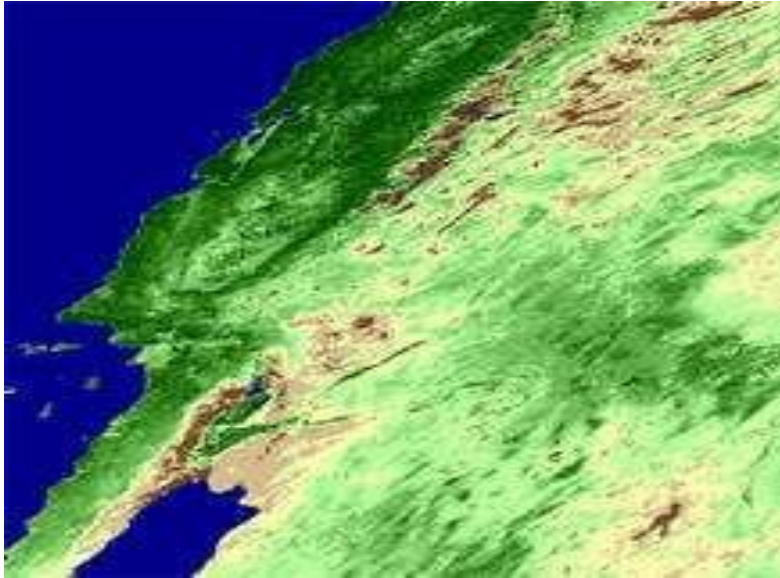


Рисунок 5.13 – Приклад індексного фарбування зображення (вегетаційний індекс)

Як приклад наведемо декілька індексів, їх призначення і порядок розрахунків:

- індекс вмісту оксиду заліза, призначений для виявлення вмісту окислів заліза, являє собою відношення значень яскравості в червоному (Ч) каналі до значень яскравості в синьому каналі (С) –  $Ч / С$ ;
- індекс вмісту глинистих мінералів, призначений для виявлення вмісту глинистих мінералів, являє собою відношення значень яскравості в межах середнього інфрачервоного каналу (СІЧ) –  $СІЧ1 / СІЧ2$ , де СІЧ1 це діапазон від 1,55 до 1,75 мкм, СІЧ2 – від 2,08 до 2,35 мкм;
- індекс вмісту залізистих мінералів, призначений для виявлення вмісту залізистих мінералів, являє собою відношення значення яскравості в середньому інфрачервоному (СІЧ1 – див. вище) каналі до значення яскравості в близькому інфрачервоному каналі (БІЧ) –  $СІЧ1 / БІЧ$ ;
- індекс червонокольоровості (RI), призначений для виявлення вмісту оксиду заліза в ґрунті, заснований на відмінності відбивної здатності червонокольорних мінералів у червоному (Ч) і зеленому (З) діапазонах –  $RI = (Ч - З) / (Ч + З)$ ;
- водний індекс (WI), застосовується для визначення вмісту води в рослинності по гіперспектральних знімках –  $WI = 0,90 \text{ мкм} / 0,97 \text{ мкм}$ ;
- нормалізований диференціальний індекс снігу (NDSI),

використовується для виділення територій, покритих снігом (для снігу  $NDSI > 0,4$ ),  $NDSI$  – це відносна величина, яка характеризується відмінністю відбивної здатності снігу в червоному (Ч) і короткохвильовому інфрачервоному (КІЧ) діапазонах –  $NDSI = (Ч - КІЧ) / (Ч + КІЧ)$ ;

- нормалізований диференціальний вегетаційний індекс (NDVI), показує наявність і стан рослинності. Хлорофіл листя рослин відбиває випромінювання в близькому інфрачервоному (БІЧ) діапазоні електромагнітного спектра й поглинає в червоному (Ч). Відношення значень яскравості в цих двох каналах дозволяє чітко відокремлювати і аналізувати рослинні від інших природних об'єктів –  $NDVI = (БІЧ - Ч) / (БІЧ + Ч)$ . Значення NDVI варіюють у межах від -1 до 1:

густа рослинність –	0,7;
виряджена рослинність –	0,5;
відкритий ґрунт –	0,025;
хмари –	0;
сніг і лід –	-0,05;
вода –	-0,25;
штучні матеріали (бетон, асфальт) –	-0,5.

Існують різні способи *класифікації*. Розглянемо один зі способів, а саме, метод аналізу головних компонентів.

**Аналіз головних компонентів** – це метод аналізу багатоспектральних корельованих даних. Поняття корельовані дані означає, що при зростанні значення яскравості пікселів в одному спектральному каналі зростають значення яскравості і в інших спектральних каналах.

На рис. 5.14 показаний приклад двовимірного простору спектральних ознак, при зростанні значення в першому каналі зростає значення в другому, це означає високу кореляцію між цими каналами.

Видно, що область розподілу значень розташована під кутом до осей графіка, тому ні по одній із цих осей не відображається весь діапазон значень об'єкта. Це значить, що при синтезі кольорового зображення знімок буде бідний кольорами. Наприклад, усі види рослинності будуть зображені близькими нерозрізненими відтінками кольору. Таке розташування значень яскравості характерно для більшості природних об'єктів (рослинності, ґрунтів, гірських порід).

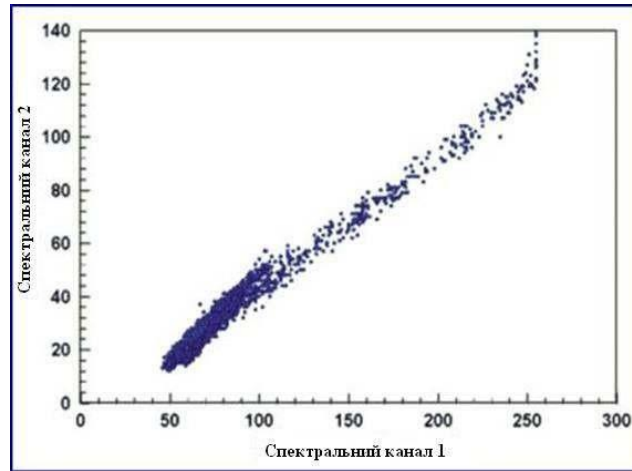


Рисунок 5.14 – Поняття корельованих даних

Якщо осі координат розгорнути так, щоб одна з них йшла паралельно полю розподілу значень, а друга розташовувалася ортогонально, то уздовж кожної з осей діапазон значень буде максимальним, що збільшує можливості дешифрування знімка (рис. 5.15...5.16).

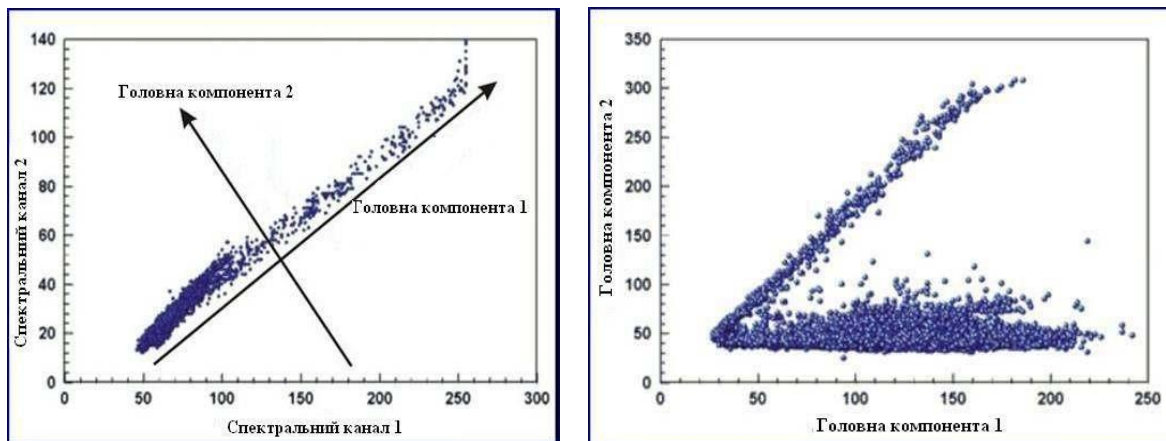


Рисунок 5.15 – Поняття головних компонентів

Можливості методу аналізу головних компонентів полягають у наступному:

1) якщо знімок містить більше трьох спектральних каналів, можна створити кольорове зображення із трьох головних компонентів, оскільки в типовому багатозональному зображенні звичайно перші дві або три компоненти здатні описати практично всю мінливість спектральних характеристик. Інші компоненти найчастіше піддані шумовим впливам. Відкидаючи ці компоненти можна зменшити обсяг даних без помітної



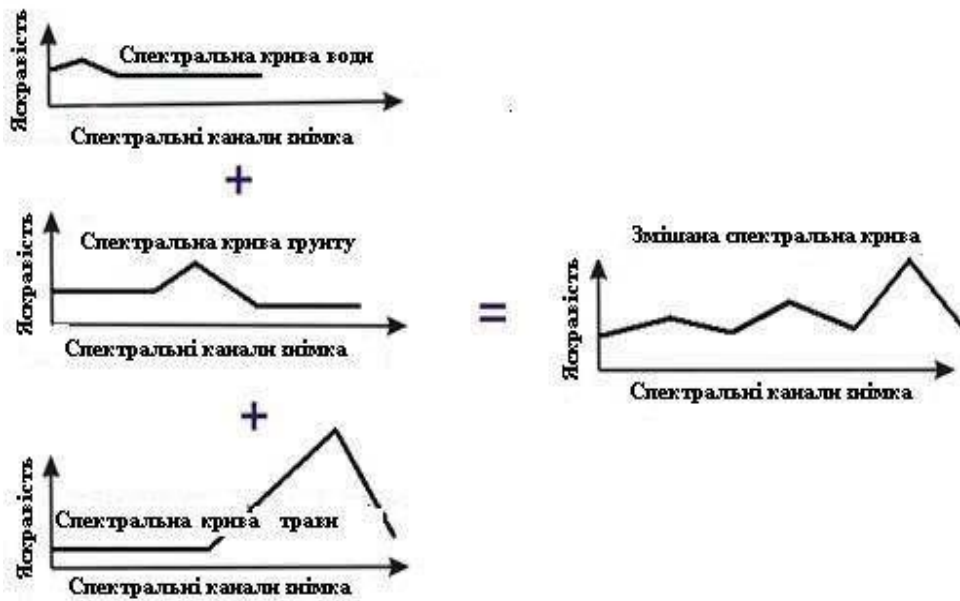


Рисунок 5.17 – Спектральна бібліотека чистих матеріалів і змішаний спектр

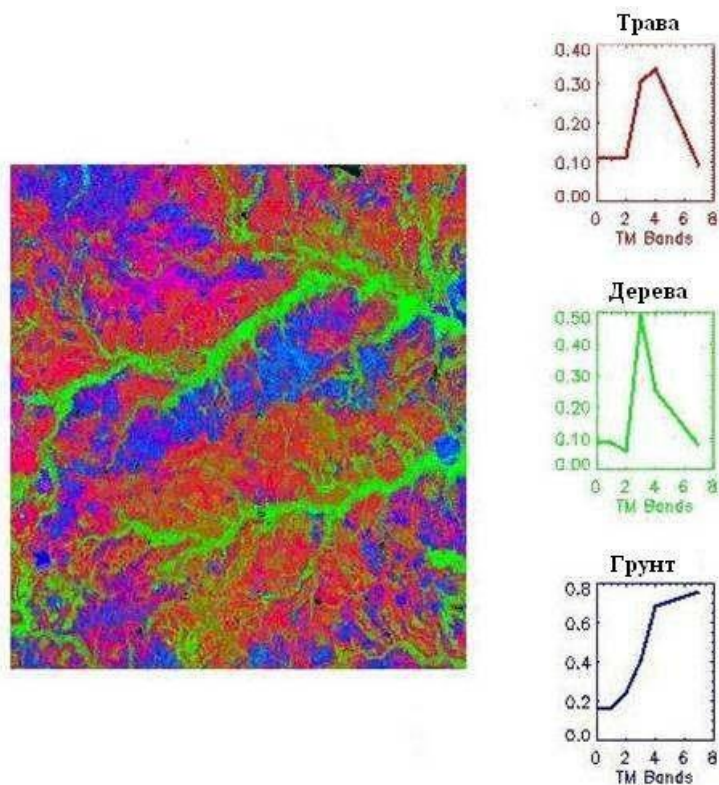


Рисунок 5.18 – Застосування методу спектрального поділу

При дешифруванні застосовують методи класифікації.

**Класифікація** – це комп'ютерне дешифрування знімків або процес автоматизованого поділу всіх пікселів знімка на групи (класи), які відповідають різним об'єктам.

По використанню статистичних параметрів розрізняють параметричні та непараметричні класифікації. При виконанні параметричних класифікацій передбачається, що значення яскравості пікселів в отриманих класах розподілені за нормальним (гаусовим) законом. Крім того, можуть бути враховані різні статистичні параметри, і чим більше їх враховано, тим точніше класифікація. Непараметричні класифікації не враховують розподіл значень спектральної яскравості усередині класу. Їх використовують або для вкрай простих випадків, або для класифікації складних неоднорідних об'єктів.

### Контрольні запитання

1. Які особливості зображень є на космічних знімках у видимому діапазоні електромагнітних хвиль ?
2. Які особливості зображень є на космічних знімках у інфрачервоному діапазоні електромагнітних хвиль ?
3. Які особливості зображень є на космічних знімках у мікрохвильовому діапазоні електромагнітних хвиль ?
4. В чому полягає службова обробка космічних знімків ?
5. В чому полягає просторова прив'язка космічних знімків ?
6. В чому полягає радіаційна корекція космічних знімків ?
7. В чому полягає тематична інтерпретація космічних знімків ?
8. Який зміст попередньої обробки космічних знімків ?
9. Який зміст тематичної обробки космічних знімків ?
10. В чому полягає геометрична корекція космічного знімка ?
11. В чому полягає радіометричне калібрування космічних знімків ?
12. В чому полягає радіометрична корекція впливу атмосфери на космічний знімок ?
13. В чому полягає відновлення пропущених пікселів на космічних знімках ?
14. В чому полягає покращення зображень на космічних знімків ?
15. В чому полягає фільтрація космічних знімків ?
16. В чому полягає суть колірних перетворень зображень на космічних знімках ?

17. Що таке індексні зображення і як вони формуються з космічних знімків ?
18. Як здійснюється аналіз космічного знімка методом головних компонентів ?
19. Як здійснюється аналіз космічного знімка методом спектрального поділу ?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Яне, Б. Цифровая обработка изображений : пер. с англ. / Б. Яне. Москва : Техносфера, 2007. – 584 с.
2. Шапиро, Л. Компьютерное зрение : пер. с англ. / Л. Шапиро, Дж. Стокман. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
3. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений : пер. с англ. // Р. Гонсалес, Р. Вудс. Москва : Техносфера, 2005. – 1072 с.
4. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.



Навчальне електронне видання

ПЕРЕЛИГІН Борис Вікторович  
ГОР'ЄВ Сергій Адольфович

ЦИФРОВА ОБРОБКА СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Конспект лекцій

**Видавець і виготовлювач**

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016

тел./факс: (0482) 32-67-35

Е-mail: [info@odeku.edu.ua](mailto:info@odeku.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016