

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

# **ІНФОРМАЦІЙНО - ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ І УЩІЛЬНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2010

УДК 621.316

P35

Автори:

**А. М. Петух, О. М. Рейда, В. П. Майданюк,  
В. П. Кожем'яко.**

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №\_\_ від \_\_.\_\_.\_\_\_\_ р.).

Рецензенти:

**В. Ю. Кучерук**, доктор технічних наук, професор;  
**В. М. Лисогор**, доктор технічних наук, професор.

**Інформаційно** - вимірювальні системи відновлення і ущільнення зображень. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 148 с.

**ISBN**

В монографії розглянуто системи формування зображень. Подано загальний аналіз основних методів побудови інформаційно-вимірювальних систем. Описані методи і алгоритми ущільнення даних. Подано класифікацію і проведено аналіз дефектів багатошарових фотографічних матеріалів. Розроблено модель для виділення та метод ідентифікації структурних дефектів, метод відновлення зображень багатошарових фотографічних матеріалів, що базується на принципах «Нестискуваності фазових середовищ». Проведено метрологічний аналіз інформаційно-вимірювальних систем відновлення структури зображень багатошарових фотографічних матеріалів. Наведено методики та приклади реалізації описаних моделей і методів.

**УДК 621.316**

**ISBN**

© А. Петух, О. Рейда, В. Майданюк, В. Кожем'яко, 2010

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ.....	8
1.1 Моделі формування зображення в системах цифрових перетворювачів інформації .....	8
1.2 Методи відновлення зображень у системах цифрових перетворювачів інформації .....	13
1.3 Багатошарові фотографічні матеріали формування зображень .....	25
2 МЕТОДИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО - ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ АНАЛІЗУ СТРУКТУРНИХ ДЕФЕКТІВ .....	36
2.1 Методи аналізу і моделі систем цифрового перетворення інформації .....	36
2.2 Методи оцінювання систем цифрового перетворення інформації для багатошарових фотографічних матеріалів.....	42
2.3 Модель об'єктів у системах цифрового перетворення інформації .....	47
2.4 Методи виділення малорозмірних об'єктів.....	54
3 УЩІЛЬНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ .....	68
3.1 Джерела надлишковості зображень .....	68
3.2 Критерії вірності кодування.....	69
3.3 Етапи кодування зображень.....	70
3.4 Аналіз основних методів кодування зображень .....	71
3.5 Кодування зображень відповідно стандартам JPEG та MPEG .....	74
3.6 Фрактальне стиснення зображень .....	78

3.6.1. Алгоритм кодування-декодування зображень фрактальним методом.....	79
3.6.2. Підвищення швидкодії фрактального стиснення .....	82
3.6.3. Табличний метод підвищення швидкодії .....	85
3.7 Рекурсивний (хвильовий) алгоритм стиснення зображень .....	88
3.9 Перспективи розвитку кодування зображень .....	97
<b>4    МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО - ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ БАГАТОШАРОВИХ ФОТОГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ .....</b>	<b>99</b>
4.1 Аналіз і класифікація дефектів фотографічних матеріалів .....	99
4.2 Аналіз системи формування зображення багатошарових фотографічних матеріалів .....	103
4.3 Аналіз точності виділення дефектів зображення цифрованих багатошарових фотографічних матеріалів в системах цифрових перетворювачів.....	111
4.4 Метрологічний аналіз структури цифрованих багатошарових фотографічних матеріалів у системах цифрових перетворювачів.....	116
<b>5    РЕАЛІЗАЦІЯ СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПОБУДОВИ ПРИСТРОЮ ВИДІЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ БАГАТОШАРОВИХ ФОТОГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>127</b>
5.1 Реалізація схемотехнічних рішень побудови пристрою виділення дефектів багатошарових фотографічних матеріалів .....	127
5.2 Реалізація методу виділення дефектів на зображенні цифрованих багатошарових фотографічних матеріалів .....	132
5.3 Реалізація методу відновлення зображення цифрованих багатошарових фотографічних матеріалів .....	135
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>139</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БФМ	– багат шарові фотографічні матеріали
ГІС	– геоінформаційні системи
ДПФ	– дискретне перетворення Фур'є
ІЧВ	– інфрачервоне випромінювання
КІХ	– кінцева імпульсна характеристика
КПІ	– канал передачі інформації
ОФМ	– одношаровий фотографічний матеріал
ПЗЗ	– прилад із зарядовим зв'язком
СКВ	– середньоквадратичне відхилення
СОІ	– системи обробки інформації
СЦОІ	– системи цифрової обробки інформації
СЦПІ	– системи цифрового перетворення інформації
ФПК	– функція передачі контрасту
ФПМ	– функція передачі модуляції
ФРТ	– функція розсіювання точки
ЦО	– цифрова обробка
ШСЗ	– штучні супутники Землі

## ВСТУП

У теперішній час набули широкого розвитку галузі науки і техніки, що застосовують системи обробки інформації (СОІ) з використанням даних у цифровому вигляді. Базовими складовими елементами таких систем є системи цифрового перетворення інформації (СЦПІ). СЦПІ призначені для цифрування природних або штучних об'єктів, що є носіями інформації у аналоговому вигляді. Дані у цифровому вигляді використовуються для збереження, передачі, аналізу і обробки у системах цифрової обробки інформації (СЦОІ)

Одними із основних типів інформаційних систем, що використовують цифрові дані, є геоінформаційні системи (ГІС). ГІС широко застосовують методи дистанційного зондування Землі, природних або штучних об'єктів. Методи дистанційного зондування ґрунтуються на реєстрації електромагнітного випромінювання в широкому спектральному діапазоні електромагнітного випромінювання і наступному їх аналізу. На даному етапі розвитку технологій дистанційного зондування широко розвинуті методи експонування об'єктів на багатошарових фотографічних матеріалах (БФМ). БФМ по своїй природі є аналоговими носіями інформації [27]. Для обробки інформації експонованої у БФМ проводиться її цифрування. Основною задачею обробки є усунення дефектів, зменшення впливу спотворень і шумів, перетворення зображення до виду, зручного для спостереження людиною-оператором.

Особливе практичне значення мають методи обробки аерокосмічних зображень. Ефективність аерокосмічних методів вивчення земної поверхні, поверхні інших планет значною мірою визначається якістю цифрованих експонованих БФМ. Підвищення якості таких зображень має велике народногосподарське значення, тому що знижує вартість виконання робіт за рахунок зменшення масштабу зйомки. [9]

Найбільш важливою проблемою при цифровому перетворенні БФМ є видалення структурних дефектів зображення. До структурних дефектів БФМ відносяться сліди порошин, відбитки пальців, волосинки, подряпини і інші сторонні об'єкти, що існують на

поверхні БФМ або у СЦП.

Видалення дефектів з цифрового зображення в основному проводиться шляхом досить кропіткої і трудомісткої процедури за допомогою відповідного програмного забезпечення. Найкращим засобом для цього служать інструменти "Clone" & "Blend", а також "Dust & Scratches" графічного пакета Adobe Photoshop [A]. Видалення структурних дефектів зображення такими методами є трудомістким і потребує багато часу.

Значною проблемою є великі розміри даних, що передаються по каналу передачі інформації. Передати цифровий потік по лініях зв'язку, враховуючи надлишкову розрядність вкрай важко. Для зберігання тільки одного буфера в цифровій формі необхідно близько 1 Гбайта пам'яті, а для одного зображення 6 Гбайтів.

Вирішенням проблеми є зменшення об'єму даних, що передаються, шляхом стиснення даних, або іншими словами кодування зображень.

Актуальність стиснення зображень особливо зросла за останні роки в зв'язку з появою розвинутих комп'ютерних засобів відображення зображень, представлених в цифровій формі. Це призвело до широкого застосування зображень в комп'ютерних системах та мережах.

# 1 СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ

## 1.1 Моделі формування зображення в системах цифрових перетворювачів інформації

Через недосконалість формуючих і реєструючих систем цифроване зображення є спотвореною (нечіткою) копією оригіналу. Основними причинами спотворень, що приводять до погіршення чіткості, є обмеження роздільної здатності формуючої системи, розфокусування, наявність проміжного середовища, рух камери стосовно реєструємого об'єкту і т.п.

Загальна схема формування зображення представлена на рис. 1.1.

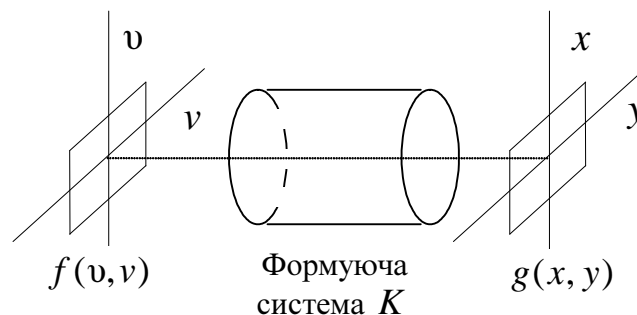


Рисунок. 1.1. Схема формування зображення:

$f(u, v)$  - функція розподілу яскравості об'єкта, що описується функцією двох змінних  $(u, v)$ ;

$g(x, y)$  – зображення сформоване  $f(u, v)$  за допомогою відомого оператора спотворень  $K$ .

Вид оператора  $K$  визначається властивостями формуючої системи. Двовимірною функцією  $f(u, v)$  називається вихідним зображенням. Задача реставрації полягає в знаходженні зображення  $\tilde{f}(u, v)$ , що є оцінюванням вихідного зображення  $f(u, v)$  по вхідному зображенню  $g(x, y)$ , що спостерігається, тобто у видаленні спотворень, внесених оператором  $K$  [9].

Розглянемо джерела спотворень зображення, цифрованих БФМ. Основними джерелами спотворень є оптичні елементи, система цифрового перетворення і елементи, що не належать до СЦП.



Оптичну систему будемо характеризувати функцією пропускання  $K(x, y, u, v)$ , яка визначається як комплексна амплітуда збудження в площині  $F(u, v)$ , обумовлена збудженням з одиничною амплітудою і фазою в точці  $(x, y)$ . Допускаємо, що система лінійна, тоді, елемент поверхні об'єкта викликає збудження поля в площині зображення

$$dg(u, v) = K(x, y, u, v) \cdot f(x, y) dx dy. \quad (1.1)$$

Повне поле джерела обчислюється за формулою

$$g(u, v) = \iint_{\infty} K(x, y, u, v) \cdot f(x, y) dx dy. \quad (1.2)$$

*Моделі формування зображення.* Для аналізу моделей передачі і формування зображень у СЦП використовується класифікація представлена на рис. 1.2, яка дозволяє поділити відомі моделі на класифікаційні групи за методами впливу на дані, що передаються або формуються у СЦП. Такі методи є загальновідомими і дозволяють описати структуру зображень сформованих у СЦП з метою моделювання їх властивостей.

Більшість формуючих систем у першому наближенні можна розглядати як лінійні і інваріантні до зсуву. Зображення, сформовані такими системами, підлягають впливу лінійних просторово-інваріантних спотворень, що характеризуються однаковим механізмом виникнення для всіх точок  $(x, y)$  [52]. Лінійні спотворення виявляються в ослабленні верхніх частот вихідного зображення. Візуально це приводить до погіршення його різкості. У процесі запису зображення спотворюються шумами, що присутні у будь-якому реальному фізичному пристрої. У ряді практично важливих випадків шум вважається адитивним і незалежним від вихідного зображення [2].



Рисунок. 1.2. Класифікація моделей формування і передачі зображень

З урахуванням вищевикладеного нерізде зображення  $g(x,y)$ , що спостерігається, можна представити як лінійну систему, показану на рис. 1.3.

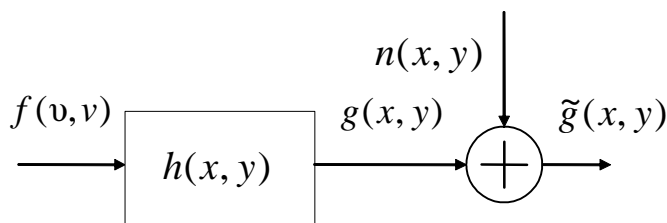


Рисунок . 1.3. Лінійна модель КПП

Математична модель процесу формування зображення має вигляд:

$$\tilde{g}(x, y) = g(x, y) + n(x, y), \quad (1.3)$$

де  $n(x,y)$  - адитивний двовимірний шум.

Зображення  $\tilde{g}(x, y)$ , отримане шляхом лінійного спотворення вихідного зображення при відсутності шуму, визначається інтегралом згортки:

$$\begin{aligned}
g(x, y) &= h(x, y) \otimes \otimes f(x, y) = \iint_{(u,v) \in \Theta^{(u)}} h(x-u, y-v) f(u, v) du dv = \\
&= \iint_{(u,v) \in \Theta^{(h)}} h(u, v) f(x-u, y-v) du dv, \quad (x, y) \in \Theta^{(s)},
\end{aligned}
\tag{1.4}$$

де  $\otimes \otimes$  – символ двовимірної згортки;

$h(x, y)$  – двовимірна імпульсна характеристика функції розсіювання точки (ФРТ) спотвореної лінійної системи.

Таким чином, значення функції яскравості  $f(u, v)$  вихідного зображення в точці з координатами  $(u, v)$  «змазується» відповідно до виду ФРТ  $h(x, y)$  і спотворюється адитивним шумом.

У виразі (1.4) враховано, що зображення, які зустрічаються в практичних задачах, мають кінцеві розміри. Це означає, що яскравість зображення приймається рівною нулеві скрізь, крім деякої кінцевої області кадру.

Каузальні лінійні системи не володіють симетрією ФРТ. Дія ФРТ зводиться до того, що кожна точка вихідного зображення «розмазується» у деяку область, обмежену кадром. Кадр вихідного зображення може бути побудований шляхом переміщення і являє собою область усіх точок, що знаходяться у кадрі при його переміщенні [69]. Тому, навіть якщо реєструємий об'єкт має нескінченні розміри, зображення, що спостерігається, формується лише тільки за рахунок деякої його частини. Причому розміри кадру зображення, що спостерігається, завжди менші або дорівнюють розмірам вихідного. Розміри кадрів вихідного зображення і зображення, що спостерігається, рівні лише при відсутності лінійних спотворень, тобто коли імпульсна характеристика системи, що спотворює, дорівнює дельта – функції [1].

*Розмиття внаслідок руху.* Змаз зображення виникає при взаємному русі камери і об'єкта відносно один одного під час експонування. Зображення, що спостерігається, є результатом накладення зі зсувом множини вихідних зображень. Розглянемо випадок, коли камера рухається з постійною горизонтальною

швидкістю відносно об'єкта який експонується. ФРТ і передатна функція такої системи визначаються виразами:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \delta(x), & \text{при } 0 \leq y \leq a, \\ 0, & \text{у інших випадках} \end{cases} \quad (1.5).$$

$$H(\omega_x, \omega_y) = \frac{\sin(\alpha \omega_y)}{\omega_y} \quad (1.6)$$

де  $\alpha$  - добуток швидкості руху камери на час експозиції.

Відповідно в дискретному випадку ФРТ змазування дорівнює

$$h(i_1, i_2) = \begin{cases} \frac{1}{L_{i_2}^h}, & \text{при } 0 \leq i_2 \leq L_{i_2}^h - 1 \text{ і } i_1 = 0, \\ 0, & \text{у інших випадках} \end{cases} \quad (1.7)$$

де  $L_{i_2}^{(h)} = \text{round}(\alpha / \Delta)$  і  $L_{i_1}^{(h)} = 1$  розміри кадру.

Доповнюючи ФРТ (1.7) нулями до розмірів кадру вихідного зображення і застосовуючи двовимірне ДПФ, одержимо частотну характеристику системи яка спотворює:

$$\tilde{H}(k_1, k_2) = \frac{1}{L_{i_2}^{(h)} \sqrt{L_{i_2}^{(u)}}} e^{j(\pi(L_{i_2}^{(h)} - 1)k_2 / L_{i_2}^{(u)})} \frac{\sin(\pi L_{i_2}^{(h)} k_2 / L_{i_2}^{(u)})}{\sin(\pi k_2 / L_{i_2}^{(u)})}. \quad (1.8)$$

*Розфокусування*. Чіткість зображення характеризується відтворенням дрібних деталей і визначається роздільною здатністю формуючої системи. Роздільна здатність оптичної системи чисельно виражається кількістю пар чорно-білих ліній на 1 мм зображення, яке формується об'єктивом системи. Величина кружка розмиття залежить від фокусної відстані об'єктива, а також від відстаней від об'єктива до об'єкта і до площини формованого зображення. Дискретне зображення буде чітким (контрастним), якщо діаметр кружка розмиття не перевищує кроку дискретизації зображення яке спостерігається. У іншому випадку лінійні спотворення стають помітними [36].

При розфокуванні розподіл інтенсивності на зображенні

точкового джерела, сформованого тонкою лінзою з круговою апертурою, постійний у межах кружка розмиття і дорівнює нулеві за його межами, що описується наступним чином:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2}, & x^2 + y^2 \leq r^2; \\ 0 & . \end{cases} \quad (1.9)$$

З (1.9) випливає, що розміри кадру  $L_x^{(h)} = L_y^{(h)} = 2r$ . Виконавши двовимірне перетворення Фур'є від (1.9), одержимо передатну функцію оптичної системи

$$H(\omega_x, \omega_y) = J_1(r\rho)/r\rho, \quad \rho^2 = \omega_x^2 + \omega_y^2, \quad (1.10)$$

де  $J_1$  - функція Бесселя першого порядку.

У дискретному випадку ФРТ (1.9) має вигляд:

$$h(i_1, i_2) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2}, & i_1^2 + i_2^2 \leq r^2; \\ 0 & . \end{cases} \quad (1.11)$$

## 1.2 Методи відновлення зображень у системах цифрових перетворювачів інформації

Для проведення відновлення структури цифрованих зображень широко використовуються методи цифрового відновлення даних. Принципи покладені в процеси відновлення поділяють методи на класифікаційні групи. Дані групи містять методи з подібними принципами обробки даних. Загальна класифікація методів відновлення приведена на рис. 1.4.

Приведена класифікація поділяє методи відновлення на три основних групи методів, що використовуються при відновленні цифрованих даних. Методи, що відновлюють структуру зображення, поділяють за лінійними (алгебраїчними), нелінійними та ітераційними принципами обробки цифрових даних. Кожна із груп методів має

пріоритетне використання при розв'язанні окремих типів задач.

Для обробки цифрованих даних БФМ використовуються оптимальна фільтрація, методи з врахуванням апіорної інформації, ітераційні методи з обмеженням.

**Алгебраїчні методи відновлення зображень.** Система формування для цифрових зображень фактично являє собою систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно  $u(i_1, i_2)$ . Задача відновлення вихідного зображення  $u(i_1, i_2)$  при відомої ФРТ  $h(i_1, i_2)$  може бути зведена до розв'язання системи лінійних рівнянь.

Зручно представити співвідношення у матричній формі, використовуючи лексикографічне упорядкування. Для цього двовимірний масив зображення перетворюється у вектор-стовпець. Перетворення здійснюється розгорненням масиву  $s(i_1, i_2)$  по рядкам. Аналогічним образом перетворюються у вектори-стовпці  $z$ ,  $u$  і  $n$  спотворене при відсутності шуму зображення  $z(i_1, i_2)$ , вихідне зображення  $u(i_1, i_2)$  і шум  $n(i_1, i_2)$ . Розміри векторів  $z$ ,  $u$  і  $n$  рівні. Зв'язок між лексикографічно упорядкованими зображеннями визначається співвідношенням

$$s = z + n, \quad (1.12)$$

де  $z = hu$ .

Символ  $h$  позначає прямокутну матрицю, за допомогою якої вектор вихідного зображення  $u$  перетвориться в спотворене зображення  $z$ . Матриця  $h$  має блокову структуру, елементи якої являють собою відліки ФРТ. Задачі реставрації зображень алгебраїчними методами при наявності і відсутності шумів спостереження мають якісні розходження.

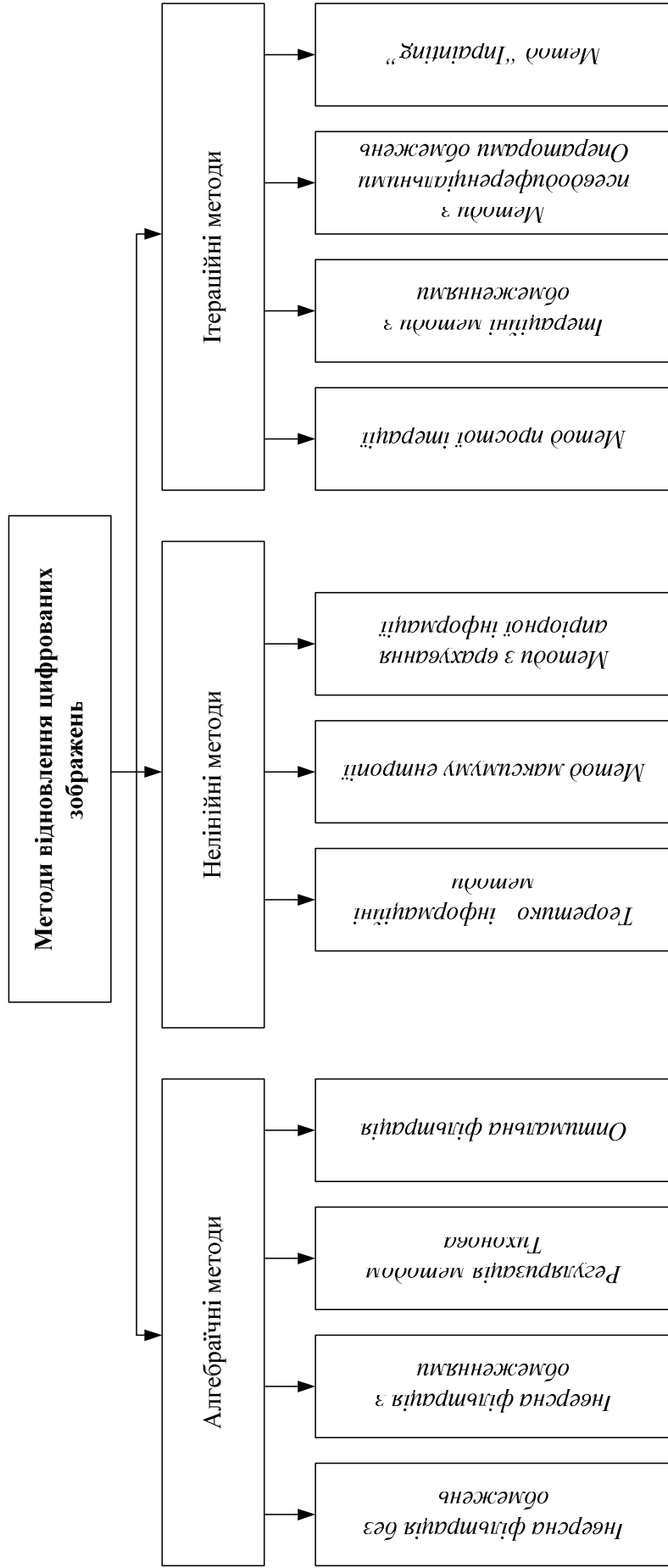


Рисунок. 1.4. Класифікація методів відновлення цифрових зображень

При  $h$  - квадратна матриця, існує зворотна матриця  $(h)^{-1}$ , що є розв'язуванням системи

$$\bar{u} = (h)^{-1} z . \quad (1.13)$$

Однак матричне рівняння являє собою недовизначену систему лінійних алгебраїчних рівнянь, тому що кількість невідомих більше числа рівнянь (розміри вихідного зображення завжди більше розмірів спотвореного зображення) Тому матриця  $h$  є прямокутною матрицею розміром. У цьому випадку для розв'язку використовуються різні методи псевдообернення матриць. Якщо недовизначена система розв'язувана, то вона має кілька рішень [22]. Виникає проблема вибору єдиного рішення з множини можливих, яке і буде прийнято як оцінювання  $\bar{u}$ . Серед усіх можливих рішень недовизначеної системи як оцінювання  $\bar{u}$  вибирається рішення, що мінімізує норму помилки відновлення

$$\varepsilon_1^2 = e_1(\bar{u})^T e_1(\bar{u}) = \sum_{i=1}^{L(u)} (u_i - \bar{u}_i)^2 = \min_{\bar{u}} , \quad (1.14)$$

де  $T$  - символ транспонування;

$e_1(\bar{u}) = u - \bar{u}$  - вектор помилки відновлення.

Критерій згідно (1.14) є критерієм найменших квадратів. Норма помилки буде мінімальною, якщо оцінювання

$$\bar{u} = h^+ z , \quad (1.15)$$

де  $h^+ = h^T (hh^T)^{-1}$  - узагальнена зворотна матриця.

У загальному випадку норма помилки не дорівнює нулеві.

Точне відновлення вихідного зображення при відсутності шумів можливе



1. коли спотворене зображення отримане в результаті згортки вихідного зображення і маски спотворення;

2. коли об'єкти вихідного зображення розташовані в центрі кадру і спостерігаються на фоні постійної яскравості, і відстань від об'єктів до границь кадру більше апертури максимального розміру об'єкту спотворення.

У цих випадках число невідомих буде дорівнює числу рівнянь, так як об'єкти, розташовані поза кадром, не будуть впливати на яскравість зображення, що спостерігається. Іншими словами, точне відновлення при відсутності шуму можливе тоді, коли обмеження розмірів кадру зображення, що спостерігається, не приводить до втрати інформації про вихідне зображення [6].

Основним недоліком алгебраїчних алгоритмів відновлення зображень є необхідність виконання трудомістких операцій згортки, множення і транспонування матриць великих розмірів.

*Нелінійні методи.* Для відновлення ушкоджених областей або зображення частин об'єкта спочатку використані методи, так званого, ретушування. Вони використані для заповнення ушкоджених об'єктів зображення таких як пила, подряпин, тріщин або видалення цілих об'єктів із зв'язаної структури зображення. Усі вище описані процедури проводилися при особистій участі оператора. Оператор виконував вручну повний діапазон операцій відновлення структури зображення.

Цифрові методи дозволяють робити відновлення ушкоджених об'єктів зображення напівавтоматично або автоматично. Розглянемо алгоритм для автоматичного цифрового відновлення, оснований на методиках, що використовуються професійними реставраторами. Алгоритм може використовуватися не тільки для відновлення ушкоджених зображень але також і для видалення небажаних об'єктів на зображенні. Області реставрації вказуються оператором, тому що вони залежать від його суб'єктивного вибору.

Для розглянутої методики відновлення не застосовуються класичні методи видалення шуму зі структури зображення. Так як точки (структурні елементи зображення) містять інформацію про реальні дані і шум для роботи алгоритму використовується

інформація головним чином із граничного оточення об'єктів структура яких відтворюється.

У літературі розглядаються в основному три напрямки:

1. відновлення структури зображення на фотографічних плівках;
2. синтез текстур;
3. дисоклюзія.

*Відновлення структури зображення на фотографічних плівках.* Кокагам використав авторегресивні рухомі моделі, щоб інтерполювати втрати в плівках суміжними структурами. Основна ідея полягає в тому, щоб копіювати в кожний поточний проміжок часу точки від границь сусідніх структур. Методика не може застосовуватися в алгоритмі, тому що не дозволяє обробляти декількома областей зображення одночасно [67].

*Синтез текстур.* Hirani і Totsuka комбінували частоту і просторову інформацію ушкодженої області щоб заповнити зазначеною (відібраною) при роботі текстурою. Це – дуже проста методика, що дозволяє одержати позитивні результати. З іншого боку, алгоритм головним чином має справу із синтезом текстури (а не із структурованим фоновим режимом), і вимагає, щоб користувач вибрав текстуру, що буде скопійована в область для відновлення. Для зображень, у яких область заповнення перекриває кілька різних структур, користувачі повинні проводити аналіз множини текстурних образів для знаходження подібних. Хоча частина цього пошуку може бути зроблена автоматично, це вимагає надзвичайно багато часу і нетривіального вибору багатьох критичних параметрів [61].

*Дисоклюзія.* Алгоритми роботи з методикою дисоклюзії поєднують методи видалення дефектів з метою сегментації зображення. Основна ідея полягає в тому, щоб підключити T – переходи однакового рівні еластичними мінімізуючими кривими. Методика була головним чином розроблена для простих зображень, з декількома об'єктами і постійними рівнями градацій сірого. Вона не може бути застосовна для прикладів із природними зображеннями. Masnou і Morel розширили ці ідеї, представляючи загальне варіаційне

формулювання для дисоклюзії і спеціального практичного алгоритму [81]. Алгоритм виконує відновлення, з'єднуючись з геодезичними кривими пунктів ізофото. Області для відновлення обмежені наявністю простої топології. Крім того, кути, з яким лінії рівня досягають границі відновлюваної області, спотворюються для відновлення градаційної структури.

Алгоритми, розроблені для відновлення структури об'єктів, що рухаються – не відповідають розв'язуваній задачі, тому що вони звичайно працюють на відносно невеликих ділянках і покладаються на існування інформації від декількох структур. З іншого боку, алгоритми, засновані на синтезі текстури можуть заповнювати великі області, але вимагають, щоб користувач визначив яку текстуру помістити.

**Ітераційні методи.** Ітераційними методами (методами послідовних наближень) розв'язання задач називають такі методи, в яких по відомому наближенню знаходиться наступне, точне наближення. Простим прикладом ітераційного алгоритму може служити перетворення розв'язку  $f^k$  в розв'язок  $f^{k+1}$  за допомогою поправок, розрахованих для  $f$ .

Ітераційні методи в останній час знаходять широке застосування в практиці реставрації зображень, так як в деяких випадках вони допускають просте врахування важливих для задач реставрації обмежень безпосередньо по схемі ітераційного алгоритму і тим самим представляють собою альтернативу методам нелінійного програмування. Основним питанням використання ітераційних методів являється збіжність ітерацій. Для деяких типів ядер основного інтегрального рівняння доказано загальні положення про збіжність послідовних наближень.

Суть ітераційних алгоритмів полягає у заміні оберненого оператора на послідовність кроків, причому на кожному наступному кроці розв'язок наближується до ідеального значення. Розповсюдженість даного методу на етапах відтворення зображень пояснюється простотою боротьби із нестійкістю розв'язку досліджуваних задач [6].

В загальну структуру ітераційного алгоритму можна ввести нелінійні обмеження, що перетворює алгоритм у нелінійний. Існуючі

ітераційні алгоритми можна поділити на три класи:

1. алгоритми на основі операторів, що не розширюються;
2. алгоритми на основі метода проєкцій на випуклі множини;
3. алгоритми на основі алгебраїчних методів.

Не лінійність ітераційних алгоритмів являється менш вираженою, ніж не лінійність теоретико – інформаційних методів. Простота реалізації ітераційних алгоритмів і існування доведених математичних результатів відносно їх збіжності зробили використання даних методів для розв'язання задач широко розповсюдженими.

*Метод „Inpainting”*. Inpainting – методика заповнення структури зображення у пошкоджених областях. Цілі і прикладні задачі inpainting:

відновлення ушкоджених картин і фотографій,  
видалення (заміна) відібраних об'єктів.

Після вибору користувачем області, що буде відновлена, алгоритм автоматично заповнює її навколишньою інформацією. Заміна проводиться так, що лінії ізофото, які досягають границь області стягаються усередині неї. У такий спосіб методика дозволяє одночасно обробляти кілька поточних ушкоджених областей зображення, що містять різні структури і фонові режими. Крім цього, не накладаються обмеження на топологію областей для роботи алгоритму. Прикладні задачі цієї методики полягають у відновленні старих фотографій і ушкодженої плівки; видаленні доданого тексту: дат, підзаголовків, реклами; і видаленні повних об'єктів із зображення [58], [70].

Алгоритм inpainting дозволяє автоматично виявляти ушкодження і відновлювати зображення об'єктів на плівці.

Методика не вимагає втручання оператора у процес відновлення структури зображення. Алгоритм може одночасно обробляти кілька ушкоджених ділянок зображення, оточених різними фоновими режимами. Для роботи не накладаються додаткові умови. Недолік даної методики складається в неможливості обробляти великі ушкоджені ділянки текстур. [12]

Приймається, що  $\Omega$  – ушкоджена ділянка зображення об'єкта,  $\partial\Omega$  – його границя. Робота методу полягає у русі лінії ізофото у напрямку кута руху точок контуру. Криві ізофото рухаються усередину робочої області до тих пір, поки не вироджуються в крапку або лінію.

Приймається, що  $I_0(i, j)$  де  $i \in [0..M]$ ,  $j \in [0..N]$  дискретне 2D зображення в градаціях сірого (8 біт) розміром  $(M+1) \times (N+1)$ . Процедура відновлення складається в одержанні сімейства зображень  $I^{(n)}(i, j)$  де  $i \in [0..M]$ ,  $j \in [0..N]$ ;  $I^{(0)}(i, j) = I_0(i, j)$  і  $\lim_{n \rightarrow \infty} I^{(n)}(i, j) = I^{(R)}(i, j)$  де  $I^{(R)}(i, j)$  шукане (відновлене) зображення. Кожен крок роботи алгоритму описується таким виразом:

$$I^{(n+1)}(i, j) = I^{(n)}(i, j) + \Delta t \cdot I_t^n(i, j), \quad (1.16)$$

де  $i, j \in \Omega$ ;

$n$  – індекс кроку роботи алгоритму;

$i, j$  – координати крапки зображення;

$\Delta t$  – нормалізуючий коефіцієнт;

$I_t^n(i, j)$  – основа для відновлення зображення  $I^{(n)}(i, j)$ .

Зображення  $I^{(n+1)}(i, j)$  є відновленим за структурою варіантом зображення  $I^{(n)}(i, j)$  з відновленою інформацією  $I_t^n(i, j)$ . При збільшенні індексу  $n$  покращується якість зображення.

Відповідно до технології алгоритму, необхідно дані з області на границі ділянки  $\partial\Omega$ , що відновлюється, внести усередину  $\Omega$ . Іншими словами переносяться розраховані дані усередину області  $\Omega$ . Прийmemo  $L^n(i, j)$  за розраховані дані і  $N^{(n)}(i, j)$  – напрямок поширення отриманих даних.

$$I_t^n(i, j) = \overline{\delta L^{(n)}}(i, j) \cdot \overline{N^{(n)}}(i, j), \quad (1.17)$$

де  $\overline{\delta L^{(n)}}(i, j)$  – значення зміни даних  $L^{(n)}(i, j)$ .

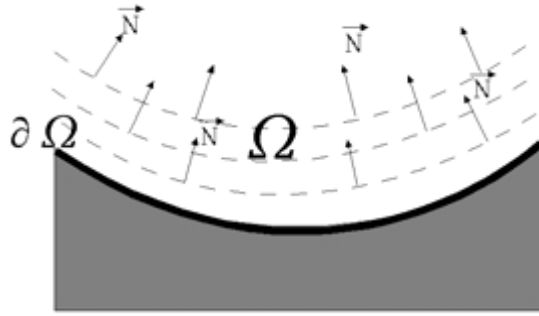


Рисунок. 1.5. Нормаль вектора направлення по границі області

З цього рівняння випливає, що оцінювання даних  $L^{(n)}(i, j)$  проводиться з урахуванням напрямку вектора  $\overline{N^{(n)}}(i, j)$ . У стійкому стані, коли алгоритм сходиться:  $I^{(n+1)}(i, j) = I^{(n)}(i, j)$  то  $\overline{\delta L^{(n)}}(i, j) \cdot \overline{N^{(n)}}(i, j) = 0$ , це означає, що інформація  $L$  була розмножена в напрямку  $\overline{N^{(n)}}(i, j)$ .

Для розрахунку інформації необхідно згладжувати дані  $L^{(n)}(i, j)$  оціночним фактором. Для цього використовується просте дискретне перетворення Лапласа  $L^{(n)}(i, j) = I_{xx}^n(i, j) + I_{yy}^n(i, j)$  чи інші методи, що дозволяють одержати границі об'єктів зображення.

Наступним етапом є розрахунок зміни  $\overline{\delta L^{(n)}}(i, j)$  величини  $L^{(n)}(i, j)$  уздовж  $\overline{N^{(n)}}(i, j)$ . Для цього визначається напрямок  $\overline{N^{(n)}}(i, j)$  для 2D даних, що модифікуються. Одним зі способів визначення  $\overline{N^{(n)}}(i, j)$  є його асоціація з нормаллю до дотичного уздовж границі  $\partial\Omega$  у кожній точці  $(i, j)$ . Такий вибір мотивується тим, що розраховані дані передаються безупинно уздовж границі ізофото. Орієнтація  $\partial\Omega$  не залежить від структури зображення і не впливає на процес відновлення.

Якщо ізофото мають тенденцію вирівнювання з  $\overline{N^{(n)}}$ , тоді виникає проблема наявності ізофото усередині області  $\Omega$ , що еквівалентно самостійному відновленню зображення.

У процесі роботи алгоритму використовується тимчасове оцінювання напрямку поля ізофото: для будь-якої точки  $(i, j)$

дискретний вектор градієнта  $\nabla I^n(i, j)$  визначає напрямок максимальної зміни у просторі, у той час, як поворот зазначеного вектора на  $90^\circ$   $\nabla^\perp I^n(i, j)$  визначає напрямок мінімальної зміни. З вище сказаного виходить, що вектор  $\nabla^\perp I^n(i, j)$  визначає напрямок ізофото. Поле вектора  $\overline{N^{(n)}}$  відповідає тимчасовій зміні  $\nabla^\perp I^n(i, j)$ . Використаний фактор тимчасової модифікації спочатку роботи алгоритму має грубу помилку, але потім досягає бажаної безперервності уздовж  $\partial\Omega$ .

Напрямок поля  $\overline{N^{(n)}}$  не нормований, але його величина нормується нормою градієнта поля  $I^{(n)}(i, j)$ . При обертанні отриманого вектора поля  $\nabla^\perp I^n(i, j)$  по або проти годинникової стрілки зміна значення  $I^{(n)}(i, j)$  повинна знаходитися в мінімумі.

Оцінювання зміни гладкості зображення проводиться шляхом розрахунку дискретної згортки із 2D оператором Лапласа і напрямку проєкції на лінії ізофото. Розрахунок проєкції використовується для модифікування структури зображення усередині області, що відновлюється.

Для збереження напрямку поля даних  $I^{(n)}(i, j)$  використовується моделювання дифузійного процесу, що чергується з процесом заповнення. Кілька ітерацій заповнення чергуються з дифузійним процесом. Цей процес відповідає періодичному вигину ліній ізофото, що дозволяє уникнути наявності границі їхнього перетинання. Для описаної методики використовується анізотропна фільтрація. Вона дозволяє одержати точну копію реального зображення після відновлення. Зокрема, використовується дискретна анізотропна дифузія в часі і у просторі рівнянням:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t}(x, y, t) &= g_\epsilon(x, y) \cdot k(x, y, t) |\nabla I(x, y, t)|, \\ \forall (x, y) &\in \Omega \end{aligned} \quad (1.18)$$

де  $\Omega^\epsilon$  – розширення  $\Omega$  кулею радіуса  $\epsilon$ ,  
 $k$  – Евклідова кривизна ізофото,

$g_\epsilon(x, y)$  – функція, що згладжує, в  $\Omega$  області.

В результаті попередньої обробки вхідне зображення піддається анізотропному дифузійному згладжуванню. Ціль обробки полягає у мінімізації впливу шуму на оцінювання напрямку ізофото. Після цього алгоритм inpainting виконується усередині області  $\Omega$ . При закінченні декількох ітерацій заповнення виконується анізотропна дифузія. Цей процес повторюється, поки не досягнутий стійкий стан системи.

Припустимо, що  $I^{(n)}(i, j)$  – складається з точок зображення усередині області  $\Omega$  в тимчасовому інтервалі  $n$ . Дискретне заповнення в математичному виді має наступний вигляд:

$$I^{(n+1)}(i, j) = I^{(n)}(i, j) + \Delta t \cdot I_t^n(i, j), \quad (1.19)$$

де  $i, j \in \Omega$ .

$$I_t^n(i, j) = \left( \overrightarrow{\delta L^n}(i, j) \cdot \frac{\overrightarrow{N}(i, j, n)}{|\overrightarrow{N}(i, j, n)|} \right) \cdot |\nabla I^n(i, j)|. \quad (1.20)$$

$$\overrightarrow{\delta L^n}(i, j) = (L^n(i+1, j) - L^n(i-1, j), L^n(i, j+1) - L^n(i, j-1)). \quad (1.21)$$

$$L^n(i, j) = I_{xx}^n(i, j) + I_{yy}^n(i, j). \quad (1.22)$$

$$\frac{\overrightarrow{N}(i, j, n)}{|\overrightarrow{N}(i, j, n)|} = \frac{(-I_y^n(i, j), I_x^n(i, j))}{\sqrt{(I_y^n(i, j))^2 + (I_x^n(i, j))^2}}. \quad (1.23)$$



$$\beta^n(i, j) = \frac{\overrightarrow{\delta L^n}(i, j) \cdot \overrightarrow{N}(i, j, n)}{|\overrightarrow{N}(i, j, n)|}. \quad (1.24)$$

$$|\nabla I^n(i, j)| = \begin{cases} \sqrt{(I_{xbm}^n)^2 + (I_{xfM}^n)^2 + (I_{ybm}^n)^2 + (I_{yfM}^n)^2}, \beta^n > 0 \\ \sqrt{(I_{xbM}^n)^2 + (I_{xfm}^n)^2 + (I_{ybM}^n)^2 + (I_{yfm}^n)^2}, \beta^n < 0 \end{cases}. \quad (1.25)$$

Першим проводиться розрахунок 2D фактору згладжування  $L$  і напрямку ліній ізофото. Потім розраховується коефіцієнт  $\beta^n$ , використовуючи (1.24), прогнозування  $\overrightarrow{\delta L^{(n)}}$  у напрямку  $\overrightarrow{N^{(n)}}$ , що дозволяє розрахувати зміну  $L^{(n)}$  уздовж  $\overrightarrow{N^{(n)}}$ . Наприкінці розраховується коефіцієнт крутизни нормованого градієнту зображення  $\nabla I^{(n)}$ . Поточна реалізація може вивести систему зі стійкого стану, тому використовується кутовий коефіцієнт. Субіндекси  $b$  і  $f$  вказують на наступний і попередній диференціальні відношення. Субіндекси  $m$  і  $M$  описують мінімум і максимум відношення між джерелом і нулем. Вибір ненормалізованого поля  $\overrightarrow{N^{(n)}}$  замість нормалізованої величини враховує більш просту і більш стійку числову схему.

### 1.3 Багат шарові фотографічні матеріали формування зображень

Багат шаровий матеріал, що призначається для кольорової фотографії, складається із трьох шарів (див. рис. 1.6), в яких утворюються, відповідно, три кольорово-незалежних зображення.

Дані шари відрізняються від одношарових галогенідосрібних (чорно-білих):

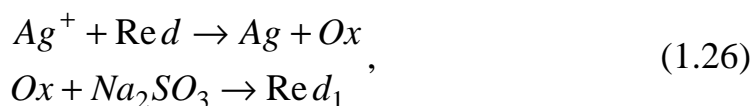
1. значно меншою товщиною,
2. наявністю компонентів – барвників або капуляторів.

Компоненти – барвники представляють собою сполуки, які у процесі кольорового проявлення взаємодіють із продуктами окислення проявляючої речовини кольорового проявника – похідними

парафенілєндіамина, утворюючи відповідні типи барвників [14].

Відмічу різницю між чорно – білим і кольоровим процесом проявлення.

Чорно – біле проявлення відбувається по схемі



де Red – формула речовини проявника;

Ox – окислена форма проявника;

Red<sub>1</sub> – речовина, що проявляє.

Основним продуктом реакції являється спектрально – неселективне поглинаюче металічне срібло. Ox є побічним продуктом реакції, що реагує з сульфітом натрію, який міститься у розчині проявника. Утворена сполука регенерує до нової, менш активної проявляючої речовини Red<sub>1</sub> (моносульфат вхідного проявляючого матеріалу Red)

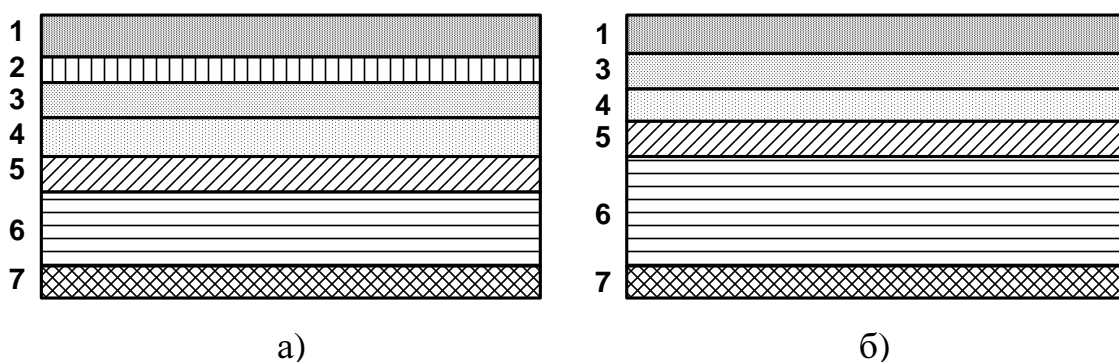
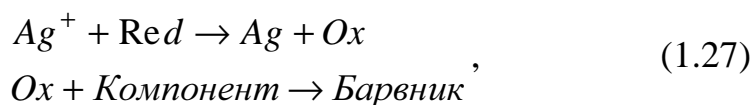


Рисунок. 1.6. Схеми будови кольорових фотоматеріалів:  
а) – негативної фотоплівки;  
б) – позитивної фотоплівки.

Кольорове проявлення багатшарового матеріалу проводиться по схемі:



де Red – формула речовини проявника;

Ox – окислена форма проявника;

*Компонент* – фарбоутворювальна компонента;

*Барвник* – утворений барвник.

В даній схемі основним продуктом реакції служить барвник, що утворюється в результаті конденсації окисленої форми проявляючої речовини, що проявляє, з фарбоутворювальною компонентою (*Компонент*) спектрально – селективною поглинаючою світло. Металічне срібло в даному випадку є побічним продуктом, що видаляється із фотографічного шару.

Між собою окремі елементарні шари багатошарового матеріалу суттєво відрізняються спектральними властивостями. Тобто вказані шари мають різні спектральні зони світлопоглинання і володіють різними спектральними розподіленнями чутливості.

Кольорові фотоматеріали поділяють на негативні, оборотні, позитивні фотоплівки і фотографічний папір. Характерною особливістю всіх кольорових фотоматеріалів є те, що вони мають три емульсійні шари з різною спектральною світлочутливістю. Крім того, в кожний емульсійний шар вводяться безбарвні компоненти (у деяких літературних джерелах їх називають кольоровими компонентами), які при хіміко–фотографічній обробці кольорових фотоматеріалів на тих ділянках, де подіяло світло, утворюють відповідні барвники (див. рис. 1.6).

На прозору основу 6 наносять підшар 5, призначений для міцного скріплення емульсійних шарів з підкладкою, на підшар – нижній світлочутливий шар 4, потім середній 3, жовтий фільтровий шар 2 і верхній світлочутливий шар 1. На зворотному боці основи є лаковий протишар 7, який перешкоджає скручуванню плівки у бік емульсії.

Для збільшення різкості зображення на фотопапері між світлочутливі шари додають желатинові прошарки 8, які перешкоджають дифузії утворених барвників з шару в шар. На емульсійному шарі фотопаперу розміщений захисний шар із задубленої желатинової плівки 9.

Верхній емульсійний шар має власну спектральну чутливість солей галогенного срібла до синьо–фіолетової області спектра і його безбарвний компонент утворює жовтий барвник. Середній емульсійний шар «активний» до зелених променів, тобто має ортохроматичну сенсibiliзацію і зберігає природну спектральну

світлочутливість до синьо-фіолетової області спектра. Його безбарвний компонент утворює пурпурний барвник.

Нижній емульсійний шар має панхроматичну сенсibiliзацію, тобто він «активний» до червоних променів і має власну чутливість до синьо-фіолетової області спектра. Його безбарвний компонент утворює голубий барвник. Таке розміщення світлочутливих шарів називають звичайним, або природним.

Отже, на кольорових негативних фотоплівках кольори поділяються внаслідок різної спектральної чутливості емульсійних шарів. У верхньому світлочутливому (синьочутливому) шарі утворюється зображення лише тих подробиць об'єкта, які відбивають сині промені, в середньому (зелено чутливому) – зелені, в нижньому (червоночутливому) – червоні. Оскільки середній і нижній емульсійні шари мають природну світлочутливість до синьо-фіолетових променів, то щоб виключити дію на них цих променів, між верхнім і середнім шарами наносять жовтий фільтровий шар, який поглинає сині промені. Він складається з колоїдного срібла в желатині, яке виводиться з шару при хіміко-фото-графічній обробці фотоплівки.

Сумарна товщина емульсійного шару 20 – 25 мкм, а фільтрового – 2 – 3 мкм.

У лаковий протискручувальний шар кольорових негативних немаскованих плівок вводять протиореольний барвник сірого кольору, який вимивається в процесі обробки. Для покращення якості передачі кольору в середній і нижній світлочутливі шари кольорових негативно маскованих плівок, крім безбарвних компонентів, вводять забарвлені. Для поліпшення різкості зображення роль протиореольного шару виконує синій колоїдносрібний желатиновий підшарок срібло якого виводиться в процесі обробки [27].

Кольорові оборотні фотоплівки мають таку ж будову, як і негативні немасковані, але протиореольним шаром у них є коричневий колоїдносрібний желатиновий підшарок.

Кольорові позитивні фотоплівки мають зміщений розподіл світлочутливих шарів. Такий розподіл світлочутливих шарів не містить жовтого фільтруючого шару. Даний шар повністю поглинає сині промені і добре зберігає від їхнього впливу середній і нижній світлочутливі шари. Проте він містить окислювачі, які взаємодіють з проявною речовиною, що спричинює утворення кольорової вуалі.

На позитивних фотоматеріалах вуаль є мінімальною. Тому у кольорових позитивних фотоплівках верхній світлочутливий шар забарвлений жовтим барвником – тартрацином, який затримує сині промені і вимивається в процесі обробки. Для підвищення різкості зображення середній і нижній світлочутливі шари мають протиореольне забарвлення, яке перешкоджає розсіюванню світла в шарах. Середній шар забарвлений пурпурним барвником, що поглинає зелені промені, а нижній – голубим, що поглинає червоні промені. Протиореольні барвники вимиваються в процесі обробки. У лаковий протискручувальний шар вводиться зелений протиореольний барвник, який також вимивається при обробці.

У кольорових позитивних фотоплівок з зміщеним розподілом світлочутливих шарів верхній шар «активний» до зелених, середній – до червоних і нижній – до синіх променів. Такий розподіл світлочутливих шарів значно підвищує різкість, оскільки візуальне оцінювання різкості кольорового зображення насамперед залежить від пурпурного, голубого і від жовтого зображень. Це пов'язано з порогом кольоророзрізнення ока. Найбільш різким буде зображення у верхньому шарі і менш різким – у середньому і нижньому внаслідок розсіювання світла у верхніх шарах. Тому і різкість зображення при візуальному розгляді у плівок із зміщеним розподілом світлочутливих шарів дуже зростає. Плівки мають зелений протиореольний лаковий шар. Оскільки у них синьо-фіолетові промені повинні проходити до нижнього шару, помітно не впливаючи на верхній і середній шари, то світлочутливою речовиною в останніх є хлористе срібло з дуже незначною світлочутливістю до короткохвильових випромінювань, а в нижньому – бромисте.

У чорно-білій фотографії єдиним продуктом фотографічного процесу є високодисперсне металеве срібло. Воно поглинає світло практично спектрально – неселективно або дуже слабо селективно. Тому при вимірюванні оптичних властивостей почорніння майже зовсім не чутливе до спектральної області освітлення.

У кольоровій фотографії властивості кольорових шарів залежать від спектрального діапазону. Кожний з барвників багатшарового матеріалу володіє власною характерною спектральною кривою поглинання (див. рис. 1.7) В межах видимої і близькій інфрачервоній областях спектра монохроматичні показники поглинання кожного

даного елементарного емульсійного шару багат шарових матеріалів при будь-якій довжині хвилі лінійно зв'язані з концентрацією барвника, що міститься в цьому шарі [14].

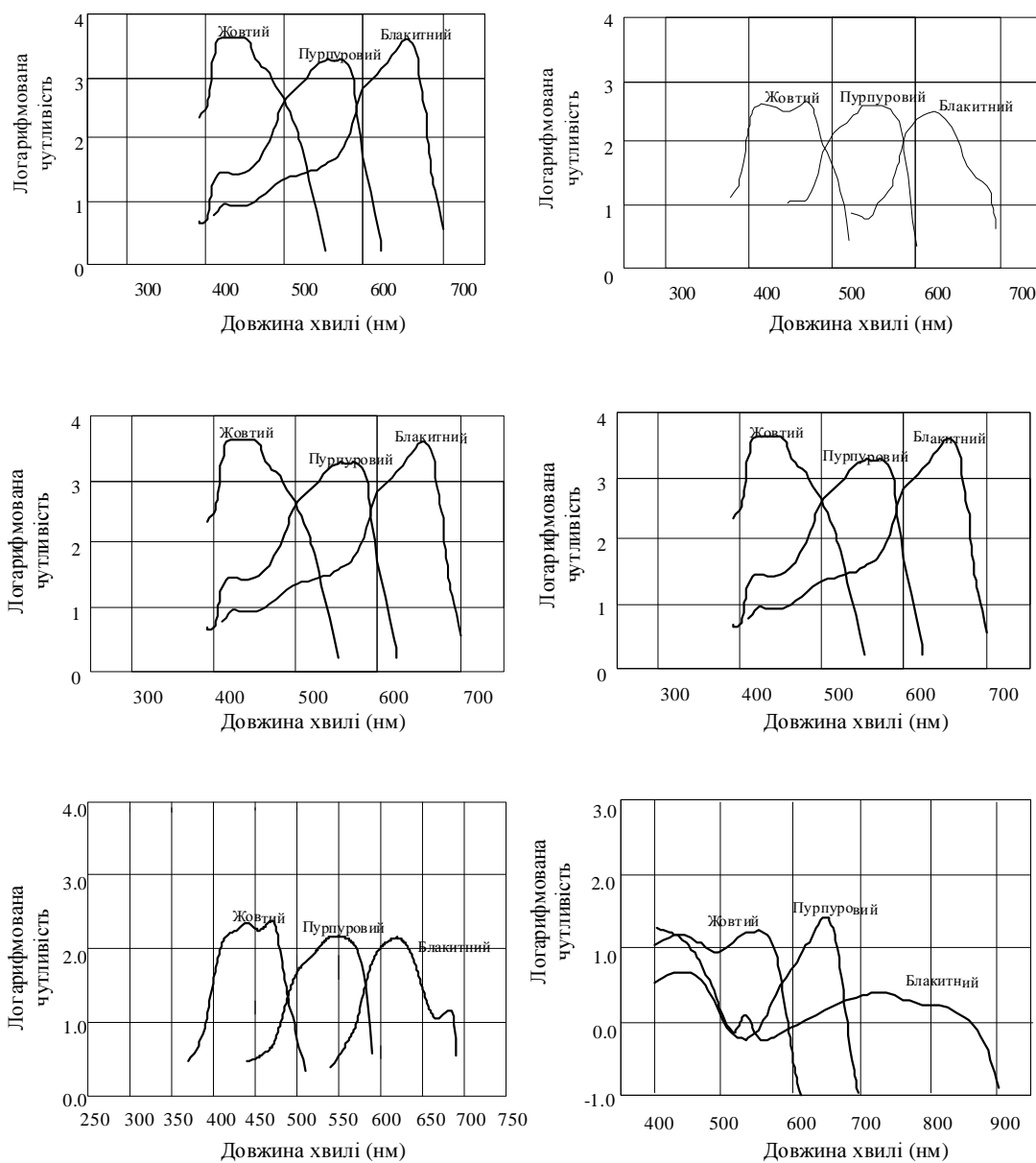


Рисунок. 1.7. Спектральні властивості емульсійних шарів БФМ фірми "Kodak"

Спектральна крива питомого показника поглинання барвника є стабільною характеристикою оптичних властивостей барвника, тобто властивості останніх підпорядковуються закону Бугера, а це означає, що до БФМ застосовуються методи хімічної колориметрії.

Розглянемо математичну модель БФМ. Кожний емульсійний шар

БФМ реагує на випромінювання так саме як емульсійний шар одношарового фотографічного матеріалу. В якості першого наближення запропоноване припущення є придатним для проведення первинного аналізу властивостей БФМ.

Типові характеристики спектральної чутливості емульсійних шарів БФМ приведені на рис. 1.7.

Інтегральні експозиції шарів БФМ визначаються виразами:

$$X_i(C) = d_i \int C(\lambda) L_i(\lambda) d\lambda, \quad (1.28)$$

де  $d_i$  – постійні коефіцієнти пропорційності;

$X_i(C)$  – інтегральна експозиція кожного шару БФМ;

$C(\lambda)$  – спектральна густина енергії експонуючого світла;

$L_i(\lambda)$  – спектральна чутливість окремого шару.

Коефіцієнт пропускання  $\tau_{БФМ}$  проявленого експонованого БФМ розраховується як добуток коефіцієнтів пропускання  $\tau_i(\lambda)$  кожного шару БФМ:

$$\tau_{БФМ} = \prod_{i=1}^N \tau_i(\lambda), \quad (1.29)$$

де  $N$  – кількість шарів БФМ.

Коефіцієнт пропускання кожного шару барвника БФМ залежить від спектральної характеристики поглинання і концентрації. Функціонально залежність виражається через відносну оптичну густину [39]. В даному випадку загальний коефіцієнт пропускання БФМ виражається як

$$\tau_{БФМ} = \prod_{i=1}^N 10^{-k_i \cdot D_i(\lambda)}, \quad (1.30)$$

де  $k_i$  – доля барвника в елементарному шарі БФМ;

$D_i(\lambda)$  – спектральна оптична густина.

З вище приведеного виразу загальна оптична густина БФМ

обчислюється по формулі:

$$D_{БФМ} = \sum_{i=1}^N D_i. \quad (1.31)$$

Модель каналу передачі інформації (КПІ) для вимірювання оптичних густин проявлених БФМ представлена на рис. 1.8. Модель представляє собою систему, що складається із джерела електромагнітного випромінювання, модулятора експонованого освітлення, що є селективним у визначених спектральних діапазонах кожного шару БФМ.

При експонуванні проявленого БФМ випромінюванням в широкому спектральному діапазоні, кожний шар виступає як спектрально – селективний фільтр у визначеному діапазоні спектру електромагнітного випромінювання. Крім селективних властивостей, шари мають залежну від кількості барвника пропускну і розсіюючу здатність. В загальному вигляді модель експонованих проявлених БФМ представляє собою джерело випромінювання в широкому спектральному діапазоні, що проходить через спектрально – селективний фільтр, в якості якого виступає спектральна селективність речовини барвника і амплітудно – модулюючий перетворювач.

Розглянемо модель КПІ для вимірювання оптичних густин проявлених БФМ з опорним джерелом світла для визначення основних компонентів системи спотворення інформації, що експонована в шарах БФМ. В якості базової використовується модель розроблена Надері і Савчуком, яка, в свою чергу, оснований на моделі Келі [40]. В моделі (див. рис. 1.9) враховуються: просторова нечіткість зображення, нелінійність характеристичної кривої, дифузійні властивості БФМ.



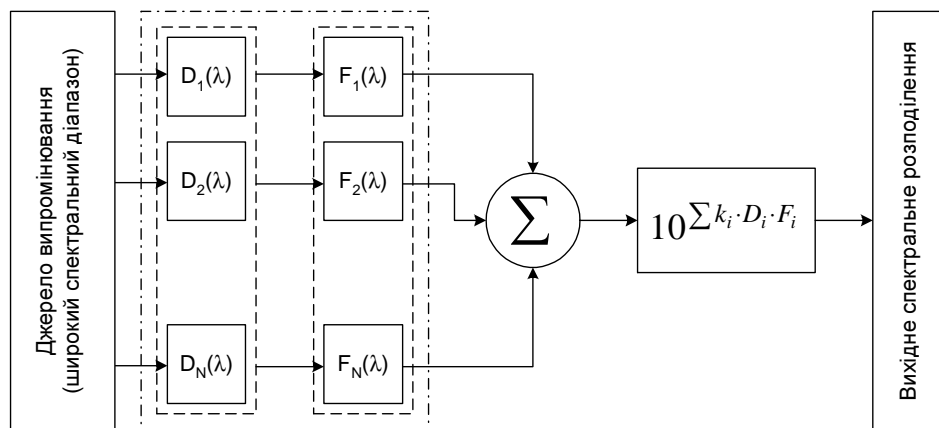


Рисунок. 1.8. Модель КПІ для вимірювання оптичних густин проявленого БФМ

Модель КПІ експонованих БФМ складається із джерела опорного випромінювання, БФМ, вихідного оптичного зображення. Джерелом опорного випромінювання є випромінювачі зі спектральним діапазоном, що знаходиться у синій, зеленій, червоній і дальній інфрачервоній областях спектру. БФМ представляє собою сукупність окремих елементів структурної схеми, які в цілому характеризують властивості проявлених БФМ. Оптична дифузія розсіювання характеризує дифузійне розсіювання в підкладинковому шарі. Нелінійність характеристичної кривої впливає на лінійність відображення градаційної шкали і характеризується коефіцієнтом нелінійності кожного спектрально – селективного шару БФМ. Спектрально – селективна оптична густина виступає в якості елемента з спектрально-залежною амплітудно-модулюючою характеристикою. Наступні елементи схеми використовуються для розмежування спектрально – селективних характеристик БФМ із шумовими і спотворюючими структуру вихідного зображення елементами. Дані елементи є індивідуальними для кожного типу БФМ [53].

Слід виділити наступну істотну особливість спектральних кривих поглинання барвників багатошарових плівок. У межах видимої області спектра (від  $\lambda = 420 - 680 \text{ nm}$ ) форма кривих постійна для різних зразків плівок даного типу при зміні у досить широких межах умов хіміко-фотографічної обробки. У фіолетовій і особливо ультрафіолетовій області різні зразки плівок мають різне поглинання. На рис. 1.10 приведені криві  $D(\lambda)$  для найбільш поглинаючого зразка негативних БФМ.

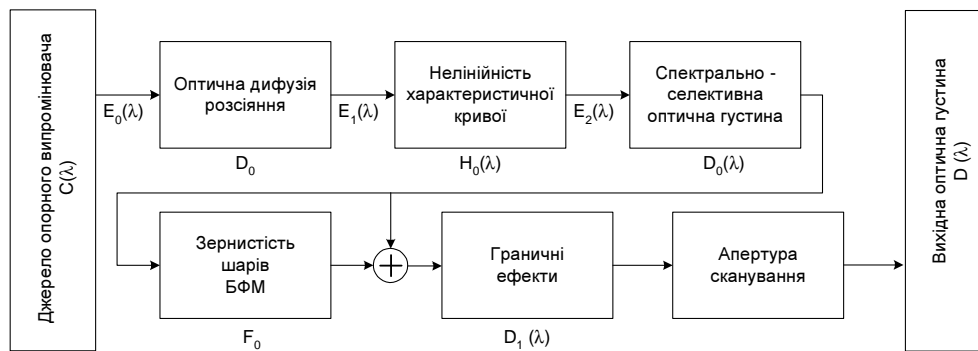


Рисунок. 1.9. Розширена модель КПІ для вимірювання оптичної густини

Будь-яка форма сумарної кривої поглинання кольорового поля може бути обумовлена лише одним сполученням концентрацій трьох обраних барвників. Така крива є найбільш повним описом властивостей проявленого БФМ.

Спектральні характеристики БФМ мають наступні властивості:

1. в ультрафіолетовому і видимому діапазонах барвники БФМ спектрально – селективні;
2. в інфрачервоному вони не мають такої властивості (див. рис. 1.10).

В інфрачервоному діапазоні барвники БФМ є селективно-нейтральними і мають постійну оптичну густина, що не залежить від типу або спектральних характеристик барвника.

Мірою фотографічного ефекту можуть служити дві величини:

1. поверхнева концентрація металевого срібла в почорнінні;
2. оптична щільність почорніння.

Перший вид оцінювання дає представлення про хімічну сторону ефекту, а другий – про оптичну. Ці дві принципово різні кількісні міри результату дії світла на чорно-білий матеріал зв'язані між собою через поняття так званого фотометричного еквівалента, тобто через відношення поверхневої концентрації срібла в почорнінні до дифузійної оптичної щільності останнього.

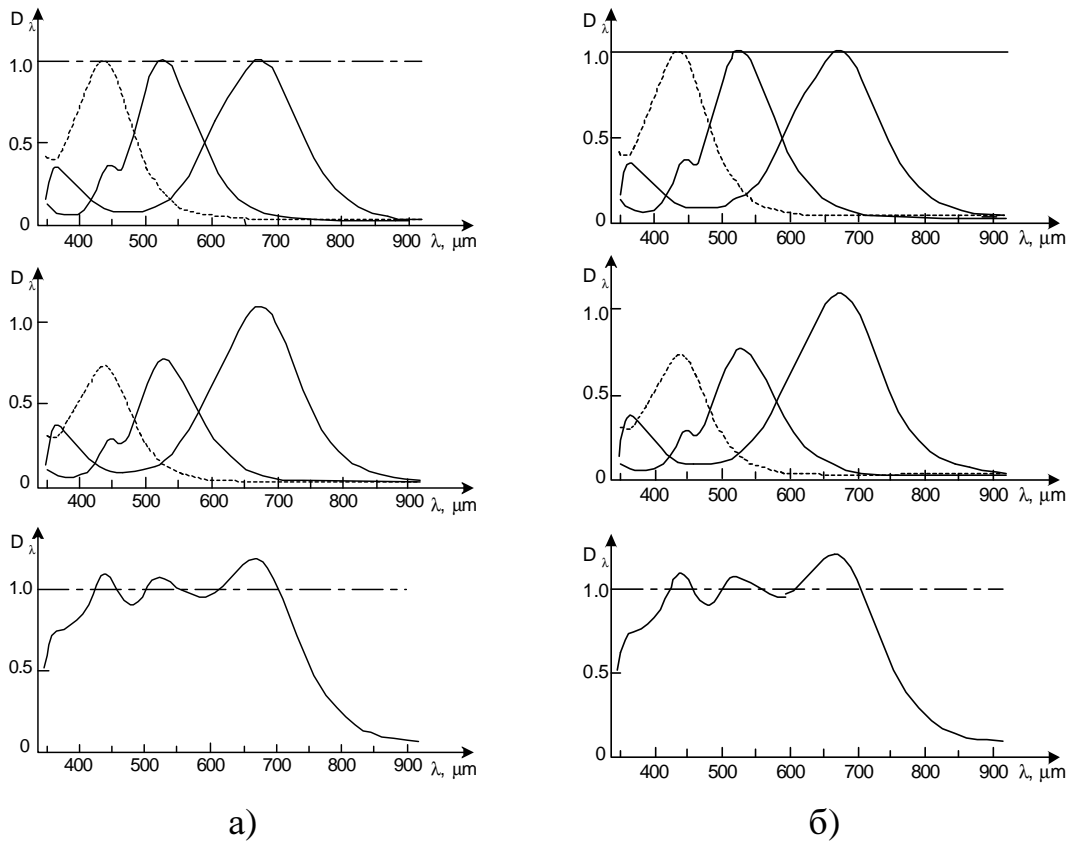


Рисунок. 1.10. Спектральні криві поглинання барвників кольорових фотоплівок:  
 а) негативних;  
 б) позитивних.

## 2 МЕТОДИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО - ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ АНАЛІЗУ СТРУКТУРНИХ ДЕФЕКТІВ

### 2.1 Методи аналізу і моделі систем цифрового перетворення інформації

Особливість методів аналізу інформаційних властивостей полягає в тому, що розглядається не одинична структура даних, а сукупність структур визначеного типу, наприклад, сукупність зображень (для систем повітряного фотографування сукупність зображень аеролашдшафтів або різних об'єктів) [13]. При цьому передбачається, що дана структура, яка підлягає передачі або збереженню, є результатом випадкового вибору з сукупності структур. Останні разом з ймовірностями їх вибору створюють структуру реального об'єкту. Передача або збереження інформації здійснюється сукупністю технічних засобів.

Розглянемо фотографічні системи різного призначення, зокрема аерофотографічні системи.

Найпростіша структурна схема каналу передачі двовимірної інформації зображена на рис. 2.1.

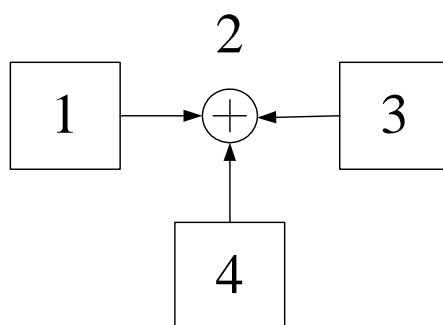


Рисунок. 2.1. Структурна схема КПІ передачі інформації у ІВС:

- 1 – джерело інформації;
- 2 – передавальна система;
- 3 – система прийому інформації;
- 4 – джерело перешкод.

Якщо спектр нерівномірний, коефіцієнт спотворення інформації

можна записати в інтегральній формі:

$$C_0 = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \left[ 1 + \frac{S_c(f)}{S_n(f)} \right] df, \quad (2.1)$$

де  $S_c, S_n$  – енергетичні спектри сигналу і шуму відповідно.

Для оптичних двовимірних систем, вираз (2.1) приймає наступний вигляд:

$$C_0 = 0,5 \cdot \iint_{S_{\vartheta}} \left[ 1 + \frac{S_{s.in}(\vartheta_x, \vartheta_y) \cdot W^2(\vartheta_x, \vartheta_y)}{S_{n.in}(\vartheta_x, \vartheta_y)} \right] d\vartheta_x d\vartheta_y, \quad (2.2)$$

де  $W(\vartheta_x, \vartheta_y)$  – ФПМ оптичної системи;

$S_{s.in}(\vartheta_x, \vartheta_y), S_{n.in}(\vartheta_x, \vartheta_y)$  – просторово – частотні спектри дисперсії сигналу на вході і виході системи;

$S_{\vartheta}$  – область інтегрування в площині просторових частот.

Вираз (2.2) характеризує просторово-частотну модель двовимірної структури даних. Джерелом інформації у цьому випадку, як і у випадку на структурній схемі, показаної на рис. 2.2, є джерело стаціонарного білого шуму  $S_{s.in}(\vartheta_x, \vartheta_y)$ . В якості джерела спотворень використовується джерело шуму, просторово - частотний спектр дисперсії якого має Гаусову форму.

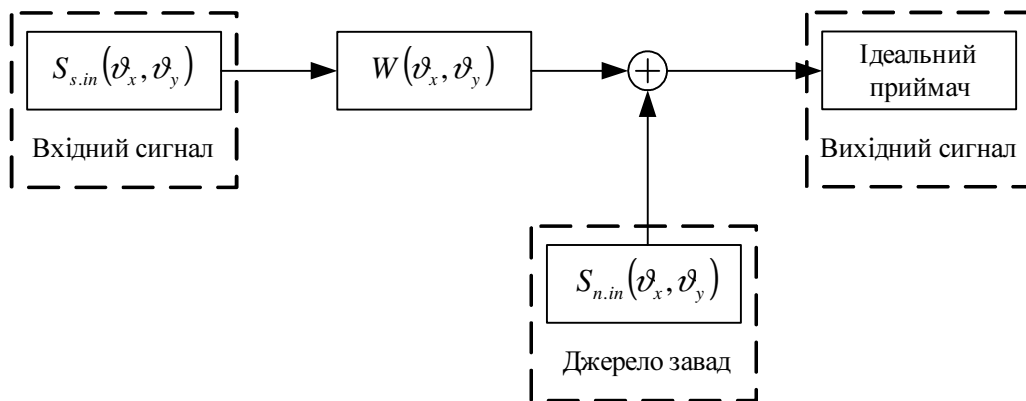


Рисунок. 2.2. Просторово - частотна модель двовимірної системи

З огляду на те, що для багатьох практичних випадків двовимірні функції  $S_{s.in}(\vartheta_x, \vartheta_y)$ ,  $S_{n.in}(\vartheta_x, \vartheta_y)$ ,  $W(\vartheta_x, \vartheta_y)$  мають кругову симетрію і можуть бути зображені у вигляді тіл обертання, вираз (2.2) представляємо у виді:

Для того, щоб обчислити коефіцієнт спотворення, даний вираз максимізується по двох параметрах: спочатку з урахуванням обмеженого динамічного діапазону системи максимізується середньоквадратичне значення вхідного сигналу, а потім для отриманого на виході системи спектрального відношення сигнал/шум визначається верхня границя частоти інтегрування  $\vartheta_m$ , що відповідає максимальному значенню величини  $C_0$ .

$$C_0 = \pi \int_0^{\vartheta_m} \left[ 1 + \frac{S_{s.in}(\vartheta) \cdot W^2(\vartheta)}{S_{n.in}(\vartheta)} \right] d\vartheta, \quad (2.3)$$

де  $\vartheta = \sqrt{\vartheta_x^2 + \vartheta_y^2}$  – узагальнена просторова частота.

При використанні іконічних систем технічного призначення якість систем оцінюється для малоконтрастних сигналів. У цих випадках зображення, що одержані системами, використовуються для подальшого дешифрування. Найбільші труднощі при цьому виникають при дешифруванні малоконтрастних зображень [44].

Прикладом таких систем є широкий клас фотографічних і телевізійних систем, що використовуються в процесі аерозйомки земної поверхні з літаків і космічної зйомки з ШСЗ для картографування, дослідження природних ресурсів, оцінювання забруднення навколишнього середовища й інших задач.

Для оцінювання подібних систем використовується вираз (2.2) з такими модифікаціями:

1. середньоквадратичне значення похибки вхідного сигналу обмежується величиною порядку 0,2-0,3 величини динамічного діапазону системи по вхідним сигналам;
2. межа інтегрування виразу (2.2) обмежується просторовою частотою  $\vartheta_m = R_{kt}$ , де  $R_{kt}$  - роздільна здатність по штриховій мірі з контрастом  $k_r$ , рівним контрастові реального сигналу.

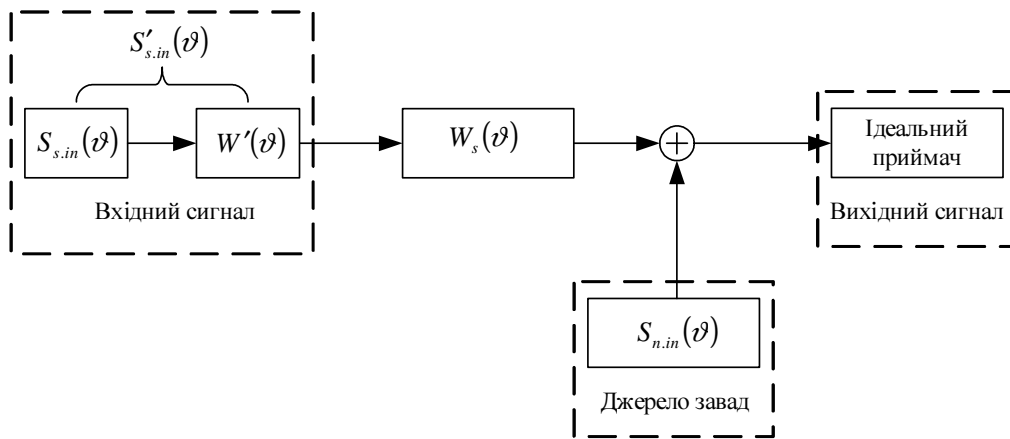


Рисунок. 2.3. Структурна схема каналу передачі інформації з джерелом інформації, що враховує усереднену статистику реальних сигналів

Вираз якісного оцінювання  $C_I$  для структурної системи, зображеної на рис. 2.3 у даному випадку (2.2) приймає вид

$$C_I = \pi \int_0^{R_{kt}} \vartheta \cdot \left[ 1 + \frac{S'_{s.in}(\vartheta) \cdot W^2(\vartheta)}{S_{n.in}(\vartheta)} \right] d\vartheta, \quad (2.4)$$

де  $S'_{s.in}(\vartheta) = S'_{s.in}[W'(\vartheta)]^2$  – просторово-частотний спектр дисперсії вхідного сигналу з урахуванням усередненої форми спектра реальних сигналів.

Модель сигналу  $W'(\vartheta)$ , що описує ФПМ, форма якої подібна усередненій формі амплітудного спектра реальних сигналів, дає можливість врахувати статистику реальних сигналів.

У виразі (2.2)  $C_0$  являє собою якість і є абсолютним оцінюванням. Дана величина однозначно визначає потенційно можливу величину коефіцієнта передачі дійсного зображення, що може зафіксувати іконічна система на одиниці площі свого приймача інформації. У виразі (2.1) величина  $C_I$  є відносним оцінюванням якості і характеризується якість інформації, що може зафіксувати іконічна система на одиниці площі свого приймача відносно заданої величини сигналу у прийнятих межах інтегрування.

Для одної системи величина  $C_0$  завжди більше  $C_I$ . Величину  $C_I$  доцільно використовувати в якості одного з можливих порівняльних критеріїв для оцінювання і ранжування різних варіантів іконічних

систем.

Процедура розрахунку оцінювання  $C_I$  істотно простіше розрахунку інформаційної ємності  $C_0$  так як не враховує максимально припустимого значення вхідного сигналу (з урахуванням обмеженості динамічного діапазону), при якому реалізуються потенційні можливості системи. Границі інтегрування при розрахунках інформаційного оцінювання легко визначаються і збігаються з властивостями реального об'єкту.

Оцінювання  $C_I$  наближується до умов дешифрування малоконтрастних зображень, якщо, використовувати лінійні перетворення і перетворити структурну схему, зображену на рис. 2.3 у схему зображену на рис. 2.4.

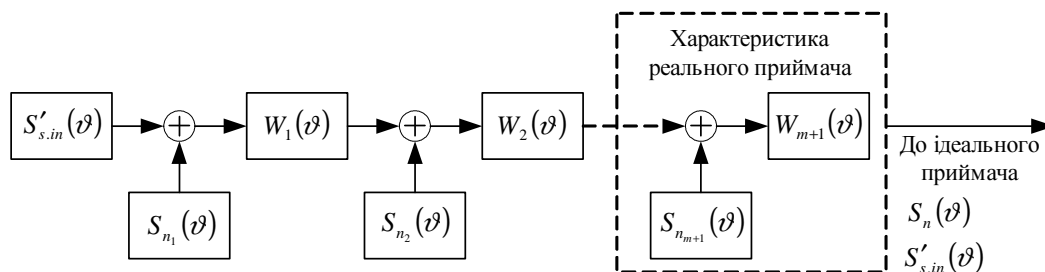


Рисунок. 2.4. Узагальнена структурна схема з багатьма джерелами шумів

Для даної структурної схеми оцінювання якості значення  $C_I$  обчислюється таким чином:

Як видно з узагальненої структурної схеми (див. рис. 2.4) перше джерело шумів діє на вхід системи разом з корисним сигналом (цей випадок часто зустрічається на практиці) Центральна частина структурної схеми, виконана у вигляді послідовного з'єднання декількох елементів із відповідною ФПМ, дозволяє еквівалентно представити лінійну модель будь-якої багатоланкової іконічної системи.

За допомогою ФПМ  $W_n(v)$  і джерела шумів  $S'_{n_{n+1}}(v)$  можна врахувати еквівалентні передатні і шумові характеристики СЦП. Таким чином, модель в узагальненій структурній схемі (див. рис. 2.4) дозволяє послабити вимоги припущення.

Реалізована у виразі (2.5) форма запису оцінювання припускає, що кінцева ланка каналу проходження інформації, передатні властивості якого враховуються, має джерело адитивного шуму на своєму виході.



Така форма запису дозволяє досить наочно врахувати вплив зміни передатних властивостей будь-якої лінійної ланки, що передує кінцевій. Якщо в реальній системі відсутні які-небудь передатні ланки або які-небудь джерела перешкод, то відповідна ФПМ замінюється на одиницю, а відповідний спектр перешкод - на нуль.

$$C_1 = \pi \int_0^{R_{kt}} \vartheta \cdot \left[ 1 + \frac{S'_{s.in}(\vartheta) \cdot W^2(\vartheta)}{S_{n.in}(\vartheta)} \right] d\vartheta, \quad (2.5)$$

$$\text{де } S'_{s.out}(\vartheta) = S'_{s.in}(\vartheta) \cdot \prod_{i=1}^m W_i^2(\vartheta),$$

$$S'_{n.out}(\vartheta) = \sum_{i=1}^m S'_{n_i}(\vartheta) \cdot \prod_{j=1}^m W_j^2(\vartheta) + S'_{n_{n+1}}(\vartheta).$$

Порівняння коефіцієнту якості  $C_0$  з оцінюванням  $C_1$  показує, що остання більш чуттєвий до зміни рівня шумів у системі. Відношення сигнал/шум, взяте у повному динамічному діапазоні системи, завжди значно більше відношення сигнал/шум при малих значеннях сигналів.

Коефіцієнту якості  $C_0$  і оцінювання  $C_1$  є різними формами критерію відношення сигнал/шум, тому що крім спектрального відношення сигнал/шум на виході системи існує додаткова складова інформації яка не використовується при використанні запропонованого критерію.

Поряд з перевагами коефіцієнт оцінювання  $C_1$  у порівнянні з коефіцієнтом  $C_0$ , стосовно реальних систем, оцінювання  $C_1$  володіє і деяким недоліком: воно характеризує систему поблизу обраної робочої точки на статичній (амплітудній) характеристиці системи і не враховує повного діапазону статичної характеристики, у межах якої нормально функціонує дана система. Якщо статична характеристика системи нелінійна, то оцінювання  $C_1$  буде змінюватися в залежності від вибору робочої точки.

## 2.2 Методи оцінювання систем цифрового перетворення інформації для багатошарових фотографічних матеріалів

Оцінювання якості фотограмметричної системи характеризує її здатність відтворення сигналів з максимальної точністю. Тому для оцінювання якості системи використовуються критерій  $C_1$ . Цей критерій використовується як чисельне оцінювання системи при дослідженні ймовірних характеристик дешифрування зображень. Останнє пов'язано з тим, що критерій якості на відміну від інших критеріїв враховує не тільки спектральне відношення сигнал/шум на виході системи, але і передатні властивості і шуми приймача.

Структурну схему каналу передачі інформації для аерофотографічних систем показана на рис. 2.5.

Для даної структурної схеми вираз інформаційного оцінювання (2.2) має вигляд [41]

У формулі (2.6) передатні властивості системи збільшення з коефіцієнтом збільшення  $\alpha_m$  не враховувалися, тобто вважалося, що ФПМ СЦП дорівнює 1. Вплив збільшення в цьому випадку враховується при перерахуванні ФПМ приймача в площину розглянутої фотографічної плівки і при визначенні величини дисперсії сигналів і шумів.

$$C_1 = \pi \int_0^{R_{kl}} \vartheta \cdot \left[ 1 + \frac{S'_s(\vartheta) \cdot \alpha_m^2 \cdot W_\Sigma^2(\vartheta) \cdot W_{np}^2(\vartheta)}{S_{n_{nl}}(\vartheta) \cdot \alpha_m^2 \cdot W_{np}^2(\vartheta) + S_{n_{np}}(\vartheta)} \right] d\vartheta \quad (2.6)$$

де  $\alpha_m$  – коефіцієнт збільшення в ІВС;

$S_{n_{nl}}(\vartheta)$ ,  $S_{n_{np}}(\vartheta)$  – просторово-частотні спектри дисперсії корисного сигналу на вході, шумів зернистості фотографічної плівки і шумів приймача;

$W_\Sigma(\vartheta)$  – результуюча ФПМ аерофотографічної системи;

$W_{np}^2(\vartheta)$  – ФПМ системи приймача, приведена до площини фотографічного зображення з урахуванням впливу коефіцієнта збільшення  $\alpha_m$ .

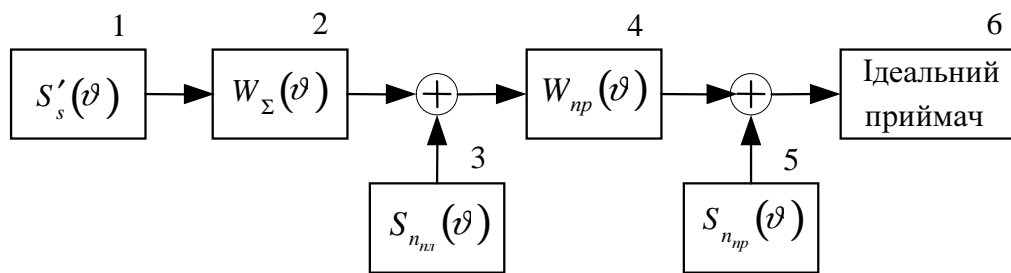


Рисунок. 2.5. Структурна схема каналу передачі інформації в ІВС

- 1 – джерело сигналу;
- 2 – аерофотосистема;
- 3 – шуми зернистості плівки;
- 4 – фотоприймач і АЦП;
- 5 – шуми фотоприймача і АЦП;
- 6 – ідеальний приймач.

Для визначення зв'язку між ймовірностями характеристиками дешифрування і величиною критерію якості у вираз (2.6) підставляються значення усереднених просторово-частотних спектрів дисперсій зображень досліджуваних об'єктів. Так як спектр зображення залежить не тільки від форми об'єкта, але і від його граничних розмірів, величина критерію якості буде змінюватися в залежності від масштабу фотографування. Для проведення аналізу системи приймаємо, що просторово-частотний спектр сигналу є рівномірним у деякому діапазоні просторових частот [24].

Величина шумів зернистості визначається по зображенню цифрованого БФМ. Тому фактори прояву враховуються і при визначенні просторово-частотного спектра корисного сигналу. Це здійснюється, при умовному прирівнянні значення дисперсії випадкового сигналу до квадрата амплітуди детермінованого сигналу, отриманого по зображенню цифрованого БФМ. При цьому інформаційне оцінювання  $C_I$  буде враховувати відношення сигнал/шум у зображенні цифрованого БФМ.

Просторово-частотний підхід застосовується до лінійних систем. Перепад оптичної щільності  $\Delta D$  не може бути безпосередньо використаний як корисний сигнал. За величину корисного сигналу приймається величина перепаду непрозорості  $(1 - \Delta \tau)$  обумовлена кривою, яку отримують при перерахуванні граничної кривої.

Використання величини непрозорості пов'язане з тим, що при

такому представленні амплітудної характеристики, збільшення вхідного сигналу відповідає збільшенню вихідної величини.

Визначимо амплітудні значення сигналів і шуму, що входять у формулу (2.7) Амплітуда корисного сигналу

$$\Delta A = \tau_{\max} - \tau_{\min}, \quad (2.7)$$

де  $\tau_{\min}$ ,  $\tau_{\max}$  – величини непрозорості, що відповідають негативним зображенням об'єкта і фона відповідно.

Виміряні значення амплітуди сигналу  $\Delta A$  для негативних плівок (у випадку, коли контраст вихідного зображення  $k_t=0,2$ ) приведені в табл. 2.1. У таблиці приведені середньоквадратичні значення шумів зернистості по пропусканню  $\sigma_D$  і по густини  $\sigma_\tau$ .

Таблиця 2.1 - Параметри аерофотоплівки

Тип плівки	$\gamma$	$\Delta A$	$\sigma_D$	$\sigma_\tau$	$\alpha_{\text{нор}}$
ТІ2159	2,1	0,0390	0,073	0,0170	7
ТІ2527	1,9	0,0540	0,058	0,0133	10
ТІ2569	3	0,0640	0,020	0,0046	17

Фактор зернистості фотографічної плівки визначає те граничне збільшення  $\alpha_{\text{нор}}$  при якому спостерігач незброєним оком на відстані оптимального спостереження (250 мм) починає виявляти зернисту структуру даного фотоматеріалу на рівному полі із середньою щільністю, близької до 1D.

Знаючи середньоквадратичні значення приведених шумів зернистості і еквівалентних шумів приймача, а також з огляду на те, що середньоквадратичне значення сигналу прирівнюється до обумовленого виразом (2.8), одержуємо значення відповідних просторових спектрів. Скануючою апертурою в даному випадку є апертура ФПЕ (ПЗЗ).

Розглянуті вирази справедливі в припущенні, що всі просторові

сигнали і шуми представлені у виді стаціонарного білого шуму з нормальним законом розподілу.

При спостереженні шуму зернистості ФПМ скануючої апертури СЦПІ, перерахована в площину фотографічного зображення  $W_{np}(\vartheta)$  обчислюється по формулі для круглої апертури, що у площині приймача має радіус 8 мкм (розмір окремого елемента ПЗЗ приймача) Величина апертури перераховується в площину БФМ з урахуванням фокусної відстані оптичної системи і коефіцієнта збільшення оптичної системи  $\alpha_m = 1$ .

З урахуванням вище приведеного формула (2.8) приймає вид:

$$C_1 = \pi \int_0^{R_{kt}} \vartheta \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta A^2 \cdot \alpha_m^2 \cdot W_\Sigma^2(\vartheta) \cdot W_{np}^2(\vartheta)}{\sigma_\tau^2 \cdot \alpha_m^2 \cdot Q_1 \cdot W_{np}^2(\vartheta) + (\sigma_\tau \cdot \alpha_m)_{сер}^2 \cdot k_{np}^{-2} \cdot \alpha_m^{-2} \cdot Q_1} \right] d\vartheta, \quad (2.8)$$

де  $Q_1$  – площа скануючої апертури при вимірювання;

$k_{np}$  – відношення сигнал/шум на порозі зорового сприйняття.

Коефіцієнт інформаційного оцінювання  $C_1$  обчислюється по формулі (2.2) чисельними методами. Для практичних випадків використовується метод, наближеного рішення.

Введемо наступні допущення до параметрів фотограмметричної системи і приймача у виразі (2.8):

результуюча ФПМ системи апроксимується законом Гауса:

$$W_\Sigma(\vartheta) = \exp(-2 \cdot \pi^2 \cdot a_\Sigma^2 \cdot \vartheta), \quad (2.9)$$

де  $a_\Sigma$  – параметр закону Гауса.

ФПМ приймача також апроксимуються законом Гаусса:

$$W_{np}(\vartheta) = \exp(-2 \cdot \pi^2 \cdot a_{np}^2 \cdot \alpha_m^{-2} \cdot \vartheta^2), \quad (2.10)$$

де  $a_{np}$  – параметр закону Гауса;

$\alpha_m$  – коефіцієнт збільшення системи;

З урахуванням приведених допущень вираз (2.8) приймає вид

$$C_1 = \pi \cdot \int_0^S \vartheta \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta A_1^2}{\sigma_\tau^2 + \sigma_{\tau_{np}}^2 \cdot \alpha_M} \cdot \exp\left(-4 \cdot \pi^2 \cdot \left(\alpha_\Sigma^2 + \frac{\alpha_{np}^2}{\alpha_M^2}\right) \cdot \vartheta^2\right) \right] d\vartheta. \quad (2.11)$$

$$C_1 = \pi \cdot \int_0^S \vartheta \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta A_1^2}{\sigma_\Sigma^2} \cdot \exp(-4 \cdot \pi^2 \cdot \alpha_1^2 \cdot \vartheta^2) \right] d\vartheta, \quad (2.12)$$

де

$$\alpha_1^2 = \left( \alpha_\Sigma^2 + \frac{\alpha_{np}^2}{\alpha_M^2} \right),$$

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma_\tau^2 + \sigma_{\tau_{np}}^2 \cdot \alpha_M^{-2}.$$

Наближення законом гауса результуючої ФПМ системи найбільшою мірою відповідає випадкові практичного використання іконічних систем, коли на процес одержання зображень впливають численні незалежні друг від друга фактори.

З огляду на рівень шуму зернистості сучасних фотографічних і аерофотографічних плівок, орієнтовно вибрано коефіцієнт пропорційності  $k_t \approx 0,5$ . Це значення коефіцієнта пропорційності справедливо тільки для систем, ФПМ яких апроксимована законом Гауса. При інших формах ФПМ значення коефіцієнта пропорційності уточнюється.

Розглянемо деякі міркування про фізичний зміст поняття узагальненої роздільної здатності. Практика дешифрування показує, що розміри найменшої деталі, що розпізнається на реальних фотографічних знімках, у тім або іншому ступені перевищують ширину штриха міри, що гранично розрізняється. Це пояснюється тим, що умови спостереження штрихової міри істотно відрізняються від умов розрізнення одиночних деталей зображення. Зображення штрихової міри значно менше піддане впливу шуму зернистості в порівнянні з зображенням одиночного об'єкта, що визначається протяжною формою штрихів і регулярним характером зображення міри. Таким чином, критерій роздільної здатності, (по штриховій мірі) не повною мірою враховує вплив шуму зернистості, що пов'язано із значною завадостійкістю зображення міри.

Коефіцієнт узагальненої роздільної здатності враховує зміну рівня шуму у системі і більш однозначно пов'язана із розміром дрібних деталей, що розрізняються на реальних фотографічних зображеннях. Вибором відповідного коефіцієнта пропорційності можна домогтися того, що величина елемента розрізнення, що відповідає узагальненій роздільній здатності, буде порівнянна з розміром найменшої деталі, що розрізняється на реальному зображенні.

### 2.3 Модель об'єктів у системах цифрового перетворення інформації

Для проведення досліджень властивостей БФМ використано модель, що характеризує властивості фазових середовищ. Використання даної моделі обумовлено відповідністю її властивостей до властивостей структури зображень, що сформовані у БФМ у результаті експонування предметів. Модель включає в себе фізичні властивості об'єктів, що експоновані у БФМ і математичні залежності, які використовуються для відновлення структури зображення, цифрованого системою цифрового перетворення.

*Рівняння Власова.* Припустимо, що система (зображення цифрованого БФМ) складається із великої кількості точок  $N$ , таких, що  $N$  можна вважати нескінченним. Замінімо опис густини всіх точок відносно їх розподіленням у фазовому просторі. Функція розподілення стану фазового середовища є неперервною [17].

Розглянемо властивості фазових середовищ. Слід відмітити, що явне визначення функції розподілення дозволяє точно визначити стан середовища в конфігураційному просторі. В подальшому вважаємо, що система є незіткненою системою багатьох частинок з консервативними силами взаємодії. Рівняння Власова (2.13) описує систему без зіткнень. Дослідження рівняння показали, що величина  $f$  залишається незмінною, а також не змінюються всі її ступені [59].

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial x} + a \frac{\partial f}{\partial v} = 0. \quad (2.13)$$

Рівняння Власова дозволяє достатньо просто описати беззіткнений

рух «нескінченної кількості тіл», так як рух описується одним нестационарним рівнянням у часткових похідних із двома або у загальному випадку шістьма «просторово – подібними» змінними. Фактично розв'язується рівняння переносу і, очевидно, що вказане рівняння можна розв'язати прямими різницевою методами.

Візьмемо у фазовому просторі ейлерева різницева сітку з просторовим кроком  $dx$  і  $dy$ . Вважаємо, що утворений фазовий простір складається із великої кількості малих комірок, що визначаються індексами  $(i, j)$  (див. рис. 2.6) Функція розподілення  $f$  визначається у кожній точці таким чином, щоб кількість частинок в комірці  $(i, j)$  в момент  $t_n$  було рівне  $f_{i,j}^n \Delta x \Delta y$ . Для інтегрування рівняння переносу записується за допомогою різницевої схеми Лакса. У відповідності з рівнянням (2.13) густину  $f_{i,j}^{n+1}$  в кожній наступний момент часу  $t^{n+1}$  можна розрахувати по формулі

$$u_j^{n+1} = \frac{1}{2}(u_{j+1}^n + u_{j-1}^n) - \frac{v\Delta t}{2\Delta}(u_{j+1}^n - u_{j-1}^n). \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} f_{i,j}^{n+1} = & \frac{1}{4}(f_{i+1,j}^n + f_{i-1,j}^n + f_{i,j+1}^n + f_{i,j-1}^n) - \\ & - \frac{\Delta t y_j}{2\Delta x}(f_{i+1,j}^n - f_{i-1,j}^n) + \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta x} \frac{\Phi_{i+1}^n - \Phi_{i-1}^n}{\Delta x}(f_{i,j+1}^n - f_{i,j-1}^n) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Необхідно відмітити, що різницева форма рівняння не є консервативною і значення величини  $f$  точно зберігається на різницевої сітці, так як коефіцієнти  $y_j$  не залежать від індексу  $i$  (від координати  $X$ ) і, відповідно, потенціал  $\Phi$  не залежить від індексу  $j$ . Рівняння (2.13) описує гравітаційний випадок. Після завершення кожної ітерації обчислюється густина  $m_i^{n+1}$  в кожній комірці простору. Після проведених розрахунків обчислюється потенціал в момент часу  $t^{n+1}$  на основі різницевого рівняння Пуассона:



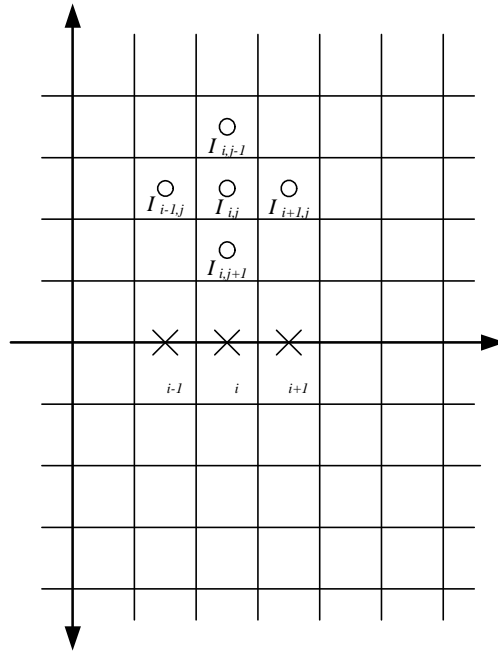


Рисунок. 2.6. Різницева решітка в фазовому просторі

$$\Phi_{i+1}^{n+1} - 2\Phi_i^{n+1} + \Phi_{i-1}^{n+1} = 4\pi G(\Delta x^2) m_i^{n+1}. \quad (2.16)$$

Для розглянутого методу існують обмеження, що пов'язані з проявом аномальної численної дифузії, яка відбивається при розв'язанні рівняння Власова по методу Лакса. Для зменшення вказаного ефекту можна використовувати схеми більш високого порядку, наприклад метод Лакса – Вендорфа або метод «з переступанням». Численна дифузія являється небажаним ефектом, що присутній для різницевого розв'язку рівняння Власова, так як різницева модель не зберігає величину  $f$  і тим самим веде до зростання ентропії. Тому, в даному випадку ефект численної дифузії еквівалентний внесенню аномальних збуджень.

*Нестискуваність фазового середовища.* Густина середовища в фазовому просторі змінюється у відповідності з процесом переносу. Даний підхід, оснований на використанні Лагранжевих представлень про зміну густини фазового середовища, дозволяє використовувати інші різницеві методи розв'язку [10].

Для аналізу розглянемо властивості об'єму  $V$  в фазовому просторі  $(x, y)$ , який змінює своє положення разом із фазовим середовищем (див. рис. 2.7) При відсутності зіткнення кількість частинок  $N_V$  в об'ємі  $V$ , що

рухається з середовищем, повинно залишатися постійним.

Величину виділеного об'єму в будь – який момент часу можна виразити формулою

$$V = \iint dx dy = \frac{1}{2} \oint [S, dl] \quad (2.17)$$

де  $s=\{x,y\}$  – радіус – вектор точок границі об'єму  $V$  в фазовому просторі;

$dl$  – елемент довжини в фазовому просторі дотичної до границі.

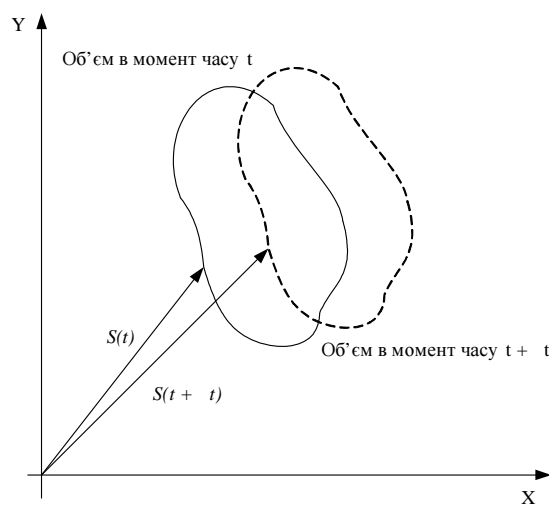


Рисунок. 2.7. Діаграма руху об'єкта в фазовому середовищі

Через проміжок часу  $\Delta t$  зміна об'єму визначається таким чином:

$$\Delta V = \frac{1}{2} \oint [s(t + \Delta t), dl] - \frac{1}{2} \oint [s(t), dl]. \quad (2.18)$$

Точка  $s(t + \Delta t)$  фазового об'єму взаємозв'язана з точкою  $s(t)$  співвідношенням:

$$s(t + \Delta t) = (x + v\Delta t, x + a\Delta t) = s(t) + \{v, a\}\Delta t. \quad (2.19)$$

Після підстановки (2.19) в (2.18) отримуємо

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{2} \oint (v dy + a dx). \quad (2.20)$$

Прискорення точки об'єму визначається через потенціал  $\Phi$  таким чином

$$a = -\frac{1}{m} \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad (2.21)$$

звідки випливає, що зміну об'єму протягом часу можна записати у вигляді інтегралу по замкнутому контуру від повного диференціалу:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{2m} \oint d \left( \frac{m v^2}{2} + \Phi \right) = 0. \quad (2.22)$$

Величина любого об'єму, що змінює своє положення разом з фазовим середовищем, являється інваріантом руху, так що фазове середовище можна вважати нестискуваним. Даний підхід буде використовуватись для опису властивостей частин зображення, що були пошкоджені. Якщо розглянути нескінченно малий елемент  $dV$  середовища, то його об'єм при переміщенні зберігається і зберігається також кількість точок в об'ємі.

*Метод «Водяного мішка».* Властивість нестискуваності фазового середовища під час зміни положення дозволяє побудувати опис системи, в якій розподілення частинок  $f$  описується набором контурів (ліній рівня густини) в двовимірному фазовому просторі (див. рис. 2.8) Так як середовище нестискуване, площа, що обмежена кожним контуром, являється інваріантом руху, але протягом часу контури змінюють положення в просторі і описують еволюцію системи. Контури змінюють свою форму у відповідних площинах зрізу, але зберігають суть ліній рівня і ніякі два контури не можуть перетинатися [17].

Для опису еволюції системи, що розглядається можна використовувати модель «водяного мішка». Розподілення точок

описується східчастою функцією  $f$  (див. рис. 2.9), так що між контурами густина постійна.

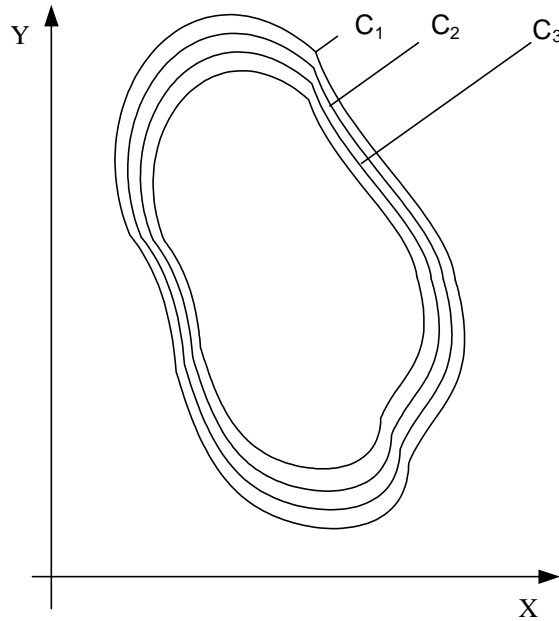


Рисунок. 2.8. Функція розподілення, представлена набором контурів в фазовому просторі

Позначимо контури  $C_j, j \in [1..J]$  і кожний контур задамо кінцевою кількістю точок  $(x_i, y_i)$ , що лежать на вказаному контурі (див. рис. 2.10) Ці точки можна розглядати як точки фазового простору, і відповідно, їх рух визначається рівнянням Гамільтона. Для точки  $(x_i, y_i)$  контуру  $C_j$  виконується система рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = v_i \\ \frac{dy_i}{dt} = g_i \end{cases} \quad (2.23)$$

Інтегрування по часу здійснюється переміщенням контурів через невеликі проміжки часу, нове положення кожного контуру визначається інтегруванням рівнянь для координат точок:

$$\begin{cases} y_i^n = y_i^{n-2} + 2 \cdot \Delta t \cdot g(x_i^{n-1}) \\ x_i^n = x_i^{n-2} + 2 \cdot \Delta t \cdot y_i^{n-1} \end{cases} \quad (2.24)$$

В даному випадку використана схема «з переступанням», що дозволило отримати другий порядок точності. Так як координати розраховуються у всі моменти часу, у схемі може відбутися розходження часових рівнів. Для того, щоб виключити значних похибок, що визвані таким розходженням, через деякий інтервал проводиться перетворення змінних в проміжні моменти часу шляхом інтерполяції між сусідніми часовими шарами.

Модель «водяного мішка» вільна від дифузії. Якщо дифузія відбувається в просторі то вона має ті самі властивості, що й зіткнення. З другого боку, рух контурів приводить до зміни і ускладненню їх форми (див. рис. 2.8) При продовженні розрахунку достатньо тривалий проміжок часу появляється необхідність спрощення і зменшення довжини кожного контуру. Така операція веде до чисельної дифузії.

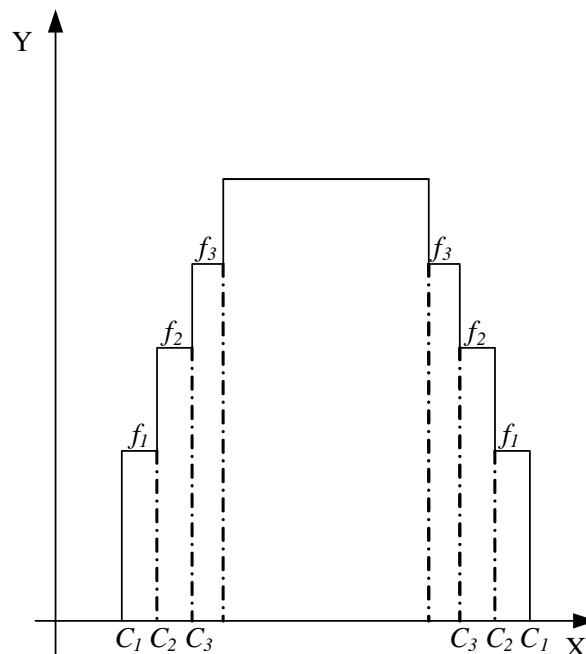


Рисунок. 2.9. Густина точок між контурами в фазовому просторі

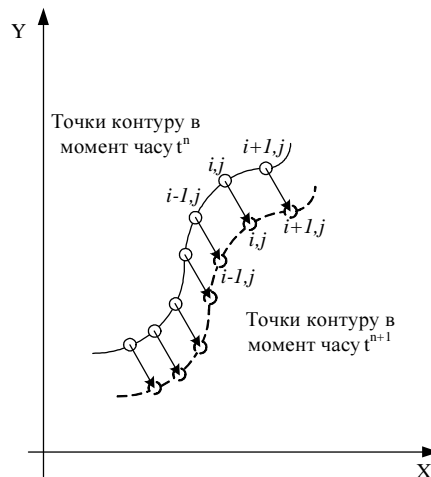


Рисунок. 2.10. Рух точок контуру в моделі "водяного мішка"

#### 2.4 Методи виділення малорозмірних об'єктів

Для проведення автоматичного виділення об'єктів, що мають малі розміри і просту форму, на зображенні з неоднорідним фоном проведено вирівнювання фонового зображення дефектів цифрового БФМ. Неоднорідний фон є основним фактором, що приводить до збільшення значення похибок виділення дефектів цифрованих БФМ. Процес вирівнювання приводить зображення до виду, що описується за допомогою моделі сигналу на фоні адитивного шуму.

Для проведення вирівнювання фону зображення в роботі запропоновано використовувати методи фільтрації, основані на принципах фільтрації в частотній області спектра. Так як дефекти зображення цифрованих БФМ є просторово –декорельовані, спектральні характеристики переважають у високих частотах, для вирівнювання фону використовуються фільтри низьких частот.

*Низькочастотна фільтрація.* Для низькочастотної фільтрації використовувався фільтр, робота якого полягає у визначенні в області маски елементів яскравість яких відрізняється від яскравості поточного елементу на величину порогу, після чого значення елементу замінюється на середнє арифметичне подібних елементів. При збільшенні розмірності маски, що фіксує поле порівняння, зменшується рівень шуму. Для покращення рівномірності розподілення рівнів яскравості визначаються границі кожної зони і

проводиться фільтрація шляхом заміни яскравості елементів поточної зони на їх середнє арифметичне значення [9].

При обробці не змінюється середня яскравість зображення так як сума коефіцієнтів маски є постійна величина рівна 1:

$$\sum_{(i_1, j_1) \in S} \sum a_{i_1, j_1} = 1. \quad (2.25)$$

У практиці цифрової обробки зображень широко використовується фільтрація маскою коефіцієнтів. Її лінійний різновид є одним із варіантів двовимірної КІХ – фільтрації. У якості маски використовується множина вагових коефіцієнтів, заданих у всіх точках околу  $S$  симетрично навколо робочої точки кадру. Поширеним видом околу, часто застосовуваним на практиці, є квадрат  $3 \times 3$  із робочим елементом у центрі. Застосовують різноманітні види масок, одним з евристичних варіантів є рівномірна маска, усі дев'ять вагових коефіцієнтів якої рівні  $1/9$ . Такий вибір коефіцієнтів відповідає умові зберігання середньої яскравості розрахованої по формулі (2.25) і тому в процесі обробки центрувати зображення не потрібно [45].

Проста гранична фільтрація декорельованого шуму представляє собою заміну рівня яскравості точки в області маски при порівнянні центрального елемента з іншими елементами маски. Розглянемо випадок коли яскравість поточного елемента перевищує середню яскравість оточуючих елементів на деяку величину. В даному випадку яскравість центрального елемента замінюється на середню арифметичну оточуючих елементів:

Описаний метод фільтрації використовується при фільтрації некорельованого імпульсного шуму з частотами, що значно перевищують частоти самого зображення [22].

Оскільки шум просторово декорельований, проста низькочастотна фільтрація служить ефективним засобом згладжування шумів. Розглянемо методи локальної фільтрації для зменшення рівня низькочастотного шуму.

$$\tilde{y}_{i,j} = \begin{cases} sum, & y_{i,j} - sum > \varepsilon, \\ y_{i,j}, & y_{j,j} - sum \leq \varepsilon; \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\text{де } sum = \frac{\left( \sum_{i_1=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{j_1=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} y_{i+i_1, j+j_1} - y_{i,j} \right)}{(2 \cdot N - 1)^2};$$

$\varepsilon$  – величина порогу;

$N \times N$  – розмірність маски.

Найбільше застосування для лінійної просторової фільтрації зображень одержала анізотропна фільтрація. Дискретна інтерпретація останньої призводить до співвідношення:

$$\tilde{y}_{i,j} = \Lambda \left[ \sum_{i_1=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{j_1=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} y_{i+i_1, j+j_1} a_{i_1, j_1} - \eta \right], \quad (2.27)$$

де  $\eta$  – поріг фільтрації, що є константою;

$\Lambda$  – порогова функція, яка дорівнює:

$$\Lambda(x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x < 0; \\ 1, & \text{якщо } x \geq 0. \end{cases}$$

Для повної фільтрації матрицю зображення симетрично доповнюється елементами, рівними нулеві, так щоб її результуючий розмір був рівним  $(M + N) \times (M + N)$  елементів ( $M$  – розмір зображення в елементах) При  $a_{k,l} = \text{const}$  має місце алгоритм усереднення. Крім того, якщо фільтрується багато градаційне зображення, то вводиться множину порогів (кількість множин дорівнює числу градацій яскравості) і надавати елементу  $\tilde{y}_{i,j}$  значення, що відповідає максимальному порогові [9].

Анізотропна фільтрація послаблює вплив окремих малорозмірних об'єктів, що не відносяться до фону, і шумів. Вона забезпечує



ефективну фільтрацію зображень з адитивним нормальним шумом [43].

Якість фільтрації зростає зі збільшенням розміру зображення  $N$ . Звичайно розмір апертури вибирається рівним  $5 \times 5$  елементів, що забезпечує добру якість і завершення процесу фільтрації зображень за прийнятний час.

Елементи  $a_{i_1, j_1}$  апертури визначаються виходячи з нормального двомірного некорельованого кругового розподілу, максимум якого збігається з центром. Такий розподіл можна охарактеризувати тільки середнім квадратичним відхиленням  $\sigma$ . Розподіл належним чином відсікається і апроксимується так, щоб коефіцієнти були нормовані (сума коефіцієнтів рівна одиниці)

Чим менше  $\sigma$ , тим більше значення надається центральному елементу апертури. Так, при  $\sigma \leq 0,3$  величина центрального елемента  $\omega_1 = 1$ , значення периферійних елементів  $\omega_2 = \omega_3 = 0$  і ефект фільтрації відсутній. При  $\sigma \rightarrow \infty$  має місце алгоритм усереднення, а при відсутності нормування – повне стирання зображення.

Теоретичний аналіз анізотропної фільтрації для визначення оптимального значення порога фільтрації  $\eta$  можна виконати тільки для частини зображення. При адитивному нормальному шумі значення  $\eta$  повинно знаходитися поблизу 0,5, причому при збільшенні  $\eta$  спостерігається потоншення проєкції, а при зменшенні  $\eta$  – її потовщення. Звичайно використовуються такі значення:  $\eta_1 = 0,3$ ;  $\eta_2 = 0,4$ ;  $\eta_3 = 0,5$ ;  $\eta_4 = 0,6$ .

Отримані результати свідчать про те, що гірше усього згладжуються зображення, що мають вузькі виступаючі частини. Для оцінювання граничних розмірів цих частин, при яких усе ще буде мати місце ефективне згладжування, можна поставити експеримент.

Коефіцієнти маски отримані із розрахунку щільності розподілення ймовірностей за законами Гауса і Релея.

Для проведення низькочастотної фільтрації з метою виділення фону був використаний метод з виділенням елемента з максимальною яскравістю в околі робочої точки зображення. Враховуючи те, що яскравість дефектів менша ніж яскравість фонових об'єктів, даний метод є альтернативним методу анізотропної фільтрації [53].

В загальному випадку його можна записати таким чином:

$$\tilde{y}_{i,j} = \max(y_{i,j,x,y}) \quad . \quad (2.28)$$

Даний метод може використовуватися лише для низькочастотної фільтрації на нерівномірному фоні. Так як значення яскравості точки фону значно перевищує значення яскравості зображення дефектів, то:

$$I = \frac{1}{N} \iint I(x, y) dx dy \approx \max(I(x, y)), \quad (2.29)$$

де  $N$  – кількість точок околу, ;  
 $x, y$  – координати точок в околі.

Виходячи з вище сказаного для виділення фону зображення можуть використовуватися анізотропний фільтр або фільтр «максимумів».

*Виділення об'єктів високої просторової частоти.* Для видалення об'єктів зображення з високою просторовою частотою використовуються фільтри високих частот. Дані фільтри дозволяють виділяти частотний діапазон для малорозмірних об'єктів, розмір яких складає 3 - 4 точки.

Принцип дії високочастотних фільтрів базується на роботі зі спектром перетворення Фур'є. Перетворення Фур'є дозволяє отримати спектр зображення об'єктів. Отриманий спектр містить в собі інтегральні значення, що характеризують структуру об'єктів, які містяться на зображенні. Згідно моделі зображення (див. рис. 1.9) спектральні характеристики дефектів БФМ є складовими спектру зображення.

Так як зображення, отримане після низькочастотної фільтрації, не містить в собі об'єктів високої просторової частоти можна стверджувати, що спектральна характеристика дефектів БФМ може бути представлена у вигляді:

Згідно (2.30) рівняння спектральної характеристики дефектів представлено як різниця спектрів реального зображення і його фонові складові.

$$I_D(\omega) = I_3(\omega) - I_\phi(\omega), \quad (2.30)$$

де  $I_D(\omega)$  – спектр дефектів БФМ;  
 $I_3(\omega)$  – спектр зображення;  
 $I_\phi(\omega)$  – спектр фонового зображення.

Структура високочастотного зображення містить в собі не тільки складову дефектів БФМ, а також і спектр зернистості БФМ. Тому для видалення пошкоджень проводиться фільтрація зернистості БФМ безпосередньо. Спектр зернистості БФМ являє собою більш високочастотну складову ніж спектр дефектів у структурі отриманого зображення і тому в загальному вигляді зображення дефектів БФМ можна представити у виді (1.3), де основними складовими зображення є дефекти і шум зернистості БФМ.

Уолкап і Чоенс запропонували використовувати вінерівську фільтрацію для боротьби із шумом зернистості фотоплівки в моделі системи зображення виду [57]

$$\tilde{y}_{i,j} = y_{i,j} + \alpha [y_{i,j}]^{1/3} n_{i,j} \quad (2.31)$$

де  $\alpha$  – постійна складова характеристики шуму.

Для цієї моделі була отримана частотна характеристика фільтра, що реставрує, відповідному випадку нескінченного зображення, у виді:

$$H_R(\omega_x, \omega_y) = \frac{W_{F_1}(\omega_x, \omega_y)}{W_{F_1}(\omega_x, \omega_y) + \alpha^2 E\left\{[F_1(\omega_x, \omega_y)]^{2/3}\right\}} \quad (2.32)$$

де  $WF_1(\omega_x, \omega_y)$  – енергетичний спектр ідеального зображення;  
 $E(\bullet)$  – позначення математичного сподівання.

У (2.32) прийняте припущення про стаціонарність першого і другого моментів випадкового поля, що представляє ідеальне зображення. Надері і Савчук [40] розробили процедуру вінерівського оцінювання дискретних зображень на основі моделі фотографічного запису зображення, що представлена на рис. 1.9.

Ця модель враховує хімічні ефекти фотографічного процесу, такі, як нелінійність характеристичної кривої і прикордонні ефекти, обумовлені дифузією проявника, а також шум зернистості фотоплівки. Перевага розглянутої вінерівського оцінювання складається не тільки в тому, що вона заснована на моделі загального виду: завдяки властивій їй адаптивності вона здатна модифікуватися відповідно до змін першого і другого моментів випадкового поля поданого ідеальним зображенням.

Цвейг і ін. розробили евристичний нелінійний метод реставрації малоконтрастних зображень із метою послаблення шуму зернистості фотоплівки. При використанні цього методу вхідне зображення розгортається з високою роздільною здатністю, а кожний його елемент квантується великим числом рівнів. Потім одержують зображення зниженої чіткості, об'єднуючи елементи у фрагменти, що не перетинаються, розміром  $2 \times 2$ . Звичайно, чітке зображення має більш різкі границі, ніж зображення зі зниженою чіткістю, проте дисперсія шуму останнього виявляється меншою. У випадку білого шуму дисперсія нечіткого зображення в чотири рази менша, ніж для чіткого зображення, що є наслідком просторового усереднення елементів. Усереднене зображення повторно квантується з використанням рівномірної шкали, причому крок квантування вибирається рівним зчетвереному значенню середньоквадратичного відхилення шуму. Завдяки такому вибору забезпечується помилка квантування 5% при гаусовому шумі. Отримані квантовані елементи нечіткого зображення досліджують в окрузі розміром  $3 \times 3$  елементів [40].

Може виявитися, що усі вісім периферійних елементів квантовані з однаковим рівнем, а центральний елемент – з іншим рівнем. У цьому випадку вважають, що ізольований центральний елемент містить помилку, обумовлену шумом, і приписують йому середній рівень периферійних елементів. Якщо центральний елемент нечіткого зображення лежить на границі (див. рис. 2.11), він розділяється на чотири елемента, що відповідають повній роздільній здатності; цим новим елементам приписуються рівні, що залежать як від рівнів, що відповідають вихідним елементам чіткого зображення, так і від рівнів найближчих елементів нечіткого зображення. Простий алгоритм полягає в тому, що елементу, який відповідає високій роздільній

здатності, приписують рівень одного з чотирьох пов'язаних елементів (елементи «північ» і «схід» або «північ» і «захід» і т.д.), найближчий до рівня шуканого елемента.

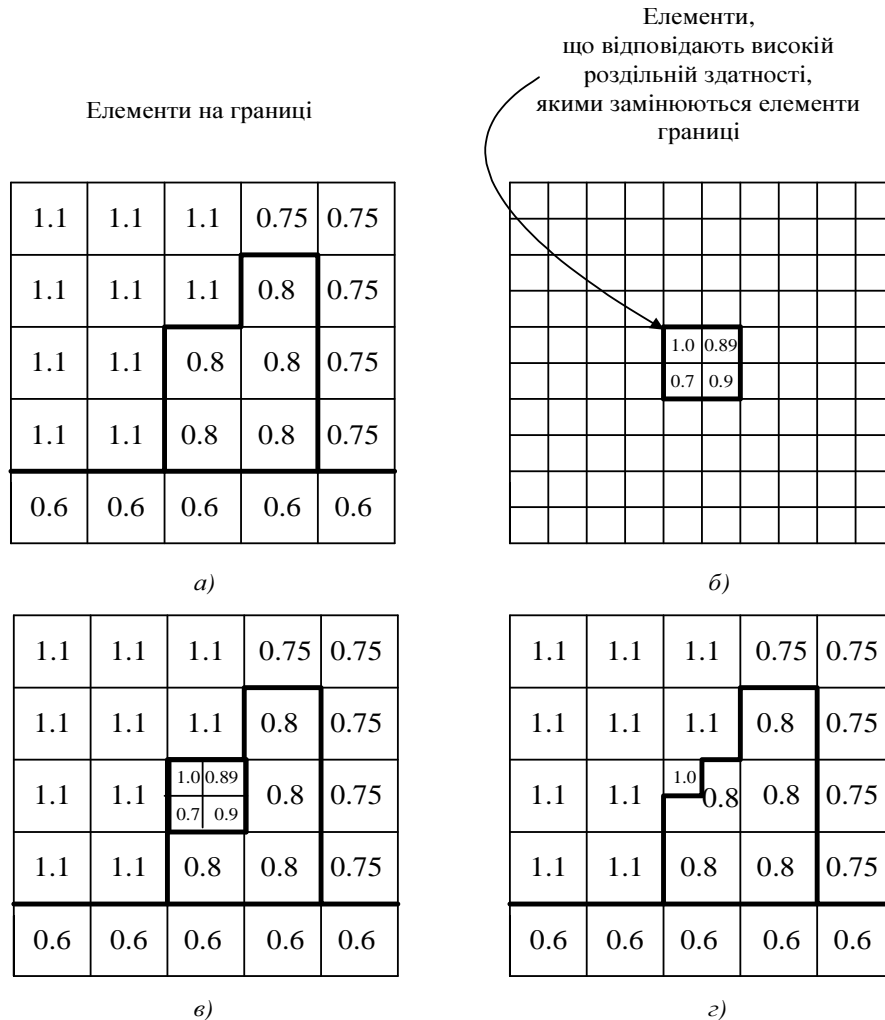


Рисунок. 2.11. Алгоритм фільтрації зернистості фотоматеріалів, по Надері:  
*a* – масив, що відповідає зниженій роздільній здатності;  
*б* – масив, що відповідає високій роздільній здатності;  
*в* – заміна елемента, що належить до границі;  
*г* – остаточний результат.

В результаті видалення шуму зернистості зі структури зображення отримуємо зображення дефектів БФМ. Дане зображення представляє собою багатоградаційне зображення, що не є достатнім для проведення подальшої обробки БФМ. Для реставрації БФМ проводиться операція бінарізації, яка дозволяє створити маски дефектів зображення. Для створення маски зображення проводиться

локальне контрастування зображення дефектів.

Операція локального контрастування дозволяє підвищувати діапазон перепаду між двома сусідніми точками зображення незалежно від напрямку перепаду і його характеристик. Дана операція дозволяє виділяти малорозмірні об'єкти зображення відповідно до структури дефектів, що значно підвищує ефективність проведення операції відновлення дефектів на структурі зображення цифрованого БФМ у видимому діапазоні.

Операція локального контрастування передбачає визначення спектральних характеристик зображення і подальше маніпулювання із спектром зображення. Обробка спектральних характеристик дозволяє значно підвищити якість вихідного результату і швидкодію.

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left( \frac{r(u, v)}{r_0} \right)^{2n}}, \quad (2.33)$$

де  $r(u, v) = \sqrt{u^2 + v^2}$  – відстані від центру до точки з координатами  $(u, v)$

$r_0$  – частота зрізу фільтра;

$n$  – показник ступеня характеристики фільтра.

$$H(u, v) = e^{\left( \frac{-(r(u, v))^2}{2r_0^2} \right)}, \quad (2.34)$$

де  $r(u, v) = \sqrt{u^2 + v^2}$  – відстані від центру до точки з координатами  $(u, v)$ ;

$r_0$  – частота зрізу фільтра.

Локальне контрастування проведено у два етапи. Перший етап полягав у проведенні високочастотної фільтрації зображення дефектів БФМ. Високочастотна фільтрація проводилась у спектральному діапазоні, що обмежений високими частотами. Для фільтрації використовувались методи лінійної фільтрації у просторовій спектральній області [65]. В якості вагових функцій використовувались функції Баттерворту (2.33) і Гауса (2.34)

Величина частоти зрізу фільтра визначається адаптивно в залежності від енергії, що зберігається в діапазоні частот відповідних перерізу максимального розміру дефектів БФМ:

$$r_0 = f \left( \int_{-d}^d |S(u)|^2 du \right), \quad (2.35)$$

де  $S(u)$  – спектр зображення дефектів БФМ.

Після фільтрації високих частот проведено бінарізацію фільтрованого зображення для отримання маски дефектів зображення. Для проведення бінарізації використовується метод з вибором адаптивного рівня бінарізації. Даний метод дозволяє використано поріг бінарізації в залежності від структури зображення і насиченості зображення об'єктами з високої просторової частотою. Головним критерієм для адаптивного порогу є енергії, що зберігається в діапазоні частот відповідних перерізу максимального розміру дефектів БФМ:

$$\delta = g \left( \int_{-d}^d |S(u)|^2 du \right), \quad (2.36)$$

де  $S(u)$  – спектр зображення дефектів БФМ.

Ефективність виділення дефектів БФМ, як об'єктів з високою просторовою частотою, важко оцінити унаслідок великого числа запропонованих методів, через труднощі у визначенні найкращих параметрів, пов'язаних із кожним методом, а також через відсутність єдиного критерію ефективності.

При розробці критерію ефективності для детекторів перепаду доцільно розрізняти обов'язкову і допоміжну інформацію, яку одержують за допомогою детекторів. Перша складова визначає положення об'єкту. Інша включає висоту і крутизну яскравості об'єкта, а також його просторову орієнтацію. Корисною інформацією є також достовірність рішення про детектування об'єкта, наприклад

про ступінь відповідності фрагмента істинного зображення моделі ідеального.

Існують три основних типи помилок, пов'язаних із визначенням положення дефектів БФМ:

пропускання істинних дефектів;

помилка у визначенні їх положення;

прийняття шумових викидів за дефекти (помилкове виявлення).

Загальна стратегія в задачах виявлення сигналів полягає у встановленні деякої границі можливості помилкового виявлення, що є наслідком впливу шуму, із наступною максимізацією можливості правильного виявлення.

Поширення цієї ідеї на виявлення дефектів веде до встановлення порогу виявлення на такому рівні, при якому можливість помилкового виявлення, обумовленого одним лише шумом, не перевищує деякого заданого значення. Можливість виявлення істинного перепаду можна легко обчислити, порівнюючи зображення, отримані за допомогою ідеального і реального детекторів перепаду. Визначення розміру штрафу за помилки в локалізації перепадів являє собою більш важку задачу. Ясно, що детектори, які дають «змазаний» перепад, повинні бути «штрафовані». Варто віддавати перевагу детекторам, що локалізують перепади, хоча і дають при цьому невелику помилку. Точність у визначенні положення перепаду можна оцінити розміром

Значення критерію (2.37) нормалізоване так, що  $R=1$  для точно виділеного дефекту БФМ. Масштабний множник можна підібрати таким чином, щоб установити штрафи для перепадів, істинне положення яких відрізняється від виявленого.

$$R = \frac{1}{I_N} \sum_{i=1}^{I_A} \frac{1}{(1 + \alpha d)^2}, \quad (2.37)$$

де  $I_N = \max(I_I, I_A)$ ,  $I_I$  і  $I_A$  – число точок перепадів в ідеальному і реальному контурних препаратах;

$\alpha$  – масштабний множник;

$d$  – відстань між точкою дійсного перепаду і лінією, що складається з точок ідеального об'єкту, виміряне по нормалі до цієї лінії.



Множник  $\frac{1}{I_N}$  забезпечує штраф за змазані або розбиті контури.

Наприклад, якщо  $\alpha = \frac{1}{9}$ , то при виявленні вертикального перепаду, що стоїть на один елемент зображення відносно істинного положення  $R = 0.90$ , зсув на два елементи приводить до значення  $R = 0.69$ . При  $\alpha = \frac{1}{9}$  змазаний контур шириною в три елементи зображення, центр якого збігається з центром істинного вертикального перепаду, дає значення  $R = 0.93$ , а при ширині в п'ять елементів  $R = 0.84$ . Більш високе значення  $R$  для змазаного контуру в порівнянні зі значенням для зрушеного перепаду рекомендується розумним, оскільки є можливість шляхом наступної обробки зробити змазаний контур більш тонким.

Для проведення реставрації структури цифрованого БФМ при наявності дефектів виділяються границі маски дефектів зображення, для визначення їх положення і структури. Для виявлення границі використовуються методи виділення контурних перепадів об'єктів.

Різкі зміни яскравості, координат кольору або параметрів, що характеризують структуру, є важливими найпростішими ознаками, тому що вони часто визначають контури зображених об'єктів. Локальні розриви яскравості називаються перепадами яскравості, або контурами яскравості (luminance edge)

Вихідне зображення подане масивом чисел  $y_{i,j}$ , піддається лінійній або нелінійній обробці з тим, щоб підсилити перепади яскравості. У результаті утвориться масив чисел  $g_{i,j}$ , що описує зображення з підкресленими змінами яскравості. Потім виконується операція порівняння з порогом і визначається положення елементів зображення з яскраво вираженими перепадами.

Якщо  $g_{i,j} < T_{L_{i,j}}$ , то має місце спадний перепад, а при  $g_{i,j} \geq T_{U_{i,j}}$  - висхідний перепад. Величини  $T_{L_{i,j}}$  і  $T_{U_{i,j}}$  являють собою нижнє і верхнє граничне значення. Ці значення можна зробити перемінними в площині зображення для компенсації впливу значних змін яскравості на результати виявлення перепадів. Вибір порога є одним із ключових питань виділення перепадів.

Для виділення перепадів в структурі зображення використовуються лінійні, нелінійні і статистичні методи .

Один із найбільше простих засобів виявлення перепадів полягає в обчисленні дискретних різниць, що аналогічно нескінченному просторовому диференціюванню. Підкреслення вертикальних перепадів здійснюється горизонтальним або вертикальним дискретним диференціюванням. У результаті формується деяке зображення - масив елементів. Двовимірне дискретне диференціювання можна виконати за допомогою операції згортки масиву вихідного зображення з курсовими градієнтними масками. Підвищення контрасту перепадів без врахування їх орієнтації можна одержати шляхом згортки масиву зображення з оператором Лапласа.

*Нелінійні методи контрастування.* У нелінійних системах виявлення перепадів для контрастування перед граничним обмеженням використовуються нелінійні комбінації значень яскравості елементів зображення. Основний засіб контрастування перепадів із таким граничним обмеженням за своїм характером є евристичним. Кожний алгоритм необхідно “налагоджувати” евристичним методом. Звичайно одержаний при цьому результат оцінюється лише експериментально, але не можна передбачити заздалегідь. Метод апроксимації, хоча і сформульований математично, має безліч таких же недоліків. Крім того, ці методи не справляються достатньо ефективно із шумом.

Результати обробки методами контрастування і апроксимації для задач виявлення перепадів при наявності шуму покращуються шляхом введення засобів обробки, заснованих на статистичних властивостях шуму.

Для визначення найбільш ефективного методу виявлення перепаду застосовано метод визначення достовірності виділення перепадів яскравості. Для порівняльного аналізу використовувались лінійні, нелінійні і статистичні методи виділення перепадів яскравості зображення. На рис. 2.12 представлені графіки, що характеризують ефективність методів виділення перепаду.

На основі запропонованого критерію ефективності і розроблених тестових об'єктів був проведений аналіз якості виділення перепадів, враховуючи структуру зображення з підвищеним рівнем зернистості фотоплівки. Розглянуті оператори виділення перепадів можуть

використовуватися при виділенні перепадів на зображенні, але так як вихідне зображення має підвищений рівень зернистості фотошару, використовується оператор з максимальною ефективністю і мінімальним часом обробки. Тому для визначення перепадів було вибрано оператор Робертса з сумою абсолютних різниць

Для зменшення програмних і апаратних затрат на виділення перепадів запропоновано проводити виділення лише в точках з рівнем бінарізації рівним нулеві, так як ці точки зображення характеризують дефекти БФМ. При використанні запропонованого методу час обробки зменшується пропорційно до кількості точок з нульовою яскравістю на зображенні.

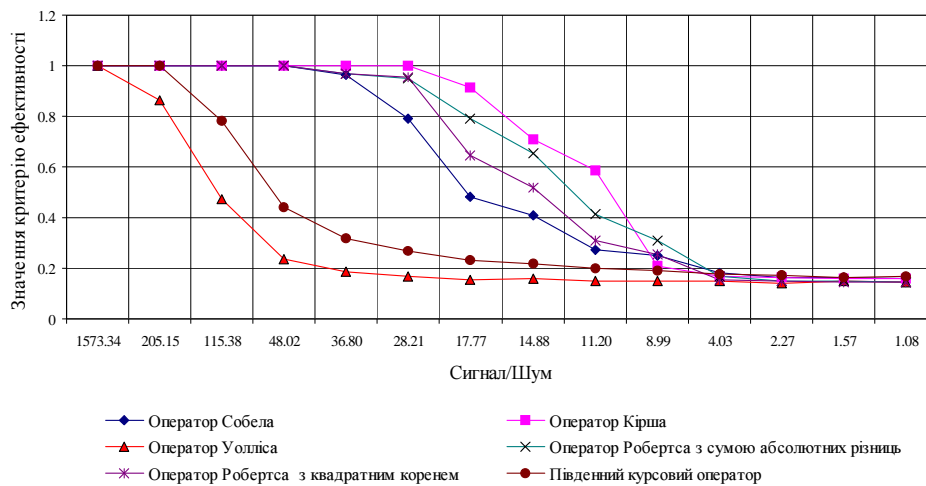


Рисунок. 2.12. Графіки залежності критерію достовірної локалізації перепадів від відношення сигнал/шум (С/Ш) ( $h = 30, W = 1$ )

Основним недоліком даного методу є його чутливість до наявності шумів зернистості. Тому для попередньої обробки бажано використовувати фільтр точкових об'єктів який представляє собою фільтр низьких частот. Використання фільтру проводиться при обробці зображення цифрованих БФМ з підвищеним рівнем зернистості. Використання даного фільтру значно підвищує ймовірність вірного виділення перепаду. Такий фільтр не бажано використовувати для зображень БФМ з низьким рівнем зернистості так, як це приведе до спотворення форми дефектів зображення і видалення тих, розмір яких не перевищує 2 точки.

## 3 УЩІЛЬНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Виділення кодування зображень в окремий розділ пов'язано з тим, що зображення особливий вид даних, орієнтований на зорове сприйняття людиною, що дозволяє створити спеціальні алгоритми стиснення, які призначені тільки для зображень. Крім того, зображення має надлишковість в двох вимірах, тобто це двовимірний сигнал, що також дає додаткові можливості для стиснення. Завдяки цьому алгоритми стиснення зображень можуть мати дуже високі характеристики.

Дослідження, які виконуються в області ущільнення зображень, орієнтовані в першу чергу на фотореалістичні зображення, оскільки їх ущільнення вимагає найбільших витрат і при його виконанні виникають найбільші труднощі. Дійсно, ущільнення, наприклад, комп'ютерної графіки може бути легко виконано передачею файлу, що використовується для формування графічного зображення, ущільнення зображень з малим числом градацій яскравості також не представляє значних труднощів, оскільки при його стисненні можуть бути використані алгоритми з малою обчислювальною складністю.

### 3.1 Джерела надлишковості зображень

В зображенні розрізняють два основних види надлишковості [3-4]:

- статистична надлишковість;
- фізіологічна надлишковість.

Перша пов'язана з тим що будь-які величини отримані із зображення не є випадковими. Сусідні відліки часто мають подібні значення яскравості, в чому проявляється важлива властивість їх просторової кореляції. Якщо відповідним чином використати цю властивість, то можна значно зменшити число біт для подання зображення у цифровій формі.

Фізіологічна надлишковість пов'язана з тією частиною інформації, яка не сприймається оком людини. Скорочення фізіологічної надлишковості в значній мірі скорочує і статистичну надлишковість і навпаки.

Необхідно відзначити і так звану афінну надлишковість, на якій базуються фрактальні методи [6-7] стиснення зображень (більш детально розглядається нижче).

### 3.2 Критерії вірності кодування

Задача відновлення зображення після кодування полягає в тому, щоб одержати вихідне зображення, яке в найменшій мірі відрізняється від вхідного зображення.

Широко розповсюдженою мірою вірності кодування зображень є усереднена середньоквадратична помилка [1-4]:

$$e^2 = \frac{1}{M * N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M E(U_{ij} - \hat{U}_{ij})^2, \quad (3.1)$$

де  $U_{ij}$  - значення відліків початкового зображення,  $\hat{U}_{ij}$  - значення відліків відновленого зображення; M, N – розміри сторін зображення;  $E(\bullet)$  – математичне очікування.

В експериментах мірою середньоквадратичної помилки служить середнє значення поелементних середньоквадратичних помилок:

$$\bar{e}^2 = \frac{1}{M * N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (U_{ij} - \hat{U}_{ij})^2. \quad (3.2)$$

На основі приведених вище залежностей можна визначити відношення сигнал/шум:

$$SNR = 10 \lg \frac{255^2}{e^2}. \quad (3.3)$$

У чисельнику заданий розмах значень відеоданих, що звичайно задаються у виді дискретних відліків, проквантованих на 256 рівнів.

Критерій середньоквадратичної помилки - природна міра спотворень з фізичної і математичної точки зору. Але якщо зображення призначені для візуального спостереження, то перевага

цьому критерію віддається не завжди. Це пов'язано з тим, що зорова система не обробляє зображення елемент за елементом, а витягає з нього в процесі нейронного кодування деякі просторові, часові ознаки, а також ознаки кольору.

Найбільш розповсюдженим і найнадійнішим способом визначення якості зображення є суб'єктивна експертиза [4].

Як експертів рекомендується залучати спостерігачів-неспеціалістів, їх оцінки визначають якість зображення саме так, як його сприймає "середній спостерігач".

Відповідно до рекомендації 654 МККР рекомендується п'ятибальна шкала абсолютних оцінок:

За результатами експертних оцінок звичайно визначається середній бал:

$$\bar{C} = \sum(n_k C_k) / \sum n_k \quad (3.4)$$

де  $n_k$  - число зображень, віднесених до  $K$ -ої категорії, а  $C_k$  - відповідний їй бал.

Таблиця 3.1 - П'ятибальна шкала абсолютних оцінок

Якість	Погіршення
5. Відмінна	5. Непомітне
4. Добра	4. Помітне, але не заважає
3. Задовільна	3. Злегка заважає
2. Погана	2. Заважає
1. Дуже погана	1. Дуже заважає

### 3.3 Етапи кодування зображень

Ефективне кодування зображень звичайно виконується за три етапи:

1. На першому етапі знаходиться представлення зображення в вигляді набору коефіцієнтів деякого перетворення. Ця операція як правило зворотна.

2. На другому етапі зменшується точність представлення компонент зображення, але так, щоб виконувались задані вимоги до якості зображення. Така операція призводить до втрат інформації,

тому не є зворотною.

3. На третьому етапі усувається статистична надлишковість в зображенні, отриманому після виконання перших двох етапів. Для виконання цього етапу може застосовуватись кодування Хаффмана, арифметичне кодування та інші. Ця операція зворотна [4].

Найбільш інтенсивні дослідження виконуються по пошуку нових методів для виконання першого і другого етапів, оскільки при цьому витрачається найбільше обчислювальних ресурсів і дослідження пов'язані не тільки з пошуком математичного перетворення, але і з дослідженням особливостей зорового сприйняття зображення і особливостей завадостійкої передачі цього зображення по каналах зв'язку.

#### 3.4 Аналіз основних методів кодування зображень

Базовим методом цифрового кодування джерел зображень є імпульсно-кодова модуляція (ІКМ). Вона характеризується тим, що кожному закодованому в цифрову форму слову відповідає квантований в часі і за амплітудою відлік відеоінформації. При цьому повинні виконуватись вимоги теореми дискретизації  $f_d > 2W_0$ , де  $W_0$  максимальна частота, яка міститься в сигналі. Щоб запобігти появі фальшивих контурів на однокольоровому зображенні необхідно більше 50 рівнів квантування, що відповідає 6-8 розрядному кодовому слову на кожний елемент (піксел) зображення. Через великі об'єми інформації ІКМ застосовується лише при внутрістудійній передачі телевізійних зображень паралельним кодом і в якості базового канонічного подання зображення у цифровій формі [1-4, 8].

Серед методів кодування з передбаченням найбільш досліджена диференційно-імпульсна кодова модуляція (ДІКМ). Суть ДІКМ така. Організується передбачення значення яскравості кожного наступного елемента зображення на основі лінійної комбінації значень яскравості попередніх елементів. Оцінка отримана в результаті передбачення віднімається від істинного значення яскравості елемента зображення і різницевий сигнал квантується невеликим числом рівнів. За рахунок цього і досягається скорочення об'єму даних [1-4, 9].

Методи кодування зображень з передбаченнями дозволяють стиснути зображення в 2-2,5 рази при простій технічній реалізації.

Серед недоліків цих методів необхідно відзначити такі:

- похибки в місцях різких перепадів яскравості;
- низька завадостійкість.

Інтерполяційні методи основані на числових методах апроксимації, за допомогою яких послідовність або двовимірний масив відліків яскравості наближено подаються через неперервні функції [8]. При цьому кодуються лише окремі відліки зображення, а сусідні з ними отримують в результаті інтерполяції поліномами, звичайно, не більше чим третього степеня. Коефіцієнт стиснення, який досягається при використанні цих методів, дорівнює 5-6.

Основним недоліком інтерполяційних методів є великий об'єм обчислень при інтерполяції поліномами високих степенів, а також необхідність зберігання координат базових відліків зображення.

Важливий клас методів кодування зображень - це методи кодування на основі перетворень. Кодування на основі перетворень - непрямий метод. Зображення піддаються унітарному математичному перетворенню, отримані в результаті коефіцієнти перетворення квантуються і кодуються для передачі по каналу зв'язку або запису в файл. Для більшості зображень значення багатьох коефіцієнтів перетворення порівняно мале. Такі коефіцієнти часто можна відкинути або виділити для їх кодування невелике число двійкових розрядів. Найчастіше використовують двовимірні ортогональні перетворення. Це такі як перетворення Карунена-Лоева, дискретне перетворення Фур'є (ДПФ), дискретне косинусне перетворення (ДКП), перетворення Уолша-Адамара [3,8,10] та інші. Коефіцієнти стиснення при застосуванні цих методів можуть досягати 6-8, завдяки чому деякі з цих методів(ДКП) знайшли широке застосування як основа промислових стандартів з кодування зображень (JPEG, MPEG-1, MPEG-2). Спільним недоліком цих методів є досить висока обчислювальна складність, а також неможливість розв'язання ряду задач обробки зображень на скороченому об'ємі даних.

Серед статистичних методів найбільш широке застосування знаходять блочні методи кодування зображень. Блоки розміром  $M \times N$  елементів кодуються у відповідності з імовірністю їх появи. Для найбільш імовірних конфігурацій використовуються короткі кодові слова, а для менш імовірних - довгі кодові слова(алгоритм Хаффмана), в результаті чого досягається стиснення даних [11-12].



Коефіцієнти стиснення при використанні цих методів можуть досягати 4-5.

Перспективним для кодування як рухомих так і нерухомих зображень є метод покомпонентного кодування [13-18]. Особливістю цього методу є формування декількох двовимірних сигналів, що несуть інформацію про деталі зображення різного розміру. Наявність декількох каналів окремої обробки деталей зображення різного розміру, дозволяє ефективно кодувати зображення як внутрікадровими так і міжкадровими методами з урахуванням особливостей сприйняття інформації зоровим аналізатором людини. Важливою перевагою цього методу є те, що формати подання даних після стиснення є компонентами вихідного зображення, тобто кожна компонента візуально представляє зображення з тим чи іншим ступенем роздільної здатності, а це в свою чергу дозволяє розв'язувати ряд задач обробки зображень на скороченому об'ємі даних.

Хоча практично досягнутий коефіцієнт стиснення при застосуванні цього методу незначно менший в порівнянні з методами кодування з перетвореннями, його технічна реалізація значно простіша і відповідно швидкодія значно більша.

Для стиснення зображень у реальному часі за сукупністю таких параметрів як простота технічної реалізації, обчислювальна складність, коефіцієнт стиснення найкращі результати одержують при використанні Wavelet-кодування (хвильове кодування), що базується на пірамідальних схемах розкладу початкового зображення на компоненти [6]. Цей алгоритм орієнтований на стиснення кольорових і чорно-білих зображень з плавними переходами. Ідеальний для картинок типу рентгенівських фотографій. Коефіцієнт ущільнення варіюється в межах 5-100. При великих коефіцієнтах стиснення на різких границях, особливо діагональних, можливі спотворення. Важливою перевагою хвильового кодування є можливість показати "огрублене" зображення (низької роздільної здатності), використавши тільки початок файлу. Хвильові методи знайшли застосування в останніх модифікаціях стандартів JPEG та MPEG (JPEG2000, MPEG-4) [6].

Найбільші коефіцієнти стиснення забезпечує метод фрактального стиснення зображень [7,19-23 та ін. (більш детальну інформацію можна отримати в Internet наприклад за адресою

<http://www.dip.ee.uct.ac.za/imageproc/compression/fractal/>), відкритий в 1988 році. Процес фрактального стиснення оснований на твердженні, що зображення реального світу мають афінну надлишковість. Коефіцієнти стиснення можуть досягати 50-60 раз. Основним недоліком цього методу є велика обчислювальна складність. Однак, враховуючи великий ступінь стиснення, який можна отримати цим методом, а також гігантський прогрес у збільшенні продуктивності мікропроцесорів та інших апаратних засобів, слід очікувати самого найширшого застосування даного методу в найближчі роки.

Останні роки характеризуються зростанням інтересу до застосування штучних нейронних мереж для ущільнення зображень. Розглядаються два підходи до застосування нейронних мереж для ущільнення зображень:

- самостійне застосування нейронних мереж [24];
- у комбінації з відомими методами [25-27].

Один з підходів до стиснення зображень [24] на базі нейронних мереж побудований на основі тришарової нейронної мережі. Число нейронів вхідного і вихідного шарів однакове, а число нейронів прихованого шару значно менше. Якщо в результаті навчання мережа може відтворювати на виході той же вхідний вектор, який подається на вхід, то на нейронах прихованого шару виникає представлення кожного вхідного вектора, яке значно коротше, ніж довжина вектора, що подається на вхід. Тобто, здійснюється стиснення інформації на нейронах прихованого шару.

### 3.5 Кодування зображень відповідно стандартам JPEG та MPEG

Досягти великих коефіцієнтів стиснення, використовуючи один метод (крім фрактального), практично неможливо. Тому ефективно кодування зображень виконується із застосуванням декількох методів за декілька етапів. Ця концепція і покладена в основу стандартів, розроблених міжнародною організацією по стандартизації (ISO), які відомі як стандарти JPEG (Joint Photographic Expert Group) та MPEG (Motion Picture Experts Group). Стандарт JPEG призначений для стиснення нерухомих зображень, а MPEG - рухомих зображень[4, 6, 28-30].

Процес кодування за схемою JPEG ділиться на такі етапи (рис. 3.1):

1. Перетворення зображення в оптимальний кольоровий простір (тільки у випадку кодування кольорових зображень).

2. Субдискретизація компонент різницевих кольорових сигналів шляхом усереднення груп пікселів (тільки у випадку кодування кольорових зображень) .

3. Виконання ДКП для зменшення надлишковості даних зображення.

4. Квантування кожного блока коефіцієнтів ДКП із застосуванням вагових функцій оптимізованих з урахуванням сприйняття людиною.

5. Кодування результувальних коефіцієнтів із застосуванням статистичного кодування Хаффмана.



Рисунок. 3.1. Послідовність операцій при стисненні зображень за методом JPEG

При виконанні першого етапу виконується перетворення кольорового зображення з системи представлення RGB в іншу систему, наприклад YUV, де Y – сигнал яскравості, U і V – різницеві кольорові сигнали.

Перетворення виконується від піксела до піксела за такими формулами:

$$Y = 0.3 \cdot R + 0.59 \cdot G + 0.11 \cdot B;$$

$$U = -0.15 \cdot R - 0.29 \cdot G + 0.44 \cdot B;$$

$$V = 0.62 \cdot R - 0.52 \cdot G - 0.1 \cdot B.$$

де R, G, B – кольорові сигнали зображення (червоний, зелений і синій

відповідно).

Представлення кольорового зображення в системі YUV дає можливість використати особливості зорового сприйняття зображень людиною – низьку чутливість до точності представлення кольорів. Це виконується за рахунок субдискретизації компонент різницевих кольорових сигналів U і V шляхом усереднення груп пікселів (тільки у випадку кодування кольорових зображень). Наприклад, усереднення значень відліків в межах примикальних квадратів з розмірами сторін 2x2, зменшує розмір компонент U і V в чотири рази без помітного зменшення якості зображення. Враховуючи те, що на кожний піксел витрачається три байти (YUV), виграш значний.

Найбільш важким для реалізації є виконання ДКП. Однак, завдяки наявності швидких алгоритмів (ті ж самі, що для обчислення ДПФ) число арифметичних операцій може бути зменшено в десятки разів. Процес кодування із застосуванням ДКП пояснює рис. 3.2.

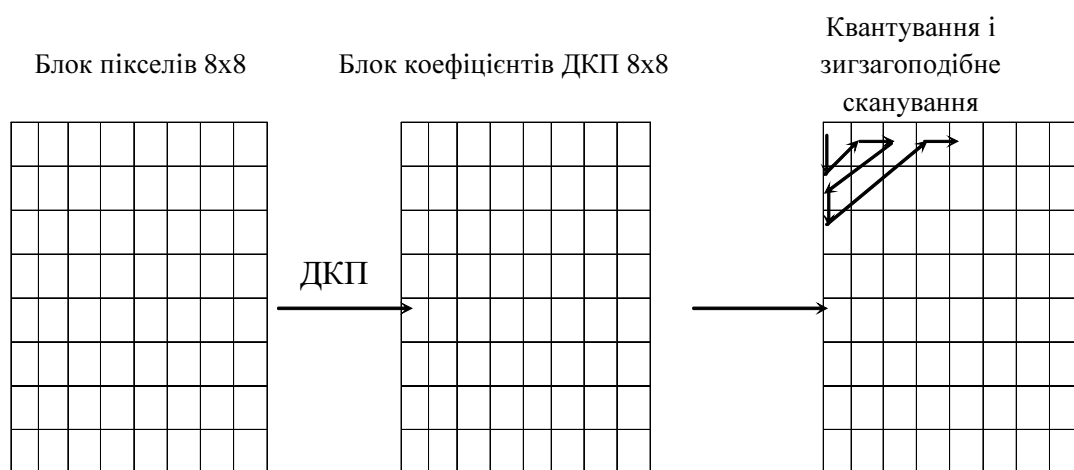


Рисунок. 3.2. Кодування з застосуванням ДКП

Зображення розбивається на примикальні один до одного блоки розміром 8x8 (при кодуванні кольорових зображень кожна компонента обробляється незалежно). В межах кожного блока виконується двовимірне ДКП у відповідності з виразом:

$$F(u, v) = \frac{1}{4} C(u)C(v) \sum_{I=0}^7 \sum_{J=0}^7 f(i, j) \cos\left(\frac{(2i+1)u\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2j+1)v\pi}{16}\right), \quad (3.5)$$

де

$$C(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & x = 0 \\ 1 & x \neq 0, \end{cases}$$

$$u, v = 0, 1, 2 \dots 7.$$

При декодуванні обчислюється зворотне ДКП:

$$f(i, j) = \frac{1}{4} \sum_{u=0}^7 \sum_{v=0}^7 C(u)C(v)F(u, v) \cos\left(\frac{(2i+1)u\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2j+1)v\pi}{16}\right), \quad (3.6)$$

$$i, j = 0, 1, 2 \dots 7.$$

Квантування виконується за рахунок ділення кожного коефіцієнта ДКП на свій "коефіцієнт квантування" з округленням результату до цілого. Терми більшого порядку квантуються з більшим "коефіцієнтом квантування". Крім того, для даних яскравості і кольору застосовуються різні таблиці квантування, оскільки око людини має різну чутливість до яскравості і кольору зображення.

На етапі статистичного кодування специфікація JPEG допускає застосування крім алгоритму Хаффмана і інших методів з метою зменшення об'єму інформації.

При кодуванні рухомих зображень відповідно стандарту MPEG застосовуються два типи стиснення: внутрікадрове кодування (подібно JPEG) і міжкадрове кодування. Міжкадрове кодування оснований на кодуванні з передбаченням та інтерполяцією. Кадри рухомого зображення містять багато ідентичних даних. Якщо використати цей факт, то в результаті набагато збільшиться ступінь стиснення.

Для підтримки міжкадрового і внутрікадрового кодування потік даних MPEG містить три типи закодованих кадрів:

- I-кадри,
- P-кадри,
- B-кадри.

I-кадр містить один кадр відеоданих, який не пов'язаний з інформацією у будь-якому іншому кадрі. P-кадр містить відмінності



$$W(\cdot) = \bigcup_{i=1}^n w_i(\cdot) \quad (3.7)$$

Хатчинсон [2] показав, що для вхідного зображення  $f_0$  результат перетворення

$$f_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} W^n(f_0) \quad (3.8)$$

не залежить від вибору  $f_0$ . Зображення  $f_\infty$  називається нерухомою точкою перетворення  $W$ . В якості перетворень  $w_i$  використовуються афінні перетворення:

$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_i & b_i & 0 \\ c_i & d_i & 0 \\ 0 & 0 & S_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ O_i \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

де  $a_i, b_i, c_i, d_i$  – афінні коефіцієнти деформації, стиснення, обертання,  $d_x, d_y$  – коефіцієнти переміщення;  $x, y$  – координати точки, що перетворюється;  $z$  – її інтенсивність. Параметр  $S_i$  керує контрастністю, а  $O_i$  – яскравістю зображення. Знаючи коефіцієнти цих перетворень, ми можемо відновити початкове зображення.

### 3.6.1. Алгоритм кодування-декодування зображень фрактальним методом

Одна з можливих схем кодування зображень фрактальним методом запропонована Джеквіном (Jacquin) [20,21], і містить такі етапи:

- Зображення розділяється на області, що примикають одна до одної розміром  $n \times n$  (рангові області).
- Задається набір доменних областей. Доменні області можуть перекриватись, вони не повинні обов'язково закривати всю поверхню зображення. Розміри доменних областей звичайно вибирають  $2n \times 2n$ .
- Для кожної рангової області підбирається доменна область, яка після афінних перетворень найбільш точно апроксимує рангову область. На практиці застосовується вісім варіантів відображення одного квадрата в інший з використанням афінних перетворень, які приведені на рис. 1.3 [15-19]. Це повороти зображення на кути 90, 180, 270 (-90) градусів відносно його центра і перетворення симетрії відносно ортогональних осей, які проходять через центр фрагмента перпендикулярно його сторонам.

• Точність апроксимації визначається за допомогою середньоквадратичного критерію:

$$F = \sum_{i,j} (Sd_{ij} + O_{ij} - r_{ij})^2 \quad (3.10)$$

де  $d_{ij}$  – значення, отримані в результаті усереднення по фрагментах з розмірами  $2 \times 2$  елементів доменної області, що приводить її розмір до розміру рангової області;  $r_{ij}$  – значення елементів рангової області. Зміщення  $O_{ij}$  може бути як константою (як в даній роботі), так і описуватись поліномами першого, другого, третього порядків [3].

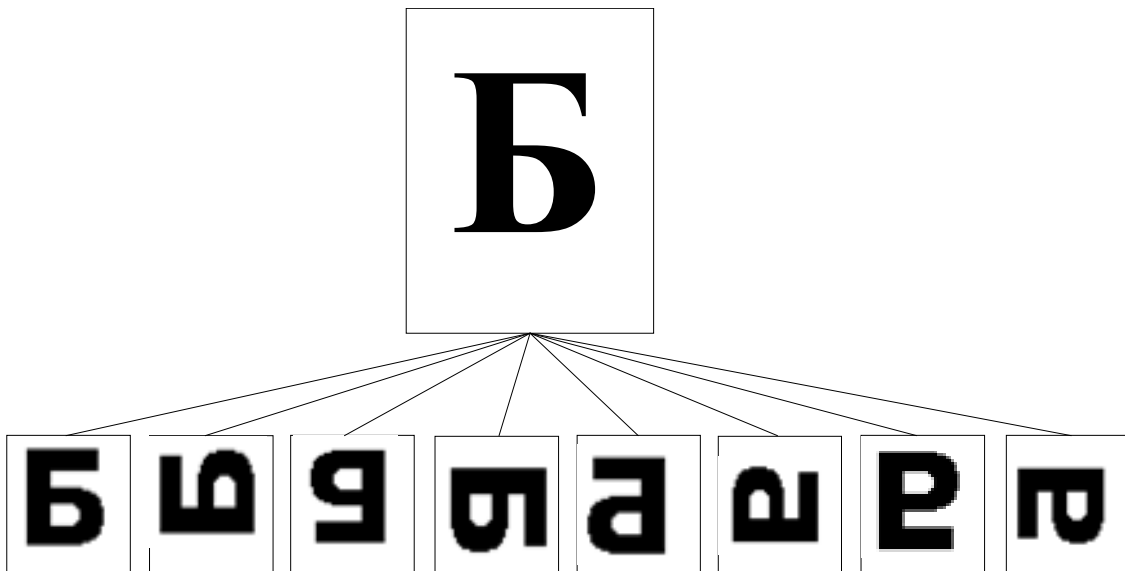


Рисунок. 3.3. Можливі варіанти відображення одного квадрата в інший з використанням афінних перетворень

Прирівнявши до нуля часткові похідні від виразу (3.10) по  $S$  і  $O$ :

$$\frac{\partial F}{\partial S} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial O} = 0,$$

знайдемо значення  $S$  і  $O$ , при яких досягається мінімум виразу (1.10):

$$O = \frac{1}{n^2} \left( \sum_{i,j} r_{ij} - S \sum_{i,j} d_{ij} \right) \quad (3.11)$$



$$S = \frac{n^2 \sum_{i,j} r_{ij} d_{ij} - \sum_{i,j} r_{ij} \sum_{i,j} d_{ij}}{n^2 \sum_{i,j} d_{ij}^2 - (\sum_{i,j} d_{ij})^2} \quad (3.12)$$

Доменні блоки звичайно вибирають з кроком  $n/2$  при  $n=4$ . У вихідний файл записуються такі параметри:

- координати доменної області з найменшим значенням  $F_{min}$ ;
- значення для  $O$  і  $S$ , отримані згідно з формулами (3.11- 3.12);
- номер афінного перетворення.

Процес фрактального перетворення асиметричний. Тобто, процес декодування не є простою інверсією процедур стиснення і вимагає значно менше часу для його виконання, що дає можливість уже тепер використовувати цей метод для зберігання зображень на компакт-дисках та інших носіях інформації. Декодування стисненого зображення носить ітераційний характер і складається з таких етапів:

- Створюються два зображення однакового розміру  $A$  і  $B$ . Розмір цих зображень не обов'язково рівний розміру початкового зображення, початковий рисунок областей  $A$  і  $B$  будь-який.

- Зображення  $B$  розбивається на рангові області так, як на першій стадії процесу стиснення. Для кожної рангової області зображення  $B$  виконується афінне перетворення відповідної доменної області зображення  $A$  і результат поміщається в  $B$ .

- Виконуються операції ідентичні попередньому пункту, тільки зображення  $A$  і  $B$  міняються місцями.

- Багатократно повторюються другий і третій кроки до тих пір поки зображення  $A$  і  $B$  не стануть нерозрізненими.

Основним недоліком фрактального методу є низька швидкість кодування, яка пов'язана з тим, що для отримання високої якості зображення для кожного рангового блока необхідно виконати перебір всіх доменних блоків, і для кожного доменного блока необхідно виконати не менше восьми афінних перетворень.

В цифровій обробці сигналів швидкодія методу оцінюється кількістю арифметичних операцій, необхідних для виконання перетворення. Оцінимо, наприклад, число операцій множення при кодуванні зображень фрактальним методом (вважаючи, що  $S=1$ ),

оскільки для їх виконання витрачається найбільше часу. Нехай  $M \times N$  розміри зображення і  $M=N=n_k$ , де  $n$  - розмір сторін рангового блока. Нехай крок вибору доменних блоків  $n/2$ . Для порівняння даного рангового блока з доменним блоком необхідно виконати  $8n^2$  операцій множення. Тоді загальна кількість операцій множення для пошуку відповідного доменного блока така:

$$M = 8n^2 * (\text{кількість доменних блоків}),$$

Кількість доменних блоків при кроці вибору  $n/2$  складе:

$$\left(\frac{n^k - 2n}{n/2} + 1\right) * \left(\frac{n^k - 2n}{n/2} + 1\right),$$

Після підстановки кінцева формула має такий вигляд [18]:

$$M = 8(4n^{k+1}(n^{k-1} - 3) + 9n^2).$$

Для порівняння, виконання ДКП для блока такого ж розміру, навіть без використання швидких алгоритмів, вимагає лише  $n^4$  операцій множення.

Незважаючи на те, що виконані в останні роки роботи дозволили зменшити час кодування в десятки раз [21-23], актуальним залишається проведення досліджень з підвищення швидкості стиснення зображень цим методом в таких напрямках:

- пошук критеріїв, які дозволяли б швидко виконувати відбір доменних блоків без перебору всіх афінних перетворень;
- зменшення числа афінних перетворень.

### 3.6.2. Підвищення швидкодії фрактального стиснення

Найпростіший і найповільніший спосіб фрактального кодування є перевірка кожного доменного блока і виконання обчислень згідно з формулами (1.6-1.8). Такий спосіб називається повним пошуком або повним перебором. При кодуванні зображень природного походження можна підвищити швидкодію кодування, прийнявши  $S=1$ , оскільки враховуючи статистику зображень завжди знайдеться доменний блок, який апроксимує заданий ранговий блок з необхідною точністю. Тоді з виразів (1.10, 1.11) одержимо:

$$F = \sum_{i,j} (d_{ij} + O_{ij} - r_{ij})^2 \quad (3.13)$$

$$O = \frac{1}{n^2} \left( \sum_{i,j}^n r_{ij} - \sum_{i,j}^n d_{ij} \right) \quad (3.14)$$

Контрастність декодованого зображення може бути відновлена після декодування іншими методами. Таке спрощення дозволяє знизити кількість арифметичних операцій на 60% і відповідно підвищити швидкість кодування.

Однак, такий спосіб підвищення швидкодії не є коректним з тієї точки зору, що вже в самому алгоритмі передбачена візуально недостовірною передачею деяких графічних зображень штучного походження, тому необхідні додаткові заходи для забезпечення хоча б візуальної достовірності.

Серед відомих способів підвищення швидкодії кодування зображень фрактальним методом можна виділити такі [21-22]:

- пошук доменних блоків, для яких  $F$  не перевищує заданого значення;
- локальний та сублокальний пошук;
- ізометричне передбачення;
- класифікація доменних і рангових блоків. Ранговий блок порівнюється з доменними блоками того ж самого класу.

Кодування відповідно першого підходу пояснює рис. 3.4.

- Вибрати прийнятний рівень  $E_c$  і установити розмір рангових блоків  $R_i$   $n=n_{\max}$ .
  - Помітити блоки  $R_i$  як непокриті;
  - Поки є непокриті  $R_i$  {
    - Знайти  $D_i$  і відповідне перетворення  $w_i$  яке дає мінімум  $F$ ;
    - Якщо  $F < E_c$  або розмір  $R_i$   $n \leq n_{\max}$ , то
      - Відмітити  $R_i$  як покритий і записати параметри  $w_i$ ;
    - Інакше
      - Розділити  $R_i$  на менші блоки і помітити їх як непокриті

Рисунок. 3.4. Пошук доменних блоків з заданим  $F$

Тобто, передбачається перемінний розмір доменних і рангових блоків. При постійному розмірі доменних і рангових блоків  $n = \text{const}$

пошук продовжується до тих пір поки не буде знайдений доменний блок, який забезпечує  $F < E_c$  [18].

Локальний пошук (Local Search) передбачає пошук доменного блока тільки на ділянках зображення сусідніх з даним ранговим блоком.

Збільшити швидкість кодування можливо також, збільшивши крок вибору доменних блоків, що зменшує простір пошуку. Однак, дуже великий крок веде до зниження якості зображення. Тому спочатку пошук виконується з великим кроком, і коли знаходиться блок з мінімальним значенням  $F_{min}$ , то пошук продовжується навколо цього блока з меншим кроком (рис.3.5). Такий спосіб носить назву локальний субпошук (Local Sub Search – LSS).

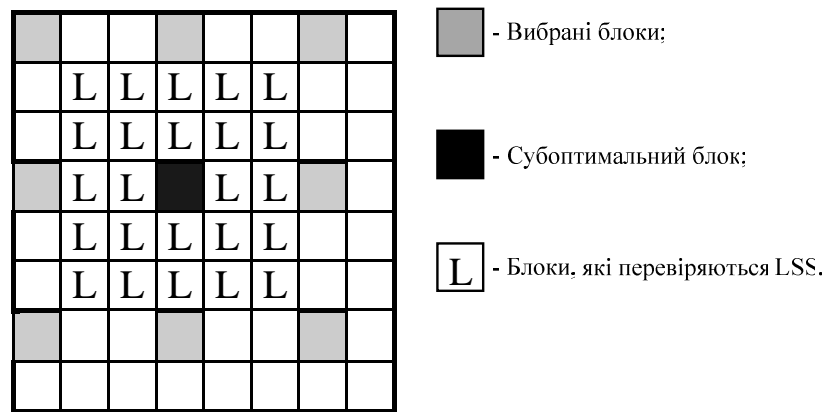


Рисунок. 3.5. Локальний субпошук

Кількість афінних перетворень зменшується за рахунок ізометричного передбачення. Кожний доменний (ранговий) блок розділяється на чотири субблоки, обчислюється середнє значення яскравості в межах кожного субблока і виконується сортування цих субблоків в порядку зростання. Порівнюючи сортований і несортований списки, обчислюється лексикографічний порядок перестановок [19]:

$$\text{Perm\#} = \text{inv}(x_1) \cdot 3! + \text{inv}(x_2) \cdot 2! + \text{inv}(x_3) \cdot 1! + \text{inv}(x_4) \cdot 0!, \quad (3.15)$$

де  $\text{inv}(x_i)$  - кількість перестановок, яка відноситься до  $i$ -ої позиції.

Тепер кожний блок має свій лексикографічний порядок, що дає можливість визначити найкраще покриття рангового блока.

Серед методів з класифікацією необхідно відзначити класифікацію, запропоновану Джеквіном [19], яка ґрунтується на топології блоків і передбачає блоки трьох типів:

- блоки без контурів (shade blocks);
- блоки, інваріантні до орієнтації (текстурні блоки);
- контурні блоки (edge blocks).

Shade-блоки можуть бути апроксимовані за допомогою поліномів третього або другого порядку, і пошук для них непотрібен, пошук текстурних блоків виконується без перевірки ізометрії (без виконання афінних перетворень). Тільки для контурних блоків виконується повний перебір.

### 3.6.3. Табличний метод підвищення швидкодії

Об'єм пам'яті та швидкодія комп'ютерів кожний рік подвоюються. Це дозволяє очікувати, що стане можливим застосування табличних методів пошуку доменних блоків без попередньої обробки зображень і пошуку критеріїв класифікації доменних блоків.

Доменний блок можна представити як вектор з  $n^2$  координатами

$$\vec{D}(d_1, d_2, \dots, d_{n^2}),$$

де  $d_i$  - значення яскравості елементів блока,  $n$  - розмір сторін рангового блока. Після виконання афінних перетворень утворюються ще 7 векторів, координати яких є перестановками координат початкового вектора. Якщо для представлення елемента  $d_i$  витрачається 8 біт, то розрядність числа  $d_1 d_2 \dots d_{n^2}$  буде рівною  $2^{8n^2}$ .

Формуються таблиці, представлені на рис. 1.7. Як видно з рисунка, для значення координати рангового блока «k» вибираються доменні блоки з номерами  $m$  та  $m_1$ , для яких необхідно обчислити тільки значення  $F$ ,  $S$  та  $O$  згідно з виразів (1.10 - 3.12). Зрозуміло, що розміри таблиці 1 на рис. 3.7 не дозволяють поки що реалізувати такий підхід на практиці без попередньої обробки доменних блоків для скорочення розмірності представлення елементів цих блоків.

Підвищення швидкодії фрактального стиснення ґрунтується на

попередній обробці кожного доменного і рангового блока одним з операторів виділення контурів зображення і оцінці детальності кожного з цих блоків [4,23]. Найбільші переваги має використання фільтра Лапласа, оскільки він точно ідентифікує контури і в порівнянні з градієнтними операторами забезпечує менші розміри таблиць пошуку:

$$G(i,j) = 4 f ( i, j) - f (i-1, j) - f (i+1, j) - f (i, j-1) - f (i, j+1). \quad (3.16)$$

Де  $f(i,j)$  – значення відліків вхідного зображення. Обробка блоків згідно з виразом (3.16) виключає з порівняння постійну складову зображення і тому дозволяє попередньо відібрати близькі до даного рангового блока доменні блоки.

Під час першого проходу оцінюється детальність доменних і рангових блоків. Такою оцінкою може бути сума модулів значень відліків контурної компоненти:

$$S_{k_D} = \frac{1}{n^2} \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n |G_D(i, j)| \right)$$

$$S_{k_R} = \frac{1}{n^2} \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n |G_R(i, j)| \right)$$

де  $k_R$  – номер рангового блока,  $k_D$  – номер доменного блока,  $S_{k_D}, S_{k_R}$  – детальність відповідно доменного та рангового блока. Суми  $S_{k_R}$  заносяться в масив, в порядку слідування рангових блоків, а для доменних блоків формуються таблиці, приведені на рис. 3.6.

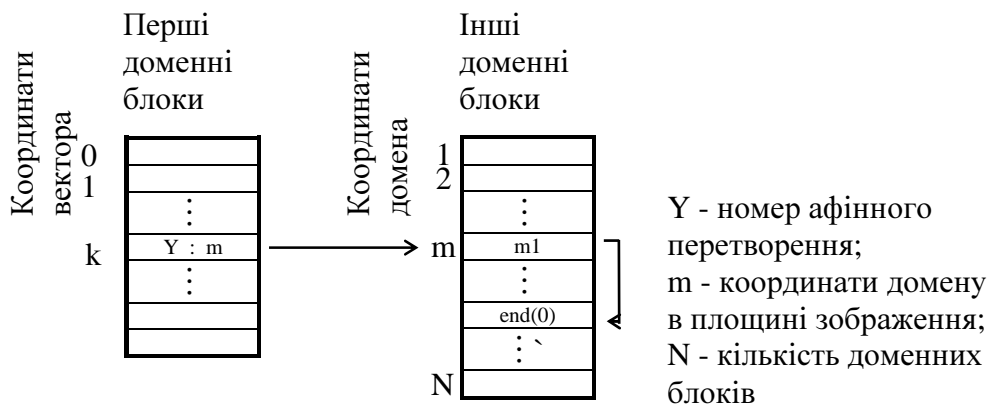


Рисунок. 3.6. Табличний метод пошуку

Під час другого проходу для кожного значення детальності рангового блоку  $S_{k_R}$  з таблиць (рис. 3.7) відбираються відповідні доменні блоки, для яких виконується обробка, характерна для фрактального стиснення та обчислення згідно з виразами (3.10-3.12). Оскільки вибраних блоків значно менше загальної кількості доменних блоків, то слід очікувати значного виграшу в швидкодії.

Приклад декодування зображення фрактальним методом приведений на рис. 3.8.

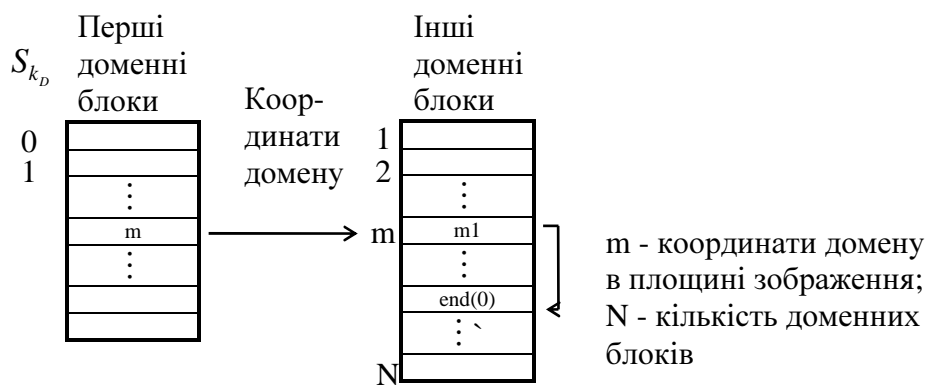


Рисунок. 3.7. Пошук доменного блока згідно з критерієм детальності



Початкове зображення



Декодоване зображення- три ітерації



Декодоване зображення - 8 ітерацій



Декодоване зображення - 16 ітерацій

Рисунок. 3.8. Декодування зображення фрактальним методом

### 3.7 Рекурсивний (хвильовий) алгоритм стиснення зображень

Англійська назва рекурсивного стиснення – wavelet. Цей алгоритм орієнтований на стиснення кольорових і чорно-білих зображень з плавними переходами, ідеальний для картинок типу рентгенівських фотографій. Коефіцієнт стиснення варіюється в межах 5-100. При великих коефіцієнтах стиснення на різких границях, особливо діагональних, можливі спотворення [6].

Основна ідея алгоритму полягає в тому, що зберігаються різниці між середніми значеннями сусідніх блоків зображення, які звичайно приймають значення близькі до нуля.

Рекурсивне стиснення базується на пірамідальному S-перетворенні, яке може використовуватись для стиснення фотореалістичних зображень як майже без втрат, так і з втратами.

Стиснення виконується за два кроки: перший – S - перетворення початкового зображення; другий - перетворені дані кодуються одним з статистичних методів. Обидві операції зворотні, що дозволяє відновити початкове зображення. Однак для отримання великих коефіцієнтів стиснення необхідно зниження точності представлення компонент зображення, отриманих в результаті виконання S-перетворення, але так щоб спотворення не були візуально помітні.

Структура кодування приведена на рис. 3.10. Вхідні відеодані обробляються фільтрами S-перетворення, які формують компоненти зображення. Адаптивний квантувач призначений для квантування значень відліків компонент з урахуванням особливостей зорового



сприйняття. Процес виконання квантування пов'язаний з втратами інформації, однак ці втрати повинні бути непомітними, тобто візуальна якість відновленого зображення не повинна відрізнятися від вхідного.

Власне стиснення може бути виконано на основі одного з методів статистичного кодування (наприклад, кодування Хаффмана, LZW-кодування, арифметичного кодування).

Відліки низько- і високочастотної складової одержують відповідно до таких виразів:

$$\begin{aligned} L(n) &= [C(2^n) + C(2^{n+1})] / 2, \\ H(n) &= [C(2^n) - C(2^{n+1})] / 2 \end{aligned} \quad (3.17)$$

де  $n = 0, 1, \dots, (N/2 - 1)$ ,  $C[2^n]$ ,  $C[2^n + 1]$  – відліки вхідного цифрового сигналу, а  $L[n]$ ,  $H[n]$  – низькочастотні і високочастотні коефіцієнти S-перетворення (рис. 3.11),  $L[n]$  – відліки на виході низькочастотного фільтра,  $H[n]$  – відліки на виході високочастотного фільтра. Ділення на два може бути виконано зсувом вправо на один біт, що дає результат з округленням до меншого.

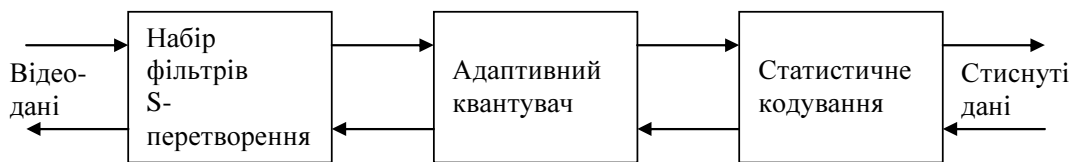


Рисунок. 3.9. Схема хвильового кодування

До кожного вихідного компонента фільтрів знову застосовуються дані формули, утворюючи в такий спосіб піраміду. Ясно, що чим більша кількість компонентів, тим більший очікуваний коефіцієнт стиску.

Перевагою даного представлення вихідного зображення є те, що дисперсія  $H[n]$  менша ніж для  $C[n]$ .

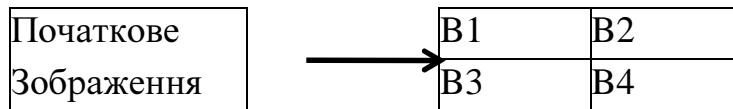
Інверсне S-перетворення обчислюється в такий спосіб:

$$\begin{aligned} C(2^n) &= L(n) + H(n), \\ C(2^{n+1}) &= L(n) - H(n) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Алгоритм для двовимірних даних реалізується аналогічно. Для квадрата з розмірами  $2 \times 2$  і значеннями елементів  $a_{2i,2j}$ ,  $a_{2i+1,2j}$ ,  $a_{2i,2j+1}$ ,  $a_{2i+1,2j+1}$  отримаємо

$$\begin{aligned}
 b_{i,j}^1 &= (a_{2i,2j} + a_{2i+1,2j} + a_{2i,2j+1} + a_{2i+1,2j+1}) / 4 \\
 b_{i,j}^2 &= (a_{2i,2j} + a_{2i+1,2j} - a_{2i,2j+1} - a_{2i+1,2j+1}) / 4 \\
 b_{i,j}^3 &= (a_{2i,2j} - a_{2i+1,2j} + a_{2i,2j+1} - a_{2i+1,2j+1}) / 4 \\
 b_{i,j}^4 &= (a_{2i,2j} - a_{2i+1,2j} - a_{2i,2j+1} + a_{2i+1,2j+1}) / 4
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

Використовуючи ці формули, наприклад, для зображення з розмірами  $512 \times 512$  пікселів після першого перетворення одержимо 4 матриці розміром  $256 \times 256$  елементів:



У першій, як легко догадатися, буде зберігатися зменшена копія зображення. В другій — усереднені різниці пар значень пікселів по горизонталі. У третій — усереднені різниці пар значень пікселів по вертикалі. У четвертій — усереднені різниці значень пікселів по діагоналі.

За аналогією з двовимірним випадком, ми можемо повторити наше перетворення й одержати замість першої матриці 4 матриці розміром  $128 \times 128$ . Повторивши наше перетворення втретє, ми одержимо в підсумку: 4 матриці  $64 \times 64$ , 3 матриці  $128 \times 128$  і 3 матриці  $256 \times 256$ . На практиці, при записі у файл, значення  $b_{i,j}^4$  звичайно не враховують, відразу одержуючи вигреш приблизно на третину розміру файлу.

До переаг такого алгоритму можна віднести те, що він дуже легко дозволяє реалізувати можливість поступового “прояву” зображення при передачі зображення по мережі. Крім того, оскільки на початку зображення ми фактично зберігаємо його зменшену копію, спрощується показ “огрубленого” зображення по заголовку.

Двовимірне 2-D перетворення може бути також виконане за допомогою застосування формул (3.17) для одновимірного перетворення послідовно до рядків і стовпців зображення. Це

зменшує обчислювальні затрати необхідні для виконання цього перетворення.

На відміну від JPEG і фрактального алгоритму, S-перетворення не оперує з блоками, наприклад, 8x8 пікселів, а оперує блоками 2x2, 4x4, 8x8 і т.д. Однак за рахунок того, що коефіцієнти для цих блоків ми зберігаємо незалежно, ми можемо досить легко уникнути дроблення зображення на “мозаїчні” квадрати.

### 3.8 Аналіз і синтез зображення при ущільненні покомпонентним методом

Особливістю покомпонентного методу (або адаптивного до контурів двовимірного аналізу і синтезу) є формування декількох двовимірних сигналів, які несуть інформацію про деталі зображення різних розмірів [15-17].

Зображення, яке кодується, піддається впливу декількох аналізуючих апертур з різними розмірами поперечного перерізу, які можуть мати ділянки як з "позитивною" так і з "негативною" прозорістю. З точки зору перетворення Фур'є сукупність таких апертур складає групу двовимірних фільтрів просторової частоти. Розмір елемента зображення, отриманого після синтезу, визначається сумою функцій розподілу окремих апертур. Найбільша апертура має позитивну прозорість і представляє собою двовимірний фільтр низької частоти. Сигнал, який створюється цією апертурою, дозволяє побудувати зображення, яке відповідає дефокусованому початковому зображенню. Апертури з ділянками позитивної і негативної прозорості можна розглядати як двовимірні смугові фільтри просторової частоти, границями смуги пропускання яких є характеристики двовимірних фільтрів низької частоти, що утворюють даний смуговий фільтр [2]. При технічній реалізації кодуючих пристроїв особливий інтерес викликає аналіз зображення квадратними аналізуючими апертурами з розмірами сторін кратними  $2n$  і формуванні компонент зображення по схемі, яка відома як піраміда Лапласа, оскільки це значно зменшує обчислювальні затрати.

Метою даної статті є дослідження покомпонентного методу при аналізі зображення апертурами з розмірами сторін, кратними  $2n$ .

Різницеве рівняння, яке описує такий низькочастотний

двовимірний фільтр має такий вигляд:

$$y(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1=0}^{N_1-1} \sum_{k_2=0}^{N_2-1} x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) \quad (3.20)$$

де  $N_1, N_2$  - розміри сторін аналізуючої апертури,  $x(n_1 - k_1, n_2 - k_2)$  - значення відліку початкового зображення.

Аналіз кореляційних залежностей зображення показує, що збільшення максимального розміру аналізуючих апертур з 8 до 16 не дає помітного виграшу коефіцієнта стиснення. Тому різницеве рівняння, яке описує двовимірний низькочастотний фільтр з найбільшим розміром апертури приймає такий вигляд:

$$y(n_1, n_2) = \frac{1}{64} \sum_{k_1=0}^7 \sum_{k_2=0}^7 x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) \quad (3.21)$$

Передаточна функція такого фільтра, яка визначається як відношення  $Z$ -перетворень вихідного сигналу до вхідного така:

$$H(Z_1, Z_2) = \frac{1}{64} \sum_{k_1=0}^7 \sum_{k_2=0}^7 Z_1^{-k_1} Z_2^{-k_2} \quad (3.22)$$

де  $Z_1, Z_2$  - трансформоване представлення затримки на рядок зображення та такт дискретизації відповідно. Після перетворень вираз (3.22) можна подати так:

$$H(Z_1, Z_2) = \left[ \frac{1}{4} (1 + Z_1^{-1})(1 + Z_2^{-1}) \right] \left[ \frac{1}{4} (1 + Z_1^{-2})(1 + Z_2^{-2}) \right] \left[ \frac{1}{4} (1 + Z_1^{-4})(1 + Z_2^{-4}) \right] \quad (3.23)$$

З цього виразу видно, що для формування згладжених компонент для різних розмірів аналізуючих апертур можна використовувати відповідні відводи згладжувального фільтра з найбільшою аналізуючою апертурою. Передаточну функцію цього фільтра позначимо як  $H_3(Z_1, Z_2) = H(Z_1, Z_2)$ . Тоді передаточні функції фільтрів з згладжувальними апертурами 4x4 і 2x2 згідно виразу (3.23) будуть такі:

$$H_2(Z_1, Z_2) = \left[ \frac{1}{4} (1 + Z_1^{-1})(1 + Z_2^{-1}) \right] \left[ \frac{1}{4} (1 + Z_1^{-2})(1 + Z_2^{-2}) \right] \quad (3.24)$$

$$H_1(Z_1, Z_2) = \left[ \frac{1}{4} (1 + Z_1^{-1})(1 + Z_2^{-1}) \right] \quad (3.25)$$

Реакції смугових фільтрів формуються як різниці реакцій згладжувальних фільтрів:

$$H'_3(Z_1, Z_2) = H_2(Z_1, Z_2) - H_3(Z_1, Z_2) \quad (3.26)$$

$$H'_2(Z_1, Z_2) = H_1(Z_1, Z_2) - H_2(Z_1, Z_2) \quad (3.27)$$

$$H'_1(Z_1, Z_2) = H_0(Z_1, Z_2) - H_1(Z_1, Z_2) \quad (3.28)$$

В канал зв'язку або файл після дискретизації і квантування передаються відліки компонент з виходів фільтрів з передаточними функціями згідно виразів (3.23) і (3.25).

Таким чином формування низькочастотних компонент зображення зводиться фактично до каскадного з'єднання одновимірних фільтрів з елементами затримки на такт, два такти, чотири такти дискретизації і на один, два і чотири рядки зображення. Операції ділення при виконанні обчислень можуть бути замінені операціями зсуву.

Розглянемо більш детально алгоритм кодування зображення, у якому аналіз зображення виконується апертурами з розмірами 2x2, 4x4, 8x8, а відновлення пропущених відліків - методами білінійної інтерполяції.

Нехай  $X_0$  - матриця початкового зображення  $N \times M$ . Тоді алгоритм включає наступні етапи:

1. Формується компонент  $X_1$  розміром  $\frac{N}{2} \times \frac{M}{2}$ , значення відліків якого визначаються середніми значеннями яскравості в границях, сусідніх один до одного фрагментів зображення  $X_0$  з розмірами сторін 2x2. Математично значення відліків компоненти  $X_1$  визначаються таким виразом:

$$X_1(m_1, m_2) = \frac{1}{4} \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_2=0}^1 X_0(2m_1 + n_1, 2m_2 + n_2), \quad m_1 = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1, \quad m_2 = 0, 1, \dots, \frac{M}{2} - 1$$

2. Аналогічно формується компонент  $X_2$  розміром  $\frac{N}{4} \times \frac{M}{4}$ . Розміри

фрагмента  $4 \times 4$  :

$$X2(m_1, m_2) = \frac{1}{4} \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_2=0}^1 X1(2m_1 + n_1, 2m_2 + n_2), \quad m_1 = 0, 1, \dots, \frac{N}{4} - 1, \quad m_2 = 0, 1, \dots, \frac{M}{4} - 1$$

3. Формується компонент  $X3$  розміром  $\frac{N}{8} \times \frac{M}{8}$  . Розміри фрагмента  $8 \times 8$ :

$$X3(m_1, m_2) = \frac{1}{4} \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_2=0}^1 X2(2m_1 + n_1, 2m_2 + n_2), \quad m_1 = 0, 1, \dots, \frac{N}{8} - 1, \quad m_2 = 0, 1, \dots, \frac{M}{8} - 1$$

4. Компонент  $X3$  трансформується в матрицю  $\tilde{X}2$  розміром  $\frac{N}{4} \times \frac{M}{4}$  , кожен другий елемент якої в напрямку  $Y$  ,  $X$  дорівнює відповідному елементу матриці  $X3$  , а пропущені відліки відновлюються білінійною інтерполяцією у відповідності з виразами:

$$\begin{aligned} \tilde{X}2_{i,j+1/2} &= (X3_{i,j} + X3_{i,j+1}) / 2, \\ \tilde{X}2_{i+1/2,j} &= (X3_{i,j} + X3_{i+1,j}) / 2, \\ \tilde{X}2_{i+1/2,j+1} &= (X3_{i,j+1} + X3_{i+1,j+1}) / 2, \\ \tilde{X}2_{i+1,j+1/2} &= (X3_{i+1,j} + X3_{i+1,j+1}) / 2, \\ \tilde{X}2_{i+1/2,j+1/2} &= (\tilde{X}2_{i+1/2,j} + \tilde{X}2_{i+1/2,j+1}) / 2. \end{aligned}$$

5. Формується різницевий компонент  $\Delta X2$  :

$$\Delta X2 = X2 - \tilde{X}2$$

Елементи матриці  $\Delta X2$  квантуються на відповідну кількість рівнів. Позначимо квантований різницевий компонент як  $\Delta X2_k$  .

6. Формується компонент  $\hat{X}2$  :

$$\hat{X}2 = \tilde{X}2 + \Delta X2_k$$

7. Матриця  $\hat{X}_2$  трансформується в матрицю  $\tilde{X}_1$  розміром  $\frac{N}{2} \times \frac{M}{2}$ , причому пропущені відліки відновлюються білінійною інтерполяцією аналогічно пункту 4.

8. Формується різницевий компонент  $\Delta X_1$ :

$$\Delta X_1 = X_1 - \tilde{X}_1$$

Відповідний квантований різницевий компонент  $\Delta X_{1k}$ .

9. Формується компонент  $\hat{X}_1$ :

$$\hat{X}_1 = \tilde{X}_1 + \Delta X_{1k}$$

Матриця  $\hat{X}_1$  трансформується в матрицю  $\tilde{X}_0$  розміром  $N \times M$ , пропущені відліки відновлюються білінійною інтерполяцією аналогічно пункту 4.

10. Формується різницевий компонент  $\Delta X_0$

$$\Delta X_0 = X_0 - \tilde{X}_0$$

Відповідний квантований різницевий компонент  $\Delta X_{0k}$ .

У пам'яті зберігаються або передаються в лінію зв'язку елементи компонентів  $X_3$ ,  $\Delta X_{2k}$ ,  $\Delta X_{1k}$ ,  $\Delta X_{0k}$ .

При декодуванні виконуються пп. 4, 6, 7, 9, 10 алгоритму кодування, у результаті чого формується компонент  $\tilde{X}_0$ . Для одержання відновленого після кодування зображення, додаються значення відповідних відліків компонентів  $\tilde{X}_0$  і  $\Delta X_{0k}$ :

$$\hat{X}_0 = \tilde{X}_0 + \Delta X_{0k}$$

де  $\hat{X}_0$  - відновлене зображення.

Значення відліків компоненти  $X_3$  квантуються на 256 рівнів по рівномірній шкалі, а квантування компонентів  $\Delta X_{2k}$ ,  $\Delta X_{1k}$ ,

$\Delta X0_k$  може виконуватися як рівномірними, так і нерівномірними шкалами (див. табл.3.2-3.3).

Проведене моделювання показало, що розроблені алгоритми забезпечують високу якість відновленого зображення при коефіцієнтах ущільнення 3÷6. Крім того, простежується явна кореляція між візуальною якістю відновленого зображення й середньоквадратичним відхиленням (СКВ). Для всіх дослідних зображень встановлено, що чим менше СКВ, тим вища візуальна якість відновленого зображення. Це спростовує думку деяких учених про непридатність середньоквадратичного критерію для оцінки якості зображень, представлених у цифровій формі. Приклади зображень наведено на рис. 3.10.

Таблиця 3.2 - Шкала квантування компонентів  $\Delta X2_k$ ,  $\Delta X1_k$

Різниця	Рівень квантування	Різниця	Рівень квантування
-255. .-128	15	2. .3	1
-127. .-64	14	4. .7	2
-63. .-32	13	8. .15	3
-31. .-16	12	16. .31	4
-15. .-8	11	32. .63	5
-7. .-4	10	64. .127	6
-3. .-2	9	128. .169	7
-1. .1	0	170. .255	8

Таблиця 3.73 - Шкала квантування компоненти  $\Delta X0_k$

Різниця	Рівень квантування
-255. .-8	3
-7. .7	0
8. .15	1
16. .255	2





а)

б)

Рисунок. 3.10. Приклад зображення: а) початкове зображення;  
б) відновлене зображення ( коефіцієнт ущільнення 3)

Збільшення коефіцієнта ущільнення пов'язано з застосуванням більш складних схем квантування різницевих компонент. Це повинні бути схеми, які забезпечували б адаптацію шкал квантування відповідно рівню змін у вхідному сигналі і з урахуванням особливостей зорового сприйняття спотворень. Можуть бути застосовані схеми векторного квантування на основі нейронних мереж, наприклад, типу двовимірна карта Кохонена.

### 3.9 Перспективи розвитку кодування зображень

Розвиток кодування зображень тісно пов'язаний з двома основними моментами:

1. Ростом швидкодії та ступеня інтеграції електронної елементної бази. Сучасні мікропроцесори дозволяють реалізувати навіть програмним способом з прийнятною швидкістю ті методи кодування зображень, які раніше вважалися складними для промислового застосування. Прикладом може бути дискретне косинусне перетворення, яке стало основою стандартів JPEG та MPEG. Але це не означає, що буде припинено пошук та дослідження більш простих методів кодування, оскільки нові можливості формують нові більш складні задачі, тому зменшення обчислювальної складності залишиться актуальним.

2. Зниженням собівартості електронної елементної бази.

Проведення досліджень методів кодування рухомих і нерухомих зображень завжди вимагало складної і дорогої обчислювальної техніки, доступ до якої мала незначна кількість спеціалістів. Поява недорогих персональних комп'ютерів з розвинутими засобами відображення графічної інформації створила передумови збільшення інтенсивності досліджень, в яких може брати участь більш широке коло дослідників, що дає надію на нові значні результати в майбутньому.

З врахуванням цього можна зробити такі висновки:

1. В найближчі роки стандарти MPEG знайдуть найширше застосування в цифровому телебаченні.

2. Великі зусилля будуть спрямовані на дослідження фрактального методу та його модифікацій, що можливо сприятиме появі нового стандарту ISO, основою якого буде фрактальний метод кодування зображень.

3. Будуть проводитись пошуки та дослідження нових методів кодування, які можуть забезпечити високий коефіцієнт стиснення і високу якість відновленого зображення, незважаючи на їх обчислювальну складність. З іншого боку будуть продовжені пошуки простих методів кодування, будуть досліджуватись комбінації цих методів з врахуванням нових технічних можливостей.

## 4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО - ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ БАГАТОШАРОВИХ ФОТОГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

### 4.1 Аналіз і класифікація дефектів фотографічних матеріалів

Для проведення аналізу дефектів БФМ запропонована класифікація дефектів, що дозволяє проводити їх ідентифікацію на структурі зображення цифрованих БФМ. Дана класифікація представлена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Класифікація дефектів БФМ

<b>Принципи класифікації</b>	<b>Найменування класифікаційних груп</b>	<b>Приклади</b>
Різновид дефектів	Механічні пошкодження	Подряпини, перегини, точкові пошкодження
	Пошкодження в процесі хімічної обробки	Залишки проявника або інших сполук
	Сторонні об'єкти, що попадають на БФМ	Пил, бруд, об'єкти системи сканування
Виникнення дефектів	Дефекти природного виникнення	Кільця Ньютона, нерівномірність проявленого емульсійного шару
	Дефекти штучної природи	Подряпини, пил

Продовження табл. 3.1.

<b>Принципи класифікації</b>	<b>Найменування класифікаційних груп</b>	<b>Приклади</b>
Абсолютне значення і співвідношення абсолютних розмірів	Компактні (точкові)	Пил, дефекти обробки
	Лінійні (протяжні)	Подряпини емульсійного шару
	Площинні	Дефекти емульсійного шару в наслідок деградації
Склад і призначення	Прості	Пил, подряпини
	Складені	Дефекти емульсійного шару, Кільця Ньютона
Властивість відбивати випромінювання	Малоконтрастні	Кільця Ньютона, малорозмірні подряпини
	Контрастні	Пил, подряпини

У процесі використання багатошарових кольорових матеріалів, їх структура підлягає впливу механічних або хімічних пошкоджень. До таких пошкоджень відносяться:

1. Подряпини емульсійного шару.
2. Перегини в процесі експлуатації.
3. Пошкодження, що утворені в процесі обробки матеріалу.

Пошкодження, що впливають на якість зображення цифрованих БФМ, поділяються на групи, за характером їх утворення:

1. Механічні пошкодження плівки, наприклад: подряпини, перегини, точкові пошкодження,

2. Пошкодження в процесі хімічної обробки, наприклад: залишки проявника або інших сполук, що використовуються при обробці фотоматеріалів.

3. Об'єкти, що потрапляють на фотоматеріал, утворюючи додаткові спотворення, викривлення на структурі сканованого зображення, наприклад: пил, бруд, об'єкти системи сканування.

Всі вище вказані групи пошкоджень мають властивості, що значно відрізняються від властивостей фотоматеріалу і негативно впливають на структуру зображень цифрованих БФМ. Спектральні характеристики таких елементів є неселективними і тому можуть бути виділені окремо із структури зображення багатошарових кольорових матеріалів. Для їх виділення запропоновано використовувати випромінювання, спектральний діапазон якого не лежить в межах або знаходиться на межі області спектральної селективності БФМ. Спектральна селективність оброблених БФМ лежить у видимій області спектру. Спектрально – неселективні об'єкти в структурі емульсійного шару або на його поверхні можуть бути виділені у діапазонах, що не належать видимій області спектру.

Розглянемо процес виділення пошкоджень. Проведемо аналіз пошкоджень відповідно до кожної групи, запропонованої класифікації пошкоджень багатошарових фотоматеріалів:

1. Механічні пошкодження плівки. Процес експонування на зображенні відбувається за рахунок розсіяння (заломлення, багатократного відбивання) у структурі дефектів. Розглянемо два випадки механічних пошкоджень: пошкодження емульсійного шару і основи багатошарових фотографічних матеріалів. Механічні пошкодження в емульсійному шарі заломлюють і розсіюють на своїй структурі випромінювання, що проходить через основу багатошарових фотографічних матеріалів. Заломлюючи і розсіюючи випромінювання пошкодження змінюють кут ходу променів в оптичну систему. Так як оптична система має лімітований кут зору, то оптичні промені заломлені або розсіяні не попадають на фотодетектор, що дозволяє їх виділяти на структурі зображення. При аналізі приймаємо, що електромагнітне випромінювання падає на структуру емульсійного шару по нормалі до площини фотоматеріалу (особливість пристрою виділення пошкоджень) Промінь, що падає на

границю механічного пошкодження в емульсійному шарі фотоматеріалу поділяється на два променя. Перший промінь заломлюється, що приводить до зміни кута ходу променя. Другий – відбивається і розсіюється у структурі емульсійного шару і у його основі. Даний ефект проходження електромагнітного випромінювання крізь дефекти емульсійного шару характеризується контрастним зображенням структури дефектів на зображенні цифрованого БФМ, внаслідок того, що розсіювання у структурі емульсійного шару практично не впливає на структуру зображення. Тому вище вказані дефекти на зображенні мають чіткі границі і низький рівень яскравості відносно загального фону зображення.

Розглянемо властивості пошкодження, утвореного у підкладинці БФМ. Основною різницею між зображенням дефектів, утворених у емульсійному шарі і у підкладинці є те, що зображення утворене у емульсійному шарі є більш контрастним, а зображення утворене дефектами у підкладинці є менш контрастним, у зв'язку з тим, що його більша частина розсіюється у структурі емульсійного шару. Даний процес дозволяє зробити висновки, що зображення дефектів, утворених у підкладинці БФМ не мають значного впливу на структуру сканованих зображень при малих розмірах (максимальна товщина дефекту не перевищує товщину емульсійного шару) Якщо товщина дефектів перевищує товщину емульсійного шару враховується коефіцієнт розсіювання емульсії для виділення на структурі цифрованого БФМ. Так як процес маскування розсіюванням дефекту являє собою ефект розфокусування у оптичній системі, для отримання більш контрастного зображення проводиться його фокусування – обернена згортка зображення з функцією розсіювання.

2. Дефекти, що виникають у БФМ у результаті хімічної обробки. Процес виділення відбувається за рахунок розсіювання, утворення дифракційних або інтерференційних побічних зображень. Дані пошкодження представляють собою хімічні сполуки, що після хімічної обробки фотоматеріалу не були видалені із структури фотографічного багат шарового матеріалу. При опроміненні дефектів електромагнітним випромінюванням відбувається процес інтерференції освітлення на границі БФМ – предметне скло пристрою виділення дефектів. Даний процес не має значного впливу на

структуру цифрованих БФМ, так як розсіяння випромінювання у видимому діапазоні значно перевищує ефекти інтерференції та дифракції. Але даний тип дефектів має значний вплив на структуру зображення дефектів БФМ. Тому для ефективної роботи алгоритму виділення дефектів на структурі зображення проводиться видалення інтерференційних і дифракційних локальних об'єктів.

3. Об'єкти, що попадають на фотоматеріал, утворюючи додаткові дефекти на структурі сканованого зображення. В якості дефектів даного типу виступають об'єкти, що не належать структурі БФМ, тому при експонуванні дефектів відбувається розсіяння на їх структурі і відбивання від БФМ. При електромагнітному опромінювання відбувається розсіяння на структурі самого об'єкту і подальше відбивання і розсіювання у структурі БФМ. В наслідок того, що оптична система пристрою виділення дефектів має лімітований кут зору, оптичні промені заломлені або розсіяні не попадають на фотодетектор. При аналізі приймаємо, що електромагнітне випромінювання падає на структуру емульсійного шару по нормалі до площини БФМ. Зображення дефектів на структурі цифрового зображення БФМ характеризується високим контрастом внаслідок того, що розсіяння в структурі емульсійного шару практично не впливають на структуру зображення.

#### 4.2 Аналіз системи формування зображення багат шарових фотографічних матеріалів

Для проведення дослідження властивостей дефектів БФМ проведено аналіз властивостей оптичної системи формування зображення БФМ. Характеристики оптичної системи мають значний вплив як на структуру зображення БФМ, так і на структуру зображення дефектів.

Оскільки оптична система пристрою представляє собою дзеркальну систему і не включає в себе нелінійних оптичних елементів вважаємо що передатна характеристика системи є симетричної. Дане припущення дозволило проводити розрахунок передатної характеристики лише в одній із площин перерізу системи. В якості площини для якої проведено аналіз використано площину формування зображення.

Для проведення дослідження властивостей використано методики оцінювання фотографічних систем. Предметом дослідження є передатна функція оптичної системи. Для розрахунку даної характеристика використовувались властивості зображення при проходженні через оптичну систему. Для визначення характеристики використано методи «Теорії систем і перетворень в оптиці», а також методи визначення ФРТ та функції передачі модуляції (ФПМ)

Вплив оптичної системи на зображення характеризується функцією згортки зображення з передатною характеристикою системи. Спектр передатної характеристик розраховується по формулі:

$$H_{u,v} = \frac{\tilde{F}_{u,v}}{F_{u,v}}, \quad (4.1)$$

де  $H_{u,v}$  – спектр передатної характеристики оптичної системи;

$F_{u,v}$  – спектр ідеального зображення;

$\tilde{F}_{u,v}$  – спектр зображення на виході оптичної системи.

Розрахунок ФПМ проводиться згідно теорії оптичних систем. Після визначення ФРТ, ФПМ розраховується по формулі:

$$W(w) = \sqrt{\text{Re}(H(w))^2 + \text{Im}(H(w))^2}, \quad (4.2)$$

де  $H(w)$  – спектр ФРТ.

Розрахунок коефіцієнту контрасту проводиться відповідно до розрахунку коефіцієнту контрасту оптичних систем:

$$K = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}, \quad (4.3)$$

де  $B_{\max}$  – максимальне значення яскравості точок об'єкта;

$B_{\min}$  – мінімальне значення яскравості точок об'єкта.

Дана характеристика дозволяє оцінити властивість оптичної системи передавати інформацію з різною величиною перепадів і різними розмірами. Залежність величини перепаду від розміру об'єкта



дозволяє оцінити спотворення, що вносить система.

Спотворення типу розфокусування або змаз виявляються в ослабленні верхніх просторових частот зображення, тому що формуючі системи являють собою фільтри нижніх частот. При цьому відношення сигнал/шум на верхніх частотах, що визначають чіткість зображення, значно гірше ніж для зображення в цілому. Якщо система, що формує зображення, послаблює сигнал на просторових частотах, то при відновленні він повинен бути підсилений у тій мірі, у якій був послаблений. Разом із сигналом будуть підсилюватися і шуми. Тому поліпшення якості зображення по різкості може привести до погіршення його якості по зашумленості.

Яскравість на краях кадру спотвореного зображення залежить від яскравості об'єктів, розташованих поза кадром, за рахунок згортки вихідного зображення з ФРТ. При відновленні зображень через неповну інформацію про сигнал поза кадром виникають крайові ефекти. Вплив крайових ефектів на якість реставрування у ряді випадків виявляється навіть більш істотним, ніж зашумленість зображення.

При спотвореннях, викликаних рухом або розфокусуванням оптичної системи, передатні функції мають нулі, наявність яких обумовлена осцилюючим характером передатних функцій. Оскільки спектр спотвореного зображення дорівнює добуткові спектра вихідного зображення і передатної функції, та наявність нулів приводить до повної втрати даних про вихідне зображення на відповідних частотах. З цієї причини не вдається абсолютно точно реставрувати вихідне зображення по зображенню, що спостерігається, навіть якщо відсутні шуми спостереження і розміри кадрів необмежені.

Аналіз оптичних параметрів системи оснований на розрахунку характеристик оптичної системи, що впливають на структуру зображення цифрованих БФМ у видимому і інфрачервоному спектральних діапазонах.

Для аналізу параметрів оптичної системи проведено дослідження характеристик якості оптичних компонентів системи. Згідно схеми формування зображення (див. рис. 2.5) проведено дослідження характеристик оптичної системи в видимому і інфрачервоному спектральних діапазонах.

В якості еталонного перепаду для дослідження ФРТ і ФПК використано перепад яскравості, що утворений лінією нанесеною на склі сітки. Товщина лінії сітки складає 17 мкм, лінія є абсолютно непрозора так як виконана із матеріалу, в якого значення коефіцієнту пропускання є достатньо малим, що дозволило вважати його непрозорим. Дослідження проведене у системі цифрування БФМ (фотограмметричний сканер) Цифрування сітки проведено у видимому і інфрачервоному спектральних діапазонах. Результати цифрування сітки приведені на рис. 4.1, рис. 4.2.

Після отримання цифрованих зображень сітки проведено дослідження характеристик оптичної системи. Зображення сітки у напрямку сканування і напрямку зчитування ПЗЗ елементу дозволили оцінити характеристику розсіювання оптичної системи – функцію розсіювання точки (ФРТ). Розрахунки приведені у додатку В. Отримані характеристики ФРТ приведені для видимого і інфрачервоного спектральних діапазонів.

Використовуючи результати, що приведені на рис. 4.1, рис. 4.2, зроблено висновок, що передатна характеристика системи є постійною у широкому спектральному діапазоні. Даний факт дозволяє проводити дослідження для інтегральної характеристики перепаду, отриманої як сума характеристик кожного із каналів зображення: червоного, зеленого, синього. Дана інтегральна характеристика у повній мірі відбиває властивості оптичної системи пристрою.

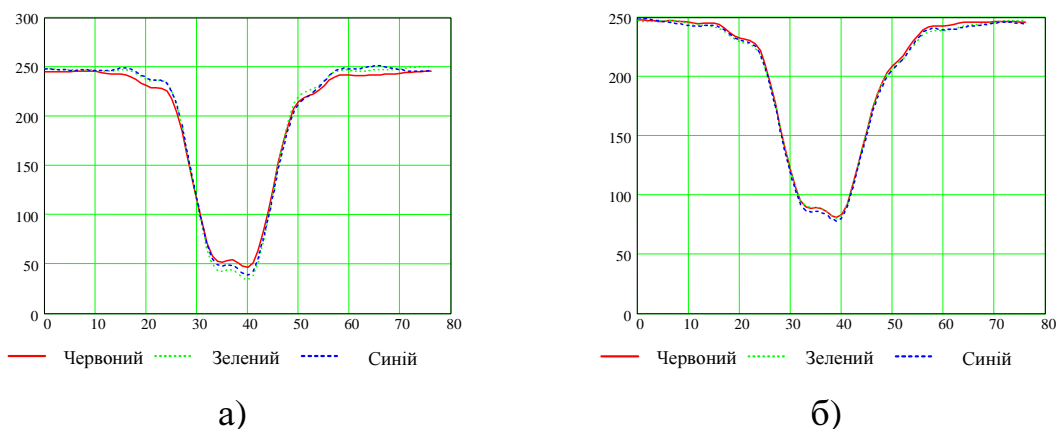


Рисунок. 4.1 Переріз зображення лінії сітки у напрямку зчитування в:  
 а) видимому спектральному діапазоні;  
 б) інфрачервоному спектральному діапазоні.

Для визначення впливу характеристик оптичної системи на різні типи БФМ проведено дослідження зображення перепаду у позитивних і негативних БФМ у видимому і інфрачервоному спектральних діапазонах. Для отримання характеристик проведено сканування з різними типами БФМ (негативні, позитивні, спектрзональні) Результати цифрування приведені на рис. 4.3, рис. 4.4.

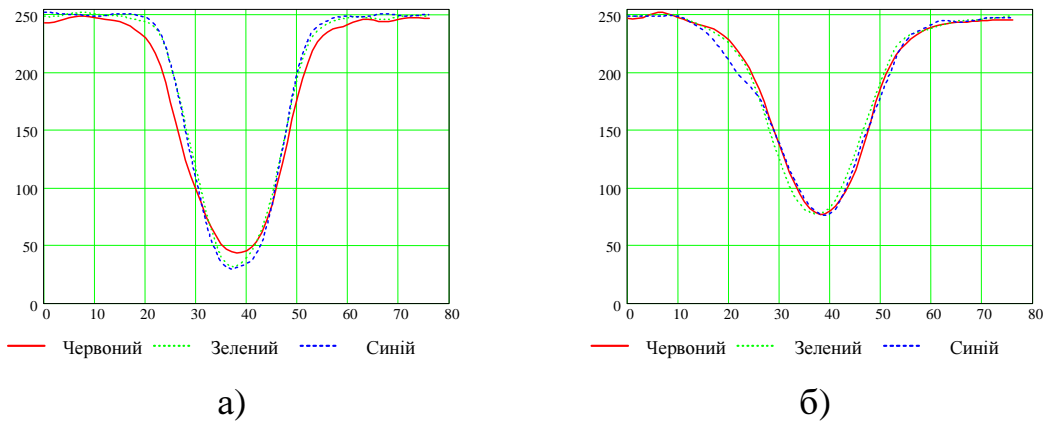


Рисунок. 4.2 Переріз зображення лінії сітки у напрямку руху в:  
 а) видимому спектральному діапазоні;  
 б) інфрачервоному спектральному діапазоні.

При порівняльному аналізі профілів перепадів на рис. 4.1, рис. 4.2, рис. 4.3, рис. 4.4 зроблено висновок, що характеристика оптичної системи не залежить від типу БФМ, і є постійною у видимому і інфрачервоному спектральних діапазонах електромагнітного випромінювання. Подальші розрахунки характеристик оптичної системи проведено для інтегральних характеристик спектральних складових і складових із врахуванням типів БФМ. Таке припущення дозволило розрахувати інтегральну характеристику, що моделює вплив оптичної системи КПП на зображення отримане у результаті цифрування у СЦПІ.

Передатна характеристика системи є постійною і подальший аналіз проведено для інтегральної характеристики профілю перепаду. Детальний розрахунок ФРТ приведений у додатку В. Дана характеристика дозволяє враховувати ефекти розсіяння, розфокусування і деформації оптичної системи.

Розрахунок передатної характеристики системи проведено по формулі (4.1) Після розрахунку спектру розраховано перетворення

Фур'є для отримання функції розсіяння точки (ФРТ) і функція передачі модуляції (ФПМ) відповідно методики, розглянутої у п. 4.2. Графіки отриманих характеристики оптичної системи представлені на рис. 4.5, рис. 4.6.

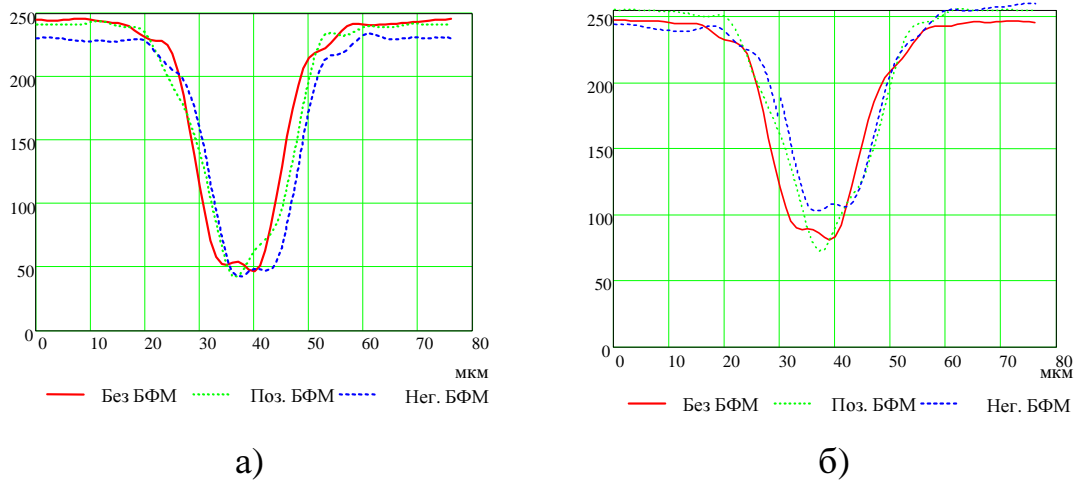


Рисунок. 4.3 Переріз зображення лінії сітки у напрямку зчитування в:  
 а) видимому спектральному діапазоні;  
 б) інфрачервоному спектральному діапазоні.

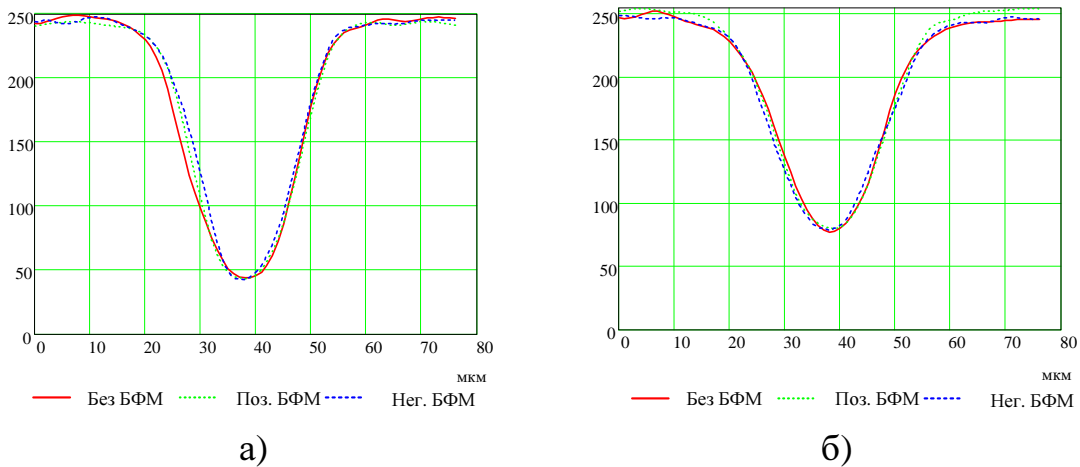
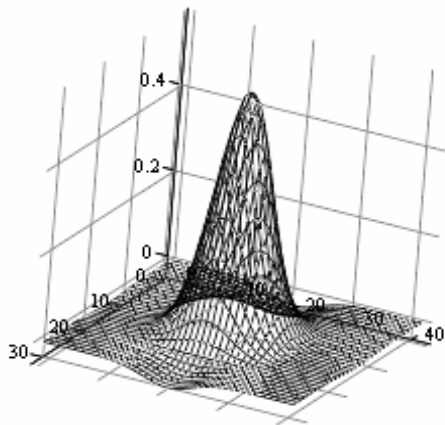
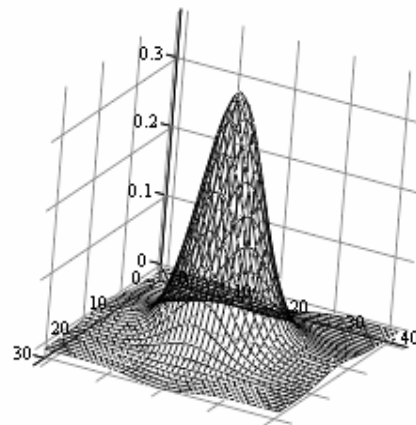


Рисунок. 4.4 Переріз зображення лінії сітки у напрямку руху в:  
 а) видимому спектральному діапазоні;  
 б) інфрачервоному спектральному діапазоні.

Аналіз отриманої характеристики дозволяє стверджувати, що вона є максимально наближеною до розподілу ймовірності згідно закону Гауса. Параметри гаусового розподілу, що максимально апроксимують передатну криву оптичної системи характеризуються параметрами приведеними в табл. 4.2.



а)

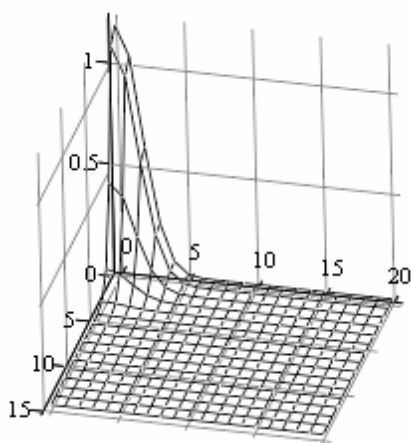


б)

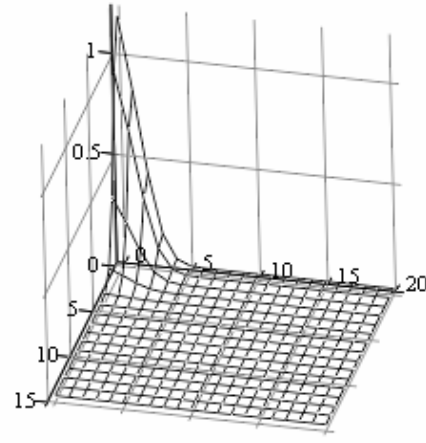
Рисунок. 4.5. Функція розсіяння токи:

а) видимий діапазон;

б) інфрачервоний діапазон.



а)



б)

Рисунок. 4.6. Функція передачі модуляції:

а) видимий діапазон;

б) інфрачервоний діапазон.

Так аналіз оптичної системи полягає у знаходженні ФПК для зображення дефектів БФМ. Розрахунок ФПК проведено, враховуючи передатну характеристику системи і мінімальний розмір перерізу дефектів БФМ. Для отримання характеристики проведено моделювання впливу ФРТ на типи об'єктів, які були обрані за еталонні. Такими об'єктами виступали лінії під різним кутом нахилу і різною товщиною, а також коло з різною товщиною ліній.

Таблиця 4.2 - Характеристики моделюючої кривої ФРТ оптичної системи

Спектр. діапазон	Напрямок	Назва хар-ки	Канал зчитування ПЗЗ		
			Червоний	Зелений	Синій
Видимий	Зчитування	Мінімум	-0.04857	-0.09039	-0.05062
		Максимум	0.81579	0.93660	0.89964
		СКВ	4.089256	3.94192	3.57468
	Рух каретки	Мінімум	-0.00846	-0.00400	-0.00437
		Максимум	0.68842	0.82798	0.84180
		СКВ	4.11010	3.74972	3.48648
Інфрачервоний	Зчитування	Мінімум	-0.02397	-0.01740	-0.01031
		Максимум	0.66778	0.66364	0.62848
		СКВ	4.16091	4.05029	4.06615
	Рух каретки	Мінімум	0.01554	0.02102	0.01918
		Максимум	0.53838	0.57500	0.51938
		СКВ	4.88478	4.51212	4.63701

В результаті розрахунків отримано криві ФПК, для різних типів ліній з товщиною 8 мкм яка представлена на рис. 4.7.

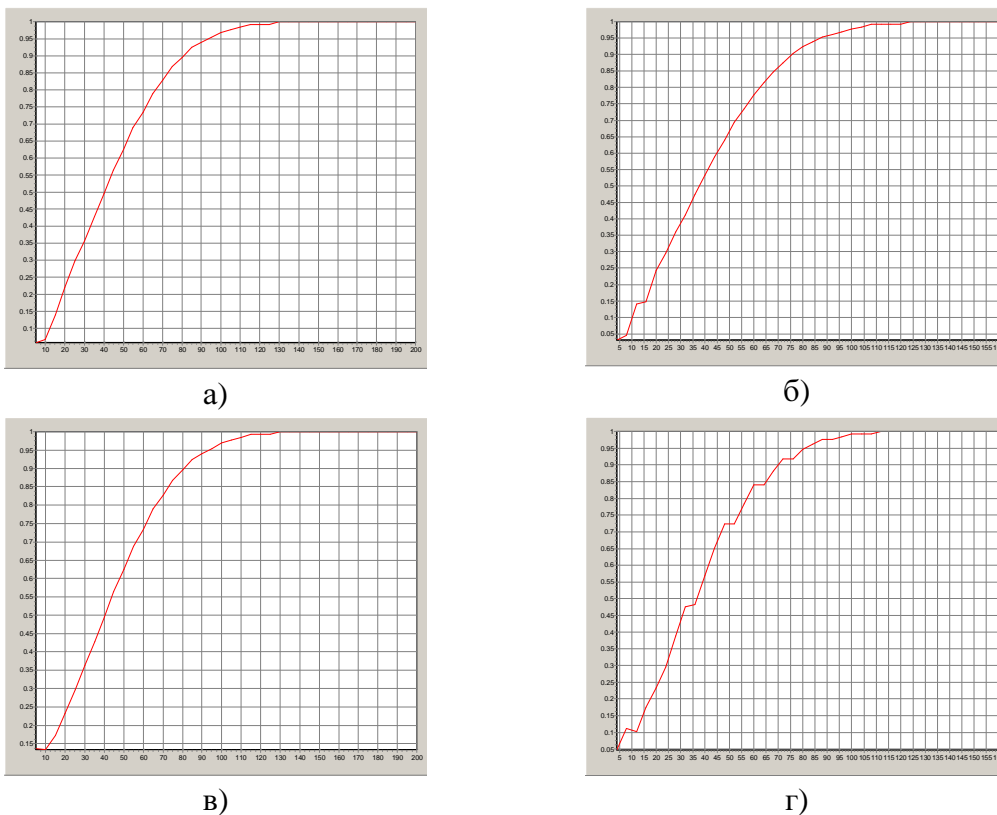


Рис. 4.7. ФПК оптичної системи зображення лінії товщиною 8 мкм: а) горизонтальні лінії; б) вертикальні лінії; в) діагональні лінії; г) коло.

#### 4.3 Аналіз точності виділення дефектів зображення цифрованих багатошарових фотографічних матеріалів в системах цифрових перетворювачів

Для проведення відновлення структури цифрованого зображення виділяється маска дефектів на зображенні цифрованих БФМ. Виділення маски передбачає створення бінарного зображення дефектів з максимально вірогідною кількістю об'єктів, що являють собою дефекти БФМ.

Для отримання зображення дефектів БФМ проведено його цифрування. Цифрування проведено при опроміненні БФМ електромагнітним випромінюванням в інфрачервоному спектрі. Згідно властивостей БФМ саме в інфрачервоному спектрі шари БФМ неселективні до випромінювання. В результаті опромінення на зображенні проявляються дефекти БФМ.

Зображення дефектів цифрованого БФМ (див. рис. 4.8) містить не тільки об'єкти, що утворено дефектами, а також об'єкти, які утворено за рахунок інтерференції, дифракції і нерівномірності розподілені густини вуалі у шарах БФМ. Суттєво на якість зображення дефектів впливають також і шуми зернистості БФМ. Для перетворення зображення дефектів у зображення маски проведено видалення об'єктів, що не є дефектами БФМ згідно класифікації запропонованої в п. 4.1.

Методика виділення безпосередньо дефектів передбачає виділення нерівномірності густини вуалі і виділення кілець Ньютона на першому етапі процесу маскування.

Для виділення нерівномірності вуалі кілець Ньютона використано методи низькочастотної фільтрації. Використання анізотропної фільтрації для виділення низькочастотних складових зображення є найкращим методом. Даний метод дозволяє виділити не тільки нерівномірності вуалі, а також і кільця Ньютона. Згідно властивостей дефектів БФМ, у спектрі зображення переважають високі частоти. При спектральному аналізі спектрів об'єктів, утворених за рахунок нерівномірності густини вуалі отримано, що в спектрі таких об'єктів переважають низькі частоти. Частка високих частот спектру є незначною і тому може не враховуватись при проведенні фільтрації.

Спектри зображення кілець Ньютона мають практично рівномірне розподілення амплітуди тому, що являють собою об'єкти періодичної структури.

Використання методів фільтрації спектру є прийнятним для об'єктів нерівномірності вуалі і не прийнятним для видалення кілець Ньютона. При фільтрації методом згортки значно спотворюється структура зображення кілець Ньютона, що є не прийнятним для проведення подальшою обробки.

Так як спектр зображення кілець Ньютона включає в себе всі частоти зображення, то використано метод, що дозволяє виділяти об'єкти періодичної структури. Основною властивістю кілець Ньютона є те, що вони повільно змінюють границі зображення об'єктів. Дана властивість дозволяє використовувати нелінійні методи фільтрації для виділення об'єктів з такою структурою.

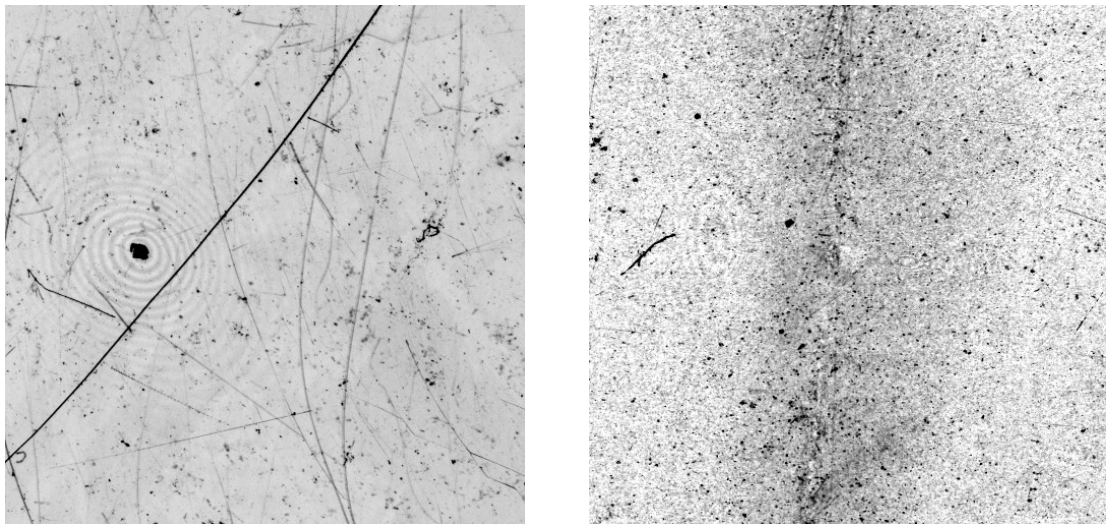


Рисунок. 4.8. Зображення дефектів цифрованих БФМ

Досліджено можливість використання медіанної фільтрації і фільтрації з компенсацією по максимальному значенню (див. п. 2.4). Головним недоліком медіанної фільтрації є згладжування зображення дефектів. Дана властивість приводить до виділення не тільки кілець Ньютона, а також до виділення об'єктів, що утворені дефектами БФМ. Зображення, що отримане в результаті медіанної фільтрації представлено на рис. 4.9. Аналіз зображення, отриманого в результаті медіанної фільтрації, показав, що виділення кілець Ньютона



відбувається при використанні вікна радіусом 2 точки. При збільшені радіусу вікна зображення повністю руйнується.

При використанні вказаних методів зроблено такі висновки:

Використання даного методу фільтрації зображення приводять до достатньо чітко прояву дефектів БФМ тому використання даного методу фільтрації є не прийнятним для вирішення поставленої задачі.

Медіанна фільтрація є нелінійним методом фільтрації зображень, що дозволяє усувати лише об'єкти з некорельованою структурою. Тому використання вказаного методу фільтрації не можливе для проведення операції видалення фонових об'єктів.

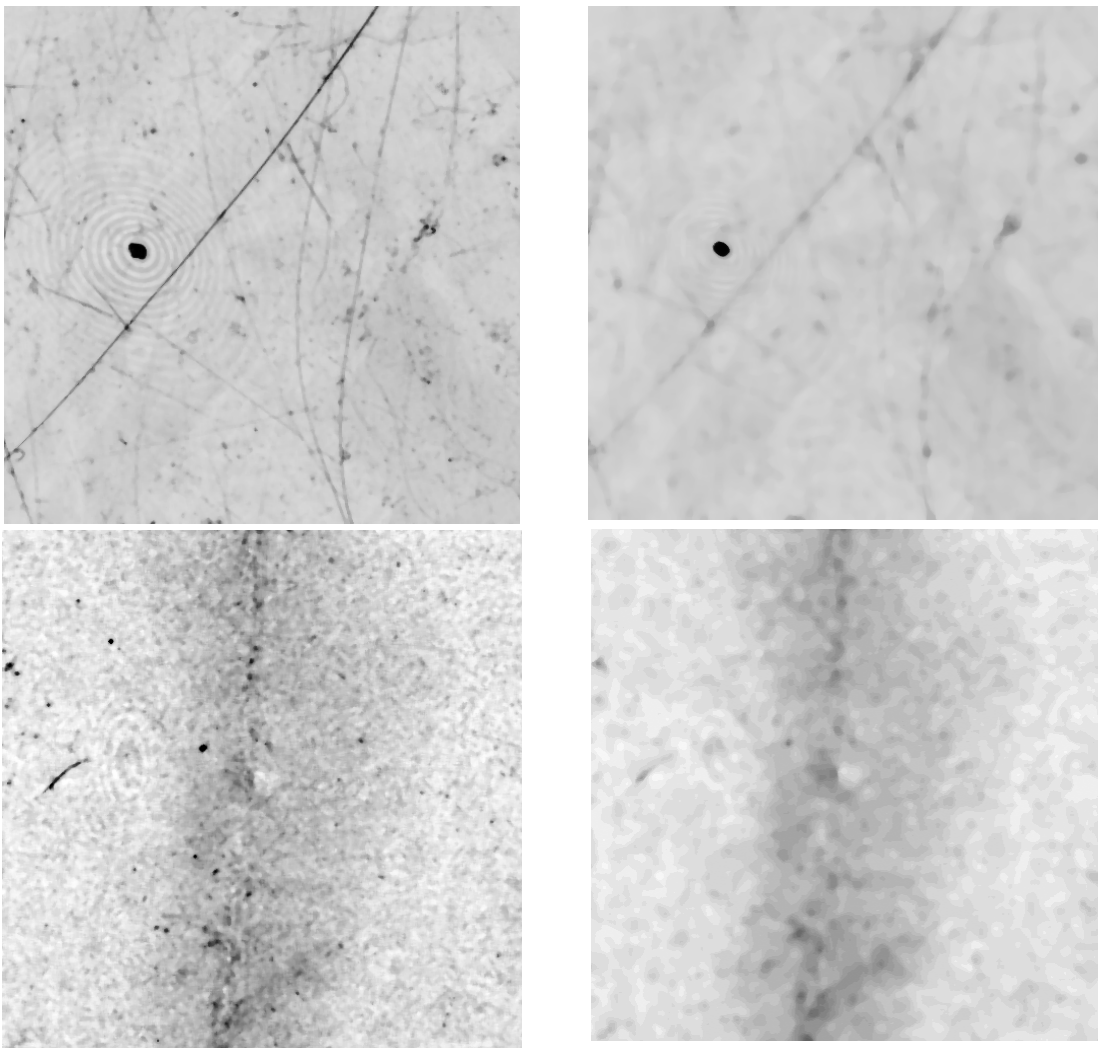


Рисунок. 4.9. Медіанна фільтрації зображень дефектів БФМ радіусом 2 і 5 точок

*Метод нелінійної фільтрації, що оснований на виділенні максимального значення. Даний метод по своїй фізичній природі*

максимально відображає властивості об'єктів, що утворені нерівномірністю вуалі і дифракційними властивостями тонких плівок (кільця Ньютона) При повільній зміні яскравості зображення даний метод не вносить значних змін до структури зображення вказаних об'єктів, так як вони не містять різких перепадів і частоти їх спектру не сконцентровані у діапазоні високих частотах. Зображення дефектів БФМ підлягає практично повному видаленню зі структури, крім дефектів з розмірами, значно більшими ніж 4 точки зображення. Зображення отримане при використанні фільтра основаного на виділенні максимального значення приведено на рис. 4.10

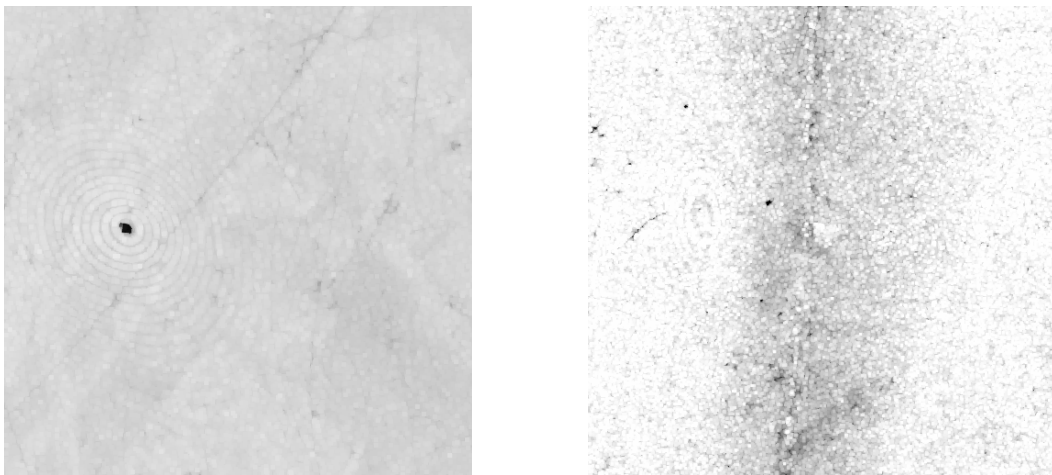


Рисунок. 4.10. Фільтрація методом виділення максимального значення

На приведених зображеннях після фільтрації виділено нерівномірність густини вуалі БФМ і кільця Ньютона. Виділення проведене за допомогою методу визначення максимального значення у вікні радіусом 3 точки зображення дефектів цифрованих БФМ. Виділене зображення дає можливість використовувати його для виключення зі структури зображення цифрованого БФМ в інфрачервоному діапазоні і представляє собою маску дефектів БФМ. Виділення маски відбувається шляхом по елементного віднімання яскравості точок зображення без накопичення. Результат даної операції приведений на рис. 4.11.

Отримані зображення, представлені на рис. 4.11, характеризують розподілення дефектів з високою просторовою частотою. Дані зображення можуть бути використані для бінарізації з метою створення маски дефектів. Основним недоліком отриманих

результатів є наявність границі об'єктів з просторовою частотою більшою ніж 2 точки і втрата інформації про структуру таких об'єктів. Точки об'єкту, що перевищують вказаний ліміт вважаються точками фону і, відповідно до цього, змінюють значення яскравості на середнє значення фону.

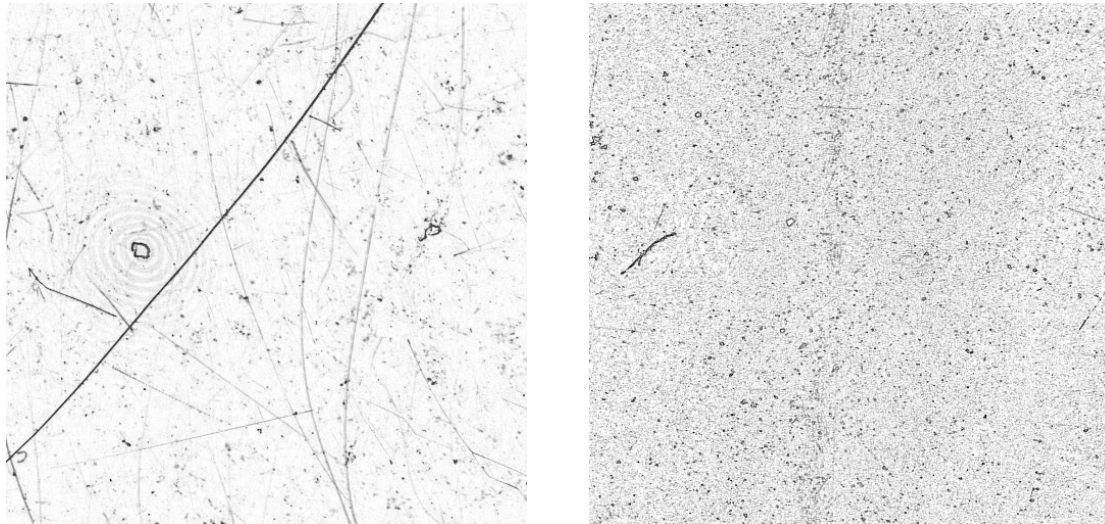


Рис. 4.11. Зображення дефектів БФМ

Відновлення таких об'єктів відбувається при порівнянні отриманих зображень із початковими даними, отриманими в процесі цифрування. Для отримання повної інформації про структуру об'єктів проведено порівняльний аналіз їх яскравості. В результаті даного аналізу точки зображення, що суттєво змінили яскравість зображення є точками об'єктів, утворених дефектами БФМ. Такі точки зображення переносяться на відфільтроване зображення, щоб заповнити структуру об'єктів. Метод дозволяє в повній мірі відтворити структуру дефектів зображення. Поріг, що характеризує зміну яскравості точок зображення дефектів БФМ встановлюється як константа, яка вибирається емпірично для кожного окремого пристрою і знаходиться в межах від 0,725 до 1,25.

Наступним етапом методики виділення дефектів зображення є вибір порогу бінарзації. Поріг бінарзації вибирається адаптивно, що дозволяє не використовувати постійних коефіцієнтів. При знаходженні адаптивного порога бінарзації ефективним є використання гістограмних ознак зображення. Після фільтрації об'єктів зображення з високою просторовою частотою, мало розмірні

об'єкти знаходяться на однорідному фоні зображення. Відстань порогу бінарзації від середнього значення фону на гістограмі залежить від центральних моментів розподілення функції гістограми.

Найкращий результат отриманий для наступних функції визначення порогу

$$\begin{aligned} \Delta &= I_{\phi} \pm k_1 \sqrt[3]{\mu_3}, \\ \Delta &= I_{\phi} \pm k_2 (\sigma + \sqrt[3]{\mu_3}), \end{aligned} \quad (4.4)$$

де  $\sigma$  – стандартне відхилення;

$\mu_3$  – центральний момент розподілення третього порядку;

$k_1, k_2$  – числові коефіцієнти.

Такий метод визначення порогу дозволяє проводити оптимальне визначення значення порогу і не потребує значних апаратних і програмних затрат.

Схема обробки зображення дефектів для побудови маски дефектів представлена на рис. 4.12.

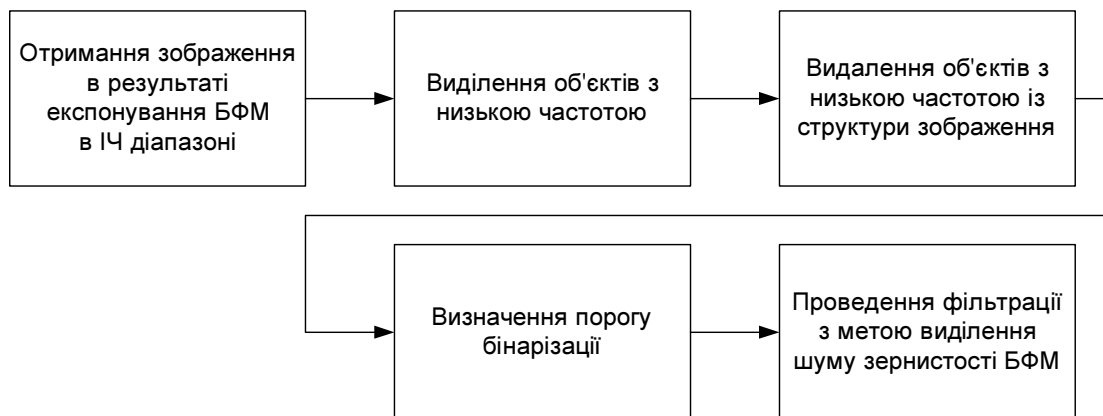


Рисунок. 4.12. Схема обробки з метою виділення маски дефектів

#### 4.4 Метрологічний аналіз структури цифрованих багатошарових фотографічних матеріалів у системах цифрових перетворювачів

Для відновлення структури зображення цифрованого БФМ на місцях пошкодження дефектами використано теорію «Нестискуваності фазових середовищ». Основні властивості

нестискуваності фазових середовищ описані рівнянням Власова. Запропоновано методіку відновлення структури зображень, що оснований на методі «Водяного мішка». Такий метод дозволяє отримати інформацію у наступний момент часу для нескінченного фазового середовища, враховуючи попередні данні, отримані при розрахунку кожної ітерації.

Враховуючи, що зображення об'єкта є нескінченим у фазовому просторі, інформація про структуру даних переноситься від однієї точки об'єкта в іншу у межах границь, що характеризують форму об'єкта. Припущення вірне лише для об'єктів, розмір яких значно перевищує розміри зони відновлення. Таке обмеження цілком обґрунтоване, адже, кількість точок об'єкта повинна бути значно більшою за розміри дефектів, так як для фазових середовищ кількість точок об'єкту вважається нескінченною для проведення аналізу в наближенні до нескінченних систем. Дане припущення дозволяє використовувати ітераційні методи для відновлення структури зображення.

Ітераційні методи дозволяють проводити відновлення структури зображення безпосередньо на границі об'єктів, що значно спрощує складність процедури відновлення і зменшує вірогідність отримання помилкового результату.

Методіка відновлення структури зображення цифрованого БФМ включає в себе наступні етапи:

1. виділення границі дефектів на зображенні маски дефектів;
2. виділення вектора градієнту для кожної точки зображення;
3. визначення значення точок контурів, які належать дефектам БФМ;
4. проведення аналізу положення точок, що відновлюються;
5. моделювання зернистості зображення для адаптації відновлених областей з структурою зображення.

Для виділення контурів дефектів на зображенні маски дефектів використано методи лінійної обробки зображень. Згортка маски з відповідним вікном дає зображення границі об'єкту.

В результаті операції виділення контуру дефектів зображення визначаються контури, точки яких відновлюються відносно

зображення, що знаходиться за границею точок. Відновлення точок контуру проведено використовуючи метод «Водяного мішка».

Для визначення вектору градієнту, що визначає напрямок руху точок зображення проведено диференціювання зображення по формулі:

$$\nabla I(x, y) = \left( \frac{I(x, y)}{dx}, \frac{I(x, y)}{dy} \right), \quad (4.5)$$

яка для дискретних систем представляється у вигляді:

$$\nabla I_{x,y} = (I_{x,y} * Sx_{i,j}, I_{x,y} * Sy_{i,j}), \quad (4.6)$$

де  $Sx$ ,  $Sy$  – оператори диференціювання відповідно напрямлення по осях  $X$  та  $Y$ .

Диференціювання виконується за рахунок згортки зображення із масками коефіцієнтів. Після проведення згортки з масками визначаються параметри вектору для визначення напрямку руху точок зображення, що не пошкоджені дефектами. Отриманий вектор має амплітуду, що дорівнює амплітуді точки зображення і напрямлення, що розраховується, використовуючи (4.6)

Після отримання маски з координатами руху вектора проведено заповнення контуру дефектів зображення яскравостями точок, що не були пошкоджені. Заповнення контуру проведене за рахунок визначення положення кожної точки зображення згідно з властивостями нескінченності його структури. Використовуючи властивості об'єктів зроблено висновок, що точки, які не лежать на границі об'єкта мають дифузійну природу заповнення фону. Точки зображення об'єкта, що лежать на границі мають чітко направлену структуру і тому напрямок їх руху є визначеним. Дана властивість точок дозволяє проводити їх відновлення.

При використанні ітераційного методу відновлення і послідовному зменшенні контуру зображення дефектів БФМ виникають ефекти перетинання точок різних об'єктів в одній точці контуру. Даний ефект пояснюється тим, що контури об'єктів, які є складовими зображення можуть перетинатися, утворюючи складну

структуру об'єктів. Для компенсації даного ефекту використовуються компенсаційні операції, які дозволяють враховувати природу стику об'єктів. При виникненні стикування двох векторів утворюється сумарний вектор напрямлення якого є результатом направлень руху векторів границі суміжних об'єктів. Амплітуду вектора розраховано як середньоарифметичне значення. Дана операція дозволяє проводити стиснення контуру дефектів зображення.

Стиснення контуру проводиться до тих пір поки кількість точок маски дефектів зображення не стане рівною нулеві –тобто будуть відновлені всі точки зображення, що були пошкоджені дефектами БФМ.

Після проведення відновлення, результуюче зображення містить лише точки, що є відновленими. Для покращення візуального сприйняття оператором зображення проводиться додаткова операція додавання шуму зернистості БФМ в структуру даних, що відновлені. Дана операція є моделюванням шуму зернистості БФМ, яка дозволяє отримати зображення, що матиме рівномірне розподілення шуму по всій структурі зображення. Так як розподілення шуму зернистості підпорядковано гаусовому розподілення ймовірнісної величини, для моделювання використовувався метод генерування шуму по гаусовому закону розподілення. Значення СКВ вибирається враховуючи тип БФМ. Для кожного з досліджуваних матеріалів були приведені характеристики середньоквадратичного відхилення виробником.

Схему відновлення структури зображення наведено на рис. 4.13. На схемі представлено зв'язок між основними операціями по видаленню структурних дефектів цифрованих БФМ.

Відповідно до схеми ітераційні методи, що використано, дозволяють проводити відновлення зображення цифрованих БФМ, використовуючи зрізи маски за визначену кінцеву кількість кроків алгоритму. Для проведення відновлення оператору надано можливість самому вводити кількість ітерацій відновлення або використовувати автоматичний метод ідентифікації об'єктів, що дозволяє виділити всі видимі дефекти, що виділення на масці дефектів зображення.

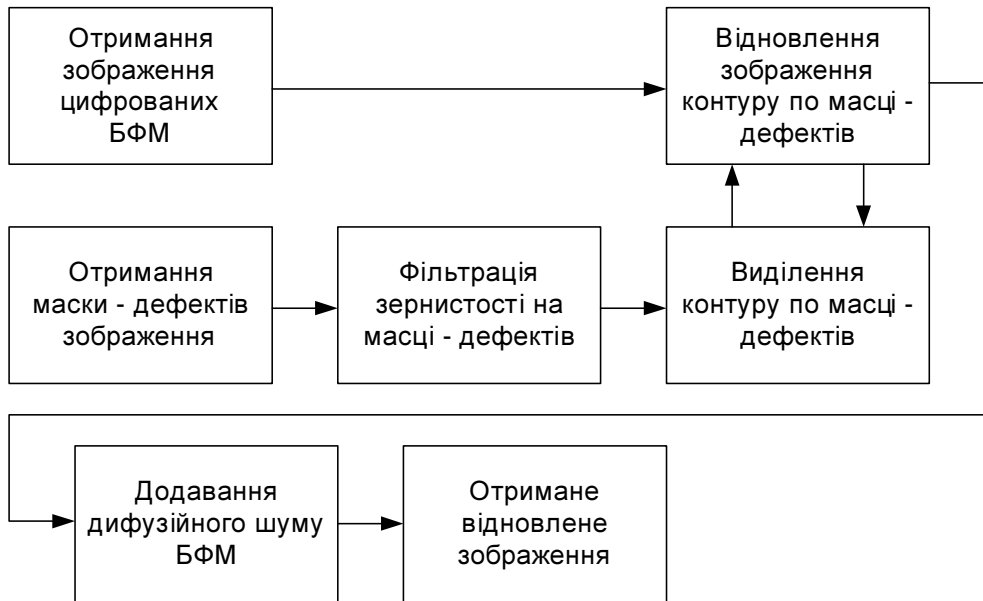


Рисунок. 4.13. Схема відновлення структури зображення

Для проведення аналізу ефективності виділення проводився аналіз точності СЦП і аналіз точності КП. Проведено аналіз КП для отримання характеристик точності системи видалення дефектів цифрованих БФМ. Даний аналіз проведено, використовуючи фізичні властивості елементів системи а також їх статистичні характеристики. На вході системи розподілення випромінювання описується таким чином:

$$I(x, y) = \int I_0(x, y) \cdot C(\lambda) d\lambda, \quad (4.7),$$

де  $I_0(x, y)$  – розподілення енергії;

$C(\lambda)$  – коефіцієнт спектральної селективності енергії.

Згідно приведенного виразу (4.8) припущено, що розподілення шуму підпорядковуються нормальному закону, параметри якого залежать від типу БФМ і його фізичних і спектральних параметрів. Для проведення аналізу розглянемо закон розподілення вхідної величини над сигналом, що проходить через формуючий елемент КП.

В результаті опромінення БФМ розподілення енергії має наступний вигляд:



$$I_{БФМ}(x, y) = I(x, y) \cdot \tau_0(x, y) \cdot 10^{-(\sigma_D(x, y)N(x, y)D(\lambda))}, \quad (4.8),$$

де  $\tau_0(x, y)$  – коефіцієнт пропускання без врахування зернистості ;

$\sigma(x, y)$  – дисперсія зернистості БФМ;

$D(\lambda)$  – спектральна оптична густина;

$N(x, y)$  – гаусовий випадковий процес із нульовим середнім.

Для аналізу сигналу допущено, що вплив на сигнал оптичною системою є спектрально неселективним. Виходячи із вище сказаного сигнал на виході оптичної системи приймає наступний вигляд:

$$I_{OC}(x, y) = \iint I_{БФМ}(x - \alpha, y - \beta) \cdot H(\alpha, \beta) d\alpha d\beta, \quad (4.9),$$

де  $H(\alpha, \beta)$  – ФРТ оптичної системи (передатна характеристика)

Передатна характеристика оптичної системи є сталою і спектрально неселективною. Графік ФРТ і її характеристики розглянуто в п. 4.2 і представлені на рис. 4.5. З отриманих результатів зроблено висновок, що ФРТ апроксимується двовимірним законом Гаусу. Даний факт дозволив зробити висновок, що система формування зображення не впливає на закон розподілу похибки, тому вважається, що система формування зображення впливає на розподілення енергії і її вплив на точність формування зображення незначний.

Розглянемо характеристики сигналу на виході системи цифрування сигналу. В даному випадку система складається з приймача і системи перетворення. На виході кожного компоненту сигнал піддається впливу спотворень і представляється таким чином:

$$I_{CCD}(x, y) = \int I_{OC}(x, y) \cdot C_\phi(\lambda) d\lambda + n_{CCD}(i), \quad (4.10),$$

де  $n_{CCD}(i)$  – шум комірок ПЗЗ приймача, відповідний струму і;

$C_\phi(\lambda)$  – спектральна селективність фільтрів при їх наявності.

Розподілення шуму ПЗЗ приймача апроксимоване гаусовим розподіленням [40] виду:

$$n(i) = \left[ \frac{2\pi q^2 u_s}{\tau^2} \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[ \frac{-(i - qu_s \tau)}{\frac{2q^2 u_s}{\tau^2}} \right], \quad (4.11),$$

де  $q$  – заряд електрону;  
 $u_s$  – середнє число електронів, що випускається фотоприймачем під час його освітлення;  
 $\tau$  – час спостереження.

Похибки, що утворено внаслідок квантування аналогового сигналу перед його цифровим перетворенням апроксимовані незалежними відліками випадкових величин, що мають густину розподілення ймовірності по закону Гауса (нормальне розподілення) [57]. Відповідно до вище викладеного, щільність перетворення аналогового сигналу у цифровий апроксимується гаусовим законом, що дозволяє використовувати нормальний закон розподілення похибки для аналізу характеристик системи.

Для проведення аналізу точності СЦПІ використано метод контролю геометричних координат по всій апертурі сканування при обмірюванні координат по контрольній сітці. Сітка представляє собою лінії, що перетинаються під прямим кутом, з максимальним відхиленням центру перетину ліній  $\Delta = \pm 4 \text{ мкм}$  і СКВ =  $\pm 3 \text{ мкм}$ . Такі характеристики дозволяють використовувати сітку як еталон для перевірки характеристик точності досліджуваної СЦПІ. Сканування сітки проведено апертурою 8 мкм. Після отримання цифрованого зображення сітки проведено вимірювання відхилень положень центрів перетину ліній на зображені сітки відносно реальних координат положення перетину. Графік відхилень представлений на рис. 4.14.

Основні характеристики геометрична точності СЦПІ представлені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3. - Характеристики СЦПІ

Назва характеристики	Вісь X	Вісь Y
Максимальне відхилення, мкм	$\pm 3$	$\pm 4$
Коефіцієнт афінної деформації	1.000001	0.999999
Неперпендикулярність, сек.	0.5	
СКВ, мкм	1.48	1.76

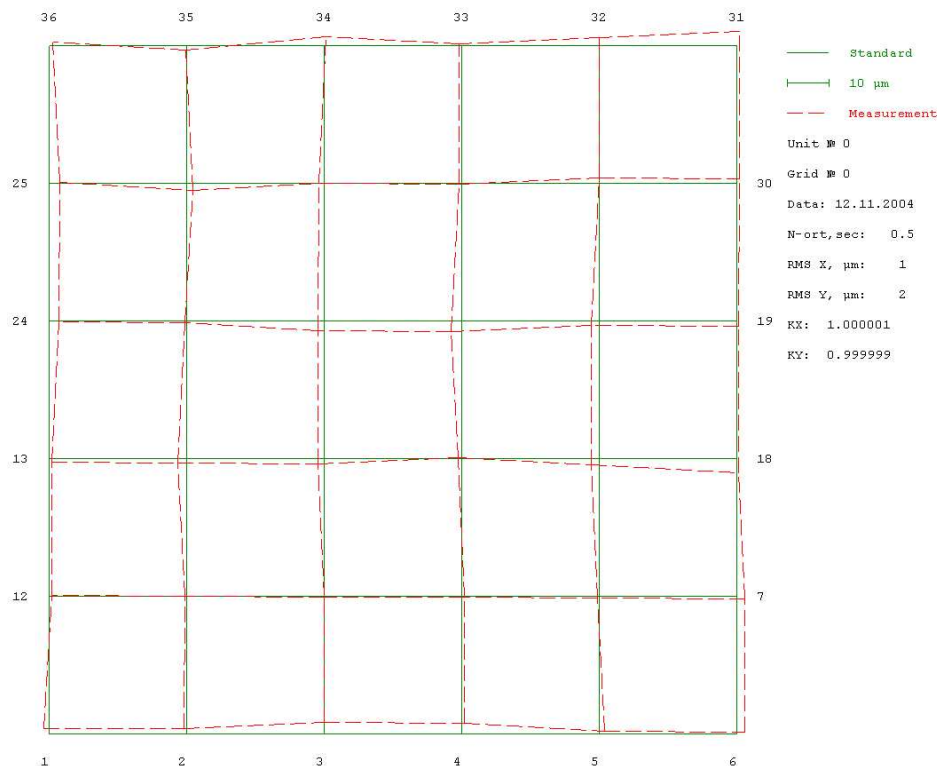


Рисунок. 4.14. Відхилення координат центрів перетину ліній сітки

В результаті вимірювань отримані координати центрів перехресть контрольної сітки, а також основні характеристики системи цифрування. Результати вимірювань дозволили визначити точність системи цифрування БФМ для проведення аналізу точності виділення дефектів БФМ і відновлення структури зображення пошкоджених об'єктів. Аналіз ефективності методу проведено, враховуючи критерії точності виділення дефектів цифрованих БФМ і їх якість відтворення. Критерій ефективності виділення дефектів зображення враховує ймовірність виділення об'єктів фіксованого розміру на структурі фонового зображення. Такий критерій дозволив оцінити якісно властивість системи, щодо виділення малорозмірних об'єктів. В результаті проведення аналізу враховано три типи похибок, що пов'язані із:

- пропуском об'єктів на фоновому зображенні;
- похибками при визначені їх місця знаходження;
- використання зернистості як дефектів (хибне виділення)

Враховуючи приведені похибки отримані криви, що характеризують ймовірність виділення дефектів зображення у залежності від розміру апертури цифрування і відношення сигнал/шум (С/Ш) Мінімально ефективний розмір апертури цифрування складає 8 мкм. Проведено аналіз ефективності виділення дефектів БФМ, що розташовані в емульсійному шарі і на підкладинці, тобто внутрішні і зовнішні. Дефекти зображення, що розташовані в емульсійному шарі, мають чітко виражену структуру і високий рівень контрасту. Дефекти, що розташовані на підкладинці, емульсійного шару мають більш розмиті (в результаті розфокусування) структуру зображення і значно нижчий рівень контрасту. Графік залежності ймовірності виділення дефектів на зображенні приведений на рис. 4.15.

Графік залежності ймовірності виділення дефектів БФМ від відношення С/Ш приведено на рис. 4.16. На даному графіку базові відношення С/Ш приймалися 2, 10, 20. Для проведення аналізу використано міри абсолютного контрасту і синтезовані текстурні, що використано, як модель зернистості БФМ.

Загальні характеристики критерію якості відтворення розраховано з врахуванням точності відтворення структури об'єкта. Для проведення дослідження використано тестові міри, зображення яких складається із об'єктів різної форми. На отримане цифроване зображення об'єктів були накладені модельовані зображення дефектів БФМ. Після проведення процесу відновлення було розраховано критерій якості.

Дослідження проведено для об'єктів з прямокутною, трикутною та круглою формами, так як дані об'єкти можуть описувати структуру будь – якого зображення. Результати дослідження приведено на рис. 4.17. Отримані результати дозволяють стверджувати, що якість методу відновлення структури зображення відповідає вимогам, що враховують якість відображення інформації в ІС для проведення обробки та аналізу інформації.

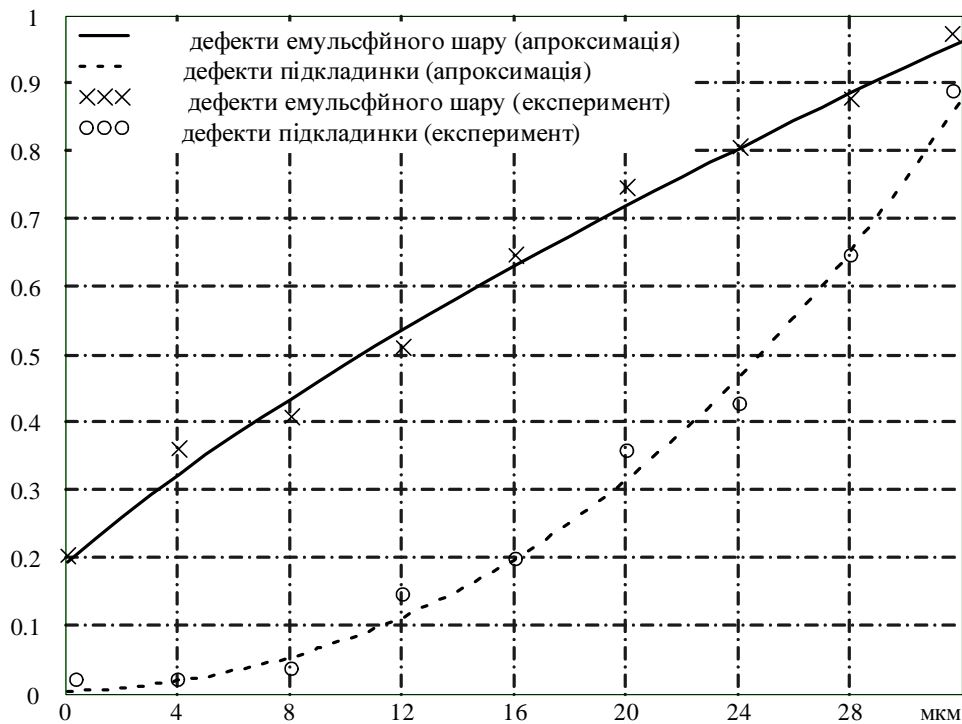


Рисунок. 4.15 Ймовірність виділення дефектів при апертурі сканування 8 мкм.

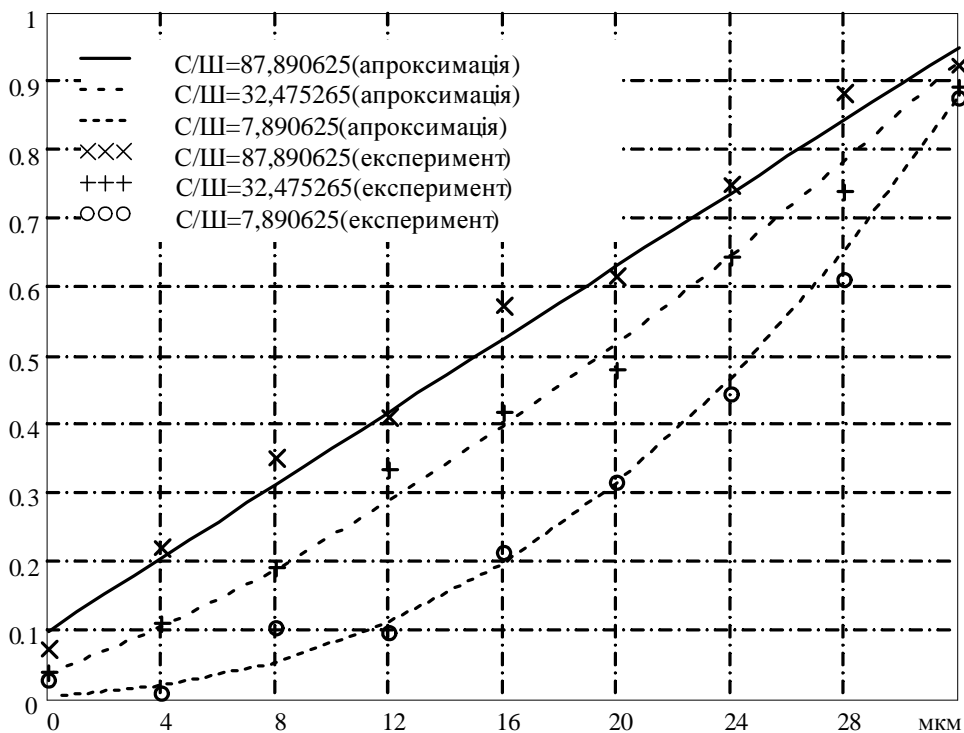
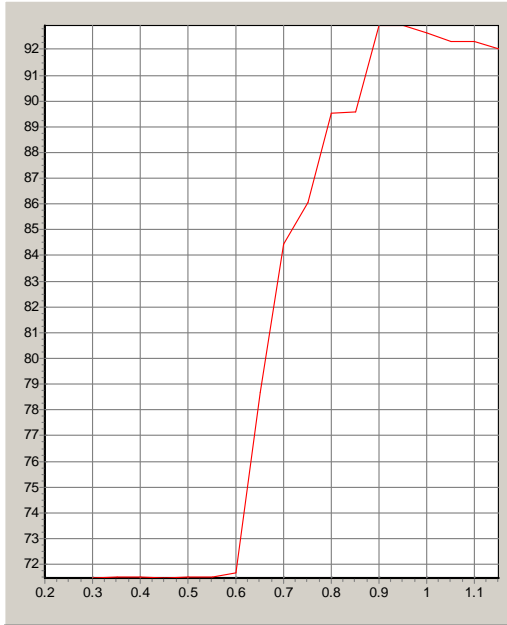
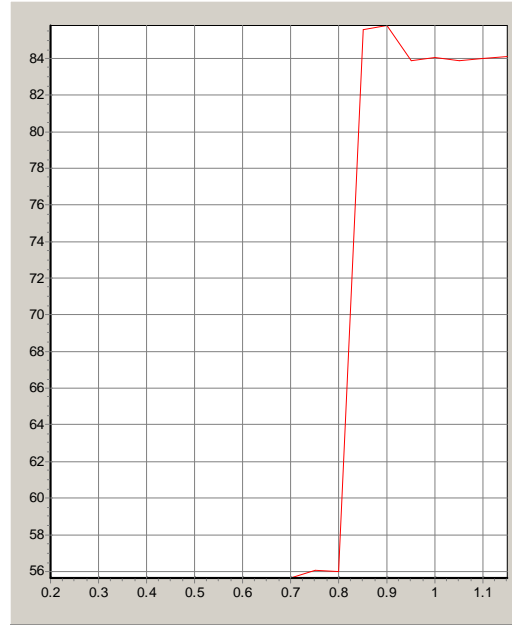


Рисунок. 4.16 Залежність ймовірності виділення від відношення С/Ш при апертурі сканування точки 8 мкм.



а)



б)

Рисунок. 4.17. Ефективність відтворення пошкоджень БФМ:  
 а) з врахуванням пошкоджень типу ліній,  
 б) з врахуванням пошкоджень з круговою формою.

## 5 РЕАЛІЗАЦІЯ СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПОБУДОВИ ПРИБОРУ ВИДІЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ БАГАТОШАРОВИХ ФОТОГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

### 5.1 Реалізація схемотехнічних рішень побудови пристрою виділення дефектів багатошарових фотографічних матеріалів

Пристрій виділення дефектів БФМ є пристроєм для цифрування БФМ і вимірювання оптичних густин у різному спектральному діапазоні. Структурна пристрою представлена на рис. 5.1. Характеристики пристрою цифрування є сумісними з пристроєм виділення дефектів БФМ і в кінцевому результаті дозволяють отримати необхідне зображення дефектів. Схема КПП представлена на рис. 4.

У відповідності з сенситометричними властивостями БФМ у різних спектральних діапазонах електромагнітного випромінювання запропоновано схему пристрою для виділення дефектів цифрованих БФМ у СЦП.

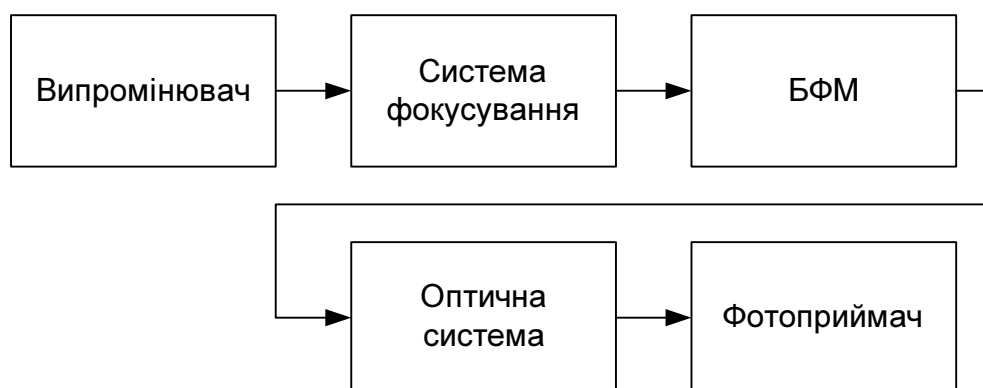


Рисунок. 5.1. Структурна схема пристрою виділення пошкоджень БФМ

Дана система складається із двох основних структурних елементів. Перший елемент представляє собою освітлювача, що містить у собі дві світлодіодні лінійки, які опромінюють БФМ у видимому і інфрачервоному діапазонах (див. рис. 5.2) Світлодіодні лінійки і оптична система освітлювача спроектовані таким чином, що дозволило фокусувати випромінювання двох джерел в одному місці

на предметному склі. Випромінювання є направленим і максимальна енергія концентрується так, щоб отримати освітлення БФМ на предметному склі з максимальною амплітудою сигналу. Максимальний рівень освітлення досягнуто шляхом отримання направлення світлових променів до площини БФМ під прямим кутом. Нормально направлене випромінювання дозволило максимально зменшити втрати на освітлення матеріалу і зменшити ефекти розсіювання, розфокусування в оптичній системі СЦП [16].

Іншим структурним елементом є оптична система, що складається з об'єктива і ПЗЗ елементу. Зображення пристрою представлено на рис. 5.3. Об'єктив оптичної системи є дзеркальним, що дозволило значно зменшити вплив аберацій оптичної системи на зображення порівняно з лінзовими об'єктивами. ПЗЗ елемент монтовано на елемент кріплення до поверхні об'єктиву. Він виконує функцію приймача випромінювання. Для підвищення функціональних властивостей системи в СЦП введені апертурні діафрагми, з метою зниження рівня розсіяного випромінювання.

Пристрій складається із випромінювача вузького спектрального діапазону, системи фокусування електромагнітного випромінювання, БФМ, оптичної системи для експонування зображення дефектів БФМ на фотоприймач.

Випромінювач представлено джерелом електромагнітного випромінювання у інфрачервоному діапазоні з довжиною хвилі  $\lambda = (900 \pm 30)$  нм. В якості активних елементів пристрою використано світлодіоди. Для заповнення апертури приймача світлодіоди набираються у світлодіодну лінійку довжиною (80 – 120) мм. Спектральні характеристики світлодіодів приведені у додатку А. Спектральний діапазон запропонованого пристрою є стабільним, що необхідно для якісного виділення дефектів. Робота випромінювача в імпульсному режимі зі скважністю рівною 2 дозволяє значно підвищити потужність випромінювання для розширення динамічного діапазону цифрованих БФМ. Імпульсний режим роботи джерела випромінювання зменшує кількість розсіяного випромінювання внаслідок руху у процесі цифрування БФМ.



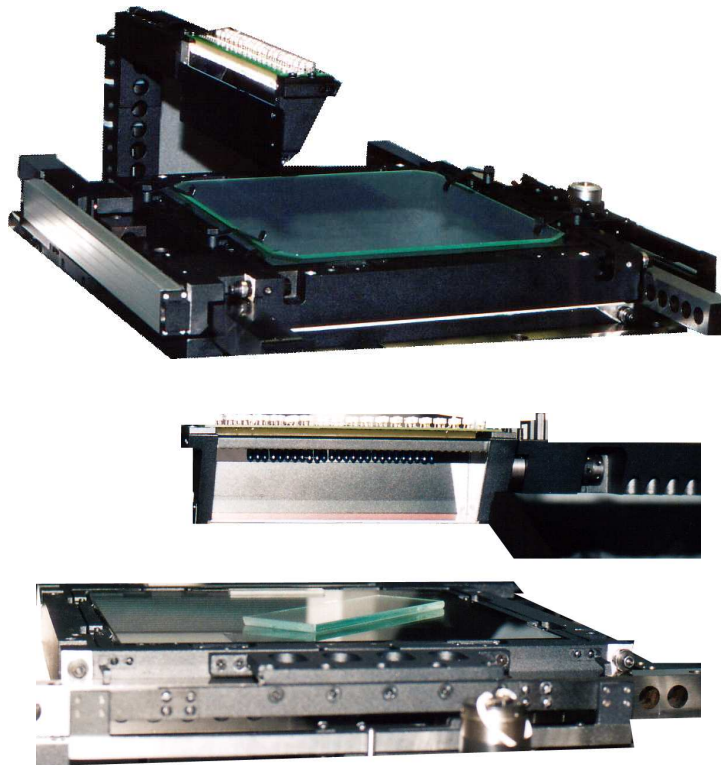


Рисунок. 5.2. Освітлювач системи виділення дефектів БФМ

Система фокусування представляє собою структурну одиницю системи освітлювача, але виділена в окремий компонент системи, так як виконує функції фокусування і направлення електромагнітного випромінювання на БФМ. Основними компонентами даної системи є компоненти для фокусування і направлення електромагнітного випромінювання. Фокуруючий компонент системи дозволяє фокусувати зображення світлодіодів на БФМ для отримання максимальної потужності. Так як компонент являється циліндричною лінзою, то згідно принципам цифрової оптики він проводить розсіювання (згортку в спектральній області) в одному напрямлені у фокусування в іншому.

Розфокусування, що вносить компонент, дозволяє отримати рівномірне зображення кожного елементу освітлювача по апертурі робочої зони. Дана властивість системи фокусування дозволила отримати сфокусований пучок по одній з просторових координат в площині об'єкта (БФМ) і розфокусований по іншій координаті напрямку руху. Компонент направлення випромінювання призначено для направлення пучка під кутом нормалі до площини БФМ.

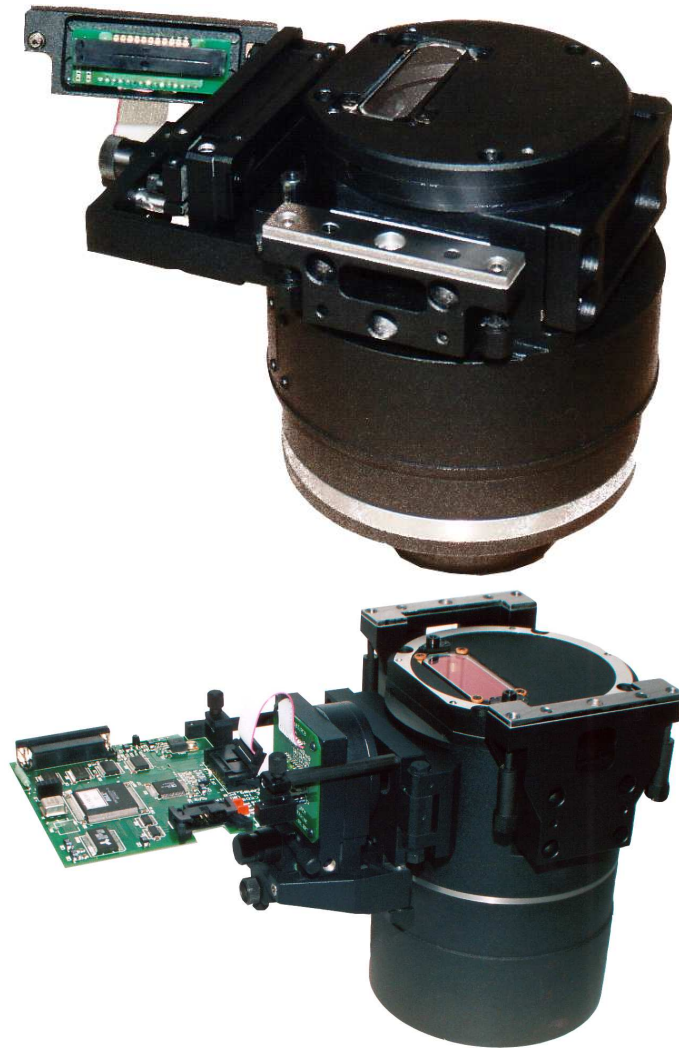


Рисунок. 5.3. Система об'єктива і ПЗЗ приймача

Кут 90 градусів дозволив отримати максимально контрастне зображення дефектів і до мінімуму знизити вплив розсіювання при експонування на приймаючий елемент. Оптичну систему пристрою представлено як дзеркальну систему, що працює у прямому ході променів. Використання дзеркальної системи дозволяє отримувати зображення у реальному масштабі (1 : 1), що значно знижує рівень викривлень, що вносяться аналогічними система з використанням нелінійних компонентів (лінз, неплоских поверхонь і т.д.) Оптична система проектує зображення дефектів БФМ на фотоприймач. Спектральні характеристики системи не є селективними і тому дозволяють проводити експонування як у видимому, так і в інфрачервоному спектральних діапазонах.

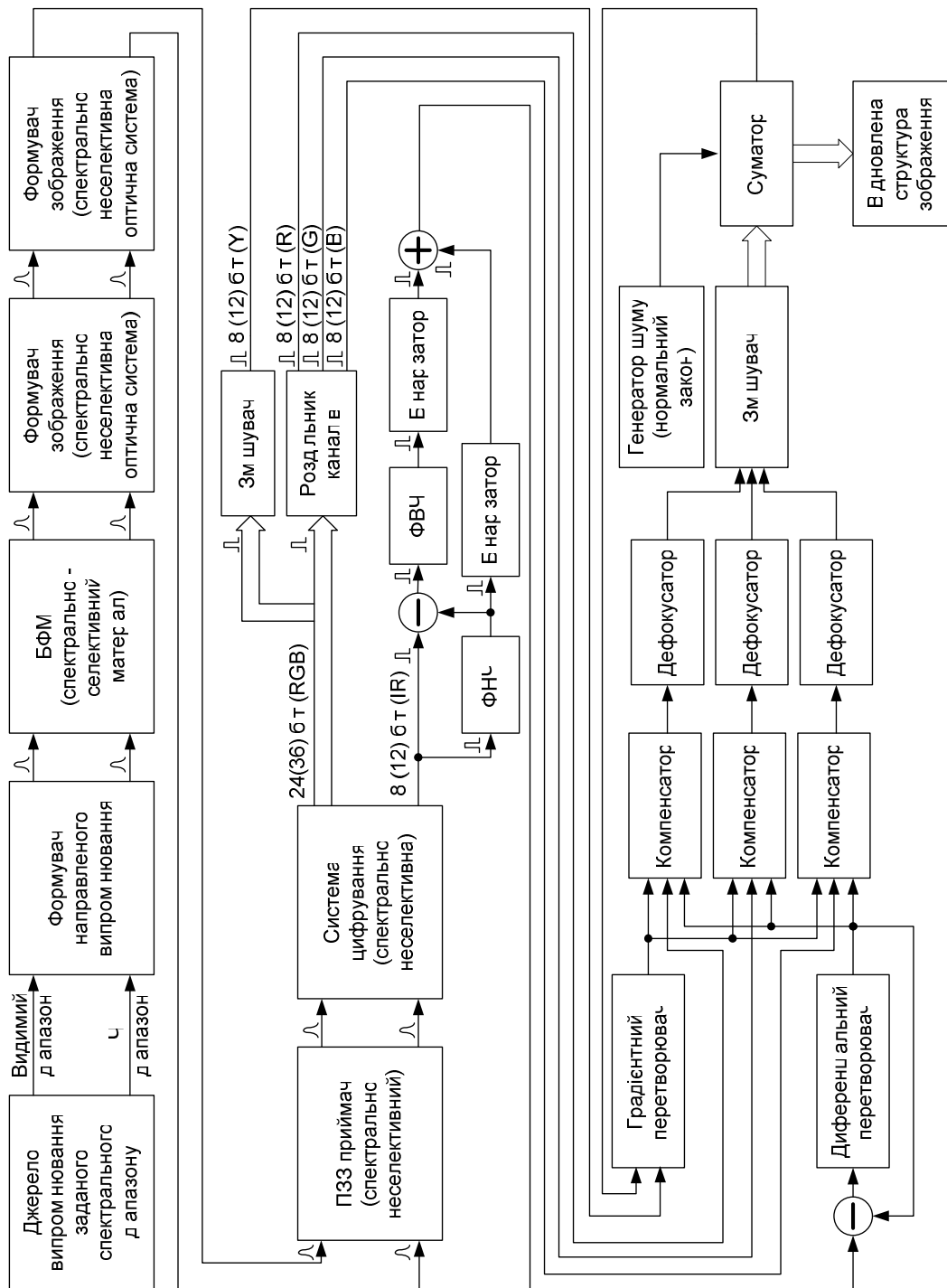


Рисунок 5.4. Схема КПП видалення дефектів цифрових БФМ

Кут 90 градусів дозволив отримати максимально контрастне зображення дефектів і до мінімуму знизити вплив розсіювання при експонування на приймаючий елемент. Оптичну систему пристрою представлено як дзеркальну систему, що працює у прямому ході променів. Використання дзеркальної системи дозволяє отримувати зображення у реальному масштабі (1 : 1), що значно знижує рівень викривлень, що вносяться аналогічними система з використанням нелінійних компонентів (лінз, неплоских поверхонь і т.д.) Оптична система проектує зображення дефектів БФМ на фотоприймач. Спектральні характеристики системи не є селективними і тому дозволяють проводити експонування як у видимому, так і в інфрачервоному спектральних діапазонах.

Як фотоприймач використано кольоровий ПЗЗ лінійного типу SONY ILX718K (спектральні характеристики див. дод. Б). ПЗЗ лінійного типу використано так як динамічний діапазон даного пристрою перевищує діапазон ПЗЗ матриць. Запропонована оптична система дозволила використовувати лінійну апертуру без наявності додаткових геометричних викривлень. ПЗЗ мають широкий спектральний діапазон, що дозволило використовувати один приймач для цифрування БФМ в широкому спектральному діапазоні. Для запропонованого пристрою приймач повинен мати спектральну чутливість у видимому і інфрачервоному діапазонах спектра. Використання приймачів з вбудованим інфрачервоним фільтром є не допустимим. Характеристики приймача наведено у додатку. Б.

## 5.2 Реалізація методу виділення дефектів на зображенні цифрованих багат шарових фотографічних матеріалів

Основою є на методиці проведення досліджень, в результаті дослідницьких робіт отримані дані, що цілком задовольняють вимогам до виділення об'єктів на зображенні. Описаний метод виділення і локалізації малорозмірних дефектів зображення на неоднорідному фоні досліджено на серії зображень яка складає 150 кадрів. Дослідження проведене при цифруванні БФМ різних типів і з різною апертурою цифрування. Приклад отриманого в результаті цифрування в інфрачервоному спектрі зображення дефектів БФМ представлено на рис. 4.8.

Спектр отриманих зображень містить складові високих і низьких частот, які характеризують дефекти і фонові об'єкти зображення відповідно. Для підвищення ефективності виділення структурних пошкоджень проведено створення маски дефектів згідно із методикою запропонованою у дисертації. Результати виділення маски зображення після низькочастотної фільтрації і використання компенсаційного методу приведені на рис. 5.5.

Отримані зображення не містять в своїй структурі фонових об'єктів і дозволяють проводити бінарізацію зображення дефектів для отримання маски.

Проведене дослідження показало, що найкращий результат бінарізації при виділенні і локалізації малорозмірних об'єктів на відфільтрованому фоні зображення дає адаптивний поріг, що визначається за формулами:

$$\begin{aligned} \Delta &= I_{\phi} + 1,98 \cdot \sqrt[3]{\mu_3}, \\ \Delta &= I_{\phi} + 1,2 \cdot \left( \sigma + \sqrt[3]{\mu_3} \right), \end{aligned} \quad (5.1)$$

де  $\sigma$  - СКВ гістограми,

$\mu$  - момент інерції третього порядку,

$I_{\phi}$  - середнє значення.

Коефіцієнти  $k_1 = 1,98$ ,  $k_2 = 1.2$  знайдено експериментально. Результати проведення бінарізації зображення цифрового БФМ з адаптивним порогом приведено на рис. 5.6.

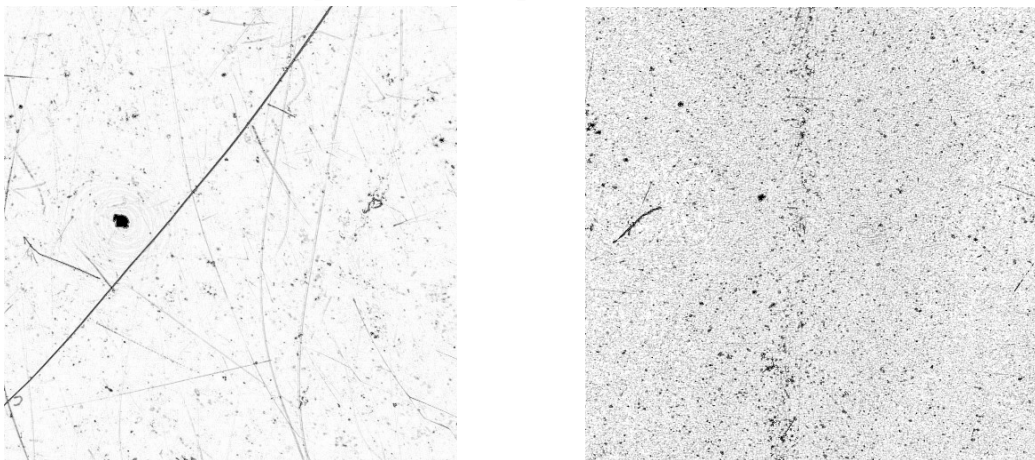


Рисунок. 5.5. Зображення відфільтрованих дефектів, враховуючи метод компенсації

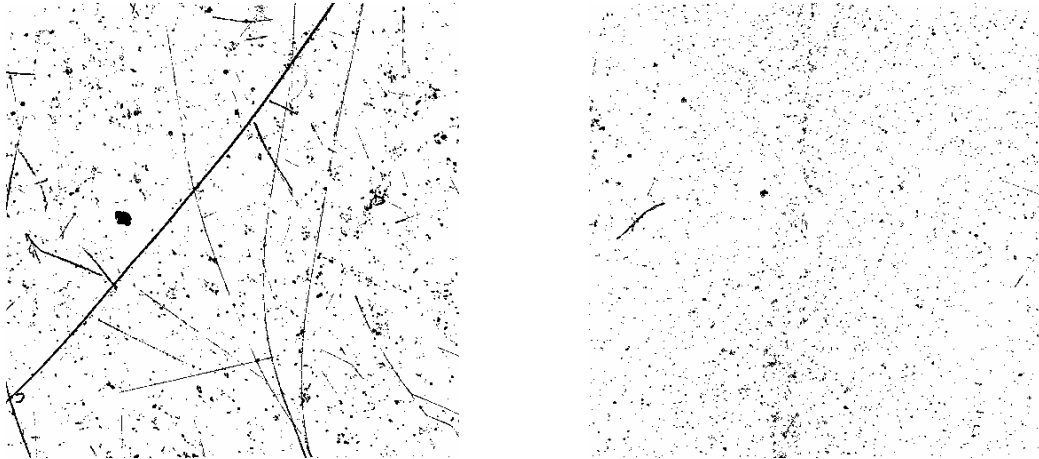


Рисунок. 5.6. Бінарізація зображення дефектів БФМ

В результаті бінарізації отримано маску зображення, що використовується для відновлення структури зображення цифрованих БФМ. Дана маска містить зображення дефектів зображення. Якщо рівень зернистості зображення дуже високий допускається використання високочастотної фільтрації з метою видалення невірно визначених об'єктів, що відповідають локалізації дефектів БФМ. Дана операція проводиться лише у тих випадках, коли користувач вважає, що кількість і структура виділених дефектів не відповідає дійсності. В результаті фільтрації, яка включена опціонально в програму виділення дефектів, зменшується рівень зернистості на зображенні маски, який не перевищує 1 точку зображення.

Після проведення бінарізації проведено розбиття зображення маски на зрізи, які утворюються при обчисленні контуру зображення. При використанні даної операції утворюються зрізи, що не містять в собі однакових точок дефектів зображення і служать для проведення процесу відновлення пошкоджених дефектами об'єктів зображення. Границі дефектів обчислено в результаті згортки зображення із операторами Лапласа, що дозволяє визначити границю об'єктів в усіх напрямках на площині зображення. На рис. 5.7 представлені зображення границь маски - дефектів першого зрізу при ітераційному відновленні структури зображень цифрованих БФМ.

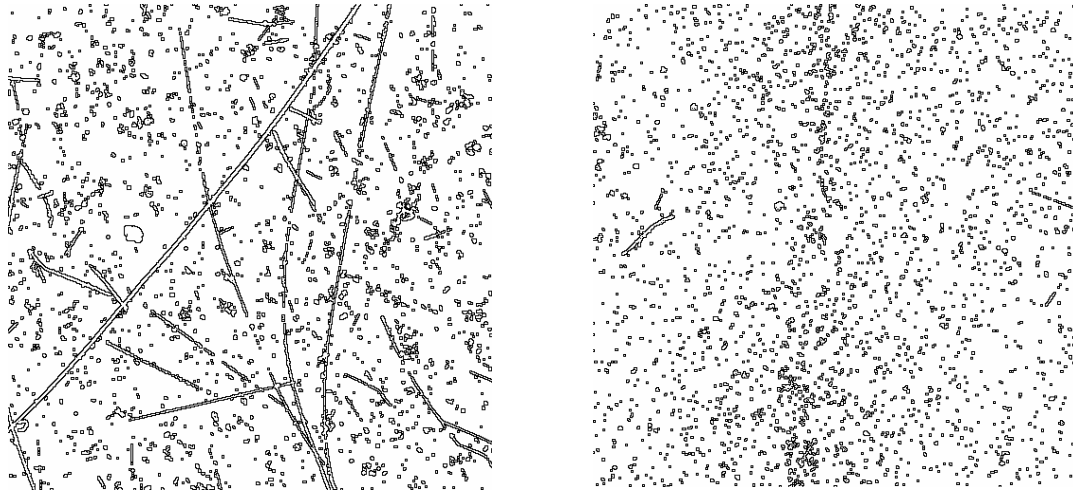


Рисунок. 5.7. Виділення границь зображення маски дефектів

### 5.3 Реалізація методу відновлення зображення цифрованих багат шарових фотографічних матеріалів

При дослідженні методу відновлення зображення використано зображення цифрованих БФМ негативного і позитивного типів. Метод був перевірений на 150 зображеннях цифрованих БФМ.

У результаті цифрування отримано зображення, що характеризує розподілення оптичних густин БФМ у видимому і інфрачервоному спектральних діапазонах. На зображеннях чітко проявляються дефекти, що є структурними дефектами цифрованих БФМ і дефектами оптичної системи, які характеризуються об'єктами зображення, що мають значно нижчий (для позитивних БФМ) або вищий (для негативних БФМ) рівень яскравості і не відповідають загальній структурі об'єктів зображення, спотворюючи їх. Зображення позитивних БФМ отримане в результаті цифрування у видимому діапазоні представлено на рис. 5.8, для негативних БФМ – на рис. 5.9.

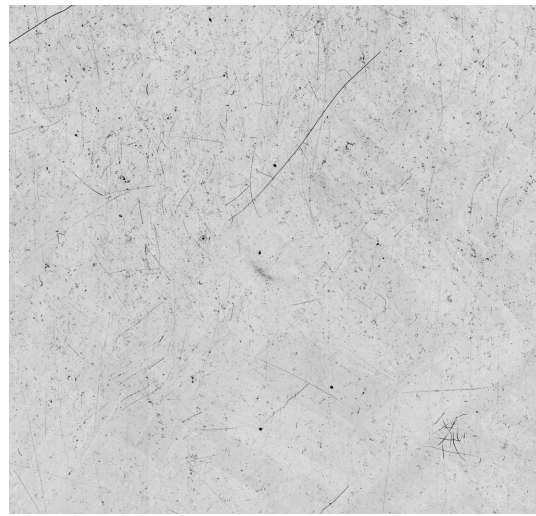
Після отримання зрізів маски дефектів зображення проведено розрахунок вектору градієнту зображення. Розрахунок градієнту проведено для приведеного сірого зображення, так як розрахунок градієнту для кожного каналу приводить до значного збільшення часу обробки і зниження продуктивності системи. На рис. 5.10 приведено результати розрахунку вектору градієнту для першої ітерації відтворення структури сканованого зображення БФМ

Після визначення вектору градієнту, згідно методу «Водяного мішка» проведено відтворення структури зображення. Даний метод

дозволяє використовувати ітераційні методи для проведення відновлення зображення. Ітераційні методи відновлення структури цифрованих матеріалів дозволяють послідовними наближеннями отримати результат з мінімальною похибкою відтворення зображення. В процесі відтворення зображення відбувається аналіз зображення навколо зони, що підлягає відтворенню, і проводиться її заповнення по крокам, що дозволяють уникнути похибок відтворення, пов'язаних із структурою об'єктів, що відтворюються.



а)



б)

Рисунок. 5.8. Зображення позитивного БФМ:  
а) видимий спектральний діапазон, б) ІЧ спектральний діапазон.



а)

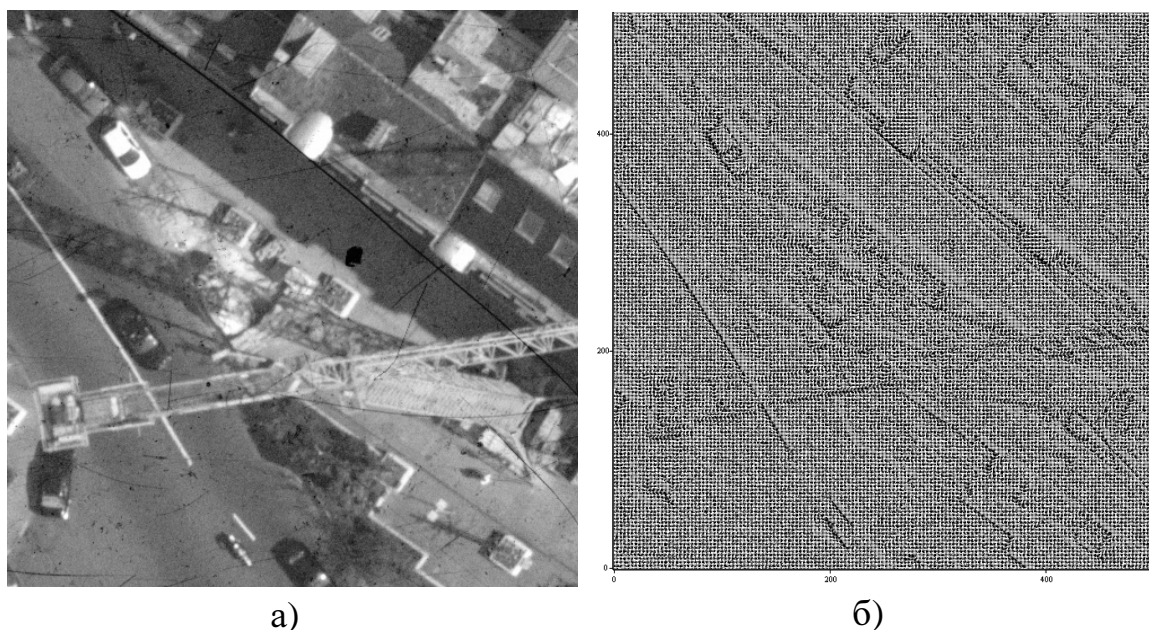


б)

Рисунок. 5.9. Зображення негативного БФМ:  
а) видимий спектральний діапазон, б) ІЧ спектральний діапазон.



Методика відтворення структури зображення враховує властивості границь об'єктів, що дозволило практично не спотворювати їх. Кожна наступна ітерація методу відтворення структури зображення у наближеній формі розв'язує систему рівнянь в першому наближенні для отримання дійсних значень точок, що були пошкоджені дефектами матеріалів. Граничні умови при розв'язанні даної системи прямують до нуля, якщо кількість точок маски – дефектів для окремо взятого об'єкту дорівнює нулеві.

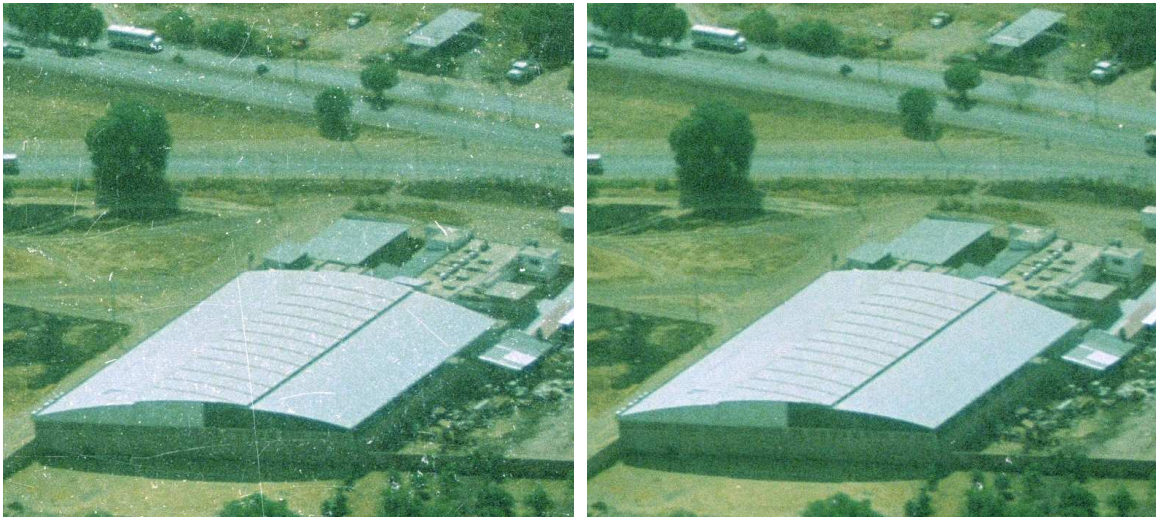


а) б)  
Рисунок. 5.10. Зображення цифрованого БФМ:  
а) в градаціях сірого, б) градієнт.

Відновлення проведено за рахунок наявності в околі зображення точок, що характеризують напрямлення і амплітуду вектора, який вказує напрямлення для відтворення питомих точок. Такий вектор являє собою вектор градієнту, що характеризує об'єкт відтворення. Вектор градієнту містить ін формацію про напрямлення і амплітуду точок об'єкту, що не пошкоджені дефектами БФМ. Характеристики таких точок дозволяють прогнозувати характеристики точок об'єкту, що пошкоджені. В загальному випадку, так як об'єкт є природнім утворенням, зроблено висновок, що значення сусідніх точок об'єкту є взаємозалежними, і тому можуть бути відтворені, враховуючи напрямлення і амплітуду точок в околі. Кожен крок алгоритму

відтворення коректує відтворені дані за рахунок наявності інформації про точки зображення в околі. Така процедура дозволяє значно зменшити похибку відтворення і підвищити якість відтвореного зображення.

Результати відтворення структури зображень представлені на рис. 5.11, рис. 5.12.



а)

б)

Рисунок. 5.11. Зображення негативного БФМ:

а) з пошкодженням структури БФМ, б) відновлене зображення цифрованого БФМ.



а)

б)

Рисунок. 5.12 Зображення позитивного БФМ:

а) з пошкодженням структури БФМ; б) відновлене зображення цифрованого БФМ.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров.- М.: Статистика, 1979.
2. Барнсли М., Ансон Л. Фрактальное сжатие изображений//Мир ПК.1992. - № 10. - С. 52-58.
3. Бейтс Р., Мак-Донелл М. Восстановление и реконструкция изображений. - М.: Мир, 1989.
4. Битюцкий О.И., Перетягин Г.И. Поиск и локализация реперных фрагментов при совмещении повторных снимков// Автометрия. - 1988.- №3.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.- М.: Наука, 1970.
6. Брауде-Золотарев Ю.М., Кожемяко В.П., Майданюк В.П. Особенности кодирования цифровых телевизионных сигналов вещательного телевидения//1-я Всесоюзная конференция "Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии": Тез. докл. - Минск, 1991. - Ч.1, С. 31-36.
7. Бьемон Ж., Лагендейк Л., Мерсеро Р.М. Итерационные методы улучшения изображений // ТИИЭР.-1990.-№5.
8. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений /Под ред. Т.С. Хуанга. - М.: Радио и связь, 1984.
9. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. - М.: Радио и связь, 1986.
10. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. - 384 с.
11. Вычислительные методы в физике плазмы. –М.: Мир, 1974.
12. Гайда В. Б., Рейда А. Н. Методика «Inpainting» // Збірник тез доповідей Другої міжнародної науково – технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Optoelectronic information-energy technologies – 2002». – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2002. – С. 46.
13. Горбунов Б.А., Дементьев В.Н., Пяткин В.П. Распознавание изображений в дистанционном зондировании // Автоматизированная обработка изображений природных

- комплексов Сибири. - Новосибирск: Наука, 1988.
14. Гороховский Ю. Н. Спектральные исследования фотографического процесса. – М.: Гос. Издательство физико-математической литературы, 1960.
  15. Грузман И.С. Компенсация краевых эффектов при коррекции линейных искажений изображений // Автометрия. -1995.- № 2.
  16. Грузман И.С., Микерин В.И., Спектор А.А. Двухэтапная фильтрация изображений на основе использования ограниченных данных //Радиотехника и электроника. - 1995. - №5.
  17. Гудмен Дж., Д. Поттер. Вычислительные методы в физике. Под ред. Ю. Н. Днестровского. –М.: Мир, 1975
  18. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. - М.: Мир, 1988.
  19. Збарянский С. Фрактальное сжатие изображений//Компьютеры + программы. - 1997. - № 6. - С. 16-22.
  20. Кожем'яко В.П., Майданюк В.П., Жуков К.М. Аналіз та перспективи розвитку кодування зображень// Вісник ВПІ, 1999, № 3. – С. 42-48.
  21. Кожем'яко В. П., Рейда О. М., Гайда В. Б. Відновлення структури зображень цифрованих БФМ // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2004. – №1(7). – С. 5 – 12.
  22. Кожем'яко В. П., Рейда О. М., Гринчишин Р. М., Пасічник Т. Г. Методи лінійної обробки зображень // Збірник тез доповідей Міжнародної науково – методичної конференції. – Дніпродзержинськ. – 2000.
  23. Кожем'яко В. П., Рейда О. М., Мутасім Абу – Шабан. Аналіз методики реставрації зображень «Inpainting» // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології – 2002. – №1(3). – С. 63 – 68.
  24. Кожемяко В. П., Тимченко Л. И., Лысенко Г. Л., Кутаев Ю. Ф. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники. – К.: УМК ВО, 1990. - 250 С.
  25. Кожемяко В.П., Гара А.К., Мартынюк Т.Б., Буда А.Г. Параллельная обработка изображений //Препринт.- Ужгород - 1993. - 87 С.

26. Кононов В.И., Федоровский А. Д. Оптические системы построения изображений. – К.: Техніка, 1981.
27. Кунт М., Джонсон О. Блочное кодирование графических материалов. Обзор//ТИИЭР. - 1980. - Т.68 N 7. - С. 21-40.
28. Кучко А. С. Аэрофотография и специальные фотографические исследования. – М.: Недра, 1988.
29. Марр Д. Зрение: информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. -М.: Радио и связь, 1987.
30. Майданюк В.П. Методи і засоби комп'ютерних інформаційних технологій. Кодування зображень. – Вінниця, ВДГУ, 2001. – 63 с.
31. Майданюк В., Хиллес Шади Мазин Векторное квантование изображений с помощью карты Кохонена // „Интернет-Освіта-Наука-2004”, четверта міжнародна конференція ІОН – 2004. Збірник матеріалів конференції. Том 2.– Вінниця: Універсум-Вінниця. - 2004. – С. 631-634.
32. Майданюк В.П. Разработка алгоритмов и аппаратных средств систем сжатия телевизионных изображений.: Дис. канд. техн. наук. Винница, 1993. - 223 с.
33. Майданюк В. П., Бондар Ю. Кодування зображень покомпонентним методом// Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні, випуск 7. – 2003. - С. 184-189
34. Майданюк В., Романюк С. Аналіз і синтез зображення при ущільненні по компонентним методом//Міжнародний науково-технічний журнал “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. - 2006. – № 1. - С. 94-97.
35. Международный стандарт JPEG ISO/IEC 10918.
36. МККР. Цифровое кодирование телевизионных изображений в студиях. Рекомендация 601. 14-я Пленарная Ассамблея (Дубровник, 1986).
37. Мюррей Дж.Д., Райпер У. Энциклопедия форматов графических файлов/Пер. с англ. - К.: ВНУ, 1997. - 672 с.
38. Оптоэлектронный модуль для обработки изображений: А.с. 1283963 СССР, МКИ Н 03 К 23/78 /Кожемяко В.П., Тимченко Л.И.и др. (СССР) - № 3939123/24-21; Заявлено 06.08.85; Опубл.

- 15.01.87, Бюл. № 2. - 5 С.
39. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Кн.1. - М.: Мир, 1982.
  40. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Кн.2. - М.: Мир, 1982.
  41. Птачек М. Цифровое телевидение. Теория и техника: пер. с чешск. - М.: Радио и связь, 1990. - 528 с.
  42. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. - М.: Мир, 1978.
  43. Рейда О. М. Використання методів розпізнавання, фільтрації і згортки для визначення характеристичних кривих якості оптичних елементів // Тези студентських доповідей. ХХІХ науково – технічної конференції. – Вінниця. – 2000. – С.56.
  44. Реконструкция изображений: Пер. с англ. / Под ред. Г.Старка. - М.: Мир, 1992.
  45. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 17784. Комп'ютерна програма ущільнення зображень на основі адаптивного до контурів двовимірного аналізу і синтезу / Майданюк В.П., Романюк С. О. Дата реєстрації – 04.09.2006.
  46. Спектор А.А. Рекуррентная фильтрация гауссовских дискретных полей, наблюдаемых в гауссовских шумах // Радиотехника и электроника. - 1994. - №7.
  47. Способ контроля дефектов поверхности.: А. с. 1275273 А1 ( СССР ) Борзых Б. А.
  48. Способ оптико – электронного контроля поверхностных дефектов и устройство для его осуществления.: А. с. 1780583 А3 ( СССР ) Потатпов А. И., Малыгин Л. Л., Валин П. Н., Ершов Е. В. –Опуб. в Бюл. 1992, № 45.
  49. Устройство для выявления дефектов поверхности полупроводниковых приборов.: А. с. 630983 А ( СССР ) Амазасян В. Н., Саркисян В. С., Горюнов Н. Н. – Опуб. в Бюл. 1981, № 11.
  50. Устройство для контроля дефектов фотошаблонов.: А. с. 1630477 А ( СССР ) Золоторенко В. Ю., Хило Н. А.
  51. Устройство регистрации дефектов в прозрачных пленках.: А. с. 1510521 А1 ( СССР ) Михайлов Л. В., Михайлова Т. Г., Госьков П. И.

52. Хорн Б.К.П. Зрение роботов.- М.: Мир, 1989.
53. Цифровая оптика. Обработка изображений и полей в экспериментальных исследованиях. – М.: Наука, 1990.
54. Цифровое телевидение /Кривошеев М.И., Виленчик С.Л., Красносельский И.Н. и др.; Под ред. М.И. Кривошеева. - М.: Связь, 1980. - 264 с.
55. Цифровое кодирование телевизионных изображений /Под ред. И.И.Цуккермана. - М.: Радио и связь, 1981. -240 с.
56. Харатишвили Н.Г. Цифровое кодирование с предсказанием непрерывных сигналов. - М.: Радио и связь, 1986. - С. 3-25.
57. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. - М.: Сов. радио, 1979.
58. Ballester, M. Bertalmio, V. Caselles, G. Sapiro, and J. Verdera, "Filling-in by joint interpolation of vector fields and grey levels," University of Minnesota IMA TR, April 2000.
59. Bertozzi The mathematics of moving contact lines in thin liquid films. Notices Amer. Math. Soc., Volume 45, Number 6, pp. 689-697, June/July 1998.
60. Efros and T. Leung, "Texture synthesis by non-parametric sampling," Proc. IEEE International Conference Computer Vision, pp. 1033-1038, Corfu, Greece, September 1999.
61. Edward R. Vrscay. A Generalized Class of Fractal-Wavelet Transforms for Image Representation and Compression. Internet, e-mail: evrscay@links.uwaterloo.ca, 1998.
62. Fisher Y. Fractal Image Compression. SIGGRAPH 92 Course Notes. e-mail: yfisher@ucsd.edu
63. R. Hamzaoui, Codebook clustering by self-organizing maps for fractal image compression, NATO ASI Conf. Fractal Image Encoding and Analysis, Trondheim, July 1995, Fractals, Volume 5, April 1997.
64. Hirani and T. Totsuka. Combining Frequency and spatial domain information for fast interactive image noise removal. Computer Graphics, pp. 269-276, SIGGRAPH 96, 1996
65. Kenney and J. Langan. A new image processing primitive: reconstructing images from modified flow fields. University of California Santa Barbara Preprint, 1999.
66. Marquina and S. Osher. Explicit algorithms for a new time

- dependent model based on level set motion for nonlinear deblurring and noise removal. UCLA CAM Report 99-5, January 1999.
67. A.C. Kokaram, R.D. Morris, W.J. Fitzgerald, P.J.W. Rayner. Detection of missing data in image sequences. *IEEE Transactions on Image Processing* 11(4), 1496-1508, 1995.
  68. Birchfield S. *An Introduction to Projective Geometry (for computer vision)*. 1998. <http://www.dai.ed.ac.uk/Cvonline/geom.htm>
  - A. Braverman. *Photoshop retouching handbook*. IDG Books Worldwide, 1998.
  - B. Heeger and J. Bergen. Pyramid based texture analysis/synthesis. *Computer Graphics*, pp. 229-238, SIGGRAPH 95, 1995.
  69. G. Emile-Male. *The Restorer's Handbook of Easel Painting*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1976.
  70. H. K. Zhao, T. Chan, B. Merriman, and S. Osher, "A variational level-set approach to multiphase motion," *J. of Computational Physics* 127, pp. 179-195, 1996.
  71. J. Tumblin and G. Turk, "LCIS: A boundary hierarchy for detail-preserving contrast reduction," *Computer Graphics*, pp. 83-90, SIGGRAPH 99, 1999.
  72. Jahne B. *Digital Image Processing: Concepts, Algorithms, and Scientific Applications*.- Berlin: Springer-Verlag, 1993.
  73. Keys R.G. Cubic convolution interpolation for Digital Image Processing.- *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1981, vol.ASSP-29, p.1153-1160.
  74. Kozhemiako V.P., Zhukov K.M., Pika S. Speeding up of fractal image compression// *Proceeding of SPIE*, 2001, Vol. 4425. - P. 9-16.
  75. L. Alvarez, P.L. Lions, J.M. Morel. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion. *SIAMJ.Numer. Anal.* 29, pp. 845-866, 1992.
  76. L. Rudin, S. Osher and E. Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Physica D*, 60, pp. 259-268, 1992.
  77. Namhol A., Steven H.S., Arozullah M. Image compression with a hierarchical neural network// *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. - 1996.- № 32. - pp. 326 - 337.
  78. M. Nitzberg, D. Mumford, and T. Shiota, *Filtering, Segmentation, and Depth*, Springer-Verlag, Berlin, 1993.
  79. P. Perona and J. Malik *Scale-space and edge detection using*



- anisotropic diffusion. IEEE-PAMI 12, pp. 629-639, 1990.
80. Parker A. J., Kenyon R., Troxel D.E. Comparison of interpolating methods for Image Resampling.- IEEE Trans. Medical Imaging, 1983, vol.MI-2, No.1, p.31-39.
  81. Petukh A.M, Kozhemiako V.P., Maidanuik V.P., Rudyi O.V. Statistical block compression of images// Proceeding of SPIE, 2001, Vol. 4425. - pp. 92-96
  82. Pulcini G., Verrando V., Rossi R. Fractal Image Compression through Iterated Function Systems. www: <http://www.webcom.com>.
  83. Rahman C., Rahman A. A New Approach for Compressing Color Images using Neural Network//CIMCA 2003 Proceedings/ISBN 1740880684: M. Mohammadian (ed). – 2003. – pp. 315-326.
  84. S. Masnou and J.M. Morel. Level-lines based disocclusion. 5th IEEE Int'l Conf. on Image Processing, Chicago, IL. Oct 4-7, 1998.
  85. S. Osher and J. Sethian. Fronts propagating with curvature dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. Journal of Computational Physics, 79:12-49, 1988.
  86. S. Osher, personal communication, October 1999.
  87. S.Walden. The Ravished Image. St.Martin's Press, New York,1985.
  88. System and method for image recovery.: US 5266805 Albert D. Edgar, Austin, Tex. Nov. 30, 1993.
  89. T. Chan and J. Shen, "Mathematical models for local deterministic inpaintings," UCLA CAM TR 00-11, March 2000.
  90. V. Kozhemyako, A. Reyda, R. Grinchishin, O. Asmolova Digital Image Filtration// Збірник тез доповідей міжнародної науково – технічної конференції Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка – ОДС 2000». – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця». 2000. – С. 46.
  91. V. Kozhemyako, V. Gayda, A. Reyda Reducing a level to slides granulations using digital image processing// Збірник тез доповідей міжнародної науково – технічної конференції Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка – ОДС 2000». – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця». 2000. – С. 40.
  92. Woods J.W. Two-Dimensional Digital Signal Processing 1. Berlin e.a., 1981.

## **ІНФОРМАЦІЙНО - ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ І УЩІЛЬНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ**

