Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп’ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Моделі градаційної корекції зображення у комп’ютерних системах обробки зображень
(тема)

Виконав:
студент II курсу, групи СПзм-18-2
Погорєлов П.П.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність
123 – Комп’ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма
Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: проф. Смеляков К.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ ______________ Коваленко А.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп’ютерної інженерії та управління

Кафедра електронних обчислювальних машин

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 – Комп’ютерна інженерія
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри ________________
(підпис)
“____”________________ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Погорєлову Павлу Павловичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи Моделі градаційної корекції зображення у комп’ютерних системах обробки зображень

затверджена наказом по університету від “ 30 ” березня 2020 р. № 43 Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 18 травня 2020 р.

3. Вхідні дані до роботи
Модель спотворень зображення.
Вимоги до алгоритму.
Вимоги до оцінювання ефективності.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
Аналіз предметної області
Реалізація адаптивного методу градаційної корекції і поліпшення зображення
Обчислювальний експеримент
Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційні матеріали. Плакати – 11 арк. ф. А4

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми	31.03.20 – 12.04.20	
2	Постановка задачі дослідження	13.04.20 – 15.04.20	
3	Аналіз літератури	16.04.20 – 20.04.20	
4	Проектування моделі й алгоритмів	21.04.20 – 24.04.20	
5	Реалізація програмної частини	25.04.20 – 28.04.20	
6	Тестування програми та аналіз результатів	29.04.20 – 03.05.20	
7	Оформлення пояснювальної записки	04.05.20 – 11.05.20	
8	Подання атестаційної роботи керівникові	12.05.20 – 14.05.20	
9	Рецензування атестаційної роботи	15.05.20 – 17.05.20	
10	Подання атестаційної роботи до ЕК	18.05.20	

Дата видачі завдання 30 березня 2020 р.

Студент ____________________
(підпис)

Керівник роботи ____________________ проф. Смеляков К.С.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 78 с., 26 рис., 0 табл., 1 додаток, 19 джерел.

ПОЛІПШЕННЯ ЗОБРАЖЕННЯ, ПІДВИЩЕННЯ РІЗКОСТІ, ПОСТУПОВА КОРЕКЦІЯ, ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМУ, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ЕФФЕКТІВНІСТЬ.

Метою атестаційної роботи є створення сучасного методу й інформаційної системи поступової корекції (поліпшення) цифрового зображення, який можуть ефективно адаптуватися до особливостей знімків, що обробляються.

У ході виконання атестаційної роботи було проаналізовано існуючі моделі й алгоритми поліпшення цифрового зображення, розроблено та реалізовано алгоритм й систему для адаптивної корекції зображення на мові C#, проведено оцінювання якості обробки зображення.

Проведений порівняльний аналіз роботи запропонованого адаптивного алгоритму поліпшення зображення з аналогами показав суттєві переваги запропонованого алгоритму, які були обумовлені більш коректною роботою в області границь зображень і ліній.

ABSTRACT

Master’s thesis: 78 pages, 26 figures, 0 tables, 1 appendices, 19 sources.

IMAGE ENHANCEMENT, IMAGE SHARPENING, ADJUSTMENT CORRECTION, NOISE FILTERING, COMPUTATIONAL EFFICIENCY.

The purpose of attestation work is to create a modern algorithm and informational system of gradual correction (enhancement) of a digital image, which can effectively adapt to the peculiarities of the images being processed.

In the course of performance of attestation work, existing models and algorithms of digital image enhancement were analyzed, algorithm and system for adaptive image correction in C # language was developed and implemented, and image quality estimation was performed.

A comparative analysis of the proposed adaptive algorithm for improving the image with analogues has shown the significant advantages of the proposed algorithm, which were due to more correct work in the area of image bounds and lines.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

Згладжування – інтерполяція попереднього стану об’єкта (розміщення, швидкість, і т. ін.) до поточного стану, створюючи вирівняний перехід між двома послідовними модифікованими станами об’єктів.

Конрастність зображення – це відношення яскравості найсвітлішої до яскравості найтемнішої частин зображення.

Піксель – найдрібніша одиниця цифрового зображення в растровій графіці.

ВСТУП

В даний час з метою аналізу обстановки на місцевості, з метою геологорозвідки і рішення ряду інших подібних завдань активно використовуються безпілотні літальні апарати. При цьому використання цифрової апаратури дозволяє отримувати і оперативно передавати аерофотознімки з високою роздільною здатністю в центр обробки даних для їх дешифрування [1-3].

Залежно від умов отримання зображення для цілей його поліпшення на етапі попередньої обробки може вирішуватися надзвичайно широкий спектр завдань, основними з яких є завдання поступової корекції, фільтрації шуму, згладжування і підвищення різкості [4, 5].

В даний час практично у всіх додатках, пов’язаних з обробкою цифрових зображень, в більшій або в меншій мірі доводиться вирішувати завдання їх поліпшення [6-8]. В силу наявності більш, чи менш вагомих спотворень знімка. В таких умовах часто виникають проблеми з адекватним сприйняттям, дешифруванням і ефективної сегментацією об’єктів на знімку в сенсі не виявлення слабо контрастних об’єктів; при цьому істотно зростає трудомісткість дешифрування слабо контрастних об’єктів на знімку [1, 9, 10].

При аналізі даних аерофотознімання така ситуація складається не так вже й рідко. В результаті стає неможливим використовувати сучасні системи комп’ютерного зору для аналізу зашумлених слабо контрастних зображень. Стає неможливим оперативно надавати адекватні результати аналізу оброблюваних знімків [11-14].

Подібна ситуація негативним чином відбивається і на можливостях передачі даних по каналах зв’язку. Вся справа в тому, що для зниження часу передачі знімки стискаються [1, 2, 15]. Наявність істотного шуму на зображенні не дозволяє ефективно стискати знімки, а застосування стиснення до знімка, який містить слабо контрастні об’єкти, призводить до додаткової втрати їх контрастності, що неприпустимо [16, 17].

В цілому аналіз сучасного стану питання показує, що за останні кілька десятирічний розроблено воістину величезна кількість методів градаційній корекції, фільтрації шуму і згладжування, а також підвищення різкості, які враховують різноманітні особливості знімків [1-3, 18, 19].

Разом з тим при такому розмаїтті потрібно витрачати величезний час на вибір і налаштування моделей на особливості оброблюваних знімків. З огляду на можливі варіації умов отримання даних, в такій ситуації просто неможливо побудувати уніфіковану інформаційну технологію комплексного поліпшення зображення. Тому методи і інформаційну технологію поліпшення зображення необхідно вибирати і налаштовувати для кожного знімка окремо, що вимагає великих витрат часу. Виникнення такої ситуації призводить до того, що тривалість аналізу аерофотознімки може перевищувати гранично допустиме значення. Крім того, існує ряд окремих проблем градаційній корекції і підвищення різкості, виникнення яких приводить до збільшення часу і зростання ймовірності появи помилок інтерпретації аерофотознімків.

Для вирішення сформульованої проблеми актуально розробити модель і алгоритм комплексного поетапного поліпшення цифрового зображення щодо узгодженого вирішення завдань градаційній корекції, фільтрації шуму, згладжування і підвищення різкості.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ

1.1 Основні сучасні завдання і проблеми поліпшення якості цифрового зображення

В даний час попередня обробка є найважливішим початковим етапом обробки цифрового зображення. В рамках попередньої обробки компенсуються недоліки, усуваються дефекти і поліпшується якість зображення для його найкращого сприйняття при візуальному аналізі та максимальної ефективності подальшої машинної обробки [1, 5, 9].

Залежно від умов отримання зображення для поліпшення його якості на етапі попередньої обробки може вирішуватися надзвичайно широкий спектр завдань. Основні з них – це завдання поступової корекції, фільтрації шуму, згладжування і підвищення різкості.

В таких умовах, якщо говорити про окремі завдання поліпшення якості зображень, найбільші проблеми виникають з адекватним підвищенням різкості зображень в силу ряду властивостей сучасних фільтрів різкості.

Тому в рамках цього розділу основна увага буде приділена аналізу актуальних завдань і проблем підвищення різкості і градаційній корекції зображень [1-3, 5, 9]. Отже, підвищення різкості служить для того, щоб підкреслити (контрастувати) дрібні деталі і об’єкти на знімку (рисунок 1.1), а також для того, щоб покращити сприйняття тих об’єктів, які були розфокусувати в силу ряду причин [1, 2, 4]. В цьому відношенні важливо відзначити, що отримання різких контурів і хороша деталізація об’єктів життєво необхідні для мінімізації ймовірностей виникнення помилок першого і другого роду при типологічну класифікацію об’єктів в ході аналізу аерофотознімків.

Практично ідеальним методом підвищення різкості вважається метод, заснований на обробці результатів накопичення зображень [1, 5].

а)

б)

Рисунок 1.1 – Підвищення різкості неконтрастного аерофотознімка

Суть цього методу полягає в тому, щоб для фіксованого положення фотокамери отримати n знімків об'єкта, а потім окремо обробити значення яскравості пікселів цих зображень з однаковими координатами. Як правило, зафіксувавши координати (x, y), на основі розподілу $\{f_i(x, y)\}_{i=1,...,n}$, будують гістограму частостей появи значень яскравості в пікселі (x, y) вибіркового зображення.

Після цього застосовують заданий критерій виключення екстремальних спостережень, наприклад, $k \cdot \sigma$-критерій, критерій Граббса, або критерій Тітьена-Мура. Після видалення k екстремальних спостережень на новому розподілі $\{f_i(x, y)\}_{i=1,...,n'}$ знаходять найбільш ймовірне значення яскравості пікселя з координатами (x, y), яке, як правило, оцінюється величиною математичного очікування яскравості виду $m = \frac{1}{n'} \cdot \sum_{i=1}^{n'} f_i(x, y)$, як це показано на рисунку 1.2.

При можливості обробки досить великого числа зображень, при $n \geq 24$ [1], закон розподілу $P(f)$ яскравості f для кожного пікселя (x, y) зображення дуже близький до нормального закону розподілу виду

$$P(f,\sigma,m)=\frac{1}{\sigma\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot e^{\frac{-(f-m)^2}{2\cdot\sigma^2}}, \quad (1.1)$$

що дозволяє використовувати для виключення екстремальних спостережень добре вивчені критерії $k\cdot\sigma$-критерій, критерій Граббса, або критерій Тітьена-Мура, а також оперативно і адекватно апроксимувати яскравість $f(x,y)$ в пікселі (x,y) за середнім після застосування процедури виключення екстремальних спостережень.

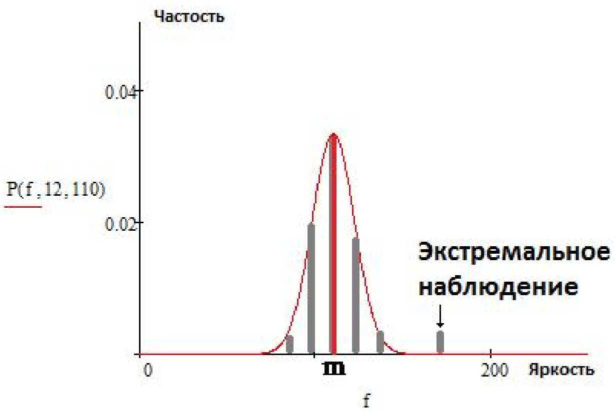


Рисунок 1.2 – Апроксимація яскравості пікселя за результатами накопичення

При цьому описаний метод обробки результатів накопичення зображень дозволяє одночасно з підвищенням різкості усунути шум зображення, що надзвичайно важливо, оскільки існуючі методи підвищення різкості нестійкі до шуму. Однак сфера застосування накопичення зображень в даний час є досить вузькою, оскільки при вирішенні багатьох практичних завдань отримати необхідну вибірку з зображень не представляється можливим.

Тому в даний час в якості основних застосовуються методи, засновані на використанні операторів просторового диференціювання [1-4, 9, 10]. Застосування таких операторів дозволяє посилити значущі перепади яскравості на границях об’єктів з фоном, а також дрібні деталі і шуми на знімку, і не посилювати області з повільною зміною рівня яскравості [1]. Далі в ході аналізу таких операторів буде показано, що ця особливість їх застосування не є їхньою перевагою, оскільки на практиці потрібно посилювати слабо контрастні межі об’єктів на знімку, шуми необхідно придушувати, а всі інші пікселі не чіпати взагалі.

Канонічне підвищення різкості. Отже, для побудови фільтрів різкості в даний час використовуються оператори просторового диференціювання, які: на ділянках з постійною яскравістю повинні давати нуль, а в місцях розриву яскравості – значимий відгук. Для цих цілей для порядкової обробки знімка використовується перша похідна виду

$$df / dx = f(x+1) - f(x) \ , \tag{1.2}$$

яка, крім висунутих вище умов, на ділянках з постійною швидкістю зростання (спадання) функції яскравості не дає нуль; тут x – це координата пікселя, а f – функція яскравості в цьому пікселі [1, 9].

Крім першої похідної для контрастування при порядкової обробці знімка використовується друга похідна виду

$$d^2 f / dx^2 = f(x+1) + f(x-1) - 2 \cdot f(x) , \tag{1.3}$$

яка, крім висунутих вище умов, на ділянках з постійною швидкістю зростання (спадання) функції яскравості дає нуль [1, 2].

В даний час вважається, що при вирішенні більшості прикладних задач використання другої похідної краще використання першої похідної тому, що використання другої похідної дає краще підсилень дрібних об’єктів і деталей. При цьому перша похідна в основному використовується для підкреслення меж об’єктів на знімку [1].

Найбільш очевидним і простим ізотропним оператором, заснованим на використанні другої похідної, є широко відомий лапласіан [1]; для функції яскравості $f(x, y)$, яка залежить від двох просторових координат (x, y), лапласіан визначається так

$$\nabla f = d^2 f / dx^2 + d^2 f / dy^2 . \qquad (1.4)$$

При застосуванні цього виразу для обробки дискретного зображення переходять до розгляду кінцевих різниць виду

$$d^2 f / dx^2 = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2 \cdot f(x, y), \qquad (1.5)$$

$$d^2 f / dy^2 = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2 \cdot f(x, y). \qquad (1.6)$$

При цьому дискретний вигляд лапласіану представляють так [1]

$$\nabla^2 f = \left(f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4 \cdot f(x, y) \right). \qquad (1.7)$$

Для цілей подальшої цифрової обробки вираз (1.7) представляють маскою фільтра (рисунок 1.3).

Застосування оператора Лапласа на цифровому зображенні підкреслює розриви яскравості, які властиві границь об’єктів і ліній, і дає зображення відгуків, яке має вигляд сірих ліній в області границь зображень об’єктів з різким перепадом яскравості; інші пікселі зображення, відповідні внутрішності об’єктів і фону без різких стрибків яскравості мають чорний колір. Тепер якщо скласти вихідне зображення і зображення відгуків Лапласіану отримаємо зображення з контрастними границями об’єктів.

Узагальнений алгоритм використання Лапласіану [1] зводиться до застосування правила контрастування виду

$$h(x, y) = f(x, y) - \nabla^2 f(x, y), \qquad (1.8)$$

за умови, що ваговий коефіцієнт $c(\xi, \eta)$ в центрі маски (ξ, η) менше нуля; інакше знак перед лапласіаном змінюється на протилежний знак.

а)

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

б)

1	1	1
1	-8	1
1	1	1

Рисунок 1.3 – Маски фільтра дискретного оператора Лапласа [1]

У деяких джерелах вважається, що процедуру підвищення різкості можна виробляти без поступової корекції на основі виразу, отриманого підстановкою виразу (1.7) в вираз (1.8) виду

$$h(x, y) = 5 \cdot f(x, y) - \left(f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)\right), \qquad (1.9)$$

або із застосуванням маски фільтра, представленої на рисунку 1.4.

а)

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

б)

-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

Рисунок 1.4 – Складові маски фільтра дискретного лапласіану згідно [1]

Однак результати теоретичного аналізу і простого чисельного експерименту показують, що використання такого оператора є некоректним, оскільки вираз (1.9) є ненормованим і величина відгуку може виходити за межі допустимих значень. Тому застосування описаного вище фільтра різкості має включати умову нормування, або окремий етап поступової корекції значень яскравості відгуку, хоча б за рахунок простого відсікання яскравостей, що виходять за межі допустимих значень, коли неприпустимі значення яскравості замінюються максимально допустимими значеннями.

Нерізке маскування і фільтрація з підйомом високих частот. Уже багато років для підвищення різкості зображень в поліграфії використовується прийом, який називається нерізким маскуванням [1].

Суть цього прийому полягає в тому, щоб для зображення $f(x, y)$ спочатку побудувати його розфокусувати копію $r(x, y)$, а потім отримати зображення $h(x, y)$ з підвищеною різкістю так

$$h(x, y) = f(x, y) - r(x, y). \qquad (1.10)$$

Після згладжування, яскравості пікселів внутрішності об’єктів і фону будуть мало відрізнятися від яскравості відповідних їм пікселів розфокусованої копії. Навпаки, яскравості пікселів границі будуть відрізнятися значно. Тому після вирахування (1.10) різниці для границі матимуть великі значення, а для внутрішності – маленькі значення.

Фільтрація з підйомом високих частот є узагальненням процедури нерізкого маскування [1]. Ця операція проводиться так

$$h'(x, y) = k \cdot f(x, y) - r(x, y),\ k \geq 1; \qquad (1.11)$$

$$h'(x, y) = (k-1) \cdot f(x, y) + [f(x, y) - r(x, y)] = (k-1) \cdot f(x, y) + h(x, y). \qquad (1.12)$$

Зауважимо, що у виразах (1.10) – (1.12) не визначене правило обчислення розфокусованої копії $r(x, y)$. Тому оператор для отримання зображення може вибиратися для розв’язання прикладної задачі індивідуально. В якості такого оператора може вибиратися і лапласіан. В таких умовах, узагальнений алгоритм використання Лапласіану [1, 9] зводиться до застосування правила контрастування виду

$$h(x, y) = k \cdot f(x, y) - \nabla^2 f(x, y), \tag{1.13}$$

за умови, що ваговий коефіцієнт $c(\xi, \eta)$ в центрі маски (ξ, η) менше нуля; інакше знак перед лапласіаном змінюється на протилежний знак.

У такій ситуації підвищення різкості зображення може проводитися із застосуванням маски фільтра, представленої на рисунку 1.5.

Застосування фільтру з підйомом високих частот виду (1.11) – (1.13) служить для обробки неконтрастних зображень, загальний рівень яскравості яких нижче, ніж це необхідно для цілі аналізу. Зауважимо, що з ростом коефіцієнта k, ефект підвищення різкості зменшується.

Розглянемо прийом поліпшення зображення із застосуванням операторів, заснованих на використанні першої похідної.

0	-1	0
-1	k+4	-1
0	-1	0

а)

-1	-1	-1
-1	k+8	-1
-1	-1	-1

б)

Рисунок 1.5 – Маски фільтра для підйому високих частот [1]

Оператори, засновані на використанні першої похідної, як правило [1, 9], використовують модуль градієнта функції яскравості виду

$$\nabla f(x, y) = \left(\frac{df}{dx}, \frac{df}{dy} \right). \tag{1.14}$$

Модуль розглянутого оператора градієнта (1.14), який використовується в розрахунках, визначається так

$$\mu = \left| \nabla f(x, y) \right| = \sqrt{\left(\frac{df}{dx} \right)^2 + \left(\frac{df}{dy} \right)^2}. \tag{1.15}$$

В силу того факту, що операція витягання квадратного кореня в (1.15) є набагато більш трудомісткою, ніж арифметичні операції додавання, множення і інші, замість виразу (1.15) для оцінювання величини градієнта на практиці часто користуються виразом

$$\mu \approx \left| \frac{df}{dx} \right| + \left| \frac{df}{dy} \right|. \tag{1.16}$$

В даний час для практичного застосування першої похідної застосовуються різноманітні маски [1, 2, 3, 9].

Найчастіше в літературі практичне застосування першої похідної ілюструється із застосуванням сімейства масок обертання, наприклад, масок Робертса, масок Собела або Преввіт (рисунок 1.6). Ці маски так і задаються сімейством, оскільки оператор першої похідної не є інваріантним до повороту.

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

а)

-2	-1	0
-1	0	1
0	1	2

б)

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

в)

0	1	2
-1	0	1
-2	-1	0

г)

Рисунок 1.6 – Маски обертання оператора Собела [1, 9]

При цьому для оцінювання величини градієнта $\nabla f(x,y)=\nabla f$ спрямовані маски використовуються так

$$\begin{aligned}|\nabla f| = &\left|\left(f_{\xi-1,\eta+1}+2f_{\xi,\eta+1}+f_{\xi+1,\eta+1}\right)-\left(f_{\xi-1,\eta-1}+2f_{\xi,\eta-1}+f_{\xi+1,\eta-1}\right)\right|+\\ &+\left|\left(f_{\xi+1,\eta-1}+2f_{\xi+1,\eta}+f_{\xi+1,\eta+1}\right)-\left(f_{\xi-1,\eta-1}+2f_{\xi-1,\eta}+f_{\xi-1,\eta+1}\right)\right|\end{aligned}, \quad (1.17)$$

де індексація яскравостей знімка приведена на рисунку 1.7.

Тепер розглянемо комбіновані методи поліпшення зображення. При вирішенні нетривіальних завдань розглянуті вище підходи (засновані на використанні градієнта, лапласіану, згладженої копії і градаційний перетворень) самі по собі рідко дають прийнятні результати. Тому в даний час ці перетворення застосовуються в комплексі. При цьому лапласіан застосовується для підкреслення дрібних деталей і кутів, а градієнт - для підкреслення меж.

$f_{\xi-1,\eta-1}$	$f_{\xi,\eta-1}$	$f_{\xi+1,\eta-1}$
$f_{\xi-1,\eta}$	$f_{\xi,\eta}$	$f_{\xi+1,\eta}$
$f_{\xi-1,\eta+1}$	$f_{\xi,\eta+1}$	$f_{\xi+1,\eta+1}$

Рисунок 1.7 – Відносні координати яскравостей пікселів околиці [1]

Особливості застосування такого комплексного підходу описані в [1, 9] на прикладі поліпшення рентгенівського знімка скелета людини.

Методи градаційній корекції. Рішення задач підвищення різкості зображення не відповідає очікуваній додатках нерозривно пов’язане із застосуванням методів градаційній корекції, що використовуються для: 1) зміни динамічного діапазону яскравості (для освітлення / затемнення знімків) з метою поліпшення сприйняття знімка, 2) підвищення різкості, 3) нормування динамічного діапазону яскравості після застосування ненормованих операторів підвищення різкості зображення [1, 2, 9].

За замовчуванням градаційна корекція часто проводиться на основі використання полінома першого ступеня виду

$$f(x) = a + b \cdot x . \tag{1.18}$$

Градаційна корекція проводиться на основі аналізу гістограми яскравості зображення. При цьому побачити і оцінити такі перетворення можна не тільки на самому зображенні, але і на гістограмі зображення, яка вже довгий час є основою для застосування сучасних методів обробки цифрових зображень [1, 2, 5, 9].

1.2 Перспективи розвитку моделей і методів поліпшення якості цифрового зображення

Як показує проведений аналіз, на фоні ряду достоїнств сучасні фільтри мають ряд суттєвих недоліків [1, 2, 9]. По-перше, ці фільтри не орієнтовані на підвищення різкості за рахунок виявлення та усунення пікселів тіні зображення об’єкта [5, 11]. Реалізація такого підходу дозволила б природним чином підвищувати різкість зображень об’єктів на знімку без необхідності спотворення яскравості в області кордонів. Хоча морфологічні фільтри та орієнтовані на усунення перепадів яскравості між об’єктом і фоном, проте, застосування таких фільтрів на практиці не орієнтоване на усунення тіні об’єкта і призводить до побудови ступенів на зображенні з різкими перепадами яскравості між ними як на кордоні, так і у нутрощі об’єктів і фону; зображення в результаті стає схожим на акварельний рисунок. При цьому області шумових викидів значно розширюються [1, 2, 9].

По-друге, існуючі фільтри різкості значимо підкреслюють лише контрастні перепади яскравості, які і так є видимими; при цьому слабо контрастні об’єкти залишаються такими.

Крім того, використання сучасних моделей підвищення різкості, призводить до виникнення проблем отримання асиметричних оцінок і стиснення інформативного діапазону яскравості знімка, зниження різкості слабо контрастних об’єктів, прояви помітного ефекту ареалу кордону.

Що важливіше, в даний час відсутня системна модель і технологія комплексного застосування існуючих методів поліпшення якості цифрового зображення [1, 2, 11].

Для вирішення цих найважливіших проблем планується розвивати такі основні напрямки досліджень.

В першу чергу важливо побудувати уніфіковані модель і метод поступової корекції зображення, використання яких дозволить одночасно виробляти тонову корекцію, підвищення різкості і нормування яскравості знімка для довільних вхідного і вихідного інтервалів яскравості.

Оскільки методи підвищення різкості нестійкі до шуму зображення, далі доцільно описати застосування моделей і методів фільтрації (згладжування) шуму зображень на основі використання фільтрів, що дозволяють згладжувати яскравості в попередньо побудованої однорідної околиці, що забезпечує рішення ключової проблеми фільтрації – не згладжування границь об’єктів і ліній.

При цьому в якості основного завдання будемо розглядати побудову уніфікованого методу підвищення різкості зображення у цифровому форматі, заснованого на використанні перерахованих вище існуючих і перспективних приватних моделей. Оскільки підвищення різкості за рахунок обробки результатів накопичення зображень можливо лише при вирішенні ряду специфічних завдань, цей підхід розглядатися не буде.

При цьому основне завдання буде полягати в тому, щоб побудувати таку модель підвищення різкості, яка забезпечить не виникнення проблем отримання асиметричних оцінок і стиснення інформативного діапазону яскравості знімка, зниження різкості слабо контрастних об'єктів, прояви помітного ефекту ареалу границі.

На цій основі буде побудований метод комплексного поліпшення якості зображення, який здатний налаштовуватися на властивості знімка, і узгоджено виконувати його поступову корекцію, фільтрацію, згладжування і підвищення різкості для умов значущих варіацій властивостей зображення.

2 БАЗОВІ АЛГОРИТМИ ПОЛІПШЕННЯ ЗОБРАЖЕННЯ

2.1 Метод фільтрації шуму зображення

В даний час вважається, що методи підвищення різкості зображень нестійкі до зашумлення: підвищення різкості в умовах зашумлення призводить до значущого посилення шумів на знімку. Тому в умовах зашумлення доцільно, спочатку згладити шуми і тільки після цього робити підвищення різкості зображення.

На сьогоднішній день одним з кращих є уніфікований метод згладжування шуму в неоднорідній околиці (ns-метод). Цей метод дозволяє ефективно ідентифікувати поодинокі і групові шуми на зображенні, будувати однорідну околиця в області шуму і адекватно згладжувати шум в однорідної околиці із застосуванням фільтра усіченого середнього (tm-фільтра)

$$h = \left\lfloor \frac{1}{n - 2 \cdot k} \sum_{i=1+k}^{n-k} f_i \right\rfloor, \; 2 \cdot k < n, \qquad (2.1)$$

де h – згладжена яскравість шуму, $\{f_i\}_{i=1,\ldots,n}$ – яскравості однорідної околиці шуму, $2 \cdot k$ – число виключених з розгляду пікселів з найбільшою і найменшою яскравістю в ряду $\{f_i\}_{i=1,\ldots,n}$, n – загальна кількість пікселів в однорідної околиці шуму.

Принцип роботи фільтра усіченого середнього полягає в наступному:

а) на першому етапі ряд яскравостей $\{f_i\}_{i=1,\ldots,n}$ впорядковується, таким чином, щоб вивести в його початок k мінімальних, а в його кінець k максимальних яскравостей;

б) на другому етапі, на множені яскравостей ряду $\{f_i\}_{i=1+k,\ldots,n-k}$ застосовується середньоарифметичний фільтр [1, 5, 9].

Зауважимо, що при граничних значеннях параметра k фільтр (2.1) буде представляти собою або середньоарифметичний фільтр (якщо $k = 0$), або медіанний фільтр (якщо $k = (n-1)/2$) [1, 5, 9].

Залежно від налаштувань параметрів ns-метод дозволяє не тільки ефективно згладжувати поодинокі і групові шуми, але і не згладжувати при цьому границі об'єктів і лінії.

Таким чином, якщо спеціально не обумовлено інше, на першому етапі обробки зображення будемо фільтрувати шум із застосуванням ns-методу.

2.2 Узагальнена модель градаційної корекції зображення

В даний час методи градаційній корекції використовуються в основному для освітлення або затемнення знімків з метою поліпшення їх візуального сприйняття.

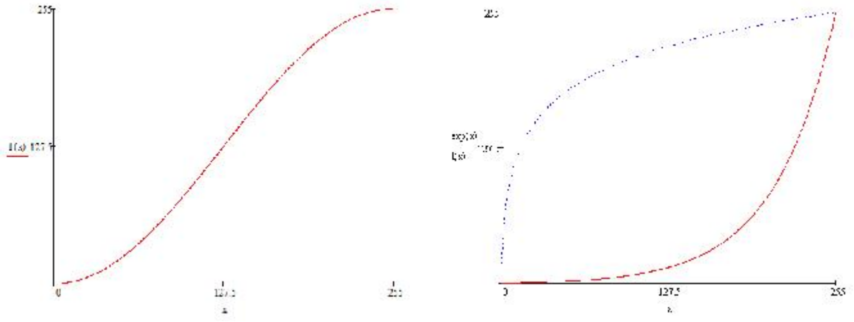
При вирішенні практичних завдань з метою плавної градаційній корекції найчастіше використовують поліном першого ступеня виду, або синусоїду (рисунок 2.1.а) виду

$$f(x) = \frac{255}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{255} \cdot x - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{255}{2}. \qquad (2.2)$$

При цьому параметри моделей градаційній корекції вибираються так, щоб значення яскравості вихідного зображення, що визначаються в діапазоні $[0, 255]$, перетворювати на такий же діапазон значень яскравості.

Для нелінійної градаційній корекції широко використовуються логарифмічна, експоненціальна і статечна функції. Так, для діапазону яскравостей $[0, 255]$, експоненціальна і логарифмічна моделі поступової корекції зображення (рисунок 2.1.б) найчастіше представляються так

$$\begin{cases} \exp(x) = e^{k \cdot x} - 1, \\ l(x) = k^{-1} \cdot \ln(x+1), \\ k = \dfrac{8 \cdot \ln(2)}{255}. \end{cases} \tag{2.3}$$



а) б)

Рисунок 2.1 – Моделі градаційної корекції зображення: синусоїдальна (а), експоненціальна і логарифмічна (б)

При цьому застосування моделі (2.3) може призводити до значного посилення фонового шуму і до необхідності повторної фільтрації шуму.

При виконанні градаційної корекції відповідно лінійної моделі і моделям (2.2) і (2.3) часто не беруться до уваги можливості підвищення різкості, нормування яскравості, корекції виділеного діапазону яскравості вихідного зображення, а також ряд інших важливих міркувань.

Якщо спеціально не обумовлено інше, будемо вважати, що в рамках перспективної технології поліпшення якості знімка, спочатку, при необхідності, фільтрується шум вхідного зображення, а потім проводиться поступова корекція цього зображення. Такий підхід у багатьох практично значущих випадках дозволяє не тільки значимо покращувати якість знімка по ряду критеріїв, але і домагатися отримання знімка необхідної якості без необхідності подальшого застосування будь-яких методів поліпшення якості зображення.

2.3 Методи згладжування зображення

Для цілей згладжування варіацій яскравості в пікселях зображення пропонується використовувати наступний метод.

Метод 2.1. Метод побудови однорідних ліній рівня зображення (llb-метод).

Основна ідея запропонованого методу полягає в тому, щоб наблизити яскравість кожного пікселя зображення до середнього значення відповідної йому лінії рівня в околиці $O_\varepsilon(i, j)$ так:

Крок 1. У околиці $O_\varepsilon(i, j)$ пікселя (i, j), знаходяться найближчі до значення $f(i, j)$ яскравості $\{f_\xi\}_{\xi=1,\ldots,m}$ пікселів, числом $m = 2 \cdot \varepsilon + 1$, де ε – радіус, а $(2 \cdot \varepsilon + 1)$ – лінійний розмір околиці $O_\varepsilon(i, j)$.

Крок 2. До множини яскравостей $\{f_\xi\}_{\xi=1,\ldots,m}$ застосовується фільтр усіченого середнього (2.1), після чого вихідна яскравість пікселя $f(i, j)$ замінюється згладженим значенням $h(i, j)$.

Крок 3. Кінець.

Після фільтрації шуму на першому етапі попередньої обробки зображення, застосування запропонованого методу дозволяє адекватно згладжувати яскравості об’єктів і фону.

Для поліпшення ступеня згладжування границь і ліній при цьому пропонується використовувати наступний метод згладжування.

Метод 2.2. Метод згладжування в однорідної околиці (shn-метод).

Основна ідея запропонованого методу полягає в тому, щоб після фільтрації шуму сформувати в околиці $O_\varepsilon(i, j)$ розглянутого пікселя однорідну множину яскравостей, а потім згладити яскравість пікселя $f(i, j)$ в однорідної околиці із застосуванням фільтра усіченого середнього виду (2.1) наступним чином.

Крок 1. У околиці $O_\varepsilon(i, j)$ пікселя (i, j) знаходяться пікселі, яскравості яких $\{f_\xi\}_{\xi=0,\ldots,n}$ потрапляють в інтервал значень $f(i, j) \pm T$. Ряд яскравостей $\{f_\xi\}_{\xi=0,\ldots,n}$ впорядковується за зростанням. Вважається: $p = 0$, $q = n$.

Крок 2. Знаходиться середнє M ряду $\{f_{\xi}\}_{\xi=p,\ldots,q}$.

Крок 3. Якщо $(f_q - M) > T$, або $(M - f_p) > T$, тоді з множини $\{f_{\xi}\}_{\xi=0,\ldots,n}$ видаляється яскравість найбільш віддалена від середнього M

$$\begin{cases} \text{если} \quad (M - f_p) > (f_q - M) \rightarrow p = p + 1, \\ \text{иначе} \quad q = q - 1, \end{cases} \tag{2.4}$$

перехід до кроку 2; інакше перехід до кроку 4.

Крок 4. До множини яскравостей $\{f_{\xi}\}_{\xi=p,\ldots,q}$ застосовується фільтр усіченого середнього (2.1), після чого вихідна яскравість $f(i, j)$ пікселя (i, j) замінюється згладженим значенням $h(i, j)$.

Крок 5. Кінець.

Після фільтрації шуму на першому етапі попередньої обробки зображення, застосування запропонованого методу дозволяє адекватно згладжувати не тільки яскравості внутрішності об’єктів, але і яскравості границь об’єктів і ліній. Для додаткового поліпшення якості згладжування запропонований метод може застосовуватися ітераційне.

В якості альтернативи пороговому критерію для побудови однорідної околиці може бути застосований $k\sigma$-критерій. Однак в цьому випадку для адекватного застосування $k\sigma$-критерію на етапі навчання необхідно буде реалізувати трудомістку процедуру побудови функції $k = k(m, \sigma)$ для можливості динамічної настройки коефіцієнта k на статистичні властивості (m, σ) розподілу яскравості в розглянутій околиці.

Загальна трудомісткість застосування методу згладжування в однорідної околиці за порядком величини буде квазілінійною.

2.4 Критерії і метод дискримінації пікселів зображення

Застосування запропонованих методів фільтрації і згладжування дозволяє отримувати відносно однорідні розподіли яскравості для внутрішності об’єктів, їх границь і ліній, залишаючи контрастність границь і ліній відносно фону на колишньому рівні.

Такий результат дає можливість навіть для низько контрастних об’єктів ефективно вирішувати завдання дискримінації пікселів на чотири категорії: пікселі внутрішності, пікселі границі, пікселі лінії і пікселі тіні.

У свою чергу, ефективна дискримінація пікселів дозволяє забезпечити ефективність застосування пропонованої в роботі перспективної технології підвищення різкості, заснованої на адаптивному контрастуванні лише границь об’єктів і ліній.

Побудова базової класифікації пікселів зображення. Пікселі цифрового зображення завжди можна поділити на чотири основні категорії:

1) пікселі внутрішності об’єкта – пікселі, які мають у своїй $\sqrt{2}$-околиці лише (граничні, або внутрішні) пікселі об’єкта;

2) пікселі границі об’єкта – пікселі, які мають у своїй $\sqrt{2}$-околиці пікселі, які одночасно:

- належать внутрішності об’єкта, і
- не належать об’єкту;

3) пікселі ліній – пікселі, які мають у своїй $\sqrt{2}$-околиці пікселі, які одночасно:

- належать об’єкту, але не належать його внутрішності, і
- не належать об’єкту;

4) пікселі тіні – пікселі, які не належать ні об’єкту ні фону.

Процес формування цифрового зображення завжди характеризується появою на цифровому зображенні пікселів тіні зображення; тут під тінню розуміється сукупність таких пікселів цифрового знімка, яскравість яких утворена одночасно випромінюванням об’єкта і фону. Поява пікселів тіні обумовлена тим, що при оцифруванні на один і той же елемент аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) одночасно потрапляє випромінювання об’єкта і фону.

Припустимо, що в області границі яскравість пікселів об’єкта має рівень f, а яскравість пікселів фону – рівень b. Припустимо також, що частка випромінювання об’єкта на елементі АЦП становить S_f, а частка випромінювання фону на цьому ж елементі АЦП становить $S_b = 1 - S_f$, де $0 < S_f < 1$, $0 < S_b < 1$, $S_f + S_b = 1$. У такій ситуації яскравість пікселів тіні об’єкта буде приймати значення в діапазоні

$$b < h\left(= f \cdot S_f + b \cdot S_b\right) < f . \qquad (2.5)$$

На практиці між границями об’єктів з фоном на цифровому знімку завжди розташовується ланцюжок пікселів тіні з яскравістю, що оцінюється відповідно (2.5).

Базові критерії дискримінації пікселів зображення. Для цілей дискримінації пікселів згладженого зображення будемо використовувати обчислювально ефективні методи сегментації по контрастності, засновані на застосуванні масок, запропонованих в [11].

Для цієї мети спочатку побудуємо впорядкований за зростанням розподіл контрастності пікселя виду

$$\{u_i\}_{i=0,\ldots,n}, \; u_0 \le u_1 \le \ldots \le u_n , \qquad (2.6)$$

$$u_i = f(\xi, \eta) - f_i , \; f(\xi, \eta) \ne f_i , \qquad (2.7)$$

де $f(\xi, \eta)$ – яскравість розглянутого пікселя (ξ, η) знімка, а f_i – яскравості пікселів ε-околиці пікселя, які визначені положенням маски оператора контрастування з центром (ξ, η).

Після цього в якості основних характеристик пікселя будемо використовувати:

1) рівень контрастності пікселя

$$c = \max\{|u_0|, |u_n|\}, \tag{2.8}$$

2) рівень однорідності пікселя

$$g = \min\{|u_0|, |u_n|\}. \tag{2.9}$$

При цьому будемо використовувати наступні основні функції визначення приналежності пікселів зображення:

1) функція приналежності внутрішності

$$F_i = \begin{cases} 1, & \text{if } (g \le T_g) \wedge (c \le T_g), \\ 0, & \text{else}; \end{cases} \tag{2.10}$$

2) функція приналежності кордоні або лінії

$$F_b = \begin{cases} 1, & \text{if } (g \le T_g) \wedge (c > T_g), \\ 0, & \text{else}. \end{cases} \tag{2.11}$$

При цьому якщо піксель, ідентифікований $(F_b = 1)$ із застосуванням функції (2.11), містить у своїй околиці хоча б один піксель внутрішності, ідентифікований $(F_i = 1)$ із застосуванням функції (2.10), тоді піксель ідентифікується як піксель границі.

В іншому випадку, якщо пікселів внутрішності в околиці немає, тоді піксель ідентифікується як піксель лінії;

3) функція приналежності тіні

$$F_s = \begin{cases} 1, & \text{if } (g > T_g) \wedge (c > T_g), \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (2.12)$$

Розглянемо принципи оцінювання радіусу ε-околиці пікселя вхідного зображення з координатами (ξ, η); визначення форми околиці докладно розглянуто в роботі [11].

Для цілей роботи важливо задавати радіус так, щоб ε-околиця мала непарний лінійний розмір. Це необхідно для однозначного визначення центрального пікселя околиці (ξ, η), оскільки передбачається, що всі розглянуті оцінки в околиці характеризують ступінь неоднорідності центрального пікселя околиці (ξ, η).

Величина радіусу вибирається на етапі навчання [5]. На якісному знімку ширина тіні становить один піксель; на неякісний знімку ширина тіні, як правило, не перевищує трьох пікселів. В таких умовах на першому етапі радіус околиці (маски) вибирається рівним одиниці, що призводить до розгляду квадратної маски розмірністю 3×3.

В ході налаштування параметрів моделі радіус маски може збільшуватися зі збільшенням ширини тіні. При цьому завжди намагаються вибирати мінімально допустимий для адекватної ідентифікації радіус маски. Це необхідно для того, щоб не завищувати оцінки перепаду яскравості для пікселів внутрішності об’єкта, щоб мінімізувати хибну ідентифікацію пікселів зображення.

Крім того, вибір мінімально допустимого радіусу маски дозволяє мінімізувати трудомісткість ідентифікації по контрастності, яка пропорційна периметру $P = 4 \cdot (2 \cdot \varepsilon + 1) - 4 = 8 \cdot \varepsilon$ околиці того ж радіуса, де величина $2 \cdot \varepsilon + 1$ – це лінійний розмір маски.

Оскільки яскравість пікселя тіні формується відповідно (2.5), ідентифікація пікселів границі, лінії і тіні завжди характеризується наявністю помилок першого і другого роду. В таких умовах, на етапі налаштування параметрів моделі радіус ε повинен вибиратися одночасно з порогом T_g для мінімізації ймовірностей помилок першого і другого роду, що виникають при дискримінації пікселів.

При цьому в якості інтегрального показника ефективності дискримінації будемо використовувати коефіцієнт зростання рівня контрастності об’єкта щодо фону, який буде розглянуто нижче.

Метод дискримінації пікселів зображення. Для практичного застосування сформульованих вище критеріїв дискримінації сформулюємо метод дискримінації пікселів зображення.

Метод 2.3. Метод дискримінації пікселів зображення по контрастності (ds-метод).

Крок 1. У процесі сканування зображення для кожного його пікселя з координатами (i, j) із застосуванням маски заданого радіуса ε, відповідно до правил (2.8) і (2.9), оцінюються величини контрастності $c = c(i, j; \varepsilon)$ і $g = g(i, j; \varepsilon)$. За цим значенням із застосуванням критеріїв (2.10) – (2.12) проводиться дискримінація пікселів на три класи: внутрішність, границя або лінія, тінь.

Крок 2. При повторному скануванні оглядається околиця $O_{\sqrt{2}}(i, j)$ кожного пікселя границі або лінії з координатами (i, j): якщо в околиці є хоч один піксель внутрішності, піксель (i, j) вважається пикселем границі; інакше піксель (i, j) важається пикселем лінії.

Крок 3. Кінець.

Загальна трудомісткість застосування методу 2.3 за порядком величини буде оцінюватися лінійною функцією.

При цьому найбільш відомі аналоги [1, 2, 9] оцінюються трудомісткістю $P \le T(N) \le P^2$ операцій порівняння на піксель знімка.

Крім того, запропонований метод дискримінації пікселів зображення по контрастності, оперуючи двома величинами c й g, дозволяє ідентифікувати пікселі тіні, чого не можуть робити його аналоги, які оперують лише величиною контрастності.

Тому, якщо спеціально не обумовлено інше, для цілей роботи будемо застосовувати метод 2.3, що дозволяє з прийнятною трудомісткістю адекватно ідентифікувати пікселі внутрішності і границі об’єкта, тіні і лінії.

2.5 Показники та критерії ефективності поліпшення зображення

Який би метод підвищення різкості не був задіяний, важливо знати наскільки збільшився перепад яскравості об’єкта щодо фону після застосування оператора контрастування.

Отже, припустимо, що задане деяке зображення E. Для нього відомо положення пікселів об’єктів, тіні і фону.

В таких умовах оцінимо мінімальну контрастність пікселя границі об’єкта на цьому зображенні щодо пікселів тіні і фону так

$$c^* = \min_i (c_i)\,; \qquad (2.13)$$

якщо спеціально не обумовлено інше, тут і далі контрастність пікселів оцінюється попарно за правилом $c(x, y; \varepsilon) = \max_{\xi} \left| f(x, y) - f_{\xi} \right|$, запропонованим в роботі [11].

Тепер припустимо, що зображення було контрастувати.

Оцінимо мінімальну контрастність g^* пікселя границі об’єкта на цьому зображенні щодо пікселів тіні і фону

$$g^* = \min_i (g_i)\,. \qquad (2.14)$$

В таких умовах, якщо $c^* < T$ і виконується умова

$$(g^* > c^*) \wedge (g^* > T), \qquad (2.15)$$

де T – гранична величина, обрана з умови забезпечення ефективності подальшої обробки знімка, тоді вважається, що підвищення різкості вироблено ефективно. У завданнях машинного зору поріг T завжди вибирають так, щоб забезпечити максимально ефективну сегментацію.

Правило (2.15) назвемо базовим критерієм ефективності підвищення різкості зображення.

Отже, ефективним будемо вважати такий оператор підвищення різкості, який забезпечує виконання умови (2.15).

При цьому величиною

$$r = \frac{g^*}{c^*}, \qquad (2.16)$$

будемо оцінити кратність підвищення різкості зображення.

Зауважимо, що при вирішенні задач машинного зору для об’єктів заданого класу важливо, щоб виконувалася умова

$$g^* > h^*, \qquad (2.17)$$

де h^* – максимальна оцінка контрастності між суміжними пікселями внутрішності об’єкта після контрастування знімка.

Виконання умови (2.17) забезпечує однозначну дискримінацію пікселів нутрощі, границі об’єкта і лінії по контрастності з застосуванням запропонованих вище критеріїв дискримінації. Зауважимо, що досягнення цієї умови забезпечується фільтрацією, градаційною корекцією, згладжуванням і контрастуванням в комплексі.

Поліпшення якості зображення може проводитися для різних цілей і досягатися застосуванням великої кількості окремих методів обробки зображення. В таких умовах при виконанні заданих обмежень по часу, інтегральний критерій ефективності поліпшення зображення має вигляд

$$ERate \le T^*,\; ERate = \max_{i,j}\{\left|En_{ij} - Tp_{ij}\right|\}, \tag{2.18}$$

де T^* – задана гранична величина, а $ERate$ – міра відмінності покращення зображення En і еталона Tp в метриці Чебишева, що дозволяє оцінювати граничну міру відмінності яскравостей пікселів зображень.

3 АДАПТИВНІ АЛГОРИТМИ ПОЛІПШЕННЯ ЗОБРАЖЕННЯ

3.1 Градаційна корекція зображення

В даний час рішення задачі градаційній корекції найчастіше спирається на використання полінома першого ступеня, синусоїди, а також експоненційної або логарифмічною функцій. Розглянемо уніфіковані аналоги цих функцій.

3.1.1 Побудова базової моделі градаційної корекції

Для можливості одночасного підвищення різкості, тонової корекції і нормування значень яскравості на інтервалі значень яскравості $[a, b]$, $a < b$, пропонується використовувати такі базові функції градаційній корекції

$$p(x) = k \cdot (x - a),\ k = \frac{255}{b - a}, \tag{3.1}$$

$$s(x) = \frac{255}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b - a} \cdot x - \frac{\pi}{2} - \frac{a \cdot \pi}{b - a}\right) + \frac{255}{2}, \tag{3.2}$$

$$t(x) = p(x) + (p(x) - s(x)), \tag{3.3}$$

які перетворюють яскравості пікселів знімка з інтервалу $[a, b]$ на стандартний інтервал значень $[0, 255]$, як це показано на рис. 3.1.

Всі три функції (3.1) – (3.3) вважаються базовими, оскільки вони призначені для плавної градаційній корекції розподілу яскравості об’єктів і фону на знімку, що потребує і вирішення більшості прикладних задач. При цьому:

– функція $p(x)$ дозволяє пропорційно перетворювати яскравості пікселів знімка, які задані на довільному інтервалі $[a, b]$, на стандартний інтервал значень $[0, 255]$;

– функція $s(x)$ дозволяє перетворювати яскравості пікселів знімка, які задані на довільному інтервалі $[a, b]$, на стандартний інтервал значень $[0, 255]$, таким чином, щоб підвищувати різкість зображення тим більше, чим ближче яскравість до середини інтервалу $[a, b]$;

– функція $t(x)$ побудована так, щоб перетворювати яскравості пікселів знімка, які задані на довільному інтервалі $[a, b]$, на стандартний інтервал значень $[0, 255]$, таким чином, щоб підвищувати різкість зображення тим більше, чим ближче яскравість до кордонів інтервалу $[a, b]$.

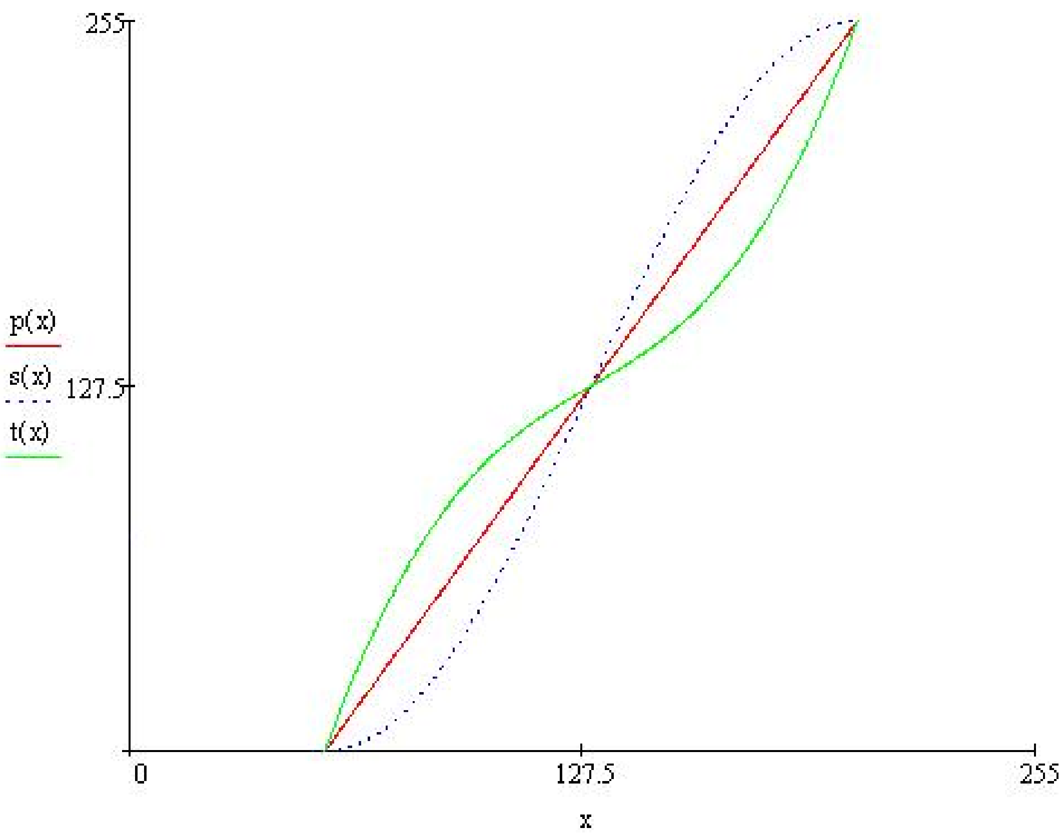


Рисунок 3.1 – Базові функції градаційній корекції (3.1) – (3.3), побудовані на інтервалі $[a = 55, b = 205]$

З метою практичного використання пропонується використовувати одну базову уніфіковану функцію плавної градаційній корекції

$$F_B(\lambda, x) = \lfloor \lambda \cdot s(x) + (1-\lambda) \cdot t(x) \rfloor, \qquad (3.4)$$

При цьому з урахуванням (3.3) вираз (3.4) набуде вигляду

$$F_B(\lambda, x) = \lfloor \lambda \cdot s(x) + (1-\lambda) \cdot (2 \cdot p(x) - s(x)) \rfloor, \qquad (3.5)$$

де $\lfloor \cdot \rfloor$ – оператор округлення до цілого.

За рахунок підбору коефіцієнта λ, $0 \le \lambda \le 1$, функція (3.5) дозволяє під певну ситуацію підбирати найкращу функцію градаційній корекції серед функцій $s(x)$, $t(x)$ і їх більш гладкий аналогів. Представники сімейства функцій представлені на рис. 3.2.

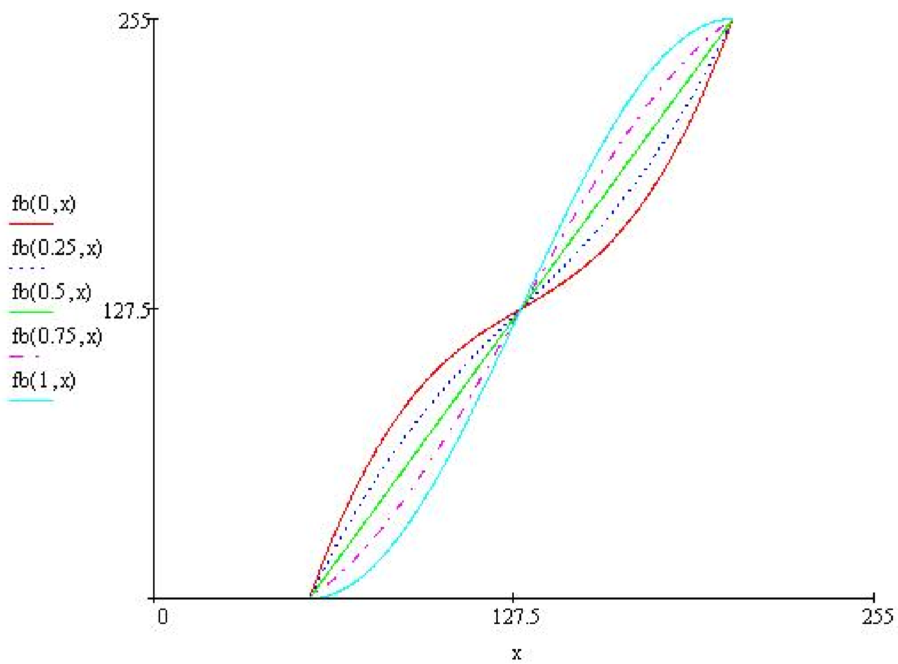


Рисунок 3.2 – Представники сімейства функцій $F_B(\lambda, x)$, побудовані при зміні параметра λ з кроком $\Delta\lambda = 0.25$ на інтервалі $[a = 55, b = 205]$

3.1.2 Модифікація базової моделі градаційної корекції

При вирішенні більшості прикладних задач пов'язаних з проведенням градаційній корекції в даний час виробляють перетворення яскравості з інтервалу $[0, 255]$ на аналогічний йому інтервал значень.

Однак проведені експериментальні дослідження гістограм зображень показують, що яскравість більшості реальних зображень змінюється в такому інтервалі значень $[a, b]$, $0 \le a \le b \le 255$, ширина якого $b - a$, як правило, менше ширини інтервалу $[0, 255]$.

В таких умовах для цілей підвищення різкості доцільно проводити поступову корекцію з інтервалу $[a, b]$ на інтервал $[0, 255]$ з використанням функції $F_B(\lambda, x)$ виду (3.5) з параметрами

$$a = \min_{i,j}\{f_{i,j}\}_{i,j}, \; b = \max_{i,j}\{f_{i,j}\}_{i,j}, \tag{3.6}$$

де $\{f_{i,j}\}_{i,j}$ – яскравості в пікселях оброблюваного знімка. При перетворенні яскравості на стандартний інтервал значень $[0, 255]$, використання такої функції аналогічно використанню критерію виду

$$x' = \begin{cases} 0, & \textit{если } (x = a), \\ F_B(a, x), & \textit{если } (a < x < b), \\ 255, & \textit{если } (x = b). \end{cases} \tag{3.7}$$

Як видно з розгляду рисунка 3.2 функції сімейства $F_B(\lambda, x)$ автоматично масштабуються, який би інтервал значень яскравості $[a, b]$ не був вибраний. Недоліком запропонованої модифікованої функції (3.5) є погіршення візуального сприйняття фрагментів зображення з яскравістю поблизу границь інтервалу $[a, b]$, оскільки ці значення будуть перетворені до чорних, або білим кольорами.

Для компенсації цього недоліку потрібно видозмінити функцію (3.5) наступним чином. Спочатку необхідно задати пороги чутливості c, d для вихідного інтервалу яскравості $[0, 255]$ так: $0 \le c \le d \le 255$, а потім проводити поступову корекцію з вихідного інтервалу $[a, b]$ на вихідний інтервал $[c, d]$ з використанням таких модифікованих функцій

$$p(x) = k \cdot (x - a) + c, \; k = \frac{d - c}{b - a}, \tag{3.8}$$

$$s(x) = \frac{d - c}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{(b - a)} \cdot x - \frac{\pi}{2} - \frac{a \cdot \pi}{b - a} \right) + \frac{d + c}{2}, \tag{3.9}$$

$$t(x) = p(x) + (p(x) - s(x)), \tag{3.10}$$

які перетворять яскравості вихідного зображення, що визначаються на інтервалі $[a, b]$, $a < b$, на інтервал значень $[c, d]$, $c < d$. Сукупність функцій (3.8) – (3.10) для фіксованих границь інтервалів $[a, b]$ і $[c, d]$ представлена на рис. 3.3.

З метою практичного використання будемо і далі користуватися моделлю градаційній корекції (3.5), заснованої на застосуванні функцій градаційній корекції (3.8) – (3.10). За рахунок настройки границь (c, d) на особливості оброблюваного знімка, використання функцій градаційній корекції (3.8) – (3.10) дозволяє створювати таке покращене зображення, на якому видно всі об’єкти незалежно від того, в якому діапазоні знаходяться їх значення яскравості. Однак слід пам’ятати, що для машинного аналізу з метою максимального підвищення контрасту границі об’єкта відносно фону значення c і d доцільно ставити так: $c = 0$, $d = 255$.

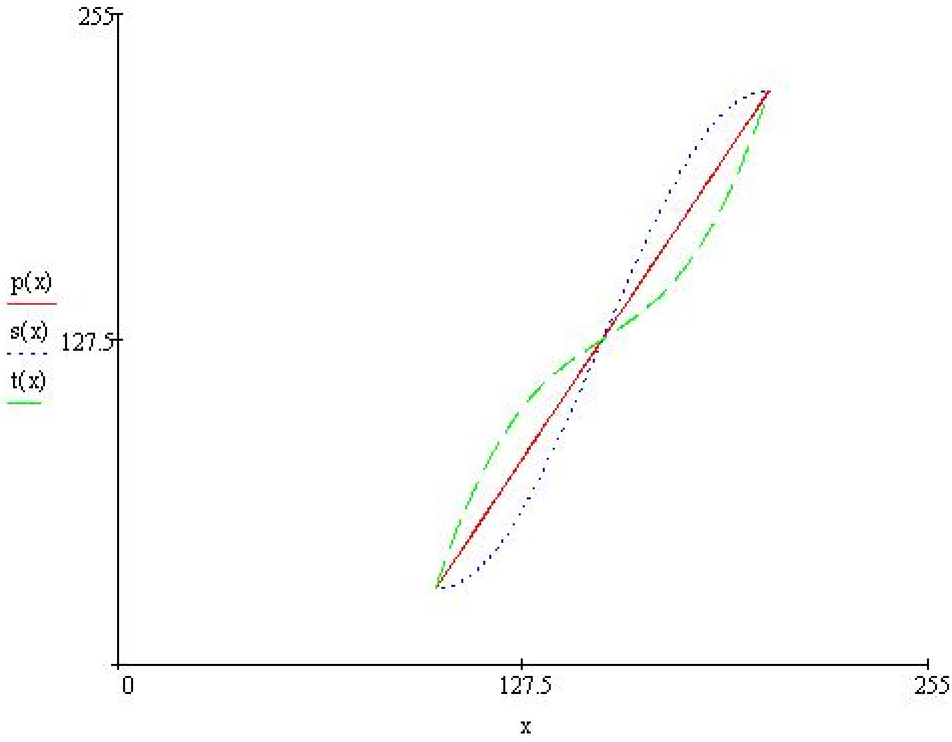


Рисунок 3.3 – Модифіковані базові функції градаційній корекції, побудовані для інтервалів $[a = 100, b = 205]$, $[c = 30, d = 225]$

3.1.3 Експоненціально-логарифмічна модель градаційної корекції

Для можливості одночасного підвищення різкості, тонової корекції і нормування значень яскравості в виділеному діапазоні значень $[a, b]$, $a < b$, пропонується, на додаток до полиному (3.1), замість функцій (3.2) і (3.3) використовувати такі функції градаційній корекції знімка

$$ef(x) = e^{k1 \cdot k2 \cdot (x-a)} - 1, \tag{3.11}$$

$$lf(x) = k1^{-1} \cdot \ln[(x-a) \cdot k2 + 1], \tag{3.12}$$

$$k1 = \frac{8 \cdot \ln(2)}{255}, \; k2 = \frac{255}{b-a}, \tag{3.13}$$

які перетворять яскравості знімка з інтервалу $[a, b]$, $a < b$, на стандартний інтервал значень [0, 255], як це показано на рис. 3.4.

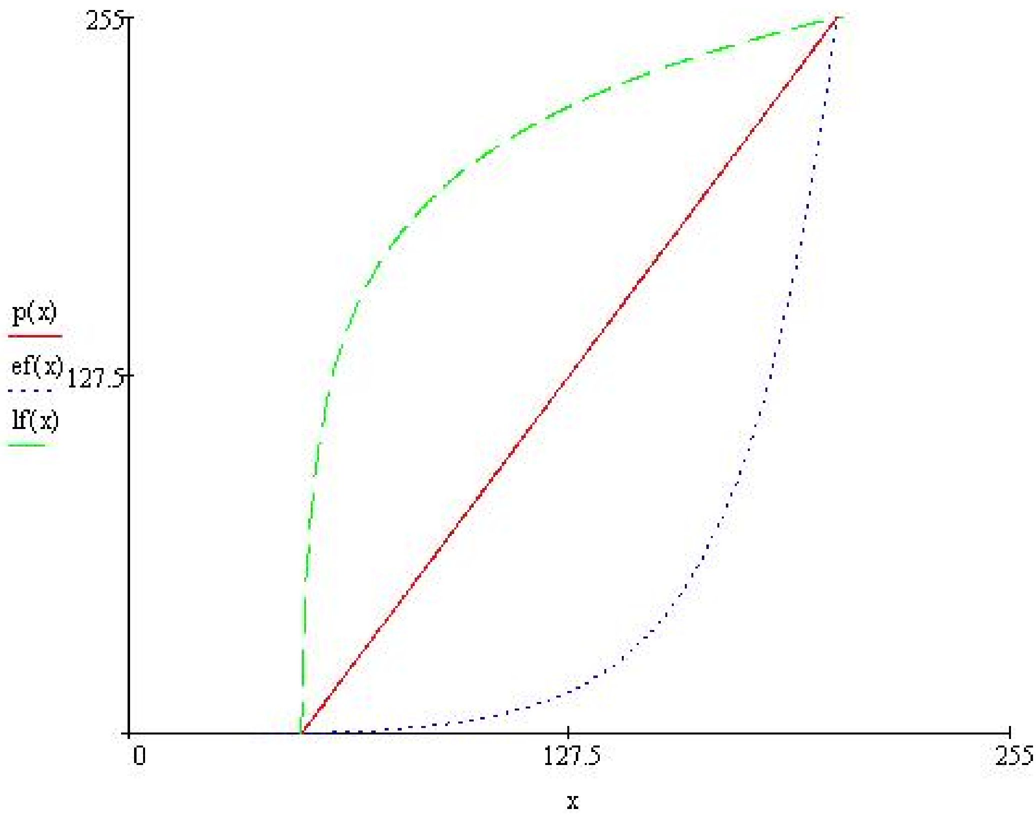


Рисунок 3.4 – Розширений набір функцій градаційній корекції (3.11) – (3.12), визначених на інтервалі значень яскравості [55, 205]

Функції (3.11) і (3.12) будемо відносити до розширеного набору функцій градаційній корекції, оскільки вони не призначені для плавного контрастування знімка. З метою практичного використання пропонується використовувати одну уніфіковану функцію експоненціально-логарифмічною градаційній корекції знімка

$$F_{ELC}(\lambda, x) = \begin{cases} \lfloor(\lambda - 1) \cdot lf(x) + [1 - (\lambda - 1)] \cdot p(x)\rfloor & \text{if} \quad \lambda \geq 1, \\ \lfloor\lambda \cdot p(x) + (1 - \lambda) \cdot ef(x)\rfloor & \text{else.} \end{cases} \tag{3.14}$$

За рахунок підбору коефіцієнта λ, $0 \le \lambda \le 2$, функція (3.14) дозволяє під певну ситуацію підбирати найкращу функцію градаційній корекції серед функцій (3.11), (3.12) і їх більш гладкий аналогів.

Представники сімейства функцій $F_{ELC}(\lambda, x)$, побудовані при зміні параметра λ з кроком $\Delta\lambda = 0.25$, представлені на рис. 3.5.

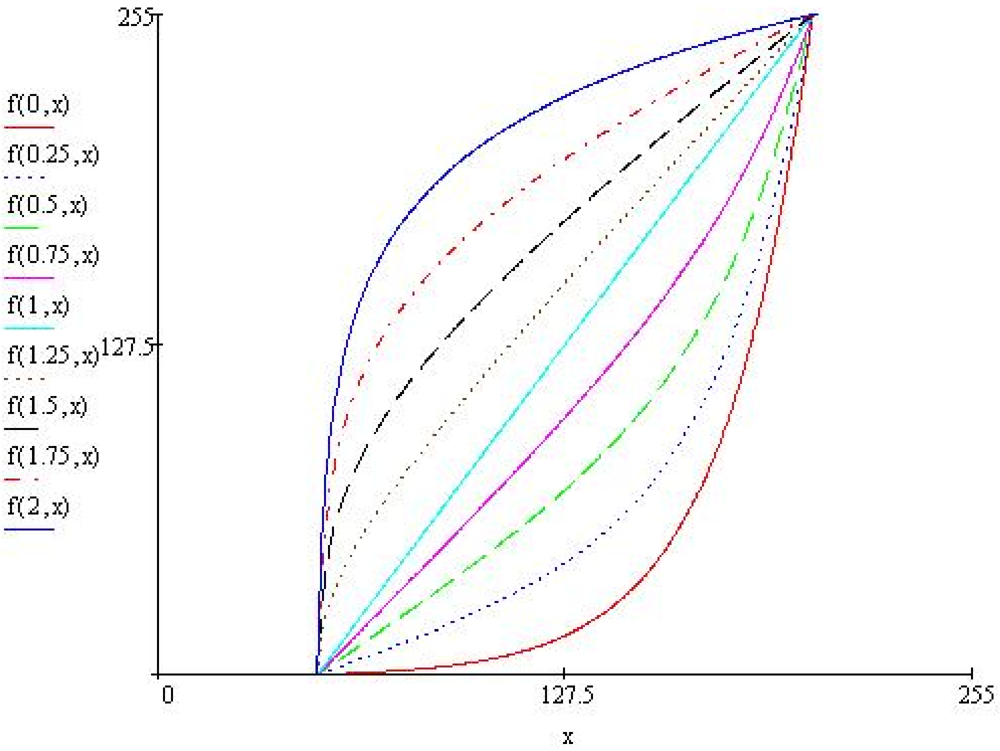


Рисунок 3.5 – Представники сімейства функцій $F_{ELC}(\lambda, x)$ на інтервалі яскравостей $[55, 205]$, побудовані при зміні параметра λ з кроком $\Delta\lambda = 0.25$

3.1.4 Модифікація експоненціально-логарифмічної моделі

При вирішенні більшості прикладних задач перетворення яскравості з інтервалу $[0, 255]$ виробляють на аналогічний йому інтервал значень. Однак проведені експериментальні дослідження гістограм зображень показують, що яскравість більшості реальних зображень змінюється в такому інтервалі значень $[a, b]$, $0 \le a \le b \le 255$, ширина якого $b - a$, як правило, менше ширини інтервалу $[0, 255]$.

В таких умовах для цілей підвищення різкості доцільно проводити поступову корекцію з інтервалу $[a, b]$ на інтервал $[0, 255]$ з використанням функції $F_{ELC}(\lambda, x)$ виду (3.14) з параметрами a і b, знайденими відповідно (3.6). Недоліком запропонованої функції (3.14) є погіршення візуального сприйняття фрагментів зображення з яскравістю поблизу границь інтервалу $[a, b]$, оскільки ці значення будуть перетворені до чорних, або білим кольорами.

Задамо пороги чутливості c, d на вихідному інтервалі $[0, 255]$, $0 \le c \le d \le 255$; поступову корекцію яскравості з інтервалу $[a, b]$ на інтервал $[c, d]$ будемо виробляти з використанням моделі (3.14), на основі використання функції (3.8), доповненої такими модифікованими функціями

$$ef(x) = k3 \cdot \left\lfloor e^{k1 \cdot k2 \cdot (x-a)} - 1 \right\rfloor + c, \tag{3.15}$$

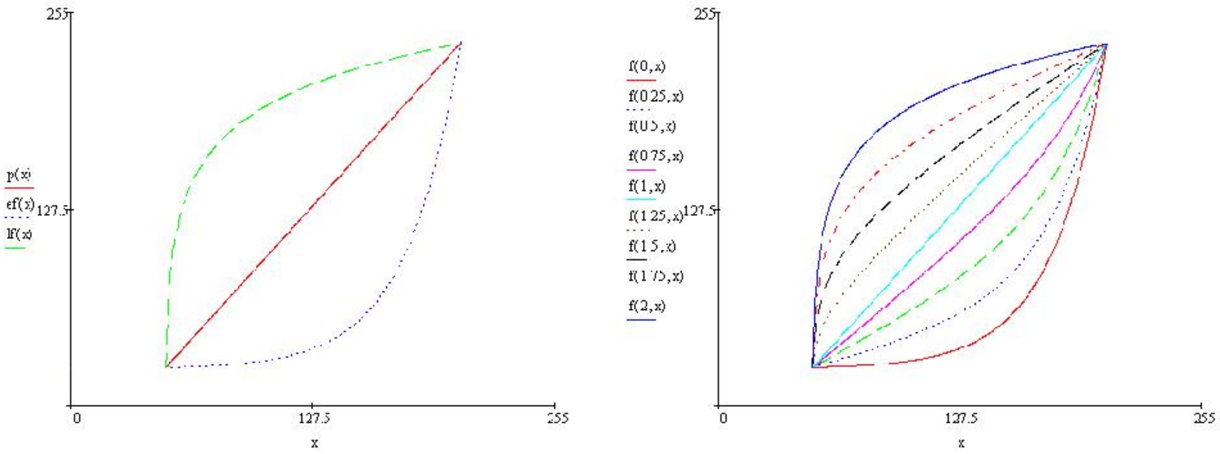
$$lf(x) = k3 \cdot k1^{-1} \cdot \ln[(x-a) \cdot k2 + 1] + c, \tag{3.16}$$

$$k1 = \frac{8 \cdot \ln(2)}{255}, \; k2 = \frac{255}{b-a}, \; k3 = \frac{d-c}{255}, \tag{3.17}$$

які перетворять яскравості вихідного зображення, що визначаються на інтервалі $[a, b]$, $a < b$, на інтервал значень $[c, d]$, $c < d$. Сукупність функцій (3.8), (3.15) і (3.16) для фіксованих меж інтервалів $[a, b]$ і $[c, d]$ представлена на рис. 3.6.

Як видно з розгляду цього рисунка 3.6 функції сімейства $F_{ELC}(\lambda, x)$ автоматично масштабуються, які б інтервали значень яскравості $[a, b]$ і $[c, d]$ не були обрані.

З метою практичного використання будемо і далі користуватися моделлю градаційній корекції (3.14), заснованої на застосуванні модифікованих функцій (3.8), (3.15) і (3.16).



а) б)

Рисунок 3.6 – Модифіковані функції експоненціально-логарифмічною моделі поступової корекції (а) і представники сімейства $F_{ELC}(\lambda, x)$, побудовані зі зміною параметра λ з кроком $\Delta\lambda = 0.25$, де $a = 50, b = 205, c = 25, d = 235$

3.1.5 Критерій ефективності градаційної корекції

Підвищення різкості зображення може бути виражено інтегральним коефіцієнтом c_s розтягування інтервалу $[a, b]$ на інтервал $[c, d]$ з урахуванням співвідношень $0 \le a \le b \le x^*$, $0 \le c \le d \le 255$ так

$$c_s = \nu / \mu, \ \nu = \frac{d - c}{255}, \ \mu = \frac{b - a}{x^*}, \ 0 \le \nu \le 1, \ 0 \le \mu \le 1, \qquad (3.18)$$

що геометрично визначається тангенсом $tg(\alpha)$ кута α нахилу

$$c_s = \mathrm{tg}(\alpha) = \frac{\nu}{\mu}, \quad (3.19)$$

як це показано на рис. 3.7. Якщо коефіцієнт c_s більше одиниці, в цьому випадку більш вузький інтервал $[a, b]$ розтягується на більш широкий інтервал $[c, d]$. З ростом коефіцієнта c_s різкість знімка буде лише підвищуватися. Якщо ж більш широкий інтервал $[a, b]$ перетворюється на більш вузький інтервал $[c, d]$, в цьому випадку коефіцієнт c_s буде менше одиниці. Зі зменшенням цього коефіцієнта різкість знімка буде тільки знижуватися.

Якщо вихідна область $[0, x^*]$ значень яскравості визначається діапазоном $[0,255]$, тоді відповідно (3.18) отримаємо

$$c_s = \frac{\nu}{\mu} = \frac{d - c}{b - a}. \quad (3.20)$$

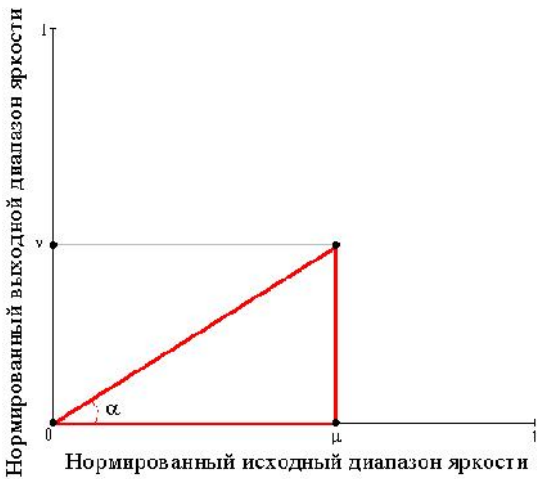


Рисунок 3.7 – Геометрична інтерпретація обчислення коефіцієнта розтягування c_s для нормованих шкал зміни яскравості зображення

Коефіцієнт c_s будемо використовувати в якості інтегрального (середнього) показника ефективності градаційній корекції і, одночасно з цим, в якості базового коефіцієнта підвищення різкості знімка градаційній корекцією. При цьому будемо пам’ятати, що використання нелінійних перетворень тягне за собою локальне нелінійна зміна різкості на різних ділянках інтервалу $[a, b]$.

Ефективною при цьому будемо вважати таку поступову корекцію знімка, в результаті якої виконується умова: $c_s > T_s$, де T_s – задана гранична величина, $T_s > 1$, яка вибирається відповідно до вимог завдання і/або особливостей індивідуального сприйняття візуальної інформації експертом в області дешифрування зображення.

При ефективній попередній фільтрації шуму [1, 9, 98] застосування запропонованих функцій градаційній корекції дозволяє не тільки виробляти тонову корекцію і нормування яскравості знімка, а й значимо звужувати інтервал $[a, b]$ і, отже, значимо підвищувати різкість знімка, відповідно (3.18).

3.1.6 Методи градаційної корекції зображення

Розглянемо тепер побудову методів поліпшення зображень, заснованих на застосуванні запропонованих вище моделей градаційній корекції зображення.

Отже, припустимо, що обрана модель поступової корекції $F(x; a, b, c, d, \lambda)$, і визначені параметри цієї моделі (a, b, c, d, λ).

Метод 3.1. В таких умовах пропонується наступний базовий метод поступової корекції зображення (hc-метод), основні кроки якого полягають у наступному.

Крок 1. Побудова табличне заданої функції градаційній корекції. З огляду на той факт, що область визначення яскравості є цілочисельною і кінцевою, для мінімізації обчислень на етапі проведення поступової корекції зображення, побудуємо табличну функцію поступового перетворення $F(x; a, b, c, d, \lambda)$ яскравості так:

1) визначимо матрицю рядок $M_{1\times n}$, де n – число можливих значень яскравості x, $n = x^* + 1$, x^* – максимально можлива яскравість;

2) в осередки матриці $M[i]$ внесемо відповідні значення яскравості $F(i) = F(i; a, b, c, d, \lambda)$, $i = 0, 1, ..., x^*$ за правилом

$$M[i] = \begin{cases} c, & \text{если } i < a, \\ F(i), & \text{если } a \le i \le b, \\ d, & \text{если } i > b. \end{cases} \qquad (3.21)$$

Крок 2. Градаційна корекція зображення. В ході порядкового сканування знімка будемо виробляти перетворення яскравості $x(\xi, \eta)$ за правилом $x(\xi, \eta) = M[x(\xi, \eta)]$.

Крок 3. Кінець.

При цьому якщо границі $[a, b]$ не задані апріорно, вони повинні оцінюватися відповідно (3.6) на початковому етапі градаційній корекції. У такій ситуації запропонований метод буде представлятися наступною послідовністю кроків.

Метод 3.2. Модифікований базовий метод поступової корекції зображення (mhc-метод).

Крок 1. Побудова гістограми частостей зображення. В ході порядкового сканування побудуємо гістограму H частостей h_i на інтервалі цілочисельних $[0, x^*]$ значень яскравості знімка

$$H = \{h_i\}_{i=0,...,x^*}, \; h_i = \frac{k_i}{N}, \qquad (3.22)$$

де x^* – максимально можлива яскравість знімка, k_i – число пікселів знімка з яскравістю i, N – число пікселів знімка.

Побудова гістограми H частостей необхідна для зниження трудомісткості знаходження границь $[a, b]$, а також для подальшої уніфікації методу поступової корекції.

Крок 2. Знаходження меж інтервалу яскравості. Аналізуючи гістограму частостей H, знайдемо першу a і останню b яскравості, частості яких відмінні від нуля.

Крок 3. Побудова табличне заданої функції градаційній корекції. Точно так же, як і в попередньому методі побудуємо табличну функцію поступового перетворення $F(x; a, b, c, d, \lambda)$ яскравості x.

Крок 4. Градаційна корекція зображення. В ході порядкового сканування знімка будемо виробляти перетворення яскравості $x(\xi, \eta)$ за правилом $x(\xi, \eta) = M[x(\xi, \eta)]$.

Крок 5. Кінець.

При вирішенні багатьох прикладних задач можна бачити, що гістограма яскравості зображення має яскраво виражені хвости (рисунок 1.10), що подаються такими значеннями, ймовірність появи яких близька до нуля.

В умовах, коли ці значення яскравості не характеризують пікселі тих об’єктів на знімку, які нас цікавлять, їх можна відсікти, шляхом обнулення відповідних їм частот.

Якщо після цього по гістограмі яскравості знайти значення мінімальної a і максимальної b яскравості знімка, то інтервал області значень яскравості знімка значно звузиться. Таким чином, можна домогтися додаткового контрастування об’єктів на знімку.

Метод 3.3. Для реалізації цього підходу, при заданих параметрах (c, d, λ) і порозі T відсікання незначущих частостей пропонується наступний метод поступової корекції зображення (hcc-метод).

Крок 1. Побудова гістограми частостей зображення. В ході порядкового сканування побудуємо гістограму частостей (3.22) на інтервалі $[0, x^*]$ цілочисельних значень яскравості знімка.

Крок 2. Знаходження границь інтервалу яскравості. Аналізуючи гістограму частостей H, знайдемо першу і останню яскравості, частость яких вище мінімально допустимого рівня: T: $h_i > T$.

Крок 3. Побудова табличне заданої функції градаційній корекції. Точно так же, як і в попередньому методі побудуємо табличну функцію градаційного перетворення $F(x; a, b, c, d, \lambda)$ яскравості x.

Крок 4. Градаційна корекція зображення. В ході порядкового сканування знімка будемо виробляти перетворення яскравості $x(\xi, \eta)$ за правилом $x(\xi, \eta) = M[x(\xi, \eta)]$.

Крок 5. Кінець.

Якщо спеціально не обумовлено інше, запропонований вище hcc-метод будемо застосовувати в якості основного методу градаційної корекції цифрового зображення.

Оскільки область визначення яскравості, в більшості випадків оцінюється 256 значеннями, а лінійні розміри сучасних знімків оцінюються кількома тисячами пікселів, основний внесок в загальну трудомісткість методу поступової корекції дають кроки, в рамках яких сканується і обробляється весь знімок.

В таких умовах отримаємо, що основний внесок в трудомісткість дає реалізація сканування зображення, що реалізується на першому і четвертому кроках hcc-методу.

Тому трудомісткість методу 3.2 і методу 3.3 по порядку величини буде оцінюватися так

$T1 = 4$ операцій порівняння на один піксель знімка. (3.23)

Трудомісткість методу 3.1 буде на 2 операції порівняння менше в зв’язку з відсутністю необхідності побудови гістограми частостей і буде оцінюватися величиною

$$T2 = 2 \text{ операцій порівняння на один піксель знімка.} \quad (3.24)$$

Таким чином, трудомісткість методу 3.1 буде такою ж, як і у аналогів, що не оцінюють межі інтервалу $[a, b]$, а трудомісткість методів 3.2 і 3.3 хоча і буде в 2 рази вище, ніж у аналогів [1, 9], проте, буде змінюватися за лінійним законом.

При цьому при приблизно рівній трудомісткості, запропоновані в роботі методи 3.2 і 3.3, дозволяють отримувати значно якісніші результати градаційній корекції і контрастування знімка, за рахунок збільшення коефіцієнта розтягування c_s.

3.2 Модель і метод підвищення різкості зображення

Застосування класичних моделей, призначених для підвищення різкості пропорційно рівню контрастності, призводить до того, що вихідні значення яскравості f' пікселів знімка після підвищення різкості можуть набувати значень на інтервалі $[a', b']$ більшому стандартного інтервалу значень яскравості $[0, 255]$. У такій ситуації необхідно проводити нормування яскравостей таким чином, щоб нормовані яскравості належали стандартному інтервалу значень яскравості.

Виконання нормування $\|f'\|$ значень яскравості часто призводить до втрати фотореалістичності знімка. Вся справа в тому, що при підвищенні різкості часто виявляються ефекти: а) значної асиметрії границь інтервалу $[a', b']$ відносно границь інтервалу $[0, 255]$, б) надлишкового зростання яскравості f' високо контрастних пікселів границь і ліній.

В таких умовах після нормування однорідні розподіли яскравості внутрішності і границь низько контрастних зображень неприродно стискаються: нерідко широкий інформативний діапазон яскравості, який на оригінальному зображенні містить переважну кількість яскравостей пікселів об'єктів і фону, стискається в кілька разів. У підсумку, високо контрастні об'єкти стають надмірно контрастними, а зображення з низькою контрастністю залишаються не контрастними. Границі контрастних зображень представляються білими або чорними точками. Через асиметрію границь інтервалу $[a', b']$ відносно границь $[0, 255]$, відбувається неприродне затемнення або освітлення зображення.

3.2.1 Модель підвищення різкості границь і ліній

Для усунення цих проблем в роботі пропонується наступна модель підвищення різкості зображення, що застосовується для пікселів границь і ліній, ідентифікованих за критеріями (2.14) – (2.16).

Базова модель підвищення різкості має вигляд

$$f' = \begin{cases} \lfloor f + sn \cdot \Delta f \rfloor, & \text{если} \quad 0 \le \lfloor f + sn \cdot \Delta f \rfloor \le 255, \\ 0, & \text{если} \quad \lfloor f + sn \cdot \Delta f \rfloor < 0, \\ 255, & \text{если} \quad \lfloor f + sn \cdot \Delta f \rfloor > 255, \end{cases} \qquad (3.25)$$

де $\lfloor \cdot \rfloor$ – операція округлення до цілого.

Така модель запропонована для того, щоб нові значення яскравості f' пікселів границь і ліній не виходили за межі стандартного діапазону яскравості $[0,...,255]$. Це зроблено для того, щоб не нормувати яскравості f' і не погіршувати властивостей знімка асиметричним стисненням.

Знакова функція в моделі (3.25) служить для адекватного збільшення (зменшення) рівня яскравості світлого (темного) пікселя на темному (світлому) фоні і визначається так

$$sn = \begin{cases} \dfrac{u_0}{|u_0|}, & \text{if} \quad |u_0| \ge |u_n|, \\ \dfrac{u_n}{|u_n|}, & \text{else}, \end{cases} \qquad c \ne 0, \tag{3.26}$$

де величини контрастності u і c знайдені відповідно (2.12) і (2.13). Абсолютна величина Δf зміни яскравості f в моделі (3.25) визначається так

$$\Delta f = y(\arg(c); k, p) = k \cdot \left(\frac{\arg(c)}{255} \right)^p \cdot \arg(c), \tag{3.27}$$

де k – інтегральний коефіцієнт посилення контрастності, а p – показник ступеня функції контрастування.

За рахунок варіації параметрів (k, p) модель (3.27) дозволяє гнучко налаштовуватися на особливості прикладної задачі:

а) вибирати необхідний середній рівень посилення контрасту знімка шляхом зміни значення інтегрального коефіцієнта посилення k, і

б) посилювати незначущі перепади яскравості шляхом збільшення показника ступеня p, або навпаки – посилювати і значущі і незначущі перепади яскравості шляхом зменшення показника ступеня p.

При цьому аргумент $\arg(c)$ в моделі (3.27) визначається так

$$\arg(c) = \begin{cases} c, & \text{если} \quad c < T_c, \\ T_c - (c - T_c) \cdot \dfrac{T_c}{255 - T_c}, & \text{иначе}, \end{cases} \tag{3.28}$$

де c – контрастність пікселя, знайдена за правилом (2.12), T_c – поріг, який визначає таку величину контрастності $c^* = T_c$, після якої приріст абсолютної величини Δf яскравості f буде лише зменшуватися.

Таке визначення аргументу $\arg(c)$ функції $\Delta f = y(\arg(c); k, p)$ необхідно для того, щоб не збільшувати великі перепади яскравості для недопущення надмірного підвищення контрастності і мінімізації негативного ефекту появи білих і чорних точок на границях об’єктів і лініях.

Моделі формування абсолютної величини Δf збільшення (зменшення) яскравості при реалізації різних правил підвищення різкості наведені на рис. 3.8, де $T_c = 76.5$, $k = 1$, $p = 0.5$; при цьому на рис. 3.9 наведені моделі формування величини Δf при різних значеннях порога T_c, ($T_{c1} = 51$, $T_{c2} = 76.5$, $T_{c3} = 102$), $k = 1$, $p = 0.5$.

На рис. 3.10. наведені моделі формування величини Δf при різних значеннях коефіцієнта k, ($k = 0.5$, $k = 1$, $k = 1.5$), $T_c = 76.5$, $p = 0.5$, а на рис. 3.11 – моделі формування величини Δf при різних значеннях показника ступеня p, ($p = 0.5$, $p = 1$, $p = 1.5$), $T_c = 76.5$, $k = 1$.

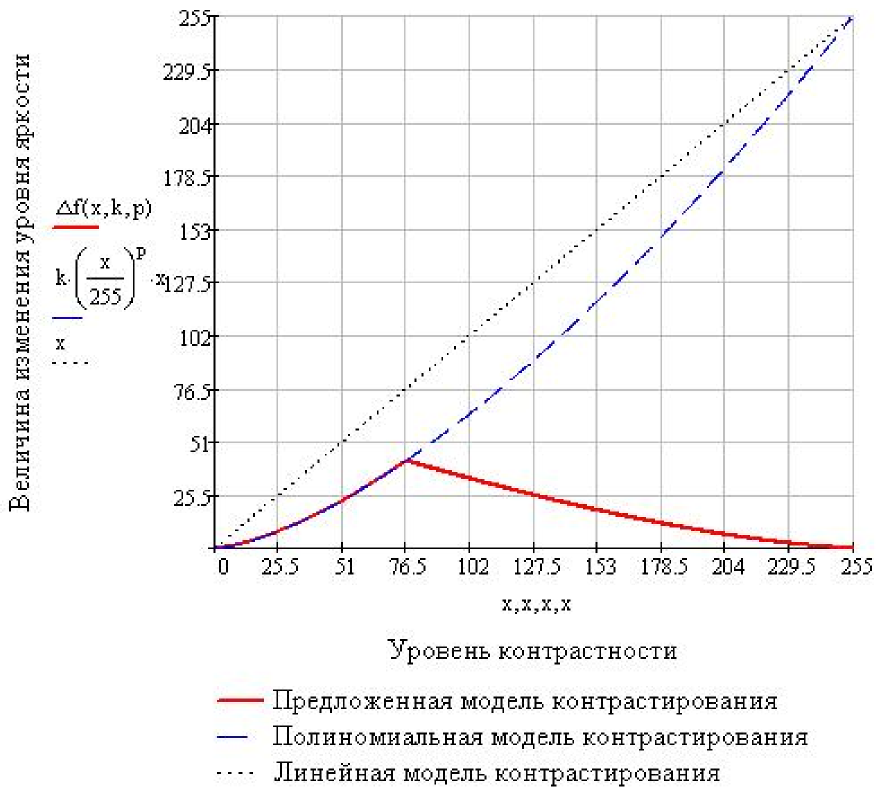


Рисунок 3.8 – Різні моделі формування величини Δf

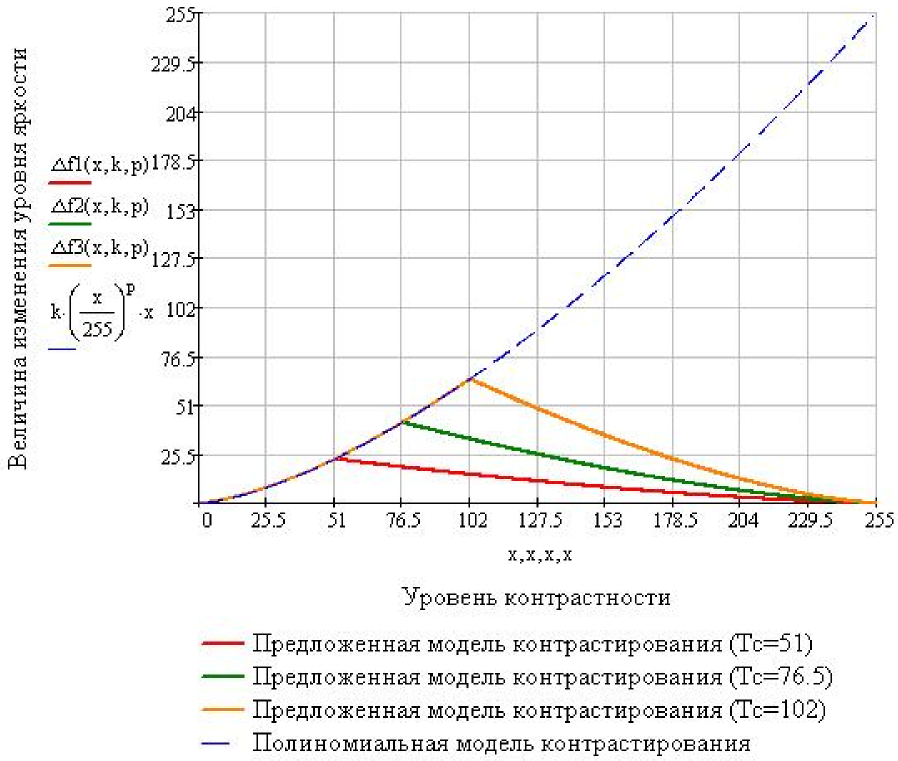


Рисунок 3.9 – Моделі формування величини Δf , при варіаціях порога T_c

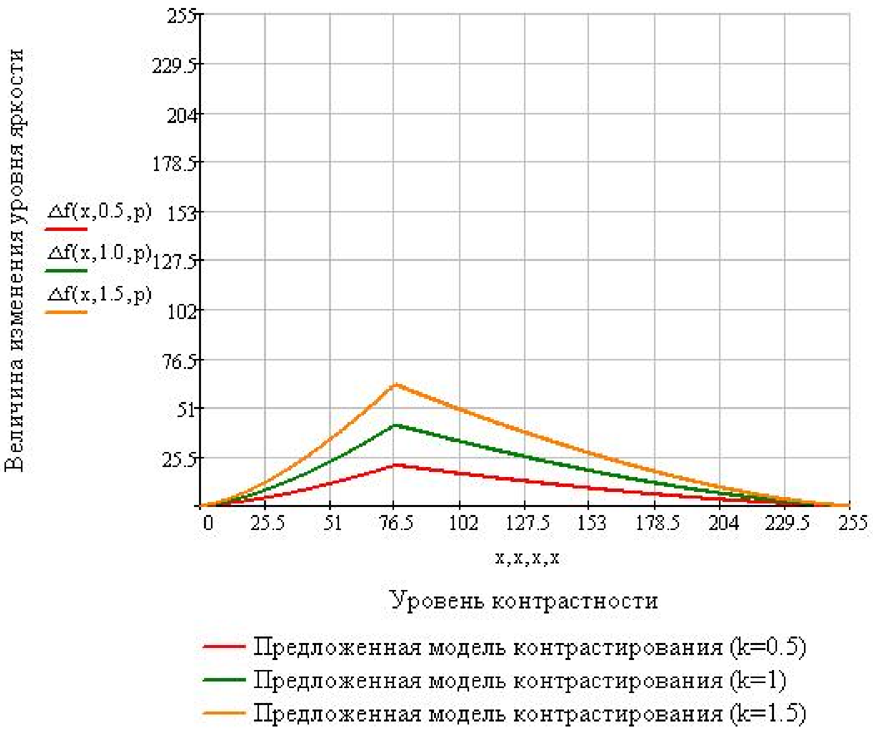


Рисунок 3.10 – Моделі формування величини Δf , при варіаціях параметра k

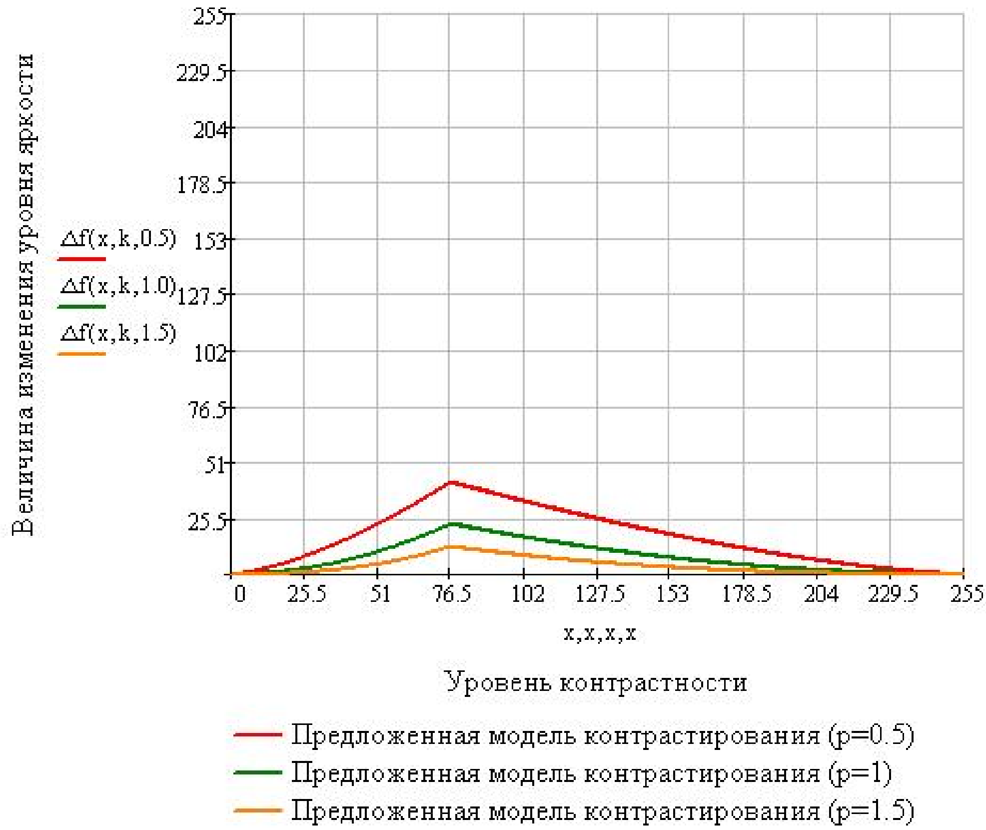


Рисунок 3.11 – Моделі формування величини Δf, при варіаціях параметра p

3.2.2 Метод підвищення різкості границь і ліній

Для практичної реалізації запропонованої моделі контрастування в умовах попередньої дискримінації пікселів зображення пропонується метод підвищення різкості (is-метод), основні кроки якого полягають у наступному.

Метод 3.4. Метод підвищення різкості границь і ліній.

Крок 1. Побудова табличній функції $\Delta f = \Delta f(c)$. Оскільки контрастність приймає значення на безлічі нейтрально чисел на інтервалі $[0,...,255]$, після того, як визначені всі параметри моделей (3.27) і (3.28) побудуємо табличну функцію $\Delta f = \Delta f(c)$, де $c = 0,...,255$.

Крок 2. Підвищення різкості. В ході сканування зображення для кожного пікселя границі і лінії:

а) в ході оцінювання контрастностей u_i знайдемо мінімальну u_0 і максимальну u_n контрастність пікселя по масці в околиці;

б) знайдемо величину контрастності c і знак sn так

$$\begin{cases} sn = \dfrac{u_0}{|u_0|}, c = |u_0|, \quad \text{если} \quad |u_0| \geq |u_n|, \\ sn = \dfrac{u_n}{|u_n|}, c = |u_n|, \quad \text{иначе}, \end{cases} \qquad c > 0; \tag{3.29}$$

в) за параметрами c і sn з використанням табличної функції $\Delta f = \Delta f(c)$ знаходимо нову яскравість f' за правилом (3.25).

Крок 3. Кінець.

У зв'язку з використанням табличній функції $\Delta f = \Delta f(c)$ трудомісткість застосування is-методу за порядком величини така ж, як у аналогів.

Таким чином, при трудомісткості, рівний за порядком величини трудомісткості широко використовуваних аналогів, заснованих на використанні операторів диференціювання, запропонований метод, як це зазначалося на початку підрозділу, дозволяє не допустити виникнення проблем:

а) асиметричного розширення діапазону яскравості і, отже, асиметричної градаційній корекції і неприродного затемнення або освітлення зображення;

б) високого ступеня стиснення інформативного діапазону яскравості знімка з втратою фотореалістичності об'єктів і різкості низько контрастних зображень і ліній;

в) надмірного збільшення різкості контрастних границь і ліній, що приводить до їх подання білими або чорними точками.

При цьому за рахунок налаштування параметрів моделей (3.27) і (3.28) запропонований метод дозволяє підвищувати різкість з урахуванням вимог завдання і властивостей оброблюваного знімка.

Проведені експериментальні дослідження показують, що пікселі об’єкта, які вдаються в фон, або навпаки, нерідко контрастують більш значуще, ніж суміжні їм граничні пікселі гладкої границі.

У такій ситуації неможливо повністю виключити ефект появи білих і чорних точок на границі високо контрастних ламаних границь об’єктів лише застосуванням запропонованого методу.

Для мінімізації ефекту чорних і білих точок доцільно після застосування is -методу на множині яскравостей пікселів границь і ліній застосувати заданий фільтр, який згладжує.

3.3 Метод комплексного поліпшення якості зображення

Запропоновані вище методи призначені для вирішення важливих, але окремих завдань поліпшення якості зображення. На основі їх використання пропонується узагальнений метод комплексного поліпшення якості зображення щодо вирішення чотирьох основних завдань: фільтрації шуму, тонової корекції, згладжування і підвищення різкості зображення.

В даному контексті термін узагальнена означає, що в рамках запропонованого методу буде дано лише опис послідовності застосування запропонованих вище методів вирішення завдань фільтрація шуму, градаційної корекції, згладжування і підвищення різкості зображення без деталізації внутрішнього устрою цих методів.

Метод 3.7. Узагальнений метод комплексного поліпшення якості цифрового зображення.

Етап 1. Фільтрація шуму. Наявність значного шуму на зображенні призводить до появи значних спотворень розподілу яскравості об’єктів і фону, які заважають адекватному візуальному сприйняттю і дешифруванню сцени, відображеної на знімку.

Крім того, наявність значного шуму на зображенні, як правило, призводить до неадекватного розширення інформативного інтервалу $[a, b]$ яскравостей зображення, що знижує можливості ефективної градаційній корекції і адекватного підвищення різкості знімка.

При цьому значимо знижується обчислювальна ефективність подальшої обробки зображення:

1) зростає трудомісткість обробки;

2) зменшується стійкість сегментації.

Тому, якщо на зображення, яке обробляється присутній шум, настільки значимий, що його присутність призводить до виникнення зазначених проблем, шум зображення необхідно згладити. Головним чином це стосується імпульсного шуму зображення [1, 9], оскільки незначні варіації яскравості в суміжних пікселях зображення, як правило, не роблять значного впливу на його візуальне сприйняття і ефективність подальшої машинної обробки.

У такій ситуації, коли максимальна величина шуму $h*$ більше заданої граничної величини T_n: $h* > T_n$, (за умови, що на зображенні немає дрібнозернистої текстури, яку не можна згладжувати), для цілей фільтрації будемо використовувати уніфікований метод адаптивної фільтрації імпульсного шуму (ns-метод).

Цей метод обраний для цілей фільтрації шуму тому, що він дозволяє одночасно адекватно згладжувати поодинокі і групові імпульсні шуми з прийнятною трудомісткістю і не згладжувати при цьому границі зображень об’єктів і лінії.

Етап 2. Градаційна корекція зображення. Отже, значимий шум на зображенні згладжений, інтервал яскравостей $[a, b]$ зображення звужений. Після цього застосовується hc-метод, або модифікований – hcc-метод для поступової корекції зображення.

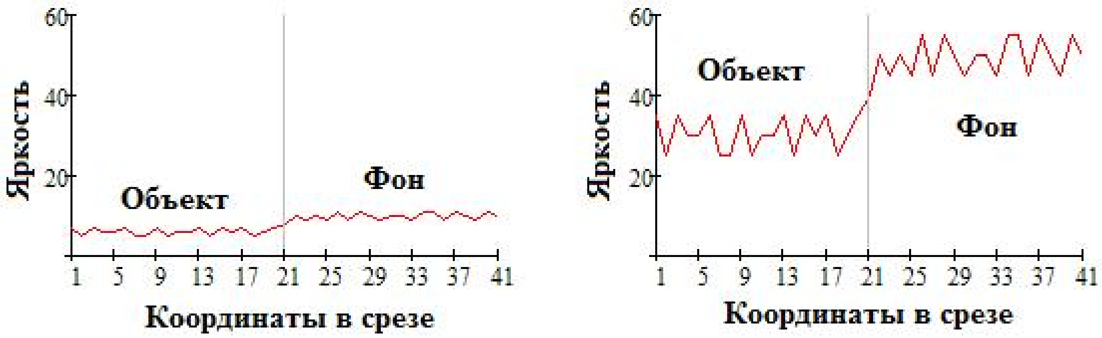
В результаті застосування одного з цих методів проводиться тонова корекція знімка, а також загальне підвищення різкості зображень об’єктів з коефіцієнтом $c_s = \nu / \mu$, відповідно (3.18).

Етап 3. Згладжування екстремальних спостережень. Виконання градаційній корекції, звичайно ж, при виконанні умови $c_s > 1$, може призводити до значного збільшення перепадів яскравості суміжних пікселів зображення, в тому числі і шумів, особливо при використанні нелінійної моделі корекції. На практиці коефіцієнт c_s, як правило, рідко перевищує значення 1.5. Тому, з одного боку різкість зображень об’єктів на знімку підвищується незначно, що часто вимагає застосування додаткових методів контрастування зображення, з іншого боку рівень шуму на знімку також підвищується не суттєво.

Для зображення після поступової корекції може повторно виконуватися згладжування шуму (етап 1), за умови, що величина коефіцієнта c_s більше заданої граничної величини T_s: $c_s > T_s$, величина якої, як правило, вибирається з умови забезпечення стійкості дешифрування (сегментації) об’єктів на знімку [5]. Ілюстрація описаної ситуації наведена на рис. 3.12 і рис. 3.13.

Етап 4. Згладжування зображення. Для забезпечення ефективності дискримінації пікселів зображення (після згладжування імпульсного шуму), при значних варіаціях яскравості суміжних пікселів об’єктів, якщо максимальний рівень g^* таких варіацій більше заданої граничної величини T_g: $g^* > T_g$, зображення згладжується з застосуванням запропонованих в роботі згладжуючих фільтрів.

В якості основного для цієї мети будемо застосовувати shn-метод (метод 2.2), що дозволяє ефективно згладжувати варіації яскравості у внутрішності і на границіях об’єктів за рахунок попереднього побудови однорідної околиці дії фільтра.



а) б)

Рисунок 3.12 – Розподіли яскравості фрагмента слабо контрастного зображення і фону в зрізі (а) і розподіл яскравості того ж фрагмента після градаційної корекції з коефіцієнтом $c_s = 5$

Рисунок 3.13 – Результат згладжування імпульсного шуму зображення із застосуванням середньоарифметичного фільтра [1, 5, 9]

Цей метод призначений для згладжування яскравостей всіх пікселів знімка і передбачає, що імпульсний шум згладжений.

Вся справа в тому, що навіть при незначних варіаціях яскравості суміжних пікселів об’єктів, згладжування зображення із застосуванням запропонованих в роботі адаптивних згладжуючих фільтрів, тим більше згладжування, що застосовується ітераційне, призводить до суттєвого зростання однорідності розподілу яскравості об’єктів в кілька разів. В результаті варіації яскравості в суміжних пікселях об’єкта практично зводяться до нуля, а перепади яскравості між пікселями об’єкта і фону залишаються на колишньому рівні. В результаті значно спрощується вибір порога для адекватної дискримінації пікселів навіть слабо контрастних зображень.

Зауважимо, що фільтрація (етап 3) і згладжування (етап 4) можуть застосовуватися лише для створення копії зображення, що використовується для ефективної дискримінації пікселів зображення.

Етап 5. Дискримінація пікселів зображення. Як вказувалося вище застосування запропонованих в роботі адаптивних методів фільтрації і згладжування дозволяє отримувати відносно однорідні розподілу яскравості для внутрішності об'єктів, їх границь і ліній, залишаючи контрастність границь відносно фону на колишньому рівні. Такий результат дає можливість ефективно вирішувати завдання дискримінації пікселів навіть низько контрастних об'єктів на знімку, що в свою чергу забезпечує можливість подальшого ефективного застосування адаптивної технології контрастування об'єктів, границь і ліній на знімку.

Для цілей реалізації об'єктно-орієнтованого підходу до вирішення завдання підвищення різкості, за умови, що мінімальний рівень контрастності c^* границь і ліній менше заданої граничної величини T_C: $c^* < T_C$, виконується дискримінація пікселів знімка на чотири основні категорії: 1) пікселі внутрішності об'єкта, 2) пікселі границі об'єкта, 3) пікселі ліній і 4) пікселі тіні. Вирішується це завдання із застосуванням запропонованого в роботі методу дискримінації пікселів по контрастності (метод 2.3).

Етап 6. Підвищення різкості зображення. При низькому рівні контрастності об'єктів відносно фону, якщо мінімальний рівень контрасту c^* границь і ліній менше заданої граничної величини: T_C: $c^* < T_C$, підвищення різкості проводиться із застосуванням запропонованого в роботі is-методу для контрастування границь об'єктів і ліній, відповідно моделі (3.25).

Етап 7. Згладжування шуму сіль і перець. Підвищення різкості часто призводить до появи на зображенні чорних і білих точок внаслідок надмірного підвищення різкості границь високо контрастних об'єктів. Для мінімізації прояви такого ефекту після підвищення різкості доцільно ідентифікувати і згладити екстремальні спостереження, які з’явилися на зображенні після підвищення різкості. Для цілей згладжування будемо застосовувати фільтр усіченого середнього (tm-фільтр) виду (2.1) на однорідній множині – множині однотипних пікселів границі (лінії), що належать одному і тому ж об’єкту.

При цьому встановлювати факт однотипності пікселів будемо на згладженому зображенні (до контрастування), а згладжувати екстремальні спостереження будемо на зображенні після його контрастування.

Етап 8. Згладжування яркостей пікселів тіні. При недостатньо високому рівні контрастності об’єктів відносно фону, якщо мінімальний рівень контрасту c^* границь і ліній менше заданої граничної величини T_c: $c^* < T_c$, підвищення різкості зображення проводиться із застосуванням запропонованого в роботі sms-методу згладжування яскравостей тіні.

Згладжування тіні призводить до зменшення ширини тіні і до збільшення перепаду яскравості на границі (рис. 3.14).

Рисунок 3.14 – Результат згладжування тіні (представленої на рисунку 3.13) sms-методом на основі використання моделі (3.32), де $\lambda = 1$

Ефект згладжування тіні не завжди проявляється так значимо, як це показано на рисунку 3.14, так як згладжування тіні з коефіцієнтом $\lambda = 1$ не завжди допустимо, оскільки зображення втрачає властивість фотореалістичності.

Етап 9. Кінець.

Для цілей подальшого використання позначимо цей метод sie-методом.

3.4 Оцінки обчислювальної ефективності методу комплексного поліпшення якості зображення

На основі запропонованих вище моделей і методів комплексного поліпшення якості цифрового зображення розроблений спеціалізований пакет прикладних програм (ППП) «IMAGE SHARPENING», який призначений для проведення досліджень щодо обчислювальної ефективності поліпшення якості зображення (рис. 3.15).

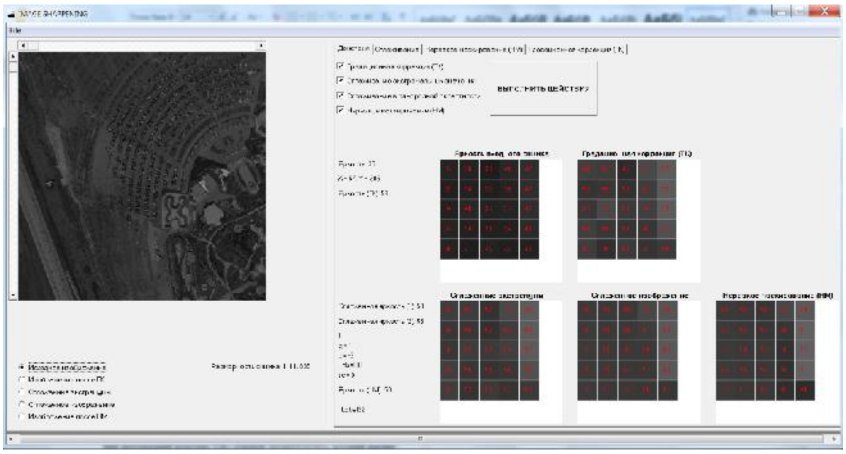


Рисунок 3.15 – Інтерфейс ППП «IMAGE SHARPENING»

Пакет прикладних програм «IMAGE SHARPENING» дозволяє узгоджено вирішувати такі основні завдання.

Завдання градаційній корекції. Пакет прикладних програм дозволяє виробляти градаційну корекцію знімка. З метою практичного використання для градаційної корекції застосовується:

– базова уніфікована функція виду (3.4), заснована на використанні синусоїдальної моделі корекції (3.8) – (3.10), або

– уніфікована функція виду (3.14), заснована на використанні експоненціально-логарифмічної моделі корекції (3.8), (3.15) – (3.17).

Вибір специфікації моделі та методу при цьому залежить від вимог до результату градаційній корекції, висунутій в додатку. В якості основного для поступової корекції застосовується запропонований вище hcc-метод.

З метою практичного застосування спочатку у вікні ППП «IMAGE SHARPENING» слід вибрати закладку «Градаційна корекція (ГК)», встановити параметри моделей, вибрати вид моделі корекції. Потім слід вибрати закладку «Дії», вибрати опцію «Градаційна корекція (ГК)» і натиснути на кнопку «Виконати дії» (рис. 3.16).

Завдання згладжування. Пакет прикладних програм дозволяє виробляти фільтрацію шуму і згладжування варіації яскравості знімка.

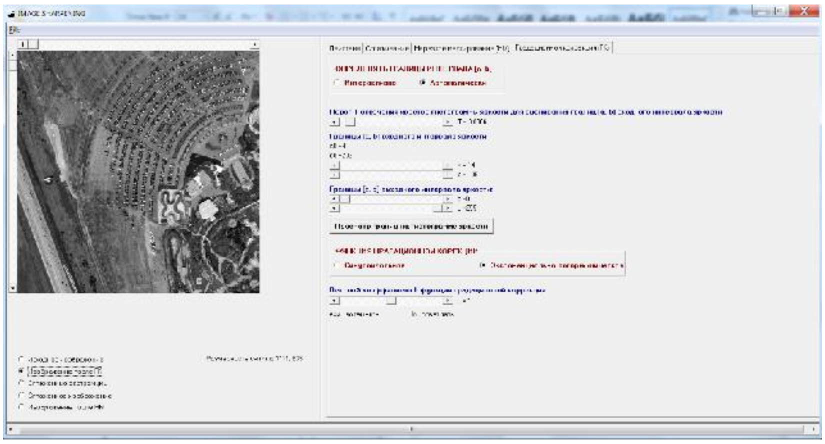


Рисунок 3.16 – Закладка «Градаційна корекція (ГК)»

Як було зазначено вище, на сьогоднішній день одним з кращих є уніфікований метод згладжування шуму в неоднорідній околиці: ns-метод, оскільки він дозволяє ефективно ідентифікувати поодинокі і групові шуми на зображенні, будувати однорідну околицю в області шуму і адекватно згладжувати шум в однорідної околиці із застосуванням фільтра усіченого середнього.

З метою практичного застосування спочатку у вікні ППП «IMAGE SHARPENING» слід вибрати закладку «Згладжування», встановити параметри моделей, вибрати тип фільтра. Потім слід вибрати закладку «Дії», вибрати опцію «Згладжування екстремальних значень» і натиснути на кнопку «Виконати дії» (рис. 3.17).

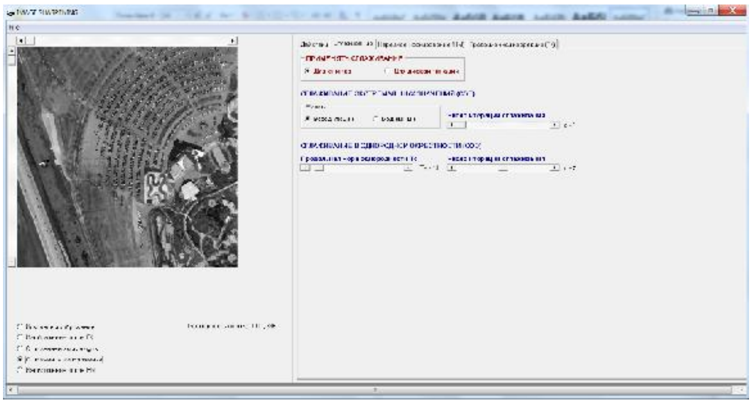


Рисунок 3.17 – Закладка «Згладжування»

Для дослідницьких цілей при цьому користувач може додатково вибирати тип фільтра і число ітерацій згладжування. Вибір специфікації фільтра при цьому залежить від вимог до результату згладжування, висунутій в додатку.

Для поліпшення ступеня згладжування об’єктів і фону при цьому може застосовуватися метод згладжування в однорідної околиці (shn-метод). Для цілей його застосування спочатку у вікні ППП «IMAGE SHARPENING» слід вибрати закладку «Згладжування», встановити параметри, вибрати фільтр (під заголовком «Згладжування в однорідної околиці (СОО)»). Потім слід вибрати закладку «Дії», вибрати опцію «Згладжування в однорідної околиці» і натиснути на кнопку «Виконати дії».

Запропонований в роботі shn-метод застосовується для цілей згладжування тому, що він дозволяє ефективно згладжувати варіації яскравості у внутрішності і на границях об’єктів за рахунок попередньої побудови однорідної околиці дії фільтра; цей метод передбачає, що імпульсний шум згладжений.

Завдання підвищення різкості. Програмний комплекс дозволяє проводити підвищення різкості границь об’єктів і ліній на знімку. З метою практичного використання для підвищення різкості застосовується базова уніфікована функція виду (3.25), заснована на використанні запропонованих в роботі моделей (3.26) – (3.28).

Вибір специфікації моделі та методу при цьому залежить від вимог до результату градаційній корекції, висунутій в додатку. В якості основного для підвищення різкості використовується запропонований вище is -метод (метод 3.4), який застосовується до попередньо ідентифікованих границь об’єктів і ліній.

З метою практичного застосування спочатку у вікні ППП «IMAGE SHARPENING» слід вибрати закладку «Нерізке маскування (НМ)», встановити параметри моделей. Потім слід вибрати закладку «Дії», встановити опцію «Нерізке маскування (НМ)» і натиснути на кнопку «Виконати дії» (рис. 3.18).

В цілому результати комплексного тестування показують помітну перевагу запропонованих в роботі методів поліпшення зображень в порівнянні з аналогами. Наприклад, для значимо затемнених знімків, коефіцієнт c_s зростання контрастності варіюється в діапазоні $[2,...,3]$; для знімка представленого на рисунку 3.15, коефіцієнт $c_s = 2.8$ (рис. 3.16).

Повністю підтверджуються зроблені в попередньому розділі оцінки ефективності запропонованого в роботі методу підвищення різкості зображень. При цьому експериментальні оцінки ефективності для зображень показують, що застосування запропонованого методу підвищення різкості для більшості з них призводить в середньому до зростання контрастності об’єктів відносно фону в 1.5 – 2.5 рази.

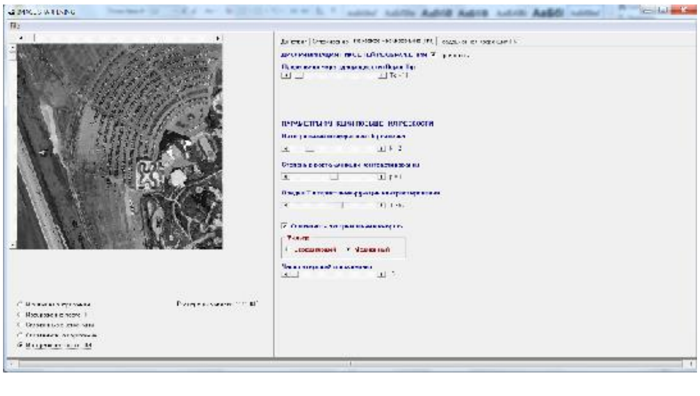


Рисунок 3.18 – закладка «нерізке маскування (нм)»

ВИСНОВКИ

В результаті виконання атестаційної роботи отримані наступні основні результати.

Відповідно завданню проведено аналіз сучасного стану питання, досліджені існуючі моделі і підходи поліпшення цифрового зображення відносно фільтрації шуму, згладжування, градаційної корекції, а також підвищення різкості зображення.

Побудована система моделей і метод комплексної корекції (поліпшення) цифрового зображення відносно вказаних операцій фільтрації, згладжування, градаційної корекції і підвищення різкості.

Побудовано відповідний комплекс прикладних програм, на основі використання якого проведений експеримент і показана відповідність реальних і теоретичних оцінок ефективності запропонованого методу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

2. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М. : Вильямс, 2004. – 928 с.

3. Журавлев Ю. И. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю. И. Журавлев, В. В. Рязанов, О. В. Сенько. – М. : Фазис, 2005. – 159 с.

4. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М. : БИНОМ, 2006. – 752 с.

5. Смеляков К. С. Модели и методы сегментации изображений объектов нерегулярного вида для автономных систем технического зрения: дис. … доктора техн. наук : 01.05.02 / Смеляков Кирилл Сергеевич. – Х., 2012. – 306 с.

6. Цифровая обработка изображений в информационных системах / [И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых и др.]. – Новосибирск : НГТУ, 2002. – 351 с.

7. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт. – М. : Мир, 1976. – 230 с.

8. Грицык В. В. Распараллеливание алгоритмов обработки информации в системах реального времени / В. В. Грицык. – К. : Наукова думка, 1981. – 215 с.

9. Sonka M. Image processing, analysis and machine vision / M. Sonka, V. Hlavak, R. Boyle. – California (USA) : Cole Publishing Company, 1999. – 770 p.

10. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М. : Техносфера, 2007. – 584 с.

11. Смеляков К. С. Модели и методы сегментации границ изображений

нерегулярного вида на основе адаптивных масок: дис. … канд. техн. наук : 01.05.02 / Смеляков Кирилл Сергеевич. – Х., 2005. – 162 с.

12. Шлезингер М. И. Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию / М. И. Шлезингер, В. Главач. – К. : Наукова думка, 2004. – 545 с.

13. Машталир В. П. Точечно-множественные методы обработки информации / В. П. Машталир. – Х. : Бизнес Информ, 2001. – 199 с.

14. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. – М. : Физматлит, 2003. – 784 с.

15. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Т. 1 / У. Прэтт. – М. : Мир, 1982. – 312 с.

16. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Т. 2 / У. Прэтт. – М. : Мир, 1982. – 480 с.

17. Путятин Е. П. Обработка изображений в робототехнике / Е. П. Путятин, С. И. Аверин. – М. : Машиностроение, 1990. – 320 с.

18. Гренандер У. Лекции по теории образов. Т. 1 / У. Гренандер. – М. : Мир, 1979. – 221 с.

19. Гренандер У. Лекции по теории образов. Т. 2 / У. Гренандер. – М. : Мир, 1981. – 211 с.