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 поліпшення цифрового зображення у мережевих комп’ютерних системах аналізу даних

(тема)

Виконав:
студент II курсу, групи СПзм-18-2
Можевітін О.Ю.
(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 С.В.
(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 Можевітіну Олександру Юлійовичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи Моделі поліпшення цифрового зображення у мережевих комп’ютерних системах аналізу даних

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
Загальні моделі фільтрації шуму зображення
Вимоги до об’єктів, моделі та алгоритму
Вимоги до оцінювання ефективності

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
Аналіз предметної області
Реалізація адаптивних моделі та алгоритму фільтрації шуму
Обчислювальний експеримент
Висновки
Аналіз предметної області

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп’ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційні матеріали. Плакати – 12 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 С.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 81 с., 20 рис., 0 табл., 1 додаток, 17 джерел.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ, ІМПУЛЬСНИЙ ШУМ, ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМУ, СГЛАДЖУВАННЯ ШУМУ, МАСКА ФІЛЬТРУ, АДАПТАЦІЯ ФІЛЬТРУ, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ПОТУЖНІСТЬ.

Метою атестаційної роботи є розробка моделі та створення відповідної системи адаптивної фільтрації імпульсного шуму цифрового зображення.

У ході виконання атестаційної роботи було проаналізовано існуючі моделі, алгоритми і технології фільтрації шуму зображень, розроблено та реалізовано модель адаптивної фільтрації шуму, а також відповідний програмний комплекс, за допомогою якого поставлено експеримент і отримано підтвердження ефективності застосування запропонованої моделі адаптивної фільтрації імпульсного шуму.

Проведений порівняльний аналіз застосування запропонованої моделі адаптивної фільтрації з аналогами показав суттєві переваги запропонованої моделі у відношені відсутності негативних ефектів неприйнятногог сгладжування границь обієктів і ліній.

ABSTRACT

Master’s thesis: 81 pages, 20 figures, 0 tables, 1 appendix, 17 sources.

MODEL IDENTIFICATION, IMPULSE NOISE, NOISE FILTTRING, NOISE SUPPRESSION, FILTER MASK, FILTER ADAPTATION, COMPUTATIONAL EFFICIENCY.

The purpose of attestation work is to develop a model and create an appropriate system of adaptive filtering impulse noise of a digital image.

In the course of performing attestation work, existing models, algorithms and technologies of noise filtration of images were analyzed, the adaptive noise filtration model was developed and implemented, as well as the corresponding software complex, with which the experiment was put and confirmation of the efficiency of application of the proposed model of adaptive filtration of impulse noise was obtained.

A comparative analysis of the application of the proposed adaptive filtration model with analogues has shown the significant advantages of the proposed model in relation to the absence of negative effects of unacceptable smoothing of the boundaries of objects and lines.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 АКТУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ, ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МОДЕЛЕЙ ПРОСТОРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ШУМУ ЗОБРАЖЕНЬ 100
1.1 Актуальні завдання фільтрації шуму зображень**Ошибка! Закладка не определ**
1.2 Актуальні проблеми і перспективи розвитку моделей просторової фільтрації шуму зображень 17
2 БАЗОВІ МОДЕЛІ І МЕТОДИ ФІЛЬТРАЦІЇ ШУМУ 21
2.1 Перспективні підходи і методи просторової фільтрації шуму 21
2.1.1 Обчислювальні аспекти використання усереднюючих фільтрів 21
2.1.2 Обчислювальні аспекти використання фільтрів шуму, які засновані на порядкових статистиках 24
2.1.3 Системні аспекти застосування фільтрів шуму 26
2.1.4 Особливості використання адаптивних фільтрів шуму 27
2.2 Загальні проблеми застосування адаптивних фільтрів шуму та шляхи їх вирішення 31
3 АДАПТИВНА ПРОСТОРОВА ФІЛЬТРАЦІЯ ІМПУЛЬСНОГО ШУМУ ЗОБРАЖЕННЯ 35
3.1. Статистичні методи виключення екстремальних спостережень 35
3.1.1 Метод виключення нетипових екстремальних спостережень за $k \cdot \sigma$-критерієм 36
3.1.2 Метод виключення нетипових екстремальних спостережень за Gr-критерієм 39
3.1.3 Метод виключення нетипових екстремальних спостережень за TM-критерієм 41
3.1.4 Критерій ідентифікації неоднорідної області зображення 44

3.2 Побудова детермінованих методів виключення екстремальних спостережень 46
3.2.1 Застосування критерію ідентифікації точкового імпульсного шуму 47
3.2.2 Застосування критерію ідентифікації групового імпульсного шуму 48
3.3 Побудова методу адаптивної фільтрації імпульсного шуму 51
3.3.1 Узагальнений метод адаптивної фільтрації імпульсного шуму зображень 51
3.3.2 Метод виявлення потенційно зашумлених околиць зображення 52
3.3.3 Метод ідентифікації та виключення імпульсного шуму 54
3.3.4 Метод згладжування імпульсного шуму 55
3.3.5 Основна специфікація узагальненого адаптивного методу фільтрації імпульсного шуму зображень 60
3.4 Експериментальна оцінка адекватності та обчислювальної ефективності фільтрації шуму 61
ВИСНОВКИ 72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 73
ДОДАТОК А Графічний матеріал атестаційної роботи (проекту) 75

ВСТУП

Одним з найважливіших завдань, що вирішуються в даний час в ході попередньої обробки цифрового знімка, є завдання фільтрації шуму [1-5]. Великі, або менші спотворення яскравості завжди присутні на цифровому зображенні. Однак при вирішенні задач розпізнавання фільтрація шуму є актуальною лише в ситуації появи на цифровому зображенні такого шуму, наявність якого призводить до нестійкості методів сегментації [6-8].

Знаючи природу і основні особливості виникнення шуму на цифровому зображенні можна зробити висновок про те, що шум може бути присутнім на знімках при вирішенні широкого спектра прикладних задач і, отже, розробка обчислювально ефективних фільтрів шуму є актуальною, який би додаток ми не розглядали [9-12].

Завдання фільтрації шуму практично завжди актуальні при обробці даних супутникової зйомки та аерофотозйомки місцевості з метою фільтрації шуму і неінформативних дрібних деталей на знімку, оскільки від ефективності фільтрації шуму залежить сама можливість і адекватність розпізнавання малорозмірних об’єктів на знімку [13-17]. Особливе значення фільтрація екстремальних спостережень має при вирішенні задач обробки термограмм, оскільки на таких зображеннях можуть бути присутніми локальні температурні аномалії, подібні імпульсного шуму, які в ряді випадків необхідно відфільтрувати попередньо аналізу таких зображень.

Розглянуті вище приклади далеко не вичерпують всієї сфери застосування фільтрації шуму на цифрових зображеннях [1, 2], але ці приклади ясно і чітко показують актуальність і важливість проведення ефективної фільтрації шуму на цифрових зображеннях.

Адекватна і ефективна фільтрація шуму важлива для адекватної обробки кольорових зображень, особливо, при необхідності зміни уявлення колірної моделі зображення; вся справа в тому, що якщо шум на знімку не усунути, тоді колірні координати можуть перетворюватися неадекватно нелінійним чином [3-5].

Крім того, фільтрація шуму важлива для цілей підвищення ефективності стиснення зображень і їх передачі по каналах зв’язку [1, 2]. Тому, що згладжування шуму істотно знижує локальні варіації яскравості і усуває імпульсний шум, в результаті чого для фіксованого порога заглиблення обсяг стисненого знімка додатково знижується в кілька разів порівняно з його не відфільтрованим аналогом.

Проведений аналіз публікацій в областях, пов’язаних з обробкою зображень і розробкою алгоритмів обробки даних показує, що в даний час, крім значних досягнень, існує ряд проблем, що стримують ефективне застосування фільтрів шуму цифрових зображень; основна проблема при цьому пов’язана з надмірним розмиванням границь об’єктів і ліній на цифровому зображенні після його фільтрації.

Виникає такий ефект тому, що існуючі фільтри шуму усредняют яскравості пікселів розглянутої околиці без урахування їх належності.

Тому актуальною є розробка адаптивних методів фільтрації шуму на цифрових зображеннях, які здатні одночасно ефективно згладжувати шум і не згладжувати при цьому малорозмірні зображення, границі зображень об’єктів і лінії.

Оскільки в сучасних системах машинного зору нестійкість сегментації і неадекватність розпізнавання зображень об’єктів на знімку обумовлюється, в основному, наявністю саме імпульсного шуму, далі в роботі розглядаються моделі, методи, алгоритми та технології фільтрації імпульсного шуму зображень [2, 6]. При цьому для можливості адаптації до геометричних властивостей об’єктів на знімку розглядаються просторові методи фільтрації шуму.

1 АКТУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ, ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МОДЕЛЕЙ ПРОСТОРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ШУМУ ЗОБРАЖЕНЬ

1.1 Актуальні завдання фільтрації шуму зображень

Одним з найважливіших завдань, що вирішуються в ході попередньої обробки (предобработки) цифрового знімка, є завдання фільтрації шуму [1, 2]. Основна суть цього завдання полягає в тому, щоб усунути (згладити) спотворення $e(x,y)$ яскравості $g(x,y)$ в пікселі (x,y), якщо таке спотворення спостерігається.

Вважається, що перегрів компонент і плат пристрою реєстрації зображення, наприклад, матриці аналогово-цифрового перетворювача сигналу (АЦП) призводить до появи шуму зображення [2].

Взагалі, на основі проведених досліджень в даний час вважається [2], що основними джерелами шуму є всілякі пристрої, призначені для реєстрації, обробки і передачі даних по каналах зв’язку, якщо такі пристрої працюють не в штатному режимі, наприклад, перегріваються, або піддаються впливу статичної електрики через не проведеного вчасно технічного обслуговування.

Які ж основні причини виникнення цифрового шуму можна виявити? Вважається, що на співвідношення сигнал-шум головним чином впливають шуми аналогової електроніки цифрового пристрою реєстрації зображення, наприклад, фотоапарата (підсилювачі, АЦП і ін.); при цьому основним джерелом шуму на цифровому знімку є фотосенсор. Причини виникнення цифрового шуму обумовлені наступними аспектами [2, 3].

По-перше, через так званого чорного дефекту, тобто через наявність дефектів потенційного бар’єру, які викликають витік заряду згенерованого за час експозиції. Такі дефекти на світлому фоні видно у вигляді більш темних пікселів.

По-друге, шум не рідко є наслідком термоелектронної емісії і, так званого, тунельного ефекту. В результаті виникає візуальний ефект, який представляється у вигляді світлих пікселів на більш темному тлі. Такі дефекти особливо часто виявляються при великому часі експозиції. На значущість прояви такого негативного ефекту безпосередньо впливає температура елементів камери, а також електромагнітні наведення від самої камери.

Крім того, спотворення яскравості виникають через наявність шуму, який виникає внаслідок стохастичною природи самого взаємодії фотонів з елементарними частинками матеріалу фотодіодів сенсора АЦП пристрою реєстрації цифрового зображення.

Також, спотворення яскравості виникають через наявність неадекватно функціонують осередків-пікселів, які проявляються при недотриманні технології виробництва фотосенсорів.

При цьому на величину шуму на цифровому зображенні істотно впливають щільність пікселів на мікросхемі, а також час експонування при отриманні знімка.

Таким чином, в умовах експлуатації електронно-обчислювальної техніки в штатному режимі, значимий шум, як правило, не з’являється на зображеннях. В таких умовах не виникає і необхідності згладжувати шум зображень.

Навпаки, в умовах експлуатації електронно-обчислювальної техніки не в штатному режимі, на зображеннях починає проявлятися більш, або менш значущий шум. В таких умовах може виникати необхідність згладжувати такий шум, якщо його наявність призводить до нестійкості застосування методів обробки зображення, наприклад, до нестійкості застосування методів сегментації зображень об’єктів [6].

Найчастіше шум зображень не носить просторово корельованого характеру. Тому з практичної точки зору актуальним є розробка і застосування моделей, критеріїв, методів, алгоритмів і технологій фільтрації (згладжування) просторово некорреліровани шуму зображень.

Саме рішення цієї проблеми і буде далі розглядатися в роботі. При цьому буде показано, що в більшості випадків просторово корельований шум можна згладити із застосуванням фільтрів, розроблених для придушення просторово некорреліровани шуму.

Вважається, і абсолютно справедливо, що на сьогоднішній день не існує якогось одного універсального методу, який дозволяє ефективно і якісно згладжувати шум на цифрових зображеннях, не погіршуючи при цьому корисних деталей зображення.

У деяких роботах по обробці зображень вважається, що прибирати шум на цифрових зображеннях можна за допомогою статистичної обробки результатів накопичення зображень (знаходження математичного очікування, або медіани яскравості в пікселі після суміщення знімків) [2, 4]. Однак такий підхід далеко не завжди застосуємо на практиці, оскільки для адекватного поєднання знімків потрібно статистично значуща вибірка зображень, отриманих при фіксованих умовах отримання даних щодо масштабу, рівня освітлення, ракурсу та інших значущих чинників впливу.

Також вважається, що процес адекватної фільтрації шуму - це досить нетривіальний процес, оскільки причиною цього є тісний взаємозв’язок деталей на знімку і неможливість однозначного відділення шуму від корисного сигналу, і найголовніше - від биття яскравості, обумовлених відмінною один від одного, що відображає різних ділянок поверхні об’єкта, навіть якщо цей об’єкт візуально має однорідний розподіл яскравості.

У такій ситуації вважається, що алгоритми і технології, призначені для згладжування шуму повинні враховувати:

1) особливості використовуваної цифрової фотокамери, а також умови її функціонування;

2) відсутність повної апріорної визначеності про типах і параметрах шумів і об’єктів на знімку;

3) природу появи шуму на зображенні;

4) особливості процесів дискретизації і квантування зображення, а також особливості моделі цифрового зображення, включаючи прояви ефекту текстури, наявність дрібних деталей і малорозмірних зображень в кадрі, а також ряд інших, описаних в роботі [6];

5) критерії сприйняття композиції на знімку.

У теперішній час шумову складову реєстрованого сигналу можна знижувати двома способами:

1) в пристрої реєстрації зображення із застосуванням призначених для цієї мети вбудованих алгоритмів згладжування шуму,

2) або на ЕОМ.

Аналізуючи ці алгоритми і результати їх застосування для зменшення шуму можна зробити наступні висновки.

Якщо планується обробляти цифровий знімок на ЕОМ, тобто застосовувати до нього алгоритми фільтрації, сегментації, розпізнавання, стиснення чи інші алгоритми, в такій ситуації доцільно вимкнути функцію шумозаглушення в камері, із застосуванням якої виходить цифрове зображення. Такий підхід дозволить в майбутньому значимо підвищити якість обробки цифрової фотографії.

Такий результат досягається за рахунок використання на ЕОМ багато більш потужних алгоритмів фільтрації шуму, що вимагають багато великих обчислювальних витрат, і недоступних в даний час більшості фотокамер. Алгоритм шумозаглушення, який використовується камерою (фотоапаратом), є відносно тривіальним; в результаті його застосування навіть значущі деталі на зображенні можуть розмиватися, і далеко не завжди потім можуть адекватно розпізнаватися. Розумієте об’єктів і дрібних деталей на знімках – це один з основних негативних ефектів згладжування шуму, особливо при використанні масок великої розмірності.

Таким чином, застосування алгоритму шумозаглушення, використовуваного пристроєм реєстрації цифрового зображення, як правило, призводить до безповоротного згладжування текстур, а також до втрати важливих деталей на знімку. Найнеприємніше при цьому полягає в тому, що ці деталі в подальшому вже не вдасться відновити навіть із застосуванням потужного спеціалізованого програмного забезпечення (http://photoboke.ru).

Вивчивши природу і деякі основні особливості виникнення шуму можна зробити висновок про те, що шум може бути присутнім на цифрових знімках в рамках будь-якої програми і, отже, розробка обчислювально ефективних фільтрів шуму є актуальною, яке б додаток ми не розглядали.

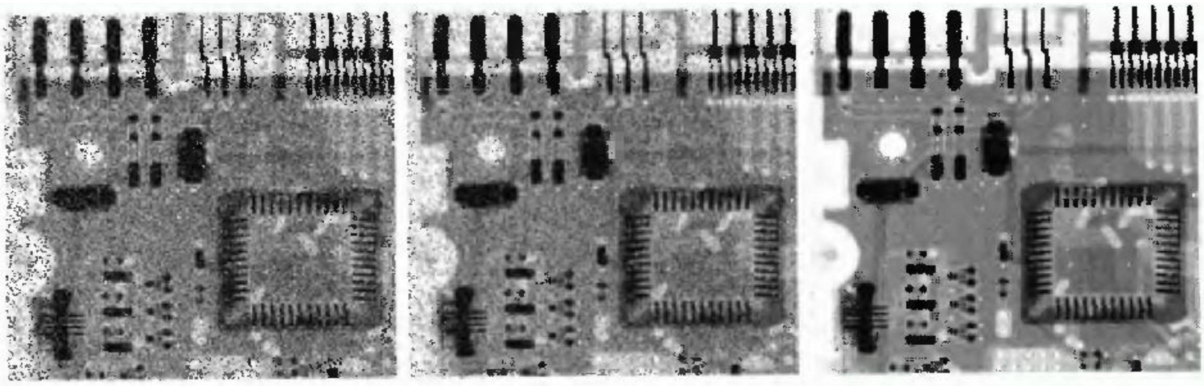
Так, наприклад, при проведенні технічного контролю якості друкованих плат і появі імпульсного шуму при перегріванні сенсорів АЦП актуальною є фільтрація такого шуму, як це показано на рис. 1.1.

Завдання фільтрації шуму практично завжди актуальні при обробці даних аерофотознімання на місцевості з метою фільтрації, як шуму, так і неінформативних дрібних деталей на знімку (рис. 1.2).

Особливе значення фільтрація екстремальних (імпульсних) спостережень має при вирішенні задач обробки термограмм (термоізображеній). Вся справа в тому, що на таких зображеннях може бути чимало локальних температурних аномалій, подібних імпульсного шуму, які в ряді випадків необхідно відфільтрувати попередньо аналізу таких зображень [6]. Так, в якості прикладу можна розглянути термограмму фрагмента трансформатора, представлену на рис. 1.3. На цьому малюнку видно кілька великих структурних елементів даної сцени і кілька локальних фрагментів, що містять биття температурного поля.

Як правило, на першому етапі аналізу такого зображення проводиться сегментація, класифікація та оцінка стану великих структурних елементів об’єкта зйомки. При цьому локальні биття температурного поля потрібно усунути (згладити), щоб вони не заважали сегментації більших об’єктів. В наслідок такі локальні фрагменти можна буде проаналізувати окремо.

Рішення задач подібного роду є актуальним в різних областях науки при аналізі термограмм, як в інтерактивному, так і в автоматичному режимі.



а) б) в)

Рисунок 1.1 – Рентгенівський знімок друкованої плати: а) спотворений імпульсним шумом, б) і в) відфільтрований знімок із застосуванням усредняющего і медіанного фільтрів, відповідно [2]

Рисунок 1.2 – Дані аерофотозйомки на місцевості для цілей дешифрування

Розглянуті вище приклади далеко не вичерпують всієї сфери застосування фільтрації шуму на цифрових зображеннях [2, 6].

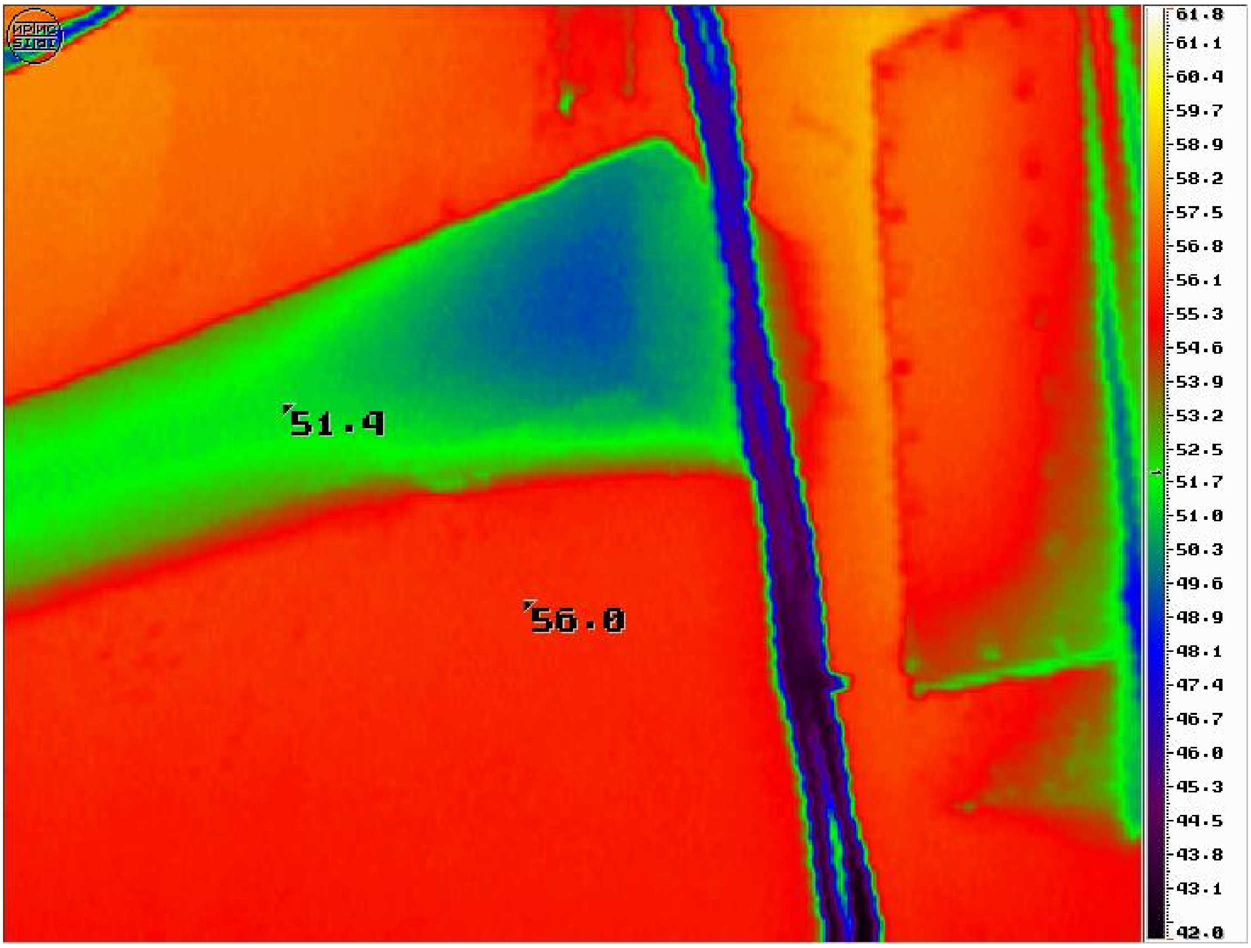


Рисунок 1.3 – Термограма фрагмента трансформатора [6]

Однак ці приклади найбільш явно і очевидно показують всю актуальність і важливість проведення ефективної фільтрації шуму на цифрових зображеннях.

Зауважимо також, що адекватна і ефективна фільтрація шуму важлива для адекватної обробки кольорових зображень, особливо, при необхідності зміни уявлення колірної моделі зображення: якщо шум не усунути, колірні координати можуть перетворюватися неадекватно нелінійним чином [2].

Крім того, фільтрація шуму важлива для цілей підвищення ефективності стиснення зображень [1-3].

Фільтрація шуму істотно знижує локальні варіації яскравості і усуває імпульсний шум.

В результаті для фіксованого порога заглиблення обсяг стисненого знімка знижується в кілька разів. Відповідні дослідження в цифрах і графіках наведені в роботі [4, 7].

Розглянемо тепер основні проблеми, які стримують ефективне застосування існуючих фільтрів шуму, а також сформулюємо основні шляхи та перспективи розвитку інформаційних технологій фільтрації шуму зображень.

1.2 Актуальні проблеми і перспективи розвитку моделей просторової фільтрації шуму зображень

Як показує аналіз результатів застосування існуючих фільтрів шуму, основна проблема використання фільтрів шуму пов’язана з розмиванням об’єктів і їх границь після фільтрації [2, 6]. Характерний приклад такого ефекту наведено на рис. 1.4.

Виникає такий ефект тому, що існуючі фільтри шуму обчислюють середнє значення яскравості пікселів розглянутої околиці без урахування їх належності. Так, якщо всі пікселі розглянутої околиці належать до внутрішньої частини об’єкта з приблизно однорідним розподілом яскравості, то результат фільтрації можна визнати більш, або менш адекватним. Але, якщо частина пікселів розглянутої околиці належить об’єкту, а інша частина фону, тоді результат усереднення буде неадекватним.

Завдання 1. Таким чином, для забезпечення адекватності фільтрації шуму зображень виникає необхідність мінімізації ефекту згладжування границь зображень і ліній при фільтрації.

В цьому відношенні в роботі необхідного результату передбачається досягти за рахунок розробки та застосування технології фільтрації шуму заданого виду в однорідної околиці, тобто в околиці, що містить або пікселі об’єкта, або пікселі фону. Основою для досягнення цієї мети буде розробка критеріїв і методів виключення екстремальних спостережень, які ототожнюються з шумом.

а)

б)

Рисунок 1.4 – Супутниковий знімок на місцевості (а) і той же знімок, оброблений фільтром Гаусса (http://habrahabr.ru/post/151112/)

Завдання 2. Для забезпечення обчислювальної ефективності технологія фільтрації шуму зображень повинна характеризуватися прийнятною трудомісткістю $T(n)$, що оцінюється в діапазоні $n \le T(n) \le n^2$ операцій порівняння, що характеризує трудомісткість переважної більшості існуючих методів фільтрації.

Дотримуватися такої оцінки, розглядаючи загальний випадок зашумлення, необхідно тому, що фільтрація шуму є всього лише однією з допоміжних операцій обробки зображення при розпізнаванні.

В цьому відношенні необхідного результату передбачається досягти за рахунок розробки та застосування технології оперативного виявлення і виборчої фільтрації шуму в потенційно зашумленной околиці.

Для досягнення необхідного ефекту при вирішенні цих двох основних завдань необхідно орієнтуватися на найбільш поширені на практиці ситуації зашумлення з тим, щоб розробити найбільш ефективні моделі, методи і технології фільтрації, орієнтовані на згладжування таких шумів. Такий підхід зокрема доцільно використовувати для того, щоб знизити апріорну невизначеність параметрів зашумлення.

Якщо спеціально не обумовлено інше далі в роботі будемо орієнтуватися на фільтрацію просторово некорреліровани шуму.

Зауважимо, що на практиці більшість фільтрів, описаних в літературі, орієнтуються на роботу з шумом Гауса - процесом, описуваних нормальним законом розподілу. Цей аспект моделювання знаходить пояснення у відповідній теоремі Ляпунова. Відповідно до цієї теореми, розподіл суми незалежних випадкових величин (при дотриманні певних умов) сходиться до нормального закону розподілу незалежно від характеру розподілу доданків (вікіпідручник, поняття про перешкоди і методи боротьби з ними http://ru.wikibooks.org/wiki/).

Більш того, в більшості таких додатків розглядається розподіл шуму має математичне очікування близьке до нуля; в таких умовах потрібно було, що розподіл шуму описується незміщеної нормальних законом розподілу $N(0,\sigma)$, де σ – середньоквадратичне відхилення (СКО) шуму [2, 6].

Таким чином, якщо спеціально не обумовлено інше, будемо вважати далі, що розподіл шуму описується нормальним законом розподілу. При цьому, якщо величина (амплітуда) шуму буде більше заданої величини, такий шум будемо інтерпретувати як імпульсний шум. Саме усунення імпульсного шуму, як основному чиннику нестійкості сегментації зображення, і буде присвячено основну увагу в роботі.

2 БАЗОВІ МОДЕЛІ І МЕТОДИ ФІЛЬТРАЦІЇ ШУМУ

2.1 Перспективні підходи і методи просторової фільтрації шуму зображень

В даний час вважається, що найкращим методом боротьби з шумом є усереднення за результатами накопичення зображень [2, 5, 6].

Однак застосування цього методу вимагає наявності кількох сполучених зображень, що при вирішенні багатьох прикладних задач практично не піддається реалізації. Тому в таких умовах єдиною альтернативою накопичення є фільтрація шуму зображень [7-10].

Розглянемо основні особливості застосування існуючих фільтрів шуму зображень з метою забезпечення ефективної обробки зображень на етапах сегментації і розпізнавання. При цьому якщо спеціально не обумовлено інше будемо розглядати просторові фільтри просторово некорельованого шуму.

2.1.1 Обчислювальні аспекти використання усереднюючих фільтрів

Найпростішим в застосуванні і обчислювально ефективним засобом згладжування шуму є використання лінійних або зважених фільтрів що усереднюють, наприклад, таких як: середньоарифметичний фільтр, середньогеометричні фільтр, середньогармонічні фільтр і ряд інших фільтрів шуму [1, 2, 6].

Середньоарифметичний фільтр. Знаходження нової згладженої яскравості h пікселя, що фільтрується d_{xy} із застосуванням середньоарифметичного фільтра задається виразом

$$h = \left\lfloor \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} f_i \right\rfloor, \qquad (2.1)$$

де $\{f_i\}_{i=1,...,n}$ – яскравості розглянутих n яскравості розглянутих $O_\varepsilon(x,y)$ пікселя d_{xy}, а $\lfloor\cdot\rfloor$ – операція округлення [2].

Застосування фільтру (2.1) на практиці часто обумовлено його прийнятним згладжуванням шуму внутрішності зображень за умови його дуже високу обчислювальну ефективність в реалізації.

Зауважимо, що згладжування шуму при використанні багатьох фільтрів представляють у вигляді згортки по масці [1-4]

$$h = \lfloor S \rfloor,\ S = S(x,y) = \sum\nolimits_{(\xi,\eta)} f_{x+\xi,y+\eta} \cdot w_{\xi,\eta},\ d_{x+\xi,y+\eta} \in O_\varepsilon(x,y), \quad (2.2)$$

де $w_{\xi,\eta}$ – вагові коефіцієнти маски фільтра, $\sum\nolimits_{(\xi,\eta)} w_{\xi,\eta} = 1$.

Середньогеометричні фільтр. Знаходження нової згладженої яскравості фильтруемого пікселя d_{xy} із застосуванням середньогеометричними фільтра задається виразом

$$h = \left\lfloor \left(\prod\nolimits_{i=1}^{n} f_i\right)^{\frac{1}{n}} \right\rfloor, \quad (2.3)$$

де $\{f_i\}_{i=1,...,n}$ – яскравості розглянутих n пікселів околиці $O_\varepsilon(x,y)$ пікселя d_{xy}, а $\lfloor\cdot\rfloor$ – операція округлення [2].

Хоча застосування цього фільтру і є істотно більш трудомістким, ніж фільтра (2.1), тим не менш, його застосування може бути обумовлено необхідністю збереження дрібних деталей на зображенні, які він пригнічує в меншій мірі, ніж фільтр (2.1) [2].

Середньогармонічний фільтр. Знаходження нової згладженої яскравості h пікселя d_{xy} який фільтрується із застосуванням середньогармонічного фільтра задається виразом

$$h = \left\lfloor \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{f_i}} \right\rfloor, \tag{2.4}$$

де $\{f_i\}_{i=1,...,n}$ – яскравості розглянутих n пікселів околиці $O_\varepsilon(x, y)$ пікселя d_{xy}, а $\lfloor \cdot \rfloor$ – операція округлення [2].

За результатами експериментальних даних вважається, що цей фільтр краще попередніх згладжує імпульсний «білий» і гаусів шум що вкрай важливо для цілей работи [1-3, 5].

Середньоконтргармонічний фільтр. Знаходження нової згладженої яскравості h пікселя d_{xy} із застосуванням середньоконтргармонічного фільтра задається виразом

$$h = \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{n} (f_i)^{q+1}}{\sum_{i=1}^{n} (f_i)^{q}} \right\rfloor, \tag{2.5}$$

де $\{f_i\}_{i=1,...,n}$ – яскравості розглянутих n пікселів околиці $O_\varepsilon(x, y)$ пікселя d_{xy}, q – порядок фільтра, а $\lfloor \cdot \rfloor$ – операція округлення [2]. Застосування цього фільтра в ряді випадків обумовлюється тим, що він кращий за попередні згладжує імпульсні шуми [2].

Якщо говорити в цілому, за результатами експериментальних досліджень вважається, що фільтри (2.1) і (2.3) підходять для фільтрації випадкових шумів типу гауссова, або рівномірного.

Контргармонічні фільтри підходять для фільтрації імпульсного шуму що дуже важливо для цілей роботи. Порівняльний аналіз застосування розглянутих фільтрів наведено в [2].

2.1.2 Обчислювальні аспекти використання фільтрів шуму, які засновані на порядкових статистиках

Фільтри шуму, застосування яких заснована на використанні порядкових статистик, вимагають попереднього упорядкування яскравостей пікселів околиці перед тим, як обчислювати відгук. До цієї групи фільтрів зазвичай відносять медіанний фільтр, фільтр серединної точки, фільтр усіченого середнього, фільтр максимального значення, фільтр мінімального значення і ряд інших. Фільтри цієї групи розглядаються, як правило, в умовах неефективності усереднюються фільтрів (при надмірному розмиття границь зображень об'єктів і ліній) [1-3].

Медіанний фільтр. Знаходження нової згладженої яскравості h фильтруемого пікселя d_{xy} в околиці $O_{\varepsilon}(x, y)$ із застосуванням медіанного фільтра задається виразом

$$h = \text{med}\{f_i\}_{i=1,\dots,n}, \qquad (2.6)$$

де значення відгуку h являє собою медіану ряду яскравостей $\{f_i\}_{i=1,\dots,n}$ пікселів околиці $O_{\varepsilon}(x, y)$ фильтруемого пікселя d_{xy} [1, 2].

За рахунок попереднього сортування яскравостей пікселів ряду $\{f_i\}_{i=1,\dots,n}$ медіанний фільтр реалізує важливу концепцію виключення екстремальних спостережень (в тому числі імпульсних шумів), а за рахунок вибору медіани - він істотно менше згладжує границі зображень, ніж усереднюються фільтри: застосування медіанного фільтра призводить до локального вирівнювання границь за рахунок усунення лінійних компонент границі зображення. При цьому, однак, об'єкти лінійного типу після застосування медіанного фільтру можуть бути згладжені повністю.

Для виявлення найбільш і найменш яскравих пікселів на зображенні в даний час часто використовуються фільтри, засновані на виборі максимального і мінімального значення [1, 2, 9].

Фільтр мінімального значення. Принцип роботи цього фільтра заснований на виборі мінімального значення в околиці

$$h = \min\{f_i\}_{i=1,\ldots,n}. \qquad (2.7)$$

Фільтр максимального значення. Принцип роботи цього фільтра заснований на виборі максимального значення в околиці

$$h = \max\{f_i\}_{i=1,\ldots,n}. \qquad (2.8)$$

Фільтр серединної точки. Знаходження нової згладженої яскравості h фильтруемого пікселя d_{xy} із застосуванням цього фільтра задається виразом

$$h = \left\lfloor \frac{1}{2}\left[\max\{f_i\} + \min\{f_i\}\right] \right\rfloor,\ i = 1,\ldots,n, \qquad (2.9)$$

де $\{f_i\}_{i=1,\ldots,n}$ – яскравості розглянутих n пікселів околиці $O_\varepsilon(x, y)$ пікселя d_{xy}, мінімальне і максимальне значення знайдені по (2.7) та (2.8), відповідно, а $\lfloor \cdot \rfloor$ – операція округлення [2].

Фільтр усіченого середнього. Фільтр працює так: для ряду яркостей $\{f_i\}_{i=1,\ldots,n}$ виводиться в початок ряду k мінімальних, а в кінець k максимальних значень; після цього на множині яркостей $\{f_i\}_{i=1+k,n-k}$ застосовується середньоарифметичний фільтр. Таким чином, після сортування розглянутих яркостей пікселів, знаходження нової згладженої яскравості h фильтруемого пікселя d_{xy} із застосуванням фільтра усіченого середнього задається виразом

$$h = \left\lfloor \frac{1}{n - 2 \cdot k} \sum_{i=1+k}^{n-k} f_i \right\rfloor, \ 2k < n. \qquad (2.10)$$

Шляхом управління параметром фільтр усіченого середнього (2.10) дозволяє: 1) адаптуватися до рівня зашумлення за рахунок виключення екстремальних спостережень, і 2) при якісному згладжуванні внутрішності знижувати ступінь згладжування границь зображень і ліній. При граничних значеннях фільтр усіченого середнього буде середньоарифметичним (при $k = 0$), або медіанним (при $k = (n - 1)/2$) [2].

2.1.3 Системні аспекти застосування фільтрів шуму

Переваги усереднюються фільтрів полягають у тому, що при досить високій обчислювальної ефективності вони дозволяють практично згладити биття яскравості, що виникають із-за локальної неоднорідності поверхні об’єктів і впливу шуму з метою наближення розподілу яскравості зображень до середнього в регресійному сенсі.

При цьому виконання згладжування за рахунок усереднення служить також для усунення дрібних деталей на зображенні, для усунення ефекту накладання зображень для об’єктів на грані роздільної здатності, а також для усунення гілок границь з метою вирівнювання границь зображень в цілому.

Разом з тим застосування фільтрів розглянутого класу прийнятно згладжує лише внутрішність зображень об’єктів; границь між зображеннями об’єктів та лінії при цьому згладжуються незадовільно через спільного усереднення яскравостей об’єкта і фону, накривають маскою фільтра в області над ділянкою об’єкта. Зокрема об’єкти лінійного типу після фільтрації можуть бути згладжені повністю.

У зв’язку з цим виникає необхідність в розробці адаптивного фільтра шуму, застосування якого, при збереженні зазначених вище достоїнств не приводить до згладжування границь зображень і ліній. Першим кроком в цьому відношенні є побудова медіанного фільтра і, потім, фільтра усіченого середнього. Оскільки ключове завдання, яке вирішується в ході фільтрації шуму - максимальне наближення яскравостей пікселів об’єкта до середньої яскравості в околиці природною є комбінація середньоарифметичного і медіанного фільтрів у вигляді фільтра усіченого середнього. Однак і цей фільтр, як показують результати експериментальних досліджень, не є оптимальним по ряду показників [1, 2, 6].

Тому в даний час актуальною є задача розробки уніфікованої (щодо топологічного типу об’єктів) системи адаптивних фільтрів шуму, які дозволяють не тільки виключати фіксоване число екстремальних спостережень, а й враховувати особливості розподілу яскравості зображень об’єктів, а також положення їх границь.

2.1.4 Особливості використання адаптивних фільтрів шуму

Під адаптивними фільтрами будемо розуміти такі фільтри, параметри яких можуть змінюватися в процесі фільтрації в залежності від глобальних і локальних властивостей зображення.

Адаптивний локальний фільтр. Нова згладжена яскравість h пікселя d_{xy} із застосуванням адаптивного локального фільтра шуму задається таким виразом

$$h(x, y) = \begin{cases} f(x, y) - \dfrac{\sigma^2}{\sigma_L^2} \cdot \left[f(x, y) - M_L \right], & \text{if } \sigma^2 \le \sigma_L^2 , \\ M_L , & \text{otherwise} , \end{cases} \qquad (2.11)$$

де σ^2 – дисперсія шуму (оцінюється заздалегідь на етапі ідентифікації параметрів закону розподілу шуму), M_L та σ_L^2 – локальне середнє і дисперсія в околиці пікселя (x, y), а $f(x, y)$ та $h(x, y)$ – яскравості викривленого і відновленого зображень [2].

Беручи до уваги випадковий характер виникнення шуму, основною моделлю просторово некорельовані шуму зображень в даний час є його щільність розподілу. Основні статистичні моделі просторово некорельовані шуму на зображеннях, що використовуються в даний час в областях, пов’язаних з обробкою зображень, а також методи їх структурної та параметричної ідентифікації, включаючи оцінювання дисперсії шуму σ^2, описані в [2]. В цьому відношенні зауважимо, що при вирішенні актуальних практичних завдань найбільш використовуваної в даний час є Гаусова модель шуму

При відомої дисперсії шуму σ^2, фільтр (2.20) у багатьох практично значущих випадках дозволяє адекватно згладжувати зображення, не спотворюючи їх границь за рахунок використання співвідношення дисперсій σ^2 / σ_L^2.

Однак в той же самий час на практиці може бути не відомо значення σ^2; крім того, співвідношення дисперсій σ^2 / σ_L^2 може давати малі значення не тільки для границь об’єктів і ліній, а й для імпульсного шуму. У такій ситуації імпульсний шум не буде згладжений.

Фільтр Лі. Для мінімізації ефекту згладжування границь зображень в [10] запропоновано таку технологія фільтрації

$$h(x, y) = f(x, y) + [1 - \alpha(x, y)], \tag{2.12}$$

$$\alpha(x,y)=\max\left\{0,\ \frac{\sigma_L^2(x,y)-\sigma^2}{\sigma_L^2(x,y)}\right\}, \tag{2.13}$$

де σ^2 – дисперсія шуму (оцінюється заздалегідь на етапі ідентифікації параметрів закону розподілу шуму), σ_L^2 – локальна дисперсія в околиці пікселя (x,y), а $f(x,y)$ та $h(x,y)$ – яскравості викривленого і відновленого зображень.

Таким чином, фільтр Лі виконує згладжування лише тоді, коли сигнал слабо відрізняється від шуму, і залишає значення яскравості незмінними, коли виявляється наявність сильного сигналу. У такій ситуації фільтри не згладжується імпульсний шум, а також шум в околиці границі зображень об'єктів і ліній [10].

Сигма-фільтр. Для мінімізації ефекту згладжування границь зображень в [10] запропоновано формувати маску фільтра відповідно до особливостей зображення в околиці дії фільтра. В цьому відношенні сигма-фільтр (σ-фильтр) виконує усереднення

$$h(x,y)=\sum_{(\xi,\eta)\in D} w(\xi,\eta)\cdot f(x+\xi,y+\eta), \tag{2.14}$$

де розглядаються пікселі в $D\subset O_\varepsilon(x,y)$ визначаються за правилом

$$D=\{(\xi,\eta):|f(x+\xi,y+\eta)-f(x,y)|\le k\cdot\sigma\}. \tag{2.15}$$

Основний недолік цього фільтра полягають в не згладжуванні імпульсного шуму зображень. Однак при модифікації цього фільтра, за умови заміни яскравості $f(x,y)$ на математичне очікування

$$\frac{1}{n}\sum_{(\xi,\eta)\in D} f(x+\xi,y+\eta),$$

в (2.15) можна отримати значне поліпшення якості фільтрації шуму за рахунок виключення екстремальних спостережень в околиці дії фільтра шуму. Цей аспект буде врахований в наступному розділі при побудові адаптивного методу фільтрації шуму.

Адаптивний медіанний фільтр. Введемо в розгляд такі позначення [2]:

1) z_{min} – мінімальна яскравість в околиці;

2) z_{max} – максимальна яскравість в околиці;

3) z_{med} – медіана яскравості в околиці;

4) z_{xy} – яскравість в пікселі (x, y);

5) S – розмір околиці;

6) S_{max} – максимальний розмір околиці.

Алгоритм 2.1. Адаптивної медіанної фільтрації складається з двох гілок (гілка A та гілка B), і його дія полягає в наступному [2]:

Гілка A: $A1 = z_{med} - z_{min}$;

$A2 = z_{med} - z_{max}$;

якщо $A1 > 0$ і $A2 < 0$, переходимо до гілки B,

інакше збільшити розмірність околиці, $S = S + \Delta$;

якщо $S \le S_{max}$, повторити гілку A,

інакше нова яскравість оцінюється так: $h(x, y) = z_{xy}$.

Гілка B: $B1 = z_{xy} - z_{min}$;

$B2 = z_{xy} - z_{max}$;

якщо $B1 > 0$ і $B2 < 0$, тоді $h(x, y) = z_{xy}$,

інакше нова яскравість оцінюється так: $h(x, y) = z_{med}$.

Особливості цього фільтра розглянуті в [2]; його основний позитивною рисою є можливість фільтрації групового шуму за рахунок розгляду збільшеною околиці розглянутого пікселя. Основний недолік цього фільтра полягають в не згладжуванні імпульсного шуму в області над ділянкою, якщо яскравість граничного пікселя об’єкта спотворюється шумом в сторону яскравості фону.

Адаптивний лінійний фільтр. Для фільтрації шуму при прийнятній якості згладжування не тільки внутрішності, а й над ділянкою об’єкта в [6] був запропонований фільтр, який для цілей згладжування використовував таку маску фільтра, яка представляється що виходить з фільтрованої пікселя x_i (центру маски O) дискретним чином відрізка фіксованою довжини.

Особливості практичного застосування цього фільтра полягають у тому, що використання лінійних масок фільтра дозволяє адаптуватися до розподілу яскравості як лінійних, так і регіональних зображень, як для внутрішності зображень, так і для їх ламаних границь. Однак для ліній високої кривизни необхідно доповнювати систему прямолінійних масок ламати, які враховують форму розглянутих ліній. У такій ситуації кількість масок і трудомісткість фільтрації зростає нелінійно [3].

Для підвищення якості фільтрації шуму зображень і зниження трудомісткості фільтрації при використанні досить великого числа масок фільтра в [6] пропонується алгоритм мультіадаптівной фільтрації шуму зображень.

Основною перевагою розглянутих фільтрів [6] є їх адаптація до положення ліній рівня за рахунок використання лінійних масок обертання і, отже, не згладжування границь зображень. Основний недолік таких фільтрів - це нелінійний зростання трудомісткості застосування при зростанні розмірності маски фільтра

2.2 Загальні проблеми застосування адаптивних фільтрів шуму та шляхи їх вирішення

Хоча застосування розглянутих вище адаптивних фільтрів і дозволяє вирішити ряд проблем згладжування шуму зображень, які не можуть бути вирішені застосуванням неадаптівних фільтрів, тим не менш, адаптивні фільтри більш трудомісткі в застосуванні. У ряді випадків зростання трудомісткості фільтрації є цілком виправданим, оскільки за рахунок згладжування шуму забезпечується стійкість сегментація зображень [1]. Однак це не завжди так, оскільки застосування адаптивних фільтрів шуму не завжди дозволяє вирішити актуальну проблему адекватного згладжування шуму в області границь зображень об'єктів.

Побудова адаптивних фільтрів в літературі [1, 2, 6] засноване на припущенні, що поведінка фільтра має змінюватися в залежності від статистичних властивостей зображення в області дії фільтра. Однак адекватна оцінка властивостей зображення в області дії фільтра і, тим більше, її співвіднесення з тією чи іншою ситуацією зашумлення зображення може представляти досить серйозну проблему.

В цьому відношенні базову проблему може представляти адекватна ідентифікація моделі шуму, використовуваної для цілей адаптації через нестачу експериментальних даних.

Крім того, проблему може представляти побудова адекватного критерію дискримінації фрагмента зображення в даній області дії фільтра на область границі і внутрішність, з урахуванням варіацій фотометричних параметрів знімка і дії шуму [6], тим більше, в умовах автоматичного виявлення і супроводу, що головним чином обумовлюється схожістю оцінок розподілу яскравості для границі зображення і імпульсних шумів. При цьому, як показує аналіз сучасної літератури, згладжування шуму, як правило, проводиться не вибірково, тобто без попереднього застосування критеріїв оцінки типу і параметрів фільтрованої шуму (адитивного, мультиплікативного, або імпульсного характеру) [4]. В цьому відношенні проблему може представляти побудова адекватного критерію дискримінації типу шуму в даній області дії фільтра.

Отже, для поліпшення якості згладжування попередньо фільтрації доцільно: 1) оцінити тип області дії фільтра (внутрішність, границя або лінія), 2) знайти і відзначити яскравості пікселів, що відповідають, принаймні, імпульсним шумів [1, 2, 6] для того, щоб виключити їх з подальшого розгляду, оскільки застосування будь-якого фільтра шуму обов’язково повинно бути пов’язане з виключенням екстремальних спостережень попередньо згладжування.

Найважливіші класи просторових згладжуючих фільтрів характеризуються прийнятним згладжуванням внутрішності, однак при цьому вони характеризуються неприйнятним згладжуванням границь зображень і ліній через використання двовимірних масок [6]. В цьому відношенні для поліпшення якості адаптації і згладжування границь зображень і ліній попередньо фільтрації може бути доцільним використовувати лінійні маски обертання для адаптації положення маски фільтра до положення лінії рівня зображення об’єкта (фону).

При цьому ряд проблем адекватної фільтрації групового шуму може бути вирішене за рахунок використання варіювання розмірності маски фільтра, як в адаптивному медіанному фільтрі.

Головним системним недоліком фільтрації шуму в даний час є відсутність єдиної комплексної моделі, методу і технології фільтрації шуму зображень, що включає етапи:

1) ідентифікації та виключення екстремальних спостережень;

2) ідентифікації типу розглянутого фрагмента зображення;

3) фільтрації шуму, що дозволяє адекватно згладжувати шум, як внутрішнб, так і зовнішню частину зображень об’єктів і ліній.

Таким чином, актуальним є побудова такої єдиної комплексної моделі, методу і технології фільтрації шуму зображень.

3 АДАПТИВНА ПРОСТОРОВА ФІЛЬТРАЦІЯ ІМПУЛЬСНОГО ШУМУ ЗОБРАЖЕННЯ

3.1 Статистичні методи виключення екстремальних спостережень

Якщо безліч яркостей пікселів околиці є однорідним, тобто належать або об’єкту, або фону і, якщо в даній околиці немає імпульсного шуму, тоді застосування фільтра, що згладжує до такої однорідної околиці є адекватним.

Однак якщо умова однорідності порушується (через те, що одна частина пікселів околиці належать об’єкту, а інша частина фону або, якщо в околиці спостерігається імпульсний шум), тоді застосування фільтра, що згладжує до неоднорідною околиці є неадекватним.

Найбільша проблема при цьому полягає в тому, що якщо одна частина пікселів околиці належать об’єкту, а інша частина фону, тоді при фільтрації відбувається згладжування над ділянкою, що згодом може приводити до нестійкості методів сегментації зображень об’єктів.

Таким чином, актуальною є розробка ефективного критерію і методу виключення екстремальних спостережень, застосування якого дозволить виключити зі сфери (околиці) дії фільтра нетипові яскравості з метою застосування фільтра, що згладжує на однорідному безлічі яркостей пікселів. В цьому відношенні актуальним є вирішення таких двох основних завдань.

Завдання 3.1. Розробити метод виключення екстремальних спостережень в околиці дії фільтра.

Завдання 3.2. Розробити метод виключення таких екстремальних спостережень в околиці дії фільтра, які ототожнюються з імпульсним шумом зображення.

Розглянемо рішення задачі 3.1 на основі застосування статистичних критеріїв виключення екстремальних спостережень [1, 2, 6].

Припустимо, що результати спостережень (значень яскравості в заданій околиці дії фільтра) представляються множиною точок

$$X = \{x_\xi\}_{\xi=1,...,n} = (x_1, x_2, ..., x_n), \quad (3.1)$$

і висунемо гіпотезу про те, що серед них присутні екстремальні спостереження, які необхідно виключити з (3.1) що не типові.

При незначних варіаціях яскравості пікселів однорідної (містить пікселі якого об'єкта, або фону) околиці наближено вважається, що це спостерігається розподіл яскравості описується нормальним законом розподілу.

3.1.1 Метод виключення нетипових екстремальних спостережень за $k \cdot \sigma$-критерієм

Для виключення одиночних нетипових екстремальних спостережень в даний час використовується $k \cdot \sigma$-критерій [8], алгоритм застосування якого полягає в наступному.

Критерій винятку нетипового максимального спостереження x_n.

Крок 1. Спостереження (3.1) упорядковуються за зростанням, таким чином, щоб виконувалося відношення порядку

$$x_1 \le x_2 \le ... \le x_n. \quad (3.2)$$

Крок 2. Для ряду (3.2) оцінюються значення математичного очікування m і дисперсії σ^2

$$m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \quad (3.3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - m)^2 . \qquad (3.4)$$

Крок 3. Проводиться перевірка максимального значення x_n ряду (3.2) на екстремальність. Так, якщо виконується умова

$$(x_n - m) > k \cdot \sigma , \qquad (3.5)$$

тоді вважається, що гіпотеза H підтвердилася

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } (x_n - m) > k \cdot \sigma, \\ 0, & \text{else}, \end{cases} \qquad (3.6)$$

і спостереження x_n необхідно виключити з (3.2) як нетипове.

Крок 4. Завершення.

Виключення мінімального спостереження x_1 производится аналогично, за винятком того, що на кроці 3 проводиться перевірка значення x_1 ряду (3.2) на проводиться перевірка значення. Якщо при цьому виконується умова

$$(m - x_1) > k \cdot \sigma , \qquad (3.7)$$

Тоді вважається, що гіпотеза H підтвердилася

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } (m - x_1) > k \cdot \sigma, \\ 0, & \text{else}, \end{cases} \qquad (3.8)$$

і спостереження x_1 необхідно виключити з (3.2) як нетипове.

Описаний $k \cdot \sigma$-критерій при фільтрації може застосовуватися в рамках будь-якого методу фільтрації в якості допоміжного, або самостійно. Перша ситуація буде описана в роботі нижче.

Для можливості самостійного застосування $k \cdot \sigma$-критерія пропонується наступний метод виключення нетипових екстремальних спостережень.

Метод 3.1. Метод виключення нетипових екстремальних спостережень за $k \cdot \sigma$-критерієм ($k \cdot \sigma$-метод).

Крок 1. Будується упорядкований за зростанямю ряд (3.2); задаються значення параметра k, індекси крайніх елементів $p = 1$, $q = n$, і число n розглянутих елементів ряду (3.2). При цьому вважається, що $p < q$.

Крок 2. Відповідно (3.3) і (3.4) оцінюють математичне очікування m та дисперсію σ^2 розподілу (3.2), де $i = p,...,q$.

Крок 3. Застосовуються критерії (3.5) і (3.7).

Якщо нетипових екстремальних спостережень не виявлено, перехід до кроку 5.

Якщо виявлено тільки максимальне нетипове спостереження x_q, то $q = q - 1$, $n = n - 1$, перехід до кроку 4. Якщо виявлено тільки мінімальне нетипове спостереження x_p, то $p = p + 1$, $n = n - 1$, перехід до кроку 4.

Якщо виявлено два нетипових спостереження x_p і x_q, тоді корекція індексів крайніх елементів ряду (3.2) визначається за правилом

$$\begin{cases} p = p + 1, & \text{if } (x_q - m) < (m - x_p), \\ q = q - 1, & \text{else}, \end{cases} \tag{3.9}$$

якщо $n = n - 1$, то перехід до кроку 4.

Крок 4. Якщо $p = q$, то перехід до кроку 5, інакше до кроку 2.

Крок 5. Завершення.

3.1.2 Метод виключення нетипових екстремальних спостережень за Gr -критерієм

Для виключення одиночних нетипових екстремальних спостережень в якості альтернативи $k \cdot \sigma$- критерієм в даний час досить широко застосовується відомий критерій Граббса, алгоритм застосування якого полягає в наступному.

Критерій винятку нетипового максимального спостереження x_n.

Кроки 1 і 2 цього алгоритму такі ж, як і для алгоритму застосування $k \cdot \sigma$-критерію.

На третьому кроці критерію Граббса знаходиться статистика

$$T_n = \frac{x_n - m}{\sigma}, \qquad (3.10)$$

і для заданого рівня значущості α – критичне (граничне) значення величини $T_{n,\alpha}$. Якщо при цьому виконується умова

$$T_n > T_{n,\alpha}, \qquad (3.11)$$

тоді гіпотеза H, що перевіряється приймається

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } (T_n > T_{n,\alpha}), \\ 0, & \text{else}, \end{cases} \qquad (3.12)$$

і вважається, що на рівні значущості α найбільше спостереження x_n в ряду значень (3.2) є екстремальним, і його доцільно виключити як помилкове.

Виключення мінімального нетипового спостереження x_1 проводиться аналогічно, за винятком того, що при виконанні кроку 3 проводиться перевірка мінімального значення x_1 ряду (3.2) на екстремальність.

Так, на третьому кроці алгоритма застосування критерія Граббса знаходиться статистика

$$T_1 = \frac{m - x_1}{\sigma}, \tag{3.13}$$

і для заданого рівня значущості α – критичне (граничне) значення величини $T_{n,\alpha}$. Якщо при цьому виконується умова

$$T_1 > T_{n,\alpha}, \tag{3.14}$$

Тоді гіпотеза H, що перевіряється приймається

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } (T_1 > T_{n,\alpha}), \\ 0, & \text{else}, \end{cases} \tag{3.15}$$

і вважається, що на рівні значущості α найменше спостереження x_1 в (3.2) є екстремальним, і його доцільно виключити як помилкове.

Критичні значення $T_{n,\alpha}$, для різних сполучень числа спостережень n і рівня значущості α даються в табличному вигляді, наприклад, в джерелах. Оскільки статистики T_1 та T_n мають однакове розподіл, для знаходження критичних значень $T_{n,\alpha}$ використовується одна і та ж таблиця значень. Також, як і $k \cdot \sigma$-критерій, критерій Граббса (Gr-критерій) може застосовуватися в рамках будь-якого методу фільтрації в якості допоміжного, або самостійно.

Метод 3.2. Метод виключення нетипових екстремальних спостережень за Gr-критерієм (Gr-метод). За структурою цей метод аналогічний $k \cdot \sigma$-методу. Відмінності Gr-метода від $k \cdot \sigma$-методу полягають у тому, що: 1) на кроці 1 замість параметра k задається величина α; 2) на кроці 3 замість критеріїв (3.5) та (3.7) застосовуються відповідні їм критерії (3.11) та (3.14).

Результати застосування і модифікації Gr-методу повністю аналогічні результатам застосування $k \cdot \sigma$-методу.

Особливості оцінювання параметра α і практичного використання Gr-критерію та Gr-методу для вирішення прикладних завдань будуть наведені нижче.

3.1.3 Метод виключення нетипових екстремальних спостережень за TM-критерієм

В умовах великої кількості спостережень n замість $k \cdot \sigma$-критерія і Gr-критерія для виявлення групи екстремальних спостережень обсягом s може бути доцільно застосовувати критерій Тітьена-Мура (TM-критерій), так як послідовне застосування критерію або критерію може бути дуже трудомістким, і/або може не давати адекватного результату.

Критерій виключення s, $0 < s < n$, нетипових найбільших спостережень $x_{n-s+1},..., x_n$. У цьому випадку вирішальне правило засноване на розгляді статистики виду

$$L_s = \sum_{j=1}^{n-s}(x_j - m_s)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n}(x_i - m)^2, \qquad (3.16)$$

де значення m оцінюється за формулою (3.3), а математичне сподівання m_s оцінюється за формулою

$$m_s = \frac{1}{n-s}\sum_{j=1}^{n-s} x_j\,, \tag{3.17}$$

а також критичного значення $L_{\alpha,n,s}$ критерію Тітьєна-Мура [65], відповідно до рівня значущості α. У такій ситуації, якщо виконується умова

$$L_s < L_{\alpha,n,s}\,, \tag{3.18}$$

тоді гіпотеза, що перевіряється H

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } (L_s < L_{\alpha,n,s}), \\ 0, & \text{else}, \end{cases} \tag{3.19}$$

про екстремальності приймається, і на рівні значущості α група з s найбільших спостережень $x_{n-s+1},...,x_n$ у (3.2) вважається нетипово екстремальної, і її доцільно виключити як помилкову [6]. Критерій виключення s нетипових найменших спостережень $x_1,...,x_{1+s-1}$. У цьому випадку вирішальне правило засноване на розгляді вибіркової статистики

$$L_s = \sum_{j=1+s}^{n}(x_j - m_s)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n}(x_i - m)^2\,, \tag{3.20}$$

де значення m оцінюється за (3.3), а значення m_s оцінюється так

$$m_s = \frac{1}{n-s}\sum_{j=1+s}^{n} x_j\,, \tag{3.21}$$

і критичне значенняи $L_{\alpha,n,s}$ критерію Тітьєна-Мура, відповідає рівню α.

У такій ситуації, якщо виконується умова (3.18), то перевіряється гіпотеза H (3.19) про екстремальності приймається, і на рівні значущості α група з s найменших спостережень $x_1,...,x_{1+s-1}$ у (3.2), є нетипово екстремальної, і її доцільно виключити як помилкову [6].

Метод 3.3. Метод виключення нетипових груп екстремальних спостережень за TM-критерієм (TM-метод).

Крок 1. Будується упорядкований за зростанням ряд (3.2); задаються значення параметра α, індекси крайніх елементів $p=1$, $q=n$, і число n елементів ряду (3.2). При цьому вважається, що $p<q$. Крім того, задається коефіцієнт μ, $0<\mu\le 0.5$, який служить для визначення граничного розміру t групи спостережень, що виключається. Цей коефіцієнт задається виходячи з умови, що число пікселів исключаемой групи не повинна перевищувати половини від загального числа пікселів розглянутого ряду.

Крок 2. Здається обмеження t на граничний розмір групи спостережень, що виключається

$$t=\begin{cases}1, & \text{if } (\lfloor \mu\cdot n\rfloor=0),\\ \lfloor \mu\cdot n\rfloor, & \text{else},\end{cases} \tag{3.22}$$

де $\lfloor\cdot\rfloor$ – операція взяття цілої частини.

Крок 3. Задаються індекси $\xi=p$ і $\eta=q$, що визначають розглянуті на предмет виключення групи спостережень $[p,\xi]$ и $[\eta,q]$, а також розмір $s=1$ для кожної з цих двох груп. Для заданого числа знаходимо дисперсію D^2, (при оцінюванні якої вважається $i=p,...,q$), яка потім буде використовуватися в знаменник виразів (3.16) та (3.20).

Крок 4. Відповідно (3.20) та (3.16) оцінюються статистики $L_{s\min}$ та $L_{s\max}$, де дисперсія в знаменнику D^2 вже розрахована, а дисперсії в чисельнику розраховуються за умови, що $j_{\min}=p+s,...,q$, $j_{\max}=p,...,q-s$.

Крок 5. Застосування критерію (3.18).

Якщо нетипових екстремальних спостережень не виявлено, вважається $\xi = \xi + 1$, $\eta = \eta - 1$, $s = s + 1$, перехід до кроку 6.

Якщо виявлена тільки група максимальних нетипових спостережень $x_{\eta},..., x_{q}$, вважається $q = \eta - 1$, $n = n - s$, перехід до кроку 7.

Якщо виявлена тільки група мінімальних нетипових спостережень $x_{p},..., x_{\xi}$, вважається $p = \xi + 1$, $n = n - s$, перехід до кроку 7.

Якщо виявлено дві нетипових групи спостережень $x_{\eta},..., x_{q}$ та $x_{p},..., x_{\xi}$, тоді корекція індексів крайніх елементів ряду (3.2) визначається за правилом мінімізації дисперсії залишилася групи спостережень

$$\begin{cases} p = \xi + 1, & \text{if } (L_{s\min} < L_{s\max}), \\ q = \eta - 1, & \text{else}, \end{cases} \qquad (3.23)$$

вважається $n = n - s$, перехід до кроку 7.

Крок 6. Якщо $s \le t$, тоді перехід до кроку 4, інакше до кроку 8.

Крок 7. Якщо $n \ge 2$, тоді перехід до кроку 2, інакше до кроку 8.

Крок 8. Завершення.

3.1.4 Критерій ідентифікації неоднорідної області зображення

Для виявлення неоднорідною області (околиці) зображення пропонується наступний критерій ідентифікації.

Критерій 3.1. Критерій ідентифікації неоднорідною околиці зображення. Отримаємо розподіл виду (3.1) для дисперсій $x_i = \sigma_i$ у всіх положеннях маски фільтру на зображенні.

Відповідно (3.3) і (3.4) знайдемо оцінки математичного очікування m_{σ} і дисперсії s_{σ}^2 ряду дисперсій виду (3.1). Будемо вважати, що значення дисперсії в такому ряду (3.1) значимо ухиляються від середнього значення m_σ, якщо виконується умова

$$(x_i - m_\sigma) > k_\sigma \cdot s_\sigma. \tag{3.24}$$

Відповідно, при проведенні фільтрації шуму неоднорідними будемо вважати тільки такі околиці, для яких виконується критерій (3.24); в іншому випадку будемо вважати, що розподіл яскравості в околиці дії фільтра є однорідним.

Для посилення дисперсії такий околиці, в центрі $d(\xi,\eta)$ якої спостерігається імпульсний шум, дисперсії $x_i = \sigma_i$ доцільно оцінювати за формулою

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}(x_i - x_j)^2,\ i \neq j, \tag{3.25}$$

де x_j – яскравість пікселя $d(\xi,\eta)$.

Застосування критерію (3.24) призведе до ідентифікації околиць з імпульсним шумом, а також околиць із високим рівнем зашумлення і околиць зі значним перепадом яскравості, розташованих на границі з фоном.

Уже в подальшому необхідно буде класифікувати тип околиці, ідентифікованої за критерієм (3.24), з метою прийняття адекватного рішення про застосування того, чи іншого методу фільтрації в цій конкретній околиці.

При вирішенні більшості практичних задач число положень маски фільтра з неоднорідним розподілом яскравості, ідентифікованих за критерієм (3.24), мінімум на два порядки менше числа положень маски з однорідним розподілом яскравості.

Застосування критерію (3.24) для одного положення маски фільтра вимагає за порядком величини $T(n) = 2 \cdot n$ операцій порівняння.

В таких умовах загальна трудомісткість застосування статистичних методів виключення екстремальних спостережень за порядком величини може бути зменшена з рівня $T(n) = n^2$ до рівня $T(n) = 2 \cdot n + n^2 / 100$ операцій порівняння для одного пікселя зображення.

Для маски 3×3, $n = 9$, середня оцінка трудомісткості аналізу розподілу яскравості для одного положення маски складе величину

$$T(9) = 2 \cdot 9 + 0.81 = 18 + 0.81 \text{ операцій порівняння,}$$

а для маски 5×5, $n = 25$, середня оцінка трудомісткості складе величину

$$T(25) = 2 \cdot 25 + 6.25 = 50 + 6.25 \text{ операцій порівняння.}$$

Таким чином, середня трудомісткість застосування статистичного методу виключення екстремального спостереження після застосування критерію (3.24) для одного положення маски фільтра зажадає за порядком величини $T(n) = 2 \cdot n$ операцій порівняння.

3.2 Побудова детермінованих методів виключення екстремальних спостережень

Нестійкість методів сегментації зображень, як правило, обумовлюється наявністю імпульсного шуму на зображенні, для виявлення якого в даний час в якості основних застосовуються детерміновані критерії виключення екстремальних спостережень [1, 2, 6]. Розглянемо особливості використання таких критеріїв для побудови методів виключення точкових і групових імпульсних шумів.

3.2.1 Застосування критерію ідентифікації точкового імпульсного шуму

Для побудови уніфікованого підходу до застосування статистичних і детермінованих критеріїв виключення екстремальних спостережень будемо вважати, що вихідні дані представляються впорядкованим за зростанням рядом яскравостей виду (3.2).

Отже, припустимо, що для деякого пікселя $d(\xi, \eta)$ визначена його $\sqrt{2}$-околиця $O_{\sqrt{2}}(d(\xi, \eta))$, розмірністю 3×3, яскравості пікселів якої представлені рядом виду (3.2), і висунемо гіпотезу H про те, що серед яскравостей ряду (3.2) присутні екстремальні спостереження, що відповідають імпульсного шуму, які необхідно виключити як нетипові.

Для виявлення максимального точкового імпульсного шуму в пікселі $d(\xi, \eta)$ перевіряється виконання умови

$$\left[f(\xi, \eta) = x_n\right] \wedge \left[\left(x_n - x_{n-1}\right) > T\right]. \qquad (3.26)$$

Якщо умова (3.26) виконується, тоді вважається, що гіпотеза підтвердилася

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } \left[f(\xi, \eta) = x_n\right] \wedge \left[\left(x_n - x_{n-1}\right) > T\right], \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \qquad (3.27)$$

і спостереження $f(\xi, \eta) = x_n$ необхідно виключити з (3.2) як нетипове.

Відповідно для виявлення мінімального точкового імпульсного шуму в пікселі $d(\xi, \eta)$ перевіряється виконання умови

$$\left[f(\xi, \eta) = x_1\right] \wedge \left[\left(x_2 - x_1\right) > T\right]. \qquad (3.28)$$

Якщо умова (3.28) виконується, тоді вважається, що гіпотеза H підтвердилася

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } \left[f(\xi,\eta) = x_1\right] \wedge \left[(x_2 - x_1) > T\right], \\ 0, & \text{else}, \end{cases} \tag{3.29}$$

і спостереження $f(\xi,\eta) = x_1$ необхідно виключити з (3.2) як нетипове.

Назвемо описаний пороговий критерій Th -критерієм.

3.2.2 Застосування критерію ідентифікації групового імпульсного шуму

Під груповим імпульсним шумом будемо розуміти зв'язну множину пікселів площею s, $s \le s^*$, екстремальну за заданим критерієм.

Виходячи з аналізу яскравості і розмірів спостережуваних групових шумів на зображеннях, якщо спеціально не обумовлено інше, будемо вважати, що:

1) пікселі групового імпульсного шуму, що розглядаються окремо, є імпульсними шумами по відношенню до не імпульсних шумів в своїй околиці, що може бути встановлено з використанням критеріїв (3.26) і (3.28);

2) площа s групового імпульсного шуму не перевищує 3, $1 < s \le 3$;

3) груповий імпульсний шум може бути локалізований в околиці $O_\varepsilon(d(\xi,\eta))$, $\varepsilon = \sqrt{2}$.

Припустимо, що в рамках околиці $O_\varepsilon(d(\xi,\eta))$ задано зв'язна множина G з s пікселів. Побудуємо $\sqrt{2}$-околицю границі множини G, і видалимо з неї пікселі множини G.

Знайдемо мінімальну яскравість x_G пікселя множини G і максимальну яскравість x_H пікселя множини H. В таких умовах для виявлення максимального групового імпульсного шуму G, локалізованого в околиці $O_{\varepsilon}(d(\xi, \eta))$, перевіряється виконання умови

$$[x_G > x_H] \wedge [(x_G - x_H) > T]. \tag{3.30}$$

Якщо умова (3.30) виконується, тоді вважається, що гіпотеза H підтвердилася

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } [x_G > x_H] \wedge [(x_G - x_H) > T], \\ 0, & \text{else}, \end{cases} \tag{3.31}$$

і множину G необхідно виключити як нетипову.

Для виявлення мінімального групового імпульсного шуму знайдемо максимальну яскравість x_G пікселя множини G, мінімальну яскравість x_H множини H і перевіримо виконання умови

$$[x_G < x_H] \wedge [(x_H - x_G) > T]. \tag{3.32}$$

Якщо умова (3.32) виконується, тоді вважається, що гіпотеза H підтвердилася

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } [x_G < x_H] \wedge [(x_H - x_G) > T], \\ 0, & \text{else}, \end{cases} \tag{3.33}$$

і множину G необхідно виключити як нетипову.

Назвемо описаний пороговий критерій Ths-критерієм. Для можливості застосування запропонованих критеріїв пропонується наступний метод виключення імпульсного шуму.

Метод 3.4. Уніфікований метод виключення одиночного і групового імпульсного шуму площею s локалізованого в околиці $O_\varepsilon(d(\xi,\eta))$, $\varepsilon=\sqrt{2}$, з площею s_ε, $s_{\sqrt{2}}=9$, $s \le s^* \le s_\varepsilon$ (Ths-метод).

Якщо піксель $d(\xi,\eta)$ вхідного зображення відзначений як виключений, перехід до кроку 7. В іншому випадку будується упорядкований по зростанню ряд яскравостей пікселів околиці $O_\varepsilon(d(\xi,\eta))$ виду (3.2).

Етап 1. Виключення максимального імпульсного шуму.

Крок 1. Множина G формується з таких пікселів околиці $O_\varepsilon(d(\xi,\eta))$, яскравість яких не нижче яскравості $f(\xi,\eta)$ центрального пікселя цієї околиці; визначається площа s множини G.

Крок 2. Якщо виконується умова $s \le s^*$, тоді перехід до кроку 3, а інакше – до кроку 4.

Крок 3. Визначається мінімальна яскравість $x_G = x_{n-s+1}$ пікселя множини G; будується множина H і визначається максимальна яскравість x_H пікселя множини H.

Якщо виконується умова (3.30), тоді пікселі множини G відзначаються як виключені, перехід до кроку 7. Інакше перехід до кроку 4.

Етап 2. Виключення мінімального імпульсного шуму.

Крок 4. Множина G формується з таких пікселів околиці $O_\varepsilon(d(\xi,\eta))$, яскравість яких не вище яскравості $f(\xi,\eta)$ центрального пікселя цієї околиці; визначається площа s множини G.

Крок 5. Якщо виконується обмеження $s \le s^*$, тоді перехід до кроку 6, а інакше – до кроку 7.

Крок 6. Визначається максимальна яскравість $x_G = x_{1+s-1}$ пікселя множини G; будується множина H і визначається мінімальна яскравість x_H пікселя множини H. Якщо виконується умова (3.32), тоді пікселі множини G відзначаються як виключені.

Крок 7. Кінець.

Після застосування Ths-методу координати виключених пікселів зберігаються, а самі виключені пікселі відзначаються для того, щоб не проводити повторних виключень. Запропонований Ths-метод є універсальним в тому сенсі, що з його застосуванням можна відфільтрувати як одиночний, так і груповий імпульсний шум.

При вирішенні задач фільтрації і згладжування шуму, детерміновані критерії та методи будуть використовуватися в якості основних для ідентифікації одиночних і групових імпульсних шумів, після застосування критерію (3.24), що дозволяє оперативно ідентифікувати ті околиці вхідного зображення, де висока ймовірність знаходження імпульсного шуму.

3.3 Побудова методу адаптивної фільтрації імпульсного шуму

Фільтрація шуму, яка виконується на етапі попередньої обробки вхідного зображення [1, 2], служить, головним чином, для того, щоб згладити такий шум, наявність якого призводить до нестійкості сегментації зображень [6]. Тому при проведенні фільтрації, як правило, потрібно виявляти і згладжувати імпульсний шум [1, 2, 4, 6], наявність якого призводить до нестійкості методів сегментації зображень в сенсі появи помилкових об’єктів і їх контурів. Для таких умов пропонується адаптивний метод фільтрації імпульсного шуму зображень, заснований на використанні введених вище критеріїв і методів виключення екстремальних спостережень. В узагальненому вигляді адаптивний метод фільтрації імпульсного шуму зображень представлений на рис. 3.1.

3.3.1 Узагальнений метод адаптивної фільтрації імпульсного шуму зображень

В якості вихідних даних методу фільтрації імпульсного шуму зображень передаються:

1) вхідне зображення;

2) параметри критеріїв і методів, які будуть використовуватися в рамках заданої специфікації методу фільтрації імпульсного шуму, наприклад, розмір маски фільтра, граничний розмір групового шуму.

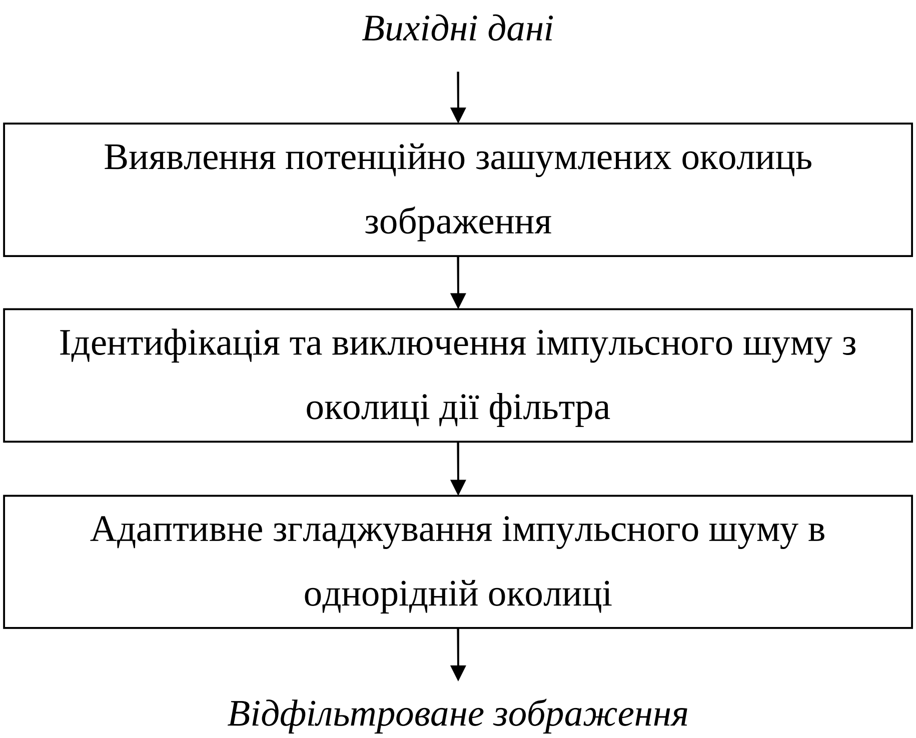


Рисунок 3.1 – Узагальнений адаптивний метод фільтрації імпульсного шуму

3.3.2 Метод виявлення потенційно зашумлених околиць зображення

Фільтрація шуму, яку виконують на етапі попередньої обробки вхідного зображення, служить, головним чином, для виявлення і згладжування імпульсного шуму, наявність якого призводить до нестійкості сегментації зображень [2, 6].

Крім того, не вибіркове застосування методів виключення екстремальних спостережень і методів фільтрації до всіх пікселів вхідного зображення є досить трудомістким, оскільки багато які з них за порядком величини оцінюються трудомісткістю $T(n) = n^2$ операцій порівняння на одне положення маски фільтра.

В таких умовах попередньо проведенню фільтрації пропонується застосувати відносно грубий, але обчислювально ефективний критерій виявлення потенційно зашумленой околиці, що дозволяє оперативно ідентифікувати лише ті околиці вхідного зображення, де може спостерігатися імпульсний шум.

Для цих цілей в роботі пропонується використовувати критерій (3.24), метод застосування якого полягає в наступному.

Метод 3.5. Метод виявлення потенційно зашумленой околиці вхідного зображення.

Крок 1. На першому етапі оцінюються математичні очікування m_i (3.3) і дисперсії σ_i^2 (3.4) у всіх положеннях маски фільтра заданої розмірності на вхідному зображенні (п. 3.1.5). В результаті отримуємо розподіл дисперсій $x_i = \sigma_i$, які представлені впорядкованим по зростанню поруч виду (3.1).

Крок 2. Відповідно (3.3) і (3.4) знаходяться оцінки математичного очікування m_σ і дисперсії s_σ^2 ряду дисперсій $\{x_i\}_i = \{\sigma_i\}_i$.

Крок 3. За цими оцінками знаходиться відповідне значення параметра $k = k(m_\sigma, s_\sigma)$, яке повинно використовуватися в $k \cdot \sigma$-критерії (3.24).

Крок 4. В процесі сканування вхідного зображення маскою фільтра заданої розмірності відзначаються ті її положення, для яких виконується критерій (3.24).

Крок 5. Кінець.

Застосування цього методу приведе до виявлення таких околиць вхідного зображення, які містять імпульсний шум, а також околиць, які характеризуються середнім високим рівнем зашумленя і околиць зі значним перепадом яскравості, розташованих на границі зображення об’єкта з фоном.

3.3.3 Метод ідентифікації та виключення імпульсного шуму

Для цілей ідентифікації і виключення імпульсного шуму в якості основних будемо застосовувати детерміновані критерії та методи виключення екстремальних спостережень, запропоновані в підрозділі 3.2.

Для виключення одиночних імпульсних шумів будемо застосовувати наступний метод (Th-метод), заснований на використанні Th-критерію.

Метод 3.6. Метод виключення одиночного імпульсного шуму.

Припустимо, що за оцінками математичного очікування і дисперсії яркостей, які отримано із застосуванням методу 3.5, знайдено то значення порога $T = T(m_{\sigma}, s_{\sigma})$, яке повинно використовуватися для ідентифікації імпульсного шуму в околиці.

Припустимо, що визначено піксель $d(\xi, \eta)$ вхідного зображення, околиця якого ідентифікована на попередньому етапі із застосуванням методу 3.5 як екстремальна.

Крок 1. Яскравості пікселів $\sqrt{2}$-околиці пікселя $d(\xi, \eta)$, розмірністю 3×3, упорядковуються для отримання ряду виду (3.2).

Крок 2. Застосовуються критерії (3.26) і (3.28). Якщо по одному з цих критеріїв яскравість пікселя $d(\xi, \eta)$ ідентифікується як нетипово екстремальна, піксель $d(\xi, \eta)$ відзначається як імпульсний шум.

Крок 3. Кінець.

В ході сканування околиць вхідного зображення ідентифікованих із застосуванням методу 3.5, застосування методу 3.6 дозволяє ідентифікувати і відзначити ті пік селі $d(\xi, \eta)$, які відповідають імпульсного шуму.

Попередньо застосування методу 3.6 значення порога T знаходиться одноразово для всіх околиць знімка за правилом $T = T(m_{\sigma}, s_{\sigma})$.

Зауважимо, що значення порога може знаходитися індивідуально для околиці за правилом $T = T(m, \sigma)$. У такій ситуації знаходження порога за правилом $T = T(m, \sigma)$ буде реалізовуватися на ітераціях сканування вхідного зображення попередньо застосування критеріїв (3.26) і (3.28) на кроці 2.

Правило знаходження порога повинно вибиратися так, щоб давати найкраще рішення задачі фільтрації імпульсного шуму за заданими критеріями якості фільтрації.

При порівняно низькій вірогідності появи імпульсного шуму в пікселі вхідного зображення, ймовірність появи групового імпульсного шуму буде практично виключена. Таким чином, застосування методу 3.6 забезпечить ефективне виключення імпульсного шуму.

Однак в умовах зростання ймовірності появи імпульсного шуму, ймовірність появи групового імпульсного шуму буде зростати. В таких умовах необхідно застосовувати уніфікований Ths-метод для виключення нетипових одиночних і групових екстремальних спостережень.

В умовах використання заниженого порогу для гарантованого виключення імпульсного шуму при обробці знімка, який містить об’єкти і фон зі значимо різними рівнями (m, σ), після застосування порогового критерію може бути доцільним застосування статистичного критерію для перевірки групи на екстремальність, яка виключається.

3.3.4 Метод згладжування імпульсного шуму

Якщо розглянута околиця цілком належить об’єкту, або фону, тоді для згладжування імпульсного шуму в якості базового може бути застосований фільтр найближчого елемента, метод застосування якого полягає в наступному.

Метод 3.7. Метод згладжування імпульсного шуму у внутрішності зображення об’єкта.

Припустимо, що множину G пікселів вхідного зображення визнано нетипово максимальним імпульсним шумом, і його яскравості потрібно згладити. Припустимо, що:

1) для множини G побудована зовнішня $\sqrt{2}$-околиця H без пікселів цієї множини G;

2) визначена максимальна яскравість x_H множини H.

В таких умовах яскравості $f(\xi, \eta)$ пікселів $d(\xi, \eta)$ множини G згладжуються за правилом

$$\forall d(\xi, \eta) \in G : f(\xi, \eta) = x_H . \qquad (3.34)$$

При цьому якщо множину G пікселів вхідного зображення визнано нетипово мінімальною, для її згладжування застосовується правило (3.34), де x_H – мінімальна яскравість в множини H.

Для поліпшення якості фільтрації внутрішності замість фільтра (3.34) може бути застосований середньоарифметичний фільтр, або, можливо інший, застосування якого доставляє найкраще рішення.

Застосування методу 3.7 на границі зображення об’єкта (або всередині об’єкта лінійного виду) може призводити до отримання неадекватних результатів. Так, якщо яскравість шуму G вище яскравості об’єкта, а яскравість об’єкта вище яскравості фону, тоді описане правило буде давати адекватний результат. Те ж саме справедливо для ситуації, коли яскравість шуму G нижче яскравості об’єкта, а яскравість об’єкта нижче яскравості фону.

Але в ситуації, коли яскравість шуму G вище яскравості об’єкта, а яскравість об’єкта нижче яскравості фону, або коли яскравість шуму G нижче яскравості об’єкта, а яскравість об’єкта вище яскравості фону, застосування правила згладжування (3.34) призведе до згладжування границі зображення об’єкта за рахунок заміни яскравостей імпульсного шуму яскравостями пікселів тіні зображення.

Для згладжування імпульсного шуму в такій ситуації пропонується наступний уніфікований метод.

Метод 3.8. Уніфікований метод згладжування імпульсного шуму.

Припустимо, що множину G пікселів вхідного зображення визнано нетипово екстремальним імпульсним шумом, і його яскравості потрібно згладити. Припустимо, що для множини G визначена його зовнішня $\sqrt{2}$-околиця, складена без пікселів множини G.

Крок 1. Побудуємо $\sqrt{2}$-околицю Z границі множини $H \cup G$ і видалимо з неї пікселі множини $H \cup G$.

Якщо множина G розташована на границі об'єкта з фоном, тоді множина H буде містити пікселі об'єкта і його тіні, а множина Z ще й пікселі фону, яскравість яких значно відрізняється від яскравості пікселів об'єкта і його тіні.

Крок 2. Знайдемо мінімальну h_{min} і максимальну h_{max} яскравості множини H, а також мінімальну z_{min} і максимальну z_{max} яскравості множини Z. В таких умовах яскравості $f(\xi, \eta)$ пікселів $d(\xi, \eta)$ множини G згладжуються за правилом

$$\forall d(\xi, \eta) \in G : \begin{cases} f(\xi, \eta) = h_{max}, & \text{if } |h_{max} - z_{max}| < |h_{min} - z_{min}|, \\ f(\xi, \eta) = h_{min}, & \text{else}. \end{cases} \qquad (3.35)$$

Критерій (3.35) сформований в припущенні, що виконання першої умови в (3.35) означає розташування яскравих об'єктів на темному тлі і приналежність яскравості h_{max} об'єкту, а виконання другої умови означає розташування темного об'єкта на яскравому фоні і приналежність яскравості h_{min} об'єкту.

Крок 3. Кінець.

Для підвищення якості згладжування імпульсного шуму при цьому пропонується наступний модифікований уніфікований метод, який застосовується при тих же початкових припущеннях, що і метод 3.8.

Метод 3.9. Модифікований уніфікований метод згладжування імпульсного шуму.

Крок 1. Оцінимо дисперсію ряду яскравостей пікселів множини H. Якщо не виконується критерій (3.24), значить, множина H складається з пікселів внутрішності зображення об’єкта, і для згладжування яскравостей пікселів множини G застосовується середньоарифметичний фільтр (1.9), або, можливо інший, застосування якого доставляє найкраще рішення завдань (1.4) – (1.8). Перехід до кроку 4. В іншому випадку перехід до кроку 2.

Крок 2. Побудуємо $\sqrt{2}$-околицю Z границі множини $H \cup G$ і видалимо з неї пікселі множини $H \cup G$.

Крок 3. Знайдемо мінімальну h_{min} і максимальну h_{max} яскравості множини H, а також мінімальну z_{min} і максимальну z_{max} яскравості множини Z. В таких умовах яскравості $f(\xi,\eta)$ пікселів $d(\xi,\eta)$ множини G згладжуються за правилом

$$\forall d(\xi,\eta) \in G: \begin{cases} f(\xi,\eta) = \left\lfloor \dfrac{h_{max} + z_{max}}{2} \right\rfloor, & \text{if } |h_{max} - z_{max}| < |h_{min} - z_{min}|, \\ f(\xi,\eta) = \left\lfloor \dfrac{h_{min} + z_{min}}{2} \right\rfloor, & \text{else}. \end{cases} \tag{3.36}$$

Крок 4. Кінець.

При відсутності імпульсного шуму в околицях H і G запропоновані методи фільтрації (метод 3.8, метод 3.9) будуть адекватно згладжувати імпульсний шум у внутрішності і на границі зображення об’єкта, а також імпульсний шум на об’єкті лінійного типу.

Для забезпечення адекватності фільтрації при порушенні цієї умови (тобто при наявності імпульсного шуму в околицях H і G) пропонується наступний модифікований уніфікований метод.

Метод 3.10. Уніфікований метод згладжування імпульсного шуму в неоднорідній околиці.

Припустимо, що множину G пікселів вхідного зображення визнано нетипово екстремальним імпульсним шумом, і його яскравості потрібно згладити. Припустимо, що для множини G визначена його зовнішня $\sqrt{2}$-околиця H, складена без пікселів множини G.

Крок 1. Оцінимо дисперсію ряду яскравостей пікселів множини H. Якщо не виконується критерій (3.24), значить, множина H є однорідною множиною, і вона складається з пікселів внутрішності об’єкта, перехід до кроку 3. В іншому випадку множина H є неоднорідною множиною, перехід до кроку 2.

Крок 2. Застосуємо до яскравостей пікселів множини H заданий метод виключення екстремальних спостережень, використання якого приносить найкраще рішення завдань сгладжування; за замовчуванням для цієї мети будемо застосовувати $k \cdot \sigma$-метод (п. 3.1.1).

За результатами виключення екстремальних спостережень видалимо з множини H пікселі з нетипово екстремальними значеннями яскравості.

Крок 3. Для згладжування яскравостей пікселів множини G використовується такий фільтр, застосування якого доставляє найкраще рішення завдань згладжування з урахуванням заданих вимог по трудомісткості. За замовчуванням будемо згладжувати яскравості пікселів множини G по одному з використанням середньоарифметичного фільтра і маски фільтра розмірністю 3×3, враховуючи при цьому лише яскравості пікселів множини H, що на цьому етапі є однорідним. При відносно великому за площею G й малому числі пікселів множини H може вийти так, що при згладжуванні пікселів множини G маска фільтра розмірністю 3×3 не буде мати пікселів з множини H. У такій ситуації збільшимо радіус маски на одиницю і застосуємо заданий фільтр.

Крок 4. Кінець.

В результаті застосування цього методу, переважна кількість шумів у внутрішності зображення об’єкта буде згладжено оптимальним чином в сенсі критеріїв згладжування, а незначна кількість шумів на границях зображень об'єктів і на об'єктах лінійного виду будуть згладжені адекватно.

У більшості практично значимих випадків площа внутрішності набагато більше площі границі об'єкта. В таких умовах середня трудомісткість згладжування одного імпульсного шуму по порядку величини буде оцінюватися величиною $T = 3 \cdot n$ операцій порівняння, при використанні середньоарифметичного фільтра.

З урахуванням того, що n по порядку величини оцінюється числом 10, середня трудомісткість згладжування одного імпульсного шуму по порядку величини буде оцінюватися величиною $T = 30$ операцій порівняння.

В силу зазначених властивостей метод 3.10 будемо використовувати в якості основного методу згладжування імпульсного шуму зображень.

3.3.5 Основна специфікація узагальненого адаптивного методу фільтрації імпульсного шуму зображень

Узагальнений адаптивний метод фільтрації імпульсного шуму зображень, представлений на рис. 3.1, в своїй базовій специфікації представляється в наступному вигляді (рис. 3.2).

Метод 3.5 обраний для виявлення потенційно зашумленних областей зображення завдяки своїй високій обчислювальної ефективності.

Метод 3.4 обраний для виключення імпульсного шуму тому, що цей метод є уніфікованим методом фільтрації одиночних і групових імпульсних шумів.

Метод 3.10 обраний для згладжування імпульсного шуму тому, що цей метод дозволяє адекватно згладжувати поодинокі і групові імпульсні шуми у внутрішності і на границі зображення об'єкта в різних умовах зашумленя.

Така схема, як показав аналіз результатів експериментів є найліпшою схемою адаптивної фільтрації.

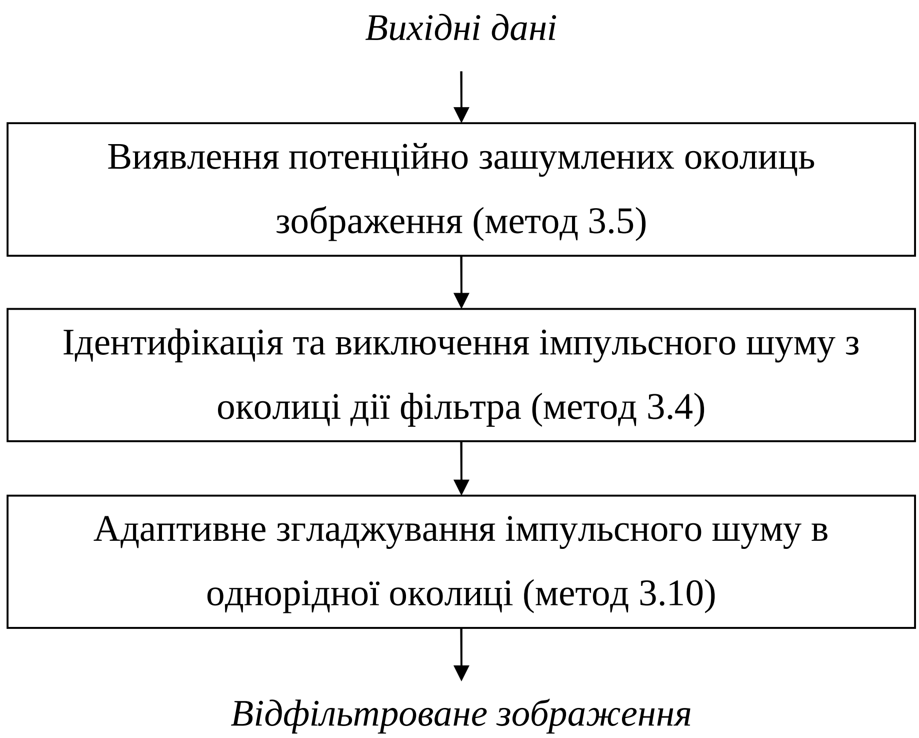


Рисунок 3.2 – Основна специфікація узагальненого методу адаптивної фільтрації імпульсного шуму зображень

3.4 Експериментальна оцінка адекватності та обчислювальної ефективності фільтрації шуму

Для перевірки достовірності отриманих оцінок адекватності та ефективності фільтрації імпульсного шуму із застосуванням запропонованих в роботі моделей, критеріїв й методу були проведені експерименти за наступною схемою.

Крок 1. Як еталон було обрано напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.3).

Крок 2. Еталон піддавався випадковому впливу імпульсного шуму різної щільності.

Крок 3. Зашумлені зображення згладжувались різними фільтрами шуму (середньоарифметичним, медіанним і запропонованим в роботі).

Крок 4. Проводилося віднімання згладженого зображення від еталона, і оцінювалася якість згладжування за заданими критеріями якості.

Крок 5. Порівнювалися отримані оцінки якості і трудомісткості згладжування шуму із застосуванням середньоарифметичного, медіанного і запропонованого в роботі фільтрів.

На цій основі оцінювалася справедливість теоретичних оцінок адекватності та обчислювальної ефективності згладжування шуму.

Так, основні результати фільтрації імпульсного шуму:

1) з щільністю зашумлення 0.05 наведені на рис. 3.4 – 3.7,

2) з щільністю зашумлення 0.1 – наведені на рис. 3.8 – 3.11,

3) з щільністю зашумлення 0.25 – наведені на рис. 3.12 – 3.15.

Після фільтрації було здійснено віднімання зображень, результати якого подаються у вигляді типових матриць залишків (рис. 3.16).

Усі ці дані – є основою формального оцінювання якості фільтрації імпульсного шуму на цифровому зображенні.

Рисунок 3.3 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому

Рисунок 3.4 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому зашумлений імпульсним шумом з щільністю зашумленя 0.05

Рисунок 3.5 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.4), згладжений медіанним фільтром

Рисунок 3.6 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.4), згладжений середньоарифметичним фільтром

Рисунок 3.7 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.4), згладжений запропонованим в роботі фільтром

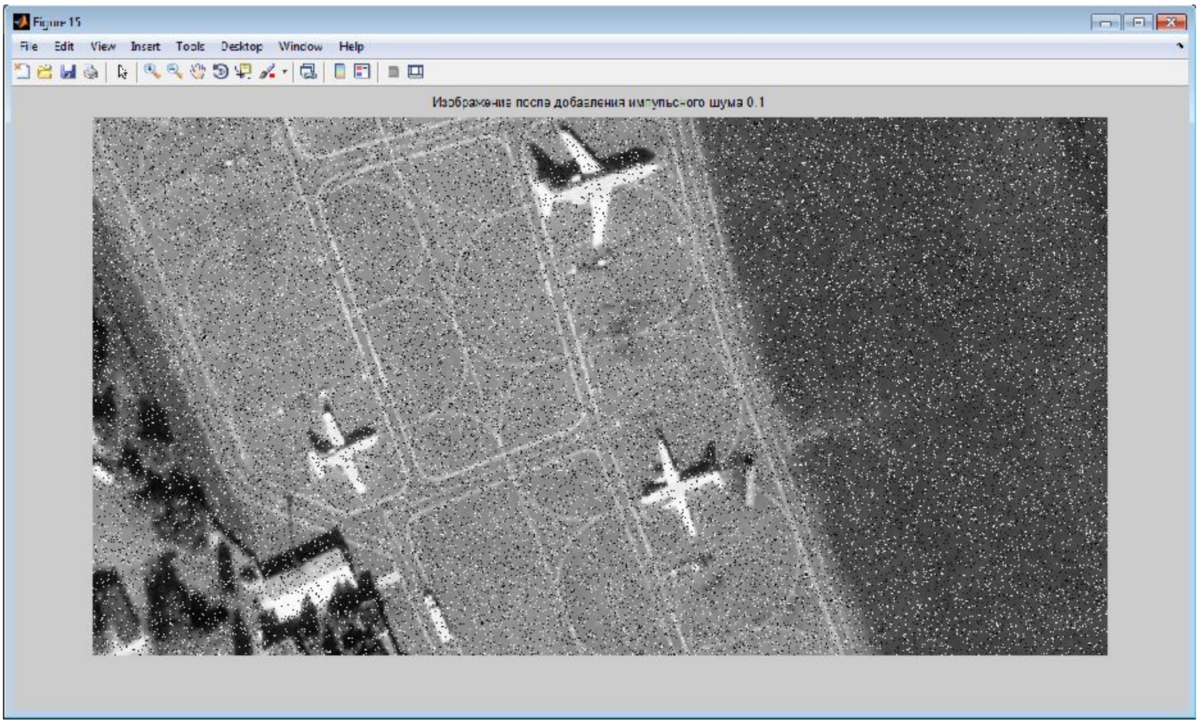


Рисунок 3.8 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому зашумлений імпульсним шумом з щільністю зашумленя 0.1

Рисунок 3.9 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.8), згладжений медіанним фільтром

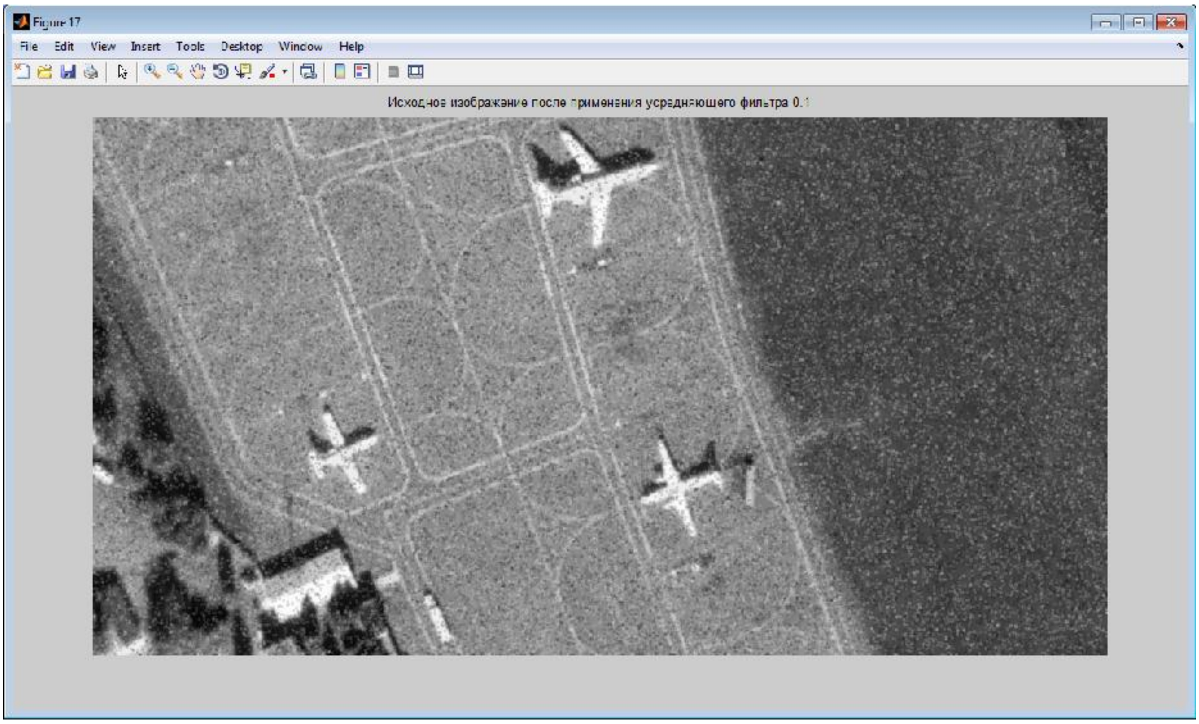


Рисунок 3.10 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.8), згладжений середньоарифметичним фільтром

Рисунок 3.11 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.8), згладжений запропонованим в роботі фільтром

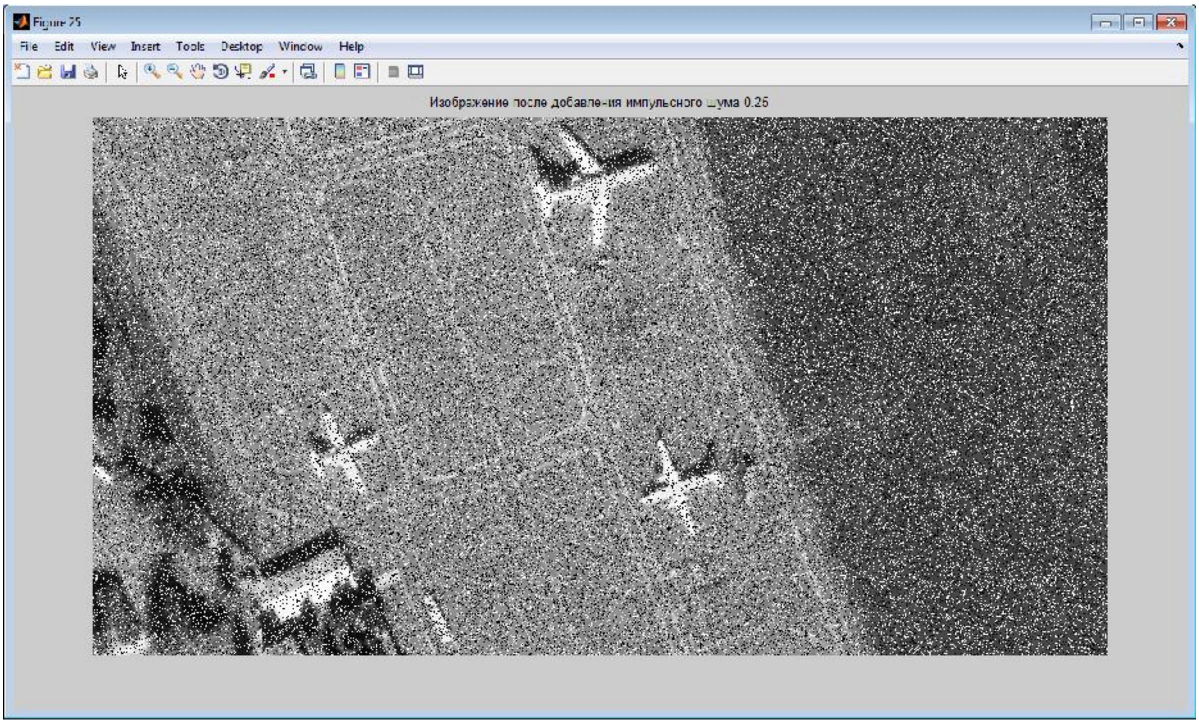


Рисунок 3.12 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому зашумлений імпульсним шумом з щільністю зашумленя 0.25

Рисунок 3.13 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.12), згладжений медіанним фільтром

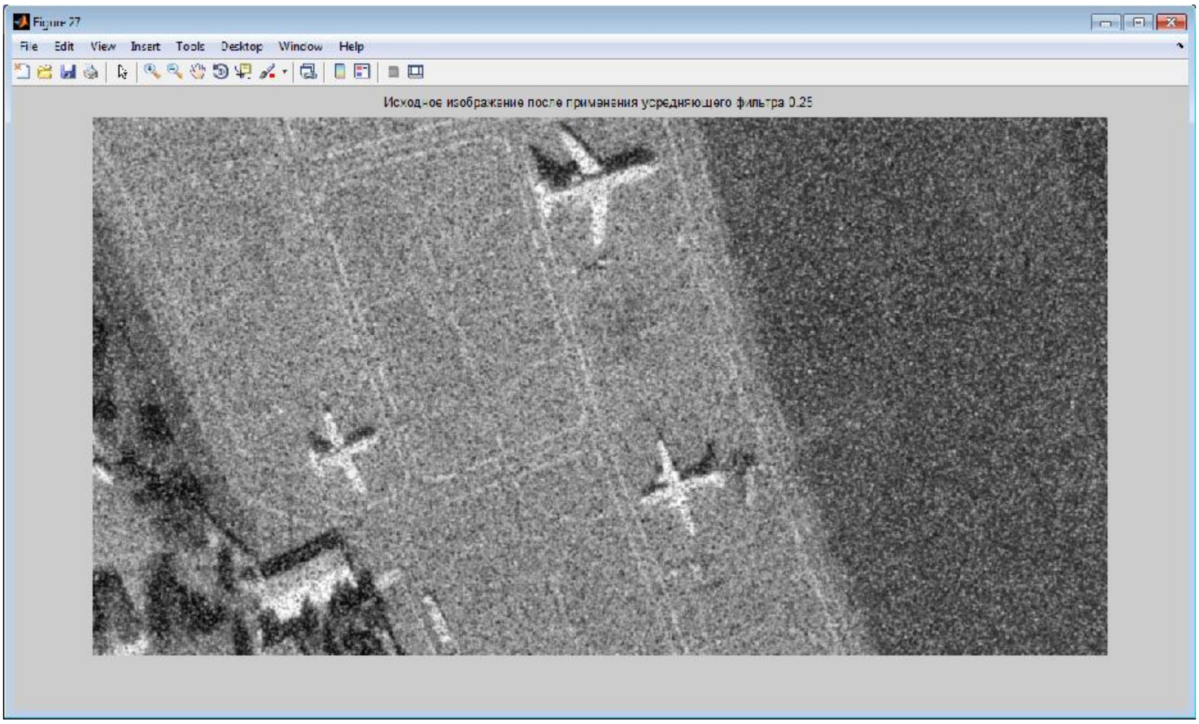


Рисунок 3.14 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.12), згладжений середньоарифметичним фільтром

Рисунок 3.15 – Напівтоновий аерофотознімок аеродрому (рис. 3.12), згладжений запропонованим в роботі фільтром

0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
3	4	0	0	0	0	0	0	0	0
36	12	0	2	0	0	0	0	0	0
30	31	25	27	0	0	0	0	0	0
56	55	29	32	3	0	0	0	0	0
28	53	27	32	7	3	0	0	0	0
26	28	0	3	6	5	6	5	0	12
1	4	0	4	7	11	14	11	0	22
1	28	24	29	29	52	54	33	4	34
0	26	27	29	30	54	84	60	28	16
1	53	53	55	30	55	84	61	33	5
3	26	25	26	2	0	28	32	33	4
4	26	28	27	29	28	27	2	1	2
1	0	2	0	31	30	27	0	1	2
0	0	0	0	28	30	26	0	0	3
0	0	0	0	2	6	3	0	0	4
17	4	0	0	0	0	0	0	1	6

Рисунок 3.16 – Результати віднімання зображень в матричному вигляді

Аналіз отриманих результатів – матриць залишків, отриманих відніманням зображень, дозволяє зробити наступні основні висновки.

Для найбільш поширених в додатках умов зашумленя, коли сумарна площа зашумленой частини зображення не перевищує 1% загальної площі зображення, трудомісткість фільтрації шуму із застосуванням середньоарифметичного, медіанного і запропонованого в роботі фільтрів відповідає отриманим теоретичним оцінками.

При цьому трудомісткість $T(n)$ застосування середньоарифметичного фільтра (розрахована для одного пікселя зображення) при використанні маски площею n становить величину порядку n операцій порівняння, трудомісткість застосування медіанного фільтру складає величину порядку n^2 операцій порівняння, а запропонованого в роботі фільтра – величину порядку $3 \cdot n$ операцій порівняння.

При цьому середньоарифметичний фільтр, як це буде показано нижче, в зв’язку з відсутністю механізмів виключення екстремальних спостережень дає найменш адекватні результати, як для внутрішності, так і для границі зображення об'єкта.

Особливо негативним є застосування середньоарифметичного фільтра для згладжування шуму на границях зображень об'єктів.

Медіанний фільтр в зв'язку з наявністю механізмів виключення екстремальних спостережень дає набагато кращий результат, практично ідеальний для внутрішності. Але в зв'язку з відсутністю механізмів виборчого виключення екстремальних спостережень цей фільтр в ряді практично значущих випадків дає неприйнятний результат для границі зображення об'єкта.

У порівнянні з медіанним фільтром, запропонований в роботі фільтр незначно покращує якість фільтрації внутрішності (яке і так вже близько до найкращого значення), але в зв'язку з наявністю механізмів виборчого виключення екстремальних спостережень дає набагато кращий результат згладжування шуму для границі зображення об'єкта.

Таким чином, можна зробити висновок, що запропонований в роботі фільтр при прийнятній трудомісткості дає значне зростання якості фільтрації в порівнянні як з медіанним фільтром, так і зі середньоарифметичним фільтром шуму.

У числовому вираженні якість фільтрації шуму із застосуванням запропонованого фільтра вище якості фільтрації шуму із застосуванням медіанного і середньоарифметичного фільтрів:

1) в метриці Чебишева – в 3 і в 12 разів, відповідно;

2) в квадратичної метриці – в 5.5 і в 106 разів, відповідно;

3) в метриці СКО – в 2.3 і в 10 разів, відповідно.

При необхідності підвищення якості фільтрації щодо згладжування шумів з відносно невисокою амплітудою, запропонований в роботі фільтр може спеціально налаштовуватися на обробку такого шуму.

При виконанні такої фільтрації при трудомісткості $T(n) \approx n^2$, порівнянної по порядку величини з трудомісткістю застосування медіанного фільтра, запропонований в роботі фільтр шуму дозволить додатково підвищити якість фільтрації шуму.

Таким чином, можна зробити загальний висновок про те, що запропонований в роботі метод адаптивної фільтрації шуму зображень дозволяє адекватно згладжувати імпульсний шум зображень з високою ефективністю.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи можна зробити наступні основні висновки.

Проаналізовано основні класи прикладних задач фільтрації шуму на цифрових зображеннях і на цій основі виявлені загальні особливості фільтрації зображень в додатках.

На основі використання основних статистичних критеріїв виключення екстремальних спостережень в роботі запропоновані відповідні їм методи виключення екстремальних спостережень, що дозволяють ефективно ідентифікувати і виключати екстремальні спостереження з околиці дії фільтра шуму, причому, як точкового, таки групового характеру.

На цій основі розроблено уніфікований метод фільтрації імпульсного шуму зображень, що дозволяє ефективно виявляти і адекватно згладжувати поодинокі і групові імпульсні шуми у внутрішності і на границі зображення об’єкта в різних умовах зашумлення.

Із застосуванням спеціально розробленого програмного забезпечення проведено експеримент, в результаті чого підтверджені теоретичні оцінки ефективності запропонованого методу адаптивної фільтрації одиночного і групового імпульсного шуму.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М. : БИНОМ, 2006. – 752 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Sonka M. Image processing, analysis and machine vision / M. Sonka, V. Hlavak, R. Boyle. – California (USA) : Cole Publishing Company, 1999. – 770 p.
4. Журавлев Ю. И. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю. И. Журавлев, В. В. Рязанов, О. В. Сенько. – М. : Фазис, 2005. – 159 с.
5. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М. : Вильямс, 2004. – 928 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. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М. : Техносфера, 2007. – 584 с.
8. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. – М. : Физматлит, 2003. – 784 с.
9. Воскобойников Ю. Е. Адаптивный алгоритм фильтрации и преобразования изображений в векторный формат / Ю. Е. Воскобойников, А. Б. Колкер // Автометрия. – 2002. – № 4. – С. 3–11.
10. Шлезингер М. И. Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию / М. И. Шлезингер, В. Главач. – К. : Наукова думка, 2004. – 545 с.
11. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт. – М. : Мир, 1976. – 230 с.

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

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

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

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

16. Трифонов А. П. Эффективность обнаружения неоднородных изображений на фоне шума / А. П. Трифонов, К. А. Зимовец // Автометрия. – 2003. – № 1. – С. 19–27.

17. Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений / В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин. – М. : Логос, 2001. – 264 с.