

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут»

КРИВЕНКО СЕРГІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ

УДК 004.932:528.8:616-071(043)

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ОБРОБКИ
ЗОБРАЖЕНЬ У СИСТЕМАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ТА МЕДИЧНОЇ
ДІАГНОСТИКИ

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Лукін Володимир Васильович,
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»,
завідувач кафедри інформаційно-комунікаційних
технологій ім. О.О. Зеленського

Опоненти: доктор технічних наук, професор
Бараннік Володимир Вікторович,
Харківський національний університет ім. В.Н.
Каразіна, професор кафедри математичного
моделювання та аналізу даних навчально-
наукового інституту комп'ютерних наук та
штучного інтелекту

доктор технічних наук, доцент
Полякова Марина Вячеславівна,
Національний університет «Одеська
політехніка», професор кафедри прикладної
математики та інформаційних технологій

доктор технічних наук, професор
Авер'янова Юлія Анатоліївна,
Державний університет «Київський авіаційний
інститут», професор кафедри аеронавігаційних
систем

Захист відбудеться « 27 » листопада 2025 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.062.07 Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17.

Із дисертацією можна ознайомитися на офіційному вебсайті Університету та в Науково-технічній бібліотеці Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17.

Реферат розісланий « 15 » жовтня 2025 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юлія ВОЛОШИН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку науки та технологій супроводжується стрімким зростанням обсягів даних, що генеруються у різних галузях людської діяльності, зокрема у дистанційному зондуванні Землі (ДЗЗ) та медичній діагностиці. Ці дані відіграють критично важливу роль у прийнятті рішень, що впливають на суспільне здоров'я, безпеку та збереження природного середовища. Водночас ефективне використання цих даних ускладнюється через обмеження у швидкості передачі інформації, ємності сховищ, а також необхідність забезпечення високої якості обробки та інтерпретації отриманих сигналів та зображень.

Дистанційне зондування Землі є основним джерелом отримання інформації про стан довкілля, прогнозування кліматичних змін, а також моніторингу надзвичайних ситуацій та певних територій. Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 105 від 4 лютого 2021 року, в рамках "Програми спостереження за навколишнім середовищем", Україна зобов'язалася впроваджувати сучасні технології аналізу супутникових даних для екологічного моніторингу. Для досягнення цієї мети необхідні методи, що забезпечують:

- 1) Автоматичну обробку мультиспектральних та гіперспектральних зображень.
- 2) Адаптацію алгоритмів обробки до шумів і спотворень.
- 3) Швидку передачу великих обсягів даних з супутників.

Традиційні методи обробки, такі як лінійні фільтри або прості алгоритми компресії, часто не відповідають вимогам сучасного ДЗЗ через їхню низьку ефективність у збереженні візуальної якості або інформаційних ознак. Тоді розробка інтелектуальних методів обробки сигналів і зображень, які базуються на глибинному навчанні та інноваційних метриках оцінки якості, стає критично важливою.

Сфера медичної діагностики зазнає значних змін під впливом розвитку телемедичних технологій. У зв'язку з пандемією COVID-19, згідно з Наказом Міністерства охорони здоров'я України № 1977 від 19 серпня 2020 року, телемедицина стала одним із ключових напрямків цифровізації медичних послуг. У цьому контексті виникає необхідність у:

- 1) Забезпеченні збереження діагностичної якості медичних зображень при їх передачі та/або компресії.
- 2) Розробці алгоритмів для автоматичного виявлення патологій на основі обробки сигналів або зображень.
- 3) Стандартизації процесів фільтрації та відновлення біомедичних сигналів для зменшення впливу шумів.

Використання традиційних методів обробки, таких як JPEG-компресія або середньоквадратичне згладжування, часто призводить до втрати критичних діагностичних даних. У зв'язку з цим необхідно впроваджувати адаптивні методи, які враховують специфіку медичних сигналів і зображень.

Наукові дослідження, зокрема у сфері машинного навчання, відкрили нові можливості для аналізу великих даних. Алгоритми глибинного навчання, такі як згорткові нейронні мережі та рекурентні нейронні мережі, демонструють високу ефективність у класифікації, сегментації та відновленні зображень. Згідно з Національною стратегією розвитку штучного інтелекту в Україні до 2030 року, одним із ключових напрямків є інтеграція штучного інтелекту у сферу охорони здоров'я та екологічного моніторингу.

Однак, реалізація таких підходів потребує вирішення низки технічних викликів:

- 1) Оптимізації алгоритмів для роботи на пристроях із обмеженими ресурсами.
- 2) Забезпечення узгодженості між якістю оброблених даних та їх об'ємом.
- 3) Створення універсальних моделей, які можуть адаптуватися до різних типів сигналів і зображень.

Це дослідження відповідає стратегічним цілям України, визначеним у державних програмах цифровізації, охорони здоров'я та екологічного моніторингу, і має потенціал для інтеграції у глобальні ініціативи. Виходячи з викладеного вище, ефективна інтелектуальна фільтрація та стиснення із втратами зображень дистанційного зондування Землі та медичної діагностики в умовах присутності складних завад і обмежених обчислювальних ресурсів з урахуванням візуальної якості є важливою та актуальною науково-практичною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, результати яких представлені у цій дисертаційній роботі, проводились у рамках наукових напрямів кафедр інформаційно-комунікаційних технологій імені О.О. Зеленського та конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету «ХАІ», пов'язаних із цифровою обробкою сигналів та зображень, та були відображені у звітах з НДР: українсько-польська НДР «Методи інтелектуальної обробки зображень та відео на основі метрик візуальної якості для перспективних застосувань» (2021, № держреєстрації 0121U113841), держбюджетна НДР «Формування технологій створення адаптивних систем керування ГТД пасажирських і транспортних літаків» (2019-2020, № держреєстрації 0119U100942), держбюджетна НДР «Методи інтелектуальної комп'ютерної обробки великих даних в системах дистанційного зондування, мультимедіа та телекомунікацій» (2018-2020, № держреєстрації 0118U003020), українсько-французька НДР «"Розумна" обробка великих об'ємів даних у застосуванні до багатоканальних зображень дистанційного зондування» (2017-2018, № держреєстрації 0117U005010), держбюджетна НДР «Методи підвищення якості сервісу засобами цифрової обробки багатоканальних даних в системах мультимедіа, дистанційного зондування та телемедицини» (2015-2016, № держреєстрації 0115U000827), держбюджетна НДР «Методи обробки багатоканальних зображень у мобільних системах на основі прогнозування та машинного навчання» (2021-2023, № держреєстрації 0121U112176), держбюджетна НДР «Інтелектуальні методи обробки багатоканальних зображень на основі карт візуальної уваги та баз зображень із спотвореннями» (2024-2026, № держреєстрації 0124U001094).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка нових та вдосконалення існуючих методів обробки зображень у дистанційному зондуванні Землі та медичній діагностиці, зокрема фільтрації та стиснення, із урахуванням візуальної якості. Для досягнення вказаної мети в роботі вирішуються наступні завдання:

- 1) Розробка методів та засобів детектування текстур на спотворених завадами зображеннях за допомогою комбінування декількох параметрів локальної активності.
- 2) Дослідження адаптивної фільтрації зображень, спотворених сигнально-залежними та просторово-корельованими завадами, за допомогою алгоритмів машинного навчання.
- 3) Розробка методів оцінки та прогнозування ефективності фільтрації для різних типів зображень і шумів.
- 4) Розробка та застосування двоетапних процедур забезпечення бажаної якості зображень.
- 5) Розробка методів та засобів стиснення зображень із забезпеченням візуально непомітних спотворень.
- 6) Дослідження адаптивного стиснення багатоканальних зображень дистанційного зондування Землі.
- 7) Дослідження дивних зображень дистанційного зондування і їхніх властивостей.
- 8) Аналіз статистичних та просторово-спектральних характеристик спотворень, внесених кодерами на основі дискретного косинусного перетворення (ДКП), і доведення, що вони залежать від кроку квантування та локального вмісту.
- 9) Доведення, що середньо-квадратичну похибку (MSE) спотворень можна легко спрогнозувати, а також що ці прогнози є достатньо точними і можуть бути використані для належного встановлення кроку квантування.
- 10) Дослідження підходів до прогнозування візуальної якості в обмеженій кількості блоків 8x8 пікселів для сучасних кодерів.
- 11) Дослідження стиснення медичних зображень, спотворених шумами різної природи.
- 12) Розробка підходів і рекомендацій щодо стиснення медичних зображень із урахування візуальної якості.
- 13) Аналіз автоматичного стиснення під час розпізнавання цілей.
- 14) Розробка методів та алгоритмів фільтрації зображень, спотворених з просторово-корельованим шумом із невідомим спектром.

Об'єктом дослідження є одно- та багатоканальні зображення, що формуються аерокосмічними та медичними системами.

Предметом дослідження є методи обробки, фільтрації та стиснення зображень із втратами із забезпеченням високої візуальної якості в радіотехнічних системах обробки даних ДЗЗ та системах медичної діагностики.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань було використано методи теорії ймовірностей, математичної статистики, нелінійної фільтрації сигналів, числового моделювання та машинного навчання.

Наукова новизна отриманих результатів. В результаті виконання дисертаційної роботи отримані такі основні наукові результати:

1) Вперше запропоновано метод виділення текстурних ділянок на зображеннях, спотворених шумом, з використанням методів машинного навчання, що використовує локальні характеристики, визначені в межах ковзного вікна, завдяки чому вдалося покращити надійність детектування текстурних фрагментів.

2) Вперше показано можливість прогнозування ефективності фільтрації у випадку сигнально-залежних завад на зображеннях при використанні традиційних та візуальних метрик якості, який забезпечує високу точність: коефіцієнт детермінації сягає 0,98 для традиційних метрик та 0,91 для метрик, що враховують візуальну якість.

3) Удосконалено двоетапний метод забезпечення необхідної візуальної якості при стисканні зображень із втратами, який забезпечує досягнення необхідного рівня якості відповідно до класичних метрик та метрик, що враховують візуальну якість, і дозволяє знизити дисперсію залишкових помилок майже на порядок порівняно з одноетапними підходами.

4) Отримали подальший розвиток методи прогнозування ефективності стиснення із втратами зображень, спотворених шумом, що передбачає поканальний аналіз мультиспектральних даних з подальшим вибором найкращих параметрів стиснення для кожного каналу, що дозволяє покращити результати класифікації шляхом придушення шумових і високочастотних компонент.

5) Удосконалено методи обробки зашумлених медичних зображень шляхом аналізу просторово-спектральних характеристик шумів, що дозволило забезпечити сліпе придушення шуму з досягнення приросту PSNR до 2,7 дБ відносно існуючих підходів.

6) Удосконалено методи контролю якості обробки медичних зображень та зображень дистанційного зондування, що дозволило гарантувати високий ступінь стиснення (у 10–40 разів), зокрема, для медичних зображень при збереженні усієї діагностично цінної інформації.

Практичне значення отриманих результатів дисертації підтверджується їх використанням:

1) Розроблені методи фільтрації радіолокаційних зображень, що спотворені сигнально залежними та/або просторово-корельованими завадами, а також метод прогнозування ефективності фільтрації радіолокаційних зображень для декількох метрик якості дозволили підвищити якість радіолокаційних зображень у відповідності до різних критеріїв, а також забезпечити прогнозування характеристик фільтрації та вибір найкращих типу та параметрів фільтру. Це підтверджено відповідним актом впровадження, наданим Інститутом радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України.

2) Метод прогнозування показників якості первинних рентгенівських знімків забезпечив стиснення зображень без втрати діагностично важливої інформації. Також було запроваджено метод стиснення медичних зображень із урахування спотворень, що вносяться апаратурою формування зображень, та забезпеченням найкращих з

точки зору візуальної якості стиснення. Це підтверджено відповідним актом впровадження, наданим КНП ХОР «Обласна дитяча клінічна лікарня».

3) Розроблений двоетапний підхід до придушення шуму та метод адаптації до просторово корельованого шуму було використано при розробці програмного забезпечення медичних приладів для підвищення ефективності вторинної обробки і аналізу зашумлених даних, отриманих з медичних датчиків. Це підтверджено відповідним актом впровадження, наданим ТОВ « Біопромінь».

4) Методи оцінки якості медичних сигналів за допомогою методів стиснення оптичних зображень та двоетапні процедури стиснення зображень з втратами для забезпечення бажаної якості стиснення зображення з втратами відповідно до метрик візуальної якості дозволили суттєво спростити процедуру оцінки ефективності фільтрації та стиснення зображень, що спотворені шумами складної природи, а також прискорити процедуру стиснення медичних та оптичних зображень із збереженням інформаційних ознак, що дозволяє використовувати наявні автоматичні методи класифікації зображень. Це підтверджено відповідним актом впровадження, наданим ТОВ НК КОЛІБРИ.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У роботах [1], [2], [3] автором вивчені питання характеристик ДКП-фільтрів при роботі в умовах сигнально-залежних та просторово корельованих шумів. В роботах [4], [5] автором досліджені порогові операції при фільтрації зображень із застосування часткового перекриття блоків зображення. Підхід Level Set при фільтрації зображень радарів із синтезованою апертурою (РСА), спотворених спекл-шумом досліджено в роботах [6], [7]. В роботах [8], [9], [10], [11], [12] автором розглянуто питання прогнозування ефективності фільтрації одноканальних та багатоканальних зображень для різних методів придушення шумів. В роботах [13], [14], [15], [16], [17] автор розробив підхід до детектування текстур на зображенні за допомогою методів машинного навчання. Декілька підходів до стиснення гіперспектральних зображень розроблено автором у роботах [18], [19], [20], [21]. Прогнозування оптимальної робочої точки та вивчення характеристик стиснення зображення в її околах розглянуто автором в роботах [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31]. У роботах [24], [32], [33], [34], [35] автор запропонував декілька підходів прогнозування якості стиснених зображень, а також дослідив ефективність цих методів у випадку медичних зображень [36], [37], [38], [39] та зображень дистанційного зондування [37], [40], [41]. У роботах [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51] автором запропоновані двоетапні процедури стиснення зображень та оцінено їхню ефективність. Аналіз характеристик різних типів шумів, що спотворюють зображення дистанційного зондування та медичні зображення, здійснено автором у роботах [52], [53], [54], [55], [56]. Обчислення характеристик класифікації незашумлених та зашумлених стиснених зображень здійснено автором у роботах [57], [58], [59], [60]. Межі варіації коефіцієнта стиснення зображень зубів із використання методу ледь помітних спотворень отримано автором у роботах [61], [62]. Також питання ефективності кодерів, пришвидшення обчислень та використання наданих ресурсів було вивчено автором у роботах [63], [64], [65], [66].

У роботі [67] автором здійснено порівняльний аналіз метрик візуальної якості в задачі розпізнавання цілі в умовах складного фону. Пошук оптимальних характеристик сучасних кодерів для стиснення без візуально помітних втрат здійснено автором у роботах [68], [69], [70]. Криві швидкості спотворення для дивних зображень були отримані автором у роботі [71].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на Міжнародній конференції «The Experience of Designing and Application of CAD systems in Microelectronics» (2013, 2021, 2023, Поляна-Свалява, Україна), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» (2016, 2019-2022, Харків, Україна), Міжнародній конференції «Problems of infocommunications. Science and Technology» (2015, 2017, 2018, Харків, Україна), Міжнародній конференції «Mediterranean Conference on Embedded Computing» (2013, 2017-2023, Будва, Чорногорія), Міжнародній конференції «International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology» (2014-2020, Київ, Україна), Міжнародній конференції «International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology» (2016, 2018, 2020, 2022, Славське, Україна), Міжнародній конференції «International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies» (2018, 2020, 2024, Афіни, Греція), Міжнародній конференції «Computing in Cardiology» (2021, Брно, Чехія), Міжнародній конференції «Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering» (2017, Київ, Україна).

Публікації. Основні результати за темою дисертації опубліковані в 71 науковій роботі, у тому числі в 4 монографіях, 15 статтях у наукових виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань категорій А та Б, 14 статей в наукових періодичних виданнях інших держав (США, Швейцарія), які індексується в Scopus (7 статей належать до журналів першого та другого квартилів), а також 38 тезах доповідей у збірниках праць наукових конференцій, 27 з яких проіндексовано у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації становить 465 сторінки, в тому числі 84 рисунків по тексту, з них 8 – на 8 окремих сторінках, 54 таблиці по тексту, з них 4 – на 4 окремих сторінках, список використаної літератури складається з 317 найменувань на 40 сторінках, 13 додатків на 102 сторінках, в тому числі – основний текст на 296 сторінках.

Здобувач висловлює щире подяку провідному вченому в галузі цифрової обробки сигналів та зображень, Лауреату Державної премії України в галузі науки і техніки, доктору технічних наук, професору Лукіну Володимирі Васильовичу.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, визначається мета роботи, основні задачі та методи досліджень. Сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію щодо апробації отриманих результатів.

У **першому розділі** визначено основні задачі фільтрації та стиснення зображень, критерії якості обробки зображень. Окремо розглянуто візуальну якість зображень, як основу оцінки ефективності майбутніх досліджень. Також розглянуто шуми на зображеннях, їхню природу на зображеннях дистанційного зондування та медичної діагностики, а також існуючі засоби їхнього придушення.

У епоху цифрових технологій здатність ефективно обробляти та передавати великі обсяги візуальних даних є надзвичайно важливою. Актуальні задачі обробки зображень у телекомунікаційних системах наведено на рис. 1. Придушення шумів і стиснення зображень є двома основними завданнями в цій галузі, особливо в таких сферах, як дистанційне зондування та медична діагностика, де якість зображення є життєво важливою для виконання вимірювань та прийняття рішень, а розмір даних може бути непомірно великим. Придушення шумів, що присутні на зображенні, передбачає не тільки боротьбу з шумом, але й мінімізацію внесених при цьому спотворень, тоді як стиснення зображення має на меті зменшити розмір файлу зображення без суттєвої шкоди для його якості. Ці два завдання нерозривно пов'язані, оскільки артефакти стиснення часто створюють шум, а придушення шумів може допомогти у створенні високоякісних стиснених зображень.

Шум на зображеннях можна віднести до небажаних випадкових коливань інформації про яскравість або колір, які спотворюють зображення. У дистанційному зондуванні цей шум може виникати через такі фактори навколишнього середовища, як внутрішні та зовнішні завади, обмеження часу формування та сам принцип роботи сенсора. Подібним чином у медичній візуалізації шум може бути внесений через апаратні обмеження (наприклад, для апаратів МРТ), рух пацієнта або методи візуалізації з низькими дозами, які використовуються для мінімізації радіаційного опромінення в комп'ютерній томографії.

Поширені типи шуму включають:

1) Адитивний білий гаусів шум (АБГШ): часто вноситься електронними схемами, він має нормальний розподіл.

2) Пуассонівський шум: виникає в умовах слабкого освітлення або під час отримання зображень із низькою кількістю фотонів.

3) Шум солі та перцю: призводить до спотворення чорно-білих пікселів, як правило, через помилки передачі або пилу на датчиках зображення.

4) Спекл-шум: поширений у когерентних системах формування зображень, таких як радіолокаційні та ультразвукові, цей шум є мультиплікативним і часто впливає на медичні зображення та зображення дистанційного зондування.



Рисунок 1 – Актуальні задачі обробки зображень у телекомунікаційних системах

Класична фільтрація зображень включає:

- 1) Лінійні фільтри, включаючи неадаптивні та адаптивні фільтри.
- 2) Нелінійні фільтри в ковзному вікні, включаючи неадаптивні та локально адаптивні.

3) Нелокальні методи, включаючи нелокальний усереднюючий фільтр, нелокальний сігма-фільтр, фільтр BM3D.

До більш розвинутих методів фільтрації можна віднести методи на базі ортогональних перетворень та фільтрацію на базі нейронних мереж (НМ). Методи ортогональних перетворень використовують як вейвлет-перетворення, так і дискретне косинусне перетворення (ДКП) для придушення шуму. З розвитком глибокого навчання фільтрація зображень досягла нових рівнів ефективності та точності. Сучасні методи часто використовують згорткові нейронні мережі (ЗНМ), автокодери та генеративні змагальні мережі (ГЗМ) для вивчення складних моделей шуму та вмісту зображень. Але НМ потребують значних обчислювальних ресурсів, що ускладнює їх використання на пристроях з обмеженими ресурсами. Крім того, велика кількість параметрів робить моделі чутливими до перенавчання, особливо за наявності обмеженого обсягу навчальних даних. НМ часто працюють як "чорна скринька", що ускладнює інтерпретацію результатів та оцінку їхньої ефективності в контексті фільтрації.

Дистанційне зондування передбачає отримання зображень Землі із супутників або бортових платформ. Ці зображення використовуються в різних сферах, включаючи моніторинг клімату, міське планування та сільське господарство.

Стиснення зображень має на меті зменшити розмір файлів зображень, зберігаючи якомога більше початкової інформації. Стиснення може бути з втратами (де деяка інформація втрачається) або без втрат (де зображення може бути ідеально реконструйовано). У медичній візуалізації, де точність діагностики є критичною, перевага часто віддається стисненню без втрат, але розмір таких зображень залишається неприйнятно великим, тому стиснення з втратами стає все більш

популярним. У дистанційному зондуванні, де величезні обсяги даних повинні передаватися із супутників на наземні станції, часто використовується стиснення з втратами, щоб збалансувати ефективність передачі даних і збереження якості.

Наведемо декілька прикладів. Датасет Dental Panoramic Caries Segmentation містить сегментацію карієсу зубів у панорамних рентгенівських знімках зубів. Розмір одного зображення складає 2943x1435 пікселів. Приклад медичного зображення наведено на рис. 2. Треба також додати, що як медичні зображення, так і зображення дистанційного зондування можуть бути багатоканальними (так, для зображень комп'ютерної томографії (КТ) типовим є 64 або 128 каналів, в той час, як для гіперспектральних зображень дистанційного зондування кількість каналів сягає сотень).

Іншим прикладом є датасет Chikusei, що містить гіперспектральні зображення поверхні, сегментовані на 19 класів. Розмір одного зображення складає 2517x2335 пікселів, а загальна кількість каналів складає 128 у спектральному діапазоні від 363 нм до 1018 нм [84]. Приклад зображення наведено на рис. 3. При цьому розмір одного зображення сягає 735 Мбайт, що накладає певні обмеження на питання передачі та зберігання таких обсягів.

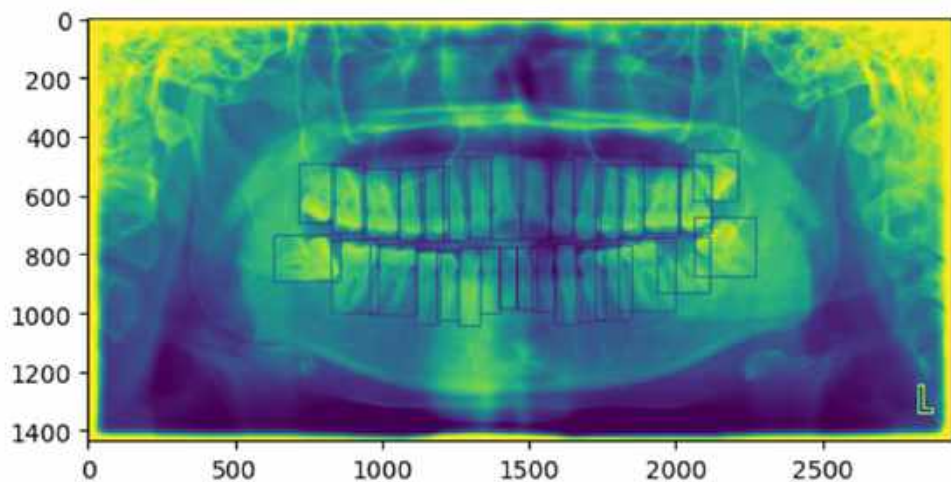


Рисунок 2 – Панорамні сегментовані зображення зубів

Традиційні методи стиснення із втратами містять:

1) JPEG та його модифікації: найпоширеніший метод стиснення з втратами, втім, JPEG може створювати блокові артефакти та розмиття, особливо при високому ступені стиснення, що може перешкоджати виконанню таких важливих завдань, як, наприклад, виявлення уражень у медичних зображеннях або класифікація типів місцевості у зображеннях ДЗЗ.

2) JPEG2000 та його модифікації: покращений у порівнянні з JPEG, JPEG2000 використовує стиснення на основі малошвилювого перетворення. Він підтримує стиснення як із втратами, так і без втрат і працює краще за вищих коефіцієнтів стиснення, що робить його придатним для таких додатків, як стиснення супутникових

зображень, де збереження деталей у стиснених зображеннях та забезпечення заданого коефіцієнту стиснення (КС) мають важливе значення.

3) Кодери AGU, AGU-M, ADCT, ADCT-M, що використовують деякі модифікації ДКП-перетворення та враховують особливості зорової системи людини.

4) Інші сучасні методи, зокрема, кодери на основі стандарту H.265, а саме BPG, HEIF, AVIF.



Рисунок 3 – Приклад зображення з датасету Chikusei

Значною проблемою зображень, що формуються сучасними системами, є просторово-корельовані сигнально-залежні негаусові завади, зокрема спекл-шум, який часто зустрічається на радіолокаційних та ультразвукових зображеннях. Втім, більшість існуючих методів (як на основі малохвильових перетворень, так і нейромереж) усунення шумів орієнтується на спрощену модель АБГШ, що різко знижує їх працездатність в реальних умовах.

Щодо стиснення в дистанційному зондуванні, то супутникові зображення високої роздільної здатності вимагають ефективного стиснення для зберігання та передачі. Методи стиснення на основі вейвлетів, такі як JPEG2000 або SPIHT, широко застосовуються для супутникових зображень, оскільки вони легко забезпечують бажані коефіцієнти стиснення. Але при цьому якість стиснених зображень може суттєво відрізнятися. Методи, засновані на глибокому навчанні, які поєднують стиснення та фільтрацію, все частіше використовуються, оскільки вони забезпечують досить високу ефективність у обробці даних із високою роздільною здатністю, що спотворені шумом. Але для цих методів складно варіювати якістю стиснених зображень.

Медична візуалізація покладається на такі методи, як рентгенівські промені, МРТ, комп'ютерна томографія та ультразвукове дослідження внутрішніх структур тіла. Якість цих зображень має першочергове значення для точної діагностики, і будь-

який шум може приховати важливі деталі. Під час сканування МРТ шум може впливати на видимість невеликих та/або слабоконтрастних структур, що ускладнює діагностику таких станів, як пухлини. Методи придушення шумів повинні досягати балансу між зменшенням шуму та збереженням діагностичних функцій.

Окремо слід зазначити, що для кількісної оцінки якості обробки зображень використовують класичні метрики якості як пікове співвідношення сигнал/шум та середньо-квадратична похибка. Окрім цього, велике розповсюдження отримали метрики візуальної якості, що враховують візуальне сприйняття системи зору людини. Прикладом є метрики PSNR-HVS, PSNR-HVS-M, MSSSIM, FSIM та інші.

Останнім часом багато робіт присвячуються вдосконаленню фільтрації та стиснення зображень, однак цілий ряд питань залишається актуальним. До них можна віднести вдосконалення підходів до обробки, фільтрації та стиснення зображень у контексті задач, пов'язаних із медичною візуалізацією, дистанційним зондуванням та іншими сферами, де важливе забезпечення високої якості зображень та ефективності їх обробки.

У **другому розділі** розглянуто питання розробки та дослідження інтелектуальних методів фільтрації зображень, спотворених різними видами шумів, а також оцінки ефективності застосування розроблених підходів до зображень дистанційного зондування Землі та медичної візуалізації. Розділ складається з трьох основних підрозділів, в яких розглядаються питання детектування та збереження текстур, адаптивної фільтрації із застосуванням машинного навчання та оцінки (прогнозування) ефективності фільтрації для різних типів зображень.

Розглянуто проблему детектування текстур на зображеннях, спотворених завадами. Текстури є важливою характеристикою багатьох зображень ДЗЗ та медичної діагностики, що містять інформацію про типи земної поверхні, структуру тканин тощо. Однак, наявність шуму значно ускладнює виділення та фільтрацію текстурних ділянок. У роботі запропоновано новий підхід до детектування текстур, що базується на комбінуванні декількох параметрів локальної активності. На відміну від існуючих методів, які часто використовують певні шаблони, запропоновано використовувати набір ознак та SVM-класифікатор для їх об'єднання з метою виявлення різних текстурних ділянок на зображеннях, спотворених завадами. В якості ознак для навчання класифікатора проаналізовано низку комбінацій локальної дисперсії (ЛД), ентропії, квазірозмаху (КР), виходів операторів Собеля, Херріса (ДХ) та Кенні, а також детектора, що працює в ДКП-області (ДКП-Д). Експериментальні дослідження на синтетичних та реальних зображеннях показали, що використання такого SVM-класифікатора дозволяє ефективно розрізняти різні текстурні та однорідні ділянки навіть при значному рівні шуму, демонструючи вищу точність порівняно з традиційними методами, що базуються на пороговій обробці ознак.

Також досліджено проблему адаптивної фільтрації зображень, спотворених сигнально-залежними та просторово-корельованими завадами, із застосуванням алгоритмів машинного навчання. Традиційні методи фільтрації часто використовують фіксовані параметри, що не завжди є оптимальним для різних локальних областей зображення з різними характеристиками шуму. В роботі

запропоновано використовувати штучні нейронні мережі для адаптивної оцінки параметрів фільтрації залежно від локальних характеристик шуму та зображення. Розроблено архітектуру нейронної мережі, на вхід якої надходить локальна статистика зображення (локальне середнє, локальну дисперсію) та оцінка рівня шуму в даній області, а на виході нейронна мережа видає оптимальні параметри для застосування локального фільтра (наприклад, розмір вікна фільтра середнього значення або параметри гаусова фільтра). Навчання нейронної мережі здійснювалося на великій кількості синтетично спотворених зображень з різними рівнями та типами шуму. Результати експериментальних досліджень на реальних зображеннях ДЗЗ (мультиспектральні та гіперспектральні знімки) та медичних зображеннях (рентгенівські знімки, МРТ) підтвердили ефективність запропонованого підходу, який забезпечує краще придушення шуму зі збереженням дрібних деталей порівняно з неадаптивними методами та традиційними адаптивними фільтрами. Фрагмент тестового зображення та отримана карта меж для фрагмента тестового зображення наведені на рис. 4, алгоритм отримання меж представлений на рис. 5.

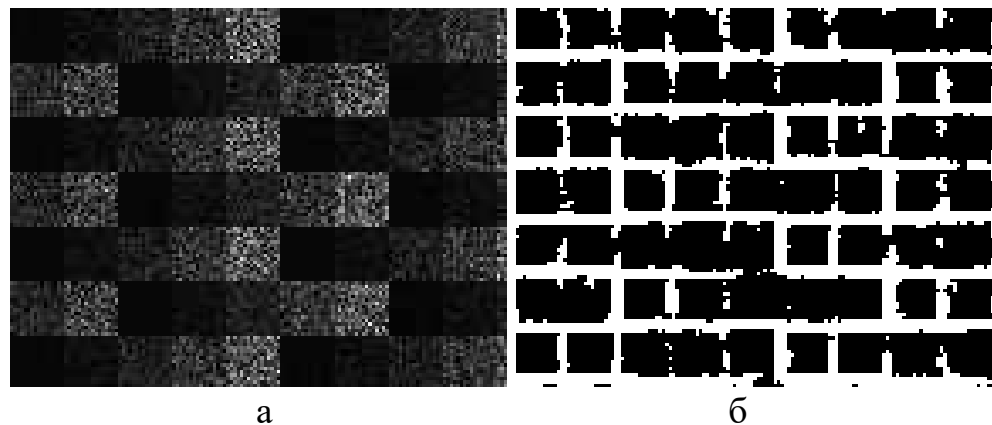


Рисунок 4 – Фрагмент тестового зображення (а) та отримана карта меж для фрагмента тестового зображення (б)

Розглянуто фільтрацію однопоглядних РСА-зображень. Це найскладніший випадок через найвищу інтенсивність спеклу. Існує два варіанти моделювання тестових зображень РСА із шумом. В першому випадку розглянуто амплітудні дані, для яких відносна дисперсія спеклу $\sigma_{\mu}^2 = 0,273$ та які відповідають релеєвському розподіленню. В другому випадку інтенсивність розглянутих зображень відповідає негативному експоненціальному розподіленню з дисперсією $\sigma_{\mu}^2 = 1$. Не втрачаючи загальності, розглядався перший випадок (вихідні та відфільтровані зображення для двох випадків можна легко перетворити з одного представлення на інше простими гомоморфними перетвореннями).

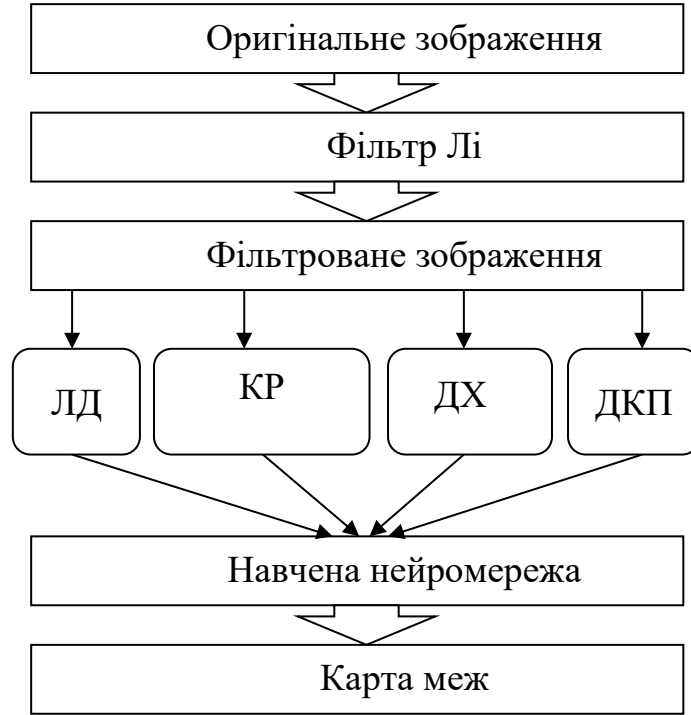


Рисунок 5 – Алгоритм отримання меж

Метод Level Set є технікою активного контуру, передній рух якого керується:

$$\psi^{(k+1)} = \psi^{(k)} - \Delta t \psi_t |\nabla \psi^{(k)}|, \quad (1)$$

де $\psi^{(k)}$ визначає рівень поверхні на k -й ітерації; $\psi^{(0)}$ – значення на першій ітерації (зазвичай, $\psi^{(0)} \in [-1; 1]$); Δt – одиничний часовий крок; $|\nabla(\cdot)|$ – величина градієнта початкової поверхні. Термін ψ_t – функція еволюції (або швидкості), яка визначає рух фронту. Було адаптовано закон еволюції набору рівнів, для виявлення малорозмірних цілей. Функція розповсюдження базується на локально оціненому коефіцієнті варіації (КВ) і пороговому значенні однорідності:

$$T = 1 + \frac{\sqrt{1+2\sigma_\mu^2}}{\sqrt{2M^2}} \sigma_\mu, \quad (2)$$

де M – розмір вікна; σ_μ – теоретичне СКВ спекла. Модель визначення цілі можна представити як:

$$\psi_t = (\hat{\sigma}_\mu - T) - \varepsilon k, \quad (3)$$

де εk – швидкість викривлення і $\hat{\sigma}_\mu$ – локальна оцінка σ_μ . Остаточні результати сегментації задаються точками перетину нуля $\psi^{(k)}$.

Ці результати попереднього аналізу показують, що, подібно до інших методів виявлення, ефективність методу Level Set залежить від контрасту об'єкта. Тут,

навпаки, ми припускаємо співвідношення $C = I_{obj}/I_{bg}$, де I_{obj} – справжнє значення зображення, яке приймається однаковим для всіх пікселів, які належать малому об'єкту, а I_{bg} позначає справжнє значення для навколишнього фону. Експерименти показали, що для $C \leq 1,6$ підхід на основі Level Set не виявляє об'єкти, головним чином, через вплив спеклу. Таким чином, доцільно дослідити вплив контрастності об'єкта на надійність виявлення об'єктів. Крім того, можна очікувати, що ймовірність правильно виявити об'єкт P_{cd} залежить від кількості пікселів, які йому належать.

Для оцінки ефективності алгоритму було проведено тести з зашумленим зображенням. Було запропоноване спеціально створене безшумне зображення з досить великою кількістю об'єктів малого розміру, які використовуються для тестування виявлення об'єктів на основі Level Set. Об'єкти представляють різні контрасти щодо однорідного фону, і C змінюється від 1,5 до 5,0. Об'єкти мають різну кількість пікселів N_{ss0} . Аналіз карти показав, що об'єкт виявляється з більшою ймовірністю, коли його контраст або параметр N_{ss0} збільшуються (наприклад, $N_{ss0} > 9$). Ще одне важливе спостереження полягає в тому, що об'єкти з більшим N_{ss0} виявляються цілком задовільно. Також перевага підходу Level Set полягає в тому, що для змодельованого зображення не спостерігалось помилкових виявлень, хоча невеликі об'єкти з низьким C були пропущені. Зазвичай досягти відповідного компромісу між ймовірністю правильного виявлення та частотою помилкових тривог є важким завданням шляхом встановлення відповідного порогу в алгоритмах виявлення цілі. Метод Level Set досить добре справляється з цим завданням, не створюючи помилково виявлені цілі, а також забезпечує правильне виявлення об'єктів із досить низьким контрастом відносно навколишнього фону.

Останній підрозділ присвячено питанням оцінки ефективності фільтрації для різних типів зображень. В роботі розроблено метод прогнозування ефективності придушення шуму для реальних багатоканальних зображень, спотворених сигнально-залежним шумом. Як параметр, що характеризує властивості зображення та шуму, застосована ймовірність $P_{2\sigma}$. Це середня ймовірність того, що амплітуди коефіцієнтів ДКП у блоках 8×8 пікселів не перевищують значення $2\sigma(n, m)$ для блоку з верхнім лівим кутом у nm -му пікселі аналізованого зображення. Поріг $2\sigma(n, m)$ розраховується індивідуально для кожного блоку з урахуванням апріорі відомої залежності локальної дисперсії від локального середнього (для блоку) у випадку сигнал-залежного шуму ($\sigma(n, m) = \sigma_{add}$ для випадку адитивного шуму, де σ_{add} позначає стандартне відхилення шуму). Аналогічно визначається показник $P_{0,5\sigma}$.

Ефективність придушення шуму розрахована за допомогою формул:

$$\begin{aligned} \text{IPSNR} &= \text{PSNR}_{out} - \text{PSNR}_{inp}, \\ \text{PSNR}_{out} &= 10 \log_{10} (\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{true} - I_{ij}^f)^2 / IJ), \\ \text{PSNR}_{inp} &= 10 \log_{10} (\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{true} - I_{ij}^n)^2 / IJ), \end{aligned} \quad (4)$$

та визначалася у дБ. Значення IPSNR близько нуля (менше 1 дБ) вказує на те, що ефективність фільтрації низька і немає практичної потреби її виконувати. Крім того, можливе також використання метрик візуальної якості як-то PSNR-HVS-M (або інших):

$$\text{IPSNR} - H = \text{PSNR} - \text{HVS} - M_{\text{out}} - \text{PSNR} - \text{HVS} - M_{\text{inp}}, \quad (5)$$

де наведені метрики вимірювалися так само в дБ. Якщо $\text{IPSNR} - H$ менше 1 дБ, то фільтрація так само не має сенсу.

Проведено аналіз діаграм розсіювання сусідніх спектральних каналів гіперспектральних зображень та показано, що існує тісний зв'язок між формою діаграми розсіювання та ефективністю застосування фільтрації. Встановлено, що показники IPSNR та $\text{IPSNR} - H$ можна прогнозувати з достатньою точністю на основі попередніх аналізу діаграми розсіювання та підгонки кривої (рис. 6).

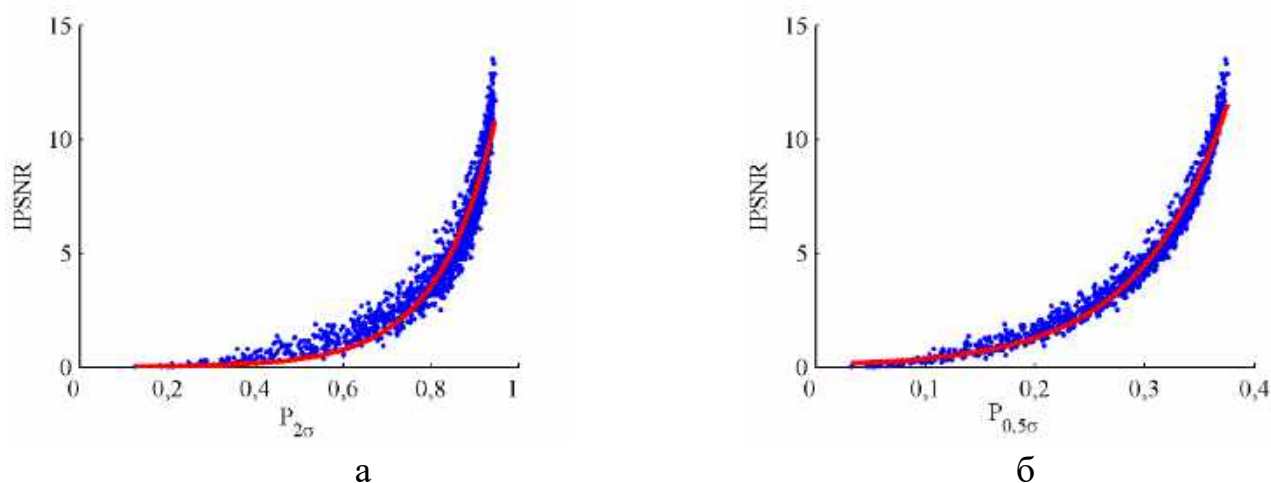


Рисунок 6 – Скатерограма IPSNR як функція від: $P_{2\sigma}$ (а), $P_{0.5\sigma}$ (б)

Маючи вписані криві та розраховане для конкретного зображення $P_{2\sigma}$ або $P_{0.5\sigma}$, можна отримати прогнозоване IPSNR та/або $\text{IPSNR} - H$. Тоді стає можливим прийняття рішень щодо доцільності застосування фільтрації для окремих каналів багатоканальних зображень. Проведено експериментальні дослідження на реальних гіперспектральних даних, які показали, що для значної кількості каналів застосування фільтрації є доцільним, оскільки забезпечує значне покращення якості зображення. При цьому, для каналів з низьким рівнем шуму або високою кореляцією з сусідніми каналами, застосування фільтрації може не призводити до суттєвого покращення якості або навіть спричиняти невелику втрату інформації.

Крім того, в підрозділі розглянуто питання оцінки ефективності розроблених методів фільтрації з використанням як традиційних (PSNR, SSIM), так і візуальних метрик якості. Проведено порівняльний аналіз розроблених методів з існуючими аналогами (медіанний фільтр, фільтр Вінера, нелокальний усереднюючий фільтр), який підтвердив їхню вищу ефективність у придушенні шумів при збереженні

важливих деталей зображення. Наведено приклади візуальної оцінки якості фільтрованих зображень ДЗЗ (рис. 7), які підтверджують переваги запропонованих адаптивних підходів у збереженні деталей та важливої контекстної інформації.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено розробці та вдосконаленню алгоритмів стиснення незашумлених зображень, а також дослідженню двоетапних процедур забезпечення бажаної якості зображень. Особливу увагу приділено адаптивному стисненню багатоканальних зображень дистанційного зондування Землі та аналізу властивостей так званих "дивних" зображень ДЗЗ.

Розглянуто двоетапні процедури забезпечення необхідної якості зображень перед їх стисненням. Існує багато невирішених питань щодо стиснення зображень із втратами, включаючи те, який кодер використовувати, як забезпечити бажаний КС, як забезпечити швидке стиснення та декомпресію тощо. Але одним із найважливіших завдань є забезпечення бажаної якості стиснутих зображень, оскільки в іншому випадку стиснення з втратами може втратити сенс. Необхідно вирішити декілька завдань. По-перше, слід вибрати хорошу метрику. По-друге, необхідно знати вищезазначені порогові значення. По-третє, має бути доступна процедура, здатна забезпечити ці порогові значення, і вона має бути достатньо швидкою та точною. Було розроблено та проаналізоване гібридне рішення, яке названо двоетапним підходом. Він включає в себе попереднє стиснення/декомпресію з обчисленням використаної метрики якості. Потім, використовуючи отриманий раніше усереднену криву швидкість/спотворення (КШС), визначається, як необхідно змінити параметр, що керує стисненням (ПКС). Після цього виконується остаточне стиснення.

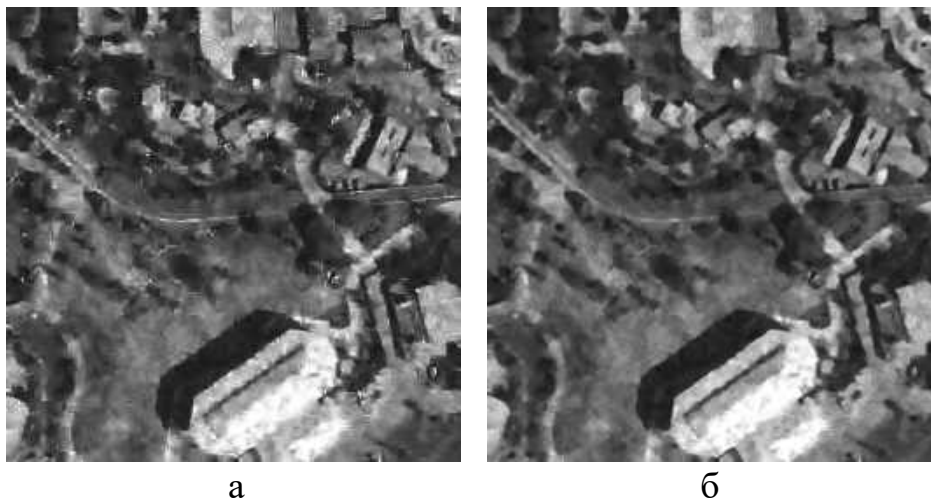


Рисунок 7 – Вихідні зображення для адаптивних фільтрів: ДКП+Хаар (а), ДКП+інтегро-диференціальний фільтр (б)

Аналіз залежностей на рис. 8 дозволяє зробити декілька висновків. По-перше, видно, що всі залежності монотонно спадають, і причини цього зрозумілі – більший КС зазвичай пов'язаний з більшим рівнем спотворень. По-друге, модифікації кодерів, призначені для забезпечення високої візуальної якості (наприклад, ADCT-M), дійсно працюють найкращим чином.

Ці спостереження дозволяють запропонувати наступну процедуру. Першим кроком є стиснення та розпакування зображення за допомогою початкового ПКС (KK_1 для AGU та ADCT), KK – крок квантування. Цей початковий PKC_{init} можна визначити з усередненої залежності використаної метрики від використаного ПКС (як PSNR від KK , представленою на рис. 9) для даного кодера та для M_{des} .

Такі усереднені залежності можна отримати заздалегідь в автономному режимі для великого набору тестових зображень. Крім того, слід визначити похідну метрики $dM/dPKC=M'$ для початкового значення ПКС. Потім обчислюється M_{init} , створений стисненням за допомогою PKC_{init} . Звичайно, для конкретного зображення, яке стискається за допомогою M_{des} , значення M_{des} і M_{init} відрізняються.

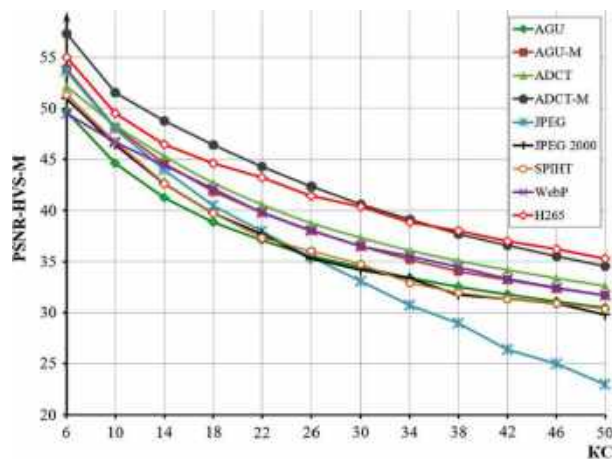


Рисунок 8 – Залежності PSNR-HVS-M від KK для тестового зображення Pole, стиснутого 9 різними методами стиснення

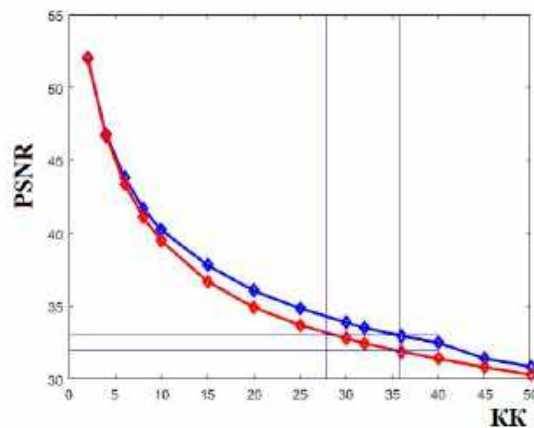


Рисунок 9 – Усереднена КШС (PSNR від KK , синій колір) і КШС для тестового зображення Boat (позначено червоним кольором)

Тоді, припускаючи лінійну залежність M від ПКС для розглянутої частини залежності, можна отримати оцінку PKC_{des} як:

$$PKC_{des} = PKC_{init} + (M_{des} - M_{init}) / M'. \quad (6)$$

Значення метрики, отримане в результаті першого стиснення, буде близьким до бажаного значення, але похибка невизначена. Потім виконується друге стиснення. Корекція параметра для другого кроку стиснення пов'язана з помилкою, отриманою в результаті першого стиснення. Методи розрахунку для показників візуальної якості однакові та виконуються за допомогою наступних формул:

$$KK_{des} = KK_{init} + (PSNR-HVS_{des} - PSNR-HVS_{init}) / M', \quad (7)$$

$$KK_{des} = KK_{init} + (PSNR-HVS-M_{des} - PSNR-HVS-M_{init}) / M', \quad (8)$$

де KK_{init} – початкове значення KK (приблизне значення з середньої кривої спотворення); $PSNR-HVS_{init}$ та $PSNR-HVS-M_{init}$ – значення метрик, отримане після першого етапу стиснення; $PSNR-HVS_{des}$ та $PSNR-HVS-M_{des}$ – бажане значення метрик; M' – похідна середньої кривої спотворення, що відповідає KK_{init} .

Таким чином, ідея полягає в тому, що після лінійної корекції, значення KK_{des} , ближче до бажаного значення, можна отримати для кожного зображення. виправляючи KK один раз, можна досягти значного підвищення точності на другому етапі стиснення.

Аналіз експериментальних результатів компресії кодерами SPIHT та AGU показує, що існує фіксований зв'язок між залежністю значень візуальної якості обох від КС. Оскільки прогнозування якості зображення після стиснення AGU було успішно досягнуто, стає можливим прогнозувати якість зображення для SPIHT за допомогою методу, що описано нижче. Запропоновано метод прогнозування візуальної якості для зображень, стиснутих кодером AGU на основі ДКП. Теоретична основа полягає в тому, що існує пряма залежність між спотвореннями, внесеними через квантування коефіцієнтів ДКП, і втратами в стиснених даних. Було використано параметр, який позначає середню ймовірність того, що квантовані коефіцієнти ДКП у блоках 8x8 дорівнюють нулю:

$$P_{0q} = (\sum_{n=1}^{N_{bl}} N_n) / 64N_{bl}, \quad (9)$$

де N_n визначає кількість коефіцієнтів ДКП, що мають бути обнулені (це відбувається, якщо величина коефіцієнта ДКП менша за $KK/2$) для n -го блоку; N_{bl} позначає кількість розглянутих блоків 8x8 пікселів, випадково вибраних у розглянутому зображенні. Вочевидь, що чим більше P_{0q} (більше коефіцієнтів, яким присвоєно нульові значення), тим більше КС. Функцію, яка апроксимує це співвідношення, можна подати як:

$$КС \approx 0,9462 \exp(2,895P_{0q}) + 1,045 \times 10^{-13} \exp(35,52P_{0q}). \quad (10)$$

Це означає, що P_{0q} можна спрогнозувати для даного КС або БНП (кількість біт на піксель) і навпаки.

Для стиснення зображень із забезпеченням візуально непомітних спотворень було запропоновано процедуру аналізу статистик коефіцієнтів ДКП для розрахунку приблизної MSE для заданого КК для кодерів AGU або ADCT. Тоді стає можливим налаштувати ПКС (у цьому випадку КК) таким чином, щоб прогнозоване значення розглянутої метрики (наприклад, MSE) приблизно дорівнювало бажаному значенню цієї метрики (наприклад, $MSE_{des}=25$ для 8-бітових зображень, що приблизно відповідає порогу невидимості внесених спотворень). Якщо ці припущення справедливі і відповідний алгоритм може бути реалізований, стає можливим здійснити стиснення з бажаною якістю без ітерацій.

Загальна формула для прогнозованої MSE_{pred} :

$$MSE_{pred} = (KK^2/12)f_0(x), \quad (11)$$

де $f_0(x)$ – функція параметрів X (або одного параметра). Завдання полягало в тому, щоб знайти цю функцію та вирішити, який параметр(и) використовувати як її аргумент(и). Завдання було вирішено з використанням діаграм розсіювання (рис. 10, 11) та регресії, а також попереднього досвіду.

Таким чином, отримана функція має вигляд:

$$f_0(P_0) = -0,007721\exp(4,824P_0) + 1,112\exp(-0,1455P_0). \quad (12)$$

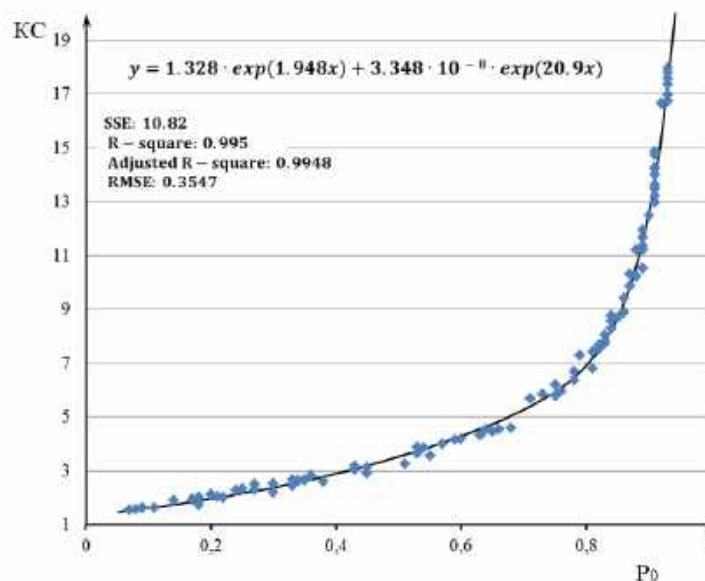


Рисунок 10 – Діаграма розсіювання КС на P_0 та підігнана крива

Маючи цю апроксимацію, пропонується наступна процедура забезпечення бажаного MSE_{des} :

1) починаємо з деякого KK_0 ; $KK_{des} = \sqrt{12MSE_{des}}$, тому рекомендується використовувати $KK_0 = \sqrt{12MSE_{des}}$; треба обчислити P_0 для цього KK_0 шляхом порівняння абсолютних значень отриманих коефіцієнтів АС ДКП з $KK_0/2$;

2) якщо $P_0 < 0,6$, треба використовувати KK_0 як KK_{des} та зупинити процедуру;

3) в іншому випадку збільшуємо KK і обчислюємо для нього P_0 доки $KK^2 f_0(P_0) \in [11MSE_{des}; 13MSE_{des}]$ (ширина інтервалу вибирається так, щоб забезпечити швидку конвергенцію і відповідну точність). Потім використовуємо KK як KK_{des} та зупиняємо процедуру. KK збільшується приблизно на $0,08KK_0$ на кожному наступному кроці.

Однак прогноз можна зробити і безпосередньо. Прогнозований PSNR можна представити як:

$$PSNR_{pred} = 10 \log_{10}(255^2 / (\frac{KK^2}{12} f_0(P_0))) = 58,92 - 20 \log_{10}(KK) + f_1(P_0), \quad (13)$$

де $f_1(P_0) = -10 \log_{10}(f_0(P_0))$.

Було розглянуто вплив стиснення з втратами на класифікацію багатоканальних зображень ДЗ. Запропоновано метод адаптивного поканального стиснення багатоканальних зображень із контролем якості, що базується на прогнозуванні впливу стиснення на точність класифікації об'єктів на зображенні.

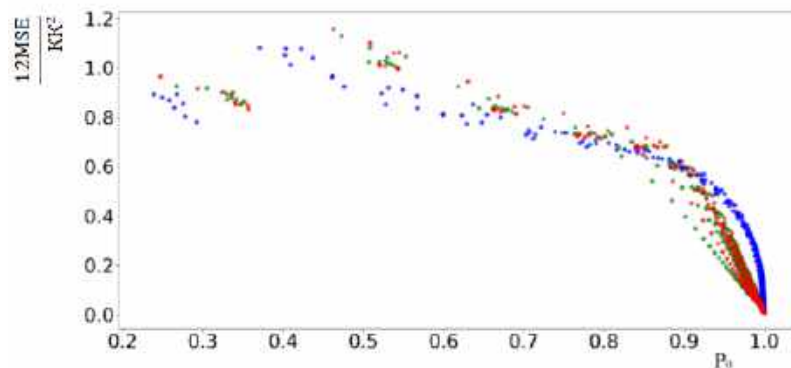


Рисунок 11 – Діаграма розсіювання $12MSE_{pred}/KK^2$ для окремих компонент кольорових зображень сітківки, кодер AGU

Розроблено модель, що дозволяє прогнозувати зниження точності класифікації залежно від коефіцієнта стиснення, застосованого до кожного спектрального каналу. Прогнозування здійснюється на основі аналізу статистичних характеристик каналів та їхньої інформаційної цінності для задачі класифікації. Запропоновано алгоритм адаптивного розподілу бітового бюджету між спектральними каналами таким чином, щоб забезпечити максимальний коефіцієнт стиснення при заданому максимально допустимому зниженні точності класифікації.

В якості прикладу адаптивного стиснення розглянуто підхід, що використовує покомпонентне стиснення з контролем якості, яка характеризується візуальною метрикою якості PSNR-HVS-M. Для кожного каналу багатоканального зображення визначається максимально можливий коефіцієнт стиснення, який не призводить до

візуально помітних спотворень. Загальний коефіцієнт стиснення для багатоканального зображення досягається за рахунок комбінування результатів стиснення окремих каналів.

Експериментальні дослідження на різних наборах даних мультиспектральних зображень ДЗЗ показали ефективність запропонованого підходу, який дозволяє досягти високих коефіцієнтів стиснення при збереженні прийнятної точності класифікації та візуальної якості відновлених зображень. Було досліджено два класифікатори (метод максимальної правдоподібності – ММП та нейронна мережа – НМ) та використано кодер AGU, а також проаналізовано ефективність кодерів на основі ДКП та вейвлетів (рис. 12).

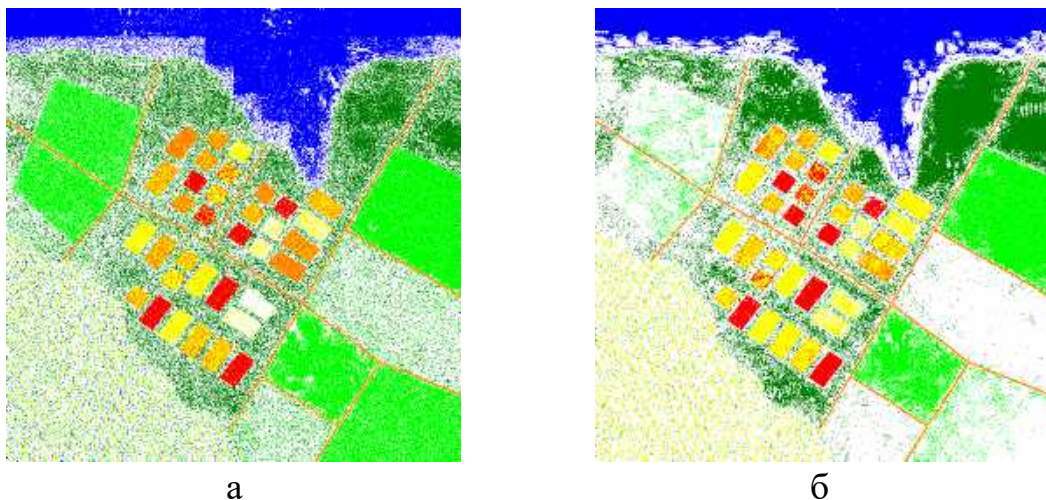


Рисунок 12 – Карти класифікації для стисненого зображення із забезпеченням $\text{PSNR-HVS-M} = 36$ дБ з використанням класифікатора ММП, навченого для того самого стиснутого зображення (а); стиснене зображення із забезпеченням $\text{PSNR-HVS-M} = 30$ дБ за допомогою класифікатора ММП, навченого для того самого стисненого зображення (б).

Показана можливість існування одно та триканальних зображень, які названі "дивними". Для них залежність між об'єктивними метриками якості (наприклад, PSNR) та КК не є монотонною (рис. 13), тобто при збільшенні КК якість зображення, оцінена за традиційною метрикою, може тимчасово покращуватися.

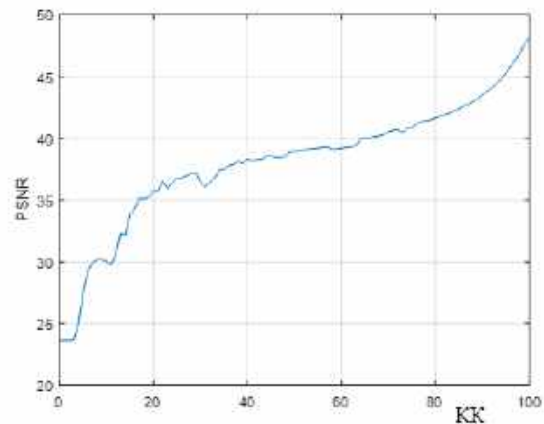
Проведено аналіз монотонності залежності PSNR від КК для чотирьох наборів даних типових зображень ДЗЗ для двох кодерів (JPEG та AGU). Показано, що існує певний відсоток зображень, для яких такі залежності не є монотонними. Найчастіше це спостерігається для зображень, що містять великі квазіоднорідні області з чіткою межею між ними (наприклад, зображення пляжу з піском та водою).

Проведено дослідження параметрів, що характеризують складність зображення, та їхньої кореляції з ймовірністю того, що зображення буде "дивним". Показано, що існує досить багато параметрів (наприклад, дисперсія яскравості, ентропія), які мають помітну кореляцію з ймовірністю немонотонної поведінки залежності PSNR від КК. Отримані результати мають важливе значення для розробки

методів стиснення, які б враховували особливості "дивних" зображень та забезпечували передбачувану поведінку метрик якості.



а



б

Рисунок 13 – Приклад дивного зображення (а) і КШС PSNR(КК) для JPEG (б) для цього зображення

В четвертому розділі розглядаються підходи до стиснення зображень, що спотворені шумом (ЗСШ), для кодерів на основі ДКП. Ці методи та алгоритми ґрунтуються на прогнозуванні середньоквадратичних похибок для заданого кроку квантування з використанням простого аналізу складності зображення. Проаналізовано статистичні та просторово-спектральні характеристики спотворень, внесених кодерами на основі ДКП, і показано, що вони залежать від кроку квантування та локального вмісту. Показано, що MSE спотворень можна досить легко спрогнозувати. Ці прогнози є достатньо точними і можуть бути використані для належного встановлення кроку квантування. Також розглядається підхід до прогнозування візуальної якості. Продemonстровано, що можна оцінити MSE-HVSM в обмеженій кількості блоків 8x8 пікселів, а потім спрогнозувати значення цієї метрики для всього зображення для розглянутого кодеру. Досліджено вплив вмісту зображення та кількості аналізованих блоків.

Необхідність вивчення статистичних і просторово-спектральних властивостей спотворень, що вносяться різними кодерами, важлива з декількох причин. По-перше, було зазначено, що спотворення через стиснення з втратами мають бути обмеженої інтенсивності та мати просторово «рівномірний» розподіл, щоб уникнути артефактів (включаючи артефакти класифікації). По-друге, деякі результати продемонстрували, що спотворення мають розподіл, близький до гаусового для відносно малих КС і КК для зображень складної структури, тоді як розподіл може бути негаусовим для зображень простих структур. Проведено детальний аналіз статистичних та просторово-частотних властивостей спотворень, що виникають при застосуванні кодерів на основі ДКП до зображень, спотворених адитивним шумом. Особливий акцент зроблено на вивченні залежності цих спотворень від ключового параметра кодування – КК, який безпосередньо визначає ступінь стиснення та рівень втрати інформації. Крім того, ретельно досліджується вплив локальних особливостей

зображення, таких як наявність дрібних деталей, різких градієнтів інтенсивності, а також протяжних однорідних областей, на характер і інтенсивність спотворень, що виникають в процесі стиснення.

Для експериментальних досліджень було обрано кодер AGU, а також розглянуто три характерні значення кроку квантування – 5, 10 та 20, що дозволяє охопити широкий діапазон ступенів стиснення, від відносно низького до високого. В якості тестових даних використано чотири зображення дистанційного зондування Землі (FR01-FR04), які відрізняються між собою рівнем деталізації та наявністю текстурних елементів. У таблиці 1 представлено значення середньої кількості біт на піксель (БНП), досягнуті при кожному значенні кроку квантування для кожного з тестових зображень. Слід зазначити, що для зображень у відтінках сірого, представлених 8 бітами на піксель, коефіцієнт стиснення (КС) може бути легко обчислений як $КС = 8/БНП$. Аналіз наведених у таблиці числових даних демонструє очікувану тенденцію до збільшення значення БНП (та, відповідно, зменшення КС) при зменшенні кроку квантування, що корелює з покращенням об'єктивної якості, оцінюваної за піковим відношенням сигнал/шум (PSNR). Проте, спостерігається варіативність у темпах зміни PSNR для різних зображень, що підкреслює значущість структурних особливостей зображення у процесі стиснення.

Таблиця 1 – Характеристики стиснення тестових зображень для AGU

ПКС	КК=5	КК=10	КК=20
FR01			
БНП	3,24	2,29	1,40
PSNR, дБ	45,06	39,74	34,75
PSNR-HVS-M, дБ	55,20	47,31	39,71
FR02			
БНП	3,28	2,34	1,46
PSNR, дБ	45,13	39,77	34,71
PSNR-HVS-M, дБ	54,98	47,46	39,87
FR03			
БНП	3,32	2,37	1,46
PSNR, дБ	44,97	39,53	34,45
PSNR-HVS-M, дБ	55,48	47,31	39,55
FR04			
БНП	3,09	2,19	1,35
PSNR, дБ	45,21	39,85	34,71
PSNR-HVS-M, дБ	54,28	47,11	39,63

З метою глибшого розуміння природи спотворень, в розділі проведено не лише кількісний, але й якісний аналіз. Зокрема, здійснювалася візуалізація різницевих зображень, отриманих шляхом порівняння оригінальних та стиснених зображень, а також аналіз спектральних характеристик коефіцієнтів ДКП. Результати аналізу показали, що зі збільшенням кроку квантування відбувається більш інтенсивне відкидання високочастотних коефіцієнтів ДКП, які відповідають за передачу дрібних деталей та різких контурів в зображенні. У випадку стиснення зашумлених

зображень, цей процес фільтрації високочастотних компонент може мати суттєвий вплив на кінцеву якість. З одного боку, він неминуче призводить до втрати частини корисних високочастотних складових, а з іншого – може сприяти частковому придушенню шуму, що може позитивно вплинути на загальне візуальне сприйняття стисненого зображення. Баланс між цими протилежними ефектами є ключовим фактором, що визначає оптимальні параметри стиснення зашумлених зображень. На основі проведеного детального аналізу зроблено висновок про принципову можливість прогнозування середньоквадратичної похибки спотворень, що виникають в процесі стиснення ЗСШ кодерами на основі ДКП з урахуванням КК та локальних статистичних характеристик зображення.

Проведено статистичний аналіз по блоках, враховуючи можливу просторову нестационарність спотворень. Використано блоки розміром 8×8 пікселів, які не перекриваються, і обчислено в кожному з них наступні два параметри (де позиція кожного блоку визначається координатами верхнього лівого кута n і m):

$$\sigma_{dist}^2 = \frac{1}{64} \sum_{i=m}^{m+7} \sum_{j=n}^{n+7} (\Delta_p(i, j) - \bar{\Delta}), \quad (14)$$

$$\sigma_{im}^2 = \frac{1}{64} \sum_{i=m}^{m+7} \sum_{j=n}^{n+7} (I^{or}(i, j) - \overline{I^{or}}), \quad (15)$$

де $\bar{\Delta} = \frac{1}{64} \sum_{i=m}^{m+7} \sum_{j=n}^{n+7} \Delta_p(i, j)$ та $\overline{I^{or}} = \frac{1}{64} \sum_{i=m}^{m+7} \sum_{j=n}^{n+7} I^{or}(i, j)$.

Отримані дані можна представити у вигляді графіків розсіювання середньоквадратичної помилки (RMSE) спотворень σ_{dist} проти локальних RMSE σ_{im} , що характеризують локальну (контентну) активність. Для тестових зображень отримані діаграми розсіювання, приклад для зображення Fr01 наведено на рис. 14 для трьох значень КК. Аналіз показує наступне:

1) Можна спостерігати великі області σ_{im} , де σ_{dist} є, загалом, випадковими, але їх середнє значення є практично постійним (області насичення); пізніше такі ділянки будуть називатися областю насичення. I – i

2) Не дивно, що в таких областях середнє значення σ_{dist} приблизно дорівнює (КК2/12) 0,5 – 1,4 для КК = 5 (рис. 14, а), 2,7 для КК = 10 (рис. 14, б) і 5 для КК = 20 (рис. 14, в).

3) Якщо σ_{im} досить малий, то спостерігається тенденція до зменшення σ_{dist} (в середньому) зі зменшенням σ_{im} ; ця тенденція спостерігається для $\sigma_{im} \leq \text{КК}$.

У квазіоднорідних областях зображення (блоках) існує великий відсоток коефіцієнтів ДКП, які менші за КК (особливо якщо КК достатньо великий). Помилки квантування для таких коефіцієнтів ДКП в середньому мають менші абсолютні значення порівняно з випадком, коли більшість коефіцієнтів ДКП мають абсолютні значення, більші за КК. Оскільки помилки квантування в області ДКП менші, локальні MSE для відповідних блоків стиснених зображень також менші.

Було отримано сукупні діаграми розсіювання для обох розглянутих кодерів. Крім того, представлено нормалізовані графіки розсіювання залежності $12^{0,5}\sigma_{dist}/KK$ від σ_{im}/KK . Підігнана крива для кодера AGU виражається як:

$$f\left(\frac{\sigma_{im}}{KK}\right) = -0,7381 \cdot \exp\left(-\frac{2,8526\sigma_{im}}{KK}\right) + 0,9685, \quad (16)$$

Треба зауважити, що значення 0,9685 у (16) не дорівнює 1, але воно досить близьке до одиниці. Аналогічно для кодера ADCT була отримана агрегована діаграма розсіювання. Найбільші варіації $12^{0,5}\sigma_{dist}/KK$ щодо підігнаних кривих мають місце для $\sigma_{im}/KK \approx 1$. Такі ситуації спостерігаються для блоків, які відповідають низькоконтрастним межам, деталям і текстурам.

Отримана підібрана крива для кодера ADCT представлена як:

$$f\left(\frac{\sigma_{im}}{KK}\right) = -0,9498 \cdot \exp\left(-\frac{4,0992\sigma_{im}}{KK}\right) + 0,9762. \quad (17)$$

У цьому випадку значення останнього параметра ще ближче до одиниці (дорівнює 0,9762).

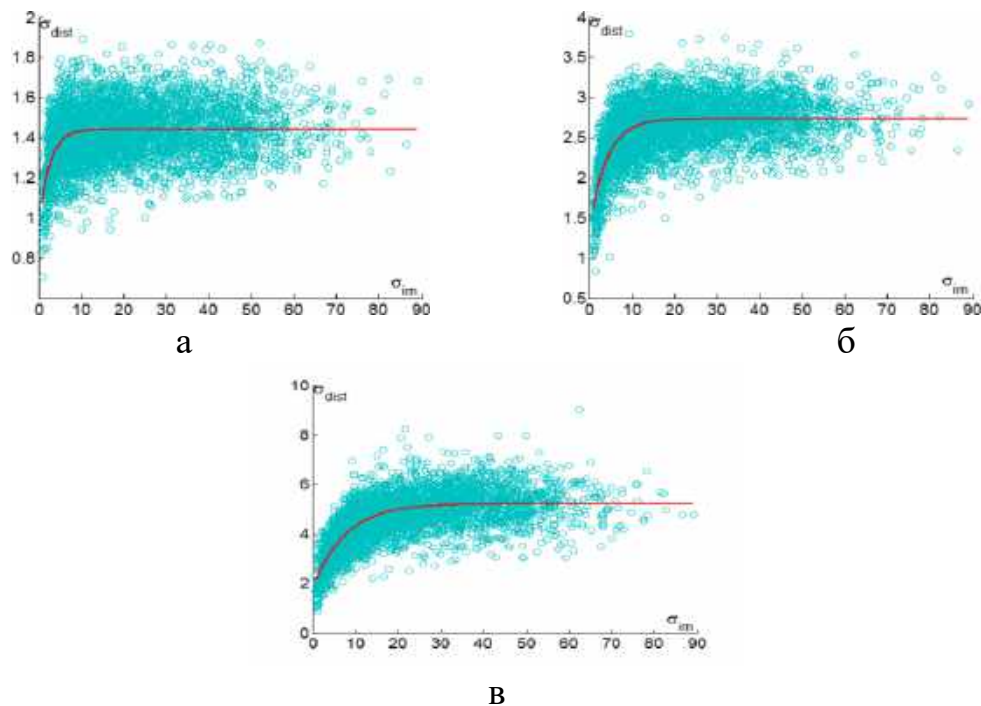


Рисунок 14 – Діаграма розсіювання σ_{dist} проти σ_{im} для тестового зображення FR01, KK дорівнює: 5 (а), 10 (б) і 20 (в)

Отримавши вирази (16) і (17) для кодерів AGU і ADCT відповідно, можна спрогнозувати σ_{dist} для кожного k -го блоку 8×8 пікселів зображення, використовуючи відповідну оцінку σ_{im} , отриману для цього блоку. Для кожного блоку та KK маємо:

$$\sigma_{dist} \approx \left(\frac{KK}{12^{0,5}} \right) f \left(\frac{\sigma_{im}}{KK} \right). \quad (18)$$

Припускаючи знання оцінок $\sigma_{dist}(k)$, $k = 1, \dots, K$, де K позначає загальну кількість блоків, MSE для всього зображення можна передбачити як:

$$MSE \approx \sum_{k=1}^K \frac{\sigma_{dist}^2(k)}{K}, \quad (19)$$

або

$$MSE \approx \sum_{k=1}^K \frac{KK}{12} f^2(\sigma_{im}(k)/KK)/K, \quad (20)$$

де $\sigma_{im}(k)$ – значення СКВ в k -му блоці, яке визначається за формулою (15). Треба зазначити, що дуже легко обчислити всі $\sigma_{im}(k)$, $k = 1, \dots, K$ заздалегідь, якщо позиції блоків також відомі заздалегідь. Це дозволяє підібрати KK для забезпечення бажаної якості.

Крім того, розглядаються сучасні підходи до розробки інтелектуальних алгоритмів стиснення, основною метою яких є досягнення максимально можливого ступеня стиснення при збереженні такого рівня якості відновленого зображення, щоб внесені спотворення були практично непомітні для людського ока.

Під час проведення досліджень було продемонстровано практичну можливість ефективної оцінки значення метрики MSE-HVSM на основі аналізу лише обмеженої кількості випадково обраних блоків, що не перекриваються, зображення розміром 8×8 пікселів. Запропоновано статистичний метод екстраполяції значення цієї метрики, розрахованої на зазначеній вибірці блоків, на все зображення в цілому для конкретного кодера на основі ДКП та заданого значення кроку квантування. Проведено ретельну експериментальну оцінку впливу таких факторів, як структурна складність зображення та кількість аналізованих блоків, на точність прогнозування візуальної якості. Отримані результати свідчать про те, що для досягнення прийнятної рівня точності прогнозування значення MSE-HVSM немає необхідності в аналізі всіх без винятку блоків зображення, достатньо мати 500 випадково розкиданих блоків, що дозволяє значно скоротити обчислювальні витрати.

Крім того, в розділі приділено значну увагу актуальному питанню оптимального вибору параметрів стиснення, зокрема величини кроку квантування, при стисненні зображень, що містять адитивний шум. Проаналізовано поведінку низки візуальних метрик якості, включаючи MS-SSIM, PSNR-HVS та PSNR-HVS-M, в залежності від KS при різних рівнях інтенсивності адитивного шуму, що спотворює оригінальне зображення. Особливий інтерес представляє дослідження феномену оптимальної робочої точки (ОРТ), який полягає в тому, що при стисненні ЗСШ збільшення ступеня стиснення (тобто збільшення KK) на певному етапі може призводити не до подальшого погіршення, а до тимчасового покращення якості зображення, якщо її оцінювати у порівнянні із зображенням без шуму за візуально орієнтованими метриками. Це явище пояснюється тим, що більш грубе квантування

може сприяти ефективнішому придушенню залишкового шуму, що в свою чергу позитивно впливає на суб'єктивне сприйняття відновленого зображення. На основі проведеного експериментального аналізу було сформульовано емпіричне правило для наближеного вибору оптимального КК: $KK \approx 3,5\sigma$, де σ позначає середньоквадратичне відхилення адитивного шуму (рис. 15). Також було досліджено вплив структурної складності зображення на ймовірність виникнення та характеристики ОРТ. Встановлено, що ОРТ з більшою ймовірністю спостерігається для відносно простих за своєю структурою зображень, які піддалися впливу досить інтенсивного адитивного шуму. Для зображень, що характеризуються високою деталізацією та складним текстурним вмістом, а також для випадків, коли рівень шуму є відносно низьким, залежність візуальних метрик якості від коефіцієнта стиснення, як правило, має монотонно спадний характер. Запропоновані методи та алгоритми розрахунку ПКС в ОРТ для таких сучасних кодерів, як BPG, HEIF та AVIF.

В п'ятому розділі розглядаються питання стиснення медичних зображень, в тому числі спотворених шумами різної природи. Зокрема, проаналізовані особливості стиснення медичних зображень, що сформовані сучасними системами реєстрації офтальмологічних та стоматологічних зображень. Також виявлені особливості шумів, що присутні на більшості медичних зображень. Розроблено підходи і надано рекомендації щодо стиснення таких зображень із урахуванням візуальної якості.

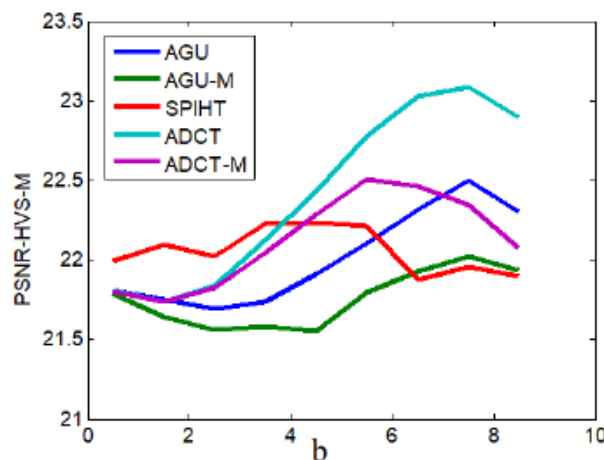


Рисунок 15 – Залежності $PSNR-HVS-M = f(b)$ для досліджуваних кодерів, зображення Goldhill, спотворено просторово-корельованим шумом з дисперсією рівною 200

Спочатку було проаналізовано більш простий випадок застосування кодера AGU окремо до R, G та B компонентів зображень сітківки. Розглянуто кілька зображень сітківки ока різної складності (з різною кількістю деталей, важливих для діагностики). MSE внесених втрат як функції КК для трьох кольорових компонентів трьох тестових зображень представлені на рис. 16. Аналіз цих залежностей показує, що вони дещо відрізняються для різних кольорових компонентів і різних кольорових зображень. Найбільші спотворення спостерігаються для синього компонента.

Одне з завдань полягало в тому, щоб забезпечити бажану MSE при роздільному стисненні компонентних зображень. В попередніх розділах було встановлено, що MSE приблизно дорівнює $KK^2/12$ для малих KK . Аналогічно до методу, запропонованого у розділі 3, проведено регресійний аналіз на базі кольорових зображень сітківки з метою визначення KK як функції відсотка нулів коефіцієнтів ДКП. Треба зазначити, що функція підгонки має бути досить плавною, вона повинна бути або монотонною, або мати максимум для P_0 близько 0,4, а значення функції повинні бути додатними для всього діапазону можливих значень P_0 . Враховуючи вищезазначене, проаналізовано декілька типів функцій для підгонки кривої до діаграми розсіювання на рис. 17, а. Ці функції є сумою двох експонент з чотирма регульованими параметрами ($R^2=0,982$, $RMSE=0,030$), підгонкою ряду Фур'є ($R^2=0,956$, $RMSE=0,047$), поліномом п'ятого порядку ($R^2=0,985$, $RMSE=0,027$, рис. 17, б), і степеневою функцією ($R^2=0,980$, $RMSE=0,032$). Сума двох експоненціальних функцій ($f(P_0)=-6,125e-05*\exp(9,477*x) + 1,073*\exp(-0,2914*x)$) і поліном п'ятого порядку є однаково хорошим вибором.

Вищезазначені експоненціальні та поліноміальні наближення відповідають діаграмі розсіювання з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,976$ і середньоквадратичним значенням 0,040. Тож, дійсна та сама процедура визначення KK , що й в розділі 3.

Оскільки MSE_{HVS-M} є більш адекватною мірою візуальної якості, ніж MSE, то нами отримано діаграму розсіювання MSE_{HVS-M} від KK для кодера AGU.

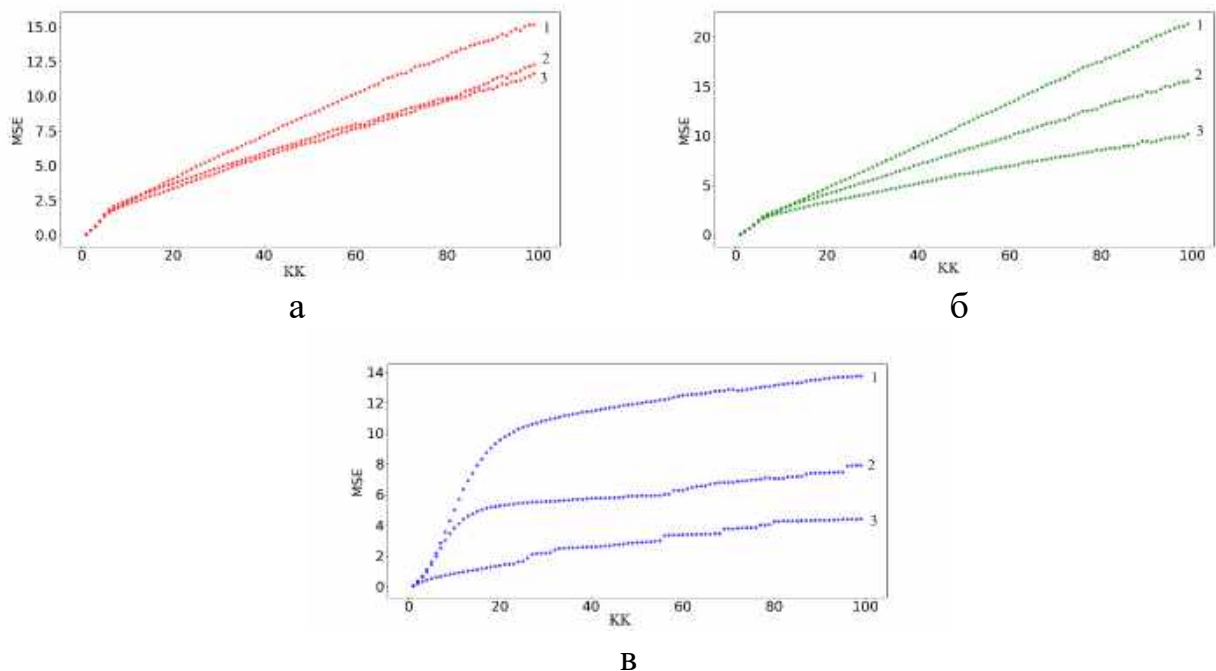
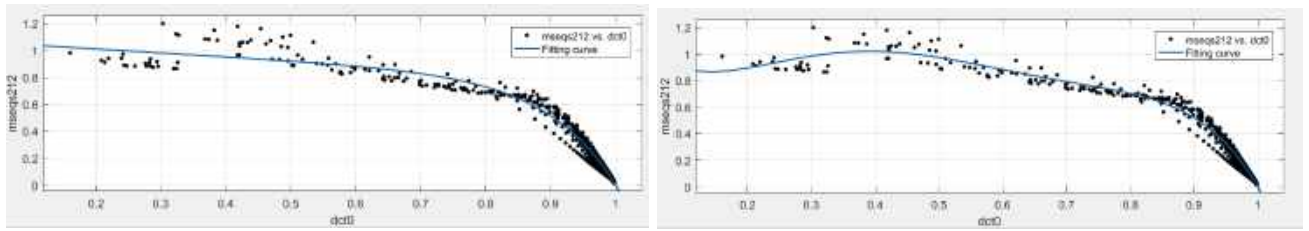


Рисунок 16 – Залежності MSE від KK для трьох різних тестових зображень (1, 2, 3) для R (а), G (б) і B (в) компонентів кольору



а

б

Рисунок 17 – Графіки розсіювання та апроксимаційні криві для суми двох експонент (а) і полінома п'ятого порядку (б)

В результаті регресійної підгонки були отримані 3 достатньо ефективні моделі:

$$MSE_{HVS-M} = 0,02896KK^{1,976}, \quad (21)$$

$$MSE_{HVS-M} = 0,02505KK^2 + 0,077KK - 0,7803, \quad (22)$$

$$MSE_{HVS-M} = 42,49 \exp(-((KK - 45,79)/21,56)^2). \quad (23)$$

Аналіз цих виразів показує, що MSE_{HVS-M} приблизно пропорційна KK^2 . Для всіх трьох наведених вище виразів значення R^2 практично однакові і дорівнюють 0,95, тобто досить високі. Значення RMSE підгонки дорівнюють 2,89, 2,88 і 2,91, тобто всі три апроксимації (21) – (23) майже однаково задовільні. Тому для вибору найкращого наближення необхідно враховувати інші фактори. Апроксимація (21) є найкращою, оскільки вона дає MSE_{HVS-M} дуже близько до нуля для $KK=0$ і всі значення є позитивними (на відміну від апроксимації (22)).

Розглянемо тепер дані для кодеру AGU-M. Були отримані діаграма розсіювання, один приклад підігнаної кривої, а також тестові зображення (рис. 18). Основні спостереження такі ж, як і в попередньому випадку. Отримані наближення такі (KM – коефіцієнт масштабування):

$$MSE_{HVS-M} = 0,1195KM^{1,976}, \quad (24)$$

$$MSE_{HVS-M} = 0,0275KM^2 + 0,5307KM - 2,161, \quad (25)$$

$$MSE_{HVS-M} = 61,4 \exp(-((KM - 44,92)/22,73)^2). \quad (26)$$

Отримані значення R^2 є меншими, ніж у попередньому випадку, і вони становлять близько 0,91, тоді як усі RMSE приблизно дорівнюють 6. Наближення (24) є найкращим. Тоді, щоб забезпечити $MSE_{HVS-M}=4$, KM має бути близько 8. Для розглянутого набору зображень найбільший KC=31,3, тоді як найменший KC=8,9. Це означає, що KC значно залежить від вмісту (складності) зображення. MSE_{HVS-M} коливався від 1,53 до 4,12. Стиснені зображення представлені на рис. 18, а та рис. 18, б. Можна констатувати, що видимих спотворень не вноситься. Крім того, щоб підтвердити збереження діагностично важливої інформації (деталі), на рис. 18, в та рис. 18, г показано збільшений фрагмент до і після стиснення. Як бачимо, ніяких відмінностей виявити не вдається.

Розглянуто проблему ефективного безітераційного стиснення зображень зубів без візуально помітних спотворень. Спочатку було показано, що цю проблему можна вирішити шляхом застосування кодеру ADCT із запропонованим налаштуванням КК. Після встановлення КК додаткові ітерації для схеми стиснення не були потрібні, і непомітність внесених спотворень була практично гарантована. Це було підтверджено відповідно до об'єктивних показників візуальної якості, які сильно корелюють з MOS, підтвердженими візуальними прикладами та експериментами, проведеними групою стоматологів. Жодних внесених артефактів та/або втрат діагностично цінної інформації виявлено не було. Водночас були надані високі значення КС (від 7,5 до 20,6 залежно від контексту зображення).

Розглянуто властивості завад на зубних знімках, отриманих сучасною цифровою рентгенівською системою Morita. Показано, що шум на таких зображеннях є просторово корельованим із середнім або високим рівнем кореляції. Було також показано, що шум у стоматологічних зображеннях залежить від сигналу, але модель залежності сигналу є досить складною, нелінійною та, іноді, немонотонною через наявність ефекту відсікання через контрастування зображень, що застосовується внутрішньо у обладнанні.



а



б



в



г

Рисунок 18 – Тестові фрагменти, для яких КМ=8, КС=12,5 (а), КМ=8, КС=10,6 (б), збільшений фрагмент пролікованого зуба до (в) і після (г) компресії

В роботі були розраховані відповідні залежності для шести тестових зашумлених зображень з дисперсіями АБГШ 25 і 100 відповідно. PSNR було розраховано між зашумленим істинним зображенням та зашумленим стисненим зображенням. Залежності для кодера VPG наведені на рис. 19. У загальному сенсі ці залежності є типовими КШС, де якість відповідно до PSNR погіршується, якщо Q збільшується. Однак варто звернути увагу на два моменти. По-перше, для певного Q (більше певного порогу T_1 і менше певного порогу T_2) криві для всіх тестових зображень «йдуть разом» з досить високим абсолютним значенням першої похідної. Для кривих на рис. 19, а це має місце при $6 \leq Q \leq 27$, тоді як для другого випадку (рис. 19, б) спостерігається більший інтервал такої поведінки ($5 \leq Q \leq 33$).

Якщо дисперсія шуму відома заздалегідь або попередньо оцінена з відповідною точністю, можна спрогнозувати PSNR для певного діапазону значень Q для кодера VPG за допомогою кривих на рис. 19. Це також можна розглядати іншим способом. Можна легко встановити Q для забезпечення бажаного PSNR. Наприклад, якщо потрібно забезпечити PSNR = 40 дБ, рекомендується використовувати $Q = 23$. Треба зазначити, що ця рекомендація дійсна для більшості тестових зображень, які практично вільні від шуму. По-друге, при $Q > T_2$ криві починають розходитися (рис. 19) і різниця між значеннями PSNR для розглянутих тестових зображень стає більшою при більшому Q .

Ці відмінності можуть досягати 5...7 дБ (див. дані для $Q = 40$ на рис. 19, а, PSNR для більш простих структурних зображень є більшим, найменші PSNR спостерігаються для найскладніших структурних зображень).

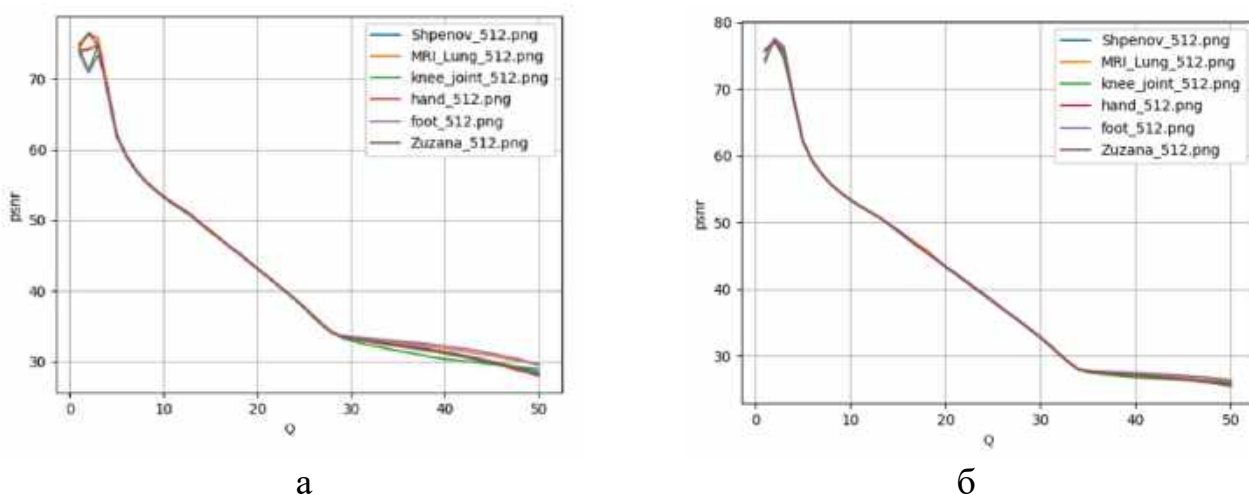


Рисунок 19 – КШС для шести тестових зашумлених зображень (PSNR розраховано між зашумленим нестисненим та зашумленим стисненим), кодер VPG: $\sigma^2 = 25$ (а) та $\sigma^2 = 100$ (б)

Таким чином, якщо PSNR між спотвореним і відповідним еталонним зображенням перевищує 36 дБ, то дуже ймовірно, що спотворення не видно. У всіх випадках, на рис. 19, це відбувається при $Q \leq 25$. Наразі неможливо дати уявлення про те, як розрізняти вищезазначені ситуації перед початком стиснення за допомогою VPG. Було зроблено наступне спостереження. Якщо дисперсія шуму збільшується,

ОРТ переміщується в область більшого Q (рис. 20). Для $\sigma^2=25$ ОРТ спостерігається для Q близько 29 (рис. 20, а), для $\sigma^2=64$ ОРТ має місце для Q близько 33 (рис. 20, б), а для $\sigma^2=100$ ОРТ спостерігається для Q близько 35. Це показує, що, швидше за все, параметри ОРТ можна визначити за умови, що дисперсія шуму апіорі відома або заздалегідь оцінена з відповідною точністю.

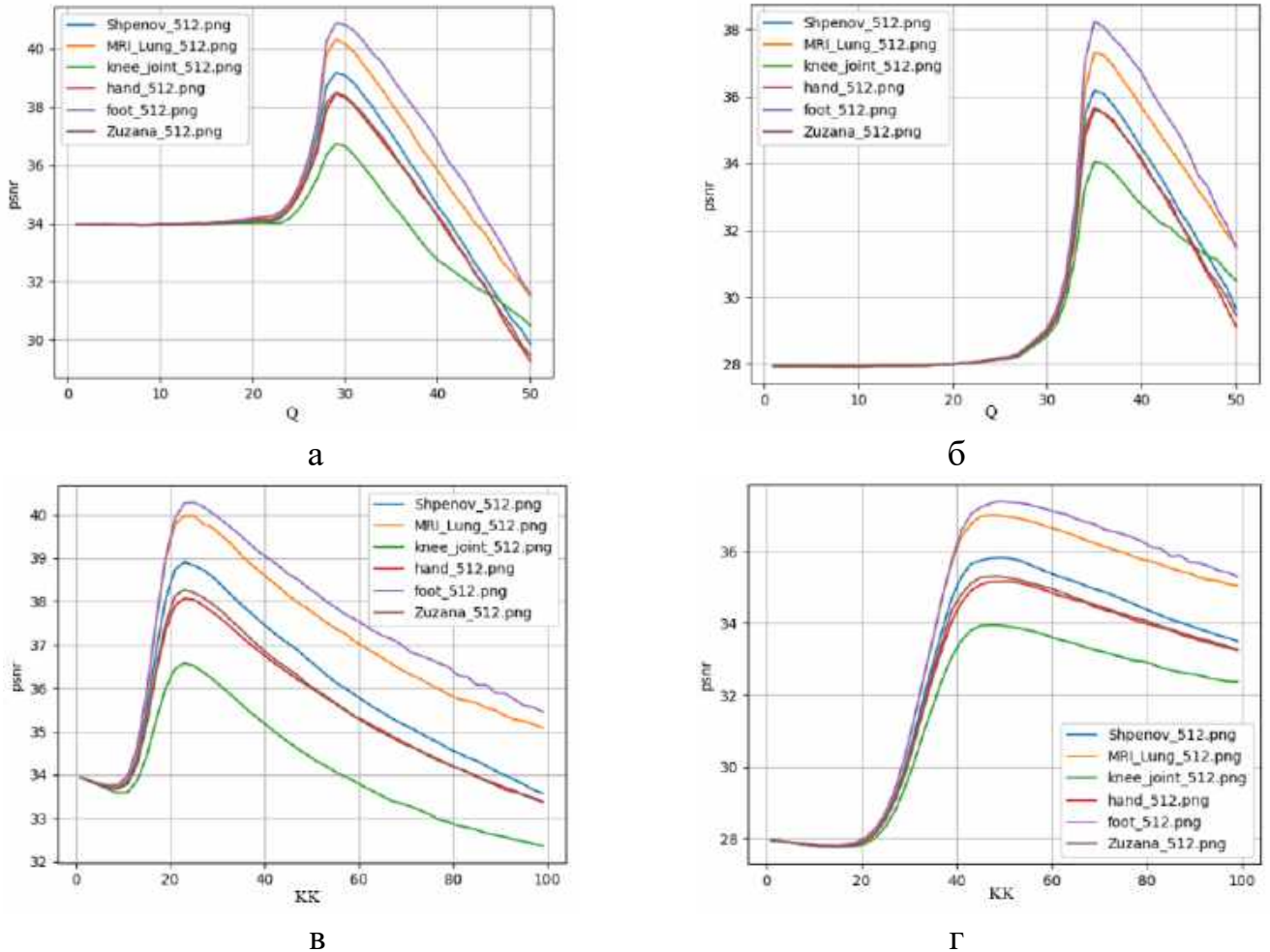


Рисунок 20 – КШС для шести тестових зашумлених зображень (PSNR розраховано між істинним та зашумленим стисненням), кодер BPG: $\sigma^2 = 25$ (а) та $\sigma^2 = 100$ (б), кодер AGU: $\sigma^2 = 25$ (в) та $\sigma^2 = 100$ (г)

Було показано, що існує декілька відмінностей у залежностях для випадків просторово корельованого шуму та некорельованого шуму. Крім того, параметри просторової кореляції значною мірою впливають на основні тенденції. Щоб надати можливість порівняти результати для SPIHT та інших кодерів, було зроблено наступне. Результати спочатку були отримані для кодера AGU, який забезпечує КШС, подібні до кодера SPIHT. Потім для кожного тестового зображення, кодера та СКВ шуму були визначені КС для AGU, далі ці КС були перераховані в БНП, і цей БНП було використано в SPIHT для стиснення. Після цього були визначені параметри стиснення кодера SPIHT. Існують різні способи моделювання 2D просторово корельованого шуму. Один із найпростіших надається Matlab (функція 'fspecial' з

типом='gaussian', window=7), де потрібно встановити лише параметр χ функції Гауса, яка визначає вагові коефіцієнти 2D фільтра з кінцевою імпульсною характеристикою. Було використано два значення: $\chi=0,7$ (цей випадок умовно назовемо «середнім кореляційним шумом») і $\chi=1,0$ (цей випадок умовно назовемо «сильним кореляційним шумом»). Вертикальні та горизонтальні головні перерізи 2D автокореляційної функції змодельованого корельованого шуму є ідентичними (хоча на практиці вони можуть бути різними і часто відрізняються). Треба зазначити, що $KK=\beta\sigma$ для кодерів AGU і ADCT, та $KM=\beta\sigma$ для кодерів AGU-M і ADCT-M. Випадок «середнього корельованого шуму» (СКШ) для тестового зображення MRT_Prepared представлено на рис. 21 для всіх п'яти розглянутих методів стиснення з втратами.

Досліджено окремий випадок стиснення зображень з втратами, спотворених просторово корельованим шумом. Показано, що просторова кореляція шуму має певний вплив на OPT та його властивості. По-перше, OPT спостерігається для більшого КК або КМ, ніж для АБГШ, що спотворює те саме зображення та має однакову дисперсію. По-друге, через це значення КС в OPT виявляються більшими, ніж для АБГШ шуму. Але OPT для просторово корельованого шуму є менш «очевидним», тобто забезпечується менш ефективна фільтрація шуму.

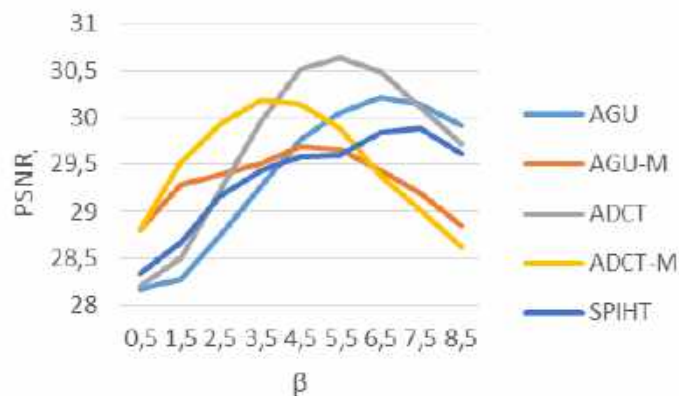


Рисунок 21 – Залежності $PSNR(\beta)$ для п'яти методів стиснення тестового зображення MRT_Prepared, СКШ, $\sigma=10$

Шостий розділ дисертаційної роботи присвячено питанням програмно-алгоритмічної реалізації розроблених методів стиснення та фільтрації зображень, а також дослідженню шляхів підвищення їхньої швидкодії. Особливу увагу приділено автоматичному стисненню зображень в задачах розпізнавання цілей та алгоритмічній реалізації методів фільтрації зображень, спотворених складними видами шумів.

Зокрема, розглядається проблема автоматичної адаптації параметрів стиснення зображень із втратами в контексті задач розпізнавання цілей. Обґрунтовано, що надмірне стиснення може призводити до втрати важливої візуальної інформації, необхідної для ефективного виявлення та ідентифікації цілей людиною-оператором або автоматизованими системами. Водночас, недостатнє стиснення призводить до неефективного використання каналів зв'язку та ресурсів зберігання.

В роботі проаналізовано результати експериментальних досліджень впливу стиснення на ефективність виявлення цілей людиною-спостерігачем, проведених іншими авторами. Зокрема, розглянуто порівняння впливу JPEG та фрактальних методів стиснення на здатність людини виявляти цілі на зображеннях. Відзначено, що фрактальні методи стиснення призводять до значно більшої втрати здатності виявляти цілі порівняно з JPEG при схожих коефіцієнтах стиснення.

З метою розробки підходу до автоматичного стиснення, що враховує вимоги задачі розпізнавання цілей, було проведено контрольований експеримент з оцінки впливу стиснення на ефективність людини-спостерігача. Результати цього експерименту показали, що для забезпечення прийняттого рівня ефективності виявлення цілей необхідно підтримувати певний рівень візуальної якості стиснених зображень (рис. 22).

На основі аналізу існуючих досліджень та з урахуванням специфіки задачі розпізнавання цілей, запропоновано підхід до автоматичного вибору параметрів стиснення (наприклад, рівня квантування в JPEG) таким чином, щоб забезпечити баланс між ступенем стиснення та збереженням візуальної інформації, критично важливої для виявлення цілей. Цей підхід передбачає можливість використання метрик якості зображення, які б корелювали з ефективністю виявлення цілей людиною. Проведено оцінку кореляції між різними метриками якості та результатами суб'єктивних тестів з виявлення цілей. Показано, що метрики, орієнтовані на оцінку якості зображення, досягають певної згоди з результатами суб'єктивних тестів, виміряних за допомогою лінійного коефіцієнта кореляції до 90%.

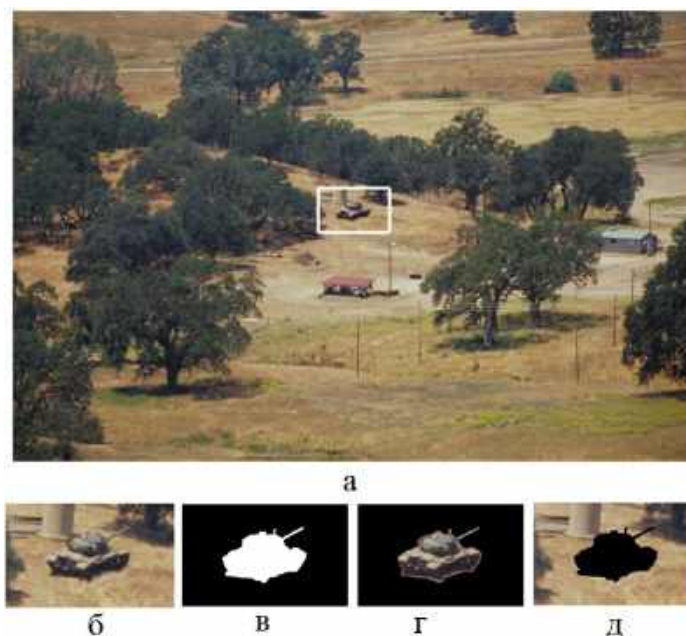


Рисунок 22 – Оригінальне зображення (а), зображення цілі (б), бінарне зображення, отримане ручною сегментацією (в), цільове та фонове зображення, отримані за допомогою бінарного зображення (г, д)

Досліджено шляхи прискорення процесів фільтрації зображень, що базуються на дискретному косинусному перетворенні. Запропоновано підхід до придушення

шумів на основі ДКП шляхом обробки зображень у блоках, що частково перекриваються. Традиційні методи фільтрації на основі ДКП часто обробляють зображення, розбиваючи їх на незалежні блоки, що може призводити до появи блокових артефактів на межах блоків. Використання блоків, що частково перекриваються, дозволяє зменшити ці артефакти та покращити якість фільтрації.

Під час дослідження було проаналізовано ефективність комбінованого порогового визначення коефіцієнтів ДКП в перекриваючихся блоках. Показано, що такий підхід забезпечує кращу ефективність придушення шуму порівняно з пороговою обробкою в незалежних блоках. Крім того, було досліджено можливість локальної адаптації порогів для коефіцієнтів ДКП залежно від характеристик локальних областей зображення. Результати показали, що локальна адаптація здатна додатково покращити якість фільтрації.

Було помічено, що середня кількість ДКП-коефіцієнтів у блоках, амплітуди яких перевищують заданий поріг, добре корелює з ефективністю фільтрації та глобально оптимальним β для фільтрації на основі ДКП із повним перекриттям. Оскільки для кожного блоку розраховуються ДКП-коефіцієнти, легко і швидко порівняти їх амплітуди з заданим порогом і визначити кількість ДКП-коефіцієнтів $N_{DCT}(n, m)$ для кожного nm -го блоку, який використовується в обробці. Тоді ідея локальної адаптації полягає в тому, щоб розрахувати $\beta(n, m)$ для кожного блоку окремо залежно від $N_{DCT}(n, m)$. Очевидно, що ця залежність має бути спадаючою, і є багато можливих варіантів. Ефективність залежить від попередньо встановленого порогу амплітуди коефіцієнта ДКП $T = b\sigma$, де b є параметром. Було перевірено декілька безперервних монотонно спадаючих функцій $\beta(n, m)$ від $N_{DCT}(n, m)$ і змінювали параметри цих функцій, а також змінювалось b , щоб знайти оптимуми для метрик MSE_{out} і $MSSIM$. Проблема полягає в тому, що для різних тестових зображень і дисперсій шуму положення оптимумів не збігаються. І дуже простим рішенням є використання $b=2,6$ і наступного жорсткого перемикавання для локально адаптивного налаштування $\beta(n, m)$:

$$\beta(n, m) = \begin{cases} 2,7, & \text{якщо } N_{DCT}(n, m) \leq 5 \\ 2,3, & \text{якщо } N_{DCT}(n, m) > 5 \end{cases}, \quad (27)$$

для випадку жорсткого порогу та

$$\beta(n, m) = \begin{cases} 4,4, & \text{якщо } N_{DCT}(n, m) \leq 6 \\ 3,5, & \text{якщо } N_{DCT}(n, m) > 6 \end{cases}, \quad (28)$$

для випадку комбінованого порогу.

Запропоновані методи були протестовані на зображеннях, спотворених як АБГШ, так і сигнально-залежним шумом. Експериментальні результати підтвердили здатність запропонованих підходів ефективно придушувати шуми обох типів при збереженні важливої інформації в зображеннях на прийнятному рівні. Використання блоків з частковим перекриттям та адаптивного визначення порогу дозволяє досягти

кращого компромісу між ступенем придушення шуму та збереженням деталей зображення, а також зменшити візуальні артефакти, характерні для блокової обробки.

Також було представлено алгоритмічну реалізацію розроблених в попередніх розділах методів фільтрації зображень, спотворених складними видами шумів. Особливу увагу приділено фільтрації рентгенівських знімків зубів, які характеризуються наявністю просторово корельованого шуму з невідомим спектром та стандартним відхиленням, що може змінюватися в різних областях зображення.

Для вирішення цієї складної задачі було запропоновано підхід, що базується на комбінації згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Networks, CNN). Розроблено дві глибокі згорткові нейронні мережі: NSPNet (Noise Suppression Prediction Network) та GDNet (Gradient Domain Network).

Мережа NSPNet призначена для прогнозування карти рівня шуму на вхідному ЗСІІ. Архітектура мережі включає декілька згорткових шарів з функціями активації ReLU та шари пакетної нормалізації. Мережа навчається на великому наборі синтетично створених ЗСІІ з різними характеристиками просторово корельованого шуму. На виході NSPNet формується карта, що відображає оцінку локального стандартного відхилення шуму в кожній точці зображення (рис. 23).

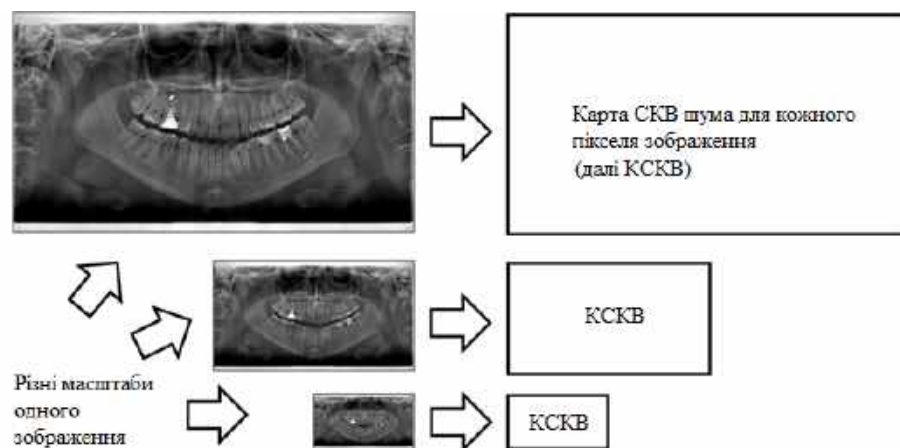


Рисунок 23 – Процедура оцінки спектру та рівнів шуму з трьох карт значень СКВ для трьох різних масштабів зображення

Мережа GDNet використовує інформацію про вхідне зашумлене зображення та прогнозовану карту шуму для безпосереднього придушення шуму. Архітектура GDNet також складається з декількох згорткових шарів, але на її вхід, окрім ЗСІІ, подається карта шуму, отримана з NSPNet. Мережа GDNet навчається таким чином, щоб на її виході формувалося очищене від шуму зображення з максимально можливим збереженням корисних деталей.

Результати експериментальних досліджень показали, що запропонований підхід, що використовує комбінацію NSPNet та GDNet, забезпечує значне покращення якості рентгенівських знімків зубів, спотворених складним просторово корельованим шумом. За об'єктивною метрикою PSNR (пікове відношення сигнал/шум), запропонований підхід перевершує інші сучасні методи придушення шуму більш ніж на 2,7 дБ. Крім того, візуальна оцінка результатів фільтрації

підтвердила ефективність запропонованого підходу у придушенні шуму при збереженні важливих деталей зображення. Завдяки своїй архітектурі, запропонований підхід є високоефективним і може бути застосований для придушення широкого спектру просторово корельованих шумів з невідомими спектральними характеристиками та змінним стандартним відхиленням.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дослідження було розроблено й запропоновано низку методів, алгоритмів та підходів до прогнозування, обробки та аналізу зображень, які мають високу ефективність і універсальність для застосування в задачах дистанційного зондування та медичної діагностики. Основні результати дисертації полягають у наступному:

1) Методи детектування текстур на зашумлених зображеннях. Було показано, що оптимальним є спільне використання локальних параметрів (відносної локальної дисперсії, квазірозмаху та параметра на основі косинусного дискретного перетворення) з обчисленням у вікні розміром 5×5 . Удосконалення алгоритмів навчання класифікаторів, зокрема через агрегування параметрів у ковзному вікні або використання потужних класифікаторів, таких як машина опорних векторів, дозволяє підвищити якість детектування й класифікації. Крім того, використання нейронних мереж на основі декількох локальних параметрів забезпечує високу ефективність із меншими обчислювальними витратами.

2) Фільтрація спекл-шуму у зображеннях дистанційного зондування. Для боротьби зі спекл-шумом запропоновано застосування методу Level Set для локалізації неоднорідностей зображень. Цей підхід дозволяє адаптивно застосовувати частотно-залежну фільтрацію до однорідних ділянок, забезпечуючи збереження важливих деталей. Використання вейвлет-фільтра Хаара та інтегрально-диференціального методу показало гарні результати як за кількісними метриками (MSE, MSSIM), так і за якістю збереження меж. Запропоновано способи суттєвого підвищення швидкодії обробки.

3) Прогнозування ефективності фільтрації. Розроблено метод прогнозування ефективності придушення сигнально-залежного шуму. Це дозволяє оцінювати покращення метрик, таких як PSNR і PSNR-HVS-M, до фільтрації, що скорочує час обробки та знижує обчислювальні витрати. Метод прогнозування продемонстрував високу точність для шумів різної природи (адитивного, мультиплікативного) і забезпечує адаптацію до особливостей зображень.

4) Стиснення зображень із втратами. Запропоновано двоетапну процедуру стиснення, яка дозволяє забезпечити бажаний рівень якості зображень згідно з метриками PSNR-HVS-M і PSNR з похибкою менше 1 дБ. Ефективність процедури підтверджено для різних типів зображень, включаючи медичні дані, і показано, що вона є значно швидшою за ітераційні підходи. У випадках, коли потрібна модифікація для забезпечення «недратівливих» спотворень, метод залишається універсальним і може бути адаптований для інших показників візуальної якості.

5) Аналіз характеристик шуму та адаптація алгоритмів. Проведено просторово-спектральний аналіз шумів у зображеннях, отриманих сучасними рентгенівськими системами. Показано, що шум є просторово корельованим і залежить від сигналу, що вимагає розробки адаптивних методів фільтрації. Запропоновано нові алгоритми, такі як NSPNet і GDNet, для сліпого придушення шуму, які забезпечують покращення PSNR на 2,7 дБ у порівнянні з існуючими методами.

6) Стиснення для задач медичної діагностики. Визначено, що стиснення зображень зубів із використанням кодера ADCT із правильно підібраними параметрами дозволяє досягти високих значень коефіцієнта стиснення без втрат діагностично важливої інформації. Застосування запропонованих підходів до медичних зображень гарантує непомітність спотворень, що підтверджено експериментами з групами стоматологів.

7) Контроль якості стиснення для багатоканальних даних. Запропоновано метод поканального аналізу мультиспектральних та гіперспектральних даних, що дозволяє визначити оптимальні параметри стиснення для кожного спектрального каналу. Показано, що для зображень із простою структурою стиснення може навіть покращити результати класифікації завдяки придушенню шумів і високочастотних варіацій.

Результати дослідження дозволяють розробляти практичні рекомендації щодо вибору параметрів кодерів залежно від властивостей даних. Це сприяє оптимізації процесів обробки зображень у реальних системах, таких як медична візуалізація, дистанційне зондування, робототехніка тощо. Дослідження відкривають перспективи для створення більш точних і адаптивних методів обробки, які можуть бути застосовані для 3D-даних і відеопослідовностей.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальних задач прогнозування та обробки зображень, які є критично важливими для сучасних систем дистанційного зондування та медичної діагностики. Отримані результати забезпечують наукову та практичну базу для подальшого розвитку високотехнологічних рішень у цих галузях, а також створюють умови для підвищення ефективності реальних систем обробки даних.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. С. К. Абрамов, Р. А. Кожемякин, С. С. Кривенко, Н. Н. Пономаренко, В. В. Лукин, “Эффективность фильтрации однозглядовых РСА-изображений при пространственно-коррелированных помехах,” *Радіоелектронні і комп’ютерні системи*, по. 3, pp. 18–25, 2012.

2. В. В. Лукин, А. В. Науменко, С. С. Кривенко, “Адаптивная фильтрация РСА-изображений с использованием нейросетевых детекторов границ,” *Радіоелектронні і комп’ютерні системи*, по. 4, pp. 121–129, 2012.

3. С. С. Кривенко, Е. О. Колганова, В. В. Лукин, “Фильтрация изображений с использованием преобразования Хаара в блоках,” *Системы обработки інформації*, no. 8, pp. 63–69, 2013.

4. V. V. Lukin, S. S. Krivenko, E. O. Kolganova, and M. K. Chobanu, “Acceleration and efficiency analysis of dct-based filtering,” *Telecom Rad Eng*, vol. 72, no. 7, pp. 613–626, 2013, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i7.50.

5. S. Abramov, S. Krivenko, A. Roenko, V. Lukin, I. Djurovic, and M. Chobanu, “Prediction of filtering efficiency for DCT-based image denoising,” in *2013 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Budva, Montenegro: IEEE, Jun. 2013, pp. 97–100. doi: 10.1109/MECO.2013.6601327.

6. D. V. Fevraleev, S. S. Krivenko, V. V. Lukin, R. Marques, and F. D. Medeiros, “Combining level sets and orthogonal transform for despeckling sar images,” *Авиационно-космическая техника и технология*, no. 2, pp. 103–112, 2013.

7. R. A. Kozhemiakin, S. S. Krivenko, V. V. Lukin, R. C. P. Marques, F. N. S. Medeiros, and B. Vozel, “Efficiency analysis of combined despeckling of single-look sar images,” *AKTT*, no. 5, pp. 102–111, 2013.

8. V. V. Lukin *et al.*, “Approaches to automatic data processing in hyperspectral remote sensing,” *Telecom Rad Eng*, vol. 73, no. 13, pp. 1125–1139, 2014, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i13.10.

9. S. Krivenko, V. Lukin, B. Vozel, and K. Chehdi, “Filtering efficiency prediction for images corrupted by signal-dependent noise,” in *12th International Conference Modern Problems Of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science*, 2014, pp. 615–617. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-01111060/>

10. S. Krivenko, V. Lukin, B. Vozel, and K. Chehdi, “Prediction of DCT-based denoising efficiency for images corrupted by signal-dependent noise,” in *2014 IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Apr. 2014, pp. 254–258. doi: 10.1109/ELNANO.2014.6873920.

11. V. V. Lukin *et al.*, “An approach to prediction of signal-dependent noise removal efficiency by dct-based filter,” *Telecom Rad Eng*, vol. 73, no. 18, pp. 1645–1659, 2014, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i18.40.

12. O. S. Rubel, R. O. Kozhemiakin, S. S. Krivenko, V. V. Lukin, B. Vozel, and K. Chehdi, “A method for predicting denoising efficiency for color images,” in *2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Apr. 2015, pp. 304–309. doi: 10.1109/ELNANO.2015.7146897.

13. A. Naumenko, S. Krivenko, V. Lukin, and K. Egiazarian, “Texture region detection by trained neural network,” in *2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, Kharkiv, Ukraine: IEEE, Jun. 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538174.

14. A. Naumenko, S. Krivenko, N. Ponomarenko, A. Zelensky, and V. Lukin, “Texture detection in noisy images by combining several local parameters,” in *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine: IEEE, Oct. 2015, pp. 230–233. doi: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357321.

15. С. С. Кривенко, А. В. Наumenко, and В. В. Лукин, “Обнаружение текстурных участков SVM-классификатором на изображениях при наличии помех,” *Радіоелектронні і комп’ютерні системи*, no. 2, pp. 50–57, 2015.

16. A. V. Naumenko, V. V. Lukin, M. S. Zriakhov, and S. S. Krivenko, “Feature aggregation for noisy image to improve ‘texture/non-texture’ classification,” in *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Apr. 2017, pp. 461–464. doi: 10.1109/ELNANO.2017.7939808.

17. S. K. Abramov, A. Naumenko, V. V. Lukin, S. S. Krivenko, and I. Kaluzhynov, “Neural network based detection of heterogeneities in noisy images,” *Telecom Rad Eng*, vol. 79, no. 19, pp. 1691–1705, 2020, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.20.

18. B. Vozel *et al.*, “Processing of multichannel Remote-sensing images with prediction of performance parameters,” in *Environmental Applications of Remote Sensing*, IntechOpen, 2016. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=Wm-QDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA373&dq=Processing+of+Multichannel+Remote-Sensing+Images+with+Prediction+of+Performance+Parameters&ots=ClwhdRf6aV&sig=1jtYRgPSY3irBSaTTqyoJQ-L3n4>

19. V. V. Lukin *et al.*, “Application of filtering efficiency prediction to hyperspectral data pre-processing,” *Ukrainian journal of remote sensing*, no. 7, pp. 4–11, 2015.

20. S. Krivenko, O. Kolganova, and V. Lukin, “Lossy compression of images corrupted by spatially correlated noise,” in *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Lviv, Ukraine: IEEE, Feb. 2016, pp. 698–702. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452157.

21. M. Zriakhov, S. Kryvenko, and B. Лукин, “Peculiarities of multispectral image lossy compression,” *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, vol. 331, no. 1, pp. 370–376, Feb. 2024, doi: 10.31891/2307-5732-2024-331-56.

22. V. Lukin, B. Kovalenko, S. Kryvenko, V. Naumenko, and B. Vozel, “Prediction of Optimal Operation Point Existence and Its Parameters in BPG-Based Automatic Lossy Compression of Noisy Images,” in *Current Overview on Science and Technology Research Vol. 9*, Dr. G. Bucci, Ed., B P International (a part of SCIENCEDOMAIN International), 2022, pp. 1–36. doi: 10.9734/bpi/costr/v9/4316A.

23. S. S. Krivenko, V. V. Lukin, and E. Kolganova, “Peculiarities of lossy compression of optical and medical images corrupted by noise,” in *2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Apr. 2016, pp. 251–256. doi: 10.1109/ELNANO.2016.7493060.

24. S. Krivenko, V. Lukin, O. Krylova, and V. Shutko, “Visually Lossless Compression of Retina Images,” in *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kiev: IEEE, Apr. 2018, pp. 255–260. doi: 10.1109/ELNANO.2018.8477459.

25. S. Krivenko, M. Zriakhov, V. Lukin, and B. Vozel, "MSE prediction in DCT-based lossy compression of noise-free and noisy remote sensing," in *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine: IEEE, Feb. 2018, pp. 883–888. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336338.
26. V. Naumenko, V. Lukin, and S. Kryvenko, "Comparison of Noisy Medical Image Lossy Compression by BPG and AGU," in *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2022*, vol. 657, M. Nechyporuk, V. Pavlikov, and D. Kritskiy, Eds., in *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 657. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 636–648. doi: 10.1007/978-3-031-36201-9_53.
27. V. Lukin, B. Kovalenko, S. Kryvenko, N. Ponomarenko, K. Egiazarian, and J. Astola, "Compression of Noisy Images Taking into Account Visual Quality: A Comprehensive Study," *Research Developments in Science and Technology Vol. 8*, pp. 89–109, 2022.
28. B. Kovalenko, V. Lukin, S. Kryvenko, V. Naumenko, and B. Vozel, "Prediction of Parameters in Optimal Operation Point for BPG-based Lossy Compression of Noisy Images," *UJRS*, vol. 9, no. 2, pp. 4–12, Jun. 2022, doi: 10.36023/ujrs.2022.9.2.212.
29. B. Kovalenko, V. Lukin, S. Kryvenko, V. Naumenko, and B. Vozel, "BPG-Based Automatic Lossy Compression of Noisy Images with the Prediction of an Optimal Operation Existence and Its Parameters," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 15, p. 7555, Jul. 2022, doi: 10.3390/app12157555.
30. B. Kovalenko, V. Lukin, V. Naumenko, and S. Krivenko, "Analysis of noisy image lossy compression by BPG using visual quality metrics," in *2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Dec. 2021, pp. 20–25. doi: 10.1109/ATIT54053.2021.9678575.
31. С. К. Абрамов, Н. В. Бурцев, С. С. Кривенко, А. Н. Земляченко, and В. В. Лукин, "Автоматическое сжатие в окрестности оптимальной рабочей точки изображений с шумом кодерами типа SPIHT и JPEG2000," *Авиационно-космическая техника и технология*, no. 2, pp. 99–109, 2016.
32. S. Krivenko, V. Lukin, and B. Vozel, "Prediction of Introduced Distortions Parameters in Lossy Image Compression," in *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine: IEEE, Oct. 2018, pp. 447–451. doi: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632130.
33. S. Krivenko, M. Zriakhov, V. Lukin, and B. Vozel, "MSE and PSNR prediction for ADCT coder applied to lossy image compression," in *2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, May 2018, pp. 613–618. doi: 10.1109/DESSERT.2018.8409205.
34. S. S. Krivenko, O. Krylova, E. Bataeva, and V. V. Lukin, "Smart lossy compression of images based on distortion prediction," *Telecom Rad Eng*, vol. 77, no. 17, pp. 1535–1554, 2018, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i17.40.
35. V. Lukin, A. Zemliachenko, S. Krivenko, B. Vozel, and K. Chehdi, "Lossy compression of remote sensing images with controllable distortions," *Satellite Information*

Classification and Interpretation, 2018, Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=lzj8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA27&dq=Lossy+compression+of+remote+sensing+images+with+controllable+distortions&ots=irk a3mNKud&sig=ljJ_EiGSZkYlW4tNWjpzfsvU3dg

36. S. Krivenko, V. Lukin, and O. Krylova, "Visually Lossless Compression of Dental Images," in *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Apr. 2019, pp. 394–399. doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783218.

37. S. Krivenko, M. Zriakhov, N. Kussul, and V. Lukin, "Prediction of Visual Quality for Lossy Compressed Images," in *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine: IEEE, Feb. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/CADSM.2019.8779266.

38. O. Krylova, L. Kryvenko, S. Krivenko, and V. Lukin, "A Fast Noniterative Visually Lossless Compression of Dental Images Using AGU-M Coder," in *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Lviv, Ukraine: IEEE, Feb. 2021, pp. 6–10. doi: 10.1109/CADSM52681.2021.9385257.

39. S. Krivenko, V. Lukin, O. Krylova, L. Kryvenko, and K. Egiazarian, "A Fast Method of Visually Lossless Compression of Dental Images," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11010135.

40. S. S. Krivenko, S. K. Abramov, V. V. Lukin, B. Vozel, and K. Chehdi, "Lossy DCT-based compression of remote sensing images with providing a desired visual quality," in *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXV*, L. Bruzzone, F. Bovolo, and J. A. Benediktsson, Eds., Strasbourg, France: SPIE, Oct. 2019, p. 36. doi: 10.1117/12.2532726.

41. F. Li, S. Krivenko, and V. Lukin, "A Modified Algorithm of Visual Quality Providing in Lossy Compression of Remote Sensing Images," in *2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odesa, Ukraine: IEEE, Nov. 2021, pp. 16–21. doi: 10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716684.

42. S. Krivenko, D. Demchenko, I. Dyogtev, and V. Lukin, "A Two-Step Approach to Providing a Desired Quality of Lossy Compressed Images," in *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*, vol. 1113, M. Nechyporuk, V. Pavlikov, and D. Kritskiy, Eds., in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1113, Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 482–491. doi: 10.1007/978-3-030-37618-5_41.

43. S. Krivenko, F. Li, V. Lukin, B. Vozel, and O. Krylova, "Prediction of Visual Quality Metrics in Lossy Image Compression," in *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Apr. 2020, pp. 478–483. doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088819.

44. F. Li, S. Krivenko, and V. Lukin, "A Two-step Procedure for Image Lossy Compression by ADCTC With a Desired Quality," in *2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, May 2020, pp. 307–312. doi: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125000.

45. F. Li, S. S. Krivenko, and V. V. Lukin, “Analysis of two-step approach for compressing texture images with desired quality,” AKTT, no. 1, pp. 50–58, Jan. 2020, doi: 10.32620/aktt.2020.1.08.

46. V. Lukin et al., “Lossy Compression of Multichannel Remote Sensing Images with Quality Control,” Remote Sensing, vol. 12, no. 22, p. 3840, Nov. 2020, doi: 10.3390/rs12223840.

Праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:

47. F. Li, S. Krivenko, and V. Lukin, “Adaptive two-step procedure of providing desired visual quality of compressed image,” in *Proceedings of the 2020 4th International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering*, Xiamen China: ACM, Nov. 2020, pp. 407–414. doi: 10.1145/3443467.3443791.

48. F. Li, S. Krivenko, and V. Lukin, “An Approach to Better Portable Graphics (BPG) Compression with Providing a Desired Quality,” in *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Nov. 2020, pp. 13–17. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349289.

49. F. Li, S. Krivenko, and V. Lukin, “A Fast Method for Visual Quality Prediction and Providing in Image Lossy Compression by SPIHT,” in *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2020*, vol. 188, M. Nechyporuk, V. Pavlikov, and D. Kritskiy, Eds., in *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 188. , Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 17–29. doi: 10.1007/978-3-030-66717-7_2.

50. F. Li, S. Krivenko, and V. Lukin, “Two-step providing of desired quality in lossy image compression by SPIHT,” Радіоелектронні і комп’ютерні системи, no. 2, pp. 22–32, Apr. 2020, doi: 10.32620/reks.2020.2.02.

51. F. Li, S. Krivenko, and V. Lukin, “An Automatic Optimization Method for BPG Compression Based on Visual Perception,” in *Mathematical Modeling and Simulation of Systems*, vol. 344, S. Shkarlet, A. Morozov, A. Palagin, D. Vinnikov, N. Stoianov, M. Zhelezniak, and V. Kazymyr, Eds., in *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 344. , Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 213–225. doi: 10.1007/978-3-030-89902-8_17.

52. A. Kharkov, V. Oliynyk, V. V. Lukin, and S. S. Krivenko, “Blind estimation of noise variance for 1d signal denoising,” *Telecom Rad Eng*, vol. 79, no. 7, pp. 567–581, 2020, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i7.30.

53. V. Abramova, S. Krivenko, V. Lukin, and O. Krylova, “Analysis of Noise Properties in Dental Images,” in *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Apr. 2020, pp. 511–515. doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088768.

54. M. Ponomarenko, O. Miroshnichenko, V. Lukin, S. Krivenko, and K. Egiazarian, “Blind denoising of dental X-ray images,” *ei*, vol. 35, no. 9, pp. 299-1-299–6, Jan. 2023, doi: 10.2352/EI.2023.35.9.IPAS-299.

55. V. Abramova, V. Lukin, S. Abramov, S. Kryvenko, P. Lech, and K. Okarma, “A Fast and Accurate Prediction of Distortions in DCT-Based Lossy Image

Compression,” *Electronics*, vol. 12, no. 11, p. 2347, May 2023, doi: 10.3390/electronics12112347.

56. V. Lukin, S. Krivenko, I. Kaluzhinov, O. Krylova, and L. Kryvenko, “Lossy Compression of Remote Sensing and Dental Images Corrupted by Spatially Correlated Noise,” in *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021*, vol. 367, M. Nechyporuk, V. Pavlikov, and D. Kritskiy, Eds., in Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 367. , Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 1003–1014. doi: 10.1007/978-3-030-94259-5_77.

57. G. Proskura, O. Rubel, S. Kryvenko, and V. Lukin, “On classifier performance for remote sensing images compressed by different coders,” *aktt*, no. 1, pp. 67–77, Feb. 2023, doi: 10.32620/aktt.2023.1.07.

58. V. Lukin, S. Abramov, S. Krivenko, A. Kurekin, and O. Pogrebnyak, “Analysis of classification accuracy for pre-filtered multichannel remote sensing data,” *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 16, pp. 6400–6411, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2013.05.061.

59. V. Lukin, F. Li, G. Proskura, S. Kryvenko, and B. Vozel, “Peculiarities of Classification of Lossy Compressed Multichannel Remote Sensing Images Using Trained Neural Networks,” in *Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications*, vol. 1198, A. Luntovskyy, M. Klymash, I. Melnyk, M. Beshley, and A. Schill, Eds., in Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 1198. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 127–143. doi: 10.1007/978-3-031-61221-3_7.

60. V. Lukin, F. Li, J. Zhu, and S. Kryvenko, “Peculiarities of SVM-Based Classification of BPG Compressed Three-Channel Images,” in *Proceedings of the 8th International Symposium of Space Optical Instruments and Applications*, vol. 191, H. P. Urbach, D. Li, and D. Yu, Eds., in Springer Proceedings in Physics, vol. 191. , Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 352–365. doi: 10.1007/978-981-97-6718-2_31.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

61. L. Kryvenko, O. Krylova, V. Lukin, and S. Kryvenko, “Intelligent visually lossless compression of dental images,” *Adv. Opt. Technol.*, vol. 13, p. 1306142, Feb. 2024, doi: 10.3389/aot.2024.1306142.

62. L. Kryvenko, O. Krylova, S. Krivenko, and V. Lukin, “A Fast Noniterative Visually Lossless Compression of Dental Images Using BPG Coder,” in *2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Budva, Montenegro: IEEE, Jun. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/MECO55406.2022.9797114.

63. B. Bondžulić, V. Lukin, D. Bujaković, F. Li, S. Kryvenko, and B. Pavlović, “On Visually Lossless JPEG Image Compression,” in *2023 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)*, Novi Sad, Serbia: IEEE, May 2023, pp. 113–118. doi: 10.1109/ZINC58345.2023.10174090.

64. V. Abramova, S. Kryvenko, S. Abramov, V. Makarichev, and V. Lukin, “A Fast Procedure for Image Lossy Compression by ADCTC Using Prediction of Distortions’ MSE,” in *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2022*, vol. 657, M. Nechyporuk, V. Pavlikov, and D. Kritskiy, Eds., in Lecture Notes in Networks and

Systems, vol. 657. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 625–635. doi: 10.1007/978-3-031-36201-9_52.

65. F. Li, S. Kryvenko, and V. Lukin, “Lossy Compression of Three-Channel Remote Sensing Images Based on Controlled Visual Quality,” in *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2022*, vol. 657, M. Nechyporuk, V. Pavlikov, and D. Kritskiy, Eds., in Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 657. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 649–661. doi: 10.1007/978-3-031-36201-9_54.

66. V. Lukin, S. Krivenko, F. Li, S. Abramov, and V. Makarichev, “On Image Complexity in Viewpoint of Image Processing Performance,” in *2022 3rd International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security*, 2022, pp. 458–473. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3156/paper35.pdf>

67. B. Bondžulić, N. Stojanović, V. Lukin, S. A. Stankevich, D. Bujaković, and S. Kryvenko, “Target acquisition performance in the presence of JPEG image compression,” *Defence Technology*, p. S2214914723003306, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.dt.2023.12.006.

68. F. Li, S. Kryvenko, and V. Lukin, “Remote Sensing Image Lossy Compression Based on JPEG with Controlled Visual Quality,” in *Proceedings of the 7th International Symposium of Space Optical Instruments and Applications*, vol. 295, H. P. Urbach and H. Jiang, Eds., in Springer Proceedings in Physics, vol. 295. , Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 8–19. doi: 10.1007/978-981-99-4098-1_2.

69. S. Kryvenko and V. Lukin, “Peculiarities of noisy image lossy compression,” *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, vol. 333, no. 2, pp. 278–283, Apr. 2024, doi: 10.31891/2307-5732-2024-333-2-44.

70. B. Bondžulić, N. Stojanović, V. Lukin, and S. Kryvenko, “JPEG and BPG visually lossless image compression via KonJND-1k database,” *Vojnotehnički glasnik*, vol. 72, no. 3, pp. 1214–1241, 2024, doi: 10.5937/vojtehg72-50300.

71. F. Li, V. Lukin, S. Kryvenko, B. Bondzulic, D. Bujakovic, and B. Pavlovic, “Strange Images in Remote Sensing and Their Properties,” *UJRS*, vol. 10, no. 2, pp. 12–18, Jun. 2023, doi: 10.36023/ujrs.2023.10.2.240.

АНОТАЦІЯ

Кривенко С.С. Методи прогнозування та інтелектуальної обробки зображень у системах дистанційного зондування та медичної діагностики. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2025.

Дисертаційну роботу присвячено підвищенню ефективності інтелектуальної фільтрації та стиснення із втратами зображень дистанційного зондування Землі та медичної діагностики в умовах присутності складних завад і обмежених обчислювальних ресурсів з урахуванням візуальної якості.

Розроблені методи фільтрації радіолокаційних зображень, що спотворені сигнально залежними та/або просторово-корельованими завадами, а також метод прогнозування ефективності фільтрації радіолокаційних зображень для декількох метрик якості дозволили підвищити якість радіолокаційних зображень у відповідності до різних критеріїв, а також забезпечити прогнозування характеристик фільтрації та вибір найкращих типу та параметрів фільтру.

Метод прогнозування показників якості первинних рентгенівських зображень забезпечив стиснення зображень без втрати діагностично важливої інформації.

Розроблений двоетапний підхід до придушення шуму та метод адаптації до просторово корельованого шуму було використано при розробці програмного забезпечення медичних приладів для підвищення ефективності вторинної обробки і аналізу зашумлених даних, отриманих з медичних датчиків.

Методи оцінки якості медичних сигналів за допомогою методів стиснення оптичних зображень та двоетапні процедури стиснення зображень з втратами для забезпечення бажаної якості стиснення зображення з втратами відповідно до метрик візуальної якості дозволили суттєво спростити процедуру оцінки ефективності фільтрації та стиснення зображень, що спотворені шумами складної природи, а також прискорити процедуру стиснення медичних та оптичних зображень із збереженням інформаційних ознак, що дозволяє використовувати наявні автоматичні методи класифікації зображень.

Ключові слова: ОПТ, ШІ, шум, зображення, медична діагностика, дистанційне зондування, стиснення, фільтрація, якість, ДКП, класифікація, обробка сигналів.

ANNOTATION

Kryvenko S.S. Methods of Forecasting and Intelligent Image Processing in Remote Sensing and Medical Diagnostics Systems. – Scientific study on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems. – National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation is devoted to improving the efficiency of intelligent filtering and lossy compression of images in remote sensing and medical diagnostics under conditions of complex noise and limited computational resources, while considering visual quality.

Developed methods for filtering radar images distorted by signal-dependent and/or spatially correlated noise, as well as a method for predicting the effectiveness of radar image filtering based on multiple quality metrics, have improved the quality of radar images in accordance with various criteria. These methods also enable the prediction of filtering characteristics and the selection of the optimal filter type and parameters.

A method for predicting the quality metrics of primary X-ray images has enabled image compression without the loss of diagnostically significant information.

A two-stage approach to noise suppression and a method for adapting to spatially correlated noise were utilized in the development of software for medical devices to enhance

the efficiency of secondary processing and analysis of noisy data obtained from medical sensors.

Methods for assessing the quality of medical signals using optical image compression techniques and two-stage lossy image compression procedures, designed to achieve the desired compression quality based on visual quality metrics, have significantly simplified the evaluation of filtering and compression efficiency for images distorted by complex noise. These methods also accelerated the compression process for medical and optical images while preserving informational features, enabling the use of existing automatic image classification methods.

Keywords: OOP, AI, noise, image, medical diagnostics, remote sensing, compression, filtering, quality, DCT, classification, signal processing.

Підписано до друку 6.10.2025

Формат 60×90/16. Папір офс. Офс. друк

Ум. друк. арк. 2,7. Обл.-вид. арк. 3. Наклад 100 пр. Замовлення

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут»

61070, м. Харків-70, вул. Вадима Манька, 17

<http://www.khai.edu>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001