

УДК 004

Є.Молчанюк, магістр гр. КН-22М-1

Центральноукраїнський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ

У статті розроблено програмне забезпечення, яке призначено для системи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень. Метою розробки є дослідження та програмна реалізація системи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень. Об'єктом дослідження є процес стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень. Предметом дослідження є методи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень. Методи дослідження базуються на методах комп'ютерної графіки, методах математичної статистики, методах розробки програмного забезпечення. Результат роботи – програмна реалізація системи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень. В процесі роботи над програмною моделлю виконано аналіз існуючих апаратних та програмних засобів. В повній мірі описані всі компоненти розробленого програмного забезпечення.

Постановка проблеми. У цей час методи цифрової обробки сигналів, що використовують у своїй роботі методи вейвлет-обробки, одержали широке поширення. Це пояснюється тими можливостями, які забезпечують вейвлет-функції, і в першу чергу, частотною й часовою локалізацією. Вейвлети й засновані на них вейвлет-перетворення були запропоновані на початку 1990-х років на основі модифікованих алгоритмів роботи з банками фільтрів [1-6] і в наступний час інтенсивно розвивалися. Великий внесок у розробку теоретичних основ вейвлетів внесли Мейер (Meyer), Добеши (Daubechies) і Маллат (Mallat), що опублікували перші теоретичні роботи в цьому напрямку. Основна маса книг і статей в області вейвлет-перетворень опублікована за рубежом. У Україні інтерес у вейвлетам активізувався трохи пізніше – у середині 1990-х років. Незважаючи на те, що основна робота Добеши (Daubechies) відноситься до початку 1990-х років, українською мовою вона вперше з'явилася тільки в 2001 році. Саме на цей часовий інтервал і доводиться публікація українською мовою ряду основних матеріалів по вейвлетам. Це перевідні роботи Чуй К., Уелстїда С., Блатера К. і роботи вітчизняних авторів (наприклад, Короновський А.). Але до виходу у світ зазначених фундаментальних українськомовних матеріалів, робота вітчизняних дослідників будувалася на базі закордонних матеріалів і невеликих вітчизняних статей. Особливо хочеться відзначити прекрасну оглядову статтю, орієнтовану на тих, хто тільки почав займатися цим предметом і які інтересуються його застосуванням, з демонстрацією вейвлет-перетворень деяких сигналів, опубліковану в журналі УФН в 1996 р. (автор Астафьева Н.М.), і яка викликала широкий інтерес до теми вейвлетів. У ній розглянуті безперервні вейвлет-перетворення, що дають наочне й видовищне подання результатів аналізу сигналу у вигляді локальних мінімумів і максимумів і скелетоних графіків вейвлет-коефіцієнтів. У цей час опубліковані сотні книг і тисячі статей по вейвлетам, що відрізняються різним підходом до центральної теми. Інтерес викликає робота Перебіна А.В., де розкриті питання про систематизацію термінології вейвлет-перетворень. Вейвлет-фільтри являють собою окремий випадок реалізації банків фільтрів, тому розвиток теорії банків-фільтрів у цей час також визначає й розвиток напрямку вейвлетів. У зв'язку із цим хочеться відзначити внесок вітчизняних учених у розвиток цього напрямку (Миронов У.Г, Чобану М.К. і ін.)

При розгляді більшості алгоритмів, пов'язаних з вейвлетами, обробка одномірних сигналів і зображень зводиться до фільтрації. Теоретичні дослідження, що стосуються подання вейвлет-аналізу сигналів за допомогою процедури фільтрації з використанням звичайних цифрових фільтрів, проведені ще на початку 1990-х років. Наприклад, основним критерієм, якому повинен задовольняти цифровий фільтр, що претендує на використання при вейвлет-обробці – це властивість квадратурно-дзеркальності. Властивості й деякі питання синтезу квадратурно-дзеркальних фільтрів викладені в роботах. У зв'язку із простотою подання вейвлет-аналізу в рамках теорії цифрових фільтрів, і з огляду на великий обсяг матеріалу, накопичений з питань подання й синтезу одномірних і багатомірних цифрових фільтрів, у дисертації виклад матеріалу й проведення різних досліджень у рамках вейвлет-перетворень виконано з позицій цифрової фільтрації. При цьому використовувався матеріал по цифровій фільтрації, представлений у роботах Хеммінга Р. Каппеліні В., Гольденберга Л.М. і ін.

Одними з найважливіших об'єктів дослідження в даній роботі є параметризація й синтез одномірних і двовимірних вейвлет-функцій.

Наявність деяких ступенів волі при визначенні одномірного вейвлету (а особливо двовимірних вейвлетів) дозволяє розраховувати вейвлет-функції з різними наперед заданими частотними й часовими властивостями. Використання вейвлет-функцій з різною частотною вибірковою дозволяє розширити застосовність вейвлетів і використовувати їх у завданнях погодженої фільтрації, розпізнавання образів (наприклад, при розпізнаванні різних примітивів – дуг, ліній). У цей час інтерес до вейвлет-функцій зі специфічними властивостями зріс. Це пояснюється розширенням області застосування вейвлетів і повнотою дослідження властивостей і застосувань класичних вейвлет-функцій.

Питання параметризації вейвлетів у літературі викладені з позицій параметризації банків фільтрів шляхом конкретизації. До основних робіт відносяться роботи Зоу (Zou H.) і Поллена (Pollen D.). Однак слід зазначити, що представлені роботи стосуються питань параметризації одномірних вейвлет-функцій. Так само до них можна звести параметризацію й роздільних двовимірних вейвлет-функцій, а для подання двовимірних нероздільних вейвлет-функцій потрібний уже інший математичний апарат. Питання параметризації двовимірних нероздільних вейвлет-функцій також є одним з об'єктів дослідження в дисертації. Основне використання їх – у завданнях обробки зображень.

Методи оптимізації вейвлет-функцій і адаптивного вибору коефіцієнтів вейвлет-розкладання є в завданнях стиску, які доповнюють друг друга. При використанні в розкладанні різних вейвлет-функцій, виходять різні набори коефіцієнтів вейвлет-перетворення й до кожного з наборів застосовні методи "оптимізації нуль-дерев". Основне питання адаптивного вейвлет-перетворення, розглянутий у дисертації – оптимізація частотної вибіркової ВФ. При стиску зображень за допомогою вейвлетів оптимізація частотної вибіркової вейвлет-фільтру є первинною стадією обробки, наступні стадії – відбір і нерівномірне квантування коефіцієнтів розкладання – спрямовані на оптимізацію подання результатів першої стадії. Тому в першу чергу робота спрямована на оптимізацію вейвлет-функцій і набір результатів, що представляються, орієнтований на зіставлення з результатами обробки, отриманими при використанні інших методів оптимізації.

Один з напрямків вейвлет-обробки пов'язане з розпізнаванням образів. У рамках даного напрямку також представлені роботи, пов'язані з оптимальним вибором вейвлет-фільтрів під різні критерії. Наприклад, у роботі [2] проведено дослідження впливу різних критеріїв вейвлет-фільтру – гладкості, лінійності фазочастотної характеристики (ФЧХ) – на точність розпізнавання текстури зображення й у рамках конкретного критерію представлений вибір оптимального вейвлет-фільтру. У рамках цього напрямку хочеться відзначити роботи Донохо [3, 5-6], що є продовженням теорії вейвлет-перетворення й присвячені синтезу особливих функцій бімлетів (Beamlets), ріджлетів (Ridglets), що відрізняються лінійною частотно-часовою локалізацією й ортогональністю розкладання. Основна перевага їх досягається в завданнях розпізнавання ліній, дуг у зображеннях з

високим рівнем шуму (особливо якщо потужність шуму в рази перевищує потужність зображення).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При аналізі останніх досліджень і публікацій [1-20] було виявлено певні прогалини у забезпеченні системи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень.

Мета й завдання дослідження. Метою роботи є дослідження та програмна реалізація системи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень.

Для досягнення поставленої мети визначена програма дослідження, що складається з наступних завдань:

- Огляд існуючих систем стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень.
- Дослідження системи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень.
- Програмна реалізація системи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень.

Об'єктом дослідження є процес стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень.

Предметом дослідження є методи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень.

Методи дослідження базуються на методах комп'ютерної графіки, методах математичної статистики, методах розробки програмного забезпечення.

Виклад основного матеріалу. Стиснення зображень є дуже важливою темою практики. Він має величезне застосування в теорії інформації [1], прикладному гармонічному аналізі [2] та обробці сигналів.

Стиснення зображення – це процес зменшення кількості даних, необхідних для представлення певного обсягу інформації, шляхом використання надмірності всередині даних. Загальними надмірностями є міжпіксельна надмірність, психовізуальна надмірність і статистична надмірність [3].

Існує кілька методів, які можна використовувати для стиснення зображень, як-от дискретне косинусне перетворення (DCT) і перетворення вейвлет-алгоритму. DCT працює, розділяючи зображення на частини з різними частотами. Під час ступінчастого квантування, де зазвичай відбувається часткове стиснення, менш важливі частоти відкидаються, отже, використовується термін «з втратами». Потім лише найважливіші частоти використовуються для відновлення процесу стиснення зображення. У результаті реконструйоване зображення містить деякі спотворення, але цей рівень спотворень можна регулювати на етапі стиснення. На реконструйованому зображенні нижче є деяка втрата якості; його можна чітко розпізнати, хоча майже 85% коефіцієнтів DCT було відкинуто.

Зображення містять велику кількість інформації, яка потребує великої смуги пропускання, великого простору для зберігання та тривалого часу передачі. Тому вкрай важливо стиснути зображення, зберігаючи лише важливу інформацію, необхідну для реконструкції зображення.

Зображення можна розглядати як матрицю значень пікселів (або інтенсивності). Щоб стиснути зображення, необхідно використати надлишки, наприклад, області, де між значеннями пікселів є незначна зміна або взагалі немає. Тому велика надмірність виникає в зображеннях, які мають великі площі однорідного кольору, і, навпаки, зображення, які мають часті та значні зміни кольору, будуть менш надмірними та їх важче стискати. Загалом, у системі стиснення зображення вейвлет-перетворення є три основні етапи: перетворення, квантування та ентропійне кодування. Деквантування є єдиною іншою частиною процесу декодування, за якою слідує зворотне перетворення для наближення вихідного зображення.

Щоб стиснути зображення, можна використовувати вейвлет-аналіз, щоб розділити інформацію зображення на підсигнали наближення та деталізації. Підсигнал наближення показує загальну тенденцію значень пікселів, а три підсигнали деталей показують горизонтальні, вертикальні та діагональні деталі або зміни в зображенні. Якщо ці деталі дуже малі, їх можна обнулити, не змінюючи істотно зображення. Значення, нижче якого деталі

вважаються достатньо малими, щоб встановити їх на нуль, називається порогом. Чим більше число нулів, тим більшого стиснення можна досягти. Кількість інформації, яку зберігає зображення після стиснення та декомпресії, називається збереженою енергією, і вона пропорційна сумі квадратів значень пікселів. Якщо збережена енергія становить 100%, то стиснення вважається без втрат, оскільки зображення можна точно реконструювати. Це відбувається, коли порогове значення встановлено на нуль, тобто деталь не була змінена. Якщо будь-які значення змінюються, енергія буде втрачена, і це називається стисненням із втратами. В ідеалі під час стиснення кількість нулів і збереження енергії будуть якомога вищими. Однак у міру отримання більшої кількості нулів втрачається більше енергії, тому потрібно знайти баланс між ними.

Вейвлети

Вейвлети – це функції, які дозволяють аналізувати дані сигналів або зображень відповідно до масштабів або роздільної здатності. Обробка сигналів за допомогою хвильового алгоритму фактично працює так само, як і людина; або як цифрова камера обробляє візуальні шкали роздільної здатності та проміжні деталі. Але той самий принцип також фіксує сигнали мобільного телефону та навіть оцифровані кольорові зображення, які використовуються в медицині.

Хвильові сигнали реально використовуються в цих областях, наприклад, для апроксимації даних із різкими розривами, такими як уривчасті сигнали, або зображення з великою кількістю країв.

Хоча вейвлети є, можливо, одним із розділів теорії функцій, ми показуємо, що алгоритми, які дають результат, є ключем до обробки чисел, точніше, оцифрованої інформації, сигналів, часових рядів, нерухомих зображень, фільмів, кольорових зображень тощо.

Таким чином, застосування ідеї вейвлету включає велику частину обробки сигналів і зображень, стиснення даних, кодування відбитків пальців і багато інших галузей науки та техніки.

Ця робота зосереджена на обробці кольорових зображень з використанням спеціально розроблених вейвлет-алгоритмів і математичних порогових фільтрів. Незважаючи на те, що нещодавно було опубліковано чимало статей про операторську теорію вейвлетів, існує потреба в роботі, який пояснює деякі прикладні тенденції з нуля для теоретиків-операторів. Вейвлети є дуже міждисциплінарним предметом і він черпає ключові шляхи ідей із зовнішнього світу. Ми прагнемо окреслити різноманітні зв'язки між геометрією простору Гільберта та обробкою зображень.

Як працюють вейвлети в обробці зображень, аналогічно тому, як працюють наші очі. Залежно від місця спостереження можна по-різному сприймати ліс. Якщо ліс спостерігати з вершини хмарочоса, він буде спостерігатися як зелений; якщо це було помічено в машині, що рухається, це буде спостерігатися як дерева в лісі, що блимають, таким чином дерева тепер розпізнаються. Тим не менш, якщо це спостерігатиме хтось із нових, хто насправді ходить навколо нього, тоді можна буде спостерігати більше деталей дерев, таких як листя та гілки, і, можливо, сім мавп на вершині кокосової пальми. Крім того, витягнувши збільшувальне скло, можна навіть спостерігати текстуру дерев та інші дрібні деталі, які не можуть сприйняти голі люди.

WaveletImageProcessing дає змогу комп'ютерам зберігати зображення в багатьох масштабах роздільної здатності, таким чином розкладаючи зображення на різні рівні та типи деталей і наближаючи його до різних значень роздільної здатності. Отже, роблячи можливим масштабування для отримання більшої кількості деталей дерев, залишають і навіть мавпу на вершині дерева. Wavelets дозволяють одному стискати зображення, використовуючи менше пам'яті. простір із більшою кількістю деталей зображення.

Перевага розкладання зображень на наближені та деталізовані частини полягає в тому, що можна виділяти та маніпулювати даними з певними властивостями. Завдяки цьому можна визначити, чи потрібно зберігати більш конкретні деталі. Наприклад, зберігати більше

вертикальних деталей замість того, щоб зберігати всі горизонтальні, діагональні та вертикальні деталі зображення, яке має більше вертикальних аспектів. Це дозволило б зображенню втратити певну кількість горизонтальних і діагональних деталей, але не вплинуло б на людське сприйняття зображення.

Як математично показано зображення можна розкласти на наближені, горизонтальні, вертикальні та діагональні деталі. Виконано N рівнів розкладання. Після цього на складеному зображенні виконується квантування, де на різних компонентах може бути виконане квантування, таким чином максимізуючи кількість необхідних деталей та ігноруючи «небажані» деталі. Це робиться за допомогою порогового значення, коли деякі значення коефіцієнтів для пікселів із зображень «викидаються» або встановлюються на нуль, або на матриці зображення використовується певний ефект «згладжування». Цей процес використовується в JPEG2000.

Весь процес стиснення хвильового зображення виконується наступним чином: комп'ютер отримує вхідне зображення, виконується пряме вейвлет-перетворення на цифровому зображенні, виконується порогове значення для цифрового зображення, ентропійне кодування виконується на зображенні, де це необхідно, тому стиснення зображення виконується на комп'ютері. Потім зі стисненим зображенням виконується реконструкція вейвлет-перетвореного зображення, а потім на зображенні виконується зворотне хвильове перетворення, таким чином зображення реконструюється. У деяких випадках використовується алгоритм нульового дерева [Sha93], і відомо, що він має краще стиснення за допомогою алгоритму нульового дерева, але тут його не було реалізовано.

Розробка структурної схеми

Стиснення зображення на основі вейвлет-перетворення полягає у застосуванні вейвлет-алгоритму до декомпозиції зображення з різною роздільною здатністю та досягненні стиснення зображення шляхом кодування отриманих вейвлет-коефіцієнтів. Спочатку на зображенні виконується багаторівнева вейвлет-розкладка для отримання відповідних вейвлет-коефіцієнтів. Потім кожен шар вейвлет-коефіцієнтів квантується, щоб отримати об'єкти квантованих коефіцієнтів. Нарешті, об'єкти квантованих коефіцієнтів кодуються для отримання результатів стиснення. У цьому документі використовується вейвлет Хаара як основа вейвлету, вибирається 2-рівнева шкала розкладання, виконується вейвлет-перетворення, стискається реконструйоване зображення, встановлюючи порогове значення, і обчислюється співвідношення розміру файлу та значення PSNR до та після стиснення. Функція вейвлет-реконструкції використовує матрицю коефіцієнтів, інформацію про розмірність і тип бази вейвлетів, отримані шляхом вейвлет-декомпозиції, для виконання вейвлет-реконструкції. Вибирається метод встановлення глобального порогу, і високочастотні вейвлет-коефіцієнти фільтруються пороговими значеннями для досягнення стиснення перед операцією реконструкції, а потім стиснене зображення отримується за допомогою вейвлет-реконструкції.

Після того, як зображення пройшло вейвлет-перетворення із заданим масштабом, більша частина енергії зосереджена в дробовій частині коефіцієнтів вейвлет-розкладання. Коефіцієнти інших частин встановлюються постійними шляхом встановлення порогу, і лише кілька коефіцієнтів розкладання зберігаються для представлення всього зображення. Результати експерименту показують, що простір для зберігання стисненого зображення значно зекономлено, а стиснене зображення не змінюється. візуально значно відрізняється від вихідного зображення.

Структурна схема розробленої системи зображена на рисунку 1. На ній показано структуру стиску та розтиснення з використанням вейвлет-перетворень.

Що стосується методології, то спочатку в систему вбудовується вихідне зображення. Потім система перетворить зображення на зображення у градаціях сірого, щоб мінімізувати розмір диска. Зображення у відтінках сірого переходить до вейвлет-перетворення на першому, другому та третьому рівнях декомпозиції рівнів. Для цього аналізу зображення трансформується до 3 рівнів. Метою цього перетворення є розділення інформації на

підсигнал. Потім система квантує зображення. Результатом є вейвлет-стиснуте зображення, де розмір стисненого зображення зменшено, але якість зображення цілком подібна до оригінального зображення.

Метою етапу трансформації є перетворення зображення в трансформовану область у кореляції, і ентропія може бути нижчою, а енергія може бути зосереджена в невеликій частині трансформованого зображення. Етап квантування призводить до втрати даних, оскільки він зменшує кількість бітів коефіцієнтів перетворення. Коефіцієнти, які не роблять значного внеску в загальну енергію або візуальний вигляд зображення, представлені невеликою кількістю бітів або відкидаються, тоді як коефіцієнт у протилежному випадку квантується точніше. Це такі операції для зменшення візуальної надмірності вхідного зображення. Ентропія знаходиться в кінці всього процесу кодування. Він призначає найменшу кількість бітових кодових слів для вихідних значень, що найчастіше зустрічаються, і більшість бітових кодових слів для малоймовірних виходів. Це зменшує надмірність кодування і, таким чином, зменшує розмір результуючого бітового потоку.

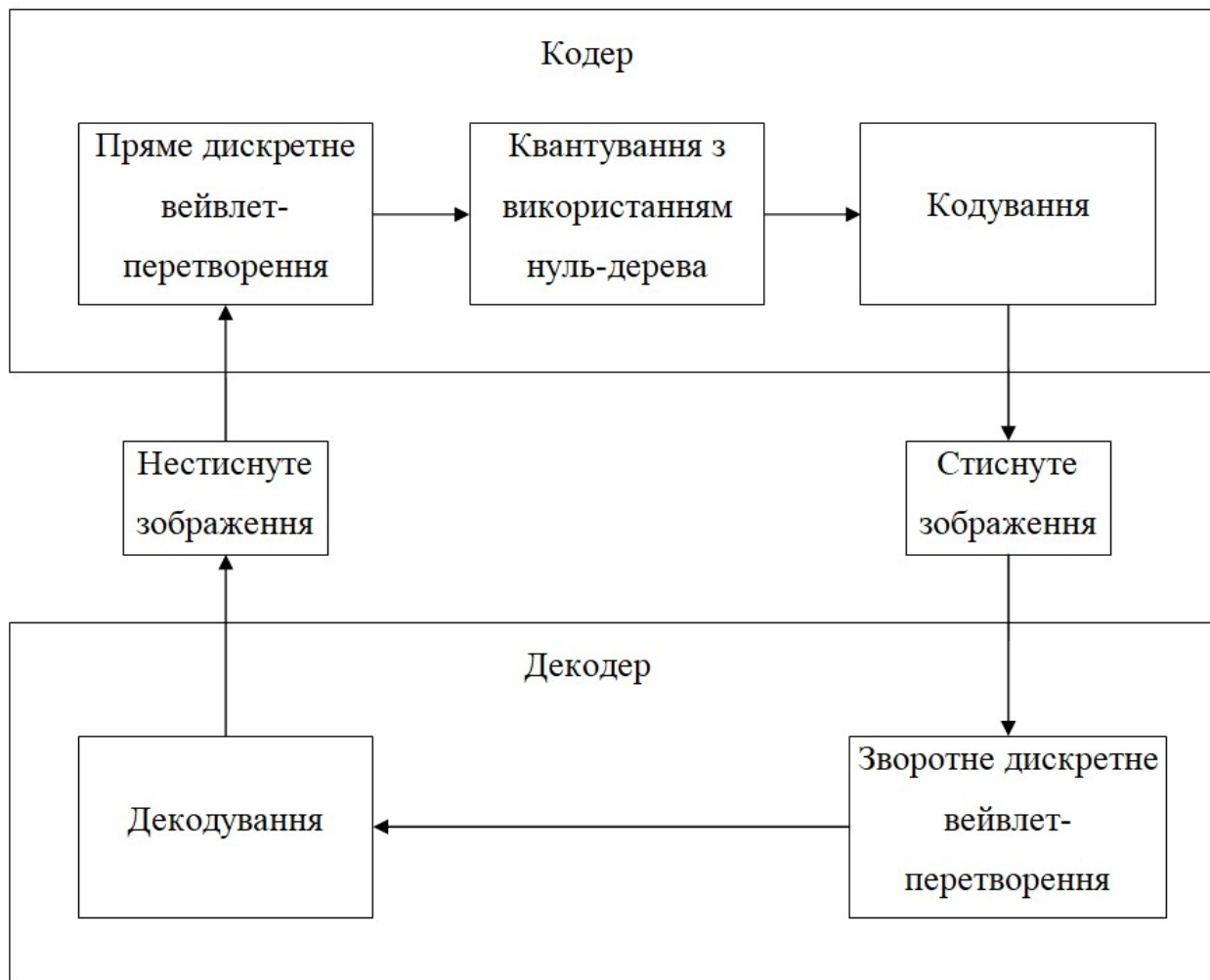


Рисунок 1 – Структурна схема системи

Як висновки, із проведеного аналізу чітко видно, що використання алгоритму вейвлетів Хаара для стиснення зображення може підтримувати якість зображення, забезпечує високу продуктивність стиснення та мінімізує обсяг даних, щоб вони могли ефективно передаватись. Також зазначається, що для зображення у форматі JPG його можна зменшити майже наполовину оригінального зображення за допомогою вейвлет-алгоритму Хаара. Тоді як для зображень у форматі PNG його можна зменшити лише до чверті оригінального розміру зображення. Це пов'язано з тим, що зображення JPG використовує

тип стиснення з втратами, що погіршує якість і інформацію зображення після виконання багаторазового стиснення. Для зображень у форматі PNG використовується стиснення без втрат, тобто при багаторазовому стисненні цього зображення все одно зберігається якість і інформація зображення. Одним із обмежень цієї системи є те, що вона не підтримує зображення розміром більше 1024x1024.

Висновки. У статті наведені теоретичне узагальнення й рішення наукового завдання дослідження методів стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень. Рішення даного завдання полягало у вирішенні наступних задач: Був проведений огляд існуючих систем стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень; Досліджена система стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень; На основі отриманих результатів досліджень створена програмна реалізація системи стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень. Розроблені під час виконання випускної кваліфікаційної роботи за другим (магістерським) рівнем вищої освіти алгоритми дозволяють успішно вирішувати завдання стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень. Проведено аналіз предметної галузі в ході якого були виявлені об'єкти, взаємодія яких носить істотний характер для функціональної діяльності предметної галузі, і їхні основні характеристики; побудована алгоритм і вибраний середовище розробки.

Список літератури

1. Smirnov O., Kuznetsov A., Lokotkova I., Kuznetsova T., Florov S., Lebid O. «Using Orthogonal Signals to Hide Information in Images». 4 IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT) - 2021, Lviv, Ukraine, September 21-25, 2021. P. 255-260.
2. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Potii, O., Poluyanenko, N., Stelnyk, I., Mialkovsky, D. «Combining and filtering functions in the framework of nonlinear-feedback shift register». International Journal of Computing; 2020, Volume 19, Issue 2 – Research Institute for Intelligent Computer Systems – 2020. – P. 247-256.
3. Smirnov O., Kuznetsov A., Kiian A., Kuznetsova T. «Non-binary constant weight coding technique». CEUR Workshop Proceedings. Volume 2740, 2020, Pages 102-114.
4. Smirnov O., Alimseitova Zh., Adranova A., Akhmetov B., Lakhno V., Zhilkishbayeva G. «Models and algorithms for ensuring functional stability and cybersecurity of virtual cloud resources». Journal of theoretical and applied information technology Vol.98. No 21, 2020, P. 3334-3346.
5. Smirnov O., Kuznetsov A., Kovalchuk D., Kuznetsova T. «New technique for data hiding in cover images using adaptively generated pseudorandom sequences». CEUR Workshop Proceedings Volume 2654, 2020, Pages 1-14.
6. Smirnov O., Kuznetsov A., Onikiychuk A., Makushenko T., Anisimova O., Arischenko A. «Adaptive pseudo-random sequence generation for spread spectrum image steganography». 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Ukraine, Kyiv, May 14-18. 2020. P. 161-165.
7. Smirnov O., Kuznetsov A., Kiian A., Cherep A., Kanabekova M., Chepurko I. «Testing of code-based pseudorandom number generators for post-quantum application». 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Ukraine, Kyiv, May 14-18. 2020. P. 172-177.
8. Smirnov O., Kuznetsov A., Pushkar'ov A., Serhiienko R., Babenko V., Kuznetsova T., «Representation of Cascade Codes in the Frequency Domain». In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 48. Springer, Cham. 2021. pp 557-587.
9. Smirnov, O., Drieieva, H., Drieiev, O., Polishchuk, Y., Brzhanov, R., Aleksander, M. «Method of fractal traffic generation by a model of generator on the graph». CEUR Workshop Proceedings Volume 2616, 2020, Pages 366-379.
10. Smirnov, O., Drieieva, H., Drieiev, O., Simakhin, V., Bondar, S., Odarchenko, R. «Managing multifractal properties of the binary sequence generated with the Markov chains», CEUR Workshop Proceedings Volume 2608, 2020, Pages 633-645.
11. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Gorbacheva, L., Babenko, V., «Hiding data in images using a pseudo-random sequence», CEUR Workshop Proceedings Volume 2608, 2020, Pages 646-660.
12. Zhurakovskiy, B., Tsopa, N., Batrak, Y., Odarchenko, R., Smirnova, T «Comparative analysis of modern formats of lossy audio compression». Workshop Proceedings, 2020, 2654, стр. 315-327.
13. Smirnov O. Kuznetsov A., Zaichenko Yu., Pastukhov M., Oleshko O., Kuznetsova K., «Formation of Discrete Signals with Special Correlation Properties». International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2019; Odessa; Ukraine; 9-13 September 2019. P.22-28.
14. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kolovanova, I., Kuznetsova, T., «Noise immunity of the algebraic geometric codes».

- International Journal of Computing; 2019, Volume 18, Issue 4 – Research Institute for Intelligent Computer Systems – 2019. – P. 393-407.
15. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Reshetniak, O., Ivko, N., Katkova, T., Kuznetsova, T., «Generators of Pseudorandom Sequence with Multilevel Function of Correlation». 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine, 8 – 11 October 2019 . P.517-522.
 16. Smirnov, O., Krasnobayev, V., Yanko, A., Kuznetsova, T. «Methods of nulling numbers in the system of residual classes». CEUR Workshop Proceedings, Vol 2588, P. 90-106, 2019.
 17. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kovalchuk, D., Averchev, A., Pastukhov, M., Kuznetsova, K., «Formation of Pseudorandom Sequences with Special Correlation Properties», 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies, AICT -2019/ Lviv, Ukraine, 2-6 July, 2019, P. 395-399.
 18. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kavun, S., Babenko, B., Nakisko, O., Kuznetsova, K., «Malware Correlation Monitoring in Computer Networks of Promising Smart Grids», 2019 IEEE 6th International Conference On Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS), Kyiv, Ukraine April 17-19, 2019 P. 347-352.
 19. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kovalchuk, D., Pastukhov, M., Kuznetsova, K., Prokopovych-Tkachenko, D., «Discrete Signals with Special Correlation Properties», CEUR Workshop Proceedings Volume 2353, CEUR Workshop Proceedings 2019, Pages 618-629.
 20. Smirnov A.A., Kuznetsov A.A., Danilenko D.A., Berezovsky A., «The statistical analysis of a network traffic for the intrusion detection and prevention systems», Telecommunications and Radio Engineering. – Volume 74, Issue 1. – Begel House Inc. – 2015. – P. 61-78.
 21. Smirnov O., Kuznetsov A., Kovalchuk D., Kuznetsova T. «New Technique for Hiding Data in Cover Images Using Adaptively Generated Pseudorandom Sequences». CEUR Workshop Proceedings Volume 2732, 2020, Pages 214-227.
 22. Батрак О., Смірнова Т., Гнатюк В., Одарченко Р., Смірнов О. «Дослідження показників ефективності функціонування та перспектив розвитку систем IP-телефонії». Підводні технології, 2024, № 13, с. 28-35.
 23. Аль-Мудхафар Акіл Абдулхуссейн М., Смірнова Т.В., Буравченко К.О., Смірнов О.А. «Метод оцінки та підвищення користувальницького досвіду абонентів в програмно-конфігурованих мережах на основі використання машинного навчання». Сучасні інформаційні системи, 2023, том 7, № 2, С. 49-56.
 24. Т.В. Смірнова, О.М. Дреєв, О.А. Смірнов «Хмарна інформаційна система оцінювання шорсткості з використанням дискретного частотного аналізу макрофотографій». IV міжнародна науково-практична конференція “Інформаційна безпека та комп’ютерні технології”, м. Кропивницький. 15-16 квітня 2021р. – Кропивницький: ЦНТУ. – 2021. – С. 30.