

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

кафедра радіотехнічних систем

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Метод стиснення цифрових зображень на основі вейвлет-кодування

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РАМ-61
спеціальності _____

172 Електронні комунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

_____	Ступка В.В.
(підпис)	(прізвище та ініціали)

Керівник	_____	Дедів І.Ю.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль	_____	Хвостівська Л.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри	_____	Дунець В.Л.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Рецензент	_____	Дозорська О.Ф.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«26» листопада 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Ступці Віталію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод стиснення цифрових зображень на основі вейвлет-кодування

Керівник роботи Дедів Ірина Юріївна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «26» листопада 2025 року № 4/7-1038

2. Термін подання студентом завершеної роботи 11 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання, стиснення цифрових зображень

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітична частина

2. Основна частина

3. Науково-дослідна частина

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

[illegible]

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Студент		Ступка Віталій Володимирович
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник роботи		Дедів Ірина Юріївна
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Метод стиснення цифрових зображень на основі вейвлет-кодування // Кваліфікаційна робота магістра // Ступка Віталій Володимирович // ТНТУ ім. І.Пулюя, ФПТ // Тернопіль, 2025 // с. - 81, рис. - 13, дод. - 2, бібл. - 42.

Ключові слова: ВЕЙВЛЕТИ, КОМПРЕСІЯ, ЯКІСТЬ, ЗОБРАЖЕННЯ.

В роботі розроблено метод кодування цифрових зображень для зменшення їхнього розміру із застосуванням вейвлетів. Розглянуто методи кодування цифрових зображень, використання вейвлетів в представленні сигналів та зображень. Проаналізовано багатовимірні вейвлет-перетворення, процедури кодування, методи кодування зображень довільної форми, методи інтерполяції зображень. Розроблено послідовність дій для методу вейвлет-кодування. Цю послідовність реалізовано у вигляді програми для Matlab із графічним інтерфейсом, з допомогою якого задаються параметри стиснення та візуалізуються результати стиснення. Проведено опрацювання тестового зображення розробленим методом із різними заданими параметрами стиснення та типом використаного вейвлета. Показано, що вейвлет Добеші є оптимальним для вирішення поставленого завдання.

ANNOTATION

A method of compressing digital images based on wavelet coding. // Stupka V.V.
// TNTU, FPT // Ternopil, 2025 // p. - 81, fig. - 13, appl. - 2, bibl. - 42.

Key words: WAVELET, DIGITAL IMAGE, COMPRESSION, PROCESSING METHOD.

The paper developed a method for compressing digital images based on wavelet coding. Methods for coding digital images based on wavelet transforms, the use of wavelets in the representation of signals and images were considered. Multidimensional wavelet transforms, coding procedures, methods for coding arbitrary-shaped images, and image interpolation methods were analyzed. A sequence of actions for a method for compressing digital images based on wavelet coding was developed. This sequence was implemented in the form of a program for Matlab with a graphical interface, with the help of which compression parameters are set and compression results are visualized. A test image was processed by the developed method with different specified compression parameters and the type of wavelet used. It was shown that the best among the wavelet types used in the developed method is the 4th-order Daubech wavelet.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Актуальність задачі стиснення цифрових зображень.....	10
1.2 Загальна класифікація методів стиснення зображень.....	11
1.3 Стиснення без втрат.....	14
1.4 Стиснення із втратами.....	15
1.5 Типові формати та відповідні методи.....	16
1.6 Метрики якості й артефакти.....	19
1.7 Сучасні нейромережеві методи стиснення.....	20
1.8 Висновки до розділу 1.....	23
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	25
2.1 Загальні відомості.....	25
2.2 Використання вейвлетів в представленні сигналів та зображень.....	26
2.3 Кодування зображень.....	26
2.4. Інтерполяція зображень.....	39
2.5 Висновки до розділу 2.....	42
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	43
3.1 Основи проєктованого методу.....	43
3.2 Експериментальна верифікація розробленого методу.....	46
3.3 Висновки до розділу 3.....	51
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	53
4.1 Охорона праці.....	53
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	56
4.3 Висновки до розділу 4.....	61

ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	64
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність. Актуальність стискання цифрових зображень зумовлена стрімким зростанням обсягів візуальної інформації, яку щодня генерують користувачі, камери спостереження, супутники, медичні прилади, мобільні пристрої тощо. Без ефективних методів стиснення зберігання та передавання таких даних вимагало б надзвичайно великих обчислювальних ресурсів, пропускну здатності мереж і обсягів пам'яті.

Таким чином, стиснення зображень є важливим компонентом сучасних інформаційних систем. Воно дозволяє зробити обмін, зберігання й обробку візуальних даних економічно доцільними, технічно здійсненими та придатними для масштабування в умовах постійного зростання обсягів цифрової інформації.

Вейвлет-перетворення вважається найпотужнішим і найширше використовуваним інструментом, що з'явився в галузі обробки сигналів за останні кілька десятиліть. Здатність вейвлетів до багатороздільного представлення, що подібна до роботи людської зорової системи, стимулювала швидке впровадження та широке використання вейвлетів в засобах цифрової обробки зображень. Алгоритми на основі вейвлетів стають домінуючими в області стискання зображень. Також, вейвлети все частіше використовуються в кодуванні вихідних даних дистанційного зондування, супутникових та інших геопросторових зображень. Крім того, вейвлети починають використовуватися за межами сфери кодування вихідних даних зі зростанням інтересу до надійної передачі зображень та відео як по дротових, так і по бездротових мережах.

Застосування вейвлет-кодування дає можливість досягнення набагато більших в порівнянні із існуючими методами коефіцієнтів стиснення при достатній якості реконструйованих зображень, незважаючи на обмежену поширеність такого підходу через його новизну та відсутність діючих стандартів.

Таким чином, задача розроблення методу стиснення цифрових зображень на основі вейвлет-кодування є актуальною.

Мета. Розробка методу кодування зображень з метою зменшення їхнього розміру шляхом застосування вейвлет-кодування. **Задачі:**

- аналіз методів компресії зображень;
- аналіз форматів та стандартів компресії зображень;
- аналіз типових методів компресії зображень шляхом вейвлет-обробки;
- розроблення методу компресії зображень шляхом вейвлет-обробки;
- експериментальне дослідження результатів опрацювання тестових зображень розробленим методом.

Об'єкт дослідження: процес вейвлет-кодування цифрових зображень.

Предмет дослідження: метод компресії зображень шляхом вейвлет-обробки.

Наукова новизна. На основі результатів роботи розробленого методу обґрунтовано ефективність застосування вейвлета Добеші для компресії зображень.

Практичне значення. Розроблена програма може бути використана як окремий елемент чи модуль компресії зображень в телекомунікаційних мережах.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Актуальність задачі стиснення зображень

Актуальність стискання цифрових зображень зумовлена стрімким зростанням обсягів візуальної інформації, яку щодня генерують користувачі, камери спостереження, супутники, медичні прилади, мобільні пристрої тощо. Без ефективних методів стиснення зберігання та передавання таких даних вимагало б надзвичайно великих обчислювальних ресурсів, пропускної здатності мереж і обсягів пам'яті [1].

Основні аспекти актуальності стискання цифрових зображень наступні [1-8]:

- економія пам'яті та зменшення вартості зберігання. Стиснені зображення займають значно менше місця на дисках, серверах і в «хмарі». Це зменшує витрати на обладнання й інфраструктуру, дозволяє зберігати більші історичні архіви (медичні зображення, супутникові дані, фотобанки тощо);

- зменшення навантаження на мережі та підвищення швидкості передавання. Стиснення безпосередньо впливає на час завантаження вебсторінок, роботу стримінгових сервісів, відеоконференцій, систем відеоспостереження. Менший обсяг даних означає менші затримки та стабільнішу роботу при обмеженій пропускній здатності каналу;

- забезпечення роботи в реальному часі. У багатьох застосуваннях (дрони, системи технічного зору, автономний транспорт, телемедицина, відеозв'язок) обробка зображень повинна виконуватися в реальному часі. Стиснені дані дозволяють швидше виконувати передавання, обробку та аналіз;

- інтеграція з мобільними та вбудованими системами. Мобільні пристрої й вбудовані системи мають обмежені ресурси — пам'ять, можливості процесора, енергію. Стиснення зменшує енергоспоживання під час передавання й обробки зображень, що є критичним для автономних і батарейних пристроїв.

- масштабованість та адаптивна якість. Сучасні методи стиснення (зокрема вейвлет-орієнтовані) забезпечують можливість передавання зображень із різною якістю та роздільною здатністю залежно від умов каналу і потреб користувача (наприклад, попередній перегляд низької якості з можливістю «довантажити» деталі).

- підтримка аналітики та штучного інтелекту. Великі набори даних для навчання нейромереж (face recognition, object detection тощо) часто повинні бути стиснутими, щоб їх можна було зручно передавати, зберігати й оновлювати. Без стиснення створення та обробка таких датасетів були б надто ресурсомісткими.

Отже, стиснення цифрових зображень є критично важливим компонентом сучасних інформаційних систем. Воно дозволяє зробити обмін, зберігання й обробку візуальних даних економічно доцільними, технічно здійсненими та придатними для масштабування в умовах постійного зростання обсягів цифрової інформації.

Проведемо аналіз та класифікацію методів та підходів до стиснення цифрових зображень.

1.2 Загальна класифікація методів стиснення зображень

Насамперед методи стиснення класифікуються за збереженням інформації на наступні типи [3-5]:

- стиснення без втрат (lossless). Використовується там, де важлива абсолютна точність: медичні знімки, технічні креслення, супутникові дані,

проміжні результати обробки. Приклади: PNG, GIF, BMP з RLE, TIFF (lossless), JPEG-LS;

- стиснення із втратами (lossy). Частина інформації при цьому безповоротно втрачається. Використовується в фото, відео, стрімінгу, веб-графіці, де головне – невеликий розмір + прийнятна якість. Приклади: JPEG, JPEG2000 (lossy), WebP (lossy), HEIC, AVIF, більшість відеокодеків.

- стиснення майже без втрат (near-lossless). При цьому допускається лише маленька різниця (наприклад, відхилення до 1–2 рівнів яскравості). Приклад: режим near-lossless у JPEG-LS, де помилка обмежена заданим порогом.

Також методи стиснення класифікують за принципом кодування. Сюди відносять:

- ентропійні методи (статистичне/ентропійне кодування). Не змінюють значення пікселів; стискають за рахунок різної довжини кодів для частих/рідкісних символів;

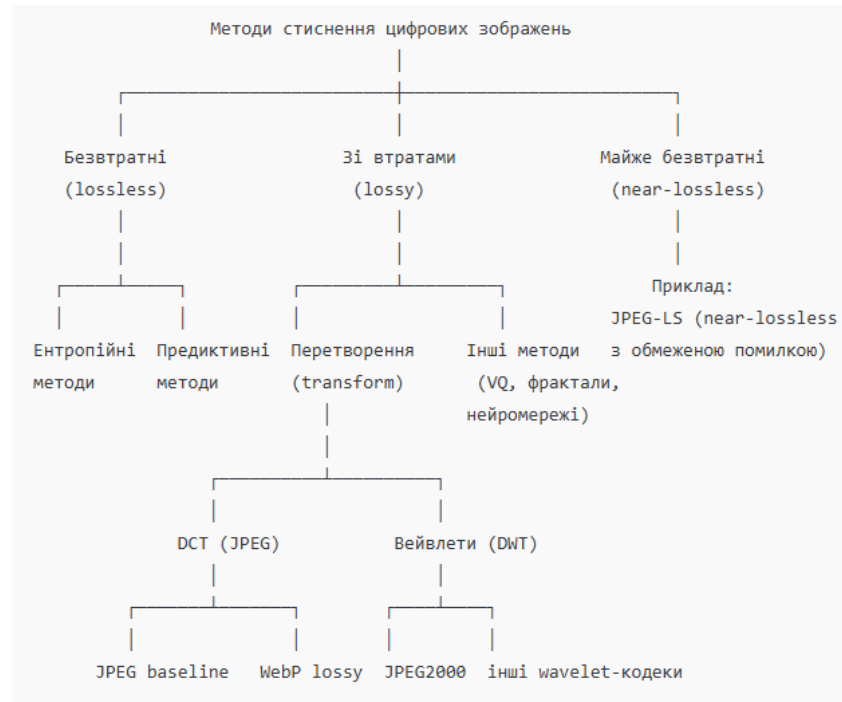
- методи, які враховують кореляцію / надлишковість: лінійні предиктори (DPCM, JPEG-LS); фільтрація по рядках/стовпцях (PNG-фільтри); інші підходи, що використовують зв'язок між сусідніми пікселями;

- методи на основі перетворень (transform coding). Замість роботи напряму з пікселями, зображення перетворюється в інший простір (DCT, DWT, інші вейвлети). Суть методів: енергія сигналу концентрується в небагатьох коефіцієнтах і їх можна зберегти точніше, інші – грубо або занулити;

- методи векторної квантизації (VQ). Зображення розбивається на блоки/вектори, кожен вектор замінюється індексом найближчого елемента з кодової книги;

- фрактальні, субдіфузійні, інші специфічні методи. Фрактальне стиснення, методи з ітеративним відновленням; нині практично зустрічаються рідко в масових форматах.

- неймережеві/автоенкодерні (deep learning-based). Глибокі автоенкодери/варіаційні автоенкодери, моделі типу generative compression, diffusion-based codecs. Вони вчаться відображати зображення в компактне латентне представлення та відновлювати його.



```

Безвтратні (lossless):
- Ентропійні методи:
  • Huffman, arithmetic, DEFLATE (LZ77 + Huffman)
  • Приклади форматів: PNG, GIF, WebP lossless, TIFF (lossless)
- Предиктивні методи:
  • PNG-фільтри (Sub, Up, Average, Paeth)
  • JPEG-LS (LOCO-I)

Зі втратами (lossy):
- Перетворення (transform coding):
  • DCT 8x8 → JPEG (класичний)
  • Integer-DCT-подібні трансформи + предикція блоків → WebP lossy
  • DWT (вейвлети) → JPEG2000
- Інші:
  • Векторна квантизація (VQ)
  • Фрактальне стиснення
  • Неймережеві автоенкодери / генеративні методи

Майже безвтратні (near-lossless):
- JPEG-LS у режимі near-lossless (обмежена максимальна помилка)
  
```

Рис. 1.1. Дерево-класифікація (текстова схема)

1.3 Стиснення без втрат

Припускається, що у зображеннях є надлишковість [6]:

- статистична: деякі значення зустрічаються частіше (наприклад, фоновий колір);
- просторова: сусідні пікселі схожі один на одного;
- спектральна: в кольоровому зображенні канали R,G,B корельовані.

Методи кодування без втрат комбінують перетворення/предикцію, щоб зменшити варіативність даних (зробити розподіл “гострішим” біля нуля) та ентропійне кодування, щоб представити часті значення короткими бітовими кодами.

Розглянемо ентропійне кодування на прикладі кодування Хафмана. Воно будує бінарне дерево, де часто вживані символи мають короткі коди. Є оптимальне (в певному сенсі) для відомих імовірностей та кодів змінної довжини без префіксів. Просте, швидке, широко використовується (JPEG, PNG).

При Arithmetic coding замість коду для кожного символу кодується ціла послідовність як число в інтервалі $[0,1)$. Може підходити ближче до теоретичної границі Шенона, ніж Хафман. Часто використовується разом з адаптивними контекстними моделями.

У випадку контекстно-адаптивних методів імовірності символів оцінюються з урахуванням контексту (сусідніх пікселів, попередніх значень), наприклад, в САВАС (в H.264/H.265) або в сучасних кодеках (WebP, AVIF).

Розглянемо тепер методи на основі предикції / фільтрації. Замість зберігати значення пікселя $P(i,j)$, можна зберігати різницю між ним і прогнозом з сусідів:

$$e(i,j) = P(i,j) - \hat{P}(i,j)$$

де $\hat{P}(i, j)$ – передбачене значення (наприклад, усереднення зліва і зверху).

У результаті, якщо зображення плавне, більшість $e(i, j)$ малих за модулем, концентруються біля нуля та добре стискаються ентропійним кодуванням.

Сюди відносять PNG-фільтри. PNG перед стисненням (DEFLATE) застосовує фільтри по рядках:

- None (без фільтра)
- Sub (перша різниця по горизонталі)
- Up (різниця з пікселем зверху)
- Average (середнє лівого та верхнього)
- Paeth (спеціальний предиктор з трьома сусідами: лівий, верхній, діагональний)

Для кожного рядка вибирається фільтр, який дає кращі умови для стиснення.

Також сюди відноситься JPEG-LS, в основі якого використовується LOCO-I алгоритм:

- простий, але ефективний контекстно-залежний предиктор;
- адаптивне моделювання івірогідностей;
- можливість обмежити помилку (near-lossless, наприклад, відхилення не більше 1).

1.4 Стиснення із втратами

Тут принцип такий: з урахуванням людського зору прибираємо/грубо квантуємо компоненти, які менш помітні.

Базова схема наступна [4]:

(1) Перетворення $\rightarrow$ (2) Квантування $\rightarrow$ (3) Ентропійне кодування

Перед перетворенням часто роблять:

1. Перехід з RGB в YCbCr (або подібний)

- Y – яскравість (luma), Cb/Cr – хромінанс (кольорові компоненти).
- око людини більш чутливе до яскравості, ніж до кольорових деталей.

2. Частотна дискретизація хромі (chroma subsampling)

- зменшення роздільної здатності Cb/Cr : схеми 4:4:4, 4:2:2, 4:2:0.

Наприклад, 4:2:0 означає, що хрома вдвічі нижча по горизонталі і вертикалі. В результаті отримуємо менше даних при мало помітній втраті якості. Це вже дає серйозне зменшення обсягу даних, особливо для фото і відео.

Дальше проводиться перетворення (Transform Coding):

1) DCT (дискретне косинусне перетворення) – база JPEG.

Розбиваємо зображення на блоки 8×8 (класичний JPEG). Для кожного блоку обчислюється DCT, яке перетворює пікселі в частотні коефіцієнти. Енергія сигналу концентрується в кількох низькочастотних коефіцієнтах (верхній лівий кут матриці 8×8). Після DCT вводиться квантувальна матриця (більші кроки для високих частот, менші – для низьких). Високочастотні коефіцієнти часто стають нулями і добре стискаються. Плюси: просте і прискорюване (апаратно/інструкціями SIMD) стиснення; давно стандартизовано, підтримується всюди. Мінуси: блокові артефакти при сильному стисненні через незалежну обробку блоків 8×8 ; можливі “кільця” навколо різких контурів (ringing).

2) Вейвлет-перетворення (DWT) – база JPEG2000.

Замість блоків 8×8 DWT працює типово на всьому зображенні або на великих плитках. Зображення розкладається на субсмути: LL (низькі частоти) + LH, HL, HH (горизонтальні/вертикальні/діагональні деталі) на кількох рівнях.

Вейвлети (Daubechies, biorthogonal, Haar тощо) мають локалізацію і в просторі, і в частоті.

Переваги: краще поводить з локальними особливостями зображення (краї, текстури); відсутність жорстких блокових меж, менше блокових артефактів і візуально плавніше; багаторівнева структурована декомпозиція; можливість прогресивної передачі (спочатку грубий, потім детальний).

Недоліки: складніша реалізація; більш вимогливе до ресурсів, особливо для старих пристроїв (тому JPEG2000 не став настільки масовим як JPEG).

Дальше проводиться квантування - ключовий крок, де з'являються втрати:

Без квантування (або з квантуванням кроком 1) стиснення було б без втрат.

Квантування умовно можна подати так:

$$\tilde{c} = \text{round} \left(\frac{c}{\Delta} \right)$$

де c – коефіцієнт перетворення, Δ – крок квантування.

У JPEG це реалізовано через квантувальну матрицю (поелементний поділ). Чим більший крок (Δ), тим більше інформації губиться; більше нулів і сильніше ентропійне стиснення; гірша якість (нижчий PSNR, помітні артефакти).

Ентропійне кодування (кодеки з втратами).

Після квантування багато коефіцієнтів нульові, розподіл сильно скошений і відмінні умови для методу Хафмана/арифметичного кодування.

Використовуються прийоми:

- RLE (run-length encoding) для послідовностей нулів (JPEG по зигзагу);
- контекстно-залежні моделі,
- спеціальні кодові таблиці.

Інші підходи із втратами:

1) Векторна квантизація (VQ). Зображення розбивається на блоки (наприклад 4×4), блок розглядається як вектор. Є кодова книга (набір еталонних блоків). Кожний блок замінюється індексом найближчого вектора з кодової книги. Книгу можна навчити по великій базі зображень (кластеризація, наприклад k-means). Плюси: дуже висока компресія, просте декодування (по суті lookup). Мінуси: важке навчання кодової книги; блокові артефакти/“плями”.

2) Фрактальне стиснення. Припускається, що зображення містить самоподібні області. Кодується набір афінних перетворень, які при ітеративному застосуванні реконструюють зображення. Формально цікаво, але практично мало використовується через складність кодування та патентну історію.

1.5 Типові формати та відповідні методи

Проаналізуємо тепер типові формати та відповідні методи стиснення цифрових зображень.

1) JPEG (класичний).

Колір: перехід $RGB \rightarrow YCbCr$, хрома-субдискретизація (4:2:0).

Блоки 8×8 , DCT.

Квантування DCT-коефіцієнтів (матричне).

RLE + Huffman.

Із втратами; є режим “lossless JPEG”, але в практиці рідкісний, поступився JPEG-LS/PNG.

2) PNG.

Основна ідея: стиснення без втрат.

Фільтри по рядках (Sub, Up, Average, Paeth).

Потім DEFLATE (LZ77 + Huffman).

Дуже популярний для графіки з прозорістю, скріншотів, схем.

3) GIF.

Старий формат, 8-бітна палітра (до 256 кольорів).

LZW-стиснення.

Підтримує анімацію, просту прозорість.

Замінений частково PNG (для статичних) і web-анімаціями (WebP, MP4).

4) JPEG2000.

Базується на DWT (вейвлети).

Підтримує lossy і lossless режими.

Прогресивне кодування, довільний доступ до областей зображення.

Краща якість при високому стисненні, але гірша підтримка в браузерах/пристроях.

5) WebP.

Із втратами: використовує методи, схожі на відеокодек VP8 (блочне предиктивне кодування + трансформ).

Без втрат: інші механізми (предикція + ентропійне кодування).

Підтримує прозорість, анімацію.

Часто дає менший розмір, ніж JPEG/PNG, при близькій якості.

6) HEIC/HEIF, AVIF.

Базуються на сучасних відеокодеках (HEVC, AV1).

Сильна міжблокова та міжкадрова (для послідовностей) предикція, потужне ентропійне кодування.

Дуже хороше співвідношення якості/розмір.

Широко використовуються в сучасних смартфонах (наприклад, HEIC в iOS).

1.6 Метрики якості й артефакти

Тепер розглянемо основні метрики, які використовуються для порівняння вихідного та відновленого зображень і оцінювання якості стиснення, а також артефакти [7,8].

1) MSE і PSNR

- MSE (mean squared error):

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2$$

де x_i – оригінал, $\hat{x}_i$ – декодоване зображення.

- PSNR (peak signal-to-noise ratio):

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{L^2}{\text{MSE}} \right)$$

де L – максимальне можливе значення (255 для 8 біт, 1 для normalized).

30–40 dB зазвичай вважається хорошою якістю для фотографій.

2) Перцептивні метрики

SSIM (Structural Similarity Index) – оцінює схожість структур, а не просто різницю пікселів.

Інші: MS-SSIM, VIF, LPIPS та ін., особливо актуальні для нейромережових методів.

3) Типові артефакти:

- JPEG (DCT 8×8): блоковість, ringing.
- сильне квантування: “мільність”, втрата текстур.
- надмірна хрома-субдискретизація: кольорові смуги, колірні артефакти на контрастних межах.

1.7 Сучасні нейромережові методи стиснення

Автоенкодери. Encoder-сітка відображає зображення в компактний латентний вектор. Цей вектор квантується й стискається ентропійно. Decoder-сітка відновлює зображення. Можна навчати під конкретну метрику (MSE, SSIM, перцептивні із втратами).

Варіаційні автоенкодери (VAE). Латентний простір має розподіл; compression = зберігання параметрів розподілу.

Генеративні моделі (GAN, diffusion). Можна ще сильніше стискати латентний код, а “деталі” домальовує генеративна модель. Це вже наближається до “семантичного” стиснення: зберігаємо не всі дрібні деталі, а “сенси” сцени.

Плюси й мінуси:

- краща якість при тій самій бітовій швидкості (особливо для складних текстур);
- висока обчислювальна складність, потреба в потужних GPU/спеціальному залізі;
- питання стандартизації і сумісності.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика основних методів стиснення цифрових зображень

Метод / підхід	Тип (lossy / lossless)	Основна ідея	Переваги	Недоліки	Типові застосування / формати
Ентропійне кодування (Huffman, arithmetic, DEFLATE)	Зазвичай lossless	Коди змінної довжини: часті символи мають коротший код	Наближення до межі Шеннона; універсальний етап у багатьох кодах	Потребує попередньої «підготовки» даних (предикція/перетворення); сам по собі дає обмежене стиснення	PNG, GIF, WebP (lossless і всередині lossy), JPEG, JPEG2000
Предиктивні методи (DPCM, PNG-фільтри, JPEG-LS)	Lossless / near-lossless	Кодується різниця між пікселем і прогнозом із сусідів	Добре працюють на гладких зображеннях; прості; зручні для безвтратного стиснення	Гірше на дуже «шумних»/текстурних зображеннях; чутливі до вибору предиктора	PNG, JPEG-LS, WebP lossless
DCT (дискретне косинусне перетворення)	Lossy	Розклад блоків (частіше 8×8) на косинусні базиси; енергія в низьких частотах	Ефективне для фото; швидке; апаратна підтримка	Блокові артефакти (8×8), ringing; погано для чіткого тексту/логотипів	JPEG, WebP (lossy, integer DCT-подібні трансформи), відеокодеки

Продовження таблиці 1.1

DWT (вейвлет-перетворення)	Lossy і lossless	Багаторівневий розклад на субсмуги (LL, LH, HL, HH)	Краща якість при великому стисненні; менше блоковості; прогресивність	Складніша реалізація; вища обчислювальна вартість; слабша підтримка в масових програмах	JPEG2000, спец. кодеки
Векторна квантизація (VQ)	Lossy	Блоки зображення як вектори; кожен замінюється індексом із кодової книги	Висока компресія; дуже просте декодування (табличний пошук)	Складне навчання кодової книги; помітні блокові/«плямисті» артефакти	Спеціалізовані системи, старі кодеки
Фрактальне стиснення	Lossy	Використання самоподібності; кодуються афінні перетворення блоків	Теоретично високе стиснення і масштабованість без додаткових втрат	Дуже повільне кодування; складність; майже не використовується на практиці	Історичний/науковий інтерес
Нейромережеві автоенкодера / генеративні методи	Переважає lossy	NN-енкодер стискає в латентний вектор, декодер відновлює; можливе «домальовування» деталей	Краще співвідношення якості/бітрейт; перцептивно приємні результати на складних текстурах	Високі обчислювальні витрати (GPU); відсутність усталених стандартів; проблеми сумісності	Дослідницькі кодеки, прототипи, спецсервіси

Таблиця 1.2

**Порівняльна характеристика основних форматів та стандартів
стиснення цифрових зображень**

Формат	Тип стиснення	Основний метод / ядро	Переваги	Недоліки	Коли обирати
JPEG	Lossy	DCT 8×8 + квантування + RLE + Huffman	Добре стискає фото; максимальна сумісність; швидке декодування	Блокові артефакти при сильному стисненні; немає прозорості; погано для тексту/логотипів	Фото, галереї, веб-фото, камери
PNG	Lossless	Предикція по рядках (фільтри) + DEFLATE	Без втрат; альфа-канал; чіткі краї й текст; широка підтримка	Великі файли для фото; кодування повільніше, ніж у JPEG	Логотипи, іконки, скріни, інтерфейсна графіка
WebP (lossy)	Lossy	VP8-подібний кодек: intra-pred + integer DCT + ентропійне кодування	Краще співвідношення якості/розмір, ніж JPEG; прозорість; анімація	Не всі старі браузері/програми підтримують; складніше кодування	Фото в веб, з прозорістю, анімовані зображення

Продовження таблиці 1.2

WebP (lossless)	Lossless	Предиктори + LZ-подібні посилання + ентропійне кодування	Часто менший розмір, ніж PNG; альфа-канал; один контейнер із lossy-режимом	Кодування/декодування складніше; підтримка гірша, ніж у PNG (особливо в старих системах)	Сучасні веб-проекти, де важливий кожен кілобайт
JPEG2000	Lossy і lossless	Вейвлет-перетворення (DWT) + ентропійне кодування	Краща якість при високому стисненні, ніж JPEG; прогресивність; довільний доступ до областей	Гірша підтримка в браузерах і ПЗ; складність; більше навантаження на CPU	Архіви, медичні/супутникові зображення, професійні застосування
JPEG-LS	Lossless / near-lossless	Предиктивний алгоритм LOCO-I + ентропійне кодування	Дуже ефективне безвтратне й near-lossless стиснення; простий декодер	Слабка підтримка в масових інструментах; мало відомий	Медичні, технічні, наукові зображення
GIF	Lossless (із 8-біт палітрою)	LZW + палітра до 256 кольорів	Анімація; історично широка підтримка	Обмеження 256 кольорів; великі файли; застарілий для серйозних задач	Прості анімації, меми (історично), де сумісність важливіша за ефективність

Проаналізувавши дані таблиць 1.1 та 1.2 можна стверджувати, що немає єдиного універсального підходу щодо методу та процедури СЦЗ. Усі існуючі методи мають як сильні так і слабкі сторони. Однак, перспективним є застосування вейвлет-кодування, яке дає можливість досягнення набагато більших в порівнянні із існуючими методами коефіцієнтів стиснення при достатній якості реконструйованих зображень, незважаючи на обмежену поширеність такого підходу через його новизну та відсутність діючих стандартів.

1.8 Висновки до розділу 1

Проведено аналіз та класифікацію методів СЦЗ, зокрема із втратами та без втрат. Також проаналізовано типові формати стиснення зображень і використовувані методи стиснення.

Встановлено, що немає єдиного універсального підходу щодо методу та процедури СЦЗ. Усі існуючі методи мають як сильні так і слабкі сторони. Однак, перспективним є застосування вейвлет-кодування, яке дає можливість досягнення набагато більших в порівнянні із існуючими методами коефіцієнтів стиснення при достатній якості реконструйованих зображень, незважаючи на обмежену поширеність такого підходу через його новизну та відсутність діючих стандартів.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Загальні відомості

Вейвлет-перетворення, мабуть, є найпотужнішим і найширше використовуваним інструментом, що з'явився в галузі обробки сигналів за останні кілька десятиліть. Здатність вейвлетів до багатороздільного представлення, подібна до роботи людської зорової системи, стимулювала швидке впровадження та широке використання вейвлетів у програмах обробки зображень. Дійсно, алгоритми на основі вейвлетів домінували в стисканні зображень протягом понад десятиліття, і кодування вихідних даних на основі вейвлетів зараз з'являється в інших областях. Наприклад, нещодавні відеокодери на основі вейвлетів використовують часову фільтрацію на основі вейвлетів у поєднанні з компенсацією руху для отримання ефективного стиснення відео з повною часовою, просторовою та точною масштабованістю. Крім того, вейвлети все частіше використовуються в кодуванні вихідних даних дистанційного зондування, супутникових та інших геопросторових зображень. Крім того, вейвлети починають використовуватися за межами сфери кодування вихідних даних зі зростанням інтересу до надійної передачі зображень та відео як по дротових, так і по бездротових мережах. Зокрема, нещодавно було запропоновано вейвлети для спільного кодування джерела та каналу та кодування з кількома описами.

2.2 Використання вейвлетів в представленні сигналів та зображень

У найпростішому сенсі вейвлети забезпечують набір розкладу (зазвичай базис), який одночасно розкладає зображення за частотою та простором. Таким чином, представлення сигналу за допомогою набору розкладу та відповідних коефіцієнтів розкладу можна вважати найфундаментальнішим завданням, до якого застосовуються вейвлети. Поєднання такого представлення сигналу з квантуванням та певною формою генерації бітового потоку дає схеми стиснення зображень/відео; таке кодування джерела, мабуть, є найпоширенішим практичним застосуванням вейвлетів.

2.3 Кодування зображень

Протягом останнього десятиліття вейвлети зайняли домінуюче місце в задачі стиснення 2D-зображень, і їх все частіше розглядають також для стиснення 3D-зображень. Вейвлети є привабливими в задачі кодування зображень завдяки традиції відмінної продуктивності швидкості спотворення в поєднанні з властивою здатністю до прогресивної передачі, де можливі послідовні реконструкції зображення, оскільки все більше стисненого бітового потоку отримується та декодується. Розглядаємо кілька важливих концепцій у галузі кодування зображень, включаючи багатовимірні вейвлет-перетворення, процедури кодування, що застосовуються до таких перетворень, а також методологію кодування для загальних зображень форми, відмінної від традиційних прямокутних сцен (тобто адаптивне до форми кодування).

2.3.1. Багатовимірні вейвлет-перетворення

Один етап одновимірного дискретного вейвлет-перетворення (DWT) розкладає одновимірний сигнал на низькочастотний та високочастотний сигнал. Багатовимірні вейвлет-розклади зазвичай будуються за допомогою таких

одновимірних вейвлет-розкладів, що застосовуються незалежно вздовж кожного виміру набору даних зображень, створюючи низку піддіапазонів. Процедuru розкладу можна повторювати рекурсивно на одному або кількох піддіапазонах, щоб отримати кілька рівнів розкладу все нижчої та нижчої роздільної здатності.

Найпоширеніша структура багатовимірного DWT складається з рекурсивного розкладу піддіапазону з найнижчою роздільною здатністю. Ця діадна структура розкладу проілюстрована для двовимірного зображення на рис. 1(a). У двовимірному діадному DWT вихідне зображення розкладається на чотири піддіапазони, кожен з яких має чверть розміру вихідного зображення, а піддіапазон з найнижчою роздільною здатністю (основна смуга) рекурсивно розкладається. Структура діадного перетворення тривіально розширюється на 3D-зображення, як показано на рис. 1(b) — один етап 3D-розкладання дає 8 піддіапазонів, при цьому базова смуга рекурсивно розкладається для 3D-діадного перетворення.

Альтернативні структури перетворення виникають, коли піддіапазони, відмінні від базової смуги або на додаток до неї, піддаються подальшому розкладу. Зазвичай їх називають вейвлет-пакетними перетвореннями, ці структури розкладання можуть бути фіксованими (як діадна структура) або оптимально адаптованими для кожного кодованого зображення (тобто так звана структура найкращого базисного перетворення [9]). Пакетні перетворення пропонують потенціал для кращого узгодження просторових або просторово-часових характеристик певних зображень і таким чином можуть іноді забезпечити більшу ефективність кодування. Хоча фіксовані пакетні перетворення, такі як ті, що проілюстровані на рис. 2, не використовуються широко для кодування 2D-зображень, вони широко використовуються в кодерах 3D-зображень і часто забезпечують ефективність кодування, що значно перевищує ефективність діадного перетворення, показаного на рис. 1(b). Зокрема, було показано, що структура пакетів, показана на рис. 2(a), є майже

оптимальною в певних застосуваннях, забезпечуючи продуктивність кодування, майже ідентичну оптимальній структурі розкладання пакетів, обраний у сенсі найкращого базису швидкості та спотворень.

Хоча існує багато можливих фільтрів вейвлет-перетворення, програми кодування зображень майже виключно покладаються на повсюдне біртогональне перетворення [10]. Біртогональність сприяє симетричному розширенню на межах зображення та дозволяє використовувати лінійно-фазові КІХ-фільтри. Крім того, досвід показав, що біртогональне перетворення $9/7$ загалом пропонує хорошу продуктивність кодування [11], тоді як біртогональне перетворення $5/3$ є привабливим для зменшення обчислювальної складності або для реалізації оборотного цілочисельного перетворення. Фактично, біртогональне перетворення $9/7$ та цілочисельне біртогональне перетворення $5/3$ є єдиними перетвореннями, дозволеними Частиною 1 стандарту JPEG2000 [12], хоча розширення кодування Частини 2 стандарту дозволяють застосовувати більшу різноманітність перетворень.

2.3.2. Процедури кодування

Багато вейвлет-кодерів для 2D та 3D зображень базуються на наступних спостереженнях, які, як правило, справедливі для діадних розкладів багатьох класів зображень: (1) оскільки більшість зображень мають низьку частоту, більша частина енергії сигналу стискається в піддіапазони з нижчою роздільною здатністю; (2) більшість коефіцієнтів дорівнюють нулю для піддіапазонів з високою роздільною здатністю; (3) коефіцієнти з малими або нульовими значеннями (тобто незначні коефіцієнти) схильні до групування у заданому піддіапазоні; та (4) кластери незначних коефіцієнтів у піддіапазоні, як правило, розташовані в тому ж відносному положенні, що й подібні кластери в піддіапазоні тієї ж орієнтації на наступному рівні вищої роздільної здатності.

Вейвлет-кодери зображень зазвичай реалізують наступну процедуру кодування. Коефіцієнти DWT представлені у формі знак-величина, причому

знаки та величини кодуються окремо. Величини коефіцієнтів послідовно апроксимуються за допомогою кодування на бітовій площині, де кодується найважливіший біт з усіх величин коефіцієнтів, потім наступний за старшістю біт і так далі. На практиці таке кодування на бітовій площині зазвичай реалізується шляхом виконання двох проходів кодування через набір коефіцієнтів для кожної бітової площини – проходу значущості та проходу уточнення. По суті, прохід значущості описує першу бітову площину, яка містить ненульовий біт для всіх коефіцієнтів у DWT, тоді як прохід уточнення створює послідовне апроксимування кожного коефіцієнта після кодування його найважливішого ненульового біта. Прохід значущості працює шляхом послідовного кодування карти значущості – коефіцієнтів, які є незначущими відносно порогу; основна відмінність між кодерами на основі вейвлетів полягає в тому, як виконується це кодування карти значущості. У таблиці 1 наведено огляд основних стратегій кодування карти значущості.

Нульові дерева широко використовувані методи кодування карт значущості у кодерах на основі вейвлетів. Нульові дерева використовують той факт, що в діадних перетвореннях незначущі коефіцієнти, як правило, групуються разом у піддіапазоні, а кластери незначущих коефіцієнтів, як правило, розташовуються в одному місці в піддіапазонах з різною роздільною здатністю. Як показано на рис. 2.3(а), "батьківські" коефіцієнти в піддіапазоні можуть бути пов'язані з "дочірніми" коефіцієнтами в тому ж відносному місці в піддіапазоні з наступною вищою роздільною здатністю. Нульове дерево формується, коли коефіцієнт та всі його нащадки є незначущими відносно поточного порогу. Вбудований алгоритм вейвлета нульового дерева (EZW) [13] був першим кодером зображень, який використовував нульові дерева. Пізніше алгоритм розбиття множин в ієрархічних деревах (SPIHT) удосконалив концепцію нульового дерева, додавши низку відсортованих списків, що містять набори коефіцієнтів (тобто нульові дерева) та окремі коефіцієнти. Як EZW, так і

SPINT спочатку були розроблені для двовимірних зображень. EZW було розширено до 3D у [20, 21]; SPINT було розширено до 3D у [14]. У той час як розширення 2D структури нульового дерева до 3D діадного перетворення є простим, підгонка нульових дерев до 3D пакетних перетворень з рис. 2.2 є менш простою. Асиметрична структура нульового дерева, що проілюстрована на рис. 2.3(b), зазвичай забезпечує найкращу продуктивність для пакетного перетворення з рис. 2.2(a).

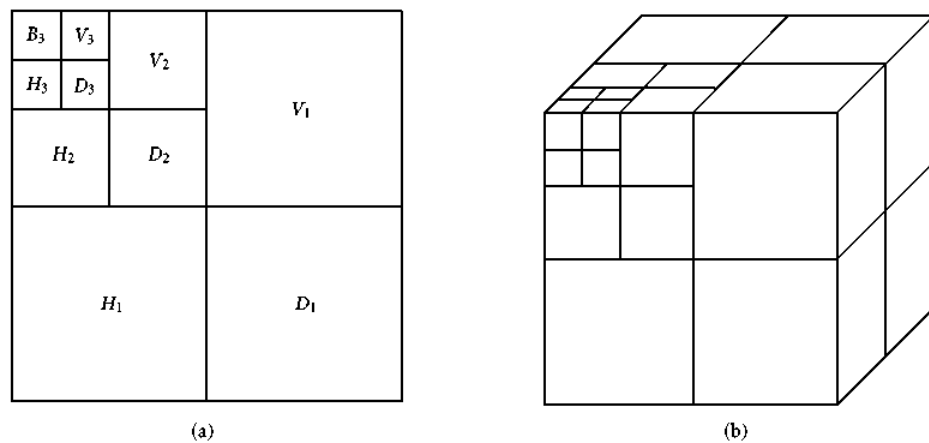


Рис. 2.1: Діадна DWT з трьома рівнями розкладання. (a) 2D; (b) 3D.

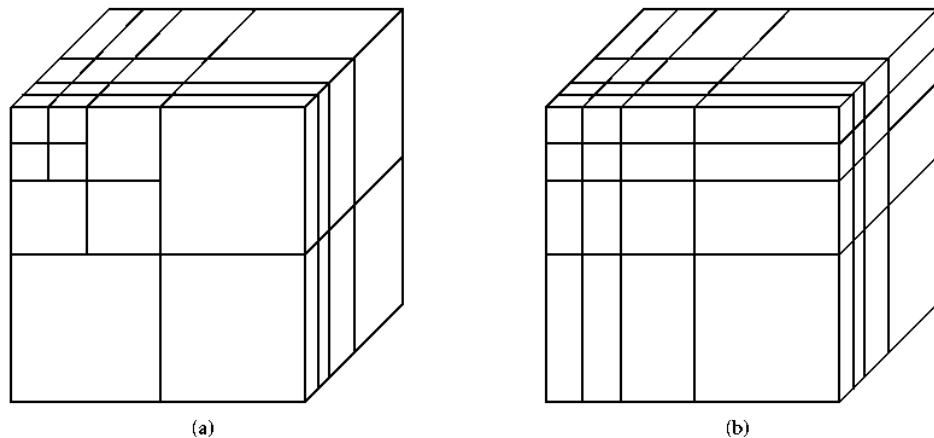


Рис. 2.2: Приклади 3D-вейвлет-пакетних DWT з трьома рівнями розкладання. (a) 2D-діадне плюс незалежне 1D-діадне; (b) три незалежні 1D-діадні перетворення.

Таблиця 2.1:

Стратегії кодування карти значущості у вейвлет-кодерах нерухомих зображень.

Стратегія	Видатні приклади	Методологія	Примітки
Нульові дерева (Zerotrees)	EZW, SPIHT	Крос-масштабні дерева коефіцієнтів плюс арифметичне кодування	Широко використовується
Розбиття множини (Set partitioning)	SPECK, BISK	Розбиття множини на підмножини плюс арифметичне кодування	Без крос-піддіапазонної обробки
Умове кодування (Conditional coding)	JPEG2000	Мультиконтекстне арифметичне кодування малих блоків; арифметичне кодування; оптимальне усічення блоків	Вища продуктивність за критерієм швидкість-спотворення; крос-піддіапазонна обробка обмежується процесом усічення блоків.

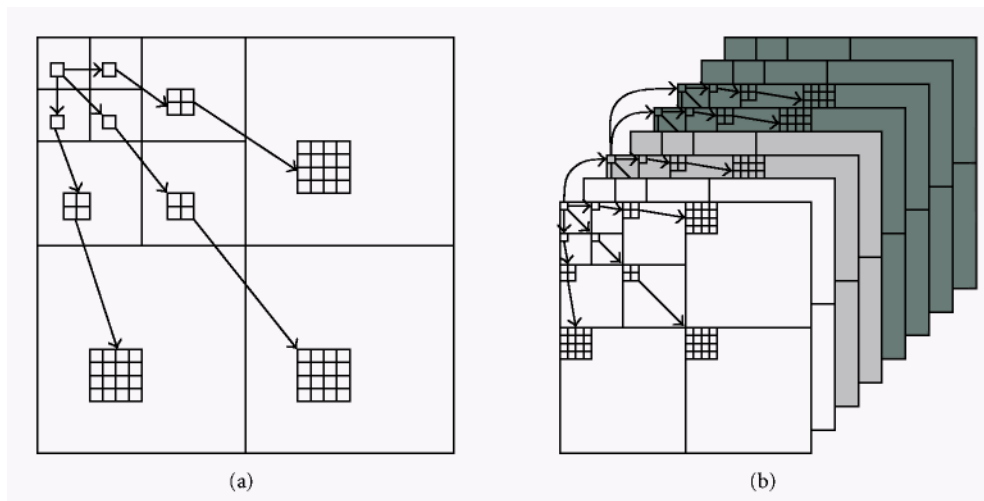


Рис. 2.3: Нульові дерева в (a) 2D-діадному перетворенні для рис. 1(a), (b) 3D-пакетному перетворенні для рис. 2(a).

Незважаючи на популярність алгоритмів на основі нульових дерев, в роботі [10] показано, що, як правило, здатність передбачати незначущість коефіцієнта через міжмасштабні зв'язки дещо обмежена порівняно з прогностичною здатністю сусідніх коефіцієнтів у межах одного піддіапазону. Отже, останні алгоритми зосередилися на кодуванні інформації карти значущості, використовуючи лише інформацію в межах піддіапазону. Альтернативою нульовим деревам для кодування карти значущості є внутрішньодіапазонне розбиття набору. Вбудований блочний кодер з розбиттям набору (SPECK), спочатку розроблений як 2D-кодер зображень, використовує розбиття квадродерев (рис. 2.4(a)) для визначення значущих коефіцієнтів у межах піддіапазону; 3D-розширення (3D-SPECK) замінює квадродеревами октодерева, як показано на рис. 4(b). Подібний підхід втілено в алгоритмі розщеплення бінарних множин за допомогою *fc-d* дерев (BISK) як в його 2D (2D-BISK), так і в 3D (3D-BISK) варіантах, де множини завжди розділяються на дві підмножини. Перевагою цих алгоритмів розділення множин є те, що множини обмежені тим, щоб знаходитися в межах одного піддіапазону в будь-який момент часу протягом усього алгоритму, тоді як нульові дерева охоплюють кілька роздільних здатностей перетворення. Цей факт не тільки передбачає простішу реалізацію, але є вигідний з обчислювальної точки зору, оскільки кодер повинен буферизувати лише один піддіапазон в даний момент часу, що призводить до зменшення необхідної динамічної пам'яті. Крім того, алгоритми SPECK та BISK легко застосовуються як до діадних, так і до пакетних структур перетворення, показаних на рис. 2.1(b), 2.2(a) та 2.2(b), без жодних алгоритмічних відмінностей.

Інший підхід до внутрішньодіапазонного кодування полягає у використанні поширеного адаптивного арифметичного кодування з кількома контекстами. JPEG2000, найвідоміший метод умовного кодування, кодує карту значущості зображення, використовуючи відомі стани значущості сусідніх коефіцієнтів, щоб забезпечити контекст для кодування стану значущості

поточного коефіцієнта. Для кодування 2D-зображення кодер JPEG2000 спочатку виконує 2D вейвлет-перетворення зображення, а потім розділяє кожен піддіапазон перетворення на невеликі 2D прямокутні блоки, які називаються кодовими блоками, які зазвичай мають розмір 32×32 або 64×64 пікселі. Згодом кодер JPEG2000 незалежно генерує вбудований бітовий потік для кожного кодового блоку. Щоб зібрати окремі потоки бітів кодових блоків в єдиний кінцевий потік бітів, кожен потік бітів кодових блоків певним чином обрізається, а обрізані потоки бітів об'єднуються разом, утворюючи кінцевий потік бітів.

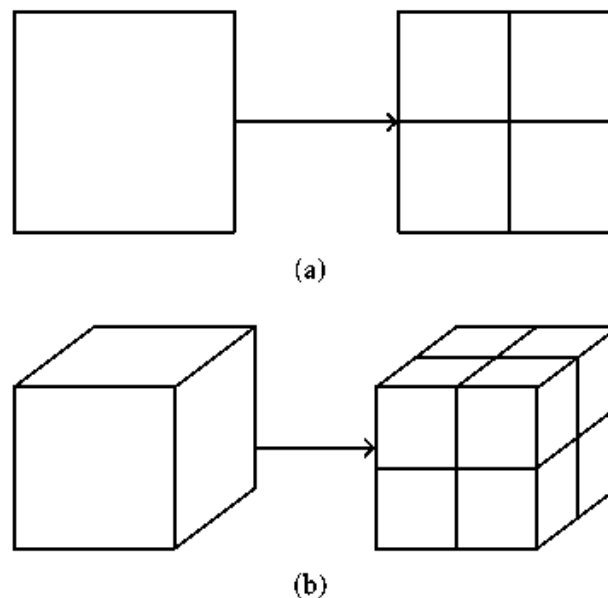


Рис. 2.4: Розбиття набору. (a) Розбиття 2D квадродерева. (b) Розбиття 3D октодерева

У JPEG2000 метод обрізання потоку кодових блоків зазвичай є методом оптимального співвідношення швидкості та спотворення за Лагранжем, оптимізацією швидкості та спотворення після стиснення (PCRD) [15]. Оптимізація PCRD виконується одночасно для всіх блоків коду зображення, створюючи оптимальну точку обрізання для кожного блоку коду. Обрізані блоки коду потім об'єднуються разом, утворюючи один бітовий потік. Оптимізація

PCRD, по суті, розподіляє загальну швидкість зображення просторово між блоками коду оптимальним для швидкості та спотворення способом, таким чином, що блоки коду з вищою енергією, які, як правило, сильніше впливають на міру спотворення, отримують більшу швидкість. Крім того, обрізані потоки бітів кодових блоків чергуються в оптимальному порядку таким чином, що кінцевий потік бітів близький до оптимального за швидкістю спотворення в багатьох точках обрізання. Як описано в Частині 1 стандарту JPEG2000, по суті, є кодером 2D-зображень. Однак для 3D-зображень розширення кодування, доступні в Частині 2 стандарту, можуть здійснювати перетворення пакетів, показане на рис. 2(a), а оптимізацію PCRD можна застосовувати до всіх трьох вимірів; ця стратегія для 3D-зображень отримала назву "багатокомпонентний JPEG2000". Зазначимо, що JPEG2000 з істинно 3D-кодуванням, що складається з арифметичного кодування 3D-блоків коду, як у [16], розробляється як JPEG2000 Part 10 (JP3D), розширення основного стандарту JPEG2000; однак використання багатокомпонентного JPEG2000 наразі залишається поширеним для 3D-зображень.

На рис. 2.5 та 2.6 показано типову продуктивність кодування для деяких відомих 2D та 3D вейвлет-кодерів зображень, розглянутих вище. Для 2D-зображень спотворення зазвичай вимірюється як пікове відношення сигнал/шум (PSNR), яке визначається як

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{255^2}{D}, \quad (2.1)$$

де D – середньоквадратична помилка (MSE) між вихідним зображенням та реконструйованим зображенням; для 3D-зображень зазвичай використовується співвідношення сигнал/шум (SNR), де 2552 у (1) замінюється дисперсією набору даних. Як PSNR, так і SNR мають одиниці вимірювання в децибелах (дБ). Бітрейт

вимірюється в бітах на піксель (bpp) для 2D-зображень та зазвичай в бітах на воксель (brv) для 3D-зображень, еквівалентно в бітах на піксель на смугу (bprpb) для гіперспектральних зображень, що складаються з кількох спектральних смуг. На рис. 2.5 та 2.6 можна бачити, що JPEG2000 пропонує продуктивність, дещо вищу, ніж інші методи як для 2D, так і для 3D-кодування.

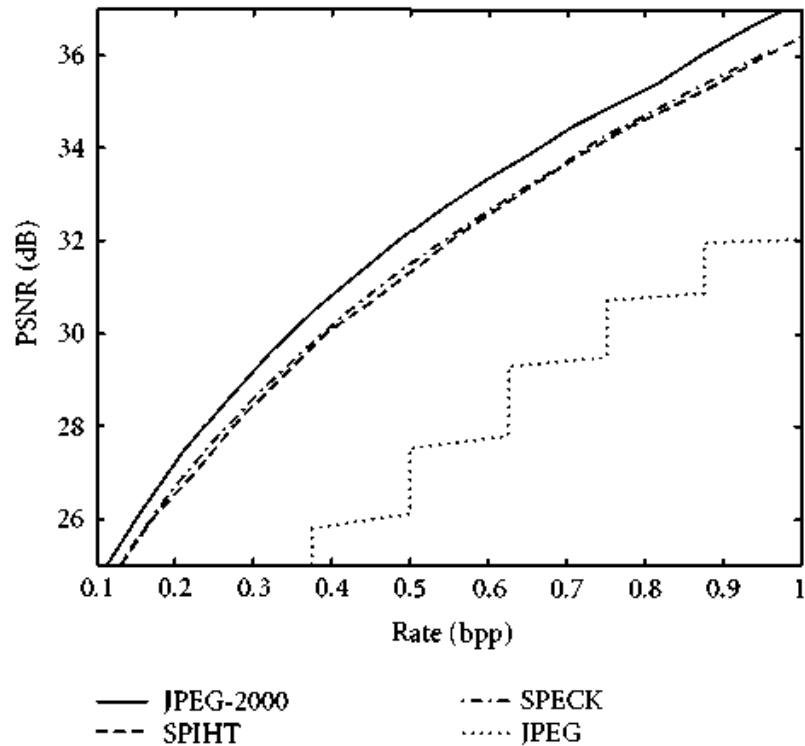


Рис. 2.5: Показники залежності швидкості від спотворень для 2D-зображення, що порівнюються з вейвлет-кодувальниками JPEG2000, SPIHT та SPECK, а також з оригінальним стандартом JPEG [17].

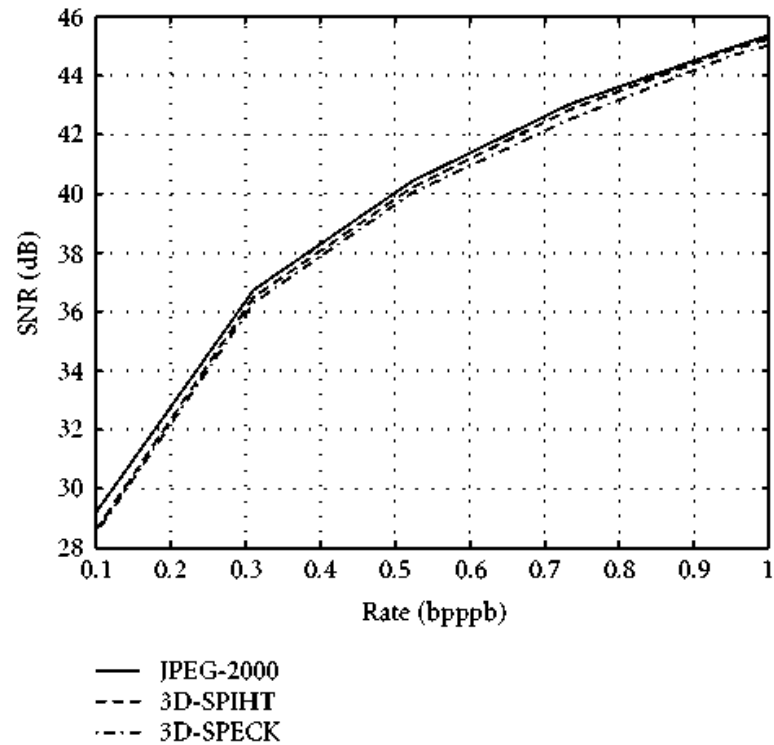
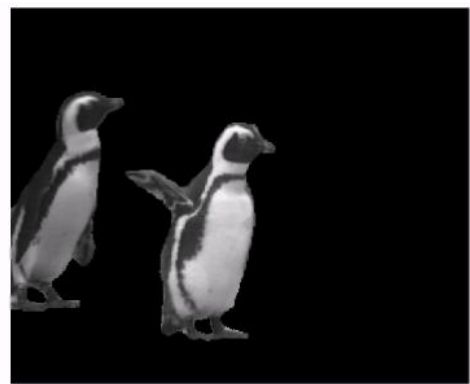


Рис. 2.6: Залежність швидкості від спотворення для 3D-зображення, гіперспектрального зображення AVIRIS просторового розміру 512×512 з 224 спектральними смугами. Використовується вейвлет-пакетне перетворення з 9-7 вейвлет-фільтрами та 4 рівнями як просторово, так і спектрально. 3D-SPIHT використовує асиметричні нульові дерева, а для JPEG2000 використовується багатокomпонентний міжсмуговий розподіл швидкості JPEG2000.



(a)



(b)

Рис. 2.7: (a) Вихідна сцена. (b) Об'єкти зображення довільної форми, що кодуються за допомогою адаптивного до форми кодування.

Робота «Адаптація нульових дерев з використанням представлень знакових двійкових цифр для 3D-кодування зображень» Е. Крістофа та ін. представляє 3D-кодер на основі нульових дерев, що працює на гіперспектральних зображеннях, розкладених за допомогою пакетного перетворення з рис. 2.2(а). Алгоритм 3D-EZW модифіковано таким чином, щоб усунути прохід уточнення. Усунення підлеглого проходу, який зазвичай передбачає відсортований список, спрощує реалізацію алгоритму, але знижує ефективність кодування. Однак використання представлення знакових двійкових цифр замість традиційної форми знакової величини для вейвлет-коефіцієнтів збільшує частку нульових бітів у бітових площинах збільшуючи ефективність кодування до рівня вихідної реалізації 3D-EZW. Також у статті «JPEG2000-сумісне безвтратне кодування даних з плаваючою комою» Б. Е. Усевіча пропонуються розширення стандарту JPEG2000 для забезпечення безвтратного кодування даних з плаваючою комою, яке виникає в багатьох наукових застосуваннях.

В процедуру кодування бітів JPEG2000 внесено кілька модифікацій для врахування розширеного цілочисельного представлення чисел з плаваючою комою.

2.3.3. Кодування зображень довільної форми

У традиційній обробці зображень, як і у випадку попереднього обговорення, неявно передбачається, що зображення має форму прямокутника (у 2D) або прямокутного об'єму (у 3D). Більшість літератури з кодування зображень стосується кодування лише зображень прямокутної форми.

Однак зображення довільної, непрямокутної форми стали важливими в низці галузей, включаючи мультимедійні комунікації (наприклад, відеоб'єкти довільної форми, що охоплюються стандартом відеокодування MPEG-4 [18] та іншими підходами [42]), геопросторові зображення (наприклад, океанографічні набори даних про температуру, мультиспектральні/гіперспектральні

зображення) та біомедичні застосування. Кодування зображень з адаптацією до форми для цих застосувань зазвичай досягається шляхом адаптації існуючих кодерів зображень, розроблених для прямокутних зображень, до задачі кодування з адаптацією до форми.

У загальному сенсі, кодування з адаптацією до форми можна розглядати як задачу кодування «об'єкта» зображення довільної форми, що знаходиться в типово прямокутній «сцені», як показано на рис. 2.7. Мета полягає в тому, щоб кодувати об'єкт зображення, не витрачаючи жодних бітів на частини сцени, що не є об'єктами. Зазвичай, «маску» об'єкта потрібно передавати декодеру окремо, щоб відокремити об'єкт від необ'єктних областей сцени. Зосередимося лише на кодуванні об'єктів, припускаючи, що будь-який з кількох алгоритмів дворівневого кодування зображень без втрат використовується для забезпечення ефективного представлення цієї двійкової маски об'єкта як додаткової інформації для центрального завдання адаптивного до форми кодування зображень. Аналогічно, сегментація об'єктів зображення від необ'єктного фону вважається специфічною для застосування проблемою поза межами задачі адаптивного до форми кодування.

Як обговорювалося вище, типові кодери на основі вейвлетів мають загальну конструкцію, побудовану на трьох основних компонентах: DWT, кодуванні на основі карти значущості та квантуванні послідовного наближення у формі кодування на бітовій площині. Кожен з цих складових процесів легко адаптується до форми для кодування об'єкта зображення довільної форми. Зазвичай використовується адаптивне до форми DWT (SA-DWT) таким чином, що лише пікселі зображення, що лежать всередині об'єкта, перетворюються на вейвлет-коефіцієнти. Потрапивши в область вейвлетів, усі області, що відповідають необ'єктним областям на вихідному зображенні, назавжди вважаються «незначними» та відіграють ту саму роль, що й справжні незначущі коефіцієнти в кодуванні карти значущості. Хоча більшість кодерів, що

адаптуються до форми, базуються на цій загальній ідеї, ряд підходів використовують різні модифікації кодування карти значущості, такі як явне відкидання наборів, що складаються лише з необ'єктних областей, для підвищення продуктивності.

В роботі «Витрати та переваги об'єктно-орієнтованого кодування зображень з адаптивним до форми вейвлет-перетворенням» розглядаються джерела неефективності, а також джерела підвищення продуктивності, що виникають в результаті застосування адаптивного до форми кодування. Спостерігається, що неефективність виникає як через знижені можливості SA-DWT щодо ущільнення енергії (через меншу кількість даних для обробки DWT), так і через взаємодію кодування карти значущості з межами об'єктів (наприклад, у адаптивному до форми SPIHT). З іншого боку, об'єкти зображень, як правило, є більш когерентними та «плавнішими», ніж повнокадрові зображення, оскільки краї меж об'єкт/необ'єкт відсутні в об'єкті, що може призвести до покращення кодування. Експериментальні результати дають уявлення про відносну величину цих втрат і вигащів, які можна очікувати в різних робочих умовах.

2.4. Інтерполяція зображень

Хоча вейвлети, мабуть, відіграли свою найважливішу роль у програмах кодування вихідного коду, таких як кодери зображень та відео, представлення сигналів на основі вейвлетів широко використовуються в інших програмах, таких як фільтрація сигналів, шумозаглушення, виявлення ознак та покращення сигналу. Зокрема, характеристика багатороздільної здатності, властива вейвлет-перетворенням, робить їх природним вибором для завдання інтерполяції зображень — збільшення або покращення роздільної здатності зображення з метою зниження втрати різкості зображення. Філософія, що лежить в основі інтерполяції зображень на основі вейвлетів, проілюстрована в 1D на рис. 2.8. По

суті, високочастотна підсмуга синтезується процесом прогнозування з заданого сигналу низької роздільної здатності, який сам по собі розглядається як низькочастотна підсмуга. Обидві підсмуги потім проходять один етап синтезу DWT, що призводить до отримання сигналу високої роздільної здатності, збільшеного в 2 рази порівняно з вхідним сигналом.



Рис. 2.8: Інтерполяція 1D сигналу на основі вейвлетів. Інтерполяцію 2D зображень можна виконати за допомогою аналогічної системи, що застосовується до піддіапазонів стадії синтезу 2D DWT, або шляхом застосування цієї 1D системи роздільним чином до рядків і стовпців зображення незалежно.

Хоча інтерполяція зображень є класичною проблемою в галузі обробки зображень накладають обмеження на неперервність зображення, що призводить до тенденції до створення надмірно згладжених країв. Крім того, ці традиційні інтерполятори включають пікселі вихідного зображення в інтерпольоване вихідне зображення. Проте, фільтри згладжування часто використовуються на практиці для отримання зображень або зменшення роздільної здатності. З іншого боку, включення фільтра синтезу низьких частот на рис. 2.8 можна розглядати як компенсацію фільтра згладжування (який був би фільтром аналізу низьких частот

на неіснуючому етапі аналізу DWT), тоді як предиктор на рис. 2.8 явно додає інформацію про високі частоти, щоб зберегти деталі чітких країв та текстур.

Багато схем інтерполяції на основі вейвлетів базуються на методах, що описані в [12]. У цих алгоритмах 1D RDWT використовується для визначення розташування країв у рядку або стовпці зображення шляхом ідентифікації ознак сигналу, які зберігаються в масштабах вейвлетів. Потім смуга високих частот синтезується шляхом «копіювання» ознак сигналу в нову смугу високих частот у місцях розташування ідентифікованих країв. Регулярність країв зберігається шляхом вимірювання спаду регулярності в масштабах у місцях розташування країв та екстраполяції в новостворену підсмугу високих частот. Цю базову стратегію було вдосконалено шляхом проекції на опуклі множини (POCS) для ітеративного уточнення початкової екстрапольованої смуги високих частот. Крім того, були запропоновані альтернативні стратегії для прогнозування високих частот у формі лінійної мінімальної середньоквадратичної оцінки, прихованих марківських моделей, прихованих марківських дерев та гаусових моделей сумішей.

В роботі "Покращення роздільної здатності зображення за допомогою параметричних моделей, керованих даними, у вейвлет-просторі" використовується стратегія POCS, що складається з обмеження спостереження (аналіз DWT, застосований до виходу інтерполятора високої роздільної здатності, повинен відповідати початковому входу низької роздільної здатності), а також кількох додаткових обмежень на особливості різкого сигналу високих частот. Зокрема, окремі обмеження формулюються для країв, контурів та текстурних особливостей.

2.5 Висновки до розділу 2

Розглянуто методи кодування цифрових зображень на основі вейвлет-перетворення, використання вейвлетів в представленні сигналів та зображень. Проаналізовано багатовимірні вейвлет-перетворення, процедури кодування, методи кодування зображень довільної форми, методи інтерполяції зображень.

Встановлено, що існує велика кількість методів кодування зображень на основі використання різних типів вейвлетів, послідовностей операцій кодування, покращення якості зображень. Однак практично відсутні результати порівняття результатів кодування тестових зображень на основі використання різних типів вейвлетів та параметрів кодування.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Основи проєктованого методу

Принцип вейвлет-стиснення можна зрозуміти як «розумне обнулення дрібних деталей» у спеціальному представленні зображення. Основна суть методу – замість пікселів застосовуються для зберігання, передачі, реконструкції вейвлет-коефіцієнти.

Звичайне зображення – це матриця яскравостей $f(x,y)$. Вейвлет-стиснення працює не напряду з пікселями, а з їхнім вейвлет-перетворенням (DWT).

Суть методу наступна:

- застосовуємо 2D-вейвлет-перетворення - зображення розкладається на коефіцієнти різних масштабів і орієнтацій;
- багато коефіцієнтів виявляються дуже малими і їх можна обнулити (прибрати), майже не пошкоджуючи вигляд зображення;
- зберігаємо (або точніше кодуємо) тільки важливі коефіцієнти і отримуємо менше даних.

1D-вейвлет: фільтр низьких і високих частот.

У 1D (для сигналу, наприклад рядка пікселів) використовується два фільтри: низькочастотний h – дає “грубу” версію; високочастотний g – виділяє “деталі” (краї, різкі зміни).

Пропускаємо сигнал через обидва фільтри і проріджуємо (downsampling) у 2 рази. Низькі частоти (approximation):

$$a[k] = \sum_n f[n] h[2k - n]$$

Високі частоти (detail):

$$d[k] = \sum_n f[n] g[2k - n]$$

Це перший рівень. Потім можна ще раз застосувати ту ж операцію до коефіцієнтів $a[k]$ – отримуємо багаторівневе (multiresolution) представлення: великий масштаб, середній, дрібний.

2D-вейвлет для зображень.

Для зображень DWT робиться послідовно по рядках і стовпцях: спочатку 1D-перетворення для кожного рядка. Потім – для кожного стовпця (окремо для частин низьких і високих частот). Результат одного рівня – 4 підзображення (саббенди):

- LL (Low–Low) – низькі частоти по рядках і стовпцях – “груба” версія зображення;
- LH (Low–High) – вертикальні деталі;
- HL (High–Low) – горизонтальні деталі;
- HH (High–High) – діагональні/дрібні деталі.

Потім LL можна знову розкласти тим самим способом – отримуємо LL2, LH2, HL2, HH2 і т.д. Це дає пірамідну структуру: велике грубе зображення + все тонші деталізації.

Ключем до стиснення є квантування / порогування коефіцієнтів. Після DWT ми отримаємо значну кількість коефіцієнтів. Припускається, що у LL зосереджена основна енергія (глобальна структура), у LH, HL, HH дуже багато малих коефіцієнтів (дрібні деталі, шум).

Тому необхідно провести порогування (thresholding). Для цього вводимо поріг T . Наприклад: якщо $|c| < T$ – робимо $c=0$; якщо $|c| \geq T$ – залишаємо без змін.

Можливим є hard-thresholding: $c'=0$, якщо $|c|<T$, і $c'=c$ інакше; та soft-thresholding: $c' = \text{sign}(c) \max(|c| - T, 0)$.

Це дає розріджене представлення: багато нулів.

Ще одним етапом є квантування:

$$c' = \text{round} \left(\frac{c}{\Delta} \right)$$

де Δ – крок квантування (може бути різний для різних підсмуг і рівнів).

Для дрібних деталей (високі частоти) можна брати більший $\Delta \rightarrow$ сильніше стиснення, більше втрат.

Для грубої структури (LL) – менший Δ , щоб берегти якість.

Результат: багато нульових і невеликих цілочисельних коефіцієнтів, що є ідеальним для ентропійного кодування.

Потім проводиться ентропійне кодування по схемі, як у JPEG/PNG:

- беремо масив квантованих вейвлет-коефіцієнтів (LL, LH, HL, HH для всіх рівнів);

- подаємо на ентропійний кодер: Huffman, arithmetic coding, EBCOT (у JPEG2000) і т.п.

- використовуємо структуру підсмуг і рівнів, щоб кодувати “важливі” коефіцієнти (прогресивне кодування).

Декодування проводиться у зворотному порядку. Розпаковуємо ентропійний код та отримуємо квантовані коефіцієнти. Деквантуємо (якщо потрібно): множимо на Δ . Застосовуємо зворотній DWT (inverse DWT):

- відновлюємо з LL, LH, HL, HH набір блоків,
- потім з LL2, ... з останнього рівня до повного розміру.

Отримуємо наближене зображення $f_{\sim}(x,y)$.

Якщо поріг/кроки квантування були малі - зображення виглядає майже як оригінал (велика якість, менше стиснення). Якщо великі - сильніше стиснення, більше втрат (але часто все ще прийнятно для ока).

Якщо підсумувати вищесказане, то вейвлет-перетворення розкладає зображення на “шари масштабу”: велика форма, середні деталі, дрібні деталі.

Для великих форм (LL) ми зберігаємо коефіцієнти достатньо точно. Для дрібних деталей (LH, HL, HH на високих рівнях) грубо обнуляємо / грубо квантуємо. Потім стискаємо ці коефіцієнти як звичайні дані (ентропійне кодування). Око людини набагато менш чутливе до точності дрібних деталей, тому зображення часто виглядає майже так само, хоча даних стало в рази менше.

Описані етапи було реалізовано у вигляді коду програми для Matlab. Текст програми наведено в Додатку А. Розглянемо його детально.

3.2 Експериментальна верифікація розробленого методу

На рис. 3.1 наведено вигляд вікна програми після запуску. В лівій стороні вікна розгорнута вкладка «Вейвлет» та показано п'ять можливих для вибору вейвлетів.

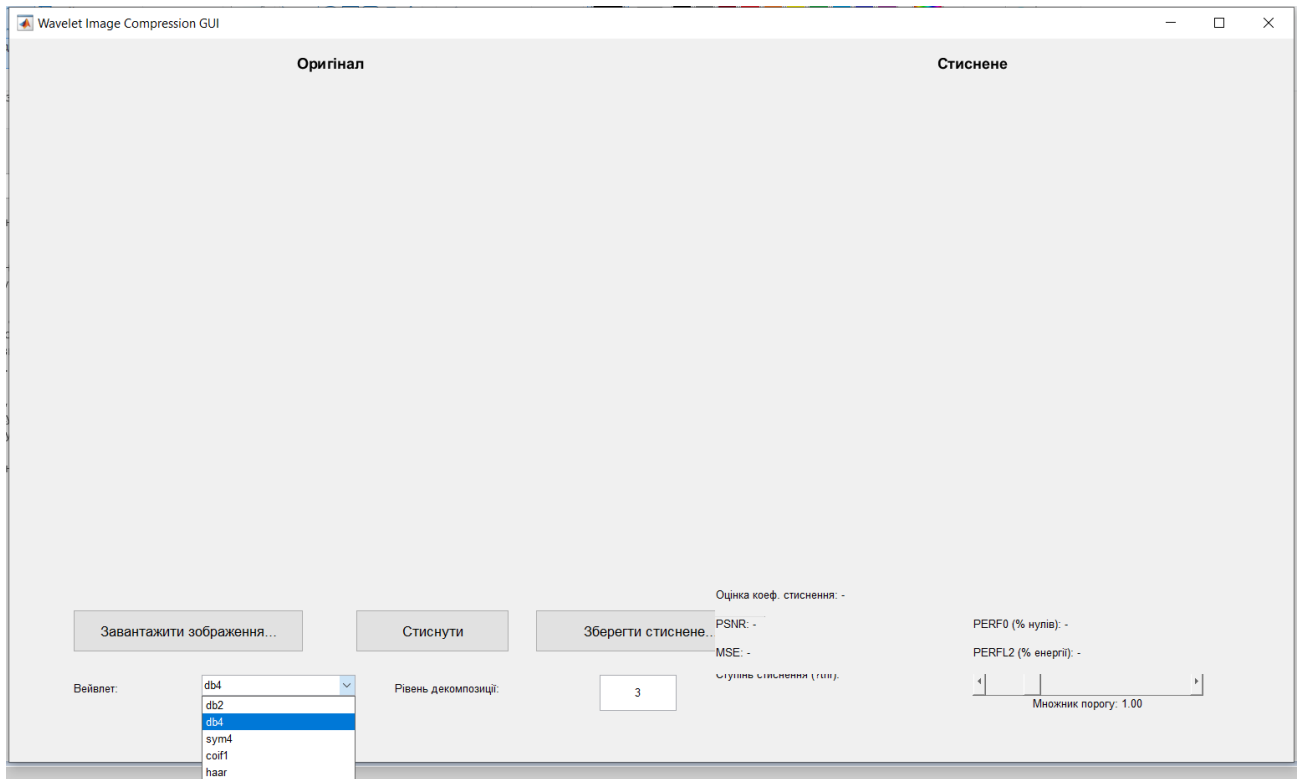


Рис. 3.1. Вигляд вікна розробленої програми

На рис. 3.2 показано це ж вікно із завантаженим зображенням, яке буде підлягати стисненню. Після вибору типу вейвлета, рівня декомпозиції та ступеня стиснення, після натиснення на кнопку «Стиснути» в правій частині вікна програми з'явиться стиснуте зображення, яке можна зберегти. Також будуть відображатись коефіцієнти стиснення, а над самим стисненим зображенням буде додатково відображатись значення PSNR. Це показано на рис. 3.3. та 3.4.

В таблиці 3.1 зведено результати опрацювання одного і того ж зображення розробленим методом із різними заданими параметрами стиснення та типом використаного вейвлета.

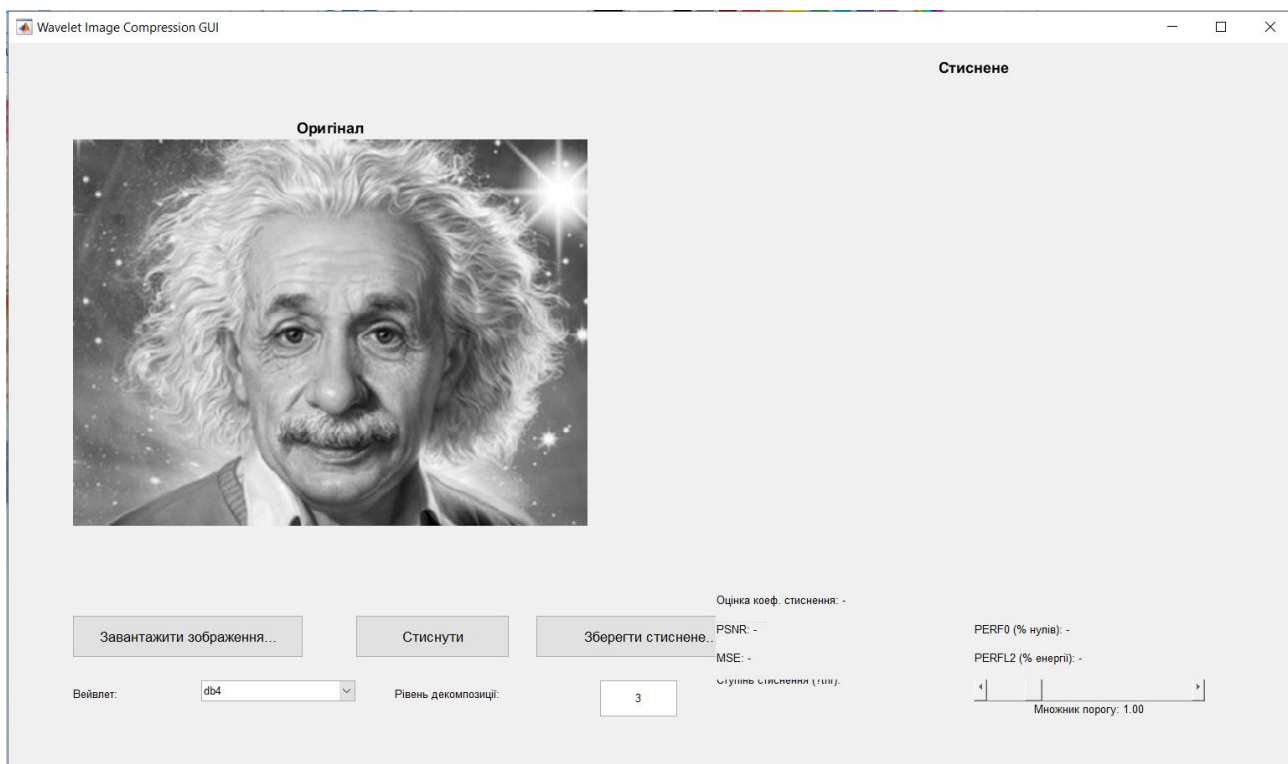


Рис. 3.3. Вікно програми із завантаженим зображенням, яке буде підлягати
СТИСНЕННЮ

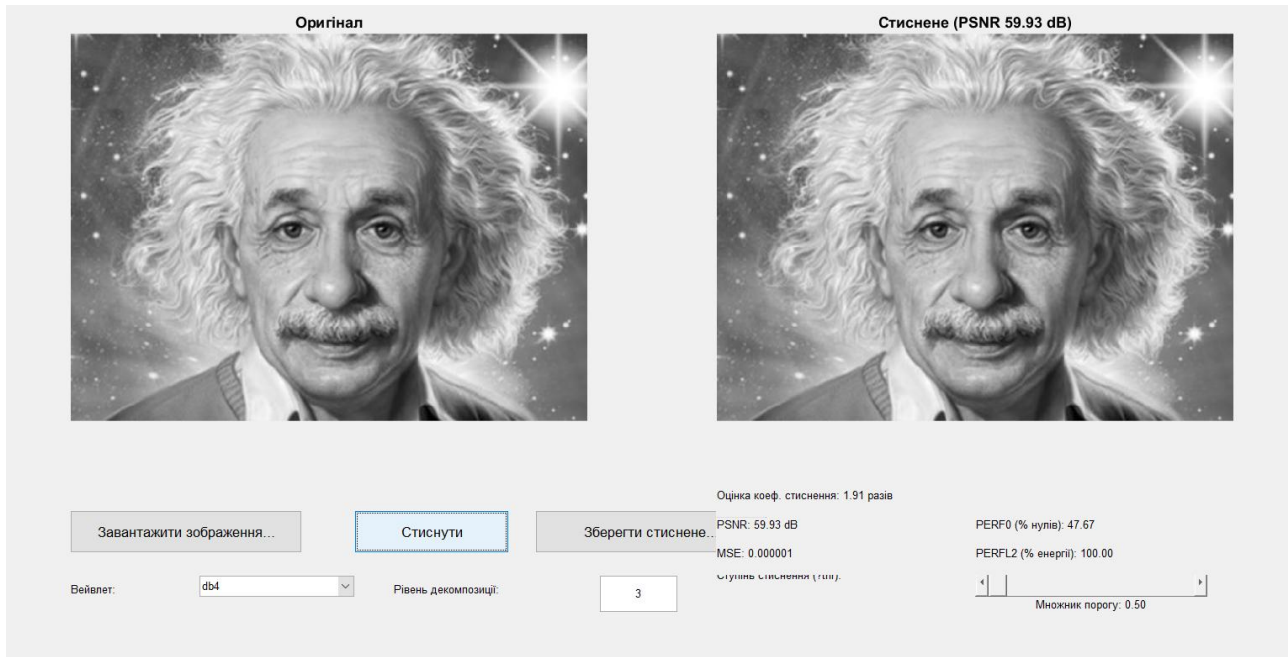


Рис. 3.3. Приклад результату роботи програми із мінімальним стисненням

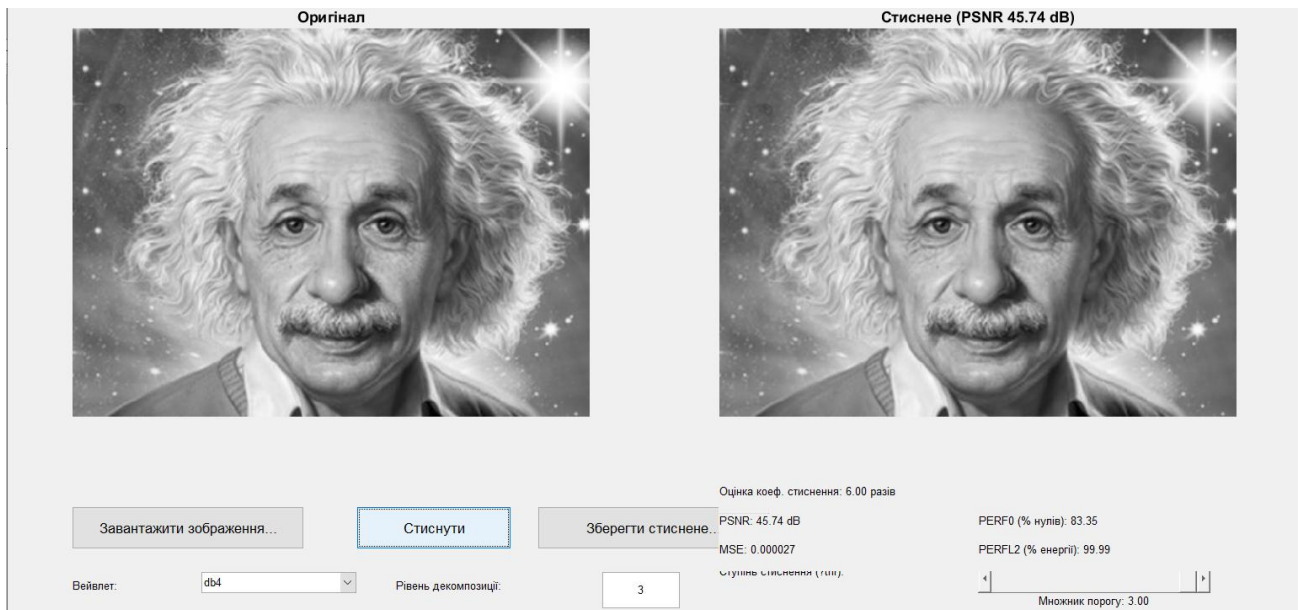


Рис. 3.4. Приклад результату роботи програми із максимальним стисненням

Таблиця 3.1

Результати опрацювання тестового зображення розробленим методом із різними заданими параметрами стиснення та типом використаного вейвлета.

Тип вейвлета	Стиснення	PSNR, Дб (пікове відношення сигнал/шум)	MSE середньоквадратична помилка між оригінальним і відновленим (стисненим) зображенням
<i>Параметри стиснення при значенні множника порога стиснення 0,5</i>			
db2 (Добеші 2 порядку)	1,63	60,46	0,000001
db4 (Добеші 4 порядку)	1,91	59,93	0,000001
sym4 (Симлет 4 порядку)	1,88	59,95	0,000001
coif4 (Койфлета 4 порядку)	1,67	60,42	0,000001
haar (Хаара)	1,41	61,93	0,000001
<i>Параметри стиснення при значенні множника порога стиснення 3,0</i>			
db2 (Добеші 2 порядку)	4,73	44,95	0,000032
db4 (Добеші 4 порядку)	6	45,74	0,000027
sym4 (Симлет 4 порядку)	6,03	45,7	0,000027
coif4 (Койфлета 4 порядку)	4,83	45,05	0,000031
haar (Хаара)	3,25	44,84	0,000033

Відповідно до табл. 3.1 можна стверджувати, що при мінімальному значенні множника порога стиснення найкращий результат стиснення вийшов при засосуванні вейвлета Добеші 4-го порядку (x1,91), а найгірший результат отримано при застосуванні вейвлета Хаара (x1,41). Середньоквадратична помилка між оригінальним і відновленим (стисненим) зображенням залишалась незмінною для усіх типів використаних вейвлетів.

Стосовно ж показника PSNR то ситуація наступна. Чим більший PSNR тим краща якість стиснення і менша різниця між оригіналом і стисненим зображенням. Типові значення є наступні:

- < 25 dB – помітні артефакти, погана якість;
- 25–30 dB – помітна деградація, але ще терпимо;
- 30–35 dB – нормальна/прийнятна якість;
- 35–40 dB – хороша якість;
- 40 dB – дуже хороша, різницю важко помітити на око.

У нашому випадку значення PSNR більше 40 дБ для усіх типів вейвлетів.

Якщо значення множника порога стиснення максимальне (3,0), то отримано для вейвлета Симлет 4-го порядку (x6,03), хоча результат практично такий же як і для вейвлета Добеші 4-го порядку (x6,0), а найгірший результат отримано при застосуванні вейвлета Хаара (x3,25). Стосовно ж PSNR, то результат також найкращий виявився для використання вейвлета Добеші 4-го порядку.

Стосовно ж середньоквадратичної помилки, то при максимальних параметрах стиснення вона збільшилась для усіх типів вейвлетів, але мінімальною все ще залишилась для вейвлетів Симплет та Добеші 4-го порядку.

Візуально жодної різниці між вихідним та стиснутим навіть при максимальних параметрах зображенням не виявлено. Таким чином можна

збільшити стиснення, збільшивши значення множника порога стиснення, поки PSNR не досягне значення 35 дБ для хорошої якості стиснення.

Підсумовуючи отримані результати встановлено, що застосування вейвлет-кодування для СЦЗ дає можливість отримувати великі степені стиснення при мінімальних чи невідчутних візуально спотвореннях відновлених зображень, а найкращим серед розглянутих типів вейвлетів виявився вейвлет Добеші 4-го порядку.

3.3 Висновки до розділу 3

Розроблено послідовність дій для СЦЗ на основі вейвлет-кодування. Цю послідовність реалізовано у вигляді програми для Matlab із графічним інтерфейсом, з допомогою якого задаються параметри стиснення та візуалізуються результати стиснення.

В розробленому методі реалізовано вейвлет-перетворення, при якому зображення розкладається на коефіцієнти різних масштабів і орієнтацій; багато коефіцієнтів виявляються дуже малими і їх можна обнулити (прибрати), майже не пошкоджуючи вигляд зображення; виконується кодування тільки важливих коефіцієнтів.

Проведено опрацювання тестового зображення розробленим методом із різними заданими параметрами стиснення та типом використаного вейвлета. Встановлено, що при мінімальному значенні множника порога стиснення найкращий результат стиснення вийшов при засосуванні вейвлета Добеші 4-го порядку (x1,91), а найгірший результат отримано при застосуванні вейвлета Хаара (x1,41). Середньоквадратична помилка між оригінальним і відновленим (стисненим) зображенням залишалась незмінною для усіх типів використаних вейвлетів.

Якщо значення множника порога стиснення максимальне (3,0), то найкращий результат отримано для вейвлета Симлет 4-го порядку (x6,03), хоча результат практично такий же як і для вейвлета Добеші 4-го порядку (x6,0), а найгірший результат отримано при застосуванні вейвлета Хаара (x3,25). Стосовно ж PSNR, то результат також найкращий виявився для використання вейвлета Добеші 4-го порядку. Стосовно ж середньоквадратичної помилки, то при максимальних параметрах стиснення вона збільшилась для усіх типів вейвлетів, але мінімальною все ще залишилась для вейвлетів Симплет та Добеші 4-го порядку. Візуально жодної різниці між вихідним та стиснутим навіть при максимальних параметрах зображенням не виявлено.

Таким чином встановлено, що застосування вейвлет-кодування для СЦЗ дає можливість отримувати великі ступені стиснення при мінімальних чи невідчутних візуально спотвореннях відновлених зображень, а найкращим серед розглянутих типів вейвлетів виявився вейвлет Добеші 4-го порядку.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

Вірно спроектоване та раціонально влаштоване освітлення виробничих приміщень справляє позитивний психофізіологічний вплив на працюючих, підвищує ефективність та безпеку праці, знижує втому та травматизм, забезпечує високу працездатність.

Зір у всій системі органів відчуттів людини посідає чільне місце. Відомо, що на органи зору припадає 90% всієї інформації, котру отримує людина. Відчуття зору відбувається під впливом видимого випромінювання (світла), котре є електромагнітним випромінюванням з довжиною хвилі 0,38...0,76 мкм. Чутливість зору максимальна до електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі 0,555 мкм (жовто-зелений колір) та зменшується до границь видного спектру.

Класифікація освітлення

При освітленні виробничих приміщень використовують:

- природне освітлення, котре створюється прямими сонячними променями та розсіяним світлом небосхилу і яке змінюється залежно від географічної широти, пори року, доби, ступеня хмарності та прозорості атмосфери;
- штучне освітлення, створюване електричними джерелами світла;
- сумісне освітлення, при котрому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним.

Природне освітлення поділяється на бічне (одно- або двостороннє), здійснюване через світлові отвори в зовнішніх стінах; верхнє, що здійснюється через аераційні та захисні ліхтарі, отвори в дахах та перекриттях; комбіноване поєднання верхнього та бічного освітлення.

Штучне освітлення за конструктивним виконанням поділяється на два види - загальне та комбіноване. Система загального освітлення використовується в приміщеннях, де по всій площі виконуються однотипні роботи. Розрізняють загальне рівномірне освітлення, при котрому світловий потік розподіляється рівномірно по всій площі приміщення без урахування розташування робочих місць і загальне локалізоване освітлення (з врахуванням розташування робочих місць).

При виконанні точних зорових робіт (слюсарні, токарні, фрезерні, контрольні тощо) в місцях, де обладнання створює глибокі, різкі тіні або робочі поверхні розташовані вертикально, поряд з загальним освітленням застосовується місцеве освітлення. Сукупність місцевого та загального освітлення називається комбінованим. Застосування лише місцевого освітлення не допускається з огляду на небезпеку виробничого травматизму.

За функціональним призначенням штучне освітлення поділяється на робоче, аварійне і спеціальне, котре в свою чергу класифікується як охоронне, чергове, евакуаційне, бактерицидне, еритемне тощо.

Робоче освітлення призначене для забезпечення виробничого процесу, проходу людей, руху транспорту та є обов'язковим для всіх виробничих приміщень.

Аварійне освітлення влаштовується для продовження роботи у випадках, коли раптове відключення робочого освітлення та пов'язане з цим порушення нормального обслуговування обладнання може викликати вибух, пожежу, отруєння людей, порушення технологічного процесу тощо. Мінімальна освітленість робочих поверхонь при аварійному освітленні повинна складати 5% від нормованої освітленості робочого освітлення, але не менше 2 лк.

Евакуаційне освітлення призначене для забезпечення евакуації людей з виробничого приміщення при аваріях та вимкненні робочого освітлення і влаштовується в місцях, небезпечних для проходу з виробничих приміщень, в

котрих працює більше 50 чол. Мінімальна освітленість на підлозі основних проходів та на сходах при евакуаційному освітленні повинна бути не менше 0,5лк, а на відкритих майданчиках - не менше 0,2 лк.

Охоронне освітлення влаштовується вздовж границь території, котра охороняється спеціальним персоналом. Найменша освітленість у нічний час - 0,5лк. Сигнальне освітлення застосовується для фіксації границь небезпечних зон, вказує на наявність небезпеки, або безпечний шлях евакуації.

До виробничого освітлення можна віднести бактерицидне та еритемне освітлення. Бактерицидне освітлення створюється для знезараження повітря, питної води, продуктів харчування. Найбільшу бактерицидну здатність мають ультрафіолетові промені з довжиною хвилі 0,254...0,257мкм. Еритемне опромінювання влаштовується у виробничих приміщеннях, де недостатньо сонячного світла. Максимальний еритемний вплив справляють електромагнітні промені з довжиною хвилі 0,297мкм.

Гігієна праці вимагає в першу чергу максимального використання природного освітлення, оскільки денне світло краще сприймається органами зору.

Правильна організація освітлення передбачає не лише дотримання норм освітленості, котрі регламентують мінімальну освітленість для кожного виду робіт, але й дотримання гігієнічних вимог до якості освітлення, таких як рівномірність освітлення робочої поверхні, обмеження надмірної яскравості, блиску, осліплюючої дії, різких тіней та контрасту.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Дії персоналу підприємства з виготовлення телекомунікаційних систем при виникненні надзвичайних ситуацій [2]

1. Загальні положення

Типова Інструкція розроблена згідно з Кодексом цивільного захисту та інших нормативно-правових документів.

Усі працівники підприємства, не залежно від займаних посад, повинні знати і суворо виконувати вимоги Типової Інструкції щодо дій персоналу при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій природного або техногенного характеру. За невиконання вимог Інструкції персонал підприємства може бути притягнутий до адміністративної відповідальності.

2. Характеристика можливої обстановки в районі підприємства при виникненні надзвичайної ситуації

У розділі перелічуються можливі джерела потенційної небезпеки на території самого підприємства або поблизу від нього, додається характеристика можливої обстановки при виникненні надзвичайних ситуацій, яка пов'язана з руйнуванням або іншим негативним впливом.

Відомості про джерела і характер їх дії на підприємство надають районні державні адміністрації, міські ради.

3. Порядок оповіщення адміністрації та персоналу про загрозу виникнення надзвичайних ситуацій

Оповіщення адміністрації, робітників та службовців підприємства щодо надзвичайних ситуацій проводиться по завчасно розробленій схемі.

Адміністрація у неробочий час оповіщається по телефону (вказується відповідальний виконавець). У залежності від обстановки, оповіщається і решта персоналу.

У робочий час персонал підприємства оповіщається про надзвичайну ситуацію (вказується яким способом).

При отриманні відповідної інформації вмикають сирени, інші звукові та світлові засоби, що буде означати подання попереджувального сигналу "Увага всім", після чого негайно приводяться у готовність гучномовці, радіотрансляційні та телевізійні приймачі для прослуховування початкового повідомлення.

Кожний працівник підприємства повинен знати сигнали оповіщення цивільного захисту та вміти правильно діяти в умовах загрози та виникнення надзвичайних ситуацій.

4. Порядок укриття персоналу у захисних спорудах цивільного захисту

На випадок виникнення надзвичайної ситуації, яка пов'язана із загрозою або початком забруднення повітря хімічно небезпечною, радіоактивною речовиною всі працівники підприємства підлягають укриттю у захисних спорудах цивільного захисту (вказується адреса, кому належить).

Для термінового укриття працівників у разі забруднення хімічно небезпечною речовиною використовуються власні загерметизовані приміщення (вказується адреса), забезпечується перебування у ньому осіб, без подачі повітря протягом години.

При отриманні інформації щодо радіоактивної небезпеки працівники укриваються (вказується приміщення, адреса), яке забезпечує захист осіб, що переходять від ураження іонізуючим випромінюванням при радіоактивному зараженні.

5. Порядок видачі персоналу засобів індивідуального захисту

Засоби індивідуального захисту (вказуються які) видаються після отримання відповідного розпорядження або за рішенням керівника підприємства (вказується місце видачі).

Працівники, які отримали такі засоби, повинні перевірити їх стан, провести підбір та мати постійно при собі або на робочому місці.

Протигази переводяться у бойовий стан за командою або самостійно, при наявності небезпеки забруднення повітря.

6. Порядок виділення автомобільного транспорту для проведення евакуаційних заходів

При проведенні негайної евакуації персоналу з небезпечних зон залучається увесь наявний службовий, а також особистий транспорт працівників підприємства,

які повинні надавати його у розпорядження адміністрації для негайної евакуації із небезпечної зони працівників та відвідувачів підприємства (вказується вид та тип транспортних засобів, місця посадки на транспорт та маршрут руху).

7. Вимоги до персоналу щодо додержання протиепідемічних заходів при загрозі розповсюдження особливо небезпечних інфекційних захворювань

Якщо на території підприємства або поблизу його виникла небезпека розповсюдження особливо небезпечних інфекційних захворювань, усі працівники повинні суворо дотримуватись вимог санітарно-епідеміологічної служби щодо проведення термінової профілактики та імунізації, ізоляції і лікування виявлених хворих, дотримуватися режиму, який запобігає розповсюдженню інфекції. При необхідності працівники, які прибули на роботу, повинні проходити санітарну обробку (проводити дезінфекцію або зміну одягу) (вказується місце її проведення), а водії транспортних засобів - здійснювати спеціальну обробку автотранспорту (вказується місце її проведення), а також виконувати інші вимоги та заходи, які перешкоджають розповсюдженню особливо небезпечних інфекційних захворювань.

8. Заходи щодо зберігання матеріальних цінностей у період загрози та виникнення надзвичайних ситуацій

Усі працівники підприємства повинні вжити необхідних заходів щодо зберігання матеріальних цінностей при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій.

У період виконання заходів захисту від надзвичайних ситуацій або при ліквідації їх наслідків необхідно вживати заходи, які направлені на попередження або зменшення можливих збитків підприємству від надзвичайних ситуацій, на забезпечення охорони майна та обладнання.

Відповідальність за організацію охорони покладається на (вказується посада, прізвище).

9. Особливості дій працівників при деяких надзвичайних ситуаціях

При загрозі ураження хімічно небезпечною речовиною оповіщаються усі працівники та відвідувачі, які знаходяться на території підприємства.

Вентиляційні установки та кондиціонери терміново вимикаються, зачиняються вікна, двері, квартирки, приміщення герметизується. Вихід із будівлі й вхід до неї припиняється до особливого розпорядження адміністрації.

Працівникам видаються засоби індивідуального захисту, одночасно приймаються заходи щодо забезпечення відвідувачів ватно-марлевими пов'язками.

Відповідальними призначаються за:

- забезпечення герметизації приміщень (посада, прізвище);
- забезпечення працівників та відвідувачів засобами індивідуального захисту (посада, прізвище).

При виявленні у приміщенні, де укриваються працівники, хімічно небезпечної речовини, працівники повинні вийти (вказати куди) або з дозволу адміністрації залишити зону забруднення. Виходити з неї необхідно тільки у засобах індивідуального захисту і рухатися в напрямку, перпендикулярному напрямку вітру.

При виникненні пожежі на підприємстві всі працівники зобов'язані суворо виконувати вимоги Інструкції з пожежної безпеки, евакуацію проводити згідно з Планом евакуації (вказується показчик напрямку руху).

Відповідальність за дотриманням заходів пожежної безпеки та організацію дій персоналу при загрозі або виникненні пожежі покладається на (посада, прізвище).

При радіоактивному забрудненні території підприємства або при загрозі забруднення всі працівники повинні уважно слідкувати за мовним повідомленням управління з питань надзвичайних ситуацій, яке передається за допомогою радіо і телебачення після попереджувального сигналу "Увага всім", за інформацією інших засобів масової інформації про обстановку в місті, і суворо виконувати рекомендації по захисту від радіоактивного зараження.

Працівник (посада, прізвище) організовує на території підприємства контроль за радіаційною обстановкою за допомогою побутового дозиметру (називається тип приладу) і постійно інформує про результати вимірювань адміністрацію підприємства, управління з питань надзвичайних ситуацій.

При перевищенні гранично допустимих норм опромінення організується облік доз опромінювання. Відповідальний за виконання цього заходу (посада, прізвище).

Скорочується до мінімуму вхід у будівлю та вихід із неї. Контроль за дотриманням режиму поведінки й роботи працівників, який дозволяє максимально понизити наслідки радіоактивного опромінення покладається на (посада, прізвище).

При загрозі або виникненні катастрофічних стихійних лих призначений працівник підприємства за розпорядженням адміністрації повинен зупинити виробництво, виконати необхідні протипожежні заходи, відімкнути від електромережі електрообладнання, підготуватися до евакуації або вивезення у безпечні місця найбільш цінних матеріальних засобів.

Контроль за обстановкою на території підприємства при стихійних лихах і за прийнятті заходи захисту персоналу покладається на (посада, прізвище).

Якщо з'явилися постраждалі - надається перша медична допомога.

Залучаються санітарні дружини підприємства або санітарні пости, які створені. Приймаються заходи щодо госпіталізації постраждалих до спеціалізованих медичних закладів.

Працівник (посада, прізвище) постійно слідкує за інформацією, яку надає управління з питань надзвичайних ситуацій, про обстановку у місті та доводить її до адміністрації і персоналу підприємства.

При надходженні анонімної інформації про загрозу на території підприємства або поблизу нього терористичного акту, працівник, який прийняв її, повинен терміново доповісти керівнику підприємства й у правоохоронні органи, і діяти згідно з розпорядженнями і рекомендаціями. [1]

4.3 Висновки до розділу 4

В розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано освітлення виробничого приміщення та дії персоналу підприємства при виникненні надзвичайних ситуацій.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз та класифікацію методів СЦЗ, зокрема із втратами та без втрат. Також проаналізовано типові формати стиснення зображень і використовувані методи стиснення.

Встановлено, що немає єдиного універсального підходу щодо методу та процедури СЦЗ. Усі існуючі методи мають як сильні так і слабкі сторони. Однак, перспективним є застосування вейвлет-кодування, яке дає можливість досягнення набагато більших в порівнянні із існуючими методами коефіцієнтів стиснення при достатній якості реконструйованих зображень, незважаючи на обмежену поширеність такого підходу через його новизну та відсутність діючих стандартів.

Розглянуто методи кодування цифрових зображень на основі вейвлет-перетворення, використання вейвлетів в представленні сигналів та зображень. Проаналізовано багатовимірні вейвлет-перетворення, процедури кодування, методи кодування зображень довільної форми, методи інтерполяції зображень.

Встановлено, що існує велика кількість методів кодування зображень на основі використання різних типів вейвлетів, послідовностей операцій кодування, покращення якості зображень. Однак практично відсутні результати порівняття результатів кодування тестових зображень на основі використання різних типів вейвлетів та параметрів кодування.

Розроблено послідовність дій для СЦЗ на основі вейвлет-кодування. Цю послідовність реалізовано у вигляді програми для Matlab із графічним інтерфейсом, з допомогою якого задаються параметри стиснення та візуалізуються результати стиснення.

В розробленому методі реалізовано вейвлет-перетворення, при якому зображення розкладається на коефіцієнти різних масштабів і орієнтацій; багато

коефіцієнтів виявляються дуже малими і їх можна обнулити (прибрати), майже не пошкоджуючи вигляд зображення; виконується кодування тільки важливих коефіцієнтів.

Проведено опрацювання тетсового зображення розробленим методом із різними заданими параметрами стиснення та типом використаного вейвлета. Встановлено, що при мінімальному значенні множника порога стиснення найкращий результат стиснення вийшов при застосуванні вейвлета Добеші 4-го порядку (x1,91), а найгірший результат отримано при застосуванні вейвлета Хаара (x1,41). Середньоквадратична помилка між оригінальним і відновленим (стисненим) зображенням залишалась незмінною для усіх типів використаних вейвлетів.

Якщо значення множника порога стиснення максимальне (3,0), то найкращий результат отримано для вейвлета Симлет 4-го порядку (x6,03), хоча результат практично такий же як і для вейвлета Добеші 4-го порядку (x6,0), а найгірший результат отримано при застосуванні вейвлета Хаара (x3,25). Стосовно ж PSNR, то результат також найкращий виявився для використання вейвлета Добеші 4-го порядку. Стосовно ж середньоквадратичної помилки, то при максимальних параметрах стиснення вона збільшилась для усіх типів вейвлетів, але мінімальною все ще залишилась для вейвлетів Симплет та Добеші 4-го порядку. Візуально жодної різниці між вихідним та стиснутим навіть при максимальних параметрах зображенням не виявлено.

Таким чином встановлено, що застосування вейвлет-кодування для СЦЗ дає можливість отримувати великі ступені стиснення при мінімальних чи невідчутних візуально спотвореннях відновлених зображень, а найкращим серед розглянутих типів вейвлетів виявився вейвлет Добеші 4-го порядку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Zhu Y. та ін. Lossy Infrared Image Compression Based on Wavelet Coefficient Probability Modeling and Run-Length-Enhanced Huffman Coding // Sensors. 2025. Vol. 25, Iss. 8. Art. 2491.
2. Liu J., Zhang L., Wang X. Remote Sensing Image Compression via Wavelet-Guided Local Structure Decoupling and Channel–Spatial State Modeling // Remote Sensing. 2025. Vol. 17, Iss. 14. Art. 2419. DOI: 10.3390/rs17142419.
3. Liu M., Zhou G., Wang H., Zheng Y. Research on image compression technology based on improved SPIHT compression algorithm for power grid transmission images // Journal of Intelligent Systems. 2024. DOI: 10.1515/jisys-2024-0112.
4. Pranitha K., Kavya G. An optimized 9/7 wavelet transform with entropy encoder architecture for image compression // Microprocessors and Microsystems. 2023. Vol. 98. Art. 104821. DOI: 10.1016/j.micpro.2023.104821.
5. Ranjan R., Kumar P. An Efficient Compression of Gray Scale Images Using Wavelet Transform // Wireless Personal Communications. 2022. Vol. 126. P. 3195–3210. DOI: 10.1007/s11277-022-09859-9.
6. Al-Janabi A.K., Al-Musawi H.K., Harbi Y.J. An efficient and Highly Scalable Listless SPIHT Image Compression Framework // Journal of Applied Research and Technology. 2022. Vol. 20, No. 2. DOI: 10.22201/icat.24486736e.2022.20.2.1269.
7. Iliopoulou S., Tsinganos P., Ampeliotis D., Skodras A. Learned Image Compression with Wavelet Preprocessing for Low Bit Rates // IEEE (conference proceedings, IC-DSP 2023). 2023.
8. Shelke K., Sinha S.K., Patel G.S. Development of Wavelet Based Image Compression Approach Using Modified SPIHT Algorithm // Research Square (preprint). 2021/2022 (posted). DOI: 10.21203/rs.3.rs-894142/v1.

9. K. Ramchandran and M. Vetterli, "Best wavelet packet bases in a rate-distortion sense," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 2, no. 2, pp. 160–175, 1993.
10. D. Le Gall and A. Tabatabai, "Sub-band coding of digital images using symmetric short kernel filters and arithmetic coding techniques," in *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '88)*, pp. 761–764, New York, NY, USA, April 1988.
11. J. D. Villasenor, B. Belzer, and J. Liao, "Wavelet filter evaluation for image compression," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 4, no. 8, pp. 1053–1060, 1995.
12. "Information Technology—JPEG 2000 Image Coding System—Part 1: Core Coding System," ISO/IEC 15444-1, 2000.
13. J. M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, no. 12, pp. 3445–3462, 1993.
14. X. Tang, S. Cho, and W. A. Pearlman, "3D set partitioning coding methods in hyperspectral image compression," in *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP '03)*, vol. 2, pp. 239–242, Barcelona, Spain, September 2003.
15. D. S. Taubman and M. W. Marcellin, *JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass, USA, 2002.
16. P. Schelkens, J. Barbarien, and J. Cornelis, "Compression of volumetric medical data based on cube-splitting," in *Applications of Digital Image Processing XXIII*, vol. 4115 of *Proceedings of SPIE*, pp. 91–101, San Diego, Calif, USA, July 2000.
17. W. B. Pennebaker and J. L. Mitchell, *JPEG Still Image Compression Standard*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass, USA, 1993.

18. “Information Technology—Coding of Audio-Visual Objects—Part 2: Visual,” ISO/IEC 14496-2, 1999, MPEG-4 Coding Standard.
19. H.Wang,G.M.Schuster,andA.K.Katsaggelos,“Ratedistortion optimal bit allocation for object-based video coding,” IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 15, no. 9, pp. 1113–1123, 2005
20. М.П. Мотелюк, С.Т. Боїло, І.Ю. Дедів, В.Г. Дозорський. Методи обробки мовних сигналів для безпекових систем. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» – Тернопіль, 7-8 грудня 2022 року. С. 150.
21. Dozorskyi V., Dediv I., Sverstiuk S., Nykytyuk V., Karnaukhov A. The Method of Commands Identification to Voice Control of the Electric Wheelchair. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.233-240. ISSN 1613-0073.
22. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dediv I., Yatskiv V., Palaniza Y. Method, Algorithm and Computer Tool for Synphase Detection of Radio Signals in Telecommunication Networks with Noises. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.173-180. ISSN 1613-0073.
23. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 111, no 3, 2023. pp. 48–57.
24. Основи технології радіоелектронних апаратів : навчальний посібник / Р. А. Ткачук, В. Г. Дозорський, Л. Є. Дедів, І. Ю. Дедів. - Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. - 336 с.

25. Dozorskyi V., Dediv L., Kovalyk S., Dozorska O., Dediv I. (2024) Design of the endoskeleton of a biocontrolled hand prosthesis. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 115, no 3, pp. 100-111.

26. Дедів І. Ю. Метод автентифікації користувачів за параметрами голосових сигналів / І. Ю. Дедів, М. М. Кузик // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. Т.: ТНТУ, 2017. Том 2. С. 47.

27. Методичні рекомендації до виконання, оформлення та захисту кваліфікаційних робіт для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»/уклад.: Дунець В.Л., Хвостівська Л.В., Дедів І.Ю. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 56 с.

28. Математичне та комп'ютерне моделювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу / Л.Є. Дедів, А.С. Сверстюк, І.Ю. Дедів, М.О. Хвостівський, В.Г. Дозорський, Є.Б. Яворська. – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. – 120 с. ISBN 978-617-574-218-1.

29. Математичне моделювання, методи та програмне забезпечення опрацювання дихальних шумів у комп'ютерних аускультативних діагностичних системах / І.Ю. Дедів, А.С. Сверстюк, Л.Є. Дедів, В.Г. Дозорський, М.О. Хвостівський. – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. – 126 с. ISBN 978-617-574-219-8.

30. Методичні рекомендації з оформлення кваліфікаційних робіт бакалавра за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» уклад.: Дунець В.Л., Хвостівський М.О. Дедів І.Ю. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021 р. – 72с.

31. Дозорський В.Г., Дозорська О.Ф., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Паньків І.М., Яворська Є.Б. Структура системи відбору біосигналів для задачі відновлення комунікативної функції людини. Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – Хмельницький: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету". – 2019. - №2(271) – с. 183-186.

32. Dozorska O., Yavorska E., Dozorskyi V., Pankiv I., Dediv L. Dediv I. The Method of Indirect Restoration of Human Communicative Function. Proc. of the 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), CADSM'2019, (pp. 19–22). Polyana-Svalyava (Zakarpattya), UKRAINE 978-1-7281-0053-1/19.

33. Дозорська О.Ф., Яворська Є.Б., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю. Метод виявлення ознак основного тону в структурі електроміографічних сигналів для задачі компенсації порушеної комунікативної функції людини», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (81), с. 56-64. doi: 10.20535/RADAP.2020.81.56-64.

34. Khvostivska L., Khvostivskyu M., Dunetc V., Dediv I.. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022. CEUR Workshop Proceedings. Ternopil 22- 24 November 2022. Vol 3309, P. 314-318. ISSN 1613-0073.

35. Гевко О.В., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Дозорська О.Ф. Структурний синтез вібромасажної апаратури. Перспективні технології та прилади, № 20, Луцьк, 2022. – с. 23-31.

36. Dozorskyi V., Dediv I., Sverstiuk S., Nykytyuk V., Karnaukhov A. The Method of Commands Identification to Voice Control of the Electric Wheelchair. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.233-240. ISSN 1613-0073.

37. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dediv I., Yatskiv V., Palaniza Y. Method, Algorithm and Computer Tool for Synphase Detection of Radio Signals in Telecommunication Networks with Noises. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.173-180. ISSN 1613-0073.

38. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 111, no 3, 2023. pp. 48–57.

39. Основи технології радіоелектронних апаратів : навчальний посібник / Р. А. Ткачук, В. Г. Дозорський, Л. Є. Дедів, І. Ю. Дедів. - Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. - 336 с.

40. Dozorskyi V., Dediv L., Kovalyk S., Dozorska O., Dediv I. (2024) Design of the endoskeleton of a biocontrolled hand prosthesis. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 115, no 3, pp. 100-111.

41. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2022. – 150 с.

42. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної бо та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Текст програми стиснення зображень

```

function wavelet_compress_gui()
% WAVELET_COMPRESS_GUI
% GUI для стиснення зображень на основі вейвлет-кодування
% (MATLAB R2015b + Wavelet Toolbox).
%
% Запуск:
%    >> wavelet_compress_gui

%-----
% 1. Створення фігури та осей для зображень
%-----
hFig = figure('Name','Wavelet Image Compression GUI', ...
    'NumberTitle','off', ...
    'MenuBar','none', ...
    'ToolBar','none', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.1 0.1 0.8 0.8], ...
    'Color',get(0,'DefaultUicontrolBackgroundColor'));

% Оригінал
handles.axOrig = axes('Parent',hFig, ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.05 0.25 0.4 0.7]);
title(handles.axOrig,'Оригінал');
axis(handles.axOrig,'image','off');

% Стиснене
handles.axComp = axes('Parent',hFig, ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.55 0.25 0.4 0.7]);
title(handles.axComp,'Стиснене');
axis(handles.axComp,'image','off');

% Ініціалізація полів даних
handles.Iorig = [];
handles.Icomp = [];
handles.currentFile = "";

%-----
% 2. Елементи керування (кнопки, роупи, повзунок, тексти)
%-----

% Кнопка "Завантажити"

```

```

handles.btnLoad = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','pushbutton', ...
    'String','Завантажити зображення...', ...
    'Units','normalized', ...
    'FontSize',10, ...
    'Position',[0.05 0.15 0.18 0.06], ...
    'Callback',@onLoadImage);

% Кнопка "Стиснути"
handles.btnCompress = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','pushbutton', ...
    'String','Стиснути', ...
    'Units','normalized', ...
    'FontSize',10, ...
    'Position',[0.27 0.15 0.12 0.06], ...
    'Callback',@onCompress);

% Кнопка "Зберегти"
handles.btnSave = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','pushbutton', ...
    'String','Зберегти стиснене...', ...
    'Units','normalized', ...
    'FontSize',10, ...
    'Position',[0.41 0.15 0.18 0.06], ...
    'Callback',@onSaveCompressed);

% Попуп для вибору вейвлета
uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','text', ...
    'String','Вейвлет:', ...
    'Units','normalized', ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'Position',[0.05 0.07 0.1 0.04]);

handles.popupWavelet = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','popupmenu', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.15 0.07 0.12 0.05], ...
    'String',{'db2','db4','sym4','coif1','haar'}, ...
    'Value',2); % за замовчуванням db4

% Рівень декомпозиції
uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','text', ...
    'String','Рівень декомпозиції:', ...
    'Units','normalized', ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'Position',[0.30 0.07 0.16 0.04]);

```



```

handles.editLevel = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','edit', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.46 0.07 0.06 0.05], ...
    'String','3'); % за замовчуванням 3

% Повзунок для compressionFactor
uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','text', ...
    'String','Ступінь стиснення (?thr):', ...
    'Units','normalized', ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'Position',[0.55 0.09 0.2 0.04]);

handles.sliderComp = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','slider', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.75 0.09 0.18 0.04], ...
    'Min',0.5, 'Max',3, 'Value',1, ...
    'SliderStep',[0.01 0.1], ...
    'Callback',@onUpdateCompSlider);

handles.textCompVal = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','text', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.75 0.05 0.18 0.04], ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'String','Множник порогу: 1.00');

% Поля для відображення показників якості
handles.textPSNR = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','text', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.55 0.16 0.18 0.04], ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'String','PSNR: -');

handles.textMSE = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','text', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.55 0.12 0.18 0.04], ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'String','MSE: -');

handles.textPERF0 = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','text', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.75 0.16 0.18 0.04], ...
    'HorizontalAlignment','left', ...

```

```

'String','PERF0 (% нулів): -');

handles.textPERFL2 = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','text', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.75 0.12 0.18 0.04], ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'String','PERFL2 (% енергії): -');

handles.textCR = uicontrol('Parent',hFig, ...
    'Style','text', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.55 0.20 0.38 0.04], ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'String','Оцінка коеф. стиснення: -');

guidata(hFig,handles);

%-----
% 3. Вкладені callback-функції
%-----

function onLoadImage(hObj, ~)
    % Завантаження зображення
    hFigLocal = ancestor(hObj,'figure');
    handles = guidata(hFigLocal);

    [fname, fpath] = uigetfile({'*.png;*.jpg;*.jpeg;*.bmp;*.tif','Image files'}, ...
        'Обрати зображення');
    if isequal(fname,0)
        return;
    end

    imgPath = fullfile(fpath, fname);
    I = imread(imgPath);

    if ndims(I) == 3
        I = rgb2gray(I);
    end
    I = im2double(I);

    handles.Iorig = I;
    handles.Icomp = [];
    handles.currentFile = imgPath;

    % Показати оригінал
    axes(handles.axOrig);
    imshow(I,[]);
    title(handles.axOrig,'Оригінал');

```

```

% Очистити стиснене
axes(handles.axComp);
cla(handles.axComp,'reset');
axis(handles.axComp,'image','off');
title(handles.axComp,'Стиснене');

% Скинути показники
set(handles.textPSNR,'String','PSNR: -');
set(handles.textMSE,'String','MSE: -');
set(handles.textPERF0,'String','PERF0 (% нулів): -');
set(handles.textPERFL2,'String','PERFL2 (% енергії): -');
set(handles.textCR,'String','Оцінка коеф. стиснення: -');

guidata(hFigLocal,handles);
end

function onCompress(hObj, ~)
% Запуск стиснення
hFigLocal = ancestor(hObj,'figure');
handles = guidata(hFigLocal);

if isempty(handles.Iorig)
    errordlg('Спочатку завантажте зображення.','Немає зображення');
    return;
end

% Параметри з GUI
waveletList = get(handles.popupWavelet,'String');
widx = get(handles.popupWavelet,'Value');
wname = waveletList{widx};

level = str2double(get(handles.editLevel,'String'));
if isnan(level) || level < 1
    errordlg('Рівень декомпозиції має бути цілим числом >= 1.', ...
        'Некоректний рівень');
    return;
end
level = round(level);

compFactor = get(handles.sliderComp,'Value');

I = handles.Iorig;

% Викликаємо допоміжну функцію для стиснення
try
    [Icomp, stats] = doWaveletCompress(I, wname, level, compFactor);
catch ME
    errordlg(['Помилка під час вейвлет-стиснення: ' ME.message], ...

```

```

        'Помилка');
    return;
end

handles.Icomp = Icomp;

% Показати стиснене
axes(handles.axComp);
imshow(Icomp,[]);
title(handles.axComp,sprintf('Стиснене (PSNR %.2f dB)', stats.psnr));

% Оновити показники якості
set(handles.textPSNR, 'String',sprintf('PSNR: %.2f dB', stats.psnr));
set(handles.textMSE, 'String',sprintf('MSE: %.6f', stats.mse));
set(handles.textPERF0, 'String',sprintf('PERF0 (%% нулів): %.2f', stats.PERF0));
set(handles.textPERFL2,'String',sprintf('PERFL2 (%% енергії): %.2f', stats.PERFL2));

if isinf(stats.CR)
    crStr = '?';
else
    crStr = sprintf('%.2f', stats.CR);
end
set(handles.textCR, ...
    'String',sprintf('Оцінка коеф. стиснення: %s разів', crStr));

guidata(hFigLocal,handles);
end

function onSaveCompressed(hObj, ~)
    % Збереження стисненого зображення
    hFigLocal = ancestor(hObj,'figure');
    handles = guidata(hFigLocal);

    if isempty(handles.Icomp)
        errordlg('Немає стисненого зображення для збереження.', ...
            'Немає даних');
        return;
    end

    [fname, fpath] = uiputfile({'*.png','PNG image'; ...
        '*.jpg','JPEG image'; ...
        '*.bmp','Bitmap image'}, ...
        'Зберегти стиснене зображення як');
    if isequal(fname,0)
        return;
    end

    outPath = fullfile(fpath, fname);
    % Із діапазону [0,1] у потрібний формат

```

```

imwrite(handles.Icomp, outPath);
msgbox(['Стиснене зображення збережено: ' outPath], 'Готово');
end

function onUpdateCompSlider(hObj, ~)
% Оновлення тексту з поточним значенням множника порогу
hFigLocal = ancestor(hObj,'figure');
handles = guidata(hFigLocal);

val = get(hObj,'Value');
set(handles.textCompVal, ...
    'String', sprintf('Множник порогу: %.2f, val));

guidata(hFigLocal,handles);
end

%-----
% 4. Допоміжна функція вейвлет-стиснення
%-----
function [I_comp, stats] = doWaveletCompress(I, wname, level, compressionFactor)
% Вейвлет-стиснення зображення I з параметрами:
%   wname - назва вейвлета (наприклад, 'db4')
%   level - кількість рівнів декомпозиції
%   compressionFactor - множник автоматичного порогу

dwtmode('per','nodisp'); % періодичний режим доповнення

% Автоматичні параметри порогоування для задачі стиснення
[thr, sorh, keepapp] = ddencmp('cmp','wv',I);
thr = thr * compressionFactor;

% Стиснення (wdencmp - глобальне порогоування вейвлет-коэф.)
[I_comp, ~, ~, PERF0, PERFL2] = ...
    wdencmp('gbl', I, wname, level, thr, sorh, keepapp);

% Обчислення MSE, PSNR, оцінки коефіцієнта стиснення
mseVal = mean((I(:) - I_comp(:)).^2);
if mseVal == 0
    psnrVal = Inf;
else
    maxVal = 1; % тому що використовуємо im2double, діапазон [0,1]
    psnrVal = 10*log10(maxVal^2 / mseVal);
end

nonZeroFrac = 1 - PERF0/100;
if nonZeroFrac > 0
    CR_est = 1 / nonZeroFrac;
else
    CR_est = Inf;
end

```

```
end

% Повертаємо статистику
stats.mse  = mseVal;
stats.psnr = psnrVal;
stats.PERF0 = PERF0;
stats.PERFL2 = PERFL2;
stats.CR   = CR_est;
end
end
```

Додаток Б

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

МАТЕРІАЛИ

ХІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



17-18 грудня 2025 року

ТЕРНОПІЛЬ
2025

УДК 621.397

В. Ступка; В. Анненков; І. Дедів, к. т. н., доц.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

МЕТОД СТИСНЕННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-КОДУВАННЯ

UDC 621.397

V. Stupka; V. Annenkov; I. Dediv, PhD., Assoc. Prof.

DIGITAL IMAGE COMPRESSION METHOD BASED ON WAVELET CODING

Актуальність стискання цифрових зображень зумовлена стрімким зростанням обсягів візуальної інформації, яку щодня генерують користувачі, камери спостереження, супутники, медичні прилади, мобільні пристрої тощо. Без ефективних методів стиснення зберігання та передавання таких даних вимагало б надзвичайно великих обчислювальних ресурсів, пропускну здатності мереж і обсягів пам'яті.

Вейвлет-перетворення вважається найпотужнішим і найширше використовуваним інструментом, що з'явився в галузі обробки сигналів за останні кілька десятиліть. Здатність вейвлетів до багатороздільного представлення, що подібна до роботи людської зорової системи, стимулювала швидке впровадження та широке використання вейвлетів в засобах цифрової обробки зображень. Алгоритми на основі вейвлетів стають домінуючими в області стискання зображень. Також, вейвлети все частіше використовуються в кодуванні вихідних даних дистанційного зондування, супутникових та інших геопросторових зображень. Крім того, вейвлети починають використовуватися за межами сфери кодування вихідних даних зі зростанням інтересу до надійної передачі зображень та відео як по дротових, так і по бездротових мережах.

Застосування вейвлет-кодування дає можливість досягнення набагато більших в порівнянні із існуючими методами коефіцієнтів стиснення при достатній якості реконструйованих зображень, незважаючи на обмежену поширеність такого підходу через його новизну та відсутність діючих стандартів.

В розробленому методі реалізовано вейвлет-перетворення, при якому зображення розкладається на коефіцієнти різних масштабів і орієнтацій; багато коефіцієнтів виявляються дуже малими і їх можна обнулити (прибрати), майже не пошкоджуючи вигляд зображення; виконується кодування тільки важливих коефіцієнтів.

Проведено опрацювання тестового зображення розробленим методом із різними заданими параметрами стиснення та типом використаного вейвлета. Встановлено, що при мінімальному значенні множника порога стиснення найкращий результат стиснення отриманий при застосуванні вейвлета Добеші 4-го порядку, а найгірший результат отримано при застосуванні вейвлета Хаара. Середньоквадратична помилка між оригінальним і відновленим (стисненим) зображенням залишалась незмінною для усіх типів використаних вейвлетів. Якщо значення множника порога стиснення максимальне, то найкращий результат отримано для вейвлета Симлет 4-го порядку та вейвлета Добеші 4-го порядку, а найгірший результат отримано при застосуванні вейвлета Хаара. Стосовно ж середньоквадратичної помилки, то при максимальних параметрах стиснення вона збільшилась для усіх типів вейвлетів, але мінімальною все ще залишилась для вейвлетів Симлет та Добеші 4-го порядку. Візуально жодної різниці між вихідним та стиснутим навіть при максимальних параметрах стиснення зображенням не виявлено.

Таким чином встановлено, що застосування вейвлет-кодування для стиснення цифрових зображень дає можливість отримувати великі ступені стиснення при мінімальних чи невідчутних візуально спотвореннях відновлених зображень, а найкращим серед розглянутих типів вейвлетів виявився вейвлет Добеші 4-го порядку.

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

О. Керницький, В. Сікула, Т. Максимів, І. ДедівМЕТОД ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ВІЗУАЛЬНОГО СПРИЙНЯТТЯ ПОШКОДЖЕНИХ
ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНОГО РЕЗОНАНСУ**O. Kernitsky, V. Sikula, T. Maksymiv, I. Dediv**THE METHOD FOR ENHANCING THE LEVEL OF DAMAGED IMAGES VISUAL
PERCEPTION BASED ON STOCHASTIC RESONANCE

3

А. Кондратюк, Я. Литвиненко

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛУ З АРТЕФАКТАМИ

A. Kondratyuk, I. Lytvynenko

METHODS FOR MODELING ELECTROCARDIO SIGNAL WITH ARTIFACTS

4

В. Кривень, В. Шаповалов

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ КРУГОВОЇ ПЛАСТИНИ

V. Kryven, V. ShapovalovMATHEMATICAL MODEL OF ELECTRICAL RESISTANCE OF A CIRCULAR
PLATE

5

С. Литвиненко, М. ФризПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ СПОСОБІВ ПРОСУВАННЯ ЦІЛЬОВОЇ
РЕКЛАМИ**S. Lytvynenko, M. Friz**

APPROACHES TO MODELING METHODS OF TARGETED ADVERTISING

6

І. Плєскуп, Д. Кривко, Т. Дубиняк, М. ЯворськаМОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ
ГОСПОДАРСЬКОГО ПРИМІЩЕННЯ**I. Pleskun, D. Kryvko, T. Dubyniak, M. Yavorska**

MODELING OF A TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR UTILITY ROOMS

7

М. СтрілецькийМОДЕЛЬ ЛОТКА-ВОЛЬТЕРРА ОЦІНКИ ЗАБРУДНЕНЬ В ЗОНІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ МАЛОГО МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА**M. Striletskyi**LOTKA-VOLTERRA MODEL FOR ASSESSING POLLUTION IN THE
OPERATIONAL ZONE OF A SMALL MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

9

В. Ступка, В. Анненков, І. ДедівМЕТОД СТИСНЕННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-
КОДУВАННЯ**V. Stupka, V. Annenkov, I. Dediv**

DIGITAL IMAGE COMPRESSION METHOD BASED ON WAVELET CODING

11

В. Сумко, Я. ЛитвиненкоОГЛЯД МЕТОДІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ В ЗАДАЧАХ ОЦІНЮВАННЯ ЇХ
РИТМІЧНОЇ СТРУКТУРИ**V. Sumko, I. Lytvynenko**A REVIEW OF SIGNAL INTERPOLATION METHODS FOR THE PURPOSE OF
ESTIMATING THEIR RHYTHMIC STRUCTURE

12

М. Фриз, Б. МлинкоСИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ
ЗАБРУДНЕНЬ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ**M. Fryz, B. Mlynko**SYSTEM ANALYSIS OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION MONITORING
MODELS AND METHODS

14