

Олександр Герцій¹, Наталія Бутрик^{2*}

¹ Завідувач кафедри, Кафедра Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8634-5880>

² Аспірант, Кафедра Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0520-645X>

*Автор, відповідальний за листування: by3nyatko@meta.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ГРАФІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

В статті проаналізовано основні характеристики методів стиснення графічної інформації із втратами та без втрат (RLE, LZW, метод Хаффмана, DEFLATE, JBIG, JPEG, JPEG 2000, Lossless JPEG, фрактальний та Wavelet). Ефективна передача та збереження зображень в комунікаційних системах на залізничному транспорті зараз є важливим завданням, оскільки великі розміри зображень потребують великих ресурсів для зберігання. Це завдання стало дуже актуальним останніми роками, оскільки стали актуальними проблеми передачі інформації по телекомунікаційних каналах зв'язку транспортної інфраструктури, а також є велика потреба у проведенні відеоконференцій, де завданням є ефективне стиснення відеоданих, тому що чим більший обсяг даних, тим більша вартість передачі інформації відповідно. Тому застосування методів стиснення зображень, які передбачають зменшення розміру файлу є вирішенням цього завдання. В результаті дослідження виділено переваги та недоліки методів стиснення. Здійснено порівняльний аналіз основних можливостей методів стиснення графічної інформації. Актуальність полягає в ефективній передачі та збереженні графічної інформації, оскільки великі дані вимагають великих ресурсів для зберігання. Практичне значення полягає у вирішенні завдання ефективного зменшення розмірів даних шляхом застосування відомих методів стиснення.

Ключові слова: стиснення, метод, зображення, перетворення, характеристики.

Вступ. Зараз існує досить багато методів компактного представлення графічної інформації. Основою будь-яких методів стиснення даних є використання природної надмірності вихідної інформації. Методи стиснення графічної інформації розроблені для зниження обсягу вихідної інформації за допомогою перетворення без втрат або перетворення з втратами. Тому такі методи поділяють на стиснення з втратами та стиснення без втрат [7].

Стиснення з втратами (англ. Lossy compression) – це перетворення вхідних даних у вихідні дані, які повторюють зовнішні характеристики вхідних даних з різницею у обсязі. Ступінь подібності вхідних і вихідних даних визначається ступенем відповідності певних властивостей зображення, що представляється заданим потоком інформації. Методи стиснення з втратами дозволяють отримати істотно більші коефіцієнти стиснення. Але при цьому відбувається спотворення вихідного зображення, погіршення його якості. Тому при порівнянні різних методів стиснення

необхідно враховувати якість відновлення зображення. Стиснення із втратами найчастіше використовується для мультимедійних даних, особливо для потокової передачі даних та телефонії. Методи з втратами зазвичай застосовуються для стиснення зображень і аудіо [7, 11].

Стиснення без втрат (англ. Lossless) – це перетворення вхідних даних у вихідні дані, де закодована інформація може бути відновлена з точністю до біта. Методи стиснення без втрат застосовуються для зменшення розміру даних. З використанням цих методів можливо в точності відновити початкові дані. Для кожного з типів цифрової інформації, як правило, існують свої методи стиснення без втрат [11]. Результатом стиснення без втрат завжди є зниження обсягу вихідного потоку інформації без зміни його інформативності, тобто без втрати інформаційної структури. Методи стиснення без втрат використовуються у сферах, де важливі точність даних та швидкість їх передавання між вузлами системи. Наприклад у наукових і медичних прикладних програмах, коли втрата інформації неприпустима або самі шуми зображення є головною інформацією. Практичне значення має саме його апаратна реалізація. Такі кодери використовують в охоронних системах, системах збирання інформації, супутникових, підводних та інших системах фото- та відеоспостережень, а також в астрономічних інструментах і телескопах [7, 10].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Першими для стиснення зображень стали застосовуватися звичні методи, що використовуються в системах резервного копіювання, при створенні дистрибутивів. Ці алгоритми стискали інформацію без змін. Великі компанії використовували методи стиснення для зберігання великих масивів даних. Із появою інтернету виникла необхідність у вдосконаленні існуючих методів стиснення, оскільки пропускна здатність каналів була надзвичайно вузькою [1]. Тому були створені формати ZIP, GIF і PNG. Перший успішний архіватор ARC дозволяв стискати кілька файлів в архів, до того ж вихідні її були відчинені. ARC використовувала модифікований метод LZW. З розвитком комп'ютерної техніки, на заміну методу LZW став метод DEFLATE. Серед нових можливостей була функція розбиття архіву на томи. Ця версія досі повсюдно використовується, незважаючи на поважний вік. Формат зображень GIF (Graphics Interchange Format) підтримує стиснення зображення без втрат, і обмежений палітрою в 256 кольорів. Він до цих пір популярний, особливо в зв'язку з підтримкою анімації. Зараз DEFLATE найпопулярніший алгоритм стиснення. Оскільки останнім часом все частіше використовують нові класи зображень, старі методи перестали задовольняти вимогам, що представляються до стиснення. Це привело до створення нового типу алгоритмів – стискаючих з втратою інформації [6]. Як правило, коефіцієнт архівації, і отже, величину втрат якості в них можна задавати. При цьому досягається компроміс між розміром і якістю зображень. Однією із суттєвих проблем стиснення зображень є відсутність адекватних критеріїв оцінки втрати якості, тому що якість може погіршуватись на будь-якій стадії обробки (при оцифруванні, при переводі в обмежену палітру кольорів, при переведенні в іншу систему представлення кольорів для друку, при стисненні із втратами).

Відомо, що майже вся графічна інформація, яка піддається стиску, призначена для подальшого аналізу людиною. Краще всього втрату якості зображень оцінювати візуально, за допомогою зору. Відмінним вважається стиснення, коли неможливо візуально відрізнити початкове зображення та відновлене після стиснення; нормальним, коли

початкове та відновлене після стиснення зображення можна відрізнити тільки порівнюючи два зображення.

На практиці, навіть при відмінному збереженні якості, в зображення можуть бути внесені регулярні специфічні зміни. Тому методи стиснення з втратами не рекомендується використовувати при стисненні зображень, які надалі необхідно друкувати з високою якістю, або обробляти програмами розпізнавання образів [4]. Неприємні ефекти з такими зображеннями, можуть виникнути навіть при простому масштабуванні [2, 12, 15].

Мета і завдання дослідження. На сьогодні актуальним завданням ефективною передачі та збереження зображень в комунікаційних системах, оскільки великі розміри графічних зображень вимагають великих ресурсів для зберігання. Застосування методів стиснення зображень, які передбачають зменшення розміру файлу є вирішенням цього завдання. Існує багато розроблених методів стиснення графічної інформації, серед яких розрізняють методи спрямовані на компресію та декомпресію і методи спрямовані на ступінь стиснення. Та зазвичай такі методи розробляють для визначених типів графічної інформації. І, відповідно, для проведення аналізу різних методів стиснення зображень необхідно знати на який клас зображень треба орієнтуватися (монохроматичне, напівтонове, кольорове, зображення з неперервним тоном, дискретно-тонове зображення, зображення, в яких присутні великі області одного кольору). Тому складно розмежувати та скласти універсальний опис відомих методів. Це можна зробити тільки для типових методів за умови використання типових методів на типових платформах [15].

Матеріали та методи дослідження. До основних методів стиснення інформації без втрат належать метод RLE, метод LZW, метод Хаффмана, метод JBIG, метод Lossless JPEG та метод DEFLATE. Розглянемо їх детальніше.

1. *Метод RLE (Run Length Encoding)* – один із найстаріших і найпростіших методів стиснення. Даний метод простий у реалізації, оскільки не вимагає додаткової пам'яті при компресії/декомпресії. Метод орієнтований на зображення з невеликою кількістю кольорів або зображення з більш великими областями кольору, який повторюється. RLE має високу швидкодію та не вимагає додаткової пам'яті при стисненні. RLE має низький ступінь стиснення. Застосування даного методу ефективно при стисненні растрових тонових зображень (BMP, PCX, TIFF), оскільки вони містять довгі серії повторюваних послідовностей байтів [7, 11, 15]. Головною перевагою RLE є його більш низька розрахункова складність з більш простими етапами кодування та декодування. Це сприяє швидкій реалізації в порівнянні з іншими методами кодування для кращої роботи стиснення без спотворень [3].

2. *Метод LZW (Lempel, Ziv, Welch – метод Лемпеля-Зіва-Велча)*. Це універсальний метод стиснення без втрат орієнтований на 8-бітові зображення. Стиснення забезпечується однаковими підланцюжками байтів у потоці. Процес стиску виглядає досить просто: послідовно зчитуються символи вхідного потоку й перевіряється, чи є такий рядок в створеній таблиці рядків. Якщо рядок є, то зчитується наступний символ, а якщо рядок відсутній, то в потік заноситься код для попереднього знайденого рядка, у таблицю заноситься рядок й починається пошук знову. LZW універсальний, оскільки саме його варіанти використовуються в звичайних архіваторах. Він реалізований у форматах GIF, TIFF і TGA. Основним недоліком цього методу є низький ступінь стиснення у порівнянні зі схемою двоступеневого кодування [7, 11, 15].

3. *Метод Хаффмана* – класичний метод стиску інформації, актуальний для текстових файлів, де символи тексту замінюються ланцюжками біт різної довжини, і забезпечує однозначну побудову коду з найменшим для даного розподілу ймовірностей середнім числом символів на літеру. Метод Хаффмана практично не застосовується до зображень у чистому вигляді. Зазвичай використовується як один з етапів компресії в більш складних схемах. Це єдиний метод, що не збільшує розміру вихідних даних у найгіршому разі (якщо не вважати необхідності зберігати таблицю перекодування разом з файлом) [7, 11, 15].

4. *Метод DEFLATE* базується на комбінації алгоритмів LZW (Лемпеля-Зіва-Велч) та Хаффмана. Метод DEFLATE достатньо простий у реалізації, швидкий, широко використовується у програмному забезпеченні. Недоліком методу є низька ефективність кодування незначного обсягу даних. Порівняно із методами RLE, LZW та Хаффмана, метод DEFLATE є оптимальним за співвідношенням якості втрати. Тому доцільно розробити новий підхід до стиснення зображень на основі методу DEFLATE з використанням етапу попередньої обробки. На цьому етапі повинні підготуватися дані, які по-перше, мають повторювані фрагменти, по-друге, мають велику кількість однакових пікселів на зображенні. Етап попередньої обробки може включати наступні основні алгоритми: визначення кольору фону; визначення наявності зображення; аналіз можливості відділення фрагментів зображення; доведення фрагментів до прямокутної форми; безпосередня обробка фрагментів зображення. Додатково збільшити коефіцієнт стиснення можливо за рахунок вибору кольорової моделі. Так як алгоритм DEFLATE стискає за рахунок різної частоти з'явлення пікселів у зображенні, то доцільно використовувати кольорорізнлицеву модель, в якій у двох кольорових компонентів знижений динамічний діапазон даних для фрагментів зображення з однотипними рядками [11].

5. *Метод JBIG (Joint Bi-level Experts)* розроблений групою експертів ISO (Joint Bi-level Experts Group) спеціально для стиснення однобітних чорно-білих зображень (наприклад, для факсів або відсканованих документів), і може застосовуватися і до 2-х, і до 4-х бітових зображень, розбиваючи їх на окремі бітові площини. Метод JBIG так само як метод Хаффмана, використовує для частих символів короткі ланцюжки, для рідких — довгі. Однак на відміну від нього в методі JBIG використовуються послідовності символів. JBIG дозволяє керувати порядком розбиття зображення на бітові площини, шириною смуг в зображенні, рівнями масштабування. Останнє дозволяє легко орієнтуватися в базі великих за розмірами зображень, переглядаючи спочатку їх зменшені копії. Налаштування означених параметрів дозволяє при отриманні зображення по мережі або по будь-якому іншому каналу, пропускна здатність якого мала в порівнянні з можливостями процесора, розпаковувати зображення на екрані поступово, що забезпечує оператору аналіз картинки задовго до кінця процесу розархівування. Характерною особливістю JBIG є різке зниження ступеню стиснення при підвищенні рівня шумів вхідного зображення [7, 11, 15].

6. *Метод Lossless JPEG* розроблений групою експертів з фотографії (Joint Photographic Expert Group). JPEG-LS створено на основі методу стиснення LOCO-I. Він істотно відрізняється від методів JPEG та JPEG2000, хоча назва схожа. На відміну від JBIG, Lossless JPEG орієнтований на повнокольорові 24-бітові та 8-бітові зображення без палітри (в градаціях сірого). Він представляє собою спеціальну реалізацію JPEG без втрат. JPEG включає два способи стиснення – без втрат і з втратою якості. Цей метод рекомендується використовувати в системах з доволі обмеженими ресурсами,

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

наприклад, космічних станціях чи веб-камерах. Метод JPEG-LS складається з трьох основних етапів виконання: моделювання, прогнозування та кодування. Основною його відмінністю від інших алгоритмів є модуль прогнозування та робота з контекстом [7, 10, 11, 15] Для порівняння методів стиску графічної інформації без втрат розглянемо таблицю 1.

Таблиця 1. Порівняння основних характеристик методів стиснення графічної інформації без втрат

Назва методу	Основні характеристики методу	Переваги та недоліки методу
Метод RLE (Run Length Encoding)	Суть полягає у кодуванні повторюваних значень кольорів	<i>Переваги:</i> простий в реалізації, корисний для надлишкових даних, таких як картинки із великою кількістю пікселів
		<i>Недоліки:</i> стиск призводить до збільшення розміру файлу
LZW (метод Лемпеля-Зіва-Велча)	Повторення однотипних послідовностей кольорів	<i>Переваги:</i> простий в реалізації, висока швидкість стиску, не потребує додаткової пам'яті
		<i>Недоліки:</i> малий коефіцієнт стиску
Хаффмана	Різна частота появи кольорів	<i>Переваги:</i> висока швидкість стиску, актуальний для текстових файлів, забезпечує однозначну побудову коду з найменшим для даного розподілу ймовірностей середнім числом символів на літеру
		<i>Недоліки:</i> практично не застосовується до зображень у чистому вигляді
DEFLATE	Стиснення відбувається за рахунок різкої частоти з'явлення пікселів у	<i>Переваги:</i> простий у реалізації, швидкий, широко використовується у програмному забезпеченні
DEFLATE	зображенні та їх однотипних рядків	<i>Недоліки:</i> низька ефективність кодування незначного обсягу даних
JBIG	Стиснення однобітних чорно-білих зображень	<i>Переваги:</i> дозволяє керувати порядком розбиття зображення на бітові площини, шириною смуг в зображенні, рівнями масштабування (можливо переглядати зображення через їх зменшені копії)
		<i>Недоліки:</i> зниження ступеню стиску при підвищенні рівня шумів вхідних даних
Lossless JPEG	Орієнтований на повнокольорові 24-бітові та 8-бітові зображення без палітри	<i>Переваги:</i> універсальний
		<i>Недоліки:</i> низький коефіцієнт стиску (при стиску зображення без втрат)

Отже, наведені вище методи стиснення інформації без втрат є універсальними та охоплюють всі типи зображень, проте мають занадто маленький коефіцієнт стиску. Використовуючи один з методів стиску без втрат, можна забезпечити стиснення зображення приблизно у два рази, хоча це і багато в чому залежить від характеристик зображення. Методи стиснення з втратами найбільш ефективні, проте вимагають також оцінювання за означеними вище критеріями, оскільки важливим в методах репродукування - забезпечення раціонального відтворення оригіналу (аналогового чи цифрового) з повним набором кольорових і тонових характеристик [7, 11].

Тому, проаналізуємо основні методи стиснення графічної інформації з втратами. До основних методів стиснення інформації з втратами належать метод JPEG, метод JPEG 2000, фрактальний метод, Wavelet (рекурсивний метод). Розглянемо їх детальніше.

1. *Алгоритм JPEG* – один з найпоширеніших і достатньо потужних методів. На сьогодні він є стандартом для повнокольорового зображення. Він оперує областями 8x8, на яких яскравість і колір міняються порівняно плавно.

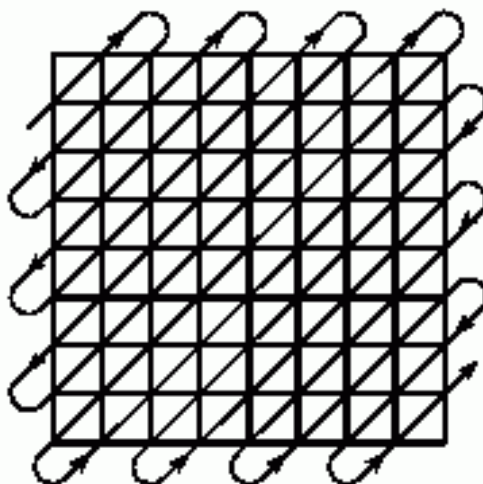


Рис. 1. Область зображення 8x8

Внаслідок цього, при розкладанні матриці такої області в подвійний ряд по косинусах значущими виявляються тільки перші коефіцієнти. Стиснення в JPEG здійснюється за рахунок плавності зміни кольорів в зображенні [11, 12, 15].

Метод охоплює повнокольорові 24 бітні зображення (24 біта на 1 точку) або зображення в градаціях сірого без різких переходів кольорів (фотографії). Симетричність: 1 [11, 15].

Схема алгоритму стиснення зображень за стандартом JPEG наведена на рис. 2.



Рис. 2. Схема алгоритму стиснення зображень JPEG (Джерело: [7])

Стиснення зображень за стандартом JPEG має таку послідовність кроків:

1) Кольорове зображення переводиться з простору RGB в простір YCrCb.

У зображеннях формату RGB є суттєва кореляція між кольоровими компонентами. Компоненти R, G і B перетворюються в компоненту Y і дві різнокольорові компоненти U і V, формату YUV, де Y – сигнал яскравості, U і V – різницеві колірні сигнали. Перетворення виконується від пікселя до пікселя за такими формулами:

$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B \tag{1}$$

$$U = -0.15R - 0.29G + 0.44B \quad (2)$$

$$V = 0.62R - 0.52G - 0.1B \quad (3)$$

де R, G, B – колірні сигнали зображення (червоний, зелений і синій відповідно).

Представлення кольорового зображення в системі YUV дає можливість використати особливості зорового сприйняття зображень людиною – низьку чутливість до точності представлення кольорів [7, 12].

2) Кольорове зображення розбивається на крупні пікселі. Пікселі кожної кольорової компоненти збираються у блоки 8×8 , які називаються одиницями даних;

3) Застосовується дискретне косинус-перетворення до кожної одиниці даних та отримують блоки 8×8 частот одиниць даних (для зменшення надлишковості даних зображення);

4) Квантування кожного блоку коефіцієнтів ДКП: кожна з 64 компонент частот одиниць даних ділиться на спеціальне число – коефіцієнт квантування (QC), яка округляється до цілого. Виконання ДКП є найбільш важким для реалізації. Процес кодування із застосуванням ДКП: зображення розбивається на блоки розміром 8×8 (при кодуванні кольорових зображень кожна компонента обробляється незалежно).

В межах кожного блоку виконується двовимірне ДКП відповідно до виразу:

$$F(u,v) = \frac{1}{4} C(u)C(v) \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 f(i,j) \cos\left(\frac{(2i+1)u\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2j+1)v\pi}{16}\right), \quad (4)$$

$$\text{де } C(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & x = 0 \\ 1 & x \neq 0 \end{cases} \quad x = 0, \quad u, v = 0, 1, 2 \dots 7.$$

При декодуванні обчислюється зворотне ДКП:

$$F(i,j) = \frac{1}{4} \sum_{u=0}^7 \sum_{v=0}^7 C(u)C(v) F(u,v) \cos\left(\frac{(2i+1)u\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2j+1)v\pi}{16}\right), \quad (5)$$

$$\text{де } i, j = 0, 1, 2 \dots 7.$$

5) Кодування результувальних коефіцієнтів із застосуванням статичного кодування Хаффмана: усі 64 квантованих частотних коефіцієнта кожної одиниці даних кодуються з допомогою комбінації RLE і алгоритму Хаффмана. На етапі статичного кодування крім алгоритму Хаффмана, специфікація JPEG допускає застосування інших методів з метою зменшення об'єму інформації, наприклад застосування арифметичного кодування QM;

6) На останньому кроці додається заголовок з використаних параметрів JPEG і результати виводяться в стислий файл. Ступінь стиску задається користувачем від 2 до 200, хоча на практиці коефіцієнт стиснення не перевищує 20-25 [11, 12, 15].

У JPEG є свої особливості. Найбільш відомі «ефект Гіббса» і дроблення зображення на квадрати 8×8 . Перший виявляється на границях різких меж предметів, утворюючи своєрідний «ореол». Розбиття на квадрати відбувається, коли задається занадто великий відсоток архівації для даного конкретного зображення. Недоліком методу JPEG є також те, що нерідко горизонтальні і вертикальні смуги на дисплеї абсолютно не видно, і можуть виявитися тільки при друці у вигляді муару. З цієї причини JPEG не рекомендується використовувати в поліграфії при високих коефіцієнтах стиснення. Однак при застосуванні раціональних меж стиснення і алгоритмів розмиття точок растрування він може розглядатися як варіант стиснення для зменшення обсягу файлу повноколірного зображення в оригінал-макетах видань, які будуть друкуватися [7].

2. *Метод JPEG 2000*. Розроблений тією ж групою експертів в галузі фотографії, що і JPEG.

Схема алгоритму стиснення зображень за стандартом JPEG2000 представлена за на рис. 3.

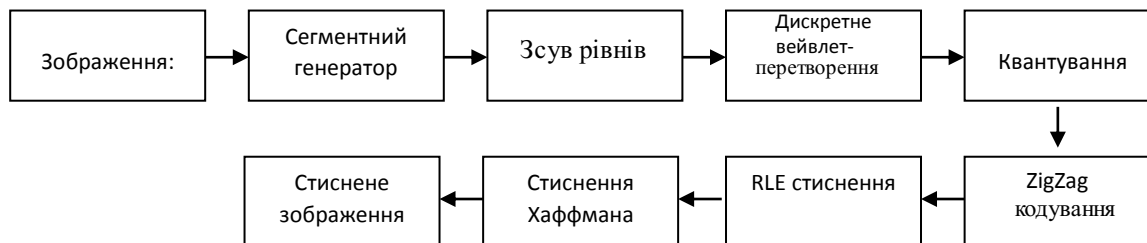


Рис. 3. **Схема алгоритму стиснення зображень JPEG2000** (Джерело: [10])

Схема алгоритму JPEG 2000 дуже схожа на базову схему JPEG. Відмінності полягають у такому:

замість дискретного косинусного перетворення (ДКП) використовується дискретне вейвлет-перетворення (ДВП);

замість кодування по Хаффману використовується арифметичне стиснення;

у алгоритм, з самого початку закладено управління якістю областей зображення;

не використовується явно дискретизація компонент U і V після перетворення кольорних просторів, оскільки при ДВП можна досягти того ж результату, але дещо краще.

Отже, при виконанні алгоритму JPEG 2000, на відміну від алгоритму JPEG, отримуємо:

покращену якість зображення при значній величині стиснення;

підтримка стиснення без втрат. Це дає можливість використовувати JPEG для стиснення медичних зображень, в поліграфії;

підтримка стиснення одно бітових (2-кольорових) зображень. У JPEG при стисненні 1-бітова картинка збільшувалася в 8 разів. Після чого робилася спроба стиснення, нерідко менш ніж в 8 разів. Зараз можна рекомендувати JPEG 2000 як універсальний метод;

на рівні формату JPEG 2000 підтримується прозорість. При створенні www-сторінок тепер можна накладати прозорий фон не лише в GIF, але і в JPEG 2000. Крім того, підтримується не лише 1 біт прозорості (піксель прозорий /непрозорий), а окремий канал, що дозволило задавати плавний перехід від непрозорого зображення до прозорого фону [12, 15].

3. *Фрактальний метод* – це математичний процес кодування растрів, які містять реальне зображення, в сукупність математичних даних, що описують фрактальні властивості зображення. Метод заснований на тому, що усі природні і більшість штучних об'єктів містять надмірну інформацію у вигляді однакових малюнків, що повторюються (фрактали) [13]. Метод заснований на представленні зображення в компактній формі за допомогою коефіцієнтів системи ітерованих функцій - СІФ (Iterated Function System - IFS). СІФ переводять одне зображення в інше. Перетворенню піддаються точки в тривимірному просторі (x-координата, y-координата, яскравість) [11, 12, 13, 15]. Тобто, здійснюється пошук самоподібних областей в зображенні. Метод

використовує системи доменних і рангових блоків зображення, блоків квадратної форми, що покривають все зображення [5]. Відповідно до даного методу зображення розбивається на безліч неперекритих рангових підзображень і визначається безліч неперекритих доменних підзображень. Для кожного рангового блоку алгоритм кодування знаходить найбільш підходящий доменний блок і афінне перетворення, що переводить цей доменний блок у даний ранговий блок. Структура зображення відображається в систему рангових блоків, доменних блоків і перетворень [11, 12, 15].

Процес фрактального стиснення починається з того, що беруться два ідентичні екземпляри зображення – А і Б, один з них розділяється на блоки, що не перекриваються (рангові області), а на другому задається набір доменів, які можуть взаємно перекриватися, як це показано на рис. 4.

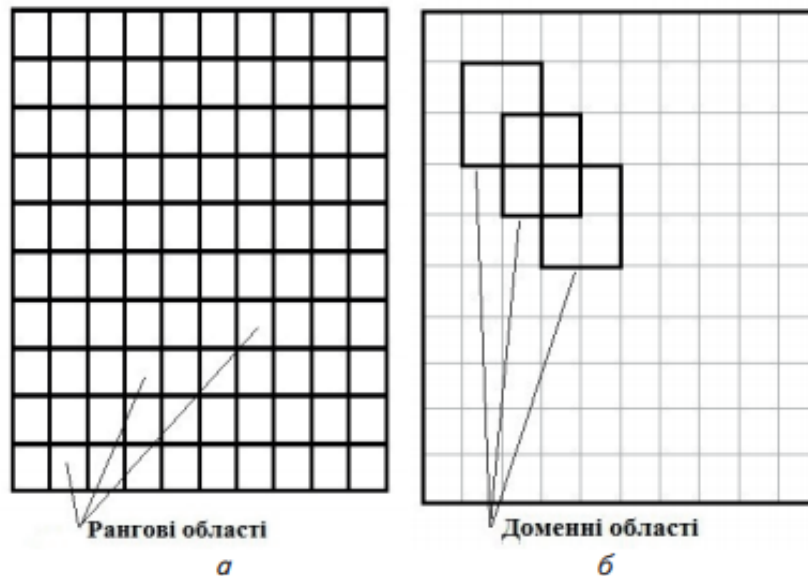


Рис. 4. Розподіл на зображенні: а- рангових областей; б – доменних областей
(Джерело: [13])

Після цього для кожної рангової області підбирається найбільш відповідний домен. Номери доменів, використаних при кодуванні кожної рангової області записуються у файл. Файл стисненого зображення містить заголовок з інформацією про розташування рангових областей і доменів.

Фрактальне стиснення – процес асиметричний. Стиснення триває набагато довше, ніж розпаковування. Ця характеристика дає можливість ефективно використовувати метод для зображень, які безперервно розпаковуються, але ніколи не стискаються. Тому фрактальний метод доцільно застосовувати в базах даних зображень. Проблемам оптимізації фрактального стиснення цифрових зображень присвячена велика кількість досліджень зарубіжних учених. Слід відмітити роботу С. В. Винокурова [8], у якій розглянуто метод фрактального стиснення зображень з використанням просторово-чутливого хешування. Проте досі мало уваги приділяється методам оптимізації фрактального стиснення, які б мали однаково високі характеристики ступеня стиснення і якості відновленого зображення. Особливо актуальним на сьогодні залишається питання побудови швидкодіючих методів фрактального стиснення [13].

Отже, проаналізувавши особливості фрактального методу стиску визначили, що він здатний забезпечити найкраще співвідношення ступеня стиску і якості відновленого

зображення. Метод має хороші перспективи для подальшого розвитку. У процесі перетворення звичайних растрових зображень у фрактальні є можливість масштабувати фрактальне зображення без появи артефактів і втрати деталей, як це характерно для растрових зображень [13]. Переваги фрактального методу полягають у високих коефіцієнтах стиснення та швидкості зворотного перетворення, а також можливості подальшого структурного аналізу зображення. Однак результати стиснення залежать від принципів відбору базових елементів і доменів, а коефіцієнт стиснення залежить від повторюваності базових елементів. Алгоритм орієнтований на повноколірні зображення і градації сірого. Фрактальне стиснення реалізовано у форматі FIF [7].

Основним недоліком фрактального методу є низька швидкість стиснення. Вона пов'язана з тим, що для отримання високої якості зображення, для кожного рангового блоку необхідно виконати перебір всіх доменних блоків. Для кожного доменного блоку необхідно виконати не менше восьми афінних перетворень. Ця проблема розв'язана тільки частково. Внаслідок відмічених недоліків цей метод застосовується на практиці порівняно рідко.

Процес фрактального перетворення асиметричний. Тобто відтворення зображення відбувається набагато швидше ніж стиснення. Тому перед дослідниками відкриваються можливості покращення ефективності та пошуку інших способів оптимізації фрактального кодування [13].

4. *Wavelet – рекурсивний (хвильовий) метод* – це стиснення з використанням сплесків, які визначені лише на частині області задання аргументу і можуть розглядатися як репліки єдиної базової функції, що відрізняються за масштабом та розміщенням. Ідея методу полягає в тому, щоб зберігати у файл різницю між середніми значеннями сусідніх блоків у зображенні, які зазвичай приймають значення близькі до 0 [7, 15]. Метод орієнтований на стиснення кольорових та чорно-білих зображень із плавними переходами. Ідеальний для картинок типу рентгенівських знімків. Сьогодні фахівці визначають низку переваг вейвлет-стиснення в порівнянні з методами, побудованими на основі дискретно-косинусного перетворення Фур'є, яке використовується в JPEG. Вейвлетне стиснення в сучасних методах компресії зображень дозволяє значно (до двох разів) підвищити ступінь стиснення чорно-білих і кольорових зображень при порівнянній візуальній якості стосовно методів попереднього покоління [7, 11, 12].

Широке застосування вейвлет-перетворення знайшло в завданнях обробки зображень (мова, супутникові зображення, рентгенограми), розпізнавання образів, при вивченні властивостей поверхонь кристалів і нанооб'єктів [16]. Вейвлет-перетворення використовуються у медичній діагностиці для стискання зображень з найменшими втратами інформації, потрібної для діагнозу. Вейвлет-перетворення більш досконалі, порівняно з перетворенням Фур'є. Метою нових методів аналізу медичних сигналів є автоматичне встановлення правильного діагнозу за відсутності лікаря чи недостатній його кваліфікації, що підвищує ймовірність діагностування захворювань на ранніх стадіях.

На рис. 5 наведено приклад застосування вейвлетів до аналізу результатів електрокардіографії.

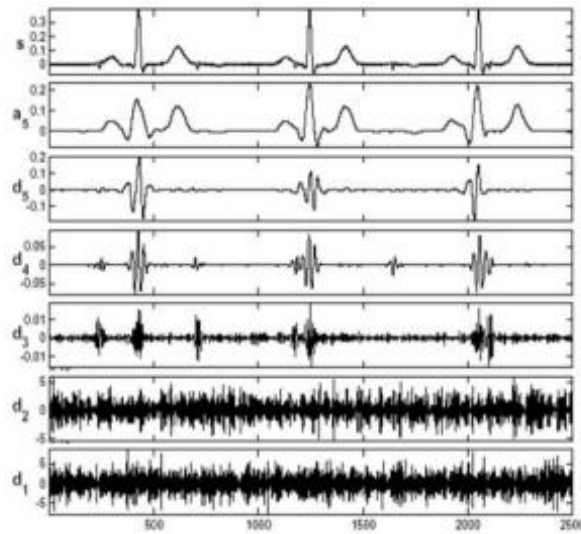


Рис. 5. Аналіз електрокардіографії за допомогою неперервних вейвлет-перетворень (Джерело: [14])

Коефіцієнти неперервного вейвлет-перетворення містять інформацію про енергію окремих компонент електрокардіографії сигналу і про час їх появи. Це дозволяє одночасно досліджувати повільну і швидку динаміку змін кардіосигналу у часі.

Широко застосовується вейвлет-аналіз до дослідження електрокардіограми плоду з абдомінальних сигналів матері. Метод дозволяє усунути шуми та очистити абдомінальний сигнал від головної високоамплітудної перешкоди — ЕКГ матері. Сигнал абдомінальної ЕКГ за допомогою дискретного вейвлет-розкладу представляється у вигляді суми апроксимуючої складової та деталізуючих складових [рис 6].

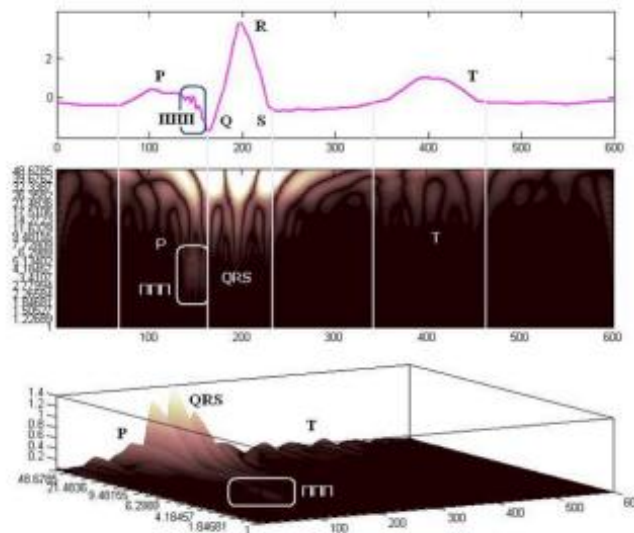


Рис. 6. Вейвлет-розклад моделі ЕКГ (Джерело: [14])

До переваг цього методу можна віднести те, що він дуже легко дозволяє реалізувати можливість поступового «проявлення» зображення при передачі його по мережі. Крім того, оскільки на початку зображення ми фактично зберігаємо його зменшену копію, то це спрощує його показ по заголовку. На відміну від JPEG і фрактального алгоритмів

цей метод не оперує блоками, наприклад 8x8 пікселів. Точніше ми оперуємо блоками 2x2, 4x4, 8x8 і так далі. Проте за рахунок того, що коефіцієнти для цих блоків ми зберігаємо незалежно, є можливість досить легко уникнути дроблення зображення на мозаїчні квадрати [12].

За останні декілька років вейвлет-перетворення стало відоме як потужний інструмент для стиснення зображень. Відомі різноманітні підходи, що мають справу з кодуванням за допомогою вейвлетів. Ефективність кодування з перетворенням по суті залежить від стиснення енергії дворівневим вейвлет-перетворенням [9, 16]. Створення нової системи функцій «вейвлетів» здійснило справжню революцію в теорії обробки та збереження сигналів, дозволяючи стискати інформацію в 100 -150 разів без суттєвої втрати якості. Це і є головним призначенням та досягненням використання вейвлет-перетворень [9].

Отже, проаналізувавши основні характеристики методів стиснення графічної інформації з втратами представимо результати порівняння у таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняння основних характеристик методів стиснення графічної інформації з втратами

Назва методу	Основні характеристики методу	Переваги та недоліки методу
JPEG	Відсутність різких границь	<i>Переваги:</i> Гарна якість відновленого зображення
		<i>Недоліки:</i> Ефект Гібса. Відсутність автоматичного перетворення для множини випадків
JPEG 2000	Відсутність різких границь	<i>Переваги:</i> покращена якість зображення при значній величині стиснення, підтримка
JPEG 2000	Відсутність різких границь	стиснення без втрат, підтримка стиснення однобітових (2-кольорових) зображень
		<i>Недоліки:</i> Відсутність автоматичного перетворення для множини випадків
Фрактальний	Повноколірні зображення і градації сірого	<i>Переваги:</i> Високий коефіцієнт стиснення, висока швидкість зворотного перетворення можливість подальшого структурного аналізу зображення, розмір фізичних даних, які використовуються для запису фрактальних кодів, значно менший розміру початкових растрових даних.
		<i>Недоліки:</i> низька швидкість стиснення, через що метод метод застосовують порівняно рідко
Wavelet (рекурсивний стиск)	Стиснення кольорових та чорно-білих зображень із плавними переходами	<i>Переваги:</i> можливість стиснення інформації без суттєвої втрати якості
		<i>Недоліки:</i> їх відносна складність

Висновки. Отже, проаналізувавши методи стиснення графічної інформації, можна виявити широкий спектр різних вимог та обмежень до зображення для його компактного представлення. Дослідили, що основними вимогами до універсальних методів компактного представлення зображень є високі ступінь стиску, якість стиснутого зображення та швидкість компресії/декомпресії, а також врахування індивідуальної специфіки зображення.

У результаті дослідження виявили, що методи стиснення зображень з втратами мають значно кращі показники стиснення у порівнянні з іншими існуючими методами.

В багатьох ситуаціях невеликі втрати даних допустимі та компенсуються зростанням ступеню стиснення. Вважаємо, що серед досліджених методів стиснення з втратами фрактальний метод є найбільш перспективним для подальшого розвитку, вдосконалення та практичного використання в комп'ютерних технологіях. Він має декілька унікальних особливостей та переваг: відновлення зображення відбувається набагато швидше, відсутні спотворення на границі різких переходів кольорів, можливість використання даного методу для стиснення зображень, які готують для якісного друку, а також масштабування зображень.

Зараз існує багато методів стиснення зображень, деякі з них стандартизовані. Описані стандартні методи та їх комбінації не дають однозначної відповіді про те, які з них найкращі. Все залежить від конкретних вимог до відновленого після стиску зображення, наявного апаратного та програмного забезпечення.

Отже, досягти великих коефіцієнтів стиснення, використовуючи один метод (крім фрактального), практично неможливо. Тому ефективно кодування зображень виконується із застосуванням декількох методів за декілька етапів. Ця концепція і покладена в основу стандартів, розроблених міжнародною організацією по стандартизації (International Organization for Standardization –ISO).

ЛІТЕРАТУРА

1. Bindu K., Ganpati A., Sharma A. K. A Comparative Study of Image Compression Algorithms // *International Journal of Research in Computer Science*. 2012. вип. 5 Т. 2. С. 37-42.
2. Gunasheela, K.S., & Prasantha, H.S. Satellite image compression-detailed survey of the algorithms. // *In Proceedings of International Conference on Cognition and Recognition*, Springer, Singapore. 2018. С. 187-198.
3. Mohammadpour T.I., Mollaei M. R. K. ECG Compression with Thresholding of 2-0 Wavelet Transform Coefficients and Run Length Coding. // *European Journal of Scientific Research*. 2009. вип. 27, С. 248-257.
4. Viola I., Řeřábek M., Bruylants T., Schelkens P., Pereira F, & Ebrahimi T. Objective and subjective evaluation of light field image compression algorithms // *In 2016 Picture Coding Symposium (PCS)*, IEEE. 2016. С. 1-5.
5. Welstead S.T. Fractal and wavelet image compression techniques // Spie Press. 1999. вип. 40.
6. ZainEldin H., Elhosseini M.A., & Ali H. AImage compression algorithms in wireless multimedia sensor networks: A survey // *Ain Shams Engineering Journal*. 2015. вип. 6 Т. 2. С. 481-490.
7. Афанасьев Д. Систематизация методов стиснення цифрових зображень // *Сучасне репродукування: інжиніринг, моделювання, мульти- та кросмедійні технології*. 2018. С. 24-29.
8. Винокуров С.В. Эффективный алгоритм фрактального сжатия изображений с использованием пространственно-чувствительного хеширования [Текст] / С.В. Винокуров// *Открытое образование*. 2006. Т.4, № 57. С. 62-70.
9. Гармаш В.В., Кулик А.Я. Вейвлет-фільтр для стиснення зображень. // Підсекція 6.2, м. Вінниця, С. 371.
10. Глухов В.С., Хомиць В.М. Підхід до стиснення зображень без втрат методом JPEG-LS. // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: *Комп'ютерні системи та мережі*. 2017. вип. 881. С. 32-40.
11. Гриньов Д.В., Закіров З.З. Методи стиснення зображень в системах цифрової обробки даних. // *Системи обробки інформації*. 2010. вип. 2. Т. 83. С. 66-70.
12. Зубко, Р.А. Алгоритми стиснення зображень. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013 вип. 1. Т.2, С. 40-44.
13. Зубко Р.А. Стиснення зображень фрактальним методом. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. вип.6. Т.2. С 23-28.
14. Калюга Б.В., Задерей Н.М. Застосування вейвлет-перетворення в сучасній науці та техніці. // *Наукові записки молодих учених*. 2019. вип. 4.
15. Корпань Я.В. Методи та алгоритми компактного представлення графічної інформації в комп'ютерних системах. // *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. вип.3. Т. 2. С. 32-36.
16. Ситников В.С., Биленко А.А. Классификация вейвлет-функций. // *Труды Одесского политехнического университета*. 2008. вип.1. С. 168-170.

REFERENCES

1. Bindu, K., Ganpati, A., & Sharma, A. K. (2012). A comparative study of image compression algorithms. *International Journal of Research in Computer Science*, 2(5), 37.
2. Gunasheela, K. S., & Prasantha, H. S. (2018). Satellite image compression-detailed survey of the algorithms. In *Proceedings of International Conference on Cognition and Recognition* (pp. 187-198). Springer, Singapore.

3. Mohammadpour, T. I., Mollaei, M. R. K., "ECG Compression with Thresholding of 2-0 Wavelet Transform Coefficients and Run Length Coding", Euro. J. Sci. Research, vol-27, pp 248-257,2009.
4. Viola, I., Řeřábek, M., Bruylants, T., Schelkens, P., Pereira, F., & Ebrahimi, T. (2016, December). Objective and subjective evaluation of light field image compression algorithms. In *2016 Picture Coding Symposium (PCS)* (pp. 1-5). IEEE.
5. Welstead, S. T. (1999). *Fractal and wavelet image compression techniques* (Vol. 40). Spie Press.
6. ZainEldin, H., Elhosseini, M. A., & Ali, H. A. (2015). Image compression algorithms in wireless multimedia sensor networks: A survey. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 481-490.
7. Afanasyev, D. (2018). Systematyzatsiya metodiv stysnennya tsyfrovyykh zobrazhen' [Systematization of digital image compression methods].
8. Vinokurov, S.V. (2006) Effektivnyy algoritm fraktal'nogo szhatiya izobrazheniy s ispol'zovaniyem prostranstvenno-chuvstvitel'nogo kheshirovaniya [An effective algorithm for fractal image compression using spatially sensitive hashing]. *Open education*. 4(57). P. 62–70.
9. Garmash, V.V., & Kulik, A. Ya. VEYVLET-FIL'TR DLYA STYSNENNYA ZOBRAZHEN' [WAVELET FILTER FOR COMPRESSION OF IMAGES]. Subsection 6.2, 371.
10. Glukhov, V.S., & Khomits, V.M. (2017). Pidkhid do stysnennya zobrazhen' bez vtrat metodom JPEG-LS [The approach to lossless image compression using the JPEG-LS method]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Computer Systems and Networks*, (881), 32-40.
11. Grinyov, DV, & Zakirov, ZZ (2010). Metody stysnennya zobrazhen' v systemakh tsyfrovoyi obrobky danykh [Methods of image compression in digital data processing systems]. *Information processing systems*, (2), 66-70.
12. Zubko, R.A. (2013). Alhorytmy stysnennya zobrazhen' [Image compression algorithms]. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, 1 (2), 40-44.
13. Zubko, R.A. (2014). Stysnennya zobrazhen' fraktal'nym metodom. [Compression of images by fractal method]. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, (6 (2)), 23-28.
14. Kaluga, B.V., & Zaderey, N.M. (2019). ZASTOSUVANNYA VEYVLET-PERETVORENNYA V SUCHASNIY NAUTSI TA TEKHNISSI [APPLICATION OF WAVELET TRANSFORMATION IN MODERN SCIENCE AND TECHNOLOGY]. *Scientific notes of young scientists*, (4).
15. Korpan, Ya.V. (2015). Metody ta alhorytmy kompaktnoho predstavleniya hrafichnoyi informatsiyi v komp'yuternykh systemakh. [Methods and algorithms for compact representation of graphic information in computer systems]. *Technological audit and production reserves*, (3 (2)), 32-36.
16. Sitnikov, V.S., & Bilenko, A.A. (2008). Klassifikatsiya veyvlet-funktsiy [Classification of wavelet functions]. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, (1), 168-170

Olexander Gertsy¹, Nataliia Butryk²

¹ Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

² Personnel department, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

COMPARATIVE ANALYSIS OF COMPACT METHODS REPRESENTATIONS OF GRAPHIC INFORMATION

The main characteristics of graphic information compression methods with losses and without losses (RLE, LZW, Huffman's method, DEFLATE, JBIG, JPEG, JPEG 2000, Lossless JPEG, fractal and Wavelet) are analyzed in the article. Effective transmission and storage of images in railway communication systems is an important task now. Because large images require large storage resources. This task has become very important in recent years, as the problems of information transmission by telecommunication channels of the transport infrastructure have become urgent. There is also a great need for video conferencing, where the task is to effectively compress video data - because the greater the amount of data, the greater the cost of transmitting information, respectively. Therefore, the use of image compression methods that reduce the file size is the solution to this task. The study highlights the advantages and disadvantages of compression methods. The comparative analysis the basic possibilities of compression methods of graphic information is carried out. The relevance lies in the efficient transfer and storage of graphical information, as big data requires large resources for storage. The practical significance lies in solving the problem of effectively reducing the data size by applying known compression methods.

Keywords: *compression, method, image, transformation, characteristics.*