

УДК 004.932:004.627

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРТОГОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ КОМПРЕСІЇ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

О. П. Доренський

Кіровоградський національний технічний університет

dorensky@ukr.net

Проведено порівняльне дослідження найпоширеніших ортогональних перетворень для компресії цифрових зображень. Проаналізовано перетворення Карунена–Лоєва, Хаара, Волша–Адамара, Хартлі, дискретно-косинусне перетворення, їх суттєві недоліки та переваги для застосування у методах і алгоритмах стиснення й відновлення зображень. За результатами дослідження зроблено висновок про доцільність застосування дискретного перетворення Хартлі задля розробки ефективного методу компресії цифрових зображень.

Ключові слова: цифрове зображення, компресія, ортогональні перетворення.

The comparative research the most common orthogonal transformation for compressing digital images conducted. Analyzed in the article Karhunen–Loeve transform, Haar transform, Walsh–Hadamard transform, Discrete Hartley transform, discrete cosine transform, essential advantages and disadvantages for application in the methods and algorithms for image compression. According to the study concluded that it is appropriate to apply the discrete Hartley transform for developing an effective method of digital image compression.

Keywords: digital image, compression, orthogonal transformation.

Вступ

Сьогодні спостерігається стрімкий розвиток цифрової техніки та її обчислювальних можливостей. Кількість інформації, яка обробляється інфокомунікаційними системами, стрімко зростає. При цьому суттєво переважають графічні дані, які характеризуються значними обсягами. Таким чином, гостро постає завдання компактного представлення надвеликих даних, особливо цифрових зображень, які нагромаджуються й зберігаються на запам'ятовуючих пристроях, передаються каналами зв'язку. Її розв'язок забезпечить економію пам'яті обчислювальних систем і носіїв, суттєве зменшення навантаження на канали передачі даних, підвищення ефективності функціонування інформаційно-комунікаційних систем і мереж. Отже, технології компресії даних є цілком актуальними в умовах формування світового інформаційного простору.

Постановка проблеми

Компресія цифрових зображень належить до процедур перекодування, які здійснюються з метою зменшення обсягу даних та є необхідною для раціональнішого використання пристроїв зберігання інформації (пам'яті), а також передавання даних каналами зв'язку.

Одним з основних підходів, який використовується для компресії цифрових зображень, є перетворення вхідного масиву графічних даних (пікселів) та кодування перетворених значень [1]. Це забезпечує декореляцію зображення.

Переважаюча більшість перетворень ґрунтуються на перетвореннях Карунена–Лоєва, Волша–Адамара, Хаара, Фур'є, Хартлі, дискретно-косинусного перетворення.

Широке застосування ортогональних перетворень (ОП) пов'язане з їх здатністю концентрувати максимальну енергію вихідного зображення у мінімальній кількості спектральних коефіцієнтів. Це дозволяє обнуляти малі коефіцієнти без суттєвого спотворення зображення. З цього випливають значні компресійні можливості ОП, а, отже, їх дослідження й застосування є доцільним та перспективним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах [2–4] досліджено методи й алгоритми компресії зображень без втрат і з частковою втратою якості, найпоширеніші графічні формати даних, обґрунтовано переваги та запропоновано застосування тих чи інших ортогональних перетворень для стиснення зображень. Проте порівняльного дослідження найпоширеніших ОП для компресії цифрових зображень не здійснено, хоча саме за його результатами можливо обрати ОП, яке забезпечить ефективне стиснення й відновлення цифрових зображень. Таким чином, зазначена задача є актуальною і потребує розв'язку.

Постановка задачі

Мета роботи — порівняльне дослідження найпоширеніших ортогональних перетворень, їх трансформант, аналіз основних недоліків та переваг застосування для стиснення і відновлення зображень.

Розв'язок цієї науково-практичної задачі дасть можливість у подальшому розробити ефективний метод і алгоритм стиснення й відновлення цифрових зображень за заданими характеристиками.

Основна частина

З погляду декореляції статичного цифрового зображення найбільш ефективним є перетворення Карунена–Лоева [1] (ПКЛ), що є розкладанням зображення за власними векторами. ПКЛ володіє оптимальними базисними функціями для представлення блоків цифрового зображення. Але його застосування на практиці пов'язане з рядом проблем, оскільки здійснюється за власними (базисними) функціям, які є індивідуальними для кожного типу зображень.

Під час застосування ПКЛ досягається повна декореляція реальних зображень об'єктів, а коефіцієнти трансформанти монотонно зменшуються зі зростанням індексу коефіцієнтів. Це дозволяє отримати максимальну, порівняно з методами на основі інших ортогональних перетворень, компресію цифрових зображень. Проте для ПКЛ не існує швидкого алгоритму обчислення, що робить його суто теоретичним. Адже воно потребує виконання обчислень матриць власних значень та власних векторів для кожного вхідного інфопотоку, а, отже, вимагає значних арифметичних операцій. Це суттєво обмежує застосування даного перетворення і є перепорою до його апаратної реалізації. Саме тому воно часто досліджується за допомогою моделювання з метою визначення граничної ефективності інших перетворень при заданому середньоквадратичному відхиленні [5–6].

На відміну від ПКЛ базисні функції дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) та інших розглянутих нижче ортогональних перетворень є «стандартними», тобто їх не потрібно визначати, використовуючи для цього статистику зображень. Крім того, для ДПФ існує швидкий алгоритм, за яким здійснюється не більше $\log_2 N$ операцій множення і стільки ж операцій додавання.

Основним недоліком ДПФ є суттєве середньоквадратичне відхилення, що виникає під час відкидання високочастотних компонент трансформанти.

При порівнянні значень середньоквадратичних відхилень, що мають місце у випадках ПКЛ та ДПФ, видно, що в останньому ступінь компресії, обумовлений кількістю збережених коефіцієнтів при заданому середньоквадратичному відхиленні, істотно менший, ніж у першому. Пояснюється це тим, що високочастотні компоненти двовимірного спектра мають порівняно великі амплітуди, наявність яких зумовлена не змістом самого зображення, а необхідністю передачі стрибків яскравості, які виникають на межі переходу від лівого краю зображення до правого, та від верхнього до нижнього.

Слід відзначити важливий недолік ДПФ — необхідність проводити обчислення з комплексними числами [7].

З погляду практичної реалізації найбільш простими є перетворення Хаара (ПХ) та Уолша–Адамара (ПУА). Перше ґрунтується на базисі, в якому використовуються кусково-постійні функції. ПХ можна розглядати як процес дискретизації вихідного сигналу, при якому з переходом до наступного рядка вдвічі зменшується крок дискретизації. Приклад трансформанти блоку цифрового зображення наведено на рис. 1.

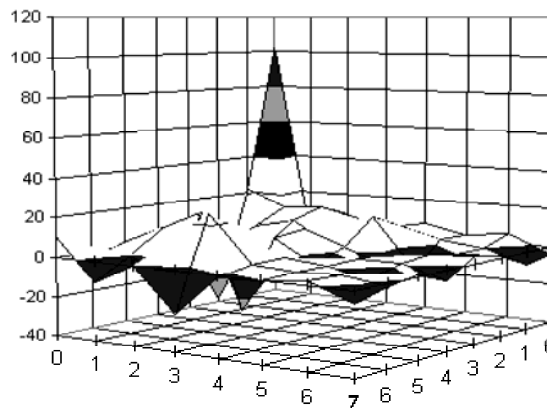


Рис. 1. Трансформанта ПХ для блоку зображення розмірності 8×8

До переваг існуючих методів компресії зображень на основі дискретного перетворення Хаара [5] слід віднести:

- динамічний діапазон трансформанти ПХ відповідає динамічному діапазону відліків зображення, тому не вимагає додаткових витрат пам'яті обчислювальної системи;
- коефіцієнти ПХ володіють глобальною та локальною чутливістю, що забезпечує їх роздільну здатність у частотній і часовій областях одночасно;
- високу обчислювальну ефективність;
- просту технічну реалізацію;
- забезпечення порівняно малого значення середньоквадратичного відхилення.

До основного недоліку використання перетворення Хаара можна віднести те, що під час його реалізації необхідно виконувати арифметичні операції.

На сьогодні в методах і алгоритмах компресії зображень часто застосовується дискретно-косинусне перетворення (ДКП). Варто зазначити, що методи компресії зображень на основі цього перетворення отримали широке розповсюдження й реалізовані, наприклад, у стандарті JPEG.

Для аналізу ДКП слід врахувати, що ряд Фур'є для будь-якої неперервної дійсної і симетричної (парної) функції містить тільки дійсні коефіцієнти, що відповідають косинусним членам

ряду. У відповідній інтерпретації цей результат можна поширити і на ДПФ зображень [5; 7]. Обчислення двовимірного перетворення Фур'є під час використання накладання крайніх елементів блоку призводить до непарного косинусного перетворення. Базисні функції непарного косинусного перетворення є роздільними, тож двовимірне непарне косинусне перетворення можна здійснювати з використанням одновимірних операцій, які виконуються послідовно.

Виконання двовимірного перетворення Фур'є під час побудови парних функціональних співвідношень шляхом прилаштування до блоку зображення його дзеркальних відображень призводить до парного косинусного перетворення.

На рис. 2 показано приклад трансформанти ДКП блока зображення.

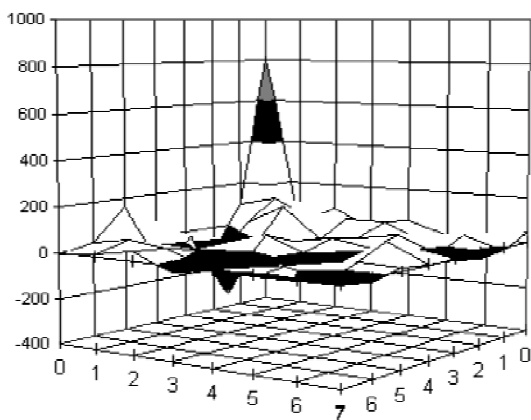


Рис. 2. Трансформанта ДКП для блока зображення розмірністю 8×8

До головних переваг існуючих методів компресії зображень на основі ДКП слід віднести:

- відповідність перетворенню Фур'є парних продовжених послідовностей, що усуває розриви на межах послідовності, а отже, її ряд Фур'є сходиться значно швидше;

- порівняно невелике значення середньоквадратичного відхилення відновлених зображень, за рахунок чого можлива побудова ефективних методів фільтрації й компресії цифрових зображень.

Водночас застосування ДКП має такі недоліки [5; 9]:

- динамічний діапазон трансформанти перевищує динамічний діапазон відліків зображення в кілька разів, що призводить до збільшення обсягу пам'яті обчислювальної системи під час переходу до спектрального подання за допомогою цього перетворення;

- усі коефіцієнти ДКП володіють глобальною чутливістю і відповідно роздільною здатністю виключно в частотній області.

Перетворення Уолша–Адамара можна розглядати як дискретний аналог безперервного пере-

творення за базисом, утворений з функцій Уолша [7–8]. Воно ґрунтується на квадратній матриці, елементи якої дорівнюють плюс або мінус одиниці, а рядки і стовпці утворюють ортогональні вектори. Рядки матриць ПУА можна розглядати як послідовність відліків прямокутних періодичних коливань, період яких кратний $1/N$, де N — кількість відліків. Таким чином, матриця Уолша–Адамара описує перетворення, що пов'язане з розкладанням блоків зображень за сімейством прямокутних базисних функцій. Приклад трансформанти ПУА блока зображення наведено на рис. 3.

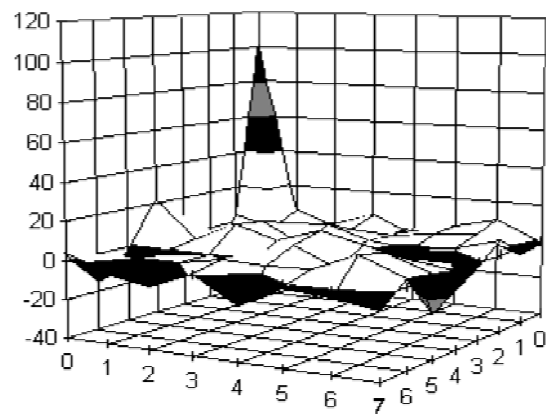


Рис. 3. Трансформанта ПУА для блока зображення розмірністю 8×8

Переваги існуючих методів компресії цифрових зображень на основі дискретного ПУА:

- перетворення має цілочислові дискретні значення базисних функцій, що визначає простоту його технічної реалізації і високу обчислювальну здатність;

- динамічний діапазон трансформанти ПУА відповідає динамічному діапазону відліків зображення, тому перехід до спектрального подання зображення за Уолшем не призводить до додаткових витрат пам'яті обчислювальної системи [7–8].

До суттєвих недоліків використання перетворення Уолша–Адамара належать:

- порівняно велике значення середньоквадратичного відхилення під час процесу відновлення зображення;

- усі коефіцієнти ПУА володіють глобальною чутливістю і відповідно мають роздільну здатність тільки в частотній області;

- для ПУА є характерною надчутливість до помилок округлення під час обчислення коефіцієнтів перетворення.

Наведені недоліки перетворення Уолша–Адамара накладають значне обмеження щодо його застосування у багатьох галузях цифрової обробки сигналів.

Модифікація перетворення Фур'є призвела до отримання перетворення Хартлі [10]. На відміну

від ПФ, в якому є дійсні й уявні числа та комплексна сума синусоїдальних функцій, перетворення Хартлі використовується виключно дійсні числа й дійсна сума синусоїдальних функцій.

Це перетворення застосовує введену функцію косеканс [10], яка визначається виразом $\text{cas}(\Theta) = \cos(\Theta) + \sin(\Theta)$, де Θ — змінна.

На рис. 4 подано приклад трансформанти дискретного перетворення Хартлі (ДПХ) для блока зображення.

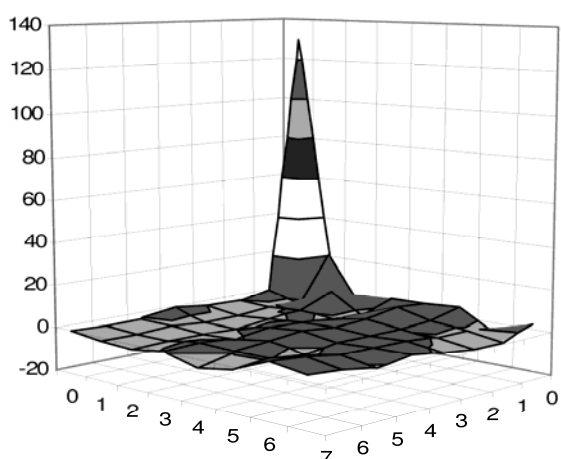


Рис. 4. Трансформанта перетворення Хартлі для блока зображення розмірністю 8×8

Оцінка значень трансформант перетворення Хартлі вказує на такі переваги ДПХ щодо кодування цифрових зображень [21]:

— трансформанта перетворення Хартлі дозволяє подолати високу структурну надмірність вихідного зображення;

— динамічний діапазон трансформант Хартлі менший за динамічний діапазон відліків зображення і, відповідно, обсяг пам'яті обчислювальної системи для зберігання трансформанти є значно меншим, ніж для зберігання вихідного блока цифрового зображення;

— перетворення Хартлі є інваріантним до різних видів зрушень;

— як видно з рис. 4, трансформанта перетворення Хартлі має досить «гладку» структуру, а отже, можна зробити висновок про ефективність застосування методів фільтрації й відбору коефіцієнтів дискретного перетворення Хартлі.

Водночас варто відзначити недолік ДПХ, який полягає у необхідності виконання дійсних арифметичних операцій.

Отже, наведені результати вказують на високі компресійні властивості трансформант перетворення Хартлі. Тож, є доцільним застосування дискретного перетворення Хартлі для розробки методу компресії статичних цифрових зображень.

Висновки

За результатами порівняльного дослідження наведених у статті ортогональних перетворень, які є найпоширенішими, впливає, що для компресії цифрових зображень доцільним є використання дискретного перетворення Хартлі [21]. Як показано в роботі, ДПХ, порівняно з іншими ортогональними перетвореннями, має ряд суттєвих переваг й дозволяє отримати трансформанту блока зображення з високими компресійними властивостями.

Перспективою подальших досліджень є розробка процедур фільтрації й відбору коефіцієнтів перетворення задля скорочення кількості елементів трансформанти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэлмон. — М. : Техносфера, 2004. — 317 с.
2. Ивашко А.В. К выбору оптимального целочисленного ортогонального преобразования для сжатия сигналов и изображений / А. В. Ивашко, М. В. Слободян // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» — 2011. — № 11. — С. 46–51.
3. Вальчук Д. О. Дослідження особливостей універсалізації технологій стиснення сигналів із різними щільностями / Д. О. Вальчук // Зв'язок — 2010. — № 1. — С. 70–74.
4. Смірнов О. А. Аналіз процесів стиснення та відновлення зображень на основі цифрових методів / О. А. Смірнов, О. П. Доренський, О. М. Дреєв // Наука і техніка Повітряних сил Збройних сил України. — 2013. — № 3(12). — С. 122–127.
5. Бохан К. А. Способы и средства двумерного преобразования изображений в базе Хаара: Дис... канд. техн. наук: 05.12.02. — Х., 2003. — 217 с.
6. Уинтц П. А. Кодирование изображений посредством преобразований / П. А. Уинтц // ТИИ-ЭР. — 1972. — № 7. — С. 69–110.
7. Залманзон А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / А. Залманзон. — М. : Наука, 1989. — 496 с.
8. Данюк Ю. В. Исследование базиса преобразования Уолша / Ю. В. Данюк, М. Н. Колмыков // Зб. наук. пр. Ін-ту ПМЕ ім. Г. Є. Пухова. — 2004. — №25. — С. 24–27.
9. Сойфер В. А. Методы компьютерной обработки изображений / В. А. Сойфер — М. : Физматлит, 2003. — 780 с.
10. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. Теория и практика: пер. с англ. / Р. Брейсуэлл. — М. : Мир, 1990. — 175 с.

REFERENCES

1. *Selomon D.* Data compression, image and sound / D. Selomon. — M. : Tekhnosfera, 2004. — 317 p.
2. *Ivashko A.V.* By choosing the optimal integer orthogonal transformation for signal and image compression / A. V. Ivashko, M. V. Slobodyan // Herald of the National Technical University “KhPI”, 2011. — № 11. — P. 46–51.
3. *Valtchuk D. O.* The research of universalization of the compression technology signals with different densities / D. O. Valtchuk // Zvyazok, 2010. — № 1. — P. C. 70–74,
4. *Smirnov O. A.* Analysis of the process and restoration of image compression based digital methods / O. A. Smirnov, O. P. Dorensky, O. M. Dreyev // Science and Technology of the Air Force of Ukraine. — № 3(12), 2013. — P. 122–127.
5. *Bokhan K. A.* Methods and means two-dimensional image conversion in the Haar basis, Dissertation 05.12.02, Kharkiv, 2003. — 217 p.
6. *Uints P. A.* Image coding by transformation / P. A. Uints // TIIEP, 1972. — № 7. — P. 69–110,
7. *Salmanson A.* The Fourier transform, Walsh, Haar and their application in management, communication and other fields / A. Salmanson. — M. : Nauka, 1989. — 496 p.
8. *Danyuk Y. V.* Research basis of Walsh / Y. V. Danyuk, M. N. Kolmykov // Collected papers Pukhov IAME, 2004. — № 25. — P. 24–27
9. *Soyfer V. A.* Methods of computer image processing / V. A. Soyfer. — M. : Fizmatlit, 2003. — 780 p.
10. *Bracewell R. N.* The Hartley Transform. Theory and practice: Translated from English / R. N. Bracewell. — M. : Mir, 1990. — 175 p.

Стаття надійшла до редакції 03.12.2013