

6. Приказ Министерства охраны здоровья Украины от 23.09.2009 г. № 687 “Об утверждении Инструкции по созданию и ведению Государственного кадастра природных лечебных ресурсов” [Электронный ресурс] / Законодательство Украины. – Режим доступа: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0154-10/> – Загл. с экрана
7. Обзор кадастров, которые функционируют в Украине [Электронный ресурс] / Единая служба правовой помощи 3222. – Режим доступа : http://3222.ua/ru/article/oglyad_kadastrv_yak_funktsonuyut_v_ukran.htm/ – Загл. с экрана.
8. Золотова, Е. В. Основы кадастра. Территориальные информационные системы [Текст] / Е. В. Золотова. – М. : Фонд МИР, Академический проспект, 2012. – 316 с.
9. Омелянець, С. Обґрунтування методичних підходів до розробки державного кадастру природних лікувальних ресурсів [Текст] / С. Омелянець, І. Мельник // Український бальнеологічний журнал. – 2004. – № 3,4. – С. 12–16.
10. Мещеряков, В. И. Создание кадастра природных лечебных ресурсов в системе мониторинга окружающей среды [Текст] / В. И. Мещеряков, А. В. Мокиенко, А. В. Козлов, В. В. Фоменко // Український гідрометеорологічний журнал. – 2013. – № 13. – С. 29–33.
11. Муртазов, А. К. Экологический мониторинг. Методы и средства [Текст] / А. К. Муртазов. – Рязань : Рязанский гос. университет им. С.А.Есенина, 2000. – 146 с.
12. Кузнецов, О. Л. Геоинформатика и геоинформационные системы [Текст] / О. Л. Кузнецов, А. А. Никитин, Е. Н. Черемисина. – М. : ВНИИгеосистем, 2005. – 453 с.
13. Петин, А. Н. Геоинформатика в рациональном недропользовании [Текст] / А. Н. Петин, П. В. Васильев. – Белгород : Изд-во БелГУ, 2011. – 268 с.
14. Киотский протокол к рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс] / Экологический синтезирующий центр «Восток». – Режим доступа: http://www.ecovostok.ru/agreements/conventions/climate_change.php
15. COPERT 4 – Общая информация [Электронный ресурс] / Emisia – Миссия по охране окружающей среды. – Режим доступа: <http://www.emisia.com/copert/> – Загл. с экрана.
16. Замарьева, В. В. ARCMAP – руководство пользователя. Под редакцией geoFAQ [Электронный ресурс] / Справочная система geoFAQ. – Режим доступа: <http://geofaq.ru/art/arcmap.htm>. – Загл. с экрана.
17. Степаненко, С. Н. Анализ функции плотности распределения концентрации в гауссовых моделях рассеяния примесей в атмосфере [Текст] / С. Н. Степаненко, В. Г. Волошин // Український гідрометеорологічний журнал. – 2008. – № 3. – С. 5–12.
18. Бызова, Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примесей [Текст] / Н. Л. Бызова, Е. Г. Гаргер, В. Н. Иванов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1991. – 273 с.

Досліджено фрактальний метод стиснення зображень. Розглянуті математична модель та класичний алгоритм кодування-декодування зображень цим методом. Проведено стислий аналіз варіантів оптимізації та підвищення швидкодії побудови систем ітеруючих функцій фрактального кодування зображень, їх ефективності та можливості практичного застосування

Ключові слова: стиснення зображень, фрактальний алгоритм, системи ітеруючих функцій, афінні перетворення

Исследован фрактальный метод сжатия изображений. Рассмотрены математическая модель и классический алгоритм кодирования-декодирования изображений этим методом. Проведен сжатый анализ вариантов оптимизации и повышения быстродействия построения систем итерирующих функций фрактального кодирования изображений, их эффективности и возможности практического применения

Ключевые слова: сжатие изображений, фрактальный алгоритм, системы итерирующих функций, аффинные преобразования

УДК 004.6
DOI: 10.15587/1729-4061.2014.33445

СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ФРАКТАЛЬНИМ МЕТОДОМ

Р. А. Зубко
Старший викладач
Кафедра інформаційних технологій
та програмування
Відкритий міжнародний університет
розвитку людини «Україна»
вул. Львівська, 23,
м. Київ, Україна, 03115
E-mail: RZubko@ukr.net

1. Вступ

Зображення, які представлені в цифровій формі, необхідно зберігати на носіях та передавати каналами зв'язку. Для економії пам'яті та більш ефективного використання ресурсів системи створюють

спеціальні алгоритми кодування. Зображення – це особливий вид даних, який має надлишковість в двох вимірах, що дає додаткові можливості для стиснення. Завдяки цьому такі алгоритми кодування зображень можуть мати дуже високі коефіцієнти ущільнення.

Одним із перспективних методів кодування є стиснення зображень з використанням фрактальної графіки. Фрактальне кодування - це математичний процес для кодування растрів, які містять реальне зображення, в сукупність математичних даних, що описують фрактальні властивості зображення. Цей вид кодування заснований на тому, що усі природні і більшість штучних об'єктів містять надмірну інформацію у вигляді однакових малюнків, що повторюються [1]. Вони отримали назву фракталів.

Фрактал - це структура, яка складається з подібних форм і малюнків, що зустрічаються в різних розмірах. Цей термін уперше застосував Бенуа Мандельброт (Benoit Mandelbrot) для опису малюнків, що повторювались, які він спостерігав в багатьох різних проявах. Ці малюнки виглядали майже ідентичними за формою та зустрічались в усіх предметах. Мандельброт також виявив, що фрактали можна описувати математично і створювати за допомогою дуже простих алгоритмів і незначної кількості даних [2].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Початок у розробці фрактального методу поклали дослідження Майкла Барнслі (Michael Barnsley) у 1988 році. Він відкрив клас теорем, що дозволили ефективно стискати зображення. Барнслі назвав метод «фрактальним перетворенням» (Fractal Transform). При цьому кодується по суті не саме зображення, а алгоритм його побудови [3, 4]. Метод базується на певній особливості реальних зображень, яка полягає в тому, що в них з невеликими варіаціями багаторазово повторюються окремі самоподібні фрагменти. Наприклад, листя в кроні дерева, вікна в будівлі, пішоходи на вулиці, луска на рибі, межі між темними і світлими ділянками зображення, як це показано на рис. 1. І хоча ці фрагменти відрізняються між собою в деталях, проте, в них багато спільного [5]. Це був практично перший алгоритм, застосований для математичного опису реального растрового зображення через його фрактальні властивості.

Фрактальне кодування широко використовується для перетворення растрових зображень у фрактальні коди. Фрактальне декодування є зворотним процесом, в якому система фрактальних кодів перетворюється в растр.

На ступінь фрактального стиснення помітний вплив чинять вміст і розподільна здатність початкового растру. Зображення з великою кількістю фрактальних елементів (наприклад, портрети, пейзажі і складні текстури) характеризуються вищою мірою стиснення, чим зображення з низьким вмістом таких елементів (графіки, схеми, текст і прості текстури). Зображення з високою розподільною здатністю можна стискати з великим ступенем компресії, не впливаючи на їх якість. Для збереження високої якості зображень з низькою розподільною здатністю підсумковий ступінь стиснення має бути набагато меншим. Відмітимо, що зображення з більшою бітовою глибиною (наприклад, 24-бітові кольорові зображення) стискаються ефективніше, ніж зображення з меншою кількістю бітів на пиксель (зокрема, 8-бітові півтонові) [1].

Процес кодування вимагає дуже великого об'єму обчислень. Для пошуку фрактальних малюнків в

зображенні потрібні мільйони, навіть мільярди ітерацій. Залежно від розподільної здатності і змісту вхідних растрових даних, якості зображення, часу стиснення і розміру файлу процес стиснення одного зображення може зайняти від декількох секунд до декількох годин (і більше) навіть на дуже швидкодіючому комп'ютері [1].



Рис. 1. Самоподібні фрагменти зображення.

Декодування фрактального зображення – процес набагато простіший, оскільки уся трудомістка робота була виконана при пошуку усіх фракталів під час кодування. В процесі декодування треба лише інтерпретувати фрактальні коди, перетворивши їх в растрове зображення.

Фрактальний метод стиснення зображень відноситься до групи методів стиснення з втратами інформації. Це означає що, у разі його застосування відновлене зображення буде відрізняється від початкового на величину шуму перетворення, хоча ця відмінність може бути дуже малою. Процес порівняння фракталів не передбачає пошуку точної їх відповідності. Замість цього шукається «найкраща» відповідність на підставі параметрів стиснення (часу кодування, якості та розміру вихідного зображення). Процесом кодування, проте, можна керувати, доводячи його до стану, в якому зображення «візуально не має втрат». Тобто, користувач не повинен бачити погіршення зображення.

Фрактальне кодування відрізняється від інших методів стиснення з втратами. Метод JPEG забезпечує ущільнення, відкидаючи ті компоненти зображення, які не важливі для сприйняття людським оком. Отримані в результаті дані надалі обробляються за допомогою методу стиснення без втрат. Для досягнення високої міри стиснення необхідно відкидати більше даних, що призводить до погіршення якості зображення і появи дискретних (блокових) ділянок.

Фрактальні зображення не будуються на базі растру, а кодування не порівнюється з візуальними характеристиками людського ока. Навпаки, растрові дані відкидаються, якщо необхідно створити найкращий фрактальний малюнок. Високий ступінь стис-

нення досягається шляхом виконання великого об'єму перетворень і обчислень, що може погіршити якість зображення, проте завдяки фрактальним компонентам спотворення не такі помітні.

Більшість інших методів стиснення з втратами за своїми характеристиками симетричні. Це означає, що вони засновані на використанні конкретної послідовності операцій, які при розпаковуванні виконуються в зворотному порядку. На стиснення і розпаковування потрібно приблизно однакового часу. 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. Так, випущена у 1997 році фірмою Microsoft енциклопедія Encarta вміщує на одному компакт-диску велику кількість текстової інформації та ілюстрована близько сімома тисячами фотографій, які закодовані саме цим методом.

Фрактальний метод кодування зображень забезпечує коефіцієнти стиснення, що становлять від п'ятидесяти до п'ятисот разів залежно від типу зображення і допустимого рівня шуму перетворення. Такі коефіцієнти стиснення разом з високою швидкістю декодування роблять цей метод привабливим у використанні. Сам процес, що використовується деякими фрактальними пакетами, включаючи Fractal Transform Майкла Барнслі, вважається патентованим [1].

Проблемам оптимізації фрактального стиснення цифрових зображень присвячена велика кількість досліджень зарубіжних учених [6–11]. Слід відмітити роботу С. В. Винокурова [10], у якій розглянуто алгоритм фрактального стиснення 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 сьогоднішній день залишається питання побудови швидкодіючих алгоритмів фрактальної компресії.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження та аналіз перспективних алгоритмів фрактального кодування зображень, а також можливості покращення коефіцієнтів стиснення.

Для досягнення поставленої мети :

- проаналізувати аспекти та особливості застосування фрактального методу стиснення зображень;
- оцінити переваги та недоліки алгоритму фрактального кодування;
- запропонувати варіанти оптимізації та підвищення швидкодії стиснення зображень з використанням фрактальної графіки.

4. Математична модель кодування-декодування зображень фрактальним методом

Серед різноманітних методів кодування фрактальний метод дозволяє отримувати найбільші коефіцієнти стиснення. З фізичної точки зору фрактальне

кодування ґрунтується на твердженні, що зображення містить афінну надлишковість. Математична модель, яка використовується при фрактальному стисненні зображень, називається системами ітеруючих функцій (Iterated Function Systems – IFS) [12]. Системи ітеруючих функцій містять набір стискаючих перетворень ω_i , які можливо задати так:

$$W(S) = \bigcup_{i=1}^n \omega_i(S), \quad (1)$$

де S – зображення; ω_i – набір стискаючих перетворень.

Відповідно до теореми Банаха [13], існує певний клас відображень, які називаються стискаючими і для них справедливо таке твердження: якщо до якогось зображення f_0 ми почнемо багаторазово застосовувати відображення W таким чином, що:

$$f_1 = W(f_1), f_i = W(f_{i-1}), \quad (2)$$

то в межі при i , що прямує до нескінченності, ми отримаємо таке саме зображення незалежно від того, яке зображення ми взяли за f_0 :

$$f = \lim_{i \rightarrow \infty} f_i. \quad (3)$$

Зображення f називається нерухомою точкою перетворення W або аттрактором.

В якості перетворень w_i використовуються афінні відображення:

$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_i & b_i & 0 \\ c_i & d_i & 0 \\ 0 & 0 & S_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ O_i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де a_i, b_i, c_i, d_i – афінні коефіцієнти деформації, стиснення, обертання; dx, dy – коефіцієнти переміщення; x, y – координати точки, що перетворюється; z – її інтенсивність.

Параметр S_i керує контрастністю, а O_i – яскравістю зображення. Знаючи коефіцієнти цих перетворень, ми можемо відновити початкове зображення [12].

Алгоритм фрактального кодування зображень можна описати так. Процес 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. 2. Домени повинні включати характерні фрагменти, які надалі використовуються для побудови декодованого зображення. Після цього починається кодування зображення шляхом підбору для кожної рангової області найбільш відповідного домена, за допомогою якого розподіл яскравості в ранговій області може бути апроксимований розподілом яскравості в домені. Для того, щоб отримати найкращу апроксимацію, домени піддаються афінним перетворенням, в результаті яких відбувається не лише їх геометрична деформація, але і зміни контрасту та яскравості. Якщо розподілом яскравості в перетвореному домені не вдасться досягти задовільної апроксимації розподілу яскравості в ранговій області, рангова область ділиться на чотири частини і про-

цес повторюється. Якість необхідної апроксимації задається у вигляді допустимого значення середнього квадрата помилки апроксимації (середнього квадрата невідповідності). Номери доменів, використаних при кодуванні кожної рангової області, а також коефіцієнти афінних перетворень стискаються шляхом кодування ентропії і записуються у файл. Файл стисненого зображення містить заголовок з інформацією про розташування рангових областей і доменів, а також таблицю ефективно упакованих афінних коефіцієнтів для кожної рангової області.

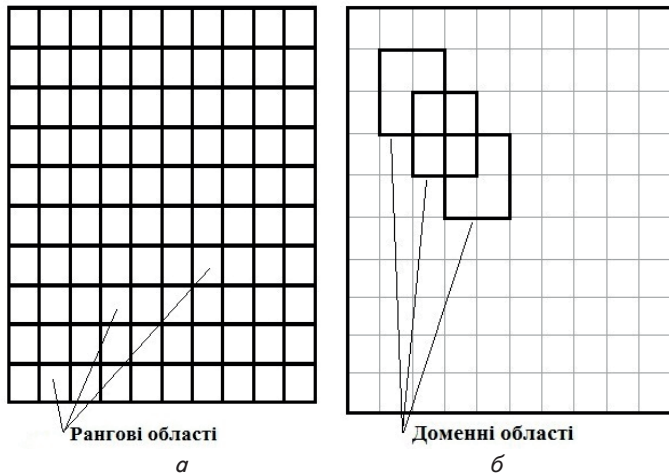


Рис. 2. Розподіл на зображенні: а – рангових областей; б – доменних областей

Одна з можливих схем кодування зображень фрактальним методом, запропонована Арно Жакуїном (Arnaud Jacquin) [14, 15], містить такі етапи:

- Зображення розділяється на примикаючі одна до одної області розміром $N \times N$ (рангові області).
- Задається набір доменних областей. Доменні області можуть перекриватись, вони не повинні обов'язково закрити всю поверхню зображення. Розміри доменних областей звичайно вибирають $2N \times 2N$. Для кожної рангової області підбирається доменна область, яка після афінних перетворень найбільш точно апроксимує рангову область. На практиці застосовується вісім варіантів відображення одного квадрата в інший з використанням афінних перетворень. Це повороти зображення на кути 0, 90, 180, 270 градусів відносно його центра і перетворення симетрії відносно ортогональних осей, які проходять через центр фрагменту перпендикулярно його сторонам.
- Точність апроксимації F визначається за допомогою середньоквадратичного критерію:

$$F = \sum_{ij} (Sd_{ij} + O_{ij} - r_{ij})^2, \tag{5}$$

де d_{ij} – значення, отримані в результаті усереднення по фрагментах з розмірами 2×2 елементів доменної області, що приводить її розмір до розміру рангової області; r_{ij} – значення елементів рангової області; O_{ij} – зміщення, може бути як константою так і описуватись поліномами першого, другого або третього порядків.

Приврівнявши до нуля часткові похідні від виразу (5) по S і O

$$\frac{dF}{dS} = 0, \frac{dF}{dO} = 0, \tag{6}$$

знайдемо значення S і O , при яких досягається мінімум виразу (5):

$$O = \frac{1}{n^2} \left(\sum_{ij} r_{ij} - S \sum_{ij} d_{ij} \right), \tag{7}$$

$$S = \frac{n^2 \sum_{ij} r_{ij} d_{ij} - \sum_{ij} r_{ij} \sum_{ij} d_{ij}}{n^2 \sum_{ij} d_{ij}^2 - \left(\sum_{ij} d_{ij} \right)^2}. \tag{8}$$

Доменні блоки звичайно вибирають з кроком $n/2$ при $n=4$. У вихідний файл записуються такі параметри:

- координати доменної області з найменшим значенням F_{min} ;
- значення O і S , отримані згідно виразів (7, 8);
- номер афінного перетворення.

Алгоритм декодування полягає в тому, що беруться два екземпляри одного і того ж зображення А і Б, розподіл яскравості в яких неважливий. На цих зображеннях виділяються області, межі яких співпадають з межами рангових областей і доменів, а потім, використовуючи відомі значення афінних коефіцієнтів, по доменах, виділених на зображенні Б, знаходяться розподіли яскравості в рангових областях зображення А. Після цього зображення А і Б міняються місцями і операція повторюється. Можна показати, що при багатократному повторенні цієї операції розподіл яскравості в зображеннях А і Б наблизатиметься до розподілу яскравості в початковому зображенні. Звернемо увагу на те, що алгоритми стиснення і декомпресії асиметричні. Слід також відмітити, що процес стиснення вимагає набагато більше часу, чим процес декомпресії.

Декодування стисненого зображення носить ітеративний характер і складається з таких етапів [12]:

- Створюються два зображення однакового розміру А і Б. Розмір цих зображень не обов'язково рівний розміру початкового зображення, початковий малюнок областей А і В будь-який.
- Зображення Б розбивається на рангові області так як на першій стадії процесу стиснення. Для кожної рангової області зображення Б виконується афінне перетворення відповідної доменної області зображення А і результат поміщається в Б.
- Виконуються операції ідентичні попередньому пункту, тільки зображення А і Б міняються місцями.
- Багатократно повторюються другий і третій кроки до тих пір поки зображення А і Б не стануть нерозрізненими.

5. Аналіз методів оптимізації фрактального стиснення зображень

Для підвищення швидкодії та ефективності фрактального кодування зображень використовують ряд методів оптимізації. Найпростіший і найповільніший

спосіб фрактального кодування є перевірка кожного доменного блоку і виконання обчислень згідно виразів (5), (7), (8). Такий спосіб називається повним пошуком або повним перебором. При кодуванні зображень природного походження можна підвищити швидкодію кодування, прийнявши $S=1$, оскільки враховуючи статистику зображень завжди знайдеться доменний блок, який апроксимує заданий ранговий блок з необхідною точністю. Тоді з виразів (5), (7) одержимо:

$$F = \sum_{ij} (d_{ij} + O_{ij} - r_{ij})^2, \quad (9)$$

$$O = \frac{1}{n^2} \left(\sum_{ij} r_{ij} - \sum_{ij} d_{ij} \right). \quad (10)$$

Контрастність декодованого зображення може бути відновлена іншими методами. Таке спрощення дозволяє знизити кількість арифметичних операцій на 60 % і відповідно підвищити швидкість стиснення.

Найбільш відомі методи підвищення швидкодії кодування зображень фрактальним методом:

1. Пошук доменних блоків, для яких F не перевищує заданого значення.

2. Локальний та сублокальний пошук.

3. Ізометричне передбачення.

4. Класифікація доменних і рангових блоків; ранговий порівнюється з доменними блоками того ж самого класу.

Серед методів необхідно відмітити класифікацію, що запропонував Арно Жакуін [12, 16]. Вона ґрунтується на топології блоків і передбачає:

– блоки без контурів;

– блоки, інваріантні до орієнтації (текстурні блоки);

– контурні блоки (виконується повний перебір).

6. Висновки

В результаті аналізу аспектів та особливостей застосування фрактального методу стиснення зображень, можемо зробити висновки, що він здатний забезпечити найкраще співвідношення ступеня стиснення і

якості відновленого зображення і має хороші перспективи для подальшого розвитку. Стало зрозуміло, що в процесі перетворення звичайних растрових зображень у фрактальні дані відразу ж реалізуються кілька суттєвих переваг. Наприклад, можливість масштабувати фрактальне зображення без появи артефактів і втрати деталей, як це характерно для растрових зображень. Цей процес не залежить від розподільної здатності початкового зображення і масштаб обмежується тільки об'ємом вільної пам'яті комп'ютера. Ще одна перевага полягає в тому, що розмір фізичних даних, які використовуються для запису фрактальних кодів, значно менший розміру початкових растрових даних. Саме ця відмінність фрактальної технології, що називається фрактальним стисненням, викликала найбільший інтерес у сфері формування і відтворення комп'ютерних зображень.

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. Процес ітераційного декодування не є простою інверсією процедур стиснення і вимагає значно менше часу для його виконання, що дає можливість уже тепер використовувати цей метод для компактного зберігання зображень на різних носіях інформації.

Пропонуються варіанти оптимізації та підвищення швидкодії стиснення зображень з використанням фрактальної графіки. Оптимізація дозволить зменшити час стиснення зображень без суттєвого погіршення якості. Нажаль, запропоновані методи не повністю вирішують проблему підвищення швидкодії фрактального стиснення зображень. Тому перед дослідниками відкриваються можливості покращення ефективності та пошуку інших способів оптимізації фрактального кодування.

Література

1. Мюррей, Д. Энциклопедия форматов графических файлов [Текст] / Д. Мюррей, У. ван Райпер; пер. с англ. – К.: Издательская группа ВHV, 1997. – 672 с.
2. Бенуа, Б. Мандельброт. Фрактальная геометрия природы [Текст] / Б. Бенуа. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 666 с.
3. Ватолин, Д. Методы сжатия данных [Текст] / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: Диалог-МИФИ, 2002. – 381 с.
4. Барнсли, М. Фрактальное сжатие изображений [Текст] / М. Барнсли, Л. Ансон // Мир ПК. – 1992. – № 10. – С. 52–58.
5. Красильников, Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений [Текст]: уч. пос. / Н. Н. Красильников. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 608 с.
6. Ватолин, Д. С. Использование ДКП для ускорения фрактального сжатия изображений [Текст] / Д. С. Ватолин // Программирование. – 1999. – № 3. – С. 51–57.
7. Карпов, П. М. Быстрый фрактальный алгоритм сжатия изображений [Текст] / П. М. Карпов. – Научная сессия МИФИ, 2006. – Т. 15.
8. Шабаршин, А. А. Метод фрактального сжатия изображений [Текст] / А. А. Шабаршин // Научные школы УПИ-УГТУ. – 1997. – № 1. – С. 70–82.

9. Винокуров, С. В. Методы повышения временной эффективности алгоритмов фрактального сжатия изображений [Текст]: матер. конф. // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики, сборник Информатика, 2005. – С. 53–59.
10. 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.
11. Осокин, А. Н. Исследование возможности распараллеливания процесса фрактального сжатия изображений [Текст] : сб. трудов VIII Всеросс. научно-практ. конф. / А. Н. Осокин, М. П. Шарабайко // Молодежь и современные информационные технологии. – Томск, 2010. – Т. 1, Ч. 2. – С. 212–213.
12. Майданюк, В. П. Методи і засоби комп'ютерних інформаційних технологій. Кодування зображень [Текст]: навч. пос. / В. П. Майданюк. – Вінниця: ВДТУ, 2001. - 65 с.
13. Краснов, М. Л. Интегральные уравнения: введение в теорию [Текст] / М. Л. Краснов. – М.: Наука, 1975. – 302 с.
14. Хуанг, Т. С. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений [Текст] / Т. С. Хуанг и др.; под ред. Т. С. Хуанга: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
15. Кунт М. Блочное кодирование графических материалов. Обзор [Текст] / М. Кунт, О. Джонсон // ТИИЭР. – 1980. – Т. 68, № 7. – С. 21–40.
16. Майданюк, В. П. та ін. Кодування зображень в комп'ютерних системах [Текст] / В. П. Майданюк та ін. – К.,1996. – 16 с.