

ФРАКТАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПОЛУТОНОВЫХ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Касаткин А.С., Шанцын Е.А., Мусихин В.В.

Введение

Постоянное возрастание объемов передаваемых данных требует усовершенствования прежних и разработку новых алгоритмов сжатия данных. Среди общего объема цифровых данных цифровые изображения занимают особое место. Связано это, во-первых, со статистическими характеристиками изображений, во-вторых, с психофизическим восприятием последних человеком.

В отличие от произвольного цифрового потока, представляемого в виде массива данных, поступающих на кодер, цифровое изображение правильнее представлять матрицей, обладающей пространственными корреляционными связями. Корреляционные характеристики, практически постоянные на всем интервале изображения, указывают на схожесть (предсказуемость) соседних элементов изображения. Чем выше корреляция пикселей изображения, тем меньше бит информации будет необходимо для их кодирования.

Однако использование одной статистической избыточности не позволяет достичь больших коэффициентов сжатия, например, кодирование файла bmp архиватором ZIP обычно дает сжатие в 1.5-3 раз. Поэтому все современные методы сжатия построены с учетом информационной избыточности изображения. Для качественного восприятия изображения достаточно его приближенной копии, задача кодера в этом случае состоит в выборе значащих составляющих изображения и эффективного их кодирования. Коэффициент сжатия в случае использования алгоритмов сжатия с частичной потерей данных при приемлемом восстановлении изображения достигает 20 раз и более.

Чем больше информации об изображении использует кодер, тем эффективнее происходит кодирование. Яркость или цветность в цифровом изображении передается посредством цепочки бит, поэтому наряду с пространственными корреляционными характеристиками в цифровом изображении присутствуют корреляционные связи между битами данных. Операции межбитовой обработки являются бинарными, т.е. могут быть аппаратно реализованы для ускорения процессов кодирования/ декодирования.

Рассмотрен вопрос эффективности представления цифрового изображения в виде набора битовых сечений и приведены результаты фрактальных бинарных алгоритмов кодирования динамических полутонных и статических цветных цифровых изображений.

Битовые сечения цифрового изображения

Разрядность является одной из характеристик цифрового изображения и показывает, сколько бит данных приходится на кодирование каждого пикселя изображения. Чаще всего на практике из-за простоты используют равномерную импульсно-кодую модуляцию, для кодирования полутонного цифрового изображения достаточно 8 бит данных, цветного изображения – 24 бита, по восемь бит на каждый цвет.

Битовое сечение представляет собой сечение цифрового изображения по соответствующему разряду. Старшим сечением является сечение по восьмому биту, младшим – по первому. Разбиение на битовые сечения позволяет выделить бинарные составляющие цифрового изображения. Старшие битовые сечения в основном передают крупные и средние объекты (низкочастотные составляющие) цифрового сигнала, с уменьшением разряда битового сечения величина передаваемых объектов уменьшается (частота составляющих сигнала увеличивается). Установлено [1], что наибольший вклад в восприятие человеком изображения оказывают низкочастотные сигналы, формирующие основу изображения.

Равномерное квантование по сравнению с неравномерным увеличивает избыточность цифрового изображения, т.к. для кодирования информации используется цепочка бит фиксированной большей длины. Возрастание избыточности приводит к усилению корреляционных связей между битовыми сечениями. Связи в первую очередь возрастают между старшими битами, постепенно ослабевая с уменьшением номера разряда. В битовых сечениях, особенно в соседних, наблюдается множество похожих областей, полностью совпадающих, повернутых на определенный угол или инвертированных (рис.1,б,в).

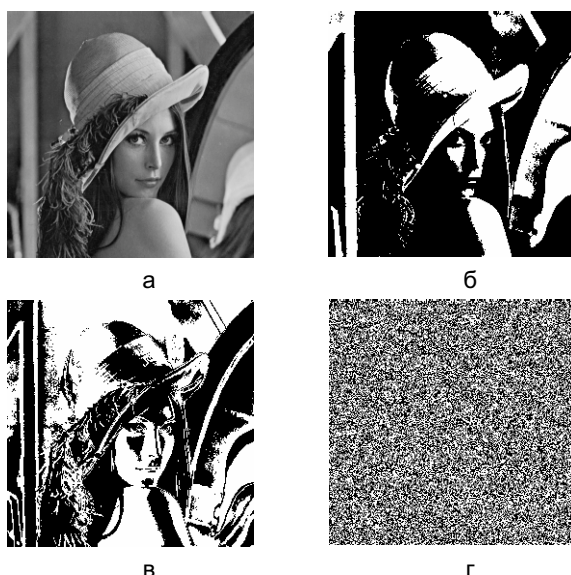


Рис.1

На рис.1 представлено полутоновое изображение «Лена» и его битовые сечения: 1,а – исходное изображение; 1,б – битовое сечение восьмого разряда; 1,в – битовое сечение седьмого разряда; 1,г – битовое сечение первого разряда.

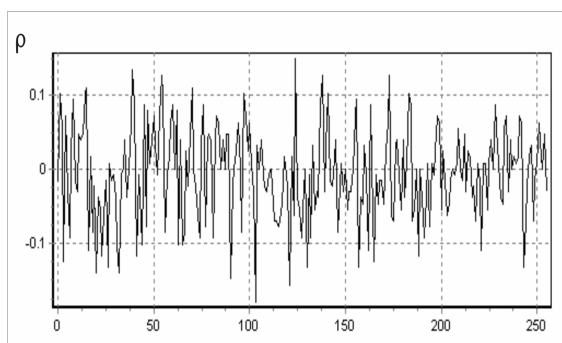
Было проведено исследование корреляционных характеристик изображения рис.1,а. Коэффициент корреляции в среднем между строками составлял 0,967, между столбцами – 0,934. Коэффициенты корреляции в сечениях старших и младших битов представлены в табл.1.

Таблица 1

Зависимость коэффициента корреляции

Коэффициент корреляции	Между строками	Между столбцами
8 бит	0.9102	0.8638
7 бит	0.8026	0.7240
2 бит	0.0051	0.0044
1 бит	0.0050	0.0000

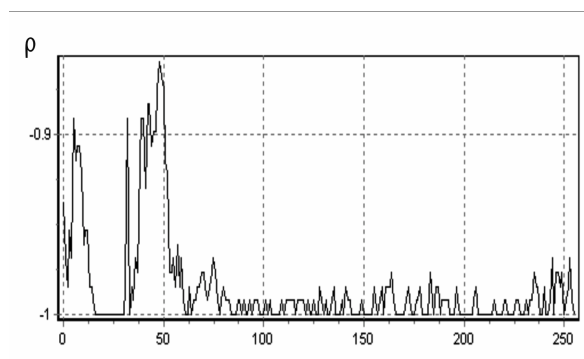
Корреляция между битовыми сечениями зависит от положения битовых сечений друг относительно друга и их разрядности. Наибольший коэффициент корреляции наблюдается между соседними старшими битовыми сечениями рис.2,в, практически все области инверсные с коэффициентом корреляции близким к -1.



а



б



в

Рис.2

На рис.2 представлены зависимость коэффициента корреляции между столбцами в битовом сечении цифрового изображения «Лена»: 2,а – зависимость коэффициента корреляции между столбцами 1 и 2 битовых сечений; 2,б – та же зависимость для 8 и 2 битовых сечений; 2,в – для 8 и 7 битовых сечений.

Уменьшение разрядности битовых сечений снижает коэффициент корреляции рис.2,а. Удаленность битовых сечений друг от друга также снижает совпадение бинарных областей рис.2,б.

Качество восстановленного из битовых сечений полутонового изображения зависит в первую очередь от точности восстановления старших битовых сечений, младшие (1-3 разряда) битовые сечения можно даже не восстанавливать, что заметно сократит вычислительные затраты и незначительно ухудшит качество восстановления.

Во время декодирования с целью повышения качества восстановленного изображения информацию о младших разрядах можно восстановить за счет аппроксимации яркостных составляющих изображения [4].

Битовые сечения в динамических полутоновых и статических цветных цифровых изображениях

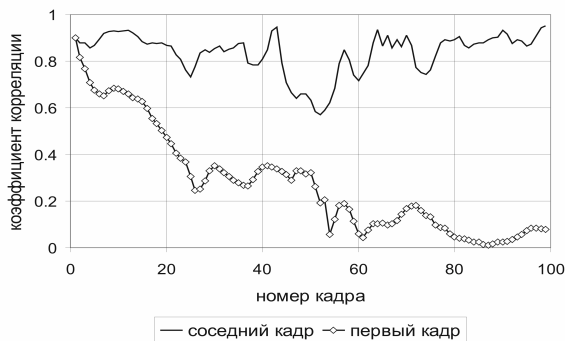
Корреляционные характеристики между битовыми сечениями не удастся описать простейшими линейными уравнениями, поэтому статистические связи довольно сложно прогнозировать и использовать при сжатии полутоновых изображений [3]. Более перспективным выглядит вариант использования корреляционных связей между битовыми сечениями в видеоизображениях и цветных изображениях.

Корреляционные характеристики полутоновых цифровых видеоизображений

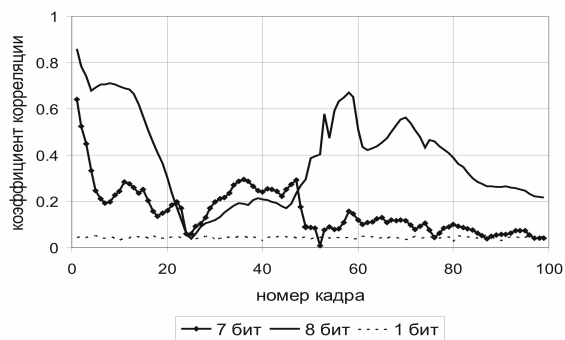
Видеоизображение представляет собой чередующийся с определенной скоростью набор статических изображений (кадров). Поэтому в видеоизображениях можно выделить пространственные корреляционные связи, ничем не отличающиеся от связей в статических изображениях рис.1, и временные корреляционные связи, определяющие большие коэффициенты компрессии при сжатии.



а



б



в

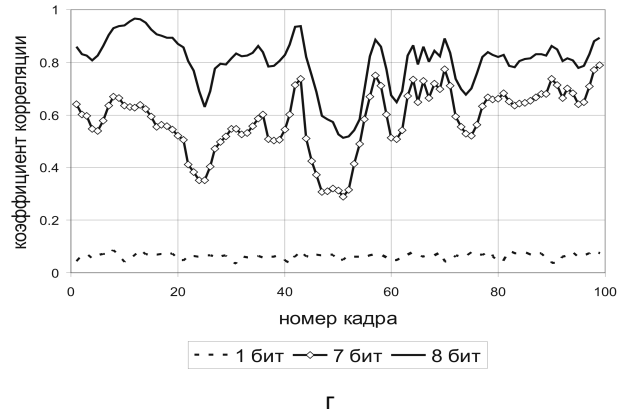


Рис.3

На рис.3 представлены корреляционные характеристики динамических изображений: 3,а – типовой кадр исследуемой видеопоследовательности; 3,б – зависимость коэффициента корреляции между кадрами полутонового видеоизображения; 3,в – зависимость коэффициента корреляции между битовыми сечениями (8, 7, 1 сечения) кадров видеоизображения при первом опорном кадре; 3,г – зависимость коэффициента корреляции между битовыми сечениями (8, 7, 1 сечения) кадров видеоизображения при соседнем опорном кадре.

На рис.3,а представлен типовой кадр исследуемой видеопоследовательности длительностью 100 кадров. Выбранная видеопоследовательность сочетала крупные объекты и довольно быструю съемку (динамику смены кадра). Исследовались две корреляционные зависимости: связь текущего кадра с первым (рис.3,б,в) и связь текущего кадра с соседним кадром (рис.3,б,г). Данные зависимости могут использоваться для выбора частоты следования опорных кадров в видеоизображении.

Корреляционные характеристики исследовались непосредственно в полутоновом изображении (рис.3,б) и в битовых сечениях кадров рис.3,в,г. С удалением от опорного кадра степень корреляции в старших битовых сечениях ослабевает несколько меньше, чем в целом полутоновом, основное совпадение наблюдается на начальных кадрах. Особенно сильные корреляционные связи просматриваются между соседними кадрами, в которых корреляция в старших сечениях повторяет зависимость коэффициента корреляции в полутоновом видеоизображении, незначительно уменьшаясь по абсолютной величине с уменьшением номера разряда сечения (рис.3,б, г).

Корреляционные характеристики цветных цифровых изображений

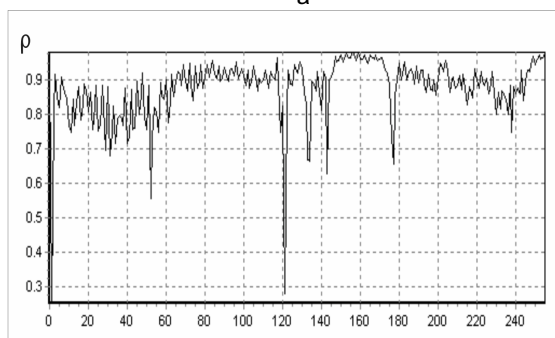
Цвет в цветном цифровом изображении передается комбинацией трех цветовых составляющих. Известно несколько цветовых координатных систем, наиболее известной и часто употребляемой в вычислительной

технике является система RGB, например, формат bmp файлов. В этом случае на каждую составляющую цвета выделяется одинаковое число бит – по восемь, т.е. каждую цветовую составляющую в отдельности можно считать полутоновым изображением. Корреляционные характеристики цветовой компоненты похожи на корреляционные характеристики полутоновых изображений.

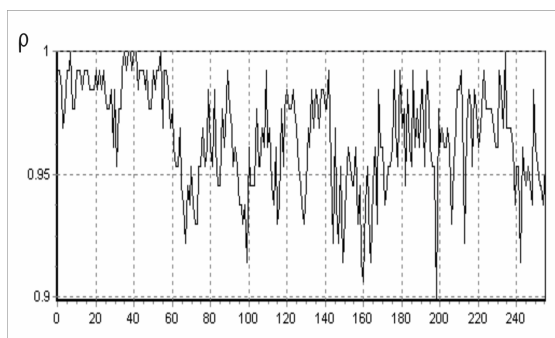
Можно работать и в других координатных системах, однако, например, перевод из системы RGB в XYZ требует последующей работы с числами с плавающей точкой, также после обработки необходимо будет для большинства графических редакторов снова переводить изображение в систему RGB.



а



б



в



г

На рис.4 представлены корреляционные характеристики между столбцов цветовых составляющих цветного цифрового изображения: 4,а – исходное цветное изображение; 4,б – зависимость коэффициента корреляции между R и G цветовыми компонентами; 4,в – зависимость коэффициента корреляции между R и G цветовыми компонентами в 8-х битовых сечениях; 4,г – зависимость коэффициента корреляции между R и B цветовыми компонентами в 5-х битовых сечениях.

В JPEG кодерах цветное изображение разбивается на яркостную и два цветоразностных сигнала. Чем меньше информации содержится в цветоразностных составляющих тем лучше, так как они кодируются с большими потерями по сравнению с яркостным сигналом. Можно организовать кодер противоположным образом: выбирать координатную систему с максимальным совпадением цветовых составляющих – в этом случае кодируется не отличие, как в JPEG, а совпадение областей изображения. Выбор цветовой координатной системы определяется корреляционными связями между цветовыми составляющими. Коэффициенты корреляции цветовых составляющих по строкам и столбцам цветного изображения рис.4,а близки единице рис.4,б.

Корреляция между старшими битовыми сечениями цветовых составляющих практически совпадает с корреляцией между самими цветовыми составляющими рис.4,б,в. Статистические связи между другими битовыми сечениями цветовых составляющих сигнала зависят от изображения и могут соответствовать зависимостям как на рис.4,в, так и на рис.4,г.

Фрактальное кодирование

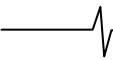
Корреляционные связи, наблюдаемые между битовыми сечениями, можно использовать для сокращения кодируемых данных, например, с помощью простейшего адаптивного предсказания. Наиболее эффективным в данном случае является процесс кодирования, учитывающий совпадение пространственных областей, в качестве которого можно привести один из самых современных способов сжатия – фрактальный алгоритм сжатия.

Существующие аналоги [2] производят обработку полутонового или цветного изображения, работая с яркостными или цветовыми составляющими изображения. Разложение на битовые сечения позволяет работать с бинарными сигналами, значительно упрощая сравнение областей.

Фрактальное кодирование динамических полутоновых изображений

Корреляционные зависимости между битовыми сечениями соседних кадров рис.3,в,г позволяют спроектировать довольно простой алгоритм фрактального кодирования: видеоизображение разбивается на группы, в основе которых лежит опорный кадр и последовательность кодируемых кадров, по аналогии с I и P кадрами в стандарте MPEG2; битовые сечения опорного кадра разбиваются на до-

Рис.4



менные области; сечения кодируемого кадра разбиваются на ранговые области; ранговые области битового сечения кодируются по доменным блокам соответствующего битового сечения (т.е. восьмой по восьмому, седьмой по седьмому и т.д.) опорного кадра с использованием выбранных преобразований; информация о преобразованиях сохраняется в результирующем файле.

В данной работе доменные и ранговые блоки (для простоты обработки) выбирались в виде квадратных областей, количество преобразований было минимальным: прямой перенос с масштабированием и инверсный перенос с масштабированием, т.к. более 70% блоков передается с помощью этих преобразований. Для уменьшения времени кодирования и увеличения суммарного коэффициента компрессии опорный кадр сжимался с помощью встроенного в CorelDraw11 плагина jpeg2000. Результирующий файл дополнительно сжимался архиватором ZIP.

Исходный алгоритм фрактального сжатия полутонового изображения [2] предусматривает при максимальном коэффициенте сжатия полный перебор подходящих доменных блоков, начиная с левого верхнего угла. Для ускорения времени кодирования, поиск подходящего домена начинался с координат местоположения рангового блока, информация записывалась в виде вектора смещения. Если в текущем окне обработки подходящего домена по заданному порогу соответствия не находилось, кодирование проводилось по стандартной схеме с возможным уменьшением размера рангового блока.

Кодируемая видеопоследовательность из 50 кадров разбивалась на группы по 15 кадров с одним опорным кадром, размер кадров составлял 256 на 256 пикселей. Параметры алгоритма: размер домена 16 на 16 пикселей, порог соответствия составлял 0,95.

Исследования алгоритма показали, что время кодирования, начиная с восьмого и до пятого битовых сечений, каждого последующего сечения увеличивается вдвое. Так как младшие битовые сечения содержат меньшую долю информации о восстанавливаемом кадре, то их можно исключать из кодирования. При смене кадра изображение получает некоторый сдвиг относительно предыдущего, который повторяется во всех битовых сечениях. Это приводит к появлению похожих областей в закодированных битовых сечениях. Таким образом, во время декодирования часть информации младших разрядов может быть восстановлена за счет старших. Результаты кодирования приведены в табл.2.

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{m^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \right) \quad (1)$$

Таблица 2

Результаты кодирования полутоновой видеопоследовательности

Количество кодируемых сечений	PSNR, дБ	Коэффициент сжатия, раз
2	15.76 / 17.93	19.14
3	20.70 / 22.17	9.27
4	23.58 / 24.03	-

Во второй колонке табл. 2 слева приведено среднее пиковое отношение с/ш, рассчитанное по формуле (1) с m=255, при восстановлении только старших битовых сечений, справа – при восстановлении всего кадра по информации старших битовых сечений. Во второй колонке приведен коэффициент сжатия относительно последовательности bmp кадров. Различные импульсные помехи и блочные структуры при восстановлении кадров могут быть снижены за счет фильтрации и интерполяции.

Выбор количества кодируемых сечений зависит от пропускной способности канала связи и может управляться: при перегрузке канала связи и переполнении буфера данных устройство управления выдает сигнал на кодер об уменьшении числа кодируемых сечений; при восстановлении работы канала, количество кодируемых сечений увеличивается. При таком способе обмена информацией удаленный пользователь все время будет получать видеоизображение без заметных временных задержек.

Фрактальное кодирование цветных изображений

Кодирование цифрового цветного изображения проводится по следующей схеме: по корреляционным характеристикам цветовых составляющих выбирается опорный цвет, имеющий наибольшие коэффициенты корреляции с двумя другими; битовые сечения опорного цвета разбиваются на доменные блоки, а кодируемых цветов – на ранговые блоки. Ранговые области битового сечения кодируются по доменным блокам соответствующего битового сечения (т.е. восьмой по восьмому, седьмой по седьмому и т.д.) опорного цвета с использованием выбранных преобразований; информация о преобразованиях сохраняется в результирующем файле.

Для простоты обработки области являлись квадратами, в качестве преобразований использовался параллельный перенос с масштабированием и инверсией. Опорный цвет кодировался с помощью встроенного в CorelDraw11 плагина jpeg2000. Файл результата дополнительно сжимался архиватором ZIP.

В качестве тестируемого было выбрано цветное изображение леса рис.4,а. Картинка содержит большое количество мелких деталей. Исследова-

ние результатов показало, что наиболее эффективным является использование параметров кодирования: размер домена 16 на 16 пикселей, порог соответствия 0,95. В табл.3 представлены результаты кодирования изображения рис.4,а. Мерой качества восстановления изображения была выбрана величина пикового отношения сигнал/шум, рассчитанная по формуле (1) с $m=16777215 (2^{24}-1)$.

Таблица 3
Результаты кодирования цветного изображения

Количество сечений	PSNR, дБ/сжатие, раз	
	0,90	0,95
1	110.13 / 22.061	110.19 / 20.107
2	111.92 / 15.682	112.31 / 11.860
3	115.66 / 9.7815	116.49 / 7.2480
4	116.59 / 5.9114	117.78 / 4.425

Так как корреляционные характеристики между битовыми сечениями цветовых составляющих во многом похожи, это позволяет использовать закодированную информацию старших битов для восстановления младших разрядов цветного изображения, повышая качество восстановленного изображения (результаты для порога 0,95 представлены в табл.4).

Дополнительная обработка позволяет повысить величину пикового отношения с/ш на 1-4 дБ. Для сравнения в табл.4 приведены результаты кодирования встроенных в CorelDraw11 кодеров jpeg и jpeg2000. Снижение величины пикового отношения с/ш (при восстановлении четырех разрядов) объясняется частичным искажением и отсутствием информационных составляющих в младших разрядах опорного цвета, потерянных при jpeg кодировании.

Таблица 4
Результаты кодирования цветного изображения

Количество сечений	PSNR, дБ	JPEG PSNR, дБ/сжатие, раз	JPEG2000 PSNR, дБ/сжатие, раз
1	116.17	121.45	117.42
2	116.23	26.94	23.14
3	118.48		
4	117.47		

Работа алгоритма была проверена на цветных изображениях [5], параметры алгоритма: размер домена 16 на 16, порог соответствия ранговых и доменных областей 0,95, кодируются три старших битовых сечения, используется восстановление в младших разрядах (табл.5).

Увеличение количества обрабатываемых битовых сечений до четырех незначительно (до 1,5 дБ) повысит величину пикового отношения с/ш, но существенно (примерно 1,5 раза) снизит коэффициент сжатия.

Таблица 5

Результаты кодирования цифровых цветных изображений

Количество сечений	PSNR, дБ	Сжатие, раз
Airplane	119.02	6.53
Baboon	117.73	3.86
House	119.23	7.44
Lenna	117.34	5.34

Выводы

1. Рассмотрены корреляционные характеристики между битовыми сечениями цифровых изображений. Коэффициенты корреляции в старших битовых сечениях значительны, это можно использовать для кодирования цифровых изображений.

2. На основании корреляционных характеристик предложен алгоритм фрактального бинарного кодирования цифровых видеоизображений. При приемлемом качестве восстановления удастся сжать видеопоследовательность в 10-20 раз (в зависимости от требуемого качества) относительно исходного размера bmp файлов. Преимуществом данного способа кодирования является бинарная обработка и возможность регулирования величины бинарного потока на выходе кодера.

3. Корреляционные характеристики между цветовыми составляющими цветного цифрового изображения могут достигать 90%, та же картина наблюдается между битовыми сечениями цветовых составляющих. Коэффициент сжатия существенно зависит от детальности изображения, в работе коэффициент сжатия составляет величину 4-7 раз при пиковом отношении сигнал/шум равном примерно 118 дБ. При передаче по сетям связи сжатие можно повысить в ущерб качеству, т.к. при восстановлении изображения глаз в первую очередь будет аппроксимировать яркостную составляющую.

Литература:

1. У. Прэтт Цифровая обработка изображений в 2кн., М.: – «Мир», 1982.
2. Уэлстид С. Фракталы и вейвлеты для сжатия в действии. – М.: Триумф, 2003. – 320с.
3. Трубин И.С., Касаткин А.С. Фрактальное сжатие полутоновых изображений. Всероссийская научно-техническая конференция «Наука-производство-технология-экология». Сборник материалов. Том 2, ФАВТ, ФПМТ, Киров: Изд-во ВятГУ., 2004г., с.106-107.
4. Трубин И.С., Касаткин А.С. Методы борьбы с ложными контурами сжатого цифрового полутонового изображения. Вестник Вятского научного центра Верхнее-Волжского отделения Академии технологических наук РФ, Серия: Проблемы обработки информации, Выпуск 1(5)/2004, Вятский научный центр, Киров, 2004 г., с.50-55.
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_test_image.