

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЧИ

УДК 621.391

А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков

ВЕЙВЛЕТ-СЖАТИЕ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ N-МЕРНЫХ РАЗВЕРТОК

Предлагается метод блочного и поточно-блочного прогрессивного вейвлет-сжатия полутонных изображений с потерями и без потерь на основе N-мерных древовидных и многосвязных структур. Данный метод позволяет управлять соотношением качество/быстродействие за счет выбора размерности древовидной структуры вейвлет-коэффициентов и согласования с ней размерности пространства пикселей исходного изображения. Согласование осуществляется посредством преобразования изображения в многосвязную структуру с использованием строчных и рекурсивных разверток. Показывается, что за счет преобразования развертками достигается увеличение пикового отношения сигнал/шум при сжатии с потерями и коэффициента сжатия без потерь.

Введение

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке новых методов сжатия видеоинформации. Основу данных методов составляет сжатие неподвижных полутонных изображений, являющихся основными компонентами цветных неподвижных и подвижных изображений. Широко используемым алгоритмом сжатия изображений является JPEG (Joint Photographic Experts Group) [1], однако он неэффективен для сжатия изображений с резкими перепадами яркости, что обусловлено свойствами базисных функций дискретного косинусного преобразования, имеющих низкую пространственную и высокую частотную локализацию и лучше аппроксимирующих плавные изменения яркости [2]. В связи с этим разработан алгоритм сжатия JPEG 2000, использующий дискретное вейвлет-преобразование и поддерживающий прогрессивную передачу [3]. Эффективность JPEG 2000 обусловлена высоким пространственным и частотным разрешением базисных вейвлет-функций.

Особенностью JPEG 2000 является использование арифметики с плавающей точкой. Это ограничивает применение JPEG 2000, в частности, в космических системах. Для передачи космической информации NASA (National Aeronautics and Space Administration) использует алгоритм ICER (Incremental Cost-Effectiveness Ratio), основанный на целочисленной арифметике, которая упрощает реализацию компрессора и декомпрессора [4].

Целочисленная арифметика используется также в алгоритмах прогрессивного вейвлет-сжатия на основе классификации фрагментов древовидных структур вейвлет-коэффициентов [5, 6]. Данные алгоритмы формируют компактные описания древовидных структур, в которых исключаются фрагменты, содержащие избыточную информацию (нуль-деревья), поддерживают прогрессивную передачу и адаптируются к объему или скорости передачи информации.

Технология исключения нуль-деревьев из компактных описаний древовидных структур используется в ряде других алгоритмов вейвлет-сжатия. В алгоритме [7] данная технология в сочетании с арифметическим кодированием позволяет достичь высоких коэффициентов сжатия, однако использование энтропийного кодирования в этом алгоритме, как и в алгоритмах JPEG и JPEG 2000, делает компактное описание древовидных структур чувствительным к ошибкам, так как искажение любого символа компактного описания приводит к размножению ошибок. Это требует помехоустойчивого кодирования всех символов компактного описания.

Особенностью алгоритмов сжатия на основе классификации фрагментов древовидных структур [5, 6] является то, что около 50 % символов формируемых ими компактных описаний древовидных структур не размножают ошибки. Это позволяет использовать неравномерную защиту от ошибок, кодируя символы, размножающие ошибки с большей корректирующей

щей способностью и избыточностью, чем остальные символы. В результате коэффициент помехозащищенного сжатия при неравномерной защите от ошибок оказывается выше, чем при равномерной.

Недостатком алгоритмов [5–7], а также JPEG 2000 является блочное сжатие изображений на основе двумерных блоков пикселей и двумерных древовидных структур. Это требует записи всего или значительной части изображения в буферную память. Сократить затраты памяти позволяет поточно-блочное сжатие, оперирующее одномерными блоками пикселей.

1. Сжатие изображений на основе N -мерных древовидных и многосвязных структур

Для эффективной блочной и поточно-блочной компрессии изображений предлагается метод прогрессивного вейвлет-сжатия на основе N -мерных древовидных и многосвязных структур. Метод позволяет управлять соотношением между степенью сжатия (качеством восстановления) и скоростью (вычислительной сложностью) компрессии и декомпрессии изображений за счет выбора размерности древовидной структуры вейвлет-коэффициентов и согласования размерности пространства пикселей изображения (двухмерного в блочном режиме и одномерного в поточно-блочном) с размерностью древовидной структуры (одномерной, двумерной, трехмерной). Согласование размерностей основано на преобразовании изображения в N -мерную многосвязную структуру, сохраняющую корреляцию пикселей (рис. 1). Для сжатия вейвлет-коэффициентов используется алгоритм на основе классификации фрагментов N -мерных древовидных структур [6].



Рис. 1. Блок-схема метода прогрессивного вейвлет-сжатия полутоновых изображений

Основными операциями сжатия полутоновых изображений на основе классификации фрагментов древовидных структур являются прямое и обратное вейвлет-преобразования, квантование, компактное описание и восстановление древовидной структуры. Вейвлет-преобразование формирует множество вейвлет-коэффициентов, упорядоченных в древовидную структуру (вейвлет-дерево) [8]. Дерево состоит из вершины (коэффициента-корня) и коэффициентов-потомков, располагающихся на различных уровнях разложения (рис. 2).

Вейвлет-преобразование ставит в соответствие каждому коэффициенту текущего уровня вейвлет-разложения (коэффициенту-родителю) несколько коэффициентов следующего уровня (коэффициентов-потомков). Размерность древовидной структуры вейвлет-коэффициентов совпадает с размерностью преобразуемого дискретного сигнала. Одномерная древовидная структура вейвлет-коэффициентов включает вырожденное дерево L (аппроксимационный коэффициент) и дерево H (детализирующие коэффициенты) и строится итерационно в результате последовательного применения вейвлет-преобразования к исходным данным на первой итерации или коэффициентам, полученным на предыдущей итерации (рис. 2) [8]. При построении двумерной древовидной структуры вейвлет-коэффициентов используется одномерное вейвлет-преобразование, применяемое сначала к строкам, а затем к столбцам двумерной матрицы исходных данных или коэффициентов. При этом формируются четыре поддиагоналы коэффициентов (LL , HL , HH , LH). Аналогично строится трехмерная древовидная структура вейвлет-коэффициентов, включающая восемь поддиапазонов.

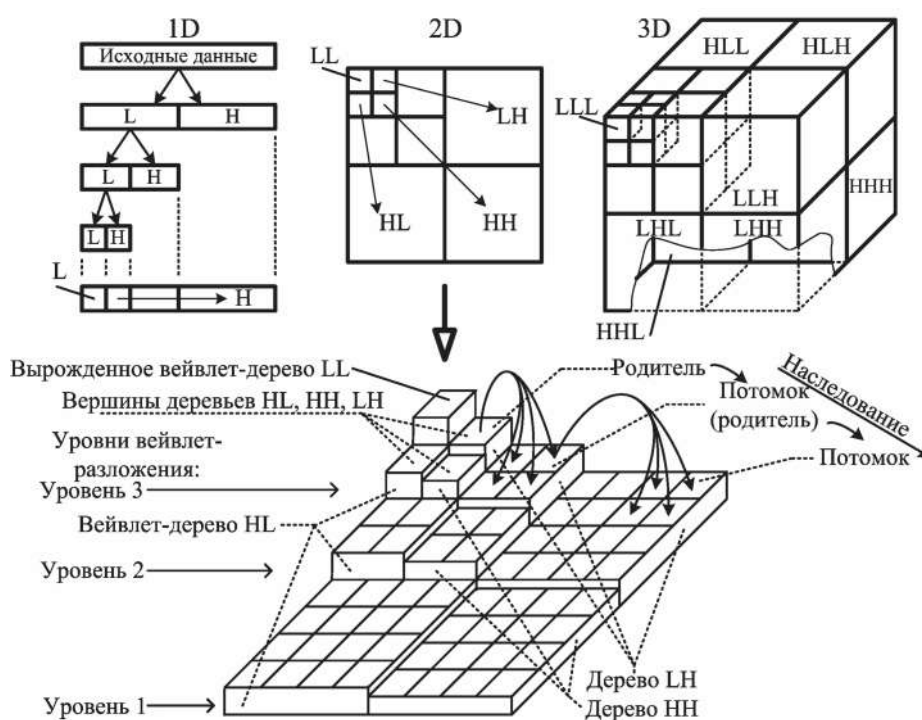


Рис. 2. N -мерные структуры вейвлет-коэффициентов для трех уровней разложения:
 L, LL, LLL – аппроксимационные поддиапазоны; HL, HH, LH – детализирующие поддиапазоны

Важнейшим свойством древовидной структуры вейвлет-коэффициентов является наследственная связь между значениями коэффициентов-родителей и коэффициентов-потомков. Она проявляется в том, что коэффициенты-потомки с большой вероятностью близки по значениям коэффициенту-родителю. При взвешивании вейвлет-коэффициентов относительно некоторого порога данный факт обуславливает формирование нуль-деревьев – фрагментов древовидной структуры, все вейвлет-коэффициенты которой имеют значения ниже порога (являются незначимыми). Технология вейвлет-сжатия основана на использовании данной наследственной связи для описания координат нуль-деревьев в древовидной структуре минимальным числом бит.

Основными параметрами древовидной структуры вейвлет-коэффициентов являются размерность N , число D вейвлет-деревьев (диапазонов), число C коэффициентов-потомков и максимальное число R_{MAX} уровней разложения (поддиапазонов), определяемые как

$$D = 2^N - 1; \quad (1)$$

$$C = 2^N; \quad (2)$$

$$R_{MAX} = \log_2 \left(\sqrt[N]{M} \right), \quad (3)$$

где N – размерность древовидной структуры вейвлет-коэффициентов; M – число пикселей исходного изображения.

Из соотношений (2) и (3) следует, что число пикселей M преобразуемого изображения или его части (блока) должно удовлетворять условию

$$M = 2^{m \cdot N}, \quad (4)$$

где m – число, определяющее размеры N -мерного пространства пикселей по каждой оси.

В табл. 1 представлена зависимость глубины вейвлет-разложения от размерности древовидной структуры вейвлет-коэффициентов.

Таблица 1

Управление глубиной вейвлет-разложения

Число пикселей изображения M	Формат представления изображения			Число уровней вейвлет-разложения		
	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=1$	$N=2$	$N=3$
64	64×1	8×8	4×4×4	6	3	2
4096	4096×1	64×64	16×16×16	12	6	4
262144	262144×1	512×512	64×64×64	18	9	6

Из выражений (1)–(3), рис. 1, 2 и табл. 1 видно, что уменьшение размерности древовидной структуры приводит к уменьшению числа коэффициентов-потомков для каждого коэффициента-родителя и увеличению максимального числа уровней вейвлет-разложения (глубины вейвлет-разложения). Увеличение размерности приводит к обратному эффекту. В обоих случаях уменьшается вероятность образования нуль-деревьев и, следовательно, ухудшаются характеристики вейвлет-сжатия изображений, оцениваемые значениями степени сжатия BR , среднеквадратической ошибкой MSE и пиковым отношением сигнал-шум $PSNR$ согласно выражениям

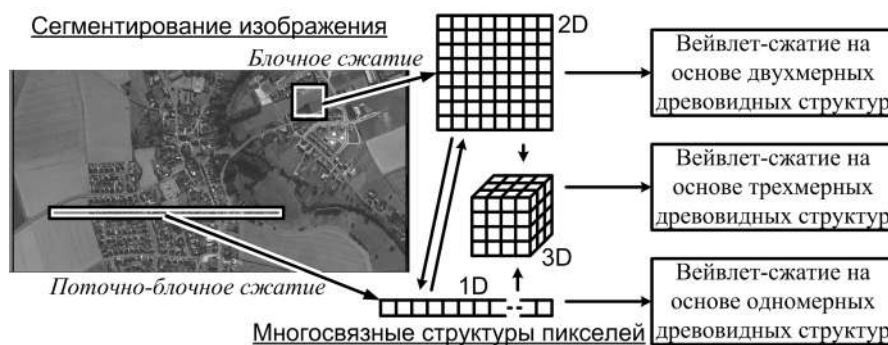
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (X_i - \tilde{X}_i)^2; \quad (5)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left((2^{BD} - 1)^2 / MSE \right); \quad (6)$$

$$BR = BD / CR, \quad (7)$$

где X_i, \tilde{X}_i – исходное и восстановленные значения пикселей изображения; BD – битовая глубина (число бит на пиксель (bpp) для исходного изображения); $CR = n \cdot BD / V$ – коэффициент сжатия; V – объем сжатых данных в битах.

Для эффективной аппаратно-программной компрессии изображений большого формата (например, спутниковых) представляют интерес древовидные структуры различной размерности в сочетании с блочным и поточно-блочным сжатием (рис. 3). Уменьшение размерности древовидной структуры ведет к упрощению аппаратно-программной реализации компрессора и декомпрессора. Увеличение размерности древовидной структуры позволяет повысить скорость сжатия за счет распараллеливания процессов обработки вейвлет-коэффициентов отдельных диапазонов. По сравнению с одномерной древовидной структурой, использование двухмерной и трехмерной древовидных структур позволяет повысить скорость компрессии (декомпрессии) в три и семь раз соответственно. За счет блочного сжатия достигаются наибольшие коэффициенты сжатия, однако поточно-блочное сжатие более экономично, поскольку требует буферизации не всего изображения, а относительно небольшого числа пикселей.

Рис. 3. N -мерное блочное и поточно-блочное вейвлет-сжатие полутоновых космических изображений

$$2D: J_M^{2D} = \frac{1}{X \cdot Y} \cdot \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} J_E(x, y); \quad (9)$$

$$3D: J_M^{3D} = \frac{1}{X \cdot Y \cdot Z} \cdot \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{z=0}^{Z-1} J_E(x, y, z), \quad (10)$$

где x, y, z – координаты дискретов сигнала; X, Y, Z – размеры пространства представления сигнала.

Значение окрестного индекса J_E элемента матрицы траектории развертки является функцией типа развертки и координат элемента в матрице и определяется числом элементов в окрестности Мура, оказавшихся рядом с рассматриваемым элементом в одномерном представлении.

Использование 2D-развертки Гильберта для преобразования двухмерных дискретных сигналов предпочтительнее, чем Z-развертки или строчной развертки, поскольку обеспечивает лучшее сохранение окрестностей ($J_E^{2D} = \{3, 4, 5, 6, 7\}$, $J_M^{2D} = 4, 6$ для развертки Гильберта (рис. 5, а); $J_E^{2D} = \{3, 4\}$, $J_M^{2D} = 3, 6$ для Z-развертки (рис. 5, б); $J_E^{2D} = \{1, 2\}$, $J_M^{2D} \approx 2$ для строчной развертки).

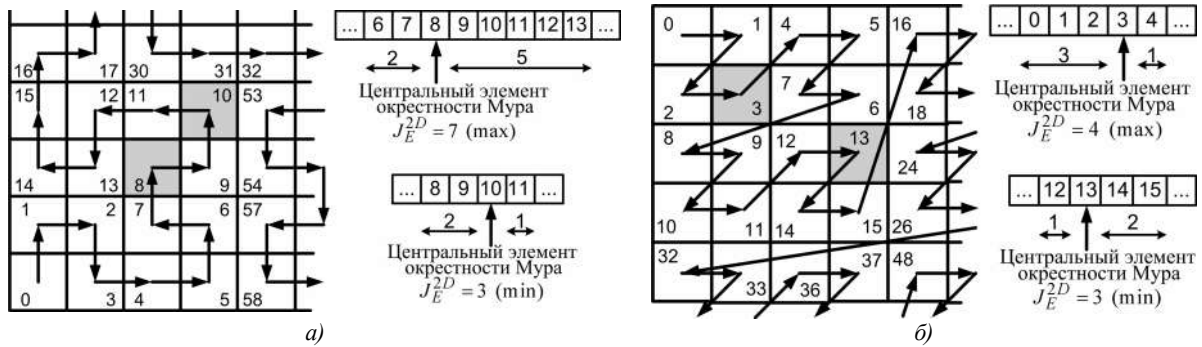


Рис. 5. Определение значений окрестных индексов элементов матриц траекторий рекурсивных разверток: а) 2D-развертки Гильберта; б) 2D Z-развертки

Вопросы использования рекурсивных разверток в сочетании с алгоритмами вейвлет-сжатия практически не исследованы. В связи с этим актуальной является задача разработки алгоритма преобразования изображений развертками и исследования его эффективности в составе предложенного метода блочного и поточно-блочного вейвлет-сжатия на основе N -мерных древовидных структур.

3. Преобразование дискретных сигналов строчными и рекурсивными развертками

Предлагается алгоритм преобразования N_0 -мерных дискретных сигналов на основе перестановок дискретов с использованием N -мерных строчных и рекурсивных разверток, позволяющий за H шагов согласовать размерность N_0 пространства исходного представления сигнала с размерностью древовидной структуры вейвлет-коэффициентов [11]. Алгоритм основан на рекуррентном выражении

$$D_h = \varphi_h(D_{h-1}, T_h), \quad (11)$$

где $h = \overline{1, H}$ – номер итерации; H – число итераций; φ_h – рекуррентное преобразование разверткой на h -й итерации; $D_{h-1} = \left\| d_{i_0 \dots i_{(N_h-1)}}(h-1) \right\|_{\left(i_0=0, \dots, \overline{N_h-1} / L_T - 1, \dots, i_{(N_h-1)}=0, \dots, \overline{N_h-1} / L_T - 1 \right)}$ – N_{h-1} -мерная матрица дискретов преобразованного сигнала на $(h-1)$ -й итерации; $D_h = \left\| d_{i_0 \dots i_{(N_h-1)}}(h) \right\|_{\left(i_0=0, \dots, \overline{N_h-1} / L_T - 1, \dots, i_{(N_h-1)}=0, \dots, \overline{N_h-1} / L_T - 1 \right)}$ –

N_h -мерная матрица дискретов преобразованного сигнала на h -й итерации;
 $D_0 = \left\| d_{i_0, \dots, i_{(N_h-1)}}(0) \right\|_{\left(i_0=0, \dots, N_h-1, \dots, i_{(N_h-1)}=0, \dots, N_h-1 \right)}$ – N_0 -мерная матрица дискретов исходного сигнала;
 T_h – N_h^T -мерная матрица траектории развертки; L_T – длина траектории развертки, равная числу элементов в N_h -мерных матрицах $D_0, \dots, D_{h-1}, D_h, \dots, D_H$ и T_h ; $d_{i_0, \dots, i_{(N_h-1)}}(0)$, $d_{i_0, \dots, i_{(N_h-1)}}(h-1)$, $d_{i_0, \dots, i_{(N_h-1)}}(h)$ – значения дискретов исходного и преобразованных развертками сигналов.

Для сжатия неподвижных изображений размерность N_0 матрицы D_0 выбирается равной двум при блочном сжатии и равной единице при поточно-блочном сжатии. Размерности N_{h-1} и N_h матриц D_{h-1} и D_h выбираются из ряда $\{1, 2, 3\}$, и в общем случае $N_{h-1} \neq N_h$.

Термин « N -мерная матрица» используется для обозначения системы переменных $\{d_{i_0, \dots, i_{N-1}}\}$, расположенных в точках N -мерного пространства, которое определяется координатами (i_0, \dots, i_{N-1}) :

$$D = \left\| d_{i_0, \dots, i_{N-1}} \right\|_{\left(i_n=0, L_n-1, n=0, N-1 \right)}, \quad (12)$$

где L_n – число элементов в направлении n -й оси N -мерного пространства.

Условием реализации алгоритма H -кратного преобразования N_0 -мерного дискретного сигнала развертками является соблюдение соотношения, устанавливающего взаимосвязь между размерностями пространств представления дискретного сигнала на итерациях $h-1$ и h :

$$\forall N_{h-1} \forall N_h ((N_{h-1} = 1) \vee (N_h = 1)). \quad (13)$$

Размерность N_h^T матрицы траектории развертки T_h , используемой в N_h^T -мерном однократном преобразовании развертками на итерации h , определяется выражением

$$N_h^T = \max(N_{h-1}, N_h). \quad (14)$$

Условие (13) определяет основную особенность предлагаемого алгоритма. Согласно данному условию размерность хотя бы одного из пространств представления дискретного сигнала, используемого до или после преобразования разверткой на каждом шаге алгоритма, должна быть равна единице. Таким образом, однократное преобразование N_h^T -мерной разверткой на итерации h позволяет перейти от N_h^T -мерного представления дискретного сигнала к одномерному представлению (прямое преобразование: $\varphi_h = \varphi_A$) и обратно (обратное преобразование: $\varphi_h = \varphi_B$). Это позволяет в общем случае сократить число различных вариантов преобразований развертками, определяемых как N^2 , до значения $2N$. При ограничении максимального значения N числом три выигрыш от использования предлагаемого алгоритма в объеме памяти для хранения матриц траекторий разверток составляет $9/6=1,5$ раза.

H -кратное преобразование N -мерными развертками осуществляется на основе чередующихся однократных прямых и обратных преобразований φ_A и φ_B :

$$\forall \varphi_h \forall \varphi_{h-1} (((\varphi_{h-1} = \varphi_A) \rightarrow (\varphi_h = \varphi_B)) \wedge ((\varphi_{h-1} = \varphi_B) \rightarrow (\varphi_h = \varphi_A))). \quad (15)$$

Чередование однократных преобразований φ_A и φ_B позволяет управлять размерностью пространства представления дискретного сигнала. Управление интервалом корреляции дискретов в преобразованном сигнале осуществляется за счет выбора типа развертки для однократных преобразований φ_A и φ_B : строчной (L) или рекурсивной (R).

Предлагаемый алгоритм позволяет осуществлять преобразование дискретных сигналов с использованием строчных, рекурсивных и сочетания строчных и рекурсивных разверток. Преобразование строчной разверткой уменьшает корреляцию пикселей в преобразованном дискретном сигнале, по сравнению с его исходным представлением, а преобразование рекурсивной разверткой приводит к увеличению корреляции. Данное различие обусловлено характером заполнения матриц траекторий строчной и рекурсивной разверток.

Из выражения (13) следует, что для случая $N_h^T = 1, 2, 3$ существует всего три пары взаимнообратных преобразований развертками, определяемых на основе однократных преобразований φ_A и φ_B , с помощью которых формируются элементы N_h -мерной матрицы

$$D_h = \left\| d_{i_0, \dots, i_{N_h-1}} \right\|_{(i_n=0, \overline{L_n-1}, n=0, \overline{N_h-1})}$$

из N_{h-1} -мерной матрицы $D_{h-1} = \left\| d_{i_0, \dots, i_{N_{h-1}-1}} \right\|_{(i_n=0, \overline{L_n-1}, n=0, \overline{N_{h-1}-1})}$:

1. $N_h^T = 1$: $T_h = \left\| t_i \right\|_{(i=0, \overline{L_T-1})}$, $((N_{h-1} = 1) \wedge (N_h = 1))$,

$$\begin{cases} \varphi_A : d_{t_i}(h) = d_i(h-1), \\ \varphi_B : d_i(h) = d_{t_i}(h-1), \end{cases} \quad (16)$$

где L_T – длина траектории развертки, равная размеру одномерных матриц T_h , D_h и D_{h-1} .

2. $N_h^T = 2$: $T_h = \left\| t_{i,j} \right\|_{(i=0, \overline{X-1}, j=0, \overline{Y-1})}$,

$$\begin{cases} \varphi_A : ((N_h = 2) \wedge (N_{h-1} = 1)), d_{t_{i,j}}(h) = d_{i,j}(h-1), \\ \varphi_B : ((N_h = 1) \wedge (N_{h-1} = 2)), d_{i,j}(h) = d_{t_{i,j}}(h-1), \end{cases} \quad (17)$$

где X, Y – размеры двумерных матриц T_h , D_h и D_{h-1} ; $L_T = X \cdot Y$ – длина траектории развертки.

3. $N_h^T = 3$: $T_h(R) = \left\| t_{i,j,l} \right\|_{(i=0, \overline{X-1}, j=0, \overline{Y-1}, l=0, \overline{Z-1})}$,

$$\begin{cases} \varphi_A : ((N_h = 3) \wedge (N_{h-1} = 1)), d_{t_{i,j,l}}(h) = d_{i,j,l}(h-1), \\ \varphi_B : ((N_h = 1) \wedge (N_{h-1} = 3)), d_{i,j,l}(h) = d_{t_{i,j,l}}(h-1), \end{cases} \quad (18)$$

где X, Y, Z – размеры трехмерных матриц T_h , D_h и D_{h-1} ; $L_T = X \cdot Y \cdot Z$ – длина траектории развертки.

Размерность N_h^T матрицы траектории развертки T_h на h -й итерации в выражениях (16)–(18) определяется в соответствии с выражением (14). Предложенный алгоритм преобразования дискретных сигналов с использованием N -мерных разверток, основанный на выражении (11), не зависит от способа формирования матриц T_h траекторий строчных и рекурсивных разверток.

Исходя из соотношений (16)–(18) преобразования дискретных сигналов развертками могут быть разделены на группы в зависимости от типов используемых разверток (табл. 2). В основе классификации преобразований лежит операция однократного преобразования развертками размерности пространства представления дискретного сигнала, определяемая как

$$N_{h-1} \Rightarrow N_h^{Scan}, \quad (19)$$

где \Rightarrow – символ, обозначающий операцию преобразования размерности дискретного сигнала на h -й итерации; N_{h-1} и N_h – размерности пространств представления дискретного сигнала, принимающие значения 1D, 2D или 3D; *Scan* – тип матрицы траектории развертки, принимающий значение L для строчной развертки и значение R – для рекурсивной.

Номера итераций в описаниях схем преобразования развертками в табл. 2 опущены.

Таблица 2

Схемы преобразований дискретных сигналов развертками

Размерность преобразованного сигнала, N_H	Размерность исходного дискретного сигнала, N_θ			Схема преобразования
	1	2	3	
1	1D	2D \Rightarrow 1D ^L	3D \Rightarrow 1D ^L	L
	1D \Rightarrow 2D ^L \Rightarrow 1D ^R	2D \Rightarrow 1D ^R	3D \Rightarrow 1D ^R	A
	1D \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L	2D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L	B
2	1D \Rightarrow 2D ^L	2D	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^L	L
	1D \Rightarrow 2D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 2D ^L	2D \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 2D ^L	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 2D ^L	A
	1D \Rightarrow 2D ^R	2D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R	B
3	1D \Rightarrow 3D ^L	2D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^L	3D	LL
	1D \Rightarrow 2D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	2D \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	AL
	1D \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^L	2D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^L	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^L	BL
	1D \Rightarrow 3D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	2D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	3D \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	LA
	1D \Rightarrow 2D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	2D \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	AA
	1D \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	2D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^L	BA
	1D \Rightarrow 3D ^R	2D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^R	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^R	LB
	1D \Rightarrow 2D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^R	2D \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^R	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^L \Rightarrow 1D ^R \Rightarrow 3D ^R	AB
	1D \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^R	2D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^R	3D \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 2D ^R \Rightarrow 1D ^L \Rightarrow 3D ^R	BB

Схемы преобразования N -мерных пространств представления дискретных сигналов в трехмерное, приведенные в табл. 2, реализуются в два этапа и обозначены двумя символами, значение каждого из которых (L, A или B) определяет тип матрицы траектории развертки, используемой на соответствующем этапе: L – строчная, A или B – рекурсивная.

Матрицы траекторий строчных разверток используются в схемах преобразования развертками L и LL при реализации однократных преобразований φ_A и φ_B :

$$\begin{cases} \varphi_A : (ND \Rightarrow 1D^L), \\ \varphi_B : (1D \Rightarrow ND^L), \end{cases} \quad (20)$$

где $N = 2, 3$; D – символ, обозначающий размерность пространства.

Матрица траектории рекурсивной развертки используется в следующих схемах преобразования развертками: A, AL, AA, AB при реализации однократного преобразования φ_A ($2D \Rightarrow 1D^R$); B, BL, BA, BB при реализации однократного преобразования φ_B ($1D \Rightarrow 2D^R$); LA, AA, BA при реализации однократного преобразования φ_A ($3D \Rightarrow 1D^R$); LB, AB и BB при реализации однократного преобразования φ_B ($1D \Rightarrow 3D^R$).

4. Оценка эффективности вейвлет-сжатия с преобразованием развертками

Для оценки эффективности предложенного алгоритма преобразования развертками в сочетании с методом блочного и поточно-блочного вейвлет-сжатия полутоновых изображений на основе N -мерных древовидных структур разработаны программные модели одномерного (1D-BC), двухмерного (2D-BC) и трехмерного (3D-BC) вейвлет-сжатия с преобразованием строчными и рекурсивными развертками. Алгоритмы вейвлет-сжатия основаны на компактном описании древовидной структуры вейвлет-коэффициентов [6], применяющем иерархически упорядоченные классы фрагментов вейвлет-дерева, и обеспечивают блочное и поточно-блочное сжатие полутоновых изображений с потерями и без потерь. В качестве рекурсивных разверток использованы двухмерные и трехмерные развертки Гильберта, которые формируются на основе метода компактного описания, предложенного в работе [9]. В качестве тестовых изображений использованы стандартное низкочастотное тестовое полутоновое изображение 512×512 пикселей «Лена», содержащее в основном крупные детали и плавные перепады яркости, а также высокочастотное полутоновое аэрокосмическое изображение «Аэро» 512×512 пикселей с преобладанием мелких деталей и резких перепадов яркости.

Рассмотрим характеристики блочного вейвлет-сжатия с потерями для рационального вейвлет-преобразования Хаара при размере блока, совпадающем с размером изображения 512×512 пикселей (рис. 6). Обозначения используемых схем преобразования развертками указаны в круглых скобках после обозначения типа алгоритма вейвлет-сжатия. Для вейвлет-сжатия на основе биортогональных вейвлетов характеристики $PSNR$ улучшаются на 2–4 дБ. При этом для изображений «Лена» и «Аэро» на уровне 0,5 бит/пиксель алгоритм 2D-BC обеспечивает значения $PSNR$ на уровне 36,17 и 30,67 дБ, уступая алгоритму JPEG 2000 около 0,5 дБ и алгоритму, предложенному в [7], около 1,5 дБ. Следует отметить, что алгоритм 2D-BC, в отличие от алгоритма JPEG 2000 и алгоритма, предложенного в [7], не использует адаптивное квантование. Адаптивное квантование позволяет улучшить характеристику $PSNR$ алгоритма 2D-BC на 3 дБ при $0,5 < BR < 4$ бит/пиксель и на 5 дБ при $BR > 2$ бит/пиксель [12].

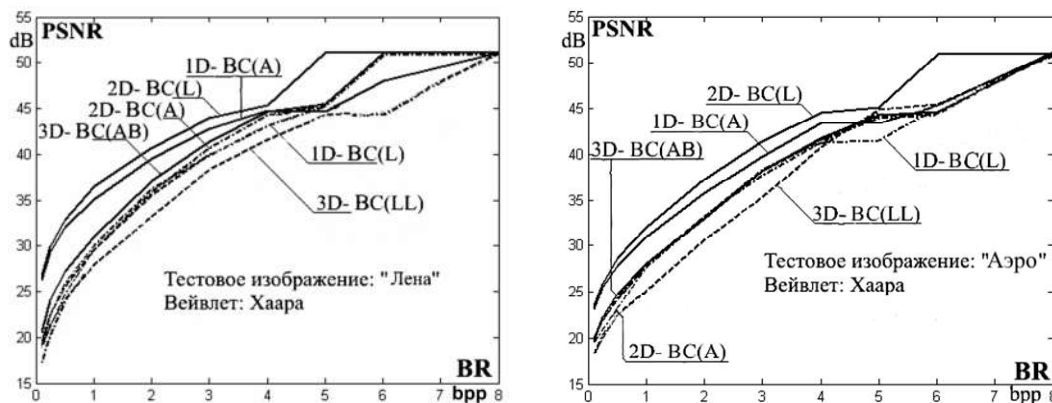


Рис. 6. Характеристики блочного вейвлет-сжатия полутоновых изображений для вейвлетов Хаара

В табл. 3 представлены коэффициенты блочного вейвлет-сжатия без потерь для целочисленного вейвлет-преобразования Хаара при размере блока 512×512 пикселей. Для вейвлет-сжатия без потерь на основе целочисленного биортогонального вейвлет-преобразования $5/3$ коэффициент сжатия увеличивается на 9 % (для изображений «Лена» и «Аэро» алгоритм 2D-BC обеспечивает сжатие в 1,75 и 1,51 раза).

Таблица 3

Коэффициенты CR-блочного сжатия без потерь полутоновых изображений для вейвлетов Хаара

Алгоритм вейвлет-сжатия	1D-BC			2D-BC			3D-BC		
	L	A	B	L	A	B	LL	LB	AB
«Лена»	1,29	1,45	1,12	1,60	1,31	1,31	1,12	1,16	1,36
«Аэро»	1,18	1,27	1,08	1,39	1,21	1,22	1,08	1,11	1,22

Из рис. 6 и табл. 3 видно, что для блочного сжатия целесообразно использовать алгоритм вейвлет-сжатия без преобразования развертками (2D-BC(L)). Алгоритмы сжатия 1D-BC(A) и 3D-BC(AB) с преобразованием развертками по схеме А проигрывают алгоритму 2D-BC(L) при $0,1 < BR < 4$ бит/пиксель до 1 и 5 дБ соответственно. Рассматриваемый диапазон изменения значений BR представляет в основном интерес для сжатия с потерями, поскольку при значении $BR > 4$ бит/пиксель возможно сжатие без потерь.

На рис. 7–9 представлены характеристики блочного (1D-BC, 2D-BC) и поточно-блочного (1D-BCп, 2D-BCп) вейвлет-сжатия с потерями и без потерь на основе вейвлетов Хаара для изображений «Лена» и «Аэро». По оси абсцисс на графиках отложено значение m , определяющее на основании (4) размер двухмерного блока пикселей. Из рис. 7–9 видно, что для поточно-блочного сжатия полутоновых изображений с потерями и без потерь следует использовать двухмерный алгоритм компрессии с преобразованием развертками (2D-BCп(B)) или одномерный алгоритм компрессии без преобразования развертками (1D-BCп(L)). Различие между этими алгоритмами в отношении сигнал/шум при сжатии с потерями и коэффициенте сжатия без потерь не превышает 1 дБ и 3,5 % соответственно. При сжатии с потерями целесообразно выбирать размер блока исходя из компромисса между качеством восстановления и вычислительной сложностью компрессии и декомпрессии. Из рис. 9 видно, что характеристики блочного и поточно-блочного сжатия без потерь не зависят от размера блока.

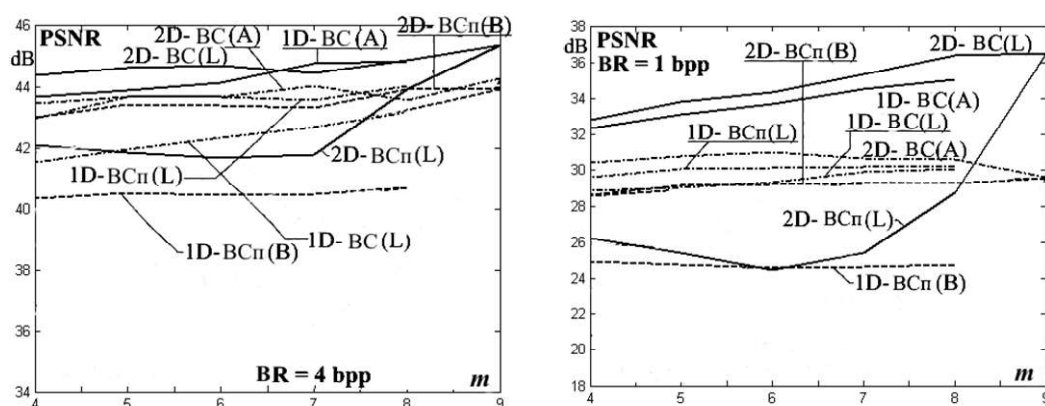


Рис. 7. Зависимость характеристик вейвлет-сжатия с потерями от размера блока для изображения «Лена»

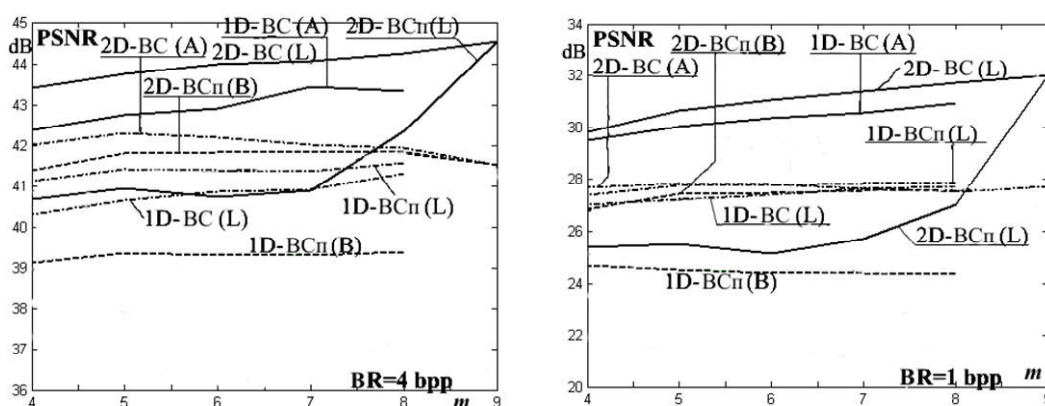


Рис. 8. Зависимость характеристик вейвлет-сжатия с потерями от размера блока для изображения «Аэро»

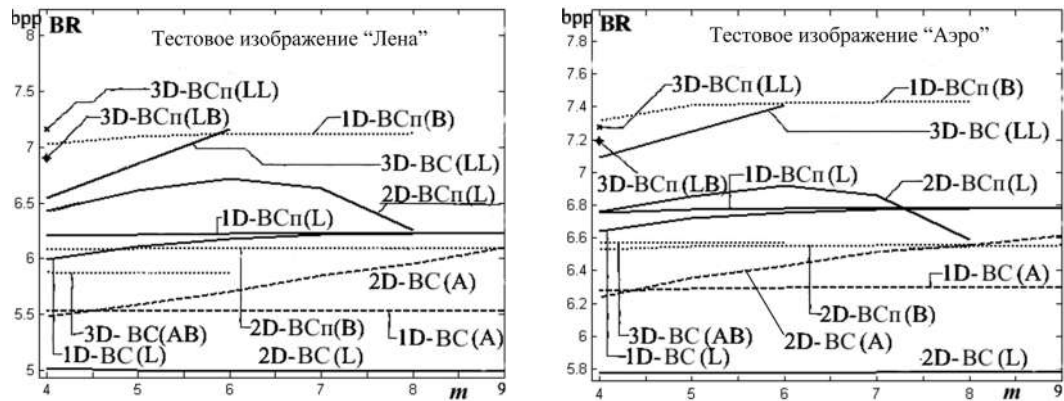


Рис. 9. Зависимости характеристик вейвлет-сжатия без потерь от размера блока для изображений «Лена» и «Аэро»

Заключение

Разработан метод блочного и поточно-блочного вейвлет-сжатия полутоновых изображений с использованием N -мерных древовидных и многосвязных структур. Он позволяет управлять соотношением качество/быстродействие за счет выбора размерности древовидной структуры вейвлет-коэффициентов и степени связности структуры пикселей. Установлено, что максимальное качество восстановления полутоновых изображений обеспечивает вейвлет-сжатие на основе двумерных древовидных структур. Определено, что максимальная скорость компрессии и декомпрессии может быть достигнута при использовании трехмерной древовидной структуры за счет распараллеливания процесса сжатия на семь подпроцессов. Минимальные затраты при аппаратной реализации (минимальная площадь на кристалле интегральной микросхемы) обеспечивает использование одномерной древовидной структуры. Характеристики вейвлет-сжатия на основе одномерных и трехмерных древовидных структур могут быть улучшены за счет преобразования исходного изображения в многосвязную структуру посредством строчных и рекурсивных разверток.

Список литературы

1. Артюшенко, В.М. Цифровое сжатие видеoinформации и звука: учеб. пособие / В.М. Артюшенко, О.И. Шелухин, М.Ю. Афонин / Под ред. В.М. Артюшенко. – М.: Дашков и К°, 2003. – 426 с.
2. Joshi, R.L. Comparison of multiple compression cycle performance for JPEG and JPEG 2000 / R.L. Joshi, M. Rabbani, M. Lepley // Proc. of the SPIE. – San Diego, CA, 2000. – Vol. 4115. – P. 492–501.
3. JPEG2000 still image coding versus other standards / T. Ebrahimi [et al.] // Proc. of the SPIE. – San Diego, CA, 2000. – Vol. 4115. – P. 446–454.
4. ICER on Mars: Wavelet-based image compression for the Mars exploration rovers // IND Technology: Science News, 2002. – Vol. 15. – P. 15–19.
5. Said, A. A new, fast, and efficient codec based on set partitioning in hierarchal trees / A. Said, W.A. Pearlman // IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology. – 1996. – Vol. 6. – P. 243–250.
6. Борискевич, А.А. Компактное описание вейвлет-коэффициентов для сжатия медиаданных / А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков // Информатика. – 2007. – № 1 (13). – С. 46–56.
7. Умняшкин, С.В. Компрессия цифровых изображений на основе кодирования древовидных структур вейвлет-коэффициентов с прогнозированием статистических моделей / С.В. Умняшкин // Известия вузов. Электроника. – 2001. – № 5. – С. 86–94.
8. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MatLab / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.

9. Борискевич, А.А. Компактное описание и формирование N-мерных рекурсивных разверток / А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков // Информатика. – 2007. – № 2 (14). – С. 5–15.

10. Hilbert, D. Uber die stetige abbildung einer linie auf Flachenstuck / D. Hilbert // Mathematische Annalen. – 1891. – № 38. – P. 459–460.

11. Цветков, В.Ю. Метод двумерного представления аудио- и речевой информации на основе рекурсивных разверток / В.Ю. Цветков // Технические средства защиты информации: материалы докладов III Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 23–27 мая 2005 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: М.П. Батура [и др.]. – Минск: БГУИР, 2005. – С. 34–40.

12. Борискевич, А.А. Оценка влияния модификации вейвлет-коэффициентов на сжатие медианых / А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков // Доклады БГУИР. – 2006. – № 4 (16). – С. 17–24.

Поступила 04.07.07

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
Минск, П. Бровки, 6
e-mail: vtsvet@bsuir.unibel.by*

A.A. Boriskevich, V.Yu. Tsviatkou

A WAVELET COMPRESSION OF HALFTONE IMAGE USING N-DIMENSIONAL SCANS

A block and stream-block method of hierarchical lossy and lossless wavelet compression of halftone image based on the multi-dimensional tree and multiply connected recursive structures is proposed. The method allows to control the quality/speed relationship at the expense of the choice of the dimension of wavelet coefficient tree structure and matching the original image pixel space dimension with the structure. The matching is reached by the image transform to the multiply connected structure using line and recursive scans. It is shown that the scan transform allows to increase the peak signal to noise ratio in lossy compression and the compression ratio in lossless compression.