

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

УДК 519.7

А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков

КОМПАКТНОЕ ОПИСАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-КОЭФФИЦИЕНТОВ
ДЛЯ СЖАТИЯ МЕДИАДАНЫХ

Предлагается компактное описание вейвлет-коэффициентов на основе иерархических множеств и эффективного вложенного кодирования. Дается сравнительная оценка эффективности сжатия вейвлет-коэффициентов на основе предложенного компактного описания. Показывается, что за счет компактности описания достигаются уменьшение среднего квадрата ошибки, увеличение пикового отношения сигнал-шум при сжатии с потерями и коэффициента сжатия при восстановлении без потерь, уменьшение вычислительной сложности и алгоритмической задержки компрессии и декомпрессии вейвлет-коэффициентов для различных компонент медиаданных.

Введение

В условиях интенсивного развития технологий хранения, обработки, передачи и распределения мультимедийной информации актуальна задача поиска эффективных алгоритмов сжатия медиаданных. Перспективным направлением является развитие технологии вейвлет-сжатия, позволяющее достичь высокого качества восстановления информации и значительных коэффициентов сжатия при относительно низкой вычислительной сложности. Вейвлет-сжатие с потерями основано на вейвлет-преобразовании и эффективном вложенном кодировании вейвлет-коэффициентов. При использовании вложенного кодирования для двух формируемых битовых последовательностей длиной L_1 и L_2 ($L_1 < L_2$) биты более короткой последовательности совпадают с первыми L_1 битами (префиксом) более длинной. Вложенное кодирование позволяет осуществить прогрессивную передачу информации о вейвлет-коэффициентах с последовательным улучшением качества восстанавливаемых данных. При этом данные вначале аппроксимируются небольшим числом бит, а затем эта аппроксимация уточняется. Одной из особенностей технологии вложенного кодирования вейвлет-коэффициентов является сокращение времени кодирования и декодирования при увеличении коэффициента сжатия, в случае сжатия изображений это обеспечивает возможность их быстрого поиска и просмотра без визуализации мелких деталей. При достаточных вычислительных ресурсах результаты вложенного кодирования могут подвергаться энтропийному кодированию, что, однако, дает незначительный выигрыш в коэффициенте сжатия (до 1 %) из-за низкой статистической избыточности результатов вложенного кодирования [1]. Наиболее эффективными алгоритмами вложенного кодирования (сжатия) вейвлет-коэффициентов изображений являются EZW (Embedded Zerotree Wavelet) [2], SLCCA (Significance-linked connected component analysis) [3], SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees) [1], SPECK (Set Partitioning Embedded block) [4], MRWD (Morphological Representation of Wavelet Data) [5] и т. д. Сжатие вейвлет-коэффициентов используется в кодеках JPEG 2000 [6]. Необходимость сжатия видеоданных обусловила разработку трехмерных версий ряда алгоритмов, в частности 3D-EZW [7], 3D-SLCCA [8], 3D-SPIHT [9]. Вопрос эффективности применения одномерных версий перечисленных алгоритмов для сжатия аудиоданных практически не исследован. В связи с этим актуальной является задача совершенствования и развития алгоритмов сжатия вейвлет-коэффициентов для повышения компактности представления информации о их значениях, снижения вычислительной сложности и уменьшения алгоритмической задержки компрессии и декомпрессии.

1. Анализ алгоритмов вейвлет-сжатия

Основной особенностью алгоритмов сжатия вейвлет-коэффициентов является эффективное кодирование информации о вейвлет-коэффициентах за счет использования жесткой про-

странственной связи «родитель – потомок» между коэффициентами частотных поддиапазонов различных уровней вейвлет-дерева (частотного диапазона), а также статистических свойств наследования значимости коэффициентов в направлении этих связей (рис. 1) [10, 11]. При одномерном вейвлет-разложении каждый коэффициент-родитель в любом поддиапазоне, кроме последнего, имеет двух потомков, при двухмерном – четырех, а при трехмерном – восемь.

Одной из особенностей алгоритмов сжатия вейвлет-коэффициентов является определение значимости вейвлет-коэффициентов. Она заключается в разделении множества всех вейвлет-коэффициентов на два подмножества значимых и незначимых коэффициентов посредством сравнения их значений с порогом, зависящим от динамического диапазона значений вейвлет-коэффициентов. Определение значимости позволяет выявить статистическую зависимость между коэффициентами-родителями и коэффициентами-потомками. Если коэффициент-родитель является значимым, то высока вероятность наличия значимых коэффициентов среди его потомков [12]. Все алгоритмы сжатия вейвлет-коэффициентов ориентируются на использование этой статистической зависимости для минимизации объема информации о вейвлет-коэффициентах [1–9]. Например, в алгоритмах EZW, SLCCA и SPIHT для компактного описания зависимости по значимости коэффициентов-родителей и коэффициентов-потомков вейвлет-коэффициенты каждого диапазона (см. рис. 1) разделяются на иерархические множества. В алгоритме SPIHT для каждого вейвлет-коэффициента любого поддиапазона, кроме последнего, выделяются: D – множество потомков, включающее потомков всех поддиапазонов; I – множество непосредственных потомков, включающее потомков нижеследующего по иерархии поддиапазона; L – множество всех потомков, за исключением непосредственных.



Рис. 1. Пирамида поддиапазонов и взаимосвязь «родитель – потомок» в одном из трех диапазонов (деревьев) 2D-вейвлет-разложения

Общими особенностями алгоритмов сжатия вейвлет-коэффициентов являются выбор начального значения порога T в соответствии с максимальным абсолютным значением вейвлет-коэффициентов и понижение значения порога $T = T - I$ до нуля включительно в каждом цикле описания вейвлет-коэффициентов. В циклах осуществляется формирование информации о вейвлет-коэффициентах (значимость, знаки и битовые плоскости для значимых коэффициентов) в порядке убывания их психоакустической или психовизуальной значимости. В алгоритмах EZW и SPIHT множество значимых вейвлет-коэффициентов называется LSP (List of Significant Pixels) [1, 2], а в алгоритме SLCCA аналогом LSP является множество POS (Positive) [3]. Незначимые коэффициенты, обнаруженные в процессе иерархического поиска значимых коэффициентов, образуют множество незначимых коэффициентов LIP (List of Insignificant Pixels) в алгоритме SPIHT, NEG (Negative) – в алгоритме SLCCA. Итерационный характер обработки вейвлет-коэффициентов определяет общую структуру алгоритма (рис. 2, а) и структуру формируемого битового потока (рис. 2, б) и позволяет реализовать режим прогрессивной передачи для постепенного восстановления значений вейвлет-коэффициентов.

Алгоритм SPIHT является одним из наиболее эффективных алгоритмов сжатия вейвлет-коэффициентов полутоновых изображений. Особенностью алгоритма SPIHT является введение нового множества коэффициентов-родителей LIS (List of Insignificant Sets) с целью уточнения связей по значимости между коэффициентами-родителями и коэффициентами-потомками множеств D , I , L . Битовая структура потока, формируемого алгоритмом SPIHT, состоит из циклов описания вейвлет-коэффициентов, число которых определяется значением порога T

(рис. 3). Формат формируемого битового потока включает начальное значение порога T и циклы описания вейвлет-коэффициентов для каждого значения порога.

Первый цикл описания вейвлет-коэффициентов отличается от последующих циклов отсутствием последовательности бит, представляющих битовые плоскости для значимых вейвлет-коэффициентов множества LSP . Первый цикл, как и все последующие циклы, включает серию бит, представляющих информацию о вейвлет-коэффициентах множества LIP . Все циклы, кроме последнего, включают серии бит (D -серии длиной 1 бит и DIL -серии длиной 6–10 бит для 2D-вейвлет-преобразования), представляющих информацию о вейвлет-коэффициентах иерархических множеств D, I, L , – биты значимости $M (M^D, M^I, M^L)$ и биты знаков S^I .

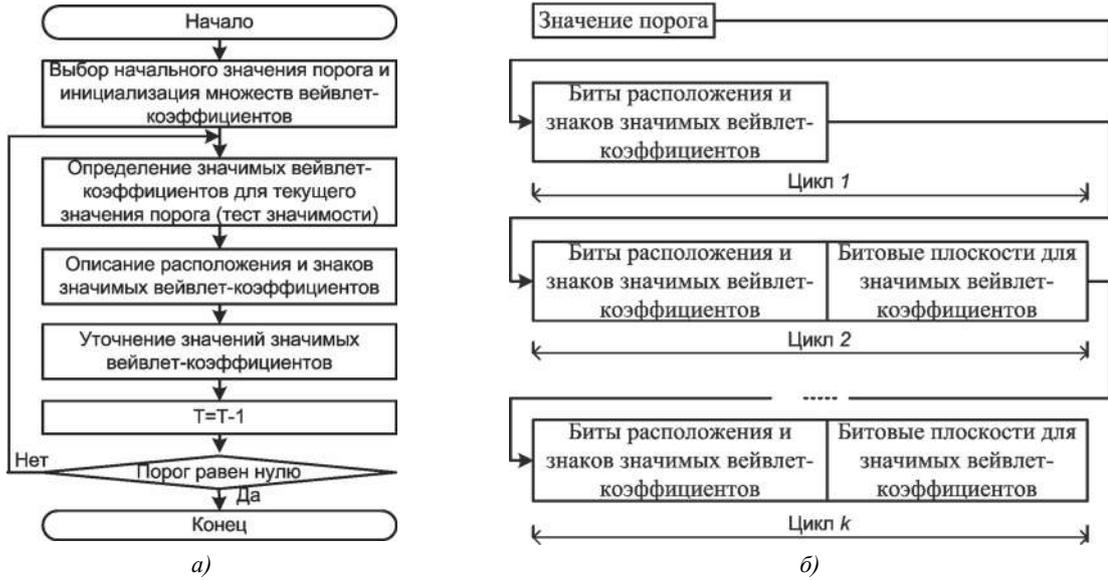


Рис. 2. Структуры алгоритма вейвлет-сжатия и формируемого битового потока: а) блок-схема алгоритма; б) структура битового потока

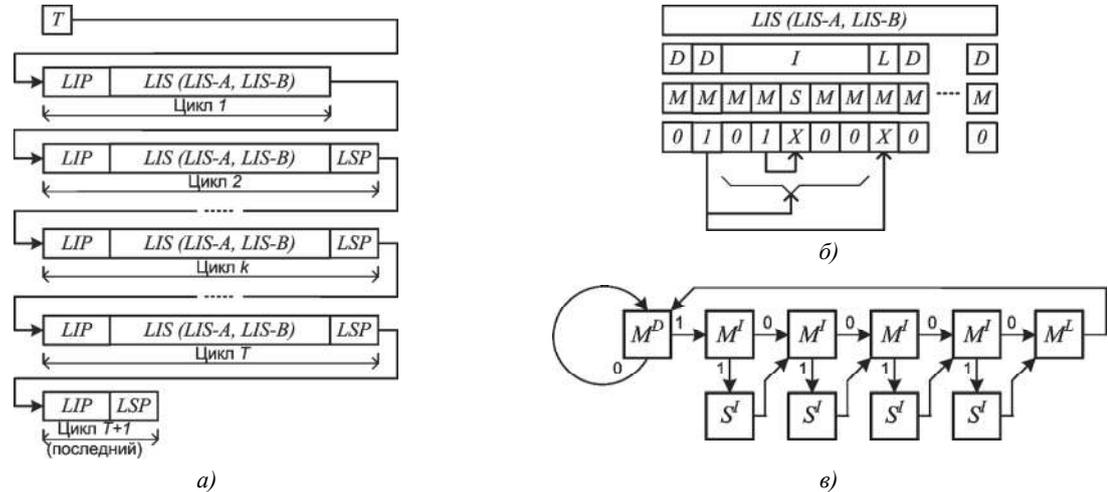


Рис. 3. Формирование битового потока алгоритмом SPIHT: а) структура битового потока; б) фрагмент структуры цикла с описанием множеств D, I, L , где X – безразличное состояние бита; в) граф формирования описания множеств D, I, L

Вейвлет-коэффициенты иерархических множеств D, I, L являются коэффициентами-потомками и имеют коэффициентов-родителей в множестве LIS . Число D - и DIL -серий в каждом цикле описания определяется числом обрабатываемых вейвлет-коэффициентов из множества LIS . Если среди коэффициентов-потомков множеств D_i и L_i , принадлежащих коэффициенту-родителю C_i из LIS , существует хотя бы один значимый коэффициент, то биты M^D_i и M^L_i равны единице

(рис. 3, б, в). Если коэффициент-потомок C_j из множества I_i , соответствующий коэффициенту-родителю C_i из LIS , является значимым, то бит M_j^I равен единице. Если значимый коэффициент-потомок C_j из множества I_i является положительным, то бит S_j^I равен единице.

В соответствии с алгоритмом SPIHT множество LIS разделено на два подмножества: $LIS-A$ и $LIS-B$. Это сделано для реализации иерархической обработки вейвлет-коэффициентов множеств D, I, L . Множество $LIS-A$ содержит коэффициенты-родители, для которых необходимо осуществить поиск значимых коэффициентов-потомков в множествах D и I . Множество $LIS-B$ содержит коэффициенты-родители, для которых необходимо осуществить поиск значимых коэффициентов-потомков в множестве L . В начале каждого цикла описания вейвлет-коэффициентов в множество $LIS-A$ помещается вейвлет-коэффициент C_0 , являющийся корнем вейвлет-дерева соответствующего диапазона, а множество $LIS-B$ пусто. В процессе иерархического кодирования для каждого коэффициента-родителя C_i из множества $LIS-A$ выполняется поиск значимых потомков среди коэффициентов множества D_i . Если в множестве D_i обнаружен значимый вейвлет-коэффициент, выполняется поиск значимых потомков в множестве I_i и коэффициент-родитель C_i перемещается из множества $LIS-A$ в множество $LIS-B$. Для каждого коэффициента-родителя C_i из множества $LIS-B$ выполняется поиск значимых потомков среди коэффициентов множества L_i . Если в множестве L_i обнаружен значимый вейвлет-коэффициент, коэффициенты-потомки из множества I_i причисляются к множеству $LIS-A$ (становятся коэффициентами-родителями). Обработка вейвлет-коэффициентов множества $LIS-A$ продолжается до достижения поддиапазона нулевого уровня вейвлет-разложения, а обработка коэффициентов множества $LIS-B$ – до достижения первого уровня вейвлет-разложения.

2. Компактное описание коэффициентов рационального вейвлет-преобразования

Для минимизации объема информации о коэффициентах рационального вейвлет-преобразования предлагается подход, основанный на расширенной классификации вейвлет-коэффициентов, который позволяет уточнить взаимосвязь между значимыми коэффициентами множеств D, I, L в соответствии с соотношением

$$L = D \cap \bar{I}. \quad (1)$$

Расширение классификации вейвлет-коэффициентов осуществляется за счет введения в множество LIS двух новых множеств вейвлет-коэффициентов P и G , дополняющих множества $LIS-A$ и $LIS-B$. Множество P – это множество коэффициентов-родителей, для которых существуют значимые коэффициенты-потомки как в множестве L , так и в множестве I , а множество G – множество коэффициентов-родителей, для которых значимые коэффициенты-потомки существуют в множестве L , но не существуют в множестве I . Распределение вейвлет-коэффициентов по двум новым множествам в процессе обработки элементов множества LIS позволяет не передавать информацию о значимости коэффициентов-потомков из множества L при условии, что коэффициент-родитель принадлежит множеству G . В этом случае наличие значимого потомка в множестве L предопределено выражением (1) и информация о наличии значимого потомка в множестве L может быть восстановлена алгоритмом декомпрессии автоматически по значениям бит M^D и M^I .

Предлагаемое компактное описание вейвлет-коэффициентов реализуется следующим алгоритмом.

1. Задание начальных состояний множеств $LIP = \emptyset$, $LSP = \emptyset$, $LIS-A = \{C_0\}$, $LIS-B = \emptyset$ и максимально допустимого числа бит, выделяемого для компактного описания вейвлет-коэффициентов. Определение значения порога T :

$$T = \lfloor \log_2(\max\{|C_i|\}) \rfloor, \quad (2)$$

где $\lfloor \rfloor$ – операция округления с недостатком; C_i – i -й вейвлет-коэффициент; $\max\{|C_i|\}$ – определение максимального значения среди абсолютных значений вейвлет-коэффициентов; $i = 0, n-1$; n – общее число коэффициентов вейвлет-разложения.

2. Начало цикла описания вейвлет-коэффициентов. Выполнение теста значимости. Если выполняется условие

$$T \leq \lfloor \log_2(|C_i|) \rfloor < T + 1, \quad (3)$$

то коэффициент C_i является значимым. Значимые коэффициенты, определяемые порогом T и обнаруженные в текущем цикле описания, причисляются к множеству LSP' значимых вейвлет-коэффициентов:

$$\forall C_i \left((T \leq \lfloor \log_2(|C_i|) \rfloor < T + 1) \rightarrow (C_i \in LSP') \right). \quad (4)$$

В конце каждого цикла коэффициенты множества LSP' переносятся в множество LSP .

3. Формирование информации о значимости (битов M) и знаках значимых (битов S) вейвлет-коэффициентов множества LIP согласно правилу

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall C_i \left(\left((C_i \in LIP) \wedge (C_i \in LSP') \right) \rightarrow \exists M_i \exists S_i \left((M_i = 1) \wedge \left(S_i = \begin{cases} 1 & \text{ï ðè } C_i \geq 0 \\ 0 & \text{ï ðè } C_i < 0 \end{cases} \right) \right) \right); \\ \forall C_i \left(\left((C_i \in LIP) \wedge \neg(C_i \in LSP') \right) \rightarrow \exists M_i (M_i = 0) \right). \end{array} \right. \quad (5)$$

4. Формирование информации о значимых коэффициентах из множества LIS (битов значимости M^D , M^I , M^L и битов знаков S^I).

Для каждого коэффициента C_i из $LIS-A$ осуществляется поиск значимых потомков во множестве D_i (первый этап обработки коэффициентов $LIS-A$) согласно правилу

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall C_i \left(\exists C_j \left((C_i \in LIS - A) \wedge (C_j \in D_i) \wedge (C_j \in LSP') \right) \rightarrow \exists M_i^D (M_i^D = 1) \right); \\ \forall C_i \left(\forall C_j \left((C_i \in LIS - A) \wedge (C_j \in D_i) \wedge \neg(C_j \in LSP') \right) \rightarrow \exists M_i^D (M_i^D = 0) \right). \end{array} \right. \quad (6)$$

Если значимый коэффициент обнаружен, то формируется информация о значимости (биты M^I) и знаках значимых (биты S^I) коэффициентов-потомков из множества I_i (второй этап обработки коэффициентов $LIS-A$) в соответствии с правилом

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall C_i \forall C_j \left(\exists M_i^D \left((C_i \in LIS - A) \wedge (M_i^D = 1) \wedge (C_j \in I_i) \wedge (C_j \in LSP') \right) \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \exists M_j^I \exists S_j^I \left((M_j^I = 1) \wedge \left(S_j^I = \begin{cases} 1 & \text{ï ðè } C_j \geq 0 \\ 0 & \text{ï ðè } C_j < 0 \end{cases} \right) \right) \right); \\ \forall C_i \forall C_j \left(\exists M_i^D \left((C_i \in LIS - A) \wedge (M_i^D = 1) \wedge (C_j \in I_i) \wedge \neg(C_j \in LSP') \right) \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \exists M_j^I \left((M_j^I = 0) \wedge (C_j \in LIP) \right) \right). \end{array} \right. \quad (7)$$

В зависимости от наличия среди элементов I_i значимых вейвлет-коэффициентов коэффициент-родитель C_i причисляется к множеству P или к множеству G :

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall C_i \left(\exists C_j \left((C_i \in LIS - A) \wedge (C_j \in I_i) \wedge (C_j \in LSP') \right) \rightarrow (C_i \in P) \right); \\ \forall C_i \left(\forall C_j \left((C_i \in LIS - A) \wedge (C_j \in I_i) \wedge \neg(C_j \in LSP') \right) \rightarrow (C_i \in G) \right). \end{array} \right. \quad (8)$$

Коэффициент-родитель C_i переносится из множества $LIS-A$ в множество $LIS-B$:

$$\forall C_i \left(\exists M_i^D \left((C_i \in LIS - A) \wedge (M_i^D = 1) \right) \rightarrow \left((C_i \notin LIS - A) \wedge (C_i \in LIS - B) \right) \right). \quad (9)$$

Для каждого коэффициента-родителя C_i из множества $LIS-B$ и множества P осуществляется поиск значимых потомков в множестве L_i и определяется значение бита M_i^L :

$$\begin{cases} \forall C_i \left(\exists C_j \left((C_i \in LIS - B) \wedge (C_i \in P) \wedge (C_j \in L_i) \wedge (C_j \in LSP') \right) \rightarrow \exists M_i^L (M_i^L = 1) \right); \\ \forall C_i \left(\forall C_j \left((C_i \in LIS - B) \wedge (C_i \in P) \wedge (C_j \in L_i) \wedge \neg (C_j \in LSP') \right) \rightarrow \exists M_i^L (M_i^L = 0) \right). \end{cases} \quad (10)$$

Если значимые потомки в множестве L_i обнаружены, то непосредственные потомки коэффициента C_i причисляются к множеству $LIS-A$:

$$\forall C_i \forall C_j \left(\exists M_i^L \left((C_i \in LIS - B) \wedge (C_i \in P) \wedge (C_j \in L_i) \wedge (M_i^L = 1) \right) \rightarrow (C_j \in LIS - A) \right). \quad (11)$$

Для коэффициентов-родителей C_i из множества $LIS-B$ и множества G поиск значимых коэффициентов-потомков в множествах L_i не производится, биты M_i^L не формируются и непосредственные потомки коэффициента C_i причисляются к множеству $LIS-A$ по умолчанию:

$$\forall C_i \forall C_j \left(\left((C_i \in LIS - B) \wedge (C_i \in G) \wedge (C_j \in L_i) \right) \rightarrow (C_j \in LIS - A) \right). \quad (12)$$

Коэффициент-родитель C_i исключается из множества LIS .

5. Формирование информации о битовой плоскости $B(T)$ значимых вейвлет-коэффициентов из множества LSP :

$$\forall C_i \left((C_i \in LSP) \rightarrow \exists B_i(T) \left(B_i(T) = \begin{cases} 1 \text{ и } \delta \text{è } (|C_i|) \bmod_{2^{T+1}} \geq 2^T \\ 0 \text{ и } \delta \text{è } (|C_i|) \bmod_{2^{T+1}} < 2^T \end{cases} \right) \right), \quad (13)$$

где T – текущее значение порога, выбирающее битовую плоскость; $\bmod_{2^{T+1}}$ – операция по модулю 2^{T+1} над абсолютным значением вейвлет-коэффициента.

На первой итерации алгоритма компактного описания, соответствующей максимальному значению порога, множество LSP пусто и информация о битовой плоскости не формируется.

6. Включение коэффициентов множества LSP' в множество LSP с целью осуществления передачи информации о битовых плоскостях данных коэффициентов на шаге 5 в последующих циклах алгоритма:

$$LSP = LSP \cup LSP'. \quad (14)$$

7. Проверка значения порога на равенство нулю. Если условие не выполняется, осуществляется уменьшение порога на 1 и переход к началу цикла на шаг 2. Если порог равен нулю, информация о вейвлет-коэффициентах сформирована полностью и алгоритм компактного описания завершен. Вторым условием завершения алгоритма может быть превышение максимально допустимого числа бит, выделяемого для компактного описания вейвлет-коэффициентов.

В результате для 2D-вейвлет-преобразования цикл описания вейвлет-коэффициентов множества LIS состоит из D -, DI - и DIL -серий (рис. 4, а) длиной 1, 5 и 7–10 бит соответственно, формируемых согласно графу (рис. 4, б). Данное описание вейвлет-коэффициентов является более компактным, чем описание, формируемое алгоритмом SPIHT (см. рис. 3, б) за счет замены некоторых длинных DIL -серий на более короткие DI -серии для коэффициентов из множества G . В этом случае DIL -серии представляют коэффициенты из множества P .

Выполнение условия (12) для некоторых коэффициентов из LIS уменьшает вычислительную сложность предлагаемого алгоритма сжатия, а также алгоритмическую задержку на компрессию и декомпрессию, по сравнению с алгоритмом SPIHT, за счет исключения операций поиска значимых коэффициентов-потомков среди элементов множества L_i . Вычислительная

D , что снижает вычислительную сложность и алгоритмическую задержку на компрессию и декомпрессию.

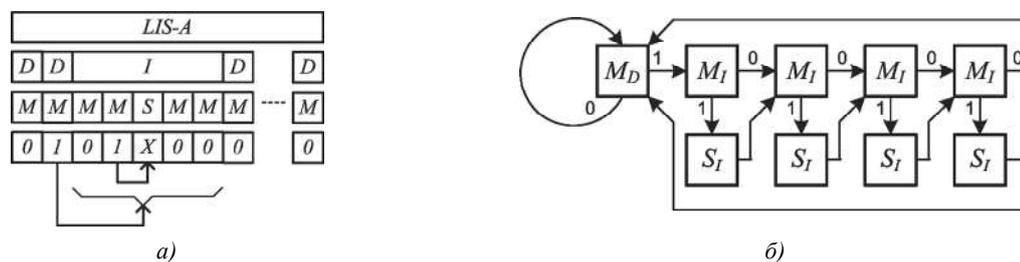


Рис. 5. Формирование битового потока алгоритмом компактного описания целочисленных вейвлет-коэффициентов: а) фрагмент структуры цикла с описанием множеств D , I ; б) граф формирования описания множеств D , I

Предложенное компактное описание целочисленных вейвлет-коэффициентов, как и рациональных, определяет несимметричную систему компрессии-декомпрессии из-за исключения операций поиска значимых коэффициентов в иерархических множествах при декомпрессии.

4. Результаты моделирования

Для оценки эффективности предложенных компактных описаний рациональных и целочисленных вейвлет-коэффициентов разработаны программные модели, реализующие 1D-, 2D- и 3D-алгоритмы сжатия вейвлет-коэффициентов (1D-BC – одномерное вейвлет-сжатие, 2D-BC – двухмерное и 3D-BC – трехмерное соответственно), и произведено сравнение их характеристик с характеристиками 1D-, 2D- и 3D-алгоритмов SPIHT (1D-SPIHT, 2D-SPIHT, 3D-SPIHT) для различных составляющих медиаданных: аудио (рис. 6), неподвижных изображений (рис. 7) и видео (рис. 8) [15]. Во всех случаях использованы рациональное и целочисленное вейвлет-преобразования Хаара.

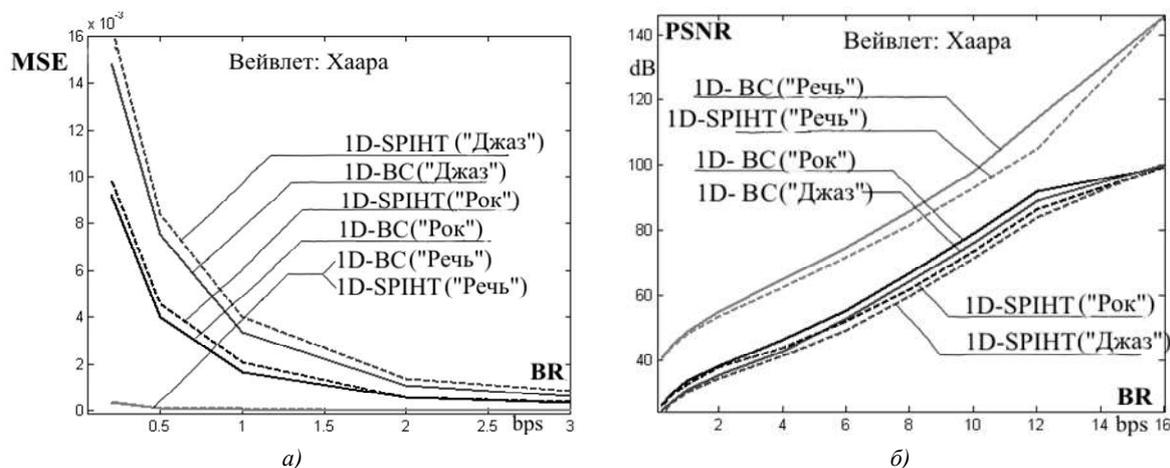


Рис. 6. Характеристики сжатия аудиоданных: а) MSE; б) PSNR

В качестве тестовых сигналов для оценки характеристик сжатия аудиоданных выбраны два характерных монофонических музыкальных 16-битных фрагмента по 262 144 отсчета в стиле рок («Рок») и джаз («Джаз») с частотой оцифровки 44 100 Гц, а также 16-битный речевой фрагмент в 262 144 отсчета с частотой оцифровки 22 050 Гц («Речь»), имеющие существенные различия в динамическом диапазоне и огибающей спектральных компонент. В качестве тестовых изображений использованы два стандартных тестовых полутоновых изображения размером 512×512 пикселей: низкочастотное «Лена» и высокочастотное «Барбара», а также высокочастотное полутоновое аэрокосмическое изображение «Аэро» размером 512×512 пикселей с преобладанием структурных элементов. Для оценки параметров 3D-алгоритмов сжатия использованы три видеопоследовательности по 64 полутоновых кадра форматом 64×64 пикселей,

представляющие перемещение низкочастотных («Видео-1») и высокочастотных («Видео-2» и «Видео-3») объектов на видеоизображении.

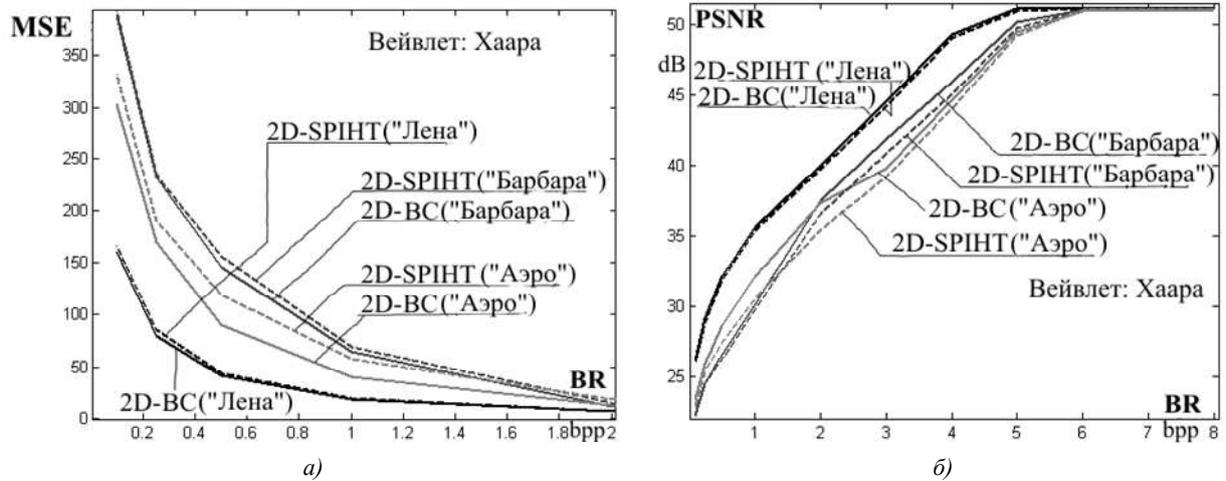


Рис. 7. Характеристики сжатия полутоновых изображений: а) MSE; б) PSNR

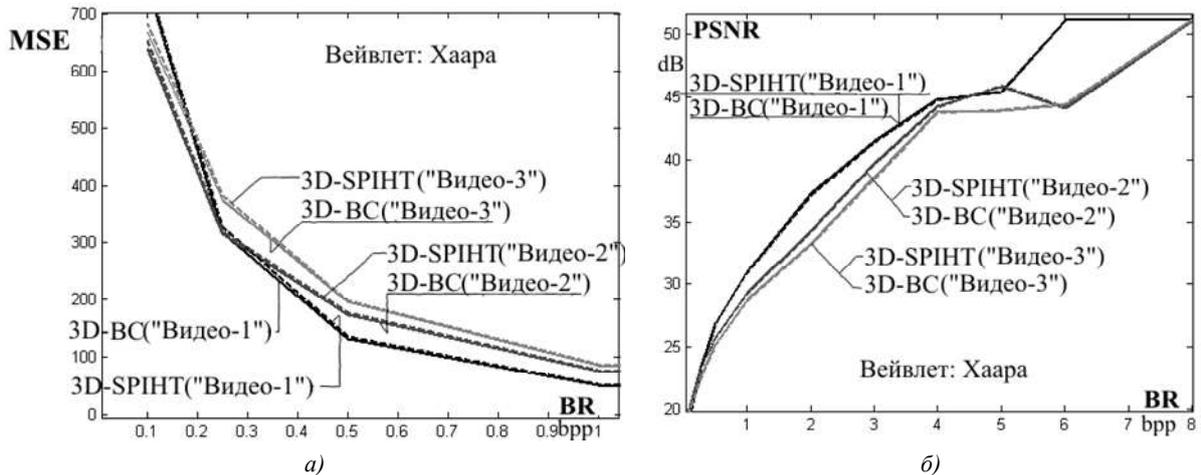


Рис. 8. Характеристики сжатия полутоновых видеоданных: а) MSE; б) PSNR

Для сравнения эффективности алгоритмов сжатия рациональных значений вейвлет-коэффициентов использованы оценки среднего квадрата ошибки MSE и пикового отношения сигнал-шум $PSNR$ при различной степени сжатия BR :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (X_i - \tilde{X}_i)^2; \quad (16)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{(2^P - 1)^2}{MSE} \right); \quad (17)$$

$$BR = BD/CR = V/n, \quad (18)$$

где X_i, \tilde{X}_i – исходное и восстановленное значения дискретов сигнала (пикселей изображения, видеоданных или отсчетов аудиоданных); n – общее число пикселей изображения, видеоданных или отсчетов аудиоданных; BD – число бит на пиксель (bpp) для исходного изображения и видеоданных или число бит на отсчет (bps) для исходных аудиоданных; $CR = n \cdot BD / V$ – коэффициент сжатия; V – объем сжатых данных в битах.

В таблице представлены коэффициенты сжатия без потерь для предложенных алгоритмов 1D-WC, 2D-WC и 3D-WC компактного описания целочисленных вейвлет-коэффициентов и алгоритма SPIHT.

Таблица

Коэффициенты сжатия (CR) тестовых аудиоданных, изображений и видеоданных

Алгоритмы	Тестовые аудиоданные			Тестовые изображения			Тестовые видеоданные		
	«Рок»	«Джаз»	«Речь»	«Лена»	«Барбара»	«Аэро»	«Видео-1»	«Видео-2»	«Видео-3»
1D-BC	1,18	1,14	1,32						
1D-SPIHT	1,12	1,09	1,26						
2D-BC				1,60	1,43	1,39			
2D-SPIHT				1,56	1,40	1,35			
3D-BC							1,315	1,267	1,211
3D-SPIHT							1,306	1,258	1,203

Наибольший выигрыш при использовании предлагаемого компактного описания вейвлет-коэффициентов, по сравнению с алгоритмом SPIHT, обеспечивается для аудиоданных: выигрыш в оценке $PSNR$ при малой и средней степени сжатия с потерями достигает 10 дБ (дБ), выигрыш в коэффициенте сжатия без потерь составляет порядка 6 %. Выигрыш для полутоновых изображений меньше: до 3 дБ в оценке $PSNR$ и порядка 4 % в коэффициенте сжатия CR . Выигрыш для полутоновых видеоданных наименьший: до 1 дБ в оценке $PSNR$ и 0,1 % в коэффициенте сжатия CR . Таким образом, эффективность предложенного компактного описания вейвлет-коэффициентов снижается с увеличением мерности обрабатываемых компонент медиаданных. Использование данного компактного описания целесообразно для компонент медиаданных любого типа, поскольку позволяет уменьшить вычислительную сложность и алгоритмическую задержку компрессии и декомпрессии. Использование семейства биортогональных вейвлет-функций, отличных от Хаара, позволяет улучшить характеристики сжатия, но не влияет на результаты сравнительного анализа.

Заключение

Представленные теоретические и экспериментальные результаты показывают эффективность предложенных способов компактного описания коэффициентов рационального и целочисленного вейвлет-преобразований на основе иерархических множеств вейвлет-коэффициентов. Алгоритмы компактного описания определяются статистикой распределения значимых вейвлет-коэффициентов по поддиапазонам и являются существенно различными для рационального и целочисленного вейвлет-преобразований. При рациональном вейвлет-преобразовании и сжатии медиаданных с потерями предложенное компактное описание вейвлет-коэффициентов позволяет увеличить $PSNR$ при постоянном коэффициенте сжатия на 10, 3 и 1 дБ для аудиоданных, полутоновых изображений и видеоданных соответственно за счет расширения классификации вейвлет-коэффициентов с целью уточнения наследственной иерархической связи между значимыми коэффициентами-родителями и коэффициентами-потомками. При целочисленном вейвлет-преобразовании и сжатии медиаданных без потерь компактность описания вейвлет-коэффициентов позволяет увеличить коэффициент сжатия на 6, 4 и 0,1 % для аудиоданных, изображений и видеоданных соответственно за счет упрощения классификации коэффициентов-потомков. В обоих случаях достигается сокращение объема информации о вейвлет-коэффициентах в формируемом алгоритмом сжатия битовом потоке, уменьшение вычислительной сложности алгоритма и алгоритмической задержки на компрессию и декомпрессию медиаданных. Для предложенных компактных описаний вейвлет-коэффициентов система компрессии-декомпрессии является несимметричной из-за исключения операций поиска значимых коэффициентов в иерархических множествах при декомпрессии.

Список литературы

1. 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.

2. Shapiro, J.M. Embedded image coding using zerotress of wavelet coefficients / J.M. Shapiro // IEEE Trans. Signal Processing. – 1993. – № 41. – P. 3445–3462.
3. Chai, B.-B. Significance-linked connected component analysis for wavelet image coding / B.-B. Chai, J. Vass, X. Zhuang // IEEE Trans. Image Processing. – 1999. – Vol. 8, № 6. – P. 774–784.
4. Islam, A. An embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder / A. Islam, W.A. Pearlman // Proc. of SPIE. Visual Communications and Image Processing. – San Jose, CA, 1999. – Vol. 3653. – P. 294–305.
5. Servetto, S. Wavelet based image coding via morphological prediction of significance / S. Servetto, K. Ramchandran, M.T. Orchard // Proc. of IEEE International Conference on Image Processing. – Atlanta, 1995. – P. 530–533.
6. Wavelet TCQ: submission to JPEG-2000 / P. J. Sementilli [et al.] // Proc. of SPIE. Appl. of Digital Image Processing XXI. – San Jose, CA, 1998. – Vol. 3460. – P. 2–12.
7. A zerotree wavelet video coder / S.A. Martucci [et al.] // IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology. – 1997. – Vol. 7, № 1. – P. 109–118.
8. Vass, J. 3DSLCCA – A highly scalable very low bit rate software-only wavelet video codec / J. Vass, B.-B. Chai, X. Zhuang // Proc. of IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing. – Los Angeles, CA, 1998. – P. 474–479.
9. Kim, B.-J. An embedded wavelet video coder using three-dimensional set partitioning in hierarchical trees (SPIHT) / B.-J. Kim, W. Pearlman // Proc. of Data Compression Conference. – Snowbird, Utah, 1997. – P. 251–260.
10. Сэломон, Д. Сжатие данных, изображения и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 360 с.
11. Малла, С. Вэйвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М.: Мир, 2005. – 650 с.
12. Buccigrossi, R. W. Image compression via joint statistical characterization in the wavelet domain / R.W. Buccigrossi, E.P. Simoncelli // IEEE Trans. Image Processing. – 1999. – Vol. 8, № 12. – P. 1688–1701.
13. Villasenor, J. Wavelet Filter Evaluation for Image Compression / J. Villasenor, B. Belzer, J. Liao // IEEE Trans. Image Processing. – 1995. – Vol 2. – P. 1053–1060.
14. Sweldens, W. The Lifting Scheme: A New Philosophy in Biorthogonal Wavelet Constructions / W. Sweldens // Proc. of SPIE. – San Jose, CA, 1995. – Vol. 2569. – P. 68–79.
15. Борискевич, А.А. Повышение эффективности сжатия изображений алгоритмом SPIHT / А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков // Современные средства связи: материалы науч.-техн. конф. – Нарочь, 2006 г. – Минск: Бестпринт, 2006. – С. 93.

Поступила 16.11.06

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

A.A. Boriskevich, V.Yu. Tsviatkou

A COMPACT DESCRIPTION OF WAVELET COEFFICIENTS FOR MULTIMEDIA DATA COMPRESSION

A compact wavelet coefficient description based on the hierarchical sets and the embedded coding is proposed. A comparative efficiency estimation of the wavelet coefficient compression based on the proposed compact description is given. It is shown that the description allows to reduce the mean square error, to increase the peak signal to noise ratio in lossy compression and the compression ratio in lossless reconstruction, to reduce the computational complexity, and the algorithmic delay of wavelet coefficient compression and decompression for various multimedia data components.