

УДК 621.391

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ ВЕЙВЛЕТ-КОЭФФИЦИЕНТОВ НА СЖАТИЕ МЕДИАДАНЫХ

А.А. БОРИСКЕВИЧ, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь,*

*Поступила в редакцию 19 июня 2006*

Предложены алгоритмы модификации вейвлет-коэффициентов, основанные на масштабировании и коррекции значений вейвлет-коэффициентов для адаптации к равномерной шкале квантования и согласования восстановленных значений с динамическим диапазоном исходных вейвлет-коэффициентов. Данные алгоритмы позволяют улучшить характеристики вейвлет-сжатия различных компонент медиаданных (аудио, изображений и видео) с потерями. Дана количественная оценка влияния модификации вейвлет-коэффициентов на характеристики сжатия. Показано, что характеристики вейвлет-кодеков могут быть улучшены в области малых коэффициентов сжатия за счет выбора оптимального значения масштабирующего коэффициента и в области средних коэффициентов сжатия за счет коррекции восстановленных значений вейвлет-коэффициентов на величину предсказанной ошибки восстановления.

*Ключевые слова:* вейвлет-коэффициенты, квантование, сжатие, восстановление, масштабирование, коррекция.

### Введение

Перспективным направлением в области хранения, обработки, передачи и распределения мультимедийной информации является технология вейвлет-сжатия. Данная технология позволяет достичь высокого качества восстановления информации и значительных коэффициентов сжатия при относительно низкой вычислительной сложности. Наибольшее распространение получили алгоритмы вейвлет-сжатия изображений, такие как EZW (Embedded Zerotree Wavelet) [1], SLCCA (Significance-linked connected component analysis) [2], SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees) [3], SPECK (Set Partitioning Embedded bloCK) [4], MRWD (Morphological Representation of Wavelet Data) [5], JPEG 2000 [6] и т.д. Для сжатия видеоданных разработаны трехмерные версии некоторых 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 вейвлет-сжатия для улучшения их характеристик и расширения области применения.

### Квантование и восстановление значений вейвлет-коэффициентов

Сущность технологии вейвлет-сжатия состоит в использовании операций прямого и обратного рационального и целочисленного вейвлет-преобразований, эффективного вложенного квантования и восстановления вейвлет-коэффициентов. При динамическом выделении сетевых

ресурсов и резервировании полосы пропускания канала связи в соответствие с объемом передаваемой информации и временем на передачу возможно сжатие изображений, аудио и видеоданных без потерь с использованием целочисленного вейвлет-преобразования на основе лифтинг-схемы [10]. Если требуемая скорость передачи превышает пропускную способность канала связи, возможно их согласование за счет сжатия дискретных сигналов с потерями на основе рационального вейвлет-преобразования, использующего банк вейвлет-фильтров [11]. Сжатие рациональных значений вейвлет-коэффициентов требует их предварительного квантования. При вейвлет-сжатии осуществляется прогрессивная передача информации о вейвлет-коэффициентах. Особенностью режима прогрессивной передачи является эффективное распределение бит, определяющих значения вейвлет-коэффициентов, по битовым плоскостям и передача битовых плоскостей в порядке убывания их психовизуальной и психоакустической значимости. Это позволяет реализовать на приемной стороне постепенное восстановление значений вейвлет-коэффициентов и постепенное улучшение качества восстанавливаемого сигнала, оцениваемого средним квадратом ошибки  $MSE$  (mean-square error) и пиковым отношением сигнал шум  $PSNR$  (peak signal-to-noise ratio) при определенной степени сжатия  $BR$  (Bit Ratio):

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

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{(2^p - 1)^2}{MSE} \right), \quad (2)$$

$$BR = BD/CR, \quad (3)$$

где  $X_i, \tilde{X}_i$  — исходное и восстановленные значения дискретов сигнала (пикселей изображения, видеоданных или отсчетов аудиоданных);  $n$  — общее число пикселей изображения, видеоданных или отсчетов аудиоданных;  $BD$  — битовая глубина (bit depth — 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 (Compression Ratio);  $V$  — объем сжатых данных в битах.

Причинами ошибок восстановления данных являются квантование рациональных значений вейвлет-коэффициентов и ограничение объема  $V$  передаваемой о них информации при  $CR > 1$ .

В результате равномерного квантования ряд различных значений исходных вейвлет-коэффициентов  $C_i^O$ , заключенных в интервале квантования  $[L, L+1)$ , заменяются на  $L$  и  $L+1$  или  $L$  в зависимости от способа квантования: округление до ближайшего целого в соответствии

с выражением  $C_i^O = \begin{cases} L, & \text{при } L \leq C_i^O < L + 0,5, \\ L + 1, & \text{при } L + 0,5 \leq C_i^O < L + 1 \end{cases}$  или округление с недостатком согласно

соотношению  $C_i^O = L$ , при  $L \leq C_i^O < L + 1$ , где  $i = \overline{0, n-1}$  — номер вейвлет-коэффициента;  $n$  — число вейвлет-коэффициентов.

Операции округления и усечения необратимы и являются причинами шума квантования. Мощность шума квантования вейвлет-коэффициентов определяет качество восстановления сигнала при малой степени сжатия.

При средней и высокой степени сжатия качество восстановления сигнала определяется объемом  $V$  передаваемой информации о вейвлет-коэффициентах. Ограничение  $V$  приводит к неточному восстановлению значений вейвлет-коэффициентов. При сжатии с потерями для всех исходных  $C_i^O$  и восстановленных  $C_i^R$  значений вейвлет-коэффициентов справедливо соотношение  $C_i^R \leq C_i^O$ .

Увеличение степени сжатия приводит к росту значений ошибок восстановления вейвлет-коэффициентов и ухудшению оценок  $MSE$  и  $PSNR$  восстановленных данных.

В связи с этим актуальной является задача поиска эффективных алгоритмов обработки рациональных значений вейвлет-коэффициентов, позволяющих сократить потери информации при квантовании и восстановлении значений вейвлет-коэффициентов.

### Масштабирование значений вейвлет-коэффициентов

Предлагается алгоритм адаптации значений вейвлет-коэффициентов к шкале квантования по критерию минимума среднеквадратической ошибки восстановления данных. Алгоритм основан на масштабировании значений вейвлет-коэффициентов перед квантованием и после их восстановления. Он позволяет сократить объем информации о вейвлет-коэффициентах и улучшить качество восстановления при сжатии медиаданных с потерями. На рис. 1,а представлена структурная схема процедуры масштабирования вейвлет-коэффициентов. Из рисунка видно, что суть предложенного алгоритма состоит в умножении рациональных значений всех вейвлет-коэффициентов на масштабирующий коэффициент  $s$  перед квантованием и выполнении обратной операции после восстановления значений вейвлет-коэффициентов. Выбор значения коэффициента  $s$  зависит от плотности вероятности значений исходных и восстановленных вейвлет-коэффициентов и осуществляется следующим образом.

Если значения любой пары исходных вейвлет-коэффициентов  $C_i^o$  и  $C_j^o$  находятся в интервале квантования  $[L, L+1)$ , то модуль их разности не превышает единицы:

$$\forall C_i^o \forall C_j^o \left( (L \leq C_i^o < L+1) \wedge (L \leq C_j^o < L+1) \wedge (C_i^o \neq C_j^o) \right) \rightarrow (|C_i^o - C_j^o| < 1). \quad (4)$$

В этом случае значение масштабирующего коэффициента может быть выбрано из диапазона  $s > 1$  таким образом, чтобы для любой пары вейвлет-коэффициентов, значения которых находятся в интервале квантования  $[L, L+1)$ , выполнялось условие

$$\forall C_i^o \forall C_j^o \exists s \left( (L \leq C_i^o < L+1) \wedge (L \leq C_j^o < L+1) \wedge (C_i^o \neq C_j^o) \rightarrow (|s C_i^o - s C_j^o| \geq 1) \wedge (s > 1) \right). \quad (5)$$

Следовательно, значения вейвлет-коэффициентов из интервала квантования  $[L, L+1)$  (рис. 1,б) после масштабирования окажутся в разных интервалах (рис. 1,з) и после квантования (рис. 1,д) могут быть восстановлены более точно, чем квантованные немасштабированные вейвлет-коэффициенты (рис. 1,в).

Выполнение условия (5) позволяет уменьшить шум квантования и улучшить оценку  $MSE$  для восстановленных данных, не превышающую предельного значения  $MSE$  при коэффициенте сжатия  $CR=1$  без масштабирования ( $s=1$ ).

Если значения любой пары восстановленных вейвлет-коэффициентов  $C_i^R$  и  $C_j^R$  находятся на разных уровнях квантования  $L_1$  и  $L_2$ , то модуль разности значений соответствующих не-квантованных исходных вейвлет-коэффициентов не меньше единицы:

$$\forall C_i^R \forall C_j^R \forall C_i^o \forall C_j^o \left( (C_i^R = L_1) \wedge (C_j^R = L_2) \right) \rightarrow (|C_i^o - C_j^o| \geq 1). \quad (6)$$

В этом случае значение масштабирующего коэффициента может быть выбрано из диапазона  $s < 1$  так, чтобы для любой пары восстановленных вейвлет-коэффициентов, значения которых находятся на разных уровнях квантования  $L_1$  и  $L_2$ , выполнялось условие:

$$\forall C_i^R \forall C_j^R \forall C_i^o \forall C_j^o \exists s \left( (C_i^R = L_1) \wedge (C_j^R = L_2) \rightarrow (|s C_i^o - s C_j^o| < 1) \wedge (s < 1) \right). \quad (7)$$

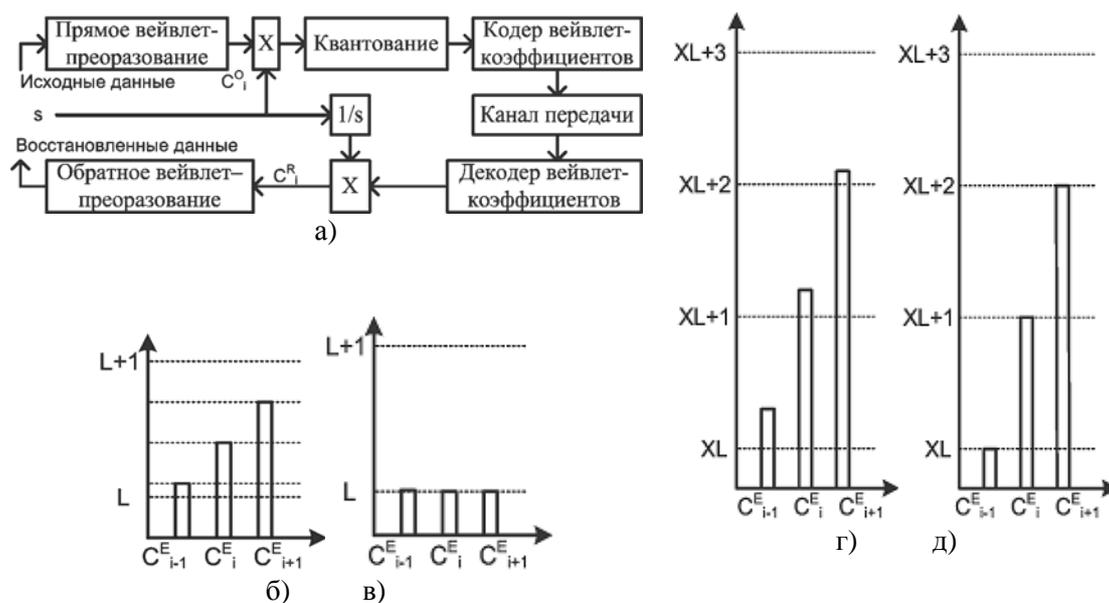


Рис. 1. Масштабирование вейвлет-коэффициентов: *a* — структурная схема процедуры масштабирования; *б* — исходные вейвлет-коэффициенты; *в* — квантованные вейвлет-коэффициенты; *г* — масштабированные вейвлет-коэффициенты; *д* — квантованные масштабированные вейвлет-коэффициенты

Поскольку величина масштабирующего коэффициента  $s$  влияет на максимальное абсолютное значение  $C_{max}^o$  исходных вейвлет-коэффициентов, то изменение числа  $T$  битовых плоскостей (реальной битовой глубины) оценивается соотношением:

$$T = \lceil \log_2 (C_{max}^o(s)) \rceil, \quad (8)$$

где  $\lceil \cdot \rceil$  — операция округления с избытком;  $C_{max}^o(s) = \max \left\{ \left| C_i^o(s) \right| \right\}$  — максимальное абсолютное значение исходных вейвлет-коэффициентов;  $i = \overline{0, n-1}$ ;  $n$  — число вейвлет-коэффициентов.

Согласно выражению (8), выбор значения масштабирующего коэффициента  $s < 1$  приводит к уменьшению значения максимального вейвлет-коэффициента, числа  $T$  битовых плоскостей, а также увеличению концентрации информации в битовых плоскостях. В результате при сжатии с потерями передаваемая информация о вейвлет-коэффициентах в объеме  $V$ , ограниченном коэффициентом сжатия, позволяет менее точно восстановить значения большего числа вейвлет-коэффициентов. Сокращение числа битовых плоскостей за счет масштабирования при  $s < 1$  может привести к тому, что реальный коэффициент сжатия  $CR$  окажется больше заданного коэффициента сжатия  $CR_s$ .

Алгоритм поиска оптимального значения масштабирующего коэффициента  $s$  по критерию минимума среднеквадратической ошибки  $MSE$  восстановления сигнала целесообразно осуществлять в диапазонах  $s_L \leq s < 1$  и  $1 < s \leq s_H$ , где  $s_L$  и  $s_H$  — нижняя и верхняя границы поиска. Значение  $s_H$  определяется минимально достижимым значением  $MSE$  при коэффициенте сжатия  $CR=1$  без масштабирования ( $s=1$ ). Значение  $s_L$  определяется условием  $CR_s < \min(CR)$ . Выбранное значение  $s$  должно быть передано на декомпрессор.

## Коррекция восстановленных значений вейвлет-коэффициентов

Предлагается алгоритм согласования восстановленных значений вейвлет-коэффициентов с динамическим диапазоном исходных вейвлет-коэффициентов. Данный алгоритм основан на коррекции восстановленных значений в соответствии с предсказанной ошибкой восстановления и позволяет улучшить качество восстановления при сжатии медианных с потерями. Алгоритм включает операции определения максимального абсолютного значения  $C_{\max}^O$  исходных вейвлет-коэффициентов (рис. 2,а), передачи данного значения в декомпрессор, вычисления максимального абсолютного значения  $C_{\max}^R$  восстановленных вейвлет-коэффициентов и вычисления приблизительного значения ошибки  $\delta$  восстановления вейвлет-коэффициентов в соответствии с выражением:

$$\delta = \frac{C_{\max}^O - C_{\max}^R}{2}. \quad (9)$$

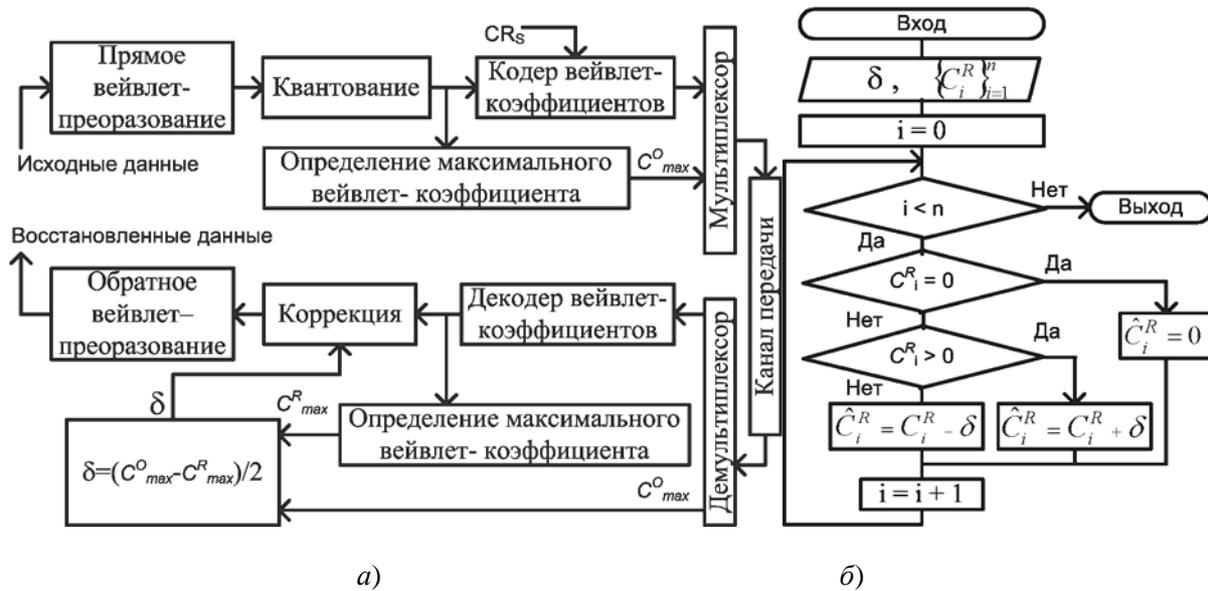


Рис. 2. Коррекция восстановленных значений вейвлет-коэффициентов: а — структурная схема процедуры коррекции; б — алгоритм коррекции

Предсказанная ошибка восстановления  $\delta$  используется для вычисления скорректированных значений вейвлет-коэффициентов  $\hat{C}_i^R$  (рис. 2,б) с учетом знака восстановленных значений вейвлет-коэффициентов  $C_i^R$  в соответствии с соотношением:

$$\hat{C}_i^R = \begin{cases} C_i^R + \delta & \text{при } C_i^R > 0, \\ C_i^R - \delta & \text{при } C_i^R < 0, \\ 0 & \text{при } C_i^R = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Из выражений (1), (2) и (10) видно, что данная коррекция позволяет улучшить оценки качества восстановленного сигнала  $MSE$  и  $PSNR$ .

## Результаты моделирования

Для оценки эффективности использования предложенных алгоритмов модификации вейвлет-коэффициентов разработаны программные модели вейвлет-кодеков для сжатия медианных с потерями: одномерные (1D-WC), двумерные (2D-WC) и трехмерные (3D-WC) [12].

В качестве тестовых сигналов для оценки характеристик сжатия аудиоданных выбраны два характерных монофонических музыкальных 16-битных фрагмента по 262144 отсчета

в стиле рок ("Rock") и джаз ("Jazz") с частотой оцифровки 44100 Гц, имеющие существенные различия в динамическом диапазоне и распределении спектральных компонент. В качестве тестовых изображений использованы два стандартных тестовых полутоновых изображения 512×512 пикселей: низкочастотное "Lena" и высокочастотное "Barbara". Для оценки параметров 3D алгоритмов сжатия использованы две видеопоследовательности по 64 полутоновых кадра форматом 64×64 пикселей, представляющие перемещение низкочастотных ("Video-1") и высокочастотных ("Video-2") объектов на видеоизображении.

Адаптация значений вейвлет-коэффициентов к шкале квантования для полутоновых изображений и видеоданных наиболее эффективна при небольшой степени сжатия (рис. 3). При  $BR > 2$  bpp выигрыш в оценке  $PSNR$  для полутоновых изображений может достигать 5 дБ. Для аудиоданных масштабирование не приводит к существенному выигрышу в оценке  $PSNR$ , но позволяет управлять степенью сжатия в пределах 13–16 bps без существенного изменения значения  $PSNR$ .

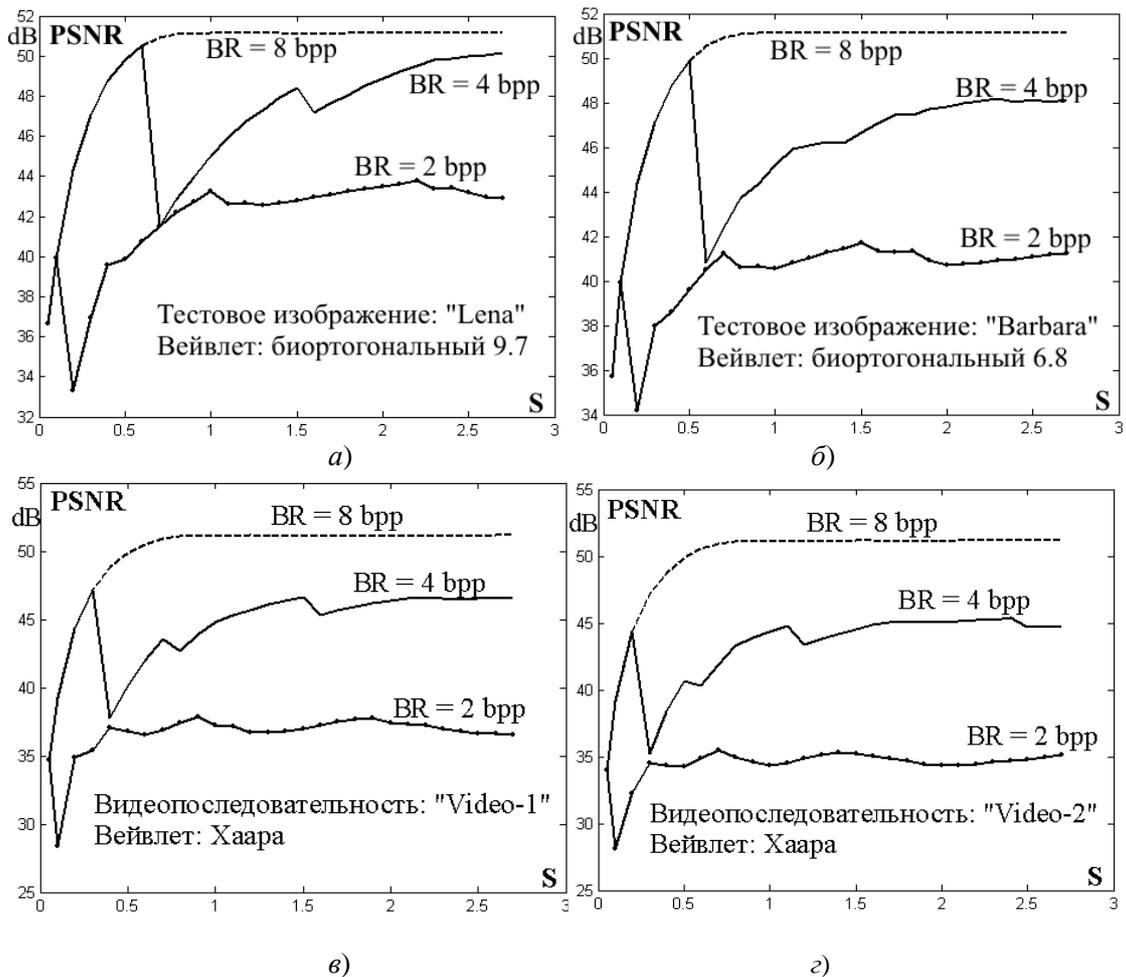


Рис. 3. Характеристики сжатия полутоновых изображений и видеоданных: *a* —  $PSNR$  для "Lena"; *б* —  $PSNR$  для "Barbara"; *в* —  $PSNR$  для "Video-1"; *г* —  $PSNR$  для "Video-2"

Относительно низкая эффективность масштабирования значений вейвлет-коэффициентов для аудиоданных в сравнении с изображениями и видеоданными объясняется более высокой разрядностью отсчетов аудиоданных, а также спецификой формы плотности вероятности значений вейвлет-коэффициентов, обусловленной высокочастотным характером аудиоданных и более равномерной концентрацией информации в битовых плоскостях.

Согласование восстановленных значений вейвлет-коэффициентов с динамическим диапазоном исходных вейвлет-коэффициентов за счет коррекции наиболее эффективно при сжатии аудио и видеоданных (рис. 4). Вейвлет-кодеки с коррекцией (1D-WCс, 2D-WCс, 3D-WCс) в

сравнении с вейвлет-кодеками без коррекции (1D-WC, 2D-WC, 3D-WC) позволяют получить наибольший выигрыш в оценке  $PSNR$  в области средних коэффициентов сжатия: до 5 дБ для аудиоданных при  $0,5 < BR < 14$  bps и до 3 дБ для изображений и видеоданных при  $0,5 < BR < 4$  bps. В области малых коэффициентов сжатия точность предсказания ошибки восстановления невысока и может дать проигрыш в оценке  $PSNR$  до 7 дБ для изображений и видеоданных. В области больших коэффициентов сжатия коррекция неэффективна из-за низкой точности восстановления значений вейвлет-коэффициентов. Из рис. 4 видно, что для высокочастотных компонент медианных коррекция восстановленных значений вейвлет-коэффициентов более эффективна, чем для низкочастотных. Это объясняется более равномерным характером гистограммы значений вейвлет-коэффициентов высокочастотных данных.

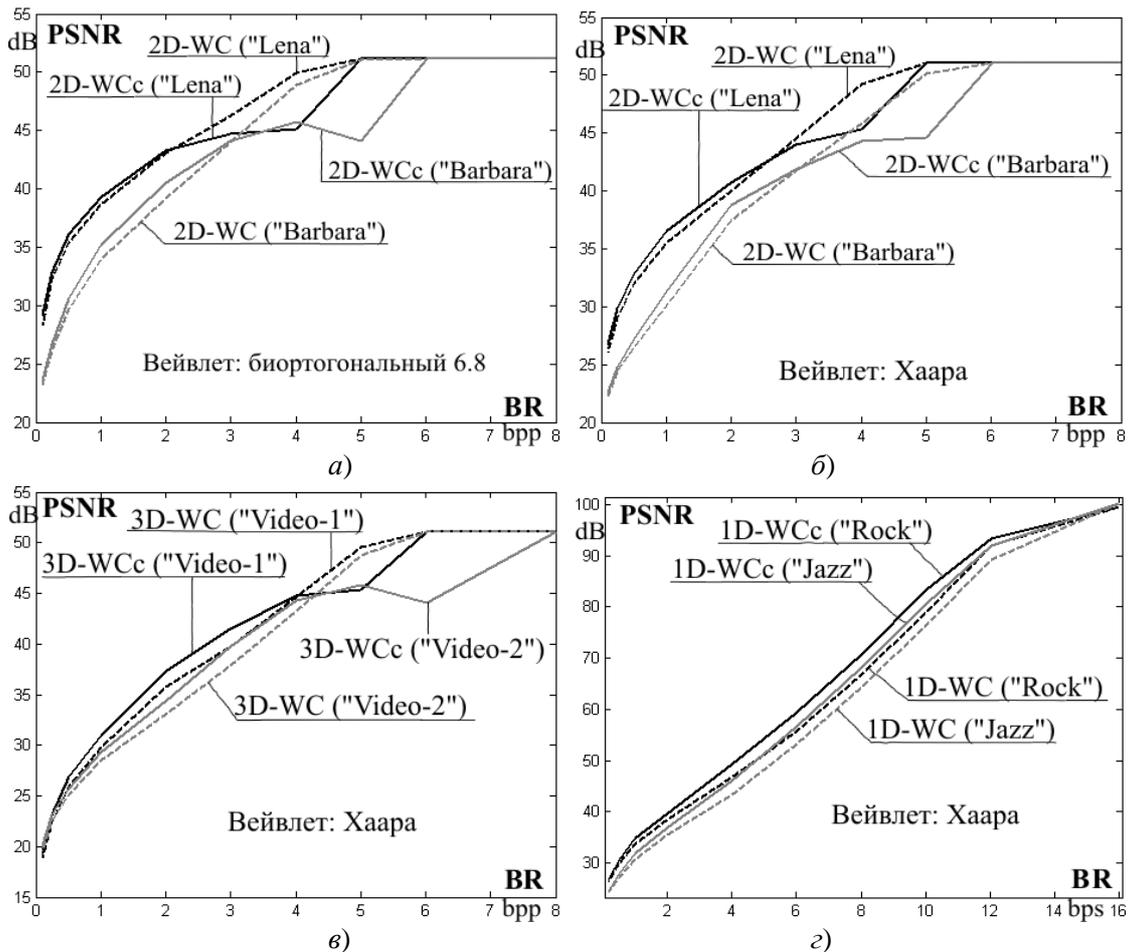


Рис. 4. Характеристики сжатия компонент медианных: а, б —  $PSNR$  для полутоновых изображений; в —  $PSNR$  для видеоданных; г —  $PSNR$  для аудиоданных

### Заключение

Результаты моделирования показывают эффективность использования предложенных алгоритмов модификации значений вейвлет-коэффициентов в составе вейвлет-кодеков для сжатия различных компонент медианных: изображений, видео, аудио. Алгоритм адаптации значений вейвлет-коэффициентов к шкале квантования, основанный на выборе оптимального значения масштабирующего коэффициента, эффективен в области малых коэффициентов сжатия ( $BR > 2$  bps — для изображений и видеоданных) и позволяет получить выигрыш в оценке  $PSNR$  порядка 5 дБ для полутоновых изображений и видеоданных. Алгоритм согласования восстановленных значений вейвлет-коэффициентов с динамическим диапазоном исходных вейвлет-коэффициентов, основанный на коррекции восстановленных значений вейвлет-

коэффициентов в соответствие с предсказанной ошибкой восстановления, эффективен в области средних коэффициентов сжатия ( $0,5 < BR < 4$  bpp — для изображений и видеоданных,  $0,5 < BR < 14$  bps — для аудиоданных) и позволяет получить выигрыш в оценке *PSNR* до 10 дБ для аудиоданных и до 3 дБ для изображений и видеоданных. Эффективность предложенных алгоритмов модификации вейвлет-коэффициентов ограничена формой плотности вероятности значений вейвлет-коэффициентов различных компонент медиаданных.

## ESTIMATION OF WAVELET COEFFICIENTS MODIFICATION INFLUENCE ON MULTIMEDIA DATA COMPRESSION

A.A. BORISKEVICH, V.YU. TSVIATKOU

### Abstract

The wavelet coefficients modification algorithms based on scaling and correcting wavelet coefficient values for adaptation to uniform quantization scale and adjusting reconstructed values with original wavelet coefficients dynamic range are proposed. The algorithms allow to improve lossy wavelet compression characteristics for the various multimedia components (audio, image and video). A quantitative estimation of wavelet coefficients modification influence on the multimedia data compression characteristics is presented. It is shown that the wavelet compression characteristics may be improved in domain of low compression coefficients due to choice of optimal scalable coefficient and in domain of mean compression coefficients due to correction of reconstructed wavelet coefficient values according to predicted reconstruction error value.

### Литература

1. *Shapiro. J.M.* // IEEE Trans. Signal Processing. 1993. № 41. P. 3445–3462.
2. *Chai B.-B., Vass J., Zhuang X.* // IEEE Trans. Image Processing. 1999. Vol. 8, № 6. P. 774–784.
3. *Said A., Pearlman W.A.* // IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology. 1996. Vol. 6. P. 243–250.
4. *Islam A., Pearlman W.A.* Set partitioned sub-block coding (speck) // ISO/IEC/JTC1/SC29, WG1 N873. 1998.
5. *Servetto S., Ramchandran K., Orchard M.T.* // Proc. of IEEE International Conference on Image Processing. 1995. P. 530–533.
6. *Sementilli P.J., Bilgin A., Kasner J.H., Marcellin M.W.* // Proc. of SPIE, Appl. of Digital Image Proc. 1998. P. 2–12.
7. *Martucci S.A., Sodagar I., Chiang T., Zhang Y.-Q.* // IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology. 1997. Vol. 7, № 1. P. 109–118.
8. *Vass J., Chai B.-B., Zhuang X.* // Proc. of IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing, Los Angeles, CA. 1998. P. 474–479.
9. *Kim B.-J., Pearlman W.* // Proceedings of Data Compression Conference. 1997. P. 251–260.
10. *Sweldens W.* // Proc. of SPIE. 1995. Vol. 2569. P. 68–79.
11. *Villasenor J., Belzer B., Liao J.* // IEEE Trans. Image Processing. 1995. Vol. 2. P. 1053–1060.
12. *Борискевич А.А., Цветков В.Ю.* // Совр. средства связи: Материалы конф. Минск: Бестпринт, 2006. С. 93.