

## КОРРЕКЦИЯ АРТЕФАКТОВ ЗВОНА ПРИ JPEG-КОДИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Бехтин Ю.С.**, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации и информационных технологий в управлении Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: yuri.bekhtin@yandex.ru

**Толстая Е.В.**, ст. инженер отдела трёхмерных приложений, Исследовательский центр Samsung Electronics, г. Москва; заочный аспирант кафедры автоматизации и информационных технологий в управлении Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: ktolstaya@yandex.ru

**Ключевые слова:** компрессия цифровых изображений, сжатие изображений с потерями, метод JPEG, артефакты звона, коррекция артефактов звона

### Введение

Метод кодирования цифровых изображений JPEG широко применяется в цифровой фотографии и для хранения и передачи изображений в Интернет. При больших степенях сжатия метод JPEG вносит заметные артефакты в декодированное изображение. Принято различать на JPEG-изображениях блочные артефакты (blockiness) и артефакты звона (ringing), вызванные эффектом Гиббса [1].

Точная процедура обнаружения артефактов в каждом блоке изображения позволяет производить аккуратную модификацию изображения с подавлением артефактов и сохранением мелких деталей без внесения дополнительных погрешностей в изображение. Предлагаемая процедура обнаружения артефактов использует только коэффициенты дискретно-косинусного преобразования (ДКП). Устранение артефактов на изображении производится только для тех блоков изображения, где были выявлены артефакты. При этом результаты анализа коэффициентов ДКП сохраняются в памяти, а собственно процедура устранения артефактов звона на изображении производится после его декодирования.

К настоящему времени предложено множество способов обнаружения артефактов звона, которые основываются на нахождении контуров объектов в изображении [2-5, 10]. Однако нахождение контуров объектов – это достаточно сложная вычислительная процедура, имеющая ряд неизвестных параметров. В данной работе производится выявление артефактов звона без выполнения поиска контуров объектов.

Описывается экономный метод обнаружения и коррекции артефактов звона, появляющихся при блочном кодировании изображений с применением ДКП и квантования коэффициентов преобразования за счет избирательной (адаптивной) фильтрации участков, на которых предполагается появление звона.

### Обнаружение артефактов звона на JPEG-изображениях

В отличие от блочных, артефакты звона не проявляются на границах блоков. Тем не менее, артефакты звона становятся заметными, когда блок, содержащий ненулевые коэффициенты ДКП, соответствующие высокочастотным гармоникам (особенно блок, содержащий значительный перепад яркости), соседствует с прилегающим гладким блоком. В этом случае возле края проявляются паразитные колебания яркости, которые принадлежат тому же блоку, что и край.

Закономерности проявления артефактов звона могут быть охарактеризованы следующими правилами:

- текущий блок изображения (содержащий артефакты) представлен достаточно большим количеством ненулевых коэффициентов ДКП;
- по крайней мере, один из соседних четырёх блоков является достаточно гладким блоком (представлен малым количеством ненулевых коэффициентов ДКП);
- количество нулевых коэффициентов ДКП, которыми представлен текущий блок изображения, также достаточно велико, так как артефакты, содержащиеся в блоке изображения, – признак того, что блок был подвержен сжатию.

На рис. 1 представлены фрагменты известного изображения «Маяк» и его ненулевые коэффициенты ДКП (чёрные клетки). Как видно из рис.1, блок, подверженный артефактам, имеет «гладкого» соседа.

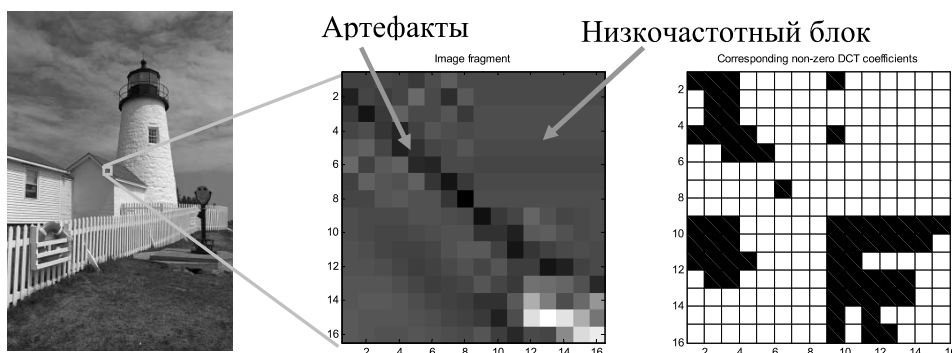


Рис.1. Фрагмент изображения «Маяк» (четыре соседних блока размером 8×8 пикселей), и соответствующие ненулевые коэффициенты ДКП (закрашены черным цветом)

На основе таких предположений проводится анализ коэффициентов ДКП для выявления «подозрительных» блоков. Методика расчета вероятности появления артефактов звона в блоке заключается в следующем.

Для каждого блока коэффициентов ДКП размером  $8 \times 8$  рассчитываются следующие величины:

1.  $i_{\max}$  - максимальный индекс ненулевого ДКП коэффициента в упорядоченном векторе коэффициентов, полученном в результате зигзагообразного сканирования;
2.  $N_{DCT}$  - число ненулевых коэффициентов ДКП в блоке.

Относительно простая метрика для оценки вероятности появления артефактов RM рассчитывается по формуле:

$$RM = \frac{\sqrt{|G_1 G_2|} (64 - N_{DCT})}{64} \times \theta(N_{DCT} > 4) \cdot \theta(G_1 < 0) \cdot \theta(G_2 < 0) \cdot \theta(i_{\max} \geq 5), \quad (3)$$

где

$$G_1 = \min_{\substack{k=\text{"top"} \\ \text{"bottom"} \\ \text{"left"} \\ \text{"right"}}} \{N_{DCT}^k - N_{DCT}\}, \quad G_2 = \min_{\substack{k=\text{"top"} \\ \text{"bottom"} \\ \text{"left"} \\ \text{"right"}}} \{i_{\max}^k - i_{\max}\}, \quad (4)$$

$64 - N_{DCT}$  - число нулевых коэффициентов ДКП в текущем блоке. Чем больше это число, тем выше степень сжатия;

$\theta(G_1 < 0)$  – определяет ситуацию, когда рядом с текущим блоком находится, по крайней мере, один соседний блок с меньшим количеством ненулевых коэффициентов ДКП (т.е., по крайней мере, один из соседних четырех блоков является достаточно гладким блоком), при этом  $\theta=1$ , если  $G_1 < 0$ , и  $\theta=0$  в противном случае;

$\theta(G_2 < 0)$  – определяет ситуацию, когда рядом с текущим блоком находится, по крайней мере, один соседний блок с меньшим индексом последнего ненулевого коэффициента ДКП (дополнительное условие наличия соседнего гладкого блока);

$\theta(i_{\max} \geq 5)$  – задает условие, что частота артефакта звона достаточно высока.

На рис.2 продемонстрировано два примера расчета величины RM. Те клетки, для которых вероятность RM

меньше 10 % ее максимального значения, были обнулены.

Представленная метрика позволяет спрогнозировать возможное местоположение артефактов (без использования ВЧ фильтра). Однако серьезным ее недостатком является большое количество ложных срабатываний (блок определен как имеющий артефакты, а на самом деле артефактов нет). Следующим шагом является определение силы проявляющихся артефактов.

### Оценка яркости артефактов звона

К настоящему времени предложено множество метрик для оценки яркости артефактов звона, например, [2-4, 6, 7]. В большинстве своем расчет метрик производится путем определения областей перепада яркости и измерением осцилляций возле таких перепадов. К сожалению, подобные методы являются вычислительно сложными или требуют наличия эталонного (несжатого) изображения.

С помощью пороговой обработки метрики RM вида (3) удается, во-первых, снизить число потенциально «плохих» блоков и, во-вторых, оценить локальную дисперсию яркостей артефактов для последующей обработки изображения. Такая оценка позволяет использовать адаптивный фильтр для устранения выявленных артефактов.

Для оценки яркости артефактов звона недостаточно только вычислить дисперсию в блоке изображения, поскольку, скорее всего, блок будет содержать существенные перепады яркости из-за присутствия края объекта в блоке изображения. Для расчета дисперсии возле границы объектов необходимо сначала кластеризовать пиксели по яркости на несколько классов, затем для каждого класса рассчитать среднюю абсолютную разность между значениями пикселей и центром класса. На рис.3 показан декодированный блок яркостей пикселей с артефактами, содержащий край объекта. Пиксели кластеризуются по яркости на несколько классов [7], для каждого класса рассчитывается средняя абсолютная разность между значениями пикселей и центром класса, потом для оценки яркости артефакта выбирается меньшая величина из всех подсчитанных.

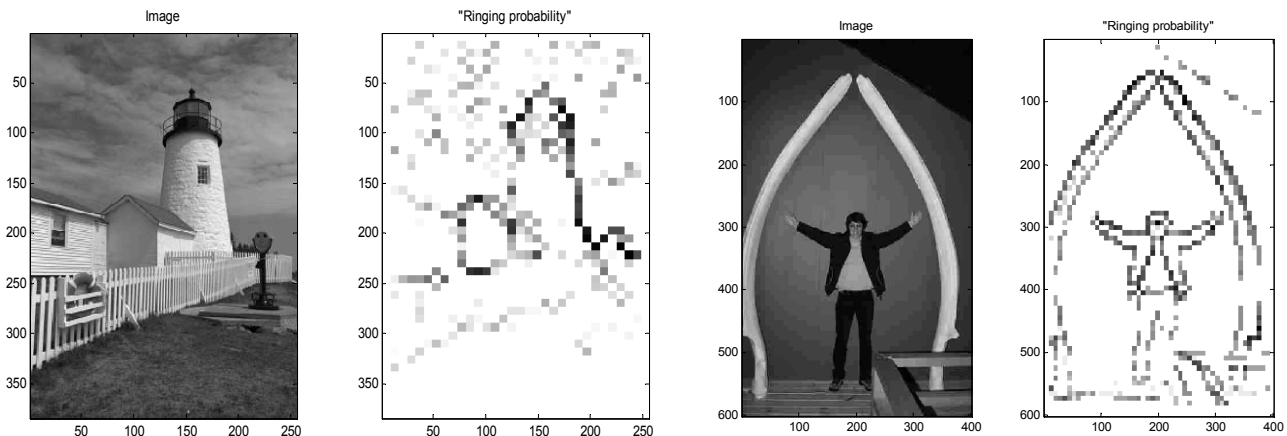


Рис.2. Пример двух изображений и их метрик RM вида (3)

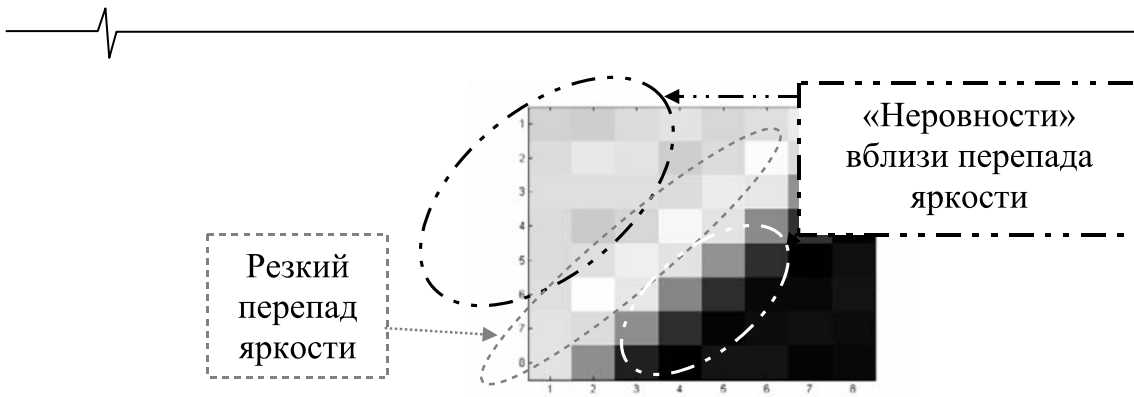


Рис.2. Декодированный блок, содержащий артефакты и резкий перепад яркости

В отличие от [7] предложено производить разделение на 2, 3 и 4 класса и выбирать наименьшую ошибку кластеризации. В результате с помощью вычисленной величины средней абсолютных разностей между значениями пикселей и центром класса можно оценить разброс значений пикселей внутри потенциально «испорченных» блоков изображения. Такая процедура относительно проста с точки зрения вычислительных и временных затрат. Вычисленная величина используется далее на этапе коррекции артефактов.

#### Коррекция артефактов звона

Артефакты звона эффективно корректируются с помощью билатерального фильтра [8]. При этом обрабатываются только те блоки, в которых оценка RM вида (3) больше нуля.

Для ускорения вычислений билатеральный фильтр применяется сначала для строк, затем для столбцов. Фильтрованное изображение  $I_f$ , таким образом, находится в два этапа:

$$I_f^{temp}(m, j) = \frac{\sum_{i=m-x}^{m+x} I(i, j) h(|I(i, j) - I(m, j)|) w(|i - m|)}{\sum_{i=m-x}^{m+x} h(|I(i, j) - I(m, j)|) w(|i - m|)}, \quad (5)$$

$$I_f(m, n) = \frac{\sum_{j=m-x}^{m+x} I_f^{temp}(i, j) h(|I_f^{temp}(m, j) - I_f^{temp}(m, n)|) w(|j - n|)}{\sum_{j=m-x}^{m+x} h(|I_f^{temp}(m, j) - I_f^{temp}(m, n)|) w(|j - n|)}, \quad (6)$$

где  $h(y)$  - ядро фильтра по диапазону яркостей,  $w(t)$  - ядро фильтра размером  $2x+1$  в пространственной области:

$$h(y) = \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_r}\right), \quad 0 < y < 255, \quad w(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_d}\right), \quad -x < t < x, \quad (7)$$

здесь  $\sigma_r$  и  $\sigma_d$  - параметры ядра фильтра по диапазону яркостей и в пространственной области соответственно. Применение билатерального фильтра позволяет сгладить небольшие перепады яркости, возникающие вследствие артефактов, в то же время эта операция предохраняет значительные перепады яркости от размытия. Параметры  $\sigma_d$  и  $x$  могут быть зафиксированы (в экспериментах принималось  $\sigma_d = 0,8$  и  $x=7$ ), что существенно сокращает необходимые вычислительные ресурсы. Фильтрация по диапазону яркостей может быть адаптивной: параметр  $\sigma_r$  зависит от вычисленной на

предыдущем шаге величины средней абсолютной разности между значениями яркостей пикселей и центрами классов. Чем больше эта величина, тем больше значение параметра  $\sigma_r$ . Однако, как показали результаты статистического моделирования, подобная адаптивность незначительно улучшает качество декодированных изображений, поэтому для упрощения вычислений параметр  $\sigma_r$  является константой (в экспериментах принималось  $\sigma_r = 0,1$ ). С другой стороны, чтобы избежать потери мелких деталей на декодированном изображении в случае, если артефакты звона не сильно заметны, предлагается зафиксировать  $\sigma_r$  и использовать величину средней абсолютных разностей между значениями яркостей пикселей и центрами классов при смешивании изображения и результата его фильтрации. Подобная операция замещения приводит к увеличению объема обработанного изображения в среднем на 3÷5 процентов.

#### Результаты статистического моделирования

Во многих работах для оценки качества алгоритма коррекции артефактов используются критерии минимума среднеквадратической ошибки (MSE) и максимума пикового отношения сигнал-шум (PSNR):

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I - I_{true})^2, \quad PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{255^2}{MSE} \right). \quad (8)$$

В статье приведены результаты сравнения по критерию максимума PSNR разработанного алгоритма с тремя известными приложениями для коррекции JPEG артефактов: shape-adaptive DCT (SA-DCT) [9], Topaz Labs DeJPEG (<http://www.topazlabs.com>), JPEG Enhancer (<http://www.vicman.net/jpegenhancer/>). В случае ручной корректировки использовались параметры по умолчанию. Результаты моделирования (обработки) для фрагмента изображения «Фотограф» показаны на рис.4-6.

Необходимо отметить, что, несмотря на объективность, критерий максимума PSNR является относительно грубым показателем качества, поскольку не всегда соответствует субъективному визуальному восприятию человека. Например, часто изображения с большими значениями PSNR могут казаться пользователю сильно размытыми.

Рис. 7. демонстрирует зависимость PSNR от степени сжатия, измеряемое через относительный показатель количества бит, приходящихся на один пиксель, - BPP (bit per pixel), для изображений «Фотограф» и «Лена». JPEG-изображения были получены в программной среде Photoshop CS2 с помощью функции «Save for Web».

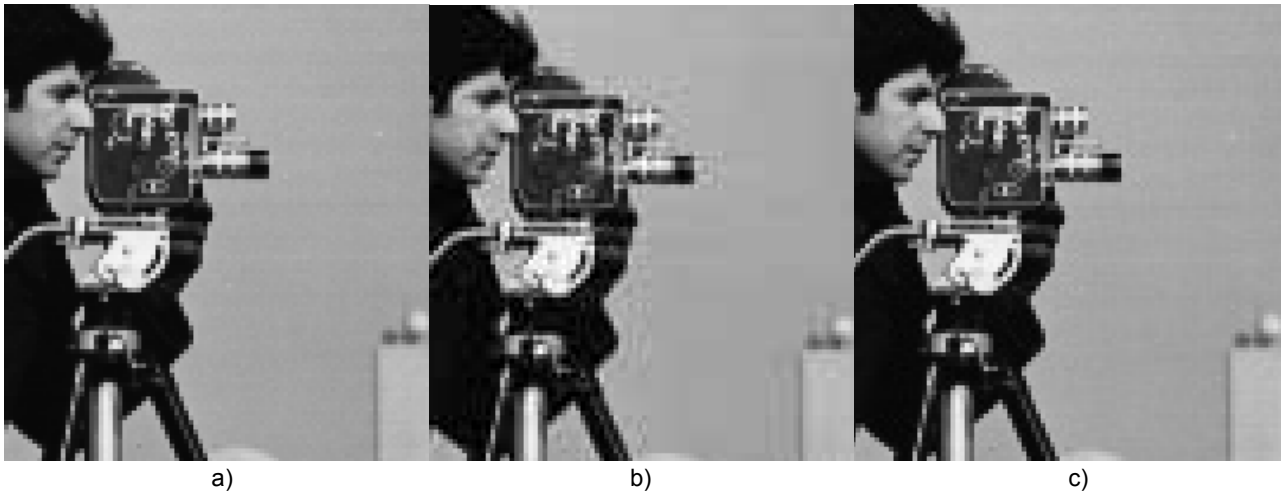


Рис.3. Фрагмент изображения «Фотограф»: а) исходное изображение (несжатое); б) 20%-е качество Photoshop (PS) "Save for Web"; в) 80%-е качество Photoshop "Save for Web"

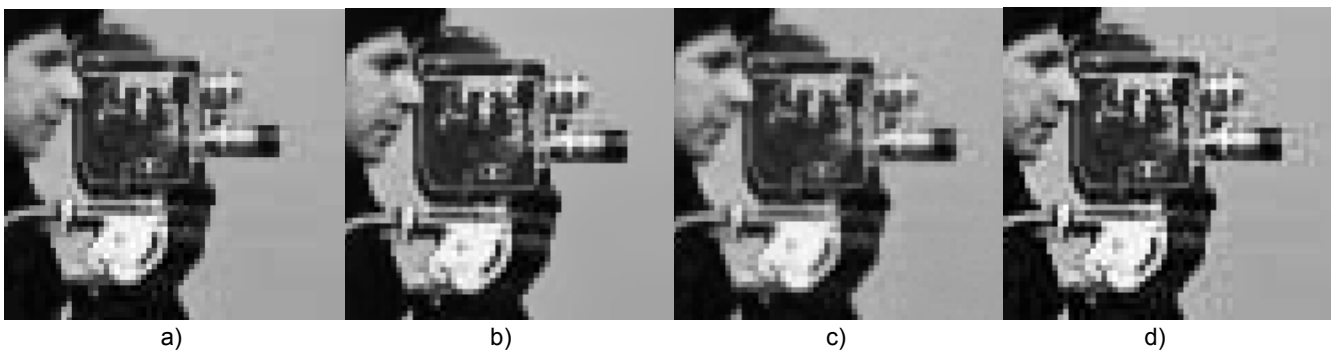


Рис.4. Результаты обработки изображения 20%-го качества Photoshop "Save for Web": а) предложенный метод; б) Shape-adaptive DCT; в) JPEG Enhancer; г) DeJPG

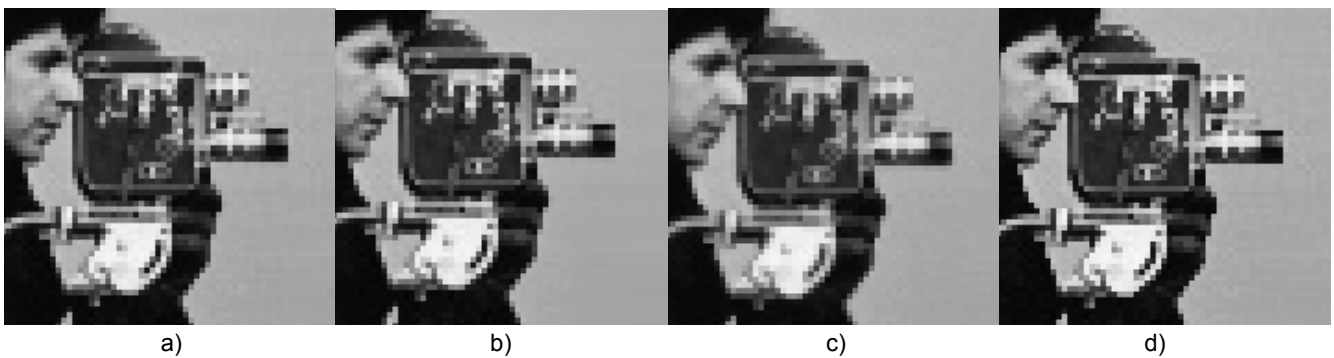
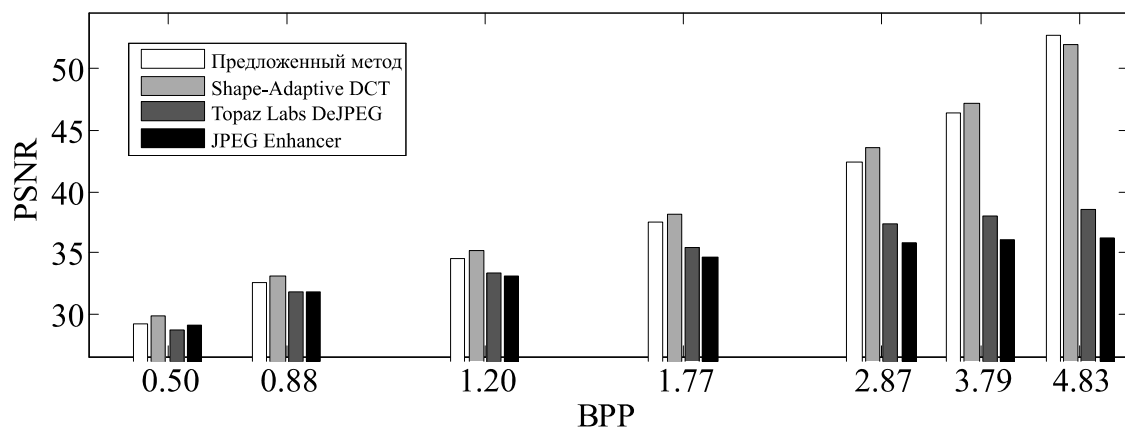


Рис.5. Результаты обработки изображения 80%-го качества Photoshop "Save for Web": а) предложенный метод; б) Shape-adaptive DCT; в) JPEG Enhancer; г) DeJPG

PSNR для изображения "Фотограф"



### PSNR для изображения "Лена"

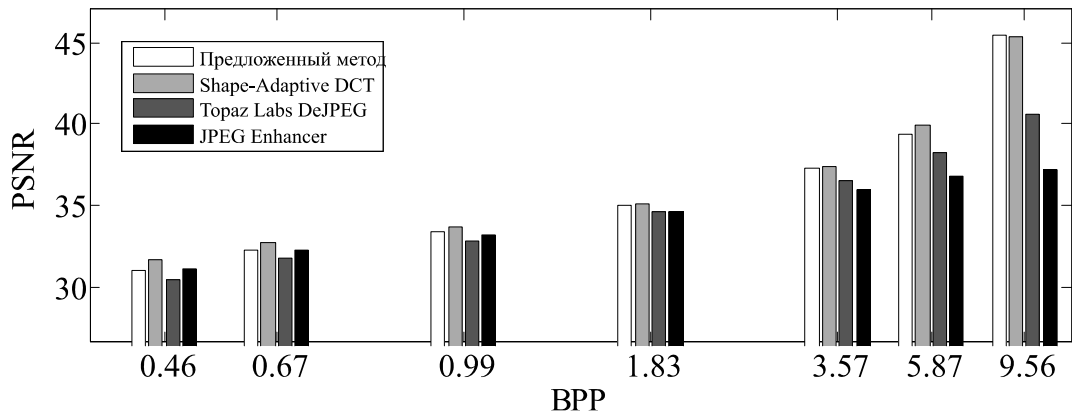
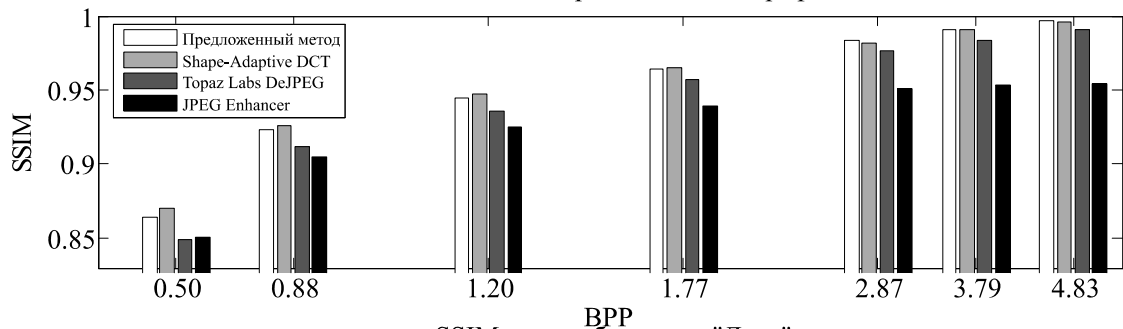


Рис.6. Результаты сравнения значений PSNR для изображений «Фотограф» (вверху) и «Лена» (внизу) для разных значений BPP

### SSIM для изображения "Фотограф"



### SSIM для изображения "Лена"

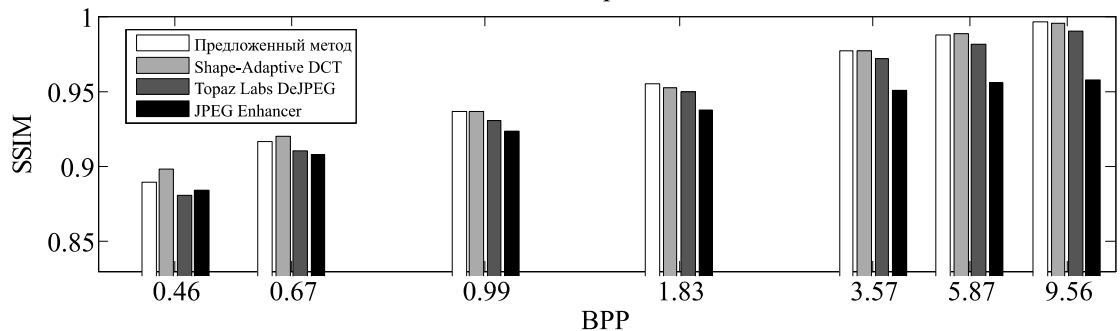


Рис. 7. Результаты сравнения значений SIMM для изображений «Фотограф» (вверху) и «Лена» (внизу) для разных значений BPP

При выявлении эффективности метода также использовалась комплексная оценка SSIM (Structural SIMilarity) [11]. Для экспериментов на ЭВМ была выбрана свободно распространяемая программа для среды Matlab [12], при этом применялись параметры «по умолчанию». Рис. 8 демонстрирует зависимость SIMM от степени сжатия BPP для тех же изображений.

Из рис. 7 видно, что предложенный метод немного уступает методу SA-DCT в смысле максимума PSNR при высоких (BPP<1) и средних степенях сжатия (1<BPP<3). Однако, по комплексной оценке SSIM, что иллюстрирует рис.8, предложенный метод не проигрывает методу SA-DCT при средних и высоких степенях сжатия. Вместе с

тем, при средних степенях сжатия изображения, обработанные методом SA-DCT, выглядят слишком размытыми, качество текстур снижено. Предложенный метод для изображений со средними и малыми (BPP>3) степенями сжатия (наиболее часто встречающийся случай) показывает относительно хорошие результаты: артефакты скорректированы, текстуры и края объектов не повреждены.

Кроме того, предложенный метод обеспечивает значительный выигрыш по быстродействию по сравнению с известными методами. В таблице приведено время обработки изображения размером 2480×3507 на ПК с процессором Pentium IV (3,2 ГГц, 1 Гб ОЗУ) различными методами.

Время обработки изображения размером 2480×3507 на ПК Pentium IV

Метод	Предложенный	UnJPEG	DeJPEG	JPEG Enhancer	SA-DCT (PS plug-in)
Время, с	9	26	37	25	811

## Заключение

Разработан автоматический и вычислительно эффективный метод обнаружения и коррекции артефактов звона, появляющихся при JPEG-кодировании изображений. Метод основан на анализе коэффициентов ДКП и улучшает качество декодированных изображений при малых и средних степенях сжатия, по скорости обработки превосходя известные решения. В процессе обработки не используются сложные с вычислительной точки зрения операции, и не обязательно хранить все изображение целиком в памяти, что облегчает задачу интеграции соответствующих данному методу алгоритмов и программного обеспечения в различные устройства отображения, например, устройства фотопечати.

## Литература

1. Адрес официального сайта для метода JPEG в Интернет: <http://www.jpeg.org>.
2. Feng, X., Allebach, J. P., "Measurement of ringing artifacts in JPEG images", Proc. SPIE 6076, pp. 74-83 (2006).
3. Oguz, S.H., Hu, Y.H., Nguyen, T.Q., "Image coding ringing artifact reduction using morphological post-filtering", IEEE 2<sup>nd</sup> Workshop on Mult.Sig.Proc., pp. 628-633 (1998).
4. Chang, Y.-W. and Chen, Y.-Y., "Alleviating-Ringing-Artifact Filter Using Voting Scheme", ICGST Int. Journal Graphics Vision and Image Proc.: Special Issue on Applicable Image Processing Techniques 6, pp. 9-14 (2006).
5. Marziliano, P., Dufaux, F., Winkler, S., Ebrahimi T. "Perceptual Blur and Ringing Metrics: Application to JPEG2000", Sig. Proc.: Image Comm. 19(2), pp. 163-172 (2004).
6. Chou, C., and Li, Y., "A perceptually tuned subband image coder based on the measure of just-noticeable distortion profile," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. 5(6), pp. 467-476 (1995).
7. Yang, S., Hu, Y., Nguyen, T. Q., and Tull, D. L., "Maximum-likelihood parameter estimation for image ringing-artifact removal," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. 11(8), pp. 963-973 (2001).
8. Tomasi, C., Manduchi, R., "Bilateral Filtering for Gray and Color Images," Proc. IEEE Conf. on Computer Vision, pp. 839-846 (1998).
9. Foi, A., Katkovnik, V., and Egiazarian, K., "Pointwise Shape-Adaptive DCT for High-Quality Denoising and Deblocking of Grayscale and Color Images," IEEE Trans. Image Proc. 16(5), pp. 1395-1411 (2007).
10. Vo, D. T., Nguyen, T. Q., Yea, S., Vetro, A., "Adaptive Fuzzy Filtering for Artifact Reduction in Compressed Images and Videos", IEEE Trans. Image Proc. 18(6), pp. 1166-1178 (2009).
11. Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, Simoncelli, E. P., "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, Apr. 2004.
12. The SSIM Index for Image Quality Assessment, <http://www.ece.uwaterloo.ca/~z70wang/research/ssim/>
13. Толстая Е. В., Способ выявления искажений, вызванных эффектом Гиббса, при JPEG- кодировании, Патент РФ № 2365994 Опубликовано: 27.08.2009, Бюл. № 24.
14. Толстая Е. В. Способ удаления искажений на цифровых изображениях, Патент РФ № 2402070, Опубликовано: 20.10.2010 Бюл. № 29.

## REMOVAL OF RINGING ARTIFACTS IN JPEG-CODED IMAGES

*Yuri S. Bekhtin, Ekaterina V. Tolstaya*

The paper is related to image quality enhancement; in particular, to the method for the effective reduction of ringing artifacts caused by lossy compression algorithms of JPEG coding using the block-based discrete cosine transform (DCT).

In order to reduce the effect of ringing artifacts due to significant information losses the variety of different algorithms and methods has been suggested in the last decades. However, the majority of solutions for ringing artifact detection usually relies on an edge-detection step that is a complicated and versatile procedure with unknown optimal parameters. In other cases, a reference (uncompressed) image is required to detect the ringing artifacts.

The presented method of ringing coding artifacts removal in images coded with block-based discrete cosine transform is characterized by next important properties: an edge-detection is not employed in proposed solution; the probability of the ringing artifact presence is computed in frequency domain using the simple and effective formula. The blocks having the high probability of ringing artifact presence are processed by the edge-preserving bilateral filter only; moreover, the introduced ringing artifacts severity metrics allow an end-user to vary the filter parameters.

The results of numerical modeling the algorithms of blocking and ringing artifact detection and removal are described and compared to some of the existing solutions in terms of PSNR and SSIM (Structural SIMilarity). The proposed method is intended to be implemented in software for digital cameras, slide scanners, camera-phones, printers, etc.