

Ю. В. ЛУЖКОВ

## МЕТОД АДАПТИВНОГО СКАЛЯРНОГО КВАНТОВАНИЯ В СХЕМАХ НЕОБРАТИМОГО СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматривается проблема адаптивной генерации матриц квантования. Для схем сжатия изображений с потерей качества, использующих спектральные преобразования, предложен способ адаптивного скалярного квантования спектральных коэффициентов на основе весового критерия и рассмотрены способы определения этого критерия.

*Ключевые слова:* сжатие изображений, адаптивное квантование, весовой критерий, JPEG.

**Введение.** В настоящее время одним из распространенных форматов сжатия изображений с потерей качества является JPEG (Joint Photographic Experts Group) [1]. Разработаны и другие схемы сжатия (см., например, работы [2, 3]), эффективность которых существенно превосходит алгоритмы на основе дискретных спектральных преобразований. Однако вследствие широкой распространенности последних перед исследователями встает следующий вопрос: возможно ли модифицировать существующую схему компрессии таким образом, чтобы повысить степень сжатия, не меняя при этом алгоритм декомпрессии? Решение этой задачи позволит вносить изменения в существующие программы-компрессоры, не заботясь о наличии у пользователей специального (модифицированного) программного обеспечения для декомпрессии изображений.

В применяемых алгоритмах сжатия используются некоторые параметры по умолчанию. Например, в формате JPEG к таким параметрам относятся матрицы квантования и таблицы Хаффмана: они сохраняются в заголовке сжатого файла, и формат допускает самостоятельное определение пользователем их значений, что является одним из путей повышения степени компрессии. Так, известны несколько подходов к составлению матриц квантования в формате JPEG (например, [4, 5]), которые, однако, не являются универсальными и требуют сравнительно большого объема вычислений.

В настоящей статье рассматривается обобщенный подход к адаптивному скалярному квантованию коэффициентов спектра, предлагаемый способ прост в реализации и может быть применен, в частности, для формата JPEG.

**Адаптивное квантование сигнала.** Квантование — способ обработки сигнала, сопряженный с внесением в него искажения. Суть квантования сводится к разбиению диапазона значений сигнала  $z$  на конечное число интервалов с последующим выбором одного значения для представления любой величины из данного интервала. При *векторном квантовании* — это разбиение пространства возможных значений векторной величины на конечное число областей. Наиболее полный аналитический обзор вопросов квантования приведен в работе [6].

Так, пусть заданы множество интервалов  $S = \{S_i; i \in \mathbb{Z}\}$  и множество точек  $C = \{y_i; i \in \mathbb{Z}\}$ , тогда функция квантования сигнала  $z$  определяется как  $q(z) = y_i$  для  $z \in S_i$ . При *равномерном скалярном квантовании* множество интервалов можно представить в виде

$$S_i = [d + \Delta i, d + \Delta(i+1)), \quad i \in \mathbb{Z},$$

где  $\Delta$  — параметр, или шаг, квантования; величина  $d$  задает смещение интервалов  $S_i$  относительно нуля,  $d \in [-\Delta/2, \Delta/2)$ ;  $i$  — номер интервала, который и является кодируемым объектом.

Тогда операция квантования может быть сведена к простому делению с округлением:

$$q(x) = i = \left[ (z - d) / \Delta \right], \quad (1)$$

где  $[\cdot]$  — операция округления до ближайшего целого.

При восстановлении сигнала  $z$  привносится ошибка  $e: z = q(z) - e$ .

Методы *адаптивного квантования* могут быть разделены на две группы: адаптивное скалярное квантование; векторное и кодовое квантование.

Адаптивность в скалярном квантовании достигается путем индивидуального выбора параметра квантования  $\Delta$  для каждого квантуемого значения.

**Адаптивное скалярное квантование на основе весового критерия.** Предлагаемый в настоящей статье подход основан на *статистическом анализе коэффициентов спектра*. Этот подход может быть использован в схемах сжатия (например, JPEG) при условии, что окно сканирования сигнала имеет постоянный размер.

Так, пусть дана последовательность коэффициентов спектра, разбитая на  $M$  одинаковых блоков по  $N$  значений в каждом, при этом  $n = \overline{0, N-1}$  — номер (позиция) коэффициента в данном блоке, т.е. каждый коэффициент имеет аналог в любом другом блоке. Суть предлагаемого подхода заключается в следующем: для каждого  $n$ -го номера вычисляется значение специального весового критерия, и значение параметра квантования данного коэффициента спектра тем больше, чем меньше соответствующее ему значение весового критерия.

Таким образом, идея метода основана на том, что процедура квантования выполняется с учетом некоторой статистической информации о сигнале, заданном как  $\mathbf{z} = \{z_{0,0}, \dots, z_{N-1, M-1}\}$ , полученной от  $M$  блоков для каждого порядкового номера  $n$ . Функция квантования (1) в этом случае будет обозначаться как  $q(\mathbf{z}, n)$ , а функция параметра квантования — как  $\Delta(\mathbf{z}, n)$ .

Введем критерий  $T$ , назвав его *весом спектрального коэффициента*. Величина  $T$  отражает степень значимости спектральных коэффициентов  $z_{n,m}$ , имеющих одинаковый порядковый номер  $n$ , для всех  $M$  блоков,  $m = \overline{0, M-1}$ . Рассмотрим некоторые способы определения критерия  $T$ . Первый из возможных способов основан на статистике максимальных значений:

$$T_n = \sum_{m=0}^{M-1} c_n, \quad c_n = \begin{cases} 1, & |z_{n,m}| = z_{m,\max}; \\ 0, & |z_{n,m}| \neq z_{m,\max}, \end{cases}$$

где  $z_{m,\max}$  — максимальный по модулю спектральный коэффициент в данном блоке.

Такой способ вычисления критерия пригоден в том случае, если нет выраженной концентрации энергии сигнала на определенных спектральных позициях. Однако, как показали, например, эксперименты с дискретным косинусным преобразованием (ДКП), в 99 % случаев коэффициент с номером 0 определяется как максимальный, причем для более чем 90 % номеров  $n$  значение критерия  $T$  равно 0, что препятствует практическому использованию данного критерия в схемах сжатия на основе ДКП.

Другой способ вычисления  $T$  является развитием предыдущего и основан на *пороговом ограничении спектральных коэффициентов*:

$$T_n = \sum_{m=0}^{M-1} c_n, \quad c_n = \begin{cases} 1, & |z_{n,m}| \geq P; \\ 0, & |z_{n,m}| < P, \end{cases} \quad 0 < P \leq z_{m,\max},$$

где  $P$  — порог ограничения.

Использование порогового ограничения позволяет решить проблему непропорционального распределения энергии сигнала, присущую первому способу. Однако основной недостаток порогового вычисления  $T$  — необходимость определения значения  $P$ .

Следующий алгоритм вычисления  $T$  оперирует средними амплитудами спектра, не используя при этом порог  $P$ :

$$T_n = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |z_{n,m}|. \quad (2)$$

Достоинством данного способа является отсутствие обязательной дополнительной обработки сигнала (для определения порога  $P$ ). К недостаткам можно отнести операции с числами с плавающей запятой (при использовании предыдущих способов выполняется просто увеличение счетчиков на единицу).

На рис. 1, *а*, *б* представлена зависимость  $T(n)$ , вычисленная по формуле (2) для коэффициентов ДКП при  $M = 8 \times 8 = 64$ : *а* — результаты вычислений для матрицы яркости  $Y$  изображений "Lena" и "Oldman", *б* — для хроматических матриц изображения "Oldman". На графиках значения  $T$  упорядочены так, чтобы значения критерия не возрастали. Как видно, динамика изменения величины  $T$  достаточно резкая, что в некоторых случаях может привести к чрезмерному квантованию малозначимых спектральных коэффициентов.

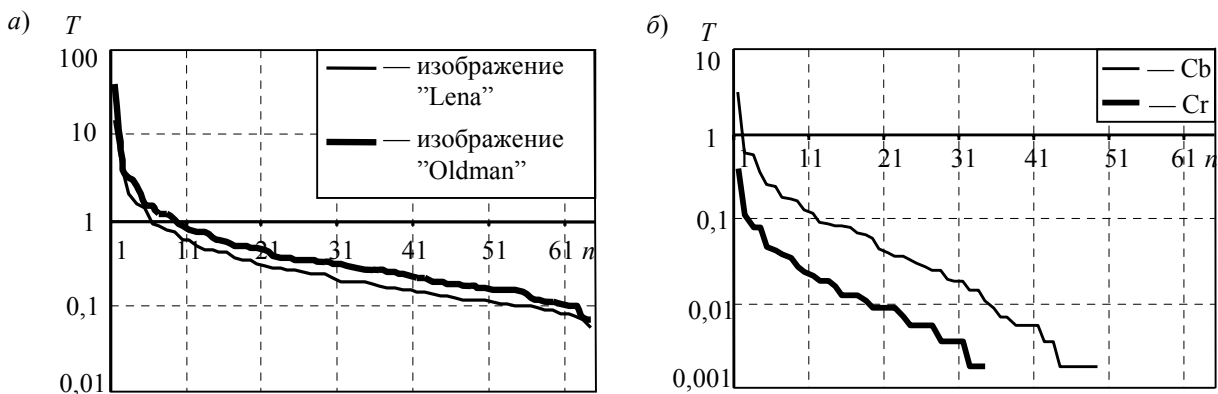


Рис. 1

Скорректировать ситуацию можно, выбирая в качестве значения критерия максимальные амплитуды коэффициентов:

$$T_n = \max |z_{n,m}|. \quad (3)$$

Обратимся далее к определению функции  $\Delta(\mathbf{z}, n)$ . Пусть ее значения ограничены диапазоном  $[a_1, a_2]$ ,  $0 \leq a_1 < a_2$ . Введем линейную функцию от  $T$ :

$$E(T) = a_1 + \frac{T_{\max} - T_n}{T_{\max} - T_{\min}}(a_2 - a_1).$$

Также может использоваться нелинейная функция от  $T$ , что достигается введением корректирующей функции  $\hat{f}$ :

$$E(T) = a_1 + \frac{\hat{f}(T_{\max}) - \hat{f}(T_n)}{\hat{f}(T_{\max}) - \hat{f}(T_{\min})}(a_2 - a_1). \quad (4)$$

Поскольку любое значение критерия  $T_n$  в общем случае зависит от всех коэффициентов исходного спектрального вектора  $\mathbf{z}$ , то функция  $E$  также зависит от  $\mathbf{z}$ . Фактически это есть функция параметра квантования сигнала  $\Delta(\mathbf{z}, n)$ . Введем обозначение  $f(\mathbf{z}, n) = \hat{f}(T_n)$ . Тогда формула (4) окончательно принимает следующий вид:

$$\Delta(\mathbf{z}, n) = \Delta(T) = a_1 + \frac{f(\mathbf{z}, n_{\max}) - f(\mathbf{z}, n)}{f(\mathbf{z}, n_{\max}) - f(\mathbf{z}, n_{\min})}(a_2 - a_1). \quad (5)$$

Таким образом, функция параметра квантования локализована в диапазоне от  $a_1$  до  $a_2$ . Варьируя ее форму, можно осуществлять квантование коэффициентов спектра с данным порядковым номером с большим или меньшим шагом: см. рис. 2, а (значения  $T$  упорядочены по возрастанию). На рисунке кривая 1 соответствует линейному преобразованию, кривая 2 — преобразованию с использованием функции  $\hat{f}$ . Так, пусть известно, что высокочастотным коэффициентам спектра соответствуют малые значения  $T$ . Тогда для подавления высоких частот достаточно задать функцию  $\hat{f}$  с таким расчетом, чтобы ее энергия на начальном участке была большой.

Примеры корректирующих функций  $\hat{f}$  приведены на рис. 2, б.

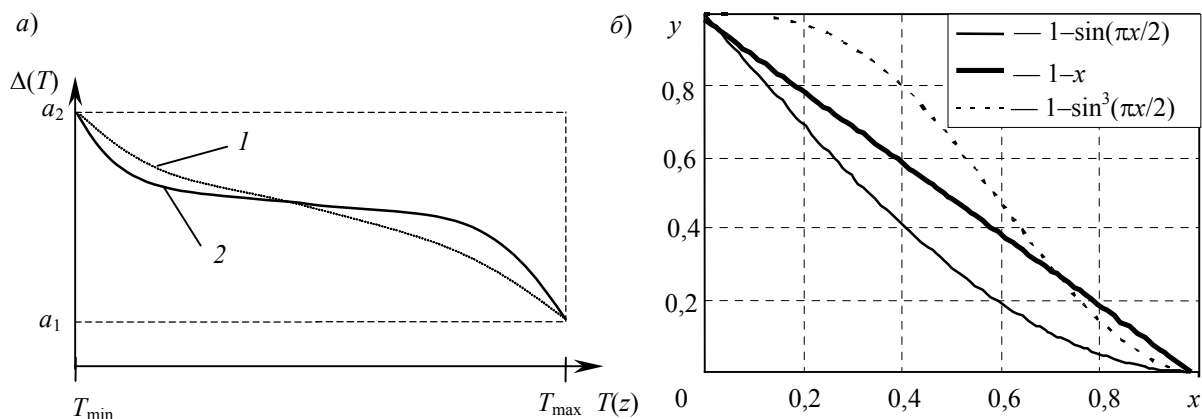


Рис. 2

Квантование с различным шагом реализовано, например, в формате JPEG. Однако значения параметра  $\Delta$  не вычисляются адаптивно, а представлены значениями по умолчанию. Рассмотрим возможность применения предложенного подхода для адаптивной генерации матриц квантования в схеме JPEG. В формуле (5) будем использовать линейную корректирующую функцию и критерий максимальных амплитуд (3).

На рис. 3, *а* приведены графики стандартных функций параметра квантования в формате JPEG, а на рис. 3, *б* — графики значений  $\Delta$ , сгенерированных адаптивным способом для изображения "Oldman". В обоих случаях значения упорядочены в соответствии с „зигзаг“-сканированием. Как видно, отличие сгенерированных значений от стандартных достаточно велико.

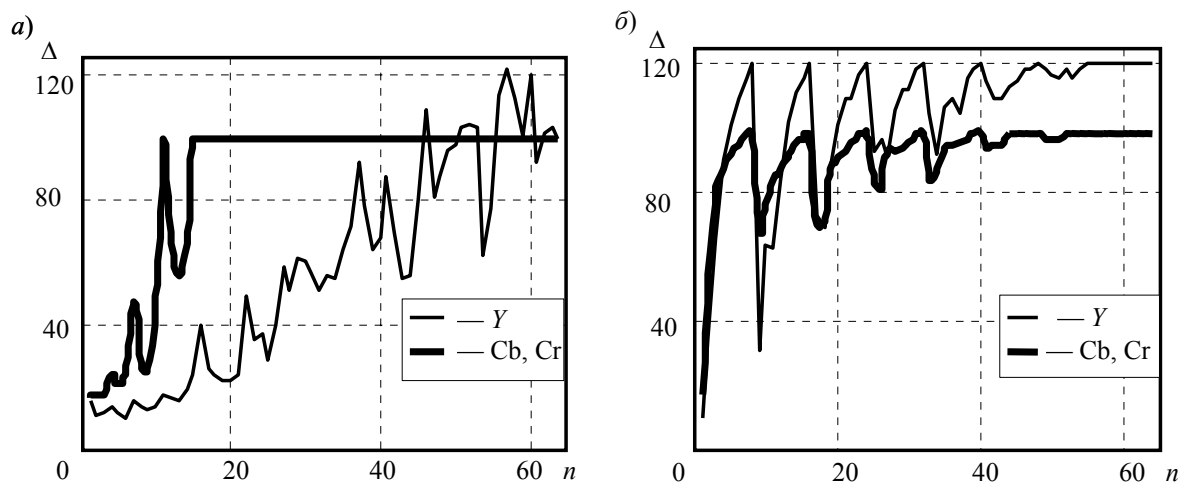


Рис. 3

График зависимости  $T(n)$  для изображения "Oldman" представлен на рис. 4, *а*. На рис. 4, *б* показаны результаты сжатия этого изображения с применением функций квантования, данных по умолчанию (кривая 1), и функций, сгенерированных в рамках эксперимента (кривая 2). По оси абсцисс — среднее число бит на пиксел ( $b$ ), по оси ординат — пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR). Анализ результатов показывает, что разница в степени сжатия составляет до 20 % в пользу адаптивного подхода при одинаковых значениях PSNR.

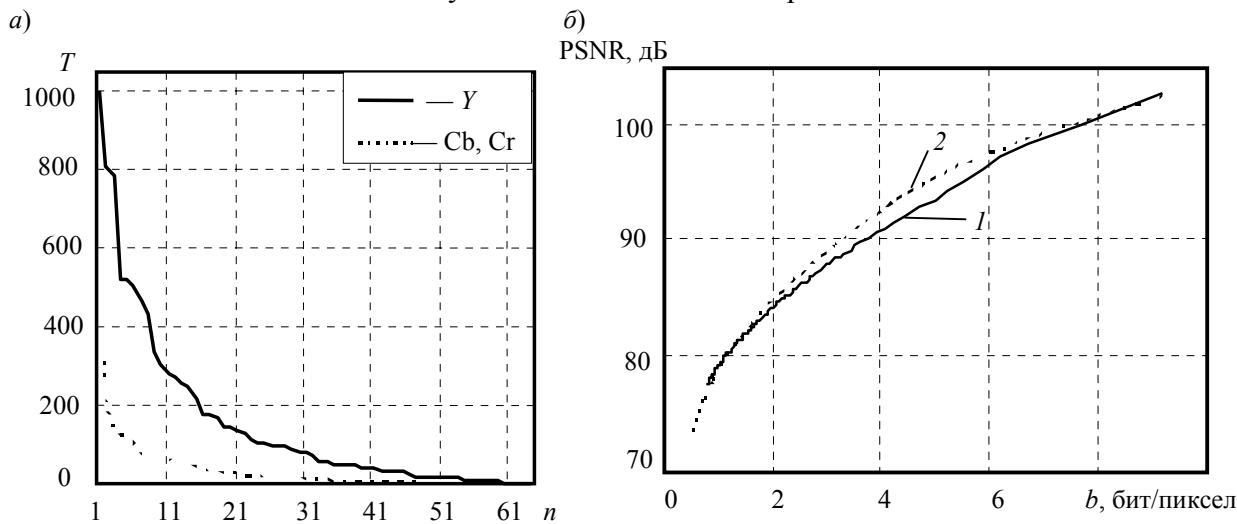


Рис. 4

**Заключение.** Предложенный способ адаптивного скалярного квантования коэффициентов спектра основан на вычислении критерия значимости коэффициентов спектра. Как показали эксперименты, применение рассмотренного подхода в схеме JPEG позволяет получить выигрыш по степени сжатия до 20 % по сравнению с использованием стандартных матриц квантования.

При практическом использовании рассмотренного метода квантования необходима модернизация только компрессора, а для просмотра изображений достаточно применения стандартного JPEG-декомпрессора, что является важным достоинством предложенного решения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wallace G. K.* The JPEG still picture compression standard // IEEE Trans. Consumer Electronics. 1992. Vol. 38, N 1. P. 18—34.
2. *Shukla R.* Rate-distortion optimized tree-structured compression algorithms for piecewise polynomial images // IEEE Transact. on Image Processing. 2005. Vol. 14, N 3. P. 343—359.
3. *Dalai M., Leonardi R.* L-inf norm based second generation image coding // Proc. of Intern. Conf. on Image Processing. 2004. P. 3193—3196.
4. *Ratnakar V., Livny M.* Extending RD-OPT with global thresholding for JPEG optimization // Proc. of the Conf. on Data Compression. 1996. P. 379—386.
5. *Fung H. T., Parker K. J.* Design of image-adaptive quantization tables for JPEG // J. of Electronic Imaging. 1996. Vol. 4, N 2. P. 144—150.
6. *Gray R. M., Neuhoff D. L.* Quantization // IEEE Transact. on Information Theory. 1998. Vol. 44, N 6. P. 2325—2383.

**Сведения об авторе****Юрий Валерьевич Лужков**

— аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: luzhkov@inbox.ru

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники

Поступила в редакцию  
24.11.08 г.