

УДК 681.325

Н.Н. ПОНОМАРЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

НЕРАВНОМЕРНОЕ КВАНТОВАНИЕ В СЖАТИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Исследована задача квантования данных, в частности, спектральных коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП), при сжатии изображений. Предложен простой и эффективный метод определения величины “мертвой зоны” при неравномерном квантовании. Показано, что такое квантование обеспечивает меньший объем сжатых квантованных данных, чем равномерное квантование и квантование по обобщенному алгоритму Ллойда. Рассмотрена взаимосвязь между выбором метода квантования и эффективностью контекстно-зависимого кодирования квантованных коэффициентов ДКП, а также эффективностями предварительной фильтрации и постобработки для устранения блочного эффекта на декодированных изображениях.

Ключевые слова: квантование, сжатие изображений, дискретное косинусное преобразование.

Введение

Квантование данных является хорошо изученной задачей [1]. Так, например, обобщенный алгоритм Ллойда [2], обеспечивающий минимальную ошибку квантования при заданном числе уровней квантования, предложен еще в 1957 году. В то же время задача минимизации объема сжатых квантованных данных при заданной допустимой ошибке квантования, известная еще как проблема распределения бит [1], в общем виде не имеет решения (существуют решения для частных случаев, например, для квантования и сжатия значений гауссова шума [3]).

Актуальность этой задачи очень высока, принимая во внимание широкое использование квантования в большинстве известных методов сжатия с потерями информации изображений (JPEG, JPEG2000), видео (семейство MPEG) и звука (MP3).

При разработке методов квантования для методов сжатия, как правило, полагается, что избыточность в данных устраняется с помощью кодирования Шеннона [4], где на одно значение с вероятностью встречаемости P_i выделяется $-\log_2(P_i)$ бит. Однако при таком упрощении не учитывается, например, контекстное моделирование при кодировании квантованных данных, используемое в большинстве современных кодировщиков [5, 6], а также влияние неравномерного квантования на эффективность предварительной фильтрации (ПФ) и постобработки (ПО) декодированного изображения (рис. 1).

В данной работе предлагается простой метод определения величины “мертвой зоны” для неравномерного квантования, который может эффективно использоваться в сочетании с кодированием битовых плоскостей. Кроме того, на примере кодировщика AGU [6] рассматривается влияние метода квантования на эффективность ПФ и ПО.

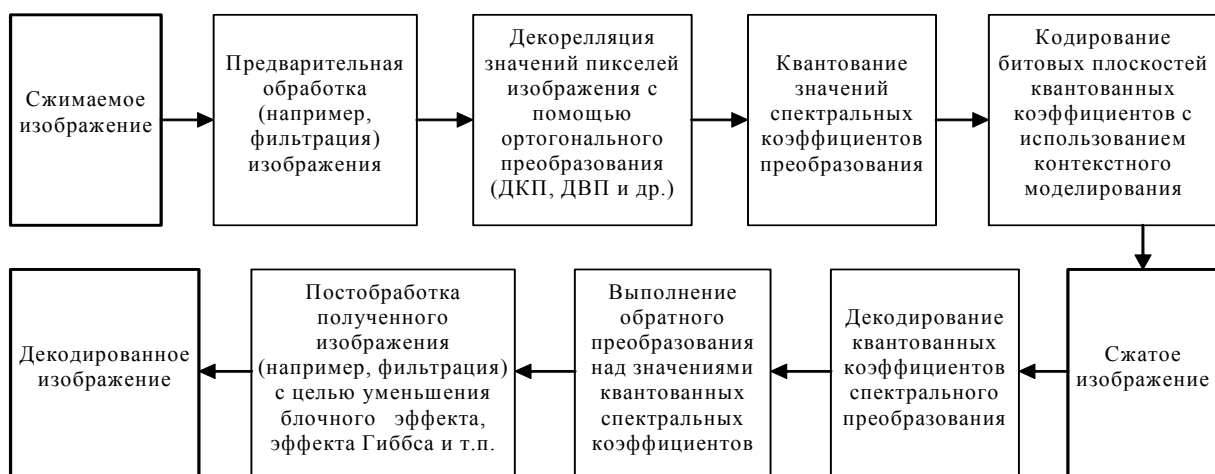


Рис. 1. Структурная схема кодирования и декодирования изображения в современных методах сжатия

1. Описание предлагаемого метода

Квантование с “мертвой зоной” (КМЗ) отличается от равномерного квантования (РК) лишь несколько большей величиной интервала значений, квантуемых до нуля (рис. 2).

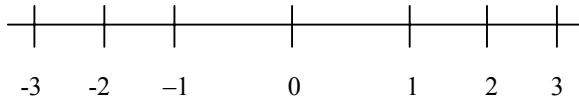


Рис. 2. Квантование с “мертвой зоной”

КМЗ хорошо сочетается с кодированием битовых плоскостей, так как РК применяется здесь ко всем битовым плоскостям, кроме самой младшей. Задача заключается только в определении оптимального значения величины мертвой зоны.

Пусть для РК с заданным шагом квантования QS для квантованных данных получены вероятности встречаемости нулей P₀ и единиц P₁. При введении “мертвой зоны” часть значений, квантуемых ранее до единицы, начинает квантоваться до нуля. Оценим увеличение ошибки квантования и уменьшения объема данных, происходящие при этом.

В качестве ошибки квантования будем использовать суммарную среднеквадратическую ошибку

$$MSE^q = \frac{1}{QS^2} \sum_{i=1}^N (I_i - I_i^q)^2,$$

где I_i – исходное значение элемента выборки; I_i^q – значение квантованного элемента выборки; N – длина выборки.

Для каждого значения α, квантуемого при РК до единицы, а при КМЗ – до нуля, увеличение MSE^q составит (α/QS)² - (1 - (α/QS))² или 2α/QS - 1. При этом уменьшение объема, занимаемого квантуемым значением в сжатых данных, можно оценить как log₂(P₀/K_m) - log₂(P₁), где K_m – увеличение степени сжатия нулей в случае использования контекстного моделирования (K_m=1, если оно не используется).

Значение α выгоднее квантовать до нуля, чем для единицы, если выполняется условие

$$[2\alpha/QS - 1] / [\log_2(P_0/K_m) - \log_2(P_1)] < Tr,$$

где Tr – некоторая норма повышения ошибки квантования на каждый бит уменьшения объема занимаемой сжатыми квантованными данными памяти. Предельное значение α, которое еще выгодно квантовать, деленное на шаг квантования, и является оптимальной величиной “мертвой зоны” D_z:

$$D_z = (Tr[\log_2(P_0/K_m) - \log_2(P_1)] + 1) / 2. \quad (1)$$

Для оценки Tr воспользуемся подходом, описанным в [5]. Для двух значений шага квантования, равных 0,9QS и 1,1QS осуществим РК данных и кодирование Шеннона. Полученные значения MSE^q,

соответственно M1 и M2, а также значения объема сжатых данных, соответственно S1 и S2 позволяют оценить Tr на отрезке 0,9QS...1,1QS:

$$Tr = K_d(M2 - M1) / (S1 - S2), \quad (2)$$

где K_d – среднее прогнозируемое увеличение степени сжатия вследствие применения КМЗ.

Подставив выражение (2) в выражение (1), получаем итоговое выражение для D_z:

$$D_z = \frac{K_d(M2 - M1)(\frac{\log_2(P_0)}{K_m} - \log_2(P_1))}{2(S1 - S2)} + \frac{1}{2}. \quad (3)$$

Минимальное значение D_z при P₀=P₁ и K_m=1 равняется 0,5 (это соответствует РК). K_d можно принять равным 1,1 (см. обоснование в разделе 2). Задача выбора K_m при использовании контекстного моделирования рассматривается в разделе 3.

2. Сжатие квантованных данных без контекстного моделирования

Проверим эффективность предложенного метода при сжатии тестовой выборки данных, сформированной следующим образом. В блоках 32x32 пикселя тестовых изображений Lena, Baboon, Varba и Peppers [7] (в оттенках серого цвета, 512x512 пикселей) выполнено ДКП. Из полученных данных исключены коэффициенты с нулевыми индексами (средние значения интенсивности в блоках) и данные по всем изображениям объединены в один массив (тестовая выборка содержит 1047552 элемента).

Оценим, насколько близкое к оптимальному значение D_z позволяет находить предложенный метод. На рис. 3 приведены зависимости bpr (число бит в сжатой выборке, приходящееся на единицу данных в исходной выборке) от D_n=D/D_z, где D – величина “мертвой зоны” при КМЗ.

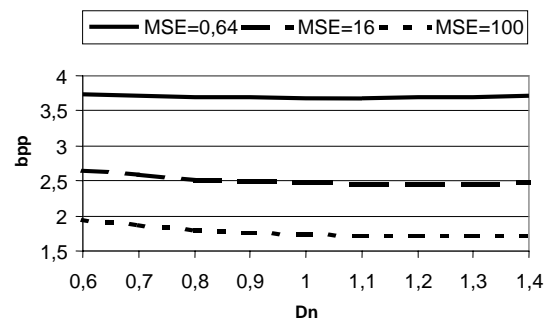


Рис. 3. Зависимости bpr от D_n для заданных MSE

Оптимальной величиной D_n для каждого графика с постоянным MSE = $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_i^q)^2$ является точка с минимальным значением bpr. При этом вы-

бранная в соответствии с (3) D_z (при $K_m=1$) обеспечивает или оптимальное значение bpp , или отличающееся от него не более, чем на 0.5-1%.

Покажем, что сжатие с КМЗ обеспечивает меньший bpp , чем квантование Ллойда и РК.

Таблица 1

Сжатие тестовой выборки

MSE	Метод квантования	Число уровней квантования	Число нулей в данных	bpp
69,6	Ллойд	15	85,11%	0,87
	РК	70	92,18%	0,57
	КМЗ, $D_z=0,64$	80	93,19%	0,52
104,9	Ллойд	10	88,51%	0,70
	РК	50	94,95%	0,39
	КМЗ, $D_z=0,64$	57	95,63%	0,36
277	Ллойд	5	95,65%	0,31
	РК	19	98,96%	0,103
	КМЗ, $D_z=0,63$	21	99,12%	0,090

Как видно из табл. 1, квантование Ллойда неэффективно в сочетании с последующим сжатием квантованных данных.

В то же время КМЗ за счет увеличения числа нулей в квантованных данных позволяет увеличить степень сжатия по сравнению с РК в среднем на 10% (эта цифра хорошо соотносится с рекомендованным значением для $K_d=1,1$).

3. Сжатие квантованных данных с контекстным моделированием

Для исследования сочетания предложенного метода квантования с контекстным моделированием при сжатии данных используем кодер AGU, описанный в [6] и обеспечивающий в среднем лучшее качество сжатия, чем JPEG2000. Этот кодер основан на ДКП в блоках 32x32 пикселя и использует контекстное моделирование при кодировании битовых плоскостей. Кодер и набор тестовых изображений доступны для скачивания на [7].

Оценим с помощью кодера AGU K_m для выражения (3).

В табл. 2 для разных шагов квантования и тестовых изображений приведены bpp по сжатию квантованных спектральных коэффициентов ДКП для кодера AGU и кодирования Шеннона.

Как видно из табл. 2, выигрыш в сжатии от контекстного моделирования по сравнению с кодированием Шеннона зависит от изображения и QS и колеблется в пределах от 1,12 до 2,17.

Принимая во внимание, что не весь этот выигрыш является результатом более эффективного кодирования нулей, значение K_m можно выбирать в диапазоне 1,1...1,2.

Таблица 2

Сжатие тестовых изображений

QS	Изображение	Шеннон	AGU	Выигрыш
5	Lena	2,41	1,97	1,22
	Barbara	2,72	2,12	1,28
	Baboon	4,04	3,60	1,12
20	Lena	0,83	0,48	1,73
	Barbara	1,17	0,73	1,60
	Baboon	2,11	1,71	1,23
80	Lena	0,26	0,12	2,17
	Barbara	0,36	0,18	2,00
	Baboon	0,62	0,40	1,55

Подставим в (3) $K_m=1,1$ и сравним на примере кодера AGU (с отключенной постобработкой) эффективность кодирования с использованием контекстного моделирования для РК и для КМЗ (AGU-D). Результаты сравнения (bpp при фиксированном пиковом соотношении сигнал/шум (ПССШ), дБ) для ряда тестовых изображений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сжатие изображений с КМЗ и РК, bpp

Изображение	ПССШ=40 дБ		ПССШ=34 дБ		ПССШ=30 дБ	
	AGU	AGU-D	AGU	AGU-D	AGU	AGU-D
Lena	1,03	0,97	0,28	0,26	0,113	0,101
Barbara	1,23	1,22	0,72	0,71	0,39	0,37
Baboon	2,82	2,81	1,82	1,77	1,16	1,08

Использование КМЗ в данном случае обеспечивает выигрыш от 0,5% до 10%. Отметим, что выигрыш получается более высоким для более гладких изображений и высоких степеней сжатия.

4. Сочетание неравномерного квантования с предварительной фильтрацией и постобработкой

Оценим влияние КМЗ на эффективность ПФ и ПО. Табл. 4 содержит данные по сжатию изображения Lena методами А (AGU), РА (AGU с ПФ), АР (AGU с ПО), РАР (с ПФ и ПО) и этими же методами с КМЗ (соответственно АД, РАД, АДР и РАДР).

Таблица 4

Влияние КМЗ на качество предварительной фильтрации и постобработки, ПССШ, дБ

bpp	РА	РАД	А	АД	АР	АДР	РАР	РАДР
1	40,35	40,46	39,86	40,25	40,52	39,95	40,54	40,43
0,5	37,06	37,14	36,74	37,04	37,46	36,88	37,43	37,31
0,25	33,87	33,94	33,55	33,86	34,51	33,64	34,38	34,20

При выполнении процедур ПФ и ПО использовался фильтр на основе ДКП [8] (с порогом, равным 0,5 QS, заданным в соответствии с [6]).

Анализ данных табл. 4 показывает, что КМЗ в сочетании с постобработкой почти всегда приводит к ухудшению качества изображения. В то же время

КМЗ в сочетании с ПФ позволяет незначительно (примерно на 0,1 дБ) повысить качество декодированных изображений. Наибольший выигрыш от использования КМЗ достигается в том случае, когда не используются ПФ и ПО, и составляет 0,3-0,4 дБ.

Интересно, что разница между АР и РА является несущественной, в то время, как разница между АР и А доходит до 0,5 дБ. Это говорит о целесообразности использования ПФ в тех приложениях, где может не хватать времени на ПО при декодировании изображений, например, в сжатии видео.

Заклучение

В результате проведенных исследований разработан метод определения величины “мертвой зоны” для КМЗ. Показана его эффективность в сжатии с использованием контекстного моделирования при кодировании битовых плоскостей.

Показано, что КМЗ может применяться совместно с ПФ, однако неэффективно в сочетании с ПО.

Литература

1. Gersho A. *Vector Quantization and Signal Compression* / A. Gersho, R.M. Gray. – Boston, MA: Kluwer, 1992. – 732 p.

2. Lloyd S.P. *Least squares quantization in PCM* / S.P. Lloyd // *Unpublished Bell Laboratories Technical Note*. – 1957.

3. Huang J.Y. *Block quantization of correlated Gaussian random variables* / J.Y. Huang, P.M. Shultheiss // *IEEE Trans. Comm.* – 1963. – CS-11. – P. 289-296.

4. Shannon C.E. *A mathematical theory of communication* / C.E. Shannon // *Bell System Technical Journal*. – 1948. – Vol. 27. – P. 379-423, 623-656.

5. Ponomarenko M. *Partition Scheme Based High Quality Image Compression: Thesis for the degree of Doctor of Technology* / M. Ponomarenko. – Tampere (Finland, Tampere University of Technology), 2005. – 180 p.

6. Ponomarenko N.N. *DCT Based High Quality Image Compression* / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *Proc. of 14th Scandinavian Conf. on Image Analysis*. – Joensuu, Finland, 2005. – P. 1177-1185.

7. *Информационная страница кодера AGU [Электронный ресурс]*. – 2008. – Режим доступа к странице: <http://ponomarenko.info/agucoder.htm>.

8. Egiazarian K. *Removal of blocking and ringing artifacts using transform domain denoising* / K. Egiazarian, M. Helsingius, P. Kuosmanen, J. Astola // *Proc. of ISCAS'99*. – 1999. – Vol. 4. – P. 139-142.

Поступила в редакцию 3.09.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

НЕРІВНОМІРНЕ КВАНТУВАННЯ У СТИСКУ ЗОБРАЖЕНЬ

М.М. Пономаренко

Досліджено задачу квантування даних, зокрема, спектральних коефіцієнтів ДКП, у стиску зображень. Запропоновано простий та ефективний метод визначення розміру «мертвої зони» для нерівномірного квантування. Показано, що таке квантування забезпечує менший об'єм стиснених даних, ніж рівномірне квантування та квантування за узагальненим алгоритмом Ллойда. Розглянуто взаємозв'язок між вибором методу квантування та ефективністю контекстно-залежного кодування квантованих коефіцієнтів ДКП, а також ефективністями попередньої фільтрації та пост обробки для усунення блочного ефекту на декодованих зображеннях.

Ключові слова: квантування, стиск зображень, дискретне косинусне перетворення.

NONUNIFORM QUANTIZATION IN IMAGE COMPRESSION

N.N. Ponomarenko

The task of data quantization for image compression is investigated. A simple and effective method of a “dead zone” value determination is proposed. It is shown that such quantization provides smaller size of compressed data than a uniform quantization or Lloyd quantization. Interrelation between selection of a quantization method and effectiveness of context depended coding of quantized DCT coefficients as well as effectiveness of pre-filtering and post-processing for blocking artifacts removal is considered.

Key words: quantization, image compression, discrete cosine transform.

Пономаренко Николай Николаевич – канд. техн. наук, докторант кафедры «Прием, передача и обработка сигналов» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: nikolay@ponomarenko.info.