

УДК 621.391

**Н. В. КОЖЕМЯКИНА, В. В. ЛУКИН, Н. Н. ПОНОМАРЕНКО,  
А. И. МИРОШНИЧЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***JPEG СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
РЕКУРСИВНОГО ГРУППОВОГО КОДИРОВАНИЯ**

*Рассмотрена задача альтернативного кодирования квантованных коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП) в стандарте JPEG. Вместо цепочки из ряда операций предлагается использовать рекурсивное групповое кодирование (РГК). РГК является альтернативой арифметическому кодированию и кодированию Хаффмана и в отличие от них способно эффективно кодировать символы очень больших алфавитов (каждый блок 8x8 пикселей с квантованными коэффициентами ДКП можно представить в качестве такого 64-байтного или 128-байтного символа). Проведен сравнительный анализ эффективности JPEG и предлагаемой модификации при сжатии тестового набора изображений (по три изображения для трех разных фотокамер) и шести разных таблиц квантования. Показано, что при низкой вычислительной сложности и высокой скорости кодирования РГК обеспечивает более высокую степень сжатия коэффициентов ДКП, чем стандартная схема JPEG. Показано, что выигрыш в сжатии является более высоким для меньших шагов квантования и в режиме высокого качества составляет около 10%. Показано, что для изображений фотохостинга "Яндекс.Фотки" выигрыш в сжатии предложенным методом составляет в среднем 3,25%.*

**Ключевые слова:** JPEG, сжатие изображений с потерями, дополнительное сжатие JPEG, рекурсивное групповое кодирование, энтропийное кодирование.

**Введение**

Задача сжатия изображений с потерями является актуальной в течение нескольких последних десятилетий. При этом основное внимание уделяется методам на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП) [1], лежащего в основе стандарта JPEG [2], и на основе дискретного вейвлетного преобразования, лежащего в основе стандарта JPEG2000 [3]. Именно методы, основанные на этих ортогональных преобразованиях, обеспечивают наиболее высокие степени сжатия при заданном качестве изображений. Методы, использующие другие подходы, например, фрактальное сжатие изображений [4], сжатие на основе векторного квантования [5], также находят свое применение в различных частных задачах.

Отдельным направлением в сжатии изображений является учет визуального качества изображений при их сжатии, сжатие с требуемым визуальным качеством, сжатие без внесения визуально заметных искажений [6, 7]. Эти методы требуют разработки и анализа специальных метрик визуального качества изображений [8]. В этом направлении также, как правило, лучшие результаты показывают методы, основанные на ДКП [9]. Большинство из них учитывают особенности восприятия человека

за счет использования неравномерных таблиц квантования, а также за счет оценивания и учета характеристик шума, присутствующего на изображении [10, 11]. Характеристики шума используются и при сжатии мозаичных изображений (RAW), снимаемых с выхода матрицы фотоаппарата [12].

Для ряда задач, таких как сжатие изображений дистанционного зондирования Земли, сжатие медицинских изображений, основным критерием качества изображений может выступать эффективность решения конечных задач интерпретации информации, содержащейся в изображении, которые могут решаться в автоматическом режиме без участия оператора. Для таких задач оправданным является использование равномерных таблиц квантования с небольшими значениями шагов квантования.

Методы сжатия неподвижных изображений лежат в основе методов сжатия многоканальных изображений [13] и видео, в которых кроме устранения внутрикадровой избыточности требуется еще и учитывать межкадровое подобие изображений.

При этом, несмотря на то, что стандарт JPEG был разработан более двадцати лет назад и с тех пор разработан ряд более эффективных методов, в частности, стандарт JPEG2000, все они так и не смогли вытеснить JPEG из повседневного использования. Частично причиной этого является то, что

JPEG поддерживается огромным количеством программного обеспечения и аппаратных платформ. Важным фактором также является патентная чистота JPEG, подтвержденная временем, что позволяет производителям использовать его без риска возникновения патентных претензий. Более 80% изображений в сети Интернет по-прежнему передаются и хранятся в формате JPEG. JPEG является наиболее распространенным стандартом для хранения изображений, формируемых цифровыми фотокамерами, смартфонами, планшетами. Поэтому являются актуальными такие задачи, как дополнительное сжатие изображений JPEG [14] при их передаче по сети, разработка различных модификаций JPEG, ориентированных на сжатие определенных классов изображений, например, 16-битных.

Сжатие в стандарте JPEG условно можно разбить на два этапа: 1) устранение корреляции и упрощение изображения за счет выполнения ДКП в блоках изображения и квантования коэффициентов ДКП; 2) устранение статистической избыточности за счет сложной процедуры, состоящей из зиг-заг сканирования, кодирования длин повторов (Run-Length Encoding, RLE) и арифметического кодирования (АК) или кодирования Хафмана (КХ) на заключительной стадии (рис. 1).

Зиг-заг сканирование и RLE требуются для кодирования большого количества нулей в квантованных коэффициентах ДКП. Без их использования и АК, и КХ будут неэффективными, так как квантованные коэффициенты ДКП внутри блоков изображения являются статистически неоднородными. В высокочастотных коэффициентах нулей гораздо больше, чем в низкочастотных. Однако, если рассматривать блоки квантованных коэффициентов ДКП как неделимую единицу данных (символы алфавита), то по своим статистическим характеристикам они являются достаточно похожими друг на друга. В начале каждого символа меньше нулевых байтов, в конце каждого символа больше нулевых байтов. Если кодировать квантованные коэффициенты не как отдельные байты, а как большие символы, то можно было бы обойтись без зиг-заг сканирования и RLE кодирования, использование которых замедляет процесс кодирования и понижает его

потенциальную эффективность. Однако АК и КХ, используемые в стандарте JPEG, не позволяют эффективно кодировать символы больших алфавитов.

Задачу эффективного кодирования символов сверхбольших алфавитов позволяет решить относительно недавно появившаяся альтернатива арифметическому кодированию - рекурсивное групповое кодирование (РГК) [15, 16]. Этот метод, являясь самодостаточным и вычислительно простым (основной цикл кодирования может быть реализован лишь на операциях сдвига и логического "или"), за счет рекурсивного масштабирования данных позволяет наиболее эффективно кодировать тексты с символами больших алфавитов без какой-либо априорной информации об их статистических характеристиках [17].

*Целью данной работы* является усовершенствование метода JPEG, в которой весь второй этап сжатия предлагается заменить на РГК, а также анализ эффективности предлагаемой модификации при сжатии изображений с использованием равномерных и неравномерных таблиц квантования, для синтезированных и реальных наборов тестовых изображений.

## 1. Использование RGC в JPEG сжатии

Метод РГК является альтернативой таким "элементарным" методам устранения статистической избыточности в данных, как АК или КХ. Однако в данном случае благодаря способности РГК эффективно кодировать символы больших алфавитов оказывается возможным заменить на РГК несколько последовательно применяемых шагов кодирования метода JPEG (рис. 2).

При этом особенностью кодирования является то, что динамический диапазон квантованных коэффициентов ДКП при небольших степенях сжатия превышает 256, поэтому при использовании РГК нужно выбрать стратегию их кодирования. Во-первых, можно кодировать 16-битные значения коэффициентов ДКП (при этом один символ алфавита будет занимать 128 байт). Во-вторых, можно предварительно разделить данные на старшие и младшие байты и кодировать эти два массива данных

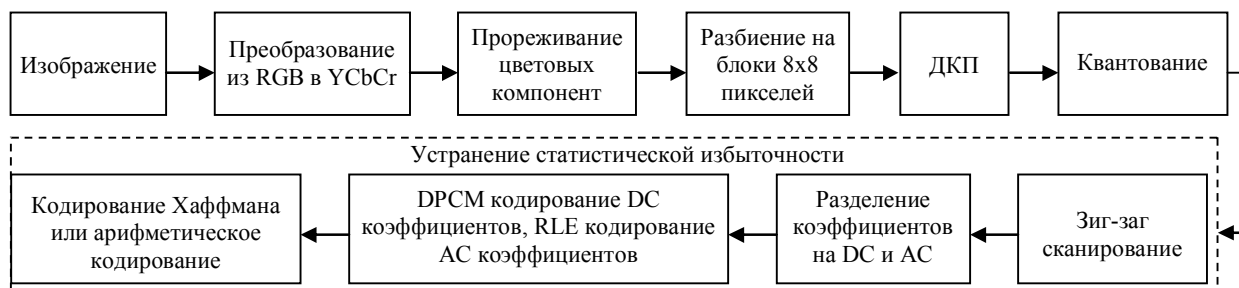


Рис. 1. Схема сжатия в JPEG



Рис. 2. Схема возможного использования РГК в JPEG

отдельно. В данной работе будем использовать вторую стратегию, предварительно (перед разделением на старшую и младшую часть) добавив к каждому квантованному коэффициенту 128. В этом случае большинство отрицательных коэффициентов станут положительными с математическим ожиданием в 128. При этом почти вся информация окажется сосредоточенной в массиве младших значений.

## 2. Сравнительный анализ

Для сравнительного анализа эффективности JPEG и предлагаемой модификации будем использовать набор тестовых изображений из [18] (все изображения сохранены в формате TIFF без сжатия). Будем сжимать их стандартным JPEG и предложенной модификацией (JPEG-RGC).

В таблице 1 приведены результаты сжатия тестовых изображений для трех таблиц квантования, соответствующих высокому среднему и низкому качеству JPEG изображений (параметр Quality при сжатии равен 100, 80 и 50 соответственно).

Таблица 1  
bpp для стандартных таблиц квантования JPEG

Тестовый набор	№	Quality=100		Quality=80		Quality=50	
		JPEG	JPEG-RGC	JPEG	JPEG-RGC	JPEG	JPEG-RGC
Canon EOS 40D	1	6,25	5,63	1,06	1,04	0,49	0,49
	2	5,91	5,38	0,91	0,92	0,39	0,43
	3	6,05	5,52	1,01	1,01	0,47	0,49
Panasonic Lumix LX20	1	7,41	6,61	1,71	1,70	1,00	0,94
	2	8,11	7,19	1,97	1,94	1,18	1,16
	3	5,55	5,17	0,95	0,95	0,49	0,52
Olympus C765UZ	1	9,50	8,09	2,68	2,63	1,63	1,63
	2	7,73	6,86	2,05	2,05	1,25	1,25
	3	5,86	5,50	1,25	1,30	0,73	0,75
Average		6,93	6,22	1,51	1,50	0,85	0,85

Из данных таблицы видно, что JPEG-RGC обеспечивает наибольший выигрыш (в среднем 10%) по сравнению с JPEG при Quality=100 и для текстурированных изображений (максимальный выигрыш достигается для первого изображения из набора Olympus C765UZ). При больших степенях сжатия RGC-JPEG обеспечивает сравнимую с JPEG степень сжатия. В таблице 2 приведены аналогичные показатели для равномерных таблиц квантования.

Таблица 2  
bpp для равномерных таблиц квантования

Тестовый набор	№	Quality=100		Quality=80		Quality=50	
		JPEG	JPEG-RGC	JPEG	JPEG-RGC	JPEG	JPEG-RGC
Canon EOS 40D	1	9,48	9,21	6,63	6,44	3,55	3,53
	2	9,20	9,05	6,31	6,27	3,28	3,36
	3	9,45	9,23	6,58	6,43	3,50	3,54
Panasonic Lumix LX20	1	10,23	9,66	7,23	7,00	4,64	4,50
	2	11,93	11,27	8,82	8,42	6,02	5,83
	3	8,30	7,90	5,35	5,23	3,01	3,05
Olympus C765UZ	1	12,71	12,14	9,67	9,31	7,00	6,79
	2	9,63	9,22	6,85	6,61	4,71	4,62
	3	7,69	7,47	4,92	4,92	3,09	3,19
Average		9,85	9,46	6,93	6,74	4,31	4,27

Из данных таблицы видно, что RGC-JPEG также обеспечивает наибольший выигрыш по сравнению с JPEG для Quality=100, хотя в данном случае его среднее значение примерно в два раза ниже - около 5%.

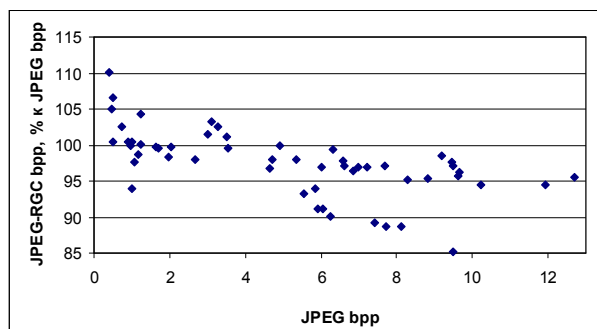


Рис. 3. Эффективность сжатия JPEG-RGC в зависимости от bpp JPEG файла

На рис. 3 приведена скаттерграмма, на которой объединены данные обеих таблиц. Видно, что RGC-JPEG имеет преимущество при больших bpp JPEG. Стандартная схема сжатия JPEG в свою очередь имеет преимущество при bpp меньше 4.

Для оценивания эффективности сжатия изображений предложенным методом также был использован тестовый набор из 100 изображений, случайным образом выбранным на хостинге изображений "Яндекс.Фотки".

Результаты сжатия показали, что из 100 тестовых изображений, увеличение степени сжатия по сравнению с JPEG было достигнуто для 68 изображений. При этом было достигнуто уменьшение объ-

ема памяти, требуемого для хранения этих 100 изображений на 3,5%.

На рис. 4 приведена скаттерграмма, которая показывает эффективность сжатия JPEG-RGC по сравнению с JPEG для данного тестового набора.

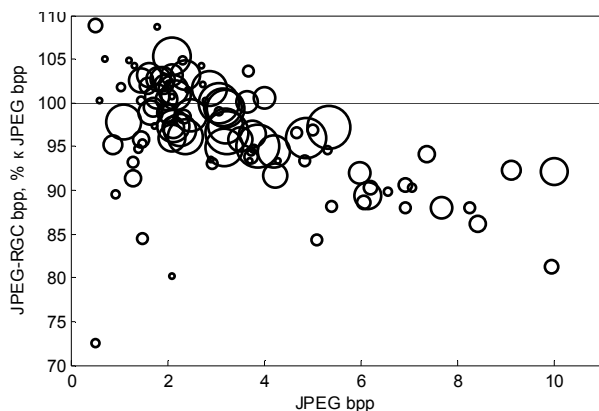


Рис. 4. Эффективность сжатия JPEG-RGC в зависимости от bpp JPEG файла для тестового набора из фотохостинга "Яндекс.Фотки"

Каждая окружность на изображении соответствует одному изображению, а ее площадь - размеру JPEG файла этого изображения (от 40 кБайт до 7 МБайт). Хорошо видно, что эффективность предложенного метода сжатия не зависит от размера изображения. При bpp 4 и выше предложенный метод всегда обеспечивает более высокую степень сжатия, чем JPEG, что хорошо согласуется с данными рис. 3.

### Заключение

Исследования показывают, что РГК может эффективно использоваться в схемах сжатия, где нужно кодировать блоки квантованных коэффициентов ДКП, в частности, при небольших шагах квантования, что особенно актуально для приложений с высокими требованиями к качеству сжатых изображений. Перспективным представляется использование РГК и в других задачах сжатия данных, где имеются квантованные коэффициенты ДКП в блоках: сжатии звука и видео.

### Литература

1. ADCTC: A new high quality DCT based coder for lossy image compression [Electronic resource] / N Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola. – 80 Min / 700 MB. CD ROM Proceedings of LNLA. – Switzerland, August – 2008. – 6 p. – 1 electronic optical disc (CD-ROM).
2. Wallace, G. The JPEG Still Picture Compression Standard [Text] / G. Wallace // *Comm. of the ACM*. – 1991. – Vol. 34. – P. 30-44.
3. Taubman, D. JPEG 2000: Image Compr. Fundamentals. Standards and Practice [Text] /

D. Taubman, M. Marcellin. – Boston : Kluwer, 2002. – 360 p.

4. Cascade Fractal Image Compression and its Modification [Text] / N. N. Ponomarenko, K. Egiazarian, V. V. Lukin, J. T. Astola // *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – Philadelphia, USA. – March, 2005. – Vol. 2. – P. 361-364.

5. Gersho, A. Vector Quantization and Signal Compression [Text] / A. Gersho, R. M. Gray. – Boston : Kluwer, 1992. – 732 p.

6. Lossy Compression of Noisy Images Based on Visual Quality: A Comprehensive Study [Text] / N. Ponomarenko, S. Krivenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2010. – P. 13.

7. Lossy compression of images without visible distortions and its application [Text] / V. Lukin, M. Zriakhov, N. Ponomarenko, S. Krivenko, M. Zhenjiang // *Proceedings of IEEE International Conf. on Signal Processing*. – 2010. – P. 698-701.

8. Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives [Text] / N. Ponomarenko, L. Jin, O. Ieremeiev, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola, B. Vozel, K. Chehdi, M. Carl // *Signal Processing: Image Communication*. – 2015. – Vol. 30 – P. 55-77.

9. Visual quality of lossy compressed images [Text] / N. Ponomarenko, S. Krivenko, V. Lukin, K. Egiazarian // *Proceedings of CADSM*. – Svalyava. – 2009. – P. 137-142.

10. Quasi-optimal compression of noisy optical and radar images [Text] / V. Lukin, N. Ponomarenko, M. Zriakhov, A. Zelensky, K. Egiazarian, J. Astola // *Proc. of SPIE Conf. "Image and Signal Processing Remote Sensing XII"*. – 2006. – Vol. 6365. – P. 12.

11. Methods and automatic procedures for processing images based on blind evaluation of noise type and characteristics [Text] / V. Lukin, S. Abramov, N. Ponomarenko, M. Uss, M. Zriakhov, B. Vozel, K. Chehdi, J. Astola // *Journal of Applied Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 5. – doi:10.1117/1.3539768

12. Compression of noisy Bayer pattern color filter array images [Text] / N. Ponomarenko, A. Bazhyna, K. Egiazarian, V. Lukin // *Proc. of SPIE Photonics West Symp.* – San Jose. – 2007. – Vol. 6498. – P. 9.

13. Automatic approaches to on-land/on-board filtering and lossy compression of aviris images [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Zriakhov, A. Kaarna, J. Astola // *Proceedings of IGARSS*. – Barcelona. – July, 2008. – P. 4

14. Additional lossless compression of JPEG images [Text] / N. Ponomarenko, K. Egiazarian, V. Lukin, J. Astola // *Proceedings of 4th Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*. – Zagreb, Croatia, 2005. – P. 117-120.

15. Recursive coding: A new fast and simple alternative of arithmetical coding [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2009. – Vol. 68, N 20. – P. 1857-1863.

16. Пономаренко, Н. Н. Метод энтропийного рекурсивного группового кодирования [Текст] / Н. Н. Пономаренко, Н. В. Кожемякина, В. В. Лукин // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2014. – № 3 (67). – С. 20-26.

17. Means and results of efficiency analysis for data compression methods applied to typical multimedia data [Text] / N. Kozhemiakina, N. Ponomarenko,

V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *IEEE First International Scientific-Practical Conference Problems*. – 2014. – P. 12-14.

18. Comparison of lossy compression technique performance for real life color photo images [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, E. Delp // *Proceedings of Picture Coding Symposium*. – USA, 2009. – P. 4

Поступила в редакцію 2.09.2015, рассмотрена на редколлегии 11.09.2015

## JPEG СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РЕКУРСИВНОГО ГРУПОВОГО КОДУВАННЯ

*Н. В. Кожемякіна, В. В. Лукін, М. М. Пономаренко, О. І. Мірошніченко*

Розглянуто задачу альтернативного кодування квантованих коефіцієнтів дискретного косинусного перетворення (ДКП) в стандарті JPEG. Замість ланцюжка з ряду операцій пропонується використовувати рекурсивне групове кодування (РГК). РГК є альтернативою арифметичному кодуванню та кодуванню Хаффману, і на відміну від них здатне ефективно кодувати символи дуже великих алфавітів (кожен блок 8x8 пікселів з квантованими коефіцієнтами ДКП можна представити в якості такого 64-байтного або 128-байтного символу). Проведено порівняльний аналіз ефективності JPEG і запропонованої модифікації при стисненні тестового набору зображень (по три зображення для трьох різних фотокамер) і шести різних таблиць квантування. Показано, що при низькій обчислювальній складності і високій швидкості кодування РГК забезпечує більш високий ступінь стиснення коефіцієнтів ДКП, ніж стандартна схема JPEG. Показано, що вииграш у стисненні є більш високим для менших кроків квантування і в режимі високої якості становить близько 10%. Показано, що для зображень фотохостингу "Яндекс.Фотки" вииграш у стисненні запропонованим методом складає в середньому 3,25%.

**Ключові слова:** JPEG, стиснення зображень з втратами, додаткове стиснення JPEG, рекурсивне групове кодування, ентропійне кодування.

## JPEG IMAGE COMPRESSION USING RECURSIVE GROUP CODING

*N. V. Kozhemiakina, V. V. Lukin, N. N. Ponomarenko, A. I. Miroshnichenko*

A task of alternative coding of discrete cosine transform (DCT) coefficients within JPEG based image compression approach is considered. In the data processing chain, it is proposed to apply a recursive group coding. RGC is thought as an alternative to arithmetic or Huffman coding, in opposite to the aforementioned data coding techniques, the RGC method is able to efficiently code symbols of very large alphabets (each block of 8x8 pixels of quantized DCT coefficients can be presented as such 64-byte or 128-byte symbol). Comparative analysis of efficiency for the standard JPEG and its proposed modification (for three images of three different digital cameras) is carried out using six different quantization Tables. It is shown that RCG possesses low computational complexity and high speed of compression simultaneously with higher compression ratio compared to the standard JPEG. The benefit in CR appears to be larger for smaller quantization. This benefit can reach up to 10%. It is shown that the proposed methods for images of photohosting "Yandex.Fotki" provides 3.25% benefit in size of compressed images.

**Key words:** JPEG, lossy image compression, additional JPEG compression, recursive group coding, entropy coding.

**Кожемякіна Надежда Владимировна** – аспірант каф. приєма, передачі і обробки сигналів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: nadejda\_kozickaya@mail.ru.

**Лукин Владимир Васильевич** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. приєма, передачі і обробки сигналів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: lukin@ai.kharkov.com.

**Пономаренко Николай Николаевич** - д-р техн. наук, доцент, проф. каф. приєма, передачі і обробки сигналів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: nikolay@ponomarenko.info.

**Мирошніченко Александр Иванович** - студент каф. приєма, передачі і обробки сигналів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: smirr72@gmail.com.