

УДК 621.3:681.34

А.Н. ЗЕМЛЯЧЕНКО, В.В. ЛУКИН

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

## СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ВИЗУАЛЬНО ЗАМЕТНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

*Рассмотрены методы сжатия изображений с потерями, но без визуально заметных искажений. Для контроля визуального качества сжимаемых изображений использованы метрики PSNR-HVS-M и MSSIM. Рассмотрена зависимость коэффициента сжатия от устанавливаемых пользователем значений метрик PSNR-HVS-M и MSSIM. Приведены результаты сжатия для различных тестовых изображений и кодеров. Проведен их сравнительный анализ, даны рекомендации по использованию. Показано, что коэффициент сжатия существенно зависит от таких характеристик сжимаемого изображения как сложность информационной составляющей и уровень помех.*

*Ключевые слова:* степень сжатия, сжатие с потерями, метрики визуального качества изображений.

### Введение

Бурное развитие полупроводниковых технологий привело к созданию процессоров, произведенных с применением более «тонкого» техпроцесса, что позволило значительно усложнить их архитектуру, и, как следствие, обеспечить выполнение более сложных вычислений и повысить быстродействие. Одновременно существенно улучшилось разрешение систем формирования изображений и увеличился объем данных, которые необходимо обрабатывать, передавать по каналам связи и хранить [1-3]. При этом доступные объемы памяти и пропускная способность каналов связи также возрастали, но с меньшей скоростью. Это привело к необходимости разработки эффективных методов сжатия изображений, причем даже достаточно сложные методы (например, с использованием блоков переменного размера и постобработки), способные обеспечить более высокие коэффициенты сжатия (КС) могут быть реализованы в реальном времени.

Отметим, что применение сжатия изображений актуально для систем дистанционного зондирования и мониторинга поверхности Земли, медицинских приложений, видео и фотокамер, систем документальной связи и т.д. При использовании методов сжатия изображений без потерь редко удаётся достичь КС порядка 2...3 [1-3], что часто недостаточно для практики. Поэтому актуальной является разработка методов сжатия с потерями, потенциально позволяющих достичь КС до нескольких десятков. Однако при этом желательно, а часто и не менее важно обеспечить приемлемое для пользователя визуальное качество сжатых изображений.

Решение этой задачи сдерживается рядом факторов. Во-первых, это ограниченная адекватность

метрик, характеризующих визуальное качество, хотя для таких метрик как PSNR-HVS-M [4], MSSIM [5] и ряда других достигнуто неплохое соответствие между их значениями и визуальным качеством сжатых изображений [6]. Во-вторых, не для всех метрик определены значения, которые соответствуют визуально незаметным искажениям. Лишь для метрик PSNR-HVS-M и MSSIM недавно были примерно установлены пороги, равные соответственно 40 дБ и 0,99 [7], при превышении которых искажения, вносимые сжатием с потерями, практически гарантированно оказываются визуально незаметными. В-третьих, процедуры обеспечения требуемого значения используемой метрики требуют выполнения нескольких итераций компрессии и декомпрессии для сжимаемого изображения [8], что снижает быстродействие. В-четвертых, многие методы сжатия не учитывают особенности зрительного восприятия (Human Vision System - HVS). Для стандарта JPEG особенности HVS учтены в таблице квантования [1], но аналогичные возможности не исследованы для других методов сжатия (кодеров).

В связи с изложенным выше, целью данной работы является исследование зависимости КС от значений метрик визуального качества для достаточно широких наборов кодеров и тестовых изображений. Результатом исследования являются практические рекомендации по выбору кодеров.

### 1. Инструментарий и методика тестирования

В данной работе исследования проводились с применением современных кодеров AGU [9], ADCT [10] и их модифицированных версий AGU-M, ADCT-M [11], а также стандартных JPEG [1] и SPIHT [12].

В основе кодера ADCT лежит алгоритм сжатия на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП). Кодер использует адаптивное разбиение изображения на блоки различного размера и контекстное кодирование.

Кодер AGU использует несколько другую схему обработки коэффициентов ДКП и работает с блоками изображения фиксированного размера 32x32 пикселя. Как и для ADCT, используется контекстное кодирование квантованных ДКП-коэффициентов, а также деблокинг после декомпрессии.

Кодеры AGU-M и ADCT-M являются модернизированными версиями с учетом визуального качества. Для них, как и для JPEG, применяются таблицы квантования, которые индивидуальны для каждого размера блока и представляют собой наборы значений, интерполированных из исходной матрицы JPEG.

В отличие от всех перечисленных выше кодеков, в основе кодера SPIHT лежит дискретное вейвлет преобразование (ДВП). Фактически SPIHT можно считать аналогом стандарта JPEG2000.

В качестве параметра, управляющего сжатием, все кодеры на основе ДКП используют шаг квантования, а кодер SPIHT использует количество бит на пиксель (bits per pixel - bpp), которое для используемого ниже 8-битного представления изображений легко пересчитывается как  $KC=8/bpp$ .

Метрика PSNR-HVS-M позволяет учитывать эффекты маскирования и различную чувствительность зрения человека к разным пространственным частотам. Она рассчитывается с использованием таблицы квантования, принятой в стандарте JPEG для квантования компоненты Y цветных изображений. Для этой таблицы характерна общая тенденция увеличения шага квантования спектральных компонент ДКП при увеличении пространственной «частоты».

Значения метрики PSNR-HVS-M измеряются в децибелах, большие значения соответствуют лучшему визуальному качеству. Определяется эта метрика по формуле:

$$PSNR - HVS - M = 10 \lg(255^2 / MSE_{HVS-M}),$$

где  $MSE_{HVS-M}$  рассчитывается с учетом особенностей визуального восприятия человека в соответствии с выражением:

$$MSE_{HVS-M} = K \sum_{i=1}^{I-7} \sum_{j=1}^{J-7} \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 (I(n,m)_{ij}^n - I(n,m)_{ij}^e \times T_c(n,m))^2,$$

где  $K = 1 / ((I-7) / (J-7) / 64, I_{ij}^n$  – коэффициенты ДКП фрагмента искаженного изображения размером 8x8 пикселей с координатами верхнего левого

угла,  $I_{ij}^e$  – коэффициенты ДКП соответствующего фрагмента изображения,  $T_c$  – матрица корректирующих множителей.

Метрика MSSIM основана на определении меры подобия двух изображений для нескольких величин, таких, как контраст, яркость и структурность. При этом метрика является робастной к изменению разрешения изображений. Адекватность метрики обусловлена также и тем, что при измерении параметров изображение разбивается на локальные блоки и оценка параметров подобия производится в скользящем окне внутри блока. Метрика может изменяться в пределах от 0 (наихудшее качество) до 1 (наилучшее качество).



Рис. 1. Стандартные тестовые изображения: BABOON, GOLDHILL, BARBARA, CAMERAMAN, PEPPERS, LENNA

В данном исследовании использовалось программное обеспечение [13], позволяющее для заданной метрики (например, PSNR-HVS-M, MSSIM или других) реализовать сжатие заданного изображения с обеспечением заранее установленного значения этой метрики в автоматическом режиме. Такая процедура может быть реализована для любого из перечисленных выше кодеков. После окончательного сжатия рассчитываются KC и шаг кванто-

вания. Кроме того, на экран выдаются другие параметры: число итераций, точность обеспечения значения метрики и т.д.

Особенности итеративной процедуры состоят в следующем: обрабатываемое изображение на каждом  $k$ -м шаге сжимается с некоторым текущим значением  $KC_k$  (которое определяется параметром  $brp_k$  для SPIHT или шагом квантования  $QS_k$ ), а затем декодируется. Для декодированного изображения вычисляется  $PSNR-HVS-M_k$  или  $MSSIM_k$ . Полученное значение  $PSNR-HVS-M_{tr}$  (или  $MSSIM_k$  сравнивается с  $MSSIM_{tr}$ ) и принимается решение, как изменять  $brp$  или шаг квантования  $QS$  на следующем шаге, чтобы приблизиться к  $PSNR-HVS-M_{tr}$  или  $MSSIM_{tr}$ . Итерации завершаются, когда  $PSNR-HVS-M_{tr}$  или  $MSSIM_{tr}$  достигнуты с требуемой точностью (в данном исследовании обеспечивалось  $PSNR-HVS-M_{tr}$  с

точностью порядка 0,2 дБ,  $MSSIM_{tr}$  с точностью 0,0002).

Поскольку характеристики сжатия зависят от свойств изображений (тип и сложность текстур, мелких объектов, границ, однородных участков), в эксперименте были использованы шесть стандартных тестовых изображения (рис. 1), и четыре менее известных тестовых изображения (рис. 2). Кроме того, для изображений BABOON, BARBARA и PEPPERS имеются их цветные версии. Из этих версий были выделены их R, G и B цветные компоненты. Если на стандартных черно-белых изображениях BABOON, BARBARA и PEPPERS шум практически незаметен визуально, то на цветных компонентах (особенно R и B) шум виден. Эти компоненты использовались нами для того, чтобы определить, каким образом наличие шума может влиять на характеристики сжатия.



Рис. 2. Менее известные тестовые изображения: GRASS, AIRFIELD, BOAT, POLE

Использование такого большого набора тестовых изображений обусловлено желанием охватить широкий круг типов изображений и их характеристик, встречающихся в реальных условиях применения кодеров. Тестовые изображения представлены в градациях серого (8 бит/пиксель), все они имеют размер 512x512 пикселей.

## 2. Анализ полученных данных

Сжатие проводилось для значений метрик визуального качества равных PSNR-HVS-M=40; 42; 44 дБ и MSSIM=0,985; 0,99; 0,995. На рис. 3 – 5 приведены значения КС для заданного (фиксированного) значения метрики качества для всего набора тестовых изображений и кодеров.

Проведем сначала анализ данных, приведенных на рис. 3 и в таблице под ним. Как видно, КС в зависимости от сжимаемого изображения изменяется в очень широких пределах. Значения КС лежат в пределах от 3 до 5,5 для наиболее сложных по своей структуре изображений (например, GRASS) до 16...32 для наиболее простых изображений (например, POLE), имеющих значительный процент пикселей, принадлежащих однородным участкам.

Фактически изображения можно разделить на три группы: высокотекстурные (GRASS, BABOON,

AIRFIELD), для которых для всех используемых кодеров значения КС весьма малы; средней сложности (GOLDHILL, BOAT, BARBARA), имеющие как текстурные, так и однородные участки (им соответствуют средние значения КС среди изображений тестового набора); относительно простые (CAMERAMAN, PEPPERS, LENNA, POLE), которые характеризуется большим количеством однородных участков. Для последней группы изображений получены наибольшие значения КС. Такая группировка изображений практически не зависит от используемого кодера, хотя достигаемые значения КС существенно отличаются.

Также по результатам исследований наблюдается «разделение» кодеров на две группы. Первая группа - это кодеры, адаптированные под визуальное качество (AGU-M, ADCT-M, JPEG), вторая - кодеры без такой адаптации (AGU, ADCT, SPIHT).

Для всего набора тестовых изображений первая группа кодеров обеспечивает более высокие значения КС. Лучшие значения КС в данной группе наблюдаются обычно для кодера ADCT-M, а худшие - для JPEG. Однако для некоторых тестовых изображений (BARBARA, CAMERAMAN, LENNA, POLE) JPEG несколько уступает наилучшему из кодеров без адаптации (ADCT).

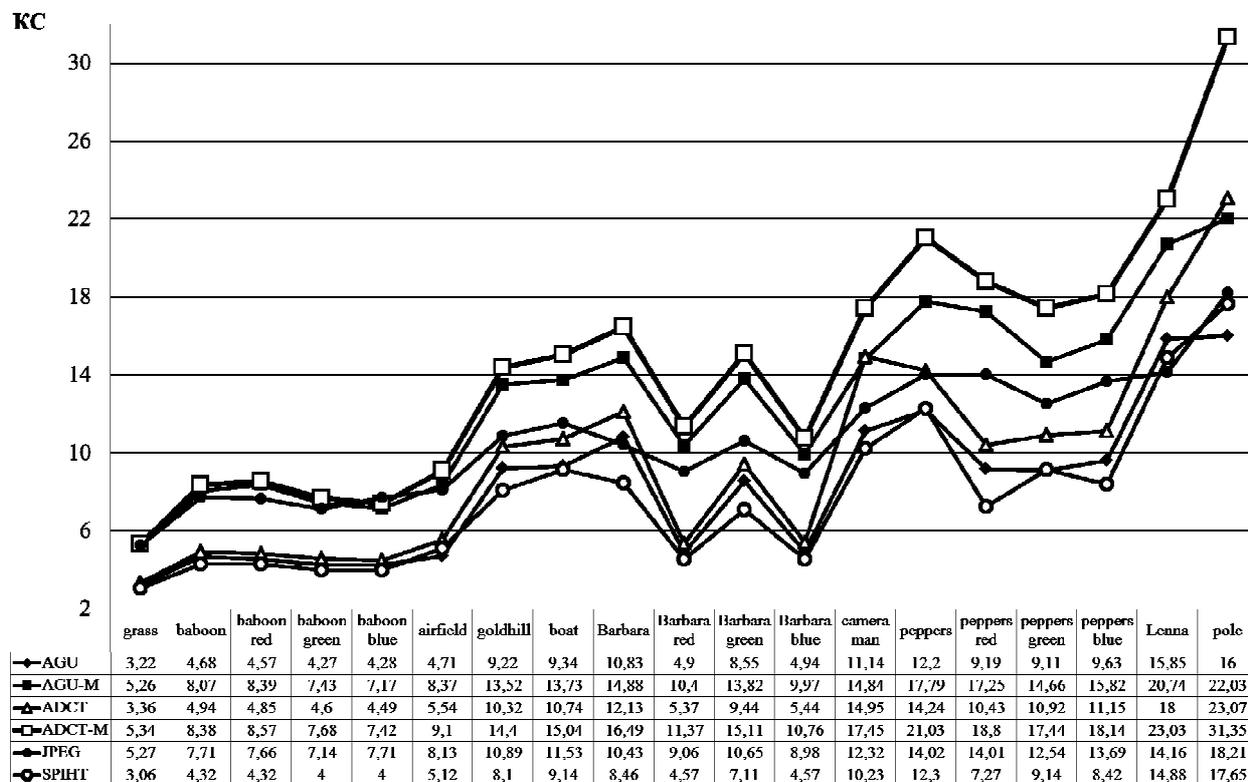


Рис. 3. Значения КС для тестовых изображений и разных кодеров при PSNR-HVS-M=40 дБ

Во второй группе кодеров наибольшие значения КС обеспечивает кодер ADCT, а наименьшие - SPIHT. Кодеры AGU и AGU-M по своим характеристикам занимают промежуточные позиции в своих группах. Эти кодеры имеют преимущество в скорости сжатия по сравнению с кодерами ADCT и ADCT-M. Преимущества кодеров с переменным размером блоков (ADCT и ADCT-M) особенно явно проявляются для третьей группы (простых) изображений.

На графиках также хорошо прослеживается интересная тенденция. КС для цветowych компонент R и B изображений BARBARA и PEPPERS меньше, чем для зеленой компоненты и черно-белого изображения (интенсивности). Это свойство обусловлено наличием шума большего уровня в R и B компонентах. Фактически в рамках рассматриваемого подхода к сжатию без визуально заметных искажений методы сжатия стремятся «сохранить» шум [14, 15], чтобы не допустить визуальных отличий. При этом на сохранение шума «тратятся» лишние биты, что снижает соответствующие значения КС.

Отметим, что в соответствии с результатами работы [7] при PSNR-HVS-M=40 дБ искажения все же были видны для примерно 20% изображений, сжатых с потерями. По нашим наблюдениям это чаще всего происходит тогда, когда шум в исходном изображении визуально заметен и сжатие с потерями его частично подавляет.

При значении метрики качества PSNR-HVS-M=42 дБ (рис. 4) характер поведения зависимости значений КС от сжимаемого тестового изображения и анализируемых кодеров практически не изменился. Единственное отличие состоит в том, что значения КС снизились в среднем на 20% относительно КС для PSNR-HVS-M=40 дБ. При этом значения КС для сложных изображений снизились в меньшей степени, чем значения КС для более простых изображений.

При установке требования PSNR-HVS-M=44 дБ (зависимости не приведены) основные закономерности те же, но КС еще меньше.

Для метрики MSSIM (рис. 5) отличительной особенностью является переход кодера JPEG во вторую группу кодеров (имеющих худшие характеристики), а также заметное снижение КС для цветowych компонент изображений BARBARA и PEPPERS для кодеров AGU-M и ADCT-M. В среднем при использовании метрики MSSIM=0,99 имеет место примерно на 23% меньший КС, чем при обеспечении PSNR-HVS-M=40 дБ, и на 2% меньший КС, чем при задании PSNR-HVS-M=42 дБ.

Если установить в программе MSSIM=0,985, то полученные значения КС будут примерно на 10% больше чем при установке PSNR-HVS-M=40 дБ (для соответствующих кодеров и изображений). Если же MSSIM=0,995, то заметно снижаются значения КС.

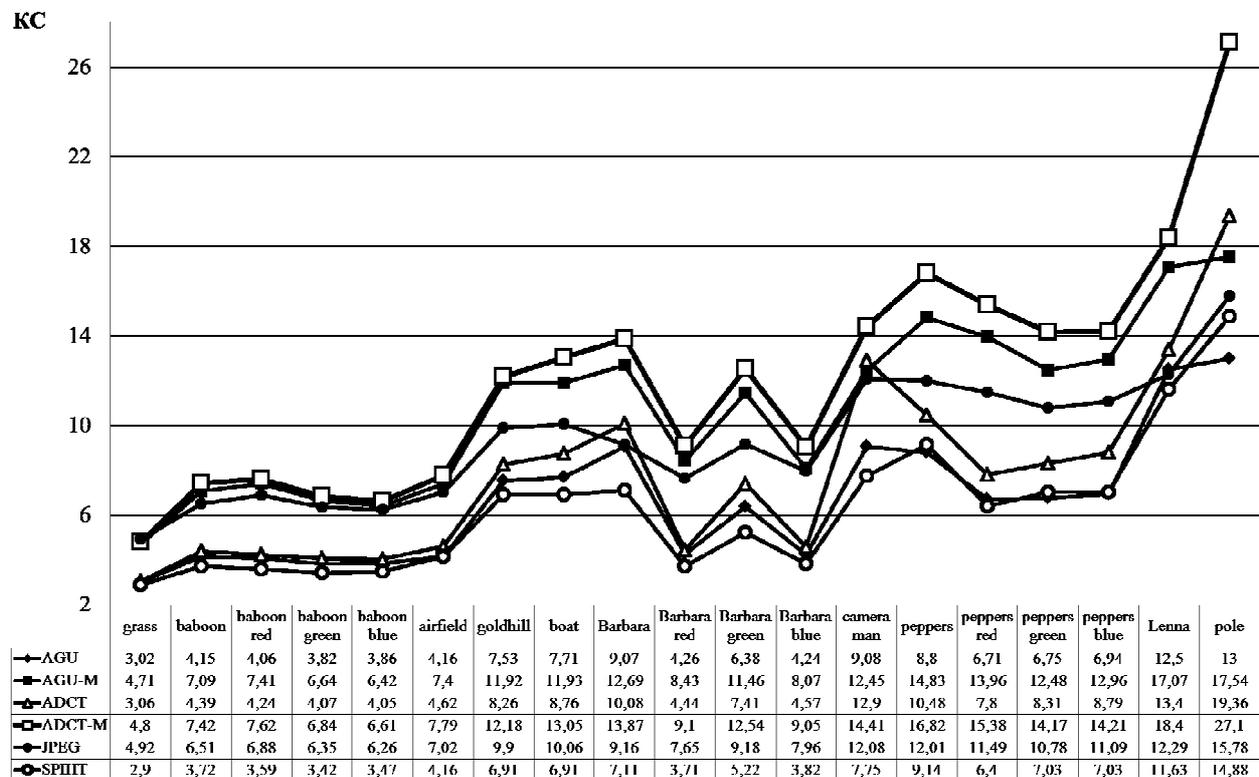


Рис. 4. Значения КС для тестовых изображений и разных кодеров при PSNR-HVS-M=42 дБ

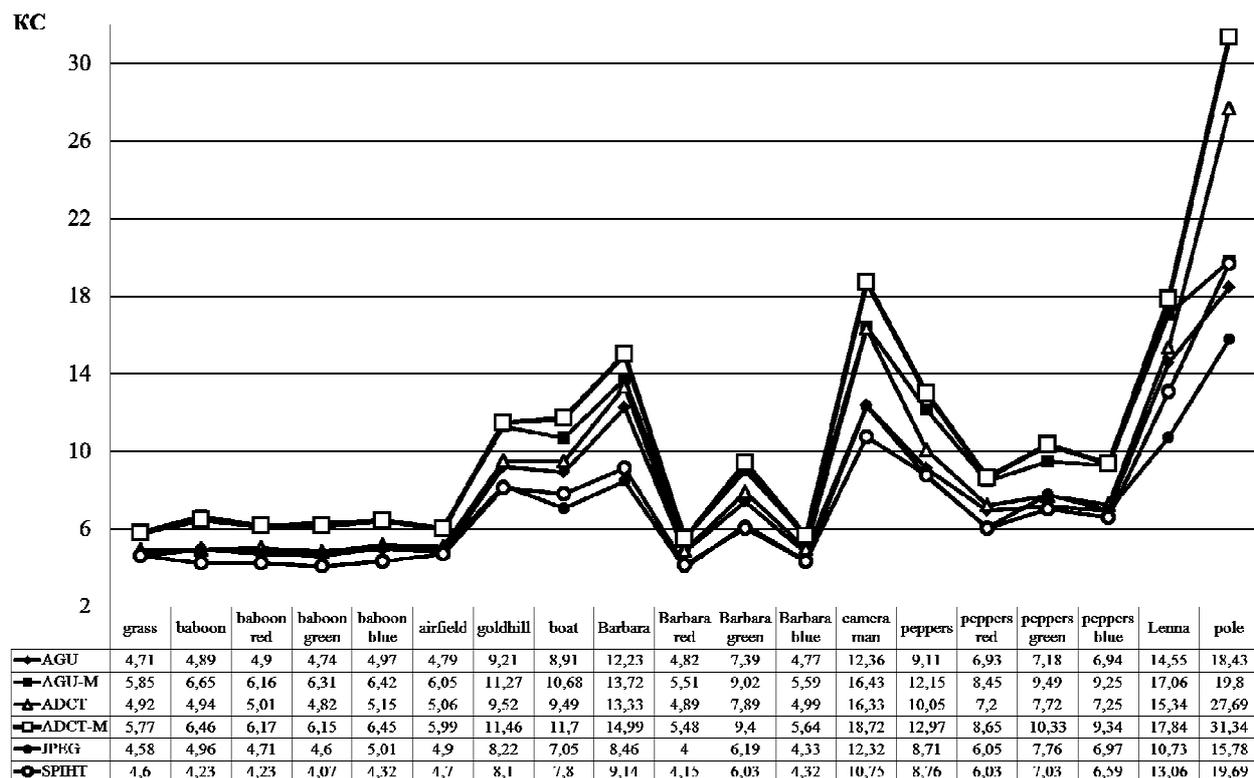


Рис. 5. Значения КС для тестовых изображений и разных кодеров при  $MSSIM=0,99$

Таким образом, на практике для обеспечения визуально незаметных искажений целесообразно устанавливать либо PSNR-HVS-M около 42 дБ, либо  $MSSIM=0,99$ . При этом достигаемые КС существенно варьируются в зависимости от степени сложности изображения, подлежащего сжатию.

Несмотря на то, что в основе метрики PSNR-HVS-M лежит ДКП, а в основе  $MSSIM$  – дискретное вейвлетное преобразование, результаты для них аналогичны. При этом кодеры AGU-M и ADCT-M в целом обеспечивают наилучшее качество сжатия в соответствии с обеими метриками.

### Заключение

Проведен анализ эффективности шести методов сжатия с потерями для большого набора тестовых изображений.

Основное внимание уделено обеспечению заданного визуального качества в соответствии с двумя HVS-метриками.

Показано, что достигаемая степень сжатия может на порядок изменяться в зависимости от степени сложности изображения.

При этом разработанные недавно кодеры AGU-M и ADCT-M позволяют для метрик  $MSSIM$  и PSNR-HVS-M повысить КС на 30...45% и 70...90%, соответственно, по сравнению с SPIHT при одном и том же визуальном качестве.

### Литература

1. Bovik, A. *Handbook on Image and Video Processing [Текст] / A. Bovik. – USA, Academic Press, 2000. – 891 p.*
2. Kaarna, A. *Compression of Spectral Images [Текст] / A. Kaarna // Vision Systems: Segmentation and Pattern Recognition – Vienna: I-Tech. – 2007. – Vol. 1. – P. 269 – 298.*
3. Yu, G. *Image compression systems on board satellites [Текст] / G. Yu, T. Vladimirova, M. Sweeting // Acta Astronautica. – 2009. – Vol. 64. – P. 988 – 1005.*
4. *On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions [Текст] / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, V. Lukin // Proc. of the Third Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics, USA. – 2007. – Vol. 3. – 4 p.*
5. Wang, Z. *Multi-scale structural similarity for image quality assessment [Текст] / Z. Wang, E.P. Simoncelli, A.C. Bovik // IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. – 2003. – Vol. 6. – 5 p.*
6. *Metrics Performance Comparison for Color Image Database [Текст] / K. Egiazarian, J. Astola, N. Ponomarenko, V. Lukin, F. Battisti // Proceedings of the Second International Workshop on Video Processing and Quality Metrics, USA. – 2009. – Vol. 6. – 6 p.*
7. *Lossy Compression of Images without Visible Distortions and Its Application [Текст] / V.V. Lukin, M.S. Zriakhov, N.N. Ponomarenko, S.S. Krivenko, Miao Zhenjiang // Proceedings of ICSP, Beijing, China, 13-18 September 2010. – 2010. – P. 698 – 701.*

8. Зряхов, М.С. Обеспечение заданного качества при сжатии изображений с потерями [Текст] / М.С. Зряхов, В.В. Лукин // "Радиотехника": сб. научных трудов, ХНУРЭ. – 2005. – Вып. 143. – С. 76–82.
9. DCT Based High Quality Image Compression [Текст] / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // Proceedings of 14th Scandinavian Conference on Image Analysis. – Joensuu, Finland. – June 2005. – Vol. 14. – P. 1177–1185.
10. ADCT: A new high quality DCT based coder for lossy image compression [Электронный ресурс] / N. Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // CD ROM Proceedings of LNL. – Switzerland. – 2008. – 6 p. – Режим доступа к журн.: <http://www.lnl.com/2008>. – 01.07.2011 г.
11. Visual Quality of Lossy Compressed Images [Текст] / N. Ponomarenko, S. Krivenko, V. Lukin, K. Egiazarian // Proceedings of CADSM2009, Svalyava. – Feb. 2009. – P. 137–142.
12. Said, A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [Текст] / A. Said, W.A. Pearlman // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 1996. – Vol. 6. – P. 243–250.
13. Кривенко, С.С. Автоматизированный программный комплекс оценки визуального качества сжатых данных дистанционного зондирования [Текст] / С.С. Кривенко // 9-я Харьковская конференция молодых ученых «Радиофизика, электроника, фотоника и биофизика»: сб. тезисов докладов, ИРЭ НАН Украины, Харьков, – 2009. – С. 35.
14. Al-Chaykh, O.K. Lossy compression of noisy images [Текст] / O.K. Al-Chaykh, R.M. Mersereau // IEEE Trans. on Image Processing. – Dec. 1998. – Vol. 7 (12). – P. 1641–1652.
15. Estimation of accessible quality in noisy image compression [Текст] / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Zriakhov, K. Egiazarian, J. Astola // Proc. EUSIPCO. – Italy, 2006. – Vol. 12. – 4 p.

Поступила в редакцию 4.07.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов В.К. Волосюк, Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

## СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ БЕЗ ВІЗУАЛЬНО ПОМІТНИХ СПОТВОРЕНЬ

*О.М. Земляченко, В.В. Лукін*

Розглянуті методи стиснення зображень з втратами, але без візуально помітних спотворень. Для контролю візуальної якості стиснутих зображень використані метрики PSNR-HVS-M та MSSIM. Розглянута залежність коефіцієнта стиснення від встановлених користувачем значень метрик PSNR-HVS-M та MSSIM. Приведені результати стиснення для різних тестових зображень і кодерів. Проведений їх порівняльний аналіз, надано рекомендації по використанню. Показано, що коефіцієнт стиснення суттєво залежить від таких характеристик стисненого зображення як складність інформаційної складової та рівня завад.

**Ключові слова:** ступінь стиснення, стиснення з втратами, метрики візуальної якості зображень.

## IMAGE COMPRESSION WITHOUT VISUALLY VISIBLE DISTORTIONS

*A.N. Zemlyachenko, V.V. Lukin*

Methods for lossy compression of images without visual visible distortions are considered. Metrics PSNR-HVS-M and MSSIM are used for controlling visual quality of compressed images. The dependency of the compression ratio on the values of the metrics PSNR-HVS-M and MSSIM preset by the user is considered. The results of compression for different test images and coders are presented. The comparative analysis is carried out, the recommendations on the coder use are given. It is shown that the compression ratio greatly depends on such features of the compressed images as complexity of information content and level of the noise.

**Keywords:** compression ratio, lossy compression, image visual quality metrics.

**Земляченко Александр Николаевич** – магистрант каф. приема, передачи и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [hagriel@ukr.net](mailto:hagriel@ukr.net).

**Лукин Владимир Васильевич** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. приема, передачи и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [lukin@xai.kharkov.ua](mailto:lukin@xai.kharkov.ua).