

УДК 621.3:681.34

**С. К. АБРАМОВ, Н. В. БУРЦЕВ, С. С. КРИВЕНКО,
А. Н. ЗЕМЛЯЧЕНКО, В. В. ЛУКИН***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***АВТОМАТИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ В ОКРЕСТНОСТИ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ШУМОМ КОДЕРАМИ ТИПА SPIHT И JPEG2000**

Для методов сжатия изображений на основе вейвлетных преобразований (SPIHT, JPEG2000) разработана итеративная процедура сжатия изображений, на которых присутствуют некоррелированные помехи, в окрестности оптимальной рабочей точки. Для достижения такого сжатия предполагается, что дисперсия или другие характеристики помех априорно известны или автоматически оценены с необходимой точностью. Далее учитываются те факты, что для кодера на основе дискретного косинусного преобразования AGU сжатие в окрестности OPT может быть реализовано без итераций путем установки шага квантования с учетом свойств помех и основные характеристики сжатия для AGU близки к характеристикам сжатия для SPIHT и JPEG2000. Кроме того, используется предложенная ранее процедура прогнозирования коэффициента сжатия для AGU в окрестности OPT.

Ключевые слова: сжатие с потерями, оптимальная рабочая точка, помехи.

Введение

Средства дистанционного зондирования (ДЗ) с аэрокосмических носителей находят все более широкое применение. Объемы получаемых ими данных постоянно растут вследствие улучшения разрешающей способности систем, растущей популярности гиперспектральных средств, имеющих сотни каналов, необходимости контроля измерений на контролируемых территориях и т.д. [1, 2]. В связи с этим возрастает необходимость применения эффективных методов сжатия изображений для их передачи по каналам связи на Землю [1, 3], последующего хранения и доставки потенциальным потребителям.

Требования к методам сжатия данных ДЗ систем аэрокосмического базирования имеют свою специфику. С одной стороны, применение методов сжатия без потерь редко позволяет удовлетворить предъявляемым требованиям, поскольку достигаемые значения коэффициентов сжатия (КС), как правило, малы и имеют порядок 2...4 даже при сжатии гиперспектральных изображений, для которых есть возможность учесть спектральную избыточность [4]. С другой стороны, при применении методов сжатия с потерями обычно можно обеспечить заметно большие значения КС, но одновременно необходимо контролировать вносимые искажения для того, чтобы их уровень не оказался недопустимо высоким и не привел фактически к потере полезной информации.

Кроме характерной для сжатия с потерями проблемы достижения компромисса между вносимыми искажениями и коэффициентом сжатия, при компрессии изображений ДЗ обычно необходимо

учитывать еще пять важных моментов. Первый – на изображениях неизбежно присутствует шум, уровень и тип которого может варьироваться от одной практической ситуации к другой в широких пределах [5–7]. Второй – сжатые данные ДЗ часто желательно представлять в стандартных форматах, в связи с чем часто применяют стандарт сжатия JPEG2000 или его модификации [4, 8, 9]. Третий – желательно обеспечить требуемые характеристики сжатия достаточно быстро и с небольшими вычислительными или аппаратными затратами, что особенно важно при обработке на борту носителя [1, 4] Это возможно, если число итераций мало (желательно вообще без итераций) и при этом используются достаточно быстрые алгоритмы сжатия. Четвертый момент – при сжатии целесообразно использовать критерии, которые связаны с эффективностью решения конечных задач, в частности, классификации [10]. Поэтому при выборе параметров сжатия желательно использовать или учитывать несколько критериев. Наконец, пятый момент – все операции при сжатии необходимо (или желательно) выполнять автоматически [1, 11].

Методы сжатия с потерями на основе вейвлетных преобразований, например JPEG2000 или SPIHT, способны удовлетворить ряд из перечисленных требований. Сжатые данные представляются в популярных форматах, обеспечивается неплохой компромисс между степенью сжатия и стандартными критериями типа среднеквадратической ошибки внесенных искажений (СКОш) или пикового отношения сигнал-шум (ПОСШ), быстродействие достаточно высоко, легко обеспечивается заданный коэффициент сжатия или bpp (bits per pixel, КС=8/bpp

для изображений, представленных в виде массивов восьмибитных или байтовых целых неотрицательных чисел).

Однако имеются и определенные недостатки. Прежде всего, это касается учета помех. При сжатии с потерями СКОш вносимых искажений должна быть меньше [12] или примерно равной [13] дисперсии помех в исходном изображении (или эквивалентной дисперсии, если помехи являются сигнально-зависимыми [14]). Во втором случае, то есть при примерном равенстве СКОш вносимых искажений и (эквивалентной) дисперсии помех в сжимаемом изображении, может иметь место так называемая оптимальная рабочая точка (ОРТ) [13, 14], когда в соответствии с выбранной метрикой (критерием) сжатое изображение более близко к истинному (без шумов), чем исходное изображение (с шумами), которое подвергается сжатию. Тогда сжатие в ОРТ (или его окрестности) может быть целесообразно по двум причинам. Во-первых, качество сжатого изображения может оказаться выше (ближе к качеству истинного изображения), чем качество исходного. Во-вторых, достигаемые при этом значения КС, как правило, имеют порядок 5...20, то есть они значительно больше, чем значения КС при сжатии без потерь.

Постановка задачи исследования

В принципе, существуют подходы к автоматическому сжатию изображений, искаженных шумом, в окрестности ОРТ кодерами JPEG2000 и SPIHT [13]. Однако для этого надо использовать итеративные процедуры, предусматривающие на каждом этапе сжатие изображения, его декомпрессию, расчет метрики и принятие решения, как далее изменять параметр (bpp), позволяющий варьировать КС и СКОш вносимых потерь.

Цель данной работы – показать, что сжатие в окрестности ОРТ для кодеров JPEG2000 и SPIHT может быть реализовано без итераций с учетом подбора характеристик сжатия для этих кодеров и кодера AGU [15] на основе ДКП, а также на основе недавно предложенной процедуры предсказания КС при сжатии изображений, искаженных помехами, кодером AGU [16].

1. Особенности сжатия в окрестности оптимальной рабочей точки

Рассмотрим изображение, искаженное сигнально-зависимым шумом:

$$I_{ij}^n = I_{ij}^{\text{true}} + n_{ij}(I_{ij}^{\text{true}}), \quad (1)$$

где I_{ij}^{true} – истинное значение в ij -м пикселе;

I_{ij}^n – наблюдаемое значение изображения в ij -м пикселе;

n_{ij} – шум в пикселе, причем статистические характеристики шума в общем случае зависят от I_{ij}^{true} .

Возможны различные зависимости локальной дисперсии помех от I_{ij}^{true} . Для компонентных изображений, формируемых современными гиперспектральными системами ДЗ адекватной в настоящее время считается модель вида:

$$\sigma_{nqij}^2 = k_q I_{ij}^{\text{true}} + \sigma_{\text{add}q}^2, \quad (2)$$

где q – индекс, относящийся к номеру канала;

$\sigma_{\text{add}q}^2$ – дисперсия аддитивной компоненты, полагаемой гауссовой с нулевым математическим ожиданием;

k_q – множитель, который зависит от особенностей операции коррекции динамического диапазона при формировании изображения [6, 7].

Для модели (2) эквивалентную дисперсию помех можно оценить как:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\text{eq}}^2 &= \left(\sum_{i=1}^{I_m} \sum_{j=1}^{J_m} k I_{ij}^{\text{true}} / (I_m J_m) \right) + \sigma_{\text{add}}^2 \approx \\ &\approx \sum_{i=1}^{I_m} \sum_{j=1}^{J_m} \hat{k} I_{ij}^n / (I_m J_m) + \hat{\sigma}_{\text{add}}^2 = \hat{k} \hat{I}_{\text{mean}} + \hat{\sigma}_{\text{add}}^2, \quad (3) \end{aligned}$$

где \hat{k} , \hat{I}_{mean} , $\hat{\sigma}_{\text{add}}^2$ – соответственно оценки параметра k , среднего значения и дисперсии аддитивной компоненты для данного изображения размером $I_m J_m$ пикселей.

На практике могут иметь место и другие модели сигнально-зависимых помех, но и для них можно аналогично (3) рассчитать $\hat{\sigma}_{\text{eq}}^2$.

Сжатие изображений, искаженных сигнально-зависимыми помехами, можно осуществлять двумя способами [14]. Первый – сжимать изображение без каких-либо предварительных преобразований с учетом $\hat{\sigma}_{\text{eq}}^2$ (в результате получают I_{ij}^c ($i=1, \dots, I_m$, $j=1, \dots, J_m$)). Второй вариант – выполнять соответствующее вариационно-стабилизирующее преобразование (ВСП) и применять сжатие к преобразованному изображению, учитывая при этом дисперсию аддитивного шума после преобразования $\hat{\sigma}_{\text{VST}}^2$, которую можно оценить или рассчитать [14].

В связи с такой возможностью (вторым вариантом) рассмотрим некоторые особенности сжатия изображений, искаженных шумом более простого вида – аддитивным гауссовым шумом с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . Здесь необходимо напомнить, что для разных методов сжатия КС изменяется (варьируется) разными способами. В частности, для методов сжатия на основе ДКП КС изменяют, варьируя либо шаг квантования (ШК), либо масштабирующий множитель (ММ). При этом ОПТ (если она наблюдается) для метрик СКОш и PSNR (peak signal-to-noise ratio – пиковое отношение сигнал-шум ПОСШ), рассчитанных для пары изображений I_{ij}^{true} и I_{ij}^c ($i=1, \dots, I_{lm}$, $j=1, \dots, J_{lm}$), наблюдается при ШК, примерно равном $\beta\sigma=4\sigma$ ($\beta\sigma_{eq}=4\sigma_{eq}$ при применении сжатия непосредственно к изображениям, искаженным сигнально-зависимыми помехами, или $\beta\sigma_{VST}=4\sigma_{VST}$ при применении сжатия после ВСП).

Графики зависимостей ПОСШ, рассчитанных для изображений I_{ij}^{true} и I_{ij}^c ($i=1, \dots, I_{lm}$, $j=1, \dots, J_{lm}$), от шага квантования QS для кодера AGU приведены на рис. 1. Эти зависимости получены для трех тестовых изображений (более простого по структуре изображения Frisco и двух изображений средней сложности Airfield и Aerial) при двух дисперсиях помех (100 и 200). Эти графики позволяют проиллюстрировать основные закономерности:

- для изображений примерно одинаковой сложности при одинаковой дисперсии графики ведут себя примерно одинаково;

- возможны ситуации, когда формально ОПТ отсутствует; такая ситуация, в частности, наблюдается для тестового изображения Airfield при дисперсии помех, равной 100; хотя кривая и имеет локальный максимум, но значение ПОСШ в нем меньше, чем для исходного изображения (см. данные для шага квантования, равного 1);

- при дисперсии, равной 100, максимумы ПОСШ (два глобальных и один локальный), наблюдаются при ШК порядка 41; при дисперсии, равной 200, все три максимума являются глобальными (то есть ОПТ существуют) и они наблюдаются при ШК порядка 60, то есть при ШК чуть большем, чем 4σ ;

- очевидно, что, с одной стороны, для разных практических ситуаций, значение множителя β перед СКО, при котором наблюдается ОПТ, немного варьируется, но рекомендованное значение, равное 4, позволяет достаточно точно установить ШК; с другой стороны, область небольших изменений ПОСШ в окрестности максимума достаточно широка, поэтому при выполнении указанной рекоменда-

ции удается «попасть» в окрестность ОПТ согласно метрике ПОСШ;

- при выполнении рекомендации можно осуществлять сжатие в окрестности ОПТ без итераций, то есть устанавливая ШК с учетом СКО помех, которая предполагается заранее известной или оцененной с приемлемой точностью.

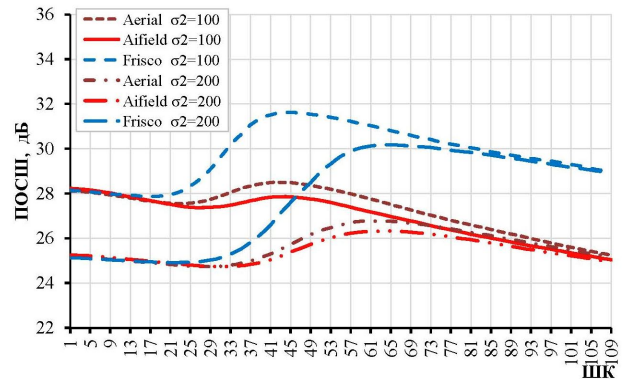


Рис. 1. Зависимости ПОСШ от ШК для трех тестовых изображений и двух значений дисперсии аддитивных помех

Интересно, что имеется возможность предсказать как наличие ОПТ и значение $\Delta\text{PSNR}=\text{PSNR}(\text{QS}\approx 4\sigma)-\text{PSNR}(\text{QS}=1)$ в ОПТ для AGU и некоторых других методов сжатия на основе ДКП [17]. Можно также предсказать и значения КС, которые будут достигнуты при сжатии в окрестности ОПТ [18].

Подходы к предсказанию основываются на получении аппроксимирующей кривой путем ее вписывания в скаттерограмму (пример показан на рис. 2). Пример показан для случая использования в качестве входного параметра $P_{1\sigma}$ – вероятности того, что модульные значения ДКП-коэффициентов в блоках 8×8 пикселей не превышают σ .

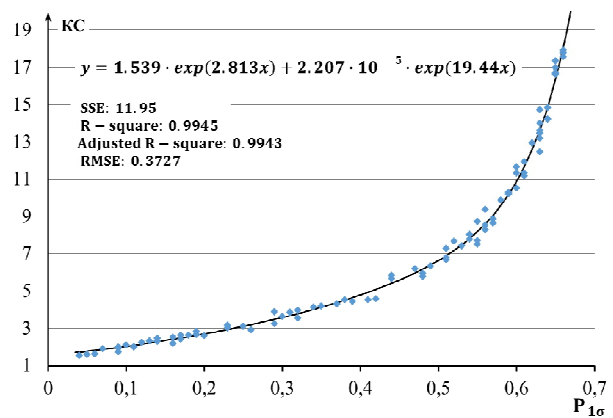


Рис. 2. Скаттерограмма зависимости КС от $P_{1\sigma}$ и аппроксимирующая функция при ШК=3,5 σ

Для аппроксимации (при вписывании) можно использовать полиномы четвертой или пятой степени, а также другие относительно простые функции (см. пример на рис. 2, а также другие подробности в работе [19]). Достижимые значения параметра R^2 , превышающие 0,99, указывают на качественное вписывание и существование жесткой зависимости выходного параметра от входного.

2. Сравнение зависимостей для разных кодеров

К сожалению, описанную выше методику обеспечения сжатия в окрестности ОПТ, применимую для AGU и некоторых других кодеров на основе ДКП, сложно или практически невозможно применить для методов сжатия на основе вейвлетных преобразований, для которых характеристики сжатия изменяются путем варьирования параметра bpp . Однако, как будет показано ниже, существует возможность решить эту проблему.

Чтобы показать это, проведем сравнение основных показателей сжатия для нескольких методов сжатия. Основные примеры приведены ниже для известного тестового изображения Барбара (рис. 3), искаженного гауссовым белым шумом с дисперсией, равной 100. Однако основные закономерности, описанные ниже, справедливы для большого количества других проанализированных нами тестовых изображений, искаженных аддитивным белым гауссовым шумом с таким же и другими значениями дисперсии.



Рис. 3. Изображение Барбара

В первую очередь, приведем зависимости PSNR_{tc} от параметра β , определяющего шаг квантования как $\text{ШК}=\beta\sigma$ для кодеров AGU и ADCT и масштабирующий множитель как $\text{MM}=\beta\sigma$ для кодеров AGU-M и ADCT-M, где

$$\text{PSNR}_{\text{tc}} = 10 \lg \left[255^2 / \text{MSE}_{\text{tc}} \right], \quad (4)$$

$$\text{MSE}_{\text{tc}} = \sum_{i=1}^{I_{\text{Im}}} \sum_{j=1}^{J_{\text{Im}}} (I_{ij}^{\text{true}} - I_{ij}^c)^2 / I_{\text{Im}} J_{\text{Im}}. \quad (5)$$

Для того чтобы иметь возможность сравнить показатели сжатия для этих четырех кодеров на основе ДКП и кодеров SPIHT и JPEG2000 на основе вейвлетных преобразований, данные были получены следующим образом. Осуществлялось сжатие данного изображения кодером AGU с заданным $\text{ШК}=\beta\sigma$ и определялись все параметры, включая MSE_{tc} , PSNR_{tc} , $\text{PSNR-HVS}_{\text{tc}}$ [20], $\text{PSNR-HVS-M}_{\text{tc}}$ [21], MSSIM_{tc} [22], WSNR_{tc} [23], KC , $\text{bpp}=8/\text{KC}$, а также

$$\text{MSE}_{\text{nc}} = \sum_{i=1}^{I_{\text{Im}}} \sum_{j=1}^{J_{\text{Im}}} (I_{ij}^n - I_{ij}^c)^2 / I_{\text{Im}} J_{\text{Im}}. \quad (6)$$

Для корректного сравнения сжатие кодерами SPIHT и JPEG2000 осуществляется с тем же $\text{bpp}=8/\text{KC}$, что достигнуто для AGU. Затем для изображений, сжатых кодерами SPIHT и JPEG2000, рассчитывались значения перечисленных выше метрик PSNR_{tc} , $\text{PSNR-HVS}_{\text{tc}}$, $\text{PSNR-HVS-M}_{\text{tc}}$, MSSIM_{tc} и WSNR_{tc} , где последние четыре являются метриками визуального качества.

На рис. 4 представлены зависимости PSNR_{tc} от параметра β при дисперсии помех равной 100. При $\text{ШК}=5$ для кодеров AGU, SPIHT и JPEG2000 имеем $\text{bpp}=3,55$; при $\text{ШК}=15$ $\text{bpp}=2,03$; при $\text{ШК}=25$ $\text{bpp}=1,38$; при $\text{ШК}=35$ $\text{bpp}=0,86$; при $\text{ШК}=45$ $\text{bpp}=0,48$; при $\text{ШК}=55$ $\text{bpp}=0,35$ и так далее, то есть по мере увеличения ШК наблюдается естественное повышение ШК и уменьшение bpp . Очевидно, что для всех кодеров имеют место максимумы соответствующих функций, наблюдаемые при $\text{bpp}=0,65$.

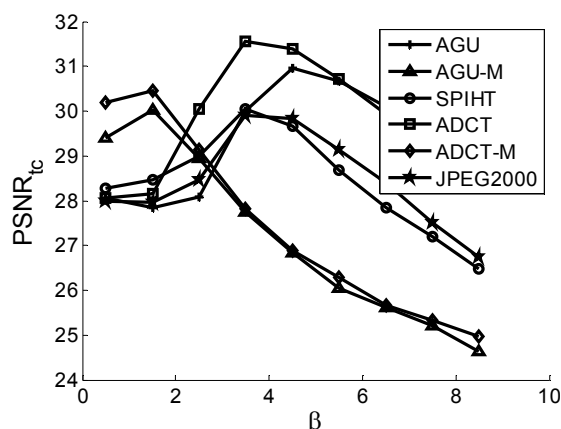


Рис. 4. Зависимости PSNR_{tc} от β для тестового изображения Барбара при дисперсии аддитивных помех, равной 100, сжатого разными методами

Хорошо видно также, что максимумы для кодеров AGU-M и ADCT-M имеют место при β поряд-

ка 2, а для кодера ADCT – при β порядка 4, как и для кодера AGU. Однако для кодера ADCT характер зависимости в большей степени отличается от зависимостей $PSNR_{tc}$ от β для SPIHT и JPEG2000, чем для AGU. Например, значение $PSNR_{tc}$ в OPT для SPIHT и JPEG2000 примерно равны 30 дБ, для AGU это значение примерно равно 31 дБ, а для ADCT – 31,6 дБ. Отметим, что для кодеров AGU-M и ADCT-M значения β_{opt} (примерно 0,65) и $PSNR_{tc}$ (примерно 30,5 дБ) в OPT того же порядка, что и для кодеров SPIHT, JPEG2000 и AGU.

Рассмотрим теперь зависимости $PSNR-HVS-M_{tc}$ от параметра β для того же тестового изображения и при той же дисперсии помех. Эти зависимости приведены на рис. 5. Напомним, что метрика $PSNR-HVS-M$ измеряется в дБ; чем больше ее значение, тем более похожи друг на друга сравниваемые изображения. Метрика $PSNR-HVS-M$ учитывает некоторые аспекты визуального восприятия изображений человеком и является одной из лучших для изображений в градациях серого.

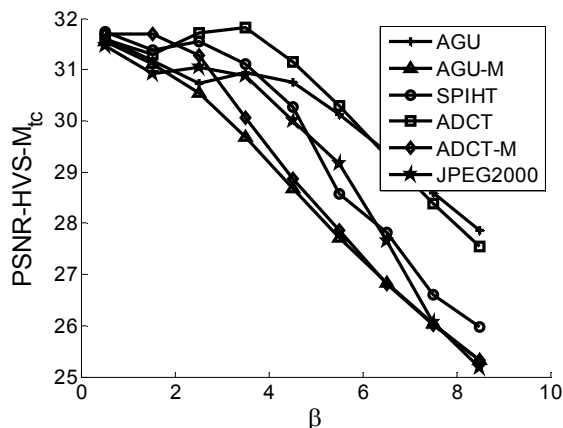


Рис. 5. Зависимости $PSNR-HVS-M_{tc}$ от β для тестового изображения Барбара при дисперсии аддитивных помех, равной 100, сжатого разными методами

Анализ зависимостей показывает, что формально для большинства кодеров OPT (то есть глобальный максимум функции) для метрики $PSNR-HVS-M_{tc}$ не наблюдаются. Лишь для кодера ADCT имеется слабо выраженный максимум при β порядка 3,5. В целом, именно для кодера ADCT имеют место наилучшие результаты – наибольшие значения $PSNR-HVS-M_{tc}$. Важно также отметить, что поведение зависимостей для кодеров SPIHT, JPEG2000 и AGU очень подобно, особенно при $\beta \leq 5$.

Еще одна метрика, характеризующая визуальное качество, – это $MSSIM$. Зависимости $MSSIM_{tc}$ от параметра β для тестового изображения Барбара при дисперсии помех, равной 100, приведены на рис. 6. В отличие от метрики $PSNR-HVS-M$, значения $MSSIM$ изменяются в пределах от 0 до 1, причем

чем больше значение данной метрики, тем более похожи друг на друга анализируемые изображения.

Анализ зависимостей на рис. 6 показывает следующее. Для всех кодеров наблюдаются OPT, однако они имеют место при разных значениях β . Для кодеров AGU-M и ADCT-M OPT имеют место при β порядка 2, для остальных кодеров – при β порядка 4...4,5. Для кодера ADCT наблюдается наиболее явно выраженный максимум, и имеют место наилучшие результаты. Как и ранее, поведение зависимостей $MSSIM_{tc}$ от параметра β для кодеров SPIHT, JPEG2000 и AGU очень подобно.

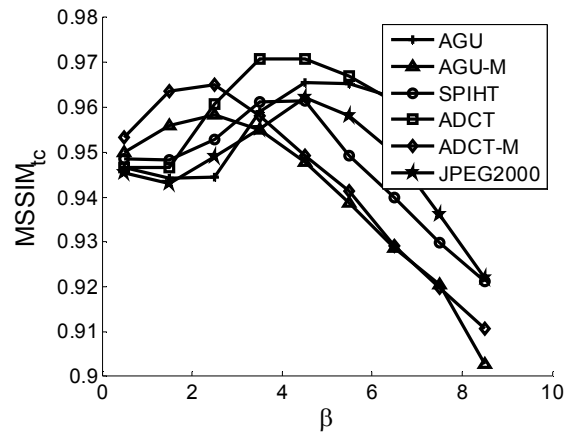


Рис. 6. Зависимости $MSSIM_{tc}$ от β для тестового изображения Барбара при дисперсии аддитивных помех, равной 100, сжатого разными методами

Наконец, проанализируем зависимости еще одной метрики визуального качества – $WSNR_{tc}$ – от β . Тестовое изображение и дисперсия помех – те же, что и ранее. Зависимости для всех шести методов сжатия с потерями приведены на рис. 7.

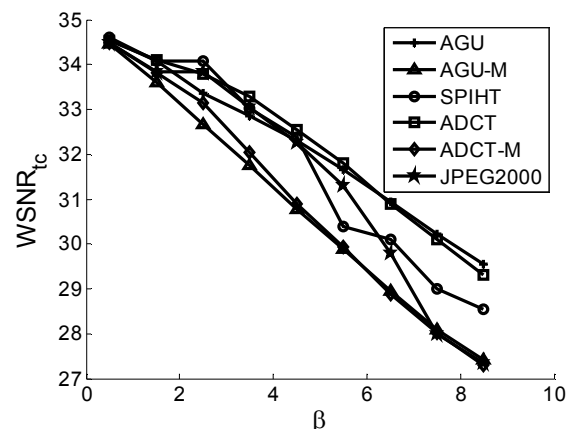


Рис. 7. Зависимости $WSNR_{tc}$ от β для тестового изображения Барбара при дисперсии аддитивных помех, равной 100, сжатого разными методами

Из рис. 7 видно, что аналогично метрике $PSNR-HVS-M$, значения $WSNR$ измеряются в дБ и

большие значения соответствуют лучшему визуальному качеству. Все полученные зависимости монотонно убывают, то есть для всех кодеков ОПТ не наблюдаются. В целом, как и ранее, наилучшие результаты имеют место для кодера ADCT, а зависимости для кодеков SPIHT, JPEG2000 и AGU мало отличаются друг от друга, особенно при $\beta \leq 5$.

Может показаться странным, что в соответствии с одними метриками визуального качества ОПТ может существовать, а в соответствии с другими – отсутствовать. Однако такой факт можно объяснить тем, что даже наилучшие из известных метрик визуального качества далеки от совершенства и не всегда способны количественно характеризовать визуальное качество с желаемой адекватностью.

Вместе с тем, совместный анализ результатов для всех четырех проанализированных метрик свидетельствует о следующем. Во-первых, результаты для методов сжатия SPIHT и JPEG2000 очень близки, достаточно близки к ним и результаты для кодера AGU в предположении, что обеспечивается один и тот же КС и сжатие осуществляется в окрестности ОПТ или, вернее, при β порядка 3,5 (при больших КС кодер AGU работает лучше, чем SPIHT и JPEG2000). Во-вторых, зависимости для кодеков AGU-M и ADCT-M от параметра β заметно отличаются от соответствующих зависимостей для других кодеков. В-третьих, наилучшие результаты, как правило, обеспечивает кодер ADCT, но при этом его быстродействие заметно ниже, чем для большинства других методов сжатия. Для разрабатываемой ниже методики особенно важен первый вывод.

3. Краткий анализ результатов для других изображений

Необходимо отметить, что аналогичные исследования были проведены для нескольких других тестовых изображений разной степени сложности, в частности, стандартных тестовых изображений Baboon, Goldhill, Lenna, нескольких медицинских изображений. Рассматривались другие значения дисперсии помех – 200 и 50. Некоторые результаты приведены в табл. 1. Изображение MRT – тестовое медицинское со сравнительно простой структурой (см. рис. 8).

Сравнение результатов, полученных для разных тестовых изображений и значений дисперсии шума, позволяет сделать следующие выводы. Для более простых по структуре изображений и более высоких значений дисперсии ОПТ более явно выражено. Для изображений со сложной структурой и/или при шуме небольшой интенсивности ОПТ, как правило, отсутствует (об этом говорят отрицательные значения $\Delta PSNR$ в табл. 1).



Рис. 8. Изображение MRT

Кроме того, сложность изображения и интенсивность помех влияют на $bpp_{OПТ}$. Простые по структуре изображения, естественно, можно сжать с большим КС, особенно при достаточно высокой интенсивности помех. Данные в табл. 1 свидетельствуют о том, что значения КС в ОПТ могут отличаться в разы.

Основные закономерности, обнаруженные для тестового изображения Барбара и описанные выше, оставались теми же. В частности, хорошо видно, что значения $\Delta PSNR$ для кодеков AGU и SPIHT достаточно близки друг к другу, хотя в большинстве ситуаций первый кодер обеспечивает немного лучшие результаты.

Таблица 1
Результаты сжатия тестовых изображений в ОПТ (при ШК=4 σ)

Тестовое изображение	Дисперсия	$bpp_{OПТ}$	$\Delta PSNR$ AGU	$\Delta PSNR$ SPIHT
Барбара	200	0,51	3,5 дБ	2,7 дБ
Baboon	100	1,19	-1,1 дБ	-0,8 дБ
Baboon	200	0,87	-0,1 дБ	0,1 дБ
MRT	100	0,45	4,8 дБ	4,4 дБ
MRT	200	0,34	5,9 дБ	5,2 дБ

Аналогичные исследования были проведены для кодера JPEG2000, причем для другого набора тестовых изображений (шесть изображений). Полученные результаты приведены в табл. 2 для дисперсии помех 100 и в табл. 3 для дисперсии помех 200. Хорошо видно, что значения $\Delta PSNR$ для сравниваемых методов сжатия (AGU и JPEG2000) достаточно близки. Значения $bpp_{OПТ}$ изменяются от 0,37 для изображений с относительно простой структурой при высоком уровне помех (см. данные для тестового изображения F-16 в табл. 3) до 0,97 для изображений со сравнительно сложной структурой (текстурных изображений) при более низком уровне помех (см. данные для тестового изображения stream_bridge в табл. 2). Результаты для тестового

изображения *stream_bridge* показывают, что ОПТ может не существовать при одном (более низком) уровне помех (см. данные в табл. 2), но существовать при более высоком уровне шума (см. данные в табл. 3). Сравнение данных в табл. 2 и 3 показывает также, что при возрастании σ^2 ОПТ становятся все более явными (значения ΔPSNR возрастают). При этом уменьшаются значения $\text{brr}_{\text{ОПТ}}$. В первую очередь это происходит потому, что рекомендуемый ШК становится больше и после квантования коэффициентов используемого ортогонального преобразования увеличивается число коэффициентов, равных нулю.

Таблица 2
Результаты сжатия тестовых изображений в ОПТ
(при ШК=4,5 σ)

Тестовое изображение	Дисперсия	$\text{brr}_{\text{ОПТ}}$	ΔPSNR AGU	ΔPSNR JPEG2000
Couple	100	0,50	2,20	1,66
Stream_bridge	100	0,91	-0,75	-0,73
Man	100	0,52	2,02	2,07
Boats	100	0,48	2,41	2,28
F-16	100	0,37	4,09	3,73
Sailboat	100	0,58	1,54	1,37

Таблица 3
Результаты сжатия тестовых изображений в ОПТ
(при ШК=4,5 σ)

Тестовое изображение	Дисперсия	$\text{brr}_{\text{ОПТ}}$	ΔPSNR AGU	ΔPSNR JPEG2000
Couple	200	0,35	3,65	2,90
Stream_bridge	200	0,63	0,59	0,40
Man	200	0,35	3,55	3,23
Boats	200	0,34	3,84	3,46
F-16	200	0,27	5,42	4,81
Sailboat	200	0,40	3,07	2,68

4. Методика сжатия в окрестности ОПТ без итераций

Как уже отмечалось, сжатие в окрестности ОПТ может быть обеспечено и для методов сжатия на основе вейвлетных преобразований. Такое сжатие реализуется на основе интересного наблюдения, описанного в работе [13]. Проанализируем поведение параметра $\text{MSE}_{\text{nc}}(\beta)$ для тестового изображения Барбара при дисперсии шума, равной 100. Полученные зависимости показаны на рис. 9.

При увеличении ШК i , соответственно, КС увеличивается среднеквадратическая ошибка вносимых потерь. Это наблюдается для всех исследуемых методов сжатия. MSE_{nc} оказывается примерно равной дисперсии помех тогда, когда наблюдается

ОПТ (проанализируйте совместно соответствующие кривые на рис. 4 и 9). Этот факт был положен в основу итеративной процедуры поиска $\text{brr}_{\text{ОПТ}}$.

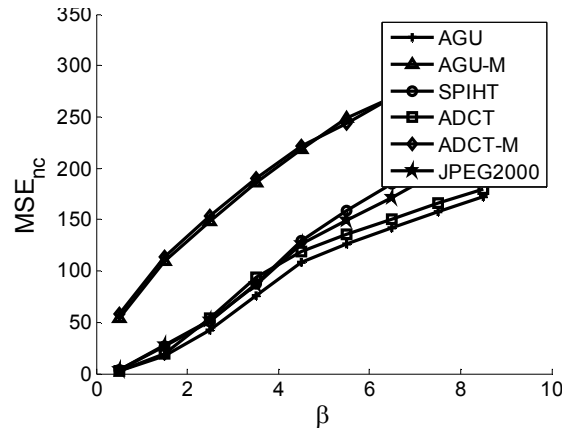


Рис. 9. Зависимости MSE_{nc} от β для тестового изображения Барбара при дисперсии аддитивных помех, равной 100, сжатого разными методами

Суть процедуры состоит в следующем. Задается некоторое стартовое значение brr_0 и выполняется сжатие изображения, его декомпрессия и расчет MSE_{nc} . Если MSE_{nc} оказывается больше дисперсии помех, то brr увеличивают, чтобы уменьшить MSE_{nc} , и наоборот. Количество необходимых итераций зависит от многих факторов: отличия brr_0 и $\text{brr}_{\text{ОПТ}}$, шага Δbrr , с которым изменяют brr , установленной точности обеспечения $\text{brr}_{\text{ОПТ}}$. Даже при грамотной установке этих параметров (например, brr_0 порядка 1, Δbrr порядка 0,2, точность обеспечения порядка 0,05), необходимое число итераций, как можно определить из данных в табл. 1, может достигать шести и более.

Нами предлагается следующая методика сжатия. Предположим, что характеристики помех в исходном изображении известны (или предварительно оценены с высокой точностью), после чего, при необходимости, выполнено соответствующее вариационно-стабилизирующее преобразование и определена дисперсия помех σ^2 в изображении, полученном после ВСП. Далее определяют входной параметр для прогнозирования КС. Если с этой целью используют упомянутый ранее параметр $P_{1\sigma}$, то его рассчитывают как среднее для локальных оценок этой вероятности, полученных в блоках размером 8x8 пикселей. Напомним, что $P_{1\sigma}$ – вероятность того, что амплитуды ДКП-коэффициентов (ДКП-коэффициент с индексами 0,0 при расчетах не учитывается) не превосходят σ . Также напомним, что обычно достаточно использовать 500 неперекрывающихся блоков, которые могут быть выбраны на изображении случайным или каким-либо регулярным способом.

Далее полученное значение $P_{1\sigma}$ подставляют в полученную заранее аппроксимацию для расчета КС (или bpp). Если прогнозируется КС, то рассчитывается оценка $\text{bpp}_{\text{OPT}}=8/\text{КС}$, которая и задается как входной параметр для сжатия используемым вейвлетным кодером (SPIHT или JPEG2000).

Проанализируем, насколько хорошо работает эта методика, и уточним некоторые детали. Для этого возьмем несколько тестовых изображений и исследуем результаты для нескольких значений дисперсии помех (достаточно больших для того, чтобы согласно метрике PSNR_{tc} ОПТ наблюдалось). Полученные результаты приведены в качестве графиков на рис. 10, 11 и 12. Прежде всего, рассмотрим зависимости на рис. 10 для тестовых изображений с простой и сложной структурой – соответственно F-16 и Stream_bridge. Во-первых, хорошо видно, что зависимости для одного и того же изображения похожи друг на друга, но если для изображения F-16 для обоих кодеров имеют место ОПТ (причем для примерно одинаковых значений bpp), то для изображения Stream_bridge ОПТ не наблюдается. Вертикальными линиями отмечены значения bpp, достигнутые при задании ШК, равным $3,5\sigma$, 4σ и $4,5\sigma$. Для тестового изображения F-16 наилучшим вариантом является выбор ШК= $4,5\sigma$. Для второго тестового изображения такой выбор приводит к некоторому ухудшению качества сжатого изображения.

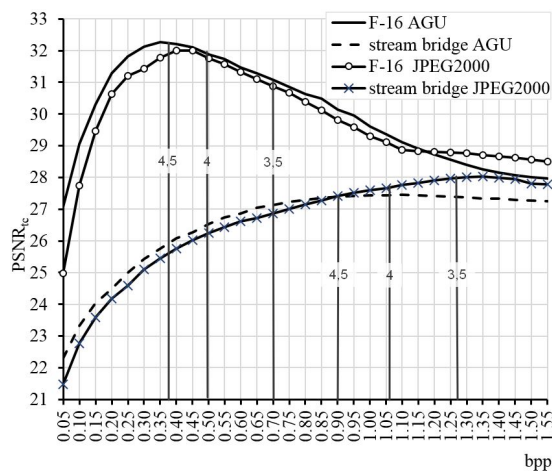


Рис. 10. Зависимости PSNR_{tc} от bpp для двух тестовых изображений при дисперсии аддитивных помех, равной 100, сжатых кодером JPEG2000 и AGU

Учитывая тот факт, что нас, в первую очередь, интересует сжатие в окрестности ОПТ для тех ситуаций, когда ОПТ имеет место, дальнейшие исследования проведем в предположении, что ШК= $4,5\sigma$. Полученные при этом результаты для шести тестовых изображений приведены на рис. 12 и 13. Хорошо видно, что удастся практически всегда попасть в окрестность ОПТ для кодера JPEG2000. При этом,

используя методику получения аппроксимационной кривой, аналогичную получению кривой на рис. 2, но для случая ШК= $4,5\sigma$, было получено следующее выражение для прогнозирования КС:

$$\text{КС} = 1,449 \exp(3,662x) + 2 \times 10^{-5} \exp(22,4x).$$

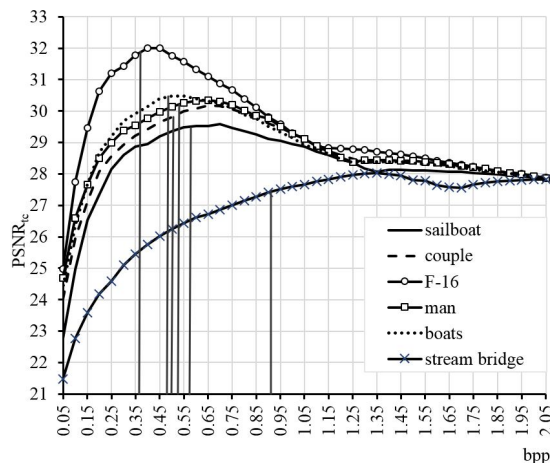


Рис. 11. Зависимости PSNR_{tc} от bpp для тестовых изображений при дисперсии аддитивных помех, равной 100, сжатого кодером JPEG2000

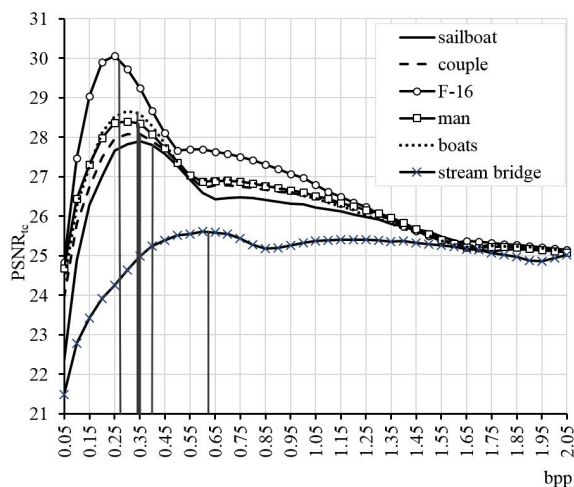


Рис. 12 Зависимости PSNR_{tc} от bpp для тестовых изображений при дисперсии аддитивных помех, равной 200, сжатого кодером JPEG2000

Выводы

Показано, что основные характеристики сжатия с потерями изображений, искаженных помехами, весьма близки для вейвлетных кодеров SPIHT или JPEG2000 и кодера AGU на основе ДКП. Учитывая этот факт, а также простоту обеспечения сжатия в окрестности ОПТ для кодера AGU и прогнозирования для него коэффициента сжатия, предложена быстрая и простая процедура прогнозирования bpp для вейвлетных кодеров SPIHT или JPEG2000, что позволяет выполнить сжатие изображений этими

кодерами в окрестности ОПТ за одну без итераций, устанавливая спрогнозированное bpp.

Литература

1. Yu, G. *Image Compression Systems on Board Satellites* [Text] / G. Yu, T. Vladimirova, M. N. Sweeting // *Acta Astronautica*. – 2009. – Т. 64, № 9–10. – P. 988–1005.

2. Schowengerdt, R. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* [Text] / R. Schowengerdt. – Academic Press, 2006. – 560 p.

3. Christophe, E. *Hyperspectral Data Compression Tradeoff* [Text] / E. Christophe // *Optical Remote Sensing in Advances, Signal Processing and Exploitation Techniques* (Springer); eds. S. Prasad, L. M. Bruce, J. Chanussot. – 2011. – P. 9–29.

4. Blanes, I. *A tutorial on Image Compression on Optical Space Imaging Systems* [Text] / I. Blanes, E. Magli, J. Serra-Sagrisat // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. – 2014. – Т. 2, № 3. – P. 8–26.

5. Noise identification and estimation of its statistical parameters by using unsupervised variational classification [Text] / B. Vozel, K. Chehdi, L. Klaine, V. V. Lukin, S. K. Abramov // *Proceedings of ICASSP*. – Toulouse, France, 2006. – Т. 2. – P. 841–844.

6. *Image Informative Maps for Component-wise Estimating Parameters of Signal-Dependent Noise* [Text] / M. L. Uss, B. Vozel, V. Lukin, K. Chehdi // *Journal of Electronic Imaging*. – 2013. – Т. 22, № 1. – doi:10.1117/1.JEI.22.1.013019.

7. Scatter-plot Based Estimation of Mixed Noise Parameters for Remote Sensing Image Processing [Text] / V. V. Abramova, S. K. Abramov, V. V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *Proceedings of the 5-th World Congress «Aviation in the XXI-st Century»*. – Kiev, Ukraine, 2012. – Т. 2. – P. 3.7.56–3.7.60.

8. Progressive 3D coding of hyperspectral images based on JPEG 2000 [Text] / B. Penna, T. Tillo, E. Magli, G. Olmo // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2006. – Т. 3, № 1. – P. 125–129.

9. Dragotti, P. *Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm* [Text] / P. Dragotti, G. Poggi, A. Ragozini // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2000. – Т. 38, № 1. – P. 416–428.

10. *Analysis of classification accuracy for pre-filtered multichannel remote sensing data* [Text] / V. Lukin, S. Abramov, S. Krivenko, A. Kurkin, O. Pogrebnyak // *Expert Systems with Applications*. – 2013. – Т. 40. – P. 6400–6411.

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 // *SPIE Journal on Advances in Remote Sensing*. – 2011. – Т. 5, № 1. – 27 p. – doi: 10.1117/1.3539768.

12. Aiazzi, B. *Near lossless compression of 3-D optical data* [Text] / B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti //

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2001. – Т. 39, № 11. – P. 2547–2557.

13. *Lossy compression of images with additive noise* [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Zriakhov, K. Egiazarian // *Proc. of International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*. – Antwerpen, Belgium, 2005. – P. 381–386.

14. Автоматическое сжатие изображений в окрестности оптимальной рабочей точки с учетом визуальной модели восприятия человека при сигнално-зависимых помехах [Текст] / А. Н. Земляченко, Р. А. Кожемякин, С. К. Абрамов, В. В. Лукин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 6/93. – С. 99–108.

15. *DCT Based High Quality Image Compression* [Text] / N. N. Ponomarenko, V. V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *Proc. of 14th Scandinavian Conference on Image Analysis, June 2005*. – Finland, 2005. – P. 1177–1185.

16. *Compression Ratio Prediction in Lossy Compression of Noisy Images* [Text] / A. N. Zemliachenko, S. Abramov, V. V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *Proc. of IGARSS*. – Milan, Italy, 2015. – P. 3497–3500.

17. *Lossy compression of noisy remote sensing images with prediction of optimal operation point existence and parameters* [Text] / A. Zemliachenko, S. Abramov, V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *SPIE Journal on Applied Remote Sensing*. – 2015. – Т. 9, № 1. – P. 095066-1–095066-26.

18. ADCT: A new high quality DCT based coder for lossy image compression [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *Proceedings of LNLA, August 2008*. – Switzerland, 2008. – 6 p.

19. *Prediction of Compression Ratio in Lossy Compression of Noisy Images* [Text] / A. Zemliachenko, R. Kozhemiakin, B. Vozel, V. Lukin // *Proceedings of TCSET 2016, February 2016*. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2016. – P. 693–697.

20. *New full-reference quality metrics based on HVS* [Text] / K. Egiazarian, J. Astola, N. Ponomarenko, V. Lukin, F. Battisti, M. Carli // *Proceedings of the Second International Workshop on Video Processing and Quality Metrics*. – Scottsdale, USA, 2006. – 4 p.

21. *On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions* [Text] / N. N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. T. Astola, V. V. Lukin // *Proceedings of VPQM*. – USA, 2007. – 4 p.

22. Wang, Z. *Multi-scale structural similarity for image quality assessment* [Text] / Z. Wang, E. P. Simoncelli, A. C. Bovik // *Proceedings of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, November 2003*. – P. 1398–1402.

23. Mitsa, T. *Evaluation of contrast sensitivity functions for the formulation of quality measures incorporated in half-toning algorithms* [Text] / T. Mitsa, K. L. Varkur // *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, April 1993*. – P. 301–304.

References

1. Yu, G., Vladimirova, T., Sweeting, M. N. Image Compression Systems on Board Satellites. *Acta Astronautica*, 2009, vol. 64, no. 9–10, pp. 988–1005.
2. Schowengerdt, R. *Remote Sensing : Models and Methods for Image Processing*. Academic Press Publ., 2006. 560 p.
3. Christophe, E., eds. Prasad, S. Bruce, L. M., Chanussot, J. Hyperspectral Data Compression Trade-off. *Optical Remote Sensing in Advances, Signal Processing and Exploitation Techniques (Springer)*, 2011, pp. 9–29.
4. Blanes, I., Magli, E., Serra-Sagrisat, J. A tutorial on Image Compression on Optical Space Imaging Systems. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 8–26.
5. Vozel, B., Chehdi, K., Klaine, L., Lukin, V. V., Abramov, S. K. Noise identification and estimation of its statistical parameters by using unsupervised variational classification. *Proceedings of ICASSP*, Toulouse, France, 2006, vol. 2, pp. 841–844.
6. Uss, M. L., Vozel, B., Lukin, V., Chehdi, K. Image Informative Maps for Component-wise Estimating Parameters of Signal-Dependent Noise. *Journal of Electronic Imaging*, 2013, vol. 22, no. 1. doi: 10.1117/1.JEI.22.1.013019.
7. Abramova, V. V., Abramov, S. K., Lukin, V. V., Vozel, B., Chehdi, K. Scatter-plot Based Estimation of Mixed Noise Parameters for Remote Sensing Image Processing. *Proceedings of the 5-th World Congress «Aviation in the XXI-st Century»*, Kiev, Ukraine, 2012, vol. 2, pp. 3.7.56–3.7.60.
8. Penna, B., Tillo, T., Magli, E., Olmo, G. Progressive 3D coding of hyperspectral images based on JPEG 2000. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, vol. 3, no. 1, pp. 125–129.
9. Dragotti, P., Poggi, G., Ragozini, A. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, vol. 38, no. 1, pp. 416–428.
10. Lukin, V., Abramov, S., Krivenko, S., Kurkin, A., Pogrebnyak, O. Analysis of classification accuracy for pre-filtered multichannel remote sensing data. *Expert Systems with Applications*, 2013, vol. 40, pp. 6400–6411.
11. Lukin, V., Abramov, S., Ponomarenko, N., Uss, M., Zriakhov, M., Vozel, B., Chehdi, K., Astola, J. Methods and automatic procedures for processing images based on blind evaluation of noise type and characteristics. *SPIE Journal on Advances in Remote Sensing*, 2011, vol. 5, no. 1, 27 p. doi: 10.1117/1.3539768.
12. Aiazzi, B., Alparone, L., Baronti, S. Near lossless compression of 3-D optical data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, vol. 39, no 11, pp. 2547–2557.
13. Ponomarenko, N., Lukin, V., Zriakhov, M., Egiazarian, K. Lossy compression of images with additive noise. *Proc. of International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, Antwerpen, Belgium, 2005, pp. 381–386.
14. Zemljachenko, A. N., Kozhemjakin, R. A., Abramov, S. K., Lukin, V. V. Automatic image compression in the neighborhood of optimal operation point based on model of human vision system for signal-dependent noise. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija – Aerospace Technic And Technology*, 2012, no. 6/93, pp. 99–108. (In Russian).
15. Ponomarenko, N. N., Lukin, V. V., Egiazarian, K., Astola, J. DCT Based High Quality Image Compression. *Proc. of 14th Scandinavian Conference on Image Analysis*, June 2005, Finland, 2005, pp. 1177–1185.
16. Zemliachenko, A. N., Abramov, S., Lukin, V. V., Vozel, B., Chehdi, K. Compression Ratio Prediction in Lossy Compression of Noisy Images. *Proc. of IGARSS*, Milan, Italy, 2015, pp. 3497–3500.
17. Zemliachenko, A., Abramov, S., Lukin, V., Vozel, B., Chehdi, K. Lossy compression of noisy remote sensing images with prediction of optimal operation point existence and parameters. *SPIE Journal on Applied Remote Sensing*, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 095066-1–095066-26.
18. Ponomarenko, N., Lukin, V., Egiazarian, K., Astola, J. ADCT : A new high quality DCT based coder for lossy image compression. *Proceedings of LNLA*, August 2008, Switzerland, 2008. 6 p.
19. Zemliachenko, A., Kozhemiakin, R., Vozel, B., Lukin, V. Prediction of Compression Ratio in Lossy Compression of Noisy Images. *Proceedings of TCSET 2016*, February 2016, Lviv-Slavske, Ukraine, 2016, pp. 693–697.
20. Egiazarian, K., Astola, J., Ponomarenko, N., Lukin, V., Battisti, F., Carli, M. New full-reference quality metrics based on HVS. *Proceedings of the Second International Workshop on Video Processing and Quality Metrics*, Scottsdale, USA, 2006, 4 p.
21. Ponomarenko, N. N., Silvestri, F., Egiazarian, K., Carli, M., Astola, J. T., Lukin, V. V. On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions. *Proceedings of VPQM*, USA, 2007, 4 p.
22. Wang, Z., Simoncelli, E. P., Bovik, A. C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment. *Proceedings of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, November 2003, pp. 1398–1402.
23. Mitsa, T., Varkur, K. L. Evaluation of contrast sensitivity functions for the formulation of quality measures incorporated in halftoning algorithms. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, April 1993, pp. 301–304.

**АВТОМАТИЧНЕ СТИСНЕННЯ В ОКОЛІ ОПТИМАЛЬНОЇ РОБОЧОЇ ТОЧКИ ЗОБРАЖЕНЬ
З ШУМОМ КОДЕРАМИ ТИПУ SPIHT І JPEG2000**

С. К. Абрамов, М. В. Бурцев, С. С. Кривенко, О. М. Земляченко, В. В. Лукін

Для методів стиснення зображень на основі вейвлетних перетворень (SPIHT, JPEG2000) розроблено неітеративну процедуру стиснення зображень, на яких присутні некорельовані перешкоди, в околі оптимальної робочої точки. Для досягнення такого стиснення передбачається, що дисперсія або інші характеристики перешкод апріорно відомі або автоматично оцінені з необхідною точністю. Далі враховуються ті факти, що для кодера на основі дискретного косинусного перетворення AGU стиснення в околі ОПТ може бути реалізовано без ітерацій шляхом встановлення кроку квантування з урахуванням властивостей перешкод і основні характеристики стиснення для AGU близькі до характеристик стиснення для SPIHT і JPEG2000. Крім того, використовується запропонована раніше процедура прогнозування коефіцієнта стиснення для AGU в околі ОПТ.

Ключові слова: стиснення з втратами, оптимальна робоча точка, перешкоди.

**AUTOMATICAL NOISE IMAGE COMPRESSION IN THE NEIGHBORHOOD
OF OPTIMAL OPERATING POINT BY SPIHT AND JPEG2000 CODERS**

S. K. Abramov, N. V. Burcev, S. S. Krivenko, A. N. Zemliachenko, V. V. Lukin

Non-Iterative procedure of uncorrelated noise image compression is developed for image compression methods on a basis of Wavelet transform (SPIHT, JPEG2000) in the neighborhood of optimal operating point. For achievement of such compression it is supposed that variance or other noise characteristics are a priori known or automatically estimated with the required accuracy. Further those facts are considered that for the coder on the basis of discrete cosine transform the AGU compression in the neighborhood of OOP can be realized without iterations by setting a quality step taking into account noise properties and the main characteristics of compression for AGU are close to characteristics of compression for SPIHT and JPEG2000. Besides, it is used the previously proposed procedure of compression ratio prediction for AGU in the neighborhood of OOP.

Key words: lossy compression, optimal operating point, noise.

Абрамов Сергей Клавдиевич – канд. техн. наук, доцент, докторант каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: ask379@mail.ru.

Бурцев Никита Викторович – студент каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

Кривенко Сергей Станиславович – канд. техн. наук, с.н.с. каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: krivenko.sergiy@gmail.com.

Земляченко Александр Николаевич – канд. техн. наук, ассистент каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: hagriel@ukr.net.

Лукін Владимир Васильевич – д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: lukin@ai.kharkov.com.

Abramov Sergej Klavdievich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor, Post doctorate student of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Reception, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: ask379@mail.ru.

Burcev Nikita Viktorovich – student of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Reception, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine.

Krivenko Sergej Stanislavovich – Candidate of Technical Science, Senior researcher of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Reception, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: krivenko.sergiy@gmail.com.

Zemljachenko Aleksandr Nikolaevich Candidate of Technical Science, Assistant of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Reception, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: hagriel@ukr.net.

Lukin Vladimir Vasil'evich – Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Reception, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: lukin@ai.kharkov.com.