

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПРОЦЕДУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ СИГНАЛЬНО-ЗАВИСИМЫХ ПОМЕХАХ В ОКРЕСТНОСТИ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

© 2013 г. А. Н. Земляченко^{1*}, Р. А. Кожемякин¹, С. К. Абрамов¹, В. В. Лукин¹, М. К. Чобану²

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”,
Харьков, Украина

²Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва

*E-mail: cmk2@orc.ru

Поступила в редакцию 25.06.2012 г.

Рассмотрены подходы к сжатию с потерями одноканальных изображений дистанционного зондирования (ДЗ) Земли, которые искажены сигнально-зависимыми помехами. Анализ проведен для кодеров на основе дискретного косинусного преобразования и вейвлет-преобразования. Сравнение эффективности сжатия выполнено в соответствии с несколькими критериями как при прямом применении кодеров к изображениям, так и при использовании вариационно-стабилизирующего преобразования. Показано, что различия в эффективности незначительны, но применение вариационно-стабилизирующих преобразований обеспечивает определенные преимущества для применения трехмерных кодеров для сжатия многоканальных данных ДЗ. Предложены процедуры автоматического сжатия в окрестности оптимальной рабочей точки. Проанализированы их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: сжатие изображений ДЗ с потерями, сигнально-зависимый шум

DOI: 10.7868/S0205961413020140

ВВЕДЕНИЕ

Современные средства дистанционного зондирования (ДЗ) широко используются для различных приложений (Шовенгердт, 2010). Формируемые ими изображения характеризуются все лучшим пространственным разрешением, увеличивается количество каналов (спектральных зон) как для систем оптического и ИК-диапазонов, так и радиолокационных (РЛ) средств (вследствие применения многочастотных и поляризационных систем). В результате резко возрастает объем данных, которые необходимо в первую очередь передать в наземные центры обработки и хранения (космической) информации, а затем и предоставить (в удобном виде) потребителям. В связи с этим часто приходится применять сжатие данных ДЗ (Бабкин и др., 2004; Бехтин, 2007; Каага, 2007).

В зависимости от приоритета требований технических характеристик канала связи и организации передачи данных с борта носителя системы ДЗ, возможны различные стратегии сжатия. Некоторые ученые и разработчики настаивают на том, что необходимо использовать только сжатие

без потерь (Бабкин и др., 2004; Бехтин, 2007; Penpa et al., 2007) или, в крайнем случае, с ограниченными потерями. В этом случае наилучшие современные методы сжатия, учитывающие как пространственную, так и спектральную избыточность многоканальных данных, обеспечивают коэффициент сжатия (КС) порядка 4 (при сжатии с ограниченными потерями немного больше), что часто недостаточно для практических приложений. Вторая стратегия – сжатие в заданное число раз, определяемое исходным объемом данных, пропускной способностью канала и временем передачи данных. В рамках этой стратегии желательно использовать методы сжатия, обеспечивающие при заданном КС наименьший уровень вносимых потерь (искажений). Наконец, третья стратегия – автоматически обеспечить на борту носителя заданный в соответствии с каким-либо критерием уровень вносимых потерь при максимальном возможном КС (Lukin, 2009). При этом важное значение имеют также простота и быстродействие аппаратно-алгоритмической реализации используемого метода сжатия. Методы, рассмат-

риваемые в данной статье, относятся именно к этой стратегии сжатия.

Для многих практических приложений сжатия многомерных сигналов (одноканальных и многоканальных изображений, видео) обработка осуществляется в предположении, что помехи отсутствуют (Чобану, 2009) или, по крайней мере, присутствие помех при анализе игнорируется. Однако на практике помехи с большим или меньшим уровнем присутствуют на любых изображениях, хотя на некоторых типах изображений шум может быть визуально незаметен (Лукин и др., 2010; Liu et al., 2006). В частности, для гиперспектральных данных ДЗ с аэрокосмических носителей помехи хорошо заметны для изображений в каналах с малым отношением сигнал/шум (ОСШ) и практически не видны для изображений в других каналах (Кривенко и др., 2009; Ponomarenko et al., 2006). При этом присутствие помех при использовании сжатия без потерь резко снижает достигаемые значения КС (Во, 2011). Если помехи являются интенсивными, как, например, для одно-взглядовых РСА-изображений, то достигаемый даже для наилучших кодеров (архиваторов) КС оказывается лишь немного большим единицы (Ponomarenko et al., 2011). Поэтому тип и характеристики помех желательно учитывать при выборе известного метода сжатия и установке его параметров, а также при разработке новых методов сжатия.

Присутствие помех вынуждает использовать специальные подходы к их учету при сжатии изображений (Бехтин, 2007; Ponomarenko et al., 2011; Al-Chaykh, Mersereau, 1998; Shahnaz et al., 1999; Chang et al., 2000). Целесообразным, оказывается, использовать сжатие с потерями при условии, что тип и характеристики помех надлежащим образом учтены. Во-первых, сжатие с потерями позволяет обеспечить гораздо более высокие значения КС (Lukin, 2009; Christophe et al., 2008). Во-вторых, сжатие с потерями изображений ДЗ, искаженных помехами, может при определенных условиях приводить к повышению вероятности их правильной классификации (Blanes et al., 2009; Lukin et al., 2006a). В-третьих, положительным моментом является эффект фильтрации, который может быть весьма существенным при устанавливаемых параметрах алгоритмов сжатия с потерями. Этот эффект был впервые отмечен в работах (Al-Chaykh, Mersereau, 1998; Shahnaz et al., 1999; Chang et al., 2000). Характерно, что эффект фильтрации наблюдается для методов сжатия, основанных на использовании различных ортогональных преобразований, включая дискретное косинусное преобразование (ДКП) и дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) (Бехтин, 2007; Al-Chaykh, Mersereau, 1998; Shahnaz et al., 1999; Chang et al., 2000; Lim, 2006; Ponomarenko et al., 2005, 2006).

Важной задачей является выбор параметров кодера таким образом, чтобы сжатие осуществлялось в окрестности так называемой оптимальной рабочей точки (ОРТ) (Al-Chaykh, Mersereau, 1998; Lim, 2006; Ponomarenko et al., 2005, 2006, 2010a; Lukin et al., 2006b), и чтобы декодированное изображение было “максимально похожим” на истинное – в соответствии с выбранным критерием. ОРТ наблюдается (хотя и не всегда) для разных типов помех (Chang et al., 2000; Lim, 2006; Lukin et al., 2006b, 2008) и различных методов сжатия. ОРТ может иметь место как для традиционных критериев – среднеквадратической ошибки (СКО) или отношения пикового сигнала к шуму (ПОСШ, PSNR) (Бехтин, 2007; Lukin, 2009; Chang et al., 2000; Lim, 2006; Ponomarenko et al., 2005a, 2006, 2010a; Lukin et al., 2006b, 2008), так и для метрик, учитывающих визуальное качество (Ponomarenko et al., 2010a), например PSNR-HVS-M (Ponomarenko et al., 2007) и MSSIM (Wang et al., 2003). Более того, ОРТ может наблюдаться и в соответствии с критерием вероятности правильной классификации данных многоканального ДЗ (Lukin, 2009; Blanes et al., 2009).

С практической точки зрения факт существования ОРТ очень важен. Но не менее важно и то, как обеспечить сжатие с потерями в окрестности ОРТ, причем в автоматическом режиме (на борту носителя системы ДЗ). Эта задача успешно решена для случая аддитивных помех (Ponomarenko et al., 2005a, 2006, 2010) в предположении, что дисперсия помех для каждого сжимаемого изображения априорно известна или оценена с необходимой точностью (Vozel et al., 2009). Если сначала предложенные автоматические процедуры сжатия в окрестности были итеративными (Ponomarenko et al., 2005a), то позднее для кодеров на основе ДКП удалось разработать метод определения шага квантования (ШК) и последующего сжатия без итераций (Ponomarenko et al., 2006, 2010a), в том числе и для гиперспектральных изображений с использованием трехмерных кодеров (Lukin et al., 2010a; Ponomarenko et al., 2010b).

Если изображения искажены сигнально-зависимыми помехами простых видов – мультипликативным или пуассоновским шумом, – то ситуация является немного более сложной (Lukin et al., 2006b, 2008). Положительным моментом является тот факт, что к изображениям, искаженным этими типами помех, можно применить вариационно-стабилизирующие (гомоморфные) преобразования (ВСП), позволяющие после соответствующего прямого преобразования получить изображения, искаженные аддитивными помехами (Lukin et al., 2006b, 2008; Зряхов и др., 2011; Anscombe, 1948). Тогда сжатие с автоматическим обеспечением компрессии в окрестности ОРТ

можно выполнять с использованием многоэтапной процедуры обработки, включающей применение прямого ВСП и последующее сжатие на этапе кодирования, декомпрессию и обратное преобразование при декодировании.

Достижимые при сжатии в окрестности ОРТ значения КС зависят от многих факторов: степени сложности изображения (насыщенности деталями, текстурности), уровня помех, используемого критерия качества, применяемого метода сжатия. Для случая сжатия одноканальных изображений (или поканального, раздельного сжатия) многоканальных изображений КС меняется в пределах от трех для сложных изображений с низким уровнем помех до 30–40 для простых изображений с высоким уровнем помех. Если для сжатия многоканальных изображений используются трехмерные кодеры, позволяющие учесть спектральную избыточность (коррелированность компонентных изображений в соседних каналах), то достигаемые КС в 2–4 раза выше (Lukin et al., 2010a; Ponomarenko et al., 2010b). При этом предполагается, что для группируемых каналов помехи аддитивные с практически одинаковой дисперсией, что не выполняется при сигнально-зависимых помехах.

В связи с этим проблемой остается автоматическое обеспечение сжатия в окрестности ОРТ при сложных видах сигнально-зависимых помех (Зряхов и др., 2011). Ее актуальность на практике обусловлена тем, что для изображений, формируемых сенсорами нового поколения, характерна явная сигнальная зависимость помех, т.е. зависимость дисперсии помех от локального среднего (или истинного значения) для изображения (Foi, 2007; Murtagh, 2001; Kerekes, 2003; Uss et al., 2010; Barducci et al., 2005). В частности, не ясно, можно ли обойтись без выполнения ВСП. Кроме того, не изучены особенности сжатия при использовании сложных ВСП типа обобщенного преобразования Энскомба (Murtagh, 2001).

Поэтому цель данной статьи состоит в исследовании характеристик сжатия с потерями изображений, искаженных помехами со сложной сигнально-зависимой структурой, а также в разработке процедур и алгоритмов обеспечения сжатия в окрестности ОРТ. Для простоты рассматривается случай сжатия одноканального изображения (или поканального сжатия многоканальных данных ДЗ) в предположении, что полученные результаты послужат в будущем основой разработки более эффективных трехмерных кодеров. Анализ проводится для нескольких современных методов сжатия с потерями на основе ДКП и ДВП.

МОДЕЛЬ ПОМЕХ И ТЕСТОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В системах формирования изображений на основе ПЗС-матриц, которые часто используются в средствах многоканального ДЗ, есть два основных источника шумов (Kerekes, 2003): фотонный шум, возникающий в результате дискретной природы света (формирование изображения осуществляется путем подсчета количества детектированных фотонов), который подчиняется пуассоновскому закону распределения, и тепловой шум (возникающий в результате нагрева аппаратуры), который можно считать аддитивным и подчиняющимся гауссову распределению. В результате помеха, искажающая изображение после операций калибровки, имеет сложную природу и описывается моделью одновременно присутствующих сигнально-зависимой (квази-пуассоновской) и аддитивной сигнально-независимой (гауссовой) компонент

$$I_{ij} = n_{ij}^{\text{пуас}}(I_{ij}^{\text{ист}}, k) + n_{ij}^{\text{алд}}(g, \sigma_a^2), \quad (1)$$

где I_{ij} – значение зашумленного изображения в ij -м пикселе; $n_{ij}^{\text{пуас}}$ – квази-пуассоновская компонента шума; $I_{ij}^{\text{ист}}$ – истинное значение незашумленного изображения; k – коэффициент коррекции динамического диапазона изображения; $n_{ij}^{\text{алд}}$ – аддитивная компонента шума с дисперсией σ_a^2 и математическим ожиданием g , которое положим равным нулю. Тогда дисперсия помех для ij -го пиксела равна $\sigma_{ij}^2 = kI_{ij}^{\text{ист}} + \sigma_a^2$. В зависимости от k , σ_a^2 и диапазона значений $I_{ij}^{\text{ист}}$ превалирующей может быть как сигнально-зависимая, так и аддитивная компонента. Шумы для компонент полагались независимыми и пространственно-некоррелированными.

Исследование проводилось с использованием тестовых изображений Airfield (рис. 1а), а также стандартных для оптики тестовых изображений Baboon, Barbara, Goldhill, Lenna, Peppers, различающихся степенью сложности (наиболее сложное – Baboon, наиболее простые – Lenna и Peppers). Все изображения имеют размер 512×512 пикселей. К сожалению, для систем ДЗ нет общепринятых тестовых изображений. Тем не менее результаты сжатия в большей степени зависят от общих характеристик изображений (процентного отношения числа пикселей, принадлежащих однородным участкам, текстурности), чем от их конкретного контента. Поэтому выводы, полученные ниже для указанных тестовых изображений, справедливы и для данных ДЗ.

На каждое из этих изображений накладывался искусственно сгенерированный шум согласно модели (1). Использовались следующие парамет-



Рис. 1. Исходное (а), зашумленное ($k = 1$ и $\sigma_a^2 = 20$) тестовое изображение Airfield (б).

ры модели: $k = 0.2; 0.4;$ и 1 а $\sigma_a^2 = 20$ оставалось неизменным. В случае $k = 0.4$ и 1 превалирующим является сигнально-зависимая помеха, а при $k = 0.2$ сигнально-зависимая и аддитивная компоненты примерно одинаковы по степени негативного воздействия на качество изображения. На рис. 1б представлено зашумленное изображение Airfield. Шум визуально заметен, особенно на однородных участках, причем это имеет место для всех трех комбинаций параметров модели.

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ СЖАТИИ С ПОТЕРЯМИ

Как отмечено выше, особенностью сжатия с потерями является наличие эффекта подавление помех при задании определенных управляющих параметров, позволяющих сжимать изображения в окрестности ОРТ. Этот эффект обусловлен тем, что вследствие квантования часть коэффициентов используемого ортогонального преобразования, которые имеют относительно малые исходные значения и в первую очередь обусловлены шумом, принимает нулевые значения, в результате чего помеха частично подавляется. Вместе с тем такая “фильтрация” при использовании сжатия с потерями является менее эффективной, чем обычная фильтрация с использованием того же самого ортогонального преобразования (Ponomarenko et al., 2005a).

Для контроля эффективности сжатия и подавления помех нами использовались как упомянутые ранее традиционные критерии качества СКОш и ПОСШ, так и метрики, учитывающие визуальное качество, PSNR-HVS-M (Ponomaren-

ko et al., 2007) и MSSIM (Wang et al., 2003). При наличии исходных истинного ($I_{ij}^{\text{ист}}$), искусственно зашумленного (I_{ij}) и декодированного после сжатия ($I_{ij}^{\text{дек}}$) изображений имеется возможность рассчитать количественные характеристики двумя способами. Первый из них – традиционный (Чобану, 2009) – предусматривает расчет СКО_{тр} в виде

$$\text{СКО}_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} - I_{ij}^{\text{дек}})^2 / IJ, \quad (2)$$

где I, J – количество пикселей в строках и столбцах изображений. Зависимость СКО_{тр} от КС при сжатии изображений, искаженных помехами, традиционная – такая же, как и при сжатии изображений без помех: увеличение КС приводит к увеличению СКО_{тр}.

Второй способ – сравнить декодированное зашумленное изображение $I_{ij}^{\text{дек}}$ и исходное незашумленное $I_{ij}^{\text{ист}}$. В этом случае СКО_ш^{эт} рассчитывается для эталонного $\{I_{ij}^{\text{ист}}\}$ и декодированного $\{I_{ij}^{\text{дек}}\}$ изображений как

$$\text{СКО}_{\text{ш}}^{\text{эт}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{\text{ист}} - I_{ij}^{\text{дек}})^2 / IJ, \quad (3)$$

отношение пикового сигнала к шуму при 8-битном представлении истинного изображения определяется как

$$\text{ПОСШ}^{\text{эт}} = 10 \lg(255^2 / \text{СКО}_{\text{ш}}^{\text{эт}}). \quad (4)$$

При определенных условиях зависимости $СКО_{ш}^{ЭТ}$ и $ПОСШ^{ЭТ}$ от $КС$ имеют соответственно минимум и максимум. Координаты минимума метрики $СКО_{ш}^{ЭТ}$ и максимума метрики $ПОСШ^{ЭТ}$ являются ОПТ. При этом ОПТ можно характеризовать коэффициентом сжатия $КС_{ОПТ}$, $bpp_{ОПТ}$ (bits per pixel – количеством бит на пиксель) и шагом квантования $ШК_{ОПТ}$, поскольку эти параметры жестко ($КС_{ОПТ} = 8/bpp_{ОПТ}$) или нелинейно взаимосвязаны (при увеличении шага квантования коэффициентов ортогонального преобразования возрастает $КС$).

Наряду с традиционными метриками (критериями) нами рассматривались и другие метрики, в частности, характеризующие визуальное качество изображений. Одной из лучших является метрика PSNR-HVS-M, которая учитывает особенности зрительной системы человека. В ее основе лежит дискретное косинусное преобразование. Значения метрики PSNR-HVS-M измеряются в децибелах, большие значения соответствуют лучшему визуальному качеству. При PSNR-HVS-M > 40 дБ внесенные искажения (отличия между изображениями) можно считать практически незаметными (Lukin et al., 2010б). Метрика MSSIM основана на вейвлет-преобразовании, диапазон изменения ее значений лежит в пределах от 0 (очень плохое качество) до 1 (отличное качество). Отличия между изображениями можно считать визуально незаметными, если значения этой метрики превышают 0.99 (Lukin et al., 2010б).

На первый взгляд, использование метрик визуального качества правомерно при сжатии цветных изображений или видео, но бесполезно при анализе качества сжатия данных ДЗ. Однако необходимо иметь в виду два аспекта. Во-первых, для многих приложений ДЗ по-прежнему используется интерпретация и анализ данных ДЗ опытными дешифровщиками, для которых визуальное качество имеет значение. Во-вторых, как показано в работе (Fevrale et al., 2010), вероятность правильной классификации данных многоканального ДЗ различными автоматическими классификаторами (на основе нейросетей или метода опорных векторов) сильно коррелирована с $ПОСШ^{ЭТ}$ для классов, представляющих собой в основном однородные объекты (поля, луга, водные поверхности большой площади), и с метриками визуального качества для классов, представляющих собой малоразмерные объекты и текстуры (дороги, урбанизированные участки). Последняя взаимосвязь не удивительна, так как метрики визуального качества ориентированы в первую очередь на описание уровня искажений для окрестностей границ и мелких деталей.

ПРОЦЕДУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НА ОСНОВЕ ДКП

В данной работе исследования проводились с использованием кодеров AGU (Ponomarenko et al., 2005б) и ADCT (Ponomarenko et al., 2008), принцип работы которых основан на ДКП. Кодер ADCT использует адаптивное разбиение изображения на блоки различного размера и контекстное кодирование. Кодер AGU использует несколько иную схему обработки коэффициентов ДКП и работает с блоками изображения фиксированного размера 32×32 пиксела. Как и для ADCT, используется контекстное кодирование квантованных ДКП-коэффициентов, а также деблокинг после декомпрессии.

Для этих кодеров управляющим параметром является ШК. Оптимальный ШК, при котором наблюдается максимальный эффект подавления помех в соответствии с критериями $СКО_{ш}^{ЭТ}$ или MSSIM, можно определить, сжимая тестовые изображения и варьируя значения параметра, управляющего сжатием, в широком диапазоне (например, значения ШК нами варьировались от 1 до 100) (рис. 2 и 3).

Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 2, в большинстве случаев для используемых метрик увеличение ШК сначала приводит к росту $СКО_{ш}^{ЭТ}$ (уменьшению MSSIM), но при дальнейшем возрастании ШК имеет место уменьшение и минимум $СКО_{ш}^{ЭТ}$ (увеличение и максимум MSSIM), соответствующие ОПТ. При этом значения $СКО_{ш}^{ЭТ}$ в ОПТ могут быть примерно в 2 раза меньше, чем $СКО_{ш}^{ЭТ}$ при ШК = 1. Анализируя зависимости, приведенные на рис. 2, можно также прийти к выводу, что при рассматриваемых параметрах шума ОПТ в соответствии с метриками $СКО_{ш}^{ЭТ}$ и MSSIM наблюдается для значения ШК порядка 40. При этом для изображений с малым количеством текстурных участков (Lenna, Peppers) значения $СКО_{ш}^{ЭТ}$ значительно ниже (а MSSIM заметно выше), чем для высокотекстурных (Airfield, Baboon). Соответственно для таких изображений наблюдается более высокий эффект фильтрации. Иными словами, ОПТ более “ярко выражена” для простых изображений (Peppers, Lenna, Barbara). С увеличением количества текстурных объектов и границ на изображении ОПТ имеет менее выраженный характер (изображение Airfield) или может вообще отсутствовать (изображение Baboon).

На рис. 3 представлены зависимости значений метрик $СКО_{ш}^{ЭТ}$ и MSSIM от ШК для кодера ADCT. Видно, что для кодера ADCT сохраняются характерные для кодера AGU зависимости. Но для кодера ADCT ОПТ находится при значении ШК,

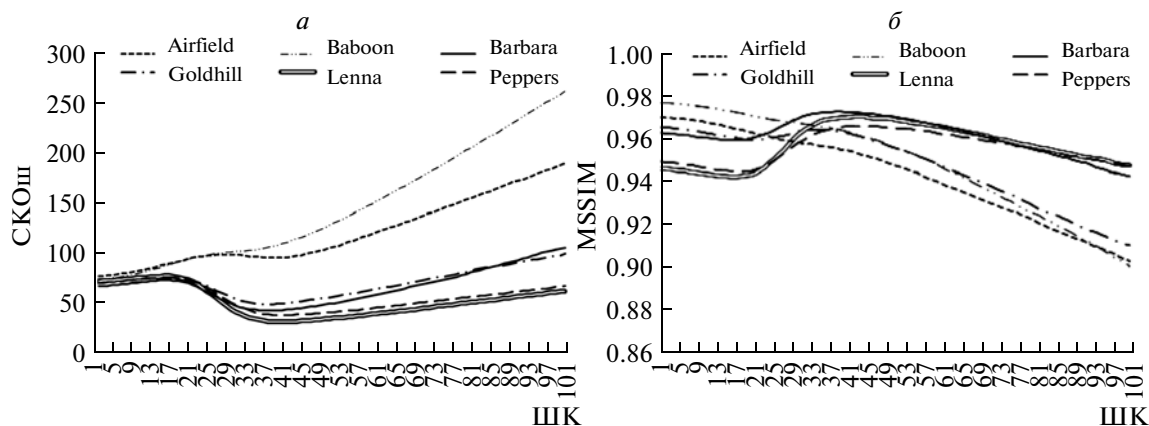


Рис. 2. Зависимости метрик (а) и MSSIM (б) от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером AGU при $\sigma_a^2 = 20$, $k = 0.4$.

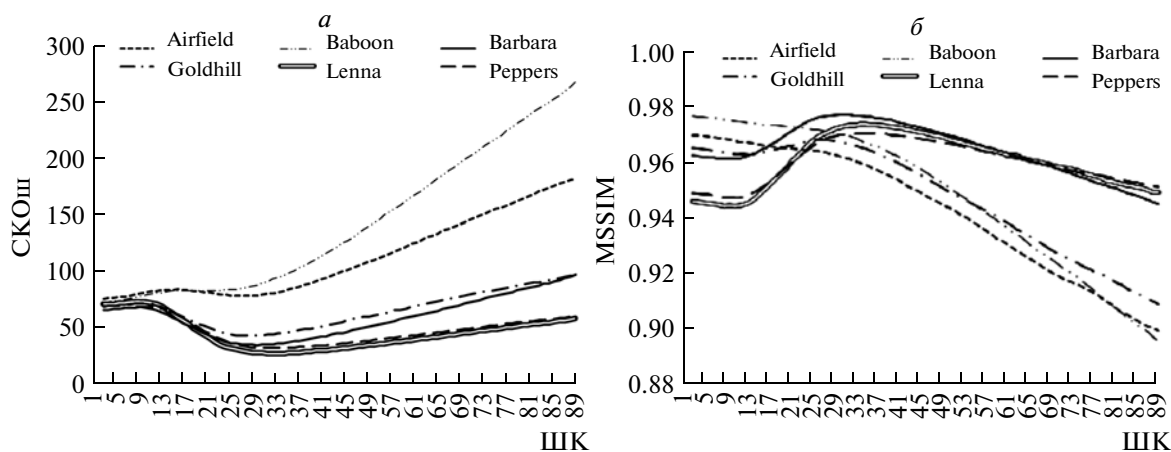


Рис. 3. Зависимости значений (а) и MSSIM (б) от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером ADCT, при $\sigma_a^2 = 20$, $k = 0.4$.

близком к 33, что несколько меньше, чем оптимальный ШК для AGU.

В табл. 1 представлены значения ШК для ОПТ ($ШК_{ОПТ}$) и полученные для ОПТ значения КС ($КС_{ОПТ}$) для кодера AGU. При $k = 1$, $\sigma_a^2 = 20$ значения $ШК_{ОПТ}$ лежат в пределах от 51 до 58, а при $k = 0.2$, $\sigma_a^2 = 20$ значения $ШК_{ОПТ}$ существенно меньше и лежат в пределах от 24 до 31. Поэтому можно предположить, что $ШК_{ОПТ}$ зависит как от свойств самого изображения (в меньшей степени), так и от свойств (уровня) помех. При чисто аддитивных помехах в ряде работ предложено устанавливать шаг квантования как $4.5\sigma_a$. При сигнално-зависимых помехах можно для тестовых изображений рассчитать эквивалентную дисперсию помех в виде

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} - I_{ij}^{ист})^2 / IJ = \\ &= \sigma_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{ист} k) / IJ. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассчитаем шаг квантования $ШК_B$ как 4.5σ и проверим, какие значения КС ($КС_B$) и метрик при этом получаются. Значения σ^2 , $ШК_B$ и $КС_B$ представлены в табл. 1. Как показывает анализ, вычисленные значения параметра $ШК_B$ и полученные значения $КС_B$ с небольшой погрешностью соответствуют оптимальным параметрам сжатия. С возрастанием уровня помех для простых изображений отмечается немного заниженное значение $ШК_B$ относительно $ШК_{ОПТ}$, но при этом все равно наблюдается попадание в окрест-

Таблица 1. Сжатие кодером AGU в области ОРТ при $k = 1, k = 0.2$ и $\sigma_a^2 = 20$

Изображение	$k = 1, \sigma_a^2 = 20$						$k = 0.2, \sigma_a^2 = 20$					
	I_{cp}	σ^2	КС _B	КС _{ОРТ}	ШК _B	ШК _{ОРТ}	I_{cp}	σ^2	КС _B	КС _{ОРТ}	ШК _B	ШК _{ОРТ}
Airfield	143	163	12.25	12.5	57.45	58	143	49	6.61	6.5	31.39	31
Baboon	129	149	9.27	8.1	54.93	51	130	46	5.71	4.58	30.50	24
Barbara	112	132	18.00	20.8	51.70	55	112	42	11.81	11.60	29.33	29
Goldhill	То же	То же	20.90	26.0	51.70	56	112	То же	11.54	11.29	29.31	То же
Lenna	124	144	31.11	35.0	54.00	57	124	45	18.01	19.15	30.13	31
Peppers	120	140	25.95	33.6	53.24	58	120	44	24.83	16.06	29.88	То же

ность ОРТ. Так как в предложенной процедуре ШК зависит от уровня помех, то соответственно с их увеличением КС тоже увеличивается.

Таким образом, имеется возможность автоматически сжимать изображения в окрестности ОРТ, если имеются достаточно точные оценки σ^2 . Оценить эту величину можно как

$$\hat{\sigma}^2 = \hat{\sigma}_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} \hat{k}) / IJ,$$

где $\hat{\sigma}_a^2$ и \hat{k} – оценки параметров сигнално-зависимых помех. Поэтому на практике возникает необходимость их определения непосредственно по обрабатываемому изображению и, желательно, в автоматическом режиме.

Для случая смеси пуассоновского и аддитивного шумов (т.е. модели (1)) существует метод (Абрамов, 2011; Лукин и др., 2012), позволяющий вычислять параметры шума автоматически. Он основан на вписывании регрессионной прямой по скаттерограмме пар локальных оценок дисперсии и среднего, вычисленных по детектированным однородным участкам изображения. Ордината точки пересечения вписанной прямой с осью Y определяет оценку дисперсии аддитивной компоненты σ_a^2 , а наклон прямой – коэффициент усиления пуассоновского шума k .

Существует еще один подход к методу сжатия изображений в окрестности ОРТ. Перед сжатием к изображению применяется гомоморфное преобразование на основе прямого обобщенного преобразования Энскомба (ОПЭ) (Murtagh et al., 2001), разработанное специально для случая наличия на изображении сложных помех

$$I_{ij}^{энс} = 2/k(kI_{ij} + 3/8k^2 + \sigma_a^2)^{1/2}. \quad (6)$$

Применение ОПЭ позволяет на основе имеющихся или полученных автоматически оценок параметров смешанного шума преобразовать смесь квазипуассоновского и аддитивного шума в чисто аддитивный с фиксированной дисперсией,

равной 1. Однако применение ОПЭ (6) к изображению приводит к уменьшению динамического диапазона его представления и к дополнительным ошибкам квантования, поскольку многие используемые кодеры разработаны таким образом, что сжимаемые изображения должны быть представлены как массив 8-битных целых чисел. Чтобы минимизировать ошибки, обусловленные квантованием при выполнении прямого и обратного ОПЭ, нами применялась операция приведения динамического диапазона изображения к 8-битному (0–255) виду

$$G_{ij}^p = \left[X(I_{ij}^{энс} - I_{мин}^{энс}) \right], \quad (7)$$

где $X = 255 / (I_{макс}^{энс} - I_{мин}^{энс})$; $I_{макс}^{энс}$, $I_{мин}^{энс}$ – максимальное и минимальное значения динамического диапазона изображения после ОПЭ; $[\cdot]$ – операция округления до ближайшего целого числа.

Как отмечалось ранее, после применения прямого ОПЭ (6) получаем $\sigma^2 \approx 1$. Поэтому после последующего растяжения динамического диапазона (7) имеем дисперсию помех $\sigma_{ОПЭ}^2 \approx X^2$. В соответствии с рекомендациями (Ропотаренко et al., 2006) для аддитивных помех значение ШК при последующем сжатии в окрестности ОРТ определяется как $4.5X$. После декодирования к изображению применялась операция, обратная (7),

$$G_{ij}^{ip} = \left[G_{ij}^p / X + I_{мин}^{энс} \right]. \quad (8)$$

Для возвращения динамического диапазона изображения в исходные пределы применялось обратное ОПЭ

$$I_{ij}^{энс.обр} = (G_{ij}^{ip} / 2)^2 k - 3/8k - \sigma_a^2 / k. \quad (9)$$

Анализ показал, что незначительные ошибки, возникающие в результате нелинейности преобразований и операций округления, не приводят к существенным искажениям.

При данном подходе также обеспечивается попадание ШК_B в окрестность ШК_{ОРТ} для разных значений интенсивности шума (табл. 2). Из анализа данных в табл. 2 также видно, что при рас-

Таблица 2. Сжатие кодером AGU в области ОПТ с применением ОПЭ

Изображение	$k = 1, \sigma_a^2 = 20$					$k = 0.2, \sigma_a^2 = 20$				
	X	КС _В	КС _{ОПТ}	ШК _В	ШК _{ОПТ}	X	КС _В	КС _{ОПТ}	ШК _В	ШК _{ОПТ}
Airfield	10.55	11.39	10.15	47.49	45	6.45	6.47	6.76	29.03	30
Baboon	То же	8.97	6.96	То же	40	6.85	5.66	5.61	30.81	То же
Barbara	11.01	18.48	17.70	49.54	49	6.86	11.81	11.00	30.88	29
Goldhill	10.84	20.07	20.00	48.79	48	6.71	11.13	10.42	30.20	То же
Lenna	10.65	28.78	30.12	47.93	52	7.13	17.28	18.55	32.11	33
Peppers	То же	24.83	32.65	47.49	54	6.67	13.25	15.40	30.03	31

смаатриваемом подходе при различных уровнях помех наблюдается приемлемая точность попадания в ОПТ. Сравнение описанных выше методов, проведенное с учетом визуального качества (согласно метрикам MSSIM и PSNR-HVS-M) и достигаемых КС, может быть выполнено на основе данных, приведенных в табл. 3, 4. Метод без использования ОПЭ обозначен БВС, соответственно с применением ОПЭ—ВС.

Исходя из анализа данных, полученных для кодера AGU (табл. 3), методы БВС и ВС обеспечивают сравнимые результаты в плане значений КС и метрик СКО_ш^{эт}, MSSIM, PSNR-HVS-M при малых интенсивностях шума. С увеличением интенсивности шума наблюдается небольшое преимущество метода ВС, согласно метрикам СКО_ш^{эт}, MSSIM и PSNR-HVS-M, при небольшом снижении достигаемого КС.

Исходя из зависимостей, приведенных на рис. 3, и предложенной выше методики выбора ШК_В для обеспечения автоматического сжатия кодером ADCT в области ОПТ, ШК_В рекомендуется устанавливать равным $3.5X$ для метода на основе ОПЭ и равным 3.5σ для метода без использования вариационно-стабилизирующего преобразования. Результаты приведены в табл. 4.

Из анализа приведенных в табл. 3 и 4 данных видно, что кодер ADCT обеспечивает лучшее визуальное качество сжатых изображений по сравнению с AGU при небольшом снижении КС.

При этом для сложных изображений обеспечивается более заметное улучшение визуального качества, согласно метрикам PSNR-HVS-M (улучшение до 1.5 дБ) и MSSIM (до 0.08), чем для простых изображений (увеличение PSNR-HVS-M до 1 дБ и MSSIM до 0.04). Значение СКО_ш^{эт}, полученные для кодера ADCT, меньше на 5–17% по сравнению с соответствующими значениями для кодера AGU. Такое улучшение достигается благодаря адаптивности кодера ADCT к контенту изображения за счет использования схемы разбиения.

Однако оптимизация схемы разбиения требует дополнительных затрат, поэтому быстрое действие кодера ADCT заметно ниже, чем для AGU. Таким образом, имеется возможность выбрать процедуру автоматического сжатия, которая в любом случае предусматривает оценивание характеристик помех вслепую, но может отличаться в используемом кодере и выражениями для установки его параметров. Вопрос о том, применять ли ОПЭ, будет обсужден позднее.

ПРОЦЕДУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НА ОСНОВЕ ДВП

Наряду с методами сжатия на основе ДКП, широко используются и методы сжатия изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования (Чобану, 2009; Chang et al., 2000). Одними из наиболее распространенных кодеров на основе ДВП являются JPEG2000 (Чобану, 2009; Taubman, Marcellin, 2002) и его альтернативная реализация SPIHT (Чобану, 2009; Said, 1996). Специфика многих методов сжатия на основе ДВП состоит в том, что параметром, управляющим степенью сжатия, является bpp (bits per pixel – количество бит в сжатом изображении на один пиксел исходного изображения). Задавая bpp, можно варьировать КС, который для обычного 8-битного представления данных равен 8bpp .

Прежде всего, покажем, что и для методов сжатия на основе ДВП могут иметь место ОПТ для разных критериев. На рис. 4 представлены зависимости значений метрик СКО_ш^{эт} и MSSIM от управляющего параметра для шести тестовых изображений, сжатых кодером JPEG2000 без использования ВСП. Рассмотрен случай сигнально-зависимых помех с $\sigma_a^2 = 20, k = 1$. Очевидно, что для большинства тестовых изображений зависимости СКО_ш^{эт} от bpp имеют минимумы (или, по крайней мере, большие плоские участки). Большинство зависимостей MSSIM от bpp имеют максимумы, причем ОПТ $\text{bpp}_{\text{ОПТ}}$ тем меньше, чем менее сложным является сжимаемое изображение —

Таблица 3. Сравнение эффективности методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера AGU

Изображение	Параметры шума	Метод	ШК _В	СКО _ш ^{ЭТ}	КС	MSSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	$k = 0.2$	БВС	31.39	71.57	6.61	0.967	32.01
		ВС	29.03	70.50	6.47	0.966	32.02
	$k = 0.4$	БВС	39.57	93.37	8.19	0.955	30.03
		ВС	34.94	91.85	7.89	0.955	30.07
	$k = 1$	БВС	57.48	138.67	12.27	0.931	27.00
		ВС	47.49	134.34	11.39	0.932	27.15
Baboon	$k = 0.2$	БВС	30.50	76.81	5.71	0.974	32.59
		ВС	30.81	75.63	5.66	0.974	32.66
	$k = 0.4$	БВС	38.15	105.01	6.76	0.965	30.48
		ВС	35.13	103.11	6.63	0.965	30.52
	$k = 1$	БВС	55.06	168.93	9.31	0.943	27.17
		ВС	47.49	164.76	8.97	0.944	27.35
Barbara	$k = 0.2$	БВС	29.33	31.06	11.81	0.979	34.07
		ВС	30.88	30.93	11.81	0.979	34.11
	$k = 0.4$	БВС	36.27	40.70	13.89	0.972	32.38
		ВС	36.24	40.47	13.85	0.973	32.44
	$k = 1$	БВС	51.79	65.24	18.05	0.958	29.65
		ВС	49.64	62.22	18.48	0.961	29.74
Goldhill	$k = 0.2$	БВС	29.31	37.45	11.54	0.973	33.13
		ВС	30.20	36.88	11.13	0.974	33.25
	$k = 0.4$	БВС	36.25	47.07	14.48	0.964	31.34
		ВС	35.65	45.62	13.77	0.966	31.57
	$k = 1$	БВС	51.74	67.28	20.93	0.946	28.84
		ВС	48.79	64.01	20.07	0.949	29.03
Lenna	$k = 0.2$	БВС	30.13	23.70	18.01	0.976	34.47
		ВС	32.11	23.16	17.28	0.977	34.61
	$k = 0.4$	БВС	37.55	29.78	21.92	0.969	32.79
		ВС	37.11	28.86	20.56	0.971	32.97
	$k = 1$	БВС	54.02	42.96	31.13	0.957	30.29
		ВС	47.93	40.70	28.78	0.960	30.58
Peppers	$k = 0.2$	БВС	29.88	29.76	14.49	0.971	34.05
		ВС	30.03	29.49	13.95	0.972	34.09
	$k = 0.4$	БВС	37.16	36.69	18.45	0.965	32.52
		ВС	34.94	35.65	17.33	0.966	32.58
	$k = 1$	БВС	53.33	51.67	26.05	0.951	30.00
		ВС	47.49	49.51	24.83	0.953	30.03

наименьшее значение $bpr_{\text{ОПТ}}$ наблюдается для тестового изображения Peppers.

Аналогичные зависимости для кодера SPIHT приведены на рис. 5. Сравнение графиков на рис. 4а и 5а, а также 4б и 5б показывает, что зависимости для одного и того же тестового изображения мало отличаются. Таким образом, можно утверждать, что ОПТ могут иметь место и для методов сжатия

на основе ДВП. Для процедур сжатия с использованием ВСП (6) и (7) получены аналогичные зависимости. Тогда вопрос заключается в том, каким образом можно автоматически обеспечить сжатие изображений в окрестности ОПТ?

Обеспечить автоматическое сжатие изображений, искаженных помехами, при отсутствии эталона, т.е. на практике, в области ОПТ для рассмат-

Таблица 4. Сравнение эффективности методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера ADCT

Изображение	Параметры шума	Метод	ШК _В	СКО _ш ^{ЭТ}	КС	MSSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	$k = 0.2$	БВС	24.42	59.02	6.01	0.972	33.24
		ВС	22.58	58.48	5.87	0.972	33.20
	$k = 0.4$	БВС	30.78	78.09	7.23	0.962	31.21
		ВС	27.17	76.56	6.95	0.962	31.24
	$k = 1$	БВС	44.71	119.85	9.90	0.940	28.08
		ВС	36.94	115.61	9.39	0.941	28.23
Baboon	$k = 0.2$	БВС	23.72	61.83	5.02	0.979	34.02
		ВС	23.96	60.89	4.98	0.979	34.08
	$k = 0.4$	БВС	29.67	85.75	5.86	0.971	31.76
		ВС	27.32	83.91	5.77	0.971	31.85
	$k = 1$	БВС	42.82	141.75	7.79	0.951	28.39
		ВС	36.94	138.12	7.54	0.953	28.54
Barbara	$k = 0.2$	БВС	22.81	26.39	9.92	0.982	35.31
		ВС	24.02	26.14	9.89	0.983	35.39
	$k = 0.4$	БВС	28.21	35.06	11.39	0.977	33.57
		ВС	28.19	34.72	11.35	0.977	33.58
	$k = 1$	БВС	40.28	57.60	14.14	0.963	30.66
		ВС	38.61	55.40	14.24	0.965	30.78
Goldhill	$k = 0.2$	БВС	22.80	32.84	9.18	0.976	34.24
		ВС	23.49	32.19	9.05	0.977	34.40
	$k = 0.4$	БВС	28.19	42.71	10.94	0.968	32.39
		ВС	27.73	40.65	10.76	0.970	32.61
	$k = 1$	БВС	40.24	63.89	14.61	0.950	29.64
		ВС	37.95	59.35	14.34	0.955	29.93
Lenna	$k = 0.2$	БВС	23.43	21.93	13.28	0.978	35.38
		ВС	24.98	21.30	12.90	0.979	35.54
	$k = 0.4$	БВС	29.21	28.32	15.32	0.972	33.77
		ВС	28.87	26.92	14.82	0.974	33.98
	$k = 1$	БВС	42.02	43.00	19.45	0.959	31.22
		ВС	37.28	39.79	19.12	0.962	31.44
Peppers	$k = 0.2$	БВС	23.24	26.24	11.64	0.976	35.14
		ВС	23.35	25.49	11.36	0.976	35.29
	$k = 0.4$	БВС	28.90	33.09	13.88	0.970	33.53
		ВС	27.17	31.63	13.33	0.971	33.67
	$k = 1$	БВС	41.48	50.05	17.42	0.955	30.88
		ВС	36.94	46.31	16.93	0.959	31.14

риваемых кодеров на основе ДВП сложнее, чем для методов сжатия на основе ДКП. Для выполнения автоматического сжатия воспользуемся особенностями поведения кривых $СКО_{тр}$ и $СКО_{ш}^{ЭТ}$ от bpp . На рис. 6 для изображений Airfield и Barbara приведены обе эти зависимости. Предположим, что σ^2 априорно известно или оценено

с приемлемой точностью ($\sigma^2 = 163$ для случая на рис. 6а и 132 для изображения на рис. 6б, эти уровни показаны горизонтальными линиями). Совместный анализ зависимостей $СКО_{тр}$ и $СКО_{ш}^{ЭТ}$ от bpp на каждом из рисунков показывает, что $СКО_{ш}^{ЭТ}$ близко к минимальному значению для такого bpp , где $СКО_{тр}$ равно σ^2 .

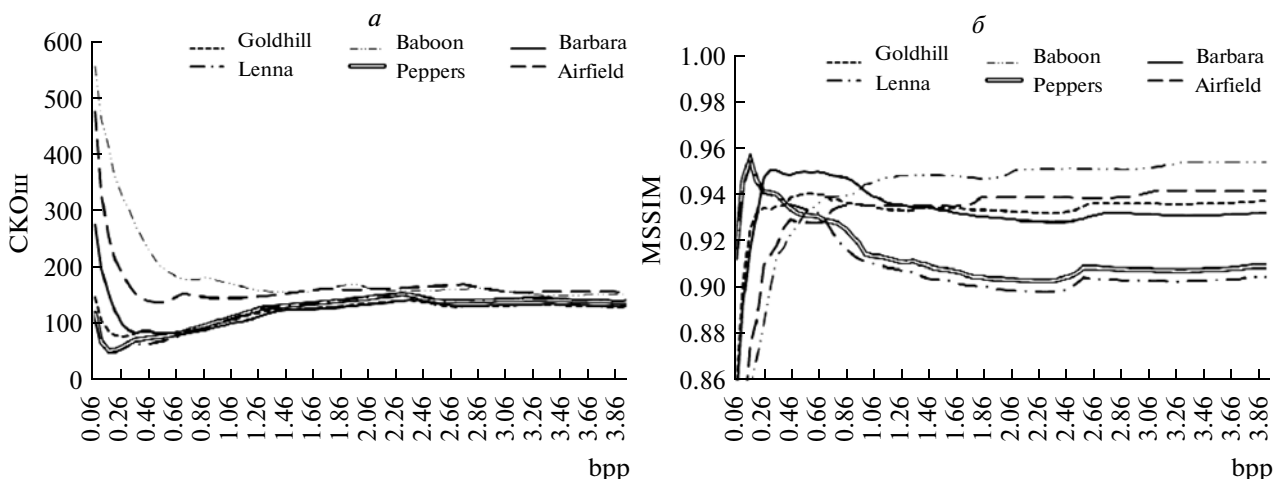


Рис. 4. Зависимости значений (а) и MSSIM (б) от bpr для тестовых изображений, сжатых кодером JPEG2000, при $\sigma_a^2 = 20$, $k = 1$.

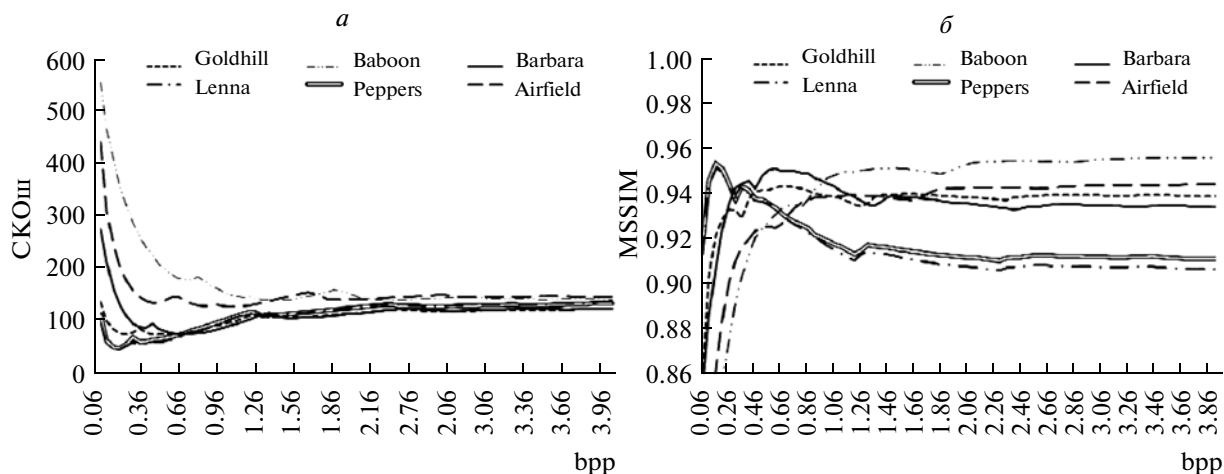


Рис. 5. Зависимости значений (а) и MSSIM (б) от bpr для тестовых изображений, сжатых кодером SPIHT, при $\sigma_a^2 = 20$, $k = 1$.

Напомним, что на практике нет возможности определить $SKO_{ш}^{ЭТ}$, но есть возможность рассчитать $SKO_{тр}$ для сжатого и затем декодированного изображения. Таким образом, имеется возможность реализовать итерационную процедуру сжатия, для которой на нулевом шаге выполняется сжатие с некоторым фиксированным bpr_0 , а затем выполняется декодирование и определяется $SKO_{тр0}$. Это значение сравнивается с σ^2 ; если $SKO_{тр0}$ меньше σ^2 , то на следующем шаге задается $bpr_1 = bpr_0 - \delta bpr$, где δbpr – шаг изменения bpr . Если же $SKO_{тр0}$ больше σ^2 , то для следующей итерации используют $bpr_1 = bpr_0 + \delta bpr$. Рекомендованной исходной точкой для запуска процедуры является $bpr_0 = 1.6$, а δbpr можно выбрать

порядка 0.2. Далее с помощью итеративной процедуры уточняются параметры сжатия, при которых достигается выполнение условия $SKO_{трl} \approx \sigma^2$, где $SKO_{трl}$ – ошибка для l -й итерации. Обычно количество итераций не превышает 8. Для уточнения $bpr_{ОПТ}$ на последнем этапе может использоваться линейная интерполяция. Более подробно итеративная процедура описана в работе (Ponomarenko et al., 2005a).

При использовании ВСП вместо σ^2 в итерационной процедуре используется $\sigma_{ОПЭ}^2 \approx X^2$, а $SKO_{тр}$ для изображения после сжатия и декодирования определяется относительно изображения $\{G_{ij}^p\}$. Рекомендации по выбору bpr_0 и δbpr те же, что и ранее.

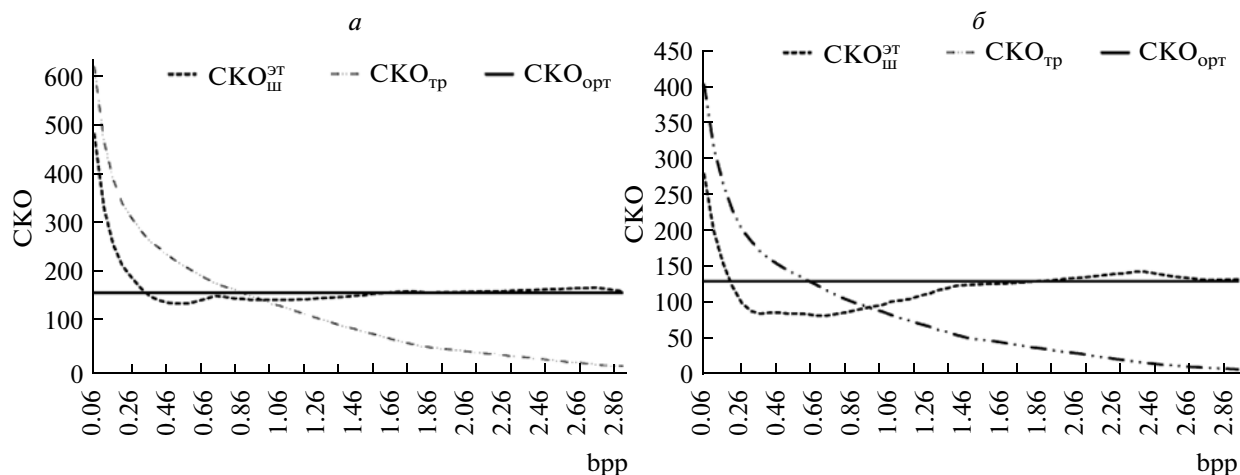


Рис. 6. Зависимости значений СКО от bpp для изображений Airfield (а) и Barbara (б), сжатых кодером JPEG2000, при $\sigma_a^2 = 20$, $k = 1$.

Рассмотрим некоторые результаты применения описанных выше процедур автоматического сжатия. Данные для JPEG2000 без вариационно-стабилизирующего преобразования приведены в табл. 5 для двух разных значений k и фиксированной дисперсии аддитивной компоненты. Очевидно, что выбранные в результате применения процедуры значения bpp_B и оптимальные значения $\text{bpp}_{\text{ОПТ}}$, полученные на основании анализа зависимостей $\text{СКО}_{\text{шт}}^{\text{ЭТ}}$ от bpp , отличаются, причем значения bpp_B могут быть как заметно больше, так и немного меньше, чем значения $\text{bpp}_{\text{ОПТ}}$. В первом случае КС оказывается меньше, чем КС, который можно было бы достигнуть при более высокой точности автоматической процедуры. Во втором случае в сжатое изображение вносятся несколько большие искажения, чем было бы желательно. Тем не менее сжатие в обоих случаях осуществляется в окрестности ОПТ. Естественно, что чем меньше k и σ^2 , тем меньше КС. Наибольшие значения КС достигаются для менее сложных изображений, а наименьшие — для наиболее сложных изображений (текстурного изображения Baboon).

Проведем сравнительный анализ для двух рассматриваемых подходов — с ВСП и без него. Результаты для кодера JPEG2000 приведены в табл. 6. Визуальное качество сжатых изображений для обоих подходов практически одинаковое. Но при этом использование ВСП позволяет несколько уменьшить $\text{СКО}_{\text{шт}}^{\text{ЭТ}}$ при интенсивных помехах (см. данные для $k = 1$) и достичь немного больших значений КС. Аналогичные выводы можно сделать из анализа данных, приведенных в табл. 7, для метода сжатия SPIHT. При этом SPIHT обеспечивает немного лучшие значения $\text{СКО}_{\text{шт}}^{\text{ЭТ}}$ и КС, чем JPEG2000. Кроме того, имеется возможность сравнить данные для кодера SPIHT на основе ДВП (табл. 7) и ADCT на основе ДКП (табл. 4). Для одного и того же изображения при одинаковых характеристиках помех ADCT обеспечивает меньшие значения $\text{СКО}_{\text{шт}}^{\text{ЭТ}}$ и немного большие значения КС, т.е. более эффективное сжатие.

Результаты для кодера JPEG2000 приведены в табл. 6. Визуальное качество сжатых изображений для обоих подходов практически одинаковое. Но при этом использование ВСП позволяет несколько уменьшить $\text{СКО}_{\text{шт}}^{\text{ЭТ}}$ при интенсивных помехах (см. данные для $k = 1$) и достичь немного больших значений КС. Аналогичные выводы можно сделать из анализа данных, приведенных в табл. 7, для метода сжатия SPIHT. При этом SPIHT обеспечивает немного лучшие значения $\text{СКО}_{\text{шт}}^{\text{ЭТ}}$ и КС, чем JPEG2000. Кроме того, имеется возможность сравнить данные для кодера SPIHT на основе ДВП (табл. 7) и ADCT на основе ДКП (табл. 4). Для одного и того же изображения при одинаковых характеристиках помех ADCT обеспечивает меньшие значения $\text{СКО}_{\text{шт}}^{\text{ЭТ}}$ и немного большие значения КС, т.е. более эффективное сжатие.

Таблица 5. Сжатие кодером JPEG2000 в области ОПТ при $k = 1$, $k = 0.2$ и $\sigma_a^2 = 20$

Изображение	$k = 1, \sigma_a^2 = 20$						$k = 0.2, \sigma_a^2 = 20$					
	$I_{\text{ср}}$	σ^2	КС_B	$\text{КС}_{\text{ОПТ}}$	bpp_B	$\text{bpp}_{\text{ОПТ}}$	$I_{\text{ср}}$	σ^2	КС_B	$\text{КС}_{\text{ОПТ}}$	bpp_B	$\text{bpp}_{\text{ОПТ}}$
Airfield	143	163	9.56	15.73	0.84	0.51	143	49	5.47	6.37	1.47	1.26
Baboon	129	149	6.71	10.57	1.20	0.76	130	46	4.43	3.4	1.81	2.36
Barbara	112	132	12.93	11.33	0.63	0.71	112	42	8.62	11.29	0.94	0.71
Goldhill	112	132	14.43	13.22	0.56	0.61	112	42	8.23	6.12	0.98	1.31
Lenna	124	144	21.44	50.48	0.38	0.16	124	45	12.31	8.88	0.66	0.91
Peppers	120	140	18.60	51.12	0.44	0.16	120	44	10.72	22.4	0.75	0.36

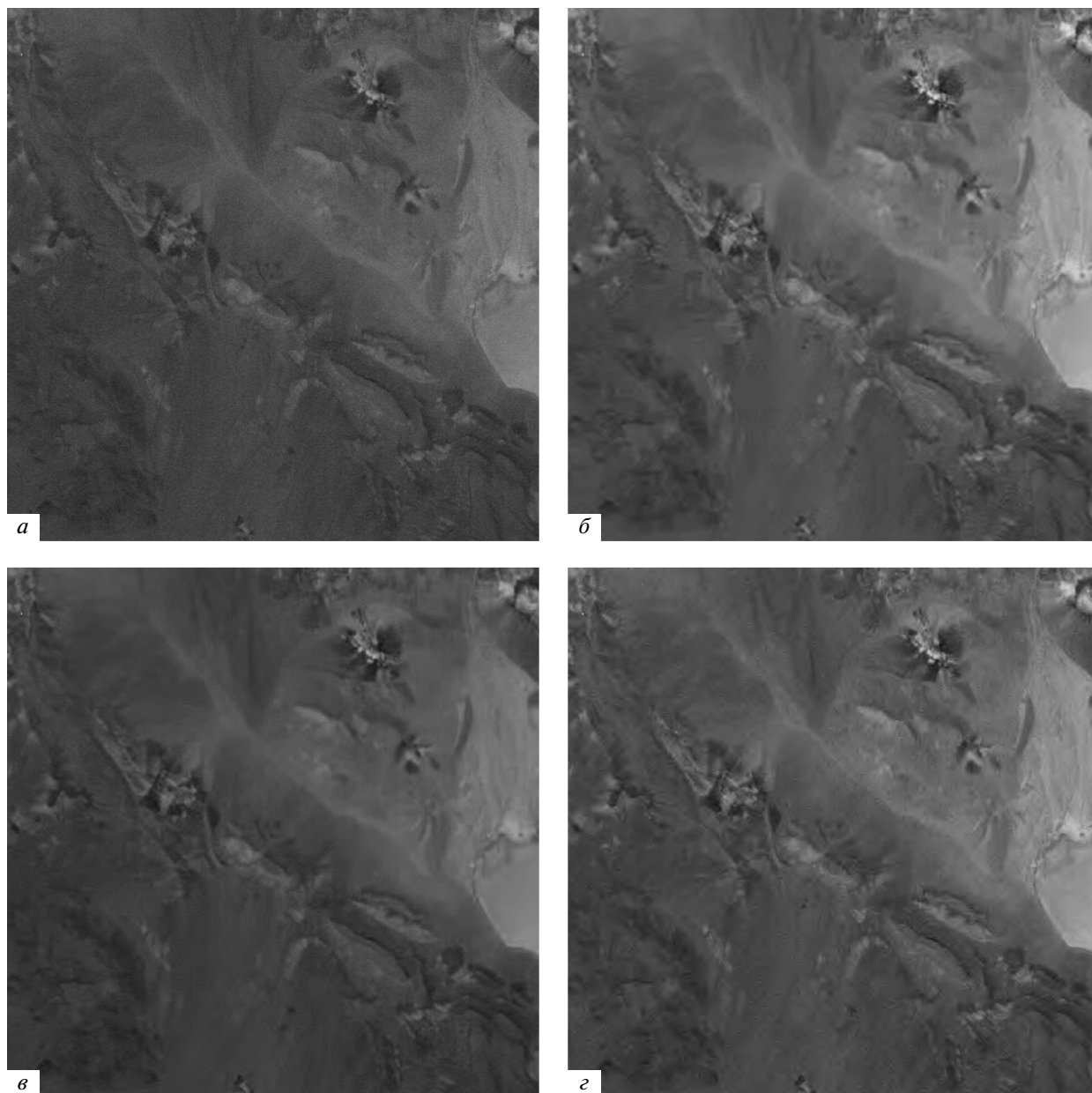


Рис. 7. Исходное изображение в канале 222 гиперспектрального изображения Lunar Lake системы AVIRIS (а) и результаты его автоматического сжатия кодерами AGU без ВСП (б), ADCT с ВСП (в) и JPEG2000 без ВСП (г).

Таким образом, и для методов сжатия с потерями на основе ДВП имеется возможность осуществить автоматическую компрессию данных в окрестности ОРТ. Тот факт, что сделать это более сложно вследствие необходимости применять описанную выше итеративную процедуру, не означает, что сжатие на основе ДВП для рассматриваемого применения менее перспективно, чем сжатие на основе ДКП. Для кодеров на основе ДВП имеется принципиальная возможность управлять степенью сжатия путем изменения шага квантования коэффициентов вейвлет-преобразования. При этом возможно использовать разные

шаги квантования для разных уровней декомпозиции (Чобану, 2009; Chang et al., 2000). Вопрос о том, какой из алгоритмов является в этом плане наилучшим, будет предметом дальнейших исследований.

В двух последних разделах эффективность рассматриваемых методов сжатия анализировалась в предположении, что параметры шума k и σ_a^2 точно оценены, что позволяет оценить $\sigma^2 = \hat{\sigma}_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} \hat{k}) / IJ$ и выполнить соответствующее вариационно-стабилизирующее преобразо-

Таблица 6. Сравнение эффективности методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера JPEG2000

Изображение	Параметры шума	Метод	bpp _B	СКО _ш ^{ЭТ}	КС	MSSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	$k = 0.2$	БВС	1.47	65.39	5.47	0.973	33.74
		ВС	1.45	65.14	5.51	0.973	33.52
	$k = 0.4$	БВС	1.22	87.37	6.62	0.959	30.86
		ВС	1.14	84.80	7.05	0.958	30.82
	$k = 1$	БВС	0.84	151.60	9.56	0.936	27.84
		ВС	0.73	133.14	10.92	0.936	27.81
Baboon	$k = 0.2$	БВС	1.81	66.91	4.43	0.979	34.33
		ВС	1.69	69.04	4.76	0.977	33.58
	$k = 0.4$	БВС	1.53	92.90	5.23	0.968	31.32
		ВС	1.44	93.67	5.57	0.967	31.02
	$k = 1$	БВС	1.20	166.27	6.71	0.948	28.43
		ВС	1.03	160.92	7.79	0.949	28.08
Barbara	$k = 0.2$	БВС	0.94	38.35	8.62	0.977	34.42
		ВС	0.88	37.25	9.21	0.977	34.27
	$k = 0.4$	БВС	0.80	47.78	10.13	0.968	32.56
		ВС	0.70	45.90	11.40	0.971	32.47
	$k = 1$	БВС	0.63	86.04	12.93	0.950	29.37
		ВС	0.47	82.76	17.37	0.953	28.96
Goldhill	$k = 0.2$	БВС	0.98	43.06	8.23	0.973	34.05
		ВС	0.94	43.63	8.61	0.973	33.89
	$k = 0.4$	БВС	0.78	55.20	10.29	0.961	31.73
		ВС	0.67	49.30	11.94	0.963	31.66
	$k = 1$	БВС	0.56	85.72	14.43	0.941	28.92
		ВС	0.38	76.66	21.49	0.945	28.61
Lenna	$k = 0.2$	БВС	0.66	34.25	12.31	0.969	34.30
		ВС	0.63	29.73	12.90	0.970	34.38
	$k = 0.4$	БВС	0.53	37.54	15.16	0.956	32.37
		ВС	0.44	30.79	18.46	0.967	33.14
	$k = 1$	БВС	0.38	66.05	21.44	0.939	29.69
		ВС	0.19	49.84	43.08	0.953	29.42
Peppers	$k = 0.2$	БВС	0.75	38.97	10.72	0.966	34.32
		ВС	0.67	37.98	11.98	0.966	33.89
	$k = 0.4$	БВС	0.59	46.16	13.57	0.955	32.40
		ВС	0.50	39.49	16.20	0.958	32.43
	$k = 1$	БВС	0.44	76.55	18.60	0.937	29.69
		ВС	0.22	54.19	36.75	0.951	29.56

вание, если применяется сжатие с использованием ВСП. При этом влияние неточности оценок $\hat{\sigma}_a^2$ и \hat{k} не принималась во внимание. Поэтому в будущем целесообразно провести дополнительные исследования, направленные на анализ точностных характеристик оценок $\hat{\sigma}_a^2$ и \hat{k} , а также влияние неточности оценивания этих параметров на харак-

теристики предложенных выше автоматических процедур сжатия с потерями в окрестности ОПТ.

ПРИМЕР АВТОМАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ

Приведем пример автоматического сжатия одноканального изображения для гиперспектральных данных ДЗ, полученных системой AVIRIS.

Таблица 7. Сравнение эффективности методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера SPIHT

Изображение	Параметры шума	Метод	bpp _B	СКО _ш ^{ЭТ}	КС	MSSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	$k = 0.2$	БВС	1.41	60.40	5.69	0.972	33.59
		BC	1.39	59.58	5.75	0.971	33.59
	$k = 0.4$	БВС	1.16	84.02	6.92	0.960	30.90
		BC	1.09	86.09	7.31	0.957	30.44
	$k = 1$	БВС	0.80	136.70	10.04	0.936	28.11
		BC	0.69	127.32	11.64	0.936	27.85
Baboon	$k = 0.2$	БВС	1.77	62.33	4.53	0.978	34.51
		BC	1.66	66.73	4.83	0.976	33.70
	$k = 0.4$	БВС	1.48	92.03	5.39	0.968	31.32
		BC	1.39	93.67	5.75	0.967	30.97
	$k = 1$	БВС	1.16	151.70	6.92	0.950	28.74
		BC	1.00	153.90	8.00	0.948	28.28
Barbara	$k = 0.2$	БВС	0.97	35.70	8.26	0.978	34.92
		BC	0.92	41.20	8.68	0.975	33.95
	$k = 0.4$	БВС	0.83	50.35	9.66	0.969	32.39
		BC	0.72	46.13	11.13	0.973	32.60
	$k = 1$	БВС	0.63	82.71	12.80	0.951	29.80
		BC	0.48	87.32	16.52	0.952	29.27
Goldhill	$k = 0.2$	БВС	0.95	38.74	8.39	0.974	34.35
		BC	0.91	39.56	8.83	0.974	34.06
	$k = 0.4$	БВС	0.78	53.93	10.24	0.962	31.53
		BC	0.66	48.50	12.19	0.965	31.70
	$k = 1$	БВС	0.55	83.40	14.63	0.941	29.01
		BC	0.36	78.35	22.26	0.942	28.58
Lenna	$k = 0.2$	БВС	0.63	30.34	12.80	0.971	34.69
		BC	0.63	31.64	12.80	0.969	33.83
	$k = 0.4$	БВС	0.53	36.99	15.06	0.964	32.53
		BC	0.44	30.48	18.29	0.970	33.00
	$k = 1$	БВС	0.36	61.77	22.26	0.944	30.05
		BC	0.19	51.72	42.67	0.952	28.90
Peppers	$k = 0.2$	БВС	0.72	34.47	11.13	0.969	34.74
		BC	0.64	36.38	12.49	0.967	33.84
	$k = 0.4$	БВС	0.59	44.24	13.47	0.960	32.33
		BC	0.47	37.58	17.07	0.964	32.46
	$k = 1$	БВС	0.39	66.89	20.48	0.943	30.06
		BC	0.23	61.81	34.13	0.946	28.77

На рис. 7а приведено изображение в канале 222 реального изображения Lunar Lake. Шум на этом изображении достаточно хорошо заметен и имеет сигнально-зависимый характер (Uss et al., 2010). Для этого изображения характерен относительно узкий динамический диапазон. Для его представления достаточно 8 бит, хотя для большинства компонентных изображений гиперспектральных

данных ДЗ AVIRIS разность между максимальным и минимальным значениями имеет порядок тысяч и для их представления используют 16 бит.

Характеристики шума неизвестны, но они были оценены двумя различными автоматическими методами. Для метода, реализующего функцию Матлаба Robustfit устойчивого вписывания прямой в скаттерограмму локальных оценок диспер-

сии, получены значения $\hat{\sigma}_a^2 = 7.09$ и $\hat{k} = 0.381$ (Lukin et al., 2011). Если же используется метод устойчивого вписывания прямой по центрам кластеров с двойным взвешиванием (Lukin et al., 2011), то оценки соответственно равны $\hat{\sigma}_a^2 = 5.91$ и $\hat{k} = 0.345$. Таким образом, для обоих методов оценки примерно одинаковы и можно считать, что $\hat{\sigma}_a^2 \approx 6.5$ и $\hat{k} \approx 0.363$. Тогда получаем

$$\sigma^2 = \hat{\sigma}_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} \hat{k}) / IJ = 29.16,$$

и для кодера AGU без ВСП ШК_в, выбираемый как 4.5σ , равен 21.94. Результат сжатия приведен на рис. 7б, КС = 45.51. Хорошо виден эффект фильтрации.

При использовании кодера ADCT с ВСП используемый ШК = 27.87, сжатое изображение приведено на рис. 7в, а КС = 23.08. Эффект фильтрации также хорошо заметен, но границы объектов и текстуры хорошо сохранены. При использовании кодера JPEG2000 достигаемый КС = 32.6, а полученное изображение приведено на рис. 7г. Шум также подавлен, но в некоторых местах сжатого изображения можно заметить небольшие артефакты.

Аналогичный анализ был проведен и для других каналов реального изображения Lunar Lake. Для каналов с низким отношением сигнал-шум получены аналогичные указанным выше значения КС (от примерно 20 до 35), для каналов с высоким ОСШ значения КС в 2–3 раза меньше, от 7 до примерно 20.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены возможные подходы к автоматическому сжатию изображений ДЗ, искаженных сигнально-зависимыми помехами. Предложенные процедуры предусматривают автоматическое оценивание характеристик помех на первом этапе. Затем сжатие в окрестности оптимальной рабочей точки может выполняться как с использованием соответствующих вариационно-стабилизирующих преобразований, так и без них. В первом случае достигается несколько лучшее сжатие, особенно при явно выраженной зависимости дисперсии помех от локального среднего. Кроме того, использование ВСП обеспечивает лучшие предпосылки для применения трехмерного сжатия с учетом коррелированности изображений в соседних каналах (Lukin, 2009; Ponomarenko et al., 2010б). Благодаря ВСП, удается обеспечить практически одинаковые значения дисперсии аддитивных помех во всех компонентных изображениях, сжимаемых при использовании трехмерных кодеров совместно (Ponomarenko et al., 2010б).

Тогда появляется возможность одновременно достичь сжатия в окрестности ОРТ для всех компонентных изображений с установкой единого шага квантования. Авторы ожидают, что аналогично (Ponomarenko et al., 2010б) в этом случае может быть достигнут в 2–3 раза больший КС, чем при поканальном сжатии. Разработка соответствующих алгоритмов является направлением дальнейших исследований.

Автоматические процедуры разработаны как для кодеров на основе ДКП, так и ДВП. Для сжатия на основе ДВП процедуры более сложны, но в перспективе представляется возможным разработать неитеративные методы сжатия на основе ДВП. Дополнительное внимание в будущем необходимо уделить и анализу влияния точности оценки параметров сигнально-зависимых помех на эффективность сжатия с потерями. Однако очевидно, что сжатие с потерями на основе предложенных автоматических процедур компрессии в окрестности ОРТ способно обеспечить КС в десятки раз выше значений КС при использовании методов сжатия данных ДЗ без потерь.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 12-07-00762-а и 12-07-00388-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабкин В.Ф., Книжный И.М., Хрекин К.Е.* Сжатие многоспектральных изображений без потерь или с ограниченными потерями // Докл. сем. "Современные и перспективные разработки и технологии в космическом приборостроении". М.: ИКИ РАН, 2004. С. 87–94.
- Бехтин Ю.С.* Поиск оптимального распределения бит при сжатии данных зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразования // Цифровая обработка сигналов. 2007. № 1. С. 17–24.
- Зряхов М.С., Кривенко С.С., Абрамов С.К., Пономаренко Н.Н., Лукин В.В.* Особенности сжатия изображений при сигнально-зависимых помехах // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ, 2011. № 2/79. С. 87–95.
- Кривенко С.С., Лукин В.В., Зряхов М.С., Зеленский А.А.* Сжатие изображений дистанционного зондирования без визуально заметных искажений // Радиотехника. 2009. Т. 159. С. 248–254.
- Лукин В.В., Усс М.Л., Абрамов С.К., Чобану М.К.* Автоматическое определение характеристик помех на изображениях: методы и их точность // Тр. 14-й Межд. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2012". М., 2012. Т. 2. С. 274–277.
- Лукин В.В., Февралев Д.В., Пономаренко Н.Н., Абрамов С.К.* Фильтрация цветных изображений: когда она необходима? // Радиотехника та комп'ютерні системи. 2010. Т. 4. № 44. С. 65–74.
- Чобану М.К.* Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов. М.: Техносфера, 2009. 480 с.
- Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 594 с.

- Abramov S., Zabrodina V., Lukin V., Vozel B., Chehdi K., Astola J.* Methods for blind estimation of the variance of mixed noise and their performance analysis // Book Chapter in Numerical Analysis – Theory and Applications / Ed. J. Awrejcewicz. 2011. P. 49–70.
- Al-Chaykh O.K., Mersereau R.M.* Lossy compression of noisy images // IEEE Trans. Image Proc. 1998. V. 7. № 12. P. 1641–1652.
- Anscombe F.J.* The transformation of Poisson, binomial and negative-binomial data // Biometrika. 1948. V. 35. № 3–4. P. 246–254.
- Barducci A., Guzzi D., Marcoionni P., Pippi I.* CHRIS-Proba performance evaluation: signal-to-noise ratio, instrument efficiency and data quality from acquisitions over San Rossore (Italy) test site // Proc. 3-rd ESA CHRIS/Proba Workshop. 2005. 11 p.
- Blanes I., Zabala A., More G., Pons X., Serra-Sagrista J.* Classification of hyperspectral images compressed through 3D-JPEG2000 // Proc. LNAI. 2009. V. 5179. P. 416–423.
- Bo L.*, Remote sensing image compression using two-dimensional oriented wavelet transform // Geosci. Rem. Sens. 2011. V. 49. № 1. P. 236–250.
- Chang S.G., Yu B., Vetterli M.* Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression // IEEE Trans. Image Process. 2000. V. 9. № 9. P. 1532–1546.
- Christophe E., Mailhes C., Duhamel P.* Hyperspectral image compression: Adapting SPIHT and EZW to anisotropic 3-D wavelet coding // IEEE Trans. Image Proc. 2008. V. 17. № 12. P. 2334–2346.
- Fevrale D., Lukin V., Ponomarenko N., Vozel B., Chehdi K., Kurekin A., Kwan L.* Classification of filtered multichannel images // Proc. SPIE/EUROPTO on Satellite Remote Sensing, Toulouse, France. 2010. SPIE 7830. 11 p.
- Foi A.* Pointwise shape-adaptive DCT image filtering and signal-dependent noise estimation // Thesis for the degree of Doctor of Technology; defense 05.12.2007. Tampere, Finland: Tampere University of Technology, 2007. 194 p.
- Kaarna A.* Compression of spectral images, Chapter 14 // Vision Systems: Segmentation and Pattern Recognition / Eds. G. Ohinata, A. Dutta. Vienna: I-Tech, 2007. P. 269–298.
- Kerekes J.P.* Hyperspectral imaging system modeling // Lincoln Laboratory J. 2003. V. 14. № 1. P. 117–130.
- Lim S.H.* Characterization of noise in digital photographs for image processing // Proc. Digital Photogr. I. SPIE 6069. 2006. P. 219–228.
- Liu C., Freeman W.T., Szeliski R., Kang S.B.* Noise estimation from a single image // Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. 17–22 June 2006. N.Y., USA, 2006. P. 901–908.
- Lukin V.* Processing of multichannel RS data for environment monitoring // Proc. NATO Advanced Research Workshop on Geographical Information Processing and Visual Analytics for Environmental Security. July 2009. Trento, Italy: Springer Netherlands, 2009. P. 129–138.
- 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 J. Advanc. Rem. Sens. 2011.
- Lukin V., Ponomarenko N., Kurekin A., Lever K., Pogrebnyak O., Sanchez-Fernandez L.* Approaches to classification of multichannel images // Proc. CIAPR. Cancun, Mexico: Springer LNCS, 2006. V. 4225. P. 794–803.
- Lukin V., Ponomarenko N., Zriakhov M., Kaarna A., Astola J.* An automatic approach to lossy compression of AVIRIS hyperspectral data // Telecom. Radioengineer. 2010. V. 69. № 6. P. 537–563.
- Lukin V., Ponomarenko N., Zriakhov M., Zelensky A.* Quasi-optimal compression of noisy optical and radar images // Proc. SPIE Conf. Image and Signal Processing for Remote Sensing XII. Sweden: SPIE, 2006. V. 6365. 12 p.
- Lukin V., Zriakhov M., Krivenko S., Ponomarenko N., Miao Z.* Lossy compression of images without visible distortions and its applications // Proc. ICSP 2010. October 2010. Beijing, China, 2010. P. 694–697.
- Lukin V.V., Zriakhov M.S., Ponomarenko N.N., Kaarna A.* An automatic approach to lossy compression of images corrupted by Poisson noise // Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp. MRRS-2008. Kiev, 2008. P. 139–142.
- Murtagh F.* Astronomical image and signal processing // IEEE Signal Proc. Magazine. 2001. V. 18. № 2. P. 30–40.
- Penna B., Tillo T., Magli E., Olmo G.* Transform coding techniques for lossy hyperspectral data compression // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2007. V. 45. № 5. P. 1408–1421.
- Ponomarenko N., Silvestri F., Egiazarian K., Carli M.* On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions // Proc. 3-d Int. Workshop Video Processing and Quality Metrics. USA. 2007. 4 p. CD-ROM.
- Ponomarenko N., Krivenko S., Lukin V., Egiazarian K., Astola J.* Lossy compression of noisy images based on visual quality: A comprehensive study // EURASIP J. Adv. Signal Proc. 2010. № 976436. 13 p.
- Ponomarenko N.N., Lukin V.V., Egiazarian K.O.* Visually lossless compression of synthetic aperture radar images // Proc. ICATT. Kiev, Ukraine, 2011. 3 p. CD-ROM.
- Ponomarenko N.N., Lukin V.V., Egiazarian K., Astola J.* DCT based high quality image compression // Proc. 14th Scandinavian Conf. on Image Analysis. June 2005. Joensuu, Finland. 2005. V. 14. P. 1177–1185.
- Ponomarenko N., Lukin V., Egiazarian K., Astola J.* ADCT: A new high quality DCT based coder for lossy image compression // Proc. LNLA. Switzerland, 2008. 6 p. CD-ROM.
- Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Egiazarian K.* Lossy compression of images with additive noise // Proc. Int. Conf. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. September 2005. Antwerpen, Belgium, 2005. P. 381–386.
- Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Egiazarian K., Astola J.* Estimation of accessible quality in noisy image compression // Proc. EUSIPCO. Italy. 2006. 4 p. CD-ROM.
- Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Kaarna A.* Preliminary automatic analysis of characteristics of hyperspectral AVIRIS images // Proc. MMET. Ukraine, 2006. P. 158–160.
- Ponomarenko N., Zriakhov M., Lukin V., Kaarna A.* Improved grouping and noise cancellation for automatic lossy compression of AVIRIS images // Proc. ACIVS. Springer, Heidelberg. LNCS-6475. Part II. December 2010. Australia, 2010. P. 261–271.
- Said A.* A new fast and efficient image codec based on the partitioning in hierarchical trees // IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology. 1996. V. 6. P. 243–250.

Shahnaz R., Walkup J.F., Krile T.F. Image Compression in Signal-Dependent Noise // *Applied Optics*. 1999. V. 38. № 26. P. 560–5567.

Taubman D., Marcellin M. JPEG2000: Image compression fundamentals // *Standards and Practice*. Boston, USA: Kluwer, 2002.

Uss M., Vozel B., Lukin V., Chehdi K. Local Signal-Dependent Noise Variance Estimation from Hyperspectral Tex-

tural Images // *IEEE J. Selected Topics in Signal Proc.* 2010. V. 5. № 2. DOI: 10.1109/JSTSP.2010.2104312.

Vozel B., Abramov S., Chehdi K., Lukin V., Ponomarenko N., Uss M. Blind methods for noise evaluation in multi-component images // *Multivariate image processing*. ISTE Ltd, France, 2009.

Wang Z., Simoncelli E.P., Bovik A.C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment // *IEEE Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*. 2003. V. 6. 5 p.

Procedures for Automatic Image Compression in Remote Sensing of the Earth for Signal Dependent Noise Working in the Vicinity of Optimal Operating Point and their Effectiveness

A. N. Zemlyachenko¹, R. A. Kozhemyakin¹, S. K. Abramov¹, V. V. Lukin¹, M. K. Tchobanou²

¹ *N.E. Zhukovsky National Aerospace University, Kharkov, Ukraine*

² *National Research University "MEI", Moscow*

Approaches to lossy compression of single-channel remote sensing (RS) images corrupted by signal-dependent noise are considered. Analysis is carried out for coders based on discrete cosine and wavelet transforms. Efficiency comparison is performed according to several criteria for both applying coders to images directly and with using variance-stabilizing transforms. It is shown that difference in performance is not essential although variance-stabilizing transforms possess certain advantages for 3D methods of multichannel RS data compression. Automatic procedures of compression in the neighborhood of optimal operation point are proposed. Their advantages and drawbacks are studied.

Keywords: lossy image compression, remote sensing, signal-dependent noise