

УДК 621.3:681.34

**А.Н. ЗЕМЛЯЧЕНКО¹, Р.А. КОЖЕМЯКИН¹, С.К. АБРАМОВ¹, В.В. ЛУКИН¹,
М.К. ЧОБАНУ²**¹*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*²*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация*

АВТОМАТИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ С УЧЕТОМ ВИЗУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ СИГНАЛЬНО-ЗАВИСИМЫХ ПОМЕХАХ

Рассмотрены подходы к сжатию с потерями изображений, искаженных сигнально-зависимыми помехами. Проведено сравнение эффективности сжатия изображений, как с учетом визуального восприятия человека, так и без него, в соответствии с несколькими критериями. Исследовано визуальное качество изображений после применения гомоморфных вариационно-стабилизирующих преобразований. Показано, что применение вариационно-стабилизирующих преобразований обеспечивает преимущество, когда преобладающим является сигнально-зависимый тип помех. Даны рекомендации по выбору параметров методов сжатия на практике для обеспечения сжатия изображений в окрестности оптимальной рабочей точки.

Ключевые слова: *сигнально-зависимый шум, вариационно-стабилизирующие преобразования, сжатие изображений с потерями.*

Введение

Изображения – это вид данных, широко используемый в различных областях человеческой деятельности: медицине, картографировании, геологической разведке, сельском (степень зрелости культур, эродированность почв) и городском (экологический мониторинг) хозяйстве, неразрушающем контроле, мультимедиа [1]. Приведенный список практического использования изображений далеко не полный, при этом в любой области их формирование и обработка имеет свои особенности.

В большинстве случаев современные системы формирования изображений (СФИ) характеризуются высоким пространственным и спектральным разрешением (многоканальностью – цветные, мульти- и гиперспектральные изображения), что приводит к увеличению объема данных, которые необходимо передавать по каналам связи и хранить в пункте обработки. В связи с этим актуальной проблемой является эффективное сжатие таких данных.

В настоящее время не существует идеальной аппаратуры, позволяющей формировать изображения идеального качества, поэтому на практике помехи присутствуют практически на всех изображениях, хотя их уровень может варьироваться в широких пределах. На некоторых типах изображений шум может быть практически незаметен [2, 3] в связи с его низким уровнем, особенностями изображения и его визуального восприятия. Если же сформированное изображение характеризуется малым от-

ношением сигнал-шум (ОСШ), то помехи хорошо заметны.

Однако во многих приложениях сжатие изображений рассматривается в предположении, что помехи отсутствуют [1]. Это может привести к неправильной установке параметров используемого алгоритма сжатия. При сжатии изображений, как с потерями, так и без потерь, целесообразно использовать методы, учитывающие конкретный вид искажающих помех [4].

Сжатие изображений без потерь обеспечивает коэффициент сжатия (КС) до 2-3 раз, а при высоком уровне помех гораздо меньше [5], что обычно является неудовлетворительным для практического применения, особенно если сжатие происходит на борту СФИ в связи с ограниченной полосой пропускания канала связи. Поэтому целесообразно использовать сжатие с потерями, которое позволяет обеспечить гораздо более высокие значения КС, а также характеризуется рядом других достоинств.

Одним из главных достоинств является эффект фильтрации при использовании методов сжатия, основанных на использовании ортогональных преобразований [6-9]. Этот эффект достигается при определенным образом устанавливаемых параметрах алгоритмов сжатия. Параметры кодера нужно выбирать таким образом, чтобы сжатие осуществлялось в окрестности оптимальной рабочей точки (ОРТ) [6, 10-14]. При этом задачей первостепенной важности является сохранение информационной составляющей

щей и отсутствие различных нежелательных искажений в сжатом изображении. Для многих приложений важно визуальное качество сжатых изображений. Второстепенной задачей при этом является достижение более высоких значений КС.

Если речь идет о визуальном качестве, то при анализе эффективности методов сжатия с потерями должны использоваться так называемые HVS-метрики (HVS – human vision system, зрительная система человека). К настоящему времени разработано достаточно много таких метрик [15-17], которые применительно к искажениям, обусловленным сжатием с потерями, характеризуются приемлемой для практики адекватностью. Одной из них является метрика PSNR-HVS-M (если для исходного изображения значение этой метрики превышает 41 дБ, то шумы на нем визуально незаметны) [4]. Данная метрика учитывает особенности визуального восприятия человека, например неодинаковую чувствительность к искажениям в различных пространственных частотах и эффект маскирования.

Однако проблемой остается автоматическое обеспечение сжатия в окрестности ОПТ при сложных видах сигнально-зависимых помех [17]. Отметим, что модели сложной сигнальной зависимости характеристик помех признаны более адекватными, особенно для изображений, формируемых сенсорами на основе ПЗС [18-21], в частности, гиперспектральными системами дистанционного зондирования нового поколения. На основе данной модели авторами были предложены несколько алгоритмов, обеспечивающих автоматическое сжатие в окрестности ОПТ для кодеров, специально не ориентированных на улучшение визуального качества сжатых изображений [22].

Целью данной статьи является исследование характеристик сжатия изображений, искаженных помехами со сложной сигнально-зависимой структурой, с потерями с учетом визуального восприятия, и разработка автоматических методов сжатия в окрестности ОПТ.

1. Рассматриваемые методы и процедуры сжатия

Основная модель шума в современных СФИ на основе ПЗС-сенсоров имеет вид [19]:

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

где I_{ij} – зашумленный ij -й пиксель изображения; $n_{ij}^{\text{пуас}}$ – пуассоновская компонента шума; $I_{ij}^{\text{ист}}$ – истинное значение ij -го пикселя; k – коэффициент коррекции динамического диапазона изображения; $n_{ij}^{\text{алд}}$ – аддитивная компонента шума с дисперсией

σ_a^2 и математическим ожиданием g , которое полагается равным нулю.

Результирующий шум, искажающий изображение, имеет сложную структуру и состоит из одновременно присутствующих сигнально-зависимой $n_{ij}^{\text{пуас}}$ (квази-пуассоновской) и аддитивной сигнально-независимой $n_{ij}^{\text{алд}}$ (гауссовой) компонент. Дисперсия помех для ij -го пикселя равна $\sigma_{ij}^2 = kI_{ij}^{\text{ист}} + \sigma_a^2$. Шумы для этих двух компонент в рамках нашего исследования полагались независимыми и пространственно-некоррелированными.

Исследование проводилось с использованием шести стандартных тестовых изображений, на которые, согласно модели (1), накладывался искусственно сгенерированный шум с разными значениями k и σ_a^2 для моделирования исходных изображений, сформированных при различных установках параметров СФИ.

Для определения эффективности сжатия и подавления помех были использованы различные критерии качества. К ним относятся традиционные: среднеквадратическая ошибка (СКОш) и пиковое отношение сигнал-шум (ПОСШ). Были также использованы метрики PSNR-HVS-M [15], MSSIM [16], которые учитывают визуальное качество изображений. Кроме того, была использована недавно предложенная метрика визуального качества FSIM [23], которая учитывает тот факт, что человеческая система восприятия уделяет особое внимание окрестностям границ и малоразмерных деталей. Для всех трех метрик большие значения соответствуют лучшему визуальному качеству. При этом значения PSNR-HVS-M измеряются в дБ, а для MSSIM и FSIM – в безразмерных единицах с максимальным значением, равным единице (для идеального качества).

Характерной особенностью сжатия с потерями изображений, искаженных помехами, состоит в том, что все перечисленные выше метрики (при наличии эталона) могут рассчитываться как для пары зашумленное изображение – сжатое изображение, так и для пары истинное изображение – сжатое изображение (это возможно, если имеется $I_{ij}^{\text{ист}}$, то есть при моделировании). Ниже нами рассматриваются метрики, рассчитанные для второй пары, поскольку желательно, чтобы в результате сжатия изображение было как можно более похожим на истинное в соответствии с той или иной метрикой. На практике, естественно, $I_{ij}^{\text{ист}}$ недоступно, но на основании исследований нами ниже будут даны рекомендации,

каким образом устанавливать параметры исследуемых кодеров, чтобы для сжатого изображения обеспечивать наилучшее качество, в том числе визуальное.

В данной работе исследования проводились с применением кодеров AGU-M [24] и ADCT-M [25], которые являются модифицированными версиями методов сжатия AGU [26] и ADCT [27]. Принцип сжатия изображений для всех этих кодеров основан на использовании дискретного косинусного преобразования (ДКП) в блоках прямоугольной или квадратной формы, но с размерами, которые пропорциональны степени двойки. При этом квантование полученных ДКП-коэффициентов для кодеров AGU-M и ADCT-M осуществляется с учетом визуального восприятия человека.

Управляющим параметром для исследуемых кодеров является шаг квантования (ШК). Для AGU и ADCT все коэффициенты квантуются с одинаковым ШК, а для AGU-M и ADCT-M задаваемый ШК является фактически параметром, на основе которого производится расчет индивидуальных значений ШК для каждой пространственной частоты.

Проведенный ранее анализ характеристик кодеров AGU и ADCT [22] показал, что существует ШК, при котором наблюдается минимум СКОш как следствие частичного подавления шума на изображении (рис. 1). Очевидно, что для всех изображений минимум (ОПТ в соответствии со СКОш) наблюдается при ШК порядка 50...55.

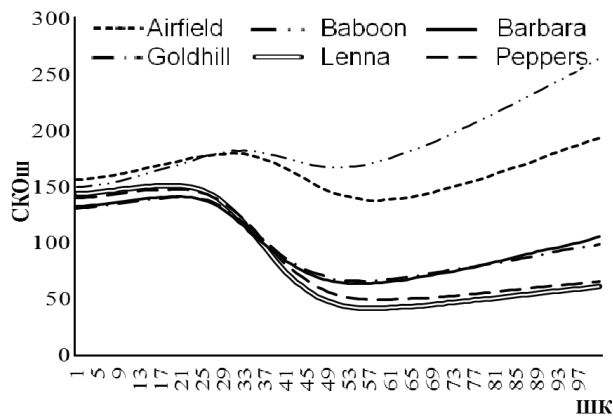


Рис. 1. Зависимости СКОш от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером AGU, при $\sigma_a^2=20, k=1$

Покажем, что и для кодеров AGU-M и ADCT-M возможно наличие ОПТ в соответствии с различными метриками. Зависимость MSSIM от ШК для кодера AGU-M приведена на рис. 2. Видно, что наличие оптимума характерно не для всех тестовых изображений, и он может быть выражен не так ярко,

как для метрики СКОш. Для текстурных изображений, например, Baboon или Airfield, максимум зависимости может вообще отсутствовать. Это обусловлено тем, что наряду с полезным эффектом подавления помех, улучшающим визуальное качество, имеет место внесение искажений, ухудшающих визуальное качество, причем степень подавления помех для текстурных изображений невелика, а вносимые искажения достаточно существенны. Для рассматриваемых характеристик помех (рис. 2) разумным следует считать выбор ШК порядка 25.

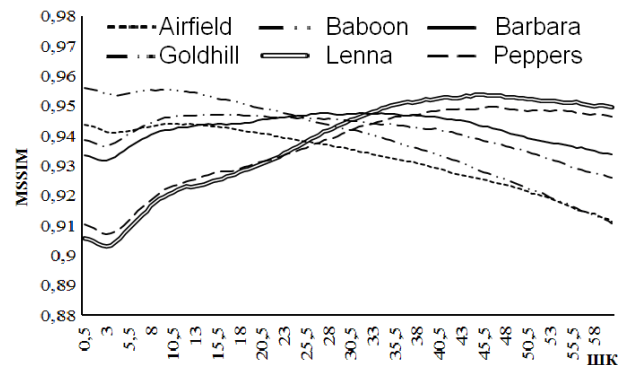


Рис. 2. Зависимости MSSIM от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером AGU-M, при $\sigma_a^2=20, k=1$

Похожие зависимости наблюдаются и для метрики FSIM (рис. 3). Для изображений с относительно простой структурой, то есть малым количеством текстурных участков (Lenna, Peppers) ОПТ выражены явно, поскольку эффект фильтрации проявляется в большей степени, чем для изображений, имеющих большое количество текстур (Baboon, Airfield). Для высоко-текстурных изображений ОПТ в соответствии с рассматриваемой метрикой может вообще отсутствовать.

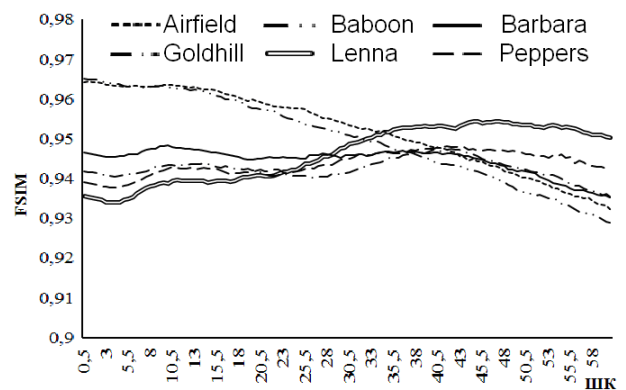


Рис. 3. Зависимости FSIM от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером AGU-M, при $\sigma_a^2=20, k=1$

Также видно, что для всех метрик ОРТ находится приблизительно в одной и той же окрестности. Для ситуации, когда влияние сигнально-зависимого шума ($k=0,2$) мало, характер изменения кривых остается тот же (рис. 4), но эффекты фильтрации проявляются в меньшей степени. Значения ШК, соответствующего ОРТ, при меньшей интенсивности шума смещаются в сторону меньших значений.

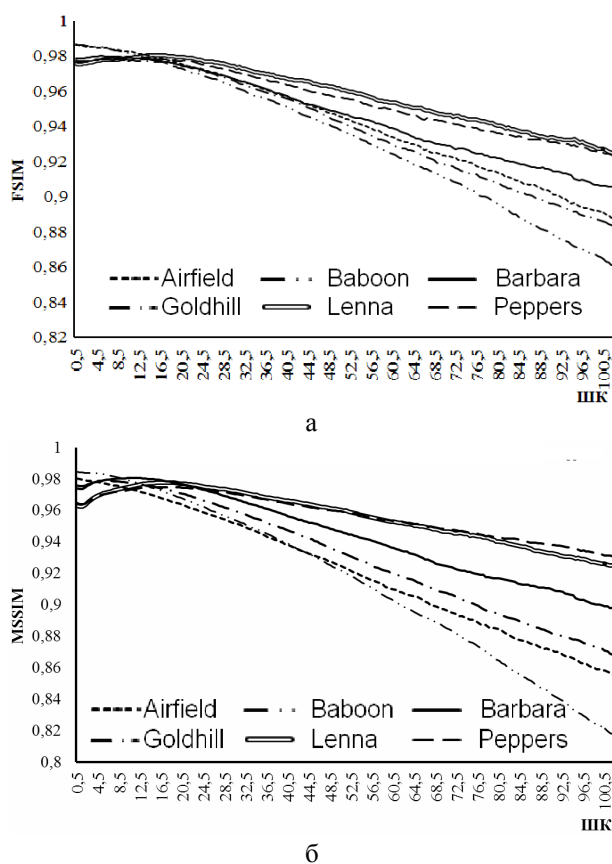


Рис. 4. Зависимости FSIM (а) и MSSIM (б) от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером ADCT-M, при $\sigma_a^2=20$, $k=0,2$

Как показывает анализ, проведенный в работе [22], для обеспечения работы кодеров в области ОРТ необходимо устанавливать шаг квантования как $4,5\sigma$ для кодера AGU и $3,5\sigma$ для кодера ADCT, где

$$\sigma^2 = \sigma_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{\text{нст}} \cdot k) / IJ.$$

Проведенные нами исследования и анализ их результатов, часть из которых представлена выше на рис. 2,3 и 4, показали, что для кодера AGU-M ШК целесообразно устанавливать равным 2σ , если

стремиться обеспечить ОРТ в соответствии с метриками СКОш или ПОСШ, и несколько меньше, например, σ , если первоочередной задачей является обеспечение высокого визуального качества. Аналогичные рекомендации справедливы и для кодера ADCT-M. Ниже результаты приводятся именно для установки ШК, равного σ .

Как следует из изложенного выше, для того, чтобы сжимать изображения в окрестности ОРТ, на практике необходимы оценки σ^2 . Данная величина может быть оценена как $\sigma^2 = \hat{\sigma}_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} \cdot \hat{k}) / IJ$,

где $\hat{\sigma}_a^2$ и \hat{k} - оценки параметров сигнально-зависимых помех. Эти оценки необходимо получать непосредственно по обрабатываемому изображению и, желательно, в автоматическом режиме. Для случая смеси пуассоновского и аддитивного шума существует метод [28], 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 .

Все результаты, приведенные выше, получены в предположении, что сжатие применяется к исходному изображению без какой-либо предварительной обработки, например, применения вариационно-стабилизирующих преобразований (ВСП). В то же время, в работе [22] предложен еще один подход к методу сжатия изображений в окрестности ОРТ. Он основан на применении гомоморфного прямого и обратного обобщенного преобразования Энскомба [19]. Непосредственно перед сжатием к изображению применяется прямое ВСП вида:

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

Данное преобразование позволяет на основе оценок параметров смешанного шума преобразовать смесь пуассоновского и аддитивного шума в чисто аддитивный шум с фиксированной дисперсией, равной единице. Однако после применения такого ВСП динамический диапазон изображения значительно сужается, что приводит к дополнительным ошибкам квантования. Чтобы минимизировать ошибки, обусловленные квантованием, в [22] предложено применять операцию "растяжения" динамического диапазона изображения к 8-битному (0-255) виду:

$$G_{ij}^p = \left[X \cdot (I_{ij}^{\text{энс}} - I_{\text{мин}}^{\text{энс}}) \right], \quad (2)$$

где $X=255/(I_{\text{макс}}^{\text{энс}} - I_{\text{мин}}^{\text{энс}})$;

$I_{\text{макс}}^{\text{энс}}$, $I_{\text{мин}}^{\text{энс}}$ - максимальное и минимальное значения динамического диапазона изображения после гомоморфного преобразования;

[•] - операция округления до ближайшего целого числа.

После декодирования к изображению применялась операция, обратная (2):

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

Далее применяется обратное преобразование:

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

Анализ зависимостей метрик от ШК для этого подхода (зависимости имеют характер, аналогичный зависимостям на рис. 2, 3 и 4) показал, что для обеспечения работы кодеков в области ОПТ для данного подхода для кодеков AGU-M и ADCT-M целесообразно устанавливать ШК как X . Результаты, приведенные ниже, получены именно при таких установках ШК в предположении, что параметры сигнално-зависимых помех k и σ_a^2 оценены точно.

2. Анализ полученных результатов

Детальное сравнение характеристик предложенных методов приведено в табл. 1 и 2. Далее метод на основе гомоморфных преобразований обозначен как ВСП, а без него – БВСП. Вначале анализируем относительно простые изображения. К ним относятся Goldhill, Barbara, Lena, Peppers. Для удобства, в таблицах представлены использованные для каждого конкретного случая значения ШК.

Исходя из анализа данных, полученных для кодера AGU-M (табл. 1), методы БВСП и ВСП при малых интенсивностях помех обеспечивают практически сравнимые результаты, как в плане значений КС, так и метрик СКОш, MSSIM, FSIM, PSNR-HVS-M. При увеличении вклада сигнално-зависимых помех для метода ВСП наблюдается небольшое уменьшение ШК, которое приводит к уменьшению КС, однако визуальное качество при этом практически не изменяется по сравнению с методом БВСП.

Для высоко-текстурных изображений (Airfield, Baboon) при малых интенсивностях помех ($k=0,2$) наблюдаются похожие закономерности. При увеличении уровня помех значения ШК значительно ниже для метода сжатия с использованием ВСП. При этом значения КС немного меньше, что не очень желательно. Однако и значения СКОш при этом меньше, то есть качество сжатых изображений (в соответ-

ствии с этой метрикой) выше. Метрики же визуального качества показывают сравнимые результаты.

Проанализируем данные, полученные при применении кодера ADCT-M (табл. 2). Характер поведения метрик и КС при различных интенсивностях помех остался такой же, как и для кодера AGU-M. Однако, при увеличении уровня сигнално-зависимых помех наблюдается несколько большая разница между КС и СКОш для методов ВСП и БВСП. То есть, метод сжатия с использованием ВСП обеспечивает меньшие значения СКОш при меньшем ШК, при этом метрики визуального качества дают практически идентичные результаты.

Сравним полученные результаты применения кодеков ADCT-M и AGU-M между собой. Из анализа данных, приведенных в табл. 1 и 2, видно, что кодер ADCT-M при малых уровнях сигнално-зависимых помех ($k=0,2$) обеспечивает лучшее визуальное качество в соответствии с метрикой PSNR-HVS-M по сравнению с AGU-M при большем КС для всех типов изображений. С увеличением уровня помех ADCT-M обеспечивает лучшее визуальное качество в соответствии со всеми метриками визуального качества при сохранении большего КС. Это свидетельствует о целесообразности применения этого кодера, если быстроедействие сжатия не имеет большого значения (кодер ADCT-M, предусматривающий использование оптимизированной схемы разбиения, обладает заметно худшим быстроедействием по сравнению с AGU-M).

Для обоих исследуемых кодеков можно также отметить две общие закономерности. Первая – более сложные по своей структуре изображения (Baboon или Airfield) сжимаются в окрестности ОПТ с меньшим КС, чем изображения с более простой структурой. Вторая – при повышении уровня помех (например, увеличении k) КС растет для всех изображений. Это достигается благодаря большим рекомендуемым значениям ШК, что позволяет более эффективно подавлять шум на изображениях при их сжатии с потерями.

Еще одна интересная закономерность характерна для недавно предложенной метрики FSIM. Ее значения мало отличаются от соответствующих значений MSSIM. Обычно значения метрики FSIM немного больше, чем соответствующие значения MSSIM. Поэтому сложно говорить, есть ли какие-либо очевидные преимущества FSIM по отношению к MSSIM и PSNR-HVS-M для рассматриваемого приложения сжатия изображений с потерями.

Еще одна задача состоит в том, чтобы сравнить характеристики сжатия для всех четырех анализируемых кодеков. В табл. 3 приведены данные по эффективности сжатия кодером AGU и его модифи-

Таблица 1

Сравнение эффективности предлагаемых методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера AGU-M

Изображение	Параметры шума	Метод	ШК	СКОш	КС	MSSIM	FSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	k=0,2	БВСП	6,98	64,65	5,76	0,976	0,984	35,14
		ВСП	6,45	64,34	5,67	0,976	0,984	35,06
	k=0,4	БВСП	8,79	81,28	6,51	0,967	0,978	32,78
		ВСП	7,76	81,09	6,37	0,966	0,978	32,69
	k=1	БВСП	12,77	120,21	7,85	0,944	0,963	29,15
		ВСП	10,55	119,48	7,58	0,946	0,964	29,19
Baboon	k=0,2	БВСП	6,78	81,33	5,16	0,982	0,984	36,26
		ВСП	6,85	80,33	5,11	0,982	0,984	36,21
	k=0,4	БВСП	8,48	104,75	5,81	0,974	0,978	33,81
		ВСП	7,81	103,34	5,72	0,974	0,978	33,79
	k=1	БВСП	12,23	157,36	7,04	0,955	0,962	29,85
		ВСП	10,55	155,80	6,88	0,955	0,962	29,88
Barbara	k=0,2	БВСП	6,52	31,13	7,52	0,977	0,979	35,76
		ВСП	6,86	31,50	7,49	0,977	0,979	35,72
	k=0,4	БВСП	8,06	42,80	8,15	0,968	0,970	33,58
		ВСП	8,05	43,15	8,09	0,968	0,970	33,58
	k=1	БВСП	11,51	74,46	9,28	0,943	0,948	29,94
		ВСП	11,03	75,14	9,16	0,943	0,948	29,92
Goldhill	k=0,2	БВСП	6,51	32,49	7,54	0,978	0,977	35,60
		ВСП	6,71	32,24	7,49	0,978	0,977	35,59
	k=0,4	БВСП	8,06	42,07	8,29	0,969	0,967	33,37
		ВСП	7,92	41,32	8,20	0,969	0,968	33,45
	k=1	БВСП	11,50	67,27	9,57	0,947	0,943	29,99
		ВСП	10,84	65,84	9,43	0,948	0,944	30,02
Lenna	k=0,2	БВСП	6,69	25,21	8,90	0,969	0,977	34,97
		ВСП	7,14	24,89	8,80	0,970	0,977	34,99
	k=0,4	БВСП	8,35	34,36	9,55	0,956	0,966	32,87
		ВСП	8,25	33,93	9,41	0,956	0,966	32,82
	k=1	БВСП	12,01	59,49	10,67	0,923	0,939	29,48
		ВСП	10,65	59,08	10,45	0,923	0,940	29,46
Peppers	k=0,2	БВСП	6,64	30,19	8,58	0,969	0,977	35,09
		ВСП	6,67	30,28	8,41	0,969	0,977	35,07
	k=0,4	БВСП	8,26	39,04	9,28	0,956	0,968	33,01
		ВСП	7,76	38,83	9,06	0,957	0,968	33,02
	k=1	БВСП	11,85	63,93	10,40	0,925	0,943	29,57
		ВСП	10,55	63,89	10,03	0,925	0,943	29,51

цированной версией AGU-M для методов ВСП и БВСП. Исходя из анализа данных, можно сделать вывод, что при малых интенсивностях помех ($k=0,2$, $\sigma_a^2=20$) кодер AGU-M обеспечивает лучшее визуальное качество декодированных изображений как для метода БВСП, так и для метода ВСП. Для методов ВСП и БВСП полученный выигрыш составляет приблизительно 3-3,6 дБ согласно метрике PSNR-HVS-M для высоко-текстурных и 0,7-2 дБ для низко-текстурных изображений. При этом получаемый КС оказывается несколько меньшим, чем для кодера AGU.

С увеличением интенсивности помех (см. слу-

чай $k=1$) применение кодера AGU-M оказывается менее эффективным по сравнению с кодером AGU для низко-текстурных изображений. Для высоко-текстурных изображений преимущество AGU-M согласно метрике PSNR-HVS-M составляет около 1-2 дБ. Эти результаты хорошо согласуются с выводами, полученными при анализе значений других HVS-метрик. Характер поведения метрик визуального качества MSSIM и FSIM аналогичен поведению метрики PSNR-HVS-M, которое было проанализировано выше.

Сравнивая эффективность сжатия кодерами ADCT и ADCT-M (табл. 4) при малых уровнях по-

Таблица 2

Сравнение эффективности предлагаемых методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера ADCT-M

Изображение	Параметры шума	Метод	ШК	СКОш	КС	MSSIM	FSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	k=0,2	БВСП	6,98	61,83	6,02	0,976	0,984	35,34
		ВСП	6,45	61,74	5,94	0,976	0,984	35,25
	k=0,4	БВСП	8,79	77,62	6,77	0,968	0,978	32,96
		ВСП	7,76	77,17	6,64	0,968	0,978	32,91
	k=1	БВСП	12,77	113,75	8,10	0,946	0,964	29,33
		ВСП	10,55	112,94	7,85	0,946	0,964	29,26
Baboon	k=0,2	БВСП	6,78	80,71	5,30	0,982	0,984	36,41
		ВСП	6,85	79,45	5,25	0,982	0,985	36,42
	k=0,4	БВСП	8,48	103,89	5,97	0,975	0,978	33,94
		ВСП	7,81	102,07	5,88	0,975	0,978	33,91
	k=1	БВСП	12,23	153,78	7,25	0,956	0,963	30,02
		ВСП	10,55	151,91	7,11	0,957	0,964	29,99
Barbara	k=0,2	БВСП	6,52	28,34	8,00	0,980	0,980	36,03
		ВСП	6,86	28,49	7,95	0,980	0,980	35,99
	k=0,4	БВСП	8,06	38,60	8,66	0,971	0,973	33,90
		ВСП	8,05	38,77	8,61	0,971	0,972	33,88
	k=1	БВСП	11,51	66,30	9,89	0,949	0,951	30,25
		ВСП	11,03	66,74	9,76	0,948	0,951	30,20
Goldhill	k=0,2	БВСП	6,51	30,86	7,79	0,979	0,979	35,75
		ВСП	6,71	30,54	7,73	0,979	0,979	35,77
	k=0,4	БВСП	8,06	39,48	8,60	0,970	0,968	33,54
		ВСП	7,92	38,78	8,52	0,971	0,969	33,58
	k=1	БВСП	11,50	61,14	9,95	0,950	0,945	30,14
		ВСП	10,84	59,94	9,82	0,951	0,946	30,19
Lenna	k=0,2	БВСП	6,69	22,95	9,37	0,972	0,978	35,19
		ВСП	7,14	22,61	9,26	0,972	0,978	35,22
	k=0,4	БВСП	8,35	30,74	10,08	0,960	0,968	33,12
		ВСП	8,25	30,23	9,94	0,961	0,968	33,14
	k=1	БВСП	12,01	51,28	11,36	0,930	0,942	29,77
		ВСП	10,65	50,50	11,18	0,931	0,943	29,81
Peppers	k=0,2	БВСП	6,64	27,56	9,11	0,971	0,979	35,35
		ВСП	6,67	27,51	8,97	0,971	0,978	35,35
	k=0,4	БВСП	8,26	34,99	9,88	0,960	0,970	33,27
		ВСП	7,76	34,69	9,69	0,961	0,970	33,27
	k=1	БВСП	11,85	56,40	11,09	0,932	0,945	29,84
		ВСП	10,55	55,66	10,72	0,932	0,946	29,84

мех, видно, что кодер ADCT-M обеспечивает лучшее визуальное качество изображений после декомпрессии при сравнимых КС.

Сравнивая эффективность сжатия кодерами ADCT и ADCT-M (табл. 4) при малых уровнях помех, видно, что кодер ADCT-M обеспечивает лучшее визуальное качество изображений после декомпрессии при сравнимых КС. Для метода БВСП выигрыш, согласно метрике PSNR-HVS-M, составляет от 0,17 дБ (для низко-текстурных изображений) до 2,39 дБ (для высоко-текстурных изображений). Выигрыш становится больше, если уровень помех снижается.

Метод ВСП обеспечивает выигрыш для кодера ADCT-M от 0,06 дБ и до 2,34 дБ для низко-текстурных и высоко-текстурных изображений соответственно.

С увеличением уровня помех наблюдается ситуация, аналогичная поведению кодеров AGU и AGU-M, но при сравнимых КС. Для низко-текстурных изображений кодер ADCT оказывается более эффективным. Для высоко-текстурных изображений целесообразно применять кодер ADCT-M. Он обеспечивает эффективность приблизительно на 1,2 дБ для метода БВСП и около 1,5 дБ для метода с использованием ВСП.

Если первоочередной задачей является обеспечение более высоких КС и сжатия в окрестности ОПТ в соответствии с традиционными метриками, то необходимо устанавливать ШК как 2σ ($2X$) или немного выше. При этом увеличение КС составляет около 1,5-2 раз по сравнению с данными, представленными в таблицах, при уменьшении визуального качества на 1-2 дБ в соответствии с метрикой PSNR-HVS-M. Ухудшение визуального качества особенно характерно для высоко-текстурных изображений, для низко-текстурных же может наблюдаться обратная ситуация (рис. 2-3).

Таблица 3
Сравнение эффективности сжатия в окрестности ОПТ для кодеров AGU и AGU-M

Изображение	AGU			AGU-M		
	КС	СКОш	PSNR-HVS-M	КС	СКОш	PSNR-HVS-M
k=0,2						
БВСП						
Airfield	6,61	71,57	32,01	5,76	64,65	35,14
Baboon	5,71	76,81	32,59	5,16	81,33	36,26
Barbara	11,81	31,06	34,07	7,52	31,13	36,03
Goldhill	11,54	37,45	33,13	7,54	32,49	35,60
Lenna	18,01	23,70	34,47	8,90	25,21	34,97
Peppers	14,49	29,76	34,05	8,58	30,18	35,09
ВСП						
Airfield	6,47	70,50	32,02	5,67	64,34	35,06
Baboon	5,66	75,63	32,66	5,11	80,33	36,21
Barbara	11,81	30,93	34,11	7,49	31,50	35,72
Goldhill	11,13	36,88	33,25	7,49	32,24	35,59
Lenna	17,28	23,16	34,61	9,26	22,61	34,99
Peppers	13,95	29,49	34,09	8,41	30,28	35,07
k=1						
БВСП						
Airfield	12,27	138,67	27,00	7,85	120,21	29,15
Baboon	9,31	168,93	27,17	7,04	157,36	29,85
Barbara	18,05	65,24	29,65	9,89	66,30	30,25
Goldhill	20,93	67,28	28,84	9,95	67,27	29,99
Lenna	31,13	42,96	30,29	10,67	59,49	29,48
Peppers	26,05	51,67	30,00	10,40	63,93	29,57
ВСП						
Airfield	11,39	134,34	27,15	7,58	119,48	29,19
Baboon	8,97	164,76	27,35	6,88	155,80	29,88
Barbara	18,48	62,22	29,74	9,16	75,14	29,92
Goldhill	20,07	64,01	29,03	9,43	65,84	30,02
Lenna	28,78	40,70	30,58	10,45	59,08	29,46
Peppers	24,83	49,51	30,03	10,03	63,89	29,51

Таким образом, можно утверждать, что применение кодеров AGU-M и ADCT-M, ориентированных на обеспечение высокого визуального качества сжатых изображений, целесообразно при относительно низком уровне помех. Можно рекомендовать

использовать AGU-M и ADCT-M, если σ^2 меньше 100 для 8-битного представления изображений или, в более общем виде, при ПОСШ для исходного изображения выше 28 дБ.

Таблица 4
Сравнение эффективности сжатия в окрестности ОПТ для кодеров ADCT и ADCT-M

Изображение	ADCT			ADCT-M		
	КС	СКОш	PSNR-HVS-M	КС	СКОш	PSNR-HVS-M
k=0,2						
БВСП						
Airfield	6,01	59,02	33,24	6,02	61,83	35,34
Baboon	5,02	61,83	34,02	5,30	80,71	36,41
Barbara	9,92	26,39	35,31	8,00	28,34	36,03
Goldhill	9,18	32,84	34,24	7,79	30,86	35,75
Lenna	13,28	21,93	35,38	9,37	22,95	35,19
Peppers	11,64	26,24	35,14	9,11	27,56	35,35
ВСП						
Airfield	5,87	58,48	33,20	5,94	61,74	35,25
Baboon	4,98	60,89	34,08	5,25	79,45	36,42
Barbara	9,89	26,14	35,39	7,95	28,49	35,99
Goldhill	9,05	32,19	34,40	7,73	30,54	35,77
Lenna	12,90	21,30	35,54	9,26	22,61	35,22
Peppers	11,36	25,49	35,29	8,97	27,51	35,35
k=1						
БВСП						
Airfield	9,90	119,85	28,08	8,10	113,75	29,33
Baboon	7,79	141,75	28,39	7,25	153,78	30,02
Barbara	14,14	57,60	30,66	9,89	66,30	30,25
Goldhill	14,61	63,89	29,64	9,95	61,14	30,14
Lenna	19,45	43,00	31,22	11,36	51,28	29,77
Peppers	11,64	26,24	35,14	11,09	56,40	29,84
ВСП						
Airfield	9,39	115,61	28,23	7,85	112,94	29,26
Baboon	7,54	138,12	28,54	7,11	151,91	29,99
Barbara	14,24	55,40	30,78	9,76	66,74	30,20
Goldhill	14,34	59,35	29,93	9,82	59,94	30,19
Lenna	29,93	39,79	31,44	11,18	50,50	29,81
Peppers	16,93	46,31	31,14	10,72	55,66	29,84

Заключение

Рассмотрены зависимости значений метрик качества, включая HVS-метрики, от ШК. Проанализированы подходы к сжатию изображений с и без использования гомоморфных ВСП. Предложены методы автоматического сжатия изображений, искаженных сигнально-зависимыми помехами, в окрестности ОПТ.

Показано, что при большом уровне помех целесообразно использовать подход с использованием ВСП для любого из рассмотренных кодеров. При

малом уровне помех имеет смысл применять кодеры AGU-M и ADCT-M.

В дальнейшем планируется применить данные методы для трехмерных кодеров, ориентированных на сжатие многоканальных изображений [25].

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 12-07-00762-а и 12-07-00388-а.

Литература

1. Чобану, М.К. Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов [Текст] / М.К. Чобану. – М.: Техносфера, 2009. – 480 с.
2. Фильтрация цветных изображений: когда она необходима? [Текст] / В.В. Лукин, Д.В. Февралев, Н.Н. Пономаренко, С.К. Абрамов // Радиотехника та комп'ютерні системи. – 2010. – № 4 (44). – С. 65-74.
3. Noise estimation from a single image [Text] / C. Liu, W.T. Freeman, R. Szeliski, S.B. Kang // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – June 2006. – P. 901-908.
4. Сжатие изображений дистанционного зондирования без визуально заметных искажений [Текст] / С.С. Кривенко, В.В. Лукин, М.С. Зряхов, А.А. Зеленский // Радиотехніка. – 2009. – Том 159. – С. 248-254.
5. Bo, L. Remote-Sensing Image Compression Using Two-Dimensional Oriented Wavelet Transform [Text] / L. Bo, Y. Rui // Geoscience and Remote Sensing – 2011. – Vol. 49(1). – P. 236-250.
6. Al-Chaykh, O.K. Lossy compression of noisy images [Text] / O.K. Al-Chaykh, R.M. Mersereau // IEEE Transactions on Image Processing. – Dec. 1998. – Vol. 7 (12). – P. 1641-1652.
7. Shahnaz, R. Image Compression in Signal-Dependent Noise [Text] / R. Shahnaz, J.F. Walkup, T.F. Krile // Applied Optics. – 1999. – Vol. 38. – P. 560-567.
8. Chang, S.G. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression [Text] / S.G. Chang, B. Yu, M. Vetterli // IEEE Trans. on Image Processing. – Vol. 9 (9). – Sep. 2000. – P. 1532-1546.
9. Lim, S.H. Characterization of Noise in Digital Photographs for Image Processing [Text] / S.H. Lim // Proceedings of Digital Photography I. – SPIE 6069. – 10 Feb. 2006. – P. 219-228.
10. Lossy compression of images with additive noise [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Zriakhov, K. Egiazarian etc. // Proceedings of International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. – Antwerpen, Belgium, Sept. 2005. – P. 381-386.
11. Estimation of accesible quality in noisy image compression [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Zriakhov, K. Egiazarian, J. Astola // EUSIPCO. – Italy, 2006. – 4 p.
12. Lossy Compression of Noisy Images Based on Visual Quality: a Comprehensive Study [Text] / N. Ponomarenko, S. Krivenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2010. – Article ID 976436. – 13 p.
13. Quasi-optimal compression of noisy optical and radar images [Text] / V. Lukin, N. Ponomarenko, M. Zriakhov, A. Zelensky etc. // Proc. SPIE Conf. Image and Signal Proc. for Remote Sensing XII. – Sweden, 2006. – SPIE Vol. 6365. – 12 p.
14. An Automatic Approach to Lossy Compression of Images Corrupted by Poisson Noise [Text] / V.V. Lukin, M.S. Zriakhov, N.N. Ponomarenko, A. Kaarna // Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium MRRS-2008. – Kiev. – Sept 2008. – P. 139-142.
15. On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions [Text] / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, V. Lukin // Proc. of the Third Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics. – Scottsdale, Arizona, USA. – Jan. 2007. – 4 p.
16. Wang, Z. Multi-scale structural similarity for image quality assessment [Text] / Z. Wang, E.P. Simoncelli, A.C. Bovik // IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. – 2003. – Vol. 6. – 5 p.
17. Особенности сжатия изображений при сигнално-зависимых помехах [Текст] / М.С. Зряхов, С.С. Кривенко, С.К. Абрамов, Н.Н. Пономаренко, В.В. Лукин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 2(79). – С. 87-95.
18. Foi, A. Pointwise Shape-Adaptive DCT Image Filtering and Signal-Dependent Noise Estimation [Text] / A. Foi. – Tampere, Finland. – 2007. – 194 p.
19. Murtagh, F. Astronomical image and signal processing [Text] / F. Murtagh, J.L. Starck // Signal Processing Magazine, IEEE. – 2001. – Vol.18 (2). – P. 30-40.
20. Kerekes, J.P. Hyperspectral Imaging System Modeling [Text] / J.P. Kerekes, J.E. Baum // Lincoln Laboratory Journal. – 2003. – Vol. 14. – P. 117-130.
21. Автоматическое определение характеристик помех на изображениях: методы и их точность [Текст] / В.В. Лукин, М.Л. Усс, С.К. Абрамов, М.К. Чобану // Труды Междунар. конф. DSPA-2012. – Т.2. – С. 274-277.
22. Автоматическое сжатие изображений при сигнално-зависимых помехах в окрестности оптимальной рабочей точки [Текст] / А.Н. Земляченко, Р.А. Кожемякин, С.К. Абрамов, В.В. Лукин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 3(90). – С. 99-107.
23. FSIM: A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment [Text] / Lin Zhang, Lei Zhang, X. Mou, D. Zhang // IEEE Transactions on Image Processing. – Aug. 2011. – Vol. 20 (8). – P. 2378-2386.
24. Lossy Compression of images without visible distortions and its applications [Text] / V. Lukin, M. Zriakhov, S. Krivenko, N. Ponomarenko etc. // Processing of ICSP 2010. – Beijing, China, Oct. 2010. – 4 p.

25. *Visual Quality of Lossy Compressed Images [Text]* / N. Ponomarenko, S. Krivenko, V. Lukin, K. Egiazarian // *Proceedings of CADSM2009, Svalyava*. – Feb. 2009. – P. 137-142.

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

27. *ADCT: A new high quality DCT based coder for lossy image compression [Электронный ресурс]* /

N. Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *CD ROM Proceedings of LNLA*. – Switzerland. – 2008. – 6 p. – Режим доступа к журн.: <http://www.lnla.com/2008>. – 4.10.2012 г.

28. *Абрамов, С.К. Проблемы и методы автоматического определения характеристик помех на изображениях [Текст]* / С.К. Абрамов, А.А. Зеленский, В.В. Лукин // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – № 2(36). – С. 25-34.

Поступила в редакцию 15.10.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Проектирование радиоэлектронных систем летательных аппаратов» Э.Н. Хомяков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков.

АВТОМАТИЧНЕ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ В ОКОЛИЦІ ОПТИМАЛЬНОЇ РОБОЧОЇ ТОЧКИ З УРАХУВАННЯМ ВІЗУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СПРИЙНЯТТЯ ЛЮДИНИ ПРИ СИГНАЛЬНО-ЗАЛЕЖНИХ ЗАВАДАХ

О.М. Земляченко, Р.О. Кожемякін, С.К. Абрамов, В.В. Лукін, М.К. Чобану

Розглянуто підходи до стиснення зображень з втратами на основі візуальної моделі сприйняття людини при сигнально-залежних завадах. Проведено порівняння ефективності стиснення зображень, як з урахуванням візуальної моделі сприйняття людини, так і без нього, у відповідності з декількома критеріями. Досліджено візуальну якість зображень після застосування гомоморфних варіаційно-стабілізуючих перетворень. Показано, що застосування варіаційно-стабілізуючих перетворень забезпечує перевагу, коли превалюючим є сигнально-залежний тип завад. Надано рекомендації щодо вибору параметрів методів стиснення на практиці для забезпечення стиснення зображень в околі оптимальної робочої точки.

Ключові слова: сигнально-залежний шум, варіаційно-стабілізуючі перетворення, стиснення зображень з втратами.

AUTOMATIC IMAGE COMPRESSION IN THE NEIGHBORHOOD OF OPTIMAL OPERATION POINT BASED ON MODEL OF HUMAN VISION SYSTEM FOR SIGNAL-DEPENDENT NOISE

A.N. Zemliachenko, R.A. Kozhemiakin, S.K. Abramov, V.V. Lukin, M.K. Tchobanou

The approaches to lossy compression based on human vision system for images corrupted by signal-dependent noise are analyzed. The efficiency of image compression from both the human visual system and without it according to several criteria is compared. Visual quality of the images after applying the homomorphic variance-stabilizing transformations is studied. It is shown that the use of variance-stabilizing transformations provides advantage when the predominant is signal-dependent type of noise. Recommendations on selecting the parameters of compression methods for the neighborhood of optimal operation point in practice are given.

Keywords: signal-dependent noise, variance-stabilizing transformations, lossy image compression.

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

Кожемякин Руслан Александрович – аспирант каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: Arctic818@gmail.com.

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

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

Чобану Михаил Константинович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Электрофизики информационных систем», Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: cmk2@orc.ru.