

УДК 621.3:681.34

А.Н. ЗЕМЛЯЧЕНКО, Р.А. КОЖЕМЯКИН, С.К. АБРАМОВ, В.В. ЛУКИН

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

АВТОМАТИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ СИГНАЛЬНО-ЗАВИСИМЫХ ПОМЕХАХ В ОКРЕСТНОСТИ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ

Проанализированы подходы к сжатию с потерями изображений, искаженных сигнально-зависимыми помехами. Проведено сравнение эффективности сжатия в соответствии с несколькими критериями при прямом применении кодеров к изображениям и при использовании гомоморфных вариационно-стабилизирующих преобразований. Показано, что при высоком уровне помех применение вариационно-стабилизирующих преобразований даёт небольшое преимущество. Даны рекомендации по выбору параметров методов сжатия на практике для обеспечения сжатия изображений в окрестности оптимальной рабочей точки.

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

Введение

Во многих приложениях сжатие изображений рассматривается в предположении, что помехи отсутствуют [1]. Однако на практике помехи с большим или меньшим уровнем присутствуют на любых изображениях, хотя на некоторых типах изображений (например, цифровых фотографиях высокого качества) шум может быть визуально незаметен [2, 3]. Для гиперспектральных данных дистанционного зондирования (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 [4]. Однако в любом случае присутствие помех вынуждает использовать специальные подходы к их учету при сжатии изображений. В частности, при использовании сжатия без потерь присутствие помех резко снижает достигаемые коэффициенты сжатия (КС) [5]. В связи с этим целесообразно использовать сжатие с потерями, которое, во-первых, позволяет обеспечить гораздо более высокие значения КС, и, во-вторых, характеризуется рядом других достоинств.

Одним из этих достоинств является эффект фильтрации, достигаемый при определенным образом устанавливаемых параметрах алгоритмов сжатия с потерями. Этот эффект был впервые отмечен в работах [6 – 8], причем он наблюдается для методов сжатия, основанных на использовании различных ортогональных преобразований [6 – 9]. Важной задачей при этом является выбор параметров кодера таким образом, чтобы сжатие осуществлялось в окрестности оптимальной рабочей точки (ОРТ) [6, 10 – 14], то есть таким образом, чтобы декодированное

изображение было «максимально похожим» на истинное в соответствии с выбранным критерием. Существование ОРТ было продемонстрировано для разных типов помех [6, 10, 13, 14], методов сжатия на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП) [11, 13, 14] и вейвлетов [8, 12], традиционных критериев среднеквадратической ошибки (СКОш) и пикового отношения сигнал-шум (ПОСШ) [7, 13, 14], а также метрик, учитывающих визуальное качество [13], в частности PSNR-HVS-M [15] и MSSIM [16]. Однако проблемой остается автоматическое обеспечение сжатия в окрестности ОРТ при сложных видах сигнально-зависимых помех [17].

В принципе, эта проблема успешно решена для аддитивных помех [10 – 12], причем если предложенные сначала процедуры были итеративными [10], то позднее для кодеров на основе ДКП удалось разработать метод определения шага квантования и последующего сжатия без итераций [11, 12]. Ситуация для простых видов сигнально-зависимых помех – мультипликативного и пуассоновского шума – является более сложной. Однако для изображений, искаженных этими типами помех, существуют вариационно-стабилизирующие гомоморфные преобразования, позволяющие после соответствующего прямого преобразования получить изображения, искаженные аддитивными помехами [13, 14, 18, 19]. Это позволяет выполнять сжатие с автоматическим обеспечением компрессии в окрестности ОРТ благодаря многоэтапной процедуре обработки, включающей применение прямого вариационно-стабилизирующего преобразование и последующее сжатие на этапе кодирования, декомпрессию и обратное преобразование на этапе декодирования.

Вместе с тем, реализация автоматического сжатия в окрестности ОПТ для изображений, искаженных сигнально-зависимыми помехами более сложного вида [17, 20] остается проблематичной. Во-первых, по-прежнему неясно, можно ли обойтись без выполнения вариационно-стабилизирующих преобразований. Во-вторых, не изучены особенности сжатия при использовании сложных вариационно-стабилизирующих преобразований типа обобщенного преобразования Энскомба [21].

Отметим, что рассмотрение случая сложной сигнальной зависимости характеристик помех становится все более важным для практики. Такие модели в последнее время признаны более адекватными, особенно для изображений, формируемых сенсорами на основе ПЗС [20-23], в частности, гиперспектральными системами дистанционного зондирования нового поколения. Поэтому **целью данной статьи** является исследование характеристик сжатия с потерями изображений, искаженных помехами со сложной сигнально-зависимой структурой, а также разработка алгоритмов обеспечения сжатия в окрестности ОПТ.

1. Модель изображений и помех

В современных системах формирования изображений (СФИ) на основе ПЗС-матриц основными источниками шумов являются фотонный шум, возникающий в результате дискретной природы света (принцип формирования изображения основан на подсчете количества детектированных фотонов), который подчиняется пуассоновской статистике и тепловой шум (возникающий в результате нагрева аппаратуры), подчиняющийся гауссовской статистике. В результате, шум, искажающий изображение, имеет сложную природу и описывается моделью одновременно присутствующих сигнально-зависимой (квази-пуассоновской) и аддитивной сигнально-независимой (гауссовской) компонент:

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

где I_{ij} – значение зашумленного изображения в ij -м пикселе;

$n_{ij}^{\text{пуас}}$ – пуассоновская компонента шума;

$I_{ij}^{\text{ист}}$ – истинное значение незашумленного изображения;

k – коэффициент коррекции динамического диапазона изображения;

$n_{ij}^{\text{адд}}$ – аддитивная компонента шума с дисперсией σ_a^2 и математическим ожиданием g , которое полагается равным нулю.

Тогда дисперсия помех для ij -го пикселя равна $\sigma_{ij}^2 = kI_{ij}^{\text{ист}} + \sigma_a^2$. Шумы для компонент полагались независимыми и пространственно-некоррелированными.

Исследование проводилось по тестовым изображениям Baboon, Barbara, Goldhill, Airfield, Lenna, Peppers, на которые накладывался искусственно сгенерированный шум согласно модели (1) с параметрами $k=0,2; 0,4; 1$ и $\sigma_a^2=20$.

На рис. 1 представлено исходное (а) и зашумленное (б) изображение Airfield.



а



б

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

2. Методы контроля эффективности при сжатии с потерями

Особенностью сжатия с потерями является эффект подавление помех при задании определенных управляющих параметров, позволяющих сжимать изображения в окрестности ОПТ.

Для контроля эффективности сжатия и подавления помех будем использовать как упомянутые ранее традиционные критерии качества СКОш и ПОСШ, так и метрики, учитывающие визуальное качество, PSNR-HVS-M [15] и MSSIM [16].

Особенностью применения данных критериев является то, что для набора тестовых изображений, искаженных искусственно сгенерированным шумом, имеется возможность сравнить декодированное зашумленное изображение $I_{ij}^{\text{дек}}$ и исходное незашумленное $I_{ij}^{\text{ист}}$.

СКОш^{ЭТ} рассчитывается для эталонного $\{I_{ij}^{\text{ист}}\}$ и декодированного $\{I_{ij}^{\text{дек}}\}$ изображений как

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

где I, J – количество пикселей в строках и столбцах изображений.

ПОСШ при 8-битном представлении истинного изображения определяется как

$$\text{ПОСШ}^{\text{ЭТ}} = 10 \lg(255^2 / \text{СКОш}^{\text{ЭТ}}). \quad (3)$$

Координаты минимума метрики СКОш^{ЭТ} и максимума метрики ПОСШ^{ЭТ} являются ОПТ. Ее можно характеризовать коэффициентом сжатия $K_{\text{ОПТ}}$, $\text{bpr}_{\text{ОПТ}}$ и шагом квантования $\text{ШК}_{\text{ОПТ}}$, поскольку эти параметры взаимосвязаны.

Метрика PSNR-HVS-M учитывает особенности зрительной системы человека, в её основе лежит дискретное косинусное преобразование (ДКП). Значения метрики PSNR-HVS-M измеряются в децибелах, большие значения соответствуют лучшему визуальному качеству.

Метрика MSSIM основана на вейвлет-преобразовании, диапазон изменения ее значений лежит в пределах от 0 (очень плохое качество) до 1 (отличное качество).

3. Рассматриваемые методы и процедуры сжатия

В данной работе исследования проводились с применением кодеров AGU [24] и ADCT [25].

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

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

Для определения оптимального шага квантования (ШК), который является управляющим параметром для данных кодеров, при котором проявляется эффект подавления помех, рассмотрим сжатие тестовых изображений в диапазоне изменения ШК от 1 до 120 с шагом 1 (рис. 2, 3).

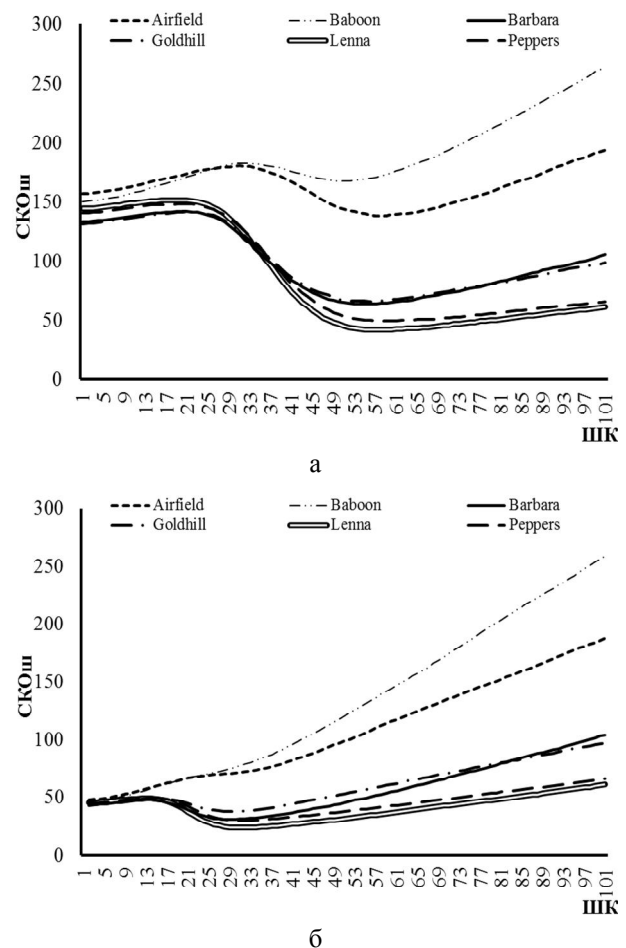
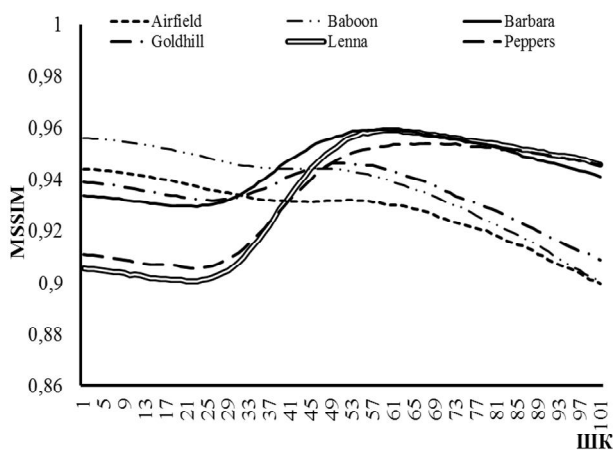


Рис. 2. Зависимости СКОш от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером AGU, при $\sigma_a^2=20, k=1$ (а) и $\sigma_a^2=20, k=0,2$ (б)

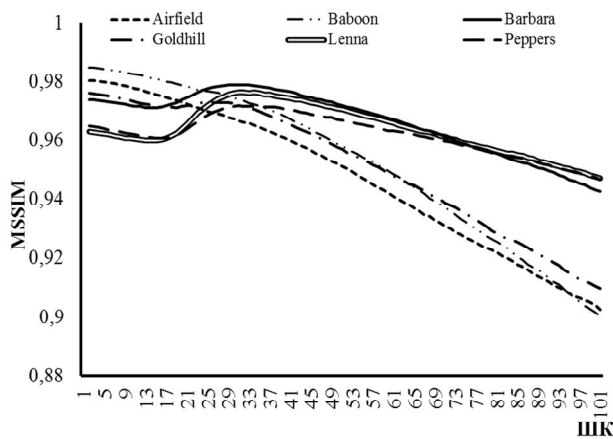
Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 2, СКОш изменяется в широких пределах, при этом увеличение ШК приводит в большинстве случаев к росту СКОш за исключением диапазона ШК (окрестность ОПТ) в котором наблюдается частич-

ное подавление помех, характеризующееся уменьшением СКОш.

При этом для изображений с малым количеством текстурных участков (Lenna, Peppers) значения СКОш значительно ниже, чем для высоко-текстурных (Airfield, Baboon). Соответственно для них эффект фильтрации больше. При больших значениях параметров шума (рис.2, а) ОРТ имеет выраженный характер для всех тестовых изображений, но с уменьшением интенсивности шума (рис. 2, б) ОРТ выражена менее явно или даже отсутствует. Для таких изображений желательно выполнять сжатие с потерями так, чтобы они были невелики.



а



б

Рис. 3. Зависимости значений метрики MSSIM от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером AGU при $\sigma_a^2=20, k=1$ (а) и $\sigma_a^2=20, k=0,2$ (б)

Согласно метрике MSSIM (рис. 3, а) координаты максимумов практически совпадают с соответствующими координатами минимумов метрики СКОш. ОРТ более выражена для простых изображений (Peppers, Lenna, Barbara). С увеличением количества текстурных объектов и границ на изображении ОРТ имеет менее выраженный характер (Ва-

boon, Airfield). Для ситуации при $k=0,2$ (рис. 3, б) характер изменения кривых остался тот же, но эффекты фильтрации проявляются в меньшей степени.

4. Предлагаемые процедуры автоматического сжатия в окрестности ОРТ

В табл. 1 и 2 представлены значения шага квантования для ОРТ ($ШК_{ОРТ}$) и полученные для ОРТ значения КС ($КС_{ОРТ}$). При $k=1, \sigma_a^2=20$ (табл. 1) значения $ШК_{ОРТ}$ лежат в пределах от 51 до 58, а при $k=0,2, \sigma_a^2=20$ (табл. 2) значения $ШК_{ОРТ}$ существенно меньше и лежат в пределах от 24 до 31. Поэтому можно предположить, что $ШК_{ОРТ}$ зависит как от свойств самого изображения (в меньшей степени), так и от свойств (уровня) помех. При чисто аддитивных помехах в работах [17] было предложено устанавливать шаг квантования как $4,5\sigma_a$. При сигнально-зависимых помехах можно для тестовых изображений рассчитать эквивалентную дисперсию помех в виде

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} - I_{ij}^{\hat{n}0})^2 / IJ = \\ &= \sigma_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{\hat{n}0} \cdot k) / IJ . \end{aligned} \tag{4}$$

Рассчитаем $ШК_B$ как $4,5\sigma$ и проверим, какие значения КС ($КС_B$) при этом получаются. Значения $\sigma^2, ШК_B$ и $КС_B$ представлены в табл. 1 и 2. Как показывает анализ, вычисленные значения параметра $ШК_B$ и полученные значения $КС_B$ с небольшой погрешностью соответствуют оптимальным параметрам сжатия. С возрастанием интенсивности шума (табл. 1) для простых изображений наблюдаются несколько заниженное $ШК_B$ относительно $ШК_{ОРТ}$, но при этом условие попадания в окрестность ОРТ соблюдается. Так как в предложенном методе ШК зависит от уровня помех, то соответственно с их увеличением КС тоже увеличивается.

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

| Изобр. | I_{cp} | σ^2 | $КС_B$ | $КС_{ОРТ}$ | $ШК_B$ | $ШК_{ОРТ}$ |
|----------|----------|------------|--------|------------|--------|------------|
| Airfield | 143 | 163 | 12,25 | 12,5 | 57,45 | 58 |
| Baboon | 129 | 149 | 9,27 | 8,10 | 54,93 | 51 |
| Barbara | 112 | 132 | 18,00 | 20,8 | 51,70 | 55 |
| Goldhill | 112 | 132 | 20,90 | 26,0 | 51,70 | 56 |
| Lenna | 124 | 144 | 31,11 | 35,0 | 54,00 | 57 |
| Peppers | 120 | 140 | 25,95 | 33,6 | 53,24 | 58 |

Таблица 2
Сжатия кодером AGU в области ОПЭ
при $k=0,2, \sigma_a^2=20$

| Изобр. | I_{cp} | σ^2 | KC_B | KC_{OPE} | $ШК_B$ | $ШК_{OPE}$ |
|----------|----------|------------|--------|------------|--------|------------|
| Airfield | 143 | 163 | 6,61 | 6,5 | 31,39 | 31 |
| Baboon | 130 | 150 | 5,71 | 4,58 | 30,50 | 24 |
| Barbara | 112 | 132 | 11,81 | 11,60 | 29,33 | 29 |
| Goldhill | 112 | 132 | 11,54 | 11,29 | 29,31 | 29 |
| Lenna | 124 | 144 | 18,01 | 19,15 | 30,13 | 31 |
| Peppers | 120 | 140 | 24,83 | 16,06 | 29,88 | 31 |

Таким образом, имеется возможность сжимать изображения в окрестности ОПЭ, если имеются достаточно точные оценки σ^2 . Оценить эту величину можно 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. Поэтому возникает необходимость их определения непосредственно по обрабатываемому изображению и, желательно, в автоматическом режиме.

Для случая смеси пуассоновского и аддитивного шума существует метод [26], 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.

Сложность изображения влияет на KC_{OPE} , который для более простых изображений принимает большее значение в сравнении со значениями для высоко-текстурных изображений. С увеличением уровня помех $ШК_{OPE}$ увеличивается, что соответственно приводит к увеличению KC_{OPE} .

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

$$I_{ij}^{энс} = 2 / k \cdot (kI_{ij} + 3 / 8 \cdot k^2 + \sigma_a^2)^{1/2}. \quad (5)$$

Применение ОПЭ позволяет на основе имеющихся или полученных автоматически оценок параметров смешанного шума преобразовать смесь пуассоновского и аддитивного шума в чисто аддитивный с фиксированной дисперсией, равной 1. Однако применение ОПЭ к изображению приводит к уменьшению его динамического диапазона и к до-

полнительным ошибкам квантования, поскольку 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:

$$G_{ij}^p = \left[X \cdot (I_{ij}^{энс} - I_{мин}^{энс}) \right], \quad (6)$$

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

$I_{макс}^{энс}$, $I_{мин}^{энс}$ - максимальное и минимальное значения динамического диапазона изображения после ОПЭ;

$[\bullet]$ - операция округления до ближайшего целого числа.

Как отмечалось ранее, после применения прямого ОПЭ $\sigma^2 \approx 1$. Поэтому после последующего растяжения динамического диапазона (6) имеем $\sigma_{OPE}^2 \approx X^2$. Значение ШК при последующем сжатии в окрестности ОПЭ определяется как $4,5X$. После декодирования к изображению применялась операция, обратная (6):

$$G_{ij}^{ip} = \left[G_{ij}^p / X + I_{мин}^{энс} \right]. \quad (7)$$

Для возвращения динамического диапазона изображения в исходные пределы применялось обратное ОПЭ:

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

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

При данном подходе обеспечивается попадание $ШК_B$ в окрестность $ШК_{OPE}$ для разных значений интенсивности шума (табл. 3,4).

Таблица 3
Сжатие кодером AGU в области ОПЭ
с применением ОПЭ при $k=1, \sigma_a^2=20$

| Изобр. | X | KC_B | KC_{OPE} | $ШК_B$ | $ШК_{OPE}$ |
|----------|-------|--------|------------|--------|------------|
| Airfield | 10,55 | 11,39 | 10,15 | 47,49 | 45 |
| Baboon | 10,55 | 8,97 | 6,96 | 47,49 | 40 |
| Barbara | 11,01 | 18,48 | 17,7 | 49,54 | 49 |
| Goldhill | 10,84 | 20,07 | 20 | 48,79 | 48 |
| Lenna | 10,65 | 28,78 | 30,12 | 47,93 | 52 |
| Peppers | 10,55 | 24,83 | 32,65 | 47,49 | 54 |

Таблица 4
Сжатие кодером AGU в области ОПТ
с применением ОПЭ при $k=0,2$, $\sigma_a^2=20$

| Изобр. | X | КС _В | КС _{ОПТ} | ШК _В | ШК _{ОПТ} |
|----------|------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Airfield | 6,45 | 6,47 | 6,76 | 29,03 | 30 |
| Baboon | 6,85 | 5,66 | 5,61 | 30,81 | 30 |
| Barbara | 6,86 | 11,81 | 11,00 | 30,88 | 29 |
| Goldhill | 6,71 | 11,13 | 10,42 | 30,20 | 29 |
| Lenna | 7,13 | 17,28 | 18,55 | 32,11 | 33 |
| Peppers | 6,67 | 13,25 | 15,40 | 30,03 | 31 |

Сравнение данных методов, проведенное с уче-

том визуального качества и достигаемых КС, может быть выполнено на основе данных, приведенных в табл. 5, 6.

Метод без использования ОПЭ обозначен БВС, соответственно с применением ОПЭ – ВС.

Исходя из анализа данных полученных для кодера AGU (табл. 5), методы БВС и ВС обеспечивают сравнимые результаты в плане значений КС и метрик СКОш, MSSIM, PSNR-HVS-M при малых интенсивностях шума. С увеличением интенсивности шума наблюдается небольшое преимущество метода ВС согласно метрикам СКОш, MSSIM и PSNR-HVS-M при небольшом снижении КС.

Таблица 5

Сравнение эффективности предлагаемых подходов методов сжатия
в окрестности ОПТ для кодера AGU

| Изображение | Параметры шума | Метод | ШК _{рек} | СКОш | 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 |

Рассмотрим результаты для второго кодера. Для ADCT характер зависимостей СКОш от ШК (рис. 4) не изменился. Отличительной особенностью являются более низкие значения СКОш_{ОРТ}, расширение окрестности ОРТ, в которой значения СКОш практически не отличаются, а также смещение ШК_{ОРТ} относительно рекомендаций, данных для кодера AGU. Исходя из зависимостей, приведенных на рис. 4 и предложенной выше методики выбора ШК_{рек} для обеспечения автоматического сжатия кодером ADCT в области ОРТ, ШК_{рек} рекомендуется устанавливать равным $3,5X$ для метода на основе ОПЭ и равным $3,5\sigma$ для метода без использования вариационно-стабилизирующего преобразования. Результаты сжатия приведены в табл. 6.

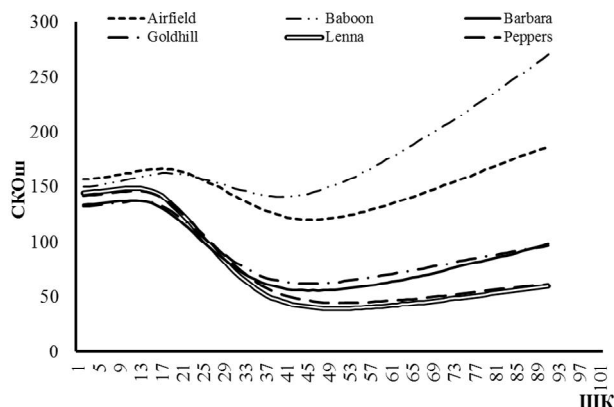


Рис. 4. Зависимости СКОш от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером ADCT, при $\sigma_a^2=20$, $k=1$

Таблица 6

Сравнение эффективности предлагаемых подходов методов сжатия в окрестности ОРТ для кодера ADCT

| Изображение | Параметры шума | Метод | ШК _{рек} | СКОш | 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 |

Из анализа приведенных в табл. 5 и 6 данных видно, что кодер ADCT обеспечивает лучшее визуальное качество в сравнении с AGU при небольшом снижении КС. Причем для сложных изображений обеспечивается более лучшее визуальное качество 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 СКОШ, полученные для кодера ADCT, меньше на 5-17% по сравнению с соответствующими значениями для кодера AGU.

Заключение

Рассмотрены зависимости значений метрик качества от ШК. Проанализированы подходы к сжатию изображений с и без использования гомоморфных преобразований. Предложены методы автоматического сжатия изображений, искаженных сигнально-зависимыми помехами, в окрестности ОПТ. Показано, что при большом уровне помех целесообразно использовать подход, основанный на автоматическом вариационно-стабилизирующем преобразовании.

В дальнейшем планируется применить данные методы для кодеров, учитывающих визуальное качество изображений [27].

Литература

1. Bovik, A. *Handbook of Image and Video Processing [Text]* / A. Bovik. – Academic Press. – USA, 2000. – 1429 p.
2. Фильтрация цветных изображений: когда она необходима? [Текст] / В.В. Лукин, Д.В. Федралев, Н.Н. Пономаренко, С.К. Абрамов // *Радиоелектронні та комп'ютерні системи*. – 2010. – Вып.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 [Текст]* / 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 – 5567.
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 // *Open access paper in: 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, USA*. – 2007. – Vol. 3. – 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 сигнально – зависимых помехах [Текст]* / М.С. Зряхов, С.С. Кривенко, С.К. Абрамов, Н.Н. Пономаренко, В.В. Лукин // *Авиационно – космическая техника и технология*. – 2011. – Вып.2(79). – С. 87 – 95.
18. Anscombe, F.J. *The Transformation of Poisson, Binomial and Negative – Binomial Data [Text]* / F.J. Anscombe // *Biometrika*. – 1948. – Vol. 35 (3–4). – P. 246 – 254.
19. *Denoising of single – look SAR images based on variance stabilization and non – local filters [Text]* / M. Makitalo, A. Foi, D. Fevralev, V. Lukin // *CD – ROM Proceedings of MMET*. – Ukraine. – Sept. 2010. – 4 p.

20. Foi, A. *Pointwise Shape – Adaptive DCT Image Filtering and Signal – Dependent Noise Estimation [Text]* / Foi Alessandro. – Tampere, Finland. – 2007. – 194 p.

21. Murtagh, F. *Astronomical image and signal processing [Text]* / F. Murtagh, J.L. Starck // *Signal Processing Magazine, IEEE*. – 2001. – Vol. 18 (2). – P. 30–40.

22. Kerekes, J.P. *Hyperspectral Imaging System Modeling [Text]* / J.P. Kerekes, J.E. Baum // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – Vol. 14. – P. 117 – 130.

23. *Local Signal – Dependent Noise Variance Estimation from Hyperspectral Textural Images [Text]* / M.Uss, B. Vozel, V. Lukin, K. Chehdi // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. – Vol. 5(2). – P. 469 – 486.

24. *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.

25. *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>. – 01.04.2012 г.

26. 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.

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

Поступила в редакцию 13.04.2012

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

АВТОМАТИЧНЕ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ СИГНАЛЬНО-ЗАЛЕЖНИХ ЗАВАДАХ В ОКОЛИЦІ ОПТИМАЛЬНОЇ РОБОЧОЇ ТОЧКИ

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

Проаналізовано підходи до стиснення з втратами зображень, які спотворено сигнально-залежними завадами. Проведено порівняння ефективності стиснення відповідно до кількох критеріїв якості при прямому застосуванні кодерів до зображень і при використанні варіаційно-стабілізуючих перетворень. Показано, що при високому рівні завад застосування варіаційно-стабілізуючих перетворень дає невелику перевагу. Дано рекомендації щодо вибору параметрів методів стиснення на практиці для забезпечення стиснення зображень в околі оптимальної робочої точки.

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

AUTOMATIC IMAGE COMPRESSION FOR SIGNAL-DEPENDENT NOISE IN THE NEIGHBORHOOD OF OPTIMAL OPERATION POINT

A.N. Zemliachenko, R.A. Kozhemyakin, S.K. Abramov, V.V. Lukin

The approaches of lossy compression of images corrupted by signal-dependent noise are analyzed. The efficiency of compression for coders applied directly to images and using variance-stabilizing transformations is compared. It is shown that for high level of noise the use of variance-stabilizing transformations is advantageous. Recommendations on the choice of the parameters of compression methods for the neighborhood of optimal operation point in practice are given.

Keywords: lossy image compression, signal-dependent noise.

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

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