

УДК 621.3:681.34

**М.С. ЗРЯХОВ, С.С. КРИВЕНКО, С.К. АБРАМОВ, Н.Н. ПОНОМАРЕНКО,  
В.В. ЛУКИН**

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

## **ОСОБЕННОСТИ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ СИГНАЛЬНО-ЗАВИСИМЫХ ПОМЕХАХ**

*Проанализирован эффект сжатия с потерями изображений, искаженных сигнально-зависимыми помехами. Показано, что при использовании методов сжатия как на основе дискретного косинусного преобразования, так и вейвлетов наблюдается эффект подавления помех. Однако этот эффект проявляется в различной степени для участков с различной средней интенсивностью. Для обеспечения одинаковой степени подавления предложено использовать вариационно-стабилизирующее преобразование Энскомба. Исследованы статистические характеристики остаточных помех при использовании предложенной трехэтапной процедуры на основе данного преобразования. Сформулированы задачи дальнейших исследований.*

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

### **Введение**

Большинство изображений, с которыми приходится иметь дело на практике, в той или иной степени искажены помехами [1]. Даже на оптических изображениях (например, цифровых фотографиях высокого качества) шум присутствует, однако при определенном уровне помех он может быть визуально незаметен [2]. Для других типов изображений, например сформированных радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА) аэрокосмического базирования, присутствие шума очевидно, особенно при многовзглядовом режиме обработки данных [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].

Для многих типов изображений используют сжатие с потерями. При этом могут применяться как стандартные методы сжатия (например, JPEG для цветных фотографий [5, 6] или трехмерные модификации JPEG2000 для гиперспектральных изображений [7]), так и специализированные методы на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП), вейвлетов и других преобразований [8-10].

Сжатие с потерями изображений, искаженных помехами, имеет свою специфику. Впервые она была отмечена в работах [11, 12]. Во-первых, специфика состоит в том, что при определенных условиях благодаря сжатию с потерями имеет место эффект подавления помех (фильтрации) [8, 11-15]. Во-вторых, авторами [11, 12] был обоснован подход, предусматривающий анализ не обычных кривых

(зависимости среднеквадратической ошибки (СКОш) вносимых искажений, рассчитываемой для исходного (сжимаемого) и сжатого изображений от коэффициента сжатия (КС) или другого параметра, связанного с КС, например  $\text{bpp}$  (bits per pixel)), а анализ зависимости среднеквадратической ошибки вносимых искажений, рассчитываемой для сжатого изображения относительно изображения без помех, от КС или  $\text{bpp}$ . Естественно, что получение таких кривых возможно только для сгенерированных тестовых изображений с помехами, когда в наличии имеется и «чистое» изображение без помех. Проведенный в работах [8, 11-15] анализ позволил показать существование так называемой оптимальной рабочей точки (ОРТ), для которой СКОш между сжатым изображением и соответствующим изображением без помех минимальна. Позднее возможность существования ОРТ была продемонстрирована и для других метрик качества сжатых изображений [16].

Очевидно, что для многих приложений целесообразно сжимать изображения, искаженные помехами, в окрестности ОРТ, причем делать это автоматически. Для изображений, искаженных аддитивными помехами, были предложены автоматические процедуры обеспечения сжатия в окрестности ОРТ [14-16]. Более того, аналогичные процедуры были предложены нами для случаев, когда изображение искажено неаддитивным шумом, но при этом тип помех известен и для него существует пара гомоморфных преобразований, позволяющих после прямого преобразования конвертировать неаддитивные помехи в аддитивные [17, 18]. Такими случаями являются, в частности, мультипликативные помехи, для которых можно в качестве прямого применять логарифмиче-

ское преобразование, и сигнално-зависимые Пуассоновские помехи, для которых существует преобразование Энскомба. Отметим, что аналогичные подходы используют и при фильтрации изображений, искаженных неаддитивными помехами [19].

В данной статье основное внимание уделим случаю, когда сжатие с потерями изображений с шумом осуществляется без учета характера помех. Такие ситуации возникают, когда по тем или иным причинам сложно заранее предсказать характер помех и/или оценить зависимость локальной дисперсии от локального среднего. Можно назвать несколько возможных причин возникновения таких ситуаций на практике. Первая – имеется несколько источников помех, например, помехи в фотосенсорах вследствие шума (квазиаддитивная компонента) в электронных элементах и накопления фотонов (сигнално-зависимая компонента) [20]. Вторая – в процессе формирования изображения с целью его лучшего (более наглядного) представления на экране монитора применяется некоторое гомоморфное преобразование с неизвестными параметрами, что не позволяет даже при известных статистических характеристиках шума до преобразования спрогнозировать характеристики после преобразования. Такого рода преобразования достаточно часто применяются как при получении фотоизображений, так и ультразвуковых медицинских изображений. Третья возможная причина – эффекты клиппирования [20, 21], приводящие к отличию свойств помех от исходных предположений. Отметим, что автоматическое оценивание типа и характеристик таких помех – сложная задача, и, по нашим сведениям, лишь в работе [22] сделана первая попытка решить ее с получением хотя бы приближенных оценок.

В работах [5, 17] показано, что если сжатие с потерями применяется к изображениям, искаженных такими сложными сигнално-зависимыми помехами, то эффекты фильтрации проявляются по-разному на участках с различным средним. Однако причины этого не выяснены и не определены возможные варианты, как же осуществлять сжатие. Поэтому целью данной статьи является исследование степени подавления помех сложной сигнално-зависимой структуры при сжатии с потерями изображений, искаженных таким шумом.

## 1. Модели изображений и помех

Модели сигнално-зависимых помех разнообразны. В наиболее общем случае можно говорить о том, что существует некоторая функция, описывающая зависимость дисперсии помех от истинного значения  $I_{ij}^{\text{true}}$ , то есть  $I_{ij}^n = I_{ij}^{\text{true}} + n_{ij}(I_{ij}^{\text{true}})$ , где  $I_{ij}^n$  – зашумленное (наблюдаемое) значение изображения

в  $ij$ -м пикселе,  $n_{ij}$  – шум в этом пикселе, статистические характеристики которого в общем случае зависят от  $I_{ij}^{\text{true}}$ . Характерными и часто рассматриваемыми зависимостями являются чисто мультипликативный шум, для которого дисперсия  $\sigma_{n_{ij}}^2 = \sigma_{\mu}^2 (I_{ij}^{\text{true}})^2$ , где  $\sigma_{\mu}^2$  – относительная дисперсия (ее значение обычно меньше единицы и зависит от режима работы СФИ), а также Пуассоновский шум, для которого  $\sigma_{n_{ij}}^2 = I_{ij}^{\text{true}}$ . Эти случаи достаточно хорошо изучены в литературе, по крайней мере, применительно к методам фильтрации изображений [19, 20, 23] и, частично, применительно к сжатию с потерями (см. [17, 18] и ссылки в этих работах). Более сложными являются ситуации, когда

$$\sigma_{n_{ij}}^2 = \sigma_{\mu}^2 (I_{ij}^{\text{true}})^2 + \sigma_{\text{add}}^2 \quad (1)$$

или

$$\sigma_{n_{ij}}^2 = k I_{ij}^{\text{true}} + \sigma_{\text{add}}^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{add}}^2$  – дисперсия аддитивной компоненты,  $k$  – постоянный множитель, зависящих от операций коррекции динамического диапазона, выполняемых на этапе формирования изображения [24, 25].

Продемонстрируем, как выглядят изображения, искаженные такими помехами. На рис. 1,а приведено исходное изображение Frisco, а на рис. 1,б – то же изображение, искаженное помехами с дисперсией, описываемой выражением (2), при  $\sigma_{\text{add}}^2 = 10$ ,  $k = 1$ . Видно, что помехи хорошо заметны, особенно на однородных участках изображения (на текстурных участках они заметны в меньшей степени вследствие эффектов маскирования [26]).

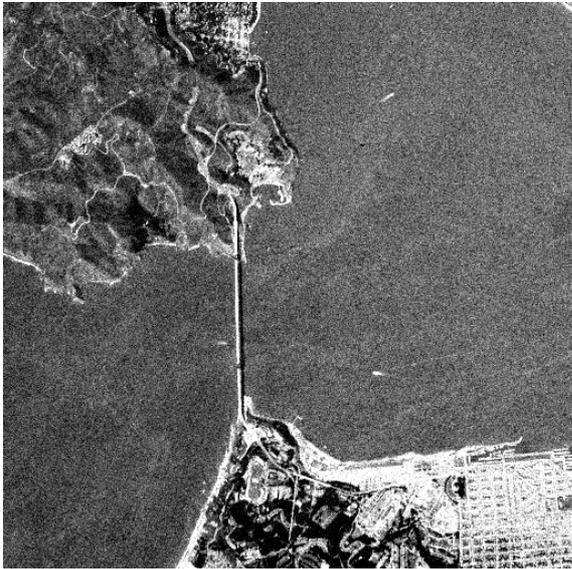
Сигнално-зависимая помеха здесь и ниже полагается пространственно-некоррелированной, независимой от сигналной компоненты и гауссовой, хотя на практике возможны и другие варианты. В частности, при малых значениях  $I_{ij}^{\text{true}}$  ПРВ Пуассоновского шума существенно отличается от ПРВ гауссовского [20], а для мультипликативных помех в изображениях, формируемых радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА) при небольшом количестве взглядов [3], ПРВ помех отлична от гауссовой при любом  $I_{ij}^{\text{true}}$ . Пространственная коррелированность помех может иметь место вследствие различных факторов, например выполнения операции demosaicing [20] при формировании оптических изображений или неопределенной пространственной дискретизации данных при формировании РСА-изображений.

Прежде, чем рассматривать результаты сжатия с потерями для изображения на рис. 1, введем также

более простое и удобное для анализа тестовое изображение «Полосы». Оно представляет собой 16 вертикальных полос каждая шириной 32 пикселя (общий размер – 512x512 пикселей). Для каждой полосы значения  $I_{ij}^{\text{true}}$  одинаковы и равны 20 (для крайней левой полосы), 30, 40, ..., 170. Иными словами, для  $\ell$ -й полосы истинное значение  $I_{\ell}$  равно  $10+10\ell$ ,  $\ell = 1, \dots, 16$ .



а



б

Рис. 1. Незашумленное (а) и зашумленное (б) изображение Frisco

Выбор такого тестового изображения обусловлен следующими причинами. Во-первых, при моделировании сигнально-зависимого шума (2) с  $\sigma_{\text{add}}^2 = 10$ ,  $k = 1$  выполняются следующие условия:

$$I_{ij}^{\text{true}} - 3\sqrt{\sigma_{\text{add}}^2 + I_{ij}^{\text{true}}} > 0 \text{ и } I_{ij}^{\text{true}} - 3\sqrt{\sigma_{\text{add}}^2 + I_{ij}^{\text{true}}} < 255$$

для любого  $I_{ij}^{\text{true}} = 20, \dots, 170$ , вследствие чего при генерировании помех практически не наблюдаются эффекты клиппирования, которые могли бы исказить получаемые результаты. Во-вторых, такой размер ширины полос удобен для анализа эффективности подавления помех в полосах при использовании для сжатия с потерями таких кодеров как JPEG и AGU [27] (доступен для скачивания на [28]). Напомним, что в кодере AGU используются блоки размером 32x32 пикселя. Таким образом, выбранный размер полос позволяет минимизировать нежелательные эффекты, обычно наблюдаемые на резких границах изображения. В-третьих, для всех полос  $\sigma_{\text{add}}^2 < I_{ij}^{\text{true}}$ , то есть сигнально-зависимые помехи являются превалирующими. Это позволяет минимизировать искажения, обусловленные клиппированием и эффектами в окрестностях резких границ.

## 2. Метрики эффективности подавления помех при сжатии с потерями

Традиционной метрикой при исследовании методов сжатия с потерями является среднеквадратическая ошибка (СКОш,  $MSE_{\text{or}}$ ), рассчитываемая для сжимаемого  $\{I_{ij}^{\text{n}}\}$  и декодированного  $\{I_{ij}^{\text{dec}}\}$  изображений как

$$MSE_{\text{or}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{\text{n}} - I_{ij}^{\text{dec}})^2 / IJ, \quad (3)$$

где  $I, J$  – количество пикселей в строках и столбцах изображений. Тогда ПОСШ при 8-битном представлении истинного изображения определяется как

$$PSNR_{\text{or}} = 10 \lg(255^2 / MSE_{\text{or}}). \quad (4)$$

Эти метрики при увеличении КС ведут себя традиционно, т.е.  $MSE_{\text{or}}$  возрастает, а  $PSNR_{\text{or}}$  убывает, никак не характеризуя эффект фильтрации. Поэтому при наличии  $\{I_{ij}^{\text{true}}\}$  также анализируют

$$MSE_{\text{nf}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{\text{true}} - I_{ij}^{\text{dec}})^2 / IJ \quad (5)$$

или

$$PSNR_{\text{nf}} = 10 \lg(255^2 / MSE_{\text{nf}}). \quad (6)$$

Метрика  $MSE_{\text{nf}}$  может при этом иметь минимум (а метрика  $PSNR_{\text{nf}}$  – максимум), координату которого называют оптимальной рабочей точкой [14-16]. Ее можно характеризовать коэффициентом сжатия  $KC_{\text{oor}}$ ,  $bpp_{\text{oor}}$  и шагом квантования  $QS_{\text{oor}}$ , поскольку эти параметры взаимосвязаны.

Для простого тестового изображения «Полосы» можно рассчитать и частные показатели эффективности подавления помех.

Так для каждой полосы можно рассчитать дисперсию остаточных помех

$$\sigma_{res \ell}^2 = \sum_{i=32(\ell-1)+3}^{32(\ell-1)+30} \sum_{j=1}^{512} (I_{ij}^{true} - I_{ij}^{dec})^2 / 512 \times 28, \quad (7)$$

а также

$$\chi_{\ell} = \sigma_{res \ell}^2 / (\sigma_{add}^2 + I_{\ell}), \quad (8)$$

где  $1/\chi_{\ell}$  показывает, во сколько раз была снижена дисперсия помех при сжатии с потерями.

Здесь необходимо отметить, что эффективность подавления помех при сжатии с потерями принципиально не может быть такой же, как при обычной фильтрации. Проще всего понять причины этого на примере сжатия JPEG и ДКП-фильтрации с применением блоков с размером 8x8 пикселей [28]. Во-первых, при ДКП-фильтрации можно использовать как неперекрывающиеся блоки (аналог сжатия JPEG), так и перекрывающиеся, причем во втором случае эффективность фильтрации заметно выше (примерно на 3 дБ по критерию ПОСШ). Во-вторых, при ДКП-фильтрации с жестким порогом обнуляются (аналогично квантованию при сжатии) только относительно малые значения ДКП-коэффициентов, а при сжатии с потерями квантуются и относительно большие значения ДКП-коэффициентов, что вносит дополнительные искажения после декомпрессии. Именно поэтому значение  $PSNR_{nf}$  в оптимальной рабочей точке примерно на 2...4 дБ меньше, чем наилучшее ПОСШ, достигаемое в результате ДКП-фильтрации (примеры можно найти в [14]).

### 3. Анализ для изображения «Полосы»

Рассмотрим сначала результаты, полученные для кодера AGU, КС для которого определяется шагом квантования ДКП-коэффициентов QS. Полученные зависимости  $\chi_{\ell}$  от номера полосы для четырех разных значений QS приведены на рис. 2. Рассматривались четыре значения QS от минимального, равного  $4,5 \sqrt{\sigma^2 + G_{16}}$ , до максимального, равного  $4,5 \sqrt{\sigma^2 + G_{16}}$  (24,65 и 60,37, соответственно). Промежуточные значения были равны 28,46 and 42,69.

Наиболее интересны полученные зависимости для малых значений QS (24,65 и 28,46). Очевидно, что для полос с относительно малой дисперсией сигнально-зависимых помех достигаются малые значения  $\chi_{\ell}$ , то есть высокая степень подавления помех. А для полос с большими  $I_{\ell}$ , то есть с высоким уровнем помех, когда

$$QS < (3...4)(\sigma_{add}^2 + I_{\ell})^{1/2}, \quad (9)$$

степень подавления помех резко снижается.

Провести анализ для кодера SPIHT [13] таким образом, чтобы сравнить полученные результаты с кодером AGU, несколько сложнее. КС для этого кодера задается опосредованно, через bpr (bpr=8/КС). Поэтому, чтобы сравнить результаты для кодеров AGU и SPIHT, значения bpr<sub>q</sub> были выбраны следующим образом.

Для четырех указанных на рис. 2 значений QS<sub>q</sub>, q=1,...,4, использованных для кодера AGU, были определены соответствующие значения КС<sub>q</sub>. Затем были рассчитаны bpr<sub>q</sub> как 8/КС<sub>q</sub> и применен кодер SPIHT с установленными bpr<sub>q</sub>.

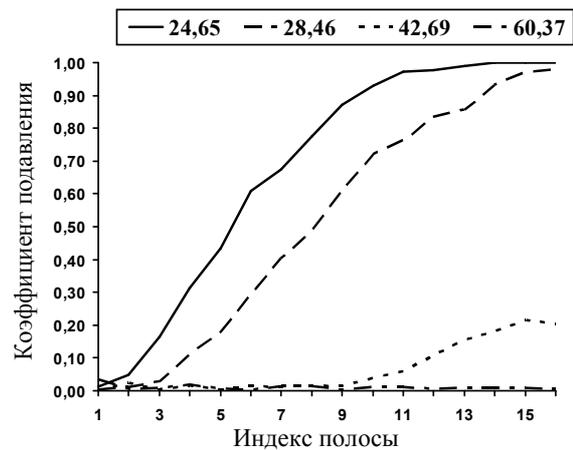


Рис. 2. Зависимости  $\chi_{\ell}$  от индекса полосы  $\ell$  для четырех различных QS, кодер AGU

Для изображения «Полосы» QS=24,65 для AGU соответствует bpr=0,885 для SPIHT, QS=28,46 соответствует bpr=0,666, QS=42,69 – bpr=0,112, и, наконец, QS=60,37 соответствует bpr=0,0076, т.е. очень высокой степени сжатия. Результаты для этих четырех значений bpr для кодера SPIHT даны на рис. 3.

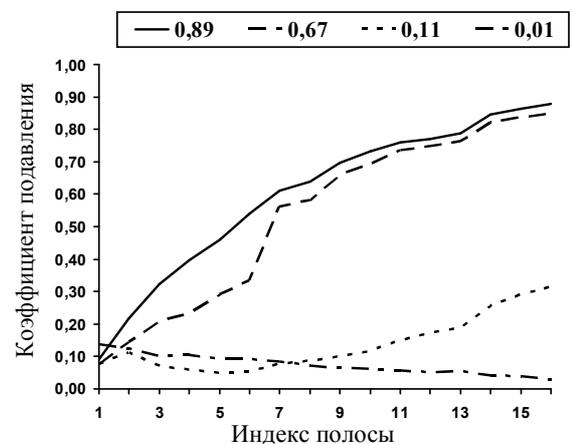


Рис. 3. Зависимости  $\chi_{\ell}$  от  $\ell$  для разных bpr для кодера SPIHT

Очевидно, что для малых КС (больших bpp) значения  $\chi_\ell$  также малы для полос с малыми  $\ell$ , то есть с низким уровнем помех, и велики для полос с интенсивными помехами, для которых шум практически не подавляется. При уменьшении bpp степень подавления помех повышается для всех полос и остаточные помехи имеют очень низкий уровень.

Таким образом, эффекты фильтрации при сжатии с потерями изображений, искаженных сигнально-зависимыми помехами, весьма специфичны. Для участков, где уровень помех высок, их подавление происходит в меньшей степени, чем подавление помех в областях, где уровень помех изначально низок. Указанные особенности фильтрации помех при сжатии с потерями объясняют зависимости уровня остаточных помех в JPEG-изображениях, анализируемые в работе [5]. При этом наивысший уровень остаточных помех наблюдается в области средних интенсивностей от 30 до 100 (при 8-битном представлении), то есть как раз для тех участков, на которых эти остаточные помехи хорошо заметны визуально [26]. Более того, после сжатия помехи обычно становятся пространственно-коррелированными, что дополнительно снижает визуальное качество. Поэтому желательно подавлять помехи на таких участках путем фильтрации до применения сжатия с потерями, поскольку после сжатия подавить остаточные пространственно-коррелированные помехи гораздо сложнее [2].

Однако, существует и другой подход. Как упоминалось ранее, для сжатия изображений, искаженных Пуассоновским шумом, предполагается использовать преобразование Энскомба или, более точно, преобразования, подобные преобразованию Энскомба. Основное выражение для преобразования Энскомба –  $S_{D_{Ans}} = (S + 3/8)^{1/2}$ , где  $S$  – исходная случайная величина, подчиняющаяся пуассоновскому закону распределения. Тогда введем следующие обозначения:  $S_{tr}$  – истинное значение,  $S_{D_{Ans}}$  – среднее, которое равно  $(S_{tr} + 1/8)^{1/2}$ ,  $\sigma_{Ans}^2$  – дисперсия  $S_{tr}$  (практически постоянна и равна 0,25 при  $S_{tr} > 3$ ). Однако применение прямого преобразования Энскомба в этой форме к 8-битным изображениям приводит к уменьшению в преобразованном изображении динамического диапазона, к дополнительным ошибкам квантования и к представлению изображения в вещественной форме, что в свою очередь, уменьшает скорость вычислений. Для того, чтобы данные после прямого преобразования Энскомба оставались в 8-битном представлении в работе [8] нами было предложено применять следующую пару преобразований:

$$G_{ij}^{An} = \left[ \frac{255}{\sqrt{DBI}} \sqrt{I_{ij}^n} \right]; \quad (10)$$

$$I_{ij}^{invA} = \left[ \left( \frac{\sqrt{DBI}}{255} G_{ij}^{Ad} \right)^2 \right], \quad (11)$$

где DBI – количество бит, используемое для представления одного бита в изображении (в нашем случае – 8),  $G^{Ad}$  – восстановленное после сжатия изображение,  $[\bullet]$  – операция округления до ближайшего целого. Отметим, что сжимается преобразованное изображение  $\{G_{ij}^{An}\}$ . Обратное преобразование (11) применяется для восстановленного после сжатия изображения  $G^{Ad}$ . Незначительные искажения после преобразований (10) и (11) во внимание принимать не будем.

После применения преобразования (10) получаем изображение, искаженное аддитивным шумом, с практически, постоянной дисперсией  $\sigma_a^2 \approx 0,25(255^2 / DBI) \approx 64$ . Тогда задача сжатия зашумленного изображения сводится к рассмотренному ранее случаю присутствия аддитивного шума [14, 15]. Однако это справедливо для случая, когда присутствует только Пуассоновский шум. Присутствие аддитивной компоненты в рассмотренной модели, даже если она и не является преобладающей, изменяет ситуацию [23].

Рассмотрим случай, когда прямое преобразование (10) применяется к тестовому изображению «Полосы», искаженному смешанным шумом с Пуассоновской и гауссовой составляющими. Для полосы с индексом  $\ell$  имеем  $G_{ij}^{An} = \frac{255}{\sqrt{DBI}} \sqrt{I_{ij}^{true} + \Delta y_{ij}}$ , где  $\Delta y_{ij} = n_{ij}^p + n_{ij}$ ,  $n_{ij}^p$  – компонента с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной  $I_{ij}^{true}$ . Часто для больших значений  $I_{ij}^{true}$  распределение  $n_{ij}^p$  можно считать Гауссовым. Тогда  $\Delta y_{ij}$  распределено по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_{\Delta y}^2 = I_{ij}^{true} + \sigma^2$ .

Предположим, что  $\sqrt{I_{ij}^{true} + \sigma^2} \ll I_{ij}^{true}$  (это верно, по крайней мере, для полос тестового изображения с большими  $I$ ). Тогда для каждой полосы

$$\begin{aligned} G_{ij}^{An} &= \frac{255}{\sqrt{DBI}} \sqrt{I_{ij}^{true} + \Delta y_{ij}} = \\ &= \frac{255}{\sqrt{DBI}} \sqrt{I_{ij}^{true} (1 + \Delta y_{ij} / I_{ij}^{true})} \approx \\ &\approx \frac{255}{\sqrt{DBI}} \sqrt{I_{ij}^{true}} (1 + \Delta y_{ij} / 2I_{ij}^{true}), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $G_{ij}^{An}$  имеет гауссово распределение со средним, примерно равным  $\frac{255}{\sqrt{DBI}} \sqrt{I_\ell^{true}}$ . Дисперсия  $\sigma_{Anij}^2$  определяется как

$$\sigma_{Anij}^2 = \frac{255^2}{4DBI I_{ij}^{true}} \sigma_{\Delta y}^2. \quad (13)$$

Теперь вспомним что для большинства полос

$$I_\ell^{true} \gg \sigma_\ell^2.$$

Тогда

$$\sigma_{\Delta y}^2 = I_\ell^{true} + \sigma^2 = I_\ell^{true} (1 + \sigma^2 / I_\ell^{true})$$

и после подстановки в (13) для каждой полосы получим

$$\sigma_{An\ell}^2 = \frac{255^2}{4DBI} + \frac{255^2 \sigma^2}{4DBI I_\ell^{true}}. \quad (14)$$

Это означает, что после прямого преобразования (10) изображение  $\{G_{ij}^{An}\}$  искажено гауссовым шумом с нулевым средним, дисперсией, одинаковой для пикселей одной полосы и немного большей для пикселей полос с меньшим значением  $\ell$ .

Предположим, что после сжатия с потерями для каждой  $\ell$ -ой полосы остаточная дисперсия  $\sigma_{An\text{res}\ell}^2$ . Тогда легко показать, что для любой  $\ell$ -ой полосы после обратного преобразования (11) остаточная дисперсия шума  $\sigma_{\text{res}\ell}^2 = \frac{4DBI}{255^2} I_\ell^{true} \sigma_{An\text{res}\ell}^2$ .

Это означает, что  $\sigma_{An\text{res}\ell}^2$  практически не зависит от  $\ell$ , а  $\sigma_{\text{res}\ell}^2$  пропорционально  $I_\ell^{true}$ .

Рассмотрим результаты моделирования (рис. 4). Для кодера AGU использовались значения  $QS_A$  в диапазоне от 24 (примерно равно  $3\sigma_a$ ) до 60 (около  $7,5\sigma_a$ ). Как видно, для  $QS_A=24$  значение  $\chi_\ell$  уменьшается с увеличением  $\ell$ . Это связано с тем, что с увеличением  $\ell$  отношение  $QS_A / QS_A / \sigma_{An}$  увеличивается и обеспечивается более эффективное подавление помех. Тем не менее, для  $QS_A=60$  подавление шума достаточно высокое для всех полос. Таким образом, можно рекомендовать выбор  $QS_A$  в диапазоне от 32 до 40, что обеспечивает примерно постоянное значение  $\sigma_{\text{res}1}^2$  (1...3), что практически незаметно в восстановленных после сжатия изображениях. Данные рекомендации совпадают с рекомендациями данными в [14, 15] –  $QS_A$  необходимо выбирать около  $4,5\sigma_a$  при использовании кодеров с потерями, применяемых для сжатия изображений, искаженных аддитивным шумом.

Проанализируем результаты, полученные для кодера SPIHT. Его параметры определены как и в предыдущем случае. Значение  $QS_A=24$  для AGU соответствует  $\text{bpp}=0.66$  для SPIHT,  $QS_A=28$  – для  $\text{bpp}=0.34$ ,  $QS_A=42$  – для  $\text{bpp}=0.009$  и  $QS_A=60$  – для  $\text{bpp}=0.007$ .

Таким образом, здесь мы имеем дело с очень большим коэффициентами сжатия.

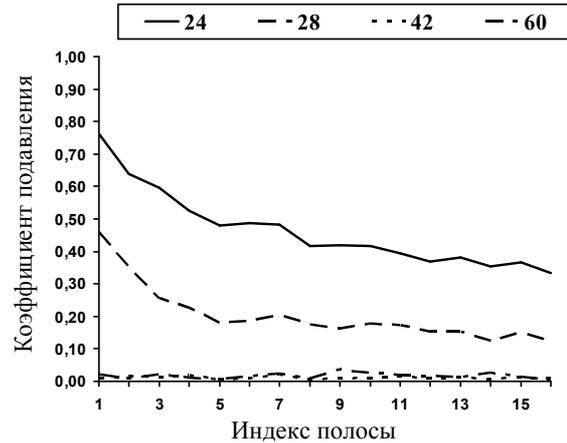


Рис. 4. Зависимость  $\chi_\ell$  от  $\ell$  для различных  $QS_A$  для кодера AGU

Полученные зависимости  $\chi_\ell$  от  $\ell$  для различных  $\text{bpp}$  для кодера SPIHT, представлены на рис. 5.

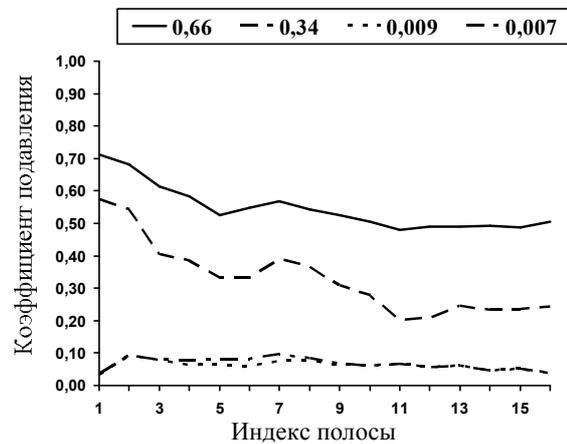


Рис. 5. Зависимость  $\chi_\ell$  от  $\ell$  для различных  $\text{bpp}$  при использовании кодера SPIHT

Как видно из графика, при  $\text{bpp}=0,66$  нельзя обеспечить хорошее подавление шума,  $\chi_\ell$  примерно равно 0,7 для полос с малыми  $\ell$  и 0,5 для полос с большими  $\ell$ . Результаты сжатия с  $\text{bpp}$ , равным 0,01 и меньше, свидетельствуют об эффективном подавлении помехи для всех полос.

Результаты, полученные для рассматриваемого тестового изображения, показывают, что в большинстве случаев можно обеспечить эффективное подавление помех на однородных участках, если выбранный шаг квантования достаточно велик или  $bpp$  достаточно мало.

С увеличением  $QS$  ( $bpp$  уменьшается), вносимые помехи при сигнально-зависимом преобразовании незначительны. Используя соответствующие гомоморфные преобразования можно уменьшить негативное влияние таких преобразований.

В будущем нами планируется использовать более точные гомоморфные преобразования, позволяющие конвертировать смешанный шум в чисто аддитивный [23].

#### 4. Анализ для тестового изображения

Предыдущий анализ показал, что при выборе шага квантования достаточно большим ( $QS_A / \sigma_{An} > 4$ ) достигается существенное подавление помех. Однако увеличение шага квантования неизбежно приводит к внесению заметных искажений в информационную составляющую изображений. Следовательно, должно быть найдено компромиссное решение.

Рассмотрим прямое применение сжатия с потерями без пары гомоморфных преобразований к зашумленному изображению (обозначим его DC – direct compression) и сжатие с использованием пары преобразований (10) и (11), которое обозначим как НВС (homomorphic based compression). Полученные кривые  $PSNR_{nf}(bpp)$  для обеих процедур и двух анализируемых кодеков AGU и SPIHT представлены на рис. 6 для изображения Frisco (рис. 1).

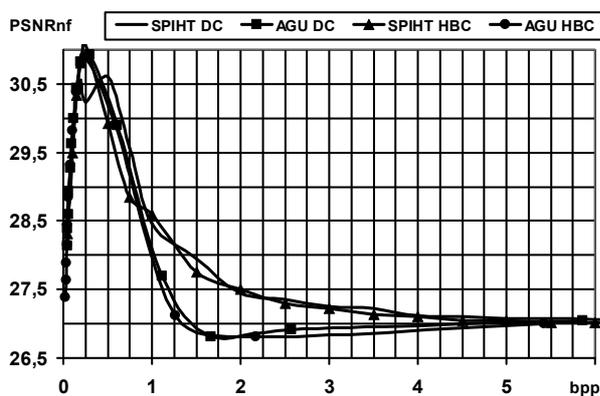


Рис. 6.  $PSNR_{nf}(bpp)$  для обеих процедур сжатия для кодеков AGU и SPIHT, изображение Frisco

Первый вывод, который вытекает из анализа этих зависимостей, заключается в том, что все зависимости

имеют максимумы, то есть ОПТ существует. Практически для всех четырех рассматриваемых случаев  $bpp_{OПТ}$  приблизительно равно 0,25, то есть изображение может быть сжато в 32 раза. Для более сложных изображений значения  $bpp_{OПТ}$  обычно больше.

Максимальные значения  $PSNR_{nf}(bpp)$  в ОПТ для трех кривых практически совпадают, лишь для процедуры НВС при использовании кодера SPIHT эти значения немного меньше.

Основные различия между прямым применением сжатия и сжатием с использованием гомоморфных преобразований состоят в следующем. При использовании НВС можно дать четкую практическую рекомендацию по выбору шага квантования. В частности, для рассматриваемого случая смешанных помех после прямого гомоморфного преобразования  $QS_A$  следует устанавливать примерно равным 40. В общем случае шаг квантования следует выбирать в 4...5 раз больше, чем среднеквадратическое отклонение (СКО) помех после выполнения прямого гомоморфного преобразования.

Однако для выполнения прямого гомоморфного преобразования, стабилизирующего дисперсию, необходимо априорно знать характеристики сигнально-зависимых помех.

Эффект фильтрации при сжатии с потерями хорошо виден на изображении (рис. 7), при этом искажения на неоднородных участках (границы, мелкие детали, текстуры) практически незаметны.

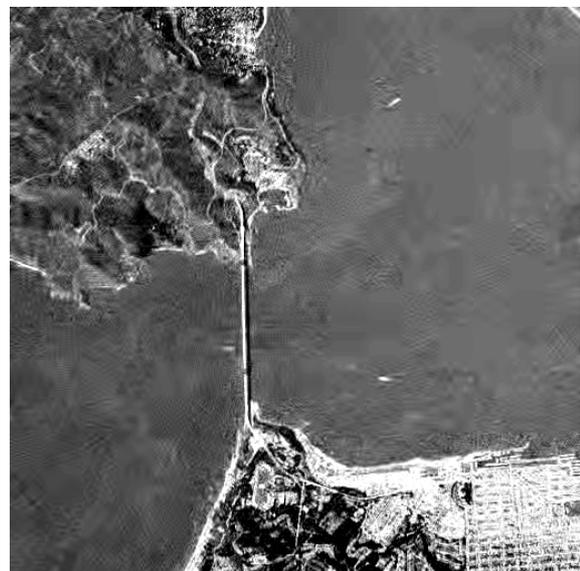


Рис. 7. Сжатое изображение

#### Заключение

Проведен анализ эффектов фильтрации, наблюдаемых при сжатии с потерями изображений, искаженных сигнально-зависимыми помехами. По-

казано, что степень подавления шума повышается при увеличении степени сжатия, однако при слишком больших КС в информационную составляющую вносятся искажения, которые нежелательны. Рассмотрены два подхода к сжатию (с и без использования гомоморфных преобразований) и показана целесообразность использования преобразований, стабилизирующих дисперсию помех.

### Литература

1. Gonzalez R.C. *Digital Image Processing* / R.C. Gonzalez, R.E. Woods. – Prentice-Hall, 2002. – 836 p.
2. Фильтрация цветных изображений: когда она необходима? / В.В. Лукин, Д.В. Февралева, Н.Н. Пономаренко, С.К. Абрамов // *Радиоелектронні та комп'ютерні системи*. – 2010. – № 4 (44). – С. 65-74.
3. Oliver C. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images* / C. Oliver, S. Quegan. – SciTech Publishing, 2004. – 486 p.
4. Сжатие изображений дистанционного зондирования без визуально заметных искажений / С.С. Кривенко, В.В. Лукин, М.С. Зряхов, А.А. Зеленский // *Радиотехніка*. – 2009. – Т. 159. – С. 248-254.
5. Lim S.H. *Characterization of Noise in Digital Photographs for Image Processing* / S.H. Lim // *Proceedings of Digital Photography I*. – SPIE 6069. – 10 Feb. 2006. – PP. 219-228.
6. Wallace G. *JPEG still image compression standard* / G. Wallace // *Comm. Of the ACM*. – Vol. 34, No 4. – 1991. – 17 p.
7. Pal M.D. *Feature Extraction from Hyperspectral Images Compressed using the JPEG-2000 Standard* / M.D. Pal, C.M. Brislawn, and S.P. Brumb // *Proceedings of Fifth IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation (SSIAI'02)*. – Santa Fe, NM, April 2002. – P. 168-172.
8. Chang S.G. *Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression* / S.G. Chang, B. Yu, M. Vetterli // *IEEE Trans. on Image Processing*. – Vol. 9 (9). – Sep. 2000. – P. 1532-1546.
9. *Comparison of lossy compression technique performance for real life color photo images* / N. Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, E. Delp // *Proceedings of Picture Coding Symposium*. – USA, June 2009. – 4 p.
10. Minasyan S. *An image compression scheme based on parametric Haar-like transform* / S. Minasyan, J. Astola, D. Guevorkian // *Proceedings of ISCAS*. – Vol. 3. – 2005. – P. 2088-2091.
11. Al-Chaykh O.K. *Lossy compression of noisy images* / O.K. Al-Chaykh, R.M. Mersereau // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 1998. – Vol. 7 (12). – P. 1641-1652.
12. Shahnaz R. *Image Compression in Signal-Dependent Noise* / R. Shahnaz, J.F. Walkup, T.F. Krile // *Applied Optics*. – 1999. – Vol. 38, Issue 26. – P. 560-5567.
13. Said A. *A new fast and efficient image codec based on the partitioning in hierarchical trees* / A. Said, W. Pearlman // *IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technology*. – 1996. – Vol. 6. – P. 243-250.
14. *Lossy compression of images with additive noise* / 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.
15. *Estimation of accesible quality in noisy image compression* / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Zriakhov, K. Egiazarian, J. Astola // *CD-ROM Proc. EUSIPCO*. – Italy, 2006. – 4 p.
16. *Lossy Compression of Noisy Images Based on Visual Quality: a Comprehensive Study* / 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.
17. *Quasi-optimal compression of noisy optical and radar images* / V. Lukin, N. Ponomarenko, M. Zriakhov, A. Zelensky etc. // *Proc. SPIE Conf. Image and Signal Processing for Remote Sensing XII*. – Sweden, 2006. – SPIE Vol. 6365. – 12 p.
18. *An Automatic Approach to Lossy Compression of Images Corrupted by Poisson Noise* / 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.
19. *Locally Adaptive DCT Filtering for Signal-Dependent Noise Removal* / R. Oktem, K. Egiazarian, V. Lukin, N. Ponomarenko etc. // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – Article ID 42472. – 2007. – 10 p.
20. Foi A. *Pointwise Shape-Adaptive DCT Image Filtering and Signal-Dependent Noise Estimation: Thesis for the degree of Doctor of Technology; defense 5.12.2007* / Foi Alessandro. – Tampere, Finland: Tampere University of Technology, 2007. – 194 p.
21. Абрамов С.К. *Проблемы и методы автоматического определения характеристик помех на изображениях* / С.К. Абрамов, А.А. Зеленский, В.В. Лукин // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – №2 (36). – С. 25-34.
22. *Noise estimation from a single image* / C. Liu, W.T. Freeman, R. Szeliski, S.B. Kang // *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Patter Recognition*. – June 2006. – P. 901-908.
23. *Denoising of single-look SAR images based on variance stabilization and non-local filters* / M. Maktalo, A. Foi, D. Fevrালেва, V. Lukin // *CD-ROM Proceedings of MMET*. – Ukraine, Kiev, Sept. 2010. – 4 p.
24. Bovik A. *Handbook of Image and Video Processing* / A. Bovik. – Academic Press. – USA, 2000. – 1429 p.
25. Kerekes J.P. *Hyperspectral Imaging System Modeling* / J.P. Kerekes, J.E. Baum // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – Vol. 14, No 1. – P. 117-130.
26. *On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions* / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli etc. // *CD-ROM Proc. of the*

*Third Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics. – USA, 2007. – 4 p.*

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

28. *AGU - DCT Based High Quality Image Compression [Электронный ресурс]. - Режим доступа:*

*http://www.ponomarenko.info/agu.htm (2.05.2008).*

29. *Лукин В.В. Исследование потенциальной эффективности фильтрации изображений на основе дискретного косинусного преобразования / В.В. Лукин, Д.В. Февралев, Н.Н. Пономаренко // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 4 (38). – С. 17-25.*

*Поступила в редакцию 1.04.2011*

**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, Украина.

### ОСОБЛИВОСТІ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ПРІ СИГНАЛЬНО-ЗАЛЕЖНИХ ЗАВАДАХ

*М.С. Зряхов, С.С. Кривенко, С.К. Абрамов, М.М. Пономаренко, В.В. Лукін*

Проаналізовано ефект стиснення з втратами зображень, які спотворено сигнально-залежними завадами. Показано, що при використанні як методів на основі дискретного косинусного перетворення, так і малошвилових перетворень спостерігається ефект придушення завад. Але цей ефект є різним для ділянок з різним середнім рівнем. Для забезпечення однакового ступеню придушення запропоновано використовувати варіаційно-стабілізуюче перетворення Енскомба. Досліджено статистичні характеристики залишкових завад при використанні запропонованої триетапної процедури на основі даного перетворення. Сформульовані задачі подальших досліджень.

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

### PECULIARITIES OF IMAGE COMPRESSION FOR SIGNAL-DEPENDENT NOISE

*M.S. Zriakhov, S.S. Kryvenko, S.K. Abramov, N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin*

The effect of compressing images corrupted by signal-dependent noise is analyzed. It is shown that the use of both DCT and wavelet-based compression methods results in noise suppression effect. However, this effect is of different strength for image fragments having different mean. In order to provide identical suppression ratio it is proposed to use variance stabilizing Anscombe transform. Statistical analysis of residual noise for the case of applying the proposed three-stage procedure that employs such kind of transform is carried out. The topics of further research are formulated.

**Keywords:** lossy image compression, signal-dependent noise.

**Зряхов Михайл Сергеевич** – канд. техн. наук, ст. преп. каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: zriakhov@mail.ru.

**Кривенко Сергей Станиславович** – аспирант каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: krivenkos@inbox.ru.

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

**Пономаренко Николай Николаевич** – канд. техн. наук, докторант каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: uagames@mail.ru.

**Лукин Владимир Васильевич** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: lukin@xai.kharkov.ua.