

УДК 621.3:681.34

В.В. ЛУКИН, Д.В. ФЕВРАЛЕВ, Н.Н. ПОНОМАРЕНКО, С.К. АБРАМОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Украина***ФИЛЬТРАЦИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ: КОГДА ОНА НЕОБХОДИМА?**

В работе проведено исследование эффективности фильтрации цветных изображений, искаженных пространственно-некоррелированными и пространственно-коррелированными аддитивными помехами. Показано, что подавление пространственно-коррелированных помех является более сложной задачей, и они в большей степени ухудшают визуальное качество как исходных, так и обработанных изображений. Определены предельные значения дисперсии исследуемых типов помех, при которых применение фильтрации становится нецелесообразным. Показано, что эти значения зависят от степени сложности изображения и от применяемого метода фильтрации.

Ключевые слова: база цветных изображений, эффективность фильтрации, метрики

Введение

Цветные изображения представляют собой один из наибольших классов изображений, для которого важно их качество, причем качество визуальное [1]. В частности, визуальное качество цветных изображений важно при цифровой фотосъемке. Однако во многих случаях, получаемое визуальное качество фотографий не удовлетворяет пользователей. Одним из основных факторов, определяющих качество для этого приложения, является шум [1]. Причинами его появления могут быть малая экспозиция или плохое освещение при получении изображения.

В таких ситуациях желательно повысить качество изображения, что может быть достигнуто путем его фильтрации [1, 2].

Существует большое количество разнообразных методов фильтрации изображений [3, 4], в том числе и специализированных подходов, ориентированных на обработку именно цветных изображений [5 – 8]. В их основу положены различные модели помех и способы учета межканальной коррелированности информационной составляющей цветных изображений. Вместе с тем, для подавляющего большинства публикаций, посвященных современным фильтрам, предназначенным для подавления помех на цветных изображениях, характерны следующие недостатки:

1) шум обычно полагают пространственно-некоррелированными (ПН) [5 – 9], что часто не согласуется со свойствами реальных помех, присутствующих в цветных изображениях [10];

2) дисперсия помех в компонентах изображений полагается достаточно большой (50 и более при 24-х битном RGB представлении данных) [6 – 9], что также не соответствует реальности;

3) при анализе эффективности фильтрации используются количественные критерии (метрики) как, например, среднеквадратическая ошибка (СКОш) или пиковое отношение сигнал-шум (ПОСШ), которые не учитывают особенности психовизуального восприятия изображений [11-13].

Отметим, что подавление ПК помех является более сложной задачей, чем фильтрация изображений, искаженных гауссовым белым шумом [14, 15]. К тому же, при одной и той же дисперсии помех изображение, искаженное пространственно-коррелированными (ПК) помехами выглядит заметно хуже, чем то же самое изображение, искаженное белым шумом [12].

Вторая важная закономерность состоит в том, что при подавлении шума с большой дисперсией достигается большая эффективность фильтрации (степень уменьшения СКОш по сравнению с исходным зашумленным изображением), чем при удалении помех со сравнительно малой дисперсией [16, 17]. Поэтому возможно, что при малых дисперсиях помех достигаемое благодаря фильтрации повышение качества цветных изображений может оказаться пренебрежимо малым, вследствие чего применение фильтрации будет нецелесообразным. В частности, в работах [16, 17] было показано, что для изображений со сложной структурой (текстурных и/или содержащих много границ и малоразмерных объектов) эффективность фильтрации невысока в соответствии с различными метриками даже при достаточно больших дисперсиях помех (50...100).

Кроме того, недавно было показано [18], что при значениях метрик $MSSIM > 0,985$ или, что практически эквивалентно, $PSNR-HVS-M > 40$ дБ искажения практически незаметны. Тогда можно утверждать, что применение фильтрации нецелесообразно, если либо фильтрация не приводит к улучшению

(визуального) качества обработанного изображения по сравнению с исходным (искаженным), либо помеха на этом изображении визуально незаметна.

Однако в литературе не приведены сведения о том, при каких значениях дисперсий помех они визуально заметны или эффективность фильтрации оказывается практически «нулевой». Лишь в [18] (раздел 14) кратко говорится о том, что для изображений, искаженных гауссовым аддитивным белым шумом, фильтрация становится нецелесообразной при дисперсии помех менее 25 (при 8-битном представлении изображений в градациях серого). Однако этот вывод является эмпирическим. К тому же, после 2005 года, когда была опубликована монография [18], появились новые, более эффективные фильтры для обработки как изображений в градациях серого, так и цветных [2 – 4, 8, 19].

Недостатком многих публикаций, посвященных вопросам фильтрации изображений, является то, что анализ эффективности проводится для ограниченного набора изображений. В то же время исследование эффективности фильтрации целесообразно проводить для большего количества изображений, на которых практически отсутствуют собственные помехи. К таковым можно отнести набор цветных тестовых изображений Кодак [20] и базу изображений TID2008 [21], сформированную на его основе. Как будет показано ниже, база TID2008 позволяет провести более широкий круг исследований с целью изучения эффективности фильтрации, чем это было сделано ранее в нашей работе [17].

Цель данной статьи состоит в определении значений дисперсий и других характеристик ПН и ПК помех, при которых применение фильтрации при обработке цветных изображений становится нецелесообразным.

1. База изображений TID2008 и особенности фильтрации цветных изображений

Прежде всего, рассмотрим некоторые особенности базы цветных изображений TID2008 [12, 21]. Она содержит 25 тестовых цветных изображений без помех и искажений (приведены на рис. 1) и 1700 искаженных цветных изображений. Общее число типов искажений – 17, число уровней искажений – 4, то есть с использованием каждого тестового изображения сформировано 68 искаженных вариантов.

Первоначально база TID2008 создавалась для тестирования метрик визуального качества изображений, на которых присутствуют различные типы помех и искажений. С ее помощью было проведено сравнение большого числа различных метрик визуального качества, выявлены их достоинства и

недостатки. В частности, было показано, что для таких типов искажений как смаз, ПН аддитивные помехи (первый тип искажений), ПК помехи (третий тип искажений), искажения в отфильтрованных и сжатых изображениях, наиболее адекватными метриками визуального качества можно считать MSSIM [11], PSNR-HVS-M [13] и ряд других [12, 22, 23]. Эти метрики хорошо работают и для других баз искаженных изображений [24, 25], а также для описания визуального качества сжатых видеопоследовательностей [26].

Одной из особенностей базы цветных изображений TID2008 является то, что интенсивность помех и искажений подобрана таким образом, что обеспечиваются четыре уровня искажений, характеризующихся значениями ПОСШ, примерно равными 30, 27, 24 и 21 дБ. Если помехи являются аддитивными, это соответствует значениям дисперсии шума, равным соответственно 65, 130, 260 и 520 для цветных изображений, каждая из компонент которых (R, G и B) представлены однобайтными (восьмибитовыми) целыми числами. С практической точки зрения значения дисперсии шума 260 и 520 не представляют интереса. Однако даже значения дисперсии порядка 65...130 не так уж часто встречаются на практике. Тем не менее, база TID2008 может быть полезна, поскольку шумы с меньшими значениями дисперсии могут быть легко сгенерированы и добавлены к исходным тестовым изображениям.

Напомним некоторые выводы, приведенные в работах [12, 17]. Во-первых, проиллюстрируем, что при одной и той же дисперсии аддитивных ПК и ПН помех, присутствующих на одном и том же изображении, изображение, искаженное ПК помехами, однозначно воспринимается наблюдателями как имеющее более низкое визуальное качество.

На рис. 2 показано тестовое изображение № 16, искаженное аддитивным гауссовым шумом с нулевым средним и дисперсией 65. Шум хорошо виден на верхней части изображения (небо), но он в значительной степени маскируется текстурой моря в нижней части. На рис. 3 приведено то же тестовое изображение, искаженное ПК шумом с нулевым средним и той же дисперсией. Здесь помехи видны уже на практически всех участках, включая и текстурные (поверхность моря, облака).

Эти эффекты хорошо (адекватно) отражаются метрикой PSNR-HVS-M.

Для изображения на рис. 2 значение PSNR-HVS-M равно 33,2 дБ, а для изображения на рис. 3 имеем PSNR-HVS-M=26,6 дБ [17]. Напомним, что чем больше значение PSNR-HVS-M, тем лучше визуальное качество изображения. При этом значения ПОСШ (PSNR) для обоих изображений одинаковы и равны 30 дБ.



Рис. 1. Тестовые изображения (1-24) TID2008, сформированные на основе набора Kodak, и 25-е тестовое изображение, синтезированное нами (размеры всех изображений 512x384 пикселей, 24 бита на пиксель)

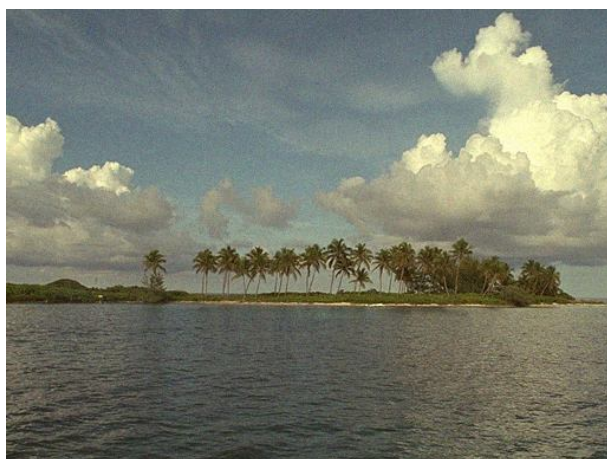


Рис. 2. Изображение с ПН помехой, ПОСШ=30 дБ



Рис. 3. Изображение ПК помехой, ПОСШ=30 дБ

Этот пример показывает, что проблеме подавления ПК помех должно быть уделено повышенное внимание. Во-первых, их присутствие приводит к более низкому визуальному качеству изображений.

Во-вторых, эффективность подавления ПК помех ниже, чем белого шума [17]. В-третьих, если для подавления аддитивного белого шума достаточно знать его дисперсию, то для эффективного по-

давления коррелированных помех необходимо заранее знать или оценивать пространственный спектр помех [14, 15, 17].

Второй вывод по результатам исследований [17] состоит в следующем. Повышение ПОСШ благодаря фильтрации не приводит к аналогичному увеличению PSNR-HVS-M (обе метрики измеряются в дБ, поэтому есть возможность их сравнивать). Например, для белого шума с дисперсией 65 ПОСШ (в зависимости от сложности изображения) после фильтрации увеличилось на 1,5...7,5 дБ. При этом PSNR-HVS-M возросло на 0,5...5,5 дБ, причем наименьшее увеличение PSNR-HVS-M имело место для наиболее сложного тестового изображения № 13. Для ПК помех с той же дисперсией улучшение обеих метрик после фильтрации еще меньше. Даже при использовании покомпонентного фильтра на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП), адаптированного к заранее известному ДКП-спектру ПК помех, ПОСШ после обработки увеличилось на 1,0...5,2 дБ. Значения метрики PSNR-HVS-M в этом случае возросли на 0,5...5,0 дБ. Если же фильтр не адаптирован к спектру коррелированных помех, то выигрыш существенно меньше [17].

Естественно, что конкретные значения ПОСШ и PSNR-HVS-M, а также степень их возрастания благодаря фильтрации зависят от свойств обрабатываемого изображения и используемого фильтра. В этом плане следует отметить следующее. С одной стороны, фильтрация на основе ДКП является одним из наиболее эффективных подходов к повышению качества зашумленных изображений [2 – 4, 8, 14, 27, 28], по крайней мере, одноканальных (в градациях серого). С другой стороны, имеется возможность дополнительно повысить эффективность подавления помех благодаря учету межканальной коррелированности цветовых компонент цветных изображений [2, 7, 8, 28] путем векторной или трехмерной обработки. Такая обработка позволяет примерно на 1...2 дБ повысить ПОСШ и PSNR-HVS-M по сравнению со случаем поканальной (раздельной) обработки компонентных изображений.

Однако если для случая аддитивных ПН помех алгоритмы фильтрации к настоящему моменту разработаны и достаточно тщательно исследованы, то для случая ПК помех проработки отсутствуют. Поэтому в рамках данного исследования ограничимся рассмотрением ДКП-фильтров, применяемых раздельно к каждой компоненте цветных изображений.

2. Анализ случая пространственно-некоррелированных аддитивных помех

Прежде всего, остановимся на количественных критериях (метриках), используемых при анализе.

Среднеквадратическая ошибка на выходе фильтра для компонент цветного изображения рассчитывается в виде

$$\sigma_{k\text{out}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{kij}^f - I_{kij}^{\text{true}})^2}{IJ}, \quad (1)$$

где I_{kij}^f – ij -й отсчет k -й компоненты цветного RGB изображения на выходе фильтра, I_{kij}^{true} – истинное значение ij -го отсчета k -й компоненты; I, J – количество пикселей в строках и столбцах изображений (для изображений в базе TID2008 соответственно 512 и 384).

ПОСШ при 8-битном представлении каждой из компонент цветного изображения определяется в виде ($k=1, \dots, 3$)

$$\text{PSNR}_k = 10 \lg(255^2 / \sigma_{k\text{out}}^2). \quad (2)$$

Метрика PSNR-HVS-M_k, выражаемая в дБ, также предусматривает сначала расчет специфически взвешенной в области ДКП СКОш $\sigma_{k\text{HVS-M}}^2$, а затем

$$\text{PSNR-HVS-M}_k = 10 \lg(255^2 / \sigma_{k\text{HVS-M}}^2). \quad (3)$$

При этом учитываются две особенности визуальной системы человека (HVS – human visual system): более низкая чувствительность к искажениям в области высоких пространственных частот и эффекты маскирования. Расчет PSNR-HVS-M производился при помощи разработанного авторами программного модуля [29].

Наконец, метрика MSSIM, которая будет использоваться нами в ходе исследования, также учитывает ряд особенностей визуальной системы человека, в частности, многоуровневую декомпозицию изображений. Значения этой метрики варьируются от 0 (крайне низкое качество) до 1 (идеальное качество).

Поскольку очевидно, что при дисперсии аддитивных помех $y^2 = 65$ (как ПН, так и ПК) они хорошо видны на зашумленных изображениях (см. пример на рис. 2), то необходимо рассмотреть меньшие значения дисперсии. Нами были рассмотрены несколько значений, но результаты ниже приведем для наиболее интересного случая $y^2 = 25$ (рассматривается случай воздействия ПН помех). Для удобства анализа отметим, что при $y^2 = 25$ ПОСШ для всех зашумленных изображений равно 34,1 дБ.

Для изображений после фильтрации значения PSNR_k варьируются в пределах от 34,95 дБ (для компонент 13-го тестового изображения) до практически 40 дБ для самых простых изображений в базе (рис. 1, изображения 3, 7, 20, 23, 25). Таким образом, с точки зрения стандартных метрик (СКОш, ПОСШ)

фільтрація приводить к полезному эффекту, хотя ее эффективность по-прежнему зависит от свойств обрабатываемого изображения.

Большой интерес представляет анализ зависимости PSNR-HVS- $M_k(n)$, где n – номер (индекс) тестового изображения в TID2008. Эти зависимости приведены на рис. 4 при $y^2 = 25$. Нижняя группа из трех практически совпадающих между собой кривых описывает визуальное качество изображений в цветовых компонентах до фильтрации. Полученные значения лежат в пределах от 37,5 до 41,5 дБ, то есть помехи мало заметны или совсем незаметны. Помехи малозаметны для изображений с относительно простой структурой (рис. 1, изображения 3, 9, 12, 15, 16, 20, 23), то есть в случаях, когда имеются достаточно большие однородные участки, на которых шум не маскирован текстурой. Чтобы шум был практически незаметен на таких участках, надо, чтобы $\sigma^2 \leq 10 \dots 15$

В свою очередь, для текстурных изображений (рис. 1, изображения 1, 5, 8, 13, 14) значения PSNR-HVS- M_k выше 40 дБ, то есть помехи маскированы и визуально зашумленные изображения практически невозможно отличить от соответствующих исходных изображений («чистых», без шума). В справедливости этих выводов авторы и ряд других экспертов убедились путем одновременного представления на экране монитора чистых и зашумленных изображений.

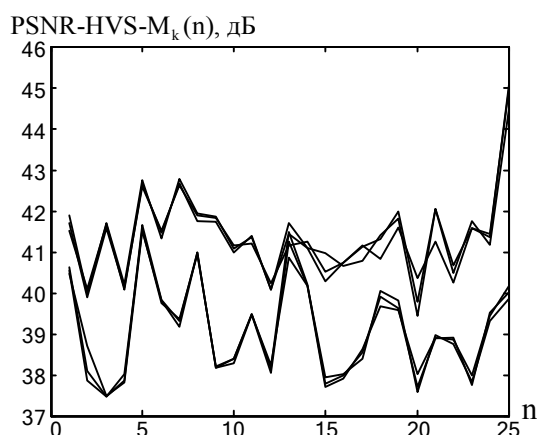


Рис. 4. Значения PSNR-HVS- $M_k(n)$ для компонент цветных изображений до и после фильтрации, $y^2 = 25$

Таким образом, текстурные изображения уже при $y^2 = 25$ нет необходимости фильтровать с целью повышения визуального качества. Этот вывод практически совпадает с рекомендацией в [18]. Для более простых изображений значения дисперсии ПН помех должны быть немного меньше, чтобы они стали визуально незаметны. Проведенный анализ показал, что ПН помехи становятся практически незаметны при $y^2 \approx 15$ для любых изображений. Отметим также, что сделать вывод о сложности изо-

бражения, искаженного белым шумом, можно путем анализа параметра $\hat{\gamma}_k$, вернее, его оценки $\hat{\gamma}_k$. Для ее получения для каждого блока с координатами верхнего левого угла l и m с размером 8×8 пикселей рассчитываются две оценки локальной дисперсии. Первая вычисляется в пространственной области:

$$\sigma_{k\ lm}^2 = \frac{\sum_{i=l}^{l+7} \sum_{j=m}^{m+7} (I_{kij}^f - \bar{I}_{k\ mn})^2}{63}; \quad \bar{I}_{k\ mn} = \frac{\sum_{i=l}^{l+7} \sum_{j=m}^{m+7} I_{kij}}{64}, \quad (4)$$

а вторая в спектральной:

$$(\sigma_{k\ lm}^{sp})^2 = \left(1,483 \text{med} \left(\left| D_{qs}^{lm} \right| \right) \right)^2, \quad (5)$$

где $D_{qs}^{lm}, q=0, \dots, 7, s=0, \dots, 7$ кроме $q=s=0$ – ДКП-коэффициенты lm -го блока. Затем для каждого блока рассчитывается значение $R_{k\ lm} = \sigma_{k\ lm} / \sigma_{k\ lm}^{sp}$, формируется их гистограмма для каждой k -й компоненты и определяется ее мода $\hat{\gamma}_k$. Для автоматической оценки моды распределения можно использовать алгоритм, описанный в работе [30]. Для относительно простых изображений значения $\hat{\gamma}_k$ близки к единице и не превышают 1,1 (рис. 5).

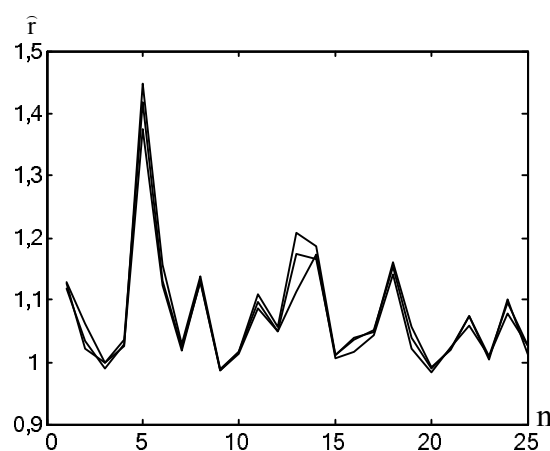


Рис. 5. Значения $\hat{\gamma}_k(n)$ для компонент цветных изображений с шумом при $y^2 = 25$

Верхняя группа из трех практически совпадающих кривых показывает зависимости PSNR-HVS- $M_k(n)$ для отфильтрованных изображений. Их анализ свидетельствует о том, что значения PSNR-HVS- M_k превышают 40 дБ для всех изображений. Следовательно, применение покомпонентной ДКП-фильтрации при $y^2 = 25$ позволяет обеспечить такое визуальное качество обработанных изображений, что они гарантированно не отличаются от соответствующих «чистых» изображений. Проведенный нами визуальный сравнительный анализ самих изображений подтвердил этот вывод.

Отметим, что если использовать более сложные и эффективные алгоритмы фильтрации, например, описанные в работах [3, 8], то имеется возможность обеспечить практически идеальное визуальное качество ($PSNR-HVS-M_k > 40$ дБ) и при больших, чем 25, значениях дисперсии помех.

В подтверждение этого приведем данные для двух изображений из базы TID2008: одного из простейших (номер 3) и одного из наиболее сложных (номер 13). В результате применения трехмерного ДКП-фильтра [8] к изображению № 3, искаженному белым шумом с $y^2 = 35$, получены значения $PSNR-HVS-M_k$, равные 41,8, 41,9 и 41,5 дБ соответственно для красной, зеленой и синей компонент. Аналогично для изображения № 13 имеем 42,7, 42,0 и 41,1 дБ.

3. Анализ результатов для случая пространственно-коррелированных помех

В случае воздействия ПК помех очевидно, что, кроме дисперсии помех, важное значение имеют и характеристики корреляции, которые могут описываться двумерными спектром или автокорреляционной функций. В связи с широким разнообразием возможных ситуаций рассмотрим два типичных случая: достаточно большой степени коррелированности помех (БКП) в соседних пикселях и средней степени коррелированности помех (СКП).

В первом случае помехи моделировались путем обработки белого шума линейным усредняющим фильтром со скользящим окном 3×3 пикселя. Во втором случае двумерный белый шум подвергался обработке КИХ-фильтром со значениями весовых коэффициентов приведенных в табл. 1.

Таблица 1
Весовые коэффициенты КИХ-фильтра

1/4	1/2	1/4
1/2	1	1/2
1/4	1/2	1/4

В обоих случаях рассматривалось покомпонентное применение модифицированного ДКП-фильтра, для которого порог являлся частотно-зависимым и устанавливался как

$$T(q,s) = 2,7\sigma\sqrt{W_{\text{norm}}(q,s)},$$

причем предполагалось, что нормированный ДКП-спектр $\{W_{\text{norm}}(q,s), q=0,\dots,7, s=0,\dots,7 \text{ кроме } q=s=0\}$ заранее известен или оценен. На рис. 6 приведены зависимости $PSNR-HVS-M_k(n)$ для компонент цветных изображений до и после фильтрации для случая БКП ($\sigma^2 = 9$). Рассматриваемое значение дисперсии выбрано меньше, чем для ПН помех, поскольку ПК помехи более заметны (рис. 2 и 3).

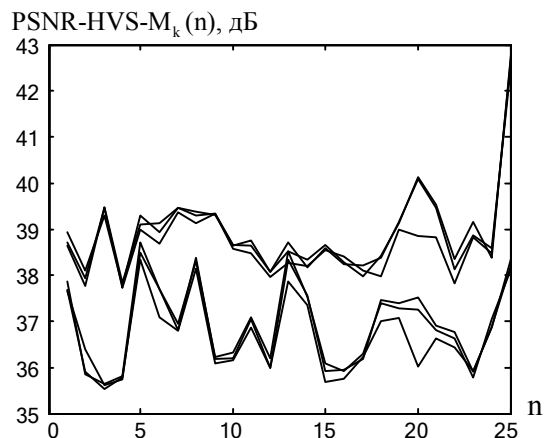


Рис. 6. Значения $PSNR-HVS-M_k(n)$ для компонент цветных изображений до и после фильтрации для случая БКП, $y^2 = 9$

Нижняя группа из трех кривых соответствует изображениям до фильтрации. Значения $PSNR-HVS-M_k(n)$ лежат в пределах от 35,5 до 38 дБ, то есть зашумленные изображения заметно отличаются от незашумленных. Иными словами, ПК шум явно заметен даже при столь малых значениях дисперсии (напомним, что для ПН помех при $y^2 = 9$ шум практически гарантированно незаметен, см. предыдущий подраздел).

Верхняя группа из трех кривых соответствует зависимостям $PSNR-HVS-M_k(n)$ после фильтрации. Очевидно, что фильтрация даже при малой дисперсии помех приводит к повышению визуального качества для всех изображений базы TID2008, хотя эффект от ее применения невелик: от долей дБ для текстурных изображений до 3...3,5 дБ для наиболее простых по структуре изображений. Тем не менее, руководствуясь значением порога «незаметности» остаточных помех и искажений ($PSNR-HVS-M > 40$ дБ), можно сделать вывод о том, что отличия отфильтрованного и соответствующего ему истинного изображения продолжают оставаться заметными.

Рассмотрим теперь случай СКП. Зависимости $PSNR-HVS-M_k(n)$ для случая $y^2 = 9$ приведены на рис. 7. Снова нижняя группа из трех кривых соответствует $PSNR-HVS-M_k(n)$, $k = 1,2,3$ до фильтрации, а верхняя группа – после фильтрации. Практически все выводы, сделанные выше для графиков на рис. 6, верны и в случае анализа кривых на рис. 7. Соответствующие друг другу кривые на рис. 6 и 7 (например, для красной компоненты до фильтрации), ведут себя очень похоже. Единственное отличие состоит в конкретных значениях. Соответствующие друг другу значения на рис. 6 и 7 (например, для красной компоненты изображения № 3 до фильтрации) отличаются незначительно. В случае СКП они, как правило, на примерно 0,5 дБ выше, чем в случае БКП. Следовательно, во-первых, визу-

альное качество изображений, искаженных СКП, выше, чем качество изображений, искаженных БКП с той же дисперсией.

Аналогичный вывод справедлив и для отфильтрованных изображений.

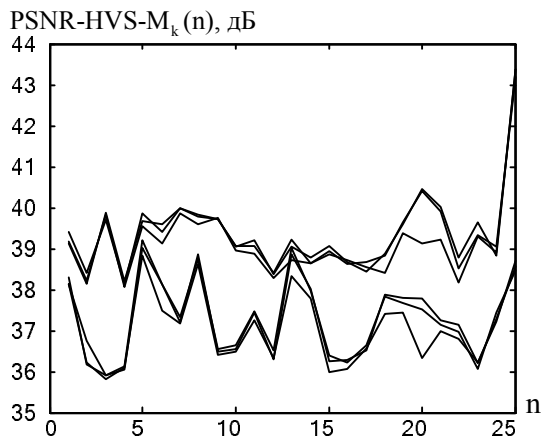


Рис. 7. Значения PSNR-HVS-M_k(n) для компонент цветных изображений до и после фильтрации для случая СКП, $y^2 = 9$

Выше выводы получены на основании анализа зависимостей PSNR-HVS-M_k(n), k=1,2,3. Как указывалось во введении, для анализа визуального качества может использоваться и метрика MSSIM. Напомним, что при MSSIM>0,985 считается, что изображения визуально неразличимы.

На рис. 8 представлены графики зависимостей MSSIM_k(n), k=1, 2, 3 до и после фильтрации для случая СКП, $y^2 = 9$.

Сравнение зависимостей на рис. 7 и 8 показывает, что они ведут себя подобным образом. Если значение MSSIM_k(n) больше значения MSSIM_k(p) (n≠p), то, как правило, и значение PSNR-HVS-M_k(n) больше, чем PSNR-HVS-M_k(p). Следовательно, выводы, сделанные на основе анализа зависимостей MSSIM_k(n), совпадают с выводами, сделанными ранее на основе анализа зависимостей PSNR-HVS-M_k(n). В частности, для всех изображений до фильтрации MSSIM_k(n)<0,985, т.е. ПК помехи на изображениях заметны. После фильтрации остаточные помехи и искажения практически незаметны на изображениях № 1, 5, 8, 13, 25 (рис. 1), которые являются текстурными, и некоторых компонент изображения № 20.

Таким образом, даже при $y^2 = 9$ для случая ПК помех невозможно гарантировать, что остаточные помехи и искажения в отфильтрованных изображениях визуально незаметны. В связи с этим нами были рассмотрены еще меньшие значения дисперсии помех, в частности, $y^2 = 6$.

Полученные зависимости PSNR-HVS-M_k(n) приведены на рис. 9 и 10 соответственно для случаев БКП и СКП.

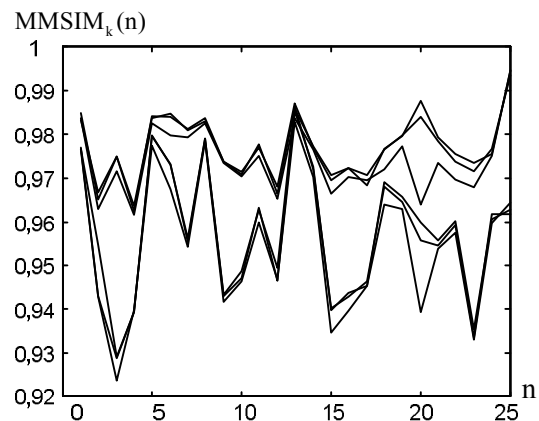


Рис. 8. Значения MSSIM_k(n) для компонент цветных изображений до и после фильтрации для случая СКП, $y^2 = 9$

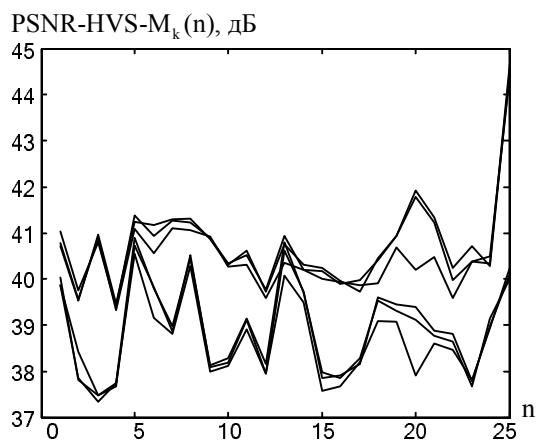


Рис. 9. Значения PSNR-HVS-M_k(n) для компонент цветных изображений до и после фильтрации для случая БКП, $y^2 = 6$

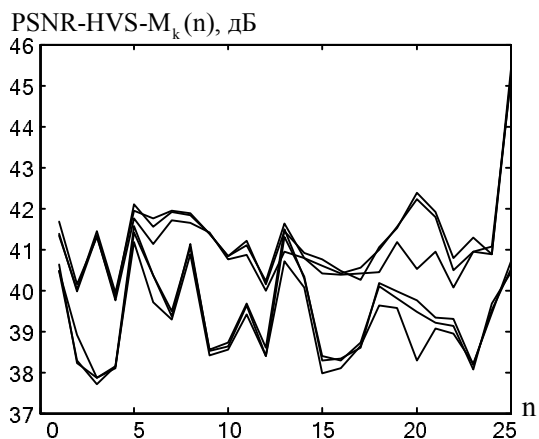


Рис. 10. Значения PSNR-HVS-M_k(n) для компонент цветных изображений до и после фильтрации для случая СКП, $y^2 = 6$

Очевидно, что соответствующие значения PSNR-HVS-M_k(n) существенно (примерно на 1,5 дБ) возросли по сравнению со случаем $y^2 = 9$ (сравните графики

на рис. 9 и 6, 10 и 7). Для фильтрованных изображений остаточные помехи и искажения после фильтрации визуально незаметны для всех изображений как для БКП, так и СКП. Однако этого нельзя гарантировать для зашумленных изображений, особенно в случае БКП (см. нижнюю группу кривых на рис. 9). Для текстурных изображений помехи практически незаметны, но для изображений с большими однородными участками они все же видны.

Отметим, что при $\gamma^2 = 6$ для БКП значения $\hat{\tau}_k(n)$ лежат в пределах от 1,24 до 1,93, а для СКП – от 1,15 до 1,96. Таким образом, поскольку $\hat{\tau}_k(n)$ превышают 1,1, можно с уверенностью говорить о том, что на этих изображениях присутствует ПК шум или изображения имеют сложную структуру. Поэтому, если применять автоматизированную обработку, на первом этапе которой оценивается $\hat{\tau}_k(n)$, который затем сравнивается с порогом (равным, например 1,1), то при $\hat{\tau}_k(n) > 1,1$ в любом случае необходимо оценивать пространственный спектр помех в ДКП области (если он заранее неизвестен). Выполнение такого оценивания вслепую представляется возможным с использованием метода, предложенного в работе [31]. Однако отметим, что ни метод [31], ни методы автоматического оценивания дисперсии помех, например [30], до настоящего времени не тестировались для случая дисперсии помех порядка 5...20. Вместе с тем, опыт тестирования методов автоматического оценивания дисперсии ПН и ПК помех [32] свидетельствует о следующем. Во-первых, чем ниже дисперсия помех, тем сложнее ее оценивать с желаемой точностью. Во-вторых, дисперсию ПК помех с приемлемой точностью оценивать сложнее, поскольку в этом случае применимо меньшее количество методов, чем при ПН помехах. В-третьих, можно предположить, что и оценивать пространственный спектр с приемлемой точностью при малой дисперсии помех гораздо сложнее, чем при γ^2 порядка десятков и сотен.

Поэтому разработке точных методов автоматического оценивания дисперсии и пространственного спектра помех при малых значениях γ^2 должно быть уделено повышенное внимание.

Отметим еще один момент. Хотя исследования выше проведены для изображений, каждая из компонент которых представляется 8-битными числами, полученные результаты представляют ценность и для других приложений, для которых изображения имеют другой динамический диапазон [33].

В общем виде

$$\text{PSNR-HVS-M}_k = 10 \lg(D^2 / \sigma_{k\text{HVS-M}}^2),$$

где D – динамический диапазон представления данных.

Поэтому все выводы, сделанные выше на основе анализа PSNR-HVS-M_k, справедливы и для изображений, для которых $D \neq 255$.

Заключение

Проведено исследование визуального качества цветных изображений, искаженных ПК и ПН помехами до и после фильтрации, используя базу TID2008. Показано, что качество зашумленных изображений и эффективность их фильтрации в соответствии с различными метриками существенно зависит как от свойств изображений (степень текстурности, сложность), так и от свойств помех. При ПН помехах они становятся практически незаметными визуально при дисперсии помех порядка 10...15. Для текстурных изображений это значение может быть еще выше. Если используется фильтрация, то можно добиться, что в обработанных изображениях остаточные помехи и искажения визуально незаметны при дисперсии помех порядка 25...35.

ПК помехи заметны на изображениях даже при значениях дисперсии порядка 6...10. В этом случае фильтрация с учетом корреляционных характеристик помех позволяет сделать остаточные помехи в обработанных изображениях практически незаметными. При больших значениях дисперсии ПК помех они заметны и существенно снижают визуальное качество как исходных, так и отфильтрованных изображений. В связи с этим желательной является разработка более эффективных фильтров, предназначенных для подавления таких помех в цветных и многоканальных изображениях.

Литература

1. Pratt W.K. *Digital Image Processing. Fourth Edition* / W.K. Pratt. – NY.: Wiley-Interscience (USA), 2007. – 1429 p.
2. Foi A. *Pointwise Shape-Adaptive DCT Image Filtering and Signal-Dependent Noise Estimation: Thesis for the degree of Doctor of Technology* / Alexandro Foi. – Tampere University of Technology, Tampere, (Finland). – 2007. – 194 p.
3. *Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering* / K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, K. Egiazarian // *IEEE Transactions on Image Processing*. – Aug. 2007. – Vol. 16, issue 8. – P. 2080-2095.
4. Elad M. *Sparse and Redundant Representations. From Theory to Applications in Signal and Image Processing* / Michael Elad. – NY.: Springer Science + Business Media (USA), 2010. – 376 p.
5. Astola J. *Vector Median Filters* // J. Astola, P. Haavisto, Y. Neuvo / *Proceedings of the IEEE*. – Aug. 1990. – Vol. 78. – P. 678-689.

6. Smolka B. *Nonlinear Techniques for Color Image Processing* / B. Smolka, K.N. Plataniotis, A.N. Venetsanopoulos // *Nonlinear Signal and Image Processing: Theory, Methods, and Applications, Electrical Engineering & Applied Signal Processing Series*; ed. by K. Barner, G. Arce. – CRC Press, 2003. – 560 p.
7. Plataniotis K.N. *Color Image Processing and Applications* / K.N. Plataniotis, A.N. Venetsanopoulos. – NY.: Springer-Verlag, 2000. – 355 p.
8. 3D DCT Based Filtering of Color and Multichannel Images / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, A.A. Zelensky, P.T. Koivisto, K.O. Egiazarian // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2008. – No 15. – P. 1369-1392.
9. Morillas S. *A Soft-Switching Approach to Improve Visual Quality of Colour Image Smoothing Filters* / S. Morillas, S. Schulte, T. Melange, E. Kerre, V. Gregori // *ACIVS'07 Proceedings of the 9th international conference on Advanced concepts for intelligent vision systems, 28-31 August 2007, Delft, Netherlands*. – Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2007. – P. 254-261.
10. Lim S.H. *Characterization of Noise in Digital Photographs for Image Processing* / S.H. Lim // *Proceedings of Digital Photography II*. – 16 January 2006, San Jose, CA, USA - 2006. – SPIE Vol. 6069. – 9 p.
11. Wang Z. *Mean squared error: love it or leave it? - A new look at signal fidelity measures* // Z. Wang, A.C. Bovik / *IEEE Signal Processing Magazine*. – Jan. 2009. – P. 98-117.
12. TID2008 – *A Database for Evaluation of Full-Reference Visual Quality Assessment Metrics* / N. Ponomarenko, V. Lukin, A. Zelensky, K. Egiazarian, J. Astola, M. Carli, F. Battisti // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2009. – No 10. – С. 30-45.
13. *On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions* / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, V. Lukin // *Proceedings of the Third International Workshop on Video Processing and Quality Metrics, Scottsdale, Arizona, USA, January 2007*. – P. 4. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.
14. *Adaptive DCT-based filtering of images corrupted by spatially correlated noise* / V. Lukin, N. Ponomarenko, K. Egiazarian, J. Astola // *Proceedings of SPIE Conference Image Processing: Algorithms and Systems VI, 28 January 2008, San Jose, CA, USA*. – 2008. – Vol. 6812. – 12 p.
15. *Pre-filtering of multichannel remote sensing data for agricultural bare soil field parameter estimation* / N. Ponomarenko, V. Lukin, I. Djurovic, M. Simeunovic // *Proceedings of BioSense 2009, oct. 2009*. – Novi Sad, Serbia. – 2009. – 4 p.
16. Chatterjee P. *Is Denoising Dead?* // P. Chatterjee, P. Milanfar / *IEEE Transactions on Image Processing*. – April 2010. – Vol. 19, No 4. – P. 895-911.
17. *Исследование эффективности фильтрации цветных изображений с использованием различных метрик* / Д.В. Февралев, С.К. Абрамов, Н.Н. Пономаренко, В.В. Лукин. // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2010. – № 2. – С. 97-107.
18. *Обработка случайных сигналов и процессов: Учебное пособие* / А.Н. Беседин, А.А. Зеленский, Г.П. Кулемин, В.В. Лукин. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 469 с.
19. Kervrann C. *Local adaptivity to variable smoothness for exemplar-based image regularization and representation* / C. Kervrann, J. Boulanger // *International Journal of Computer Vision*. – 2008. – Vol. 79, No 1. – P. 45-69.
20. *Kodak Lossless True Color Image Suite* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://r0k.us/graphics/kodak/> (7.05.2010).
21. TAMPERE IMAGE DATABASE 2008 TID2008, version 1.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ponomarenko.info/tid2008.htm> (7.05.2010).
22. *Metrics Performance Comparison for Color Image Database* / N. Ponomarenko, F. Battisti, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, V. Lukin // *Proceedings of VPQM 2009*. – Scottsdale, USA. – 2009. – 6 p.
23. *Lossy Compression of Noisy Images Based on Visual Quality: a Comprehensive Study* / N. Ponomarenko, S. Krivenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2010. – Article ID 976436. – 13 p.
24. Pedersen M. *A new spatial hue angle metric for perceptual image difference* // M. Pedersen, J.Y. Hardeberg / *Springer Series on LNCS*. – 2009. – Vol. 5646. – P. 81-90.
25. Larson E.C. *Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy* / E.C. Larson, D.M. Chandler // *Journal of Electronic Imaging*. – January-March 2010. – Vol. 19. – No 1. – P. 011006-1-011006-21.
26. You J. *Attention modeling for video quality assessment: balancing global quality and local quality* / J. You, J. Korhonen, A. Perkiš / *IEEE International Conference on Multimedia & Expo, 22 July 2010, Singapore*. – 2010. – P. 914-919.
27. Oktem R. *Locally Adaptive DCT Filtering for Signal-Dependent Noise Removal* / R. Oktem, K. Egiazarian, V. Lukin, N. Ponomarenko, O. Tsymbal // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2007. – Article ID 42472. – 10 p.
28. *Потенциальная эффективность фильтрации изображений: есть ли предел и близок ли он?* / В.В. Лукин, С.К. Абрамов, А.А. Зеленский, Н.Н. Пономаренко // *Радиоелектронні та комп'ютерні системи*. – 2010. – № 3 (44). – С. 40-45.
29. *PSNR-HVS-M download page* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ponomarenko.info/psnrhvs.htm> (7.05.2010).
30. *Improved minimal inter-quantile distance method for blind estimation of noise variance in images* / V.V. Lukin, S.K. Abramov, B. Vozel, K. Chehdi // *Proceedings of SPIE/EUROPTO Symp. on Satellite Remote Sensing*. – Sept 2007. – Florence, Italy. – 2007. – 12 p.
31. Пономаренко Н.Н. *Метод слепой оценки на изображениях характеристик аддитивного Гауссо-*

ва шума с неравномерным спектром / Н.Н. Пономаренко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – N 2 (59). – С. 82-90.

32. *Testing of methods for blind estimation of noise variance on large image database* / V.V. Lukin, S.K. Abramov, M.L. Uss, I.A. Marusiy, N.N. Ponomarenko, A.A. Zelensky, B. Vozel, K. Chehdi // *Теоретические и практические аспекты цифровой обработ-*

ки сигналов в информационно-телекоммуникационных системах; под ред. В.И. Марчука. – Шахты : ГОУ ВПО ЮРГУЭС (Россия), 2009. – С. 43-70.

33. *Сжатие изображений дистанционного зондирования без визуально заметных искажений* / С.С. Кривенко, В.В. Лукин, М.С. Зряхов, А.А. Зеленский // *Радиотехника*. – 2009. – Т. 159. – С. 248-254.

Поступила в редакцию 7.12.2010

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.

ФІЛЬТРАЦІЯ КОЛЬОРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ: КОЛИ ВОНА НЕОБХІДНА?

В.В. Лукін, Д.В. Февральов, М.М. Пономаренко, С.К. Абрамов

У статті проведено дослідження ефективності фільтрації кольорових зображень, які спотворені просторово-корельованими та просторово-некорельованими адитивними завадами. Показано, що придушення просторово-корельованих завад є більш складною задачею, й вони більшою мірою знижують візуальну якість як первинних, так і оброблених зображень. Визначені граничні значення дисперсії типів завад, що розглядаються, для яких застосування фільтрації стає недоцільним. Показано, що ці значення залежать від ступеня складності зображення та від метода фільтрації, що використовується.

Ключові слова: база кольорових зображень, ефективність фільтрації, метрики візуальної якості

COLOR IMAGE FILTERING: WHEN IT IS NECESSARY?

V.V. Lukin, D.V. Fevralev, N.N. Ponomarenko, S.K. Abramov

The paper deals with efficiency study of filtering color images corrupted by spatially uncorrelated and correlated additive noise. It is shown that suppression of spatially correlated noise is a more difficult task. They degrade visual quality of original and processed images in a larger degree. The limit values of noise variance for the considered noise types for which filter applications becomes not reasonable are determined. It is demonstrated that these values depend upon image complexity and a filtering method applied.

Key words: color image database, filtering efficiency, visual quality metrics.

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

Февральев Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, н.с. каф. «Прием, передача и обработка сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: fevralev_@mail.ru.

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

Абрамов Сергей Клавдиевич - канд. техн. наук, доцент каф. «Прием, передача и обработка сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ask379@mail.ru.