

УДК 681.3.21

А. С. РУБЕЛЬ, В. В. ЛУКИН

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

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕТРОЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОДАВЛЕНИИ АДДИТИВНОГО ШУМА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Исследована эффективность фильтрации на основе тетролет преобразования для базы тестовых изображений с различными свойствами, искаженных аддитивным белым гауссовым шумом с различной интенсивностью. В качестве критериев эффективности использованы как традиционные метрики, например, PSNR, так и метрики визуального качества (PSNR-HVS-M, MSSIM, FSIM). Проанализировано влияние свойств изображений на выбор оптимального порога. Приведен сравнительный анализ фильтра на основе тетролет преобразования с ДКП-фильтром в плане сохранения границ объектов и эффективного подавления шума.

Ключевые слова: тетролет преобразование, фильтрация, ДКП-фильтр, аддитивные помехи.

Введение

Большинство изображений, которые формируются различными цифровыми системами, искажены помехами [1, 2]. В связи с этим возникает задача подавления шума на таких изображениях [1]. Одной из наиболее часто используемых моделей шума является аддитивный белый гауссов шум (АБГШ) [3]. В настоящее время существует огромное число фильтров, предназначенных для подавления АБГШ. Достаточно высокой эффективностью устранения АБГШ обладают фильтры на основе ортогональных преобразований [4]. Чаще всего для преобразования изображений из пространственной области в область преобразования (частотную) используют дискретное косинусное преобразование (ДКП) и вейвлет-преобразование [4-6]. Одним из ярких представителей таких фильтров является ДКП-фильтр [8-10] с полным перекрытием блоков. Эффективность данного фильтра сравнима с популярными нелокальными фильтрами [6, 7, 11].

Алгоритм работы ДКП-фильтра [7-9] состоит в следующем. Изображение подвергается поблочному прямому ДКП преобразованию с размером блока 8x8 или 16x16 пикселей. Блоки могут выбираться с полным, частичным перекрытием или без перекрытия. Как правило, выбираются блоки с полным перекрытием, поскольку такой выбор обеспечивает повышение эффективности фильтрации. Затем в каждом блоке применяется жесткая пороговая обработка. Она заключается в обнулении тех спектральных коэффициентов, которые не превышают заранее выбранный порог. Значение порога выбирается с

учетом характеристик шума, которые полагают заранее известными или точно оцененными. Применение такой обработки обусловлено следующими положениями. Энергия полезного сигнала в блоке изображения сосредотачивается в достаточно небольшом количестве ДКП-коэффициентов, абсолютные значения которых значительно превышают значения остальных коэффициентов в преобразованном блоке. В то же время энергия шума равномерно распределяется по всем ДКП-коэффициентам. Следовательно, если абсолютное значение ДКП-коэффициента относительно мало, т.е. сравнимо со значением среднеквадратического отклонения шума, то можно сказать, что этот коэффициент с большой вероятностью соответствует шуму [22]. Последним этапом работы ДКП-фильтра является выполнение поблочного обратного ДКП. И наконец, для каждого пикселя выполняют усреднение фильтрованных значений, полученных для разных блоков, которые включают данный пиксель.

ДКП-фильтры, как и некоторые другие методы, характеризуются достаточно высокой интегральной эффективностью подавления АБГШ на различных типах изображений [5, 7]. Однако для многих фильтров характерны проблемы сохранения границ на изображениях. Отметим, что границы являются информативными особенностями изображения, одними из их характерных элементов, и они широко используются в задачах распознавания образов и классификации изображений [12]. Но наличие шума на изображениях затрудняет обнаружение и сохранение границ. В связи с этим интерес представляют любые новые подходы к фильтрации, позволяющие эффективно сохранять границы объектов.

Одним из преобразований, способных по утверждению авторов [13, 14] эффективно сохранять границы при фильтрации, является недавно предложенное тетролет преобразование. Его эффективность, по утверждению авторов, превосходит другие виды адаптивных вейвлет-преобразований [14-17]. Результаты работы тетролет преобразования выглядят довольно перспективными [13, 14].

Вместе с тем, возможности и свойства тетролет преобразований и алгоритмов фильтрации изображений на их основе изучены недостаточно. В частности, непонятно, можно ли использовать тетролет преобразование и фильтрацию в блоках с перекрытием, каковы оптимальные значения порогов и т.п. Поэтому, целью данной работы является анализ эффективности фильтра на основе тетролет преобразования в плане сохранения границ на изображениях в соответствии с рядом метрик. Второй аспект исследования – выбор оптимальных параметров для фильтра на основе тетролет преобразования.

Тетролет преобразование

Тетролеты являются адаптивными вейвлетами Хаара, которые поддерживают тетромино. Тетромино наиболее известны как «падающие фигуры» в компьютерной игре «Тетрис». Тетромино – это геометрические фигуры, полученные путем объединения четырех равных квадратов. Если не учитывать зеркальные отражения фигур, т.е. рассматривать “свободные” тетромино, то различных форм тетромино существует пять. Соответствующий алгоритм является простым, но очень эффективным. Очевидно, что любой квадрат может быть покрыт с помощью тетромино, однако возможное число комбинаций возрастает с ростом его размера. Существует 117 комбинаций покрытия блока размером 4x4 с использованием четырех непересекающихся тетромино [13, 14].

В двумерном преобразовании Хаара изображение разбивается на блоки 2x2 пикселя и после применения генерирует одно среднее значение и три детализирующих [13]. Эти коэффициенты содержат информацию о вертикальных, горизонтальных и диагональных строках изображения. В тетролет преобразовании изображение разбивается на блоки 4x4 пикселей. В каждом блоке определяется локальный тетролет-базис, соответствующий геометрической структуре блока. После этого применяется преобразование Хаара для генерации 4-х средних коэффициентов и 12-ти детализирующих. Преобразование Хаара применяется к каждому из четырех блоков размером 2x2 пикселей. Оптимальным способом покрытия блока тетромино считается тот, при котором генерируются минимальная сумма абсо-

лютных значений всех детализирующих коэффициентов, а такие коэффициенты называются тетролет коэффициентами [13, 14].

Для того, чтобы восстановить изображение, необходимо хранить информацию о выбранном способе покрытия в каждом блоке 4x4. Алгоритм декомпозиции выглядит следующим образом.

Вход: изображение $a = (a[i, j])_{i,j=0}^{N=1}$, где $N = 2^J$, $J \in \mathbb{N}$.

- 1) разделить изображение на блоки размером 4x4;
- 2) найти в каждом блоке “разреженное” тетролет-представление;
- 3) переупорядочить низкочастотные и высокочастотные коэффициенты каждого блока в блок размером 2x2;
- 4) сохранить тетролет-коэффициенты (высокочастотные);
- 5) применить шаги 1-4 к низкочастотному изображению.

Выход: тетролет коэффициенты разложенного изображения.

Используемая модель помехи и фильтра

В работе используется модель помехи, представленная аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ). Реализацией АБГШ является двумерный случайный процесс с нулевым средним, заданной дисперсией и гауссовой плотностью распределения. При моделировании реализация шума добавлялась к исходному (не зашумленному) тестовому изображению. Модель помехи и полутонового изображения (в оттенках серого) описывается следующим выражением:

$$I_{ш}^{add}(i, j) = I_o(i, j) + N_{гаусс}(\sigma), \quad (1)$$

где i, j – координаты пикселей на изображении,

I_o – исходное изображение без помех,

$I_{ш}^{add}$ – изображение, искаженное аддитивным шумом,

$N_{гаусс}$ – АБГШ с нулевым средним и заданным среднеквадратическим отклонением (СКО) σ .

Рассмотренный метод фильтрации работает в спектральной области тетролет преобразования с полным перекрытием блоков, размер которых составляет 4x4 пикселей.

По аналогии с ДКП-фильтром, главным принципом используемого фильтра также является жесткая пороговая обработка. Она состоит в следующем. К изображению применяется прямое тетролет преобразование с соответствующим количеством шагов

разложения, после чего полученные тетролет (спектральные) коэффициенты сравниваются с заранее определенным порогом и коэффициенты, не превышающие порог, обнуляются. Функция жесткой пороговой обработки выглядит следующим образом:

$$S_{\text{вых}}(x) = \begin{cases} x, & |x| \geq \beta\sigma, \\ 0, & |x| < \beta\sigma, \end{cases} \quad (2)$$

где x – тетролет-коэффициент,

β – пороговый параметр, который влияет на качество фильтрации,

σ – СКО шума.

Определение оптимального порога фильтрации

Рассмотрим фильтр на основе тетролет преобразования с полным перекрытием блоков (соседние блоки сдвинуты друг относительно друга на один пиксель) размером 4x4 пикселей. Такой вариант фильтра обусловлен тем, что при полном перекрытии блоков обычно значительно повышается эффективность фильтрации [7, 22]. В следующем разделе различные варианты выбора блоков в контексте фильтрации на основе тетролет преобразования будут рассмотрены более подробно (преобразование с неперекрывающимися блоками, с половинным и с полным перекрытием блоков).

Очевидно, что эффективность фильтрации зависит от порога фильтрации, т.е. от значения параметра β . На сегодняшний момент обычно эффективность фильтрации оценивается с помощью таких метрик, как среднеквадратическая ошибка (MSE) и пиковое соотношение сигнал-шум (PSNR), а также метрик, учитывающих особенности зрительной системы человека - среди них MSSIM (или SSIM) [18, 24], FSIM [19] и PSNR-HVS-M [20, 21]. В соответствии с этими метриками становится возможным определить оптимальное значение параметра β для рассматриваемого фильтра. Оптимальным значением параметра β будем считать то, которое обеспечивает лучший результат для той или иной метрики визуального качества.

Определение оптимального параметра фильтрации проводилось с использованием шести стандартных тестовых изображений различной сложности [23], искаженных АБГШ со значениями СКО, равными 7 и 15. Все изображения имеют размер 512x512 пикселей и представлены только яркостной компонентой в градациях серого, т.е. 8 бит на пиксель. Тестовые изображения показаны на рис. 1.

Прежде всего, приведем результаты для анали-

за эффективности фильтрации при $\sigma=7$ для широкого диапазона значений β . На рис. 2 показаны зависимости метрик PSNR, PSNR-HVS-M, MSSIM и FSIM от параметра фильтра β для шести стандартных тестовых изображений. Соответствующие оптимальные значения параметра β для каждого изображения приведены в табл. 1.



Рис. 1. Пример тестовых изображений с указанием их порядковых номеров и названий

Таблица 1
Оптимальные значения параметра β для СКО шума 7 с полным перекрытием блоков

Изображение	β			
	PSNR	PSNR-HVS-M	MSSIM	FSIM
Cameraman	4	3,4	4,4	3,8
Lena	4,2	3,4	4,2	3,8
Living room	3,8	3,4	4,0	3,6
Baboon	3,4	2	2,8	2,4
Pirate	3,6	3,2	3,6	3,4
Woman blonde	3,6	3,6	3,8	3,8

Рассмотрим полученные значения более подробно. Для метрики PSNR оптимальные значения

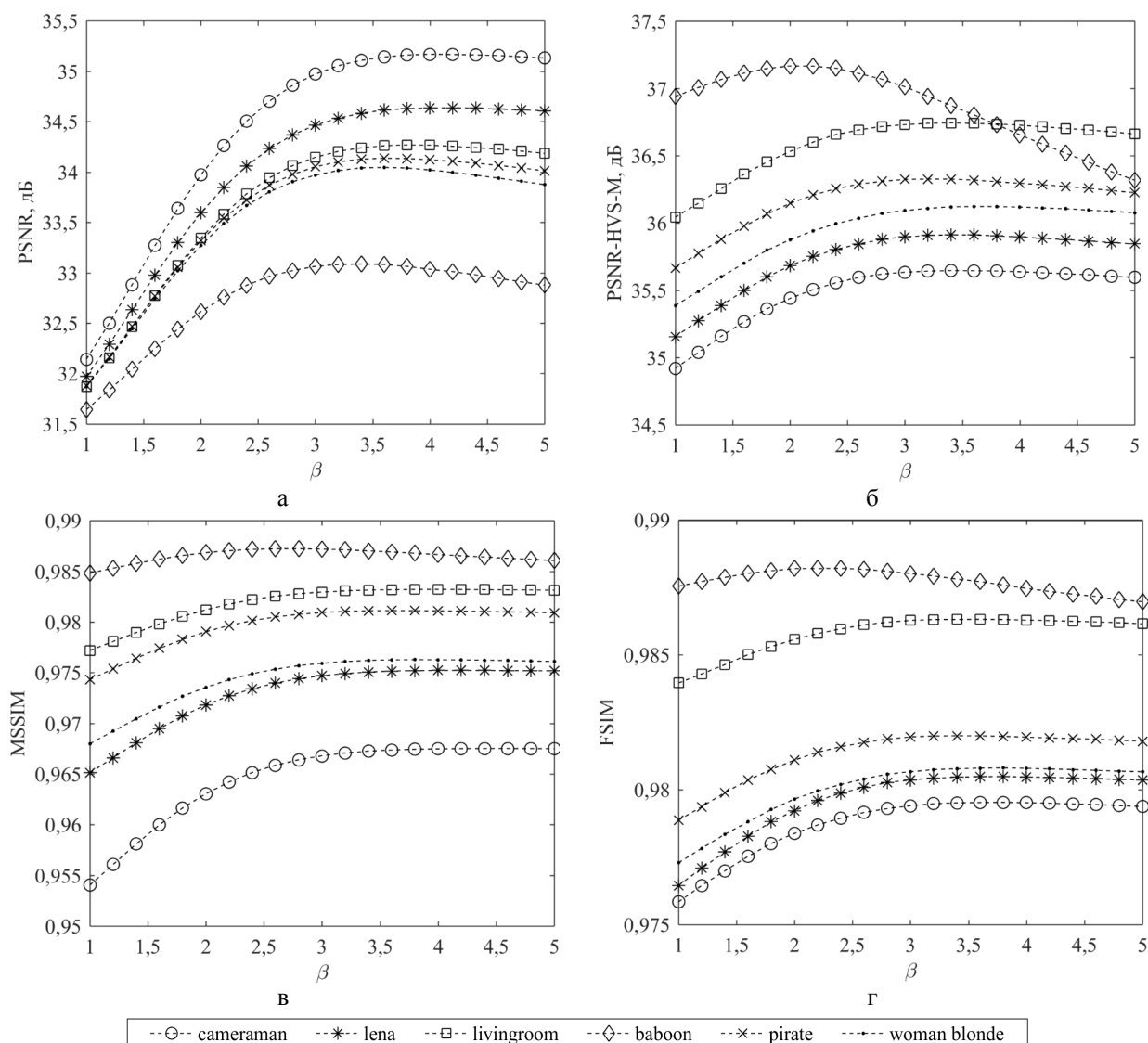


Рис. 2. Зависимости эффективности фильтрации для метрик PSNR (а), PSNR-HVS-M (б), MSSIM (в), FSIM (г) от параметра β в случае полного перекрытия блоков для СКО шума, равного 7

параметра β , в среднем, равны 3,7. В окрестности этого оптимума значения метрики мало изменяются. Стоит отметить, что для тестовых изображений Cameraman (одно из относительно простых тестовых изображение) и Lena (изображение средней сложности) значения оптимального параметра β выше, чем для других изображений. Напротив, для изображения Baboon значение β несколько ниже среднего значения и составляет 3,4. Как правило, такое изображение оказывается наиболее сложным для эффективного подавления помех, поскольку является текстурным, особенно при малом уровне шума. Выигрыш благодаря фильтрации (по метрике PSNR) для изображений Cameraman и Lena составляют 3,9 дБ и 3,4 дБ соответственно, а для изображения Baboon – 1,88 дБ. Для метрики PSNR-HVS-M оптимальное β примерно равно 3,2. Выигрыш благодаря

фильтрации для всех изображений, кроме изображения Baboon, по метрике PSNR-HVS-M составляет около 1 дБ. Для метрики MSSIM оптимальные значения β находятся около 3,8. Как и в предыдущем случае, для всех изображений, кроме Baboon, выигрыш по метрике MSSIM составляет около 0,01. Для метрики FSIM значения оптимумов практически для всех изображений (исключение также составляет текстурное изображение Baboon) находятся в диапазоне от 3,4 до 3,8. Выигрыш, вследствие фильтрации для всех изображений, составляет менее 0,01. Таким образом, анализ табл. 1 показывает, что для текстурного изображения Baboon при низком уровне помехи (СКО=7) целесообразно использовать меньшие значения параметра β .

Заметим, что значения метрик MSSIM и FSIM изменяются от 0 до 1, а значения метрики PSNR-HVS-M измеряются в дБ (большие значения соот-

ветствуют лучшему визуальному качеству).

Приведем теперь результаты анализа эффективности фильтрации для случая $\sigma=15$. На рис. 3 показаны зависимости рассматриваемых метрик от параметра β для шести тестовых изображений. Оптимальные значения параметра β для этого случая приведены в табл. 2. Анализ представленных данных показывает следующее. По всем метрикам наблюдается увеличение оптимального значения параметра β . Как и ранее, оптимальные значения параметра β для изображения Baboon практически для всех метрик несколько ниже, чем для остальных изображений. Выигрыш вследствие фильтрации по метрикам PSNR и PSNR-HVS-M лежит в пределах от 3,6 дБ до 4,6 дБ и от 0,8 дБ до 1,4 дБ соответственно. В тоже время, по метрике MSSIM он состав-

ляет от 0,02 до 0,05. И, наконец, для метрики FSIM выигрыш благодаря фильтрации находится в пределах от 0,007 до 0,02.

Таблица 2
Оптимальные значения параметра β для СКО шума 15 с полным перекрытием блоков

Изображение	β			
	PSNR	PSNR-HVS-M	MSSIM	FSIM
Cameraman	5	3,8	5	4,6
Lena	5	4,4	5	4,6
Living room	4,6	4,4	4,6	4,2
Baboon	5	3,2	3,8	3,8
Pirate	4,8	4,2	4,6	4,2
Woman blonde	4,2	4,2	4,8	4,6

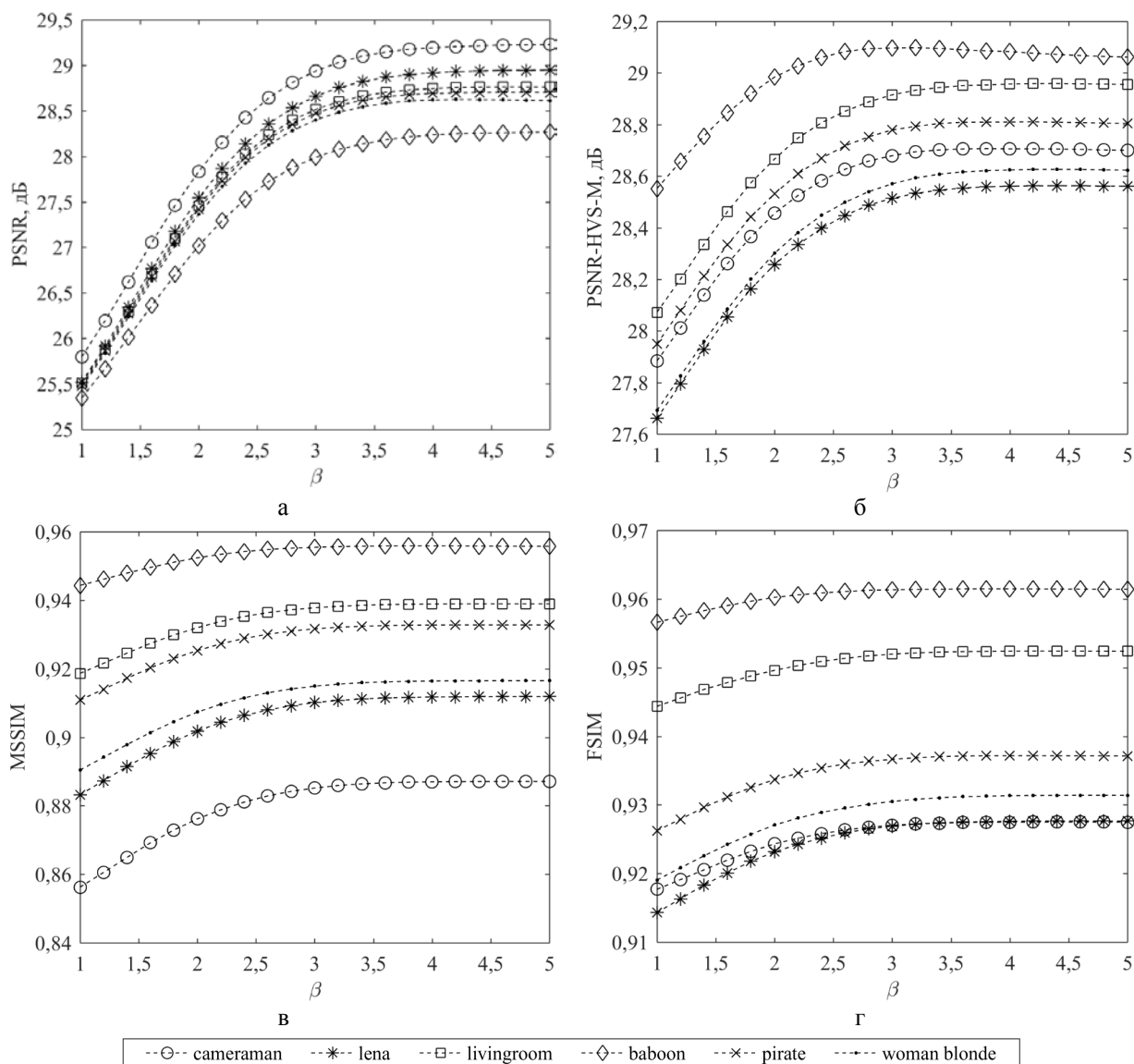


Рис. 3. Зависимости эффективности фильтрации для метрик PSNR (а), PSNR-HVS-M (б), MSSIM (в), FSIM (г) от параметра β в случае полного перекрытия блоков для СКО шума, равного 15

В целом, результаты, приведенные в табл. 2, показывают, что большинство оптимальных значений параметра β лежит в пределах от 4 до 4,7 для таких критериев эффективности фильтрации как PSNR, PSNR-HVS-M, MSSIM и FSIM.

Таким образом, для всех случаев зависимости значений метрик от параметра β (см. рис. 2 и 3) в окрестностях оптимумов представляют собой гладкие и медленно меняющиеся функции. То есть, небольшие отклонения установки параметра β от оптимальных значений не приводят к резкому ухудшению качества обработки. Значения на гладких участках (см. рис. 2 и 3) отличаются менее, чем на 0,005 дБ для метрик PSNR и PSNR-HVS-M и менее, чем на 0,003 для метрик MSSIM и FSIM, что визуально никак не сказывается. Это дает возможность рекомендовать использование параметра $\beta = 3,5$ и $\beta = 4$ в случаях СКО шума равного 7 и 15 соответственно, обеспечивая при этом высокое визуальное качество отфильтрованных изображений. Важно отметить и зависимость значений параметра β от тестового изображения. В случае обработки текстурных изображений или изображений, содержащих большие текстурные участки, особенно при малой интенсивности шума, параметр β желательно устанавливать несколько меньшим в отличие от изображений, содержащих протяженные однородные участки (например, изображение Cameraman).

Анализ модификаций тетролет-фильтра

Теперь более детально рассмотрим варианты выбора блоков для фильтра на основе тетролет преобразования. Как уже упоминалось ранее, блоки можно выбирать с полным, половинным (частичным) перекрытием и без перекрытия.

Для начала рассмотрим самый простой вариант – блоки без перекрытия. Прежде всего, определим оптимальные значения параметра β с помощью метрик эффективности PSNR, PSNR-HVS-M, MSSIM и FSIM. В табл. 3 приведены оптимальные значения параметра β в случае $\sigma = 7$. Анализируя данные в табл. 3, можно увидеть, что оптимумы параметра β меньше, чем в аналогичном случае для блоков с полным перекрытием (см. табл. 1), особенно для метрик PSNR-HVS-M и FSIM. Отметим, что при такой интенсивности шума значения метрики PSNR-HVS-M уменьшаются с увеличением параметра β , тем самым указывая на ухудшение визуального качества после фильтрации. Также для этого случая выбора блоков в табл. 4 приведены опти-

мальные значения параметра β для $\sigma = 15$. Вполне ожидаемо, что с увеличением интенсивности шума увеличились и значения оптимумов. Однако, как и в случае с $\sigma = 7$, оптимальные значения β согласно метрике PSNR-HVS-M достаточно малы.

Таблица 3
Оптимальные значения параметра β для СКО шума, равного 7, с неперекрывающимися блоками

Изображение	β			
	PSNR	PSNR-HVS-M	MSSIM	FSIM
Cameraman	3	1	3,4	1,8
Lena	2,8	1	3,2	2,2
Living room	2,4	1	2,4	1
Baboon	1	1	1,2	1
Pirate	2,4	1	2,4	1,4
Woman blonde	2,4	1	2,4	1

Таблица 4
Оптимальные значения параметра β для СКО шума, равного 15, с неперекрывающимися блоками

Изображение	β			
	PSNR	PSNR-HVS-M	MSSIM	FSIM
Cameraman	3,8	1	4,6	3,2
Lena	4	1,4	3,8	3
Living room	3,8	1	3,8	2,4
Baboon	3,2	1	1,8	1
Pirate	4	1	3,4	3,4
Woman blonde	3,6	1	3,6	2,6

Теперь перейдем к рассмотрению блоков с половинным перекрытием. Аналогичным образом определим оптимальные значения параметра β . Значения этого параметра для СКО шума, равных 7 и 15, приведены соответственно в табл. 5 и 6. Отметим, что данные значения оптимумов достаточно близки к значениям, полученным без перекрытия блоков. Также на рис. 4 показаны зависимости метрик PSNR и PSNR-HVS-M от параметра β для $\sigma = 7$ (см. рис. 4 а, б) и $\sigma = 15$ (см. рис. 4 в, г). Заметим, что для метрики PSNR-HVS-M (см. рис. 4 б, г), как и ранее, наблюдается снижение эффективности фильтрации с увеличением значения параметра β , в результате чего получены малые значения оптимумов. Также в случае $\sigma = 7$ значения метрики PSNR для высоко текстурного изображения Baboon (см. рис. 4 а) заметно снижается. Значение β возрастает с увеличением σ .

Далее перейдем к сравнению рассмотренных выше вариантов выполнения фильтрации на основе тетролет преобразования. Сравнение эффективности фильтрации будет проводиться также с использованием метрик PSNR, PSNR-HVS-M, MSSIM и FSIM.

Прежде всего, выполним сравнение, установив при этом фиксированное значение параметра $\beta = 3$ для всех трех вариантов фильтра. Полученные результаты приведены в табл. 7-10. В таблицах используются следующие обозначения. “Шум” используется для обозначения зашумленных изображений, ТФ – тетролет-фильтр, ПБ – обозначает варианты перекрытия блоков. В табл. 7,8 и табл. 9, 10 приведены значения метрик для СКО шума 7 и 15 соответственно. Анализ этих таблиц показывает, что фильтрация при полном перекрытии блоков гораздо более эффективна. При этом выигрыш от фильтрации при различной интенсивности шума по метрике PSNR составляет около 4 дБ, а в случае метрики PSNR-HVS-M может превышать 1 дБ. При СКО шума, равном 7, выигрыш, благодаря фильтрации по метрикам MSSIM и FSIM, составляет около 0,006 и 0,01 соответственно, а при $\sigma=15$ выигрыш достигает – 0,05 и 0,02. Эти результаты свидетельствуют об улучшении визуального качества изображений после применения фильтрации.

Таблица 5
Оптимальные значения параметра β для СКО шума, равного 7, с половинным перекрытием блоков

Изображение	β			
	PSNR	PSNR-HVS-M	MSSIM	FSIM
Cameraman	3	1,4	3,4	2,4
Lena	2,8	1	3,4	2,2
Living room	2,6	1	2,4	1,8
Baboon	1,4	1	1,4	1
Pirate	2,6	1	2,8	2
Woman blonde	2,6	1	3	2,4

Таблица 6
Оптимальные значения параметра β для СКО, равного 15, с половинным перекрытием блоков

Изображение	β			
	PSNR	PSNR-HVS-M	MSSIM	FSIM
Cameraman	3,8	1,6	4,6	3,2
Lena	4	1,8	4,2	3,2
Living room	3,8	1,6	3,8	2,6
Baboon	3,6	1	2,6	1,4
Pirate	4	1,4	4	3,4
Woman blonde	3,6	1,8	3,8	3,4

На рис. 5 и 6 показаны фрагменты изображений Cameraman и Lena на выходе анализируемых фильтров, при этом СКО шума соответственно равно 7 и 15. Заметим, что визуальная разница между фильтрацией без перекрытия и с половинным перекрытием выглядит незначительной. Полученные значения метрик для фильтрации без перекрытия и с поло-

винным перекрытием количественно отражают данное наблюдение (см. табл. 7-10).

Далее выполним сравнение фильтров, устанавливая при этом параметр β оптимальным для каждого конкретного фильтра и по каждой метрике. Данные значения параметра $\beta_{\text{опт}}$ соответствуют значениям, которые приведены в табл. 1-6. Результаты эффективности фильтрации для СКО шума 7 и 15 приведены в табл. 11, 12 и табл. 13, 14 соответственно. Анализ представленных значений метрик эффективности показывает, что наилучший результат после обработки, как и в случае с фиксированным параметром β , демонстрирует способ фильтрации с полным перекрытием блоков. Выигрыш благодаря применению оптимального параметра фильтра по метрике PSNR максимум на 0,3 дБ выше аналогичных значений для фиксированного параметра, по метрике PSNR-HVS-M – не более 0,05 дБ, а по метрикам MSSIM и FSIM – 0,002 и 0,0009.

Вполне ожидаемо, что значения метрик при выборе оптимального значения параметра $\beta_{\text{опт}}$ в большинстве случаев немного больше, чем аналогичные значения, но при $\beta = 3$. Однако такая разница не оказывает существенного влияния на визуальное качество изображений после обработки. Такие результаты свидетельствуют о том, что вполне допустимо использование неоптимального порогового значения β , обеспечивая при этом приемлемое визуальное качество. Поэтому можно рекомендовать использовать пороговое значение β в диапазоне от 3 до 4.

Проведем оценку временных затрат обработки с различными способами выбора блоков. Проиллюстрируем это на примере изображения Cameraman, имеющего размер 512x512 пикселей. Использовать будем только один шаг тетролет разложения. Так, временные затраты на декомпозицию и восстановление данного изображения с выбором блоков без перекрытия составляют 1,04 с и 0,8 с соответственно, при половинном перекрытии блоков – 1,4 с и 1 с, а при полном перекрытии блоков – 16,5 с, и 15,3 с (расчет произведен на машине с конфигурацией – Intel Core i7 2,2 ГГц, 16 Гб ОЗУ).

В целом, в результате анализа рассмотренных вариантов фильтрации на основе тетролет преобразования оказалось, что при полном перекрытии блоков обеспечивается наилучшая эффективность фильтрации. Тем не менее, обработка с полным перекрытием блоков требует большего времени и дополнительное ускорение обработки возможно за счет использования половинного (частичного) перекрытия блоков, однако при этом снижается эффективность обработки.

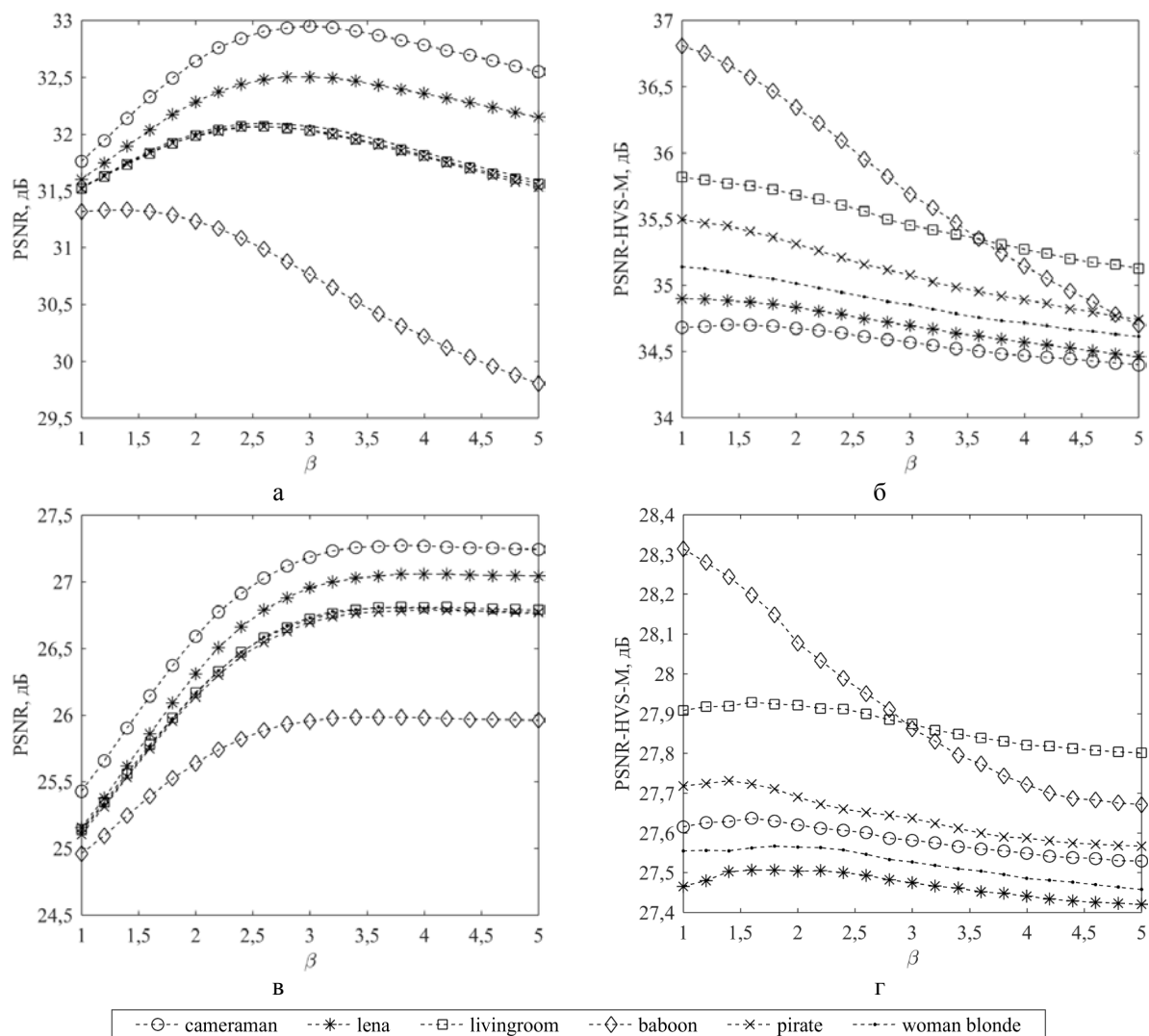


Рис. 4. Зависимости эффективности фильтрации для метрик PSNR и PSNR-HVS-M от параметра β в случае половинного перекрытия блоков для СКО шума, равного 7 (а, б) и 15 (в, г)

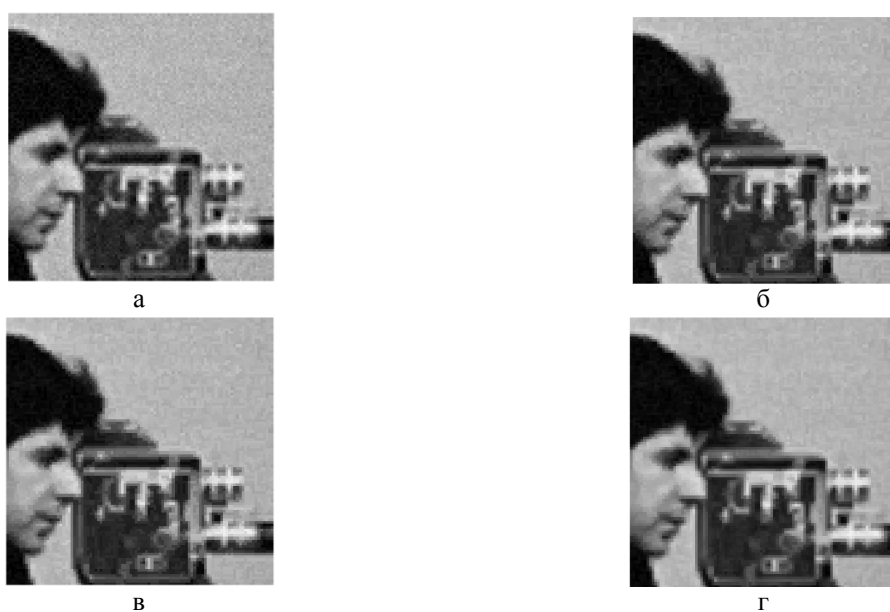


Рис. 5. Примеры фильтрации зашумленного фрагмента изображения Cameraman (а) с использованием тетролет преобразования без перекрытия (б), с половинным (в) и с полным перекрытием блоков (г) для СКО шума, равного 7

Таблица 7

Сравнение эффективности фильтрации по метрикам PSNR и PSNR-HVS-M при $\beta=3$ для $\sigma=7$

№ изображения	Шум		ТФ без ПБ		ТФ с половинным ПБ		ТФ с полным ПБ	
	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ
1	31,25	34,59	32,74	34,38	32,94	34,56	34,971	35,6339
2	31,25	34,91	32,26	34,51	32,49	34,6	34,4632	35,8982
3	31,25	35,84	31,81	35,27	32,03	35,45	34,146	36,731
4	31,25	36,91	30,41	35,49	30,76	35,68	33,0634	37,0131
5	31,25	35,54	31,71	34,88	32,03	35,07	34,0521	36,3244
6	31,25	35,19	31,78	34,66	32,06	34,85	33,9689	36,0916

Таблица 8

Сравнение эффективности фильтрации по метрикам MSSIM и FSIM при $\beta=3$ для $\sigma=7$

№ изображения	Шум		ТФ без ПБ		ТФ с половинным ПБ		ТФ с полным ПБ	
	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM
1	0,9483	0,9737	0,9574	0,9747	0,9591	0,9753	0,9668	0,9794
2	0,9618	0,9750	0,9665	0,9754	0,9680	0,976	0,9747	0,9804
3	0,9749	0,9832	0,9763	0,9828	0,9773	0,9832	0,9829	0,9863
4	0,9838	0,9875	0,9817	0,9855	0,9824	0,986	0,9872	0,988
5	0,9719	0,9780	0,9737	0,9776	0,9747	0,9781	0,9809	0,982
6	0,9655	0,9759	0,9678	0,9756	0,9692	0,9761	0,9759	0,9807

Таблица 9

Сравнение эффективности фильтрации по метрикам PSNR и PSNR-HVS-M при $\beta=3$ для $\sigma=15$

№ изображения	Шум		ТФ без ПБ		ТФ с половинным ПБ		ТФ с полным ПБ	
	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ
1	24,63	27,36	26,96	27,41	27,18	27,58	28,9374	28,679
2	24,63	27,44	26,72	27,30	26,95	27,47	28,6618	28,5136
3	24,63	27,86	26,48	27,69	26,71	27,87	28,5155	28,9151
4	24,63	28,35	25,62	27,67	25,95	27,86	27,9889	29,0964
5	24,63	27,70	26,41	27,46	26,69	27,63	28,4735	28,7787
6	24,63	27,54	26,47	27,35	26,73	27,52	28,3995	28,5699

Таблица 10

Сравнение эффективности фильтрации по метрикам MSSIM и FSIM при $\beta=3$ для $\sigma=15$

№ изображения	Шум		ТФ без ПБ		ТФ с половинным ПБ		ТФ с полным ПБ	
	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM
1	0,838	0,906	0,8632	0,9145	0,8673	0,9163	0,8871	0,9275
2	0,8746	0,9112	0,8918	0,9148	0,8951	0,9162	0,9119	0,9276
3	0,9113	0,941	0,9219	0,9429	0,9243	0,9439	0,9389	0,9524
4	0,9396	0,9558	0,9412	0,9545	0,9431	0,9556	0,9558	0,9615
5	0,9036	0,9231	0,9149	0,9249	0,9172	0,926	0,9328	0,9372
6	0,8829	0,9151	0,8960	0,9172	0,8991	0,9184	0,9165	0,9314

Таблиця 11

Сравнение эффективности фильтрации по метрикам PSNR и PSNR-HVS-M при $\beta_{\text{опт}}$ для $\sigma=7$

№ изображения	Шум		ТФ без ПБ		ТФ с половинным ПБ		ТФ с полным ПБ	
	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ
1	31,254	34,59	32,74	34,63	32,94	34,70	35,1675	35,6457
2	31,254	34,91	32,26	34,85	32,50	34,89	34,6359	35,9115
3	31,254	35,84	31,86	35,76	32,06	35,81	34,2678	36,7433
4	31,254	36,91	31,26	36,78	31,33	36,80	33,0855	37,1673
5	31,254	35,54	31,80	35,45	32,06	35,49	34,1371	36,3266
6	31,254	35,19	31,84	35,09	32,09	35,13	34,0456	36,1228

Таблиця 12

Сравнение эффективности фильтрации по метрикам MSSIM и FSIM при $\beta_{\text{опт}}$ для $\sigma=7$

№ изображения	Шум		ТФ без ПБ		ТФ с половинным ПБ		ТФ с полным ПБ	
	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM
1	0,9483	0,9737	0,9576	0,9749	0,9597	0,9754	0,9675	0,9795
2	0,9618	0,9750	0,9666	0,9756	0,968	0,976	0,9752	0,9805
3	0,9749	0,9832	0,9765	0,9834	0,9774	0,9835	0,9832	0,9863
4	0,9838	0,9875	0,9839	0,9874	0,9841	0,9875	0,9872	0,9882
5	0,9719	0,9780	0,9739	0,9781	0,9747	0,9783	0,9811	0,982
6	0,9655	0,9759	0,9679	0,976	0,9692	0,9763	0,9763	0,9808

Таблиця 13

Сравнение эффективности фильтрации по метрикам PSNR и PSNR-HVS-M при $\beta_{\text{опт}}$ для $\sigma=15$

№ изображения	Шум		ТФ без ПБ		ТФ с половинным ПБ		ТФ с полным ПБ	
	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ
1	24,63	27,36	27,02	27,57	27,27	27,63	29,2279	28,7066
2	24,63	27,44	26,81	27,42	27,05	27,50	28,9460	28,5626
3	24,63	27,86	26,56	27,85	26,80	27,92	28,7629	28,959
4	24,63	28,35	25,63	28,27	25,98	28,31	28,2652	29,0975
5	24,63	27,70	26,48	27,67	26,78	27,73	28,7010	28,8103
6	24,63	27,54	26,53	27,51	26,80	27,56	28,6257	28,626

Таблиця 14

Сравнение эффективности фильтрации по метрикам MSSIM и FSIM при $\beta_{\text{опт}}$ для $\sigma=15$

№ изображения	Шум		ТФ без ПБ		ТФ с половинным ПБ		ТФ с полным ПБ	
	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM	MSSIM	FSIM
1	0,838	0,906	0,8641	0,9146	0,8683	0,9164	0,8871	0,9275
2	0,8746	0,9112	0,8925	0,9148	0,8959	0,9162	0,9119	0,9276
3	0,9113	0,941	0,9222	0,943	0,9248	0,9439	0,9389	0,9524
4	0,9396	0,9558	0,9419	0,9561	0,9434	0,9564	0,9558	0,9615
5	0,9036	0,9231	0,9152	0,9249	0,9175	0,9261	0,9328	0,9372
6	0,8829	0,9151	0,8965	0,9172	0,8998	0,9185	0,9165	0,9314



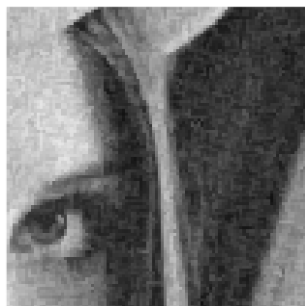
а



б



в



г

Рис. 6. Примеры фильтрации зашумленного фрагмента изображения Lena (а) с использованием тетролет преобразования без перекрытия (б), с половинным (в) и с полным перекрытием блоков (г) для $\sigma=15$

Сравнительный анализ эффективности фильтрации

Перейдем теперь к анализу эффективности фильтрации рассмотренного метода (а именно, тетролет-фильтр с полным перекрытием блоков) в плане сохранения границ. Сравнение будем проводить с

упомянутым ранее ДКП-фильтром, который демонстрирует высокую эффективность при подавлении такого шума, как АБГШ [7, 22, 25]. Анализ проведем с использованием таких количественных метрик, как традиционные PSNR и MSE (среднеквадратическая ошибка), так и метрика PSNR-HVS-M, учитывающая особенности зрительной системы человека.

Рассмотрим метрику PSNR-HVS-M более детально. Она вычисляется с помощью следующего выражения (для изображений, представленных в градациях серого, т.е. 8 бит/пиксель):

$$\text{PSNR-HVS-M} = 10 \log_{10} \left(255^2 / \text{MSE}_{\text{HVS}} \right). \quad (3)$$

Напомним, что значения метрики PSNR-HVS-M измеряется в децибелах. Особенностью данной метрики является вычисление MSE_{HVS} – среднего значения локальных оценок:

$$\text{MSE}_{\text{HVS}} = \sum_{i=1}^{I-7} \sum_{j=1}^{J-1} \text{MSE}_{\text{HVS}}(i, j) / ((I-7)(J-7)), \quad (4)$$

где $\text{MSE}_{\text{HVS}}(i, j)$ – локальная MSE (среднеквадратическая ошибка), вычисленная в области ДКП для ij -го блока,

I и J – размеры изображения.

В нашем анализе будем рассматривать три типа блоков. Их можно классифицировать как: а) однородные, где локальная дисперсия одного порядка с дисперсией шума ($\sigma_{\text{ш}}^2$); б) текстурные, в которых локальная дисперсия немного превышает дисперсию шума; в) блоки контрастных границ, где локальная дисперсия значительно превышает дисперсию шума. Для того чтобы разделить блоки изображения на соответствующие типы, мы воспользуемся следующим правилом. Блоки для которых $\sigma_{ij}^2 < 1,3\sigma_{\text{ш}}^2$ относятся к первому типу, блоки с дисперсий $1,3\sigma_{\text{ш}}^2 \leq \sigma_{ij}^2 < 3\sigma_{\text{ш}}^2$ относятся ко второму типу, а все оставшиеся – к третьему типу [25].

Используя данную классификацию, вычислим средние значения $\text{MSE}_{\text{HVS}}^{\text{cp1}}$, $\text{MSE}_{\text{HVS}}^{\text{cp2}}$, $\text{MSE}_{\text{HVS}}^{\text{cp3}}$ для всех трех типов блоков. Результаты для шести тестовых изображений при двух интенсивностях шума (СКО, равных 7 и 15) приведены в табл. 15.

Аналогичным образом вычислим и усредненные значения традиционной метрики MSE для трех типов блоков. Результаты для шести изображений с учетом двух интенсивностей шума приведены в табл. 16.

Таблица 15

Усредненные значения MSE-HVS				
№	Фильтр	$\sigma = 7$		
	Тип	MSE ^{cp1} _{HVS}	MSE ^{cp2} _{HVS}	MSE ^{cp3} _{HVS}
1	ТФ	29,16	32,92	25,52
	ДКП	8,81	20,68	21,07
2	ТФ	28,49	31,65	26,77
	ДКП	10,91	18,50	20,36
3	ТФ	28,87	31,16	25,44
	ДКП	14,85	23,41	21,72
4	ТФ	28,59	31,40	33,86
	ДКП	26,29	30,04	26,17
5	ТФ	29,07	31,20	27,89
	ДКП	13,96	23,70	25,20
6	ТФ	28,39	31,56	27,90
	ДКП	15,08	21,21	23,63
№	Фильтр	$\sigma = 15$		
	Тип	MSE ^{cp1} _{HVS}	MSE ^{cp2} _{HVS}	MSE ^{cp3} _{HVS}
1	ТФ	130,15	143,90	122,11
	ДКП	26,56	96,47	88,23
2	ТФ	132,04	144,60	133,63
	ДКП	33,18	70,91	97,40
3	ТФ	131,44	140,45	125,43
	ДКП	56,06	86,03	106,39
4	ТФ	132,00	144,81	154,62
	ДКП	83,92	127,28	141,10
5	ТФ	131,74	142,68	129,57
	ДКП	50,94	101,43	114,08
6	ТФ	130,86	145,92	131,55
	ДКП	40,24	82,31	106,17

Заметим, что для тетролет-фильтра с полным перекрытием блоков для интенсивностей шума 7 и 15 использовались значения параметра β , равные 3,5 и 4 соответственно. Также к тестовым изображениям применялся лишь один уровень тетролет-декомпозиции. В свою очередь для ДКП-фильтра с полным перекрытием блоков, размер которых составляет 8x8 пикселей, параметр β был установлен 2,6.

Поскольку нас, прежде всего, интересуют границы объектов, то, следовательно, при сравнении результатов фильтрации обратим внимание на третий тип блоков. Анализ данных в табл. 15 и 16 показывает, что по обоим метрикам тетролет-фильтр уступает ДКП-фильтру для всех шести тестовых изображений, однако отличия меньше, чем для других типов фрагментов.

Примеры карт локальных оценок MSE и MSE_{HVS} для обработанных изображений Cameraman и Woman Blonde показаны, соответственно, на рис. 7 и 8 при СКО шума, равных 7 и 15. Отметим, что на картах локальных оценок MSE и MSE_{HVS} (см. рис. 7 (а - г) и рис. 8 (а - г)) более темные пиксели обозначают меньшие значения локальных оценок.

Таблица 16

Усредненные значения MSE				
№	Фильтр	$\sigma = 7$		
	Тип	MSE ^{cp1}	MSE ^{cp2}	MSE ^{cp3}
1	ТФ	15,87	19,56	26,05
	ДКП	3,17	8,07	14,11
2	ТФ	16,88	20,75	27,92
	ДКП	6,66	11,62	19,09
3	ТФ	17,66	21,19	27,17
	ДКП	9,54	15,44	22,94
4	ТФ	16,19	19,59	35,28
	ДКП	9,77	12,41	19,40
5	ТФ	16,81	20,65	29,56
	ДКП	7,07	13,63	25,11
6	ТФ	17,67	21,61	32,31
	ДКП	9,80	14,46	27,07
№	Фильтр	$\sigma = 15$		
	Тип	MSE ^{cp1}	MSE ^{cp2}	MSE ^{cp3}
1	ТФ	70,05	84,26	97,99
	ДКП	9,51	35,90	46,52
2	ТФ	73,08	86,84	101,62
	ДКП	15,72	34,32	59,45
3	ТФ	73,96	86,35	98,20
	ДКП	26,32	45,04	76,43
4	ТФ	72,60	88,01	114,58
	ДКП	28,49	51,53	74,13
5	ТФ	73,15	89,15	105,70
	ДКП	21,62	51,95	85,41
6	ТФ	73,84	92,86	118,33
	ДКП	20,84	50,07	94,13

Анализ представленных карт показывает следующее. Карты локальных оценок традиционной MSE (см. рис. 7(а, б) и рис. 8(а, б)) не имеют каких-либо преимуществ для тетролет-фильтра по сравнению с ДКП-фильтром. Напротив, в случае карт локальных оценок MSE_{HVS} (см. рис. 7(в, г) и рис. 8(в, г)) видны отличия, особенно для изображения Cameraman (см. рис. 7в).

Тем не менее, для лучшего понимания ситуации лучше воспользоваться бинарными картами локальных оценок, в которых белые пиксели показывают блоки с меньшими значениями локальных оценок MSE и MSE_{HVS} для тетролет-фильтра. Так, при $\sigma = 7$ для изображения Cameraman бинарная карта локальных оценок MSE (см. рис. 7 д) показывает незначительное количество блоков для фрагментов, которые для нас не представляют особый интерес. Однако для карты локальных оценок MSE_{HVS} (см. рис. 7е) явно видно, что блоки, находящиеся на границах объектов, обладают меньшими значениями среднеквадратической ошибки в случае использования тетролет-фильтра. Обратимся к изображению Woman Blonde, которое было искажено более интенсивным шумом ($\sigma = 15$).

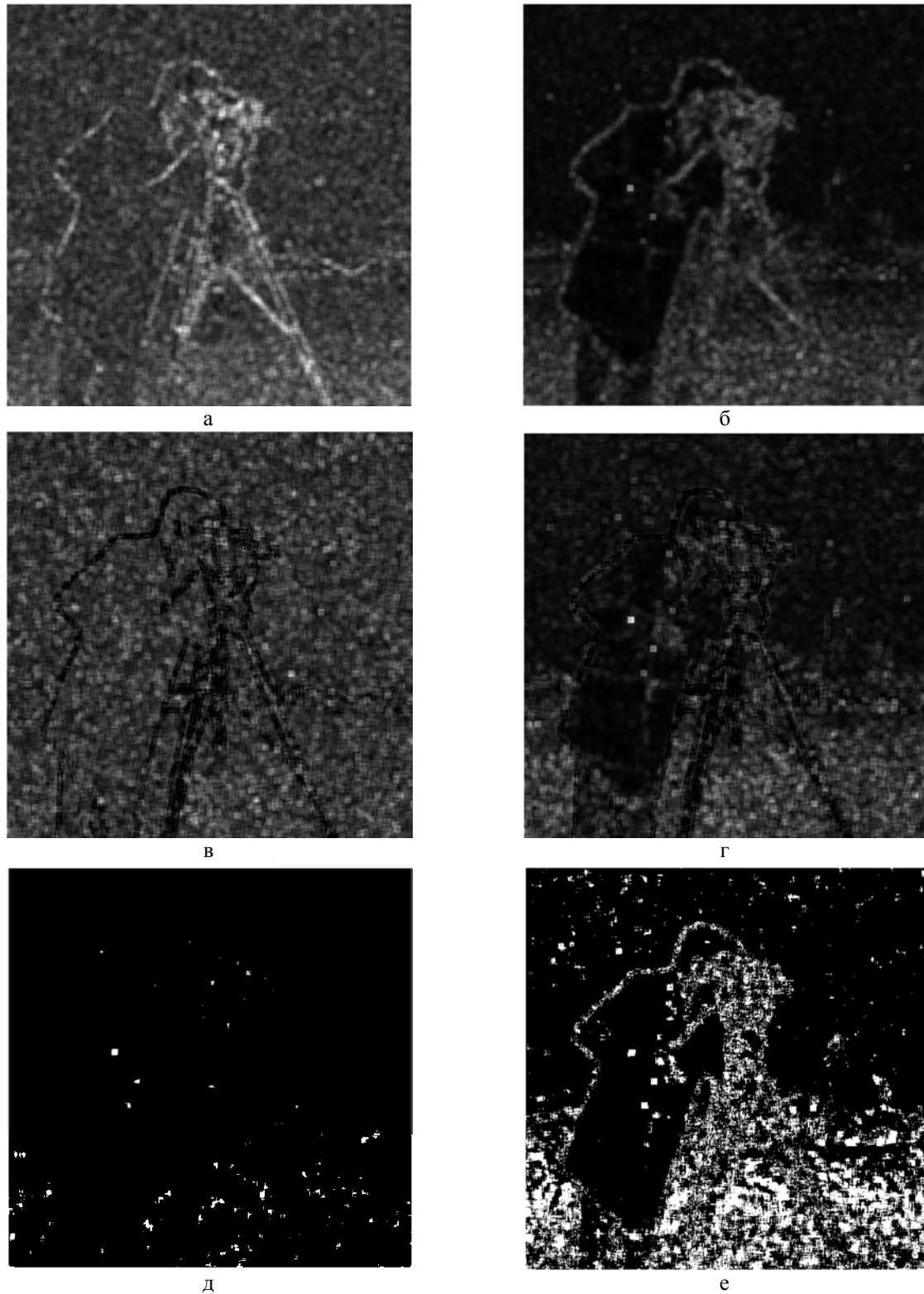


Рис. 7. Карты локальных оценок MSE для ДКП фильтра (б) и тетролет фильтра (а), MSE-HVS оценок тетролет фильтра (в) и ДКП фильтра (г), а также бинарных карт MSE (д) и MSE-HVS (е) для изображения Cameraman, $\sigma = 7$

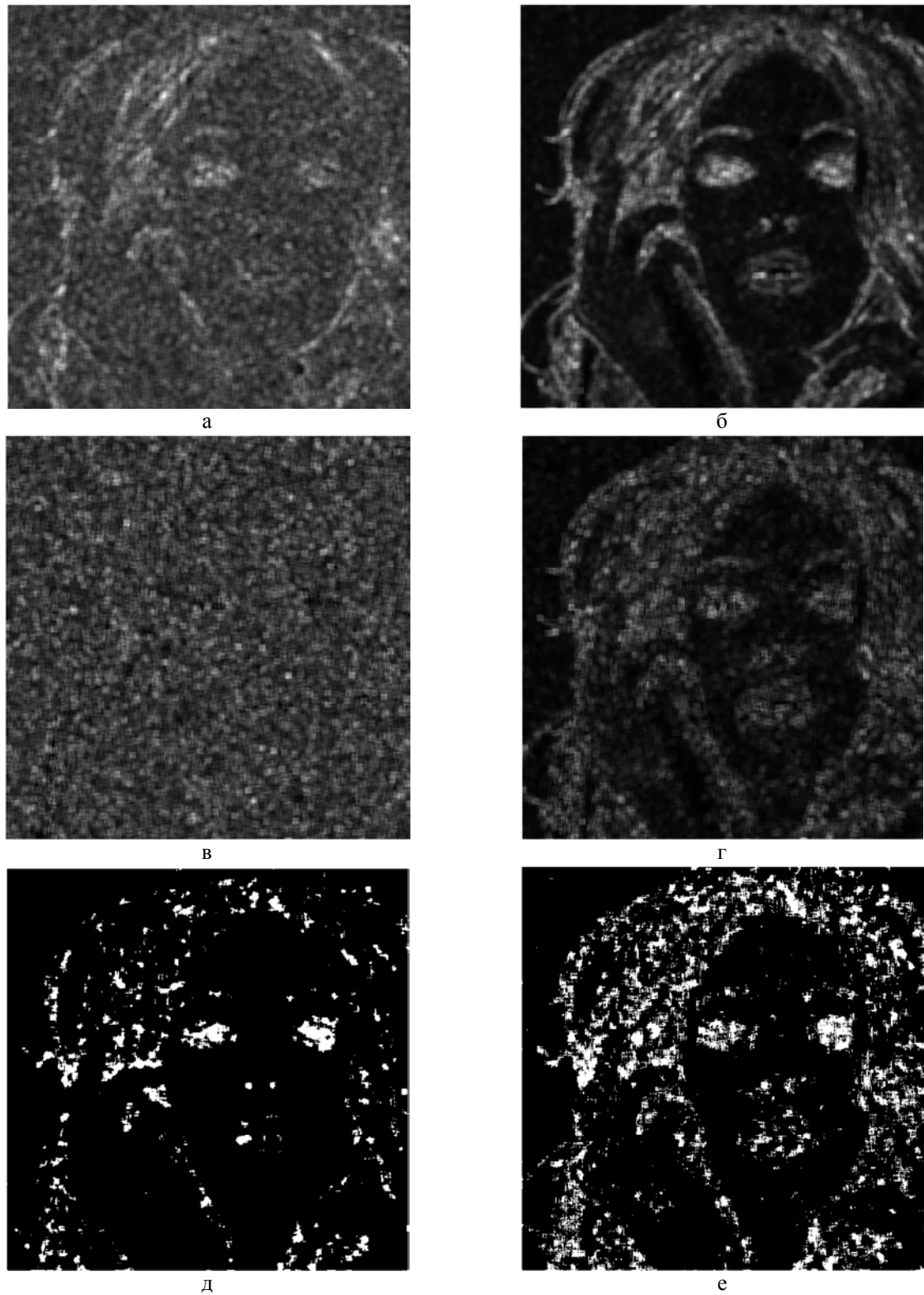


Рис. 8. Карты локальных оценок MSE для ДКП фильтра (б) и тетролет фильтра (а), MSE-HVS оценок тетролет фильтра (в) и ДКП фильтра (г), а также бинарных карт MSE (д) и MSE-HVS (е) для изображения Woman Blonde, $\sigma = 15$

В этом случае обе бинарные карты локальных оценок (см. рис. 8 д, е) показывают несомненный выигрыш при обработке тетролет-фильтром блоков, относящихся к границам объектов.

В целом, несмотря на то, что по сравнению интегральных значений метрик MSE и MSE-HVS тетролет-фильтр уступает ДКП фильтру, анализ бинарных карт, особенно карт локальных оценок MSE_{HVS} , показывает, что тетролет-фильтр эффективнее обрабатывает блоки, которые относятся к границам, тем самым лучше сохраняет их после обработки, чем ДКП фильтр.

Заключение

Проанализирована эффективность метода фильтрации изображений на основе тетролет преобразования при подавлении аддитивного шума. Рассмотрены методы фильтрации на основе тетролет преобразования с различным способом выбора блоков. Показано, что тетролет-фильтр с полным перекрытием блоков демонстрирует наилучшую эффективность среди рассмотренных вариантов. Ускорение обработки с помощью тетролет-фильтра возможно за счет использования половинного перекрытия блоков. Также даны рекомендации по практической установке параметра фильтра β для обеспечения оптимальности обработки в соответствии с различными критериями. Выполнено сравнение эффективности в плане сохранения границ объектов для тетролет-фильтра и ДКП-фильтра. При этом тетролет-фильтр в соответствии с картами локальных оценок MSE-HVS обрабатывает эффективнее блоки, находящиеся на границах объектов. В будущем планируется рассмотреть возможность комбинированной обработки изображений, сочетающей в себе преимущества тетролет-преобразования (т.е. способность лучше обрабатывать границы объектов) и ДКП-фильтра.

Литература

1. Pratt, W. K. *Digital Image Processing. Fourth Edition [Text]* / W. K. Pratt. – New York : Wiley-Interscience, USA, 2007. – 1429 p.
2. Lim, S. H. *Characterization of Noise in Digital Photographs for Image Processing [Text]* / S.H. Lim // *Proceedings of Digital Photography II, San Jose, USA.* – 16 January 2006. – SPIE vol. 6069. – 9 p.
3. Plataniotis, K. N. *Color Image Processing and Applications [Text]* / K. N. Plataniotis, A. N. Venetianopoulos. – N. Y. : Springer-Verlag, 2000. – 355 p.
4. *Image Filtering: Potential efficiency and current problems [Text]* / V. Lukin, S. Abramov, N. Ponomarenko, K. Egiazarian, J. Astola // *Proceedings of ICASSP.* – May 2011. – P. 1433-1436.
5. Chatterjee, P. *Is denoising Dead? [Text]* / P. Chatterjee, P. Milanfar // *IEEE Trans. Image Processing.* – 2010. – Vol. 19, no. 4. – P. 895-911.
6. *Secrets of image denoising cuisine [Text]* / M. Lebrun, M. Colom, A. Buades, J. M. Morel // *Acta Numerica.* – 2012. – Vol. 21, No. 1. – P. 475-576.
7. *Efficiency analysis of DCT-based filters for color image database [Text]* / D. Fevrale, V. Lukin, N. Ponomarenko, S. Abramov, K. Egiazarian, J. Astola // *Proceedings of SPIE Conference Image Processing: Algorithms and Systems VII, San Francisco, USA.* – 2011. – vol. 7870. – P. 953-964.
8. Pogrebnyak, O. *Wiener discrete cosine transform-based image filtering [Text]* / O. Pogrebnyak, V. Lukin // *Journal of Electronic Imaging.* – 2012. – no. 4. – 14 p.
9. *Adaptive DCT-based filtering of images corrupted by spatially correlated noise [Text]* / V. Lukin, N. Ponomarenko, K. Egiazarian, J. Astola // *Proc. SPIE Conference Image Processing: Algorithms and Systems VI.* – 2008. – vol. 6812. – P. 918-924.
10. Foi, A. *Pointwise Shape-Adaptive DCT Image Filtering and Signal-Dependent Noise Estimation: Thesis for the degree of Doctor of Technology [Text]* / A. Foi // *Tampere University of Technology, Tampere, (Finland).* – 2007. – 194 p.
11. Buades, A. *A non-local algorithm for image denoising [Text]* / A. Buades, B. Coll, J. M. Morel // *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) IEEE Computer Society Conference.* – 2005. – Vol. 2. – P. 60-65.
12. Haralick, R. *A Pattern recognition approach to detection of complex edges [Text]* / R. Haralick, D. Dori // *Pattern Recognition Letter.* – 1995. – No. 5. – P. 517-529.
13. Krommweh, J. *Tetrolet transform: A new adaptive Haar wavelet algorithm for sparse image representation [Text]* / J. Krommweh // *Journal of Visual Communication and Image Representation.* – 2010. – Vol. 21, No. 4. – P. 364-374.
14. Krommweh, J. *Tetrolet shrinkage with anisotropic total variation minimization for image approximation [Text]* / J. Krommweh, J. Ma // *Signal Processing.* – 2010. – Vol. 90, No. 8. – P. 2529-2539.
15. Candès, E. *New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with piecewise C2 singularities [Text]* / E. Candès, D. Donoho // *Communications on Pure and Applied Mathematics.* – 2003. – Vol. 57, No. 2. – P. 219-266.
16. Donoho, D. *Wedgelets: Nearly minimax estimation of edges [Text]* / David L. Donoho // *The Annals of Statistics.* – 1999. – Vol. 27, No. 3. – P. 859-897.
17. Do, M. *The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [Text]* / M. Do, M. Vetterli // *IEEE Transactions on Image Processing.* – 2005. – Vol. 14, No. 12. – P. 2091-2106.
18. *Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [Text]* / Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, E. Simoncelli // *IEEE Transactions on Image Processing.* – 2004. – Vol. 13, No. 4. – P. 600-612.

19. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [Text] / L. Zhang, L. Zhang, X. Mou, D. Zhang // *IEEE Transactions on Image Processing*. – Aug. 2011. – Vol. 20, No. 8. – P. 2378-2386.

20. On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions [Text] / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, V. Lukin // *Proc. of the Third Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics*. – Scottsdale, Arizona, USA. – Jan. 2007. – 4 p.

21. Lukin, V. HVS-Metric-Based Performance Analysis Of Image Denoising Algorithms [Text] / V. Lukin, N. Ponomarenko, K. Egiazarian // *Proceedings of EUVIP*, Paris, France. – 2011. – P. 156-161.

22. Image filtering based on discrete cosine transform [Text] / V. Lukin, R. Oktem, N. Ponomarenko, K. Egiazarian // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2007. – Vol. 66, No. 18. – P. 1685-1701.

23. Gonzalez, R. C. Image Databases [Electronic resource] / R. C. Gonzalez, R. E. Woods, S. L. Eddin. – Access mode: http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm. – Access date 22.10.2016. – Title by screen.

24. 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, USA*. – Nov. 2003. – Vol. 2. – P. 1398-1402.

25. HVS-based local analysis of denoising efficiency for DCT-based filters [Text] / O. Rubel, N. Ponomarenko, V. Lukin, J. Astola, K. Egiazarian // *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine. – Oct. 2015. – P. 189-192.

References

1. Pratt, W. K. *Digital Image Processing*. Fourth Edition. N. Y., Wiley-Interscience Publ., USA, 2007, 1429 p.

2. Lim, S. H. Characterization of noise in digital photographs for image processing. *Proceedings of Digital Photography II*, San Jose, USA, vol. 6069, 2006. 9 p.

3. Plataniotis, K. N., Venetsanopoulos, A. N. *Color Image Processing and Applications*. N. Y., Springer-Verlag Publ., 2000. 355 p.

4. Lukin, V., Abramov, S., Ponomarenko, N., Egiazarian, K., Astola, J. Image Filtering: Potential efficiency and current problems. *Proceedings of ICASSP*, May 2011, pp. 1433-1436.

5. Chatterjee, P., Milanfar, P. Is Denoising Dead? *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 19, no. 4, 2010, pp. 895-911.

6. Lebrun, M., Colom, M., Buades, A., Morel, J. M. Secrets of image denoising cuisine. *In Acta Numerica*, vol. 21, no. 1, 2012, pp. 475-576.

7. Fevrale, D., Lukin, V., Ponomarenko, N., Abramov, S., Egiazarian, K., Astola, J. Efficiency analysis of DCT-based filters for color image database. *Proceedings of SPIE Conference Image Processing: Algorithms and Systems VII*, San Francisco, USA, vol. 7870, 2011, pp. 953-964.

8. Pogrebnyak, O., Lukin, V. Wiener discrete cosine transform-based image filtering. *Journal of Electronic Imaging*, no. 4, 2012. 14 p.

9. Lukin, V., Ponomarenko, N., Egiazarian, K., Astola, J. Adaptive DCT-based filtering of images corrupted by spatially correlated noise. *Proc. SPIE Conference Image Processing: Algorithms and Systems VI*, vol. 6812, 2008, pp. 918-924.

10. Foi, A. Pointwise Shape-Adaptive DCT Image Filtering and Signal-Dependent Noise Estimation. *Thesis for the degree of Doctor of Technology*, Tampere (Finland, Tampere University of Technology) Publ., 2007. 194 p.

11. Buades, A., Coll, B., Morel, J. M. A non-local algorithm for image denoising. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) IEEE Computer Society Conference*, vol. 2, 2005, pp. 60-65.

12. Haralick, R., Dori, D. A pattern recognition approach to detection of complex edges. *Pattern Recognition Lett.* 16, no. 5, 1995, pp. 517-529.

13. Krommweh, J. Tetrolet transform: A new adaptive Haar wavelet algorithm for sparse image representation. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 21, no. 4, 2010, pp. 364-374.

14. Krommweh, J., Ma, J. Tetrolet shrinkage with anisotropic total variation minimization for image approximation. *Signal Processing*, vol. 90, no. 8, 2010, pp. 2529-2539.

15. Candès, E., Donoho, D. New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with piecewise C2 singularities. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 57, no. 2, 2003, pp. 219-266.

16. Donoho, D. L. Wedgelets: Nearly minimax estimation of edges. *The Annals of Statistics*, vol. 27, no. 3, 1999, pp. 859-897.

17. Do, M., Vetterli, M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 14, no. 12, 2005, pp. 2091-2106.

18. Wang, Z., Bovik, A., Sheikh, H., Simoncelli, E. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, 2004, pp. 600-612.

19. Zhang, L., Zhang, L., Mou, X., Zhang, D. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 20, no. 8, Aug. 2011, pp. 2378-2386.

20. Ponomarenko, N., Silvestri, F., Egiazarian, K., Carli, M., Astola, J., Lukin, V. On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions. *Proc. of the Third Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics*, Scottsdale, Arizona, USA, Jan. 2007. 4 p.

21. Lukin, V., Ponomarenko, N., Egiazarian, K., HVS-Metric-Based Performance and Analysis Of Image Denoising Algorithms. *Proceedings of EUVIP*, Paris, France, 2011, pp. 156-161.

22. Lukin, V., Oktem, R., Ponomarenko, N., Egiazarian, K. Image filtering based on discrete cosine transform. *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 66, no. 18, 2007, pp. 1685-1701.

23. Gonzalez, R. C., Woods, R. E., Eddin, S. L. *Image Databases*. Available at: http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm (accessed 22.10.2016).

24. Wang, Z. Multi-scale structural similarity for image quality assessment. *IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, USA, vol. 2, Nov. 2003, pp. 1398-1402.

25. Rubel, O., Ponomarenko, N., Lukin, V., Astola, J., Egiazarian, K. HVS-based local analysis of denoising efficiency for DCT-based filters. *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*. Kharkiv, Ukraine, Oct. 2015, pp. 189-192.

Поступила в редакцію 01.02.2017, рассмотрена на редколлегии 16.02.2017

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЛЬТРАЦІЇ НА ОСНОВІ ТЕТРОЛЕТ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРИ ПРИДУШЕННІ АДИТИВНОГО ШУМА НА ЗОБРАЖЕННЯХ

А. С. Рубель, В. В. Лукін

Досліджено ефективність фільтрації на основі тетролет перетворення для бази тестових зображень з різними властивостями, спотворених адитивним білим гаусовим шумом з різною інтенсивністю. В якості критеріїв ефективності використано як традиційні метрики, наприклад, PSNR, так і метрики візуальної якості (PSNR-HVS-M, MSSIM, FSIM). Проаналізовано вплив властивостей зображень на вибір оптимального порогу. Наведено порівняльний аналіз фільтра на основі тетролет перетворення з ДКП-фільтром в плані збереження меж об'єктів і ефективного придушення шуму.

Ключові слова: тетролет перетворення, фільтрація, ДКП-фільтр, адитивні перешкоди.

EFFICIENCY ANALYSIS OF TETROLET TRANSFORM-BASED FILTERING BY REMOVAL OF ADDITIVE NOISE IN IMAGES

A. S. Rubel, V. V. Lukin

Efficiency of filtering based on tetrolet transform for test image database with different properties distorted by additive white Gaussian noise with different intensity is investigated. As the performance criteria, both standard metrics, for instance, PSNR and visual quality metrics (PSNR-HVS-M, MSSIM, and FSIM) are used. Effect of test image features on optimal threshold is analyzed. A comparative analysis of the tetrolet transform-based filter with DCT-filter with respect to object edge preservation and effective denoising is shown.

Key words: tetrolet transform, filtering, DCT-filter, additive noise.

Рубель Андрей Сергеевич – аспирант каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: rubel.andrew@mail.ru.

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

Rubel Andrej Sergeevich – PhD student of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Processing, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: rubel.andrew@mail.ru.

Lukin Vladimir Vasilyevich – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Processing, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: lukin@ai.kharkov.com.