

УДК 621.3:681.34

С.С. Кривенко¹, Е.О. Колганова², В.В. Лукин¹¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Национальный авиационный университет, Украина*

ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХААРА В БЛОКАХ

Рассмотрены методы фильтрации оптических изображений, искаженных аддитивным белым гауссовым шумом, на основе применения преобразования Хаара в блоках 8×8 пикселей. Для контроля качества использованы как стандартные метрики, так и метрики визуального качества PSNR-HVS-M и MSSIM. Проанализированы тестовые изображения различной сложности при нескольких уровнях аддитивных помех. Показано, что эффективность фильтрации с использованием преобразования Хаара немного ниже, чем при использовании дискретного косинусного преобразования с тем же размером блоков, но быстродействие обработки заметно выше.

Ключевые слова: преобразование Хаара, фильтрация, ускорение обработки, качество изображений.

Введение

Изображения различных типов все шире используются как в научных и прикладных целях, так и в повседневной жизни. Они находят применение при дистанционном зондировании (ДЗ) и мониторинге поверхности Земли с аэрокосмических носителей, в медицине, системах документальной связи, мультимедийных средствах и т.д. [1]. Однако качество исходных (первичных) изображений далеко не всегда удовлетворяет пользователей. Присутствие помех и других видов искажений снижает визуальное качество, усложняет интерпретацию изображений ДЗ, выявление диагностических и других признаков, снижает эффективность сжатия изображений без потерь [1-3] и т.д. В связи с этим часто применяют предварительную обработку изображений. Если преобладающим фактором, определяющим качество первичных изображений, является шум, что часто имеет место на практике, то речь идет, прежде всего, о фильтрации изображений [4].

К настоящему моменту времени разработано очень большое количество фильтров для обработки изображений разного вида. Однако ни один из них не является универсальным и удовлетворяющим всем требованиям, которые предъявляются в конкретной ситуации. Стандартный набор требований состоит в эффективном подавлении помех того типа, который присутствует в обрабатываемом изображении, сохранении деталей, границ и текстур, обеспечении приемлемого быстродействия [5]. В последние годы все большее внимание уделяется аспектам визуального качества [6, 7]. Однако приоритет этих требований зависит от конкретной практической ситуации и возможностей программной или алгоритмической реализации методов фильтрации. Несмотря на быстрый рост производительности вычислительных средств (как компьютеров, так и спецпроцессоров), ограниче-

нием для практического применения многих методов фильтрации продолжает оставаться быстродействие соответствующих алгоритмов [7]. Это ограничение является жестким при фильтрации изображений на борту летательного аппарата, являющегося носителем системы ДЗ, внутри цифровых фотоаппаратов, при обработке видео [7, 8]. В таких условиях можно сделать менее жесткими требования к качеству изображений после обработки. Метод обработки приходится либо выбирать из существующих с учетом ограничений на вычислительную сложность, либо исследовать возможности разработки новых методов фильтрации изображений, которые бы обладали высоким быстродействием и, одновременно, приемлемой эффективностью подавления помех и сохранения полезной информации.

В последние два десятилетия разработка новых методов фильтрации велась в нескольких направлениях. В 90-е годы прошлого века, да и в последние годы много внимания уделялось разработке методов фильтрации на основе вейвлет-преобразований [9-11], применяемых ко всему изображению. При этом использовались различные материнские функции, в том числе и вейвлет Хаара, который показал себя в числе лучших [12-14]. С примерно 2005 года пристальный интерес стали привлекать нелокальные методы фильтрации [5, 15-17]. При применении этого подхода удается учитывать самоподобие информационной компоненты изображений благодаря поиску подобных блоков. Однако операция поиска занимает достаточно много времени, в результате чего быстродействие этой группы фильтров оказывается невысоким.

Параллельно с этими подходами развивались методы фильтрации на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП), отличительной особенностью которых является обработка изображений в блоках [18 – 20]. В результате анализа свойств этих

методов оказалось, что при полном перекрытии блоков эффективность фильтрации на основе ДКП превосходит эффективность многих наиболее сложных фильтров на основе вейвлетных преобразований [18] и вплотную приближается к эффективности наилучшего на данный момент нелокального метода фильтрации BM3D [17, 20]. При этом ДКП-фильтрация обладает достаточно высоким быстродействием благодаря простоте используемого ортогонального преобразования и наличию быстрых алгоритмов его реализации при применении блоков определенного размера, например, 8×8 пикселей. Более того, возможно дополнительное ускорение обработки за счет использования неполного перекрытия блоков [7], однако при этом несколько снижается эффективность обработки.

Перечисленные выше соображения указывают на то, что достижение высокого быстродействия при достаточно высокой эффективности подавления помех потенциально возможно, если фильтрация осуществляется в блоках с применением ортогональных преобразований, которые хорошо декоррелируют данные и при этом имеют алгоритмы, позволяющие достичь высокого быстродействия. Одним из таких ортогональных преобразований является преобразование (вейвлет) Хаара, хорошо проявившее себя во многих приложениях цифровой обработки изображений. В частности, оно используется при сжатии изображений [21] и для предварительной декорреляции данных в группах подобных блоков в фильтре BM3D [17]. Вейвлет Хаара в блоках 8×8 пикселей применялся и для фильтрации радиолокационных изображений [22] с целью сохранения контрастных границ и малоразмерных объектов. Однако детальный количественный анализ свойств фильтров на основе преобразования Хаара в работе [22] не проводился.

В связи с этим, целью данной статьи является анализ свойств фильтрации на основе преобразования Хаара в блоках размером 8×8 пикселей и предоставление рекомендаций по выбору параметров такого фильтра для случая белого шума. Особенностью анализа является применение не только стандартных количественных критериев (среднеквадратической ошибки или пикового отношения сигнал-шум на выходе фильтра), но и показателей, характеризующих визуальное качество PSNR-HVS-M [23] и MSSIM [24].

1. Общий подход к фильтрации в блоках с использованием вейвлета Хаара и анализу ее эффективности

При фильтрации изображений на основе ортогональных преобразований (ОП) в блоках обработка данных осуществляется следующим образом:

1) в каждом блоке изображения $I(i, j)$, $i=1, \dots, M$, $j=1, \dots, N$, характеризуемом координатами верхнего левого пикселя m и n ($m=1, \dots, M-7$, $n=1, \dots, N-7$, где M и N – число пикселей изображения по горизонта-

ли и вертикали) и включающим пиксели с индексами $i=n, \dots, n+7$, $j=m, \dots, m+7$, выполняется прямое ОП с получением матрицы коэффициентов ОП $D(m, n, k, l)$ размером 8×8 , где k и l – индексы спектральных компонент в базисе используемого ОП, $k=0, \dots, 7$, $l=0, \dots, 7$;

2) полученные значения коэффициентов $D(m, n, k, l)$ сравниваются с пороговыми значениями i , в результате, их значения тем или иным способом изменяются с получением $D_{\text{пор}}(m, n, k, l)$;

3) применительно к ДКП-коэффициентам после пороговой обработки ($D(m, n, k, l)$) выполняется обратное ОП и фильтрованные значения $I_c(i, j)$ получают одновременно для всех пикселей изображения, принадлежащих данному блоку ($i=n, \dots, n+7$, $j=m, \dots, m+7$);

4) усреднение для каждого ij -го пикселя фильтрованных значений, полученных для разных положений блоков, включающих данный пиксель ($n=i-7, \dots, n$, $j=m-7, \dots, m$).

На этапе 2 в ходе выполнения пороговой обработки возможно использование разных типов порогов: мягкого, жесткого и комбинированного. Исследования показали [25], что при использовании полного перекрытия блоков (то есть соседние блоки сдвинуты друг относительно друга только на один пиксель), которое обеспечивает наиболее эффективную фильтрацию, целесообразно использовать жесткий порог, то есть приравнять нулю значения $D(m, n, k, l)$, которые по модулю меньше порога $T(m, n, k, l)$, который в общем случае зависит от пространственных координат m, n и спектральных индексов k, l . Остальные коэффициенты $D(m, n, k, l)$ при использовании жесткой (грубой) пороговой обработки остаются неизменными.

Для рассматриваемой ситуации пространственно-некоррелированных аддитивных помех (гауссова белого шума) установка порога упрощается, поскольку порог не зависит ни от пространственных координат, ни от индексов, и обычно задается в виде $T=\beta\sigma$, где σ – среднеквадратическое отклонение помех, β – параметр, который, в частности, для ДКП-фильтров рекомендуется задавать примерно равным 2,6, если необходимо обеспечить наиболее эффективную фильтрацию в соответствии с традиционными критериями минимума среднеквадратической ошибки на выходе фильтра MSE_{out} или максимума пикового отношения сигнал-шум $PSNR_{\text{out}}$. Если же необходимо обеспечить наилучшее визуальное качество выходных изображений в соответствии с метриками визуального качества, например MSSIM [23] или PSNR-HVS-M [24], то параметр β целесообразно устанавливать примерно равным 2,5 [25], что приводит к немного лучшему сохранению деталей, границ и текстур, на которые люди обращают первостепенное внимание при визуальном анализе изображений. Отметим, что метрика PSNR-HVS-M

учитывает особенности зрительной системы человека (HVS), в её основе лежит дискретное косинусное преобразование. Значения метрики PSNR-HVS-M измеряются в децибелах, большие значения соответствуют лучшему визуальному качеству. Метрика MSSIM основана на вейвлет-преобразовании, диапазон изменения ее значений лежит в пределах от 0 (что соответствует очень низкому визуальному качеству) до 1 (, что соответствует отличному качеству).

Насколько нам известно, анализ (выбор оптимальных значений β в соответствии с различными метриками (критериями) для случая обработки изображений на основе ОП (вейвлета) Хаара не проводился и, в связи с этим, отсутствуют четкие практические рекомендации по его установке. При этом использование ОП Хаара позволяет в 3...5 раз сократить время на обработку данных в блоках [26], на которую приходится основные затраты времени при реализации рассмотренного выше подхода к фильтрации изображений. Выполнение ОП Хаара для выборки 8 отсчетов (в строке или в столбце блока) требует примерно вдвое меньшего числа сложений, чем при ДКП. При этом для ДКП необходимо еще выполнять операции умножения.

2. Анализ эффективности фильтрации

Прежде всего, приведем результаты для нескольких традиционных тестовых изображений при использовании ОП Хаара (реализован с помощью функции в Матлабе). В табл. 1 приведены значения MSE_{out} и MSSIM для тестовых изображений Peppers (одно из относительно простых тестовых изображений) при дисперсии аддитивных помех 100 и Goldhill (изображение средней сложности) при дисперсии аддитивных помех 400 для широкого диапазона значений β . Очевидно, что существуют оптимумы значений β как для метрики MSE_{out} , так и для метрики MSSIM. Для первой метрики оптимальные значения β_{OptMSE} примерно равны 2,9, а для метрики визуального качества MSSIM оптимальные значения $\beta_{OptMSSIM}$ несколько меньше и примерно равны 2,6. В окрестности оптимумов метрики мало изменяются, то есть небольшие отклонения установки β от оптимальных значений или погрешности измерения (оценки) σ не приводят к резкому ухудшению качества обработки. Выигрыш благодаря фильтрации по критерию MSE_{out} достаточно большой, превышая 5,5 дБ при установке значений β , близкими к оптимальным.

Проведем теперь анализ для двух более сложных тестовых изображений. Первое из них – Baboon – также является стандартным, но оно, как правило, оказывается наиболее сложным (из известных тестовых) для эффективного подавления помех, поскольку является текстурным, особенно при относительно невысоком уровне шума. Поэтому рассмотрим слу-

чай помех с дисперсией 25, которые на изображении Baboon видны лишь на квазиоднородных участках, площадь которых относительно мала. Второе из исследованных тестовых изображений – RSA – использовалось нами при тестировании методов фильтрации данных дистанционного зондирования [27]. Это изображение является синтезированным, оно приведено на рис. 1 и его специфика состоит в наличии протяженных объектов и резких перепадов. Для этого изображения генерировался шум с дисперсией 49.

Таблица 1

Зависимости эффективности фильтрации от параметра β для двух тестовых изображений при воздействии аддитивных помех

β	Peppers		Goldhill	
	MSE_{out}	MSSIM	MSE_{out}	MSSIM
1,200	66,3	0,950	243,8	0,893
1,400	55,6	0,957	196,5	0,906
1,600	46,4	0,963	156,4	0,918
1,800	39,6	0,969	125,2	0,927
2,000	33,6	0,973	100,8	0,935
2,200	29,6	0,975	85,1	0,939
2,400	27,3	0,977	75,8	0,940
2,600	26,0	0,978	71,2	0,939
2,800	25,4	0,978	69,9	0,936
3,000	25,4	0,977	70,9	0,933
3,200	25,7	0,977	73,0	0,929
3,400	26,2	0,976	75,9	0,924
3,600	26,8	0,976	79,2	0,920
3,800	27,5	0,975	82,6	0,915
4,000	28,3	0,974	86,1	0,911
4,200	29,0	0,973	89,5	0,909
4,400	29,8	0,973	92,9	0,903
4,600	30,7	0,972	96,1	0,899
4,800	31,6	0,971	99,3	0,896
5,000	32,5	0,971	102,4	0,892

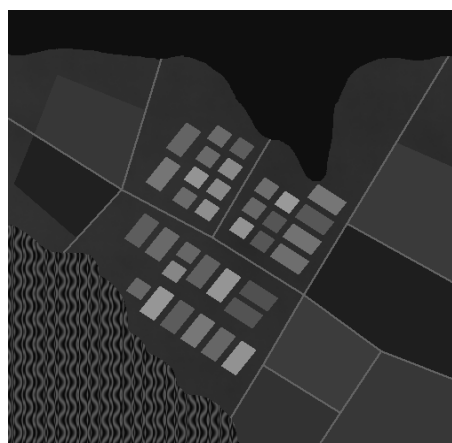


Рис. 1. Тестовое изображение RSA без помех

Полученные результаты – зависимости значений метрик MSE_{out} и PSNR-HVS-M от β для широкого диапазона значений этого параметра – приведены в табл. 2. Анализ этих зависимостей показывает следующее. Для тестового изображения RSA значение β_{OptMSE} также примерно равно 2,9, а $\beta_{OptMSSIM}$ несколько меньше и примерно равно 2,7.

Таблица 2
Зависимости эффективности фильтрации от параметра β для двух тестовых изображений при воздействии аддитивных помех

β	Baboon		RSA	
	MSE _{out}	PSNR-HVS-M	MSE _{out}	PSNR-HVS-M
1,200	23,7	41,4	30,8	36,6
1,400	23,2	41,5	25,2	37,6
1,600	22,7	41,5	20,5	38,6
1,800	22,5	41,5	16,5	39,5
2,000	22,2	41,5	13,6	40,4
2,200	22,2	41,4	11,9	41,0
2,400	22,4	41,2	10,7	41,4
2,600	22,9	41,0	10,0	41,6
2,800	23,6	40,7	9,7	41,5
3,000	24,4	40,3	9,7	41,3
3,200	25,7	39,9	10,0	41,0
3,400	27,0	39,5	10,4	40,6
3,600	28,3	39,0	11,0	40,2
3,800	30,2	38,6	11,7	39,7
4,000	32,1	38,1	12,5	39,2
4,200	34,2	37,7	13,4	38,7
4,400	36,4	37,2	14,4	38,2
4,600	38,7	36,7	15,5	37,7
4,800	41,1	36,3	16,7	37,2
5,000	43,6	35,9	17,8	36,7

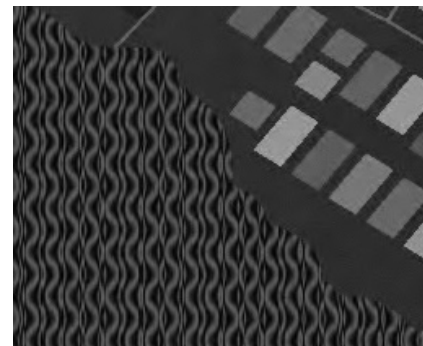
А вот для тестового изображения Baboon ситуация отличается от рассмотренных ранее. Значение β_{OptMSE} примерно равно 2,1, а β_{OptMSSIM} несколько меньше и примерно равно 1,7, то есть для текстурных изображений при низком уровне помех целесообразно использовать меньшие значения параметра β , чтобы избежать излишнего сглаживания текстур, границ и малоразмерных объектов. Вместе с тем, и при β порядка 2,8 получаются неплохие результаты. Учитывая это, нами был также проведен сравнительный анализ эффективности фильтрации четырех тестовых изображений при трех разных значениях дисперсии помех: 25, 49 и 100. Рассматривались ДКП-фильтр с $\beta=2,6$ и фильтр на основе ОП Хаара с $\beta=2,8$, оба с полным перекрытием блоков 8x8 пикселей. Результаты представлены в таблице 3 для метрик MSE_{out} и MSSIM. При анализе значений метрики MSSIM необходимо учитывать два ее важных свойства. Первое – при значениях MSSIM больше 0,99 искажения на изображениях после фильтрации визуально практически незаметны [28]. Второе – различия в визуальном качестве двух изображений становятся заметны, если значения MSSIM для них отличаются более, чем на 0,005.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает следующее. Практически для всех рассмотренных ситуаций (тестовых изображений и уровней помех) ДКП-фильтр обеспечивает более эффективную обработку в соответствии с обеими метриками. Исключение составляет лишь искусственное тестовое изображение RSA при низком и среднем уровне помех, когда фильтр на основе ОП Хаара работает немного лучше, чем ДКП-фильтр. Именно это свойство фильтра на

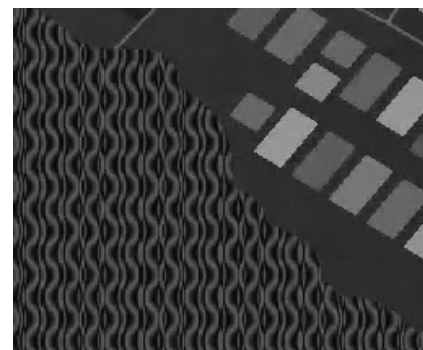
основе ОП Хаара было использовано в локально-адаптивном варианте фильтра с переключением ОП [??], где фильтр на основе ОП Хаара используется для лучшего сохранения границ. Чтобы подтвердить правильность этого решения, на рис. 2 показан фрагмент изображения RSA на выходе двух анализируемых фильтров. ДКП-фильтр более эффективно подавляет помехи на однородных участках и сохраняет текстуру, но при этом вносит специфические искажения в окрестностях контрастных границ и малоразмерных объектов. Фильтрация на основе ОП Хаара тоже приводит к некоторым артефактам для таких фрагментов, но четкость границ после обработки выше.

Таблица 3
Сравнительный анализ эффективности фильтрации для случаев обработки на основе ДКП и ОП Хаара

Изобр	Дисп. помех	ДКП		Хаар	
		MSE _{out}	MSSIM	MSE _{out}	MSSIM
Baboon	25	19,9	0,993	23,5	0,991
	49	34,4	0,988	41,3	0,985
	100	58,9	0,979	71,7	0,974
Gold-hill	25	13,3	0,991	15,4	0,989
	49	20,2	0,985	23,4	0,982
	100	30,5	0,973	35,0	0,971
Peppers	25	11,6	0,989	13,7	0,988
	49	16,2	0,985	18,6	0,983
	100	22,4	0,980	25,3	0,978
RSA	25	5,70	0,997	5,36	0,997
	49	9,81	0,994	9,81	0,995
	100	16,60	0,989	18,25	0,989



а



б

Рис. 2. Фрагмент тестового изображения RSA после обработки ДКП-фильтром (а) и фильтром на основе ОП Хаара (б), дисперсия помех в исходном изображении – 100

Вместе с тем, если фильтр на основе ОП Хаара и уступает по эффективности ДКП-фильтру, то совсем немного. Для большинства рассмотренных ситуаций визуальное качество изображений после обработки рассматриваемыми двумя методами находится практически на одном уровне. Об этом, в частности, свидетельствует визуальный анализ изображений, приведенных на рис. 3. Визуальное качество обоих обработанных изображений практически одинаково.

Таким образом, лишь для сильно-текстурных изображений при высоком уровне помех обработка на основе ОП Хаара заметно уступает по эффективности ДКП-фильтру (способность ДКП-фильтрации хорошо сохранять текстуру известно и использовалось ранее [26]). В остальных же ситуациях, обработка на основе ОП Хаара практически не уступает ДКП-фильтрации, обеспечивая при этом более высокое быстродействие. Отметим, что существуют и методы ускорения ДКП-фильтрации, например, за счет использования неполного перекрытия блоков [7]. Однако при этом снижается и эффективность обработки.



а



б

Рис. 3 Тестовое изображение Goldhill после обработки ДКП-фильтром (а) и фильтром на основе ОП Хаара (б), дисперсия помех в исходном изображении – 100

3. Эффективность сжатия изображений без потерь

Эффективность фильтрации можно проанализировать и косвенно – путем исследования коэффициента сжатия для методов архивирования изображений (сжатия без потерь). Нами были рассмотрены стандартные архиваторы: ZIP, RAR и алгоритм сжатия изображений PNG, фактически ставший стандартом для мультимедийных приложений.

Полученные данные (значения КС) представлены в табл. 4. Используются следующие обозначения: Исх. – архиватор применен к исходному изображению с помехами (дисперсия 49), ДКП – архиватор применен к изображению на выходе ДКП-фильтра, Хаар – архиватор применен к изображению на выходе фильтра на основе ОП Хаара.

Таблица 3

Значения КС для разных архиваторов, примененных к исходным и обработанным изображениям

Изобр.	К какому применено	RAR	ZIP	PNG
Baboon	Исх.	1,09	1,09	1,24
	ДКП	1,28	1,12	1,34
	Хаар	1,28	1,13	1,37
Goldhill	Исх.	1,26	1,14	1,41
	ДКП	1,67	1,27	1,86
	Хаар	1,74	1,35	1,98
Peppers	Исх.	1,33	1,07	1,42
	ДКП	1,73	1,24	1,90
	Хаар	1,84	1,38	2,12
RSA	Исх.	1,32	1,25	1,44
	ДКП	1,83	1,75	2,07
	Хаар	2,16	2,09	2,46

Из анализа приведенных данных следует, что фильтрация создает предпосылки для более эффективного сжатия без потерь. При этом наилучшие результаты (наибольшие значения КС) обеспечивает PNG, а наихудшие ZIP. Важно отметить тот факт, что практически всегда изображение на выходе фильтра на основе ОП Хаара сжимается лучше, чем на выходе ДКП-фильтра, что может быть еще одним практическим преимуществом этого метода обработки.

Заключение

Проведен анализ эффективности метода фильтрации изображений на основе ОП Хаара, для которого соответствующие алгоритмы обладают более высоким быстродействием по сравнению с аналогичной обработкой на основе ДКП. Даны рекомендации по практической установке параметра β при стремлении обеспечить оптимальность обработки в соответствии с различными критериями. Показано, что для большинства изображений и уровней помех обработка на основе ОП Хаара лишь немного уступает ДКП-фильтрации в соответствии с количественными показателями, но визуально это заметно лишь для высокотекстурных изображений при вы-

соком уровне помех. При этом предварительная фильтрация позволяет существенно повысить коэффициент сжатия изображений без потерь, особенно для формата PNG. В будущем планируется рассмотреть возможности обработки изображений на основе ОП Хаара с применением комбинированного порога, неполного перекрытия блоков и локальной адаптации к контенту изображений в блоках.

Список литературы

1. Bovik, A. *Handbook on Image and Video Processing [Text]* / A. Bovik. - USA, Academic Press, 2000. - 891 p.
2. Yu, G. *Image compression systems on board satellites [Text]* / G. Yu, T. Vladimirova, M. Sweeting // *Acta Astronautica*. - 2009. - Vol. 64. - P. 988-1005.
3. Aiazzi, B. *Near-lossless compression of 3-D optical data [Text]* / B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. - Nov 2001. - Vol. 39. - P. 2547-2557.
4. Марчук, В. *Методы цифровой обработки сигналов для решения прикладных задач [Текст]* / В. Марчук. - Россия, Москва, Радиотехника, 2012. - 128 с.
5. Elad, M. *Sparse and Redundant Representations. From Theory to Applications in Signal and Image Processing [Text]* / M. Elad. - Springer Science, 2010. - 376 p.
6. *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.
7. *Acceleration and Efficiency Analysis of DCT-based Filtering [Text]* / V.V. Lukin, S.S. Krivenko, E.O. Kolganova, M.K. Chobanu // *Telecommunications and Radio Engineering*. - 2013. - Vol. 72, No 7, P. 613-626.
8. Buades, A. *Nonlocal image and movie denoising [Text]* / A. Buades, B. Coll, J.M. Morel // *International Journal of Computer Vision*. - 2008. - Vol. 76(2). - P.123-139.
9. Sendur, L. *Bivariate shrinkage with local variance estimation [Text]* / L. Sendur, I.W. Selesnick // *IEEE Sig. Process. Letters*. - 2002. - 9[12]. - P. 438-441.
10. *Image denoising using scale mixtures of gaussians in the wavelet domain [Text]* / J. Portilla, V. Strela, M.J. Wainwright, E.P. Simoncelli // *Image Processing, IEEE Transactions on*. - 2003. - 12(11). - P. 1338-1351.
11. Starck, J.L. *The curvelet transform for image denoising [Text]* / J.L. Starck, E.J. Candes, D.L. Donoho // *Image Processing, IEEE Transactions on*. - 2002. - 11(6). - P. 670-684.
12. Luisier F. *Fast Haar-Wavelet Denoising of Multidimensional Fluorescence Microscopy Data [Text]* / F. Luisier, C. Vonesch, T. Blu, M. Unser // *Proceedings of ISBI*. - 2009. - P. 310-313.
13. Jacob, N. *Image Denoising in the Wavelet Domain Using Wiener Filtering [Text]* / N. Jacob, A. Martin // *Unpublished course project of University of Wisconsin*. - 2004. - 21 p.
14. Luisier, F. *Chi-squared Unbiased Risk Estimate for Denoising Magnitude MR Images [Text]* / F. Luisier, P. Wolfe // *Proceedings of ICIP*. - 2011. - P. 1561-1564.
15. Buades, A. *A review of image denoising algorithms, with a new one [Text]* / A. Buades, B. Coll, J. M. Morel // *Multiscale Modeling Simulation*. - 2005. - 4(2). - P. 490-530.
16. Chatterjee, P. *Is denoising dead? [Text]* / P. Chatterjee, P. Milanfar // *Image Processing, IEEE Transactions on*. - 2010. - 19(4). - P. 895-911.
17. Dabov K. *Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering [Text]* / K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, K. Egiazarian // *IEEE Transactions on image processing*. - 2007. - Vol. 16. - P. 2080 - 2095.
18. Oktem, R. *Locally Adaptive DCT Filtering for Signal-Dependent Noise Removal [Text]* / R. Oktem, K. Egiazarian, V. Lukin, N. Ponomarenko, O. Tsymbal // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. - 2007. - Article ID 42472. - 10 p.
19. Ponomarenko, N.N. *3D DCT Based Filtering of Color and Multichannel Images [Text]* / 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.
20. Лукин В.В. *Потенциальная эффективность фильтрации изображений: есть ли предел и близок ли он? [Текст]* / В.В. Лукин, С.К. Абрамов, А.А. Зеленский, Н.Н. Пономаренко // *Радиоелектронні та комп'ютерні системи*. - 2010. - №3(44) - С. 40-45.
21. Minasyan, S. *An image compression scheme based on parametric Haar-like transform [Text]* / S. Minasyan, J. Astola, D. Guevorkian // *Proceedings of ISCAS*. - 2005. - Vol. 3. - P. 2088-2091.
22. Fevralev D. *Combining level Set and Orthogonal Transforms for Speckle Reduction and Detail Preservation in SAR Images [Text]* / D. Fevralev, V. Lukin, S. Medeiros, R. Marques // *Proceedings of MRRS*. - August 2011. - P. 199-202.
23. Ponomarenko N. *On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions [Text]* / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, V. Lukin // *Proc. of the Third Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics, USA*. - 2007. - Vol. 3. - 4 p.
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*. - 2003. - Vol. 6. - 5 p.
25. Fevralev D. *Efficiency analysis of color image filtering [Text]* / D. Fevralev, V. Lukin, N. Ponomarenko, S. Abramov, K. Egiazarian, J. Astola // *EURASIP J. Adv. Signal Process*. - 2011. - Vol. 41. - 19 p.
26. Egiazarian, K. *New Algorithm for Removing of Mixed (White and Impulsive) Noise from Images [Text]* / K. Egiazarian, J. Astola // *Proceedings of the IS@T/SPIE Symposium on Nonlinear Image Processing X*. - 1999. - SPIE Vol. 3646. - P. 78-89.
27. Makitalo M. *Denoising of single-look SAR images based on variance stabilization and non-local filters / M. Makitalo, A. Foi, D. Fevralev, V. Lukin // CD-ROM Proceedings of ММЕТ, Kiev, Ukraine. -2010. - 4 p.*
28. *Сжатие изображений дистанционного зондирования без визуально заметных искажений [Текст]* / С.С. Кривенко, В.В. Лукин, М.С. Зряхов, А.А. Зеленский // *Радиоелектроніка, Харків: ХНУРЕ, Том 159. - 2009. - С. 248-254.*

Поступила в редколлегию 30.07.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

ФІЛЬТРАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ХААРА У БЛОКАХ

С.С. Кривенко, О.О. Колганова, В.В. Лукин

Розглянуті методи фільтрації оптичних зображень, які спотворені адитивним білим шумом, на основі застосування перетворення Хаара у блоках 8x8 пікселів. Для контролю якості використані як стандартні метрики, так і метрики візуальної якості PSNR-HVS-M та MSSIM. Проаналізовані тестові зображення різної складності для декількох

рівнів адитивних завад. Показано, що ефективність фільтрації із використанням перетворення Хаара децю нижче, ніж за умови використання дискретного косинусного перетворення, але швидкодія обробки суттєво вище.

Ключові слова: *перетворення Хаара, фільтрація, прискорення обробки, якість зображень.*

IMAGE FILTERING USING HAR TRANSFORM IN BLOCKS

S.S. Krivenko, E.O. Kolganova, V.V. Lukin

Methods for filtering optical images corrupted by additive white noise based on using Haar transform in blocks are considered. To control quality, both standard metrics and visual quality metrics PSNR-HVS-M and MSSIM are used. Test images of different complexity for several levels of noise are analyzed. It is shown that efficiency of Haar based denoising is slightly worse than DCT based filtering but computational efficiency is considerably better.

Keywords: *Haar transform, filtering, processing acceleration, image quality.*