

УДК 621.397

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Арлянов С.А., Приоров А.Л., Хрящев В.В.

Введение

Сложность и дороговизна субъективных экспертных оценок делают привлекательным автоматическое измерение качества с помощью определенных алгоритмов. Многие разработчики систем цифровой обработки изображений часто опираются на так называемые объективные (алгоритмические) меры качества [1-6], которые должны хорошо согласовываться с результатами субъективных оценок для широкого класса изображений, не имея при этом чересчур сложных вычислений. Кроме того, желательно, чтобы эти метрики имели простую аналитическую форму и их можно было бы применять в качестве критериев оптимальности при выборе параметров системы обработки изображений [7, 8].

На данный момент наиболее популярной объективной мерой служит пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ), определяемое по следующей формуле [9]:

$$\text{ПОСШ} = 20 \lg \frac{255}{\sqrt{\text{СКО}}}; \quad \text{СКО} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2,$$

где x_i и y_i - значения пикселей исходного и восстановленного изображений соответственно, а СКО - среднеквадратичная ошибка. Величина ПОСШ обычно используется для сравнения различных алгоритмов обработки, например, для сравнения производительности различных методов сжатия или для изучения влияния разных параметров на производительность того или иного алгоритма [10].

Широкое применение СКО и ПОСШ в практических задачах обусловлено тем, что подсчет этих характеристик математически прост и не требует больших вычислительных затрат. Однако необходимо отметить и то, что величина ПОСШ не может в полной мере отразить воздействие на изображение различных видов помех [11], то есть при наличии в изображении разных видов шумов ее значение может оставаться одним и тем же, хотя качество изображения при этом может существенно изменяться. Следовательно, величина ПОСШ плохо согласуется с субъективными критериями качества, определяемыми рекомендацией ITU-R 500 [12], и не является универсальной. Все это говорит о том, что при построении систем цифровой обработки изображений необходимо пользоваться другими метриками оценки качества [13, 14].

В последние годы выполнено множество работ по созданию более приемлемых алгоритмических мер визуального качества обрабатываемых изображений, которые были бы близки к результатам субъективных оценок [15]. Предлагается использование универсального индекса качества (УИК), определяющего подобие восстановленного изображения некоторому оригиналу.

Рассматривается применение нового метода оценки качества в задачах восстановления цифровых изображений. В отличие от широко применяемых алгоритмов на основе среднеквадратичной ошибки, предлагаемый подход учитывает искажения яркости и контраста, а также степень коррелированности между двумя изображениями. Результаты моделирования показывают хорошую коррелированность данного критерия с визуально воспринимаемым качеством изображений.

Универсальность данного критерия заключается в том, что он отражает не только некоторую схожесть обработанного изображения по отношению к оригиналу, но и должным образом учитывает различные виды искажений. В отличие от алгоритмов, предложенных в работах [16, 17], данный метод не привязан к специфике изображения и искажениям, присутствующим в нем. Он основывается на статистическом анализе отдельных блоков входного сигнала и дальнейшем сравнении полученных результатов со значениями эталонного изображения.

Определение УИК для одномерных сигналов

Рассмотрим две последовательности $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$, где $i = 1, 2, \dots, N$, соответствующие стационарному тестовому сигналу и его оригиналу. Тогда универсальный индекс качества будет определяться комбинацией статистических характеристик соответствующих последовательностей по следующей формуле [18]:

$$\text{УИК} = \frac{4\sigma_{xy} \bar{x} \bar{y}}{[\sigma_x^2 + \sigma_y^2][(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]}, \quad (1)$$

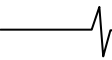
где

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i,$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2,$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

Таким образом, получается, что значение УИК изменяется в интервале $[-1, 1]$, при этом УИК = 1 соответствует наилучшему качеству сигнала. Это возможно только тогда, когда $y_i = x_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$). Минимальное значение УИК = -1 достигается в случае, если $y_i = 2\bar{x} - x_i$, где $i = 1, 2, \dots, N$.



Определенный таким образом индекс качества учитывает в себе три искажающих фактора: степень коррелированности отчетов двух сигналов, изменение значений математического ожидания и среднеквадратичных отклонений сигнала относительно оригинала. Такое представление позволяет наиболее точно оценивать качество восстановленного сигнала и величину искажений, присутствующих в нем. В результате (1) может быть представлено в виде произведения трех множителей:

$$УИК = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \cdot \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \cdot \frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}. \quad (2)$$

Первый множитель - коэффициент взаимной корреляции сигналов x и y , определяющий степень их линейной подобности, принимает значения в интервале $[-1, 1]$, его максимальное значение достигается в случае, если $y_i = ax_i + b$, где $a > 0$, $b > 0$. Второй множитель определяет соотношение между математическими ожиданиями входного и восстановленного сигналов и принимает значения в интервале $[0, 1]$, при этом максимум достигается в случае их равенства. Если сигналом является изображение, этот коэффициент отвечает за изменения его яркости. Значения среднеквадратичных отклонений σ_x и σ_y определяют динамический диапазон изменения сигналов x и y соответственно, вследствие чего они могут рассматриваться как характеристики контраста, если сигналом является изображение. Таким образом, третий множитель в выражении (2) соответствует искажению контрастности восстановленного сигнала относительно оригинала и принимает значения в интервале $[0, 1]$.

Предложенный индекс качества обладает хорошей согласованностью со значениями субъективных оценок и имеет абсолютное значение, равное единице.

Применение УИК для оценки качества изображений

Изображение является двумерным нестационарным процессом и прямое использование формул (1,2) для вычисления УИК в данном случае нерационально. Для решения этой проблемы предлагается выделять в изображении локальные области размером $A \times B$, в пределах которых сигнал можно считать стационарным и вычислять статистические характеристики внутри этих областей, а затем с их использованием вычислять значение $УИК_i$, соответствующее выделенному блоку. Такой подход обеспечивает наиболее правильное и точное суждение о качестве восстановленного изображения.

В результате, процесс нахождения УИК для конкретного изображения будет сводиться к следующему: «скользящее окно» размером $A \times B$, начиная из верхнего левого угла, проходит пиксель за пикселем по всем строкам и столбцам этого изображения, при этом на каждом шаге вычисляется значение статистических характеристик и собственно сам $УИК_i$ для текущего положения окна. Общий УИК, характеризующий качество изображения в целом, будет определяться как среднее арифметическое значений частных $УИК_i$:

$$УИК = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M УИК_i,$$

где M - число блоков, внутри которых вычислялся УИК. Такой подход к нахождению численных оценок качества особенно хорош для изображений, имеющих блочную структуру. Как известно, одним из таких типов изображений является формат JPEG, основанный на применении дискретного косинусного преобразования (ДКП) отдельных блоков размером 8×8 пикселей. В результате этого для оценки качества, например JPEG-изображений, возможно использование УИК с размером «скользящего окна» идентичного размеру блоков ДКП.

Проиллюстрируем применение предложенного подхода к оценке качества на некоторых задачах цифровой обработки изображений.

Оценка качества изображений при равенстве ПОСШ

Проведем сравнительный анализ значений УИК с равными значениями ПОСШ для ряда изображений, подверженных различным искажающим факторам. На рис. 1 представлены изображения с различными видами искажений, при этом величина ПОСШ для всех случаев приблизительно одинакова и составляет 23.4 дБ. Это говорит о том, что с точки зрения данной метрики изображения считаются визуально равноценными. Таким образом, получается, что, например, качество изображения с явно выраженной блочной структурой, обусловленной высоким коэффициентом сжатия JPEG-кодера (рис. 1е), является таким же, как для изображения с видоизмененной гистограммой (рис. 1б), хотя очевидно, что качество последнего изображения существенно выше. Если же судить о качестве изображений с точки зрения предложенного УИК, то видно, что изображение с блочной структурой имеет более низкое качество, чем изображение с трансформированной гистограммой. Для других изображений рис. 1 показания УИК также соответствуют субъективному восприятию.

Оценка яркостных искажений

Как было отмечено ранее, в некоторых случаях обработки изображений возникают такие ситуации, когда показания ПОСШ и СКО совершенно не соответствуют субъективному восприятию, например, при видоизменении гистограмм, гамма-коррекции и других операциях изменения яркости. При линеаризации гистограммы изображения его качество визуально должно улучшаться благодаря повышению контраста и уменьшаться при его ослаблении. Однако на практике при численной оценке таких изображений с помощью стандартных метрик качества ПОСШ и СКО для некоторых изображений возникают противоречивые результаты, то есть изображение с низким контрастом оценивается как изображение с более высоким качеством. Типичный пример такой ситуации представлен на рис. 2. При оценке предложенных изображений с помощью УИК полученные результаты в большей степени соответствуют субъективной оценке и не противоречат суждению о превосходстве качества высококонтрастных изображений над изображениями с низким контрастом.



а) УИК = 1,0



б) УИК = 0,89; ПОСШ = 23,4 дБ



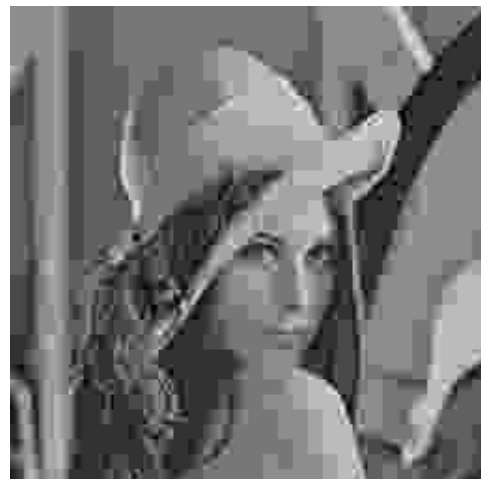
в) УИК = 0,78; ПОСШ = 23,4 дБ



г) УИК = 0,67; ПОСШ = 23,4 дБ

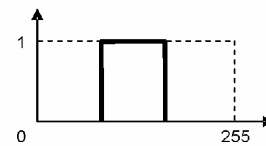
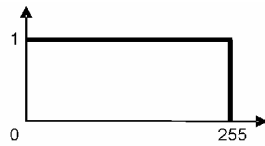
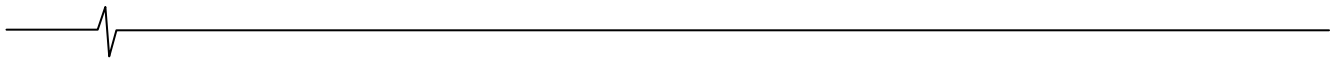


д) УИК = 0,43; ПОСШ = 23,4 дБ

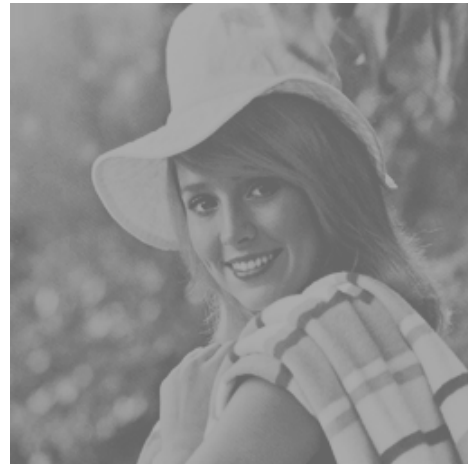


е) УИК = 0,39; ПОСШ = 23,4 дБ

Рис. 1. Оценка качества изображений по значению УИК 7x7 при равенстве ПОСШ: а) оригинал; б) видоизменение гистограммы; в) обработка ФВЧ; г) влияние импульсного шума; д) влияние «белого шума»; е) JPEG-кодирование с высоким коэффициентом сжатия



а) УИК $7 \times 7 = 0,80$; ПОСШ = 18,5 дБ



б) УИК $7 \times 7 = 0,71$; ПОСШ = 19,9 дБ

Рис. 2. Оценка качества изображений с трансформацией гистограмм: а) линейаризация гистограммы; б) усечение гистограммы

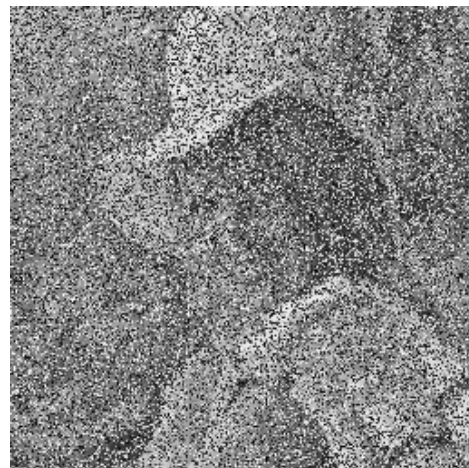
Применение УИК особенно важно при гамма-коррекции изображений. Это связано с тем, что в большинстве таких случаев общая яркость изображения либо возрастает, либо уменьшается, в результате этого показателя СКО принимают достаточно большие значения (порядка 10000) и приводят к существенному уменьшению ПОСШ (менее 10 дБ), что свидетельствует об очень плохом качестве изображений. С точки зрения ПОСШ такие результаты соответствуют значительным искажениям (например, присутствию 60% импульсного шума с произвольными значениями выбросов) в изображении и соответственно указывают на отсутствие в нем какой-либо полезной информации. Однако на самом деле в случае гамма-коррекции только при достаточно малых значениях $\gamma < 0.2$ происходит значимая потеря информации, содержащейся в изображении, в остальных случаях общее представление об изображении сохраняется, и говорить об отсутствии в нем полезной информации нельзя. Например, исходя

из показаний ПОСШ (рис. 3), можно сказать, что изображение, зашумленное импульсным шумом, обладает более высоким качеством, чем изображение после гамма-коррекции. Это говорит о том, что гамма-коррекция вносит искажения, измеримые с действием импульсного шума, что в свою очередь противоречит действительности, так как понятно, что качество первого изображения рис. 3а намного выше второго - рис. 3б. Показания УИК наиболее правильно характеризуют качество представленных изображений и соответствуют визуальному восприятию человека в большей степени.

На рис. 4. представлены графики зависимости качества изображения «LENA» от значения показателя γ . Из них следует, что в результате гамма-коррекции даже при небольших значениях $\gamma \sim 0.7$, при использовании метрики ПОСШ, качество изображения существенно ухудшается (ПОСШ < 19 дБ), хотя изображение при этом визуально практически не отличается от оригинала.



а) УИК $7 \times 7 = 0,62$; ПОСШ = 10,86 дБ



б) УИК $7 \times 7 = 0,05$; ПОСШ = 11,50 дБ

Рис. 3. Изображения с малым значением ПОСШ: а) гамма-коррекция изображения $\gamma < 0.40$; б) изображение с 60% импульсным шумом со случайными значениями импульсов

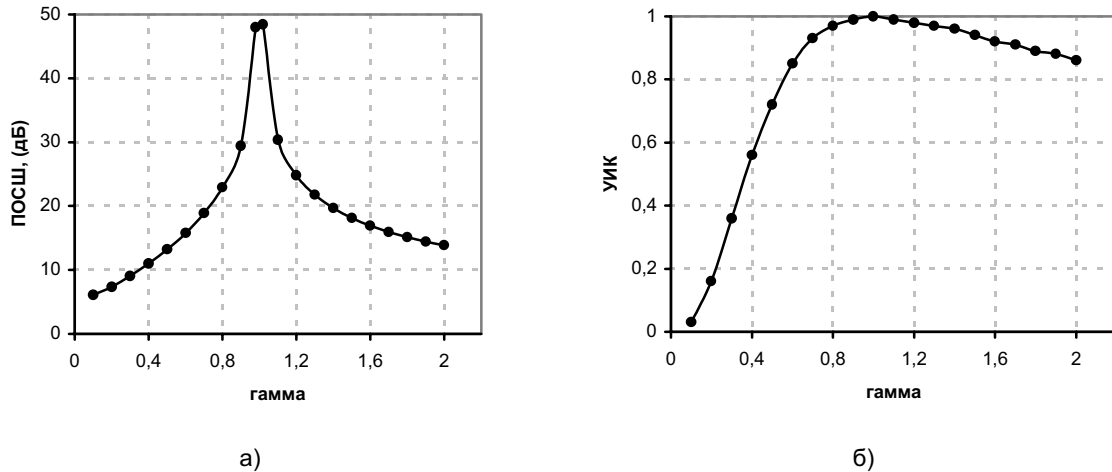


Рис. 4. Влияние показателя γ на качество изображения: а) по шкале ПОСШ; б) по шкале УИК

Оценка качества изображений в случае медианной фильтрации

Для подавления импульсных помех наиболее часто применяются различные типы медианных фильтров и их модификации, при этом для сравнения эффективности работы того или иного алгоритма обычно пользуются стандартными метриками качества типа ПОСШ. Оценим качество изображений, обработанных различными типами медианных фильтров, с помощью УИК и сравним полученные результаты с показаниями ПОСШ. В качестве тестируемых алгоритмов будем использовать следующие медианные фильтры: простой (МФ), адаптивный (АМФ), взвешенный (ВМФ) и адаптивный переключающийся (АПМФ) [19]. Важно отметить то, что качество изображения в дан-

ном случае будет зависеть от двух факторов: величины импульсной помехи в изображении и искажений, вносимых в результате применения того или иного алгоритма фильтрации. Результаты обработки изображений при разной степени зашумленности представлены на рис. 5. Если, например, считать, что изображения со значениями ПОСШ более 35 дБ являются изображениями с высоким качеством, то из графиков видно, что даже при наличии небольшого числа случайных выбросов (до 20%) значение ПОСШ говорит о высоком качестве только тех изображений, которые обработаны адаптивным переключающимся медианным фильтром. Можно сказать, что величина ПОСШ слишком чувствительна к искажениям, вносимым импульсными помехами (импульсным шумом).

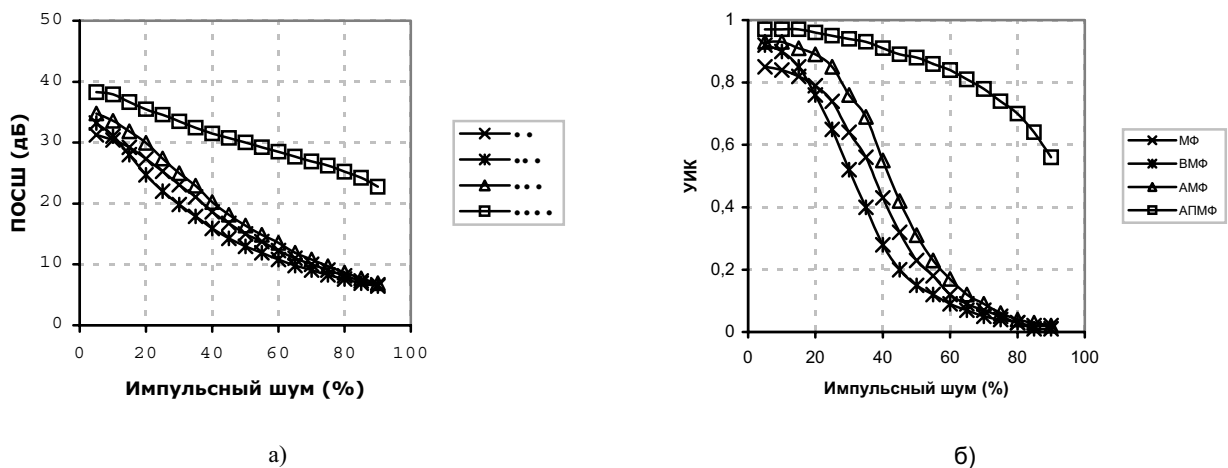
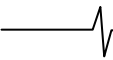


Рис. 5. Оценка изображений, обработанных медианными фильтрами: а) по шкале ПОСШ; б) по шкале УИК 7x7

При использовании метрики УИК резкий спад качества происходит только в диапазоне шума 20-60%, а в остальных случаях уменьшение качества происходит более медленно. Благодаря показаниям УИК (рис. 5) эффективность того или иного алгоритма медианной фильтрации просматривается наиболее отчетливо. Так например, разница в эффективности работы адаптивного медианного фильтра и взвешенного медианного фильтра для 40%-го импульсного шума составляет 0,3 по шка-

ле УИК в пользу первого алгоритма, а по шкале ПОСШ всего лишь 5 дБ (в процентном отношении это существенно меньше).

Для большей согласованности значений УИК с субъективной экспертной оценкой необходимо выбирать размер маски равный 7×7 пикселей, так как при этом показания УИК наиболее точно соответствуют визуальному восприятию изображений (рис. 6). При использовании других размеров маски (3×3 и 5×5) получается, например, что качество изобра-



жения с наличием 50%-го импульсного шума после обработки его адаптивным переключающимся фильтром оценивается как среднее, хотя изображение при этом слабо отличается от оригинала и, соответственно, должно обладать высоким качеством. В других случаях, например при использовании взвешенного медианного фильтра, получается, что показания УИК наоборот завышены и соответствуют изображению со средним качеством, хотя субъективно его качество оценивается как низкое (рис. 6г).

Заключение

Предложен универсальный индекс качества для сравнительного анализа степени искажений в изображениях при различных типах шумовых воздействий и алгоритмах фильтрации. Установлено, что в ряде случаев использование УИК позволяет дифференцировать изображения, обладающие одинаковым качеством, с точки зрения стандартных метрик типа ПОСШ и СКО, при этом показания УИК достаточно хорошо согласуются с визуальным восприятием таких изобра-

жений. Это обусловлено тем, что алгоритм вычисления УИК имеет комбинированную структуру и учитывает различные виды искажений, в том числе искажения яркости и контрастности. Благодаря такому подходу, оценка качества изображений осуществляется наиболее точно и объективно.

С использованием предложенного индекса качества возможно построение новых алгоритмов обработки изображений и усовершенствование существующих. Возможно также построение адаптивных фильтров и использование показаний УИК в эвристических методах обработки изображений. Кроме того, он может быть использован как основа для построения новых способов сравнения различных алгоритмов обработки не только изображений, но и других цифровых сигналов, а также применяться с целью контроля качества изображений и видеоинформации.

Недостатком метода является то, что, как и в случае вычисления ПОСШ, УИК является эталонной мерой качества, то есть для его нахождения помимо тестового изображения необходимо иметь изображение-оригинал.



а) УИК 3x3 = 0,81; УИК 5x5 = 0,88;
УИК 7x7 = 0,91;



б) УИК 3x3 = 0,63; УИК 5x5 = 0,60;
УИК 7x7 = 0,55;



в) УИК 3x3 = 0,42; УИК 5x5 = 0,46;
УИК 7x7 = 0,43;



г) УИК 3x3 = 0,41; УИК 5x5 = 0,33;
УИК 7x7 = 0,28;

Рис. 6. Влияние выбора размера маски для вычисления УИК в случае медианной фильтрации: а) адаптивным переключающимся фильтром; б) адаптивным фильтром; в) классическим медианным фильтром; г) взвешенным медианным фильтром

Список литературы

1. Eskicioglu A., Fisher P. Image quality measures and their performance // IEEE Trans. Communications. 1995. V. 43, № 12. P. 2959–2965.
2. Yu Z., Wu H., Winkler S., Chen T. Vision-model-based impairment metric to evaluate blocking artifact in digital video // Proc. of the IEEE. 2002. V. 90, № 1. P. 154–169.
3. Dijk A., Martens J., Watson A. Quality assessment for coded images using numerical category scaling // Proc. SPIE. 1995. V. 2451, № 3. P. 90-101.
4. Watson A. Visual detection of spatial contrast patterns: evaluation of five simple models // Optic Express. 2000. V. 6, № 1. P. 12-33.
5. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений. Под ред. Ю.Б. Зубарева и В.П. Дворковича. – М. 1997.
6. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. – М.: Техносфера, 2005.
7. Сухарев А.Г., Тихонов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации: Учеб. пособ. – 2 изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
8. Aubert G., Kornprobst P. Mathematical Problems in Image Processing: Partial Differential Equations and the Calculus of Variations. – Springer Verlag, 2002.
9. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука. – М.: Техносфера, 2004.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005.
11. Wang Z., Bovik A. Modern Image Quality Assessment. Synthesis Lectures on Image, Video & Multimedia Processing. Morgan & Claypool, 2006.
12. Recommendation ITU-R BT.500-11, Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures. ITU-T. 2002.
13. Branden Lambrecht C., Verscheure O. Perceptual quality measure using spatio-temporal model of the Human Visual System. Digital Video Compression Algorithms and Technologies // Proc. SPIE. 2668. 1996.
14. Pappas T., Safranek R. Perceptual criteria for image quality evaluation // In Handbook of Image and Video Processing (A. Bovik, ed.). Academic Press, 2000.
15. Wade N., Swanston M. Visual Perception: An Introduction. 2nd ed. L.: Psychology Press, 2001.
16. Wang Z., Sheikh H., Bovik A. No-reference perceptual quality assessment of JPEG compressed images // Proc. IEEE International Conference on Image Processing. 2002. P. 477-480.
17. Marziliano P., Dufaux F., Winkler S., Ebrahimi T. Perceptual blur and ringing metrics: Application to JPEG2000 // Signal Processing: Image Communication. 2004. V. 19, № 2. P. 163–172.
18. Wang Z., Bovik A. A Universal Image Quality Index // IEEE Signal processing letters. 2002. V. 9, № 3. P. 81–84.
19. Приоров А. Л., Апальков И. В., Бухтояров С. С., Хрящев В.В. Применение переключающихся медианных фильтров для восстановления зашумленных изображений // Вопросы радиоэлектроники, серия общетехническая. 2006. Вып. 2. С. 137-147.

Уважаемые авторы !

Редакция научно-технического журнала «Цифровая обработка сигналов» просит Вас соблюдать следующие требования к материалам, направляемым на публикацию:

1) Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:

- Текст – текстовый редактор Microsoft Word на базе версии WINDOWS' 95 или выше.
- Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. На все рисунки, таблицы и библиографические данные указываются ссылки в тексте статьи.
- Объем статьи до 12 стр. (шрифт 12). Для заказных обзорных работ объем может быть увеличен до 20 стр.
- Название статьи на русском и английском языках.
- Рукопись статьи сопровождается:
 - краткой аннотацией на русском и английском языках;
 - номером УДК;
 - сведениями об авторах (Ф.И.О., организация, телефоны, электронная почта).

2) Требования к иллюстрациям:

- Векторные (схемы, графики) – желательно использование графических редакторов Adobe Illustrator или Corel DRAW.
- Растровые (фотографии, рисунки) – М 1:1, разрешение не менее 300dpi, формат tiff.

Справки по телефонам: (495) 290-90-88, (4912) 96-10-95 или по электронной почте info@dspa.ru, tor@rgta.ryazan.ru