

УДК 004.421.4

Анализ и сравнение объективных методов оценки качества изображений

Бабкин П. С.^{1,*}, Павлов Ю. Н.¹

* pavel.babkin@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приводятся результаты анализа и реализации в среде MATLAB 7.8 R 2009 а формальных методов оценки изображений PQS и MS-SSIM. При анализе особое внимание было уделено практическим аспектам реализации методов оценки. Экспериментально был определён метод, результаты которого максимально соответствуют субъективным оценкам наблюдателей. Улучшено распознавание структурных расхождений между двумя изображениями в методе PQS, что позволило получить более точную оценку по сравнению со стандартной версией этого алгоритма. Результаты данной работы могут быть интересны при практической реализации систем цифровой обработки изображений.

Ключевые слова: объективные методы оценки качества изображения, Алгоритм, PQS, MS-SSIM

Введение

Цифровые изображения могут быть объектами влияния самых разнообразных искажений во время сбора, обработки, сжатия, хранения, передачи и воспроизведения, и на любой из этих стадий они могут привести к деградации качества изображения. Для приложений, в которых изображения, в конечном счете, должны быть видимыми для человека "правильным" способом, визуальное качество изображения может быть оценено только через субъективные оценки (**Mean opinion score (MOS)**). Однако субъективные оценки, как правило, слишком неудобны, трудоемки и дороги, и как бы они ни выполнялись – в соответствии с требованиями стандарта ITU R BT.500 или неформально, на глаз, – требуют много времени, ресурсов и средств. Причем даже в лучших условиях они не всегда дают схожие результаты [1].

Объективные показатели качества изображения могут быть классифицированы в зависимости от наличия исходного изображения (без искажений), с которым искаженное изображение должно сравниваться: 1) эталонные 2) неэталонные 3) псевдоэталонные. Большинство существующих подходов известны как эталонные, что означает наличие эталонного изображения [2]. Во многих практических применениях, однако, эталонное изображение отсутствует, и желателен неэталонный или "слепой" подход к оценке

качества. В третьем типе методов эталонное изображение предоставляется только частично, в виде набора извлеченных признаков, предоставленных в качестве дополнительной информации, нужной для того чтобы помочь оценить качество искаженного изображения. Эти методы называются псевдоэталонными. Данная статья посвящена эталонным оценкам качества изображения.

Наиболее простой и широко распространённой метрикой качества изображения является оценка среднеквадратичной ошибки, вычисляемая путем усреднения квадратов разностей интенсивностей искаженных и эталонных пикселей изображения, наряду с соответствующим количеством пиков отношения сигнал – шум. Этот метод привлекателен тем, что он прост для расчёта, имеет чёткий физический смысл и математически удобен в контексте оптимизации. Но он недостаточно отражает воспринимаемое визуальное качество. Два искажения изображения с одной и той же среднеквадратичной ошибкой могут иметь очень разные типы, некоторые из которых являются гораздо более заметным, чем другие. В [3-5] предложены принципы измерения качества изображения, основанные на том факте, что зрительная система человека предрасположена к извлечению структурной информации из изображения. Представленные в этих статьях методы, показавшие хорошие результаты в сравнении с субъективной оценкой экспертов, и будут рассматриваться в дальнейшем в этой статье.

1. Постановка задачи

Целью данной работы является исследование и модификация алгоритмов объективной оценки качества изображения, результатом которых является количественный показатель, с помощью которого можно прогнозировать воспринимаемое качество изображения. При этом в результате модификации алгоритм должен дать результаты, более соответствующие оценке MOS.

2. Методика решения задачи

Предлагаемая методика решения задачи состоит из следующих этапов:

- 1) исследование и реализация алгоритмов объективной оценки изображений PQS (Picture Quality Scale) и MS-SSIM (Multi-scale Structural Similarity), которые будут описаны далее в статье;
- 2) создание модифицированного алгоритма, проведение экспериментов с использованием тестовых изображений, анализ полученных результатов.

2.1. Реализация алгоритма объективной оценки изображений PQS

В статье [3], посвященной реализации алгоритмов объективной оценки изображений, рассмотрен метод и описаны немаловажные аспекты, необходимые для его практической реализации.

Объективная оценка качества изображения PQS применима только к монохромным изображениям. Блок – схема алгоритма PQS представлена на рис.1.

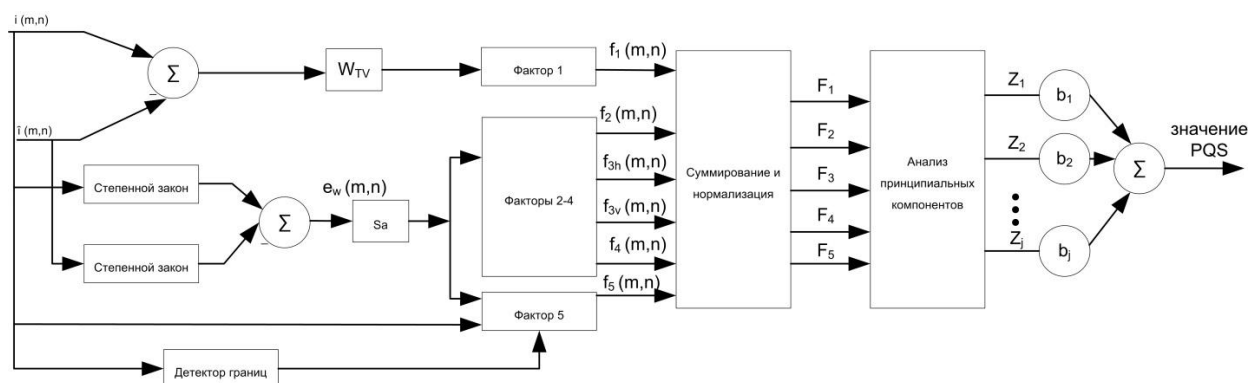


Рис.1. Блок – схема алгоритма PQS.

Для эталонного изображения $i(m,n)$, где m,n – размеры изображения, и искаженного и/или сжатого изображения $\hat{i}(m,n)$ вычисляются локальные карты искажений $\{f_i(m,n)\}$, из которых впоследствии находятся факторы искажений $\{F_i\}$. Затем с помощью регрессионного анализа осуществляется подбор комбинаций вычисленных факторов для получения числа, отражающего качество искаженного изображения. Далее приведем краткое описание факторов, из которых складывается оценка PQS, в том числе, уточняющие дополнения, необходимые для практической реализации данного алгоритма.

Первый фактор искажения F_1

Введем определение

$$e_i(m,n) = i(m,n) - \hat{i}(m,n). \quad (1)$$

Эта ошибка используется для вычисления первой локальной карты искажений изображения:

$$f_1(m,n) = [i(m,n) * \omega_{TV}(m,n)]^2. \quad (2)$$

Здесь $\omega_{TV}(m,n)$ - изотропическая пространственная надбавка области, соответствующая надбавке частоты, определенной стандартом CCIR -567 - 1:

$$\omega_{TV}(f) = \frac{1}{1 + (f / f_c)^2}, \quad f = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (3)$$

с частотой среза $f_c = 5,56$ циклов/градус на расстоянии 4-х кратной высоты изображения (4Н); символ * обозначает свертку; u, v - соответственно горизонтальные и вертикальные пространственные частоты, измеряемые в циклах на градус.

Фактор искажения F_1 вычисляется как

$$F_1 = \frac{\sum_{m,n} f_1(m,n)}{\sum_{m,n} i^2(m,n)}. \quad (4)$$

При этом есть несколько немаловажных дополнений для реализации вычислений этого и последующего факторов.

- 1) Сравнимые изображения должны быть нормированы по яркости.
- 2) Для вычисления матрицы $[U, V]$ используется принцип, приведенный в [6]. Здесь U и V - матрицы горизонтальных и вертикальных пространственных частот соответственно.
- 3) Результатом вычисления значений $[U, V]$ будет матрица размером $[2*m, 2*n]$, поэтому в этом случае свертка осуществляется с использованием теоремы корреляции:

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} F_D^{-1} [X_{1a}^*(k) X_{2a}(k)]. \quad (5)$$

Здесь r_{12} - взаимная корреляция двух последовательностей данных $x_1(n)$ и $x_2(n)$, а их ДПФ-образы равны соответственно $X_1(k), X_2(k)$; F_D^{-1} обозначает обратное дискретное преобразование Фурье. Для последовательностей $x_1(n)$ с длиной N_1 и $x_2(n)$ с длиной N_2 их линейная корреляция будет иметь длину $N_1 + N_2 - 1$. Для этого последовательность $x_1(n)$ заменяют последовательностью $x_{1a}(n)$, которая состоит из последовательности $x_1(n)$ с добавленными $N_2 - 1$ нулями, а последовательность $x_2(n)$, дополненная $N_1 - 1$ нулями, превращается в последовательность $x_{2a}(n)$ [7].

Часть кода реализации вычислений в среде MATLAB 7.8 приведена ниже:

```
img1 = imread('c1.jpeg');  
img2 = imread('c2.jpeg');  
% нормировка изображений (в данном случае входные изображения 8-битные)  
im1 = double(img1)/255;  
im2 = double(img2)/255;  
ei = im1 - im2;
```

Второй фактор искажения F_2

Фактор искажения F_2 включает более полную модель визуального восприятия. При его нахождении используется степенной закон преобразования изображения $i(m,n)$, приближенный к закону Вебера-Фехнера.

При этом при вычислениях стоит учитывать возможное деление на 0 ($\cos 90^\circ$).

```
md = V./U;  
md(abs(cos(md))<0.02) = 1.39;
```

Фактор F_2 не учитывает значения $e_o(m, n)$ ниже порога восприятия T (который подбирается экспериментально). Здесь $e_o(m, n)$ взвешенная по частоте ошибка, используемая для вычисления второй локальной карты искажений изображения.

Третий фактор искажения F_3

Фактор искажения F_3 определяется как функция двух параметров: горизонтальной и вертикальной ошибок неоднородностей. Данный фактор вводится для учёта искажений, вносимых большинством алгоритмов сжатия изображения (так называемые признаки конца блока)

Четвертый фактор искажения F_4

Фактор искажения F_4 определяется как корреляционный показатель между изображениями.

Пятый фактор искажения F_5

Фактор искажения F_5 отражает ошибки в областях с большим контрастом (по сути границы объектов):

$$S_h(m, n) = e^{\{-0.04V_h(m, n)\}}, \quad (6)$$

$$V_h(m, n) = \frac{|i(m, n-1) - i(m, n+1)|}{2}, \quad (7)$$

$$f_5(m, n) = I_M(m, n) |e_o(m, n)| \cdot (S_h(m, n) + S_v(m, n)), \quad (8)$$

$$F_5 = \frac{1}{N_K} \sum_{m, n} f_5(m, n). \quad (9)$$

Здесь $S_h(m, n)$ - маскирующий фактор, определяемый горизонтальной функцией локальной активности $V_h(m, n)$ (аналогично определяется $S_v(m, n)$); функция $I_M(m, n)$ выделяет точки, значение которых после применения оператора Kirsch, больше или равно 6 (порог подбирается экспериментально с учетом того, что изображения нормированы). Также возможно использование других граничных детекторов, таких как Canny (подробнее будет рассмотрен в разделе 3).

После того, как были вычислены все пять факторов, необходимо вычислить саму оценку PQS. В статье [3] предлагается вычислять её двумя способами.

1) С помощью линейной комбинации вычисленных факторов $\{F_i\}$:

$$PQS = a_1 + a_2 * F_1 + a_3 * F_2 + a_4 * F_3 + a_5 * F_4 + a_6 * F_5. \quad (10)$$

2) С помощью линейной комбинации принципиальных компонент $\{Z_i\}$:

$$PQS = b_1 + b_2 * Z_1 + b_3 * Z_2 + b_4 * Z_3. \quad (11)$$

В данной статье для вычисления PQS будет использоваться линейная комбинация факторов $\{F_i\}$ (при этом значений PQS будет лежать в пределах $(0;1]$, где 1- это полное совпадение изображений). Авторы статьи [3] провели регрессионный анализ для получения коэффициентов $\{a_i\}$, целью которого было получение максимального соответствия оценки PQS и субъективной экспертной оценки. Полученные ими значения коэффициентов таковы: $a_1=5,797$; $a_2=0,035$; $a_3=0,044$; $a_4=0,01$; $a_5=0,132$; $a_6=0,135$.

2.2. Реализация алгоритма объективной оценки изображений MS-SSIM

В статье [4] описывается метод оценки качества изображений SSIM, основанный на сравнении эталонного и искаженного изображения по трем характеристикам: яркость, контрастность и структура. Блок – схема алгоритма SSIM представлена на рис.2.

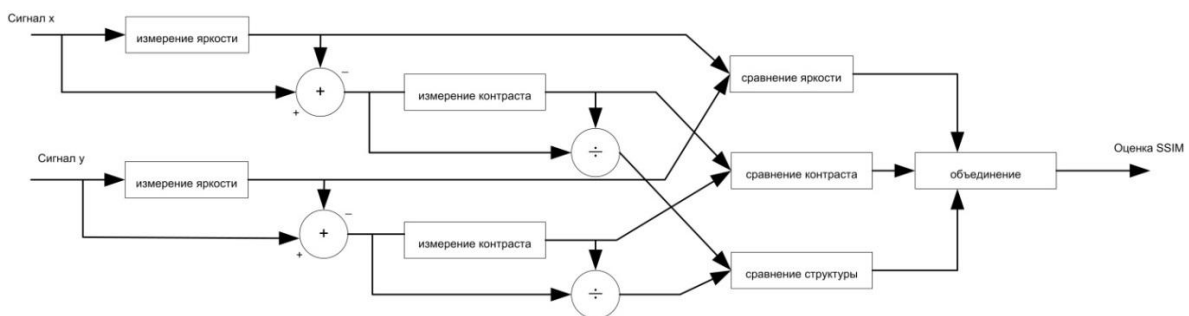


Рис.2. Блок – схема алгоритма SSIM.

Оценка SSIM должна удовлетворять следующим условиям.

- 1) Симметрия: $S(x, y) = S(y, x)$.
- 2) Диапазон: $S(x, y) \in [0;1]$.
- 3) $S(x, y) = 1$ тогда и только тогда, когда $x = y$, т.е. когда изображения идентичны.

Дальнейшее развитие метода SSIM привело к разработке алгоритма MS-SSIM. С его помощью стало возможным учитывать детали изображения при разных разрешениях. Получая на входе эталонное и искаженное изображения, система многократно (в общем случае M раз) применяет фильтр низких частот и децимацию изображения в два раза, вычисляя каждый раз функцию сравнения контраста и функцию сравнения структуры. Функция сравнения яркости вычисляется только в масштабе M . Общая оценка MS-SSIM получается путем объединения измерений в разных масштабах с помощью формулы

$$MS - SSIM(x, y) = [l_M(x, y)]^{\alpha M} \cdot \prod_{j=1}^M [c_j(x, y)]^{\beta j} \cdot [s_j(x, y)]^{\gamma j}, \quad (12)$$

где $\alpha_M, \beta_j, \gamma_j$ - параметры, используемые для регулировки относительной важности трех компонентов. Фактически за счёт параметров настройки оценка MS-SSIM можно, в частном случае, получить оценку SSIM.

Обе оценки реализованы в среде MATLAB авторами статей [4, 5]. Так же, в статье [5] доказана большая точность полученных результатов методом MS-SSIM, поэтому для дальнейших исследований в рамках данной работы выбран именно он.

3. Анализ и сравнение результатов работы алгоритмов PQS и MS-SSIM

Для тестирования описанных алгоритмов (которые были реализованы в среде MATLAB 7.8) были использованы монохромные изображения, полученные с помощью тепловизионной системы наблюдения (разработчик – фирма ООО «ИЭОС») и обработанные алгоритмами сжатия динамического диапазона.

В разделе 2.1. упоминалась возможность использования других граничных детекторов вместо того, который был предложен авторами статьи [3]. В данной статье был предложен метод модификации алгоритма PQS путём замены граничного детектора Kirsch на граничный детектор Саппу [8], являющийся одним из лучших граничных детекторов по исследованиям, приведенным в многочисленных статьях, например в [9].

Основные этапы алгоритма выделения границ Саппу приведены далее.

- 1) *Сглаживание*. Размытие изображения для удаления шума. Оператор Кэнни использует фильтр который может быть хорошо приближен к первой производной гауссиана:

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} * A.$$

- 2) *Поиск градиентов*. Границы отмечаются там, где градиент изображения приобретает максимальное значение. Они могут иметь различное направление, поэтому алгоритм Саппу использует четыре фильтра для обнаружения горизонтальных, вертикальных и диагональных ребер в размытом изображении. Угол направления вектора градиента округляется и может принимать значения 0; 45; 90; 135.
- 3) *Подавление немаксимумов*. Только локальные максимумы отмечаются как границы.
- 4) *Двойная пороговая фильтрация*. Потенциальные границы определяются порогами.

- 5) *Трассировка области неоднозначности.* Итоговые границы определяются путём подавления всех краёв, несвязанных с определенными (сильными) границами [9].

Далее проведем сравнение следующих алгоритмов.

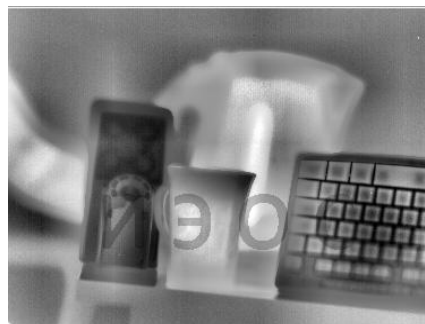
- 1) PQS алгоритм, использующий для вычисления F_5 оператор Kirsch.
- 2) PQS алгоритм, использующий для вычисления F_5 оператор Canny.
- 3) MS-SSIM алгоритм.

Целью сравнения является определение метода, результаты которого максимально соответствуют субъективной оценке. При этом субъективная оценка проводилась в соответствии с рекомендациями, данными в [10]. Ещё одной целью эксперимента было выявление метода нахождения структурных различий, максимально приближенного к субъективной оценке.

Для сравнения использовались эталонное изображение (размеры - 282x378) и его версии, полученные в результате обработки эталона различными типами фильтров, основное назначение которых – выделение границ на основе выравнивания гистограммы яркости. Один из вариантов набора изображений представлен на рисунке 3, где рисунок 3а – это эталонное изображение, а рисунки 3б-3д – изображения, подвергнутые искажениям с помощью фильтров.



а



б



в



г



Д

Рис.3.(а) эталонное изображение; (б) изображение, полученное в результате обработки фильтром; (в) изображение, полученное в результате обработки фильтром; (г) изображение, полученное в результате обработки фильтром; (д) изображение, полученное в результате обработки фильтром

Кратко опишем процедуру проведения субъективной оценки (MOS). В данном эксперименте использовался метод с двумя источниками воздействия и с использованием шкалы искажений (DSIS). Этот метод - циклический, в нем оценщику сначала демонстрируется неискаженный эталон, а затем – то же самое изображение с искажениями. После этого его просят оценить второй образец относительно первого. Во время сеанса, который длится до получаса, оценщику демонстрируют наборы изображений или их последовательности в случайном порядке. В конце серии испытаний вычисляют среднюю оценку для каждого тестового изображения. Шкала оценок искажений:

- 5 - незаметно;
- 4 - заметно, но не раздражает;
- 3 - слегка раздражает;
- 2 - раздражает;
- 1 - очень раздражает.

Получение экспертных оценок структурных различий несколько отличается по методике от выставления MOS оценок, однако и в том и в другом случае соблюдались рекомендации, данные в [10]. При оценке структурных различий в качестве наблюдателей выступали специалисты в области цифровой обработки изображений. Шкала оценок в этом случае была непрерывной и её диапазон лежал в пределах от 0 до 1 включительно, где 1-полное структурное сходство.

Всего для тестирования было использовано 60 пар изображений. Результаты тестирования приведены на графиках, изображенных на рисунке 4 (красным цветом проведена аппроксимационная кривая):

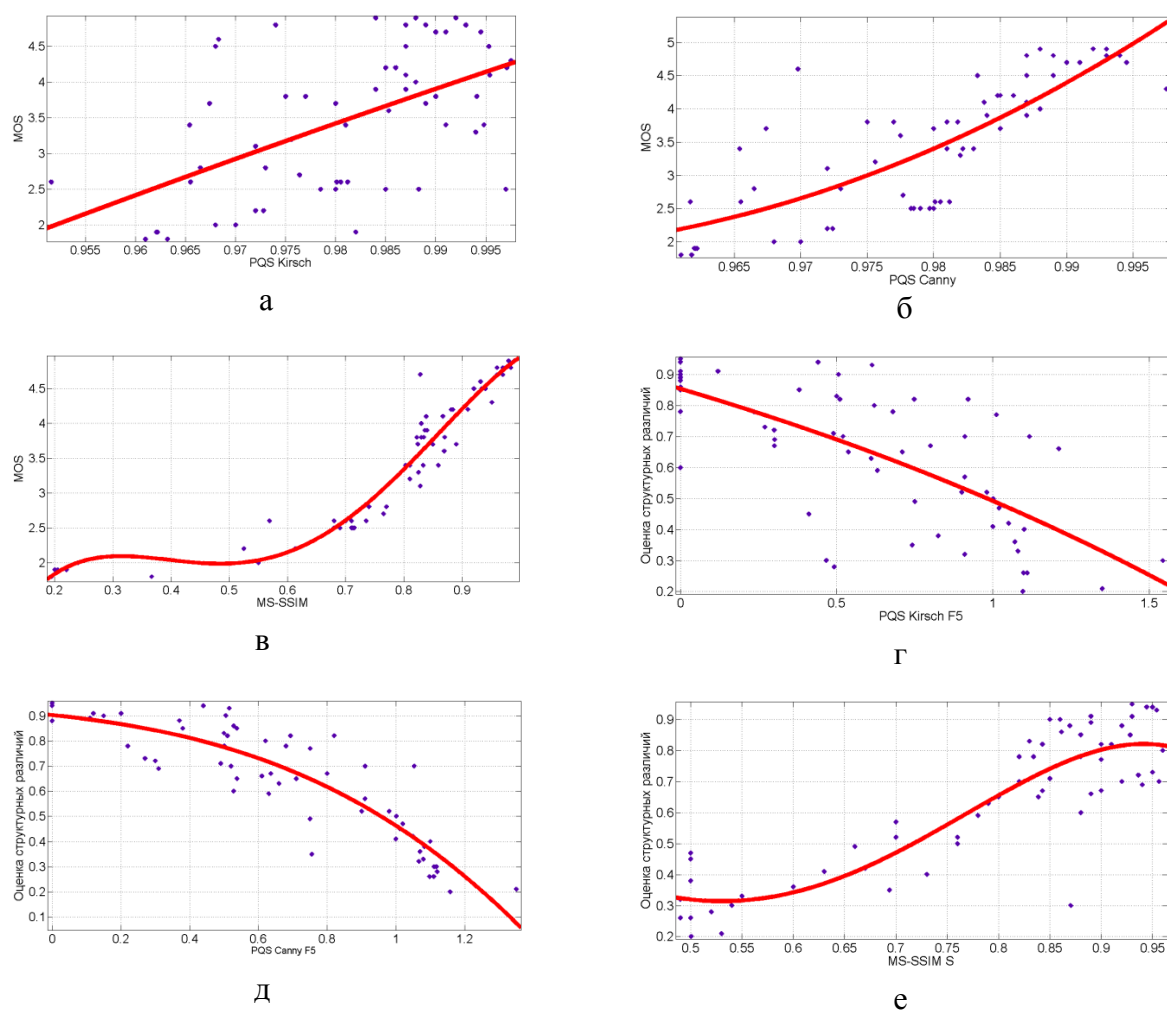


Рис.4.(а) соответствие MOS оценки и PQS оценки с детектором границ Kirsch; (б) соответствие MOS оценки и PQS оценки с детектором границ Canny; (в) соответствие MOS оценки и MS-SSIM оценки; (г) соответствие оценки структурного различия экспертом и PQS F_5 с детектором границ Kirsch; (д) соответствие оценки структурного различия экспертом и PQS F_5 с детектором границ Canny; (е) соответствие оценки структурного различия экспертом и MS-SSIM S оценки

Выводы

В данной статье были рассмотрены объективные методы оценки качества изображений PQS и MS-SSIM. Предложен способ модификации алгоритма PQS с целью его большего соответствия оценке MOS, связанный с изменением типа граничного детектора.

Исходя из полученных в ходе экспериментов результатов, можно судить, что наиболее соответствующим субъективной оценке методом является метод MS-SSIM. Однако для оценки структурных различий целесообразно использовать модифицированный метод PQS (детектор границ Canny).

Список литературы

1. Грег Хоффман. Моделирование человеческого зрения для объективной оценки качества изображения // MediaVision. Информационно-технический журнал. 2010. № 7. С. 43-45.
2. Дмитриев Н.И., Хрусталёв А.А. Система распознавания объектов, обеспечивающая работу бортовой системы технического зрения в реальном времени // Научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления 2011»: тез. докл. М.: Изд-во «Ротапринт» ИКИ РАН, 2011. С. 40-47.
3. Miyahara M., Kotani K., Algazi V.R. Objective Picture Quality Scale (PQS) for Image Coding // IEEE Transactions on Communications. 1998. Vol. 46, no.9. P. 1215-1226. DOI: [10.1109/26.718563](https://doi.org/10.1109/26.718563)
4. Zhou Wang, Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13, no. 4. P. 600-612. DOI: [10.1109/TIP.2003.819861](https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861)
5. Zhou Wang, Bovik A.C., Simoncelli E.P. Multiscale structural similarity for image quality assessment // Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Vol. 2. Pacific Grove, CA, Nov. 9-12, 2003. IEEE, 2004. P. 1398-1402. DOI: [10.1109/ACSSC.2003.1292216](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2003.1292216)
6. Ashish Meshram. Speckle Noise Reduction in Ultrasound Images // Matlab Central: website, 11 Apr. 2013. Available at: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41240-speckle-noise-reduction-in-ultrasound-images/content/dftuv.m> , accessed 05.02.2014.
7. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. 2-е изд. М.: Вильямс, 2008, 992 с. [Ifeachor E.C., Jervis B.W. Digital Signal Processing: A Practical Approach. 2nd ed. Prentice Hall, 2002. 934 p.]
8. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. PAMI-8, iss. 6. P. 679-698. DOI: [10.1109/TPAMI.1986.4767851](https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851)
9. Tzu-Heng Henry Lee. Edge Detection Analysis. Graduate Institute of Communication Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC. Available at: http://disp.ee.ntu.edu.tw/henry/edge_detection.pdf , accessed 01.08.2014.
10. Рекомендация МСЭ-R BT.500-13 (01/2012). Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. Режим доступа: <http://www.itu.int/pub/r-rec/en> (дата обращения 23.02.2014).

Analysis and Comparison of Objective Methods for Image Quality Assessment

P.S. Babkin^{1,*}, Y.N. Pavlov¹

[*pavel.babkin@mail.ru](mailto:pavel.babkin@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: algorithm, Objective methods image quality assessment, PQS, MS-SSIM

The purpose of this work is research and modification of the reference objective methods for image quality assessment. The ultimate goal is to obtain a modification of formal assessments that more closely corresponds to the subjective expert estimates (MOS).

In considering the formal reference objective methods for image quality assessment we used the results of other authors, which offer results and comparative analyzes of the most effective algorithms. Based on these investigations we have chosen two of the most successful algorithm for which was made a further analysis in the MATLAB 7.8 R 2009 a (PQS and MS-SSIM). The publication focuses on the features of the algorithms, which have great importance in practical implementation, but are insufficiently covered in the publications by other authors.

In the implemented modification of the algorithm PQS boundary detector Kirsch was replaced by the boundary detector Canny. Further experiments were carried out according to the method of the ITU-R VT.500-13 (01/2012) using monochrome images treated with different types of filters (should be emphasized that an objective assessment of image quality PQS is applicable only to monochrome images). Images were obtained with a thermal imaging surveillance system. The experimental results proved the effectiveness of this modification.

In the specialized literature in the field of formal to evaluation methods pictures, this type of modification was not mentioned.

The method described in the publication can be applied to various practical implementations of digital image processing.

Advisability and effectiveness of using the modified method of PQS to assess the structural differences between the images are shown in the article and this will be used in solving the problems of identification and automatic control.

References

1. Hoffman G. Picture Quality Measurements Based on Human Vision Modeling. *MediaVision*, 2010, no. 7, pp. 43-45. (in Russian).

2. Dmitriev N.I., Khrustalev A.A. Recognition system of objects which ensures the functioning board vision system in real time. *Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya 2011": tez. dokl.* [Scientific and Technical Conference "Vision Systems in Control Systems 2011": abstracts]. Moscow, "Rotaprint" IKI RAN Publ., 2011, pp. 40-47. (in Russian).
3. Miyahara M., Kotani K., Algazi V.R. Objective Picture Quality Scale (PQS) for Image Coding. *IEEE Transactions on Communications*, 1998, vol. 46, no.9, pp. 1215-1226. DOI: [10.1109/26.718563](https://doi.org/10.1109/26.718563)
4. Zhou Wang, Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 600-612. DOI: [10.1109/TIP.2003.819861](https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861)
5. Zhou Wang, Bovik A.C., Simoncelli E.P. Multiscale structural similarity for image quality assessment. *Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. Vol. 2. Pacific Grove, CA, Nov. 9-12, 2003. IEEE, 2004, pp. 1398-1402. DOI: [10.1109/ACSSC.2003.1292216](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2003.1292216)
6. Ashish Meshram. *Speckle Noise Reduction in Ultrasound Images*. Matlab Central: website, 11 Apr. 2013. Available at: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41240-speckle-noise-reduction-in-ultrasound-images/content/dftuv.m> , accessed 05.02.2014.
7. Ifeachor E.C., Jervis B.W. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. 2nd ed. Prentice Hall, 2002. 934 p. (Russ. ed.: Ifeachor E.C., Jervis B.W. *Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskii podkhod*. Moscow, Vil'iams Publ., 2008, 992 p.).
8. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. PAMI-8, iss. 6, pp. 679-698. DOI: [10.1109/TPAMI.1986.4767851](https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851)
9. Tzu-Heng Henry Lee. *Edge Detection Analysis*. Graduate Institute of Communication Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC. Available at: http://disp.ee.ntu.edu.tw/henry/edge_detection.pdf , accessed 01.08.2014.
10. Recommendations ITU-R. BT.500-13 (2012-01). Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures. ITU, 2012. Available at: <http://www.itu.int/pub/r-rec/en> , accessed 23.02.2014.