

УДК 621.397.2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДИФИКАЦИЙ ИНДЕКСА СТРУКТУРНОГО ПОДОБИЯ

Радченко Ю.С., Радченко Т.А., Булыгин А.В.

Введение

При разработке автоматизированных систем оценки качества цифровых изображений, тестировании кодеков для сжатия видео, оценки качества систем передачи видеoinформации весьма актуальной является проблема построения объективного критерия качества изображений. Сложность решения названной проблемы в том, что объективный критерий должен быть достаточно простым и одновременно хорошо соответствовать восприятию зрительной системы человека.

В последнее время среди специалистов по обработке изображений нашли признание критерии структурного подобия MSSIM и MESSIM [1,2]. Как показали исследования, эти критерии вполне адекватно оценивают качество изображений при наличии искажений в виде гауссова шума и размытости контуров. Однако при наличии таких искажений, как импульсный шум, блочность они дают значение качества не вполне соответствующие зрительному восприятию системе человека.

В данной работе предложены модификации критерия MSSIM, основанные на непараметрических методах статистики.

Модификации MSSIM

Критерий структурного подобия MSSIM [1,2] определяется путем усреднения индекса структурного подобия SSIM по всем блокам сравниваемых изображений X и Y :

$$\text{MSSIM}(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \text{SSIM}_j(x, y) \quad (1)$$

Значение $\text{SSIM}_j(x, y)$ для j -го блока вычисляется по формуле:

$$\text{SSIM}_j(x, y) = l(x, y) \cdot c(x, y) \cdot s(x, y) \quad (2)$$

Здесь $l(x, y)$ - функционал «сравнение яркости», $c(x, y)$ - функционал «сравнение контрастности» и $s(x, y)$ - функционал «сравнение структуры».

В соответствии с [2] функционалы сравнения в блоках вычисляются следующим образом:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2},$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}, \quad (3)$$

где $\mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2$ - выборочные среднее и дисперсия значений яркостной компоненты для блоков изображений X и Y соответственно; σ_{xy} - корреляционный момент между векторами значений в блоках; C_1, C_2, C_3 - малые константы. С точностью до константы C_3 функционал $s(x, y)$ совпадает с выборочным коэффициентом корреляции Пирсона.

Предложены модификации критерия качества восстановленного после сжатия изображения - индекса структурного подобия, основанные на методах непараметрической статистики. Показано преимущество предложенных модификаций при наличии импульсных помех, блочных искажений, размытии контуров по сравнению с исходным критерием.

Выбор в качестве меры структурного различия функционала $s(x, y)$ в виде (3) наиболее обоснован при сравнении векторов значений, имеющих гауссово распределение. Поэтому критерий MSSIM хорошо отслеживает искажения в виде гауссова шума. Однако, он неудовлетворительно работает при размытии контуров.

Существует модификация критерия структурного подобия MESSIM [4], основанная на информации о границах изображения. В MESSIM вместо (3) используются функционалы:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2},$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma'_{xy} + C_3}{\sigma'_x\sigma'_y + C_3}, \quad (4)$$

где σ'_x и σ'_y - дисперсия векторов D_x и D_y соответственно; σ'_{xy} - ковариация векторов D_x и D_y ; D_x и D_y - векторы направления границ исходного блока изображения и искаженного соответственно.

При неизвестных законах распределения искажений целесообразно воспользоваться оценками соответствующих структурных характеристик на основе непараметрической статистики [5]. В частности, для оценки яркости целесообразно использовать выборочную медиану, обладающую по сравнению с выборочным средним большей устойчивостью, а для оценки структурного подобия вместо коэффициента корреляции Пирсона - один из ранговых коэффициентов корреляции.

Нами предлагаются две модификации критерия структурного подобия на основе непараметрических методов (Mean Nonparametric Structural Similarity): MNSSIM1 и MNSSIM2 [8].

Для MNSSIM1 вместо (3) предлагается использовать функционалы:

$$l(x, y) = \frac{2m_x m_y + C_1}{m_x^2 + m_y^2 + C_1}, \quad c(x, y) = \frac{2\sigma m_x \sigma m_y + C_2}{\sigma m_x^2 + \sigma m_y^2 + C_2},$$

$$s(x, y) = R_S(x, y), \quad (5)$$

где $m_x = \text{median}(\vec{x})$ и $m_y = \text{median}(\vec{y})$ - медианы векторов значений яркости в блоках изображений X и Y соответственно;

$$\sigma_{m_x}^2 = \text{median}[(\bar{x} - m_x)^2], \quad \sigma_{m_y}^2 = \text{median}[(\bar{y} - m_y)^2]$$

медианы квадрата разности векторов значений яркости и медианы, $R_S(x, y)$ – ранговый коэффициент корреляции Спирмена [5].

Для MNSSIM2 предлагается использовать функционалы:

$$l(x, y) = \frac{2m_x m_y + C_1}{m_x^2 + m_y^2 + C_1}, \quad \alpha(x, y) = \frac{2\sigma_x \sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad s(x, y) = R_S(x, y), \quad (6)$$

т.е. функционал «сравнение контрастности» $s(x, y)$ оставить тем же, что в MSSIM

Константы C_1 и C_2 в (5), (6) идентичны, используемым при подсчете MSSIM [2].

ния более адекватные зрительному восприятию и близкие между собой.

На рис. 2 представлены зависимости критериев MSSIM, MESSIM, MNSSIM1, MNSSIM2, от параметра интенсивности шума p для импульсного шума типа «соль/перец». Аналогичные зависимости имеют место для импульсных шумов «перец» и «соль». Практически во всем диапазоне изменений p значения критериев MNSSIM1 и MNSSIM2 близки между собой и более адекватны зрительному восприятию, чем значения критериев MSSIM и MESSIM.

Таким образом, при исследовании влияния искажений в виде импульсного шума следует отдать

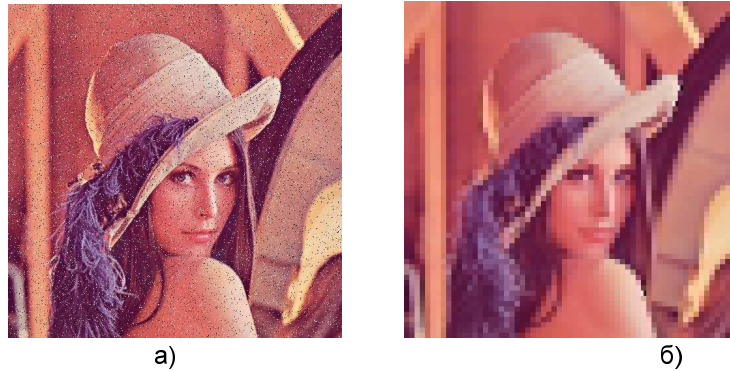


Рис. 1. Изображение «Лена»: а) шум - «соль/перец», $p=0,05$. $MSSIM = 0,315$, $MESSIM = 0,331$; $MNSSIM1 = 0,899$, $MNSSIM2 = 0,898$; б) восстановленное после максимального сжатия при помощи JPEG: $MSSIM = 0,634$, $MESSIM = 0,578$, $MNSSIM1 = 0,073$, $MNSSIM2 = 0,079$.

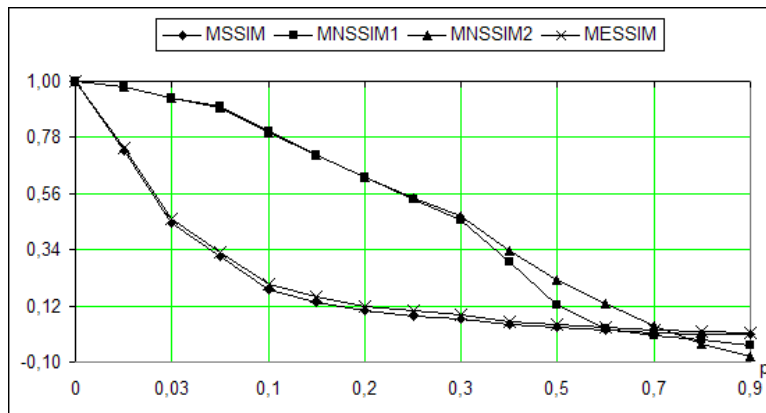


Рис.2 Зависимость значений критериев $MSSIM$, $MNSSIM1$, $MNSSIM2$, $MESSIM$ от интенсивности импульсного шума для типа «соль/перец».

Исследование критериев при наличии импульсных помех

При исследовании влияния импульсных помех на качество восстановленного изображения использовались критерии качества $MSSIM$, $MESSIM$, $MNSSIM1$, и $MNSSIM2$. Импульсный шум задавался двумя характеристиками: интенсивностью, определяемой вероятностью появления шума в пикселе p , и типом шума, имеющим три вариации: «соль», «перец» и «соль/перец». В качестве тестового изображения использовалось изображение «Лена». На рис. 1-а) представлено изображение, искаженное импульсным шумом типа «соль/перец».

Как следует из рис. 1-а), критерии $MNSSIM1$ и $MNSSIM2$ при наличии импульсного шума дают значе-

ние предпочтения модифицированным непараметрическим критериям.

Исследование критериев при наличии блочности

Блочная структура изображения обычно образуется при сжатии и восстановлении изображения и зависит от степени сжатия. Чем больше степень сжатия, тем меньше энтропия сжатого изображения. При исследовании влияния блочности на качество изображения использовались критерии $MSSIM$, $MESSIM$, $MNSSIM1$, $MNSSIM2$ и алгоритмы сжатия GDCT [6,7] и JPEG. На рис. 3 представлена зависимость критериев $MSSIM$, $MESSIM$, $MNSSIM1$, $MNSSIM2$ от энтропии (в бит/пиксель) для изображения «Лена», сжатого и восстановленного с помощью алгоритма GDCT.

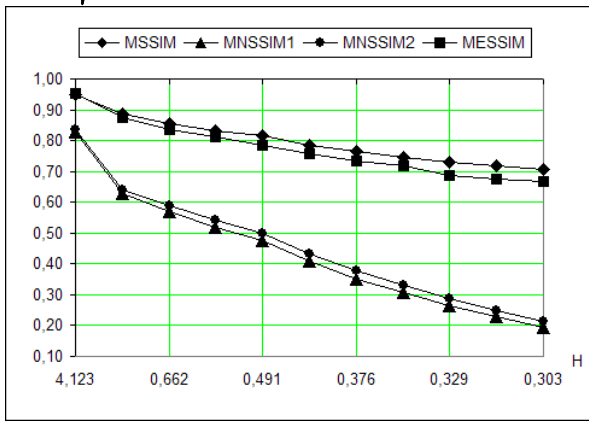


Рис. 3. Зависимость критериев *MSSIM*, *MNSSIM1*, *MNSSIM2*, *MESSIM* от энтропии.

Можно отметить, что модифицированные непараметрические критерии при малой блочности дают несколько заниженные значения качества, но при большом уровне блочности (высокой степени сжатия, или малой энтропии) более близки к зрительному восприятию человека по сравнению с критериями *MSSIM* и *MESSIM*.

Последний вывод иллюстрирует рис. 1-6), где представлено изображение «Лена», восстановленное после максимального сжатия с помощью JPEG.

Следует отметить также большой диапазон изменений критериев *MNSSIM1*, *MNSSIM2* при изменении степени сжатия (энтропии), что говорит о чувствительности этих критериев к блочным искажениям.

Исследование критериев при наличии гауссовых помех

При исследовании влияния гауссовых помех на качество изображения гауссов шум со среднеквадратическим отклонением σ добавлялся в каждую компоненту

цвета RGB. В качестве тестовых использовались изображения из базы изображений, предоставленных Laboratory for Image and Video Engineering (LIVE) университета в Остине, Техас. Из указанной базы данных были использованы и значения субъективной оценки качества изображений DMOS [3]. Для зашумленных гауссовым шумом изображений были рассчитаны значения критериев *MSSIM*, *MESSIM*, *MNSSIM1*, *MNSSIM2* и ранговые коэффициенты корреляции Спирмена между ними и значениями DMOS. Результаты исследований для изображения «Parrots» представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы, при гауссовом шуме значения и диапазон изменения критериев *MSSIM* и *MESSIM* выше, чем у критериев *MNSSIM1* и *MNSSIM2*. Все критерии сильно коррелируют с DMOS, причем *MSSIM* и *MESSIM* коррелируют несколько больше.

Исследование структурного подобию разных изображений

В ходе проведения исследований был поставлен вопрос, в какой степени рассматриваемые критерии отслеживают структурное подобие изображений. С этой целью критерии *MSSIM*, *MESSIM*, *MNSSIM1*, *MNSSIM2* были применены к совершенно разным изображениям. При этом выявилось еще одно преимущество непараметрических модификаций. При сравнении абсолютно разных изображений, имеющих одинаковые размеры, критерии *MSSIM* и *MESSIM* дают неоправданно большие значения, в то время как критерии *MNSSIM1* и *MNSSIM2* имеют значения, практически равные нулю. На рис. 4 в качестве примера представлены сравниваемые изображения и значения критериев *MSSIM*, *MESSIM*, *MNSSIM1* и *MNSSIM2*.

Таблица 1.

σ	DMOS	MSSIM	MESSIM	MNSSIM1	MNSSIM2
1,000	68,727	0,027	0,051	0,012	0,017
0,129	47,039	0,252	0,326	0,152	0,208
0,063	38,931	0,518	0,609	0,314	0,359
0,031	28,506	0,788	0,850	0,520	0,541
Коэффициент корреляции Спирмена		-0,955	-0,961	-0,929	0,921



Рис. 4. Сравнение двух изображений: «lighthouse» и «sailing 2». *MSSIM* = 0,339, *MESSIM* = 0,454, *MNSSIM1* = -0,004, *MNSSIM2* = -0,006.

Полученные данные свидетельствуют о том, что непараметрические модификации более соответствуют названию критерия структурного подобия и, может быть, они могли бы найти свое применение для определения смены сюжета в видеопоследовательности

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что предложенные непараметрические модификации критерия структурного подобия могут быть использованы для оценки качества изображений при импульсном шуме, при гауссовом шуме, при большой блочности изображений и, возможно, при обнаружении полной смены кадра в видеопоследовательности.

Авторы выражают благодарность доктору Х. Шейху за предоставленную базу данных, позволившую провести экспериментальные исследования предложенных критериев.

Литература

1. Z. Wang and A.C. Bovik, "A universal image quality index," *Signal Processing Letters, IEEE*, vol.9, no.3pp.81-84, Mar 2002.
2. Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, E. Simoncelli, "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity", *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 13, №4, 2004, 600-612.

3. H.R. Sheikh, M.F. Sabir and A.C. Bovik, "A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms", *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 11, pp. 3440-3451, Nov. 2006.
4. G-H Chen, C-L Yang, L-M Po, S-L XIE, "Edge-based Structural Similarity for Image Quality Assessment", *Proceedings of the 2006 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2006)*, Vol 2, Toulouse, France, May 2006, pp 933-936.
5. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.- 816 с.
6. Радченко Ю.С. Сравнительный алгоритм сжатия изображений на основе дискретного косинусного (DCT) и чебышевского (GDCT) преобразований / Ю.С. Радченко, Т.А. Радченко, А.В. Булыгин // *Цифровая обработка сигналов*, 2006.- №4.-С. 15-19.
7. Радченко Ю.С. Метод сжатия и восстановления изображений на основе быстрых чебышевских преобразований / Ю.С. Радченко // *Автометрия*. - 2002. - № 4. - С. 32-40.
8. Радченко Ю.С. Модификация индекса структурного подобия (MSSIM) на основе методов непараметрической статистики / Ю.С. Радченко, Т.А. Радченко, А.В. Булыгин // *Труды X международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение» DSPA'2008*, Москва, 2008. – т. II, с. 505-508.

Уважаемые коллеги!

Предлагаем вам принять участие в формировании тематических выпусков журнала «Цифровая обработка сигналов» и размещению рекламы продукции (услуг) Вашей фирмы на его страницах. В случае положительного решения просим представить в редакцию журнала Ваши предложения по плановому размещению информационных материалов и макет рекламы продукции (услуг) Вашей фирмы с указанием желаемого её месторасположения: обложка (2-я, 3-я или 4-я стр.), цветная внутренняя полоса (объем полосы).

В 2009 году планируется выпуск 4-х номеров журнала (тираж до 1000 экз.). Журнал распространяется по подписке через агентство «Роспечать» в России, СНГ и странах Балтии (индекс 82185), а также на Выставках: «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA'2009», «ExpoElectronica», «ChipEXPO», «СвязьЭкспокомм», «ЭЛЕКТРОНИКА: компоненты, оборудование, технологии» (г. Москва) и др.

Размещение рекламы Вашей фирмы на страницах журнала «Цифровая обработка сигналов» на плановой основе (не менее 2-х полных или 4-х половинчатых рекламных полос в течение года) предоставит Вам следующие возможности и права:

1. Первоочередное право расположения рекламных материалов на всех обложках (кроме 1-й) и страницах журнала.
2. Публикация представленных Вами рабочих (рекламных) материалов (статей) объемом до 6 полос в каждом очередном номере (в счет оплаченной рекламы).
3. Установка баннера Вашего сайта (или логотипа вашей организации) на 1-й странице сайта журнала «Цифровая обработка сигналов» (www.dsra.ru) в течение всего года, что привлечет внимание к продукции (услугам) Вашей фирмы новых участников на рынке DSP-технологий (ежедневно фиксируется до 100 и более посещений сайта www.dsra.ru).
4. Предоставление до 10 экз. очередного выпуска журнала.

Ориентировочная стоимость рекламных услуг:

- 4-я (внешняя) страница цветной обложки - 20 тысяч рублей.
- 2-я и 3-я (внутренние) страницы цветной обложки - 13 тысяч рублей.
- 1\2 цветной внутренней полосы - 7 тысяч рублей.
- 1\2 черно-белой внутренней полосы – 1 тысяча рублей.

Ждем Ваших предложений.

С наилучшими пожеланиями, зам. главного редактора
д.т.н., профессор Витязев Владимир Викторович

Предложения прошу направлять по адресу: E-mail: tor@rgta.ryazan.ru или info@dsra.ru