

С.А. КУЦЕНКО, С.Р. НЕМЦОВА, А.С. МКРТУМОВ, О.В. ЦВЕТКОВ
**ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ИХ ЦИФРОВОМ СЖАТИИ**

Куценко С.А., Немцова С.Р., Мкртумов А.С., Цветков О.В. Теоретико-информационная характеристика качества изображений при их цифровом сжатии.

Аннотация. Рассматриваются существующие объективные и субъективные метрики оценки качества телевизионного изображения. Приводится теоретическое обоснование новой метрики качества цифровых изображений и экспериментальная оценка возможности использования показателя локальной энтропии для формирования объективных метрик оценки качества телевизионных изображений.

Ключевые слова: объективная метрика, субъективная метрика, качество телевизионного изображения, оценка качества, препроцессинг, энтропия, дефект изображения.

Kutsenko S.A., Nemtsova S.R., Mkrumov A.S., Tsvetkov O.V. Information-theoretical image quality metric in digital image compression.

Abstract. Existing objective and subjective TV image quality assessment metrics are considered. New metrics of digital image quality test are founded. Local entropy approach to form objective TV image quality assessment metrics is demonstrated experimentally.

Keywords: objective metrics, subjective metrics, TV image quality, quality assessment, pre-processing, entropy, artefact.

1. Введение. Попытка объективными метриками оценить качество телевизионного изображения, подверженного искажениям в процессе формирования программ на этапе оцифровки и сжатия, в процессе передачи через телекоммуникационные сети, а также дальнейшего декодирования и воспроизведения, сформировала к настоящему времени набор объективных параметров, в той или иной степени характеризующих качество видеосигнала. Однако, такие параметры как PSNR, SNR и RMSE просты в вычислениях, но имеют низкую точность, а метрики PQR, VQM, MPQM более адекватны субъективному восприятию при реальном тестировании, но пока относятся к затратным методам, малоприменимым для оценки качества видео в реальном масштабе времени, когда необходимо анализировать одновременно большое количество потоков. Поэтому поиск объективных метрик оценки качества телевизионных изображений сохраняет свою актуальность и их состоятельность должна подтверждаться степенью корреляции с субъективными оценками этих изображений.

Субъективная оценка качества видеоизображений — это сложная процедура, которая может быть проведена лишь в определенных лабораторных условиях. основополагающая рекомендация по субъективной оценке телевизионных изображений [1], изданная в первой редак-

ции в 1974 году и к настоящему времени действующая в виде 13-й редакции как Рекомендация МСЭ-R BT.500-13, предлагает способы, учитывающие особенности человеческого восприятия. В этой рекомендации оговорены:

- общие условия просмотра;
- требования к мониторам;
- выбор испытательных сигналов;
- требования к экспертам;
- нормы сеанса испытаний;
- инструкции для оценки;
- представление результатов;
- выбор методов испытаний.

Основными методами испытаний являются:

- Метод с одним источником SSCQE (Single Stimulus Continuous Quality Evaluation) — непрерывная оценка качества в ходе единственного просмотра.
- Метод с двумя источниками и с использованием шкалы искажений DSIS (Double Stimulus Impairment Scale) — наблюдателю предлагается сравнить две видеопоследовательности — искаженную и оригинальную.
- Метод двух источников с непрерывной шкалой качества DSCQS (Double Stimulus Continuous Quality Scale) — качество изображений оценивается так же, как в методике DSIS. Отличительной особенностью является то, что видеоролик воспроизводится в псевдослучайном порядке, а затем повторяется. Затем все оценки усредняются и преобразуются в стандартную шкалу (от 0 до 100).

Таким образом, субъективная оценка качества видеоизображений представляет собой сложную процедуру, ее результаты являются опорной базой для подтверждения состоятельности и адекватности любой объективной метрики, но ее использование для решения текущих задач оценки качества поступающих программ ввиду большой трудоемкости практически исключено.

Ранее нами был предложен метод решения проблемы текущего контроля качества телевизионного изображения на основе препроцессинга изображений, позволяющего визуализировать дефекты цифрового сжатия и тем самым облегчить работу человека–оператора. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по оценке возможности обработки результатов визуализации де-

фектов с целью получения объективной метрики качества цифровых изображений.

2. Теоретическое обоснование новой метрики качества цифровых изображений. В основу упомянутой выше технологии препроцессинга цифровых изображений, имеющего целью визуализировать дефекты цифрового сжатия, положен теоретико-информационный анализ изображения. Рассмотрим известную формулу Шеннона для энтропии дискретного источника:

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log p_i. \quad (1)$$

Легко заметить [3], что энтропия источника представляет собой математическое ожидание величины:

$$H_i = -\log p_i. \quad (2)$$

Величина H_i (будем использовать для нее термин «локальная энтропия») характеризует степень неожиданности наступления i – го исхода, чем меньше его априорная вероятность, тем выше его локальная энтропия. Рассмотрим последовательность событий, генерируемых дискретным случайным источником: $L = \{e_i, i = 1 \dots \infty\}$.

Ей можно сопоставить числовую последовательность Q , сопоставив каждому событию его локальную энтропию:

$$q_i = H_i = -\log p(e_i). \quad (3)$$

Полученная последовательность является удобным средством для исследования динамики различных сложных систем по следующим причинам:

– она дает универсальное числовое описание для различных по своей природе источников (числовых, символьных и др.);

– ее легко анализировать, наблюдая статистику выбросов, появление которых с некоторой повышенной интенсивностью говорит об изменениях в характеристиках системы;

– с ее помощью легко визуализировать изменения в динамике сложных систем, отображая графически величину q_i .

Последнее свойство было использовано нами для визуализации дефектов цифрового сжатия [4, 5]. Для преобразования изображений в форму последовательности событий выполняются следующие действия:

– для каждой пары соседних отсчетов в строке вычисляется разность значений яркости (цветоразностные компоненты отбрасываются);

– элементарным событием считается конкретное сочетание значе-

ний двух соседних разностей, вероятность его оценивается подсчетом количества вхождений этого сочетания по всему изображению и делением на общее количество рассмотренных пар пикселей.

Затем формируется выходное изображение путем замены каждого отсчета величиной, вычисляемой по формуле:

$$Y(i, j) = k * [-\log p(e_{ij})] + C. \quad (4)$$

Изображение $Y(i, j)$ предъявляется оператору, по нему легко определить наличие дефектов цифрового сжатия. На рис. 1 видно, что если исходные изображения малы, потери качества оценить не удастся. Карты локальной энтропии при тех же размерах позволяют подготовленному оператору визуально оценить степень деградации изображения и определить его пригодность для вывода на большой экран.



Рис. 1. Визуализация дефектов цифрового сжатия: а) изображение высокого качества, б) карта его локальной энтропии, в) изображение пониженного качества, г) карта его локальной энтропии.

Эксперименты с визуализацией дефектов на изображениях позволили обнаружить интересную закономерность: для изображений более высокого качества карты локальной энтропии в целом светлее, чем для изображений с пониженным качеством. Яркость карты определяется средним значением сигнала $Y(i, j)$, а, следовательно, средним значением локальной энтропии по кадру. В соответствии с определением локальной энтропии (2) ее среднее значение является оценкой энтропии источника (1). Таким образом, обнаруженная закономерность означает, что изображения более высокого качества имеют в среднем более высокую энтропию, чем изображения низкого качества. Этот результат соответствует ранее опубликованным данным [6], снижение качества изображения при его кодировании сопровождается и снижением его энтропии, однако получение эффективных оценок энтропии изображе-

ний для построения объективных метрик качества остается предметом исследований и разработок, так что обнаруженный феномен представляет практический интерес с этой точки зрения.

3. Экспериментальная оценка возможности использования показателя локальной энтропии для формирования объективных метрик оценки качества телевизионных изображений. Для оценки практической значимости обнаруженной закономерности были проведены эксперименты с изображениями различного уровня качества. Как уже было сказано, субъективная оценка качества видеоизображений представляет собой процедуру очень большой трудоемкости, но именно ее результаты являются опорной базой для подтверждения состоятельности и адекватности любой объективной метрики. Формирование такой базы для свободного использования разработчиками объективных метрик (с условием ссылки на источник [2]) было проведено американской лабораторией LIVE (Laboratory for Image and Video Engineering) Техасского университета в г. Остин. В данной работе используется часть этой базы для сопоставления с результатами вновь предлагаемой метрики. Использованная часть (папка “jp2k” библиотеки “databaserelease2”) содержит группу из 227 изображений, включая исходные, полученных из 29 статических изображений обработкой кодеком JPEG2000 с различной степенью сжатия; для каждого из них в прилагаемом файле содержатся результаты оценки качества изображения по 100-балльной шкале Difference Mean Opinion Score (DMOS). Для исходных изображений величина $dmos = 0$.

Значения оценки качества предлагаемой метрикой были вначале получены для произвольной выборки из 30 первых по номеру изображений. Результаты сопоставления полученных значений $\bar{Y}_{ср}$ с величинами $(100 - dmos)$, характеризующими субъективную оценку качества, приведены на рис. 2 (для наглядности значения $\bar{Y}_{ср}$, находящиеся в диапазоне $0 \div 1$, подвергнуты общему линейному масштабированию по среднему уровню и приблизительно по размаху кривых).



Рис. 2. Значения субъективной и объективной оценки качества изображений. Коэффициент корреляции объективных и субъективных оценок — 0,74.

Далее такое сопоставление было проведено для 2-х групп изображений одного сюжета: monarch («бабочка») и womanhat («женская шляпка»). При сопоставлении данных максимальные значения (100 – dmos) и Y_{cp} по каждому сюжету нормировались к 1. Для изображений monarch на рис. 3 и рис. 4 показаны диаграмма значений (100 – dmos) и Y_{cp} (рис. 3) и зависимость $Y_{cp}=f(100 - dmos)$ (рис. 4).

Для группы изображений womanhat аналогичные зависимости показаны на рис. 5 и 6.

Таким образом, предложенный показатель качества изображения, вычисляемый путем усреднения яркости дифференциально-энтропийного представления изображения (4), демонстрирует достаточно высокий уровень корреляции с субъективными оценками.

Для сравнения приведем аналогичные данные для семейства популярных на сегодня метрик, используемых для тестирования кодеков (по данным [7]):

PSNR — пиковое отношение сигнала к шуму;

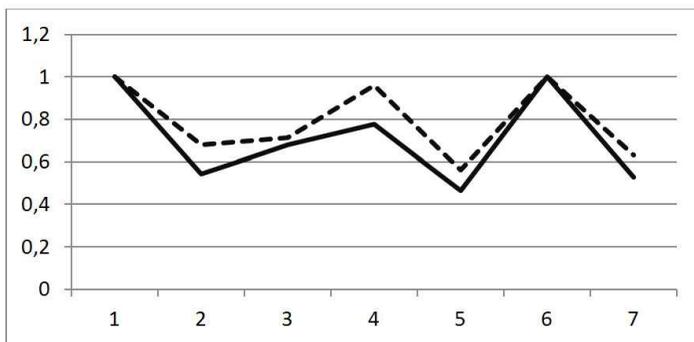
SSIM — индекс структурного сходства;

3-SSIM — индекс структурного сходства по трем областям: области границ, области текстур, области гладких поверхностей;

MS-SSIM — многомасштабный индекс структурного сходства,

основывается на измерении SSIM для нескольких уровней исходной пары видео и взвешенном суммировании результатов;

stSSIM — индекс структурного сходства с учетом временных искажений.



— нормированные значения (100 - dmos)
- - - Ycp

Рис. 3. Диаграмма нормированных значений (100 – dmos) и Ycp для группы изображений monarch.

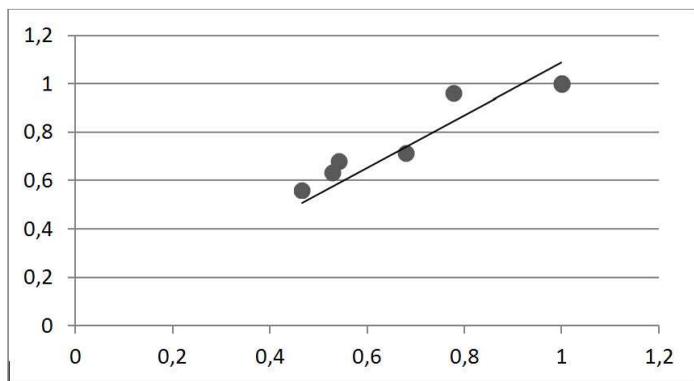


Рис. 4. Зависимость $Y_{cp} = f(100 - dmos)$ для группы изображений monarch. Коэффициент корреляции объективных и субъективных оценок 0,95.

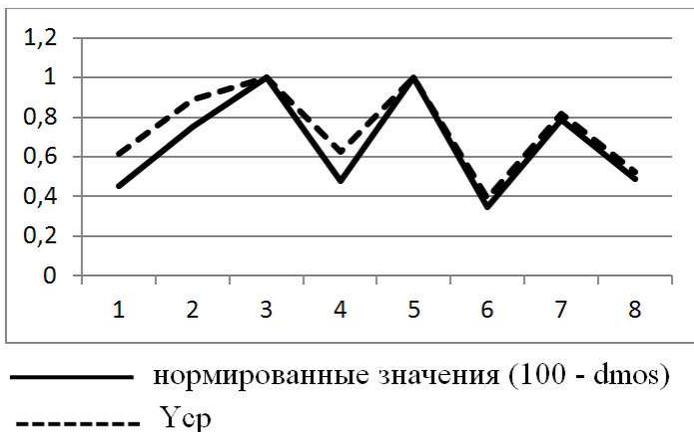


Рис. 5. Диаграмма нормированных значений (100 – dmos) (Ряд 1) и Y_{cp} (Ряд 2) для группы изображений womanhat.

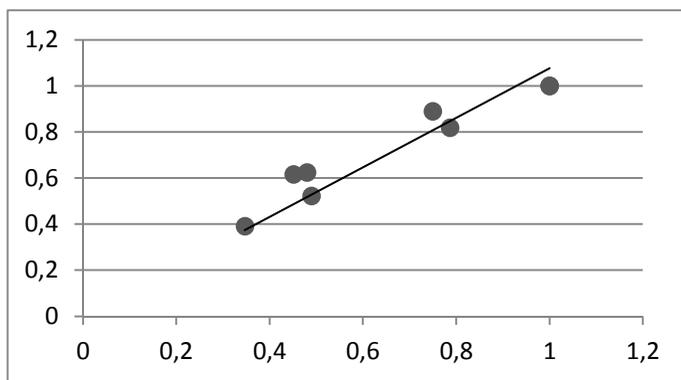


Рис. 6. Зависимость $Y_{cp} = f(100 - dmos)$ для группы изображений womanhat. Коэффициент корреляции объективных и субъективных оценок 0,97.

Приведенные на рис. 7 данные показывают, что предложенный нами показатель вполне способен конкурировать с используемыми метриками.

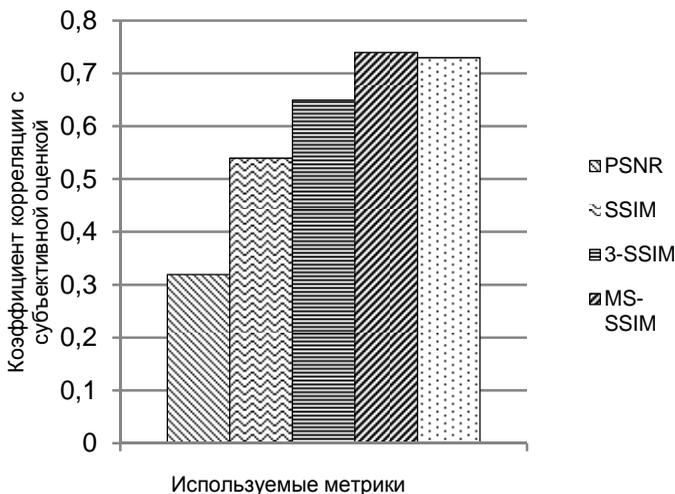


Рис. 7 Коэффициент линейной корреляции объективных метрик качества с субъективными оценками (по данным [7]).

Заклучение. Выполненные экспериментальные исследования показали, что предложенная теоретико-информационная характеристика изображения достаточно сильно коррелирована с субъективной оценкой потерь качества изображения при цифровом сжатии. Полученные результаты носят предварительный характер и дают основания для проведения дальнейших исследований по созданию новой теоретико-информационной метрики качества, обладающей следующими преимуществами:

- являясь нереферентной метрикой (применяемой в отсутствие опорного несжатого сигнала), предлагаемая метрика демонстрирует корреляцию с субъективными оценками на уровне лучших референтных метрик (таких, как MS-SSIM);

- предлагаемая метрика основана на очень простом в алгоритмическом плане показателе;

- используемая теоретико-информационная характеристика изображения по своей природе отличается от тех характеристик, которые положены в основу известных метрик, вследствие чего новая метрика будет эффективно дополнять имеющиеся при формировании комплексных показателей качества изображений после цифрового сжатия.

Литература

1. Рекомендация МСЭ-R ВТ.500-13(01/2012). Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures. — Электронный ресурс. — Доступ: <http://www.itu.int/pub/R-REC>
2. *Sheikh H.R., Wang Z., Cormack L., Bovik A.C.* LIVE Image Quality Assessment Database Release 2. — Электронный ресурс. — Доступ: <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>
3. *Kullback S.* Information theory and statistics. Gloucester: PeterSmith, 1978. 399 p.
4. *Цветков О.В.* Методы и модели энтропийной оптимизации систем обработки, хранения и передачи видеоданных. // Дисс. д.т.н. СПб.: СПИИРАН, 2011
5. *Куценко С.А.* Метод и программные средства визуализации дефектов цифрового сжатия для технических комплексов телевизионного вещания // Труды СПИИРАН, №4 (27), 2013, С. 66–72
6. *Цветков О.В.* Проблемы системной оптимизации цифрового телевизионного вещания: энтропийный подход // Труды СПИИРАН, №4 (27). 2013, С.48–65
7. MSU Quality Measurement Tool: Информация о метриках. — Электронный ресурс. — Доступ: www.compression.ru/video/quality_measure/info.html#startMSUQualityMeasurementtool

Куценко Светлана Анатольевна — соискатель, СПИИРАН; заместитель начальника отдела ФГУП «ГосНИИПП». Область научных интересов: инфокоммуникационные системы, обработка видеоданных. Число научных публикаций — 2. svetlana.a.kutsenko@mail.ru; СПИИРАН, 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)323-5139, факс +7(812)328-4450. Научный руководитель — В.В. Александров.

Kutsenko Svetlana Anatolievna — Ph.D. student, SPIIRAS; Deputy chief of department, GosNIIPP. Research interests: infocommunication systems, video data streams processing. The number of publications — 2. svetlana.a.kutsenko@mail.ru; SPIIRAS, 14-th Line V.O., 39, St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)323-5139, fax +7(812)328-4450. Scientific adviser — V.V. Alexandrov.

Немцова Светлана Рафаиловна — д.т.н.; профессор кафедры СиСМК ФГОБУ ВПО МТУСИ. Область научных интересов: экология телерадиовещания (технические аспекты), экологическая безопасность телерадиопрограмм. Число научных публикаций — более 50. mansurovo6@mail.ru; ФГОБУ ВПО МТУСИ: 111024, г. Москва, улица Aviамоторная, 8а, РФ.

Nemtsova Svetlana Rafailovna — Ph.D., Dc.Sci.; professor, SISMK in FGOBU MTUSI. Research interests: broadcasting environment (technical aspects), broadcast program environmental safety. The number of publications — more than 50. mansurovo6@mail.ru; FGOBU VPO MTUSI: 111024, Moscow, Aviamotornayast., 8a, RF.

Мкртумов Александр Сергеевич — д.т.н.; генеральный директор НИЦРИТ. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, контроль технического качества телерадиопрограмм. Число научных публикаций — более 70. nitsrit@mail.ru; НИЦРИТ, 125057, а/я 7, г. Москва, улица Песчаная, 13.

Mkrumov Aleksandr Sergeevich — Ph.D., Dc.Sci.; executive director of NITSRIT. Research interests: data computing centers, technical quality control of broadcast programs. The

number of publications — more than 70, nitsrit@mail.ru; NITSRIT, 125057, p/o box 7, Moscow, Peschanaya, 13, RF.

Цветков Олег Викторович — д.т.н.; профессор кафедры БТС СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: теория информации, инфокоммуникационные системы, оптимизация цифровых систем. Число научных публикаций — более 30. ovtv@bk.ru; СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, РФ.

Tsvetkov Oleg Viktorovich — Ph.D., Dc.Sci.; professor of Biotechnical Systems Department of the Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI". Research interests: information theory, infocommunication systems, digital systems optimization. The number of publications — more than 40. ovtv@bk.ru; LETI, 5, Professora Popova street, St. Petersburg, 197376, Russia.

Рекомендовано лабораторией автоматизации научных исследований СПИИРАН, заведующий лабораторией Александров В.В., д.т.н., проф.
Статья поступила в редакцию 16.09.2013.

РЕФЕРАТ

Куценко С.А., Немцова С.Р., Мкртумов А.С., Цветков О.В. Теоретико-информационная характеристика качества изображений при их цифровом сжатии.

Попытка объективными метриками оценить качество телевизионного изображения сформировала к настоящему времени набор объективных параметров, в той или иной степени характеризующих качество видеосигнала. Одни из этих параметров просты в вычислениях, но имеют низкую точность. Другие относятся к затратным методам, малопригодным для оценки качества видео в реальном масштабе времени. Субъективная же оценка качества видеоизображений представляет собой сложную процедуру и ее использование для решения текущих задач оценки качества поступающих программ ввиду большой трудоемкости практически исключено.

В данной работе представлены теоретическое обоснование новой метрики качества цифровых изображений и экспериментальная оценка возможности использования показателя локальной энтропии для формирования объективных метрик оценки качества телевизионных изображений.

Показано, что предложенная теоретико-информационная характеристика изображения, являясь нереферентной, демонстрирует корреляцию с субъективными оценками на уровне лучших референтных метрик, она основана на единственном показателе и очень проста в алгоритмическом плане.

SUMMARY

Kutsenko S.A., Nemtsova S.R., Mkrumov A.S., Tsvetkov O.V. **Information-theoretical image quality metrics in digital image compression.**

Efforts in evaluating TV image quality with a number of objective metrics have led to set of objective parameters, which characterize video signal quality. Some of these parameters are simple in computations, but have low accuracy. The other ones are highly-cost methods of no use in real-time video signal quality assessment. Subjective assessment of video image quality is a complex procedure and its usability in solving actual tasks is practically excluded due to heavy workload

In this work new metrics of digital image quality assessment is founded. Local entropy approach to form objective metrics of TV image quality assessment is subjected to experimental evaluation.

It's demonstrated that suggested non-reference information-theoretical metric of image exhibits correlation with subjective estimates at the level of best reference metrics It is based upon the single parameter and algorithmically simple.