

УДК 621.397: 004.932

ИССЛЕДОВАНИЕ СООТВЕТСТВИЯ ИНТЕГРАЛЬНО-МУЛЬТИПЛИКАТИВНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭКСПЕРТНЫМ ОЦЕНКАМ КАЧЕСТВА И ИНФОРМАТИВНОСТИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Сычев А.С., ассистент кафедры РТС Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: sichev.a.s@rsreu.ru

RESEARCH OF COMPLIANCE THE INTEGRATED-MULTIPLICATIVE QUALITY INDEX OF DIGITAL IMAGES AND QUALITY MEAN OPINION SCORES

Sychev A.S.

The paper considers the integral multiplicative indicator of quality and informativeness of digital images, designed to ensure the formed quality assessments monotonically increase with increasing subjective assessment of quality by an operator or expert. The correlation of the index values with the expert quality assessments has been proved by the numerical value of Spearman rank correlation coefficient equal to 0.26, which is 2.17 times higher than the analogue value calculated for the known standardless integral quality index. The prospects of using automated no-reference estimation of image quality in enhanced vision systems are shown.

Key words: digital image processing, image quality, expert opinions score, Spearman's rank correlation coefficient, multi-spectral vision systems, enhanced vision system, image enhancement.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, качество изображений, экспертные оценки, коэффициент ранговой корреляции Спирмена, мультиспектральные системы технического зрения, системы улучшенного видения, улучшение изображений.

Введение

Снижение видимости по причине плохих погодных условий, пылевых бурь, задымления при проведении поисково-спасательных работ с использованием беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов, а также робототехнических комплексов, представляет опасность для оборудования и жизни людей. Системы улучшенного видения (СУВ), являющиеся подмножеством систем технического зрения (СТЗ), призваны компенсировать приводящее к ограничению видимости негативное влияние деструктивных факторов восприятия изображений. Конечной целью функционирования СТЗ является повышение ситуационной осведомленности пилота либо оператора. Развитие СУВ идёт по нескольким направлениям, включая алгоритмы улучшения изображений и использование оптических сенсоров различных спектральных диапазонов. СУВ, включающие в себя датчики нескольких диапазонов оптического излучения, называют мультиспектральными (МСУВ или МСТЗ).

МСТЗ использует комплексирование информации для объединения информативных признаков наблюдаемой сцены, присутствующих на изображениях, полученных в различных спектральных диапазонах. Однако при снижении информативности одного из исходных кадров под влиянием шума, затенения, фоновой засветки результат комплексирования в большинстве случаев также демонстрирует снижение информативности. Поэтому целью работы является разработка численного показателя качества цифровых изображений, позволяющего выполнять обоснованный выбор комплекслируемых изображе-

Статья рассматривает интегрально-мультипликативный показатель качества и информативности цифровых изображений, разработанный с целью обеспечения монотонно возрастающей зависимости формируемых оценок качества с увеличением субъективной оценки качества оператором либо экспертом. Корреляция значений показателя с экспертными оценками качества подтверждена численным значением коэффициента ранговой корреляции Спирмена, равным 0,26, что в 2,17 раза больше аналогичного показателя, рассчитанного для известного безэталонного интегрального показателя качества. Показаны перспективы использования автоматической безэталонной оценки качества изображений в системах улучшенного видения.

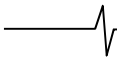
ний из полученных с нескольких сенсоров МСТЗ. Это требует наличия численного критерия для оценки эффективности работы различных показателей качества для их сравнения между собой.

Показатели качества и информативности цифровых изображений

Интегральный показатель качества (ИПК) [1] рассчитывают исходя из значений нормированных средней яркости L_n , среднеквадратического отклонения (СКО) σ_n , глобального контраста K_n , количества информационных уровней гистограммы N_n и энтропии ε_n :

$$Q_{\text{ипк}} = 0,33L_n + 0,27\sigma_n + 0,2K_n + 0,13N_n + 0,07\varepsilon_n. \quad (1)$$

В [2] показано, что для изображения, представляющего собой белый гауссовский шум с математическим ожиданием 128, ИПК стремится к единичному значению с ростом СКО шума от нулевого значения до 50. Таким образом, изображение, не содержащее никаких сюжетных объектов, имеет стремящееся к максимально возможному значению показателя качества, что принципиально не соответствует субъективному восприятию. В этой связи в [2] предложен интегрально-мультипликативный показатель качества (ИМПК), при формировании



оценки учитывающий отношение сигнал-шум и локальный контраст изображения:

$$Q_{\text{ИМПК}} = L_Q (w_1 w(q) \sigma_{\text{ВЧн}}^* + w_2 K_{\text{локВЧ}}^* + w_3 K_{\text{локНЧ}}^*), \quad (2)$$

где L_Q – нормированная трапецеидальная функция средняя яркость; $\sigma_{\text{ВЧн}}^*$ – нормированное к значению 50 СКО сигнальной составляющей изображения; $w(q) = 1 - \exp(-0,2q^2)$ – сигмоидальная функция отношения сигнал-шум q ; $K_{\text{локНЧ}}^*$, $K_{\text{локВЧ}}^*$ – средние локальные контрасты соответственно низкочастотной и высокочастотной составляющих.

Набор изображений TID2013

Для оценки пертинентности оценок качества, формируемых в соответствии с выражениями (1) и (2), необходимо сопоставить их значения со значениями субъективных оценок качества изображений, полученных в соответствии с методиками экспертных оценок. Известны датасеты (наборы) изображений, распространяемые

вместе с наборами экспертных оценок качества: JPEG2000 [3] и TID2013 [4].

TID2013 [4] – набор из трёх тысяч изображений, сформированных из 25-ти эталонных (рис. 1) посредством применения к ним искажений одного из 24-х видов с одним из 5-ти возможных уровней интенсивности воздействия по шкале «1...5», где значению «1» соответствует минимальная интенсивность искажающего воздействия, а значению «5» – максимальная. Для каждого n -го изображения приведены экспертная оценка качества Q_{MOSn} (от англ. MOS – «*mean opinion score*», средний рейтинг экспертного мнения), полученная усреднением по 985 экспериментам, и СКО данной оценки.

Все 24 вида искажений, исследуемых авторами [5], моделируют следующие типовые этапы работы с изображениями, встречающиеся в различных прикладных областях:

– дискретизация и квантование яркости пикселя матрицей цифровой камеры;

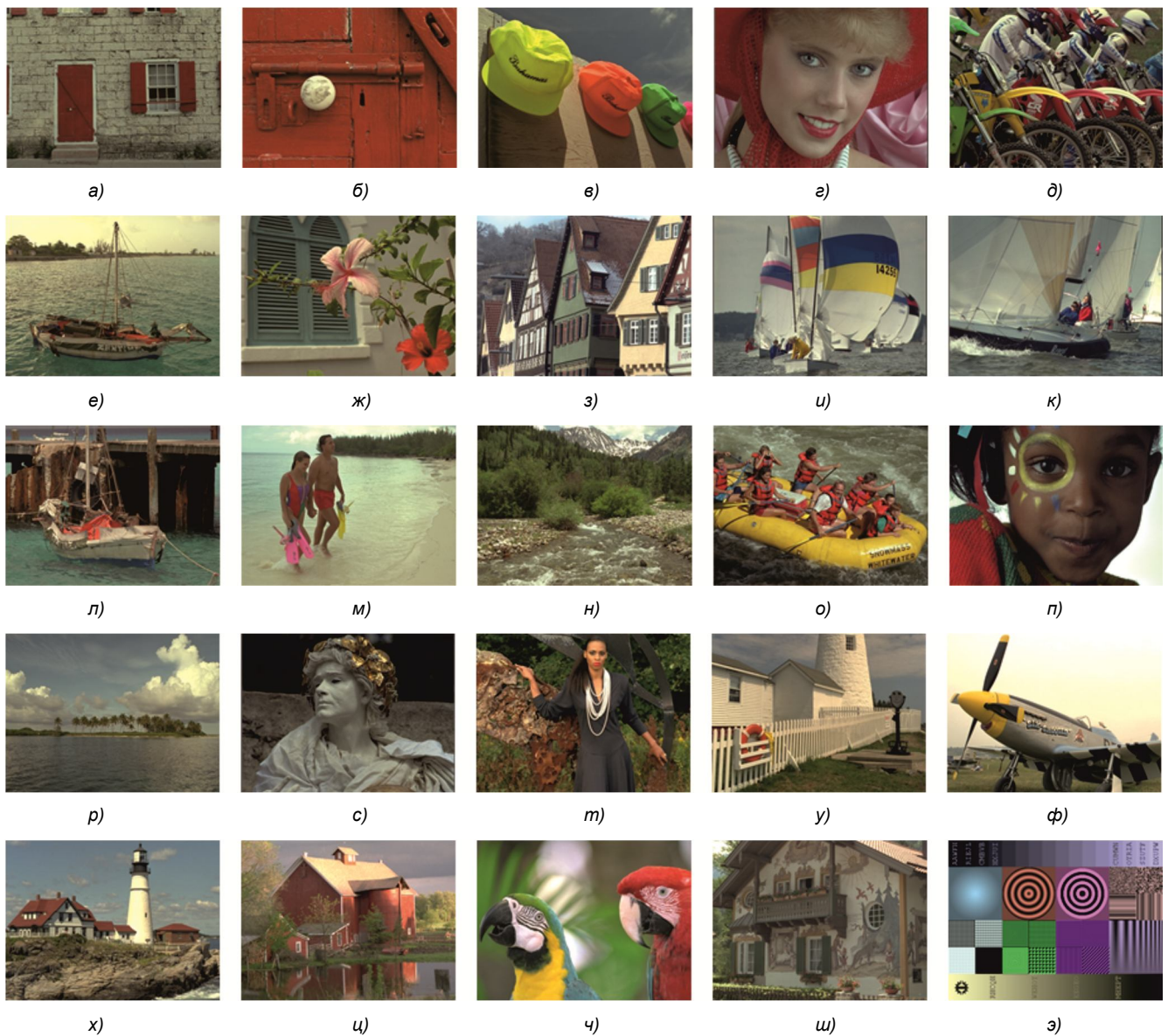


Рис. 1. Эталонные изображения из датасета TID2013 [4]

- фиксация цифрового изображения программным обеспечением камеры;
- цифровая фотография;
- передача данных;
- гамма-коррекция;
- фильтрация для подавления шумов;
- заполнение пустых полей изображения;
- наложение цифровых водяных знаков;
- сжатие, в том числе с использованием прореживающей децимации и дискретного косинусного преобразования (отдельно рассмотрено влияние сжатия JPEG и JPEG2000).

Датасет содержит изображения, полученные с применением следующих искажений:

- 1-2) аддитивный гауссовский шум, в том числе более мощный в цветовых компонентах, чем в компоненте яркости;
- 3) пространственно коррелированный шум;
- 4-5) маскирующий и высокочастотный шум, присутствующие при сжатии изображений и встраивании отслеживающих водяных знаков;

- 6) импульсный шум;
- 7-8) шум квантования и гауссово размытие, характерные для регистрации изображения матрицей камеры;
- 9) артефакты, возникающие при фильтрации изображения от шума;
- 10-13) потеря пространственного разрешения и артефакты, как результат использования кодеков JPEG и JPEG2000, а также ошибок при передаче кодированных изображений;
- 14) коррелированный структурный шум;
- 15) локальные блочные искажения различной интенсивности;
- 16-18) изменение средней яркости (сдвиг математического ожидания), контраста, насыщенности цвета, характерные для специфических условий фиксации изображения;
- 19) мультипликативный гауссовский шум;
- 20) комфортный шум, используемый при кодировании изображений;
- 21) сжатие с потерями, применённое к зашумлённому изображению;

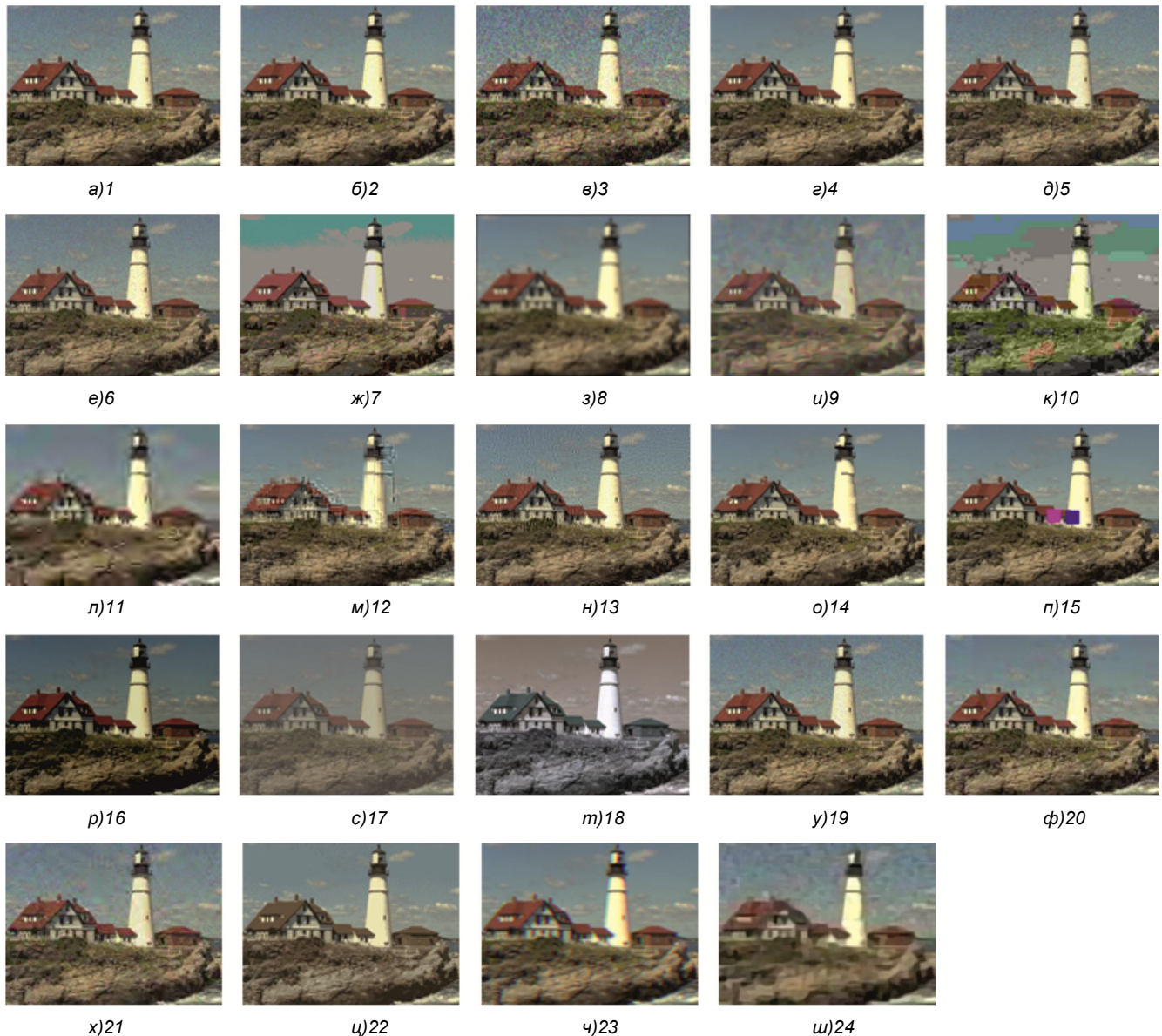


Рис. 2. Изображение №21 (рис. 1, х), искажённое с использованием 24-х различных алгоритмов

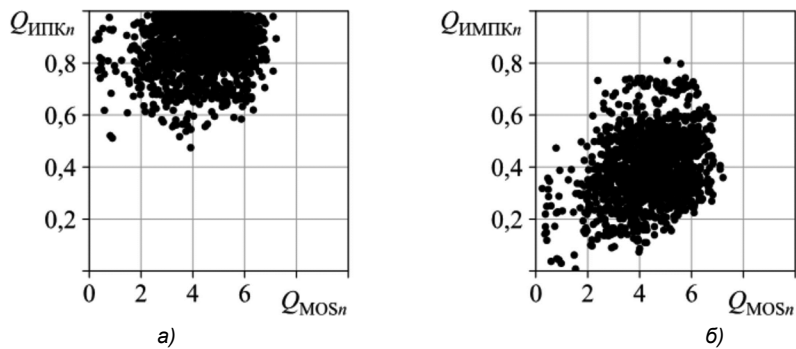


Рис. 3. Соответствие значений интегрального показателя качества (а)

и интегрально-мультипликативного показателя качества (б) значениям математического ожидания экспертных оценок

22) квантование сигнала цвета со сглаживанием;

23) хроматические аберрации;

24) сужение пространственной полосы частот, снижение локального контраста яркости.

Эффект ухудшения визуального качества исходных кадров изображения при максимальной («5 из 5») интенсивности искажений каждого вида иллюстрирует рис. 2. На нём приведены примеры изменения изображения № 21 из базы TID2013 (рис. 1, х) для случаев действия одного из 24-х перечисленных выше деструктивных факторов.

Рассматриваемые искажения изображений охватывают множество прикладных областей. Далеко не все они известны как деструктивные факторы восприятия изображений в обзорных МСТЗ. Так, учёт следующих факторов не входит в круг задач, для решения которых необходимо применение показателя качества изображений, предназначенного для использования в обзорных МСТЗ:

– ухудшение качества при кодировании изображений кодеками JPEG и JPEG2000 (пп. 10-13);

– артефакты, вызванные искажениями цвета (пп. 2, 18, 22);

– маскирующий (п. 4), высокочастотный (п. 5) и комфортный (п. 20) шумы, возникающие, как артефакты сжатия изображений, а также накладываемые с целью сокрытия отслеживающего водяного знака;

– структурный шум (п. 14), устранимый в МСТЗ на этапе предварительной обработки.

На основании вышеизложенного сопоставление значений экспертных оценок качества изображений со значениями ИПК (1) и ИМК (2) будет основано на изображениях, визуальное качество которых ухудшено действием факторов 1, 3, 6-9, 16-17, 19, 21, 23-24. Блочные искажения (п. 15, рис. 2 п) исключены из дальнейшего исследования ввиду низкой правдоподобности имитационного моделирования.

Кроме того, изображение № 25 (рис. 1, э) не является фотографией, а представляет собой созданное в графическом редакторе изображение, и потому не будет использовано в эксперименте.

Оценка корреляции значений интегрально-мультипликативного показателя качества изображений с экспертными оценками качества

Целью разработки комплексного показателя качества цифровых изображений является функция, обес-

печаивающая монотонно возрастающую зависимость формируемых значений с увеличением экспертных оценок. Оценить монотонность полученной зависимости позволяет выборочный коэффициент ранговой корреляции Спирмена r_B [6], применение которого с аналогичной целью известно по работам [5, 7, 8].

На графике (рис. 3, а) каждая точка соответствует изображению из базы TID2013 [4] и показана в координатах $(Q_{MOS_n}; Q_{ИПК_n})$ – его экспертной и автоматической оценок качества соответственно, где n – номер изображения. Коэффициент Спирмена для данной выборки $r_{B\text{ MOS-ИПК}} = 0,12$, что свидетельствует о низкой корреляции показателей. Таким образом, значения ИПК слабо коррелируют со значениями экспертных оценок качества, что говорит о нерациональности его применения в качестве численного критерия для задачи автоматического выбора комплексированных изображений в МСТЗ.

На рис. 3 б аналогичная зависимость приведена для значений экспертных оценок и значений ИМК: $(Q_{MOS_n}; Q_{ИМК_n})$. Коэффициент корреляции Спирмена в данном случае равен $r_{B\text{ MOS-ИМК}} = 0,26$. Низкая корреляция (по сравнению с «идеальным» значением, равным 1) объяснима тем, что экспертные оценки качества получены для представленных в датасете «TID2013» цветных изображений, тогда как ИМК оперирует полутонными.

Таким образом, численные значения интегрально-мультипликативного показателя качества коррелируют с экспертными оценками в 2,17 раза лучше, чем значения интегрального показателя качества. Это означает, что использование ИМК в целях выбора изображений различных каналов МСТЗ, а также алгоритма их комплексирования, предпочтительнее, чем использование ИПК.

Оценка результата улучшения изображений с использованием интегрально-мультипликативного показателя качества

Продemonстрируем перспективы использования ИМК на примере изображения с рис. 4 а. Его гистограмма $h(L)$ показана на рис. 4 в. Изображение малоинформативно по причине низких математического ожидания и контраста. Для увеличения динамического диапазона и контраста применим гамма-коррекцию. Показатель γ рассчитан адаптивно: по показанным на рис. 4 в вертикальными курсорами значениям $L_{0,5}$, L_0 и L_1 – медиане и квантилям

по уровням 0,001 и 0,999 распределения яркости исходного изображения соответственно:

$$\gamma = \frac{\ln(0,5)}{\ln\left(\frac{L_{0,5} - L_0}{L_1 - L_0}\right)}$$

Значения яркости пикселей результирующего изображения рассчитаем по значениям яркости пикселей исходного изображения в соответствии с выражением

$$L_\gamma(L) = clip_0^{255} \left(256 \cdot clip_0^1 \left(\frac{L - L_0}{L_1 - L_0} \right)^\gamma \right),$$

где $clip_a^b(x)$ – функция ограничения значения x крайними точками на интервале $[a; b]$. Функция $L_\gamma(L)$ преобразования для гамма-коррекции приведена пунктиром на рис. 4 в относительно правой оси системы коор-

динат. Описанная методика обеспечивает диапазон значений яркости результата преобразования $[0; 255]$, а также равенство медианы его яркости значению 128, показанному на рис. 4 в горизонтальным курсором, что комфортно для восприятия субъективным наблюдателем. Результирующее изображение и его гистограмма $h(L_\gamma)$, показанные на рис. 4 б, г, демонстрируют высокий контраст и большое количество полутонов, что упрощает визуальное выделение зданий в левой нижней части кадра, а также линии горизонта. Выявленная изрезанность гистограммы после гамма-коррекции вызвана малым числом уровней яркости исходного изображения.

В табл. 1 приведены численные значения $Q_{ИМПК}$ (2), а также частных показателей качества, используемых при расчёте.

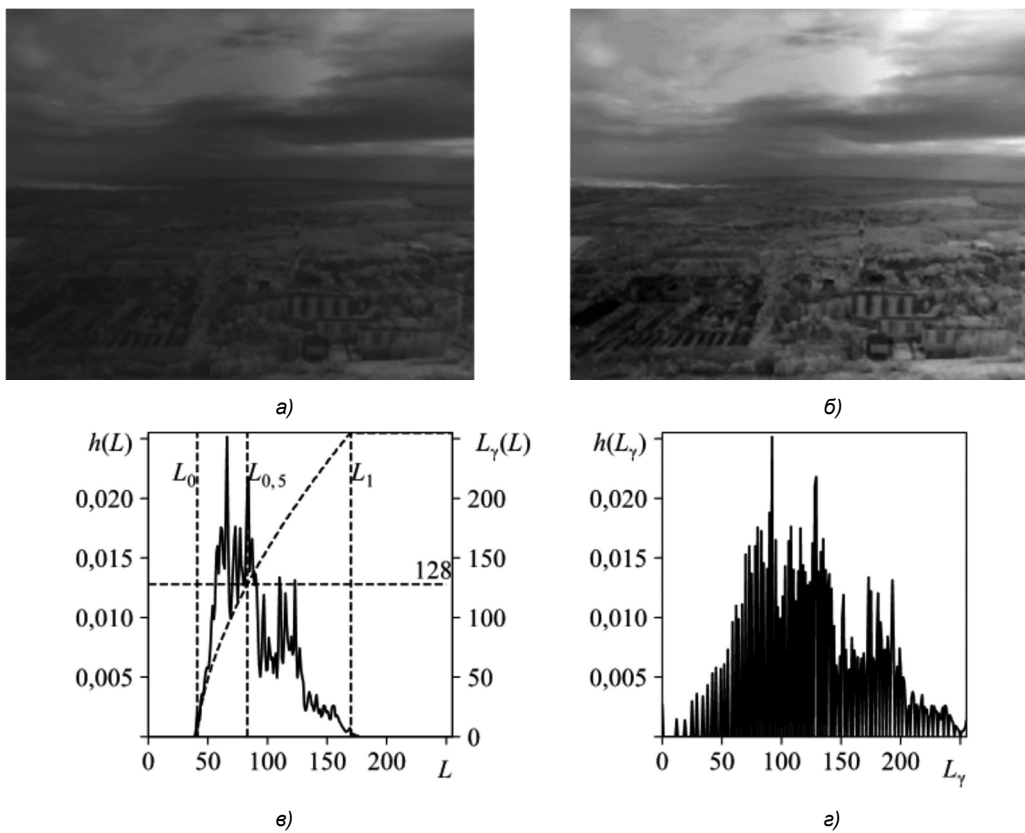
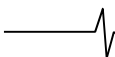


Рис. 4. Исходное изображение (а), изображение после применения гамма коррекции (б), гистограммы изображений соответственно (в, г)

Таблица 1. Показатели качества изображений с рис. 4

	Рис. 4 а	Рис. 4 б
Нормированная средняя яркость L_Q	0,788	1,000
Нормированное СКО сигнала $\sigma_{ВЧн}^*$	0,140	0,278
Отношение сигнал-шум q	9,749	16,821
Значение $w(q) = 1 - \exp(-0,2q^2)$	1,000	1,000
Скорректированная с учётом СКО шума оценка ВЧ контраста $K_{локВЧ}^*$	0,092	0,451
Скорректированная с учётом СКО шума оценка НЧ контраста $K_{локНЧ}^*$	0,124	0,146
Интегрально-мультипликативный показатель качества $Q_{ИМПК}$ (2)	0,098	0,288



Исходя из приведённых в табл. 1 значений очевидно, что использование адаптивной гамма-коррекции привело к увеличению нормированной средней яркости до 1 (функция нормировки имеет спадающую к краям динамического диапазона форму), увеличению СКО и контраста яркости изображения. Отметим также номинальное увеличение отношения сигнал-шум, чего невозможно достичь гамма-коррекцией. Это объяснимо смещением оценки СКО шума [2, 9] изображения, к которому применено нелинейное преобразование яркости.

ИМПК исходного изображения и результата применения гамма-коррекции равны соответственно 0,098 и 0,288. Таким образом, ИМПК численно демонстрирует полученный за счёт применения гамма-коррекции выигрыш в 2,9 раза по качеству и информативности изображения.

Заключение

Таким образом, результаты исследования демонстрируют, что численные значения интегрально-мультипликативного показателя качества коррелируют с экспертными оценками в 2,17 раз лучше, чем значения интегрального показателя качества (коэффициент ранговой корреляции Спирмена 0,26 по сравнению с 0,12). Сделан вывод, что использование ИМПК в целях повышения качества изображений в МСТЗ предпочтительнее, чем использование ИПК.

ИМПК перспективен для применения с целью обоснования необходимости улучшения изображений в системах технического зрения.

Литература

1. Гуров В.С. Обработка изображений в авиационных

системах технического зрения / В.С. Гуров, Г.Н. Колодько, Л.Н. Костяшкин и др.; под ред. Л.Н. Костяшкина и М.Б. Никифорова. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2016. 235 с.

2. Сычев А.С. Безэталонный интегрально-мультипликативный показатель качества цифровых полутонных изображений / А.С. Сычев и И.С. Холопов. Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 51-57.

3. Laboratory for Image & Video Engineering – The University of Texas at Austin [Электронный ресурс] URL: <https://live.ece.utexas.edu/research/quality/subjective.htm> (дата обращения: 10.03.2023)

4. Nikolay Ponomarenko homepage – TID2013 [Электронный ресурс] URL: <https://www.ponomarenko.info/tid2013.htm> (дата обращения: 10.03.2023)

5. Ponomarenko N. Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives / N. Ponomarenko, and L. Jin. Signal Processing: Image Communication. 2015, pp. 57-77.

6. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Юрайт, 2015. 479 с.

7. Wang Z. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity / Z. Wang, and A.C. Bovik. IEEE transactions on image processing. 2004. № 4, pp. 600-612.

8. Sheikh H.R. A Statistical Evaluation of Recent Full Reference Image Quality Assessment Algorithms / H.R. Sheikh, and M.F. Sabir. IEEE Transactions in Image Processing. 2006. №11, pp. 3441-3452.

9. Сычев А.С. Сравнительный анализ методик оценки мощности шума на цифровом изображении / А.С. Сычев и И.С. Холопов. Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2021), т. 2. 2021. 20392 с.

НОВЫЕ КНИГИ

Воскресенский Д.И., Добычина Е.М.

Цифровые антенные решетки: Монография. М.: Изд-во Радиотехника, 2020 г. 240 с.: ил.

Рассмотрен новый класс антенных систем – цифровых антенных решеток бортовых радиолокационных комплексов, позволяющих повысить энергетический потенциал за счет использования новых методов оптимизации режима работы высокоэффективных активных устройств и обеспечения высокой точности формирования амплитудно-фазового распределения с помощью предложенной системы автоматической калибровки. Представлены результаты экспериментальных исследований возможностей цифрового диаграммообразования и точностных характеристик калибровки макета цифровой решетки.

Для научных работников и инженеров, занимающихся исследованиями в области разработки, создания и применения цифровых решеток в современных радиоэлектронных системах. Может быть рекомендована в качестве учебного пособия студентам радиотехнических специальностей, а также аспирантам и магистрантам по направлениям «Радиотехника», «Радиофизика и электроника».

Уважаемые авторы !

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

Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:

- Текст – текстовый редактор Microsoft Word, формулы – в редакции **MathType**.
- 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, должность, ученая степень, телефоны, электронная почта); ключевыми словами на русском и английском языках; актом экспертизы (при наличии в вашей организации экспертной комиссии).

Требования к иллюстрациям:

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