

**ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ТОНОВОГО ОТОБРАЖЕНИЯ
ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОГО НАВЕДЕНИЯ**

**С. И. РУДИКОВ¹, д-р техн. наук, проф. В. Ю. ЦВЕТКОВ²,
д-р физ.-мат. наук, проф., академик Национальной академии наук Беларуси
А. П. ШКАДАРЕВИЧ¹**

(¹ УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО», Минск, Беларусь

**² Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск)**

Аннотация. Рассматривается задача количественной оценки качества тонового отображения инфракрасных изображений, обеспечивающего сжатие их динамического диапазона. Произведено сравнение эталонных показателей качества, учитывающих естественность и структурную схожесть, и безэталонных показателей, учитывающих детализацию изображения после преобразования.

Ключевые слова: тоновое отображение, сжатие динамического диапазона, показатели качества изображений, показатели качества тонового отображения, инфракрасные изображения.

Введение. Для воспроизведения инфракрасных (ИК) изображений с широким динамическим диапазоном (более 2^8 уровней яркости), на стандартных устройствах отображения с узким динамическим диапазоном (как правило, до 2^8 уровней яркости), осуществляется сжатие динамического диапазона ИК-изображений с помощью тонового отображения. Для ИК-изображений, используемых в системах оптического наведения, важно сохранение детализации и локального контраста при тоновом отображении, а также улучшение видимости в темных и светлых областях. Этим требованиям удовлетворяет метод адаптивного выравнивания гистограммы (Adaptive Histogram Equalization, АНЕ) [1]. Как и метод глобального выравнивания гистограммы (Histogram Equalization, HE) [2], АНЕ использует интегральную функцию распределения яркостей для формирования значений выравнивания. В отличие от HE, использующего глобальное значение выравнивания, формируемое на основе яркости всего изображения, АНЕ использует аппроксимацию локальных значений выравнивания ближайших блоков пикселей, на которые делится исходное изображение.

Для оценки эффективности методов тонового отображения широко используются показатели статистической естественности (Statistical Naturalness, SN) [3],

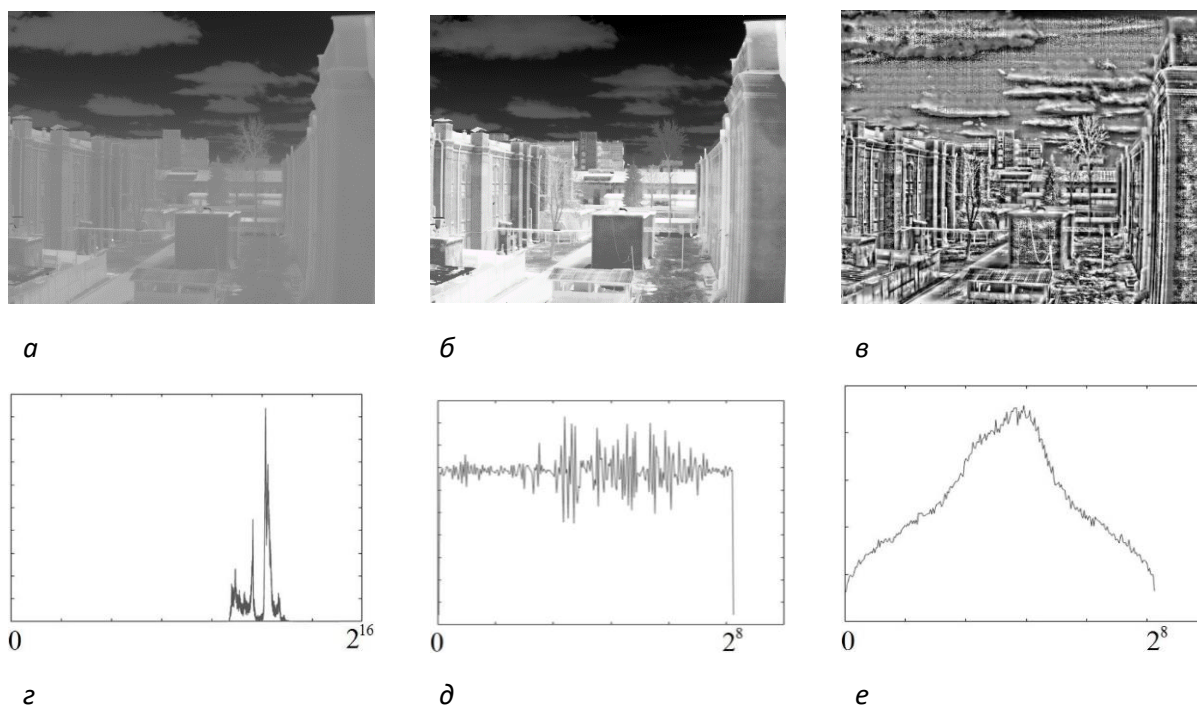
структурной точности (Structural Fidelity, SF) [4], качества тональной карты (Tone Mapped image Quality Index, TMQI) [5]. Они разработаны для цветных и полутоновых изображений, но не учитывают значимость детализации ИК-изображений в системах оптического наведения. Вместе с тем, для оценки качества изображений широко используются контраст, средний градиент и энтропия.

Целью работы является оценка точности различных показателей качества ИК-изображений, формируемых в результате тонового отображения с помощью методов глобального и адаптивного (блочного) выравнивания гистограммы.

Постановка задачи. В методе HE исходное изображение I_{HDR} с динамическим диапазоном $[0, L_{\text{HDR}} - 1]$ (L_{HDR} – количество уровней квантования изображения I_{HDR}) преобразуется в изображение с динамическим диапазоном $[0, L_{\text{LDR}} - 1]$ (L_{LDR} – количество уровней квантования преобразованного изображения $I_{\text{HE}}(L_{\text{LDR}})$) в результате выборки значений вектора выравнивания по значениям пикселей изображения I_{HDR} . Значения вектора выравнивания вычисляются на основе вектора значений интегральной функции распределения яркостей. Для уменьшения динамического диапазона исходного изображения I_{HDR} количества уровней квантования L_{HDR} и L_{LDR} ограничены условием $L_{\text{HDR}} > L_{\text{LDR}}$. Метод HE имеет значительно меньшую вычислительную сложность по сравнению с другими методами выравнивания гистограммы. Он позволяет получить достаточно близкие вероятности яркостей пикселей после преобразования, но не учитывает локальные особенности распределения яркостей пикселей, что приводит к низкому локальному контрасту преобразованного изображения $I_{\text{HE}}(L_{\text{LDR}})$ (рис. 1).

В методе АНЕ исходное изображение I_{HDR} делится на $B_y \times B_x$ блоков по вертикали и горизонтали размером $Y_b \times X_b$ пикселей по вертикали и горизонтали, для центров которых формируются векторы выравнивания в пределах блока. На основе векторов выравнивания смежных блоков интерполируются выравненные значения пикселей изображения $I_{\text{АНЕ}}(L_{\text{LDR}})$ с динамическим диапазоном $[0, L_{\text{LDR}} - 1]$, что позволяет снизить вычислительную сложность преобразования. Разделение изображения на блоки в АНЕ позволяет адаптироваться к структуре изображения и повысить локальный контраст, хотя не обеспечивает равномерность глобальной гистограммы (см. рис. 1, в, е).

Существуют различные подходы к оценке качества получаемых в результате тонового отображения изображений. Для систем оптического наведения, использующих ИК-изображения, актуальной является задача оценки качества их тонового отображения с помощью методов HE и АНЕ с учетом значимости детализации в темных и светлых областях.



a – исходное изображение I_{HDR} ; ***б*** – преобразованное изображение $I_{\text{HE}}(L_{\text{LDR}})$;
в – преобразованное изображение $I_{\text{AHE}}(L_{\text{LDR}})$ при $\gamma_{\text{B}} = 16$;
г – гистограмма изображения I_{HDR} ; ***д*** – гистограмма изображения $I_{\text{HE}}(L_{\text{LDR}})$;
е – гистограмма изображения $I_{\text{AHE}}(L_{\text{LDR}})$

Рисунок 1. – ИК-изображения и их гистограммы

Оценка качества тонового отображения ИК-изображений. Для изображения, приведенного на рис. 1, *a*, метод HE обеспечивает SN=0,0514, SF=0,7873, TMQI=0,7693. Метод AHE позволяет улучшить показатели SN и TMQI. В табл. 1 приведены значения показателей SN, SF и TMQI для результатов тонового отображения изображения, приведенного на рис. 1, *a* с помощью метода AHE при различных размерах блока.

Таблица 1. – Значения показателей SN, SF и TMQI для метода AHE

Показатели качества	Размеры блока обработки метода AHE (пикселей)							
	10×10	16×16	24×24	32×32	48×48	64×64	96×96	128×128
SN	0,6988	0,6174	0,5298	0,4512	0,3433	0,2783	0,1944	0,1382
SF	0,4689	0,6280	0,7127	0,7483	0,8190	0,8595	0,8675	0,8722
TMQI	0,7903	0,8366	0,8494	0,8466	0,8471	0,8454	0,8295	0,8174

Из табл. 1 следует, что при малых размерах блоков метод AHE, повышая локальный контраст и сохраняя детализацию в темных и светлых областях, выигрывает в естественности и интегральной оценке качества по сравнению с методом

HE, проигрывает ему в структурной точности. С увеличением размера блоков статистическая естественность тонового отображения с помощью метода АНЕ ухудшается, но растет структурная точность. Показатель TMQI является интегральным – учитывает SN и SF. Поэтому при уменьшении размеров блока в АНЕ показатель TMQI уменьшается из-за более резкого уменьшения SF по сравнению с ростом SN, а при увеличении – из-за резкого уменьшения SN по сравнению с ростом SF. Максимум TMQI достигается при размере блоков в методе АНЕ 24×24 пикселя.

При значимости детализации более однозначную оценку качества тонового отображения ИК-изображений дают контраст D_{ST} , средний градиент G_A и энтропия E_I . Такие оценки могут быть получены усреднением по достаточно большим блокам. Для изображения, приведенного на рис. 1, а, метод HE обеспечивает $D_{ST} = 21,69$, $G_A = 4,46$, $E_I = 5,34$ при размере блока оценки 32×32 пикселей; $D_{ST} = 32,85$, $G_A = 4,64$, $E_I = 6,16$ при размере блока оценки 64×64 пикселей; $D_{ST} = 41,69$, $G_A = 5,22$, $E_I = 6,84$ при размере блока оценки 64×64 пикселей. В табл. 2–4 приведены значения показателей D_{ST} , G_A и E_I для результатов тонового отображения изображения, приведенного на рис. 1, а с помощью метода АНЕ при различных размерах блоков обработки и оценки.

Таблица 2. – Значения показателей D_{ST} , G_A и E_I для метода АНЕ при размерах блока оценки 32×32 пикселей

Показатели качества	Размеры блока обработки метода АНЕ (пикселей)							
	10×10	16×16	24×24	32×32	48×48	64×64	96×96	128×128
D_{ST}	58,24	56,44	54,23	52,02	47,50	44,23	38,63	34,29
G_A	25,40	20,60	17,21	14,96	12,23	10,64	8,80	7,43
E_I	7,56	7,48	7,36	7,25	7,05	6,87	6,53	6,29

Из табл. 2–4 следует, что показатели D_{ST} , G_A и E_I ухудшаются при увеличении размера блока обработки в методе АНЕ. В этом случае метод АНЕ приближается по качеству тонового отображения к методу HE. Чувствительность этих показателей возрастает с уменьшением размера блока оценки.

Таблица 3. – Значения показателей D_{ST} , G_A и E_I для метода АНЕ при размерах блока оценки 64×64 пикселей

Показатели качества	Размеры блока обработки метода АНЕ (пикселей)							
	10×10	16×16	24×24	32×32	48×48	64×64	96×96	128×128
D_{ST}	59,10	58,34	57,98	57,48	57,03	54,47	51,74	47,34
G_A	24,09	19,53	16,36	14,24	11,78	10,51	8,55	7,40
E_I	7,75	7,70	7,67	7,62	7,54	7,44	7,20	6,97

Таблица 4. – Значения показателей D_{ST} , G_A и E_I для метода АНЕ при размерах блока оценки 128×128 пикселей

Показатели качества	Размеры блока обработки метода АНЕ (пикселей)							
	10×10	16×16	24×24	32×32	48×48	64×64	96×96	128×128
D_{ST}	60,93	61,86	62,33	60,50	61,95	60,90	55,70	51,03
G_A	23,55	19,48	16,62	14,73	12,37	11,10	9,28	8,17
E_I	7,84	7,85	7,87	7,81	7,82	7,77	7,52	7,37

Заключение. Произведено сравнение точности эталонных, основанных на статистической естественности и структурной точности, и безэталонных, основанных на градиенте и энтропии, оценок качества тонового отображения ИК-изображений в системах оптического наведения, где значимым является высокий уровень детализации в темных и светлых областях после преобразования. Показано, что контраст, средний градиент и энтропия более точно отражают качество ИК-изображений после преобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kim, T. K. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering / T. K. Kim, J. K. Paik, B. S. Kang // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 1998. – Vol. 44, no 1. – P. 82–87. – <https://doi.org/10.1109/30.663733>.
2. Nithyananda, C. R. Review on Histogram Equalization based Image Enhancement Techniques / C. R. Nithyananda, A. C. Ramachandra, Preethi // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). – Chennai, 2016. – P. 2512–2517. – <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755145>.
3. Independence of luminance and contrast in natural scenes and in the early visual system / V. Mante [et al.] // Nat Neurosci. – 2005. – Vol. 8. – P. 1690–1697. – <https://doi.org/10.1038/nn1556>.
4. Wang, Z. Multiscale structural similarity for image quality assessment / Z. Wang, E. P. Simoncelli, A. C. Bovik // The Thrity-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers. – Pacific Grove, CA, USA, 2003. – Vol. 2. – P. 1398–1402. – DOI: 10.1109/ACSSC.2003.1292216.
5. Yeganeh, H. Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images / H. Yeganeh, Z. Wang // IEEE Transactions on Image Processing. – 2013. – Vol. 22, no. 2. – P. 657–667. – DOI: 10.1109/TIP.2012.2221725.