

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

УДК 004.932+004.258

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-470-482>

Поступила в редакцию 24.09.2021

Received 24.09.2021

С. И. Рудиков¹, В. Ю. Цветков², А. П. Шкадаревич¹

¹Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

**УМЕНЬШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ВЫРАВНИВАНИЯ, РАСТЯЖЕНИЯ И СЖАТИЯ
ГИСТОГРАММЫ**

Аннотация. Рассматривается задача уменьшения динамического диапазона и улучшения качества инфракрасных (ИК) изображений с широким динамическим диапазоном для их отображения на жидкокристаллической матрице, пиксели которой имеют разрядность 8 бит. Для решения данной задачи в оптико-электронных приборах в реальном масштабе времени широко используются блочные алгоритмы на основе локального выравнивания гистограммы с учетом их относительно низкой вычислительной сложности и возможности учета локальных особенностей распределения яркости. Базовый алгоритм адаптивного выравнивания гистограммы обеспечивает достаточно высокое качество изображений после преобразования, но может приводить к чрезмерной контрастности для некоторых типов изображений. В модифицированном алгоритме адаптивного выравнивания гистограммы контраст ограничивается с помощью порога за счет усечения локальных максимумов на краях гистограммы. Однако это приводит к ухудшению других показателей качества изображения. Данный недостаток свойственен многим алгоритмам локального выравнивания гистограммы наряду с ограниченными возможностями управления характеристиками качества воспроизведения изображений. Для повышения качества и расширения интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений предложен алгоритм двойного уменьшения динамического диапазона изображения с промежуточным управлением формой его гистограммы. Данный алгоритм осуществляет предварительное уменьшение динамического диапазона изображения на основе адаптивного выравнивания гистограммы, управление формой гистограммы на основе ее линейного или нелинейного сжатия, линейного растяжения ее центральной части и линейного растяжения (сжатия) ее боковых частей, окончательное уменьшение динамического диапазона на основе линейного сжатия всей гистограммы. Проведено сравнение характеристик предложенного алгоритма с характеристиками известных алгоритмов уменьшения динамического диапазона и улучшения качества изображений. Приведены зависимости характеристик качества воспроизведения изображений после уменьшения их динамического диапазона от параметров управления предложенного алгоритма и рекомендации по их выбору с учетом вычислительной сложности.

Ключевые слова: уменьшение динамического диапазона изображений, повышение качества воспроизведения изображений, инфракрасные изображения, выравнивание гистограммы, управление формой гистограммы

Для цитирования: Рудиков, С. И. Уменьшение динамического диапазона инфракрасных изображений на основе адаптивного выравнивания, растяжения и сжатия гистограммы / С. И. Рудиков, В. Ю. Цветков, А. П. Шкадаревич // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 470–482. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-470-482>

Stanislav I. Rudikov¹, Viktor Yu. Tsviatkou², Alexey P. Shkadarevich¹

¹Scientific and Technical Center LEMT of the BelOMO, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

**DYNAMIC RANGE REDUCTION OF INFRARED IMAGES BASED ON ADAPTIVE EQUALIZATION,
STRETCH AND COMPRESSION OF HISTOGRAM**

Abstract. The problem of reducing the dynamic range and improving the quality of infrared (IR) images with a wide dynamic range for their display on a liquid crystal matrix with 8-bit pixels is considered. To solve this problem in optoelectronic devices in real time, block algorithms based on local equalization of the histogram are widely used, taking into account their

relatively low computational complexity and the possibility of taking into account local features of the brightness distribution. The basic adaptive histogram equalization algorithm provides reasonably high image quality after conversion, but may result in excessive contrast for some types of images. In a modified algorithm of adaptive histogram equalization, the contrast is limited by a threshold by truncating local maxima at the edges of the histogram. This leads, however, to a deterioration in other indicators of image quality. This disadvantage is inherent in many algorithms of local histogram equalization, along with limited control over the characteristics of image reproduction quality. To improve the quality and expand the control interval for the characteristics of the reproduction of infrared images, the article proposes an algorithm for double reduction of the dynamic range of the image with intermediate control of the shape of its histogram. This algorithm performs: preliminary reduction of the dynamic range of the image based on adaptive equalization of the histogram, control of the shape of the histogram based on its linear or nonlinear compression, linear stretching of its central part and linear stretching (compression) of its lateral parts, final reduction of the dynamic range based on linear compression of the entire histograms. The characteristics of the proposed algorithm are compared with the characteristics of known algorithms for reducing the dynamic range and improving the image quality. The dependences of the characteristics of the quality of image reproduction after a decrease in their dynamic range on the control parameters of the proposed algorithm and recommendations for their choice taking into account the computational complexity are given.

Keywords: reducing the dynamic range of images, improving the quality of image reproduction, infrared images, histogram equalization, control of the histogram shape

For citation: Rudikov S. I., Tsviatkou V. Yu., Shkadarevich A. P. Dynamic range reduction of infrared images based on adaptive equalization, stretch and compression of histogram. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 470–482 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-470-482>

Введение. Для отображения многоцветных инфракрасных изображений (ИК-изображений) на жидкокристаллической матрице, пиксели которой имеют меньшую разрядность (как правило, 8 бит), широко используются алгоритмы преобразования динамического диапазона. При этом осуществляется коррекция ИК-изображений с целью повышения качества их воспроизведения. Для решения этой комплексной задачи применяются алгоритмы на основе линейного, кусочно-линейного и нелинейного преобразования яркости [1, 2]; выравнивания гистограммы (Histogram Equalization, HE) [3–5]; преобразования [6, 7]; модели человеческого визуального восприятия [7, 8]; фильтрации и многоканальной обработки [9]; а также гибридные.

Для уменьшения динамического диапазона и улучшения качества ИК-изображений в оптико-электронных приборах наиболее эффективны блочные алгоритмы на основе локального выравнивания гистограммы [4, 5] по причине их относительно низкой вычислительной сложности и возможности учета локальных особенностей распределения яркости. В алгоритме адаптивного выравнивания гистограммы (Adaptive Histogram Equalization, АНЕ) [4] изображение разделяется на блоки. Для центров блоков на основе интегральной функции распределения яркостей вычисляются значения выравнивания, по которым интерполируются значения остальных пикселей. Алгоритм АНЕ обеспечивает достаточно высокое качество изображений после преобразования, но не позволяет управлять формой интегральной функции распределения, что приводит к чрезмерной контрастности для некоторых типов изображений. В алгоритме адаптивного выравнивания гистограммы с ограничением контрастности (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE) [5] данная особенность учитывается за счет регулируемого ограничения гистограммы. Это позволяет управлять контрастностью в сторону ее уменьшения по сравнению с АНЕ. Но при снижении контрастности в алгоритме CLAHE ухудшаются и другие показатели качества изображения (среднее значение, средний градиент, энтропия, число деталей). Данный недостаток свойственен многим модификациям алгоритма АНЕ [10–12]. Причина заключается в выравнивании гистограммы, существенно ослабляющем результаты любой предкоррекции изображения. Поэтому эффективное управление характеристиками изображения при преобразовании динамического диапазона возможно только после выравнивания гистограммы. При этом для коррекции необходимо обеспечить достаточно широкий динамический диапазон изображения.

Цель работы – повышение качества и расширение интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений при уменьшении их динамического диапазона по сравнению с алгоритмами адаптивного выравнивания гистограммы.

Постановка задачи. На рис. 1, *a* приведена гистограмма ИК-изображения $I_{\text{HDR}} = \|i_{\text{HDR}}(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ размером $Y \times X$ пикселей по вертикали и горизонтали, значения пикселей $i_{\text{HDR}}(y, x)$ которого принадлежат динамическому диапазону $[0, L_{\text{HDR}} - 1]$, где L_{HDR} – количество уровней квантования изображения I_{HDR} , $L_{\text{HDR}} = 16\,384$. Значения гистограммы сосредоточены в центре (характерно для ландшафтных ИК-изображений). В алгоритме HE [3] выравнивание гистограммы (рис. 1, *b*) и формирование изображения $I_{\text{HE}}(L_{\text{LDR}}) = \|i_{\text{LDR}}(L_{\text{LDR}}, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ (рис. 1, *c*) с динамическим диапазоном $[0, L_{\text{LDR}} - 1]$ (L_{LDR} – количество уровней квантования изображения $I_{\text{HE}}(L_{\text{LDR}})$, $L_{\text{LDR}} < L_{\text{HDR}}$) осуществляется в результате переопределения значений пикселей исходного изображения на основе вектора $H_{\text{E}}(L_{\text{LDR}}) = \|h_{\text{E}}(L_{\text{LDR}}, l)\|_{(l=0, \overline{L_{\text{HDR}}-1})}$ выравнивания с помощью

$$i_{\text{LDR}}(L_{\text{LDR}}, y, x) = h_{\text{E}}(L_{\text{LDR}}, i_{\text{HDR}}(y, x)) \text{ при } y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}. \quad (1)$$

Значения вектора $H_{\text{E}}(L_{\text{LDR}})$ вычисляются на основе вектора $H_{\text{CDF}} = \|h_{\text{CDF}}(l)\|_{(l=0, \overline{L_{\text{HDR}}-1})}$ значений интегральной функции распределения яркостей следующим образом:

$$h_{\text{E}}(L_{\text{LDR}}, l) = \left\lfloor \frac{(L_{\text{LDR}} - 1)(h_{\text{CDF}}(l) - \min(H_{\text{CDF}}))}{(YX - \min(H_{\text{CDF}}))} \right\rfloor \text{ при } l = \overline{0, L_{\text{HDR}} - 1}, \quad (2)$$

где $h_{\text{CDF}}(0) = h_{\text{HDR}}(0)$; $h_{\text{CDF}}(l+1) = h_{\text{HDR}}(l+1) + h_{\text{CDF}}(l)$ при $l = \overline{0, L_{\text{HDR}} - 2}$; $h_{\text{HDR}}(l)$ – элемент гистограммы $H_{\text{HDR}} = \|h_{\text{HDR}}(l)\|_{(l=0, \overline{L_{\text{HDR}}-1})}$ исходного изображения I_{HDR} ; $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления до целого с недостатком.

Выравнивание гистограммы на основе выражения (1) не учитывает локальные особенности распределения яркостей пикселей. В алгоритме АНЕ [4] исходное изображение I_{HDR} делится на $B_Y \times B_X$ блоков по вертикали и горизонтали размером $Y_B \times X_B$ по вертикали и горизонтали, для центров которых с помощью выражения (2) формируются векторы $H_{\text{E}}(y_B, x_B, L_{\text{LDR}}) = \|h_{\text{E}}(y_B, x_B, L_{\text{LDR}}, l)\|_{(l=0, \overline{L_{\text{HDR}}-1})}$ выравнивания в пределах блока, где y_B, x_B – координаты центра блока, $y_B = \overline{0, B_Y - 1}$, $x_B = \overline{0, B_X - 1}$. Затем на основе четырех, трех или двух (в зависимости от положения на изображении интерполируемого пикселя) векторов выравнивания смежных блоков с помощью интерполяции определяются остальные значения пикселей $i_{\text{АНЕ}}(L_{\text{LDR}}, y, x)$ изображения $I_{\text{АНЕ}}(L_{\text{LDR}})$ с динамическим диапазоном $[0, L_{\text{LDR}} - 1]$, что позволяет снизить вычислительную сложность преобразования. В центральной части изображения интерполяция осуществляется на основе векторов выравнивания четырех смежных блоков с помощью выражения

$$\begin{aligned} i_{\text{LDR}}(L_{\text{LDR}}, y, x) &= c_{00} h_{\text{E}}(y_B, x_B, L_{\text{LDR}}, i_{\text{HDR}}(y, x)) + c_{10} h_{\text{E}}(y_B + 1, x_B, L_{\text{LDR}}, i_{\text{HDR}}(y, x)) + \\ &+ c_{01} h_{\text{E}}(y_B, x_B + 1, L_{\text{LDR}}, i_{\text{HDR}}(y, x)) + c_{11} h_{\text{E}}(y_B + 1, x_B + 1, L_{\text{LDR}}, i_{\text{HDR}}(y, x)) \quad (3) \\ &\text{при } y = \overline{y_B Y_B, (y_B + 1) Y_B - 1}, x = \overline{x_B X_B, (x_B + 1) X_B - 1}, \end{aligned}$$

где $c_{00}, c_{10}, c_{01}, c_{11}$ – весовые коэффициенты ($c_{00} + c_{10} + c_{01} + c_{11} = 1$), определяющие вклад значения выравнивания каждого блока.

Разделение изображения на блоки в АНЕ позволяет адаптироваться к структуре изображения (рис. 1, *d*), хотя и не обеспечивает равномерность глобальной гистограммы (рис. 1, *e*). Для некоторых изображений, содержащих в основном светлые и темные элементы (что соответствует двум пикам на краях гистограммы), применение АНЕ приводит к чрезмерной контрастности и росту заметности шума. В таком случае эффективным может оказаться алгоритм СЛАНЕ [5], в котором предусмотрено ограничение контраста с помощью соответствующего порога. Данный алгоритм основан на АНЕ, имеет более высокую временную и соизмеримую пространственную сложность и часто используется для улучшения изображений за счет усечения локальных максимумов на краях гистограммы. Однако для ИК-изображений с характерной

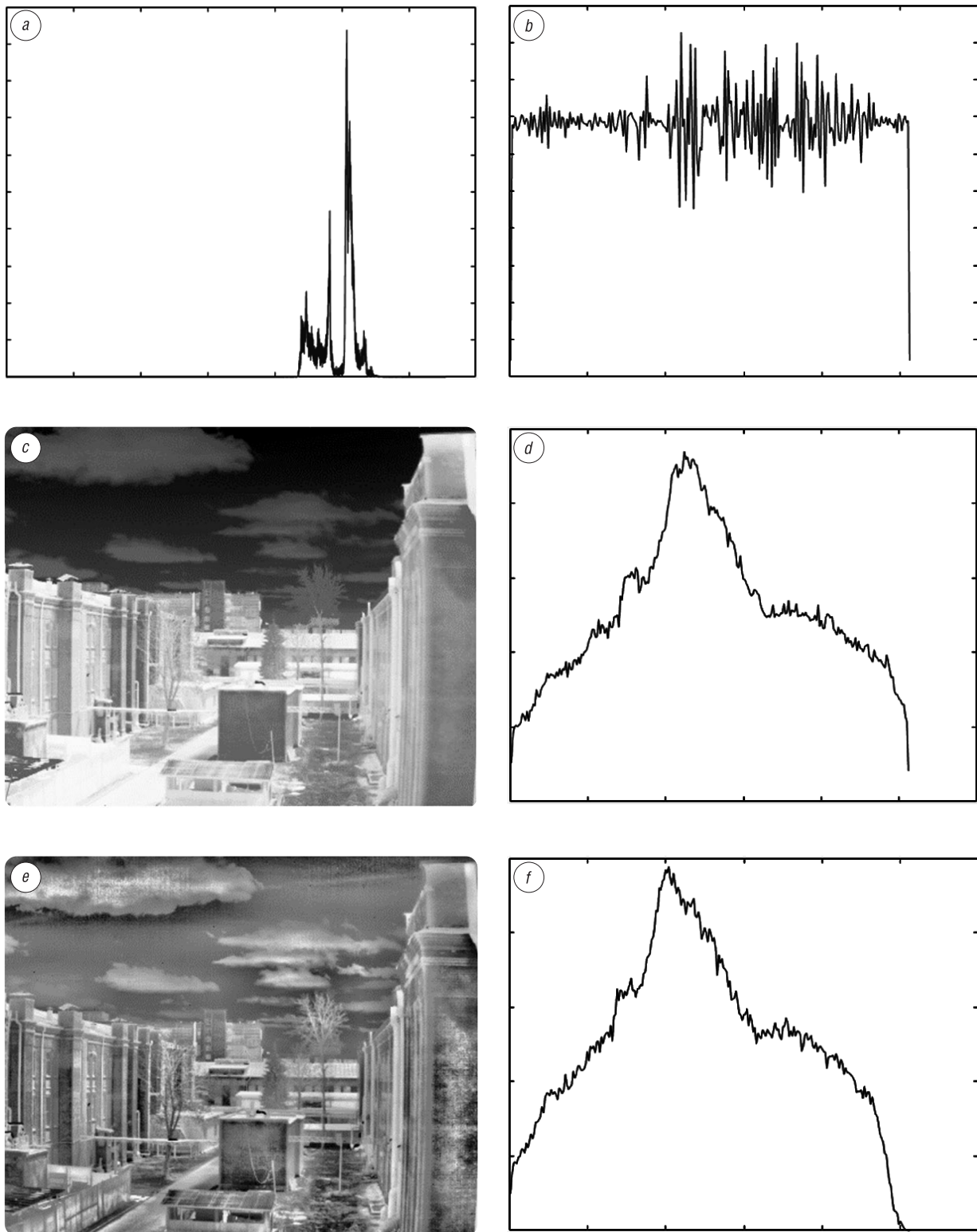


Рис. 1. Преобразованные ИК-изображения и гистограммы яркостей: *a* – гистограмма исходного изображения, *b* – гистограмма изображения после выравнивания, *c* – изображение после выравнивания, *d* – гистограмма изображения после адаптивного выравнивания, *e* – изображение после адаптивного выравнивания, *f* – гистограмма изображения после адаптивного выравнивания с ограничением контраста

Fig. 1. Converted IR images and brightness histograms: *a* – the histogram of the original image, *b* – histogram of the image after equalization, *c* – image after equalization, *d* – histogram of the image after adaptive equalization, *e* – image after adaptive equalization, *f* – image histogram after adaptive equalization with contrast limitation

концентрацией значений в центральной части гистограммы (см. рис. 1, *a*) алгоритм CLAHE неэффективен (его использование приводит только к незначительному растяжению гистограммы по сравнению с АНЕ, рис. 1, *f*).

Для ИК-изображений $I_{LDR} = \left\| i_{LDR}(y, x) \right\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ размером 640×480 пикселей (см. рис. 1), полученных в результате преобразования динамического диапазона с помощью алгоритмов HE, АНЕ, CLAHE, в табл. 1 приведены глобальные (средние по блокам) значения средней яркости V_M , контрастности (стандартного отклонения) D_{ST} , среднего градиента G_A , энтропии E_I и количества локальных экстремумов N_{LE} , вычисляемых с помощью выражений:

$$V_M = \frac{1}{YX} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i_{LDR}(y, x), \quad (4)$$

$$D_{ST} = \sqrt{\frac{1}{YX} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (i_{LDR}(y, x) - V_M)^2}, \quad (5)$$

$$G_A = \frac{1}{YX} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} \sqrt{\frac{(di_{LDR}(y, x)/dy)^2 + (di_{LDR}(y, x)/dx)^2}{2}}, \quad (6)$$

$$E_I = - \sum_{l=0}^{L-1} P(i_{LDR}(l)) \log_2 P(i_{LDR}(l)), \quad (7)$$

$$N_{LE} = N_{Lmax} + N_{Lmin}, \quad (8)$$

где $di_{LDR}(y, x)/dy$ и $di_{LDR}(y, x)/dx$ – вертикальный и горизонтальный градиенты; $L = 2^{D_B} - 1$ – битовая глубина изображения; $P(i_{LDR}(l))$ – вероятность пикселя со значением l ; N_{Lmax} – количество локальных максимумов; N_{Lmin} – количество локальных минимумов.

Т а б л и ц а 1. Глобальные (средние по блокам) характеристики ИК-изображения после преобразования динамического диапазона с помощью различных алгоритмов

Table 1. Global (block-averaged) characteristics of the IR image after dynamic range conversion using various algorithms

Алгоритм выравнивания гистограммы	V_M	D_{ST}	G_A	E_I	N_{LE}
HE	126,8	32,9	4,6	6,2	23991
АНЕ	130,8	57,1	10,5	7,46	35082
CLAHE (порог 0,7)	129,5	56,6	10,3	7,45	35057
CLAHE (порог 0,5)	123,8	54,3	9,8	7,39	35002
CLAHE (порог 0,3)	109,9	48,6	8,5	7,23	34420

гистограммы. Такое преобразование должно не только растягивать центральную часть гистограммы с большинством значений, но с учетом ее относительной узости еще и сохранять значения слева и справа от нее. Это позволит увеличить значения на краях гистограммы и повысить за счет этого контрастность и другие характеристики изображения. Следовательно, имеет смысл использовать сочетание нелинейного сжатия и линейного растяжения гистограммы для повышения концентрации значений в ее центральной части, а также разделить гистограмму для сжатия и растяжения на три части. Сжатие и растяжение частей (управление формой) гистограммы должны осуществляться после выравнивания с целью сохранения их результатов, но в достаточно широком динамическом диапазоне для исключения прореживания значений гистограммы. Это требует двойного уменьшения динамического диапазона: предварительного – на основе адаптивного выравнивания и окончательного – на основе линейного сжатия гистограммы с промежуточным управлением формой гистограммы.

Из табл. 1 следует, что АНЕ превосходит HE и CLAHE по всем показателям качества, уступая только CLAHE по средней яркости. При этом CLAHE не позволяет управлять характеристиками изображения, а только уменьшением контрастности, что сопровождается ухудшением и других характеристик.

Для повышения качества и расширения интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений при уменьшении динамического диапазона необходимо преобразование, параметры которого могут быть подобраны с учетом распределения значений в гистограмме исходного изображения, а в случае ландшафтных ИК-изображений – концентрации значений в центральной части

Таким образом, основными задачами являются разработка модели и алгоритма двойного уменьшения динамического диапазона ИК-изображения на основе адаптивного выравнивания, растяжения и сжатия гистограммы, а также исследование зависимостей качества воспроизведения ИК-изображений от параметров этого преобразования.

Предлагаемые модель и алгоритм уменьшения динамического диапазона ИК-изображений.

Для повышения качества и расширения интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений при уменьшении их динамического диапазона предлагается преобразование HECS (Histogram Equalization, Compression and Stretching) – адаптивное выравнивание, растяжение и сжатие гистограммы. Сущность преобразования состоит в двойном уменьшении динамического диапазона изображения с промежуточным управлением формой его гистограммы за счет ее частичного растяжения и сжатия. Преобразование HECS осуществляется в три этапа.

1. Предварительное уменьшение динамического диапазона изображения до $[0, L_{LDR1} - 1]$ на основе адаптивного выравнивания гистограммы по выражению (3) – формируется изображение $I_{AHE}(L_{LDR1})$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR1} - 1]$.

2. Управление формой гистограммы.

2.1. Сжатие гистограммы на основе двух гамма-функций с коэффициентами G_L и G_H , применяемых к двум частям динамического диапазона $[0, T_G - 1]$ и $[T_G + 1, L_{LDR1} - 1]$, которые разделяются на уровне $T_G = K_G(L_{LDR1} - 1)$ по коэффициенту K_G , – формируется изображение $I_G(K_G, G_L, G_H)$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR1} - 1]$ (при $G_L = G_H = 1$ сжатие линейное).

2.2. Линейное растяжение центральной части гистограммы, ограниченной динамическим диапазоном $[T, L_{LDR1} - 1 - T]$ по порогу T , с коэффициентом $(L_{LDR1} - 1)/(L_{LDR1} - 1 - 2T)$ и линейное растяжение (сжатие) боковых частей гистограммы, ограниченных диапазонами $[0, T - 1]$ и $[L_{LDR1} - T, L_{LDR1} - 1]$ по порогу T , с коэффициентами T_L/T и T_R/T – формируется изображение $I_{CS}(T, T_L, T_R)$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR1} - 1]$.

3. Окончательное уменьшение динамического диапазона до $[0, L_{LDR2} - 1]$ на основе линейного сжатия гистограммы с коэффициентом L_{LDR2}/L_{LDR1} – формируется изображение $I_{HECS}(L_{LDR2})$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR2} - 1]$.

Этап 1 преобразования HECS описывается формулой (3). Для описания 2-го и 3-го этапов предлагаются следующие выражения:

$$i_G(K_G, G_L, G_H, y, x) = \begin{cases} \left[T_G (i_{AHE}(L_{LDR1}, y, x) / T_G)^{\frac{1}{G_L}} \right] & \text{при } i_{AHE}(L_{LDR1}, y, x) < T_G, \\ i_{AHE}(L_{LDR1}, y, x) & \text{при } i_{AHE}(L_{LDR1}, y, x) = T_G, \\ \left[T_G + (L_{LDR1} - 1 - T_G) (1 - (i_{AHE}(L_{LDR1}, y, x) - T_G) / (L_{LDR1} - 1 - T_G))^{\frac{1}{G_H}} \right] & \text{при } i_{AHE}(L_{LDR1}, y, x) > T_G, \end{cases} \quad (9)$$

$$i_{CS}(T, T_L, T_R, y, x) = \begin{cases} \left[(L_{LDR1} - 1)(i_G(y, x) - T) / L_{LDR1} - 1 - 2T \right] & \text{при } (i_G(y, x) \geq T) \wedge \\ & \wedge (i_G(y, x) \leq L_{LDR1} - 1 - T), \\ \left[i_G(y, x) T_L / T \right] & \text{при } i_G(y, x) < T, \\ \left[L_{LDR1} - 1 + [T_R (i_G(y, x) - (L_{LDR1} - 1)) / T] \right] & \text{при } i_G(y, x) > L_{LDR1} - 1 - T, \end{cases} \quad (10)$$

$$i_{HECS}(L_{LDR2}, y, x) = [i_{CS}(y, x) L_{LDR2} / L_{LDR1}] \quad (11)$$

при $y = \overline{0, Y - 1}, x = \overline{0, X - 1}$.

Алгоритм HECS двойного уменьшения динамического диапазона изображения с промежуточным управлением формой его гистограммы, основанный на выражениях (3), (9)–(11), состоит из следующих основных шагов.

Вход: $I_{HDR}, L_{LDR1}, L_{LDR2}, K_G, G_L, G_H, T, T_L, T_R, B_Y, B_X$.

Определение размера изображения I_{HDR} : формируются значения Y, X .

Уменьшение динамического диапазона на основе адаптивного выравнивания гистограммы по алгоритму АНЕ (этап 1): формируется изображение $I_{\text{АНЕ}}(L_{\text{LDR1}})$ по выражению (3) для $B_Y \times B_X$ блоков.

Сжатие гистограммы (линейное при $G_L = G_H = 1$, нелинейное при $(G_L > 1) \vee (G_H > 1)$) (этап 2.1): формируется изображение $I_G(K_G, G_L, G_H)$ по выражению (9) в цикле по $Y \times X$ пикселям.

Линейное растяжение центральной части гистограммы и линейное растяжение (сжатие) боковых частей гистограммы (этап 2.2): формируется изображение $I_{\text{CS}}(T, T_L, T_R)$ по выражению (10) в цикле по $Y \times X$ пикселям.

Уменьшение динамического диапазона на основе линейного сжатия всей гистограммы (этап 3): формируется изображение $I_{\text{HECS}}(L_{\text{LDR2}})$ по выражению (11) в цикле по $Y \times X$ пикселям.

Выход: $I_{\text{HECS}}(L_{\text{LDR2}})$.

Результаты и оценка эффективности работы алгоритмов. Из выражений (3), (9)–(11) следует, что при постоянных значениях $Y_B, X_B, L_{\text{LDR1}}, L_{\text{LDR2}}$ результаты преобразования HECS зависят от шести параметров: $\{K_G, G_L, G_H, T, T_L, T_R\}$. На рис. 2 приведены зависимости $f = \{V_M, D_{\text{ST}}, G_A, E_I, N_{\text{LE}}\}$ от этих параметров, обозначенных через переменную S ($S = \{K_G, G_L, T, T_L\}, G_L = G_H, T_L = T_R$) при $L_{\text{LDR1}} = 2^{10}, L_{\text{LDR2}} = 2^8$ для изображения, приведенного на рис. 1. Значение $\Delta L = L_{\text{LDR1}} - L_{\text{LDR2}}$ обеспечивает запас по динамическому диапазону для растяжения необходимого фрагмента гистограммы в 4 раза.

Из рис. 2 следует, что для алгоритма HECS существуют наборы параметров $\{K_G, G_L, G_H, T, T_L, T_R\}$, обеспечивающие лучшие характеристики $\{V_M, D_{\text{ST}}, G_A, E_I, N_{\text{LE}}\}$ по сравнению с алгоритмами HE, АНЕ и СЛАНЕ (табл. 2, рис. 3, *a, b*). Это справедливо как для линейного, так и нелинейного сжатия гистограммы на этапе 2 преобразования HECS. Из табл. 1 и 2 следует, что при таком же отклонении от среднего по сравнению с алгоритмом СЛАНЕ нелинейное сжатие гистограммы в алгоритме HECS позволяет повысить градиент, энтропию и детализацию изображения после уменьшения динамического диапазона. Нелинейное сжатие гистограммы в алгоритме HECS позволяет также ограничить контраст. При этом при ограничении контраста (параметр D_{ST}) на таком же уровне, как в алгоритме СЛАНЕ, алгоритм HECS обеспечивает примерно такую же энтропию (параметр E_I) и более высокие значения G_A и N_{LE} (при большем отклонении средней яркости от 128) (см. табл. 2, рис. 3, *c*). Из рис. 3 также следует, что за счет изменения параметров алгоритма HECS возможно управление формой гистограммы: на рис. 3, *a* центральная и боковые части гистограммы примерно одинаковы по амплитуде; на рис. 3, *b* боковые части гистограммы преобладают над центральной; на рис. 3, *c* центральная часть гистограммы преобладает над боковыми. При этом, как следует из рис. 2, интервал управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений существенно расширяется по сравнению с алгоритмом СЛАНЕ.

Временная сложность C_T^{HECS} алгоритма HECS оценена на основе числа операций обращения к памяти, которое составляет

$$C_T^{\text{HECS}} = C_T^{\text{АНЕ}} + 3YX, \quad (12)$$

где $C_T^{\text{АНЕ}}$ – временная сложность алгоритма АНЕ, $C_T^{\text{АНЕ}} = 5YX + (2L_{\text{HDR}} + L_{\text{LDR1}})B_Y B_X$.

Временная сложность $C_T^{\text{СЛАНЕ}}$ алгоритма СЛАНЕ определяется на основе $C_T^{\text{АНЕ}}$ с учетом числа операций обращения к памяти для ограничения контраста с помощью выражения $C_T^{\text{СЛАНЕ}} = C_T^{\text{АНЕ}} + 2L_{\text{HDR}}B_Y B_X$.

Пространственная сложность C_S^{HECS} (бит) алгоритма HECS оценена на основе объема буферной памяти (бит), который составляет

$$C_S^{\text{HECS}} = C_S^{\text{АНЕ}} + YX(2\log_2(L_{\text{LDR1}}) + \log_2(L_{\text{LDR2}})), \quad (13)$$

где $C_S^{\text{АНЕ}}$ – пространственная сложность алгоритма АНЕ, $C_S^{\text{АНЕ}} = \log_2(Y_B X_B)(L_{\text{HDR}}(2 + B_Y B_X) + L_{\text{LDR1}}B_Y B_X) + YX \log_2(L_{\text{LDR1}})$.

Пространственная сложность $C_S^{\text{СЛАНЕ}}$ алгоритма СЛАНЕ определяется на основе $C_S^{\text{АНЕ}}$ с учетом объема буферной памяти (бит) для ограничения контраста с помощью выражения $C_S^{\text{СЛАНЕ}} = C_S^{\text{АНЕ}} + 2L_{\text{HDR}} \log_2(Y_B X_B)$.

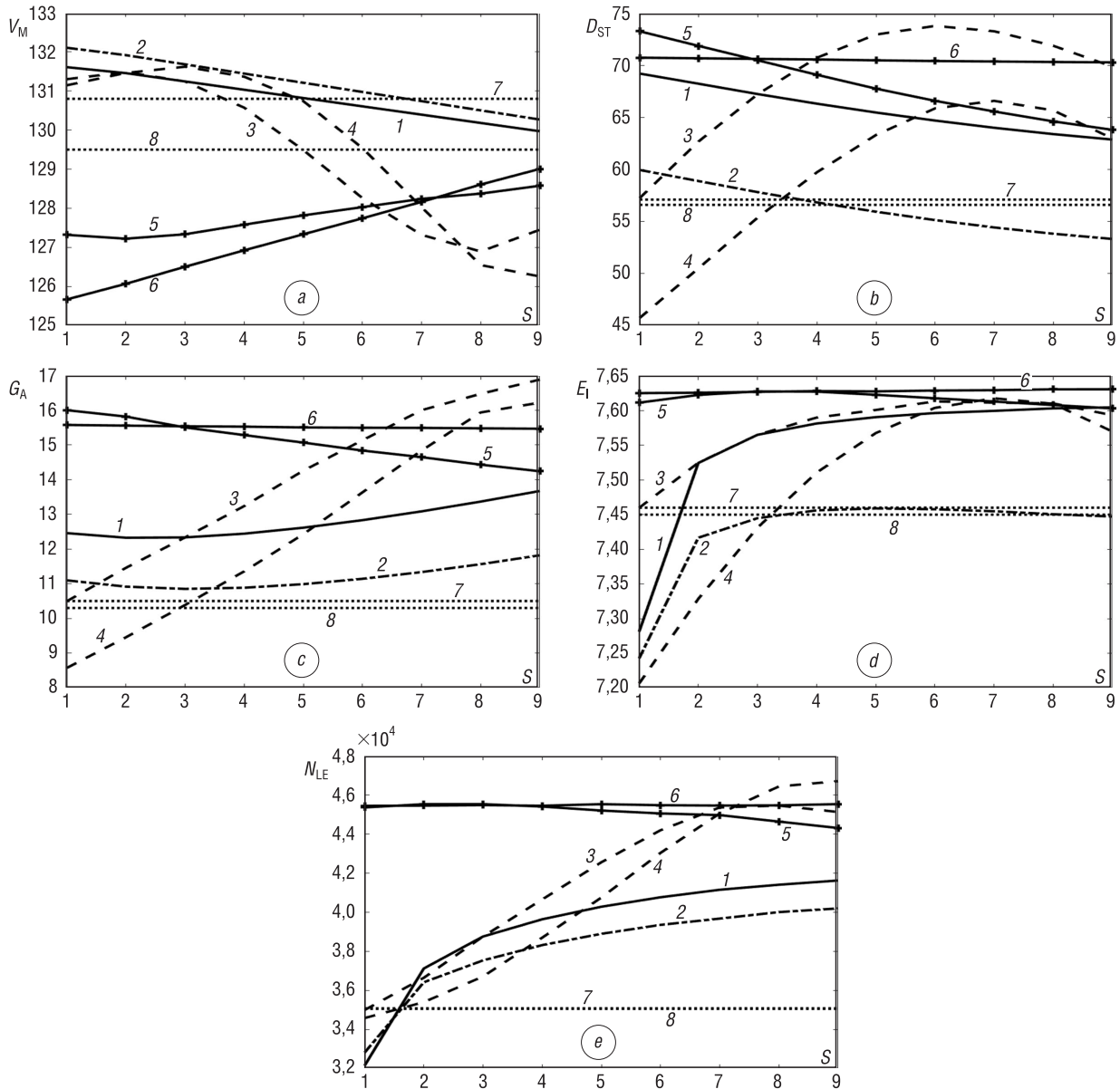


Рис. 2. Зависимости характеристик изображения (a – V_M , b – D_{ST} , c – G_A , d – E_I , e – N_{LE}) от параметров алгоритма HECS: кривая 1 – $f(T_L)$ при $G_L = 1, T = 0,1, T_L = 0,4$; кривая 2 – $f(T_L)$ при $K_G = 0,5, G_L = 2, T = 0,2, T_L = 0,2$; кривая 3 – $f(T)$ при $G_L = 1, T_L = 1, T = 0,0,4$; кривая 4 – $f(T)$ при $K_G = 0,5, G_L = 1,5, T_L = 1, T = 0,0,4$; кривая 5 – $f(G_L)$ при $K_G = 0,5, T = 0,3, T_L = 1, G_L = 1,1,84$; кривая 6 – $f(K_G)$ при $G_L = 1,2, T = 0,3, T_L = 1, K_G = 0,46,0,54$; кривая 7 – АНЕ; кривая 8 – CLAHE

Fig. 2. Dependences of the characteristics of the image (a – V_M , b – D_{ST} , c – G_A , d – E_I , e – N_{LE}) on the parameters of the HECS algorithm: curve 1 – $f(T_L)$ at $G_L = 1, T = 0.1, T_L = 0.4$; curve 2 – $f(T_L)$ at $K_G = 0.5, G_L = 2, T = 0.2, T_L = 0.2$; curve 3 – $f(T)$ at $G_L = 1, T_L = 1, T = 0.0,4$; curve 4 – $f(T)$ at $K_G = 0.5, G_L = 1.5, T_L = 1, T = 0.0,4$; curve 5 – $f(G_L)$ at $K_G = 0.5, T = 0.3, T_L = 1, G_L = 1.1,84$; curve 6 – $f(K_G)$ at $G_L = 1.2, T = 0.3, T_L = 1, K_G = 0.46,0,54$; curve 7 – AHE; curve 8 – CLAHE

Т а б л и ц а 2. Глобальные (средние по блокам) характеристики ИК-изображения после преобразования динамического диапазона с помощью алгоритма HECS
 T a b l e 2. Global (block-averaged) characteristics of the infrared image after conversion of the dynamic range using the HECS algorithm

Значения параметров алгоритма	Характеристики изображения				
	V_M	D_{ST}	G_A	E_I	N_{LE}
$G_L = 1,0; T = 0,25; T_L = 1$	128,3	73,8	15,1	7,61	44202
$K_G = 0,52; G_L = 1,2; T = 0,3; T_L = 1$	127,7	70,4	15,5	7,63	45484
$K_G = 0,5; G_L = 1,58; T = 0,13; T_L = 1$	131,5	56,5	10,7	7,46	37564

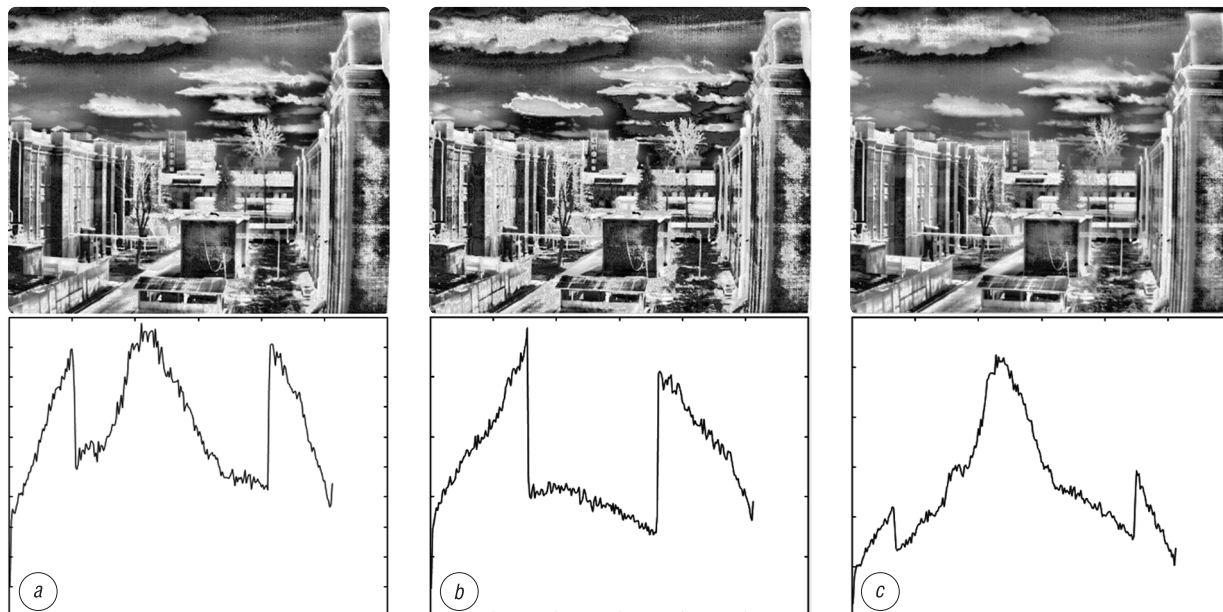


Рис. 3. Изображения и гистограммы после уменьшения динамического диапазона с помощью HECS: $a - G_L = 1,0$, $T = 0,25$, $T_L = 1$; $b - K_G = 0,52$, $G_L = 1,2$, $T = 0,3$, $T_L = 1$; $c - K_G = 0,5$, $G_L = 1,58$, $T = 0,13$, $T_L = 1$

Fig. 3. Images and histograms after dynamic range reduction using the HECS: $a - G_L = 1.0$, $T = 0.25$, $T_L = 1$; $b - K_G = 0.52$, $G_L = 1.2$, $T = 0.3$, $T_L = 1$; $c - K_G = 0.5$, $G_L = 1.58$, $T = 0.13$, $T_L = 1$

Вычислительная сложность HECS растет с увеличением $\Delta L = L_{LDR1} - L_{LDR2}$ (из-за увеличения размера гистограммы) и уменьшением $Y_B \times X_B$ (из-за увеличения числа блоков) (табл. 3). Вычислительная сложность АНЕ и СЛАНЕ также растет с уменьшением размера блока. По сравнению с АНЕ алгоритм HECS имеет в 1,1–3,4 раза более высокую пространственную сложность и в 1,0–1,6 раза более высокую временную сложность в зависимости от размера блока и ΔL . Пространственная сложность HECS также выше по сравнению с СЛАНЕ. Соотношение между временными сложностями HECS и СЛАНЕ зависит от размера блока и ΔL . При $Y_B = X_B = 128$ алгоритм HECS проигрывает алгоритму СЛАНЕ по временной сложности в 1,11–1,22 раза в зависимости от ΔL . При $Y_B = X_B \leq 64$ алгоритм HECS выигрывает у СЛАНЕ во временной сложности в 1,31 раза и более.

С увеличением ΔL показатели качества растут (рис. 4). Показатель детализации N_{LE} растет за исключением двух случаев. Для варианта $L_{LDR1} = 10$ и $L_{LDR2} = 8$ наблюдается резкий рост показателей качества по сравнению с вариантом $L_{LDR1} = L_{LDR2} = 8$ при незначительном увеличении временной и пространственной сложности (см. табл. 3 для $Y_B = X_B = 64$). Лучшее качество обеспечивается при $L_{LDR1} = 14$, но оно незначительно отличается от варианта $L_{LDR1} = 10$ и сопровождается увеличением временной и пространственной сложности по сравнению с вариантом $L_{LDR1} = L_{LDR2} = 8$ в 1,25 и 1,8 раза (см. табл. 3 для $Y_B = X_B = 64$).

Т а б л и ц а 3. Вычислительная сложность алгоритмов (для изображений 480×640 пикселей)

Table 3. Computational complexity of algorithms (for images 480×640 pixels)

Параметры алгоритмов	Временная сложность алгоритмов			Пространственная сложность алгоритмов		
	АНЕ	СЛАНЕ	HECS	АНЕ	СЛАНЕ	HECS
$L_{LDR1} = 8, Y_B = X_B = 128$	2 155 200	2 769 600	3 076 800	7 284 352	7 743 104	1 465 7152
$L_{LDR1} = 14, Y_B = X_B = 128$			3 379 200			2 442 0352
$L_{LDR1} = 8, Y_B = X_B = 64$	4 012 800	6 470 400	4 934 400	1 782 6816	1 822 0032	2 519 9616
$L_{LDR1} = 14, Y_B = X_B = 64$			6 144 000			4 524 4416
$L_{LDR1} = 8, Y_B = X_B = 32$	11 443 200	2 127 3600	12 364 800	5 270 5280	5 303 2960	6 007 8080
$L_{LDR1} = 14, Y_B = X_B = 32$			17 203 200			11 399 1680

С увеличением Y_B ($Y_B = X_B$) показатели качества и детализации падают (рис. 5). Однако при малых размерах блока на однородном фоне могут проявляться артефакты из-за интерполяции в алгоритме АНЕ (горизонтальные полосы на рис. 6, *a*, *b*). Они практически незаметны для $Y_B = 64$ (рис. 6, *c*) при лучших по сравнению с вариантом $Y_B = 128$ качестве и детализации (рис. 6, *d*).

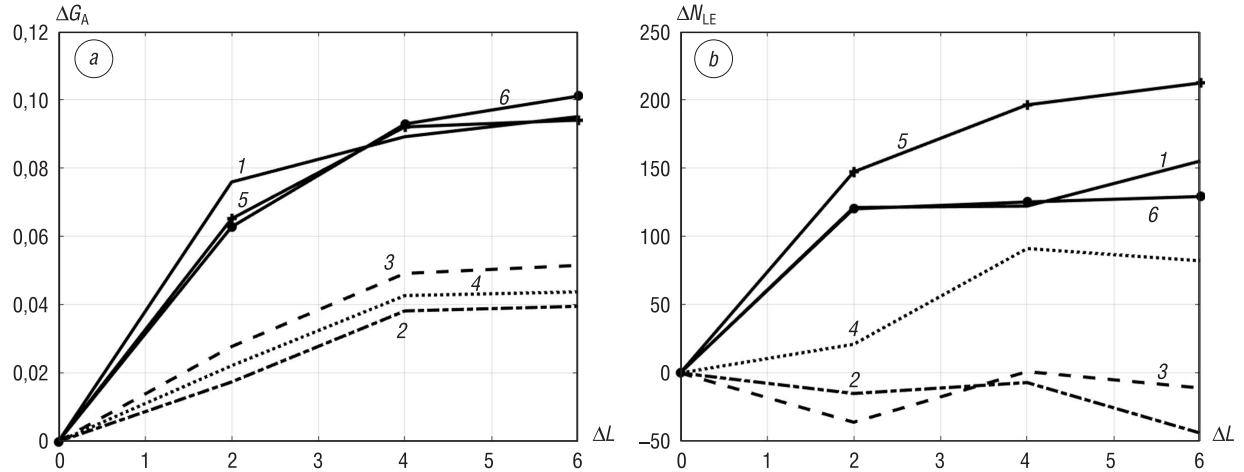


Рис. 4. Зависимости разностей показателей качества воспроизведения (*a* – $\Delta G_A = G_A(\Delta L) - G_A(\Delta L_2)$) и детализации изображения (*b* – $\Delta N_{LE} = N_{LE}(\Delta L) - N_{LE}(\Delta L_2)$) от ΔL для средних значений перестраиваемых параметров HECS, $\Delta L = \{0, 2, 4, 6\}$, $\Delta L_2 = 0$ ($L_{LDR2} = 8$): кривая 1 – $G_L = 1, T = 0,1, T_L = 2$; кривая 2 – $K_G = 0,5, G_L = 2, T = 0,2, T_L = 1$; кривая 3 – $G_L = 1, T_L = 1, T = 0,2$; кривая 4 – $K_G = 0,5, G_L = 1,5, T_L = 1, T = 0,2$; кривая 5 – $K_G = 0,5, T = 0,3, T_L = 1, G_L = 1,4$; кривая 6 – $G_L = 1,2, T = 0,3, T_L = 1, K_G = 0,5$

Fig. 4. Dependences of the differences between the indicators of reproduction quality (*a* – $\Delta G_A = G_A(\Delta L) - G_A(\Delta L_2)$) and detailing of image (*b* – $\Delta N_{LE} = N_{LE}(\Delta L) - N_{LE}(\Delta L_2)$) on the ΔL for the average values of the tunable parameters of the HECS, $\Delta L = \{0, 2, 4, 6\}$, $\Delta L_2 = 0$ ($L_{LDR2} = 8$): curve 1 – $G_L = 1, T = 0.1, T_L = 2$; curve 2 – $K_G = 0.5, G_L = 2, T = 0.2, T_L = 1$; curve 3 – $G_L = 1, T_L = 1, T = 0.2$; curve 4 – $K_G = 0.5, G_L = 1.5, T_L = 1, T = 0.2$; curve 5 – $K_G = 0.5, T = 0.3, T_L = 1, G_L = 1.4$; curve 6 – $G_L = 1.2, T = 0.3, T_L = 1, K_G = 0.5$

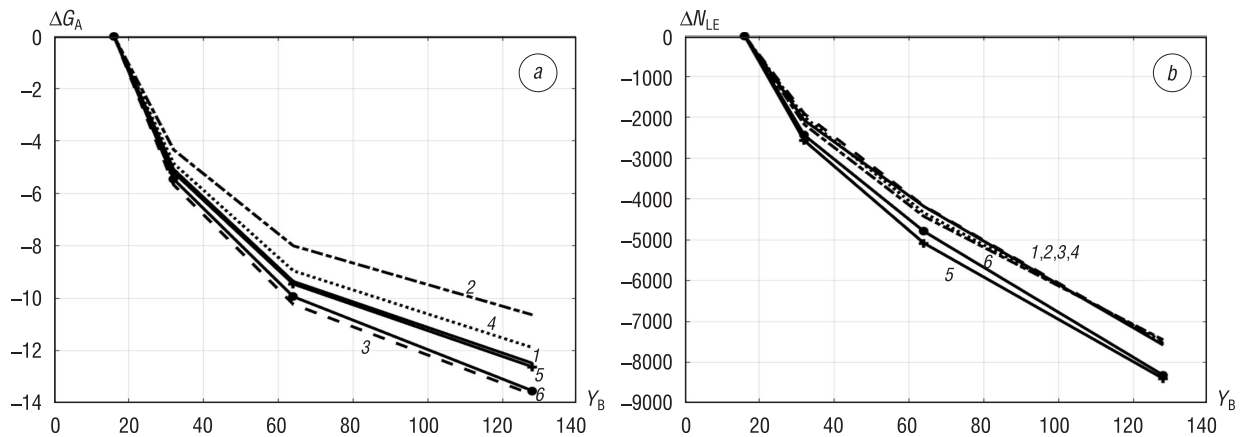


Рис. 5. Зависимости разностей показателей качества воспроизведения (*a* – $\Delta G_A = G_A(Y_B) - G_A(Y_{B2})$) и детализации изображения (*b* – $\Delta N_{LE} = N_{LE}(Y_B) - N_{LE}(Y_{B2})$) от Y_B для средних значений перестраиваемых параметров алгоритма HECS, $Y_B = \{16, 32, 64, 128\}$, $Y_{B2} = 16$: кривая 1 – $G_L = 1, T = 0,1, T_L = 2$; кривая 2 – $K_G = 0,5, G_L = 2, T = 0,2, T_L = 1$; кривая 3 – $G_L = 1, T_L = 1, T = 0,2$; кривая 4 – $K_G = 0,5, G_L = 1,5, T_L = 1, T = 0,2$; кривая 5 – $K_G = 0,5, T = 0,3, T_L = 1, G_L = 1,4$; кривая 6 – $G_L = 1,2, T = 0,3, T_L = 1, K_G = 0,5$

Fig. 5. Dependences of the differences between the indicators of reproduction quality (*a* – $\Delta G_A = G_A(Y_B) - G_A(Y_{B2})$) and detailing of image (*b* – $\Delta N_{LE} = N_{LE}(Y_B) - N_{LE}(Y_{B2})$) on the Y_B for the average values of the tunable parameters of the HECS algorithm, $Y_B = \{16, 32, 64, 128\}$, $Y_{B2} = 16$: curve 1 – $G_L = 1, T = 0.1, T_L = 2$; curve 2 – $K_G = 0.5, G_L = 2, T = 0.2, T_L = 1$; curve 3 – $G_L = 1, T_L = 1, T = 0.2$; curve 4 – $K_G = 0.5, G_L = 1.5, T_L = 1, T = 0.2$; curve 5 – $K_G = 0.5, T = 0.3, T_L = 1, G_L = 1.4$; curve 6 – $G_L = 1.2, T = 0.3, T_L = 1, K_G = 0.5$

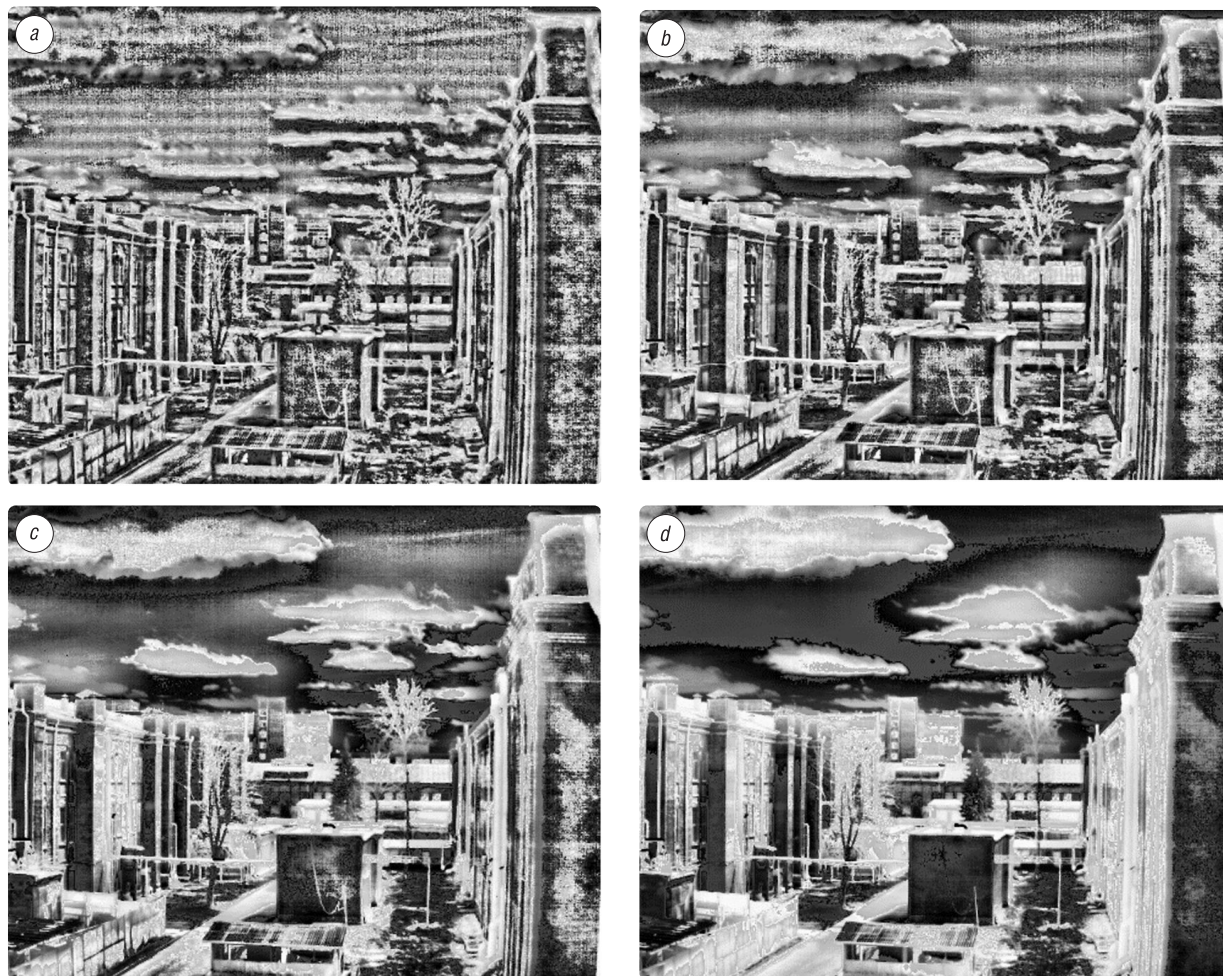


Рис. 6. Преобразованные ИК-изображения при различных размерах блоков: $a - 16 \times 16$, $b - 32 \times 32$, $c - 64 \times 64$, $d - 128 \times 128$
 Fig. 6. Converted infrared images at different block sizes: $a - 16 \times 16$, $b - 32 \times 32$, $c - 64 \times 64$, $d - 128 \times 128$

Таблица 4. Средние выигрыши в глобальных характеристиках ИК-изображений после преобразования динамического диапазона для алгоритма HECS по сравнению с АНЕ и CLАНЕ

Table 4. The average gains in the global characteristics of the IR image after converting the dynamic range for HECS algorithm compared with АНЕ CLАНЕ

Y_B	Средние выигрыши (%) в сравнении с АНЕ				Средние выигрыши (%) в сравнении с CLАНЕ			
	\widehat{D}_{ST}	\widehat{G}_A	\widehat{E}_I	\widehat{N}_{LE}	\widehat{D}_{ST}	\widehat{G}_A	\widehat{E}_I	\widehat{N}_{LE}
32	8,4	15,4	28,0	11,2	11,1	18,8	37,2	10,5
64	7,0	41,0	44,9	15,8	9,9	46,0	50,1	15,8

В табл. 4 приведены выигрыши (в процентах) алгоритма HECS по сравнению с алгоритмами АНЕ и CLАНЕ по контрастности \widehat{D}_{ST} , среднему градиенту \widehat{G}_A , энтропии \widehat{E}_I и количеству локальных экстремумов \widehat{N}_{LE} , усредненные по блокам 64×64 пикселей и 94 ландшафтными ИК-изображениям, при $Y_B = \{32, 64\}$, $L_{HDR} = 14$, $L_{LDR1} = 10$, $L_{LDR2} = 8$.

Для вычисления выигрышей использованы следующие выражения:

$$\widehat{D}_{ST} = 100(D_{ST}^{HECS} - D_{ST}^Z) / D_{ST}^Z, \quad (14)$$

$$\widehat{G}_A = 100(G_A^{HECS} - G_A^Z) / G_A^Z, \quad (15)$$

$$\widehat{E}_I = 100((8 - E_I^Z) - (8 - E_I^{HECS})) / (8 - E_I^Z), \quad (16)$$

$$\widehat{N}_{LE} = 100(N_{LE}^{HECS} - N_{LE}^Z) / N_{LE}^Z, \quad (17)$$

где $Z = \{АНЕ, CLАНЕ \text{ (порог } 0,7)\}$.

Из табл. 4 следует, что с увеличением размера блока для адаптивного выравнивания гистограммы выигрыши \widehat{G}_A , \widehat{E}_I , \widehat{N}_{LE} алгоритма HECS по отношению к алгоритмам АНЕ и CLАНЕ увеличиваются, а \widehat{D}_{ST} – уменьшаются.

Заклучение. Для повышения качества и расширения интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений при уменьшении их динамического диапазона предложен алгоритм на основе адаптивного выравнивания, растяжения и сжатия гистограммы. Сущность алгоритма состоит в двойном уменьшении динамического диапазона изображения с промежуточным управлением формой его гистограммы за счет ее частичного растяжения и сжатия.

По сравнению с известными алгоритмами адаптивного выравнивания гистограммы предложенный алгоритм обеспечивает повышение контрастности, среднего градиента, энтропии и детализации после преобразования динамического диапазона ИК-изображения. Выигрыши достигаются за счет увеличения вычислительной сложности.

Список использованных источников

1. Enhancement of low illumination images based on an optimal hyperbolic tangent profile / S. C. Liu [et al.] // *Comput. Electr. Eng.* – 2018. – Vol. 70. – P. 538–550. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.08.026>
2. Zhi, N. An enhancement algorithm for coal mine low illumination images based on bi-Gamma function / N. Zhi, S. Mao, M. Li // *J. Liaoning Tech. Univ.* – 2018. – Vol. 37, № 1. – P. 191–197. <https://doi.org/10.11956/j.issn.1008-0562.2018.01.034>
3. Nithyananda, C.R. Review on Histogram Equalization based Image Enhancement Techniques / C.R. Nithyananda, A. C. Ramachandra, Preethi // *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. – Chennai, 2016. – P. 2512–2517. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755145>
4. Kim, T.K. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering / T.K. Kim, J.K. Paik, B.S. Kang // *IEEE Trans. Consum. Electron.* – 1998. – Vol. 44, №1. – P. 82–87. <https://doi.org/10.1109/30.663733>
5. Reza, A.M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement / A. M. Reza // *Journal of VLSI Signal Process.-Syst. Signal Image Video Technol.* – 2004. – Vol. 38, № 1. – P. 35–44. <https://doi.org/10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82>
6. Nandal, A. Contrast-based image enhancement algorithm using greyscale and color space / A. Nandal, V. Bhaskar, A. Dhaka // *IET Signal Process.* – 2018. – Vol. 12, №4. – P. 514–521. <https://doi.org/10.1049/iet-spr.2017.0272>
7. Xu, Q. Low-light image enhancement algorithm based on the wavelet transform and Retinex theory / Q. Xu, J. Cui, B. Chen // *J. Hunan Univ. Arts Sci.* – 2017. – Vol. 29, №2. – P. 41–46. <https://doi.org/10.1007/s11801-018-8046-5>
8. Low-Light Image Enhancement via a Deep Hybrid Network / W. Ren [et al.] // *IEEE Trans. Image Process.* – 2019. – Vol. 28, №9. – P. 4364–4375. <https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2910412>
9. Fast Image Enhancement Based on Maximum and Guided Filters / D. Zhu [et al.] // *2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. – Taipei, 2019. – P. 4080–4084. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2019.8803591>
10. Kim, J.-Y. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization / J.-Y. Kim, L.-S. Kim, S.-H. Hwang // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. – 2001. – Vol. 11, №4. – P. 475–484. <https://doi.org/10.1109/76.915354>
11. Huang, S.-C. Image contrast enhancement for preserving mean brightness without losing image features / S.-C. Huang, C.-H. Yeh // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2013. – Vol. 26, №5. – P. 1487–1492. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.11.011>
12. Al-Sammarai, M.F. Contrast enhancement of roads images with foggy scenes based on histogram equalization / M.F. Al-Sammarai // *10th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE)*. – Cambridge, 2015. – P. 95–101. <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2015.7250224>

References

1. Liu S. C., Liu S., Wu H., Rahman Md. A., Ching-Feng Lin S., Wong C. Y., Kwok N., Shi H. Enhancement of low illumination images based on an optimal hyperbolic tangent profile. *Computers & Electrical Engineering*, 2018, vol. 70, pp. 538–550. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.08.026>
2. Zhi N., Mao S., Li M. An enhancement algorithm for coal mine low illumination images based on bi-Gamma function. *Journal of Liaoning Technical University*, 2018, vol. 37, no. 1, pp. 191–197. <https://doi.org/10.11956/j.issn.1008-0562.2018.01.034>
3. Nithyananda C. R., Ramachandra A. C., Preethi. Review on Histogram Equalization based Image Enhancement Techniques. *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. Chennai, 2016, pp. 2512–2517. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755145>
4. Kim T. K., Paik J. K., Kang B. S. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1998, vol. 44, no. 1, pp. 82–87. <https://doi.org/10.1109/30.663733>
5. Reza A. M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement. *The Journal of VLSI Signal Processing-Systems for Signal, Image, and Video Technology*, 2004, vol. 38, no. 1, pp. 35–44. <https://doi.org/10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82>
6. Nandal A., Bhaskar V., Dhaka A. Contrast-based image enhancement algorithm using greyscale and color space. *IET Signal Processing*, 2018, vol. 12, no. 4, pp. 514–521. <https://doi.org/10.1049/iet-spr.2017.0272>

7. Xu Q., Cui J., Chen B. Low-light image enhancement algorithm based on the wavelet transform and Retinex theory. *Journal of Human University, Arts Science*, 2017, vol. 29, no. 2, pp. 41–46. <https://doi.org/10.1007/s11801-018-8046-5>
8. Ren W., Liu S., Ma L., Xu Q., Xu X., Cao X., Du J., Yang M.-H. Low-Light Image Enhancement via a Deep Hybrid Network. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, vol. 28, no. 9, pp. 4364–4375. <https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2910412>
9. Zhu D., Chen G., Michelini P.N., Liu H. Fast Image Enhancement Based on Maximum and Guided Filters. *2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Taipei, 2019, pp. 4080–4084. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2019.8803591>
10. Kim J.-Y., Kim L.-S., Hwang S.-H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, vol. 11, no. 4, pp. 475–484. <https://doi.org/10.1109/76.915354>
11. Huang S.-C., Yeh C.-H. Image contrast enhancement for preserving mean brightness without losing image features. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, vol. 26, no. 5, pp. 1487–1492. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.11.011>
12. Al-Sammaraiya M.F. Contrast enhancement of roads images with foggy scenes based on histogram equalization. *10th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE)*. Cambridge, 2015, pp. 95–101. <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2015.7250224>

Информация об авторах

Рудиков Станислав Игоревич – магистр технических наук, заместитель директора по информационным технологиям, унитарное предприятие «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО» (ул. Макаенка 23/1, 220114, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-9612-9487>. E-mail: stanislav.rudikov@gmail.com

Цветков Виктор Юрьевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vtsvet@bsuir.by

Шкадаревич Алексей Петрович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, директор унитарного предприятия «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО» (ул. Макаенка, 23/1, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@lemt.by

Information about the authors

Stanislav I. Rudikov – Master of Engineering, Information Technology Deputy Director, Unitary Enterprise “STC “LEMT” BelOMO” (23/1, Makayonok Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-9612-9487>. E-mail: stanislav.rudikov@gmail.com

Viktar Yu. Tsviatkou – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Infocommunications, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vtsvet@bsuir.by

Alexey P. Shkadarevich – Academician of the National Academy of Science of Belarus, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, CEO of Unitary Enterprise “STC “LEMT” BelOMO” (23/1, Makayonok Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@lemt.by