

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕЧИ, ТЕКСТА И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION



УДК 004.932
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-2-7-25>

Оригинальная статья
Original Paper

Уменьшение динамического диапазона инфракрасных изображений на основе блочно-приоритетного выравнивания и сжатия гистограмм

С. И. Рудиков^{1✉}, В. Ю. Цветков², А. П. Шкадаревич¹

¹Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО,
ул. Макаенка, 23, корп.1, Минск, 220114, Беларусь
✉E-mail: stanislav.rudikov@gmail.com

²Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Аннотация

Цели. Рассматривается задача уменьшения динамического диапазона инфракрасных изображений для их воспроизведения на устройствах отображения с узким динамическим диапазоном. Исследуется метод адаптивного выравнивания гистограммы изображения на основе интегральной функции распределения яркости. Для преобразования яркости пиксела этот метод использует аппроксимацию локальных значений выравнивания ближайших блоков пикселей, на которые делится исходное изображение. Это повышает локальный контраст изображения, но приводит к высокой вычислительной сложности, которая растет с уменьшением размера блока. Целью работы является снижение вычислительной сложности адаптивного выравнивания и сжатия гистограмм инфракрасных изображений при уменьшении их динамического диапазона.

Методы. Используются методы обработки изображений.

Результаты. Для уменьшения вычислительной сложности преобразования динамического диапазона инфракрасных изображений предложена блочно-приоритетная модификация метода адаптивного выравнивания гистограммы. Модификация основана на разделении множества блоков изображения на подмножества высокоприоритетных и низкоприоритетных блоков в зависимости от их яркостных статистических свойств. При интерполяции значений пикселей для высокоприоритетных блоков используются локальные значения выравнивания, а для низкоприоритетных блоков – общие значения выравнивания. В результате общее число векторов выравнивания сокращается пропорционально соотношению размеров подмножеств и снижается вычислительная сложность преобразования динамического диапазона.

Заключение. При изменении отношения количества высокоприоритетных блоков пикселей инфракрасного изображения к количеству всех блоков в диапазоне 0,25–0,75 предложенный алгоритм более эффективен по сравнению с алгоритмами глобального и адаптивного выравнивания гистограммы.

Ключевые слова: динамический диапазон, инфракрасные изображения, выравнивание гистограммы, сжатие гистограммы, адаптивное выравнивание

Для цитирования. Рудиков, С. И. Уменьшение динамического диапазона инфракрасных изображений на основе блочно-приоритетного выравнивания и сжатия гистограмм / С. И. Рудиков, В. Ю. Цветков, А. П. Шкадаревич // Информатика. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 7–25.

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-2-7-25>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 29.03.2022

Подписана в печать | Accepted 11.04.2022

Опубликована | Published 29.06.2022

Reducing the dynamic range of infrared images based on block-priority equalization and compression of histograms

Stanislav I. Rudikov^{1✉}, Viktor Yu. Tsviatkou², Alexey P. Shkadarevich¹

¹Scientific and Technical Center LEMT of the BelOMO,
st. Makayonok 23/1, Minsk, 220114, Belarus

✉E-mail: stanislav.rudikov@gmail.com

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
st. P. Brovki, 6, Minsk, 220013, Belarus

Abstract

Objectives. The problem of reducing the dynamic range of infrared images for their reproduction on display devices with a narrow dynamic range is considered. The method of local image histogram equalization based on the integral distribution function of brightness is investigated. To transform the brightness of a pixel, this method uses an approximation of the local alignment values of the nearest blocks of pixels of original image. This increases the local contrast of the image, but leads to high computational complexity, which is increasing while block size decreases. The aim of the work is to reduce the computational complexity of adaptive equalization and compression of infrared image histograms while reducing their dynamic range.

Methods. Image processing methods are used.

Results. To reduce the computational complexity of transforming the dynamic range of infrared images, a block-priority modification of the adaptive histogram equalization method is proposed. The modification is based on the division of the set of image blocks into two subsets of high-priority and low-priority blocks depending on their brightness statistical properties. When interpolating pixel values, high-priority blocks use local alignment values, and low-priority blocks use global alignment values. As a result, the total number of alignment vectors is reduced in proportion to the ratio of subsets sizes and the computational complexity of the dynamic range transformation is reduced.

Conclusion. When changing the ratio of the number of high-priority blocks of infrared image pixels to the number of all blocks in the range of 0.25–0.75, the proposed algorithm is more efficient than global and adaptive histogram equalization algorithms.

Keywords: dynamic range, infrared images, histogram equalization, histogram compression, adaptive equalization

For citation. Rudikov S. I., Tsviatkou V. Yu., Shkadarevich A. P. *Reducing the dynamic range of infrared images based on block-priority equalization and compression of histograms*. Informatika [Informatics], 2022, vol. 19, no. 2, pp. 7–25 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-2-7-25>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Для воспроизведения инфракрасных (ИК) изображений, имеющих широкий динамический диапазон (от 0 до $2^{16}-1$ уровней яркости), на стандартных устройствах отображения с более узким динамическим диапазоном (как правило, от 0 до 2^8-1 уровней яркости) осуществляется сжатие динамического диапазона ИК-изображений. Такое преобразование

выполняется также для медицинских, спутниковых оптических и радарных изображений и называется тоновым отображением [1–3]. Исследования в данной области направлены на минимизацию потерь информации в результате сжатия динамического диапазона и уменьшение вычислительной сложности преобразования. Низкую вычислительную сложность и высокую равномерность гистограммы результирующего изображения обеспечивают глобальные преобразования. Хорошо сохраняя семантику исходного изображения, они, однако, теряют локальный контраст и мелкие детали. Локальные преобразования имеют более высокую вычислительную сложность и не позволяют выровнять гистограмму всего изображения, но повышают локальный контраст и разборчивость мелких деталей. Большинство методов тонового отображения являются гибридными и используют нелинейное квантование [3–6], выравнивание и ограничение гистограммы [6–8], представление изображений в нескольких разрешениях с помощью гауссовой и билатеральной фильтрации, карт прозрачности [5, 8–13], вейвлет-преобразование [12], семантическую сегментацию [14], кластеризацию [15], линейную интерполяцию [13], локальные экстремумы [11], вероятностные модели [16], модели человеческого восприятия [17], искусственные нейронные сети [18].

Для ИК-изображений, применяемых в системах оптического наведения, важно сохранение детализации и локального контраста при сжатии динамического диапазона, а также улучшение видимости в темных и светлых областях даже за счет нарушения семантики восприятия. Дополнительным требованием к преобразованию в таких системах является низкая вычислительная сложность. Поэтому методы тонового отображения ИК-изображений используют преимущественно выравнивание гистограммы [19, 20], представление изображений в нескольких разрешениях с помощью гауссовой и билатеральной фильтрации [19–22] и нелинейное квантование [22], имеющие относительно невысокую вычислительную сложность и уменьшающие потери в локальном контрасте при сжатии динамического диапазона. Высокий локальный контраст и сохранение детализации в темных и светлых областях обеспечивает метод адаптивного выравнивания гистограммы (Adaptive Histogram Equalization, AHE) [23]. Как и метод глобального выравнивания гистограммы (Histogram Equalization, HE) [24], метод AHE применяет интегральную функцию распределения яркостей для формирования значений выравнивания. Отличие этих методов заключается в том, что для преобразования яркости пиксела метод HE использует глобальное значение выравнивания, формируемое на основе яркости всего изображения, а метод AHE – аппроксимацию локальных значений выравнивания ближайших блоков пикселей, на которые делится исходное изображение. Это позволяет повысить локальный контраст изображения, но приводит к высокой вычислительной сложности, которая растет с уменьшением размера блока и, соответственно, увеличением количества блоков. Данный недостаток характерен для большинства модификаций метода AHE.

Целью исследования является снижение вычислительной сложности адаптивного выравнивания и сжатия гистограмм ИК-изображений при уменьшении их динамического диапазона.

Постановка задачи. В алгоритме HE глобального выравнивания гистограммы исходное изображение $I_{\text{HDR}} = \|i_{\text{HDR}}(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ размером $Y \times X$ пикселей с динамическим диапазоном $[0, L_{\text{HDR}} - 1]$ (L_{HDR} – количество уровней квантования исходного изображения I_{HDR}) преобразуется в изображение $I_{\text{HE}}(L_{\text{LDR}}) = \|i_{\text{HE}}(L_{\text{LDR}}, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ 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 $H_{\text{E}}(L_{\text{LDR}}) = \|h_{\text{E}}(L_{\text{LDR}}, l)\|_{(l=0, \overline{L_{\text{HDR}}-1})}$ выравнивания по значениям пикселей исходного изображения I_{HDR} (рис. 1) с помощью выражения

$$i_{\text{HE}}(L_{\text{LDR}}, y, x) = h_{\text{E}}(L_{\text{LDR}}, i_{\text{HDR}}(y, x)) \quad (1)$$

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

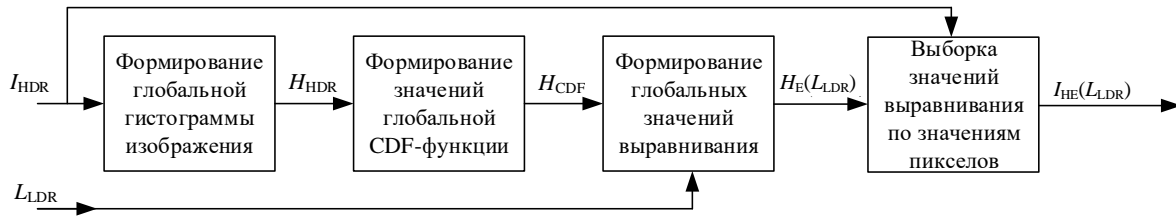


Рис. 1. Преобразование динамического диапазона изображения на основе глобального выравнивания гистограммы HE

Fig. 1. Image dynamic range converting based on global histogram equalization HE

Значения вектора $H_E(L_{LDR})$ выравнивания вычисляются на основе вектора $H_{CDF} = \|h_{CDF}(l)\|_{(l=0, L_{HDR}-1)}$ значений интегральной функции распределения яркостей (Scattering Distribution Function, CDF) с помощью уравнения

$$h_E(L_{LDR}, l) = \left\lfloor \frac{(L_{LDR} - 1) \cdot (h_{CDF}(l) - \min(H_{CDF}))}{(YX - \min(H_{CDF}))} \right\rfloor \quad (2)$$

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

Для уменьшения динамического диапазона исходного изображения I_{HDR} количество уровней квантования L_{HDR} и L_{LDR} ограничено условием $L_{HDR} > L_{LDR}$.

Алгоритм HE имеет значительно меньшую вычислительную сложность по сравнению с другими алгоритмами выравнивания гистограммы.

Временная сложность C_T^{HE} алгоритма HE определяется количеством операций обращения к памяти при загрузке исходного изображения I_{HDR} (YX операций); при формировании глобальной гистограммы H_{HDR} (YX операций), значений глобальной интегральной функции H_{CDF} распределения яркостей (L_{HDR} операций), глобальных значений $H_E(L_{LDR})$ выравнивания (L_{HDR} операций); при выборке значений выравнивания (YX операций) и выгрузке преобразованного изображения $I_{HE}(L_{LDR})$ (YX операций) с помощью выражения

$$C_T^{HE} = 4YX + 2L_{HDR}. \quad (3)$$

Пространственная сложность C_S^{HE} алгоритма HE определяется объемом оперативной памяти, необходимой для загрузки исходного изображения I_{HDR} ($YX \log_2(L_{HDR})$ бит); для формирования глобальной гистограммы H_{HDR} ($L_{HDR} \log_2(YX)$ бит), значений глобальной интегральной функции H_{CDF} распределения яркостей ($L_{HDR} \log_2(YX)$ бит), глобальных значений $H_E(L_{LDR})$ выравнивания ($L_{HDR} \log_2(YX)$ бит); для выборки значений выравнивания и формирования преобразованного изображения $I_{HE}(L_{LDR})$ ($YX \log_2(L_{LDR})$ бит), с помощью равенства

$$C_S^{HE} = 3L_{HDR} \log_2(YX) + YX (\log_2(L_{HDR}) + \log_2(L_{LDR})). \quad (4)$$

Выравнивание гистограммы с помощью алгоритма HE 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 $I_{HE}(L_{LDR})$ (рис. 2).

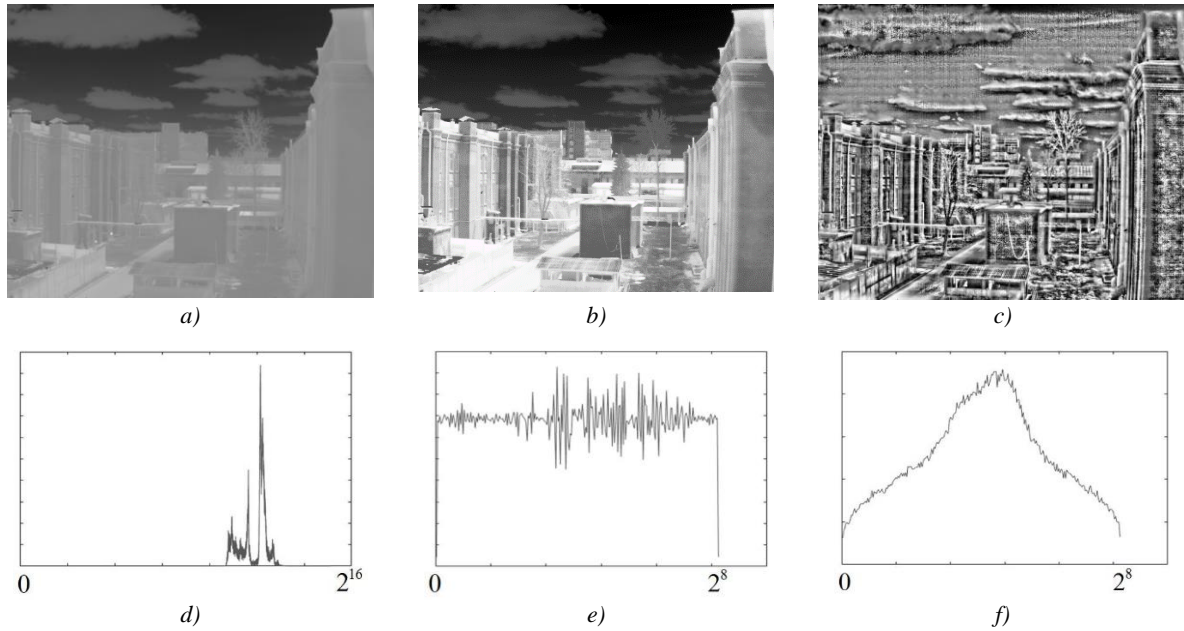


Рис. 2. ИК-изображения и их гистограммы: а) исходное изображение I_{HDR} ; б) преобразованное изображение $I_{HE}(L_{LDR})$; в) преобразованное изображение $I_{AHE}(L_{LDR})$ при $Y_B = 16$; д) гистограмма изображения I_{HDR} ; е) гистограмма изображения $I_{HE}(L_{LDR})$; ф) гистограмма изображения $I_{AHE}(L_{LDR})$

Fig. 2. IR-images and histograms: а) original image I_{HDR} ; б) modified image $I_{HE}(L_{LDR})$; в) modified image $I_{AHE}(L_{LDR})$ for $Y_B = 16$; д) image histogram I_{HDR} ; е) image histogram $I_{HE}(L_{LDR})$; ф) image histogram $I_{AHE}(L_{LDR})$

В алгоритме АНЕ адаптивного (блочного) выравнивания гистограммы 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 (рис. 3), для центров которых с помощью выражения (2) формируются векторы $H_E(y_B, x_B, L_{LDR}) = \|h_E(y_B, x_B, L_{LDR}, l)\|_{(l=0, L_{HDR}-1)}$ выравнивания в пределах блока, где y_B, x_B – координаты блока, $y_B = \overline{0, B_Y - 1}$, $x_B = \overline{0, B_X - 1}$. Затем на основе одного, двух или четырех (в зависимости от положения пиксела на изображении) значений векторов выравнивания смежных блоков интерполируются выравненные значения $i_{AHE}(L_{LDR}, y, x)$ пикселей изображения $I_{AHE}(L_{LDR})$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR} - 1]$, что позволяет снизить вычислительную сложность преобразования. В центральной части изображения выравненные значения пикселей интерполируются на основе векторов выравнивания четырех смежных блоков с помощью выражения

$$i_{AHE}(L_{LDR}, y, x) = c_{00}h_E(y_B, x_B, L_{LDR}, i_{HDR}(y, x)) + c_{10}h_E(y_B + 1, x_B, L_{LDR}, i_{HDR}(y, x)) + c_{01}h_E(y_B, x_B + 1, L_{LDR}, i_{HDR}(y, x)) + c_{11}h_E(y_B + 1, x_B + 1, L_{LDR}, i_{HDR}(y, x)) \quad (5)$$

при $y = \overline{y_B Y_B, (y_B + 1) Y_B - 1}$, $x = \overline{x_B X_B, (x_B + 1) X_B - 1}$, $y_B = \overline{1, B_Y - 2}$, $x_B = \overline{1, B_X - 2}$, 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 в выравненное значение пиксела $i_{AHE}(L_{LDR}, y, x)$.

Разделение изображения на блоки в АНЕ позволяет адаптироваться к структуре изображения и повысить локальный контраст, хотя не обеспечивает равномерность глобальной гистограммы (см. рис. 2, *c, f*).

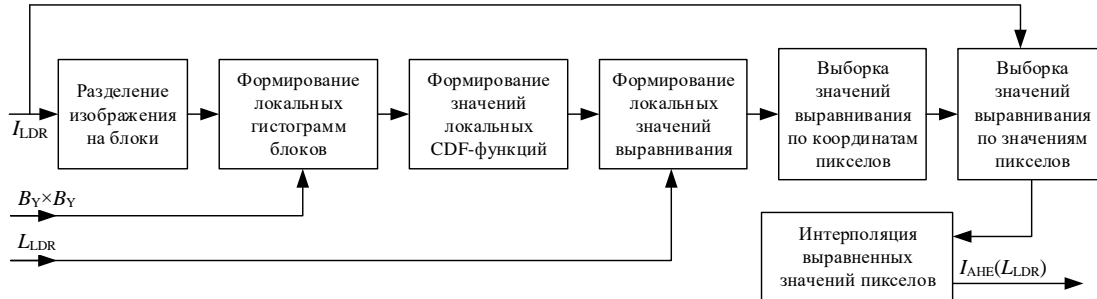


Рис. 3. Преобразование динамического диапазона изображения на основе адаптивного выравнивания гистограммы АНЕ

Fig. 3. Image dynamic range converting based on adaptive histogram equalization AHE

Для оценки эффективности алгоритмов тонового отображения широко используются показатели статистической естественности (Statistical Naturalness, SN) [25], структурной точности (Structural Fidelity, SF) [26], качества тональной карты (Tone Mapped image Quality Index, TMQI) [27]. Для изображения на рис. 2, *a* алгоритм HE обеспечивает $SN = 0,0514$, $SF = 0,7873$, $TMQI = 0,7693$. Алгоритм АНЕ позволяет улучшить показатели SN и TMQI. Для изображения на рис. 2, *a* алгоритм АНЕ обеспечивает $SN = 0,6134$, $SF = 0,6243$, $TMQI = 0,8347$ при размере блока обработки 16×16 пикселей и $SN = 0,6988$, $SF = 0,4689$, $TMQI = 0,7903$ при размере блока обработки 10×10 пикселей, т. е. алгоритм АНЕ, повышая локальный контраст и сохраняя детализацию в темных и светлых областях, выигрывает в естественности и интегральной оценке качества по сравнению с алгоритмом HE, проигрывает ему в структурной точности. Показатель TMQI является интегральным, поскольку учитывает SN и SF. Поэтому при уменьшении размера блока в АНЕ показатель TMQI уменьшается из-за более резкого уменьшения SF по сравнению с ростом SN. При акцентировании внимания на детализации более однозначную оценку качества тонового отображения ИК-изображений дают контраст D_{ST} , средний градиент G_A и энтропия E_1 . Такие оценки могут быть получены усреднением по достаточно большим блокам, например 64×64 пикселей. Для изображения на рис. 2, *a* алгоритм HE обеспечивает $D_{ST} = 32,85$, $G_A = 4,64$, $E_1 = 6,16$. Алгоритм АНЕ обеспечивает $D_{ST} = 58,29$, $G_A = 19,33$, $E_1 = 7,70$ при размере блока обработки 16×16 пикселей и $D_{ST} = 59,10$, $G_A = 24,09$, $E_1 = 7,75$ при размере блока обработки 10×10 пикселей.

Качество тонового отображения ИК-изображений с помощью алгоритма АНЕ, оцениваемое локальным контрастом и детализацией в темных и светлых областях, возрастает при уменьшении размера блока. Для систем оптического наведения достаточно высокое качество обеспечивается при размерах блоков в диапазоне $8 \times 8 - 16 \times 16$ пикселей. При этом существенно увеличивается вычислительная сложность по сравнению с алгоритмом HE.

Временная сложность C_T^{ANE} алгоритма АНЕ определяется количеством операций обращения к памяти при загрузке исходного изображения I_{HDR} (YX операций); формировании локальных гистограмм $H_{HDR}(y_B, x_B)$ (YX операций), значений локальных интегральных функций $H_{CDF}(y_B, x_B)$ распределения яркостей ($L_{HDR} B_Y B_X$ операций), локальных векторов $H_E(y_B, x_B, L_{LDR})$ выравнивания ($L_{HDR} B_Y B_X$ операций); при выборке значений выравнивания (YX операций); интерполяции выравненных значений пикселей (YX операций) и выгрузке преобразованного изображения $I_{ANE}(L_{LDR})$ (YX операций) с помощью выражения

$$C_T^{ANE} = 5YX + 2L_{HDR} B_Y B_X. \quad (6)$$

Пространственная сложность $C_S^{\text{АНЕ}}$ алгоритма АНЕ определяется объемом оперативной памяти, необходимой для загрузки исходного изображения I_{HDR} ($YX \log_2(L_{\text{HDR}})$ бит); формирования локальных гистограмм $H_{\text{HDR}}(y_B, x_B)$ ($L_{\text{HDR}} \log_2(Y_B X_B)$ бит), локальных интегральных функций $H_{\text{CDF}}(y_B, x_B)$ распределения яркостей ($L_{\text{HDR}} \log_2(Y_B X_B)$ бит), локальных значений $H_E(y_B, x_B, L_{\text{LDR}})$ выравнивания ($L_{\text{HDR}} B_Y B_X \log_2(Y_B X_B)$ бит); выборки значений выравнивания; интерполяции значений пикселей и формирования преобразованного изображения $I_{\text{АНЕ}}(L_{\text{LDR}})$ ($YX \log_2(L_{\text{LDR}})$ бит), с помощью выражения

$$C_S^{\text{АНЕ}} = L_{\text{HDR}} (2 + B_Y B_X) \log_2(Y_B X_B) + YX (\log_2(L_{\text{HDR}}) + \log_2(L_{\text{LDR}})). \quad (7)$$

В табл. 1 приведены значения вычислительной сложности алгоритмов НЕ и АНЕ для ИК-изображений размером 480×640 пикселей при $L_{\text{HDR}} = 2^{16}$, $L_{\text{LDR}} = 2^8$ и $Y_B = \{10, 16\}$.

Таблица 1

Вычислительная сложность алгоритмов НЕ и АНЕ в зависимости от размера блока по вертикали Y_B

Table 1

Computational complexity of HE and AHE algorithms in dependence with vertical block size Y_B

Y_B	Временная сложность алгоритмов <i>Temporary algorithm complexity</i>		Пространственная сложность алгоритмов <i>Spatial algorithm complexity</i>	
	АНЕ	НЕ	АНЕ	НЕ
10	672 624 640	1 359 872	2 237 551 831	10 956 732
16	213 872 640		857 767 936	

Как видно из табл. 1, вычислительная сложность алгоритма АНЕ значительно выше вычислительной сложности алгоритма НЕ, что обусловлено необходимостью хранения значений векторов $H_E(y_B, x_B, L_{\text{LDR}})$ выравнивания для $B_Y B_X$ блоков. При размере блока 16×16 пикселей алгоритм АНЕ проигрывает алгоритму НЕ во временной сложности в 157 раз, в пространственной сложности – в 78 раз. С уменьшением размера блока вычислительная сложность алгоритма АНЕ быстро растет, в то время как вычислительная сложность алгоритма НЕ не меняется. При размере блока 10×10 пикселей алгоритм АНЕ проигрывает алгоритму НЕ во временной сложности в 495 раз, а в пространственной сложности – в 204 раза. При такой высокой вычислительной сложности реализация алгоритма АНЕ в реальном времени возможна только на графическом процессоре или ПЛИС. В связи с этим актуальной является задача разработки алгоритма уменьшения динамического диапазона ИК-изображений на основе локального выравнивания и сжатия гистограмм, обеспечивающего более высокий локальный контраст после преобразования по сравнению с алгоритмом НЕ, но имеющего меньшую вычислительную сложность по сравнению с алгоритмом АНЕ.

Математическая модель, структура и алгоритм блочно-приоритетного выравнивания и сжатия гистограмм ИК-изображений. Для повышения эффективности преобразования динамического диапазона ИК-изображений предлагается блочно-приоритетное выравнивание и сжатие гистограмм (Block-Priority Histogram Equalization, ВРНЕ), основанное на разделении множества всех блоков изображения на два подмножества высокоприоритетных и низкоприоритетных блоков в зависимости от их яркостных статистических свойств и использовании при интерполяции значений пикселей формируемого изображения с узким динамическим диапазоном локальных векторов $H_E(y_B, x_B, L_{\text{LDR}})$ выравнивания для $B_Y B_X K_B$ высокоприоритетных блоков и общего вектора $H_E(L_{\text{LDR}})$ выравнивания для $B_Y B_X (1 - K_B)$ низкоприоритетных блоков, где K_B – коэффициент, определяющий часть блоков, для которых реализуется локальное выравнивание гистограмм. В результате общее число векторов выравнивания сокращается

и снижается вычислительная сложность преобразования динамического диапазона пропорционально отношению количества высокоприоритетных блоков к количеству всех блоков.

При блочно-приоритетном выравнивании и сжатии гистограмм осуществляется упорядочивание $B_Y \times B_X$ блоков исходного изображения I_{HDR} , имеющих размер $Y_B \times X_B$ пикселей по вертикали и горизонтали, по убыванию приоритета. В качестве показателя приоритета могут применяться контраст (стандартное отклонение) $D_{\text{ST}}(y_B, x_B)$, энтропия $E_1(y_B, x_B)$ и другие оценки качества. При использовании контраста или энтропии в качестве высокоприоритетных определяются первые $B_Y B_X K_B$ низкоконтрастных (низкоэнтропийных) блоков. Остальные $B_Y B_X (1 - K_B)$ высококонтрастных (высокоэнтропийных) блоков считаются низкоприоритетными. Для вычисления контраста $D_{\text{ST}}(y_B, x_B)$ и энтропии $E_1(y_B, x_B)$ блоков используются равенства

$$D_{\text{ST}}(y_B, x_B) = \sqrt{\frac{1}{Y_B X_B} \sum_{y=y_B Y_B}^{(y_B+1)Y_B-1} \sum_{x=x_B X_B}^{(x_B+1)X_B-1} (i_{\text{HDR}}(y, x) - V_M(y_B, x_B))^2}, \quad (8)$$

$$E_1(y_B, x_B) = - \sum_{l=0}^{L_{\text{HDR}}-1} P(i_{\text{HDR}}(l)) \log_2 P(i_{\text{HDR}}(l)), \quad (9)$$

где $V_M(y_B, x_B)$ – средняя яркость блока, $V_M(y_B, x_B) = \frac{1}{Y_B X_B} \sum_{y=y_B Y_B}^{(y_B+1)Y_B-1} \sum_{x=x_B X_B}^{(x_B+1)X_B-1} i_{\text{HDR}}(y, x)$;

$P(i_{\text{HDR}}(l))$ – вероятность пиксела со значением l .

Для упорядочивания блоков по убыванию приоритета формируются множества $Y_B^{\text{D}} = \left\| y_B^{\text{D}}(i) \right\|_{(i=0, \overline{B_Y B_X - 1})}$ и $X_B^{\text{D}} = \left\| x_B^{\text{D}}(i) \right\|_{(i=0, \overline{B_Y B_X - 1})}$ координат блоков, для элементов которых справедливы условия

$$(j > i) \Rightarrow \left(D_{\text{ST}}(y_B^{\text{D}}(i), x_B^{\text{D}}(i)) \geq D_{\text{ST}}(y_B^{\text{D}}(j), x_B^{\text{D}}(j)) \right), \quad (10)$$

$$(j > i) \Rightarrow \left(E_1(y_B^{\text{D}}(i), x_B^{\text{D}}(i)) \geq E_1(y_B^{\text{D}}(j), x_B^{\text{D}}(j)) \right) \quad (11)$$

при $i = \overline{0, B_Y B_X - 1}$, $j = \overline{0, B_Y B_X - 1}$.

Множество координат $\{Y_B^{\text{D}}, X_B^{\text{D}}\}$ блоков разделяется на два подмножества высокоприоритетных $\left\{ Y_B^{\text{DL}} = \left\| y_B^{\text{DL}}(i) \right\|_{(i=0, \overline{[B_Y B_X K_B] - 1})}, X_B^{\text{DL}} = \left\| x_B^{\text{DL}}(i) \right\|_{(i=0, \overline{[B_Y B_X K_B] - 1})} \right\}$ и низкоприоритетных $\left\{ Y_B^{\text{DH}} = \left\| y_B^{\text{DH}}(i) \right\|_{(i=0, \overline{B_Y B_X - [B_Y B_X K_B] - 1})}, X_B^{\text{DH}} = \left\| x_B^{\text{DH}}(i) \right\|_{(i=0, \overline{B_Y B_X - [B_Y B_X K_B] - 1})} \right\}$ блоков с помощью выражений

$$(i < [B_Y B_X K_B]) \Rightarrow \left((y_B^{\text{DL}}(i) \leftarrow y_B^{\text{D}}(i)) \wedge (x_B^{\text{DL}}(i) \leftarrow x_B^{\text{D}}(i)) \right), \quad (12)$$

$$(i \geq [B_Y B_X K_B]) \Rightarrow \left((y_B^{\text{DH}}(i - [B_Y B_X K_B]) \leftarrow y_B^{\text{D}}(i)) \wedge (x_B^{\text{DH}}(i - [B_Y B_X K_B]) \leftarrow x_B^{\text{D}}(i)) \right) \quad (13)$$

при $i = \overline{0, B_Y B_X - 1}$, где $[]$ – операция округления до ближайшего целого.

Принадлежность блоков подмножествам $\{Y_B^{\text{DL}}, X_B^{\text{DL}}\}$ и $\{Y_B^{\text{DH}}, X_B^{\text{DH}}\}$ отражается также посредством маски $M_{\text{GB}} = \|m_{\text{GB}}(y_B, x_B)\|_{(y_B=\overline{0, Y_B-1}, x_B=\overline{0, X_B-1})}$ типов блоков, каждый элемент $m_{\text{GB}}(y_B, x_B)$ которой соответствует блоку (y_B, x_B) . Если этот блок высокоприоритетный, то $m_{\text{GB}}(y_B, x_B) = 1$; если блок низкоприоритетный, то $m_{\text{GB}}(y_B, x_B) = 0$. Значения элементов маски M_{GB} вычисляются по формуле

$$m_{\text{GB}}(y_B, x_B) = \begin{cases} 1, & (y_B = y_B^{\text{D}}(i)) \wedge (x_B = x_B^{\text{D}}(i)) \wedge (i < [B_Y B_X K_B]), \\ 0, & (y_B = y_B^{\text{D}}(i)) \wedge (x_B = x_B^{\text{D}}(i)) \wedge (i \geq [B_Y B_X K_B]) \end{cases} \quad (14)$$

при $i = \overline{0, B_Y B_X - 1}$.

Для высокоприоритетных блоков на основе соответствующих векторов $H_{\text{CDF}}(y_B, x_B) = \|h_{\text{CDF}}(y_B, x_B, l)\|_{(l=\overline{0, L_{\text{HDR}}-1})}$ значений интегральных функций распределения яркостей формируются векторы $H_E(y_B, x_B, L_{\text{LDR}})$ выравнивания, значения элементов которых вычисляются с помощью выражения, аналогичного выражению (2):

$$h_E(y_B, x_B, L_{\text{LDR}}, l) = \left\lfloor \frac{(L_{\text{LDR}} - 1) \cdot (h_{\text{CDF}}(y_B, x_B, l) - \min(H_{\text{CDF}}(y_B, x_B)))}{(Y_B X_B - \min(H_{\text{CDF}}(y_B, x_B)))} \right\rfloor \quad (15)$$

при $y_B = \overline{0, B_Y - 1}$, $x_B = \overline{0, B_X - 1}$, $m_{\text{GB}}(y_B, x_B) = 1$, $l = \overline{0, L_{\text{HDR}} - 1}$, где $h_{\text{CDF}}(y_B, x_B, 0) = h_{\text{HDR}}(y_B, x_B, 0)$; $h_{\text{CDF}}(y_B, x_B, l+1) = h_{\text{HDR}}(y_B, x_B, l+1) + h_{\text{CDF}}(y_B, x_B, l)$ при $l = \overline{0, L_{\text{HDR}} - 2}$; $h_{\text{HDR}}(y_B, x_B, l)$ – элемент гистограммы $H_{\text{HDR}}(y_B, x_B) = \|h_{\text{HDR}}(y_B, x_B, l)\|_{(l=\overline{0, L_{\text{HDR}}-1})}$ блока (y_B, x_B) .

Для низкоприоритетных блоков на основе их общего вектора $H_{\text{CDF}} = \|h_{\text{CDF}}(l)\|_{(l=\overline{0, L_{\text{HDR}}-1})}$ значений интегральной функции распределения яркостей формируется общий вектор $H_E(L_{\text{LDR}})$ выравнивания с помощью равенства

$$h_E(L_{\text{LDR}}, l) = \left\lfloor \frac{(L_{\text{LDR}} - 1) \cdot (h_{\text{CDF}}(l) - \min(H_{\text{CDF}}))}{(Y_B X_B (B_Y B_X - [B_Y B_X K_B]) - \min(H_{\text{CDF}}))} \right\rfloor \quad (16)$$

при $l = \overline{0, L_{\text{HDR}} - 1}$, где $h_{\text{CDF}}(0) = h_{\text{HDR}}^{\text{G}}(0)$; $h_{\text{CDF}}(l+1) = h_{\text{HDR}}^{\text{G}}(l+1) + h_{\text{CDF}}(l)$ при $l = \overline{0, L_{\text{HDR}} - 2}$; $h_{\text{HDR}}^{\text{G}}(l)$ – элемент общей гистограммы $H_{\text{HDR}}^{\text{G}} = \|h_{\text{HDR}}^{\text{G}}(l)\|_{(l=\overline{0, L_{\text{HDR}}-1})}$ всех низкоприоритетных блоков.

Гистограмма H_{HDR}^G может быть сформирована на основе гистограммы H_{HDR} исходного изображения и гистограмм $H_{\text{HDR}}(y_B, x_B)$ высокоприоритетных блоков с помощью выражения

$$H_{\text{HDR}}^G = H_{\text{HDR}} - \sum_{y_B=0}^{Y_B-1} \sum_{x_B=0}^{X_B-1} H_{\text{HDR}}(y_B, x_B). \quad (17)$$

При блочно-приоритетном выравнивании и сжатии гистограмм в центральной части изображения интерполяция выравненного значения пиксела осуществляется на основе векторов выравнивания четырех смежных блоков с помощью равенства

$$i_{\text{ВРНЕ}}(L_{\text{LDR}}, y, x) = \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^1 c(j, i) h(L_{\text{LDR}}, y, x, j, i) \quad (18)$$

при $y = \overline{y_B Y_B, (y_B + 1) Y_B - 1}$, $x = \overline{x_B X_B, (x_B + 1) X_B - 1}$, $y_B = \overline{1, B_Y - 2}$, $x_B = \overline{1, B_X - 2}$, где $c(j, i)$ – весовые коэффициенты, определяющие вклад значения выравнивания каждого блока, $\sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^1 c(j, i) = 1$; $h(L_{\text{LDR}}, y, x, j, i)$ – локальное или общее значение выравнивания в зависимости от значения $m_{\text{GB}}(y_B + j, x_B + i) = 1$, которое находится с помощью выражения

$$h(L_{\text{LDR}}, y, x, j, i) = \begin{cases} h_E(y_B + j, x_B + i, L_{\text{LDR}}, i_{\text{HDR}}(y, x)) & \text{при } m_{\text{GB}}(y_B + j, x_B + i) = 1, \\ h_E(L_{\text{LDR}}, i_{\text{HDR}}(y, x)) & \text{при } m_{\text{GB}}(y_B + j, x_B + i) = 0. \end{cases}$$

На рис. 4 изображена структурная схема ВРНЕ блочно-приоритетного выравнивания и сжатия гистограмм, разработанная на основе математической модели (8)–(18).

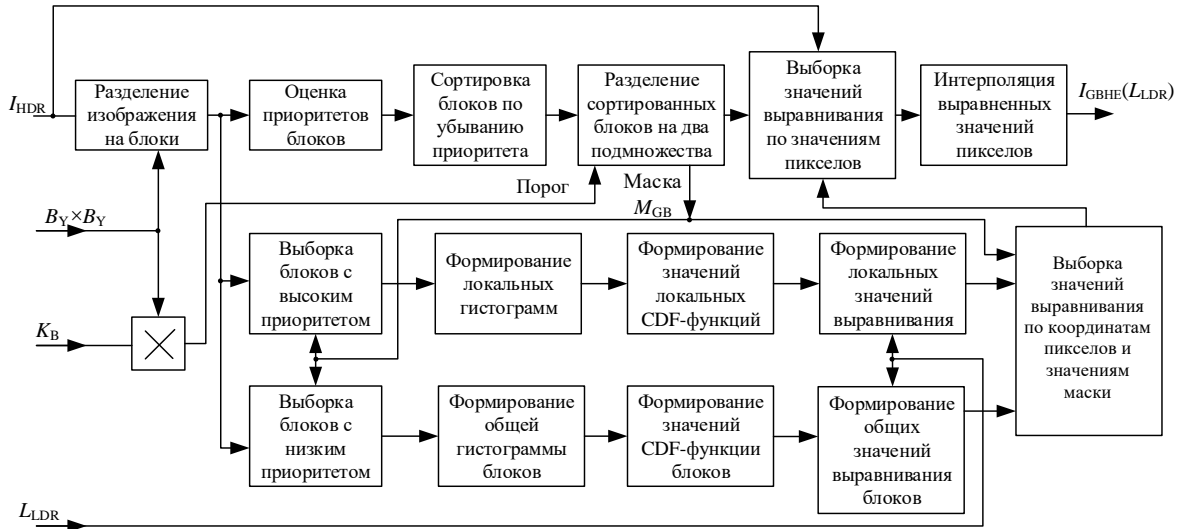


Рис. 4. Структура преобразования динамического диапазона изображения на основе блочно-приоритетного выравнивания и сжатия гистограмм

Fig. 4. Structure of image dynamic range converting based on block-structured-priority equalization and histogram compression

В приведенной схеме исходное изображение I_{HDR} с широким динамическим диапазоном разделяется на $B_Y B_X$ блоков с возможным перекрытием. Для каждого блока вычисляется значение приоритета на основе контраста, энтропии (согласно выражениям (8), (9)) или других показателей качества изображений. Блоки сортируются по убыванию приоритета в соответствии с выражения-

ми (10) или (11). Упорядоченное множество блоков разделяется на подмножества высоко- и низкоприоритетных блоков в зависимости от значения коэффициента K_B с помощью выражений (12) и (13) и формируется маска M_{GB} типов блоков с помощью выражения (14). Значение порога определяется как $B_Y B_X K_B$. Посредством маски M_{GB} блоки изображения разделяются на два подмножества. Для высокоприоритетных блоков формируются локальные гистограммы $H_{HDR}(y_B, x_B)$, интегральные функции $H_{CDF}(y_B, x_B)$ распределения яркости и векторы $H_E(y_B, x_B, L_{LDR})$ выравнивания с помощью выражения (15). Для низкоприоритетных блоков формируются общие гистограмма H_{HDR}^G , интегральная функция H_{CDF} распределения яркости и вектор $H_E(L_{LDR})$ выравнивания с помощью выражения (16). Маска M_{GB} используется также для выборки локальных $H_E(y_B, x_B, L_{LDR})$ и общего $H_E(L_{LDR})$ значений выравнивания при интерполяции выравненных значений пикселей изображения $I_{BPHE}(L_{LDR})$ с помощью выражения (18). При $L_{LDR} < L_{HDR}$ изображение $I_{BPHE}(L_{LDR})$ имеет меньший динамический диапазон по сравнению с исходным изображением I_{HDR} .

Алгоритм BPHE состоит из следующих основных шагов.

Вход: I_{HDR} , $B_Y B_X$, K_B , L_{LDR} .

1. Разделение изображения I_{HDR} на $B_Y B_X$ блоков.
2. Оценка приоритетов блоков с помощью выражений (8) или (9), сортировка блоков по убыванию приоритетов с помощью выражений (10) или (11), разделение блоков на два подмножества с помощью выражений (12) и (13), формирование маски M_{GB} с помощью выражения (14).
3. Выборка блоков с высоким приоритетом на основе K_B ; формирование локальной гистограммы, CDF-функции, значений выравнивания для каждого высокоприоритетного блока; буферизация значений выравнивания всех высокоприоритетных блоков.
4. Выборка блоков с низким приоритетом на основе K_B ; формирование общих гистограммы, CDF-функции, значений выравнивания для всех низкоприоритетных блоков.
5. Для каждого пиксела: выборка значений выравнивания смежных блоков на основе M_{GB} , интерполяция значений пикселей преобразованного изображения $I_{BPHE}(L_{LDR})$ с помощью выражения (18).

Выход: $I_{BPHE}(L_{LDR})$.

Временная сложность C_T^{BPHE} алгоритма BPHE определяется количеством операций обращения к памяти при загрузке исходного ИК-изображения I_{HDR} (YX операций); при оценке блочного контраста (энтропии) изображения I_{HDR} (YX операций); сортировке блоков ($(B_Y B_X)^2$ операций); формировании маски M_{GB} блоков (YX операций); выборке блоков (YX операций), формировании гистограмм $H_{HDR}(y_B, x_B)$ блоков (YX операций), значений глобальной H_{CDF} и блочных $H_{CDF}(y_B, x_B)$ интегральных функций распределения яркостей ($L_{HDR}(1 + B_Y B_X K_B)$ операций), значений глобального $H_E(L_{LDR})$ и блочных $H_E(y_B, x_B, L_{LDR})$ векторов выравнивания ($L_{HDR}(1 + B_Y B_X K_B)$ операций), значений выравнивания (YX операций); при интерполяции значений пикселей (YX операций) и выгрузке преобразованного изображения $I_{BPHE}(L_{LDR})$ (YX операций) с помощью выражения

$$C_T^{BPHE} = 8YX + B_Y B_X (B_Y B_X + 2L_{HDR} K_B) + 2L_{HDR}. \quad (19)$$

Пространственная сложность C_S^{BPHE} алгоритма BPHE определяется объемом оперативной памяти (в битах), необходимой для загрузки исходного ИК-изображения I_{HDR} ($YX \log_2(L_{HDR})$ бит); оценки локального контраста (энтропии) изображения I_{HDR} ($B_Y B_X \log_2(L_{HDR})$ бит); сортировки блоков ($B_Y B_X \log_2(L_{HDR})$ бит); формирования маски M_{GB} блоков (YX бит); выборки блоков ($YX \log_2(L_{HDR})$ бит); формирования локальных гистограмм $H_{HDR}(y_B, x_B)$ ($L_{HDR} \log_2(Y_B X_B) + L_{HDR} \log_2(YX - Y_B X_B B_Y B_X K_B)$ бит), общей H_{CDF} и локальных $H_{CDF}(y_B, x_B)$ интегральных функций распределения яркостей ($L_{HDR} \log_2(Y_B X_B) + L_{HDR} \log_2(YX - Y_B X_B B_Y B_X K_B)$ бит), общих $H_E(L_{LDR})$ и локальных $H_E(y_B, x_B, L_{LDR})$ значений выравнивания ($L_{HDR} \log_2(Y_B X_B) + L_{HDR} \log_2(YX - Y_B X_B B_Y B_X K_B)$ бит); выборки значений выравнивания; интерполяции значений пикселей и формирования преобразованного изображения $I_{BPHE}(L_{LDR})$ ($YX \log_2(L_{LDR})$ бит), с помощью выражения

$$C_S^{BPHE} = L_{HDR} (2 + B_Y B_X K_B) \log_2(Y_B X_B) + 3L_{HDR} \log_2(YX - Y_B X_B B_Y B_X K_B) + 2B_Y B_X \log_2(L_{HDR}) + YX (1 + 2\log_2(L_{HDR}) + \log_2(L_{LDR})). \quad (20)$$

В табл. 2 приведены значения вычислительной сложности алгоритма BPHE для ИК-изображений размером 480×640 пикселей при $L_{HDR} = 2^{16}$, $L_{LDR} = 2^8$ и $Y_B = \{10, 16\}$.

Таблица 2

Вычислительная сложность алгоритма BPHE в зависимости от размера блока по вертикали Y_B и доли блоков, для которых реализуется локальное выравнивание гистограмм, K_B

Table 2

Computational complexity of BPHE algorithm in dependence with vertical block size Y_B and fraction of the blocks for which local equalization is performed, K_B

Y_B	Временная сложность алгоритмов Temporary algorithm complexity			Пространственная сложность алгоритмов Spatial algorithm complexity		
	$K_B = 0,75$	$K_B = 0,5$	$K_B = 0,25$	$K_B = 0,75$	$K_B = 0,5$	$K_B = 0,25$
10	532 119 552	364 347 392	196 575 232	1 688 801 735	1 131 671 291	574 459 247
16	164 465 552	111 381 392	58 297 232	653 896 252	441 756 220	229 534 588

Из табл. 1 и 2 следует, что алгоритм BPHE обеспечивает уменьшение вычислительной сложности по сравнению с алгоритмом АНЕ пропорционально коэффициенту K_B , определяющему отношение количества высокоприоритетных блоков к количеству всех блоков. Временная сложность уменьшается в 1,26–3,42 раза при размерах блока 10×10 пикселей и в 1,30–3,67 раза при размерах блока 16×16 пикселей. Пространственная сложность уменьшается в 1,33–3,90 раза при размерах блока 10×10 пикселей и в 1,31–3,74 раза при размерах блока 16×16 пикселей. Алгоритм BPHE проигрывает алгоритму HE при размере блока 16×16 пикселей во временной сложности в 43–121 раз, в пространственной сложности – в 21–60 раз; при размере блока 10×10 пикселей проигрывает во временной сложности в 145–391 раз, в пространственной сложности – в 52–154 раза.

Оценка эффективности алгоритмов выравнивания и сжатия гистограммы ИК-изображений. На рис. 5–8 показаны ИК-изображения с узким динамическим диапазоном ($L_{LDR} = 2^8$), полученные из исходного ИК-изображения с широким динамическим диапазоном ($L_{HDR} = 2^{16}$) (см. рис. 2, а), при использовании контраста $D_{ST}(y_B, x_B)$ и энтропии $E_I(y_B, x_B)$ для определения приоритетности блоков при различных значениях Y_B и K_B .

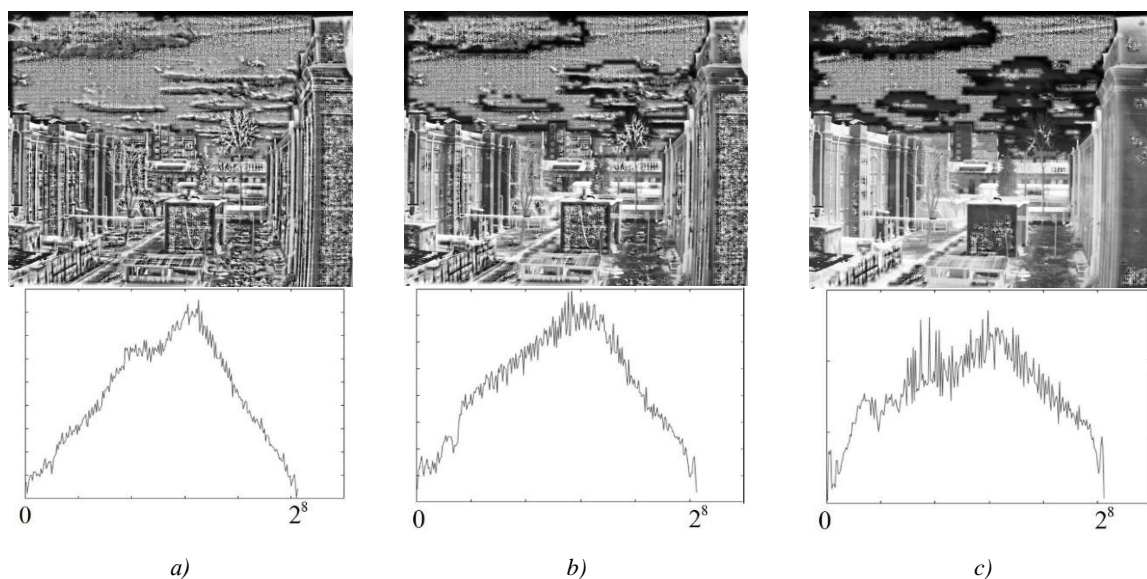


Рис. 5. ИК-изображения с $L_{LDR} = 2^8$, полученные при $Y_b = 10$ и использовании контраста для определения приоритетности блоков: а) $K_b = 0,75$; б) $K_b = 0,50$; в) $K_b = 0,25$

Fig. 5. IR-images and histograms for $L_{LDR} = 2^8$ received in case of $Y_b = 10$ and contrast using for block priority determination: а) $K_b = 0,75$; б) $K_b = 0,50$; в) $K_b = 0,25$

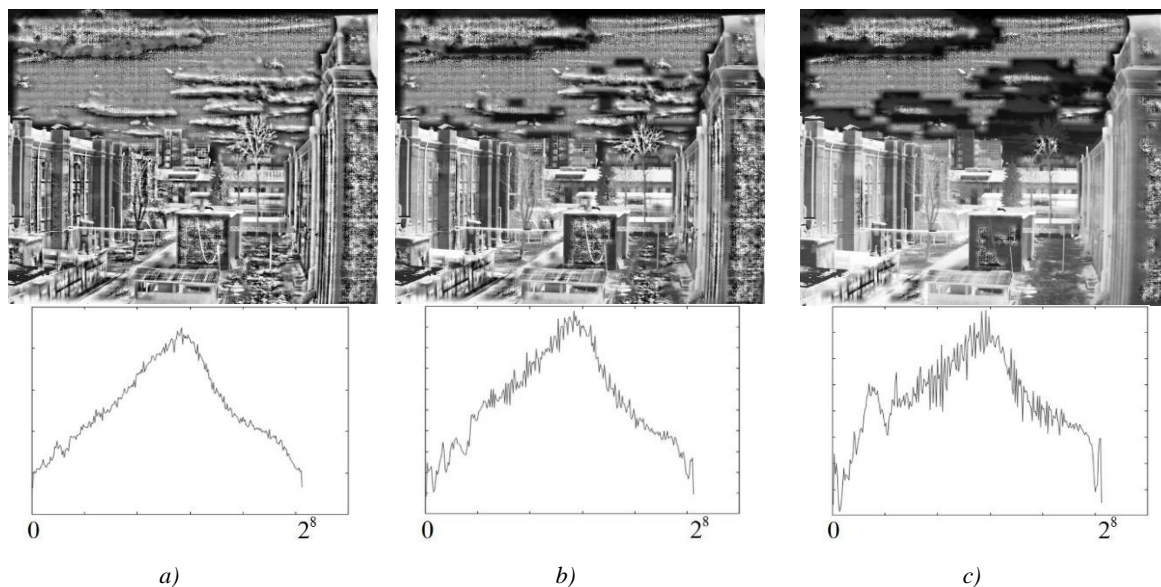


Рис. 6. ИК-изображения с $L_{LDR} = 2^8$, полученные при $Y_b = 16$ и использовании контраста для определения приоритетности блоков: а) $K_b = 0,75$; б) $K_b = 0,50$; в) $K_b = 0,25$

Fig. 6. IR-images and histograms for $L_{LDR} = 2^8$ received in case of $Y_b = 16$ and contrast using for block priority determination: а) $K_b = 0,75$; б) $K_b = 0,50$; в) $K_b = 0,25$

Как следует из рис. 5 и 6, результаты преобразования динамического диапазона изображений при использовании контраста $D_{ST}(y_B, x_B)$ для определения приоритетности блоков отличаются от аналогичных результатов при использовании энтропии $E_I(y_B, x_B)$ усилением блочного эффекта на однородных по яркости участках изображения.

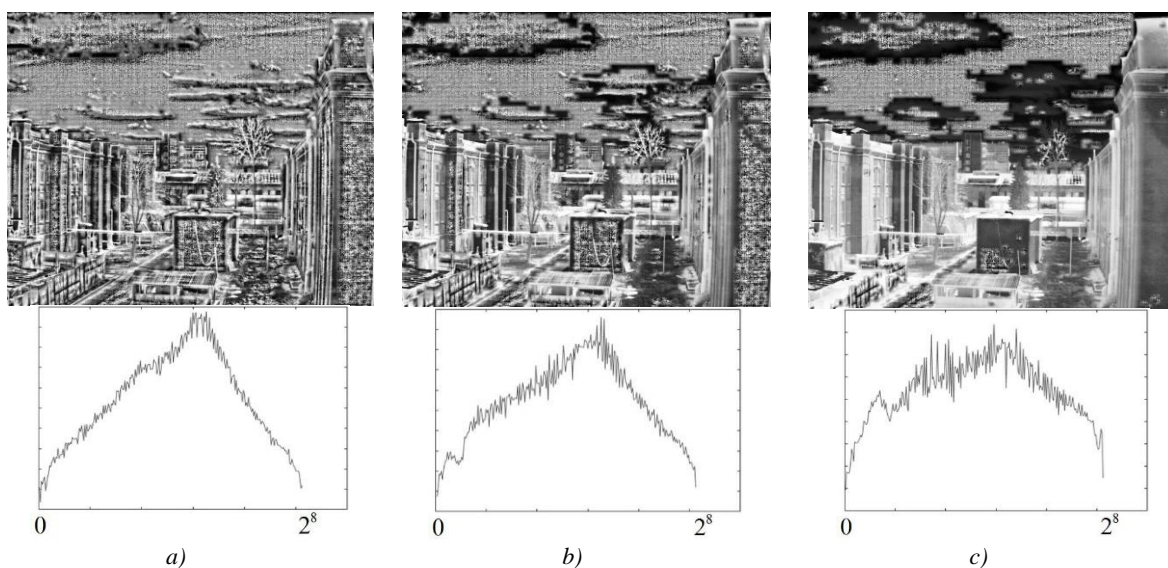


Рис. 7. ИК-изображения с $L_{\text{LDR}} = 2^8$, полученные при $Y_b = 10$ и использовании энтропии для определения приоритетности блоков: а) $K_b = 0,75$; б) $K_b = 0,50$; в) $K_b = 0,25$

Fig. 7. IR-images and histograms for $L_{\text{LDR}} = 2^8$ received in case of $Y_b = 10$ and entropy using for block priority determination: а) $K_b = 0,75$; б) $K_b = 0,50$; в) $K_b = 0,25$

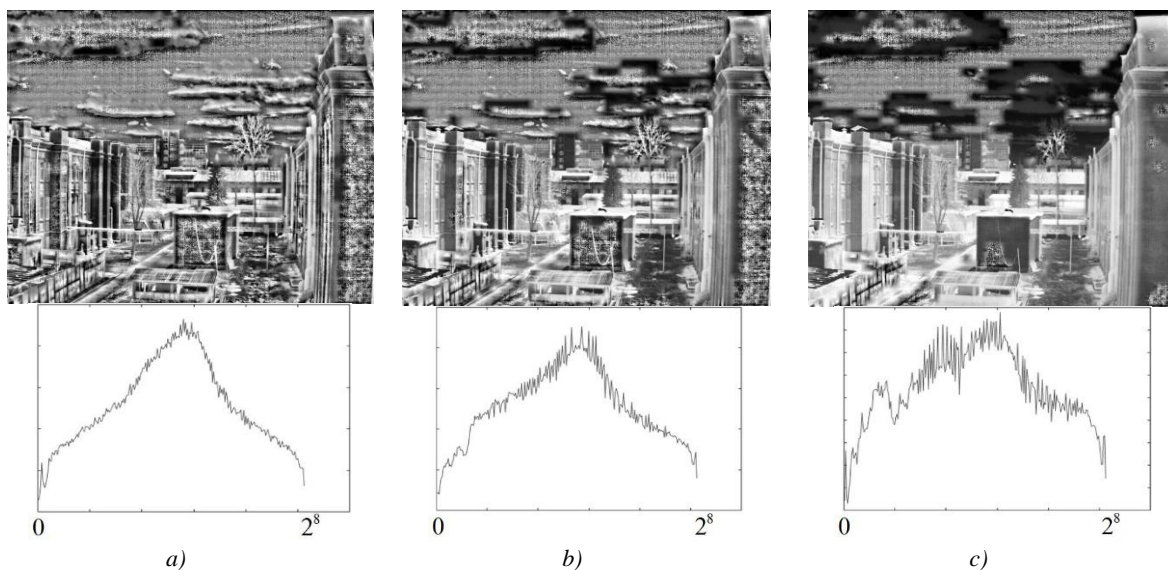


Рис. 8. ИК-изображения с $L_{\text{LDR}} = 2^8$, полученные при $Y_b = 16$ и использовании энтропии для определения приоритетности блоков: а) $K_b = 0,75$; б) $K_b = 0,50$; в) $K_b = 0,25$

Fig. 8. IR-images and histograms for $L_{\text{LDR}} = 2^8$ received in case of $Y_b = 16$ and entropy using for block priority determination: а) $K_b = 0,75$; б) $K_b = 0,50$; в) $K_b = 0,25$

В табл. 3 приведены значения показателей SN, SF и TMQI для изображений на рис. 5–8. Видно, что с уменьшением количества высокоприоритетных блоков показатели SN и TMQI уменьшаются. Это свидетельствует об ухудшении статистической естественности ИК-изображений после тонового преобразования. Показатель SF, характеризующий структурную точность, нестабилен. Вместе с тем показатели для изображений, полученных с использованием контраста при определении приоритетности блоков, лучше, чем показатели для изображений, полученных с использованием энтропии, несмотря на более сильное проявление блочного эффекта. Это го-

ворит о низкой точности показателей SF и TMQI для оценки качества тонового преобразования ИК-изображений при акцентировании внимания на улучшении детализации изображений в светлых и темных областях.

Таблица 3

Значения показателей SN, SF и TMQI в зависимости от критерия сортировки и размера блока по вертикали Y_B и доли блоков, для которых реализуется локальное выравнивание гистограмм, K_B

Table 3

Values of SN, SF, TMQI in dependence with block sort criteria, vertical block size Y_B and fraction of the blocks for which local equalization is performed, K_B

Y_B	Критерий сортировки блоков <i>Block sort criteria</i>	K_B	SN	SF	TMQI
10	Контраст <i>Contrast</i>	0,75	0,6450	0,5094	0,7981
		0,50	0,5413	0,4918	0,7741
		0,25	0,3032	0,5531	0,7543
	Энтропия <i>Entropy</i>	0,75	0,6567	0,4707	0,7844
		0,50	0,5410	0,4694	0,7649
		0,25	0,2956	0,5396	0,7477
16	Контраст <i>Contrast</i>	0,75	0,5432	0,6351	0,8267
		0,50	0,4294	0,5956	0,7934
		0,25	0,2385	0,6191	0,7643
	Энтропия <i>Entropy</i>	0,75	0,5485	0,6147	0,8207
		0,50	0,4235	0,5566	0,7784
		0,25	0,2239	0,6076	0,7572

В табл. 4 приведены показатели выигрышей по контрасту D_{ST} , среднему градиенту G_A и энтропии E_I для алгоритма АНЕ по сравнению с алгоритмом ВРНЕ и для алгоритма ВРНЕ по сравнению с алгоритмом НЕ, усредненные по блокам 64×64 пикселей и 94 ландшафтными ИК-изображениям размером 480×640 пикселей при $Y_B = \{10, 16\}$. Для вычисления выигрышей использованы выражения

$$D_{ST} = D_{ST}^B / D_{ST}^Z, \quad (21)$$

$$G_A = G_A^B / G_A^Z, \quad (22)$$

$$E_I = E_I^B / E_I^Z, \quad (23)$$

где $B = \{АНЕ, ВРНЕ\}$, $Z = \{ВРНЕ, НЕ\}$.

Из табл. 4 следует, что по контрасту D_{ST} , среднему градиенту G_A и энтропии E_I для алгоритма ВРНЕ при $K_B = 0,75$ выигрыши по сравнению с алгоритмом НЕ ($D_{ST} = 1,74-1,95$, $G_A = 3,4-4,12$, $E_I = 1,16-1,24$) существенно превосходят проигрыши по сравнению с алгоритмом АНЕ (выигрыши АНЕ по сравнению с ВРНЕ: $D_{ST} = 1,03-1,10$, $G_A = 1,09-1,22$, $E_I = 1,01-1,02$), а при $K_B = 0,25$ выигрыши по сравнению с алгоритмом НЕ ($D_{ST} = 1,36-1,48$, $G_A = 1,87-2,22$, $E_I = 1,07-1,13$) соизмеримы с проигрышами по сравнению с алгоритмом АНЕ (выигрыши АНЕ по сравнению с ВРНЕ: $D_{ST} = 1,34-1,36$, $G_A = 1,91-2,11$, $E_I = 1,10$). Таким образом, при изменении значения K_B в диапазоне $0,25-0,75$, т. е. использовании 25–75 % блоков изображения для локального выравнивания гистограмм, и при соответствующем снижении вычислительной сложности (как следует из табл. 2) разработанный алгоритм ВРНЕ более эффективен для уменьшения динамического диапазона изображений по сравнению с алгоритмом АНЕ.

Таблица 4

Средние выигрыши в характеристиках ИК-изображений после преобразования динамического диапазона (Y_B – размер блока по вертикали; K_B – доля блоков, для которых реализуется локальное выравнивание гистограмм; D_{ST} – показатель выигрыша по контрасту;

G_A – показатель выигрыша по среднему градиенту; E_1 – показатель выигрыша по энтропии)

Table 4

Mean improvement of IR images characteristics after dynamic range converting (Y_B – vertical block size,

K_B – fraction of the blocks for which local equalization is performed, D_{ST} – contrast scoring index,

G_A – average gradient scoring index, E_1 – entropy scoring index)

Y_B	Критерий сортировки блоков <i>Block sort criteria</i>	K_B	Средние выигрыши АНЕ по сравнению с ВРНЕ <i>Average gain ANE in comparison with BPHE</i>			Средние выигрыши ВРНЕ по сравнению с НЕ <i>Average gain BPHE in comparison with HE</i>		
			D_{ST}	G_A	E_1	D_{ST}	G_A	E_1
10	Контраст <i>Contrast</i>	0,75	1,04	1,09	1,01	1,90	3,99	1,23
		0,50	1,12	1,34	1,04	1,78	3,37	1,20
		0,25	1,34	2,01	1,10	1,48	2,22	1,13
	Энтропия <i>Entropy</i>	0,75	1,03	1,10	1,01	1,95	4,12	1,24
		0,50	1,10	1,36	1,04	1,70	3,07	1,13
		0,25	1,35	2,11	1,10	1,48	2,12	1,13
16	Контраст <i>Contrast</i>	0,75	1,10	1,22	1,02	1,74	3,36	1,16
		0,50	1,17	1,40	1,05	1,61	2,79	1,13
		0,25	1,35	1,91	1,10	1,36	1,92	1,07
	Энтропия <i>Entropy</i>	0,75	1,03	1,11	1,01	1,83	3,40	1,21
		0,50	1,12	1,37	1,04	1,73	2,80	1,19
		0,25	1,36	2,06	1,10	1,42	1,87	1,12

Заключение. В работе предложены математическая модель, структура и алгоритм ВРНЕ блочно-приоритетного выравнивания и сжатия гистограмм для уменьшения динамического диапазона ИК-изображений, основанные на разделении множества всех блоков исходного изображения на подмножества высокоприоритетных и низкоприоритетных блоков в зависимости от их яркостных статистических свойств и на использовании при интерполяции значений пикселей преобразованного изображения с узким динамическим диапазоном локальных значений выравнивания для высокоприоритетных блоков и общих значений выравнивания для низкоприоритетных блоков. Выигрыши алгоритма ВРНЕ по сравнению с алгоритмом НЕ глобального выравнивания гистограммы, а также проигрыши по сравнению с алгоритмом АНЕ адаптивного выравнивания гистограммы по контрасту, среднему градиенту и энтропии изменяются пропорционально отношению количества высокоприоритетных блоков к количеству всех блоков. От этого отношения пропорционально зависят также выигрыши алгоритма ВРНЕ по сравнению с алгоритмом АНЕ, а также его проигрыши по сравнению с алгоритмом НЕ в вычислительной сложности. Эксперименты по уменьшению динамического диапазона 94 ландшафтных ИК-изображений размером 480×640 пикселей показали, что при изменении отношения количества высокоприоритетных блоков к количеству всех блоков в диапазоне 0,25–0,75 алгоритм ВРНЕ более эффективен по сравнению с алгоритмами АНЕ и НЕ. В данном диапазоне алгоритм ВРНЕ имеет в 1,3–3,5 раза меньшую временную и в 1,3–3,9 меньшую пространственную сложность по сравнению с алгоритмом АНЕ при ухудшении контраста преобразованных изображений в 1,1–1,4 раза.

Вклад авторов. С. И. Рудиков разработал математическую модель, структуру, алгоритм и программную модель выравнивания гистограммы изображений, провел эксперименты; В. Ю. Цветков осуществил постановку задачи исследования и научное редактирование статьи; А. П. Шкадаревич определил направление и цель исследования, интерпретировал полученные результаты.

Список использованных источников

1. Garcia, F. Noise removal and real-time detail enhancement of high-dynamic-range infrared images with time consistency / F. Garcia, C. Schockaert, B. Mirbach // Intern. Conf. on Quality Control by Artificial Vision, SPIE Proceedings, Le Creusot, France, 3 June 2015. – Le Creusot, 2015. – Vol. 9534. <https://doi.org/10.1117/12.2182896>
2. Yang, K.-F. A biological vision inspired framework for image enhancement in poor visibility conditions / K.-F. Yang, X.-S. Zhang, Y.-J. Li // IEEE Transactions on Image Processing. – 2020. – Vol. 29. – P. 1493–1506. <https://doi.org/10.1109/tip.2019.2938310>
3. Старовойтов, В. В. Адаптивное сжатие широкого динамического диапазона цифровых радарных спутниковых изображений / В. В. Старовойтов // Информатика. – 2018. – № 15(1). – С. 81–91.
4. Lee, J. W. Local tone mapping using K-means algorithm and automatic gamma setting / J. W. Lee, R. Park, S. Chang // IEEE Intern. Conf. on Consumer Electronics (ICCE). – Las Vegas, NV, USA, 2011. – P. 807–808. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2011.5722876>
5. Iwahashi, M. Two layer lossless coding of HDR images / M. Iwahashi, H. Kiya // IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. – Vancouver, BC, Canada, 2013. – P. 1340–1344. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6637869>
6. Khan, I. R. Tone-mapping using perceptual-quantizer and image histogram / I. R. Khan, W. Aziz, S.-O. Shim // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 31350–31358. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973273>
7. Adaptive contrast adjustment for postprocessing of tone mapped high dynamic range images / M. Narwaria [et al.] // IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS). – Beijing, China, 2013. – P. 1103–1106. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2013.6572043>
8. Thai, B. C. HDR image tone mapping approach based on near optimal separable adaptive lifting scheme / B. C. Thai, A. Mokraoui, B. Matei // Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA). – Poznan, Poland, 2018. – P. 108–113. <https://doi.org/10.23919/SPA.2018.8563293>
9. Huang, P. Multi-scale bilateral grid for image tone mapping / P. Huang, Z. Su, Z. Li // Intern. Conf. on Multimedia Technology. – Hangzhou, 2011. – P. 3143–3146. <https://doi.org/10.1109/ICMT.2011.6003057>
10. HDR compression based on image matting Laplacian / C.-C. Huang [et al.] // IEEE Intern. Conf. on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW). – Nantou, Taiwan, 2016. – P. 1–2. <https://doi.org/10.1109/ICCE-TW.2016.7520957>
11. A fast multi-scale decomposition based tone mapping algorithm for High Dynamic Range images / Q. Chen [et al.] // IEEE Intern. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – Budapest, 2016. – P. 001455–001460. <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844442>
12. High dynamic tone mapping algorithm based on wavelet domain image fusion / W. Liu [et al.] // 13th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – Wuhan, China, 2018. – P. 1945–1950. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2018.8398027>
13. Lin, Y. High dynamic range image composition using a linear interpolation approach / Y. Lin, M. Huang, C. Wang // IEEE/ACIS 15th Intern. Conf. on Computer and Information Science (ICIS). – Okayama, Japan, 2016. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIS.2016.7550796>
14. Tone mapping operators: progressing towards semantic-awareness / A. Goswami [et al.] // IEEE Intern. Conf. on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW). – London, UK, 2020. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICMEW46912.2020.9106057>
15. Lee, J. W. Local tone mapping using K-means algorithm and automatic gamma setting / J. W. Lee, R. Park, S. Chang // IEEE Intern. Conf. on Consumer Electronics (ICCE). – Las Vegas, NV, USA, 2011. – P. 807–808. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2011.5722876>
16. Guangjun, Z. An improved tone mapping algorithm for High Dynamic Range images / Z. Guangjun, L. Yan // Intern. Conf. on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010). – Taiyuan, 2010. – P. V2-466–V2-468. <https://doi.org/10.1109/ICCASM.2010.5620562>
17. Banic, N. Puma: A high-quality retinex-based tone mapping operator / N. Banic, S. Loncaric // 24th European Signal Processing Conf. (EUSIPCO). – Budapest, Hungary, 2016. – P. 943–947. <https://doi.org/10.1109/EUSIPCO.2016.7760387>
18. Adversarial and adaptive tone mapping operator for high dynamic range images / X. Cao [et al.] // IEEE Symp. Series on Computational Intelligence (SSCI). – Canberra, Australia, 2020. – P. 1814–1821. <https://doi.org/10.1109/SSCI47803.2020.9308535>
19. Kumar, N. A. M. Real-time implementation of a novel detail enhancement algorithm for thermal imager / N. A. M. Kumar, B. S. Ravishankar, C. R. Patil // IEEE Uttar Pradesh Section Intern. Conf. on Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON). – Varanasi, India, 2016. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/UPCON.2016.7894614>

20. Peng, Y. Detail enhancement for infrared images based on propagated image filter / Y. Peng, Y. Yan, J. Zhao // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2016. – Vol. 2016. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2016/9410368>
21. Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images / C. Zuo [et al.] // *Optical Engineering*. – 2011. – Vol. 50(12). – P. 127401-1-10. <https://doi.org/10.1117/1.3659698>
22. Infrared image adaptive enhancement guided by energy of gradient transformation and multiscale image fusion / F. Chen [et al.] // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10. – P. 1–21. <https://doi.org/10.3390/app10186262>
23. 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>
24. Nithyananda, C. R. Review on histogram equalization based image enhancement techniques / C. R. Nithyananda, A. C. Ramachandra // *Intern. Conf. on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. – Chennai, 2016. – P. 2512–2517. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755145>
25. Independence of luminance and contrast in natural scenes and in the early visual system / V. Mante [et al.] // *Nature Neuroscience*. – 2005. – Vol. 8. – P. 1690–1697. <https://doi.org/10.1038/nn1556>
26. Wang, Z. Multiscale structural similarity for image quality assessment / Z. Wang, E. P. Simoncelli, A. C. Bovik // *The Thirty-Seventh Asilomar Conf. on Signals, Systems & Computers*. – Pacific Grove, CA, USA, 2003. – Vol. 2. – P. 1398–1402. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2003.1292216>
27. 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. <https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2221725>

References

1. Garcia F., Schockaert C., Mirbach B. Noise removal and real-time detail enhancement of high-dynamic-range infrared images with time consistency. *International Conference on Quality Control by Artificial Vision, SPIE Proceedings, Le Creusot, France, 3 June 2015*. Le Creusot, 2015, vol. 9534. <https://doi.org/10.1117/12.2182896>
2. Yang K.-F., Zhang X.-S., Li Y.-J. A biological vision inspired framework for image enhancement in poor visibility conditions. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, vol. 29, pp. 1493–1506. <https://doi.org/10.1109/tip.2019.2938310>
3. Starovoitov V. V. *Adaptive compressing of the high dynamic range of digital radar satellite images*. Informatika [Informatics], 2018, no. 15(1), pp. 81–91 (In Russ.).
4. Lee J. W., Park R., Chang S. Local tone mapping using K-means algorithm and automatic gamma setting. *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. Las Vegas, NV, USA, 2011, pp. 807–808. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2011.5722876>
5. Iwahashi M., Kiya H. Two layer lossless coding of HDR images. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 1340–1344. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6637869>
6. Khan I. R., Aziz W., Shim S.-O. Tone-mapping using perceptual-quantizer and image histogram. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 31350–31358. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973273>
7. Narwaria M., Da Silva M. P., Le Callet P., Pepion R. Adaptive contrast adjustment for postprocessing of tone mapped high dynamic range images. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Beijing, China, 2013, pp. 1103–1106. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2013.6572043>
8. Thai B. C., Mokraoui A., Matei B. HDR image tone mapping approach based on near optimal separable adaptive lifting scheme. *Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*. Poznan, Poland, 2018, pp. 108–113. <https://doi.org/10.23919/SPA.2018.8563293>
9. Huang P., Su Z., Li Z. Multi-scale bilateral grid for image tone mapping. *International Conference on Multimedia Technology*. Hangzhou, 2011, pp. 3143–3146. <https://doi.org/10.1109/ICMT.2011.6003057>
10. Huang C.-C., Ismail, Cai M.-X., Vu H. T. HDR compression based on image matting Laplacian. *IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*. Nantou, Taiwan, 2016, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/ICCE-TW.2016.7520957>
11. Chen Q., Liu X., Ran H., Dong S., Cui D., Deng X., Wang J. A fast multi-scale decomposition based tone mapping algorithm for High Dynamic Range images. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Budapest, 2016, pp. 001455–001460. <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844442>
12. Liu W., Wang Q., Liu Y., Li N. High dynamic tone mapping algorithm based on wavelet domain image fusion. *13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Wuhan, China, 2018, pp. 1945–1950. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2018.8398027>

13. Lin Y., Huang M., Wang C. High dynamic range image composition using a linear interpolation approach. *IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*. Okayama, Japan, 2016, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIS.2016.7550796>
14. Goswami A., Petrovich M., Hauser W., Dufaux F. Tone mapping operators: progressing towards semantic-awareness. *IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW)*. London, UK, 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICMEW46912.2020.9106057>
15. Lee J. W., Park R., Chang S. Local tone mapping using K-means algorithm and automatic gamma setting. *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. Las Vegas, NV, USA, 2011, pp. 807–808. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2011.5722876>
16. Guangjun Z., Yan L. An improved tone mapping algorithm for High Dynamic Range images. *International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*. Taiyuan, 2010, pp. V2-466–V2-468. <https://doi.org/10.1109/ICCASM.2010.5620562>
17. Banic N., Loncaric S. Puma: A high-quality retinex-based tone mapping operator. *24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. Budapest, Hungary, 2016, pp. 943–947. <https://doi.org/10.1109/EUSIPCO.2016.7760387>
18. Cao X., Lai K., Yanushkevich S. N., Smith M. R. Adversarial and Adaptive Tone Mapping Operator for High Dynamic Range Images. *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. Canberra, Australia, 2020, pp. 1814–1821. <https://doi.org/10.1109/SSCI47803.2020.9308535>
19. Kumar N. A. M., Ravishankar B. S., Patil C. R. Real-time implementation of a novel detail enhancement algorithm for thermal imager. *IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON)*. Varanasi, India, 2016, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/UPCON.2016.7894614>
20. Peng Y., Yan Y., Zhao J. Detail enhancement for infrared images based on propagated image filter. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, vol. 2016, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2016/9410368>
21. Zuo C., Chen Q., Liu N., Ren J., Sui X. Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images. *Optical Engineering*, 2011, vol. 50(12), pp. 127401-1-10. <https://doi.org/10.1117/1.3659698>
22. Chen F., Zhang J., Cai J., Xu T., Lu G., Peng X. Infrared image adaptive enhancement guided by energy of gradient transformation and multiscale image fusion. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, pp. 1–21. <https://doi.org/10.3390/app10186262>
23. 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>
24. Nithyananda C. R., Ramachandra A. C. Review on histogram equalization based image enhancement techniques. *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. Chennai, 2016, pp. 2512–2517.
25. Mante V., Frazor R. A., Bonin V., Geisler W. S., Carandini M. Independence of luminance and contrast in natural scenes and in the early visual system. *Nature Neuroscience*, 2005, vol. 8, pp. 1690–1697. <https://doi.org/10.1038/nn1556>
26. Wang Z., Simoncelli E. P., Bovik A. C. Multiscale structural similarity for image quality assessment. *The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*. Pacific Grove, CA, USA, 2003, vol. 2, pp. 1398–1402. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2003.1292216>
27. Yeganeh H., Wang Z. Objective quality assessment of tone-mapped images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 657–667. <https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2221725>

Информация об авторах

Рудиков Станислав Игоревич, магистр технических наук, заместитель директора по информационным технологиям, Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО.
E-mail: stanislav.rudikov@gmail.com

Цветков Виктор Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: vtsvet@bsuir.by

Шкадаревич Алексей Петрович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, директор, Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО.
E-mail: office@lemt.by

Information about the authors

Stanislav I. Rudikov, M. Sc. (Eng.), Information Technology Deputy Director, Scientific and Technical Center LEMT of the BelOMO.
E-mail: stanislav.rudikov@gmail.com

Viktar Yu. Tsviatkou, D. Sc. (Eng.), Prof., Head of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: vtsvet@bsuir.by

Alexey P. Shkadarevich, Academician of the National Academy of Science of Belarus, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., Director, Scientific and Technical Center LEMT of the BelOMO.
E-mail: office@lemt.by