



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-108-115>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932+004.258

СЖАТИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВЫРАВНИВАНИЯ ГИСТОГРАММЫ С ИНВЕРСИЕЙ КРАЕВ

С. И. РУДИКОВ¹, В. Ю. ЦВЕТКОВ², А. П. ШКАДАРЕВИЧ¹

¹Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО (г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 09.06.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Рассмотрена задача сжатия динамического диапазона инфракрасных изображений. Для повышения качества тонового отображения инфракрасных изображений при сжатии их динамического диапазона и упрощения управления характеристиками воспроизведения инфракрасных изображений предложен алгоритм преобразования динамического диапазона на основе адаптивного выравнивания гистограммы с инверсией краев. Сущность алгоритма состоит в двойном уменьшении динамического диапазона инфракрасного изображения с промежуточным растяжением, сжатием и наложением краев с инвертированием. Для выбора интервала яркости и степени его растяжения в предложенном алгоритме использовался коэффициент асимметрии. Алгоритм позволяет улучшить некоторые глобальные и интервальные показатели качества воспроизведения изображений за счет наложения краев гистограммы.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Рудиков, С. И. Сжатие динамического диапазона инфракрасных изображений на основе выравнивания гистограммы с инверсией краев / С. И. Рудиков, В. Ю. Цветков, А. П. Шкадаревич // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 1. С. 108–115. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-108-115>.

DYNAMIC RANGE COMPRESSION OF INFRARED IMAGES BASED ON HISTOGRAM EQUALIZATION WITH EDGE INVERSION

STANISLAV I. RUDIKOV¹, VIKTAR YU. TSVIATKOU², ALEXEY P. SHKADAREVICH¹

¹Science and Technology Center “LEMT” BelOMO (Minsk, Republic of Belarus)

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

Submitted 09.06.2023

Abstract. The problem of compression of the dynamic range of infrared images is considered. To improve the quality of tone mapping of infrared images when their dynamic range is compressed and to simplify the control over the reproduction characteristics of infrared images, a dynamic range conversion algorithm based on adaptive histogram equalization with edge inversion is proposed. The essence of the algorithm consists in double reduction of the dynamic range of the infrared image with intermediate stretching, compression and overlapping of edges with inversion. To select the brightness interval and the degree of its stretching, the proposed algorithm uses the asymmetry coefficient. The algorithm makes it possible to improve some global and interval indicators of image reproduction quality by superimposing the edges of the histogram.

Keywords: image dynamic range reduction, image enhancement, infrared images, histogram equalization, histogram shape control.

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

For citation. Rudikov S. I., Tsviatkou V. Yu., Shkadarevich A. P. (2024) Dynamic Range Compression of Infrared Images Based on Histogram Equalization with Edge Inversion. *Doklady BGUIR*. 22 (1), 108–115. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-108-115> (in Russian).

Введение

Инфракрасные (ИК) изображения, формируемые тепловизионными приборами, как правило, не согласуются по динамическому диапазону со стандартными мониторами. Поэтому для воспроизведения ИК-изображений применяется тоновое отображение, сжимающее их динамический диапазон. При этом алгоритмы тонового отображения пытаются улучшить форму гистограммы яркости. Некоторые алгоритмы, основанные на линейном, кусочно-линейном и нелинейном преобразованиях яркости [1], выравнивании гистограммы (Histogram Equalization, HE) [2], модели визуального восприятия [3], на фильтрации и многоканальной обработке [4], делают это для всего ИК-изображения. Более эффективными являются блочные алгоритмы тонового отображения, учитывающие локальные особенности распределения яркости на ИК-изображении. К ним относятся алгоритмы, основанные на адаптивном выравнивании гистограммы (Adaptive Histogram Equalization, AHE) [2] и ограничении контраста (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE) [5].

Для многих приложений актуальной является задача интервального управления тоновым отображением, повышающего разборчивость деталей (локального контраста), например, на краях динамического диапазона (в темной и светлой областях изображения). Алгоритм AHE не позволяет управлять гистограммой яркости. Возможности управления гистограммой в алгоритме CLAHE ограничены уменьшением контраста. Предложенный в [6] алгоритм адаптивного выравнивания, растяжения и сжатия гистограммы (Histogram Equalization, Compression and Stretching, HECS) улучшает локальный контраст ИК-изображения в области темного или светлого, но вносит значительные искажения в последовательность изменения тонов и использует сложную процедуру подбора параметров.

Цель исследований авторов – улучшение интервальных характеристик качества воспроизведения ИК-изображений при уменьшении их динамического диапазона на основе адаптивного выравнивания гистограммы.

Постановка задачи

Оценка качества тонового отображения ИК-изображений производится с помощью безэталонных и эталонных показателей. Безэталонные позволяют оценить контраст (стандартное отклонение D_{ST} , средний градиент G_A), энтропию E_I , статистическую естественность N_S [7] с использованием только преобразованного ИК-изображения. Эталонные показатели оценивают структурную точность F_S [8] и качество тональной карты I_{TMQ} [9] на основе сопоставления исходного (эталонного) и преобразованного ИК-изображений. Большинство показателей качества тонового отображения являются глобальными (применяются ко всему изображению). Для интервальной оценки качества тонового отображения в [10] предложены эталонные показатели потенциальной различающей способности P_D (чем меньше P_D , тем выше различающая способность), потеря различения при сжатии динамического диапазона E_D (чем меньше E_D , тем меньше потери различения соседних пикселей преобразованного изображения), величины нелинейных искажений сжатия E_{MS} (чем меньше E_{MS} , тем ближе передаточные характеристики блоков или всего изображения к линейным), неоднозначности тонового отображения L_{DH} (чем ближе L_{DH} к единице, тем меньше неоднозначность тонового отображения), величины нелинейных искажений из-за неоднозначности отображения L_{DL} (чем меньше L_{DL} , тем меньше нелинейные искажения из-за неоднозначности тонового отображения), безэталонные показатели равномерности использования динамического диапазона U_H (чем ближе U_H к единице, тем более равномерным является распределение яркостей на выбранном интервале динамического диапазона относительно базового интервала и тем ближе тоновое отображение к линейному при равномерном

ных значениях пикселей) и детализации изображения N_{LE} (чем больше N_{LE} , тем больше деталей на изображении). Показатели E_{MS} , L_{DH} и L_{DL} могут вычисляться как глобальные. Значения перечисленных характеристик для приведенных на рис. 1 тестовых ИК-изображений и алгоритмов HE, AHE, HECS представлены в табл. 1, 2.

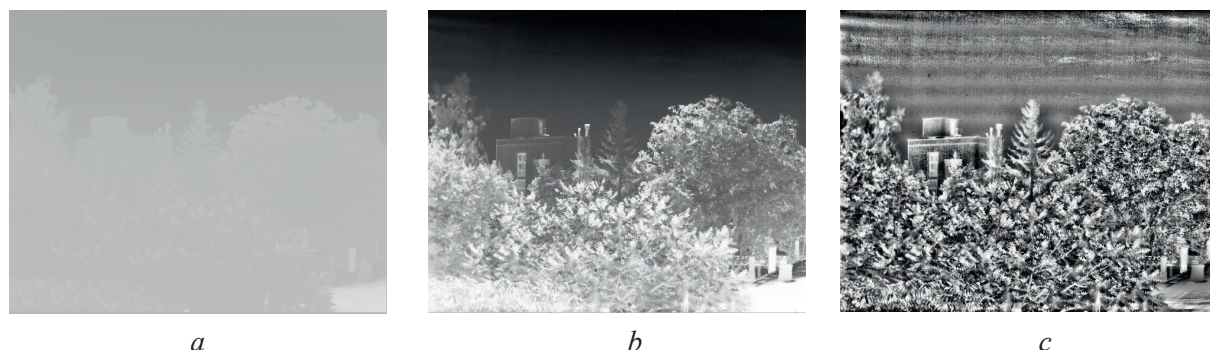


Рис. 1. Инфракрасные изображения:

a – исходное (линейное контрастирование);
 b, c – преобразованное с помощью HE и AHE соответственно

Fig. 1. Infrared images: a – initial (linear contrast); b, c – converted using HE and AHE, respectively

Таблица 1. Глобальные показатели качества тонового отображения для изображений на рис. 1
Table 1. Global tone mapping quality indicators for the images in Fig. 1

Показатель качества изображения / Image quality index	Алгоритм сжатия динамического диапазона / Dynamic range compression algorithm								
	HE	Блоки 64×64 пикселя / Blocks 64×64 pixel				Блоки 32×32 пикселя / Blocks 32×32 pixel			
		AHE	HECS	HECSm+	HECSm–	AHE	HECS	HECSm+	HECSm–
N_S	0,073	0,407	0,539	0,397	0,558	0,549	0,647	0,499	0,657
F_S	0,718	0,712	0,638	0,592	0,653	0,681	0,656	0,602	0,656
I_{TMO}	0,755	0,828	0,827	0,786	0,835	0,843	0,851	0,808	0,852
D_{ST}	28,249	52,147	55,974	55,900	60,521	55,578	60,755	58,279	59,407
G_A	8,068	17,374	22,803	19,307	20,527	20,933	24,181	22,216	23,114
E_I	6,234	7,253	7,526	7,086	7,224	7,502	7,619	7,304	7,448
N_{LE}	35 191	44 968	56 951	51 913	51 423	46 432	54 103	52 360	52 827

Примечание – HECSm – Histogram Equalization, Compression and Stretching Modification.

Таблица 2. Интервальные показатели качества тонового отображения для изображений на рис. 1
Table 2. Interval tone quality measurements for the images in Fig. 1

Интервал / Interval	Показатель / Index	Алгоритм сжатия динамического диапазона / Dynamic range compression algorithm								
		HE	Блоки 64×64 пикселя / Blocks 64×64 pixel				Блоки 32×32 пикселя / Blocks 32×32 pixel			
			AHE	HECS	HECSm+	HECSm–	AHE	HECS	HECSm+	HECSm–
L	P_D	-9,975	-224,689	-208,181	-364,615	485,332	-228,603	-203,410	-408,638	321,372
	E_D	-174,207	-34,282	-33,212	-85,689	22,348	-19,189	-27,468	-54,506	19,648
	E_{MS}	15,845	19,235	20,425	22,729	22,090	19,481	20,300	22,724	26,714
	U_H	0,988	0,505	0,531	0,590	2,660	0,519	0,645	0,484	1,362
	L_{DH}	1,000	26,704	33,610	30,369	28,684	32,822	36,142	33,901	48,740
	L_{DL}	0,018	0,687	0,847	1,476	0,266	0,836	0,827	1,678	0,512
R	P_D	2,930	-106,852	-69,005	525,549	-341,095	-98,195	-9,571	533,323	-341,452
	E_D	77,637	16,688	28,071	141,157	4,098	11,637	39,280	90,639	-8,637
	E_{MS}	0,695	0,676	0,714	1,193	1,149	0,679	0,665	1,033	1,901
	U_H	1,003	0,516	0,633	3,079	0,471	0,577	0,762	2,485	0,329
	L_{DH}	1,000	2,419	2,799	2,491	2,554	2,604	2,702	2,733	16,588
	L_{DL}	0,019	0,064	0,061	0,024	0,136	0,062	0,054	0,027	0,757

Алгоритм HECS улучшает ряд глобальных (табл. 1) и интервальных (табл. 2) показателей качества на краях динамического диапазона. Он превосходит алгоритмы HE и AHE по статистической естественности N_S , контрастам D_{ST} и G_A , энтропии E_I и детализации N_{LE} , уступая им по структурной точности F_S , неоднозначности тонового отображения L_{DH} и нелинейным искажениям L_{DL} . Причинами проигрыша HECS по ряду показателей являются сильные искажения краев гистограммы. Это подтверждают данные табл. 2, из которых следует, что на краях динамического диапазона (интервалы L и R) алгоритм HECS по сравнению с AHE имеет меньшую потенциальную различающую способность P_D , большие потери различения E_D , как правило, большие нелинейные искажения сжатия динамического диапазона E_{MS} , меньшую равномерность использования динамического диапазона U_H , большую неоднозначность тонового отображения L_{DH} . Кроме того, алгоритм HECS обладает сложной процедурой подбора параметров. Таким образом, актуальной является задача разработки простого в настройке алгоритма сжатия динамического диапазона ИК-изображений на основе адаптивного выравнивания гистограммы, позволяющего улучшить интервальные характеристики качества воспроизведения ИК-изображений без существенного ухудшения глобальных характеристик.

Алгоритм сжатия динамического диапазона с инверсией краев гистограммы

Для упрощения процедуры подбора коэффициентов сжатия динамического диапазона и улучшения интервальных характеристик качества воспроизведения ИК-изображений без существенного ухудшения глобальных показателей разработан алгоритм HECSm на основе адаптивного выравнивания гистограммы с инверсией краев. Алгоритм использует несколько этапов обработки, в процессе которых сначала осуществляется блочное выравнивание гистограммы исходного ИК-изображения в широком динамическом диапазоне, затем производятся частичное растяжение, сжатие, инвертирование и наложение краев гистограммы полученного на первом этапе ИК-изображения. После этого используется линейное контрастирование для приведения ИК-изображения к требуемому динамическому диапазону. Шаги алгоритма HECSm состоят в следующем.

1. Формирование ИК-изображения $I_{AHE} = \|i_{AHE}(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ с узким динамическим диапазоном $[0, L_{LDR1} - 1]$ с помощью адаптивного выравнивания гистограммы исходного ИК-изображения $I_{HDR} = \|i_{HDR}(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ с широким динамическим диапазоном $[0, L_{HDR} - 1]$, где $Y \times X$ – размеры ИК-изображений в пикселях по вертикали и горизонтали.

2. Управление формой гистограммы.

2.1. Формирование гистограммы $H_{LDR1} = \|h_{LDR1}(l)\|_{(l=0, L_{LDR1}-1)}$ изображения I_{AHE} .

2.2. Медианная фильтрация гистограммы H_{LDR1} – формируется отфильтрованная гистограмма $H_{MLDR1} = \|h_{MLDR1}(l)\|_{(l=0, L_{LDR1}-1)}$. Размер окна медианного фильтра зависит от доступных вычислительных ресурсов.

2.3. Поиск точки перегиба корректирующей функции T_G . Для этого осуществляется поиск максимума гистограммы G_{max} (центральной яркостной моды). Изображение может иметь несколько мод. Среди максимумов выделяются левый и правый. Точка перегиба T_G определяется посередине между координатами крайних левого I_{Lmax} и правого I_{Rmax} максимумов с помощью выражения $T_G = (I_{Lmax} + I_{Rmax})/2$.

2.4. Определение уровней обрезки гистограммы слева T_{TL} и справа T_{TR} – таких, что $H_{MLDR1}(T_{TL}) \approx G_{max}/2$ и $H_{MLDR1}(T_{TR}) \approx G_{max}/2$.

2.5. Определение крутизны левого и правого обрезанных краев гистограммы справа $S_{NR} = ((h_{MLDR1}(L_{LDR1}) + h_{MLDR1}(T_{TR}))/2) / (2h_{MLDR1}(T_{TR} + (L_{LDR1} - T_{TR})/2))$ и слева $S_{NL} = ((h_{MLDR1}(1) + h_{MLDR1}(T_{TL}))/2) / (2h_{MLDR1}(T_{TL}/2))$.

2.6. Сжатие гистограммы на основе двух гамма-функций с коэффициентами S_{NL} и S_{NR} , применяемых к двум частям динамического диапазона $[0, T_G - 1]$ и $[T_G + 1, L_{LDR1} - 1]$, которые разделяются на уровне T_G . Формируется изображение $I_G = \|i_G(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR1} - 1]$. При $S_{NL} = S_{NR} = 1$ сжатие линейное.

2.7. Формирование гистограммы $H_{GLDR1} = \|h_{GLDR1}(I)\|_{(I=0, L_{LDR1}-1)}$ изображения I_G .

2.8. Медианная фильтрация гистограммы H_{GLDR1} . Формируется отфильтрованная гистограмма $H_{MGLDR1} = \|h_{MGLDR1}(I)\|_{(I=0, L_{LDR1}-1)}$. Размер окна медианного фильтра зависит от доступных вычислительных ресурсов.

2.9. Поиск главного максимума гистограммы H_{MGLDR1} (центральной яркостной моды). Изображение может иметь несколько мод. Поэтому максимумов может быть несколько, среди которых выделяются левый и правый. Главный максимум M_G определяется посередине между координатами крайних левого M_{Lmax} и правого M_{Rmax} максимумов с помощью выражения $M_G = (M_{Lmax} + M_{Rmax})/2$. Если максимум один, то $M_{Lmax} = M_{Rmax}$.

2.10. Определение уровней обрезки гистограммы слева T_L и справа T_R – таких, что $h_{MGLDR1}(T_L) \approx M_G/KS$ и $h_{MGLDR1}(T_R) \approx M_G/K(1-S)$, где K – коэффициент ослабления ($K = 12$ – значение определено экспериментально); S – коэффициент асимметрии, значения которого находятся в диапазоне $(0, 1)$.

2.11. Прогнозирование положений левого P_L и правого P_R максимумов после растяжения гистограммы с помощью выражений $P_L = (M_{Lmax} - T_L)L_{LDR1}/(T_R - T_L)$ и $P_R = (M_{Rmax} - T_R)L_{LDR1}/(T_R - T_L)$.

2.12. Определение крутизны левого C_L и правого C_R обрезанных краев гистограммы с помощью выражений $C_L = h_{MGLDR1}(T_L/2)/((h_{MGLDR1}(1) + h_{MGLDR1}(T_L))/2)$ и $C_R = (h_{MGLDR1}(T_R + (L_{LDR1} - T_R)/2))/((h_{MGLDR1}(L_{LDR1}) + h_{MGLDR1}(T_R))/2)$.

2.13. Вычисление коэффициентов растяжения левого S_L и правого S_R краев гистограммы.

2.14. Формирование изображения $I_{PLS} = \|i_{PLS}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR1} - 1]$ в результате кусочно-линейного растяжения центральной части скорректированной гистограммы H_{MGLDR1} в диапазоне $[T_L, T_R]$ с коэффициентом $(L_{LDR1} - 1)/((L_{LDR1} - 1) - (T_L + (L_{LDR1} - 1 - T_R)))$ и кусочно-линейного растяжения (сжатия) боковых частей гистограммы H_{MGLDR1} в диапазонах $[0, T_L - 1]$ и $[T_R, L_{LDR1} - 1]$ с коэффициентами S_L и S_R .

3. Формирование результирующего изображения $I_{HECSm} = \|i_{HECSm}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ с требуемым динамическим диапазоном $[0, L_{LDR2} - 1]$ с помощью линейного сжатия гистограммы ИК-изображения I_{PLS} с коэффициентом L_{LDR1}/L_{LDR2} .

На рис. 2 приведены изображения с преобразованным динамическим диапазоном с помощью алгоритмов HECS и HECSm при размере блока 32×32 пикселя. При обрезке и сжатии левого края гистограммы с помощью алгоритма HECSm ($S = 1/5$) происходит растяжение ее правой части, в результате чего центральные значения гистограммы смещаются влево, изображение становится более темным, но повышается локальный контраст светлых областей (рис. 2, b). При обрезке и сжатии правого края гистограммы ($S = 4/5$) алгоритм HECSm обеспечивает растяжение левой ее части и повышение локального контраста темных областей (рис. 2, c).

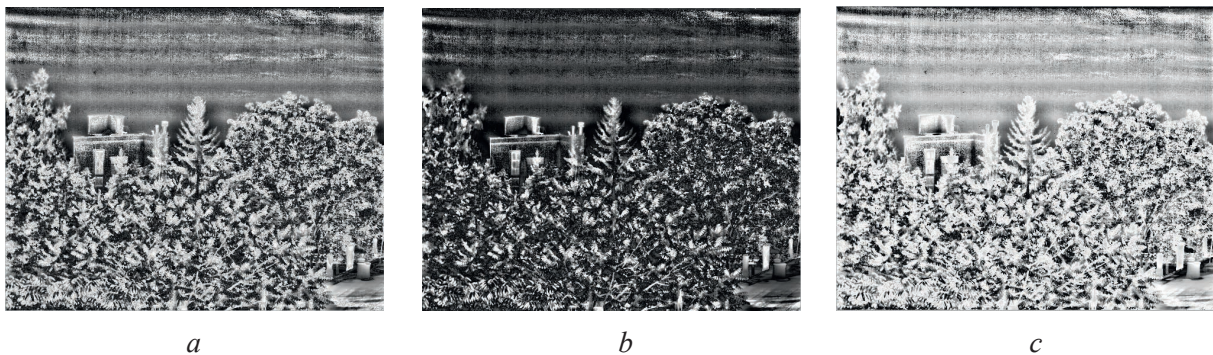


Рис. 2. Результаты тонового отображения с помощью алгоритмов:

a – HECS; b – HECSm, $S = 1/5$; c – HECSm, $S = 4/5$

Fig. 2. Tone mapping results with algorithms: a – HECS; b – HECSm, $S = 1/5$; c – HECSm, $S = 4/5$

Благодаря наложению краев гистограммы минимизируются потери информации, что позволяет улучшить некоторые глобальные и интервальные показатели качества (табл. 1, 2, где $S = 1/3$ соответствуют столбцы HECSm-, а $S = 2/3$ – столбцы HECSm+).

Оценка эффективности алгоритмов тонового отображения

В результате тонового отображения с помощью алгоритма HECSm сформированы 470 ИК-изображений с узким динамическим диапазоном. Значения показателей качества этих изображений сопоставлены с соответствующими значениями показателей качества изображений, сформированных с помощью алгоритмов HE, AHE и HECS при размере блока обработки 32×32 пикселя. В табл. 3 приведены усредненные по 470 изображениям отношения глобальных показателей, в табл. 4 – разности интервальных показателей.

Таблица 3. Отношения глобальных показателей при размере блока 32×32 пикселя
Table 3. Relationships of global indicators with a block size of 32×32 pixels

Показатель / Index	Сопоставление отношений показателей алгоритма HECSm при различных S и алгоритмах / Comparison of ratios of indicators of the HECSm algorithm for various S and algorithms														
	HE					AHE					HECS				
	$S = 1/5$	$S = 1/3$	$S = 1/2$	$S = 2/3$	$S = 4/5$	$S = 1/5$	$S = 1/3$	$S = 1/2$	$S = 2/3$	$S = 4/5$	$S = 1/5$	$S = 1/3$	$S = 1/2$	$S = 2/3$	$S = 4/5$
N_S	10,98	10,48	9,75	9,16	8,62	1,11	1,07	1,01	0,96	0,90	0,97	0,92	0,86	0,82	0,76
F_S	0,91	0,94	0,94	0,93	0,90	0,96	0,99	0,99	0,98	0,95	1,00	1,03	1,03	1,02	0,99
I_{TMQ}	1,11	1,12	1,11	1,10	1,08	1,00	1,00	0,99	0,99	0,97	0,99	1,00	0,99	0,98	0,97
D_{ST}	1,96	1,95	1,93	1,94	1,96	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,92	0,91	0,90	0,91	0,92
G_A	3,41	3,32	3,25	3,25	3,27	1,03	1,01	0,99	0,99	0,99	0,91	0,88	0,86	0,86	0,87
E_I	1,22	1,23	1,23	1,23	1,22	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97
N_{LE}	1,29	1,27	1,26	1,26	1,28	1,06	1,04	1,04	1,04	1,06	0,97	0,95	0,95	0,95	0,96

Таблица 4. Разности интервальных показателей при размере блока 32×32 пикселя
Table 4. Differences of interval indicators with a block size of 32×32 pixels

Показатель / Index	Сопоставление разности показателей алгоритма HECSm при различных S и алгоритмах / Comparison of the difference between the indicators of the HECSm algorithm for different S and algorithms														
	HE					AHE					HECS				
	$S = 1/5$	$S = 1/3$	$S = 1/2$	$S = 2/3$	$S = 4/5$	$S = 1/5$	$S = 1/3$	$S = 1/2$	$S = 2/3$	$S = 4/5$	$S = 1/5$	$S = 1/3$	$S = 1/2$	$S = 2/3$	$S = 4/5$
Интервал L															
P_D	-152,0	21,6	112,2	168,5	233,0	-254,3	-79,9	17,8	67,1	137,1	-225,2	-50,8	45,0	96,2	166,2
E_D	10,4	29,0	39,0	43,4	50,7	-21,2	-2,5	7,5	12,0	19,6	-22,7	-4,1	5,9	10,5	18,0
E_{MS}	-5,8	-2,1	0,8	3,7	3,1	-6,0	-2,2	0,2	3,6	3,2	-6,5	-2,7	-0,2	3,1	2,6
U_H	-0,2	-0,2	-0,4	-0,5	-0,5	0,1	0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3
L_{DH}	-62,2	-66,7	-67,5	-67,0	-63,4	4,2	-0,1	-1,0	-0,7	2,7	10,9	6,8	6,0	6,0	9,1
L_{DL}	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-1,0	0,3	0,1	-0,1	-0,2	-0,5	0,3	0,1	-0,1	-0,2	-0,5
Интервал R															
P_D	209,9	147,2	68,9	-51,6	-255,2	169,9	107,3	32,4	-88,9	-302,0	206,6	143,9	67,4	-52,2	-265,4
E_D	39,4	34,5	25,6	10,1	-27,4	12,4	7,6	1,8	-15,9	-55,3	29,1	24,3	18,1	0,8	-38,5
E_{MS}	-0,6	-0,1	0	-0,1	-0,2	-0,8	-0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	0,1	0,2	0,1	0
U_H	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0,1	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	-0,1	-0,3
L_{DH}	-35,8	-28,1	-21,9	-17,2	-17,3	-9,9	-2,0	4,2	9,0	8,9	-7,6	0,2	6,4	11,2	11,1
L_{DL}	-0,4	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4	-0,2	0	0,2	0,2	-0,4	-0,2	0	0,2	0,2

Из табл. 3 следует, что по большинству глобальных показателей алгоритм HECSm превосходит HE, аналогичен алгоритму AHE и уступает HECS (кроме структурной точности F_S , качества тональной карты I_{TMQ} и энтропии E_I). Анализ соотношений интервальных показателей в табл. 4 необходимо производить с учетом значения коэффициента асимметрии S . При $S < 1/2$ происходит растяжение правой части гистограммы за счет сжатия левой, что ведет к улучшению показателей качества тонового отображения для правого интервала гистограммы (более ярких

областей) и ухудшения этих показателей для левого интервала (более темных областей). Аналогично для $S > 1/2$ имеет место улучшение показателей качества тонового отображения для левого интервала гистограммы (более темных областей). С учетом этого из табл. 4 следует, что в нижнем и верхнем интервалах динамического диапазона алгоритм HECSm имеет лучшие значения потенциальной различающей способности P_D и потерь различия E_D при сжатии динамического диапазона по сравнению с алгоритмами HE, AHE и HECS, а также величины нелинейных искажений сжатия E_{MS} по сравнению с HECS.

Заключение

С целью повышения качества тонового отображения инфракрасных изображений при сжатии их динамического диапазона и упрощения управления характеристиками воспроизведения инфракрасных изображений предложен алгоритм преобразования динамического диапазона на основе адаптивного выравнивания гистограммы с инверсией краев. Для выбора интервала яркости и степени его растяжения в предложенном алгоритме использовался коэффициент асимметрии. Благодаря наложению краев гистограммы (отсутствию насыщения) минимизируются потери информации при ее растяжении, что позволяет улучшить некоторые глобальные и интервальные показатели качества.

Список литературы

1. Enhancement of Low Illumination Images Based on an Optimal Hyperbolic Tangent Profile / S. C. Liu [et al.] // *Computers and Electrical Engineering*. 2018. Vol. 70. P. 538–550. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2017.08.026.
2. 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. DOI: 10.1109/30.663733.
3. Low-Light Image Enhancement via a Deep Hybrid Network / W. Ren [et al.] // *IEEE Trans. Image Process.* 2019. Vol. 28, No 9. P. 4364–4375. DOI: 10.1109/TIP.2019.2910412.
4. Fast Image Enhancement Based on Maximum and Guided Filters / D. Zhu [et al.] // *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Taipei. 2019. P. 4080–4084. DOI: 10.1109/ICIP.2019.8803591.
5. Reza, A. M. Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement / A. M. Reza // *The Journal of VLSI Signal Processing-Systems for Signal, Image, and Video Technology*. 2004. Vol. 38, No 1. P. 35–44. DOI: 10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82.
6. 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 // *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. 2021. Т. 66, № 4. С. 470–482. DOI: 10.29235/1561-8358-2021-66-4-470-482.
7. Independence of Luminance and Contrast in Natural Scenes and in the Early Visual System / V. Mante [et al.] // *Nat Neurosci*. 2005. Vol. 8. P. 1690–1697. DOI: 10.1038/nn1556.
8. Wang, Z. Multiscale Structural Similarity for Image Quality Assessment / Z. Wang, E. P. Simoncelli, A. C. Bovik // *37th Asilomar Conf. on Signals, Systems & Computers*. Pacific Grove, CA, USA. 2003. Vol. 2. P. 1398–1402. DOI: 10.1109/ACSSC.2003.1292216.
9. Yeganeh, H. Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images / H. Yeganeh, Z. Wang // *IEEE Transactions Image Processing*. 2013. Vol. 22, Iss. 2. P. 657–667. DOI: 10.1109/TIP.2012.2221725.
10. Интервальные показатели качества сжатия динамического диапазона инфракрасных изображений на основе матрицы тонового отображения / С. И. Рудиков, В. Ю. Цветков, А. П. Шкадаревич // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*. 2022. Т. 39, № 11. С. 30–39. DOI: 10.52928/2070-1624-2022-39-11-30-39.

References

1. Liu S. C., Liu S., Wu H., Rahman M. A., Lin S. C.-F., Wong C. Y., et al. (2018) Enhancement of Low Illumination Images Based on an Optimal Hyperbolic Tangent Profile. *Computers and Electrical Engineering*. 70, 538–550. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2017.08.026.
2. Kim T. K., Paik J. K., Kang B. S. (1998) Contrast Enhancement System Using Spatially Adaptive Histogram Equalization with Temporal Filtering. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 44 (1), 82–87. DOI: /10.1109/30.663733.
3. Ren W., Liu S., Ma L., Xu Q., Xu X., Cao X., et al. (2019) Low-Light Image Enhancement via a Deep Hybrid Network. *IEEE Transactions on Image Processing*. 28 (9), 4364–4375. DOI: 10.1109/TIP.2019.2910412.

4. Zhu D., Chen G., P. Michelini N., Liu H. (2019) Fast Image Enhancement Based on Maximum and Guided Filters. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Taipei*. 4080–4084. DOI: 10.1109/ICIP.2019.8803591.
5. Reza A. M. (2004) 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*. 38 (1), 35–44. DOI: 10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82.
6. Rudikov S. I., Tsviatkou V. Yu., Shkadarevich A. P. (2021) Dynamic Range Reduction of Infrared Images Based on Adaptive Equalization, Stretch and Compression of Histogram. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. 66 (4), 470–482. DOI: 10.29235/1561-8358-2021-66-4-470-482 (in Russian).
7. Mante V., Frazor R. A., Bonin V., Geisler W. S., Carandini M. (2005) Independence of Luminance and Contrast in Natural Scenes and in the Early Visual System. *Nat Neurosci*. (8), 1690–1697. DOI: 10.1038/nm1556.
8. Wang Z., Simoncelli E. P., Bovik A. C. (2003) Multiscale Structural Similarity for Image Quality Assessment. *37th Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA*. (2), 1398–1402. DOI: 10.1109/ACSSC.2003.1292216.
9. Yeganeh H., Wang Z. (2013) Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images. *IEEE Transactions on Image Processing*. 22 (2), 657–667. DOI: 10.1109/TIP.2012.2221725.
10. Rudikov S. I., Tsviatkou V. Yu., Shkadarevich A. P. (2022) Interval Quality Indicators of the Dynamic Range Compression of Infrared Images on the Basis of a Tone Mapping Matrix. *Bulletin of Polotsk State University. Series C. Basic Sciences*. 39 (11), 30–39. DOI: 10.52928/2070-1624-2022-39-11-30-39 (in Russian).

Вклад авторов

Рудиков С. И. разработал алгоритм преобразования динамического диапазона ИК-изображений на основе адаптивного выравнивания гистограммы с инверсией краев, провел экспериментальные исследования.

Цветков В. Ю. осуществил постановку задачи исследования и редактирование статьи.

Шкадаревич А. П. определил направление и цель исследования, выполнил интерпретацию полученных результатов.

Authors' contribution

Rudikov S. I. developed an algorithm for transforming the dynamic range of infrared images based on adaptive histogram equalization with edge inversion, and conducted experimental studies.

Tsviatkou V. Yu. carried out the formulation of the research problem and editing of the article.

Shkadarevich A. P. determined the direction and purpose of the study, performed the interpretation of the results.

Сведения об авторах

Рудиков С. И., магистр техн. наук, зам. дир. по информационным технологиям, Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО

Цветков В. Ю., д-р техн. наук, доц., зав. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Шкадаревич А. П., акад. Национальной академии наук Беларуси, д-р физ.-мат. наук, проф., дир. Научно-технического центра «ЛЭМТ» БелОМО

Information about the authors

Rudikov S. I., M. of Sci., Deputy Director for Information Technologies Deputy Director, Science and Technology Center “LEMT” BelOMO

Tsviatkou V. Yu., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Shkadarevich A. P., Academician of the National Academy of Science of Belarus, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Director of the Science and Technology Center “LEMT” BelOMO

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich