

УДК 621.391

ДВОЙНОЕ УМЕНЬШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИК-ИЗОБРАЖЕНИЙ С УПРАВЛЕНИЕМ ФОРМОЙ ГИСТОГРАММЫ

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

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

2 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 1 ноября 2021

Аннотация. Для повышения качества и расширения интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений в статье предложен алгоритм двойного уменьшения динамического диапазона изображения с промежуточным управлением формой его гистограммы. Проведено сравнение характеристик предложенного алгоритма с характеристиками известных алгоритмов уменьшения динамического диапазона и улучшения качества изображений.

Ключевые слова: уменьшение динамического диапазона изображений, повышение качества воспроизведения изображений, инфракрасные изображения, эквализация гистограммы.

Введение

Для уменьшения динамического диапазона и повышения качества многоцветных инфракрасных (ИК) изображений используются методы на основе: преобразования яркости с линейной, кусочно-линейной и нелинейной (логарифмическая, гамма, арктангенс и др.) коррекцией яркости [1, 2]; эквализации гистограммы (глобальной и локальной) [3–5]; преобразования (гомоморфные, пространственно-частотные) [6, 7]; модели человеческого визуального восприятия (в сочетании с методами машинного и глубокого обучения) [7, 8]; фильтрации и многоканальной обработки [9]; гибридные. Наиболее эффективны блочные методы преобразования на основе локальной эквализации гистограммы [4, 5]. Они обеспечивают достаточно высокое качество изображений после преобразования, но не позволяют управлять формой гистограммы формируемого изображения.

Цель работы: повышение качества и расширение интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений при уменьшении их динамического диапазона.

Постановка задачи

На рис. 1, *а* приведена гистограмма ИК-изображения $I_{HDR} = \|i_{HDR}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ с динамическим диапазоном $[0, L_{HDR} - 1]$, $L_{HDR} = 16384$. Эквализация (HE) [3] выравнивает гистограмму (рис. 1, *б*) и формирует изображение $I_{HE}(L_{LDR}) = \|i_{LDR}(L_{LDR}, y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR} - 1]$ ($L_{LDR} < L_{HDR}$), переопределяя значения пикселей на основе вектора $H_E(L_{LDR}) = \|h_E(L_{LDR}, l)\|_{(l=0, L_{HDR}-1)}$ выравнивания. Значения $H_E(L_{LDR})$ вычисляются на основе вектора $H_{CDF} = \|h_{CDF}(l)\|_{(l=0, L_{HDR}-1)}$ значений интегральной функции распределения яркостей.

Для ИК-изображений $I_{LDR} = \|i_{LDR}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$, полученных в результате преобразования динамического диапазона с помощью алгоритмов на основе эквализации (HE), адаптивной эквализации (АНЕ), адаптивной эквализации с ограничением контраста (CLАНЕ), в

табл. 1 приведены блочные (для 16 центральных блоков размером 64×64 пикселей) значения средней яркости V_M , контрастности (стандартного отклонения) D_{ST} , среднего градиента G_A , энтропии E_I и количества локальных экстремумов N_{LE} .

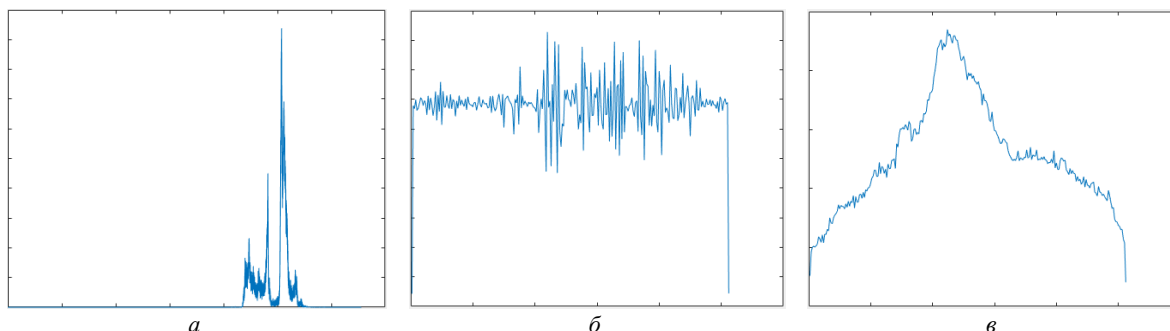


Рис. 1. Преобразованные ИК-изображения и гистограммы яркостей:
 а – гистограмма исходного изображения; б – гистограмма изображения после эквализации;
 в – гистограмма изображения после адаптивной эквализации

Табл. 1. Блочные характеристики ИК-изображения после преобразования динамического диапазона с помощью различных алгоритмов (для 16 центральных блоков 64×64 пикселей)

	HE				АНЕ				CLАНЕ (порог 0,7)			
V_M	56.6299	46.8899	60.8247	65.4817	139.0764	120.0801	131.9780	133.3284	138.3696	119.2720	131.4504	133.0400
	118.1655	110.8328	89.1611	89.4199	136.2896	136.7090	116.5271	139.1985	135.7859	136.0925	116.1260	138.7180
	182.6606	172.9255	166.6401	179.6472	145.9661	136.5193	138.9609	148.3640	144.8640	135.3958	137.5488	147.5322
	198.1091	189.7126	171.2529	204.5200	141.3127	141.5608	136.8904	149.9846	140.1589	139.8833	133.6714	148.5784
D_{ST}	21.9333	13.5732	16.0995	14.1722	45.5368	41.8184	69.5705	65.5206	45.4996	41.7598	69.3058	65.3328
	57.1386	48.7251	40.1890	13.5223	51.1520	48.4922	53.7408	51.2669	50.7874	48.0785	53.4596	51.0176
	23.2324	38.6699	45.6273	43.8044	58.5173	68.4838	65.3261	54.3119	58.0217	68.0328	65.0301	53.9292
	27.2230	49.6122	56.5827	34.2119	63.3532	69.5779	68.2903	65.8417	62.8053	69.3316	67.6612	65.4540
G_A	1.3173	1.1947	1.7782	1.9953	4.1422	4.7962	7.6560	8.9237	4.1260	4.7765	7.6317	8.8826
	4.8990	5.3019	3.3361	2.7413	8.3126	7.7338	7.3327	14.4899	8.2560	7.6350	7.3141	14.4279
	8.0839	8.2234	7.5670	6.7155	20.5580	14.5084	11.4833	10.9717	20.3731	14.3833	11.3742	10.9186
	7.9024	6.4074	6.1890	7.8415	19.9522	12.6282	11.1148	14.8632	19.7971	12.5459	10.9011	14.8030
E_I	5.3324	5.0952	5.5784	5.6022	6.7951	6.6059	7.4971	7.7360	6.7814	6.5967	7.4894	7.7285
	6.5965	6.8060	6.0109	4.5902	7.2881	7.2335	7.3563	7.5657	7.2796	7.2271	7.3496	7.5610
	6.5042	7.0595	7.1229	7.0005	7.7629	7.7622	7.6408	7.5801	7.7584	7.7530	7.6272	7.5727
	6.6978	6.8900	6.7632	6.7786	7.8310	7.8758	7.7647	7.8378	7.8200	7.8636	7.7506	7.8275

Эквализация гистограммы не учитывает локальные особенности распределения яркостей пикселей. В методе АНЕ [4] исходное изображение I_{HDR} делится на блоки размером $Y_B \times X_B$ по вертикали и горизонтали, для центров которых вычисляются векторы $H_E(y_B, x_B, L_{LDR}) = \|h_E(y_B, x_B, L_{LDR}, I)\|_{(I=0..L_{HDR}-1)}$ выравнивания в пределах блока, где y_B, x_B – координаты центра блока; B_y, B_x – число блоков по вертикали и горизонтали. На основе векторов выравнивания смежных блоков с помощью интерполяции вычисляются остальные значения пикселей $i_{АНЕ}(L_{LDR}, y, x)$ изображения $I_{АНЕ}(L_{LDR})$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR} - 1]$, что позволяет снизить вычислительную сложность преобразования. Разделение изображения на блоки в АНЕ позволяет адаптироваться к структуре изображения, хотя и не обеспечивает равномерность глобальной гистограммы (рис. 1, в). Для некоторых изображений применение АНЕ приводит к чрезмерной контрастности и росту заметности шума. Для ИК-изображений с концентрацией значений в центральной части гистограммы CLАНЕ также не эффективен (его использование приводит к незначительному растяжению гистограммы по сравнению с АНЕ).

Из табл. 1 следует, что АНЕ превосходит методы HE и CLАНЕ по всем показателям качества, уступая только CLАНЕ по средней яркости. При этом CLАНЕ 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 необходим алгоритм, параметры которого могут быть подобраны с учетом распределения значений в гистограмме исходного изображения.

Алгоритм уменьшения динамического диапазона ИК-изображений

Для повышения качества и расширения интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений при уменьшении их динамического диапазона разработан алгоритм HECS (Histogram Equalization, Compression and Stretching) на основе адаптивной эквализации, 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. Алгоритм включает три этапа.

1. Предварительное уменьшение динамического диапазона изображения до $[0, L_{LDR1} - 1]$ (этап 1) на основе адаптивной эквализации гистограммы – формируется изображение $I_{AHE}(L_{LDR1})$ с динамическим диапазоном $[0, L_{LDR1} - 1]$.

2. Управление формой гистограммы (этап 2):

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 $[T_G + 1, L_{LDR1} - 1]$, разделяемым на уровне $T_G = K_G(L_{LDR1} - 1)$ по коэффициенту K_G .

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 .

3. Окончательное уменьшение динамического диапазона до $[0, L_{LDR2} - 1]$ на основе линейного сжатия гистограммы с коэффициентом L_{LDR2}/L_{LDR1} (этап 3).

Оценка эффективности работы алгоритмов преобразования динамического диапазона

При постоянных значениях $Y_B, X_B, L_{LDR1}, L_{LDR2}$ результаты преобразования HECS зависят от 6 параметров: $\{K_G, G_L, G_H, T, T_L, T_R\}$. Причем, существуют наборы параметров $\{K_G, G_L, G_H, T, T_L, T_R\}$, обеспечивающие лучшие характеристики $\{V_M, D_{ST}, G_A, E_I, N_{LE}\}$ по сравнению с алгоритмами HE, AHE и CLANE (табл. 2).

Табл. 2. Блочные характеристики ИК-изображения после преобразования динамического диапазона с помощью алгоритма HECS (для 16 центральных блоков 64×64 пикселей)

	$G_L = 1,0; T = 0,25; T_L = 1$				$K_G = 0,52; G_L = 1,2; T = 0,3; T_L = 1$				$K_G = 0,5; G_L = 1,58; T = 0,13; T_L = 1$			
V_M	134,679	103,228	129,911	138,72	130,483	100,267	130,979	139,161	140,346	122,407	133,22	133,144
	129,257	130,461	103,448	144,552	126,184	127,752	103,79	144,7	137,321	137,822	118,068	139,427
	148,945	129,55	128,58	147,17	147,501	129,285	126,31	145,094	146,444	137,098	140,296	149,61
	145,113	142,104	132,797	153,431	144,425	140,54	131,172	151,998	141,417	142,128	137,243	149,882
D_{ST}	69,3271	61,8439	86,8645	81,2686	67,6154	58,9855	79,2623	75,9073	44,0355	40,7059	69,3043	65,9684
	77,5715	70,7298	78,5493	73,8501	78,8093	70,5348	74,7419	69,8253	49,6155	46,9932	52,3309	50,3646
	75,4276	85,2185	84,0918	70,9141	71,6261	80,5479	80,7015	67,7475	58,1275	66,9678	64,4772	54,4829
	80,1182	84,263	80,7222	81,2298	75,3926	79,6093	76,1135	77,1129	63,055	68,6331	67,2359	64,4554
G_A	7,95323	8,81321	12,0919	13,5764	8,58887	9,19957	12,0385	13,9779	4,09587	4,70267	8,2001	9,38829
	12,3054	12,6273	13,4567	22,6722	13,261	13,2373	14,4376	23,077	8,35645	7,49952	7,30333	14,3721
	27,3601	19,2297	15,6852	16,5017	26,9364	19,3573	16,2279	17,0813	20,6173	14,7596	11,9258	11,1959
	27,0372	16,2228	14,4942	19,8411	26,4846	16,5677	14,9972	19,9611	20,0698	12,8697	11,4318	15,0585
E_I	7,3657	7,28271	7,47567	7,61709	7,4243	7,28465	7,45765	7,61821	6,78842	6,57631	7,57311	7,83037
	7,78524	7,77985	7,64784	7,80486	7,85252	7,82472	7,6091	7,74005	7,25016	7,16682	7,39644	7,58231
	7,80593	7,69683	7,70292	7,82463	7,77948	7,69407	7,75383	7,81544	7,75887	7,76604	7,63545	7,58427
	7,76705	7,71467	7,80059	7,71923	7,75579	7,71989	7,85002	7,72522	7,84839	7,87996	7,73511	7,82546

Из табл. 1 и 2 следует, что при таком же отклонении от среднего по сравнению с CLАНЕ нелинейное сжатие гистограммы в HECS позволяет повысить градиент, энтропию и детализацию изображения после уменьшения динамического диапазона. Нелинейное сжатие гистограммы в HECS позволяет также ограничить контраст. Причем, при ограничении контраста (параметр D_{ST}) на таком же уровне, как в CLАНЕ, 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).

Вычислительная сложность алгоритма 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). Вычислительная сложность алгоритмов АНЕ и CLАНЕ также растет с уменьшением размера блока. Для выбора значений параметров ΔL и $Y_B \times X_B$ в алгоритме HECS необходимо учесть значения показателей качества воспроизведения и детализации ИК-изображений после уменьшения их динамического диапазона при этих параметрах.

Для средних значений интервалов перестройки параметров HECS на рис. 2 приведены зависимости разностей между показателями качества воспроизведения и детализации ИК-изображений $\Delta D_{ST} = D_{ST}(\Delta L_1) - D_{ST}(\Delta L_2)$, $\Delta G_A = G_A(\Delta L_1) - G_A(\Delta L_2)$, $\Delta E_I = E_I(\Delta L_1) - E_I(\Delta L_2)$, $\Delta N_{LE} = N_{LE}(\Delta L_1) - N_{LE}(\Delta L_2)$ при $\Delta L_1 = \{0, 2, 4, 6\}$ и $\Delta L_2 = 0$ ($L_{LDR2} = 8$) от $\Delta L = L_{LDR1} - L_{LDR2}$.

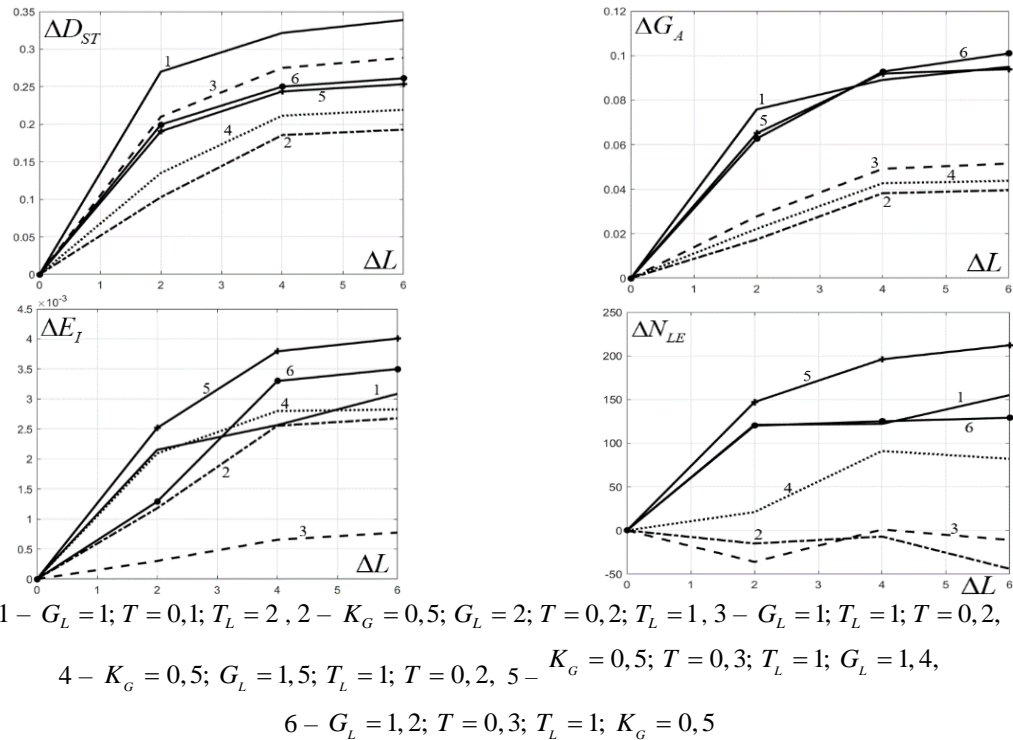


Рис. 2. Зависимости разностей показателей качества воспроизведения изображения при $\Delta L > 0$ и $\Delta L = 0$ ($L_{LDR2} = 8$) от ΔL для средних значений перестраиваемых параметров алгоритма HECS

Из рис. 2 следует, что с увеличением ΔL показатели качества растут. При этом показатель N_{LE} растет за исключением двух случаев. Для варианта $L_{LDR1} = 10$ и $L_{LDR2} = 8$ наблюдается наиболее резкий рост показателей качества воспроизведения изображения по сравнению с вариантом $L_{LDR1} = L_{LDR2} = 8$. Лучшее качество воспроизведения изображения обеспечивается при $L_{LDR1} = 14$, но оно незначительно отличается от качества воспроизведения при $L_{LDR1} = 10$.

Для средних значений интервалов перестройки параметров HECS на рис. 3 приведены зависимости разностей между показателями качества воспроизведения и детализации ИК-изображений $\Delta D_{ST} = D_{ST}(\Delta L_1) - D_{ST}(\Delta L_2)$, $\Delta G_A = G_A(\Delta L_1) - G_A(\Delta L_2)$, $\Delta E_I = E_I(\Delta L_1) - E_I(\Delta L_2)$, $\Delta N_{LE} = N_{LE}(\Delta L_1) - N_{LE}(\Delta L_2)$ при $Y_{B1} = \{16, 32, 64, 128\}$ и $Y_{B2} = 16$ от Y_B ($L_{HDR} = 14, L_{LDR1} = 10, L_{LDR2} = 8$).

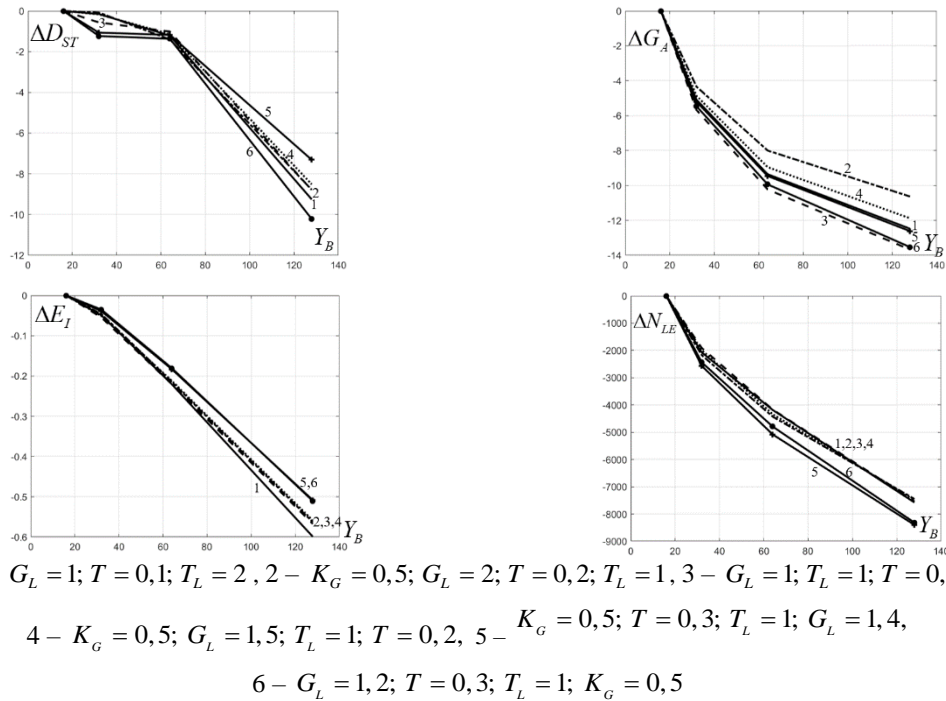


Рис. 3. Зависимости разностей показателей качества воспроизведения изображения при $Y_{B1} = \{16, 32, 64, 128\}$ и $Y_{B2} = 16$ от Y_B для средних значений перестраиваемых параметров алгоритма HECS

Из рис. 3 следует, что с увеличением Y_B показатели качества и детализации падают ($Y_B = X_B$). Однако при малых размерах блока на однородном фоне может проявляться блочный эффект, возникающий в результате интерполяции в алгоритме АНЕ.

Произведена оценка выигрышей (в процентах) алгоритма HECS по сравнению с алгоритмами АНЕ и СЛАНЕ по контрастности D_{ST} , среднему градиенту G_A , энтропии E_I и количеству локальных экстремумов N_{LE} , с усреднением по блокам 64×64 пикселей и изображениям, при $Y_B = \{32, 64\}$, $L_{HDR} = 14$, $L_{LDR1} = 10$, $L_{LDR2} = 8$.

Тестовая выборка содержит 94 ИК-изображения, разделенные на 6 типов по форме гистограммы яркости (рис. 4) после адаптивной эквализации (этап 1 преобразования): 11 изображений типа 1; 17 – типа 2; 31 – типа 3; 27 – типа 4; 5 – типа 5; 3 – типа 6. На всех изображениях алгоритм HECS показывает лучшие значения $\{D_{ST}, G_A, E_I, N_{LE}\}$ по сравнению с алгоритмами АНЕ и СЛАНЕ. По сравнению с алгоритмом АНЕ наибольшие выигрыши по контрастности D_{ST} наблюдаются для изображений типа 3 при $Y_B = 32$ (10 %) и типа 1 при $Y_B = 64$ (12,3 %), по среднему градиенту G_A – для изображений типа 4 при $Y_B = 32$ (20,6 %) и $Y_B = 64$ (50,5 %), по энтропии E_I – для изображений типа 5 при $Y_B = 32$ (39,2 %) и $Y_B = 64$ (55,9 %), по количеству локальных экстремумов N_{LE} – для изображений типа 4 при $Y_B = 32$ (17,2 %) и $Y_B = 64$ (25,9 %). По сравнению с АНЕ наименьшие выигрыши по контрастности D_{ST} наблюдаются для изображений типа 1 при $Y_B = 32$ (6,1 %) и типа 5 при $Y_B = 64$ (0,1 %), по среднему градиенту G_A – для изображений типа 5 при $Y_B = 32$ (9,4 %) и $Y_B = 64$ (13,4 %), по энтропии E_I – для изображений типа 1 при $Y_B = 32$ (13,4 %) и $Y_B = 64$ (31,4 %), по количеству локальных экстремумов N_{LE} – для изображений типа 5 при $Y_B = 32$ (4,3 %) и $Y_B = 64$ (6,9 %).

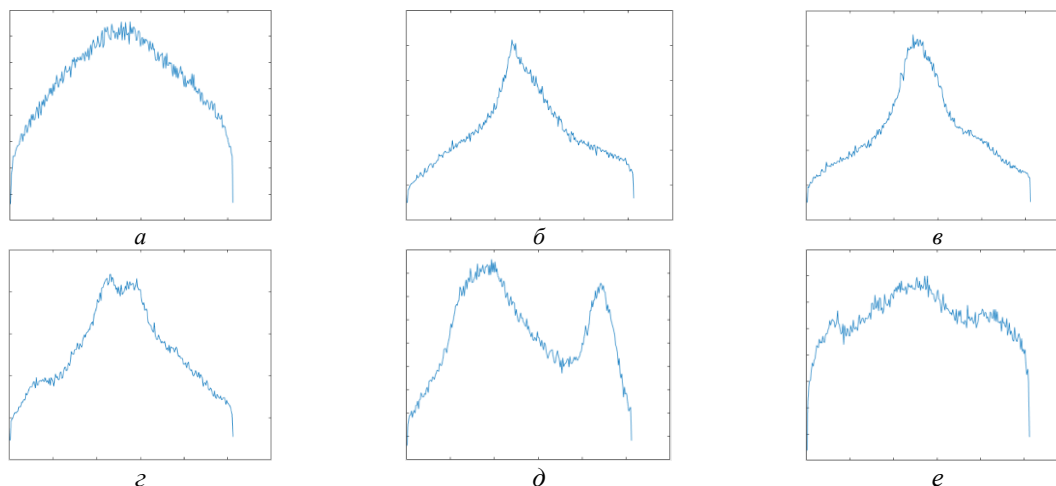


Рис. 4. Формы гистограмм яркости тестовых ИК-изображений после адаптивной эквализации:
a – тип 1; *б* – тип 2; *в* – тип 3; *г* – тип 4; *д* – тип 5; *е* – тип 6

Заключение

Для повышения качества и расширения интервала управления характеристиками воспроизведения ИК-изображений при уменьшении их динамического диапазона разработан алгоритм на основе адаптивной эквализации, 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 адаптивной эквализации гистограммы разработанный алгоритм обеспечивает повышение контрастности, среднего градиента, энтропии и детализации после преобразования динамического диапазона ИК-изображения. Выигрыши достигаются за счет увеличения вычислительной сложности.

DUAL DYNAMIC RANGE REDUCTION OF IR IMAGES WITH HISTOGRAM SHAPE CONTROL

S.I. RUDIKOV, V.Yu. TSVIATKOU, A.P. SHKADAREVICH

Abstract. The problem of reducing the dynamic range and improving the quality of infrared (IR) images with a wide dynamic range. 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. The characteristics of the proposed algorithm are compared with the characteristics of known algorithms for reducing the dynamic range and improving the image quality.

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

Список литературы

1. San Chi Liu, [et al.] // Comput. Electr. Eng. 2018. Vol. 70. P. 538–550.
2. Zhi N., Mao S., Li M. // Journal of Liaoning Tech. 2018. Vol. 37(1) P. 191–197.
3. Nithyananda C.R., Ramachandra A.C., Preethi // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 2016. P. 2512–2517.
4. Kim T.K., Paik J.K., Kang B.S. // IEEE Trans. Consum. Electron. 1998. Vol. 44(1). P. 82–87.
5. Reza A.M. // Journal of VLSI Signal Process.-Syst. Signal Image Video Technol. 2004. Vol. 38(1) P. 35–44.
6. Nandal A., Bhaskar V., Dhaka A. // IET Signal Process. 2018. Vol. 12(4). P. 514–521.
7. Xu Q., Cui J., Chen B. // Journal of Hunan Univ. Arts Sci. 2017. Vol. 29(2). P. 41–46.
8. Ren W., [et al.]. // IEEE Trans. Image Process. 2019. Vol. 28(9). P. 4364–4375.
9. Zhu D., [et al.]. // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2019. P. 4080–4084.