

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЖАТИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

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

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

2 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20 марта 2023

Аннотация. Приведены результаты анализа чувствительности показателей качества тонового отображения к выбору алгоритмов сжатия динамического диапазона, их параметров и типов инфракрасных изображений. Показано, что интервальные показатели имеют большую чувствительность к условиям тонового отображения в сравнении с глобальными показателями.

Ключевые слова: сжатие динамического диапазона изображений, инфракрасные изображения, выравнивание гистограммы.

Введение

Для отображения и повышения качества воспроизведения многоцветных инфракрасных изображений (ИК-изображений) на мониторе с меньшей разрядностью пикселей (как правило, 8 бит) широко используются алгоритмы преобразования динамического диапазона на основе выравнивания гистограммы (Histogram Equalization, HE) [1] и основанные на них блочные алгоритмы адаптивного выравнивания гистограммы (Adaptive Histogram Equalization, АНЕ) [2]. Алгоритм АНЕ обеспечивает достаточно высокое качество изображений после преобразования, но не позволяет управлять формой интегральной функции распределения, что приводит к чрезмерной контрастности для некоторых типов изображений.

В алгоритме адаптивного выравнивания гистограммы с ограничением контрастности (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE) [3] данная особенность учитывается за счет регулируемого ограничения гистограммы. Это позволяет управлять контрастностью в сторону ее уменьшения по сравнению с АНЕ. Но при снижении контрастности в алгоритме CLAHE ухудшаются и другие показатели качества изображения (среднее значение, средний градиент, энтропия, число деталей). Данный недостаток свойственен многим модификациям алгоритма АНЕ [4–6]. Причина заключается в выравнивании гистограммы, существенно ослабляющем результаты любой предкоррекции изображения. Поэтому эффективное управление характеристиками изображения при преобразовании динамического диапазона возможно только после выравнивания гистограммы. При этом для коррекции необходимо обеспечить достаточно широкий динамический диапазон изображения.

В [7] предложен алгоритм HECS (Histogram Equalization, Compression and Stretching, HECS), который превосходит алгоритм АНЕ по контрасту за счет обрезки краев, растяжения центральной части, растяжения (сжатия) и наложения обрезанных краев глобальной гистограммы. Недостатком алгоритма HECS является ухудшение контраста по краям динамического диапазона, что приводит к заметным артефактам на преобразованном ИК-изображении и дополнительной неравномерности его глобальной гистограммы.

В [8] предложен модифицированный алгоритм HECSm адаптивной эквализации, растяжения и сжатия гистограммы, основанный на инверсии ее обрезанных краев. Инверсия краев позволяет сохранить корреляцию значений и контраст для большей части смежных пикселей изображения. При уменьшении динамического диапазона ландшафтных ИК-изображений предложенный алгоритм повышает блочный контраст по сравнению с

алгоритмом адаптивной эквализации гистограммы. Особенностью алгоритма является возможность растяжения одной части (левой или правой) за счет сжатия другой в пределах динамического диапазона. Это позволяет повысить разрешение в соответствующих интервалах гистограммы и локальный контраст в темных или светлых областях изображения. Для управления растяжением и сжатием краев гистограммы в алгоритме HECSm предусмотрен параметр A асимметрии гистограммы, вычисляемый как отношение ширины левого интервала гистограммы после преобразования к ширине динамического диапазона изображения.

Целью работы является определение показателей качества тонового отображения, имеющих наибольшую чувствительность к алгоритмам преобразования, их параметрам и типам ИК-изображений.

Показатели качества тонового отображения

Качество алгоритмов тонового отображения определяется качеством преобразованных с их помощью изображений (безэталонные показатели качества) и схожестью этих изображений с исходными изображениями (эталонные показатели качества). Благодаря простоте вычисления широко используются безэталонные показатели, позволяющие оценить контраст (стандартное отклонение D_{ST} и средний градиент G_A), энтропию E_I , количество локальных экстремумов N_{LE} , статистическую естественность N_S [9]. Для оценки качества тонового отображения на основе эталона в случае ИК-изображений с широким динамическим диапазоном часто используются показатели структурной точности F_S [10] и качества тональной карты I_{TMQ} [11]. Эти показатели не учитывают ряд характеристик сжатия динамического диапазона, связанных, например, с линейностью и последовательностью передачи тонов, потерей различения соседних пикселей после преобразования и равномерностью использования динамического диапазона, ростом неоднозначности тонового отображения из-за различий передаточных характеристик блоков изображения при использовании для преобразования блочных алгоритмов. Кроме того, большинство известных показателей вычисляются для всего динамического диапазона. Однако, в ряде случаев необходимы интервальные показатели, позволяющие оценить качество тонового отображения в определённой части динамического диапазона преобразованного ИК-изображения. Данные недостатки приводят к низкой точности и неоднозначности оценки качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений. В [12] предложены интервальные показатели качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений, позволяющие оценить:

- потенциальную различающую способность P_D на выбранном интервале динамического диапазона преобразованного изображения;
- потери E_D различения соседних пикселей на выбранном интервале динамического диапазона преобразованного изображения, обусловленные тоновым отображением;
- величину E_{MS} нелинейных искажений сжатия динамического диапазона на выбранном интервале динамического диапазона преобразованного изображения относительно линейно преобразованного изображения;
- равномерность U_H использования динамического диапазона на выбранном интервале динамического диапазона преобразованного изображения относительно базового интервала;
- неоднозначность L_{DH} тонового отображения, обусловленную различиями передаточных характеристик блоков в интервале динамического диапазона преобразованного изображения, соответствующего интервалу прореженного динамического диапазона исходного изображения;
- величину L_{DL} нелинейных искажений, связанных с неоднозначностью тонового отображения, в интервале динамического диапазона преобразованного изображения, соответствующего интервалу прореженного динамического диапазона исходного изображения.

Чем меньше значения P_D и E_D , тем выше различающая способность и меньше потери различения соседних пикселей преобразованного изображения. Чем меньше значение E_{MS} , тем ближе передаточные характеристики блоков (или всего изображения) к линейным. Чем ближе к единице значение U_H , тем более равномерным является распределение яркостей на выбранном интервале относительного базового интервала и тем ближе тоновое отображение к линейному при

равновероятных значениях пикселей. Чем ближе к единице значение L_{DH} , тем меньше неоднозначность тонового отображения. Чем меньше значение L_{DL} , тем меньше нелинейные искажения из-за неоднозначности тонового отображения.

Оценка качества тонового отображения

На рис. 1 приведены примеры ИК-изображений трех типов, отличающихся формами гистограмм яркости после адаптивной эквализации. Для изображений этих трех типов в табл. 1 – 6 приведены средние значения отношений и разностей показателей качества для алгоритма HECSm при различных значениях асимметрии A и алгоритмов HE, AHE, HECS. Жирным шрифтом в таблицах отмечены максимальные значения отношений и разностей. Табл. 1, 3, 5 содержат значения глобальных параметров, определяемых в пределах всего динамического диапазона изображения. Табл. 2, 4, 6 содержат значения интервальных показателей, вычисляемых для перекрывающихся левого (L), центрального (C), правого (R) интервалов гистограммы и всего динамического диапазона изображения (интервал T). В алгоритмах AHE, HECS и HECSm использованы блоки 32×32 пикселя.

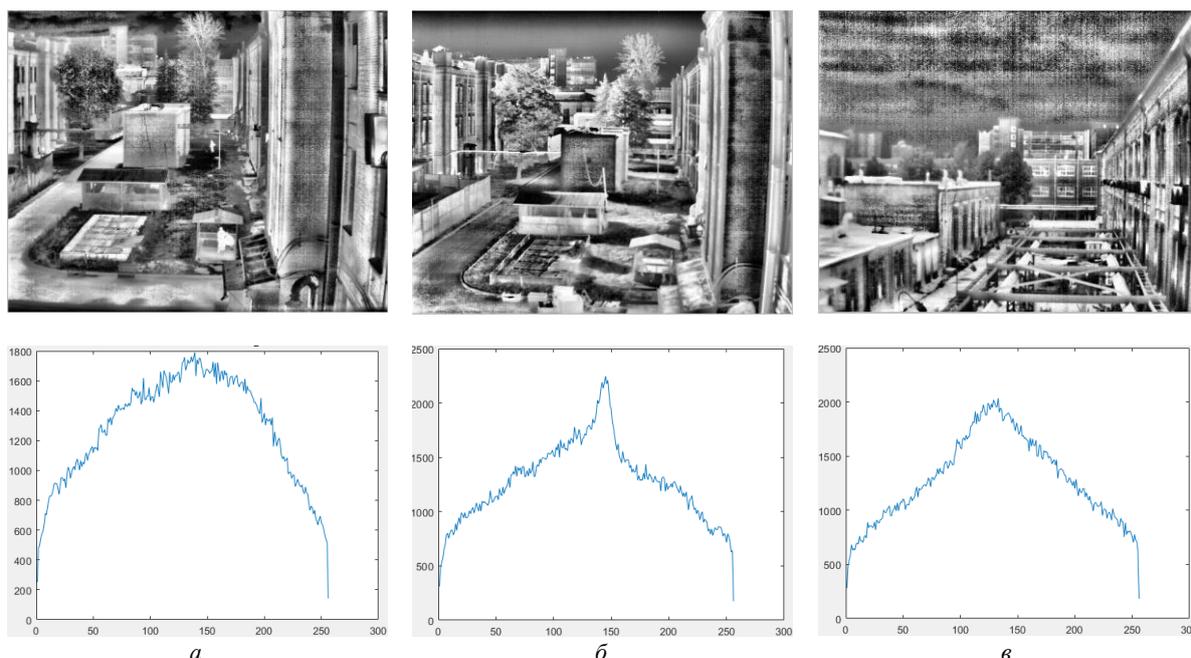


Рис. 1. Примеры ИК-изображений трех типов и их гистограмм после адаптивной эквализации: a – тип 1; b – тип 2; v – тип 3

Табл. 1. Значения отношений глобальных показателей качества для изображений типа 1

Показатели	Значения отношений показателей для алгоритма HECSm при различных A и алгоритмов HE, AHE, HECS														
	HE					AHE					HECS				
	$A=1/5$	$A=1/3$	$A=1/2$	$A=2/3$	$A=4/5$	$A=1/5$	$A=1/3$	$A=1/2$	$A=2/3$	$A=4/5$	$A=1/5$	$A=1/3$	$A=1/2$	$A=2/3$	$A=4/5$
N_S	7,813	7,348	6,844	6,542	6,235	1,037	0,975	0,909	0,868	0,828	0,934	0,879	0,819	0,783	0,746
F_S	0,933	0,961	0,964	0,960	0,942	0,963	0,992	0,996	0,991	0,973	1,001	1,031	1,035	1,030	1,012
I_{TMQ}	1,123	1,123	1,115	1,109	1,098	0,994	0,995	0,988	0,982	0,972	0,991	0,992	0,985	0,979	0,970
D_{ST}	1,890	1,882	1,860	1,871	1,906	0,961	0,957	0,946	0,952	0,970	0,908	0,904	0,893	0,899	0,916
G_A	3,151	3,082	3,023	3,036	3,092	0,994	0,972	0,954	0,957	0,975	0,874	0,855	0,838	0,842	0,857
E_I	1,209	1,216	1,215	1,212	1,203	0,983	0,989	0,988	0,986	0,978	0,980	0,986	0,985	0,983	0,976
N_{LE}	1,169	1,151	1,145	1,150	1,166	1,047	1,031	1,026	1,031	1,045	0,955	0,941	0,936	0,940	0,953

Использование классификации изображений на типы по форме гистограммы после адаптивной эквализации обусловлено особенностями формирования естественных

ИК-изображений, имеющих широкий динамический диапазон. Информация о распределении яркости на гистограммах таких изображений концентрируется в одном относительно узком интервале, что не позволяет различать особенности локального распределения в этом интервале. После эквализации гистограммы этот интервал растягивается практически на весь динамический диапазон. Причем, если алгоритм HE, не учитывающий локальные особенности изображения, обеспечивает близкое к равномерному распределение вероятностей значений пикселей в пределах динамического диапазона, то алгоритм АНЕ адаптивной эквализации, обрабатывающий изображение перекрывающимися блоками, частично сохраняет особенности распределения вероятностей исходных значений пикселей после преобразования.

Табл. 2. Значения разностей интервальных показателей качества для изображений типа 1

Показатели	Значения разностей показателей для алгоритма HECSm при различных A и алгоритмов HE, АНЕ, HECS														
	HE					АНЕ					HECS				
	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5
Интервал L															
P_D	-78,9	12,5	60,6	92,2	123,8	-124,1	-32,7	15,3	47,0	78,6	-109,5	-18,1	29,9	61,6	93,2
E_D	-2,2	2,7	4,6	5,7	6,7	-4,5	0,3	2,3	3,3	4,4	-3,05	1,77	3,70	4,78	5,83
E_{MS}	-5,6	-1,4	2,0	4,3	6,4	-5,2	-0,9	2,5	4,7	6,9	-7,75	-3,49	-0,09	2,15	4,30
U_H	-0,06	-0,30	-0,44	-0,51	-0,55	-0,08	-0,04	-0,05	-0,06	-0,06	0,05	-0,19	-0,33	-0,40	-0,45
L_{DH}	-86,7	-107,7	-108,8	-105,1	-98,4	21,5	0,5	-0,5	3,1	9,8	14,31	-6,71	-7,77	-4,12	2,63
L_{DL}	-0,31	-0,56	-0,69	-0,78	-0,86	0,26	0,01	-0,12	-0,21	-0,29	0,19	-0,06	-0,19	-0,29	-0,36
Интервал C															
P_D	-73,9	-80,8	-87,1	-86,3	-69,5	-1,7	-8,7	-15,0	-14,1	2,7	-18,9	-25,8	-32,1	-31,3	-14,5
E_D	-21,9	-22,8	-23,3	-22,6	-20,5	-0,1	-1,0	-1,5	-0,8	1,3	-2,06	-3,01	-3,44	-2,76	-0,65
E_{MS}	-3,3	-0,3	1,3	2,3	3,2	-2,4	0,7	2,2	3,2	4,1	-4,39	-1,32	0,22	1,22	2,13
U_H	-0,32	-0,66	-0,74	-0,57	-0,20	0,02	-0,33	-0,40	-0,24	0,13	-0,16	-0,50	-0,58	-0,41	-0,04
L_{DH}	-89,6	-83,7	-73,0	-64,2	-52,5	-1,3	4,6	15,3	24,1	35,8	-23,11	-17,19	-6,51	2,34	14,04
L_{DL}	-0,38	-0,33	-0,29	-0,26	-0,24	0,00	0,05	0,09	0,12	0,14	-0,05	-0,01	0,04	0,06	0,09
Интервал R															
P_D	129,0	84,6	33,7	-32,5	-134,5	107,0	62,6	11,7	-54,4	-156,5	125,9	81,5	30,6	-35,6	-137,6
E_D	25,3	23,9	22,0	18,4	12,4	4,7	3,4	1,4	-2,1	-8,1	7,26	5,91	3,97	0,39	-5,59
E_{MS}	-0,4	0,2	0,2	0,0	-0,3	-0,5	0,0	0,0	-0,2	-0,5	-0,22	0,30	0,32	0,17	-0,18
U_H	-0,55	-0,48	-0,39	-0,20	-0,22	-0,33	-0,25	-0,16	0,03	0,01	-0,43	-0,36	-0,27	-0,08	-0,10
L_{DH}	-28,3	-25,4	-23,6	-21,6	-18,4	-2,7	0,2	2,0	4,0	7,1	-0,05	2,79	4,57	6,57	9,77
L_{DL}	-0,37	-0,27	-0,20	-0,14	-0,07	-0,17	-0,08	-0,01	0,06	0,12	-0,14	-0,04	0,02	0,09	0,13
Интервал T															
E_{MS}	-3,9	0,1	2,4	3,9	5,0	-4,9	-0,9	1,4	2,9	4,0	-4,40	-0,46	1,87	3,36	4,50
L_{DH}	-67,1	-68,0	-67,8	-67,3	-66,2	2,2	1,2	1,5	1,9	3,1	5,00	4,03	4,29	4,73	5,85
L_{DL}	-0,35	-0,35	-0,35	-0,35	-0,34	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12

Табл. 3. Значения отношений глобальных показателей качества для изображений типа 2

Показатели	Значения отношений показателей для алгоритма HECSm при различных A и алгоритмов HE, АНЕ, HECS														
	HE					АНЕ					HECS				
	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5
N_S	16,82	15,99	14,84	13,97	13,15	1,097	1,042	0,967	0,910	0,858	0,931	0,884	0,821	0,773	0,728
F_S	0,866	0,904	0,909	0,904	0,883	0,945	0,986	0,992	0,986	0,963	0,985	1,027	1,034	1,028	1,003
I_{TMQ}	1,120	1,125	1,118	1,109	1,095	0,996	1,001	0,994	0,986	0,974	0,988	0,992	0,986	0,978	0,966
D_{ST}	2,433	2,443	2,419	2,431	2,469	0,993	0,996	0,987	0,992	1,007	0,903	0,906	0,897	0,902	0,916
G_A	4,221	4,131	4,041	4,042	4,101	1,038	1,014	0,992	0,993	1,007	0,878	0,858	0,839	0,840	0,852
E_I	1,260	1,269	1,267	1,263	1,251	0,985	0,992	0,990	0,987	0,978	0,975	0,982	0,981	0,977	0,968
N_{LE}	1,195	1,177	1,170	1,175	1,188	1,050	1,034	1,029	1,032	1,044	0,955	0,941	0,936	0,940	0,950

Табл. 4. Значения разностей интервальных показателей качества для изображений типа 2

Показатели	Значения разностей показателей для алгоритма HECSm при различных A и алгоритмов HE, AHE, HECS														
	HE					AHE					HECS				
	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5
Интервал L															
P_D	-107,5	14,0	77,2	119,9	185,5	-169,3	-47,8	15,4	58,1	123,7	-131,6	-10,1	53,1	95,8	161,4
E_D	-23,05	-17,05	-14,87	-13,37	-11,72	-6,50	-0,49	1,68	3,18	4,83	-4,78	1,22	3,39	4,89	6,54
E_{MS}	-3,67	0,25	3,59	6,05	3,75	-6,16	-2,24	1,10	3,55	1,26	-9,09	-5,17	-1,83	0,63	-1,67
U_H	-0,08	-0,22	-0,40	-0,49	-0,53	0,21	0,06	-0,11	-0,20	-0,24	0,00	-0,14	-0,31	-0,40	-0,44
L_{DH}	-82,84	-92,64	-98,84	-96,60	-87,45	11,28	1,49	-4,71	-2,48	6,68	15,60	5,81	-0,39	1,84	11,00
L_{DL}	-0,29	-0,52	-0,73	-0,88	-1,11	0,31	0,08	-0,13	-0,28	-0,51	0,24	0,00	-0,20	-0,35	-0,58
Интервал C															
P_D	-100,0	-106,7	-115,1	-112,3	-21,8	7,0	0,4	-8,0	-5,2	85,2	-40,4	-47,0	-55,4	-52,6	37,8
E_D	-25,08	-26,60	-26,95	-26,45	-21,37	0,41	-1,12	-1,46	-0,96	4,45	-1,43	-2,96	-3,30	-2,80	2,28
E_{MS}	-2,70	0,48	2,11	3,16	2,64	-3,24	-0,06	1,57	2,62	2,10	-5,20	-2,02	-0,39	0,67	0,15
U_H	-0,28	-0,64	-0,75	-0,57	-0,13	0,19	-0,17	-0,28	-0,10	0,34	-0,11	-0,47	-0,58	-0,40	0,04
L_{DH}	-76,05	-74,17	-67,09	-59,02	-57,61	-2,13	-0,25	6,83	14,91	16,31	-18,91	-17,03	-9,95	-1,88	-0,47
L_{DL}	-0,16	-0,14	-0,13	-0,11	-0,15	-0,02	-0,01	0,01	0,02	-0,04	-0,03	0,04	0,07	0,08	-0,02
Интервал R															
P_D	179,2	122,2	52,6	-52,7	-215,4	136,6	79,6	9,9	-95,3	-258,1	164,1	107,1	37,5	-67,8	-230,5
E_D	38,40	36,48	34,45	29,64	19,42	5,31	3,38	1,36	-3,45	-13,67	7,97	6,04	4,02	-0,79	-11,01
E_{MS}	-0,33	0,01	-0,13	-0,43	-0,65	-0,48	-0,14	-0,28	-0,58	-0,80	0,22	0,56	0,42	0,12	-0,10
U_H	-0,54	-0,46	-0,36	-0,14	-0,50	-0,28	-0,20	-0,10	0,12	-0,24	-0,41	-0,33	-0,24	-0,01	-0,38
L_{DH}	-23,22	-17,80	-13,83	-11,91	-12,01	-2,97	2,45	6,43	8,34	8,24	-10,22	-4,80	-0,83	1,08	0,98
L_{DL}	-0,29	-0,21	-0,13	-0,07	-0,04	-0,13	-0,04	0,02	0,06	0,07	-0,18	-0,10	-0,02	0,03	0,07
Интервал T															
E_{MS}	-4,44	-0,64	1,77	3,34	4,30	-5,47	-1,68	0,73	2,31	3,27	-4,80	-1,01	1,40	2,98	3,94
L_{DH}	-61,21	-61,84	-61,46	-60,86	-59,46	0,91	0,27	0,65	1,25	2,65	4,53	3,90	4,28	4,88	6,28
L_{DL}	-0,37	-0,37	-0,37	-0,36	-0,36	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04

Табл. 5. Значения отношений глобальных показателей качества для изображений типа 3

Показатели	Значения отношений показателей для алгоритма HECSm при различных A и алгоритмов HE, AHE, HECS														
	HE					AHE					HECS				
	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5
N_S	18,406	17,478	16,284	15,344	15,167	1,081	1,026	0,953	0,900	0,847	0,928	0,881	0,819	0,773	0,727
F_S	0,964	0,993	0,994	0,985	0,964	0,959	0,990	0,993	0,986	0,960	0,999	1,032	1,035	1,027	1,001
I_{TMQ}	1,154	1,155	1,147	1,137	1,127	0,998	1,000	0,993	0,985	0,972	0,990	0,993	0,985	0,977	0,964
D_{ST}	2,221	2,206	2,178	2,184	2,209	0,992	0,986	0,971	0,973	0,985	0,902	0,896	0,883	0,884	0,895
G_A	4,341	4,230	4,140	4,144	4,213	1,031	1,003	0,979	0,978	0,992	0,867	0,843	0,823	0,823	0,834
E_I	1,275	1,281	1,278	1,272	1,264	0,986	0,991	0,989	0,985	0,977	0,976	0,981	0,979	0,976	0,967
N_{LE}	1,209	1,191	1,186	1,191	1,205	1,047	1,031	1,025	1,029	1,041	0,960	0,945	0,940	0,943	0,954

Из табл. 1, 3, 5 следует, что статистическая естественность N_S достаточно чувствительна к изменению асимметрии алгоритма HECSm и выбору алгоритма между HE и AHE (HECS, HECSm), но слабо зависит от типа изображения и выбора алгоритма между AHE, HECS и HECSm. Структурная точность F_S достаточно чувствительна к изменению асимметрии алгоритма HECSm, выбору алгоритма между HE и AHE (HECS, HECSm) для некоторых типов изображений и выбору алгоритма между AHE, HECS и HECSm. Качество тональной карты I_{TMQ} достаточно чувствительно к изменению асимметрии алгоритма HECSm и выбору алгоритма между HE и AHE (HECS, HECSm).

Табл. 6. Значения разностей интервальных показателей качества для изображений типа 3

Показатели	Значения разностей показателей для алгоритма HECSm при различных A и алгоритмов HE, AHE, HECS														
	HE					AHE					HECS				
	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5	A=1/5	A=1/3	A=1/2	A=2/3	A=4/5
Интервал L															
P_D	-85,46	48,79	119,41	164,37	202,28	-203,12	-63,82	22,75	52,61	123,42	-152,06	-12,60	66,31	103,79	174,61
E_D	-20,03	-10,61	-5,83	-4,17	-5,04	-5,08	4,53	11,76	11,75	12,76	-2,52	7,12	13,99	14,30	15,14
E_{MS}	-4,30	-0,16	3,23	5,50	3,44	-6,44	-2,21	-1,50	3,75	2,56	-9,93	-5,70	-4,44	0,27	-0,94
U_H	-0,12	-0,29	-0,45	-0,53	-0,52	0,23	0,05	-0,12	-0,20	-0,24	0,02	-0,16	-0,33	-0,41	-0,45
L_{DH}	-73,67	-70,46	-70,61	-72,24	-75,43	-2,65	1,23	1,08	-1,91	-6,35	14,69	20,52	20,30	15,89	9,54
L_{DL}	-0,39	-0,54	-0,68	-0,83	-1,07	0,22	0,08	-0,12	-0,20	-0,54	0,22	0,08	-0,13	-0,20	-0,54
Интервал C															
P_D	-124,7	-131,48	-138,70	-130,10	-42,68	-0,12	-6,80	-31,71	-11,10	86,48	-54,78	-61,17	-79,35	-65,45	32,49
E_D	-21,84	-25,97	-26,10	-25,68	-19,67	-3,46	-5,89	-7,88	-5,80	3,11	-7,38	-9,80	-11,37	-9,79	-1,02
E_{MS}	-2,51	0,81	2,56	3,65	2,97	-3,54	-0,06	0,94	2,88	2,84	-6,17	-2,69	-1,30	0,25	0,20
U_H	-0,34	-0,67	-0,74	-0,52	-0,17	0,11	-0,15	-0,23	-0,09	0,23	-0,14	-0,50	-0,60	-0,42	0,01
L_{DH}	-73,94	-70,71	-65,63	-63,41	-64,05	-2,38	0,37	5,46	8,15	8,56	-7,96	-5,25	-0,14	2,54	2,94
L_{DL}	-0,43	-0,38	-0,34	-0,33	-0,41	-0,03	0,02	0,00	0,07	-0,01	-0,02	0,03	0,01	0,09	0,01
Интервал R															
P_D	176,19	115,87	34,81	-85,38	-217,58	170,19	110,63	36,73	-74,86	-264,25	193,43	134,15	55,65	-51,42	-241,27
E_D	41,94	40,20	35,98	23,93	12,74	9,86	8,24	5,64	-3,08	-25,07	17,66	16,06	12,32	4,90	-16,85
E_{MS}	-0,58	-0,03	0,01	-0,17	-0,30	-0,69	-0,10	-0,12	-0,20	-0,31	-0,43	0,16	0,09	0,05	-0,06
U_H	-0,57	-0,50	-0,38	-0,22	-0,51	-0,30	-0,23	-0,13	0,09	-0,21	-0,43	-0,35	-0,25	-0,04	-0,34
L_{DH}	-38,22	-25,32	-21,58	-20,46	-24,11	-14,52	-0,66	3,19	4,60	1,26	-18,56	-4,73	-0,70	0,66	-2,84
L_{DL}	-0,53	-0,30	-0,19	-0,13	-0,13	-0,34	-0,10	-0,01	0,08	0,10	-0,39	-0,15	-0,05	0,03	0,05
Интервал T															
E_{MS}	-4,22	-0,27	2,26	3,93	4,01	-5,90	-1,78	-0,38	2,49	3,68	-5,35	-1,23	0,09	3,04	4,22
L_{DH}	-59,53	-59,89	-59,55	-58,96	-57,87	0,67	0,25	0,59	1,09	2,27	4,09	3,67	4,01	4,51	5,70
L_{DL}	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,41	0,01	0,00	-0,05	0,01	0,02	0,03	0,03	-0,03	0,03	0,04

Стандартное отклонение D_{ST} , средний градиент G_A и количество локальных экстремумов N_{LE} достаточно чувствительны к изменению асимметрии алгоритма HECSm, выбору алгоритма эквализации и выбору типа изображения при использовании алгоритма HE. Энтропия E_I достаточно чувствительна к выбору алгоритма между HE и AHE (HECS, HECSm), выбору алгоритма между AHE, HECS и HECSm для некоторых типов изображений, выбору типа изображения при использовании алгоритма HE. Результаты анализа глобальных показателей приведены в табл. 7.

Табл. 7. Чувствительность глобальных показателей в различных условиях

Показатели	Высокая (+) или низкая (-) чувствительность глобальных показателей в зависимости от условий			
	Изменение значения асимметрии алгоритма HECSm	Использование алгоритмов HE или AHE (HECS, HECSm)	Использование алгоритмов AHE, HECS или HECSm	Использование изображений различного типа
N_S	+	+	-	-
F_S	+	+/-	+	-
I_{TMQ}	+	+	+	-
D_{ST}	+	+	+	+/-
G_A	+	+	+	+/-
E_I	-	+	+/-	+/-
N_{LE}	+	+	+	+/-

Из табл. 2, 4, 6 следует, что потенциальная различающая способность P_D , потери E_D различения соседних пикселей, величина E_{MS} нелинейных искажений сжатия динамического диапазона равномерность U_H использования динамического диапазона, неоднозначность L_{DH} тонового отображения, величину L_{DL} нелинейных искажений достаточно чувствительны к изменению асимметрии алгоритма HECSm, выбору алгоритма эквализации, типа изображения и интервала оценки (табл. 8).

Табл. 8. Чувствительность интервальных показателей в различных условиях

Показатели	Высокая (+) или низкая (-) чувствительность глобальных показателей в зависимости от условий				
	Изменение значения асимметрии алгоритма HECSm	Использование алгоритмов HE или AHE (HECS, HECSm)	Использование алгоритмов AHE, HECS или HECSm	Использование изображений различного типа	Выбор интервала оценки
P_D	+	+	+	+	+
E_D	+	+	+	+	+
E_{MS}	+	+	+	+	+
U_H	+	+	+	+	+
L_{DH}	+	+	+	+	+
L_{DL}	+	+	+	+	+

Из табл. 7, 8 следует, что интервальные показатели превосходят глобальные по чувствительности и могут эффективно использоваться для оценки качества тонового отображения. Из глобальных показателей качества тонового отображения наиболее эффективными являются стандартное отклонение D_{ST} , средний градиент G_A и количество локальных экстремумов N_{LE} , имеющие высокую чувствительность при относительно большом разнообразии условий преобразования.

Заключение

Произведена оценка чувствительности показателей качества сжатия динамического диапазона ИК-изображений к алгоритмам преобразования, их параметрам и особенностям гистограмм яркости пикселей. Рассмотрены глобальные и интервальные показатели качества. Показано, что интервальные показатели превосходят глобальные по чувствительности.

QUALITY EVALUATION OF DYNAMIC RANGE COMPRESSION OF INFRARED IMAGES

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

Abstract. The results of sensitivity analysis of tone mapping quality indicators to the choice of dynamic range compression algorithms, their parameters and types of infrared images were presented. It was shown that interval indicators are more sensitive to tone mapping conditions in comparison with global indicators.

Keywords: image dynamic range compression, infrared images, histogram equalization.

Список литературы

1. Nithyananda C.R., Ramachandra A.C., Preethi // 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). – Chennai, 2016. – P. 2512–2517.
2. Kim T.K., Paik J.K., Kang B.S. // IEEE Trans. Consum. Electron. – 1998. – Vol. 44, № 1. – P. 82–87.
3. Reza A.M. // Journal of VLSI Signal Process.-Syst. Signal Image Video Technol. – 2004. – Vol. 38, № 1. – P. 35–44.
4. Kim J.-Y., Kim L.-S., Hwang S.-H. // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2001. – Vol. 11, № 4. – P. 475–484.

5. Huang S.-C., Yeh C.-H. // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2013. – Vol. 26, № 5. – P. 1487–1492.
6. Al-Sammaraie M. F. // 10th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE). – Cambridge, 2015. – P. 95–101.
7. Рудиков С.И., Цветков В.Ю., Шкадаревич А.П. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук. 2021. Т. 66. № 4. С. 470–482.
8. Рудиков С.И., Цветков В.Ю., Шкадаревич А.П. // Технологии передачи и обработки информации: материалы международного научно-технического семинара, Минск, март-апрель 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2022. – С. 5–11.
9. 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.
10. 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.
11. Yeganeh H., Wang Z. // (2013) Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(2), 657–667.
12. Рудиков С.И., Цветков В.Ю., Шкадаревич А.П. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки, (11), 30-39.