

海面目标的红外景象增强技术研究

丁畅, 董丽丽*, 许文海

大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026

摘要 海天类红外图像的增强要求去除风浪等的环境影响,同时增强目标区域的对比度。通过探索几种典型的图像增强算法,结合红外图像梯度幅值直方图特点,提出基于梯度域的海面红外场景增强算法,将低梯度值置零去除海浪干扰,调整梯度范围对结果控制亮度,利用有效梯度范围均衡化增强目标区域的细节。实验结果表明,该算法可以明显降低图像的干扰信息,同时提高目标区域的对比度和信息熵。

关键词 图像处理; 图像增强; 红外图像; 梯度域; 小目标; 复杂场景

中图分类号 TN911.73

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0610001

Enhancement Technique for Infrared Scene with Maritime Target

Ding Chang, Dong Lili, Xu Wenhai

School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

Abstract The enhancement of infrared images containing sea and sky requires not only to remove effects by heavy wind and waves, but also to enhance target region's contrast. Exploring several typical image enhancing algorithms, and combining the characteristics of infrared image's histogram of gradient magnitude, an algorithm based on the infrared image's gradient domain is proposed. Low magnitude is set to zero to reduce wave disturbance, gradient magnitude range is adjusted to control brightness, and valid gradient magnitude range is equalized to enhance target region's details. Experimental results show that the proposed algorithm can obviously reduce the interference information of the image and improve the contrast and information entropy of target region.

Key words image processing; image enhancement; infrared image; gradient domain; dim target; complicated scene

OCIS codes 100.2980; 100.2960; 100.4994

1 引 言

深海遇险目标识别需要以可靠的红外图像增强技术为前提。本文的研究工作为国家科技支撑计划课题“深远海面遇险目标机载红外搜寻定位技术”中图像预处理部分。红外热像仪拍摄的海天类图像背景复杂,环境干扰多,目标区域小,这类图像的增强不但要去除海浪干扰,还要增强目标区域的对比度。

红外图像增强的方法有直方图均衡化(HE)相关技术^[1-7]、添加高频分量^[8-9]、Retinex 相关技术^[10-11]以及小波域相关技术^[12]等,这些方法适用于背景和目标单一的场景。本文分析了红外图像的特点,通

过图像梯度域提出了图像增强的有效算法。

2 红外图像典型增强算法的尝试

直方图均衡化相关技术^[13]广泛应用于图像增强领域,作用于时域,其优点为计算简单、有相对较好的对比度拉伸效果,应用于红外图像增强中的方法主要有平台直方图均衡化^[1-2]和双向直方图均衡化^[3]两种。平台均衡化即频率限定均衡化技术,“平台”即阈值,其主要对频率进行限制,进而调整灰度值转移函数,一般用于图像的细节增强,该算法对单一场景和单一目标效果好,不适用于复杂场景下的红外图像增强。针对图 1(a)给出的海天类图像场

收稿日期: 2017-12-19; **收到修改稿日期:** 2018-01-18

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAB12B03)、国家自然科学基金(61501077)、中央高校基本科研业务费专项资金(3132016351)

作者简介: 丁畅(1988—),男,博士研究生,主要从事图像处理、数据挖掘方面的研究。E-mail: longlongclinton@163.com

导师简介: 许文海(1956—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事图像处理、光电信息与光电检测等方面的研究。

E-mail: xuwenhai@dlmu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: 1147776326@qq.com

景 1, 采用几种典型的图像增强算法进行了图像增强, 结果如图 2 所示。图 2(a) 所示为根据 Liang 等^[2]提出的双平台均衡化技术增强的结果, 图中海浪干扰和目标同时得到了增强。陈钱等^[3]提出的双向直方图均衡化方法是在直方图均衡化结果基础上引入灰度级等间距分布方法。图 2(b) 所示为双向直方图处理后的增强结果, 在天空区域的增强效果很好, 海面部分增强过度, 该方法也不适用于复杂场景。局部直方图均衡化技术^[6-7]也是近几年的研究热点。该方法将图像空间区域分为几块, 各块分别进行均衡化可明显增强图像细节, 但对含有海面小目标场景的红外图像增强效果不一定很好, 因为目标所在区域很小, 即使分块后这部分区域也不明显。HE 相关技术对于海面红外场景图像增强效果不好, 主要原因在于直方图的频率变化过于剧烈, 如图 1(b) 所示。

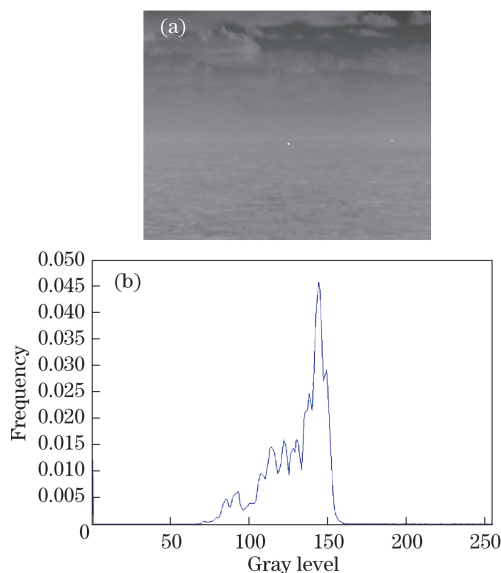


图 1 场景 1 及其直方图。(a) 场景 1; (b) 直方图
Fig. 1 Scene 1 and its histogram. (a) Scene 1; (b) histogram

反锐化掩模^[8] (UM) 通过给图像添加高频信息, 使得红外图像细节更加丰富, 表达式为

$$f_{\text{out}}(x, y) = f(x, y) + \alpha \cdot \text{HP}[f(x, y)], \quad (1)$$

式中 HP 表示图像锐化过程, 本文采用 Laplace 滤波器完成锐化, $\alpha = 1.5$ 。图 2(c) 所示为增强后的结果, 可见该方法可以锐化图像的边界, 但对于图像的亮度改变不大。

Retinex 增强技术^[10-11] 在原理上类似于同态滤波, 其将图像模型转化为反射分量与入射分量乘积的结果, 并认为反射分量反映图像内在信息, 一般通过图像的滤波估计入射分量, 进而求得图像的反射分量。图 2(d) 所示的增强结果在估计入射分量时采用的高斯滤波的模板大小为 7×7 , 高斯函数方差为 1,

计算出的反射分量经过灰度值压缩得到最终的增强结果。图 2(d) 在视觉效果上出现了颗粒噪声, 且对海浪干扰没有抑制。可见, 该类图像质量差不仅是光照导致, 因此 Retinex 增强技术的效果不一定会很好。

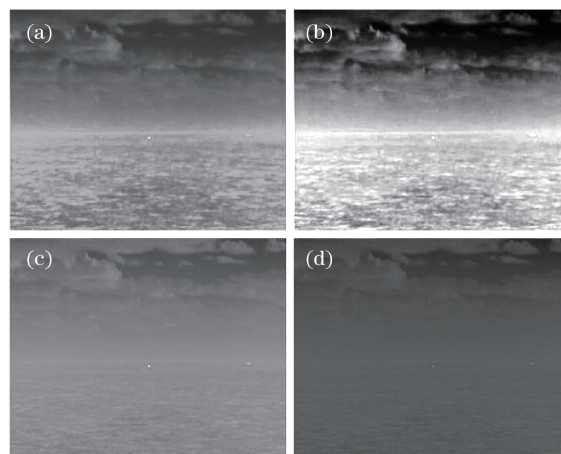


图 2 场景 1 典型算法的增强结果。(a) 双平台均衡化;
(b) 双向直方图均衡化; (c) UM; (d) Retinex

Fig. 2 Enhancement of scene 1 using typical algorithms.

(a) Double plateaus histogram equalization;
(b) histogram double equalization; (c) UM; (d) Retinex

其他算法如苏娟等^[14]提出的结合 PCNN 分割和模糊集理论的红外图像增强方法, 对于红外场景增强具有一定的作用。该算法首先要分割背景和目, 而后增强目标, 对于背景需要利用目标区域的某些灰度值人为制造。该方式可提高目标和背景的对比度, 但前期的分割增加了计算量, 背景不真实, 且整体性不好。

3 本文方法

本文算法的整体流程如图 3 所示。

3.1 红外场景梯度幅值直方图特点与梯度域的引入

红外图像的特点为灰度值动态范围较小, 灰度值集中在一段范围, 其细节隐藏在该范围内, 因此需要有效的算法使其呈现。图像梯度域对应灰度值的变化, 梯度域反映图像的细节, 国内外学者针对不同类别的图像提出了基于梯度域处理的方法^[15-20]较好地呈现其细节。小目标海面场景更适合应用梯度域方法进行处理, 原因在于小目标虽然涵盖的像素区域“小”, 但是周围梯度值很大, 此类图像的目标区域更侧重于梯度值的突出, 故而采用梯度域处理方法是一个很好的思路。常见增强方法如直方图变换、反锐化掩模以及 Retinex 算法对于含有小目标的红外图像没有特别的考虑, 这也是增强效果不理想的原因之一。

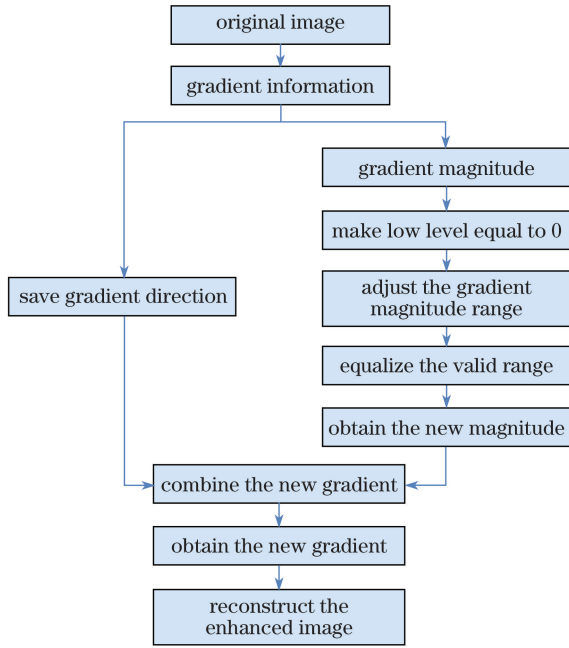


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the proposed algorithm

图 4(d)给出的梯度直方图特点也是其他场景图像具备的,主要包括:1)从直方图曲线的上升或下降的走势看,尽管直方图有几个峰,但其梯度幅值直方图仅存在一个单峰;2)整个梯度直方图明显偏向小梯度值分布。

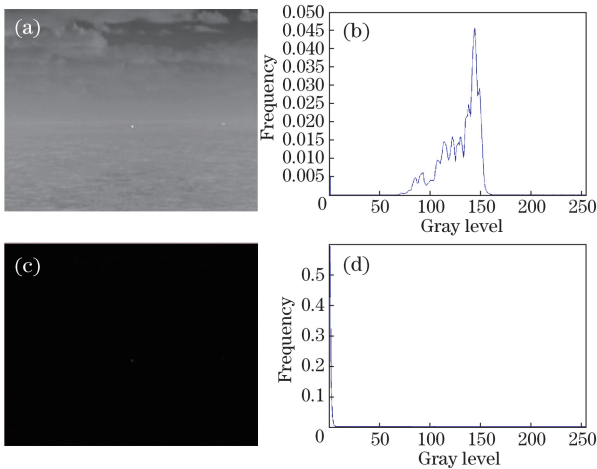


图 4 场景 1 直方图及梯度幅值直方图。(a)场景 1; (b)直方图; (c)梯度幅值图; (d)梯度幅值直方图

Fig. 4 Histogram of scene 1 and histogram of its gradient magnitude.

(a) Scene 1; (b) histogram; (c) gradient magnitude; (d) histogram of gradient magnitude

利用梯度域增强这类场景图像具有明显优势。以场景 1 为例,海浪的灰度值范围为 130~150,两个目标的平均灰度值约为 160,目标和背景非常接近,从空间域不好设计算法增强目标和背景之间的对比度。但是在梯度域角度考虑情况就大不相同。

经测定,场景 1 的海浪梯度值主要集中在 1~2,背景在梯度域得到了大幅缩减,而场景 1 左侧的目标平均梯度值为 19,右侧目标的平均梯度值为 8。这样在梯度域,目标与背景的梯度值界限非常明显,若采取有效算法可以很容易地对两者进行独立处理,从而获得满意的增强结果。

3.2 梯度域处理

步骤 1: 小梯度值置 0。为去除海浪影响,将这些区域的梯度值置 0,复原结果后这些区域为不变化的灰度值,从而去除海浪影响,提高了目标区域的对比度。该过程引入了算法中的第一个参数 t_1 ,将梯度值范围在 $[0, t_1]$ 内的所有梯度值置 0。由于海浪梯度值为 1~2,这样需要 $t_1 \geq 2$,同时 t_1 要小于目标的平均梯度值,否则复原结果中目标会被固定灰度值覆盖。 t_1 调整经验为:取值越大,场景中干扰因素消除越明显,图像整体的细节缺失也越严重。利用 $|\nabla u|$ 表示图像梯度值,将步骤 1 的操作记为 L_1 ,则数学表达式为

$$L_1(|\nabla u|) = 0, |\nabla u| \leq t_1. \quad (2)$$

步骤 2: 调整梯度范围。Fattal 等^[15]首次提出了通过图像梯度域处理并重建的增强图像细节的方法,并指出对大梯度要压制,对小梯度要拉伸。其他学者对于梯度域的操作^[16-20]也延续了这一观点。为了实现大梯度的限制,采用动态范围压缩的方法,此过程中 $[t_1 + 1, \max(|\nabla u|)]$ 内的小梯度值基本不变。图像动态范围压缩可表示为^[21]

$$t = C \cdot \ln(1 + |s|), \quad (3)$$

式中 s 为压缩前的灰度值, t 为压缩后的灰度值, C 为可调参数。(3)式可将范围 $[0, s_0]$ 压缩至 $[0, t_0]$ 。

这一步骤主要将非零梯度范围从 $[t_1 + 1, \max(|\nabla u|)]$ 调整到 $[t_1 + 1, t_2]$,同时引入算法中的第 2 个参数 t_2 ,选取自然对数,根据压缩范围计算 C ,在对数函数内部和外部补充相应的常数,得出动态范围压缩的数学模型为

$$L_2(|\nabla u|) = \frac{t_2 - t_1 - 1}{\ln(1 + \max|\nabla u| - t_1 - 1)} \cdot$$

$$\ln(1 + |\nabla u| - t_1 - 1) + t_1 + 1, |\nabla u| > t_1. \quad (4)$$

在阈值 t_2 的选取方面,结合红外图像的梯度幅值特点,区间 $[0, 40]$ 或 $[0, 30]$ 内的梯度值基本可以涵盖红外图像的整个梯度范围,考虑到重建后的增强效果,将 t_2 选择为 30~40 的数值。该参数调整的经验为:如果重构出的增强结果亮度过高,则可考虑降低 t_2 ;如果增强结果亮度过暗,则可适当提高 t_2 。

步骤 3: 有效范围内的梯度幅值直方图均衡化,

主要实现 $[t_1+1, t_2]$ 内的小梯度值拉伸。小梯度值频率高,这里采用有效范围内均衡化的方法完成小梯度值的拉伸。直方图均衡化方法可明显地增强高频灰度级的对比度^[22]。全局直方图均衡化灰度值的转移函数为^[22]

$$H_k = (K - 1) \times C(k), \quad (5)$$

式中 H_k 为变换后的灰度值, K 为灰度值总数(或全局区间的长度), $C(k)$ 为第 k 个灰度值的累积频率。由(5)式可以得出有效范围内均衡化(局部均衡化)的表达式,其主要取决于区间起始值、区间长度以及区间内的累积频率。将步骤3的操作记为 L_3 ,则数学表达式为

$$L_3(|\nabla u|) = t_1 + 1 + (t_2 - t_1 - 1) \cdot \text{CDF}[L_2(|\nabla u|)], |\nabla u| > t_1, \quad (6)$$

式中 t_1+1 为区间起始值, t_2-t_1-1 为区间长度,类似于(5)式中的 $K-1$, $\text{CDF}[L_2(|\nabla u|)]$ 表示 $L_2(|\nabla u|)$ 在 $[t_1+1, t_2]$ 内的累积频率,类似于(5)式中的 $C(k)$ 。

步骤4:新梯度场的合成。步骤1~3主要处理梯度幅值,对于原梯度场的方向要保留,两者结合建立新梯度场。对于梯度幅值的处理,将步骤1~3的整个操作记为 L ,具体表达式为

$$L(|\nabla u|) = \begin{cases} L_1(|\nabla u|), & |\nabla u| \leq t_1 \\ L_3(|\nabla u|), & |\nabla u| > t_1 \end{cases} \quad (7)$$

利用 $\tilde{\mathbf{G}}$ 表示目标梯度,则构建后的新梯度场数学表达式为

$$\tilde{\mathbf{G}} = L(|\nabla u|) \cdot \frac{\nabla u}{|\nabla u|}. \quad (8)$$

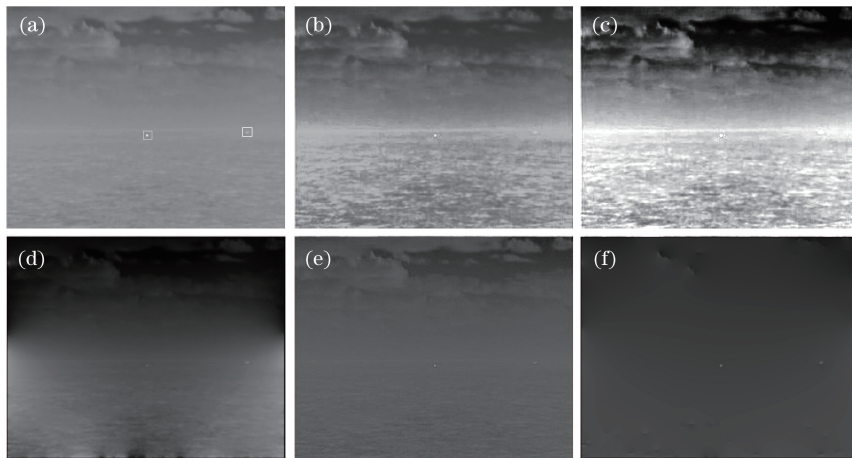


图5 场景1各算法增强结果。(a)原图;(b)文献[2]算法;(c)文献[3]算法;

(d)文献[16]算法;(e)Retinex算法;(f)本文算法

Fig. 5 Enhanced results for scene 1 by each algorithm. (a) Original image; (b) algorithm of Ref. [2]; (c) algorithm of Ref. [3]; (d) algorithm of Ref. [16]; (e) Retinex algorithm; (f) proposed algorithm

3.3 新梯度场的复原

构建新梯度场后,还要重建增强结果。新梯度场的重建主要有变分求解和矩阵变换求解两种方法。对于变分法求解,赵文达等^[16]首先按照目标梯度场定义一个泛函,使增强结果的梯度等于目标梯度场,而后利用梯度下降法求解,该方法时间复杂度和数据存储量都很多;文献^[18]利用梯度与散度算子的特征,提出矩阵变换法复原梯度场,该算法的效率比梯度下降法更高,主要原理可表示为

$$\Delta \bar{u} = \text{div}(\tilde{\mathbf{G}}), \quad (9)$$

式中 \bar{u} 为复原结果, Δ 为Laplace算子,包含前向差分计算梯度的过程和梯度后向差分计算散度的过程,可等效为矩阵乘积, div 为散度算子,由后向差分的方式计算。按照文献^[18]的方法,只需求解一个矩阵方程即可得出重建结果,大幅缩减了时间复杂度和数据存储量。

4 实验结果与分析

4.1 主观图像质量评价

对5幅海面场景与1幅地面场景进行增强实验,场景6(地面场景)的设置是为了说明该算法对其他场景的红外图像的适应性。场景1、场景3和场景5包含2个海面目标,地面场景6选取2个行人作为目标(场景左侧目标区域称为区域I,右侧目标区域称为区域II),场景2和场景4仅包含1个海面目标。实验结果如图5~10所示,目标所在区域在原图中用白框标示,其中 $t_1=5, t_2=40$ 。

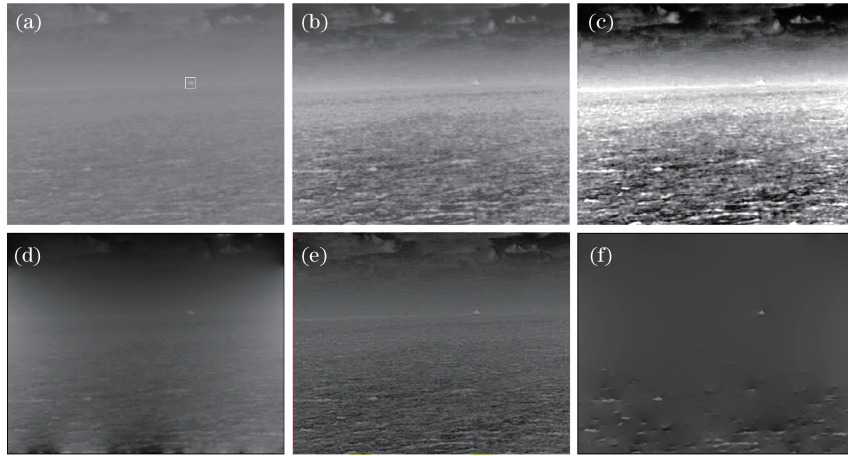


图 6 场景 2 各算法增强结果。(a)原图；(b)文献[2]算法；(c)文献[3]算法；
(d)文献[16]算法；(e) Retinex 算法；(f)本文算法

Fig. 6 Enhanced results for scene 2 by each algorithm. (a) Original image; (b) algorithm of Ref. [2];
(c) algorithm of Ref. [3]; (d) algorithm of Ref. [16]; (e) Retinex algorithm; (f) proposed algorithm

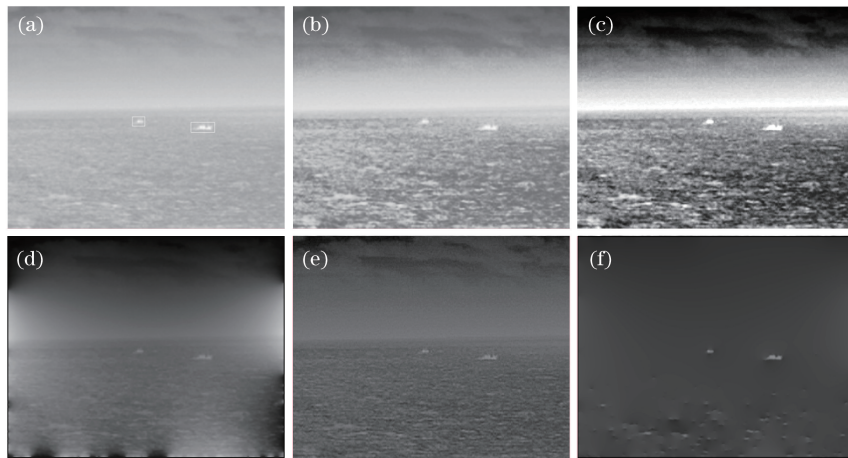


图 7 场景 3 各算法增强结果。(a)原图；(b)文献[2]算法；(c)文献[3]算法；(d)文献[16]算法；(e) Retinex 算法；(f)本文算法
Fig. 7 Enhanced results for scene 3 by each algorithm. (a) Original image; (b) algorithm of Ref. [2];
(c) algorithm of Ref. [3]; (d) algorithm of Ref. [16]; (e) Retinex algorithm; (f) proposed algorithm

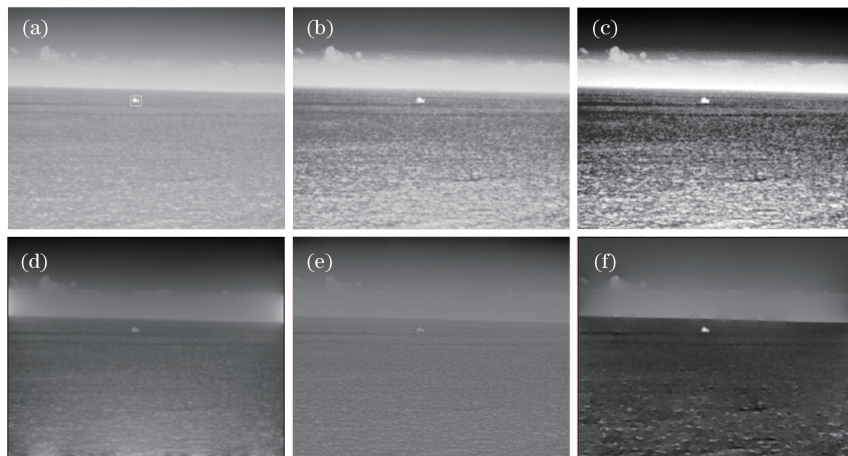


图 8 场景 4 各算法增强结果。(a)原图；(b)文献[2]算法；(c)文献[3]算法；(d)文献[16]算法；(e) Retinex 算法；(f)本文算法
Fig. 8 Enhanced results for scene 4 by each algorithm. (a) Original image; (b) algorithm of Ref. [2];
(c) algorithm of Ref. [3]; (d) algorithm of Ref. [16]; (e) Retinex algorithm; (f) proposed algorithm

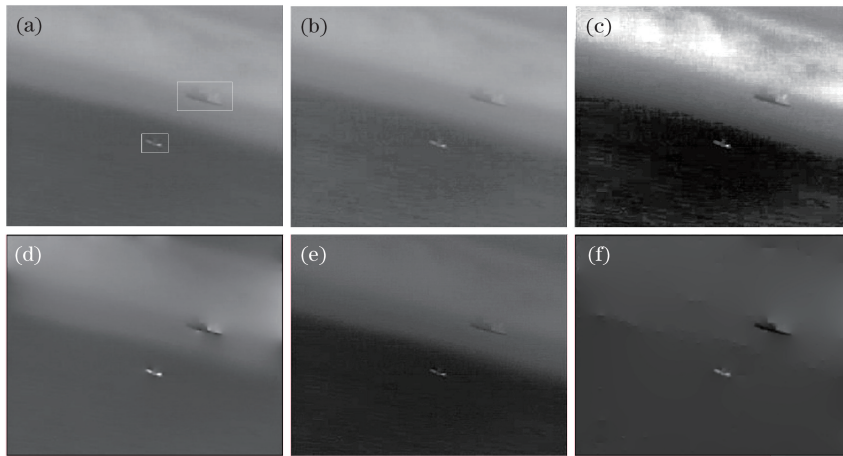


图 9 场景 5 各算法增强结果。(a)原图；(b)文献[2]算法；(c)文献[3]算法；
(d)文献[16]算法；(e) Retinex 算法；(f)本文算法

Fig. 9 Enhanced results for scene 5 by each algorithm. (a) Original image; (b) algorithm of Ref. [2];
(c) algorithm of Ref. [3]; (d) algorithm of Ref. [16]; (e) Retinex algorithm; (f) proposed algorithm

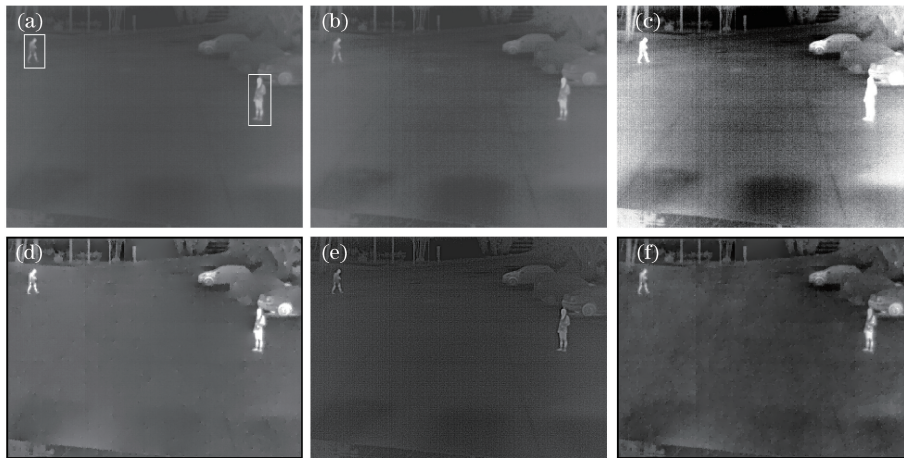


图 10 场景 6 各算法增强结果。(a)原图；(b)文献[2]算法；(c)文献[3]算法；
(d)文献[16]算法；(e) Retinex 算法；(f)本文算法

Fig. 10 Enhanced results for scene 6 by each algorithm. (a) Original image; (b) algorithm of Ref. [2];
(c) algorithm of Ref. [3]; (d) algorithm of Ref. [16]; (e) Retinex algorithm; (f) proposed algorithm

从图 5~10 可以看出,双平台均衡化与双向均衡化算法侧重于图像整体的增强,海浪干扰和目标同时增强,对海浪的干扰信息无抑制;文献[16]中的方法也是从梯度域角度完成图像细节的丰富,算法本身过多的参数难以调整,虽然对海浪干扰有抑制,但增强结果容易出现光圈效应;Retinex 算法的参数选取较简单,但其结果出现了颗粒噪声,且对海浪干扰没有抑制作用;本文算法很好地抑制了海浪的影响,对于场景 1 的目标突出不算十分明显,但对于场景 2~5 目标所在的局部区域对比度增强都十分有效,尤其是场景 4 局部区域的增强效果特别明显,场景 5 为逆光场景,图像质量较差,目标区域较大且非常模糊,本文算法获得了良好的增强效果,比其他算法更加灵活,目标 II 增强结果灰

度值变小突出了对比度。场景 6 的增强结果细节明显变得丰富。

4.2 客观图像质量评价

选择图像标准差评价算法对于海浪的抑制,标准差越小说明算法对于海浪的抑制效果越好。各算法结果的标准差如表 1 所示。

对于目标局部区域的增强效果评价,利用局部区域的对比度 EME 指标^[23]和局部区域信息熵完成。

图像对比度的 EME 评价指标就是对图像进行分块,根据每块中的最大和最小灰度值计算出图像整体的对比度,计算公式为

$$E_{\text{EME}} = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{j=1}^{k_2} 20 \ln \left[\frac{\max(X_{i,j})}{\min(X_{i,j}) + c} \right], \quad (10)$$

表 1 各算法结果标准差对比
Table 1 Comparison of standard derivation of each algorithm result

Algorithm	Scene 1	Scene 2	Scene 3	Scene 4	Scene 5	Scene 6
Original image	18.24	11.28	16.95	29.65	36.35	10.44
Algorithm of Ref. [2]	38.33	33.21	37.45	43.72	36.87	14.58
Algorithm of Ref. [3]	74.00	68.58	67.87	69.97	79.99	61.80
Algorithm of Ref. [16]	36.80	26.95	36.50	31.79	26.33	24.87
Retinex algorithm	10.28	16.94	16.25	19.44	30.22	11.21
Proposed algorithm	12.36	9.85	10.57	24.61	12.69	21.21

式中 k_1 和 k_2 分别为整幅图像高和宽分块时序号的末尾值,实际计算时应引入一个常数 c 以避免分式无意义,设定 $c=0.1$ (编程时需增加对 $\max(X_{i,j})$ 的判定,若为 0,则当次循环结果为 0,并跳入下一循

环),选择块大小为 3×3 ,按各块相等的权重计算出每幅图像的结果。EME 值越高,说明该幅图像的对比度越高,质量也越好。各算法结果的 EME 如表 2 所示。

表 2 各算法结果目标区域 EME 对比
Table 2 Comparison of target region's EME of each algorithm result

Algorithm	Scene 1		Scene 2	Scene 3		Scene 4		Scene 5		Scene 6	
	I	II	Region	I	II	Region	I	II	I	II	
Original image	1.88	0.76	0.90	0.81	0.93	1.55	1.10	0.41	3.39	3.69	
Algorithm of Ref. [2]	3.74	1.00	1.11	1.22	1.42	2.84	1.71	0.39	3.42	3.65	
Algorithm of Ref. [3]	3.27	1.03	1.40	2.51	2.69	5.55	38.85	1.11	6.59	5.56	
Algorithm of Ref. [16]	1.41	0.77	1.14	1.05	1.06	1.74	1.91	0.73	5.77	6.09	
Retinex algorithm	3.23	1.17	3.29	2.59	2.99	1.81	9.21	1.27	10.08	10.58	
Proposed algorithm	1.76	1.07	2.49	2.31	2.58	5.30	1.86	2.23	6.58	7.85	

区域信息熵反映区域内细节丰富程度,数值越大则该区域内图像质量越高,其计算公式为

$$E_{\text{entropy}} = - \sum_{i=1}^N [p_i \cdot \log_2(p_i)], \quad (11)$$

式中 p_i 为区域内灰度级的频率, N 为区域内灰度级个数(频率为 0 的灰度级,当次计算结果为 0)。信息熵越高说明细节越丰富。各算法结果目标区域信息熵如表 3 所示。

表 3 各算法结果目标区域信息熵对比
Table 3 Comparison of target region's entropy of each algorithm result

Algorithm	Scene 1		Scene 2	Scene 3		Scene 4		Scene 5		Scene 6	
	I	II	Region	I	II	Region	I	II	I	II	
Original image	4.28	3.84	4.30	4.96	5.44	5.82	3.67	5.45	5.07	5.94	
Algorithm of Ref. [2]	4.28	3.73	4.16	4.89	5.33	5.73	3.61	5.40	5.05	5.89	
Algorithm of Ref. [3]	3.74	2.84	3.00	4.25	4.30	4.92	3.12	4.29	4.15	4.09	
Algorithm of Ref. [16]	3.64	3.97	4.19	4.33	4.88	5.16	4.77	6.00	6.18	6.63	
Retinex algorithm	3.78	2.79	3.20	2.85	3.22	3.83	3.56	3.56	4.97	5.52	
Proposed algorithm	3.07	3.20	4.88	4.71	5.48	6.38	4.60	5.75	6.17	7.06	

由表 1~3 结果可知,本文算法减小了原场景的标准差,其他算法得到的标准差比原场景大,从客观数据可看出本文算法对于海浪的抑制作用明显;对于 EME 评价指标,双向均衡化算法和 Retinex 过高,主要原因是过度增强和噪声的作用,本文算法除了场景 1 的目标区域 I 对比度略有降低,其他结果

都明显提升,尤其对场景 4 的目标区域提升程度最高;对于局部区域信息熵,本文算法除了场景 1 和场景 3 的区域 I 较低以外,其他场景的信息熵结果都很好,其他算法结果均比原图小。从目标区域 EME 和信息熵两项客观数据可以看出,本文算法有利于目标局部区域的对比度增强和细节的丰富。

5 结 论

海面目标梯度值突出以及整个海天红外图像梯度幅值直方图分布的特点说明利用梯度域增强图像细节具有巨大优势。图像受到海浪等干扰因素多,在梯度域表现为很小的数值,从空域转换到梯度域后,便于分别处理有用信息和干扰信息。重建后的增强结果既抑制了海浪干扰的影响,又增强了目标区域的对比度。本文算法可以提高红外图像的质量,同时可以为目标检测及跟踪创造有利的条件。

参 考 文 献

- [1] Wang B J, Liu S Q, Zhou H X, *et al.* Self-adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on plateau histogram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 299-301.
王炳建, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算法[J]. *光子学报*, 2005, 34(2): 299-301.
- [2] Liang K, Ma Y, Xie Y, *et al.* A new adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on double plateaus histogram equalization[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(4): 309-315.
- [3] Chen Q, Bai L F, Zhang B M. Histogram double equalization in infrared image[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22(6): 428-430.
陈钱, 柏连发, 张保民. 红外图像直方图双向均衡技术研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(6): 428-430.
- [4] Huang Z H, Zhang T X, Li Q, *et al.* Adaptive gamma correction based on cumulative histogram for enhancing near-infrared images[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 79: 205-215.
- [5] Li Y, Zhang Y F, Geng A H, *et al.* Infrared image enhancement based on atmospheric scattering model and histogram equalization[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 83: 99-107.
- [6] Wang Y, Pan Z B. Image contrast enhancement using adjacent-blocks-based modification for local histogram equalization[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 86: 59-65.
- [7] Liu B, Jin W Q, Chen Y, *et al.* Contrast enhancement using non-overlapped sub-blocks and local histogram projection[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(2): 583-588.
- [8] Polesel A, Ramponi G, Mathews V J. Image enhancement via adaptive unsharp masking[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(3): 505-510.
- [9] Qi Y H, He R L, Lin H T. Novel infrared image enhancement technology based on the frequency compensation approach[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 521-529.
- [10] Li Y, Zhang Y F, Li N, *et al.* Adaptive detail enhancement for infrared image based on subband-decomposed multi-scale retinex[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0512001.
李毅, 张云峰, 李宁, 等. 基于子带分解多尺度 Retinex 的红外图像自适应细节增强[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0512001.
- [11] Wu Y Q, Shi J P. Image enhancement in non-subsampled contourlet transform domain based on multi-scale Retinex[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0310002.
吴一全, 史骏鹏. 基于多尺度 Retinex 的非下采样 Contourlet 域图像增强[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0310002.
- [12] Zhan B C, Wu Y Q, Ji S X. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and Retinex[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2788-2793.
占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2788-2793.
- [13] Ding C, Dong L L, Xu W H. Review of "histogram" equalization technique for image enhancement[J]. *Computer Engineering and Application*, 2017, 53(23): 12-17.
丁畅, 董丽丽, 许文海. "直方图"均衡化图像增强技术研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(23): 12-17.
- [14] Sun J, Li B, Wang Y Z. Infrared image enhancement based on PCNN segmentation and fuzzy set theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0910001.
苏娟, 李冰, 王延钊. 结合 PCNN 分割和模糊集理论的红外图像增强[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0910001.
- [15] Fattal R, Lischinski D, Werman M. Gradient domain high dynamic range compression[C]// *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 2002: 249-256.
- [16] Zhao W D, Zhao J, Zhao F, *et al.* Variable infrared image enhancement of bimodal Gaussian function specification[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0309002.
赵文达, 赵建, 赵凡, 等. 双峰高斯函数规定化的变分红外图像增强[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0309002.
- [17] Zhu L X, Heng P A, Xia D S. Image contrast enhancement by gradient field equalization[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*,

- 2007, 19(12): 1546-1552.
- 朱立新, 王平安, 夏德深. 基于梯度场均衡化的图像对比度增强 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(12): 1546-1552.
- [18] Ding C, Dong L L, Xu W H. Image details enhancement by gradient field bi-interval equalization[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(5): 1165-1174.
丁畅, 董丽丽, 许文海. 图像梯度场双区间均衡化的细节增强 [J]. 电子学报, 2017, 45(5): 1165-1174.
- [19] Cheng K H, Zhou H X, Qin H L, *et al.* Curvature filter and gradient transform based image enhancement[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(7): 0710001.
成宽洪, 周慧鑫, 秦翰林, 等. 基于曲率滤波和梯度变换的图像增强 [J]. 光子学报, 2017, 46(7): 0710001.
- [20] Lei X H, Yang K C. A gradient transfer contrast enhancement for underwater image[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2011, 23(1): 28-31.
雷选华, 杨克成. 一种梯度变换的水下图像对比度增强算法 [J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(1): 28-31.
- [21] Zhang Y J. Image engineering (I): Image processing[M]. 3rd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 41.
章毓晋. 图像工程(上册): 图像处理 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2012: 41.
- [22] Wang Q, Ward R K. Fast image/video contrast enhancement based on weighted thresholded histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(2): 757-764.
- [23] Agaian S S, Silver B, Panetta K A. Transform coefficient histogram-based image enhancement algorithm using contrast entropy[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3): 741-758.