

光学学报

逆光海况下低质量红外目标的增强与识别

侯义锋¹, 丁畅^{2,3,4*}, 刘海³, Mandal Mrinal⁴, 高兴宇², 罗祯东², 吴自库⁵

¹梧州学院电子与信息工程学院, 广西 梧州 543001;

²桂林电子科技大学机电工程学院, 广西 桂林 531004;

³中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

⁴阿尔伯塔大学电子与计算机工程系, 阿尔伯塔 埃德蒙顿 T6G 1H9, 加拿大;

⁵青岛农业大学理学与信息科学学院, 山东 青岛 266109

摘要 海上红外目标识别在海事搜寻中发挥着重要的作用, 针对逆光海况下出现的目标反对比度特点及其目标淹没于背景的问题, 结合其直方图呈现的局部尖峰特点, 提出了修正灰度占比的新直方图均衡化并融合边缘信息的增强算法。该算法可以有效地提升目标区域的对比度, 从而提升海上红外图像的质量。在海上红外目标识别与检测中, 建立了目标与背景的多尺度“九宫格”搜索框, 演化了局部对比度显著性量化的数学模型, 实现了符合人眼视觉特性的红外目标的准确定位与检测。在海上红外图像增强测试中, 所提算法可以使原图像的平均梯度提升两倍以上, 使局部对比度增益因子提升两倍以上。在目标识别的算法测试中, 所提多尺度局部对比度目标检测算法可以使目标检测率达到 99% 以上。

关键词 测量; 红外成像; 海上红外目标识别; 红外图像增强; 直方图变换; 局部对比度显著性; 逆光海况

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221387

1 引言

伴随着我国海洋经济的发展, 海事方面的突发事件也在与日俱增。图像是视觉的重要载体, 是人类获取、感知外在环境信息变化的主要途径。相对于雷达探测^[1]和合成孔径雷达(SAR)成像^[2], 海上远距离红外成像^[3]体现了二维空间的距离信息、方向信息、目标形状信息和场景信息, 对于搜救人员对遇险目标的视觉判断和位置估计起到了重要作用。我国当前的海上救援技术^[4]主要包括空中俯视搜寻、海上救援船舶靠近、救助人员展开救助与打捞三个阶段, 与发达国家的主要差距包括红外探测器距离短、海上红外目标准确定位与稳定跟踪技术不成熟, 以及海上红外多源数据的信息融合与应用不深入等。同时, Chan^[5]认为海上复杂环境的光线变化、波浪干扰和噪声影响是导致一些常见的目标检测算法失效的主要原因。基于以上瓶颈与卡脖子问题, 本文研究了一种恶劣海况环境下的海上红外图像质量提升方法与海上红外弱小目标的检测方法, 可以极大地提升逆光环境下红外弱小目标的视觉效果, 从而进一步提升对遇险目标的救助能力。红外图像依靠对外在环境的温度感知获得, 科研项目

和工程应用中所涉及到的一些空天场景、海上场景和森林场景较为单一, 红外图像内容本身没有可见光图像所表达的内容丰富^[6], 一般包含多目标与多背景、单目标与多背景、单目标与单背景, 以及多目标与单背景 4 类。红外图像中的大面积场景在直方图中表现为高占比的属性与特点, 尤其是小目标与单背景和小目标与多背景的直方图分布规律分别可用单高斯分布函数拟合^[7]和混合高斯分布拟合^[8]。

国内外对海上红外图像增强的研究有如下几类: 应用某些算子及特定的映射函数对红外图像进行预处理, 产生或创造目标的正向对比度^[9]; 统计一定量的海上红外图像, 根据有用信息与噪声信息在功率谱函数中的不同, 采取有针对性的措施, 可用于增强海面红外图像^[10]; 对直方图进行压缩、分组, 利用计算映射函数的方法得到细节增强的红外图像^[11]。综上, 海上红外图像的增强算法是目标识别的基础, 可结合具体海况在成像方面的特点有针对性地研究海上红外图像的质量提升算法。某些典型的直方图变换方法应用于海上红外图像中也可以产生明显的增强效果, 如灰度均值保留的直方图均衡化(MMBEBHE)算法^[12]、边缘直方图均衡化(ETHE)算法^[13]。

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2022-07-27; 录用日期: 2022-08-01; 网络首发日期: 2022-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(62162054)、中国国家留学基金(202108455015)、广西自然科学基金(2020GXNSFB A297077)、桂林市科学研究与技术开发计划(20210217-17)、认知无线电与信息处理省部共建重点实验室基金(CRKL200103)、梧州学院校级科研重点项目(2022B010)

通信作者: *dingchang@guet.edu.cn

对于海上红外目标识别,国内外最为常见的算法是局部对比度方法(LCM)^[14],主要原理是通过目标和背景的灰度值差异,建立显著性函数,将目标凸显,再通过设定阈值的方法,最终达到检测目标的效果。近年来的改进算法包括差异算子的阈值优化(IDoGb)^[15]、多尺度块的对比度测量算法(MPCM)^[16]、具有抗噪声机制的多尺度局部同质块测量算法(MLHM)^[17]、信息熵指标驱动下目标测量(DECM)机制^[18]、背景提取(BS)算法^[19]、局部对比度与边缘融合的高精度目标检测(ITSM)算法^[20]等。然而,当前研

究未考虑海上逆光等特殊环境的目标识别、多尺度目标检测的搜索框建立与搜索框自适应于目标大小的方法等。

2 逆光海况下红外图像特点

2.1 直方图特点

图 1 所示为逆光条件下的海面红外图像。前两个图像中包含两个海上红外目标,其中一个海上红外目标是隐藏的,故不明显。后两个图像包含同一目标,受强逆光、强背景影响,目标均出现负对比度。

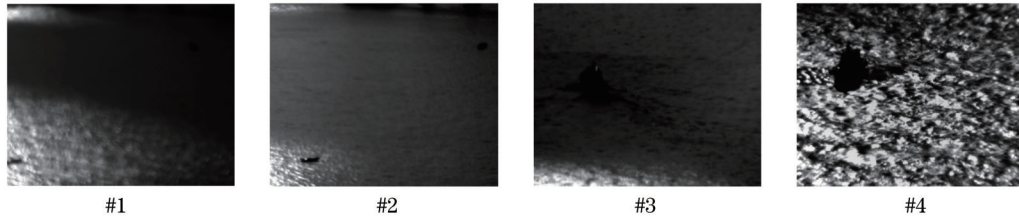


图 1 逆光条件下海上红外图像

Fig. 1 Infrared maritime images under backlight condition

图 2 所示为图 1 中各子图的直方图。可以看出,“小段尖峰”特性明显,灰度级的个数占比不是缓慢变

化的,即在某一段灰度范围内呈现较多的像素占据,这是逆光环境的强背景与大面积所导致的。

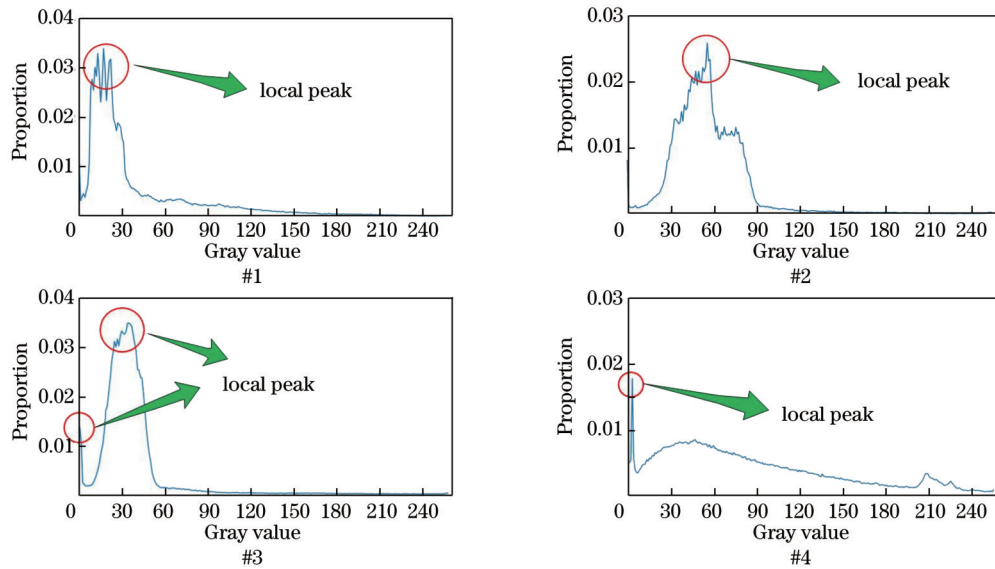


图 2 图 1 中各子图的直方图

Fig. 2 Histograms of sub-images in Fig. 1

2.2 经典 LCM 应用于海上红外图像的效果

图 3 所示为经典 LCM 应用于不同海况下的检测结果。经典 LCM 主要原理是先将目标框和背景框结合得出搜索框并遍历全部图像,再根据局部对比度显著性的数学模型得出图像各位置的对比度数值,最后设定合理的阈值明确疑似目标的区域位置。上述算法中涉及到的参数主要是目标框的尺寸,将其设置为 $\omega_1 \times \omega_1$,对比度阈值为 $T_{\text{contrast}} = \mu_c + k\sigma_c$,其中: μ_c 和 σ_c 表示图像经过分块后形成的局部对比度的统计平均

值和统计标准差; k 表示目标对比度阈值偏离平均对比度数值的长度, k 值越大,目标的筛选越严格,对于经典 LCM 而言,通常 k 的取值为 2~5 较为合适。

由图 3(a)、(b)可以看出,经典 LCM 得到的检测结果与真实目标之间存在较大偏离,不适用于具有负对比度目标特性的逆光海况下的红外目标检测。图 3(c)所示为较多海浪干扰条件下的 LCM 目标检测结果。可以看出,LCM 虽然能够成功检测到图像中的真实目标,但是因海浪的干扰,虚警目标个数变多。

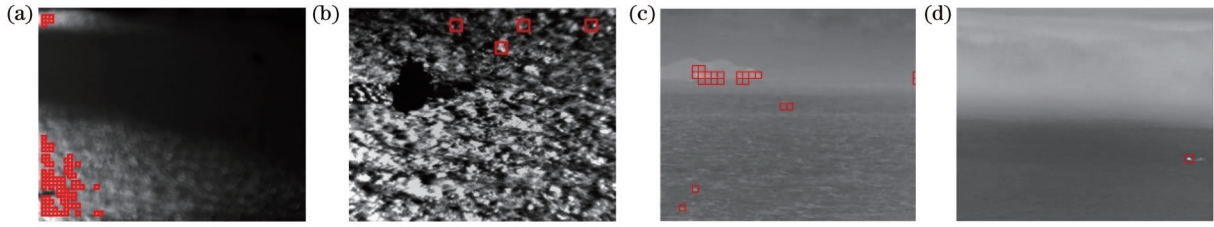


图 3 经典 LCM 应用于不同海况下的目标检测结果。(a) $\omega_1=9$ 和 $k=3$ 时逆光海况下的目标检测结果;(b) $\omega_1=27$ 和 $k=3$ 时逆光海况下的目标检测结果;(c) $\omega_1=7$ 和 $k=3$ 时较多海浪干扰下的目标检测结果;(d) $\omega_1=9$ 和 $k=3$ 时大雾环境下的目标检测结果
Fig. 3 Target detection results under different maritime conditions using classical LCM. (a) Target detection result under backlight condition with $\omega_1=9$ and $k=3$; (b) target detection result under backlight condition with $\omega_1=27$ and $k=3$; (c) target detection result under heavy wave interference with $\omega_1=7$ and $k=3$; (d) target detection result under heavy fog with $\omega_1=9$ and $k=3$

图 3(d)所示为雾天场景的目标检测结果,LCM 检测出真实目标,未出现虚警。可以看出,经典 LCM 的优点为对正向对比度目标检测可靠且稳定,缺点为抗干扰特性差、检索框无法自适应于真实目标大小和未完全符合人眼视觉特性等。

3 逆光海况下红外目标增强算法

图 2 所示的逆光海况下红外图像直方图中出现的几个较为明显的局部峰对应于图中大面积的背景区域。考虑到对图像全体灰度级进行直方图均衡化的过程中,在提升图像整体对比度的同时,会出现高占比灰度级获得高对比度增强率的现象^[21]。然而,对于此类图像,在直方图均衡化过程中该区域的对比度拉伸程度应略小于目标区域,这样才能达到凸显目标的效果。因此,在采取直方图峰值限制的同时,进行新的直方图均衡化处理的方法较适合增强逆光海况下的红外目标。考虑到直方图均衡化算法自身存在灰度级合并等特点^[21],融合一定比例的原始图像边缘信息不仅可以提升目标对比度,还可以丰富细节。本文针对逆光海况下红外目标的特点,提出了峰值限制同时融合边缘信息的直方图均衡化(HEPLEF)算法。

3.1 原始直方图修正及新直方图均衡化

图 4 所示是以图 2 中#1 对应的原始直方图为例,说明新直方图的修正过程。主要包括原始直方图的峰值查找、频率修正和整体归一化 3 个步骤。

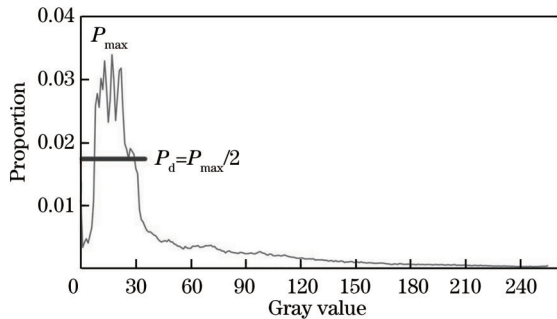


图 4 原始直方图修正示意图

Fig. 4 Schematic diagram of original histogram modification

设原始直方图占比峰值为 P_{\max} ,修正阈值为 $P_d = P_{\max}/2$,原始修正图的占比 p_i 修正后的占比为 p'_i ,则 p'_i 满足

$$p'_i = \begin{cases} P_d, & p_i > P_d \\ p_i, & p_i \leq P_d \end{cases} \quad (1)$$

式(1)展示了直方图修正的主要数学模型,整体归一化操作为

$$q_i = \frac{p'_i}{\sum_{j=1}^{255} p'_j} \quad (2)$$

式中 q_i 为新直方图的占比。式(2)保证了所有灰度级占比相加为 1 的条件。

设定原图像为 X_0 ,上述新直方图均衡化过程可以得出的中间结果为 Y_1 ,整个过程表达为 $X_0 \xrightarrow{f_1(x,y)} Y_1$, $f_1(x,y)$ 的表达式为

$$f_1(x,y) = 255 \times \sum_{j=0}^i q_j \quad (3)$$

图 5 分别为图 1 中#1 和#3 进行新直方图均衡化之后的结果。可以看出,新直方图均衡化后基本改善了整体光照对图像的影响,突出了隐藏在背景中的海上红外目标,但局部细节仍然不够丰富。

3.2 边缘信息的融合

采用二阶微分算子法对图像进行边缘信息的量化和求取,相应的数学表达式为

$$f_2(x,y) = 4X_0(x,y) - X_0(x+1,y) - X_0(x-1,y) - X_0(x,y+1) - X_0(x,y-1) \quad (4)$$

滤波结构元素如图 6(a)所示。遍历整个图像可以得到放大 5 倍并将灰度值整体提高 128 个量级后的边缘信息。将灰度值整体提高的目的是防止图像整体视觉效果偏暗,从而有利于观察。从图 6(b)、(c)可以看出,放大后的边缘信息可以较好地反映图像的局部细节和锐化程度,同时也突出了目标的轮廓和细节信息。

此过程的中间结果记为 Y_2 ,该过程可表达为 $X_0 \xrightarrow{f_2(x,y)} Y_2$,将两个过程的中间结果进行点对点的像素级融合,可以得出最终红外目标增强后的结果,相应的数学表达式为

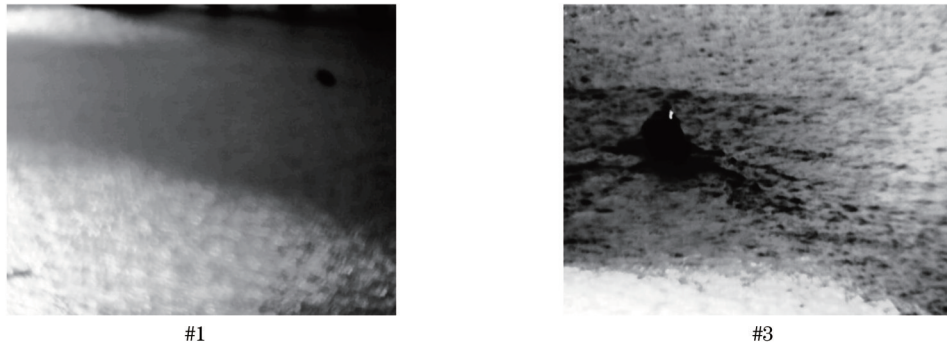


图 5 新直方图均衡化之后的结果
Fig. 5 Results of new histogram equalization

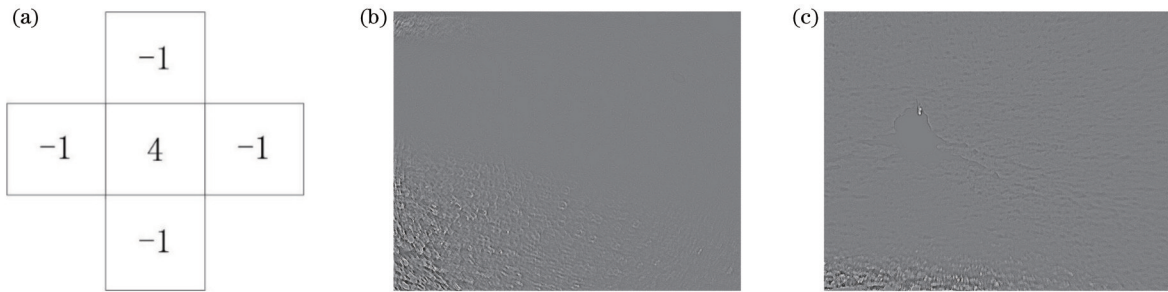


图 6 滤波结构元素及放大后的边缘信息。(a) 滤波结构元素;(b) 图 1 中#1 的边缘信息放大 10 倍后的结果;(c) 图 1 中#3 的边缘信息放大 10 倍后的结果
Fig. 6 Structural element in filter and edge information after amplification. (a) Structural element in filter; (b) result of edge information of #1 in Fig. 1 amplified by 10 times; (c) result of edge information of #3 in Fig. 1 amplified by 10 times

$$Y = Y_1 + \lambda Y_2, \quad (5)$$

式中： λ 为边缘信息增益因子， $\lambda \in [2, 3]$ ， λ 取值越大，红外图像中的细节锐化地越明显，但也容易产生过多的噪声，故常令其值为 2。

HEPLEF 算法的流程如图 7 所示。HEPLEF

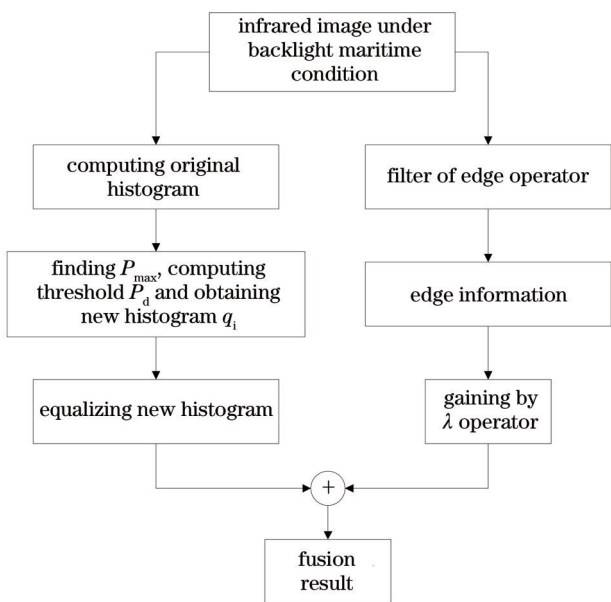


图 7 HEPLEF 算法流程图
Fig. 7 Flowchart of HEPLEF algorithm

算法的增强结果如图 8 所示，此时 $\lambda = 2$ 。通过图像整体效果及局部区域可以看出，该算法明显改善了海上的光照影响，且隐藏在海上背景中的红外目标得到了有效地凸显，对比度和细节都得到了合理提升。

图 9 所示为 HEPLEF 算法增强图 1 中#1 时边缘信息融合前后的效果图，以此说明边缘信息融合的重要性，上方矩形框为海上目标的放大图，下方矩形框为海浪背景的放大图。特别是，图 9(a) 与图 9(b) 中下方矩形框部分的对比较为明显，图 9(b) 中下方矩形框经放大后出现了较为明显的细节模糊，而图 9(a) 中下方矩形框经放大后细节更为丰富。可以看出，HEPLEF 算法在融合边缘信息后具有更加细腻的细节表达。

图 10 为 HEPLEF 算法在图 1 中#4 所示的质量极低的逆光环境下取得的增强效果。可以看出，HEPLEF 算法明显地改善了原图像的光照不良影响并提升了原图像的细节信息。

4 逆光场景的海上红外目标识别

提出了一种基于多尺度的局部对比度显著性逆光场景下的海上红外目标识别(LCMMBC)算法，包括逆光背景下局部对比度显著性的数学模型建立、多尺度下的目标搜索框的建立、基准点在图像中的遍历策略和疑似目标筛选时局部对比度显著性阈值的选取等。该算法的主要原理是通过形如“九宫格”的目标最

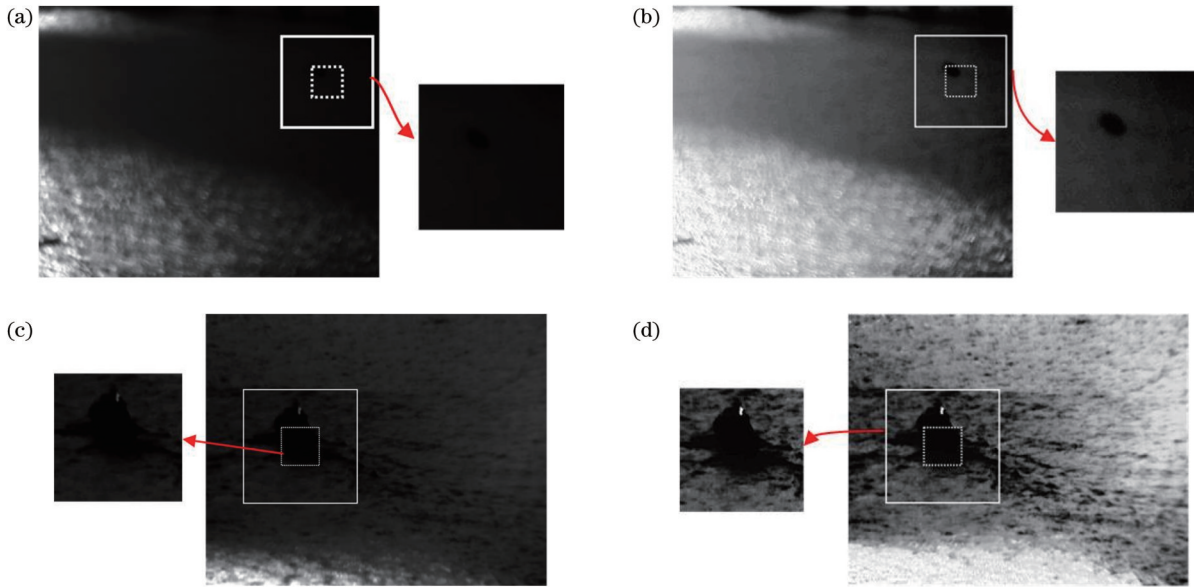


图 8 HEPLEF 算法的增强结果。(a)图 1 中 #1 的整体及局部目标区域;(b)图 1 中 #1 的增强结果及局部目标区域;(c)图 1 中 #3 整体及局部目标区域;(d)图 1 中 #3 的增强结果及局部目标区域
 Fig. 8 Enhancement results of HEPLEF algorithm. (a) Entire result and local target region of #1 in Fig. 1; (b) enhancement result and local target region of #1 in Fig. 1; (c) entire result and local target region of #3 in Fig. 1; (d) enhancement result and local target region of #3 in Fig. 1

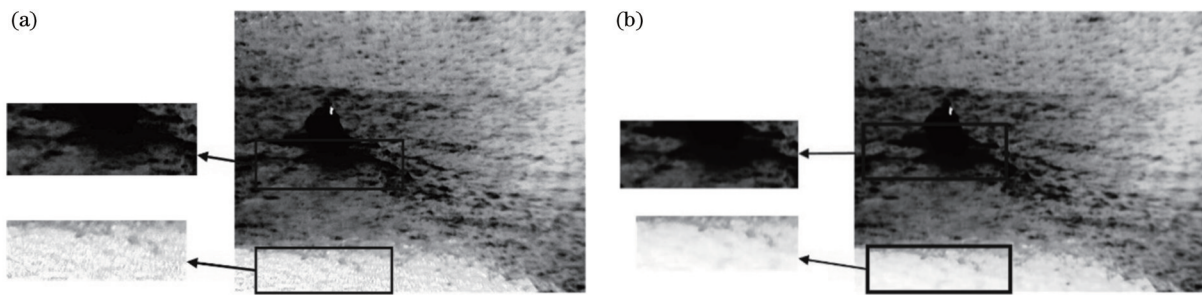


图 9 边缘信息融合前后的增强效果对比度。(a) 边缘信息融合后;(b) 边缘信息融合前
 Fig. 9 Comparison of enhancement results before and after edge information fusion. (a) After edge information fusion; (b) before edge information fusion

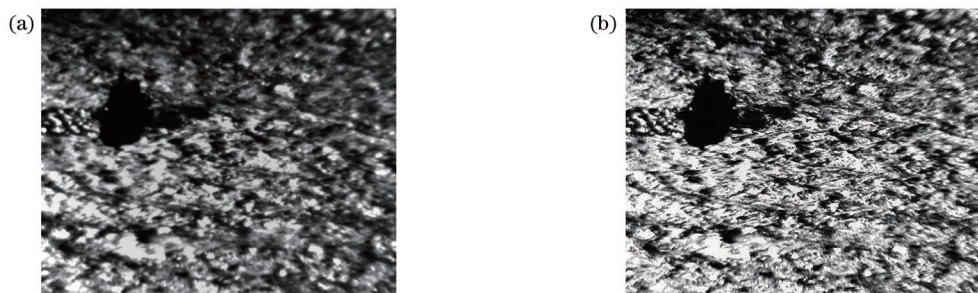


图 10 HEPLEF 算法对图 1 中 #4 的增强效果。(a) 原图;(b) 增强结果
 Fig. 10 Enhancement result of #4 in Fig. 1 by HEPLEF algorithm. (a) Original image; (b) enhancement result

小搜索单元遍历整幅图像,使具有高局部对比度显著性特征的图像目标区域被检测到。算法具有计算简单、检测结果可靠性强等特点。

4.1 局部对比度显著性数学模型的建立

图 11 所示是基于局部对比度显著性的检测原理

和单尺度下的最小检测单元示意图。图 11(b)为目标的最小检测单元,中心区域代表目标区域 [图 11(a)中的 m_0],周围 8 个子块表示背景区域 [图 11(a)中的 u],白色区域与红色区域组成了单尺度的目标最小检测单元。该最小检测单元按照图 11(a)所示的“自上至下”

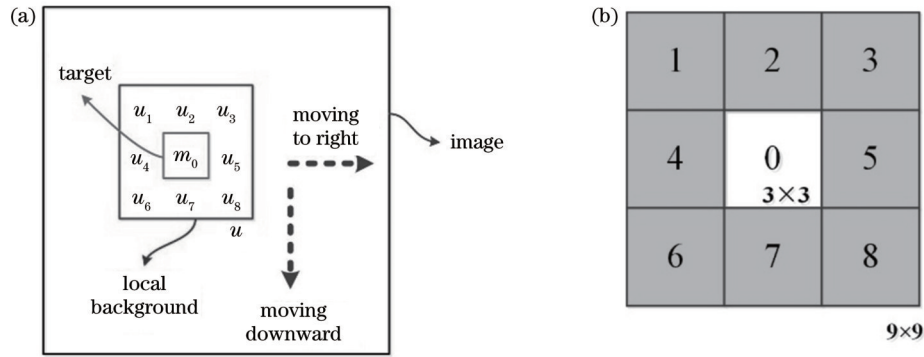


图 11 基于局部对比度显著性的目标检测原理和单尺度下的最小目标检测单元示意图。(a)基于局部对比度显著性的目标检测原理;(b)单尺度下的目标最小检测单元

Fig. 11 Principle for target detection based on local contrast saliency and minimum target detection unit under single scale. (a) Principle for target detection based on local contrast saliency; (b) minimum target detection unit under single scale

和“自左至右”的遍历方法搜寻整幅图像中的疑似目标。

根据图 11(b)所示的目标搜索“九宫格”,可以得出目标块的灰度最小值和局部对比度显著性,相应的表达式为

$$l_n = \min(m_0), \tag{6}$$

$$\begin{cases} C_n = \min_i \frac{M^2(u_i)}{l_n} \\ M(u_i) = \frac{1}{N_u} \sum_{j=1}^{N_u} u_j^{(i)} \end{cases}, \tag{7}$$

式中: l_n 表示目标子块中的最小灰度值; C_n 表示目标检测单元遍历至图像第 n 个子块的局部对比度显著性; N_u 表示 1 个背景子块所包含的像素个数; $M(u_i)$ 是 u_i 子块的均值。

根据图 11(b)所示的目标最小检测单元建立的单尺度局部对比度显著性数学模型如式(7)所示,主要原理为目标子块的灰度值低、周围背景子块的灰度值高,通过平方与比例运算可以形成两者差异化的度量。为防止对比度结果过大,采用取各背景子块计算结果最

小值的策略。式(6)和式(7)为单尺度下局部对比度显著性的主要数学模型。

4.2 多尺度下的目标搜索方法

本节讨论多尺度下局部对比度显著性的数学模型的建立、基准点的选取和移动方式,以及可变大小的目标搜索框的确定。

图 12 为多尺度的目标检测单元,包含小尺度的目标检测单元和大尺度的目标检测单元。在对图像进行遍历搜寻时,基准点为 m_0 的中心点或 M_0 的中心点首先被定位,进而确定目标框和背景框的范围。一般地,小尺度目标检测单元的尺寸为 l ,大尺度目标检测单元的尺寸为 $1.5l$,两者联合形成检测单元,各自计算局部对比度的显著性,两者经池化运算后可以得出多尺度的局部对比度显著性。池化运算起到压缩数据量和统一度量准则的作用,可以极大程度上模拟人眼“自底向上”的注意力和人眼观察目标的机制^[22]。“自底向上”的注意力具体为分层次、逐层查找有用的目标信息,LCMMBC 算法的多尺度和框架结构可以较大程度地近似与模拟人眼的注意力机制,从而得到符合人眼视觉的目标检测率。

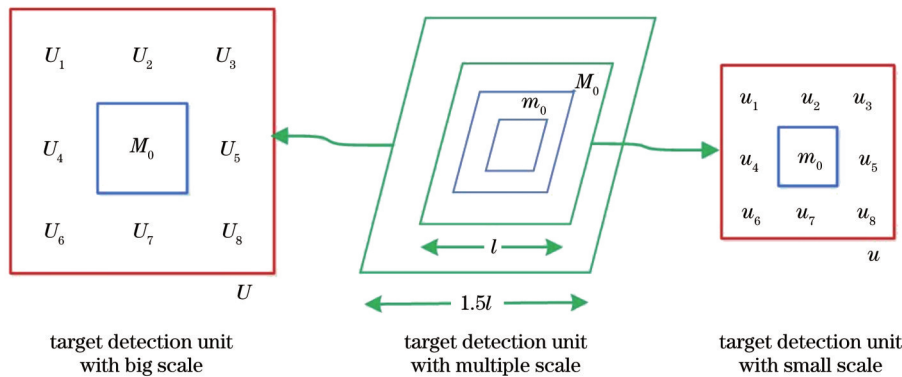


图 12 多尺度目标检测单元示意图

Fig. 12 Schematic diagram of target detection unit with multiple scale

多尺度目标检测单元的局部对比度显著性的数学计算公式为

$$\begin{cases} C_n^{(1)} = \min_i \frac{M^2(u_i)}{L_n} \\ C_n^{(2)} = \min_i \frac{M^2(U_i)}{L_n} \\ C_n = \max[C_n^{(1)}, C_n^{(2)}] \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $C_n^{(1)}$ 为小尺度下的局部对比度显著性; $C_n^{(2)}$ 为大尺度下的局部对比度显著性; L_n 为大尺度下中心块内的最

小灰度值; C_n 为多尺度目标检测单元下的局部对比度显著性, 采用取最大值池化策略, 将两个单尺度的局部对比度显著性融合得出多尺度的局部对比度显著性。

疑似目标局部对比度显著性的阈值选取公式和相应参数可以参考 2.2 节所述。LCMMBC 算法的伪代码如图 13 所示。通过图像中基准点的遍历完成小尺度目标检测单元的确定、大尺度目标检测单元的确定、局部对比度显著性的量化、目标左上角的坐标标注和目标框的标注, 并据此推算该算法的时间复杂度为 $O(N^2)$ 。

```

input: image (height:  $M$ , width:  $N$ )
output: coordinate of top left corner of target rectangle, width and height of target rectangle
definition: size of  $w_1$  under small scale, value of  $k$ 
calculation:  $w_2=1.5 \times w_1$  under big scale,  $\text{contrast\_map1}=\text{ones}(M/w_2-2, N/w_2-2)$  under small scale,
 $\text{contrast\_map2}=\text{ones}(M/w_2-2, N/w_2-2)$  under big scale,  $\text{contrast\_map}=\text{ones}(M/w_2-2, N/w_2-2)$ 
under double scale
A: locating datum point in detection unit, establishing target joint detection unit and calculating
contrast map under double scale
A1: for  $i=1.5 \times w_2: w_1: M-1.5 \times w_2$  do
A2: for  $j=1.5 \times w_2: w_1: N-1.5 \times w_2$  do
A3: delimiting target region
 $m_0=I(i-0.5 \times w_1:i+0.5 \times w_1, j-0.5 \times w_1:j+0.5 \times w_1)$ ,  $M_0=I(i-0.5 \times w_2:i+0.5 \times w_2, j-0.5 \times w_2:j+0.5 \times w_2)$ 
A4: delimiting background region
 $u=I(i-1.5 \times w_1:i+1.5 \times w_1, j-1.5 \times w_1:j+1.5 \times w_1)$ ;  $U=I(i-1.5 \times w_2:i+1.5 \times w_2, j-1.5 \times w_2:j+1.5 \times w_2)$ 
A5: According to Eq. (8),  $\text{contrast\_map1}(i, j) \leftarrow C_n^1$  and  $\text{contrast\_map2}(i, j) \leftarrow C_n^2$ 
A6: pooling operation
 $\text{contrast\_map}(i, j) = \max[\text{contrast\_map1}(i, j), \text{contrast\_map2}(i, j)]$ 
A7: end for
A8: end for
B: locating datum point of target with coordinate of  $(m_i, n_i)$ , choosing optimal scale and
identifying target rectangle
B1: computing mean value, standard deviation and  $T$  of contrast map
B2: obtaining coordinate of datum point  $(m_{ii}, n_{ij}) = \text{find}(\text{contrast\_map} > T)$  and counting target total
number  $N$ 
B3: for  $ii=1:1:N$  do
B4: setting coordinate of datum point as  $(m_{ii}, n_{ij})$ , comparing  $C_n^{(1)}$  with  $C_n^{(2)}$  and drawing
corresponding target rectangle
    if  $C_n^1 > C_n^2$ 
        calculating coordinate of top left corner  $[(x_{ii}, y_{ij})]$  and drawing rectangle with width and
height of  $w_1$ 
    else
        calculating coordinate of top left corner  $[(x'_{ii}, y'_{ij})]$  and drawing rectangle with width and
height of  $w_2$ 
    B5: end if
    B6: end for

```

图 13 LCMMBC 算法的伪代码

Fig. 13 Pseudocode of LCMMBC algorithm

图 14 是在参数 $w_1=13$ 和 $k=2.1$ 下应用多尺度目标搜索框得出的目标检测结果与局部显著性三维图, 目标检测结果中完整地标识出了两个目标所在的区域。由此可见, 本节所提算法突出了目标的局部对比

度显著性。当目标的局部对比度显著性强于背景的局部对比度显著性时, 容易设定阈值将两者分离, 进而可以实现对海上红外目标的准确检测。

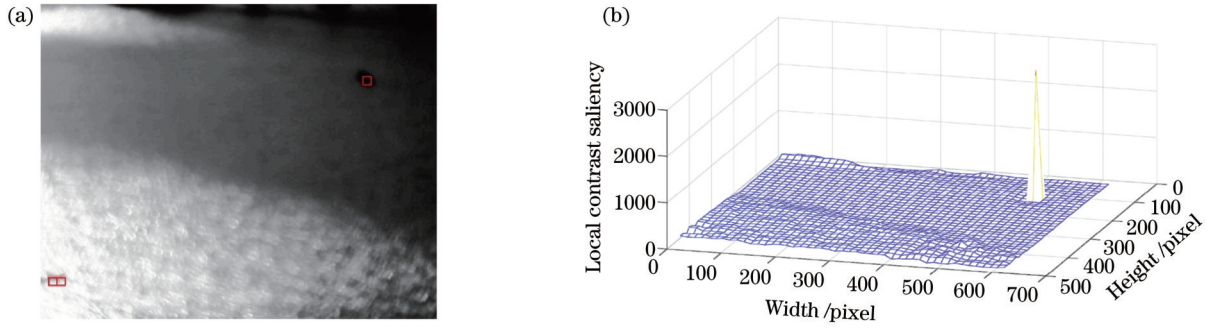


图 14 LCMMBC 算法的目标检测结果和局部对比度显著性示意图。(a) 目标检测结果示意图; (b) 局部对比度显著性示意图
Fig. 14 Schematic diagram of target detection result and local contrast saliency by LCMMBC algorithm. (a) Schematic diagram of target detection result; (b) schematic diagram of local contrast saliency

5 实验验证与分析

5.1 各类增强算法之间的对比与分析

以图 1 中 #1 和 #3 两幅待增强处理图像为例, 来比较不同增强算法的效果。将平均梯度 A_G ^[21] 和局部块的对比度增益因子 L_{CG} ^[20] 作为图像质量客观评价指标来评价增强算法的性能。 A_G 评价指标较为明显地突出了图像全局的细节丰富程度与对比度, 局部块的对比度增益因子 L_{CG} 评价指标突出了目标所在的局部区域的目标块与背景块的对比度差异, 这两个指标联合使用可以突出海上红外场景增强的视觉效果与增强算法对后续目标检测的支撑作用。 A_G 指标值越大, 图像细节丰富程度越突出。 L_{CG} 指标值越大, 局部块的对比度显著性越高。此时, 二者对后续目标检测的支撑作用越大。

A_G 的计算公式为

$$A_G = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} |\nabla f(i, j)|}{(M-1)(N-1)}, \quad (9)$$

式中: $|\nabla f(i, j)|$ 表示图像的梯度值, 其行和列都采用前向差分法计算。

L_{CG} 的计算公式为

$$\begin{cases} L_{CG} = \frac{C_{ONRES}}{C_{ONORI}}, \\ C_{ON} = |m_t - m_b| \end{cases}, \quad (10)$$

式中: C_{ONRES} 表示增强结果的局部对比度; C_{ONORI} 表示原图像的局部对比度; C_{ON} 为局部对比度, 其数值越大, 表明增强算法的效率越高, 依赖于图像中目标框和背景框的划分; m_t 和 m_b 分别表示目标区域的灰度均值和

背景区域的灰度均值。

所选对比算法对图 1 中 #1 和 #3 的增强效果分别如图 15 和图 16 所示。通过图 15(a) 和图 16(a) 可以看出, 经典直方图均衡化算法虽然较为明显地增强和突出了隐藏的海上红外目标, 但是出现了目标周边区域模糊的现象。MMBEBHE 算法主要为保留原始图像平均灰度的直方图均衡化算法, 对于隐藏在背景中的海上目标没有明显的增强, 故该算法一般对自然场景的可见光图像增强有效, 但不适用于增强海上逆光场景图像。ETHE 算法依据边缘信息的直方图均衡化定义灰度映射函数, 增强原始图像, 算法主要参数来源于梯度算子的阈值 $T_{threshold}$, 图 15(c) 与图 16(c) 中 $T_{threshold} = 5$, 即将梯度值大于 5 的位置视为边缘。虽然该算法取得了如图 16(c) 所示的较好的增强效果, 但是该算法对于图 1 中 #1 所示的淹没于背景的海上目标的增强不明显。Retinex 算法通过估计光照入射分量的方法估计图像中的反射分量, 以此复原图像中的真实信息, 主要参数为模板大小 k , 图 15(d) 中 $k=7$, 该算法的增强结果中左下角目标出现了细节缺失, 图 16(d) 中出现了背景模糊的现象。相比之下, 第 3 章提出的 HEPLEF 算法取得的增强效果最佳, 如图 8(b)、(d) 所示。

通过表 1 可以看出, 第 3 章提出的 HEPLEF 算法对于原始图像的平均梯度值有至少两倍的提升, 且是各类增强算法中对平均梯度值提升程度最大的算法, 表明该算法在图像增强方面整体性能优越。

图 1 中 #1 的局部对比度 C_{ON} 以被淹没在海上背景中的右上角目标基准点为中心, 目标框 w_1 的大小为 57×57 。对于图 1 中的 #3, 以中间目标的基准点为中心, 目标框 w_1 的大小为 71×71 , 目标检测单元的大小

表 1 原图像与增强算法的 A_G
Table 1 A_G of original image and enhancement algorithms

Image	#1 in Fig. 1	Fig. 15(a)	Fig. 15(b)	Fig. 15(c)	Fig. 15(d)	Fig. 8(b)
A_G	1.11	1.67	1.46	1.33	0.99	2.34
Image	#3 in Fig. 1	Fig. 16(a)	Fig. 16(b)	Fig. 16(c)	Fig. 16(d)	Fig. 8(d)
A_G	1.07	2.71	1.56	3.51	1.55	4.72

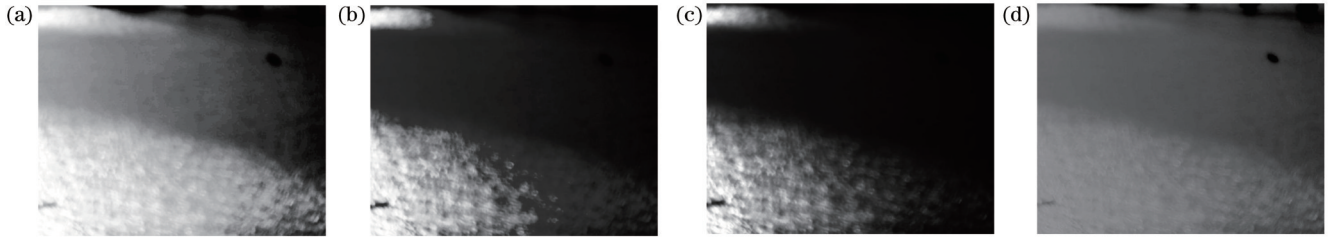


图 15 各类算法对图 1 中#1 的增强结果的比较。(a)经典直方图均衡化算法;(b)MMBEBHE算法;(c)ETHE算法($T_{\text{threshold}}=5$);(d)Retinex算法($k=7$)

Fig. 15 Comparison of enhancement results for #1 in Fig. 1 obtained by different algorithms. (a) Classical histogram equalization algorithm; (b) MMBEBHE algorithm; (c) ETHE algorithm ($T_{\text{threshold}}=5$); (d) Retinex algorithm ($k=7$)

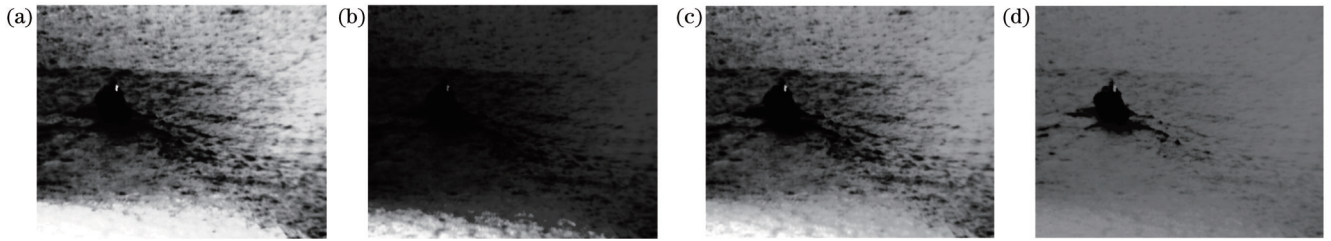


图 16 各类算法对图 1 中#3 的增强结果的比较。(a)经典直方图均衡化算法;(b)MMBEBHE算法;(c)ETHE算法($T_{\text{threshold}}=5$);(d)Retinex算法($k=7$)

Fig. 16 Comparison of enhancement results for #3 in Fig. 1 obtained by different algorithms. (a) Classical histogram equalization algorithm; (b) MMBEBHE algorithm; (c) ETHE algorithm ($T_{\text{threshold}}=5$); (d) Retinex algorithm ($k=7$)

为 w_1 的 3 倍。比较各增强算法的对比度增益因子 L_{CG} ，的 L_{CG} 值最大，可以将原始图像的 C_{ONORI} 提升两倍以上。如表 2 所示。可以发现，第 3 章提出的 HEPLEF 算法

表 2 各增强算法的 L_{CG} 对比

Table 2 Comparison of L_{CG} of different enhancement algorithms

Image	Fig. 15(a)	Fig. 15(b)	Fig. 15(c)	Fig. 15(d)	Fig. 8(b)
L_{CG}	3.36	1.14	0.30	2.78	3.46
Image	Fig. 16(a)	Fig. 16(b)	Fig. 16(c)	Fig. 16(d)	Fig. 8(d)
L_{CG}	2.07	0.49	2.17	2.54	2.67

5.2 增强算法对目标检测的支撑

通过不同算法在海上红外图像相关数据集处理结果中的对比和有效的图像客观评价指标来评估目标增强算法与目标检测算法的有效性。

图 17 所示为图 1 中#1 原始图像的目标检测结果和三维局部对比度显著性图($w_1=9$ 和 $k=2$)。LCM 对图像局部对比度显著性具有更密集的网格划分,菱形框标记出了隐藏目标在图像和三维局部对比度显著性示意图中的位置。可以看出,隐藏在逆光海上背景中的目标的局部对比度较低,应用 LCM 无法检测到。

图 18 所示为图 1 中#1 增强结果的 LCM 检测结果与三维局部对比度显著性图。通过与图 17 对比可知:所提增强算法使得原始图像任意位置处的局部对比度显著性均有不同程度的提升,图像中的虚警目标个数明显变少;隐藏在背景中的红外目标的局部对比度显著性提升程度较大,该数值的变化程度无论从整体还是局部,都是十分显著的,即通过设定阈值的方式,隐

藏目标很容易被检测算法检测到。

通过以上结果对比与实验验证可知,第 3 章提出的海上红外目标增强算法对于后续目标检测的主要贡献在于突出目标区域的局部对比度显著性和有利于算法检测两方面。

5.3 检测算法的性能分析

本节引入目标检测率(DR)^[23]和虚警率(FAR)^[23]评价目标检测算法的有效性,目标检测率和虚警率的计算公式为

$$\begin{cases} D_R = \frac{N_D}{N_T} \\ F_{AR} = \frac{N_F}{N_{IC}} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: N_D 表示成功检测出的目标个数; N_T 表示目标个数的总数; N_F 表示错误检测出的目标个数; N_{IC} 表示图像的总帧数。利用增强后的结果作为目标检测的输出,比较检测结果的目标检测率和虚警率。

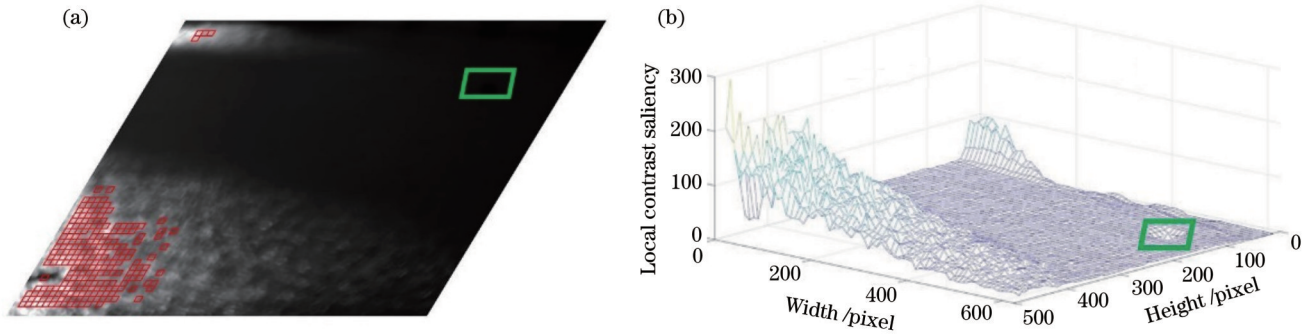


图 17 图 1 中#1 的目标检测结果和三维局部对比度显著性图($w_1=9$ 和 $k=2$)。(a) 目标检测结果; (b) 三维局部对比度显著性图
Fig. 17 Target recognition result and three-dimensional diagram of local contrast saliency for #1 in Fig. 1 with $w_1=9$ and $k=2$.
(a) Target recognition result; (b) three-dimensional diagram of local contrast saliency

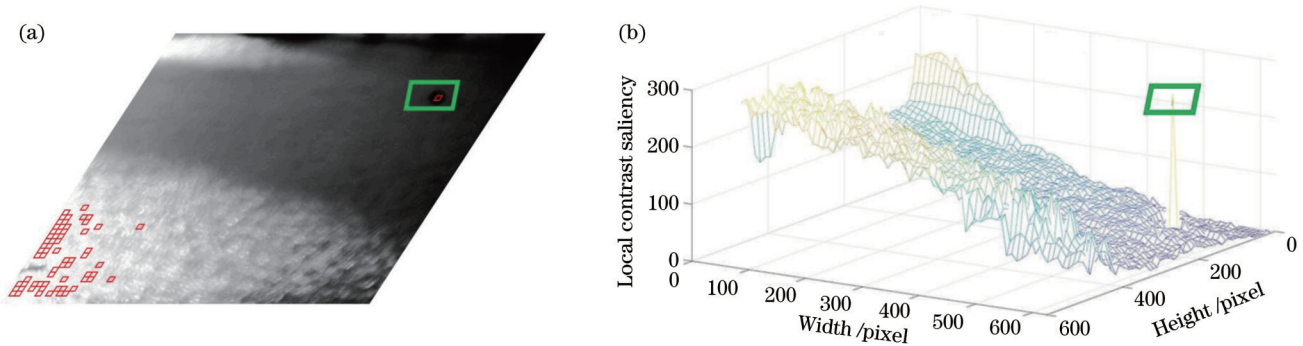


图 18 图 1 中#1 增强结果的目标检测结果和三维局部对比度显著性图($w_1=9$ 和 $k=2$)。(a) 目标检测结果; (b) 三维局部对比度显著性图
Fig. 18 Target recognition result and three-dimensional diagram of local contrast saliency for enhancement result of #1 in Fig. 1 with $w_1=9$ and $k=2$. (a) Target recognition result; (b) three-dimensional diagram of local contrast saliency

取图 3(a)、(b) 所示的代表性图像序列, 图 3(a) 的图像总帧数为 1241 张, 图 3(b) 的图像总帧数为 1352 张, 取两者之间的平均值, 得出的目标检测率与目标虚警率的结果如表 3 所示。可以看出, 第 5 章提出的算法拥有最高的目标检测率和最低的目标虚警率, 在选取的比较算法中性能最优。

表 3 不同算法之间的目标检测率和目标虚警率对比
Table 3 Comparison of target detection rates and target false alarm rates between different algorithms

Indicator	MPCM	MLHM	DECM	LCMMBC
DR	95.2	96.4	95.8	99.8
FAR	36.1	42.5	43.6	23.4

unit: %

6 结 论

根据海上红外场景图像直方图的特点和红外目标出现的负对比度的特性分别提出了 HEPLEF 算法和 LCMMBC 算法。前者增强算法的效果在于突出淹没于逆光背景下的红外目标的对比度与细节信息, 增强了逆光环境下海上红外图像中目标的可视化效果, 该算法具有自适应性强、输入参数少的特点。后

者目标检测算法以前者的增强结果作为输入, 并充分考虑了人眼的视觉注意力机制和特点, 采用了“九宫格”的基本框架作为目标最小的检测单元, 引入了多尺度的搜索机制, 在原理上采用了基准点遍历技术搜索图像中的目标, 具有计算简单、模型易于修改等特点。HEPLEF 算法适用于大范围灰度较低的海上场景中弱小目标的细节突出与对比度增强。在应用效果方面, 该算法比较侧重于图像的细节信息增强。LCMMBC 算法的适用范围主要为对负对比度先验条件下海上红外场景的目标检测与识别, 在原理方面的局限性体现在检测效果与检测率比较依赖于目标最小检测单元的尺寸, 需得知目标在图像中大小的先验信息, 存在尺寸、对比度显著性阈值等相关参数不易选取等问题。结合本研究和大量的海上红外图像数据实验与测试, 今后值得研究的方向包含以下两个方面。

1) 对比度显著性图局部峰的检测与识别

有些红外弱小目标在图像某一区域中体现出峰值特性, 而全局特性较弱, 故利用对比度的全局均值与全局标准差建立的阈值搜索机制不利于这些目标的检测与识别, 需建立更为有效的图像部分区域的局部对比度数学模型与阈值搜索机制。

2) 局部对比度显著性的目标检测方法 with 统计学习目标检测方法的融合

所提 LCMMBC 算法对疑似目标的分块、定位可以为大量图像中所包含子块中的目标、背景提供自动化的样本标注方法, 以此形成有效的大量样本数据集, 便于形成如支持向量机(SVM)分类器的参数, 易于融入目标的形状信息如梯度直方图(HOG)特征, 增加了目标的形态判别。因此, 可以考虑建立局部对比度显著性与统计学习中决策函数联合的检测机制, 使结果拥有更为准确的目标检测率。

参 考 文 献

- [1] 苏宁远, 陈小龙, 关键, 等. 基于深度学习的海上目标一维序列信号目标检测方法[J]. 信号处理, 2020, 36(12): 1987-1997.
Su N Y, Chen X L, Guan J, et al. One-dimensional sequence signal detection method for marine target based on deep learning [J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(12): 1987-1997.
- [2] 王梦瑶, 孟祥超, 邵枫, 等. 基于深度学习的 SAR 辅助下光学遥感图像去云方法[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1228002.
Wang M Y, Meng X C, Shao F, et al. SAR-assisted optical remote sensing image cloud removal method based on deep learning[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1228002.
- [3] 楼晨风, 张湧, 刘亚. 基于互补梯度增强的红外线列扫描图像小目标检测[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2104001.
Lou C F, Zhang Y, Liu Y. Small target detection of infrared linear array image based on complemented gradient enhancement [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2104001.
- [4] 王祖温. 救助打捞装备现状与发展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 91-100.
Wang Z W. Current development of rescue and salvage equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 91-100.
- [5] Chan Y T. Maritime filtering for images and videos[J]. Signal Processing: Image Communication, 2021, 99: 116477.
- [6] 陈潮起, 孟祥超, 邵枫, 等. 一种基于多尺度低秩分解的红外与可见光图像融合方法[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1110001.
Chen C Q, Meng X C, Shao F, et al. Infrared and visible image fusion method based on multiscale low-rank decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1110001.
- [7] Ding C, Pan X P, Gao X Y, et al. Three adaptive sub-histograms equalization algorithm for maritime image enhancement[J]. IEEE Access, 2020, 8: 147983-147994.
- [8] 陈莹, 朱明, 李兆泽. 基于高斯混合模型的遥感数字图像增强[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1209002.
Chen Y, Zhu M, Li Z Z. Remote sensing digital image enhancement based on Gaussian mixture modeling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(12): 1209002.
- [9] Wang B, Dong L L, Zhao M, et al. Texture orientation-based algorithm for detecting infrared maritime targets[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4689-4697.
- [10] 杨雪锋, 张英俊, 刘文, 等. 海上远距离目标探测中的红外图像增强算法[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(4): 102-107, 132.
Yang X F, Zhang Y J, Liu W, et al. Algorithm of infrared image enhancement for detecting far target at sea[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2015, 41(4): 102-107, 132.
- [11] 王园园, 赵耀宏, 罗海波, 等. 海面红外图像的动态范围压缩及细节增强[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0126003.
Wang Y Y, Zhao Y H, Luo H B, et al. Dynamic range compression and detail enhancement of sea-surface infrared image[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0126003.
- [12] Chen S D, Ramli A R. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4): 1310-1319.
- [13] Singh K, Vishwakarma D K, Walia G S, et al. Contrast enhancement via texture region based histogram equalization[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(15): 1444-1450.
- [14] Chen C L P, Li H, Wei Y T, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 574-581.
- [15] Han J H, Ma Y, Huang J, et al. An infrared small target detecting algorithm based on human visual system[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(3): 452-456.
- [16] Wei Y T, You X G, Li H. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection[J]. Pattern Recognition, 2016, 58: 216-226.
- [17] Nie J Y, Qu S C, Wei Y T, et al. An infrared small target detection method based on multiscale local homogeneity measure [J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 90: 186-194.
- [18] Bai X Z, Bi Y G. Derivative entropy-based contrast measure for infrared small-target detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(4): 2452-2466.
- [19] Chan Y T. Comprehensive comparative evaluation of background subtraction algorithms in open sea environments[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2021, 202: 103101.
- [20] Yang P, Dong L L, Xu W H. Infrared small maritime target detection based on integrated target saliency measure[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 2369-2386.
- [21] 董丽丽, 丁畅, 许文海. 基于直方图均衡化图像增强的两种改进方法[J]. 电子学报, 2018, 46(10): 2367-2375.
Dong L L, Ding C, Xu W H. Two improved methods based on histogram equalization for image enhancement[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(10): 2367-2375.
- [22] Yu C, Liu Y P, Wu S H, et al. Infrared small target detection based on multiscale local contrast learning networks[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 123: 104107.
- [23] Ren L, Pan Z B, Ni Y. Double layer local contrast measure and multi-directional gradient comparison for small infrared target detection[J]. Optik, 2022, 258: 168891.

Enhancement and Recognition of Infrared Target with Low Quality Under Backlight Maritime Condition

Hou Yifeng¹, Ding Chang^{2,3,4*}, Liu Hai³, Mandal Mrinal⁴, Gao Xingyu², Luo Zhendong²,
Wu Ziku⁵

¹*School of Electronics and Information Engineering, Wuzhou University, Wuzhou 543001, Guangxi, China;*

²*School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 531004, Guangxi, China;*

³*School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;*

⁴*Department of Electrical and Computer Engineering, University of Alberta, Edmonton T6G 1H9, Alberta, Canada;*

⁵*School of Science and Information, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China*

Abstract

Objective Infrared maritime target recognition plays a significant role in the field of maritime search and maritime rescue. However, complex maritime conditions and illumination interference decrease the quality of maritime infrared images. For example, the backlight maritime condition can result in maritime targets with a negative contrast and make them disappear in the maritime background. How to enhance the contrast of maritime infrared targets and improve the quality of dim targets in the backlight maritime condition is the significant basis of maritime target detection and recognition. Furthermore, studying effective methods for detecting maritime targets in the backlight maritime condition is a significant research direction, and conventional target detection algorithms often lead to a high false alarm rate and low detection rate. We hope that the proposed enhancement algorithm can outstand maritime targets in the backlight maritime condition and the proposed target detection algorithm can detect maritime targets in backlight maritime conditions with a high accuracy rate.

Methods We have tested the histograms of multiple maritime infrared images in the backlight condition and studied the characteristics of these histograms. Then, we find that the histograms can reflect the characteristic of a local peak, which represents the large background in the backlight maritime condition. We limit the maximum proportion in the histograms and obtain a novel histogram. The novel histogram is equalized, and it can prevent illumination interference and improve image quality. In addition, we quantize and extract the edge information in a backlight maritime image, and the edge information is fused with a suitable proportional parameter in the middle result of novel histogram equalization, which makes the enhancement result have high contrast and more detailed information. Conventional methods for target detection such as the local contrast method (LCM) are used in target detection with positive contrast by a target detection unit with a single scale. In the proposed local contrast method with multiscale for target recognition in backlight condition (LCMMBC) algorithm, we establish the target detection unit with multiple scales and define the local contrast saliency between the local targets and the local background in a negative contrast condition, and some significant procedures such as moving steps, pooling strategy, and threshold selection are discussed. Finally, the pseudocode and the implementation process of the LCMMBC algorithm are described.

Results and Discussions Infrared maritime images have the characteristics of large background with a low gray value and target region with a negative contrast which can easily disappear in the large background (Fig. 1). The histograms of the maritime infrared images in the backlight condition have a local peak (Fig. 2), and the local peak is the high proportion of pixels in image histograms, which represents the large background in backlight maritime infrared images. The diagram of the original histogram modification includes the maximum proportion's limit and normalization of the novel proportion of pixels (Fig. 4). The result of the novel histogram equalization (Fig. 5) shows that the illumination condition is reasonably adjusted compared with the original image (Fig. 1). However, the middle result misses some details to some degree, and we need to add some edge information. The edge information's structural elements, quantification model, and extraction method are described in this paper (Fig. 6), which can reflect the gray value variation around the central pixel. At last, the result of histogram equalization with plateau limit and edge fusion (HEPLEF) algorithm has high local contrast, and the illumination of the enhancement result is uniform. In particular, dim maritime targets are highlighted by this proposed algorithm (Fig. 9). From the objective image quality assessment, it can be seen that the average gradient of the

enhancement result is increased by more than two times than that of the original image (Table 1), and the local contrast gain is increased by more than two times than that of the original image (Table 2). The image assessment standard reflects that the HEPLEF algorithm can enhance the details of infrared maritime images and improve the contrast of infrared maritime images effectively. The support of the maritime target enhancement for target detection is also studied, and a three-dimensional diagram of local contrast saliency is used in the comparison between the enhancement result and the original image. Furthermore, the enhancement result increases the suspected target region's local contrast obviously (Fig. 18). The performance of the proposed LCMMBC algorithm is also tested, and we hope that the proposed algorithm can obtain a higher detection rate and lower false alarm rate. The experimental result shows that the proposed algorithm achieves a detection rate of 99.8% and a false alarm rate of 23.4%, respectively (Table 3), which shows better performance than other algorithms.

Conclusions In this study, two novel algorithms called HEPLEF and LCMMBC are used for infrared maritime image enhancement and infrared target detection in the backlight condition, respectively. The HEPLEF algorithm can be applied in infrared maritime images with a large maritime background and dim maritime targets, and the enhancement result reflects that the contrast of the entire image is improved, and the target details are highlighted. The HEPLEF algorithm has characteristics of fewer input parameters and chief calculation. LCMMBC algorithm is suitable for maritime targets with a negative local contrast, and the performance of the LCMMBC algorithm is robust. In the principle of the LCMMBC algorithm, the disadvantages are the size of the minimum detection unit relies on the factual target size in the infrared image, and the selection of the minimum target detection size and local contrast saliency threshold of the LCMMBC algorithm is sometimes difficult.

Key words measurement; infrared imaging; maritime infrared target recognition; infrared image enhancement; histogram transformation; local contrast saliency; backlight maritime condition