

基于加权块对比度的红外小目标检测方法

吴洪凯^{1,2*}, 董科研^{2**}, 宋延嵩², 董小娜², 袁明²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空间光电技术研究院, 吉林 长春 130022

摘要 针对不同背景条件下, 红外弱小目标检测信杂比低、虚警率高的特点, 重点利用小目标能量接近高斯分布特性, 提出一种利用改进的图像局部熵加权多尺度的基于图像块对比度的红外小目标检测方法。首先, 计算红外图像中心块和邻域块的均值; 然后, 计算出中心块和邻域块的均值差异达到凸显小目标、抑制背景噪声的效果, 同时计算各个像素点的改进局部图像熵以凸显小目标、抑制形状与小目标大小近似的伪目标以及大面积的干扰物体的角点; 之后, 利用改进的图像熵加权中心块和邻域块的均值差异值, 得到高信杂比、低虚警率的显著度图像; 最后, 利用自适应阈值分割算法获取目标的位置。实验结果表明, 与同类基于 human visual system (HVS) 检测方法相比, 所提方法适用场景更广, 特别是在复杂背景下, 能达到更低的虚警率、更高的信杂比。

关键词 遥感; 红外弱小目标; 目标检测; 人类视觉系统; 图像局部熵; 对比度测量; 多场景

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222118

Infrared Small Target Detection Method Based on Weighted Patch Contrast

Wu Hongkai^{1,2*}, Dong Keyan^{2**}, Song Yansong², Dong Xiaona², Yuan Ming²

¹College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract Aiming at the characteristics of a low signal-to-clutter ratio and low false alarm rate in infrared small target detection under different background conditions and focusing on the characteristics of small target energy approaching Gaussian distribution, this paper proposes an infrared small target detection method using improved image local entropy weighted multi-scale based on the image block contrast. First, the mean values of infrared image center blocks and neighborhood blocks were calculated. Thereafter, the mean difference between the center block and the neighborhood block was calculated to highlight small targets and suppress background noise. At the same time, the improved local image entropy of each pixel was calculated to highlight small targets, suppress pseudo targets whose shape is similar to the size of small targets, and suppress corners of large interfering objects. Afterward, the improved image entropy was used to weight the difference between the mean value of the center block and the neighborhood block to obtain a saliency image with a high signal-to-clutter ratio and low false alarm rate. Finally, the adaptive threshold segmentation algorithm was used to obtain the position of the target. The experimental results show that the proposed method is more applicable to a wider range of scenarios than the similar detection methods based on human visual system (HVS), especially in complex backgrounds, and can achieve a lower false alarm rate and higher signal-to-clutter ratio.

Key words remote sensing; infrared small target; target detection; human visual system; image local entropy; contrast measurement; multiple scenarios

1 引言

红外小目标识别是远程预警、空间监视^[1]和飞行

制导^[2]领域的一项重要技术。在通常情况下, 红外小目标图像背景复杂、成像距离远、小目标尺寸小、缺少目标的纹理特征, 所以对小目标的精确识别和定位存

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-07-21; 录用日期: 2022-08-04; 网络首发日期: 2022-08-14

基金项目: 中央引导地方科技发展资金(JJKH20200753KJ)、吉林省教育厅“十三五”科技技术项目(202002036JC)

通信作者: *wuhongkai1998@163.com; **2417818472@qq.com

在一定的难度。尽管近几十年来人们对这一领域进行了大量的研究,但复杂背景下的小目标检测仍然是一个悬而未决的问题。

红外小目标检测方法按照是否利用帧间相关信息可分为基于红外序列的弱小目标检测方法和基于单帧红外图像的弱小目标检测方法。因为基于红外序列的弱小目标检测方法受限于计算机的计算能力且过程中涉及单帧检测方法,单帧检测的效果同时影响多帧检测的时间复杂度和探测率^[3],所以基于单帧红外图像的弱小目标的检测方法一直是近些年的研究重点。基于单帧红外图像的弱小目标检测方法包括基于滤波的方法^[4]、基于人类视觉系统(HVS)的方法和基于低秩稀疏恢复的方法^[5]等。在实际应用中,人类能够很容易地从复杂背景中分辨出红外小目标,这主要得益于HVS的选择性注意机制^[6]。基于人类视觉的小目标检测方法是近些年的研究热点之一。Chen等^[7]提出local contrast measure(LCM)方法,将中心块与邻域块的灰度差异做定量计算,并在多个尺度取最大值。LCM具有较好的目标区域增强能力。然而,LCM放大了单像素的盐噪声,增加了虚警的数量。Wei等^[8]提出基于多尺度块的红外小目标检测对比(MPCM)方法。在基于多尺度斑块的对比测度(PCM)中,将每个感兴趣区域划分为9个斑块后,计算周围斑块与中心斑块的不相似性。将方向差异相乘,并对结果进行最小选择,得到最终输出。但该方法没有充分利用小目标能量分布近似高斯分布的特点,对于高亮度伪目标无法很好消除,且在复杂背景下引入了较多虚警。Moradi等^[9]提出基于绝对方向平均差的红外小目标快速鲁棒检测(ADMD)方法。该方法利用中心块与周围邻域块的方向信息表征region of interest(ROI)的对比度,同时优化了流程,加快了运算速度。但是该方法在处理地面、森林等复杂背景时,会误把高亮度小物体检测为小目标,造成不必要的虚警。

基于人类视觉的检测方法能够准确检测出小目标,但对背景的抑制能力比较差。特别是尺寸和小目标接近的干扰背景存在时,容易引入伪目标,所以这类方法使用场景有限。本文提出一种改进局部图像熵加权中心块和邻域块均值差异的红外小目标检测方法,使用中心块和邻域块的均值差异表征图像中目标区域与其周围区域的不相似性,使用改进的局部图像熵表征目标区域能量分布特性;小目标高斯分布^[10]的能量特性具有较大的熵值,而伪目标熵值较低。两者相加权得到最终的显著度图像,该方法在凸显小目标不连续性的同时考虑了目标的能量分布特性,可以适用于非单一背景的复杂场景。

2 基于加权块对比度的红外小目标检测

2.1 红外图像的预处理

预处理的目的是消除图像的噪声,为后面的检测做准备。通常小目标的尺寸在2 pixel×1 pixel~9 pixel×9 pixel之间^[11]。若待检测物体尺寸占图像1 pixel,那么将其判定为高频噪声;若待检测物体在横向或者纵向尺度超过9 pixel,则将其判定为背景的一部分。

图1所示滑动窗口由9个子块组成,每个子块大小相等,理想情况下子块大小应该等于小目标的尺寸。若窗口尺寸小于小目标的大小,会将小目标误测为背景;若窗口尺寸过大,计算量会增大。但由于小目标的尺寸信息事先不可知且一般情况下小目标大小是小于9 pixel×9 pixel的,所以采用多尺度的方法,将子块设置为3×3、5×5、7×7等3种情况。分别用3种尺度的滑动窗口在图片上从上到下、从左到右依次滑动计算。

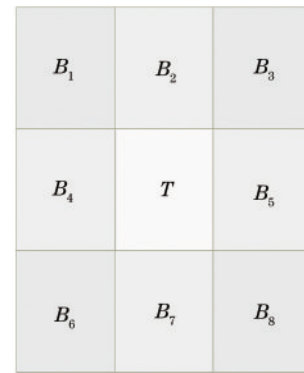


图1 包含9个子块的滑动窗口

Fig. 1 Sliding window with 9 subblocks

每一个子块的响应值用其均值来表示:

$$m_{B_i} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k I_j^{(i)}, \quad (1)$$

式中: m_{B_i} 是子块的响应值; k 是子块中像素数量; $I_j^{(i)}$ 是第*i*个子块中第*j*个像素的像素值。

同理中心子块*T*的响应值为

$$T = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k I_j, \quad (2)$$

式中: T 是中心子块的响应值; I_j 是*T*子块中第*j*个像素的像素值。使用均值来表示可以消除单像素的噪声的影响,达到滤波的效果。

2.2 红外小目标的检测

小目标与背景在空间分布上存在不连续性,检测小目标需要表征两者间的不连续性。用 $d(T, B_i)$ 表示

中心子块与邻域子块的差值:

$$d(T, B_i) = m_T - m_{B_i}, i = 1, \dots, 8. \quad (3)$$

利用 $d(T, B_i)$, 可以给出一定尺度上的局部对比度。对于小目标, 目标区域与其周围背景之间存在灰度强度差异。即目标的强度高于或小于背景子块的强度。为了刻画这个性质, 定义了度量中心子块和背景子块在第 i 个方向上的不相似性这一物理量, 其表达式为

$$\tilde{d}_i = d(T, B_i) \times d(T, B_{i+4}), i = 1, \dots, 4. \quad (4)$$

当 $\tilde{d}_i > 0$ 时, $d(T, B_i)$ 和 $d(T, B_{i+4})$ 正负号相同, 说明此时亮目标或者暗目标处于滑动窗口中心。由于在一般情况下, 需要探测的小目标都是亮目标, 且在云层背景下, 云之间的空洞容易被判断为暗目标。所以取 \tilde{d}_i 表达式右侧两项同为正数的情况, 即针对亮目标进行探测。

$$\tilde{D}_i = \tilde{d}_i \times H[d(T, B_i)] \times H[d(T, B_{i+4})], \quad (5)$$

式中: i 的取值范围同式(4); \tilde{D}_i 是假定目标为亮目标的情况下, 中心子块和背景子块在第 i 个方向上的不相似性; $H(\cdot)$ 是 Heaviside step 函数。

$$H(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}. \quad (6)$$

在小目标增强中, 目标区域与背景区域的对比度应尽可能大。因此, 中心子块与其周围背景子块之间的最小距离可以作为对比的衡量标准。因此, 可以按以下方式计算给定尺度下的 PCM:

$$c_{x,y} = \min \tilde{D}_i, i = 1, \dots, 4, \quad (7)$$

式中: (x, y) 是图形中任意点的坐标。对滑动窗口 4 个方向的对比度取最小值, 可得到 $c_{x,y}$ 。

滑动窗口从左往右、从上往下遍历整幅图像, 可以得到 PCM 的显著度图像。在 $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7$ 等 3 个尺度, 分别计算 PCM 显著度图像, 逐像素点取 3 个尺度计算结果的最大值, 得到 MPCM 显著度图像, 具体过程可描述为

$$\hat{c}_{x,y} = \max \{c_{x,y}^{(1)}, c_{x,y}^{(2)}, c_{x,y}^{(3)}\}, \quad (8)$$

式中: $\hat{c}_{x,y}$ 是 MPCM 显著度图像中坐标为 (x, y) 的点的像素值; $c_{x,y}^{(1)}, c_{x,y}^{(2)}, c_{x,y}^{(3)}$ 分别是 $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7$ 尺度下 (x, y) 点的像素值。

MPCM 能够定量表征目标和邻域内的背景的不相似性, 在提升目标效果的同时达到抑制背景的效果。但是存在一定的局限性: MPCM 没有充分利用小目标能量分布近似于高斯分布的特点^[10], 这一原因导致 MPCM 在处理小目标和几何形状接近小目标但是能量分布均匀的干扰物时, 在显著度图像中会引入虚假目标。同时若图中存在干扰目标, 滑动窗口在经过干扰物边缘时, 会有较大的响应值, 导致结果图像中的虚警率增大。

图 2 中, 右下角的白色矩形块代表灰度均匀分布

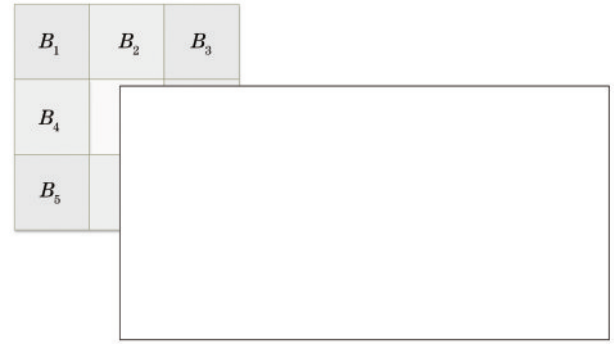


图 2 经过干扰物体的滑动窗口

Fig. 2 Sliding window passing through the interfering object

的干扰物体, 当滑动窗口中心经过干扰物体的角点位置附近时, 根据 MPCM 的定义, 可以得到一个较大的响应值, 故容易造成较大的虚警。

为了解决上述问题, 提高小目标检测的检测率降低虚警率, 在 MPCM 的基础上提出一种基于多尺度块的对比度量加权改进图像熵的方法。改进图形熵的计算方法如下:

$$E(x, y) = - \sum_{i=1}^m \{ [I_i - I(x, y)]^2 p_i \log_2 p_i \}, \quad (9)$$

式中: $E(x, y)$ 是图形中任意一个像素点经过计算后的改进图像熵; I_i 是以 (x, y) 为中心的滑动窗口内出现过的像素值, 假定窗口内除 $I(x, y)$ 共有 m 个不同灰度值像素点; p_i 是灰度为 I_i 的像素值出现的概率。窗口的大小一般为 5×5 , 此时有较高的信噪比^[12]。

一般窗口内灰度值的分布越分散, 窗口内的局部图形熵的值越大, 而改进的加权熵引入 $[I_i - I(x, y)]^2$ 项, 这能更好地契合小目标类似高斯分布的特点, 小目标中心点周围的像素点的像素值和小目标中心点的像素值作差再平方可以进一步凸显出小目标。而对于内部灰度近乎均匀分布的干扰物体, 其改进局部图像熵值几乎为 0; 即使在干扰物体的边缘, 角点区域计算改进的加权熵也仍旧是一个很小的值, 因为边缘、角点区域灰度值种类单一, 窗口内像素点与像素点之间灰度差距不大。

若对图像单独使用改进的局部图像熵, 当遇到干扰物体存在渐变边缘或者边缘附近有断断续续的高亮度噪点时, 会有很高的响应值。而 MPCM 对这种情况有很好的抑制效果, 故可以利用改进图形熵来加权 MPCM。

$$W_{\text{MPCM}}(x, y) = E(x, y) \times \hat{c}(x, y), \quad (10)$$

式中: $W_{\text{MPCM}}(x, y)$ 是用改进图像熵加权的多尺度块的对比度量。图 3 展示了 4 幅不同场景下的红外图像, 其中, 图 3(a) 是以地面为背景的红外图像, 图 3(b) 是以森林、建筑物为背景的红外图像, 图 3(c) 是以云为背景的红外图像, 图 3(d) 是以海洋天空为背景的红外图像。图 4 展示了图 3 对应的 4 幅图的显著度图, 可以

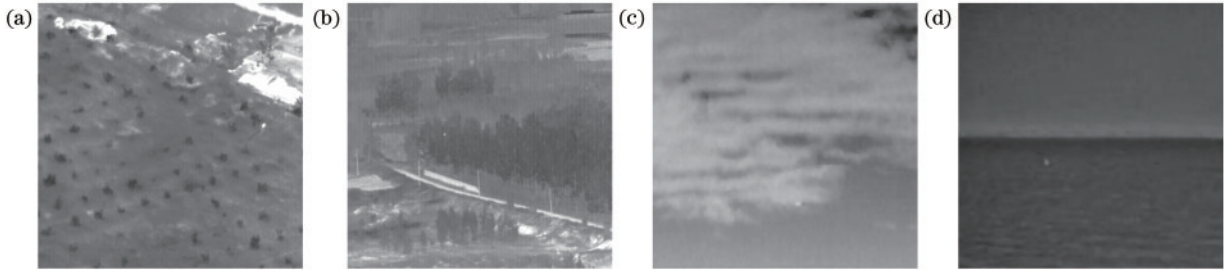


图 3 4 幅不同场景下的红外图像。(a)地面背景;(b)森林建筑背景;(c)云背景;(d)海洋天空背景

Fig. 3 Infrared images of four different scenes. (a) Ground background; (b) forest building background; (c) cloud background; (d) ocean sky background

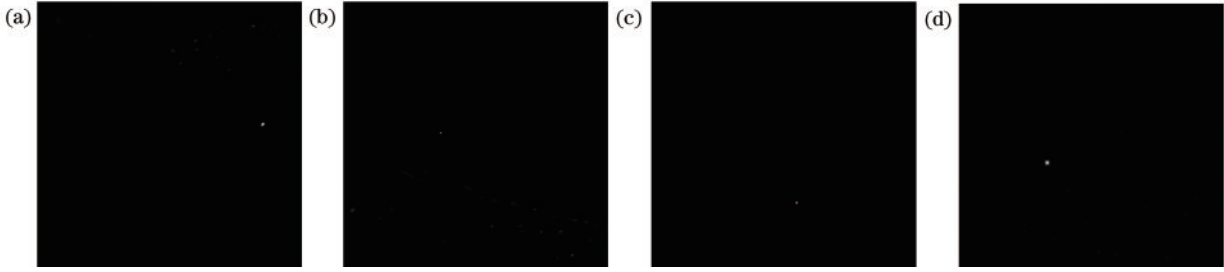


图 4 图 3 红外图像所对应的显著度图。(a)地面背景;(b)森林建筑背景;(c)云背景;(d)海洋天空背景

Fig. 4 Saliency maps corresponding to infrared images in Fig.3. (a) Ground background; (b) forest building background; (c) cloud background; (d) ocean sky background

看出,与原图像相比,显著度图大幅度提高了信杂比,增强目标的同时也比较好地抑制了图像的背景杂波。

2.3 红外小目标提取

从显著度图像可以看出,图像的信杂比得到了提升、背景得到了有效抑制、目标得到了凸显。在此基础上,采用自适应阈值分割方法对目标进行分割。

$$\tau = u + k\sigma \quad (11)$$

式中: τ 是阈值,显著度图像中的像素值大于 τ 被设置为1,反之被设置为0,最后可以得到一幅二值化图像; μ 是显著度图像的均值; k 是分割系数,一般取7~12^[13]; σ 是显著度图像的标准差。

为了获取目标的准确位置需要对小目标中心位置进行计算。考虑到红外小目标的形状规则和能量分布稳定,且灰度重心法在提取形状规则和光强分布均匀的小目标时,拥有极高的精度,所以选择灰度重心法提取小目标质心^[14]。

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J i \times G(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J G(x_i, y_j)} \\ y_0 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J j \times G(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J G(x_i, y_j)} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $G(x_i, y_j)$ 代表位于图像中第*i*行、第*j*列像元的灰度值;因为质心提取针对的是阈值分割后的图像,所以

像元的灰度值只有0和1两种; x_0, y_0 分别为所求小目标质心的横纵坐标;图像的大小为 $I \times J$ 。

3 实验结果与分析

3.1 信杂比比较

所提方法是在MPCM方法的基础上改进得到的,为了更直观体现所提方法在提高信杂比方面的作用,给出经过处理后图片的三维响应图。图5(a)~(e)分别为4幅图像原始灰度图像、4幅图像原始灰度响应图像、经过改进的局部图像熵处理后的灰度响应图像、经过MPCM方法处理后的灰度响应图像、经过所提方法处理后的灰度响应图像。从三维图中可以看出,所提方法对于提高小目标图像信杂比具有良好的效果。

为了定量地描述所提方法对图像信杂比的提高作用以及对背景杂波的抑制效果,引入信杂比(R_{SCR})^[15]和背景抑制因子(F_{BSF})的计算公式:

$$R_{SCR} = \frac{|\mu_t - \mu_b|}{\delta_b}, \quad (13)$$

$$F_{BSF} = \frac{\delta_{in}}{\delta_{out}}, \quad (14)$$

式中: μ_t 是目标所在区域的灰度均值; μ_b 和 δ_b 是目标所在区域附近的背景区域的灰度均值和灰度标准差,一般目标附近的背景区域的尺度是目标区域的3倍^[9]; δ_{in} 为原始图像灰度标准差; δ_{out} 为经过算法处理后图像的灰度标准差。 R_{SCR} 的值越大说明图像的信杂比越大,一般目标也越明显。 F_{BSF} 的值越大,说明对背景

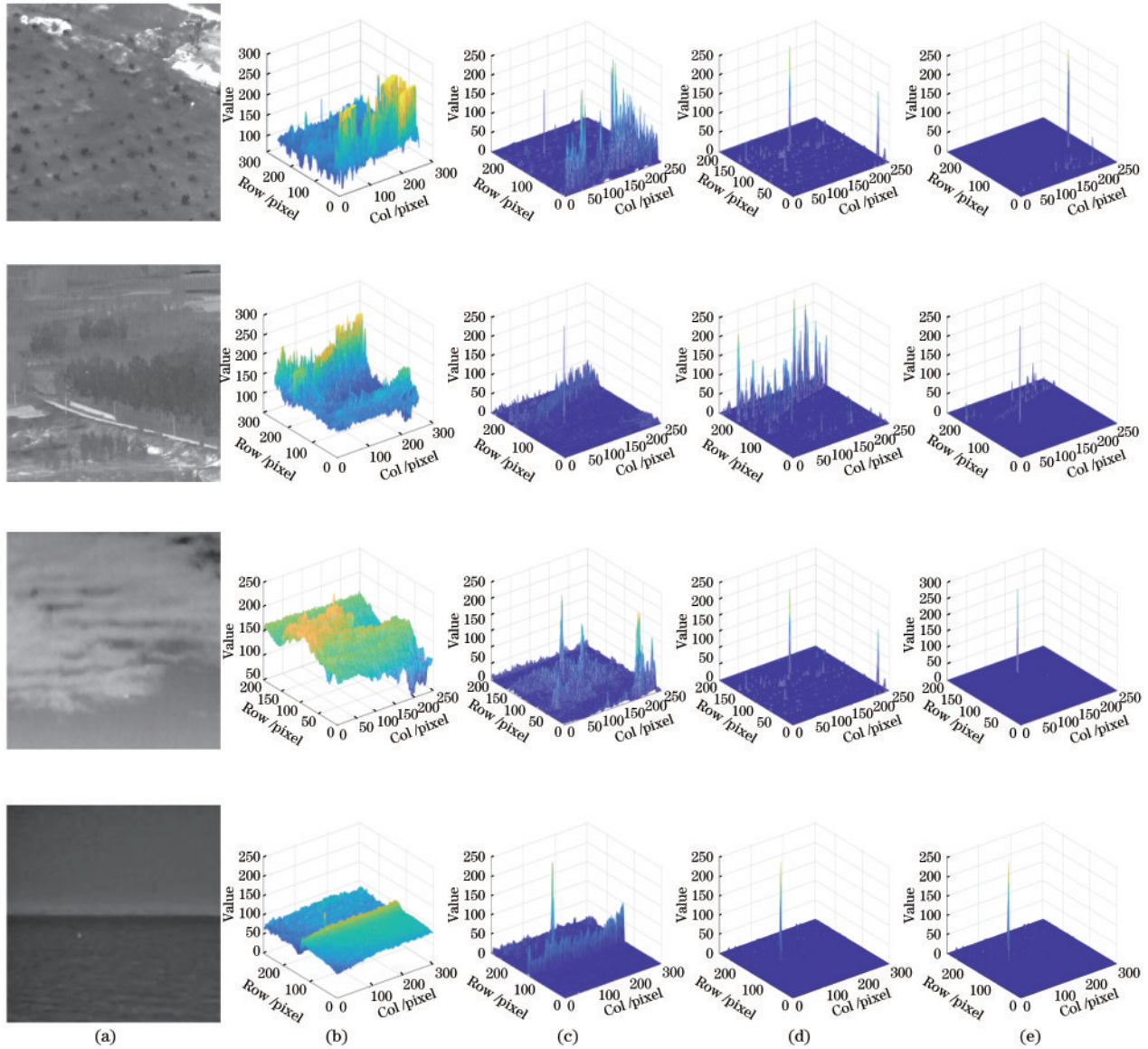


图5 响应图实验结果。(a)原始红外图像;(b)原始灰度响应图;(c) LMWIE 运算后的灰度响应图;(d) MPCM 运算后的灰度响应图;(e) 所提方法运算后的灰度响应图

Fig. 5 Experimental results of response maps. (a) Original infrared images; (b) original gray maps; (c) gray response maps using LMWIE; (d) gray response maps using MPCM; (e) gray response maps using proposed method

杂波的抑制效果越好。

不同算法在 3 种背景下的 R_{SCR} 和 F_{BSF} 对比结果如表 1 所示,其中 inf 表示无穷大。可以看出,所提算法在各个场景下的 R_{SCR} 和 F_{BSF} 都优于对比算法。

将表 1 与图 5 进行对照可以发现,所提算法在提升信杂比以及背景抑制上有着十分显著的作用。主要原因在于:MPCM 没有考虑小目标的能量分布特性,导

致对于几何形状近似小目标的物体没有筛查的能力,同时由于其本身的局限性,无法滤除高亮度干扰物体的角点。而所提算法结合了改进的局部图像熵,可以滤除高亮度干扰物体的角点以及近似的伪目标,提高了抑制背景的能力。同时所提算法采用对子块取均值的中间步骤,达到了抑制单像素噪声的目的,使得信杂比得到了提高。

表 1 3 种不同背景下的 R_{SCR} 和 F_{BSF}
Table 1 R_{SCR} and F_{BSF} of three different scenes

Algorithm	Ground		Forests and buildings		Clouds	
	R_{SCR}	F_{BSF}	R_{SCR}	F_{BSF}	R_{SCR}	F_{BSF}
MPCM	7.6976	8.7434	13.2983	3.0920	27.5198	7.5009
LMWIE	6.4259	2.8500	7.7676	4.5172	2.5276	1.7312
Proposed algorithm	24.4390	15.8077	73.4312	16.9586	inf	15.0567

为了更直观展现算法的性能,在实验中分别选取 3 个场景(云背景、森林建筑物背景、地面背景)的图像序列中的前 20 帧图像,计算其检测率(P_d)和虚警率(P_f)。

$$P_d = \frac{N_{\text{correctly detected target}}}{N_{\text{real target}}}, \quad (15)$$

$$P_f = \frac{N_{\text{incorrectly detected target}}}{N_{\text{detected target}}}, \quad (16)$$

式中: P_d 是图像中被正确检测到的小目标数量与实际

小目标数量的比值^[16]; P_f 是图像中被错误检测到的小目标数量与总的被检测到的小目标数量的比值^[5]。一个小目标在图像中被正确检测到有两个条件:1)检测结果与图像中的真实目标有重叠;2)检测结果的中心像素位置与真实目标的中心像素位置相差不超过一定的范围,一般是 5 pixel 以内。

由于所提算法和参考算法的检测率都接近 100%,在此条件下,只对虚警率进行比较。表 2 是 3 种不同场景下的虚警率数据。

表 2 3 种不同场景下的虚警率

Table 2 Probability of false alarm of three different scenes

Algorithm	Ground	Forests and buildings	Clouds
LCM	0.3750	0	0.1304
MPCM	0.1927	0.2040	0.1972
LMWIE	0.1304	0.04762	0.0909
Proposed algorithm	0.0909	0	0

从表 2 可以看出,所提算法具有较低的虚警率,能够在准确检测目标的同时,保证不引入过多的干扰信息。这得益于加权后对干扰物体角点的滤除能力。如果高亮度物体的角点、边缘等没有得到很好抑制,在显著度图像中就会表现为虚假目标。

3.2 对伪目标以及干扰物体的角点的抑制效果对比

为了进一步验证所提算法在伪目标以及干扰物体的角点抑制方面的优越性,选择传统的 LCM 算法和

MPCM 算法进行对比。图 6 展示了在复杂地面背景下的小目标检测结果。其中,图 6(a)是所提算法的检测结果,图 6(b)是传统的 LCM 算法的检测结果,图 6(c)为 MPCM 算法的检测结果。传统的 LCM 算法虽然能准确检测出小目标,但是也会引入大量的虚警;MPCM 算法引入的虚警少于 LCM 算法,但是其虚警数量仍然不容小觑。虚警发生的区域主要在亮度突出的伪目标以及干扰物体的角点处。

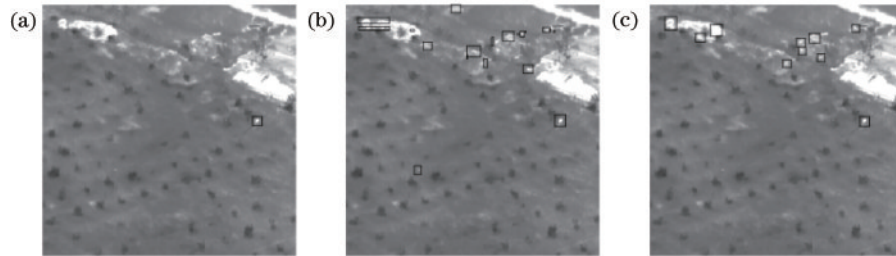


图 6 3 种算法在地面背景图像下的检测结果。(a)所提算法;(b) LCM 算法;(c) MPCM 算法

Fig. 6 Detection results of three algorithms under ground background. (a) Proposed algorithm; (b) LCM algorithm; (c) MPCM algorithm

传统的 LCM 算法以及 MPCM 算法在地面背景图像下的检测结果存在大量虚警的原因在于:LCM 算法和 MPCM 算法是基于人类视觉系统的小目标检测算法,这类算法注重于构建局部对比图,通过局部像素与邻域之间的不相似性,采用自适应阈值分割目标。其特点是对目标的定位能力强、实现简单,但是没有考虑检测区域的能量分布特性。小目标和伪目标以及某些干扰物体的角点区域有着近似的局部对比度图像,在阈值分割后,这 3 者会被同时判定为小目标。

MPCM 算法主要利用的是中心块和邻域块的均值差异,故而会引入伪目标和角点等干扰信息。而所提算法利用的是改进的图像熵加权中心块和邻域中心块的均值差异,进一步扩大了目标和伪目标以及角点干扰在显著度图像上的差异。为了直观展示中心块和

邻域块的均值差异、改进的图像熵加权中心块和邻域块的均值差异值,图 7 列出了两种算法下的均值差异值。其中,图 7(a)是原始图像,图中框里的像素集是比较两种均值差异值的样本点。图 7(b)中的数据是图 7(a)框中像素点计算完中心块和邻域块的均值差异后的数据[因为图 7(a)框中样本点过多,故截取以框中心点为中心的 3 pixel × 3 pixel 区域进行展示]。图 7(c)中的数据是图 7(a)框中像素点计算完改进的图像熵之后的数据。图 7(b)中的数据与图 7(c)中对应位置的数据相乘就是改进的图像熵加权中心块和邻域块的均值差异值。从图 7 可以看出,在角点处的伪目标和真实目标具有相同数量级的中心块和邻域块的均值差异,但是真实目标处计算得到的改进图像熵比伪目标处的改进的图像熵要高出一个数量级。经过

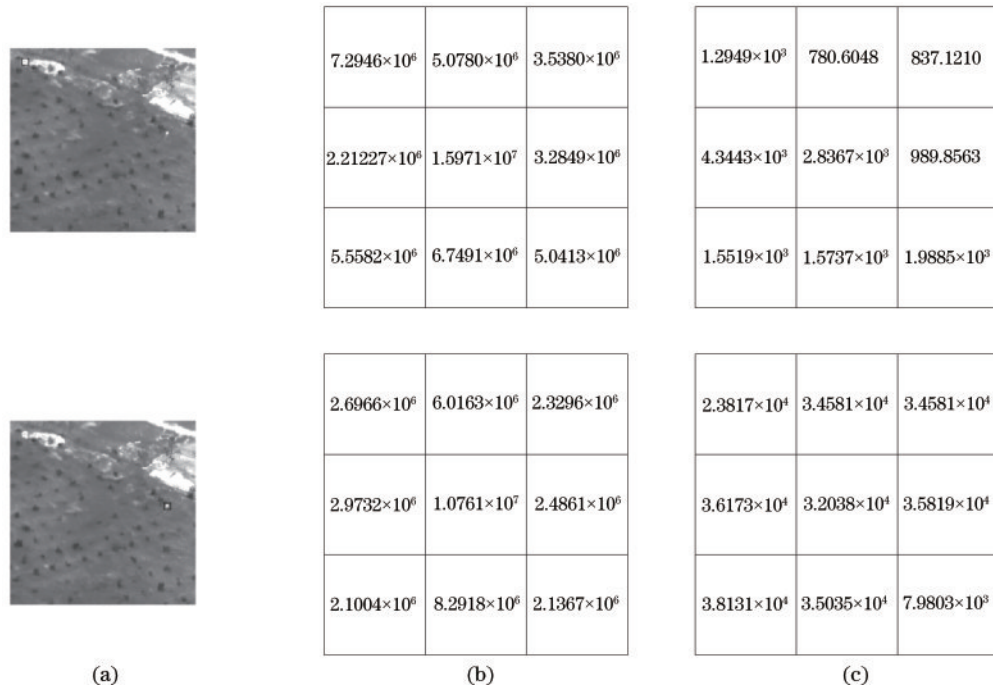


图 7 两种算法下的均值差异值。(a)原始图像;(b)中心块和邻域块的均值差异值;(c)改进的加权熵的数值

Fig. 7 The difference between the means under two algorithms. (a) Original image; (b) the mean difference value of the center block and the neighborhood block; (c) the value of the advanced weighted entropy

式(10)的乘法运算,数量级差距转移到了改进的图像熵加权中心块和邻域块的均值差异值中,这一结果经过归一化运算得到最终的显著度图像。所提算法能够凸显出能量呈现高斯分布的小目标,伪目标就被抑制了。

4 结 论

提出一种利用改进的图像熵加权多尺度图像块对比度量的红外小目标检测方法。该方法在传统的基于人类视觉的小目标检测方法的基础上引入改进的图像熵加权因子,该因子有效结合了小目标能量分布不均匀、呈现近似高斯分布的特点。所提方法不仅考虑了小目标在空间上的不连续性,还关注到小目标区域独特的能量分布特性,进而消除了伪目标和干扰物体角点对检测结果的影响。实验结果表明:所提方法在提高红外小目标图像信杂比的基础上,能很好地降低虚警率,在常见的天空背景以及多种复杂场景(地面、森林等)下的检测能力有着明显优势。不足之处在于其时间复杂度较高,算法实现对硬件性能要求较高。因此在未来的工作中,如何改进算法以提高运算效率是研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Deng L Z, Zhang J K, Xu G X, et al. Infrared small target detection via adaptive M-estimator ring top-hat transformation[J]. Pattern Recognition, 2021, 112: 107729.
- [2] Wang K W, Du S Y, Liu C X, et al. Interior attention-aware network for infrared small target detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-13.
- [3] Deng H, Sun X P, Liu M L, et al. Entropy-based window selection for detecting dim and small infrared targets[J]. Pattern Recognition, 2017, 61: 66-77.
- [4] Marvasti F S, Mosavi M R, Nasiri M. Flying small target detection in IR images based on adaptive toggle operator[J]. IET Computer Vision, 2018, 12(4): 527-534.
- [5] Zhao J J, Tang Z Y, Yang J, et al. Infrared small target detection using sparse representation[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(6): 897-904.
- [6] Li Y S, Zhang Y J. Robust infrared small target detection using local steering kernel reconstruction[J]. Pattern Recognition, 2018, 77: 113-125.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Moradi S, Moallem P, Sabahi M F. Fast and robust small infrared target detection using absolute directional mean difference algorithm[J]. Signal Processing, 2020, 177: 107727.
- [10] Liu X W, Zuo Z R. A dim small infrared moving target detection algorithm based on improved three-dimensional directional filtering[M]//Tan T N, Ruan Q Q, Chen X L, et al. Advances in image and graphics technologies. Communications in computer and information science. Heidelberg: Springer, 2013, 363: 102-108.

- [11] Wu L, Ma Y, Fan F, et al. A double-neighborhood gradient method for infrared small target detection[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(8): 1476-1480.
- [12] Deng H, Sun X P, Liu M L, et al. Small infrared target detection based on weighted local difference measure[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(7): 4204-4214.
- [13] 张祥越, 丁庆海, 罗海波, 等. 基于改进 LCM 的红外小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0726002.
Zhang X Y, Ding Q H, Luo H B, et al. Infrared dim target detection algorithm based on improved LCM[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 0726002.
- [14] 王星星, 唐新明, 祝小勇, 等. 高分七号卫星足印光斑质心提取方法与稳定性监测[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2428001.
Wang X X, Tang X M, Zhu X Y, et al. Centroid extraction method of Gaofen-7 satellite footprint spots and stability monitoring[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2428001.
- [15] Gao C Q, Meng D Y, Yang Y, et al. Infrared patch-image model for small target detection in a single image [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 4996-5009.
- [16] Deng H, Sun X P, Zhou X. A multiscale fuzzy metric for detecting small infrared targets against chaotic cloudy/sea-sky backgrounds[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(5): 1694-1707.