

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104249

基于局部积加权对比的红外弱小目标检测*

蔡 军 谭 静 邱会然

(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

摘 要:针对复杂背景下因像素点噪声及高亮边缘干扰导致的对红外弱小目标检测率低、虚警率高的问题,提出一种基于局部积加权对比的红外弱小目标检测算法。首先,分别计算目标区域与背景区域均值,并得到目标与局部背景的差异性;提出一种局部积加权方法,极大增强了小目标的显著性与抑制背景杂波的能力;其次,采用多尺度算法增强算法的自适应能力;最后,对显著性图像进行自适应阈值分割,得到待检测的真实目标。仿真实验结果表明,所提算法的信杂比增益(SCRg)和背景抑制因子(BSF)相比现有算法均有一定提升,在复杂背景及强噪声干扰下仍具有良好的准确性和鲁棒性,实现了提高检测率,降低虚警率的目的。

关键词: 红外弱小目标;局部积加权;多尺度;阈值分割

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Infrared dim small target detection based on local product weighted contrast

Cai Jun Tan Jing Qiu Huiran

(School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: An infrared dim small target detection algorithm based on local product weighted contrast is proposed for the low detection rate and high false alarm rate of infrared dim small targets in complex backgrounds caused by pixel noise and high-bright edge interference. First, the mean value of the target area and the background area is calculated respectively, and the difference between target and local background is obtained. A local product weighting method is proposed, which greatly improves the saliency of small targets and the suppression ability of background clutter. Second, multi-scale algorithm is used to enhance the adaptive ability of the algorithm. Finally, adaptive threshold segmentation is performed on the saliency image to obtain the real target to be detected. Simulation results show that compared with the existing algorithms, SCRg and BSF of the proposed algorithm are improved to a certain extent, and still have good accuracy and robustness under the complex background and strong noise interference, achieving the purpose of improving the detection rate and reducing the false alarm rate.

Keywords: infrared dim small target; local product weighting; multi-scale; threshold segmentation

0 引 言

红外搜索跟踪系统(infrared search and track,IRST)主要应用于天空、海天及地面目标的搜索跟踪任务,其具有检测精度高、隐蔽性强和多视角检测等优点,尤其是在夜战时具有更好的对战优势^[1]。红外成像技术是IRST

系统中的一项重要技术,受到了军事部门的密切关注^[2]。但在现实应用中,因红外传感器与小目标之间具有相对快速运动的特性,导致红外传感器在拍摄过程中得到的复杂背景会产生强干扰问题,如高亮度背景、背景边缘、高亮度的像素级噪声等^[3]。同时,传感器与目标成像距离较远,被测目标在红外图像中占据的像素点较少,导致红外图像中的弱小目标通常没有具体的形状或纹理特

收稿日期: 2021-05-05 Received Date: 2021-05-05

* 基金项目:国家自然科学基金(61673079)、重庆市科技局项目(自科)基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0160)、重庆市高校创新团队项目(CXTDX201601019)资助

征^[4]。检测时缺乏相应的先验信息,目标亮度也可能从暗到亮不断变化,这就大大增加了小目标的检测难度^[5]。

因此,红外弱小目标的检测问题引起了国内外众多专家学者的关注,尤其是在复杂背景下小目标的检测问题。最早的检测算法大多从抑制背景的角度出发,如较为经典的单帧滤波检测方法有 Top-Hat 滤波^[6-7]、Max-Mean 滤波和 Max-Median 滤波等,除传统滤波方法外,基于统计学的主成分分析(principal component analysis, PCA)方法也被应用到了小目标的检测中,例如鲁棒主成分分析、概率主成分分析、核主成分分析和稀疏表示^[8-10],此类方法对于图像背景的均匀性做出了一定的假设,但实际情况往往更为复杂。文献[11]提出将目标和背景分量分离成一个低秩矩阵和稀疏矩阵,利用稳定主成分追踪法,将小目标的检测问题归为一个恢复低秩稀疏矩阵的优化问题。此外,还有学者将提出利用字典学习的方法来检测目标,文献[12]采用稀疏表示和基于在线学习的双稀疏背景字典的新方法,虽然其提出的双稀疏字典模型对于训练双稀疏背景字典具有更高的效率,但其仍需大量的样本并包含足够的目标信息,否则无法很好的区分目标。

根据人眼视觉的感知特性,人类视觉系统机制对对比度更加敏感,可以在复杂的环境中抑制无关信息,并快速获取需要处理的信息。基于上述信息,文献[13]利用滑动块中中央块最大灰度值与周围块平均灰度值之间的比值作为该中心块的局部对比度(local contrast method, LCM),从而获取红外图像的显著性图像。其检测结果相较于传统算法来说更为有效,但仍存在对像素过于敏感而导致的漏检、误检问题。为解决这一问题,国内外众多学者对其进行了改进。其中包括改进的局部对比度算法^[14]、新型局部对比度算法^[15]、多尺度块局部对比测量^[16]和多尺度相对对比度算法^[17]等。上述算法实现简单,实时性强,但对于有噪声存在且背景较为复杂时,其检测性能将会降低^[18]。为进一步解决上述问题,利用小目标对整幅图像像素平滑性带来的改变,提出了基于信息熵和多尺度灰度差加权的多尺度灰度差加权图像算法^[19],采用改进的局部熵对多尺度局部差值进行加权的加权局部差测量算法^[20]和加入了幅度和位置信息的导数熵对比测量算法^[21],这些方法虽然运行效率有所降低,但对于目标在复杂背景下的检测率有了一定程度的提升。

为解决高亮背景、复杂边缘和像素点噪声在复杂背景中导致目标检测困难的问题,本文借鉴文献[22]的思想,提出了一种基于局部积加权对比的红外弱小目标检测算法。首先,利用图像中目标像素突变带来的局部差异性增强目标、抑制背景,并通过局部积加权算法进一步缓解高亮边缘及像素点噪声带来的干扰。然后,采用多

尺度算法实现对不同尺寸目标的检测,以此来解决由于目标大小变化而产生的检测率低下问题,提高算法的适用性和鲁棒性。最后,通过阈值分割提取出真实的待检测目标。本文算法无需预处理环节,能够在不同复杂背景的干扰下能够抑制背景的同时增强目标,有效降低虚警率,易于工程实现。

1 基于局部积加权的小目标检测

1.1 局部均匀性

在一幅图像中,虽然小目标往往只占了几个像素点,但仍会导致该图像局部区域的纹理特征发生相当大的改变。因此,为了能够更加直观的描述目标区域与背景区域的均匀性和差异性,采用图 1 所示的滑动窗口模板,将其沿着从左至右,从上至下的方向对整个图像进行遍历。滑动窗口被分为大小为 3×3 的 9 个子单元,并将中心单元(可能出现目标的区域)定义为 T ,周围 8 个方向子单元(背景区域)定义为 $B_i, i=1, 2, \dots, 8$ 。

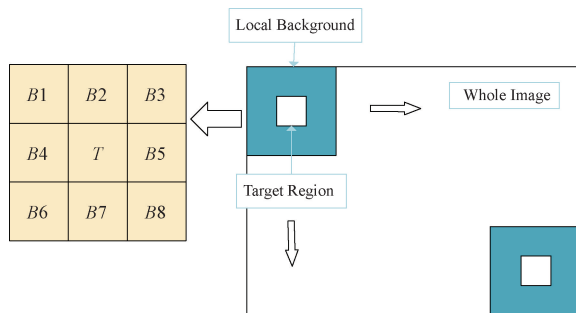


图 1 滑动窗口模板

Fig. 1 Sliding window template

首先,采用灰度均值来衡量图像的均匀性,对滑动窗口背景区域的 8 个子单元分别求取其像素灰度均值

$$m_{B_i} = \frac{1}{S \cdot S} \sum_i \sum_j I(i, j) \quad (1)$$

式中: S 表示滑动窗口子单元的尺寸大小; $I(i, j)$ 代表背景区域子单元 B_i 内的像素点坐标。其中,设 $X(i, j)$ 为滑动窗口滑动到某一位置时中心单元 T 中的像素点坐标, (m, n) 为其中心像素点坐标,得到中心单元的均值为:

$$m_T = \frac{1}{S \cdot S} \sum_{i=m-\frac{s-1}{2}}^{m+\frac{s-1}{2}} \sum_{j=n-\frac{s-1}{2}}^{n+\frac{s-1}{2}} X(i, j) \quad (2)$$

1.2 局部差异性

在一幅红外图像中,红外弱小目标通常比背景区域更亮,因此,目标区域与背景区域有着明显的不同,加上人眼对于灰度差异性的敏感性,可以利用图像中存在的

局部差异性来增强目标的显著性,以降低后续的检测难度。

为了能够更好的衡量滑动窗口中存在的局部差异性,将其表示为:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d(T, B1) \\ d(T, B2) \\ \vdots \\ d(T, B8) \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

式中: $\mathbf{D}$ 为中心单元 T 与周围的 8 个子单元之间的差异; $d(T, B_i)$ 为中心块与第 i 个背景子单元之间的差值。可采用非负约束的方式避免因红外图像中存在背景区域亮度值较高,而目标区域亮度值较低所产生的误检,计算方式定义如下:

$$d(T, B_i) = \begin{cases} m_T - m_{B_i}, m_T > m_{B_i} \\ 0, m_T < m_{B_i} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (4)$$

式中: m_T 和 m_{B_i} 分别为中心单元与背景单元的像素灰度均值。

由于在红外图像中,小目标的形状分布都大致符合二维高斯函数分布,即其形状一般呈现向四周发散的对称状,因此,为缓解高亮边缘的干扰,给出如式(5)的定义。

$$d_i = d(T, B_i) \cdot d(T, B(9-i)) \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (5)$$

式中: d_i 表示了中心单元 T 与第 i 个方向子单元的差异性,按照小目标形状对称的特性, i 最大取值为 4。

图 2 所示为存在高亮边缘的情况,灰色框中为突出高亮边缘,红色框中为待检测的真实目标。当滑动窗口遍历到图中位置时,高亮边缘与周围亮度值差异较大,从而易产生误检问题。高亮边缘通常具有单边特性, $d(T, B_i)$ 和 $d(T, B(9-i))$ 中通常有一个值极小甚至为 0,因此,获取 d_i 的最小值能够有效抑制复杂背景中的边缘像素,提高图像的信杂比。

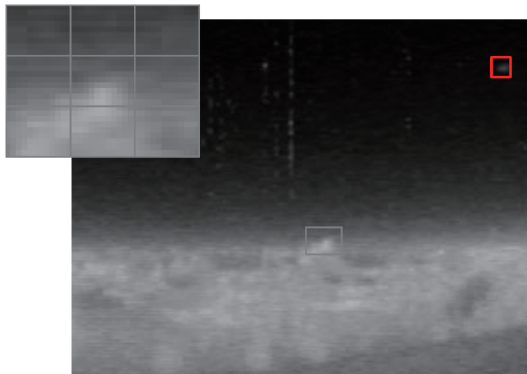


图 2 存在高亮边缘的情况

Fig. 2 The cases of highlighted edges

1.3 局部对比度

通过上述局部均匀性与局部差异性的计算,可以得到如式(6)所示的局部对比度。

$$C = \frac{\min d_i}{m_T + \delta} \quad (6)$$

为避免无法计算的情况,取 δ 值为一个小的正数。由式(6)的定义可知,初步得到的局部对比度 C 与局部差异值 d_i 成正比,也就是说获取到的 4 个不同方向对角线 d_i 最小值的值越大, C 的值越大,则该区域出现目标的可能性越大。

1.4 局部积加权

除高亮复杂边缘噪声的影响外,还有像素级点噪声也会对红外弱小目标的检测造成巨大的干扰,为解决此类问题,可按式(7)进行计算。

$$P = \prod_{i=1}^8 D(i) \quad (7)$$

式中: P 为中心单元与 8 个邻域单元间灰度均值的所有差值相乘所得到的乘积。

当滑动窗口处于目标区域时,因目标区域与背景区域的差距较大,显然根据式(4)计算得到的 $d(T, B_i)$ 数值也较大,在最终得到 P 的计算过程中, P 的值将会以数量级的方式增大;当背景区域存在噪声干扰时,根据式(4)计算得到的 $d(T, B_i)$ 存在接近于 0 的情况,则 P 将会以数量级的方式减小。通过此方式能将目标与像素级点噪声进一步区分,提高算法检测的准确率。

最终通过式(7)得到的乘积对式(6)的局部对比度进行加权,得到最终对比度如式(8)所示。

$$W = C \cdot P \quad (8)$$

通过上述过程,在遍历完整幅图像后即可得到经过处理的显著性图像 $\hat{W}$ 。

2 目标获取

2.1 多尺度应用

为了提高算法性能,在检测红外弱小目标时,应使得滑动窗口子单元尺寸与目标大小相似,但由于红外弱小目标所占像素较少,且在成像距离与成像条件等主客观因素的影响下,小目标在不同帧中的尺寸是不断变化的。同时,如果滑动窗口中心单元 T 的尺寸大于或小于小目标尺寸,都极有可能造成漏检或误检,导致算法具有较高的虚警率和误检率。因此,采用多尺度的检测方法,提高算法对不同尺寸小目标的适应性,可有效提高算法检测率。

根据规定,小目标的最大尺寸为 81 个像素点,从而设置尺度值 L 的最大值为 9,给出 4 个尺度值,分别为

$L=3, L=5, L=7, L=9$, 则有:

$$SM = \max \hat{W}_L$$

(9)

式中: $\hat{W}_L$ 表示在 L 尺度下的显著性图像; SM 表示在各尺度下获得的最大对比度所组成的最终显著性图像。

2.2 阈值分割

在最终得到的显著图像 SM 中, 显著度最高的区域为目标区域的可能性最大, 可采用自适应阈值分割的方法提取出相应的红外弱小目标。

$$T_h = \bar{I}_{SM} + k \cdot \sigma_{SM}$$

(10)

$$\bar{I}_{SM} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n SM(i, j)$$

(11)

$$\sigma_{SM} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [SM(i, j) - \bar{I}_{SM}]^2$$

(12)

式中: m 和 n 分别表示图像的行值和列值; $SM(i, j)$ 是显著图像每一个像素点的像素值; $\bar{I}_{SM}$ 和 σ_{SM} 分别是显著图像 SM 的像素灰度均值和方差; K 为一个自适应参数, 可根据实验需求进行调节; T_h 是最终得到的分割阈值。将显著图中像素点与阈值进行比较, 若该点像素值大于分割阈值, 将其标记为小目标, 反之, 则不进行标记。最终经过以上检测算法, 很容易提取出目标。整体算法流程如图 3 所示。

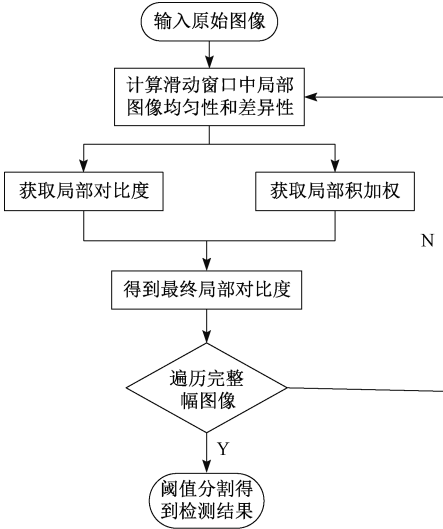


图 3 整体算法流程

Fig. 3 The flow of algorithm

3 实验结果及分析

3.1 实验设计

为了评价本文所提算法的有效性, 针对 9 幅不同复杂场景下的图像数据集进行测试, 其中, 所用图像的详细信息如表 1 所示。为便于展示, 所有图像均已缩放至同一大小。本次试验的试验设备为一台 2.90 GHz 英特尔

酷睿 i7-10700 处理器, 内存 8.0 GB 的电脑, 其中测试所用软件为 MATLAB R2018。

表 1 9 组红外图像测试数据集详细信息

Table 1 Details of nine infrared image dataset for test

图像序列	目标尺寸	图像分辨率	场景描述
图 4A	5×7	256×200	高亮背景
图 4B	3×9	256×200	高亮背景
图 4C	6×6	200×150	高亮背景
图 4D	4×4	280×228	强噪声干扰
图 4E	4×5	256×200	强噪声干扰和暗淡目标
图 4F	6×5	280×228	复杂云层
图 4G	5×4	256×200	强噪声干扰和暗淡目标
图 4H	8×6	220×140	强噪声干扰和暗淡目标
图 4I	3×4	284×213	高亮背景

经过实验, 本文所提算法对 9 幅不同背景下的检测结果如图 4 所示, 从三维展示图和对比结果不难看出, 无论是图中 4A~C 较为平滑的高亮背景, 或是图 4H 的部分高亮物体干扰和图 4I 的复杂碎云干扰, 还是图 4D~F 和 H 具有的像素点噪声干扰, 由于式 (7) 得到的 P 都能够对其有较好的抑制作用, 同时能够有效增强目标, 使得显著图中目标更加突出, 从而易于检测, 得到最终正确的目标位置。

3.2 检测结果及对比分析

为进一步验证本文算法的性能, 将本文算法与现有的 4 种算法进行对比, 其中包括传统算法 Top-Hat 算法和 Max-Mean 算法, 基于原始 HVS 方法的 LCM 算法和 MLHM 算法。在 5 种不同算法下对 7 幅图像的三维检测结果如图 5 所示, 图 5(a) 为原图, 图 5(b) 为原始三维图, 通过对比不同算法的三维图像检测结果可以看出, 图 5(c) 为 Top-Hat 算法和图 5(d) 为 Max-Mean 算法对于图 5A~D 都有一定的检测能力, 虽对较为均匀的高亮背景有一定的抑制能力, 但对于图 5F 和 G 这样像素点噪声较多, 目标较为昏暗的图像, 其虚警率明显升高, 证明其无法对此类干扰进行有效抑制。从图 5(e) 可以看出, 虽然 LCM 算法在高亮平滑的背景下均能准确检测出结果, 但其对于高亮背景的抑制能力较弱。同时, LCM 算法对于图 5E 和 G 的点噪声处理效果不佳, 具有较多虚警, 难以检测到正确目标, 其中, LCM 对图 5F 中昏暗目标的检测效果最差。从图 5(f) 和 MLHM 算法对图 5A 和 C 的检测结果来看, 在高亮背景下仍会产生一定的虚警, 从其对比图 5E~G 的检测结果可以看出, 该算法对于噪点较多, 背景较为复杂的图像处理能力较弱, 虚警率较高。同时可以看出, 本文所提算法无论是在高亮背景, 复杂云层, 昏暗小目标或是强噪声干扰的情况下都能极好的增强小目标, 并具有较强的抑制能力, 明显降低虚警率, 使得最终结果易于检测。

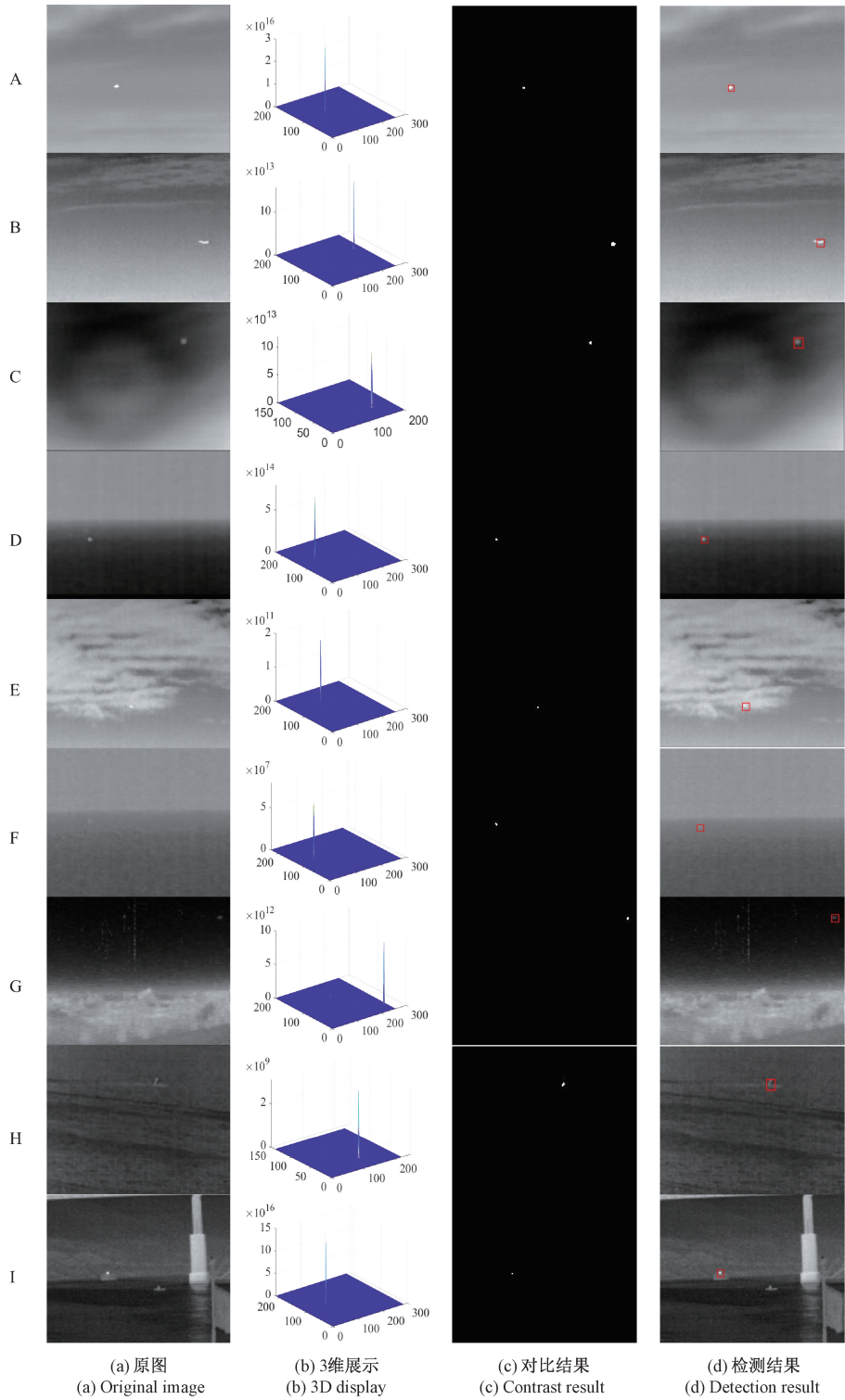


图 4 不同场景下检测结果

Fig. 4 Detection results under different scenarios

红外弱小目标检测算法通常采用的评价指标包括信杂比增益(signal to clutter ratio gain, SCRg),背景抑制因子(background suppress factor, BSF) 以及接受者操作特性曲线(receiver operating characteristic, ROC)。其中,

SCRg 用来评估算法目标增强的性能,即:

$$SCRg = \frac{SCR_{out}}{SCR_{in}} \tag{13}$$

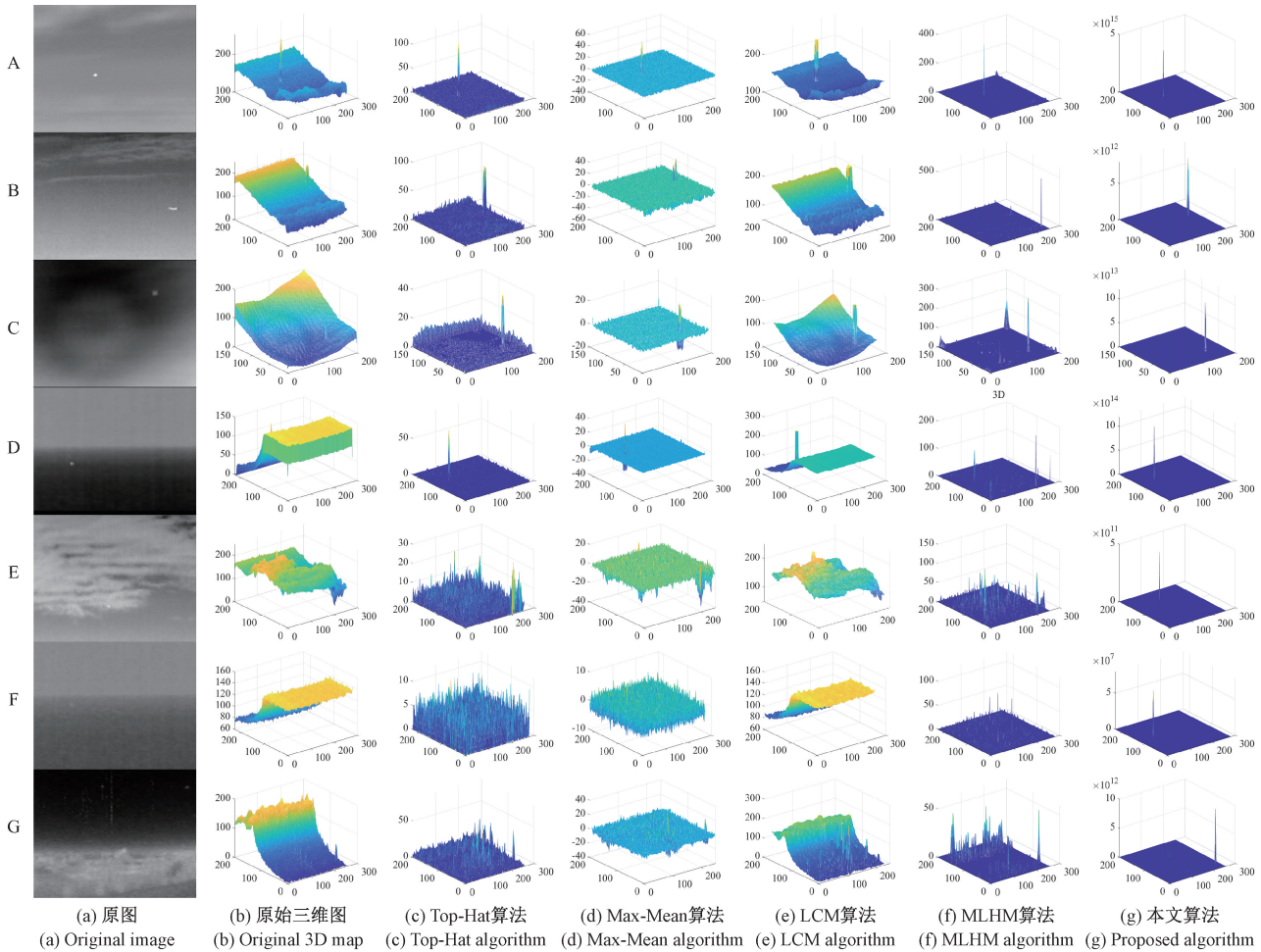


图 5 5 种算法检测对比
Fig. 5 Detection comparison of 5 algorithms

式中: SCR_{out} 和 SCR_{in} 分别表示检测图像和原始图像的信杂比(SCR),信杂比常被用于度量目标显著性及其检测难度,即图像的 SCR 越高目标越易被检测到,因此,提高图像信杂比能有效降低检测难度并提高检测率,其计算方式如下:

$$SCR = \frac{|\bar{I}_t - \bar{I}_b|}{\sigma_b} \tag{14}$$

式中: $\bar{I}_t$ 和 $\bar{I}_b$ 分别表示目标区域和邻域区域的像素均值; σ_b 则表示邻域区域的标准差。

BSF 多用于衡量背景的抑制程度,表达式为:

$$BSF = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \tag{15}$$

式中: σ_{in} 和 σ_{out} 分别表示原始图像和检测图像的灰度标准差。

表 2 为 7 个不同场景下 5 种算法的 SCRg 和 BSF 指标,可以看出,本文算法这两项指标较前 4 种算法都具有更好的结果,证明该算法能有效提高图像信杂比,并具有

较好的背景抑制能力。

表 2 7 个不同场景下的 SCRg 和 BSF

Table 2 SCRg and BSF of seven different scenes						
图像	指标	Top-Hat	Max-Mean	LCM	MLHM	本文算法
图 5A	SCRg	0.61	1.27	2.00	5.18	7.99
	BSF	0.79	0.82	1.15	1.25	1.91
图 5B	SCRg	0.99	1.54	3.49	4.60	17.12
	BSF	0.52	0.92	0.23	1.44	8.96
图 5C	SCRg	0.97	0.81	0.89	3.03	9.42
	BSF	0.40	0.41	0.14	0.55	2.86
图 5D	SCRg	1.17	1.67	2.52	2.83	17.54
	BSF	0.83	0.90	0.25	1.36	10.29
图 5E	SCRg	2.23	1.62	1.71	6.19	53.69
	BSF	0.81	1.24	0.17	4.66	15.13
图 5F	SCRg	1.47	1.99	3.30	3.71	10.46
	BSF	0.64	0.69	0.23	1.16	2.12
图 5G	SCRg	1.78	0.82	1.22	1.18	7.10
	BSF	0.59	0.70	0.12	0.36	2.15

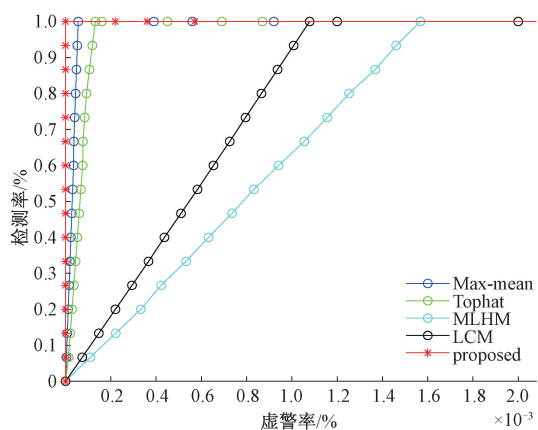
将 ROC 曲线作为算法的最后一个评价指标来定量

描述检测率 (true positive rate, TPR) 与虚警率 (false positive rate, FPR) 间的关系。其中, TPR 和 FPR 的表达式为:

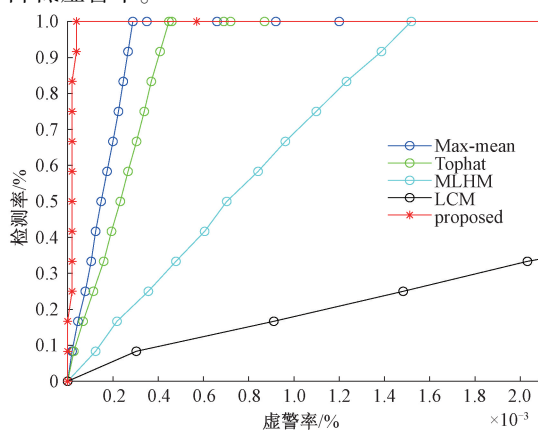
$$TPR = \frac{\text{检测出的真实目标数}}{\text{实际存在的真实目标数}} \quad (16)$$

$$FPR = \frac{\text{检测出的虚假目标像素点数}}{\text{实际存在的所有像素点数}} \quad (17)$$

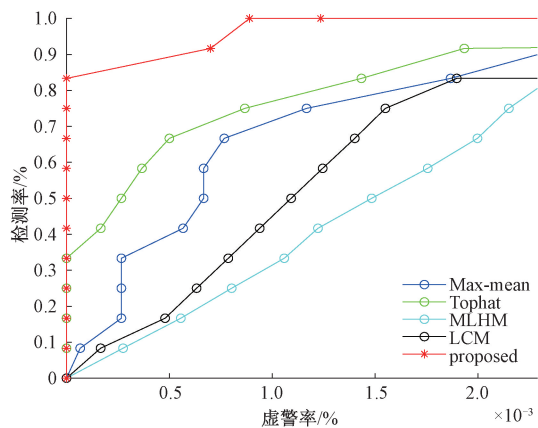
ROC 曲线是以检测率为纵轴, 虚警率为横轴来绘制的曲线, 与数值指标相比, ROC 曲线能更全面的反映算法检测性能。在同等实验条件下, 在 ROC 曲线中检测率与虚警率的关系可直观的表现曲线上升越快, 算法的



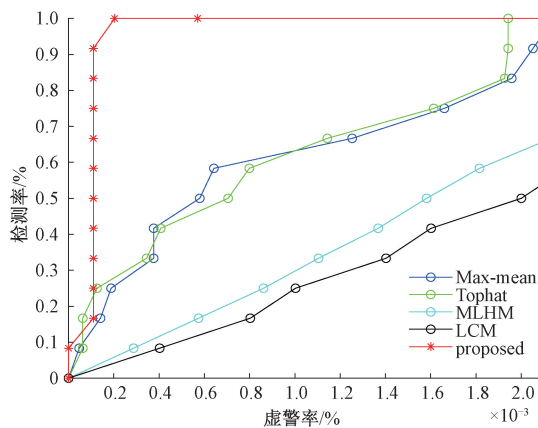
(a) 图 5A



(b) 图 5B



(c) 图 5C



(d) 图 5D

图 6 不同场景下 5 种算法的 ROC 曲线

Fig. 6 ROC curves of the five algorithms in different scenes

4 结 论

针对复杂场景下红外弱小目标的检测问题, 本文提出了一种基于局部积加权对比的红外弱小目标检测算法。本文算法思想主要是利用小目标的对称特性和高亮边缘的单边特性, 采用对角灰度差值有效抑制背景高亮

检测性能更优越。图 6 所示 5 种不同算法对红外图像序列图 5A~D 的检测能力, 可以看出, 所提算法在 4 个序列图像中相较于其余 4 种算法都有更好的 ROC 曲线。同时可以看出, 在 4 个序列图像中传统算法 Top-Hat 算法和 Max-Mean 算法具有一定的检测能力, 但随着图像噪声的增多及图像复杂程度的增强, 其虚警率也在不断上升, 在 ROC 曲线中的表现出的检测能力也逐渐减弱; LCM 算法和 MLHM 算法检测能力相对较弱, 具有较高的虚警率。总体来说, ROC 曲线表明本文所提算法具有较高的可靠性和检测率, 能够更好的抑制背景的同时突出目标, 有效降低虚警率。

边缘的干扰, 并提出局部积加权的方式放大目标与杂波的差异性, 进一步增强目标显著性。同时, 利用多尺度的思想增强算法适应性。此方法不但对图像中存在的高亮背景边缘和像素级噪点具有较强的抑制能力, 对于像素值较低的微弱目标也具有较好的检测能力, 有效提升算法的检测精度, 具有较强的鲁棒性。

参考文献

- [1] GUAN X W, PENG Z M, HUANG S Q, et al. Gaussian scale-space enhanced local contrast measure for small infrared target detection [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 17(2): 327-331.
- [2] 王军,陈俊彪,王曼,等.地/海面红外场景生成技术研究[J].国外电子测量技术,2020,39(5):23-27.
WANG J, CHEN J B, WANG M, et al. research of infrared scene generation technology based on ground and sea [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(5): 23-27.
- [3] GUO J, WU Y, DAI Y. Small target detection based on reweighted infrared patch-image model [J]. Let Image Processing, 2018, 12(1):70-79.
- [4] 赵东,周慧鑫,秦翰林,等.基于引导滤波和核相关滤波弱小目标跟踪[J].光学学报,2018,38(2):46-53.
ZHAO D, ZHOU H X, QIN H L, et al. Infrared dim small target tracking based on guided image filtering and kernelized correlation filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 46-53.
- [5] 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.
- [6] DENG L Z, ZHU H, ZHOU Q, et al. Adaptive top-hat filter based on quantum genetic algorithm for infrared small target detection [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(9): 10539-10551.
- [7] BAI X Z, ZHOU X Z, ZHOU F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(6):2145- 2156.
- [8] ZHAO J J, TANG Z Y, YANG J, et al. Infrared small target detection using sparse representation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(6): 897-904.
- [9] 杨真真,范露,杨永鹏,等.改进的低秩稀疏分解及其在目标检测中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 198-206.
YANG Z Z, FAN L, YANG Y P, et al. Improved low-rank and sparse decomposition with application to object detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 198-206.
- [10] 邓梁.基于非局部自相似性 HOG 特征与联合稀疏的遥感目标检测方法 [J]. 电子测量技术,2020,43(6): 128-133.
DENG L. Based on non-local self-similarity HOG feature and joint sparse remote sensing target detection method [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43 (6): 128-133.
- [11] GAO C, MENG D, 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.
- [12] LU Y, HUANG S, ZHAO W. Sparse representation based infrared small target detection via an online-learned double sparse background dictionary [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 99: 14-27.
- [13] CHEN C L P, LI H, WEI Y, et al. A local contrast method for small infrared target detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(1): 574-581.
- [14] HAN J H, YONG M, ZHOU B, et al. A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2168-2172.
- [15] QIN Y, LI B. Effective infrared small target detection utilizing a novel local contrast method [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(12): 1890-1894.
- [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] HAN J H, LIANG K, ZHOU B, et al. Infrared small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(4): 612-616.
- [18] 卢晨,凌兴宏.基于强度-梯度映射与多方向中值滤波的红外弱小目标检测算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12):151-158.
LU CH, LIN X H. Infrared dim small target detection algorithm based on intensity gradient mapping and multi-direction median filter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 (12): 151-158.
- [19] DENG H, SUN X, LIU M, et al. Infrared small-target detection using multiscale gray difference weighted image entropy [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(1):60-72.
- [20] DENG H, SUN X, LIU M, 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.
- [21] BAI X, BI Y. Derivative entropy-based contrast measure for infrared small-target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56 (4): 2452-2466.

[22] 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.

作者简介



蔡军, 2000 年于电子科技大学获得学士学位, 2004 年于重庆邮电大学获得硕士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为模式识别与智能系统。
E-mail: caijun@cqupt.edu.cn

Cai Jun received his B. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2000, and M. Sc. degree from Chongqing University of Post and Telecommunications in 2004, respectively. Now he is an associate professor at Chongqing University of Post and Telecommunications. His main research interests include pattern recognition and intelligence systems.



谭静, 2019 年于淮阴工学院获得学士学位, 现为重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与模式识别。
E-mail: TJYXZ123@163.com

Tan Jing received her B. Sc. degree from Huaiyin Institute of Technology in 2019. Now she is an M. Sc. candidate at Chongqing University of Post and Telecommunications. Her main research interests include image processing and pattern recognition.



邱会然, 现为重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与模式识别。
E-mail: 137142081@qq.com

Qiu Huiran is an M. Sc. candidate at Chongqing University of Post and Telecommunications. His main research interests include image processing and pattern recognition.