

# 基于改进加权局部对比度的红外小目标检测

宋婉妮, 杨本臣, 金海波

(辽宁工程技术大学软件学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:**在复杂背景的红外图像中弱小目标通常淹没在高亮边缘与强杂波处,提出一种基于改进加权局部对比度的红外小目标检测方法。利用小目标的局部特性建立一种加权函数将目标与其背景邻域的差异点乘凸显目标,进而与相接背景邻域作比值运算达到抑制复杂背景的效果;通过目标的各向同性和背景的各向异性,采用六方向梯度决策法创建背景抑制模型进一步抑制高亮边缘,实现降低虚警率,提高检测率的目的;最后,通过卷积计算将两者结合,采用自适应阈值分割检测真实目标。实验结果表明,该算法在复杂背景及强杂波干扰下有较强的鲁棒性。

**关键词:**红外弱小目标;局部对比度;加权函数;梯度特性

**中图分类号:**TP391;TN971 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.023

## Infrared small object detection based on improved weighted local contrast

SONG Wan-ni, YANG Ben-chen, JIN Hai-bo

(School of Software, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** In the infrared image of complex background, weak and small targets are usually submerged in the highlight edge and strong clutter. In this paper, a method for detecting small infrared targets based on improved weighted local contrast is proposed. Using the local characteristics of the small target, a weighting function is established to multiply the difference point between the target and its background neighborhood to highlight the target, which in turn is compared with the adjacent background neighborhood to suppress the effect of complex background. Through the isotropy of the target and the anisotropy of the background, the background suppression model is created by the six-direction gradient decision method to further suppress the highlighted edges, so as to reduce the false alarm rate and improve the detection rate. Finally, the two are combined by convolution calculation, and the real target is detected by adaptive threshold segmentation. The experimental results show that the proposed algorithm has strong robustness under complex background and strong clutter interference.

**Keywords:** infrared weak small target; local contrast; weighted functions; gradient characteristics

### 1 引言

红外搜索和跟踪系统是一种广泛应用于军事和民用领域的通用技术,由于弱小目标与普通目标相

比,缺少了大多数特定特征同时存在外界干扰<sup>[1-2]</sup>。如何克服这些困难实现精准检测一直是该领域的研究热点。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 62173171);国家自然科学基金青年基金项目(No. 41801368)资助。

**作者简介:**宋婉妮(1996-),女,硕士,主要从事为红外小目标检测、图像处理。E-mail:1738254477@qq.com

**通讯作者:**杨本臣(1975-),男,副教授,硕士生导师,主要从事大数据、物联网、智能信息处理。E-mail:297058057@qq.com

**收稿日期:**2022-08-11;**修订日期:**2022-09-13

近年来,受人类视觉系统(HVS)对比机制启发,将其应用于红外小目标检测。提出基于滤波器的方法,如LoG滤波器<sup>[3]</sup>、Top-hat滤波器<sup>[4]</sup>、DoG滤波器<sup>[5]</sup>等,可以有效增强目标,但滤波器不仅对目标敏感且对背景边缘敏感,会造成高虚警率。提出基于局部对比度及其变体方法,如Chen等人<sup>[6]</sup>利用中心块与邻域块的比值作为局部对比测度(LCM)、Wei等人<sup>[7]</sup>提出多尺度块对比测度(MPCM)利用中心块与对称单邻域的信息差实现高速检测、Han等人<sup>[8]</sup>提出一种相对局部对比测度(RLCM)来解决复杂背景下多尺度目标问题、Han等人<sup>[9]</sup>提出多尺度三层局部对比测度(TLLCM)利用高斯模板提高检测效率、Pan等人<sup>[10]</sup>提出双层局部对比度测度(DLCM)利用内邻域对角灰度差大幅度提升目标显著性、He等人<sup>[11]</sup>提出融合局部对比度与非局部低秩张量模型,抑制背景提高迭代效率。这些局部对比度算法对目标增强效果较好,但存在复杂背景及高亮边缘干扰时,背景抑制较差检测准确率会降低。此外还有LIG<sup>[12]</sup>基于小目标强度信息和梯度特性方法、红外块图IPI模型<sup>[13]</sup>将检测转化为求解低秩稀疏矩阵的数学问题、PSTNN<sup>[14]</sup>运用局部先验信息结合张量和范数算法。这些算法在增强目标、抑制背景方面性能良好,但易将一些与目标灰度值相似的孤立像素点误认为目标。

针对以上出现的问题,本文提出基于改进加权局部对比度的红外小目标检测算法,利用目标与背景邻域间灰度差异建立加权函数增强目标显著性的同时抑制复杂背景。其次,由光学扩散点函数可知,真实小目标通常是中心到边缘以圆形扩散,而背景边缘则是沿特定方向分布,故小目标的梯度幅值大且周围梯度方向会呈现出指向中心的态势,背景周围的梯度幅值差异大且方向杂乱,基于此创建背景抑制模型加强高亮边缘及强杂波抑制。

## 2 传统三层局部窗

在图像处理过程中,会提前采用预处理的方式滤除无用信息,增强有用信息,为提高检测速度借助三层窗口模式<sup>[15]</sup>。该模式由核心层,储备层和周围层构成,在核心层运用高斯函数,以达到增强目标的作用;储备层用于分离目标与背景;周围层用于捕获目标的周围背景。小目标的形状近似二维高斯类型,使用高斯函数在核心层对小目标增强以免除图

像预处理,提高检测效率。对于存在噪声图像,采用高斯模型表示为:

$$I_0(x,y) = \sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} GS(i,j) \cdot I(x+i,y+j) \quad (1)$$

其中, $I_0$ 为增强后结果, $(x,y)$ 为像素坐标, $I$ 为输入图象, $GS$ 为高斯模板,如图1所示。

$$GS = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

图1 高斯模板

Fig. 1 Gaussian template

为了最大限度地抑制干扰背景,使用背景估计思想,计算多尺度TLLCM,即:

$$TLLCM = \min\left(\frac{I_0}{I_{\text{mean}}(p)} I_0 - I_0\right) \quad (2)$$

$$I_{\text{mean}}(p) = \frac{1}{K} \sum_{q=1}^K G_p^q, p = 1, 2, \dots, 8 \quad (3)$$

其中, $I_{\text{mean}}$ 为 $K$ 最大像素平均值; $G_p^q$ 为 $p$ 块的第 $q$ 个最大灰度值, $K$ 为像素数。

从中可看出三层窗口局部对比度的局限性:预处理部分对背景处理不佳导致目标靠近高亮边缘时其灰度值偏小,背景区域与目标区域重叠发生漏检;对目标增强不足,存在复杂背景及高频噪声时弱小目标极易淹没在其中导致高漏检率;存在形状目标时目标轮廓检测不清晰导致定位不准确。

## 3 改进加权局部对比度弱小目标检测

针对传统三层局部窗算法的不足,本文引入加权函数利用背景邻域与中心目标区的差异化信息、目标特性、领域特性进行背景抑制从而增强目标显著性,随之利用其与梯度特性创建的背景抑制模型进行卷积计算进一步抑制高亮边缘。最后通过自适应阈值分割得到检测结果。本文算法流程图如图2所示。

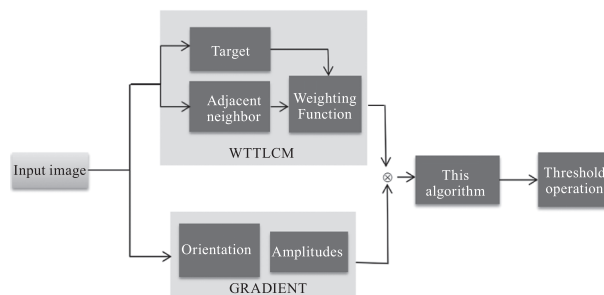


图2 本文算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart in this paper

### 3.1 加权优化算法

随着红外小目标的深入研究,研究者倾向于在基础局部对比度上加入加权函数,以增强目标显著性,抑制复杂背景。其加权函数分为两类:第一类是利用目标本身自带的统计特性,如局部熵<sup>[16]</sup>和中心块方差<sup>[17]</sup>等,第二类是利用目标与其相邻背景间的统计差异,如局部区域相似度<sup>[18]</sup>和局部自相似<sup>[19]</sup>等。经实验验证,部分函数对噪声敏感,为防止尺寸较小,亮度较弱的目标被剔除,本文利用目标与相邻域的灰度差异建立加权函数。首先,定义函数  $F$  为每个图像块的最大值与平均值的差值,即:

$$F_p = M_p - \text{mean}_p, p = 0, 1, 2, \dots, 8 \quad (4)$$

其中,  $M_p$  为图像块最大值;  $\text{mean}_p$  为图像块中所有像素平均值。

接下来,提出一种新的加权函数  $W$ ,将目标与其相邻域的差异点乘凸显小目标,再与相邻域作比值运算,表达式如下:

$$W(x, y) = \max \left\{ \frac{WT(x, y) \cdot WD(x, y)}{WB(x, y) + \delta} \right\} \quad (5)$$

其中,  $WT$  为目标特性;  $WD$  为目标与其邻域的差异;  $WB$  为邻域特性;  $\delta$  为非零常数,用来避免分母为0。

$$WT(x, y) = F_0 \quad (6)$$

$$WD(x, y) = \max\{0, \min\{F_0 - F_p\}\}, p = 1, 2, \dots, 8 \quad (7)$$

$$WB(x, y) = \text{std}\{F_1, F_2, \dots, F_8\} \quad (8)$$

本文提出的加权函数考虑全面,可以在一定程度上增强小目标且不会造成虚警率。

### 3.2 背景抑制模型

因目标与背景梯度方向的不一致性,提出利用梯度进一步判断模糊小目标的方法,同时,梯度大小和方向是根据相邻灰度值的变化而发生改变,所以对图像轮廓和边缘抑制效果较好,以此建立背景抑制模型提高检测准确度。其思想是,小目标的梯度方向大体都指向目标中心,而背景梯度方向基本保持一致,是局部定向的。可知梯度是一个矢量,表示函数在某一点处方向导数沿该方向的移动,如图3所示。

基于以上分析,给出图像的梯度公式:

$$G(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (9)$$

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \right) \quad (10)$$

$$\text{mag}(\nabla f) = g(x, y) = \sqrt{\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}} \quad (11)$$

其中,  $G_x(x, y)$  和  $G_y(x, y)$  分别代表在像素  $(x, y)$  处水平和垂直方向的梯度;  $G(x, y), \alpha(x, y)$  和  $\text{mag}(\nabla f)$  分别代表梯度的值,方向和振幅。

在红外图像中梯度方向并不是严格指向,本文采用了效果最佳的六方向作判断,六方向梯度示意图如图4所示。

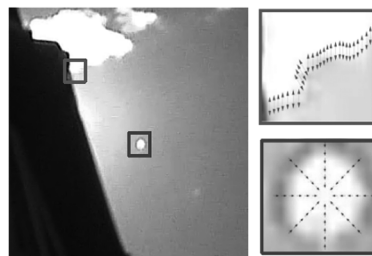


图3 目标和背景的梯度强度(箭头方向为递增方向)

Fig. 3 Gradient intensity of the target and background (the arrow direction is incremental)

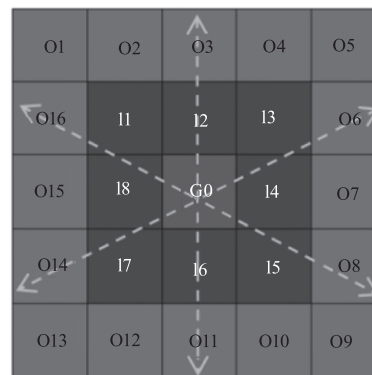


图4 六方向梯度示意图(箭头方向为梯度减小方向)

Fig. 4 Schematic diagram of a six-way gradient (the arrow direction is the gradient reduction direction)

因平方和平方根的计算相对繁杂,为降低计算量采用近似法,因此六方向梯度可近似为:

$$\begin{cases} g_1(x, y) = g(x, y + n) - g(x, y) \\ g_2(x, y) = g(x, y - n) - g(x, y) \\ g_3(x, y) = g(x + n, y + n) - g(x, y) \\ g_4(x, y) = g(x - n, y - n) - g(x, y) \\ g_5(x, y) = g(x - n, y + n) - g(x, y) \\ g_6(x, y) = g(x + n, y - n) - g(x, y) \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $n$  为步长,由小目标的大小决定,因红外小目标的尺寸小于  $9 \times 9$ ,取  $2 \leq n \leq 9$ 。然后,在每个方向上计算振幅的均方,定义如下:

$$\bar{g}_m = \sum_{m=1}^{N_m} \frac{\|g_m\|^2}{N_m + \delta}, m = 1, 2, \dots, 6 \quad (13)$$

其中,  $N_m$  是沿每个方向上满足指向中心图像块的个数,由此算出梯度幅值的最大值和最小值。

$$G_{\max} = \max_{1 \leq m \leq 6} \bar{g}_m \quad (14)$$

$$G_{\min} = \min_{1 \leq m \leq 6} \bar{g}_m \quad (15)$$

因小目标的梯度在各点同指向中心,所以  $G_{\max}$  和  $G_{\min}$  的值相差较小,反之,背景杂波的指向与幅值在每点处相差较大,导致  $G_{\max}$  和  $G_{\min}$  的数值差距较大,因此使用平均幅值  $G_{\max}$  和  $G_{\min}$  的比值来抑制背景杂波。最终得到平均幅值集合  $G$  为:

$$G = \begin{cases} \sum_{m=1}^6 \bar{g}_m, \frac{G_{\max}}{G_{\min}} > K \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $G$  为图像块中所有梯度局部值,  $K \in [0.2, 0.4]$ 。通过该方法创建背景抑制模型在加权增强的基础上提高背景抑制力。

### 3.3 卷积计算与阈值分割

本文所涉及的卷积计算可表示为:

$$F = TLLCM \cdot W(x, y) * G \quad (17)$$

其中,  $*$  表示卷积计算。接着对阈值进行自适应分割,在凸显目标同时降低背景对目标干扰的基础上进行有效分割。

$$T = \mu \cdot \max_c + (1 - \mu) \text{mean}_c \quad (18)$$

其中,  $\mu$  为影响因素,据实验经验,一般将  $\mu$  设为 0.4 ~ 0.8。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 参数分析

分别讨论比率参数  $k$  和阈值调节因子  $\mu$  的影响,使用 50 幅不同背景图像,包括云层、海面 and 地面。用虚警率和检测率定量评估不同参数的能力。虚警率 FA (False-rate) 为虚假目标在总像素中占比,检测率 PD (Probability of detection) 为检测到真实目标在总目标中占比,定义如下:

$$FA = \frac{N_f}{N_n}, PD = \frac{N_p}{N_r} \quad (19)$$

其中,  $N_f$  为检测到的虚假目标数量;  $N_n$  为图像的总像素数;  $N_p$  为检测到的真实目标数量;  $N_r$  为总的真实目标数量。通常,较好检测结果是在保证较高 PD 的同时拥有较低 PA。

使用不同的  $k$  测试本文方法,其数据如表 1 所示。当  $k$  增加到 0.2 时,性能增强,这表明当使用更大的  $k$  时,会抑制更多杂波。然而,当  $k$  值设置为 0.4 时,性能大幅度下降,因为太大的  $k$  也可以抑制部分目标,此时的目标形状不是严格高斯函数。最

后,将  $k$  设置为 0.3。

表 1 不同  $k$  值对虚警率和检测率的影响

Tab. 1 The effect of different  $k$ -values on the FA and PD

$k$	FA/%	PD/%
0.1	9.382	87.532
0.2	5.742	90.625
0.3	5.254	91.273
0.4	11.337	85.532

调节因子  $\mu$  的大小会影响阈值分割大小。因此,为保持  $\mu$  的独立性,选取调节因子  $\mu = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\}$  进行定量测试。如表 2 所示,当  $0.4 \leq \mu \leq 0.8$  时该部分算法达到最佳性能,因此,本文实验设置  $\mu$  为 0.5。

表 2 不同  $\mu$  值对虚警率和检测率的影响

Tab. 2 The effect of different  $\mu$ -values on the FA and PD

$\mu$	FA/%	PD/%
0.2	8.237	87.786
0.4	4.732	90.625
0.6	4.384	90.346
0.8	5.237	89.831
1.0	9.174	85.546

### 4.2 对比实验

为验证本文算法在高复杂度背景下的低虚警率与高检测率,选取 8 张真实图像进行实验,与算法 RLCM、LIG、TLLCM、IPI 以及 PSTNN 进行对比,客观指标使用信杂比 (signal clutter ratio, SCR)、背景抑制因子 (background suppress factor, BSF)、虚警率、检测率以及检测时间来证明。文中代码均在 Intel Core i5 处理器,内存为 8 GB 的 DELL 电脑上运行,所用软件为 matlab R2021a。图像详细信息如表 3。

信杂比 SCR 和背景抑制因子 BSF 是对目标检测能力以及对背景抑制程度的描述,其值越高,说明检测目标与抑制背景效果越好,公式如下:

$$SCR = \frac{|g_T - g_b|}{\sigma_b} \quad (20)$$

$$BSF = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \quad (21)$$

其中,  $g_T$  和  $g_b$  分别表示目标的最大值和背景区域的平均值;  $\sigma_b$  是背景区域的标准差。  $\sigma_{in}$  和  $\sigma_{out}$  分别表示原始图像和检测后图像的标准差。

表 3 红外图像的细节信息

Tab. 3 Infrared image details

图像序列	图像分辨率	目标数目	目标大小	场景描述
1	431 × 357	1	2 × 2	复杂云层 + 高亮背景
2	302 × 209	1	1 × 1	强杂波 + 高亮边缘
3	339 × 258	1	3 × 3	强杂波 + 高亮边缘 + 暗目标
4	307 × 212	2	4 × 4	多目标 + 高亮边缘 + 暗目标
5	256 × 171	1	5 × 5	强杂波 + 复杂背景
6	390 × 290	2	6 × 6	多目标 + 强杂波 + 复杂背景
7	345 × 261	1	6 × 6	暗目标 + 强杂波
8	363 × 212	1	7 × 7	强干扰 + 高亮背景 + 建筑干扰

如图 5 展示了本文算法与现存算法的检测结果图,其中不难看出,RLCM 算法检测简单图像时效果极佳,但易受高亮背景及杂波干扰。LIG 算法可以检测出目标形状,然而高亮背景对其影响较大导致高虚警。TLLCM 算法相对以上算法对高亮背景抑制较好,但其对高频噪声敏感。IPI 算法对拥有高亮背景和强杂波干扰的图像均会产生高虚警。PSTNN 算法对杂波处理不佳使目标检测不出,对于高亮背景会将孤立点错认为目标。相比较以上算法,本文算法较为完整地保留了目标信息,实现了目标的高检测率及低虚警率。

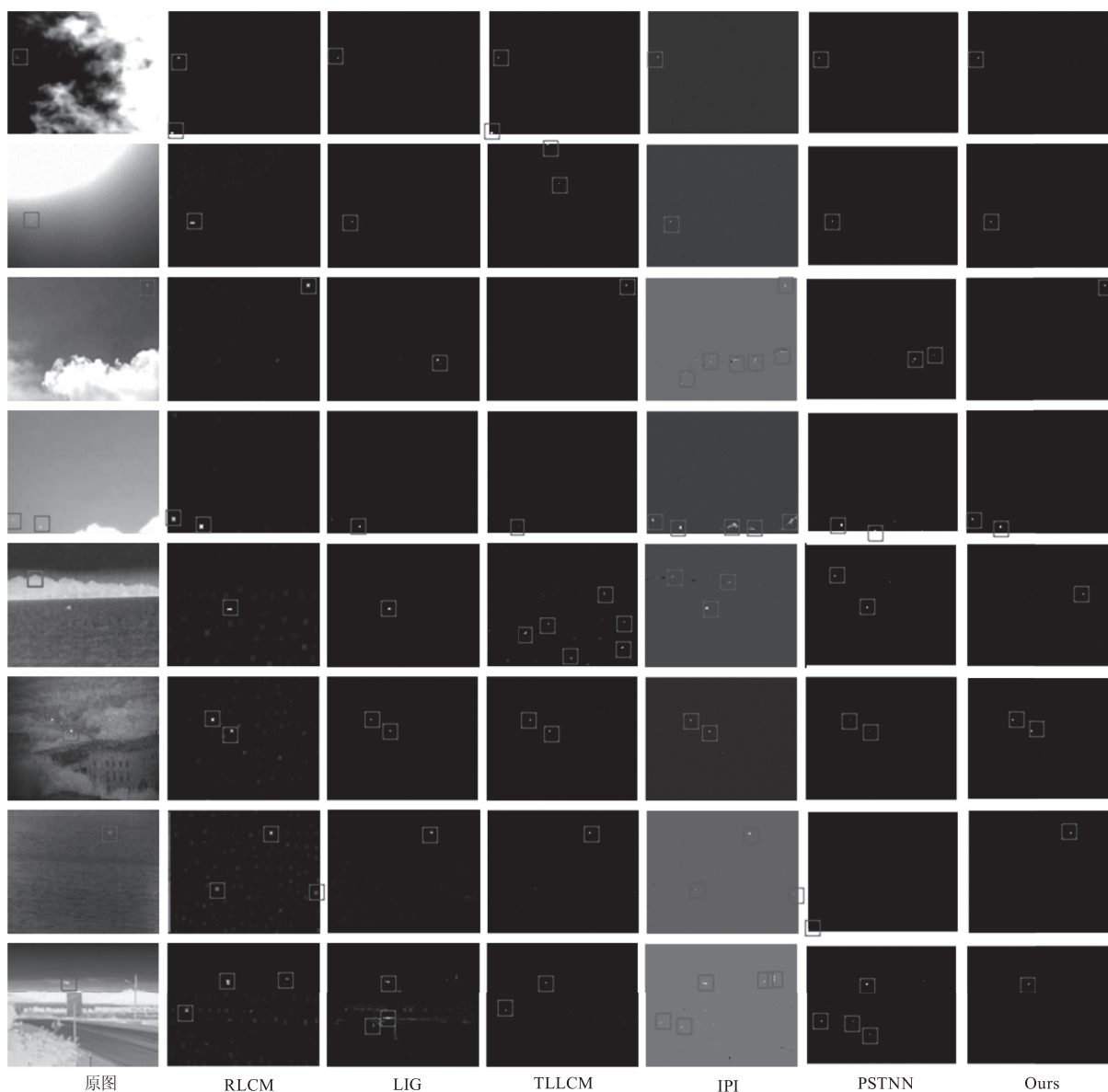


图 5 不同算法的检测结果

Fig. 5 Detection results for different algorithms

表 4 给出了 6 种不同算法各种背景下红外小目标检测的平均 SCR、平均 BSF、PA、PD 以及平均运行时间。可知本文运行速度虽相比于传统 TLLCM 算法稍慢,但相比其检测率有着明显提

升。不论是从增强抑制角度还是从检测角度,都可看出相较于其他检测算法本文的性能最优、目标凸显能力较强同时具备一定的背景平滑效果。

表 4 不同算法的评价指标

Tab. 4 Evaluation indicators for different algorithms

检测算法	SCR	BSF	FA/%	PD/%	Time/s
RLCM	6.8458	0.6062	9.569	83.162	2.175
LIG	16.4426	6.816	5.472	87.736	6.075
TLLCM	26.2868	2.0848	8.631	84.525	3.9494
IPI	25.767	0.7062	17.274	91.256	5.5648
PSTNN	20.942	0.8062	10.815	80.675	7.8108
本文算法	103.5906	12.608	2.237	96.732	4.682

## 5 总 结

提出一种基于改进加权局部对比度的红外小目标检测方法。通过目标与背景邻域得到差异化信息,从而增强目标抑制复杂背景,同时,针对现有算法高虚警率问题,利用目标的各向同性采用六方向梯度法选择目标点进行决策,进而准确判断出弱小目标的位置。实验结果表明,本文算法信杂比与背景抑制因子较其他算法都有所提升同时满足时效性,虚警率仅 2.2%,检测率为 96.7% 是一种切实可行的检测方法。

## 参考文献:

- [1] Diam Siwei, Wang Zhonghua, Ye Zheng. Infrared small target detection algorithm for airspace weighted local contrast[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(10): 1200 - 1206. (in Chinese)  
段思韦,王忠华,叶铮.空域加权局部对比度的红外小目标检测算法[J].激光与红外,2020,50(10): 1200 - 1206.
- [2] Li X, Xu G, Wu Q. An Infrared small target detection method based on local contrast measure and gradient property[J]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 1748(4): 042052.
- [3] Kim S, Yang Y, Lee J, et al. Small target detection utilizing robust methods of the human visual system forIRST [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009, 30(9): 994 - 1011.
- [4] Bai X, Zhou F. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(6): 2145 - 2156.
- [5] Wang X, Lv G, Xu L. Infrared dim target detection based on visual attention[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(6): 513 - 521.
- [6] Chen C L P, Li H, Wei Y, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(1): 574 - 581.
- [7] Wei Y T, You X G, Hong Li. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection[J]. Pattern Recognition, 2016, 58: 216 - 226.
- [8] Han Jinhui, Liang Kun, Zhou Bo, et al. Infrared small target detection utilizing the multi-scale relative local contrast measure[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(4): 612 - 616.
- [9] Han J, Moradi S, Faramarzi I, et al. A local contrast method for infrared small-target detection utilizing a tri-layer window[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 17(10): 1822 - 1826.
- [10] Pan Shengda, Zhang Su, Zhao Ming, et al. Detection method of infrared weak small target based on double-layer local contrast[J]. Journal of Photons, 2020, 49(1): 184 - 192. (in Chinese)  
潘胜达,张素,赵明,等.基于双层局部对比度的红外弱小目标检测方法[J].光子学报,2020,49(1): 184 - 192.
- [11] He Wei, An Bowen, Pan Shengda. Infrared small target detection method based on low rank model under local contrast a priori[J]. Acta Photonics, 2021, 50(11): 350 - 366. (in Chinese)

- 何巍,安博文,潘胜达.局部对比度先验下基于低秩模型的红外小目标检测方法[J].光子学报,2021,50(11):350-366.
- [12] Zhang H,Zhang L,Yuan D,et al. Infrared small target detection based on local intensity and gradient properties [J]. *Infrared Physics & Technology*,2018,89:88-96.
- [13] 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.
- [14] Zhang L,Peng Z. Infrared small target detection based on partial sum of the tensor nuclear norm[J]. *Remote Sensing*,2019,11(4):382.
- [15] Han Jinhui,Jiang Yawei,Zhang Xiaomian,et al. Detection of infrared small targets using local contrast of three-layer window [ J ]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50 (2):244-253. (in Chinese)
- 韩金辉,蒋亚伟,张小件,等.采用三层窗口局部对比度的红外小目标检测[J].*红外与激光工程*,2021,50(2):244-253.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Qi H,Mo B,Liu F,et al. Small infrared target detection utilizing local region similarity difference map[J]. *Infrared Physics & Technology*,2015,71:131-139.
- [19] Chen Y,Xin Y. An efficient infrared small target detection method based on visual contrast mechanism [ J ]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13 ( 7 ): 962-966.