光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024040301

# 复杂背景下双邻域局部权重对比度红外小目标检测算法

李守昌[1,2]，吴滢跃[1*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；2. 中国科学院大学，北京 100049）

**摘　要：** 为降低复杂背景中的干扰杂波对红外小目标检测的影响，提出一种双邻域局部权重对比度算法。首先，考虑到不同尺寸的红外小目标的背景特性，采用双邻域窗口策略有效捕捉目标与背景特性。其次，分别计算方向信息特征图和权重系数增强图，前者充分利用目标的弥散方向信息，后者结合区域灰度响应强度及离散程度生成权重信息，两者结合生成目标显著图。最后，采用自适应阈值分割从目标显著图中提取目标。在 4 组不同背景的公开数据集上与 6 种算法进行了比较，所提出的算法具备较强的抗干扰能力和准确的检测性能。

**关键词：** 红外小目标；目标检测；人类视觉系统；双邻域窗口

**中图分类号：** TP391.4　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0853－08

## Dual-Neighborhood Local Weighted Contrast Algorithm for Infrared Small Target Detection within Complex Backgrounds

LI Shouchang[1,2]，WU Yingyue[1]

（1. Shanghai Institute of Technical Physics，Chinese Academy of Sciences，Shanghai 200083，CHN；
2. University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，CHN）

**Abstract：** To mitigate the impact of interference clutter in the detection of infrared small targets within complex backgrounds，a dual-neighborhood local weighted contrast algorithm is proposed. First，considering the background characteristics of small targets of different sizes，a dual-neighborhood window strategy is employed to effectively capture target and background features. Subsequently，directional information feature and weight coefficient enhancement maps are computed separately. The former fully utilizes the dispersal direction information of the target，while the latter generates weight information by utilizing the intensity and dispersion of grayscale responses in different regions. The combination of these two maps through image fusion results in a target saliency map. Finally，adaptive threshold segmentation is applied to extract targets from the saliency map. Comparative evaluations were conducted on four publicly available datasets with different backgrounds，involving six different algorithms. The proposed algorithm demonstrates robust anti-interference capabilities and accurate detection performance.

**Key words：** infrared small targets；target detection；human visual system；dual-neighborhood windows

## 0　引言

红外搜索与跟踪（Infrared Search and Tracking，IRST）系统具备成像细节丰富、抗电磁干扰能力强和集成度高等优势，被广泛应用于军事预警、精确制导、远距遥感及民用安防等领域[1]。红外

**收稿日期：**2024－04－03.
**基金项目：**国家十四五预研基金项目(514010405).
* **通信作者：**吴滢跃

小目标探测技术是决定 IRST 系统探测性能的重要一环，但由于探测成像设备的成像距离远，加之大气扰动和光学衍射等外界因素的影响，红外小目标在成像图中占有像素数目少且缺乏纹理信息，尤其是在存在严重的干扰杂波的复杂背景中，红外小目标极其容易被淹没，使得红外小目标检测容易产生虚警[2]。为解决这些问题，以多帧检测和单帧检测[3]为代表的方案被提出。多帧检测方法是利用航迹与速率等先验信息，联合相关帧进行计算，其算力开销大、处理延迟高。此外，高速移动的成像平台与目标之间的相对运动令帧间的相关性建立变得困难。相比之下，单帧检测算法复杂度低，更适用于工程实现[4]。单帧检测算法包括滤波算法、基于低秩矩阵的算法、基于深度学习的算法和基于人类视觉显著性的算法等。滤波算法通过设定特定的滤波器对图像进行卷积，如高斯差分滤波器(Difference of Gaussian, DoG)[5]、高斯-拉普拉斯滤波器(Laplacian of Gaussian, LoG)[6]、顶帽变换(Top-Hat)[7]和最大中值(Max-mean)滤波器[8]等，这类算法基于空间背景一致性假设，通常在均匀背景下检测效果良好，但对干扰杂波和噪声敏感。基于低秩矩阵的检测方法是利用红外小目标的稀疏特性和红外图像背景的低秩特性，通过对低秩稀疏矩阵的优化实现红外小目标检测[9-10]，但这类算法依赖目标背景范数的拟合程度，而高亮噪点和强边缘也存在稀疏特性，易被误分解为稀疏矩阵而产生虚警。基于深度学习的算法通过构建特定神经网络模型来提取特征，对经典的基于卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)的目标检测网络[11]进行改进，例如 Li 等[12]提出的密集嵌套网络(Dense Nested Attention Network, DNANet)，Chen 等[13]采用可以保留语义信息的 UNet 网络来提升精度，邵斌等[14]提出实时语义分割的红外小目标检测网络等，但此类算法需要通过大规模的标记数据进行训练，在快速池化过程中容易造成细节损失而产生漏检和虚警，此外，神经网络模型参量较大，不利于进行工程实现。

近年来，受人类视觉系统(Human Visual System, HVS)启发，视觉显著性机制被引入到红外小目标检测领域。视觉显著性的基本原理是通过计算红外小目标区域与其邻域之间的灰度差异，来构建比值型或者差值型对比度，从而实现对目标的检测。Wei 等[15]提出计算中央子块和周围子块的差值型多尺度对比度算法(Multiscale Patch-based Contrast Measure, MPCM)，该算法结合目标的方向信息，可以针对亮目标和暗目标进行增强。Han 等[16]提出比差联合型的相对局部对比度算法(Relative Local Contrast Measure, RLCM)，该算法在一定程度上缓解了高亮背景的干扰。由于不能提前知悉目标尺寸，上述算法都需要进行多尺度运算，而多重缩放会破坏目标的原始尺寸。Wu 等[17]提出扩大对比范围的双邻域梯度法(Double-Neighborhood Gradient Method, DNGM)，该方法采用一个固定大小的三层嵌套串口滑动计算内外两层的联合对比度。潘胜达等[18]提出了双层局部对比度算法(Double-Layer Local Contrast Measure, DLCM)，结合最外层的对角灰度差从而实现目标检测。

上述算法均存在一定的不足，采用两层嵌套窗口的检测算法需要进行多尺度运算以满足对不同尺寸目标的检测需求，计算复杂度高；采用三层嵌套窗口没有利用红外小目标的弥散方向性进行针对性增强，容易产生虚警。为克服上述算法的缺陷，本文提出了一种双邻域窗口的局部权重对比度算法(Dual-Neighborhood Local Weight Contrast Measure, DNLWCM)。采用双邻域嵌套窗口分别计算方向信息特征图(Directional Information Feature Map, DIFM)和权重系数增强图(Weight Coefficient Enhancement Map, WCEM)。DIFM 利用红外小目标的空间弥散特性充分抑制杂波和噪声，WCEM 利用子窗内的灰度强度对比度和离散特性对目标进行增强。两者优势互补生成目标显著图，最后对目标显著图进行自适应阈值分割出小目标。实验测试结果表明，在多个公开数据集上，本文算法可以在各种复杂场景中检测出小目标，相较主流的对比度算法展现了更为优异的性能。

## 1 双邻域局部权重对比度算法

算法包括方向信息特征图和权重系数增强图的生成、目标显著图生成和自适应阈值分割，算法流程图如图 1 所示。

### 1.1 双邻域窗口的设计

双邻域窗口在图像上从左到右，从上到下进行滑动计算。图 2(a)是窗体在红外图像上某一区域的示意图，图 2(b)展示了双邻域区域的划分，图 2(c)对内外层邻域的子窗细节进行了说明。

中央子窗 T 用来框定潜在的红外小目标，IN1～IN8 是 T 的八个内层邻域子窗，构成了 T 的内部邻域层，用来对框定目标的方向性进行判定，PN1～PN8 是 T 的八个外层邻域子窗，构成了 T 的外围邻域层，利用窗口内的灰度突变性对小目标进行增强。依据国际光学工程学会（Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers，SPIE）的定义，红外小目标的尺寸介于 3×3～9×9 像素之间，由此，中央子窗设置为 3×3 像素，避免因引入过量像素级高亮点噪（Pixel-Size Noise with High Brightness，PNHB）而产生干扰。

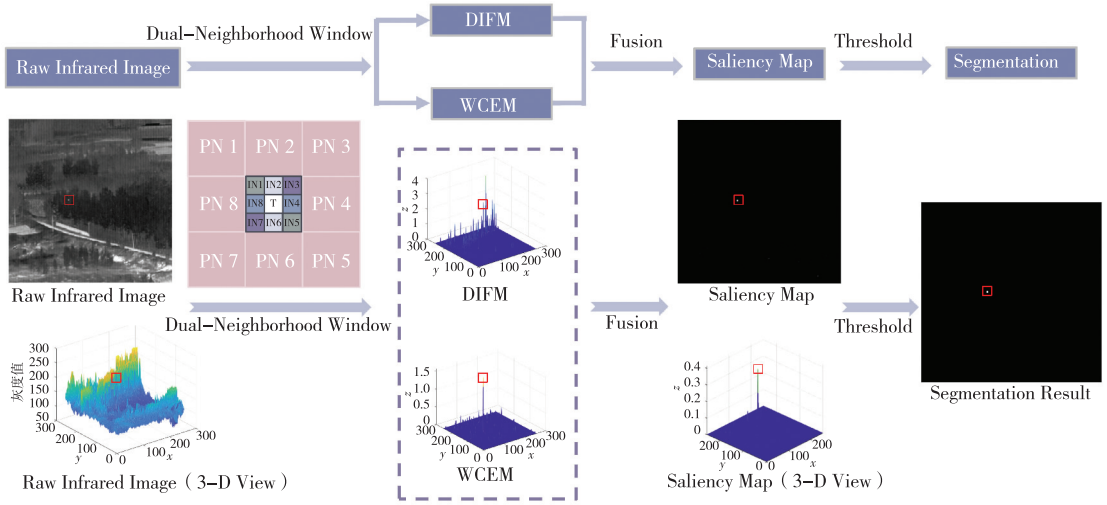
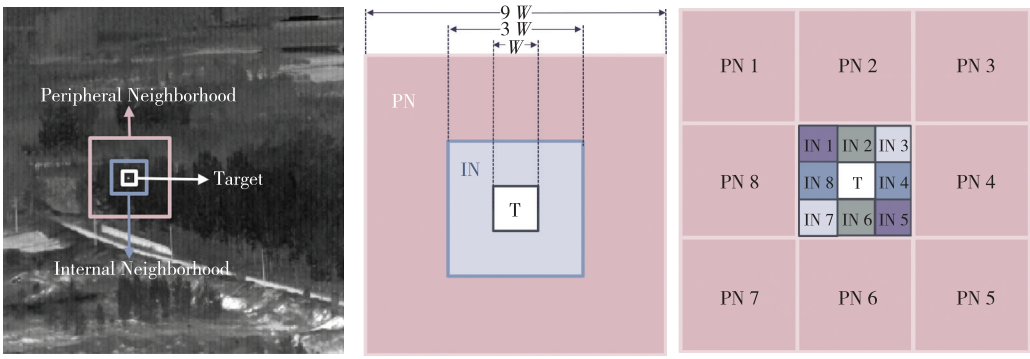



图 1　算法流程图




（a）滑动窗口示意　（b）双邻域区域划分　（c）子窗构成细节

图 2　双邻域窗口

## 1.2　目标检测阶段

### 1.2.1　方向信息特征图

红外小目标在图像中表现为孤立的亮斑，空间分布近似于二维高斯函数，亮度自中心到四周逐渐降低。杂波和强边缘有一定的结构性，而红外小目标具有各向异性，与各个方向上有正的对比度，表现为灰度分布的不连续性，本文使用 $d$ 来表征这种不连续性。中央子窗与内部邻域子窗在弥散方向上的差异用 $d(T,INi)$ 表示，其定义如下：

$$d(T,INi)=m_T-m_{INi},i=1,2,\cdots,8 \quad (1)$$

$$m_\Omega=\frac{1}{N_\Omega}\sum_{(s,t)\in\Omega}\Omega(s,t) \quad (2)$$

式中，$N_\Omega$ 代表集合 $\Omega$ 中包含的像素总数，$m_\Omega$ 表示集合 $\Omega$ 的均值。为了区别结构化杂波和强边缘，本文使用 $d_i$ 来刻画中央子窗和内层邻域子窗在 $i$ 方向上的不相似度：

$$d_i=d(T,INi)\times d(T,INi+4),i=1,2,3,4 \quad (3)$$

$d_i$ 小于零意味着中央子窗处于各向同性的背景或者结构化杂波中，而对于复杂背景中的空洞与暗斑区域，也会令 $d_i$ 小于零而产生不期望的虚警。本文设计了修正因子 $C$ 弥补该缺陷，其定义如下：

$$C=H[(m_T-m_{IN})+(m_T-m_{PN})] \quad (4)$$

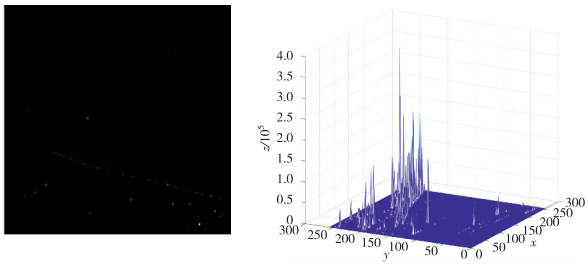
$$H(x)=\begin{cases}1 & x\geqslant 0\\ 0 & x<0\end{cases} \quad (5)$$

式中，$H$ 是 Heaviside 阶跃函数。通过联合内外层

邻域的均值差，保证对角差和修正因子均小于零，经过非负抑制之后，选择四个方向中相似性最小值保证目标区域与背景区域的对比度足够大，因此，方向信息特征图的定义为：

$$DIFM = \min_{i=1,2,3,4} D_i = \min_{i=1,2,3,4} \{\max[0, d_i \times C]\} \quad (6)$$

图 3 给出了生成的方向信息特征图，均匀背景、结构性杂波和强边缘得到了抑制，但部分高亮点噪依然存在，除此之外，仅利用差值对比度无法实现对红外小目标的增强，需要结合外围邻域灰度分布，对目标区域灰度权重进行调整，进一步增加目标的辨识能力。



(a) 二维视图 (b) 三维视图

图 3 方向信息特征图

### 1.2.2 权重系数增强图

当滑动窗进行滑动计算途径小目标区域时，区域内的灰度离散程度会升高，表现为子窗内部的灰度突变。为更有效地捕捉不同尺寸目标区域的灰度突变情况，本文使用 $W_I$ 来对中央子窗和邻域子窗的灰度突变程度进行加权计算，使用 $W_P$ 对内层窗口和外围邻域灰度突变程度进行加权计算。

本文衡量灰度的突变程度采用窗口强度对比度和区域标准差两种方式，窗口强度对比度(Window Intensity Contrast，WIC)是指当前滤波窗口内的前 $P$ 个最大像素的平均值与整个窗口均值之比，采用排序可以有效引入目标像素点，而且求均值可以有效抑制 PNHB 带来的干扰，其计算式为：

$$WIC_\Phi = \frac{M_\Phi}{m_\Phi} \quad (7)$$

$$M_\Phi = \frac{1}{P}\sum_{q=1}^{P} R_\Phi^q, P < N_\Phi \quad (8)$$

$W_I$ 定义为在保证 $T$ 区域为目标的前提下，中央子窗区域与内层邻域子窗的窗口强度对比度的最小差值，其表达式为：

$$W_I = \min_{i=1,2,\cdots,8} [(WIC_T - WIC_{INi}) \times H(m_T - m_{INi})] \quad (9)$$

经大量实验发现，当 $P$ 取值设置为 6 时可以取得较好的检测效果。

当滑动窗经过长建筑边界时，若仅依靠区域范围的窗口强度对比度，可能会出现检测失效的情况。为了规避双层窗口经过长边缘区域而导致检测失效，并有效衡量大范围的区域灰度突变的波动，本文采用 $W_P$ 来对中央区域与外层邻域的灰度波动进行衡量，其表达式为：

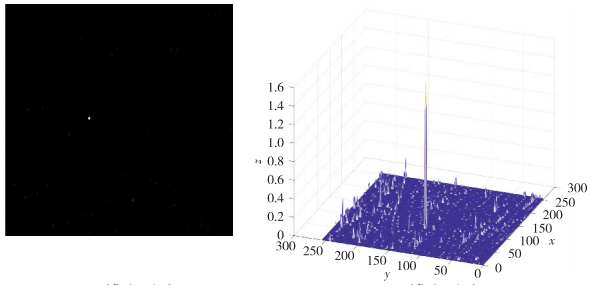
$$W_P = \frac{std(T + IN)}{\max[std(PNi)] + \varepsilon}, i = 1, 2, \cdots, 8 \quad (10)$$

式中，$\varepsilon$ 为调参系数，用来防止分母为零，在本文中其值取 $1\times10^{-3}$。

权重系数增强图联和内外邻域的两个加权因子，计算表达式为：

$$WCEM = W_I \times W_P \quad (11)$$

图 4 给出了生成的权重系数增强图，PNHB 在被抑制时，小目标被有效增强。然而，仅通过灰度分布强度及均匀性计算所得的权重系数对杂波和干扰噪声的抑制能力不足，需要结合方向信息进行抑制。



(a) 二维视图 (b) 三维视图

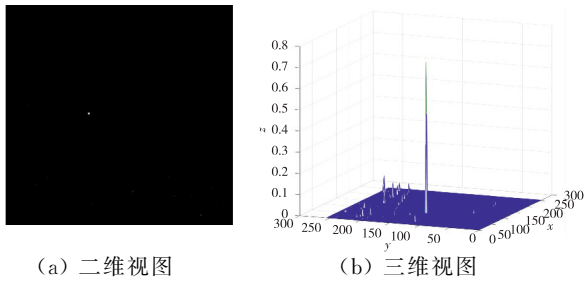
图 4 权重系数增强图

### 1.2.3 目标显著图

在利用红外小目标的弥散方向性获得方向信息图的基础上，结合权重系数增强图来增强目标的辨识能力，两者经归一化之后生成目标显著图：

$$S_{map} = \left[\alpha \times \frac{DIFM}{\max DIFM(x, y)}\right] \circ \left[\beta \times \frac{WCEM}{\max WCEM(x, y)}\right] \quad (12)$$

式中，$S_{map}$ 表示目标显著图，“∘”为哈达玛乘积，$\alpha$ 与



(a) 二维视图 (b) 三维视图

图 5 目标显著图

$\beta$ 的取值均介于 0～1 之间，用于调整方向信息和灰度均匀性信息的参量权重。在本文实验中，$\alpha$ 与 $\beta$ 均设置为 0.5，图 5 给出了生成的目标显著图，真实目标得到突显，背景、强边缘、杂波和噪声得到较好抑制。

### 1.3　目标提取

在生成的目标显著图基础上，采用一个阈值操作在目标显著图提取真实目标，阈值分割表达式为：

$$T = k\mu + \sigma \tag{13}$$

式中，$\mu$ 是显著图中所有像素的均值，$\sigma$ 是所有像素的方差，$k$ 为自适应系数，其取值范围设定为 15～30。

## 2　实验及结果分析

### 2.1　实验环境及实验数据

本实验所采用的计算机配置为 Intel® Core™ i7-12700H CPU@2.70 GHz，内存为 16 GB，算法运行环境均为 Matlab 2019a，实验数据采用 Dai 等[11]和回丙伟等[19]所整理的红外单帧图像数据对算法性能进行分析。为避免场景重复，本文将复杂背景的红外图像分为 4 个测试序列，分别为云层背景、海天背景、地面背景和山地背景，表 1 给出了序列中目标与背景的详细信息。

**表 1　测试序列详细信息**

| 分组 | 序列 1 | 序列 2 | 序列 3 | 序列 4 |
|---|---|---|---|---|
| 背景类型 | 云层背景 | 海天背景 | 地面背景 | 山地背景 |
| 图像数目 | 189 | 177 | 799 | 1 099 |
| 目标尺寸 | 3×2～7×9 | 3×3～9×5 | 3×4～4×6 | 2×2～4×4 |
| 目标数 | 1～3 | 1～3 | 1 | 2 |
| 背景细节 | 絮状云、横带云和片状亮斑 | 海杂波和海天交接强边缘 | 草丛、农田、灌木和丛林 | 森林、岩石及不规则建筑 |

云层背景中存在多种云层相互覆盖，以絮状云和带状云为主，存在较多的暗空洞；海天背景中存在海天与空天交界处的强边缘，也存在高亮的海杂波；地面背景内容最为复杂，包括杂草、农田和灌木等覆盖物，也存在成像为暗状斑点的小片丛林；山地背景中存在诸多山脉和道路等不规则建筑，即包含高亮点噪也包括强边缘。需要说明的是，本文是针对复杂背景下的红外小目标检测进行讨论，对于数据集中存在的净空背景，也选取了代表性的图像进行归类测试。

### 2.2　评价指标

本文使用信噪比增益（Signal to Clutter Ratio Gain，SCRG）和背景抑制因子（Background Suppression Factor，BSF）对算法的目标增强能力和背景抑制能力进行评估，SCRG 越大表明算法对目标的增强能力越强，BSF 越大表明复杂背景的抑制能力越强，其表达式分别为：

$$SCR = \frac{|\mu_T - \mu_B|}{\sigma_B} \tag{14}$$

$$SCRG = \frac{SCR_{in}}{SCR_{out}} \tag{15}$$

$$BSF = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \tag{16}$$

式中，$\mu_T$，$\mu_B$ 和 $\sigma_B$ 分别为目标区域灰度均值、邻域背景灰度均值和邻域背景的灰度标准差；$SCR_{in}$ 和 $SCR_{out}$ 分别代表算法处理前后图像的信噪比；$\sigma_{in}$ 和 $\sigma_{out}$ 分别代表算法处理前后的图像灰度标准差。

检测率 $P_d$ 和虚警率 $P_f$ 可以对算法检测的准确率进行定量分析，其定义分别为：

$$P_d = \frac{\text{正确检出的目标数}}{\text{真实目标总数}} \tag{17}$$

$$P_f = \frac{\text{错误检出的目标数}}{\text{图像中总的像素数目}} \tag{18}$$

### 2.3　检测效果与性能分析

为了验证本文所提算法的检测性能，选用 RLCM，MPCM，HB-MLCM[20]，DNGM，DLCM，TLLCM[21]和 TTLDM[22]作为对比算法，测试时，图像均缩放至 256×256 分辨率，图 6～9 展示了 4 组测试序列中对某一帧图像的检测效果。

实验结果表明，MPCM 对高亮背景的抑制效果良好，但是对条状及絮状云层和空洞噪声敏感，容易产生虚警，而且对目标的增强程度不足；HB-MCLM 引入了高提升滤波器，同时也将高斯噪声进行放大，对杂波噪声敏感；DNGM 同样未针对小目标进行增强，而且该算法也没有利用小目标的弥散方向性进行检测，建筑上的高亮斑点易被误检为小目标；DLCM 对强边缘噪声敏感，边缘噪声响应度接近甚至超过小目标，对后续的阈值分割带来影响；TLLCM 引入的匹配滤波，对图像中的粒状噪声和高亮点噪敏感；TTLDM 没有结合小目标的对角特性，易将丛林及灌木中的杂波误检为小目标。本文所提出的检测算法能够充分抑制杂波、强边缘和噪声，在各种复杂场景中的鲁棒性优于对比算法。表 2 给出了不同算法处理后的平均信噪比增益 $\overline{SCRG}$，表 3 给出了不同算法处理前后的平均背景抑制因子 $\overline{BSF}$。本文算法处理后的 $SCRG$ 和 $BSF$ 均优于对比算法，可以有效抑制复杂背景中的噪声和杂波，有良好的抗干扰能力，也会对小目标区域的响应度进

行增强，提升小目标区域的辨识能力。

为衡量算法的检测准确率，本文绘制了以 $P_f$ 为横轴，$P_d$ 为纵轴的受试者工作特性（Receiver Operating Characteristic，ROC）曲线，在 ROC 曲线上，在$P_f$相同的情况下，$P_d$越高，算法检测准确度越高，图 10 给出了不同算法检测的 ROC 曲线。从图中可见，在云层和海天等存在净空区域较多的红外图像中，各类算法都能有较好的检出性能，在含有诸多复杂杂波的背景下，本文算法仍能保持优异的检出性能，表现出更强的鲁棒性。

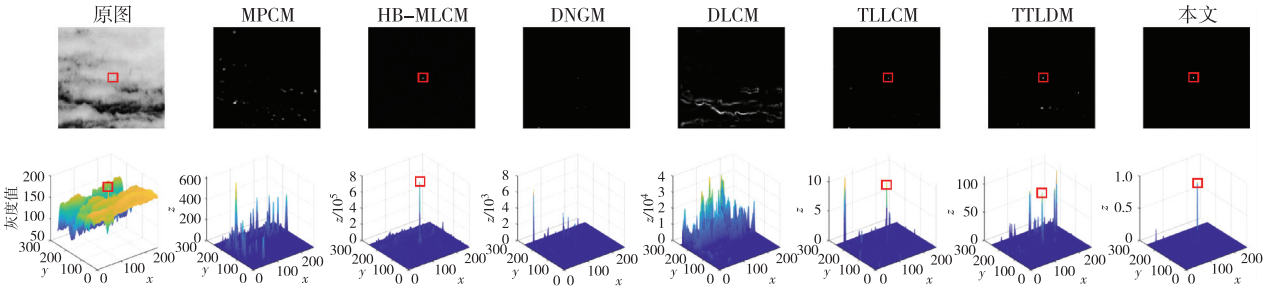



图 6 云层背景

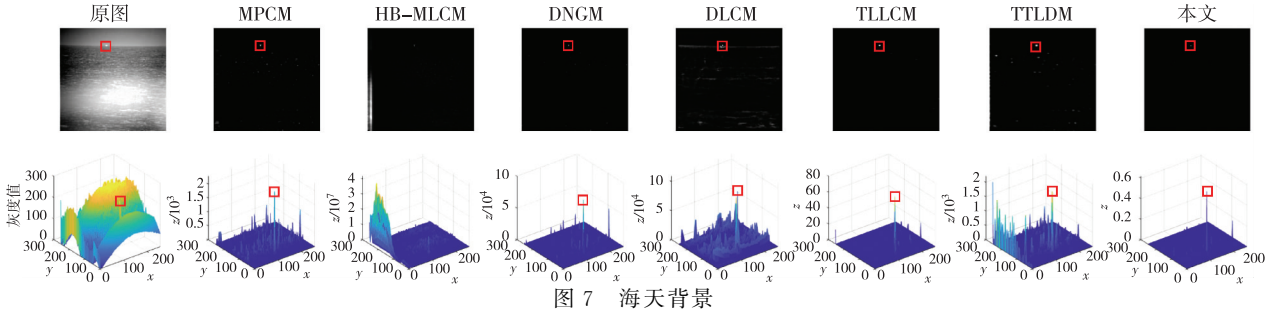



图 7 海天背景

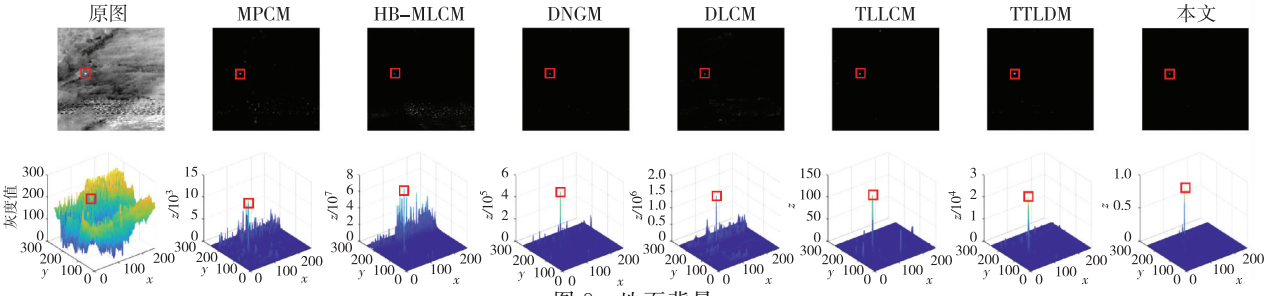



图 8 地面背景

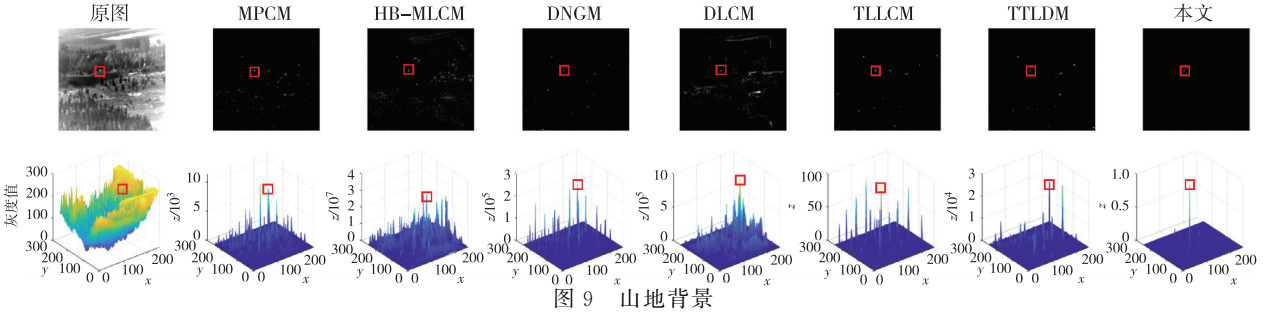


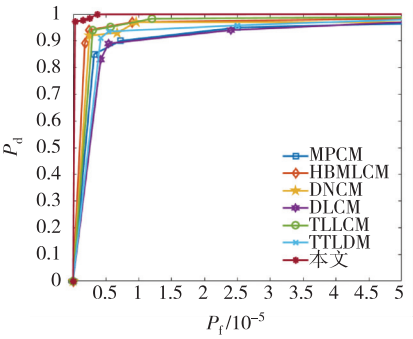

图 9 山地背景

表 2 不同算法处理后的$\overline{SCRG}$

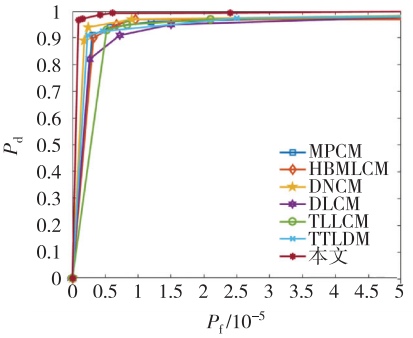
| 算法 | 序列 1 | 序列 2 | 序列 3 | 序列 4 |
|---|---|---|---|---|
| MPCM | 109.34 | 54.81 | 28.36 | 20.67 |
| HB-MLCM | 160.73 | 93.59 | 34.61 | 202.65 |
| DNGM | 86.54 | 167.37 | 54.77 | 270.78 |
| DLCM | 103.50 | 106.41 | 60.76 | 293.43 |
| TLLCM | 123.46 | 180.43 | 104.21 | 310.32 |
| TTLDM | 96.43 | 143.56 | 145.32 | 318.76 |
| 本文 | 215.85 | 363.67 | 195.34 | 420.32 |

表 3 不同算法处理后的$\overline{BSF}$

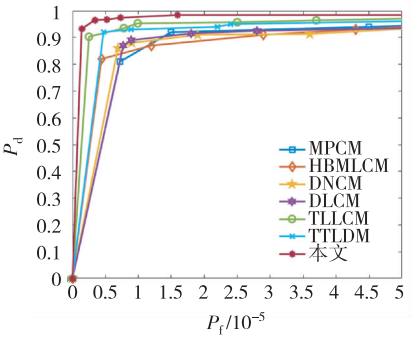
| 算法 | 序列 1 | 序列 2 | 序列 3 | 序列 4 |
|---|---|---|---|---|
| MPCM | 1.21 | 1.77 | 0.19 | 0.24 |
| HB-MLCM | 0.06 | 0.05 | 0.01 | 0.03 |
| DNGM | 11.44 | 4.03 | 0.44 | 1.07 |
| DLCM | 0.44 | 0.18 | 0.04 | 0.17 |
| TLLCM | 134.29 | 91.08 | 34.92 | 31.93 |
| TTLDM | 12.27 | 9.39 | 5.70 | 6.26 |
| 本文 | 3 911.46 | 4 673.79 | 5 838.63 | 3 349.72 |



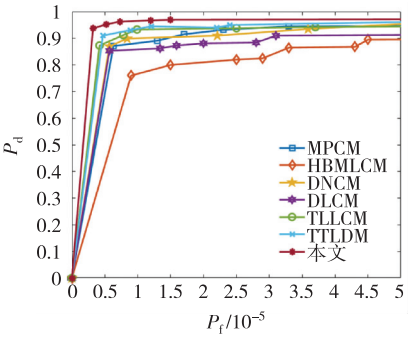

(a) 云层背景




(b) 海天背景




(c) 地面背景




(d) 山地背景

图 10　ROC 曲线

本文对四组单帧序列的算法处理平均时长进行统计，以衡量本文算法的时间复杂度，表 4 给出了不同算法的单帧处理时长。在对比的 6 种算法中，DNGM 的处理时长最短，TLLCM 由于存在较大规模的排序，处理时长最长，本文算法缩小了排序范围降低了处理时长，算法的处理时长与多尺度运算的 MPCM 接近。尽管本文算法的时间效率在对比算法中不是最优，但在复杂背景下的性能仍具有实际的应用价值。

**表 4　不同算法单帧处理平均时长(单位:ms/frame)**

| 算法 | 序列 1 | 序列 2 | 序列 3 | 序列 4 |
|---|---|---|---|---|
| MPCM | 64.27 | 37.43 | 39.91 | 45.47 |
| HB-MLCM | 22.77 | 11.53 | 11.69 | 13.07 |
| DNGM | 13.79 | 3.87 | 4.24 | 5.05 |
| DLCM | 15.69 | 5.76 | 6.94 | 9.36 |
| TLLCM | 256.38 | 289.61 | 280.91 | 276.40 |
| TTLDM | 14.14 | 7.29 | 6.87 | 7.26 |
| 本文 | 66.23 | 60.76 | 65.22 | 67.62 |

## 3　结论

本文提出了一种单尺度的双邻域局部权重红外小目标单帧检测算法。该算法设计了扩大对比范围的双邻域窗口，利用红外小目标的弥散方向性对均匀背景及干扰杂波进行抑制。同时，还利用目标与背景区域的灰度突变性和分布均匀度，对小目标进行针对性增强。生成的方向信息特征图和权重系数增强图优势互补，经权重融合后生成目标显著图。最后，采用自适应阈值分割提取真实目标，在四组不同背景的检测序列中，与六种主流对比度算法进行对比得出，本文算法的检测精度高，背景抑制和目标增强能力优异。此外，多目标场景下阈值分割选取是有价值的后续研究工作。

**参考文献：**

[1] 任向阳，王　杰，马天磊，等. 红外弱小目标检测技术综述[J]. 郑州大学学报(理学版)，2020，52(2)：1-21.
Ren Xiangyang，Wang Jie，Ma Tianlei，et al. Review on infrared dim and small target detection technology[J]. Journal of Zhengzhou University：Natural Science Edition，2020，52(2)：1-21.

[2] 李俊宏，张　萍，彭真明，等. 红外弱小目标检测算法综述[J]. 中国图象图形学报，2020，25(9)：1739-1753.
Li Junhong，Zhang Ping，Peng Zhenming，et al. Infrared small-target detection algorithms：A survey[J]. Journal of Image and Graphics，2020，25(9)：1739-1753.

[3] Liu D，Cao L，Li Z，et al. Infrared small target detection based on flux density and direction diversity in gradient vector field[J]. IEEE J. Sel. Top. in Appl. Earth Obs. and Remote Sens.，2018，11(7)：2528-2554.

[4] Qiu Z，Ma Y，Fan F，et al. A pixel-level local contrast measure for infrared small target detection[J]. Defence Technol.，2022，18(9)：1589-1601.

[5] Wang X，Lv G，Xu L. Infrared dim target detection based on visual attention[J]. Infrared Phys. Technol.，2012，55(6)：

513-521.

[6] Kim S, Yang Y, Lee J, et al. Small target detection utilizing robust methods of the human visual system for IRST[J]. J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, 2009, 30(9): 994-1011.

[7] Tom V T, Peil T, Leung M, et al. Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds [J]. Proc. of SPIE, 1993, 1954: 2-11.

[8] Deshpande S D, Er M H, Ronda V, et al. Max-mean and Max-median filters for detection of small-targets[J]. Proc. of SPIE, 1999, 3809: 74-83.

[9] Zhang Z, Ren J, Li S, Hong R, et al. Robust subspace discovery by block-diagonal adaptive locality-constrained representation[C]// Proc. of the 27th ACM International Conference on Multimedia, 2019: 1569-1577.

[10] Guo J, Wu Y, Dai Y. Small target detection based on reweighted infrared patch image model [J]. IET Image Process., 2018, 12(1): 70-79.

[11] Dai Y, Wu Y, Zhou F, et al. Asymmetric contextual modulation for infrared small target detection[C]// IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 2021: 950-959.

[12] Li B, Xiao C, Wang L, et al. Dense nested attention network for infrared small target detection[J]. IEEE Trans. Image Process., 2022.

[13] Chen Y, Li L, Liu X, et al. A multi-task framework for infrared small target detection and segmentation[J]. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens., 2022, 60: 1-9.

[14] 邵 斌, 杨 华, 朱 斌, 等. 基于实时语义分割的红外小目标检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(14): 1410006.
Shao Bin, Yang Hua, Zhu Bin, et al. Infrared small target detection algorithm based on real-time semantic segmentation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(14): 1410006.

[15] Wei Y, You X, Li H. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection [J]. Pattern Recognition, 2016, 58: 216-226.

[16] Han J, Liang K, Zhou B, et al. Infrared small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure[J]. IEEE Geosci. and Remote Sens. Lett., 2018, 15(4): 612-616.

[17] Wu L, Ma Y, Fan F, et al. A double-neighborhood gradient method for infrared small target detection[J]. IEEE Geosci. and Remote Sens. Lett., 2021, 18(8): 1476-1480.

[18] 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): 0110003.
Pan Shengda, Zhang Su, Zhao Ming, et al. Infrared small target detection based on double-layer local contrast measure [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(1): 0110003.

[19] 回丙伟, 宋志勇, 范红旗, 等. 地/空背景下红外图像弱小飞机目标检测跟踪数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2020, 5(3): 291-302.
Hui Bingwei, Song Zhiyong, Fan Hongqi, et al. Infrared image weak aircraft target detection and tracking dataset under ground/air background[J]. Chinese Science Data: Chinese and English Online Version, 2020, 5(3): 291-302.

[20] Shi Y, Wei Y, Yao H, et al. High-boost-based multiscale local contrast measure for infrared small target detection[J]. IEEE Geosci. and Remote Sens. Lett., 2017, 15(1): 33-37.

[21] 韩金辉, 董兴浩, 蒋亚伟, 等. 基于局部对比度机制的红外弱小目标检测算法[J]. 红外技术, 2021, 43(4): 357-366.
Han Jinhui, Dong Xinghao, Jiang Yawei, et al. Infrared small dim target detection based on local contrast mechanism [J]. Infrared Technology, 2021, 43(4): 357-366.

[22] 穆 靖, 李伟华, 饶俊民, 等. 采用三层模板局部差异度量的红外弱小目标检测[J]. 光学精密工程, 2022, 30(7): 869-882.
Mu Jing, Li Weihua, Rao Junmin, et al. Infrared small target detection using tri-layer template local difference measure[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(7): 869-882.

## 作者简介:

**李守昌**(1999—),男,山东省人,硕士,主要研究方向为红外图像处理;

**吴滢跃**(1985—),男,浙江省人,博士,副研究员,主要研究方向为红外视频信号处理和伺服控制。