

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-16

基于新型 Top-hat 和小波变换的红外弱小目标检测

申晓茹^{1,2}, 常霞^{1,2*}, 张群^{1,2}

(1. 北方民族大学 数学与信息科学学院, 宁夏 银川 750021;
2. 宁夏智能信息与大数据处理重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要:针对红外弱小目标图像中存在的目标信号强度低、尺寸小、易受噪声干扰以及背景杂波复杂等问题,本文提出了一种结合新型形态学 Top-hat 算子与小波变换的红外弱小目标检测方法。首先,利用改进的形态学滤波对红外图像进行初步背景抑制,以减少云层、地物起伏及局部强杂波对目标检测的干扰。其次,对预处理后的图像进行小波分解,并对低频分量使用局部梯度与局部强度算法进行背景抑制和目标增强,同时将三个高频分量进行累加,进一步增强目标点的特征信息,接着将增强后的高频信息与低频信息进行融合,实现多尺度、多频域联合增强。最后,通过自适应门限阈值分割方法提取红外弱小目标。实验结果表明,所提方法在信杂比增益(SCRG)上达到最优,在背景抑制系数(BSF)上仅次于 PTCTV 算法,整体性能优于其他对比方法。其中,在 Seq6 上 SCRG 和 BSF 分别为 14.16 和 82.49。在 ROC 曲线中,本文方法在 Seq3、Seq5 和 Seq6 的性能均超过 95%,充分验证了该算法在复杂场景下能够有效抑制背景和噪声,具有较强的稳定性和鲁棒性。

关键词:红外弱小目标检测;背景抑制;小波变换;局部梯度和局部强度;自适应门限阈值分割

中图分类号:TP391 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2026-0092 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0092

Infrared dim small target detection based on new Top-hat and wavelet transform

SHEN Xiaoru^{1,2}, CHANG Xia^{1,2*}, ZHANG Qun^{1,2}

(1. School of Math and Information Science, North Minzu University, Yinchuan 750021, China;
2. The Key Laboratory of Intelligent Information and Big Data Processing of Ningxia Province, Yinchuan 750021, China)

Abstract: According to the characteristics of infrared dim small target image, such as low signal strength, small size, susceptible to noise interference and complex background clutter, this paper proposes a new infrared dim and small target detection method based on the combination of a new morphological Top-hat operator and wavelet transform. Firstly, the improved morphological filtering was used to suppress the background of the infrared image, so as to reduce the interference of clouds, ground cover fluctuation and

收稿日期:2026-05-21;修订日期:2026-06-18.

基金项目:宁夏自然科学基金(No.2025AAC030002);宁夏高等教育一流学科建设基金(No.NXYLXK2017B09);北方民族大学研究生创新项目(No.NCYX25121)

Supported by the Natural Science Foundation of Ningxia (No.2025AAC030002); Construction Project of First-Class Disciplines in Ningxia Higher Education (No.NXYLXK2017B09); Graduate Innovation Program of North Minzu University for Nationality (No.CYX25121)

*通信联系人, E-mail:changxia0104@163.com

local strong clutter on target detection. Secondly, the preprocessed image was decomposed by wavelet, and the low frequency component was used for background suppression and target enhancement by using the Local Gradient and Local Intensity algorithm. At the same time, the three high frequency components were accumulated to further enhance the feature information of the target point. Finally, the infrared dim and small target was extracted by adaptive threshold segmentation method. The experimental results show that the proposed method achieves the optimal Signal-to-Clutter Ratio Gain (SCRG), second only to the PTCTV algorithm in the Background Suppression Factor (BSF), and the overall performance is better than other comparison methods. Among them, SCRG and BSF on Seq6 are 14.16 and 82.49, respectively. In the ROC curve, the detection rate of the proposed method in Seq3, Seq5 and Seq6 is more than 95%, which fully verifies that the algorithm can effectively suppress background and noise in complex scenes, and has strong stability and robustness.

Key words: infrared small target detection; background suppression; wavelet transform; local intensity and gradient; adaptive threshold segmentation

1 引言

随着计算机与红外成像技术的飞速发展,红外弱小目标检测已成为红外搜索跟踪系统不可或缺的核心技术,在制导、预警、机载、雷达和监控等领域具有广泛的应用价值。然而,红外弱小目标尺寸小、亮度低、缺乏纹理信息,当目标距离探测器较远或成像条件较差时,其在图像中往往仅表现为少量像素点。同时,受大气散射、吸收以及背景地物起伏、云层遮挡和局部强杂波等因素影响,目标信号易被复杂背景淹没,增加了准确检测的难度^[1]。

近年来,针对红外弱小目标检测问题,国内外学者提出了多种方法,主要包括基于人类视觉机制(HVS)的检测方法、基于稀疏与低秩表示的方法^[2]以及基于滤波器的检测算法。基于HVS的方法通常通过局部对比度^[3]、视觉显著性图^[4]以及多特征融合等方式增强目标与背景之间的差异,从而提高检测性能。Chen等人^[5]受视觉系统局部对比机制的启发,提出了一种基于局部对比度(LCM)的红外弱小目标检测方法,通过度量目标与邻域之间的差异构建对比度图像,在一定程度上提升了目标显著性。然而,该类方法在复杂背景下往往容易受到局部强杂波的干扰,检测效果受到限制。Jiang等人^[6]针对固定窗口难以适应不同尺寸目标的问题,提出了基于自适应窗口的局部对比度测量方法,通过动态调整窗口形状来提高目标显著性。此外,该方法引入定向扇

区局部对比计算,有效优化了背景区域的特征统计方式,大幅提高了检测准确率。随后,Zhang等人^[7]提出了高斯加权多尺度方法,通过相关系数约束多尺度特征选择,增强背景抑制能力并改善了多尺度检测性能。Liu等人^[8]提出了具有因子先验的非凸张量检测模型,以提升算法的鲁棒性。

基于滤波器的方法因计算开销较小、实现简单、适合实时处理而受到广大学者的关注。此类方法通过设计特定滤波器来抑制背景噪声并增强目标信号,如顶帽变换(Top-Hat)^[9]、最大中值滤波器^[10]以及二维最小均方滤波器^[11]等。Xu等人^[12]提出了次最大滤波与局部强度加权梯度方法,通过最大8邻域次极大值滤波器降低高亮噪声,并结合强度与梯度信息增强目标。然而,在复杂背景或低信杂比场景下,该方法仍会出现虚警。数学形态学方法能够较好地提取目标的形状特征,有效滤除噪声,但对于强起伏背景和局部杂波的鲁棒性仍然有限。基于此,苏等人^[13]结合数学形态学滤波与中值滤波进行时间剖面分析,从而抑制复杂背景的干扰,但其对参数依赖较强且计算复杂度较高。白等人^[14]提出了一种新型 Top-hat 变换方法,通过设计环形结构元素并结合多尺度策略,不仅可以抑制噪声,还能更好地保留图像细节,为复杂背景下的红外弱小目标检测提供了新的思路。饶等人^[15]则从聚类角度出发,利用形态学预处理生成密度特征图,并结合改进的密度峰值聚类算法实现目标检测。

尽管上述方法在一定程度上提高了检测准确率,但在复杂背景和强噪声条件下,仍会将背景杂波或强噪声误判为目标,导致检测性能下降。

小波变换具有良好的时频局域化特性,能够对图像进行多尺度分解,从而实现对目标特征的逐层分析。红外弱小目标通常表现为局部点状奇异性,适合通过小波分解在不同尺度上进行捕获与增强。然而,小波变换在突出目标高频信息的同时,也会将部分背景杂波和噪声一起放大,尤其在复杂场景下可能会影响最终检测性能。另一方面,小波分解后的低频分量包含了图像的整体结构和主要背景信息,若能在低频子带进一步实现背景抑制与局部对比增强,将有助于提高后续目标检测的稳定性。

基于上述分析,本文提出了一种结合新型形态学 Top-hat 算子与小波变换的红外弱小目标检测方法。针对红外弱小目标尺度小、局部显著、背景复杂且易受噪声干扰的成像特点,本文构建了一个前端背景抑制、多尺度特征增强以及自适应阈值分割的协同检测框架。首先,利用新型 Top-hat 算子对红外图像中的大尺度背景、云层起伏及局部强杂波进行初步抑制,减少背景干扰。其次,对预处理后的图像进行小波变换,对低频分量采用局部梯度与局部强度算法(LIG)^[16]进行背景抑制和目标增强,同时对三个高频分量进行累加,进一步突出目标点的奇异性特征。随后将融合处理后的低频与高频信息进行多尺度、多频域联合增强。最后,通过自适应门限阈值分割方法提取红外弱小目标。实验结果表明,所提方法在复杂背景下具有较好的背景抑制能力和目标增强效果,能够有效提高红外弱小目标的检测鲁棒性。

2 算法原理

2.1 红外弱小目标图像特性

单帧红外弱小目标图像通常包含三个主要组成部分,即目标部分、背景部分和噪声部分。可以表示为:

$$f(x, y) = t(x, y) + b(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

其中, $t(x, y)$ 表示目标部分, $b(x, y)$ 表示背景部分, $n(x, y)$ 表示噪声部分。红外图像中弱小目标

可以由点状目标的数学模型来描述,即:

$$s(x, y) = \tau \cdot \exp \left\{ - \left[\left(\frac{x}{\delta_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\delta_y} \right)^2 / 2 \right] \right\}, \quad (2)$$

其中, τ 为目标的灰度值, δ_x, δ_y 为目标在图像中宽度和高度方向的尺寸。

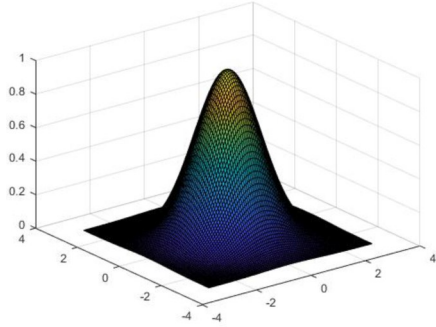


图1 点状目标三维图

Fig. 1 3D figure of point target

这个模型表明,点状目标在红外图像中的亮度分布呈高斯分布,其三维图如图1所示。目标的能量是以点源形式向外扩散的,难以获取用于识别的颜色与结构信息。其次,目标和其周边的局部背景之间,存在着明显的对比度差异。在局部区域里,目标一般体现为灰度值的极大值或者极小值。在局部范围内,目标的灰度值往往是最高的,具备突出的局部特征,在周边环境中较为显眼^[17]。且其在水平和垂直方向上的尺度一致,体现了点状目标的各向同性特性。这对于识别和检测红外图像中的点状目标具有重要意义。

2.2 新型顶帽变换

形态学滤波是一种非线性图像处理方法,其核心原理是利用一个适当大小的结构元素对原始图像进行开运算,从而去除图像中的大尺度结构并突出局部亮点目标。与传统 Top-hat 算子相比,新型 Top-hat 方法在复杂背景下具有更好的适应性。传统方法通常依赖单一结构元素的设定,若结构元素过大,容易造成目标细节的丢失;若结构元素过小,则难以有效抑制背景干扰。新型 Top-hat 变换^[14]则利用两个形状相同但尺度不同的扁平结构元素 B_i 和 B_o ,通过构造环状边缘区域,实现对背景信息的差异化抑制,在增强目标响应的同时提升背景抑制能力。定义红外图像 $f(x, y)$ 和结构元素的开运算为:

$$f \cdot B_{oi}(x, y) = (f \oplus \Delta B) \ominus B_b, \quad (3)$$

其中, B_{oi} 为 B_i 跟 B_o 和有关的元素, $\Delta B = B_o - B_i$ 为 B_i 和 B_o 之间的环状边缘区域, B_b 是介于 B_i 和 B_o 的形状相同的扁平结构元素。则新型 Top-hat 变换定义如下:

$$NWTH(x, y) = f(x, y) - f \cdot B_{oi}(x, y). \quad (4)$$

新型 Top-hat 变换利用两个不同尺度结构元素之间的差异构造环状区域,使得背景抑制不再局限于单一尺度,而是能更准确地刻画局部背景的空间变化。当背景区域具有缓变特性或存在局部强边缘时,较大的结构元素能够更充分地逼近背景,而较小的结构元素则有助于保留目标附近的局部亮点信息。二者结合后,可以增强对大尺度背景的滤除能力,同时降低对小目标的过度平滑,从而实现更精确的目标保留与背景抑制。此外,开运算能够滤除比结构元素尺度更小的孤立噪声和局部细节,从而去除背景中的小幅扰动。而环形结构元素能够利用不同尺度之间的差异对目标周围背景进行建模,使得与目标尺度不匹配的背景成分被抑制,与目标尺度相近的亮点区域得以保留。

2.3 小波变换

小波变换是一种多尺度信号分析方法,通过尺度函数(父小波)和小波函数(母小波)的平移与伸缩,实现对信号的时频局部分解。二维小波基函数

通过一维基函数的张量积构造,一般都包含一个二维尺度函数 $\varphi(x, y)$ 和 3 个二维小波: $\psi^H(x, y)$, $\psi^V(x, y)$ 和 $\psi^D(x, y)$ 。它们的表达式分别为:

$$\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y), \quad (5)$$

$$\psi^H(x, y) = \psi(x)\varphi(y), \quad (6)$$

$$\psi^V(x, y) = \varphi(x)\psi(y), \quad (7)$$

$$\psi^D(x, y) = \psi(x)\psi(y). \quad (8)$$

上述小波可以衡量图像中不同方向上的像素灰度变化情况: ψ^H 、 ψ^V 、 ψ^D 分别提取水平方向、垂直方向和对角线方向上信号的显著特征。

对于大小为 $m \times n$ 的图像 $f(x, y)$ 。其在 i 尺度下小波变换近似值为:

$$W_\varphi(i, m, n) = \frac{1}{\sqrt{mn}} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) \varphi_{i, m, n}(x, y). \quad (9)$$

水平、垂直和对角上的细节值分别为:

$$W_\psi^H = \frac{1}{\sqrt{mn}} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) \psi_{i, m, n}^H(x, y), \quad (10)$$

$$W_\psi^V = \frac{1}{\sqrt{mn}} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) \psi_{i, m, n}^V(x, y), \quad (11)$$

$$W_\psi^D = \frac{1}{\sqrt{mn}} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) \psi_{i, m, n}^D(x, y), \quad (12)$$

其中, W_φ 为低频近似系数,表征图像整体结构; W_ψ^H , W_ψ^V , W_ψ^D 分别为水平、垂直和对角线方向的高频细节系数,捕获边缘及纹理信息。

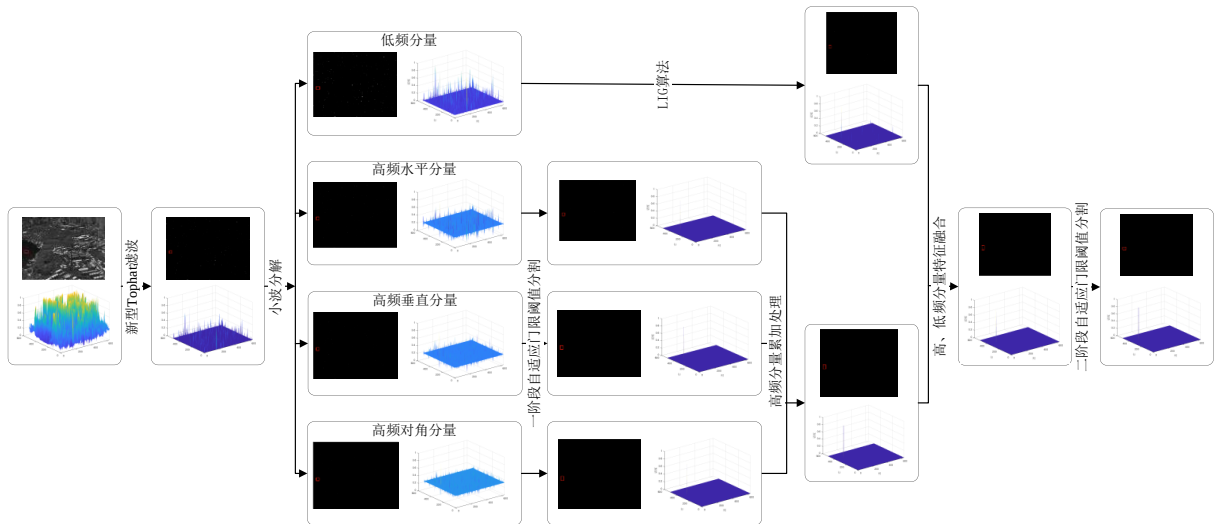


图2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

3 本文算法

3.1 算法整体设计

针对红外弱小目标信号强度低、尺寸小、易受噪声干扰等特点,本文提出了结合新型 Top-hat 和小波变换的红外弱小目标检测方法。首先利用 Top-hat 算法提取目标的形状信息,有效滤除大部分噪声。随后采用小波变换对图像进行多尺度分解,以更好地逼近点状奇异性特征,获取图像的低频和高频分量。在低频图像中利用 LIG 算法对目标点进行深度挖掘和增强,提升目标点的可信度,并抑制背景噪声。考虑到红外弱小目标具有各向同性特征,目标在水平、垂直和对角三个高频子带中均具有显著响应,因此将三

个高频子带进行累加处理,可以有效增强目标。最后,将处理后的低频信息与高频信息进行融合,实现背景抑制和目标增强,并通过自适应门限阈值分割算法对目标点进行提取,获得红外弱小目标检测结果。算法流程图如图 2 所示。

3.2 新型 Top-hat 滤波进行背景抑制

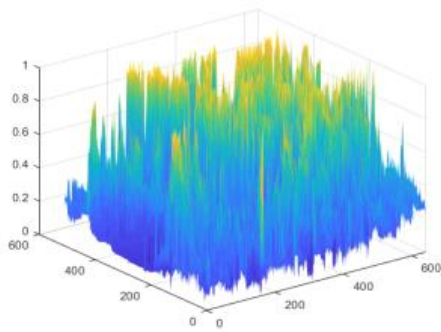
利用新型 Top-hat 变换对输入的原始图像 $f(x, y)$ 进行滤波得到的结果图如图 3 所示。经过 Top-hat 滤波之后,红外图像中的大部分低频信息通常会被过滤掉,但一些背景杂波和强边缘信息依然存在。所以新型 Top-hat 变换方法在红外弱小目标检测中适用于信杂比较高且背景区域相对平滑的图像场景。对于背景复杂,信杂比较低的图像,此方法难以有效检测出红外弱小目标,还需进一步增强目标显著性并抑制背景干扰。



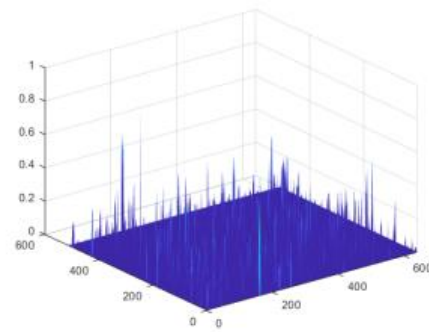
(a)原始红外图像
(a)Original infrared image



(b)新型Top-hat滤波后结果图
(b)Result of new Top-hat filtering



(c)原始红外图像三维强度图
(c)3D intensity map of original infrared image



(d)滤波后三维强度图
(d)3D intensity map after filtering

图 3 新型 Top-hat 变换后的结果图

Fig. 3 The result of the new Top-hat transformation

3.3 小波变换捕捉点状特征

由于目标点的高温特性,红外图像中这些点

的像素值会显著偏高,形成明显的奇异亮点。因此,识别图像中的这些奇异亮点,即可定位红外

弱小目标的位置。Mallat 等人^[18]证实,小波能够有效刻画信号的点状奇异性,且对图像中的突变信号尤为敏感。因此,本文通过小波变换对新型 Top-hat 滤波后的图像进行目标点捕捉。

3.3.1 小波域特性分析

将经过上述形态学滤波得到的输出图像 $NWTH(x, y)$ 作为小波变换的输入图像,其在 i 尺度下的小波变换近似值为:

$$W_{\varphi}(i, m, n) = \frac{1}{\sqrt{mn}} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} NWTH(x, y) \varphi_{i, m, n}(x, y). \quad (13)$$

水平、垂直和对角上的细节值分别为:

$$W_{\psi}^H =$$

$$\frac{1}{\sqrt{mn}} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} NWTH(x, y) \psi_{i, m, n}^H(x, y), \quad (14)$$

$$W_{\psi}^V =$$

$$\frac{1}{\sqrt{mn}} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} NWTH(x, y) \psi_{i, m, n}^V(x, y), \quad (15)$$

$$W_{\psi}^D =$$

$$\frac{1}{\sqrt{mn}} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} NWTH(x, y) \psi_{i, m, n}^D(x, y). \quad (16)$$

小波变换将图像分解为一个低频分量和三个高频分量,如图4所示,低频分量(图4(b))中包含大部分的背景信息、少部分的目标信息以及类似目标的噪声信息。三个高频分量(图4(c)、

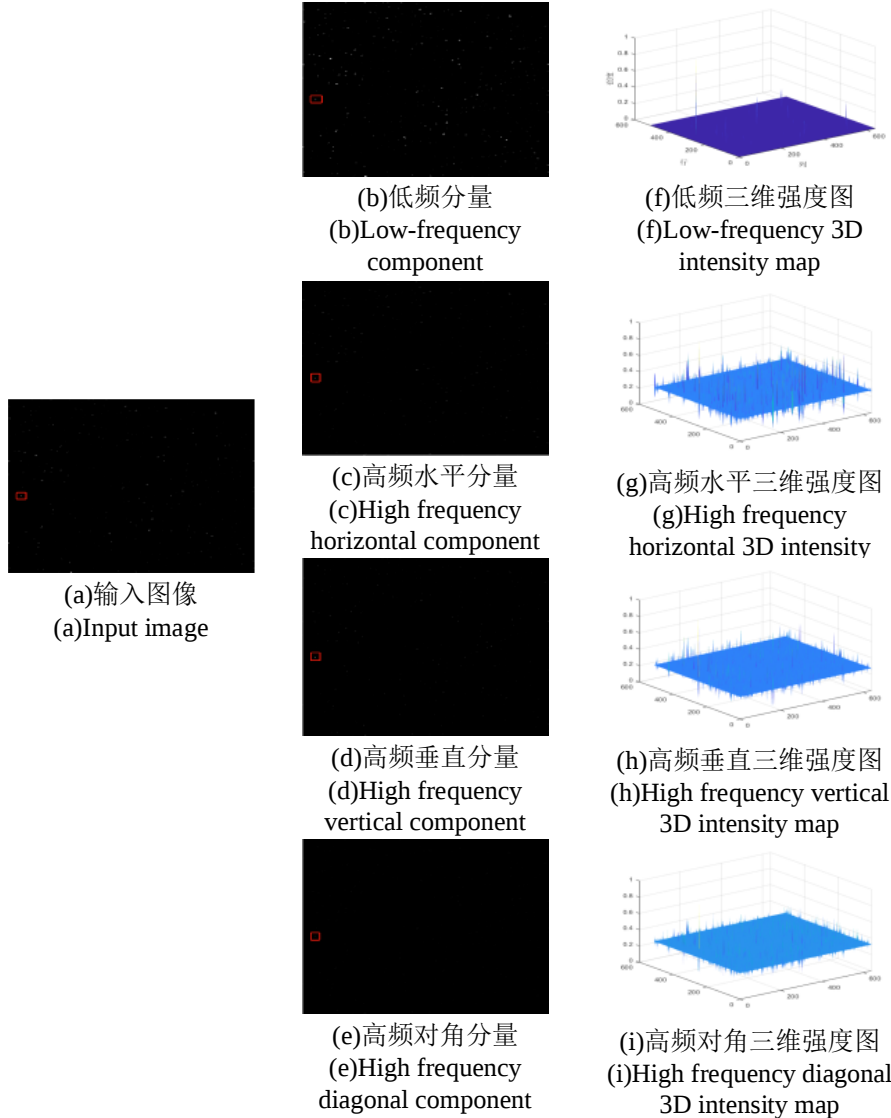


图4 小波分解图

Fig. 4 Wavelet decomposition diagram

图4(d)、图4(e))中则包含大部分的目标信号以及部分类似目标的噪声点。基于此,本文利用局部强度和梯度算法(LIG)对低频分量中的目标点进行提取,并进一步抑制背景。对于高频分量,通过自适应门限阈值分割法去除因噪声导致的无关系数点。接着,将分解得到的高频图像进行叠加汇总,以增强目标点的显著性。该过程的结果是一幅图像,其中既凸显了潜在的目标点,也包含了一定程度的噪声干扰。最后将低频系数分量处理图和高频系数分量累加图进行加权融合,进一步达到背景抑制和目标增强的效果。

3.3.2 低频分量弱小目标检测策略

通过分析发现,真实红外弱小目标的边界与其背景存在显著差异^[19],而LIG算法能够强化这一差异。因此本文采取LIG算法对低频分量中存在的目标信息进行提取。LIG算法的主要流程如下:

步骤一:计算局部强度图。

对于小波分解得到的低频系数图像 $W_{\varphi}(m, n)$ 进行滑窗,假定滑窗大小为 $a \times a$, a 为奇数。滑窗中心点周围的邻域平均强度为:

$$\bar{I} = \frac{1}{a^2 - 1} \left(I_0 - \sum_{x=1}^a \sum_{y=1}^a I(x, y) \right), \quad (17)$$

其中, I_0 为滑窗中心点的灰度值, $I(x, y)$ 为滑窗内任意一点的灰度值。因此,得到局部强度 I 为:

$$I = \max(0, I_0 - \bar{I}). \quad (18)$$

步骤二:计算局部梯度图 G 。

在红外图像中,目标的梯度方向具有各向同性,而背景的梯度向量则不具备这样的规律。基于这一特性,将每个滑动窗口分割为四个扇区,每个扇区覆盖一个角度范围,窗口的中心像素作为极坐标的原点,计算出每个像素相对于中心像素的梯度。再根据弱小目标的特点,选择出满足小目标特点的梯度值。

$$T_{\omega_i} = \left\{ g_{\omega_i}(g, v) \left| \frac{\pi(i-1)}{2} + \pi < \alpha \leq \frac{\pi i}{2} + \pi \right. \right\}, \quad (19)$$

其中, T_{ω_i} 表示满足条件的所有梯度的集合, g_{ω_i} 用来存放区域 ω_i 中的所有梯度。

对于每个扇区,选择出所有满足约束条件的

梯度,将其保留。然后,计算出每个区域内的 g_{ω_i} 的平方幅值均值,计算公式如下:

$$G_i = \frac{1}{N_j} \sum_{j=1}^{N_j} \|g_{\omega_i}^j\|^2, \quad (20)$$

其中, G_i 表示梯度的平方幅值均值, N_j 表示第 j 个扇区满足约束条件的梯度个数。

在得到所有的 G_i 后,它们的最大值和最小值可以用下列公式表示:

$$G_{\max} = \max_{1 \leq i \leq 4} G_i, \quad (21)$$

$$G_{\min} = \min_{1 \leq i \leq 4} G_i, \quad (22)$$

其中, $G_{\max}$ 和 $G_{\min}$ 分别为 G_i 的最大值和最小值。

由上述推导,计算局部梯度图的公式如下所示:

$$G = \begin{cases} \sum_{i=1}^4 G_i, & \text{if } \frac{G_{\min}}{G_{\max}} \geq k, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (23)$$

其中, k 表示阈值。

步骤三:计算输入图像。

将局部强度图 I 和局部梯度图 G 相乘就可以得到输出图像 T_1 , 公式如下:

$$T_1 = I \times G. \quad (24)$$

采用LIG方法对低频图像进行处理,得到初步目标检测结果如图5所示,初步的目标检测结果在目标提取和背景抑制方面表现出良好的效果,但仍存在一定的虚警现象。为此,本文进一步对高频系数图像进行处理,以增强目标特征并进一步抑制背景干扰。最终,通过特征融合的方法,有效降低虚警率,提升目标检测的准确性。

3.3.3 高频分量弱小目标检测策略

经过小波分解后,大部分的目标信息以及部分噪声信息存在于高频分量上,并且噪声的像素值通常小于目标的像素值。对于高频分量,首先采用一阶段自适应门限阈值分割方法,针对每个高频分量设定动态阈值,以识别和剔除由噪声产生的系数点,从而净化高频信息。一阶段自适应门限阈值计算的公式如下:

$$\tau = \mu + k\sigma, \quad (25)$$

其中, τ 为图像的均值, σ 为方差, k 为一个控制系数,取值在30~50之间。

最终高频分量的初步目标检测结果如图6所示。经过分割之后,绝大部分的噪声点都被滤

除。接着对经过阈值分割处理后的各个分量的图像进行叠加汇总,增强高频目标信息。最终得到一个含有目标以及少部分噪声的图像 T_2 :

$$T_2 = \sqrt{H^2 + V^2 + D^2}, \quad (26)$$

其中, H, V, D 分别是水平、垂直和对角分量经过阈值处理后得到的图像。

3.3.4 特征融合与阈值分割

通过充分利用低频分量与高频分量中的互补信息,可以有效提升目标检测的准确性,同时增强背景抑制效果。低频分量主要包含背景信息和部分目标信息,而高频分量则包含目标的细节信息和部分噪声。通过在低频分量中采用局部强度和梯度算法(LIG)提取目标,并在高频

分量中应用阈值分割算法抑制噪声,可以分别增强目标信号和背景抑制效果。然而,仅对单一分量进行处理往往难以实现最优性能。因此,通过对低频分量和高频分量的信息进行特征融合,能够有效结合不同处理方法的优点,进一步强化目标信号、抑制背景干扰。特征融合的公式为:

$$T = T_1 \times T_2. \quad (27)$$

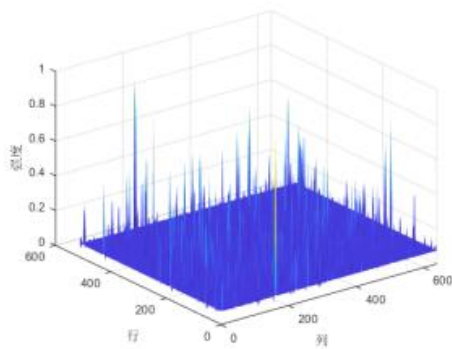
通过特征融合,背景与目标的对比度得到进一步增强,有效降低了背景噪声的干扰。为了更加精确地定位目标,对归一化后的融合图像再次进行自适应门限阈值分割,具体分割方法如公式(25)所示。分割得到的二值化图像作为最终的目标检测结果。



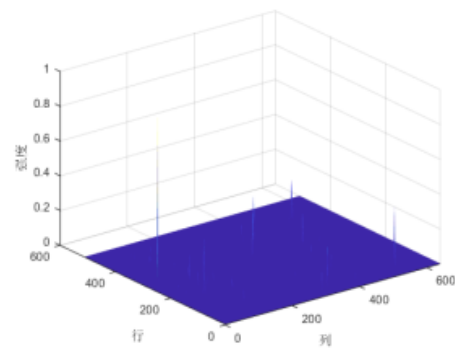
(a)小波分解后的低频图像
(a)Low frequency after wavelet decomposition



(b)初步检测结果
(b)Preliminary detection result



(c)低频三维强度图
(c)Low frequency 3D intensity map



(d)初步检测结果三维强度图
(d)3D intensity map of preliminary detection result

图5 低频分量目标检测结果

Fig. 5 Low-frequency component target detection results

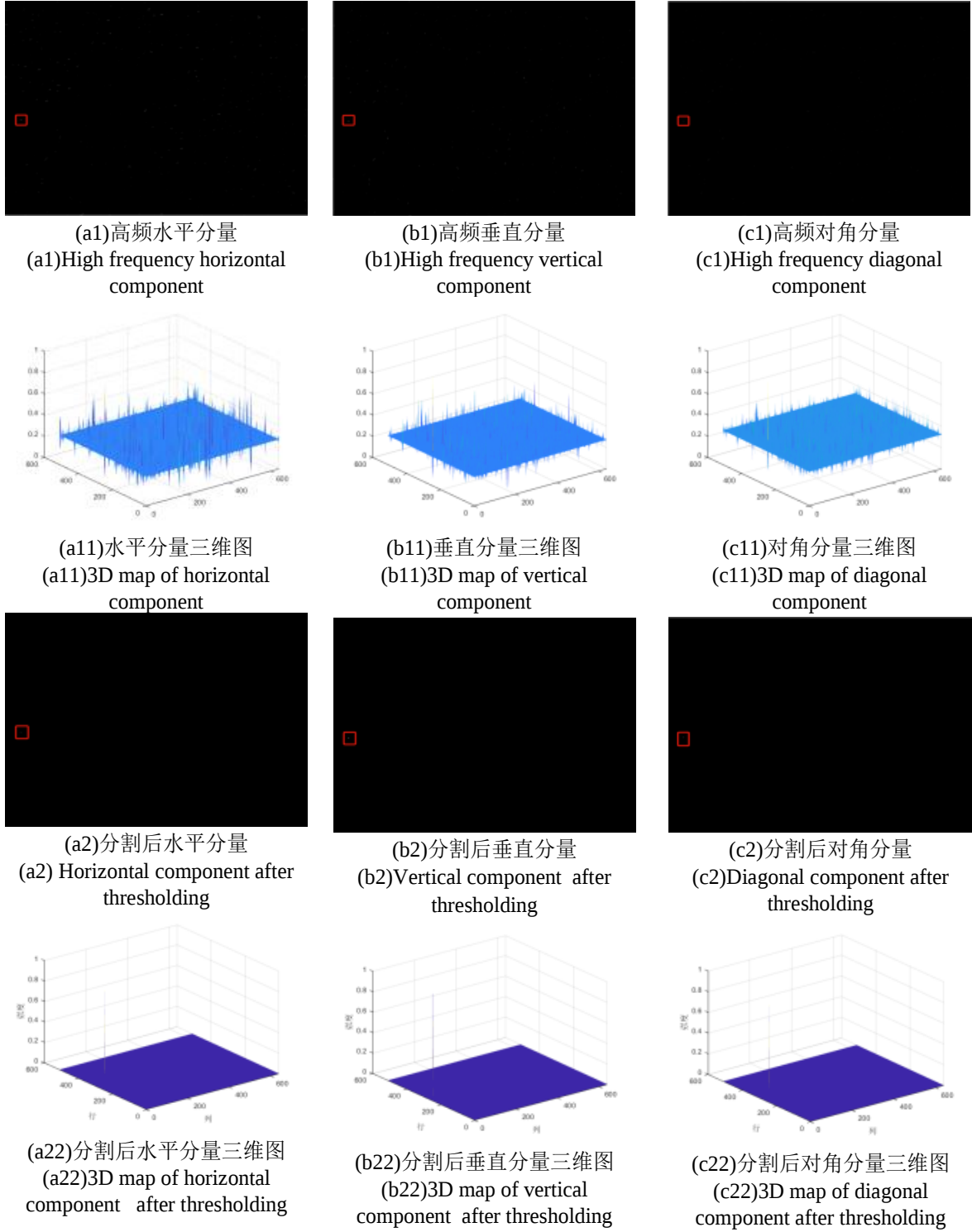


图6 高频分量目标检测结果

Fig. 6 High frequency component target detection results

4 实验结果与分析

为验证本文方法的有效性,在6个红外图像序列^[20]共1 566张红外弱小目标图像上进行实

验,并与LIG算法^[16]、MPCM算法^[21]、TopHat算法^[22]、PSTNN算法^[23]、ADMD算法^[24]和PTCTV算法^[25]6种传统红外弱小目标检测方法进行比较分析。

4.1 实验设置

本文实验在 PC 硬件配置为 Intel(R) Core (TM) i7-10700 CPU 2.90 GHZ 16cores, RAM 16GB 及计算机系统是 window11 64 位的台式电脑上完成。本文采用信杂比增益(SCRG)和背景抑制因子(BSF)对结果进行评估。信杂比增益是对目标增强能力的判定,其值越高说明目标增强效果越好。公式如下:

$$SCR = \frac{|\mu_t - \mu_b|}{\sigma_b}, \quad (28)$$

$$SCRG = \frac{SCR_{out}}{SCR_{in}}, \quad (29)$$

其中, μ_t 和 μ_b 分别是目标像素均值和背景区域像素均值; σ_b 是背景区域标准差; SCR_{in} 和 SCR_{out} 分别是输入和输出图像的信杂比。

背景抑制因子是对背景抑制程度的描述,反映对背景噪声的抑制效果,其数值越高说明效果越好。

$$BSF = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}}, \quad (30)$$

其中, σ_{in} 和 σ_{out} 为原图像和检测后图像的标准差。

4.2 目标显著性响应分析

为直观比较不同算法对红外弱小目标的检测能力,本文将不同算法在同一复杂场景下的全局响应图及目标局部响应结果进行对比分析,如图 7 所示。图中响应强度由深蓝逐渐过渡至黄色,其中黄色区域表示较强响应,对应目标中心位置,而深蓝区域则表明响应较弱,主要反映背景分布情况。全局响应图用于直观反映算法对目标与背景的整体区分能力,其中黄色框标示出虚警较为明显的区域,表明该算法在复杂背景下的抑制能力有限。为进一步观察局部细节,本文对黄色框区域进行了放大展示。局部响应区域则在全局响应图的基础上,以真实目标标注坐标为中心,向上下左右各扩展 8 个像素进行截取,用于观察目标邻域内的响应分布情况,并检验算法能否在真实目标位置形成单一、尖锐且集中的高响应峰值。若局部区域内目标位置出现明显的

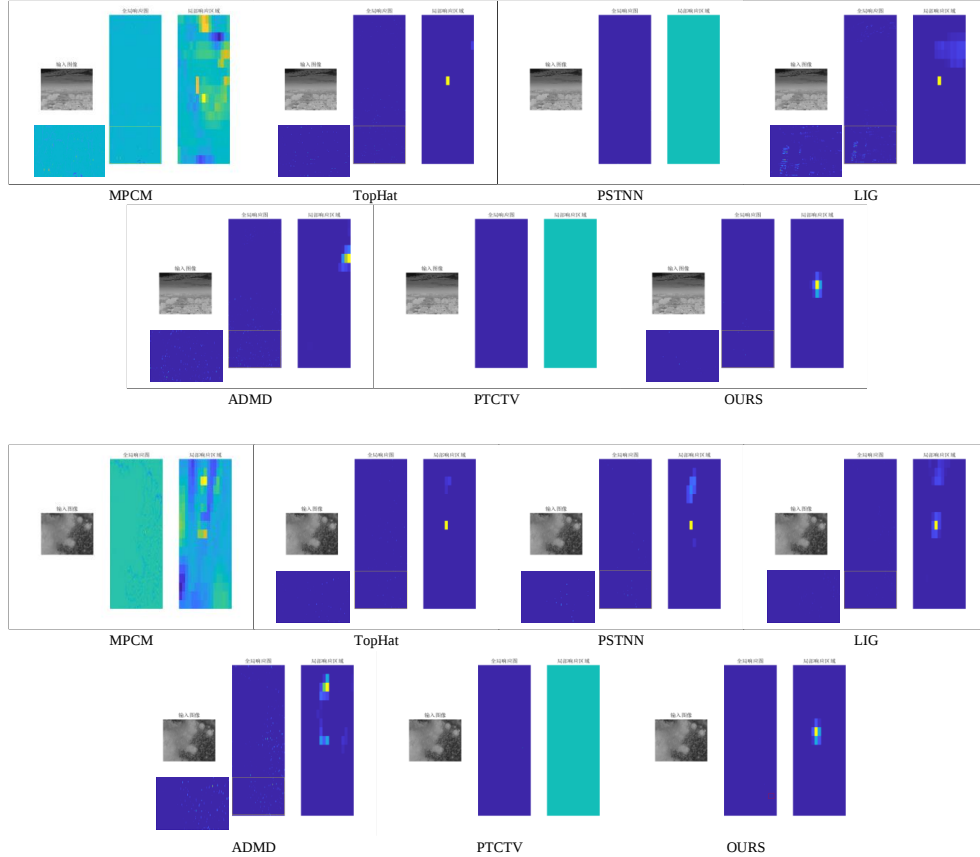


图 7 不同算法的全局响应图及局部响应区域对比

Fig. 7 Comparison of global response maps and local response areas of different algorithms

高响应且背景区域较为平滑,则说明该算法具有较好的目标检测性能。

如图7所示,在第一幅复杂城市俯视场景中,受密集建筑群及云层杂波的干扰,MPCM、PSTNN和PTCTV算法均未能在局部响应区域形成明显目标峰值,表明其目标检测能力有限。TopHat和LIG算法虽能检测到目标,但全局响应图中存在较多背景杂波,说明其背景抑制能力不足。ADMD算法目标定位存在偏差,且虚警较多。相比之下,本文算法不仅能够准确定位目标,而且全局响应图中虚警较少,表现出更强的目标增强与杂波抑制能力。在第二幅复杂云层场景中,MPCM和PTCTV算法同样未能有效检测目标,局部响应区域未出现显著峰值;

TopHat、PSTNN、LIG和ADMD算法虽能一定程度上突出目标,但全局响应图中仍伴随较多杂波虚警。相比之下,本文算法能够在准确检测目标的同时有效抑制背景干扰,全局响应图中无明显虚警,进一步验证了该方法在复杂背景下的检测性能。

4.3 主观评价

为进一步验证所提算法的有效性,在两组复杂背景场景下与六种传统红外弱小目标检测算法进行对比实验,结果如图8和图9所示。红框为正确检测目标,绿框为局部放大图。在图8山地背景中,各对比算法均能检测到目标,但仍存在不同程度的背景杂波残留。相比之下,本文方法能够更有效地抑制背景干扰,增强目标响

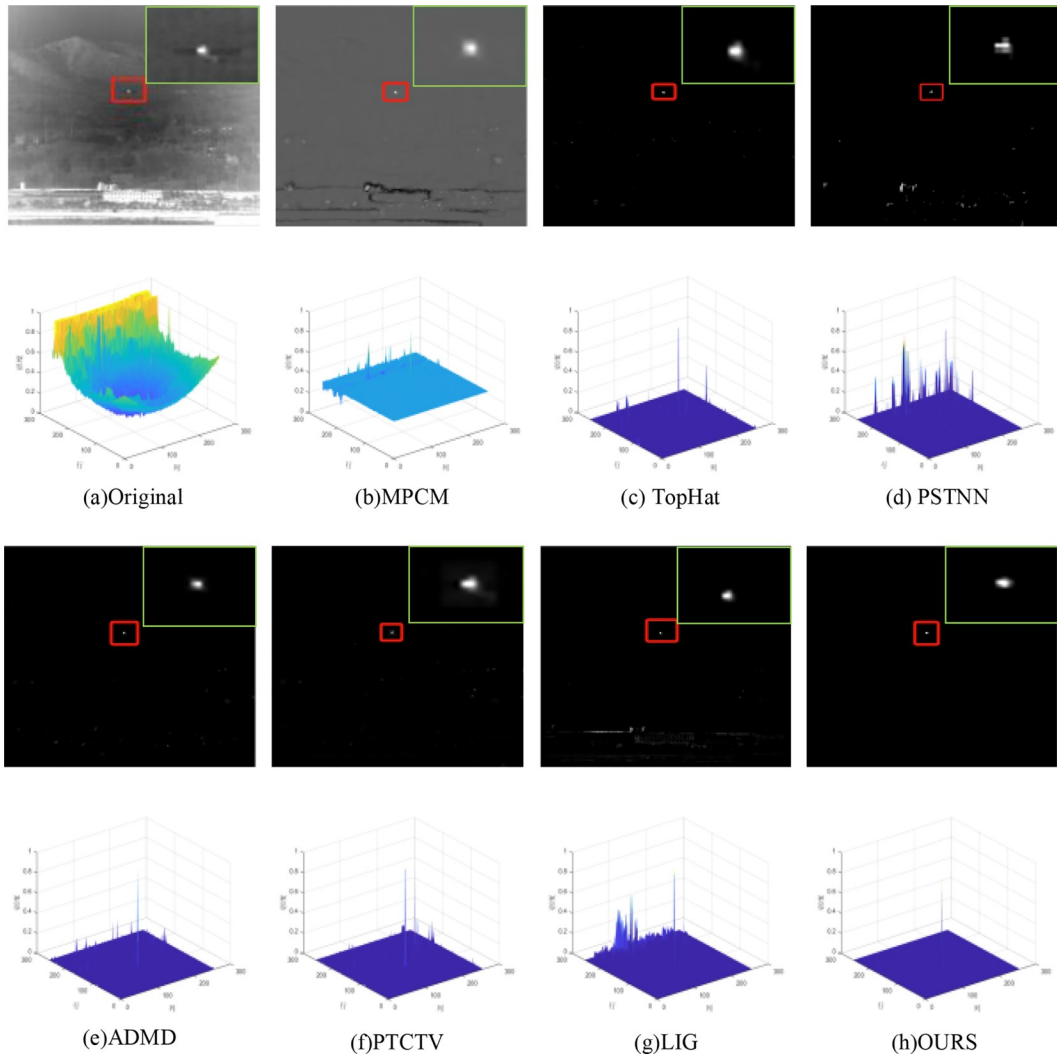


图8 山地背景算法结果对比图

Fig. 8 Mountainous background comparison of algorithm results

应,且对应的3D强度图显示目标峰值更集中、背景更平滑。在图9起伏云层背景下,MPCM和ADMD算法未能有效检测到弱小目标,而TopHat、PSTNN、PTCTV和LIG算法虽能检测

到目标,但仍存在残留的背景杂波。本文方法则在有效抑制背景噪声的同时,较好保留了目标的轮廓与细节信息,使目标区域更加突出、边缘更加清晰。

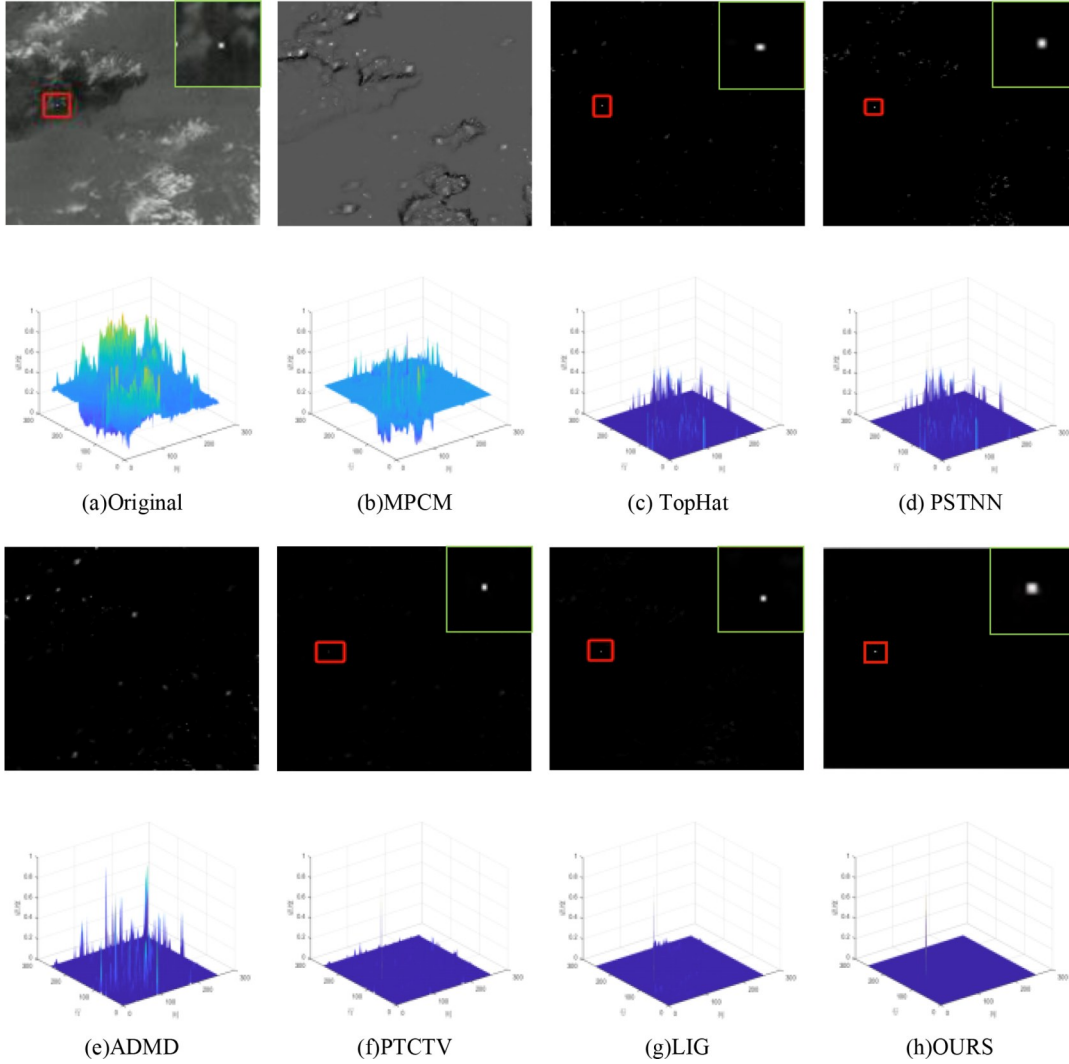


图9 天空背景算法结果对比图

Fig. 9 Sky background comparison of algorithm results

4.4 客观评价

为客观评估本文红外弱小目标检测的性能,本文选用信杂比增益(SCRG)、背景抑制因子(BSF)以及受试者工作特征曲线(ROC)作为衡量标准。SCRG反映算法对目标区域的增强效果,而BSF则反映算法对整体背景的抑制能力。两个指标值越高,代表目标增强与背景抑制效果越显著。各算法在6个红外图像序列的客观指标平均值如表1和表2所示。在表中,加粗的数据

表示最优,下划线的表示次优。由表1和表2可以看出,本文所提算法在六个红外图像序列中SCRG均为最优,而BSF均表现为次优,仅次于PTCTV算法。实验结果表明,本文算法具有良好的适应性和稳定性,在大多数情况下能够有效地提升信杂比并抑制背景噪声,尤其在复杂场景下仍能保持较好的性能。

本文使用受试者工作特征曲线(ROC)进一步评价所提出算法对红外弱小目标的检测性能。

表 1 不同算法的信杂比增益(SCRG)对比

Tab. 1 The comparison of SCRG (Signal-to-Clutter Ratio Gain) for different algorithms

	MPCM	TopHat	PSTNN	ADMD	PTCTV	LIG	OURS
Seq1	0.67	2.20	2.54	2.64	3.89	2.50	4.47
Seq2	1.79	4.43	3.17	6.62	3.76	4.72	10.29
Seq3	1.95	4.59	3.37	5.74	2.81	3.91	10.80
Seq4	0.41	2.25	1.41	1.23	4.25	0.99	7.42
Seq5	1.10	3.71	2.09	3.36	5.08	2.80	11.20
Seq6	0.73	4.67	3.91	2.98	6.50	5.97	14.16

表 2 不同算法的背景抑制系数(BSF)对比

Tab. 2 The comparison of BSF (Background Suppression Factor) for different algorithms

	MPCM	TopHat	PSTNN	ADMD	PTCTV	LIG	OURS
Seq1	8.33	18.85	34.24	14.15	77.56	9.39	47.03
Seq2	10.02	25.59	21.68	17.99	83.42	15.85	57.50
Seq3	7.47	33.12	21.33	16.17	90.24	13.64	62.00
Seq4	15.18	34.69	29.49	23.66	92.86	13.92	76.67
Seq5	9.38	33.42	19.63	18.99	91.18	17.62	65.08
Seq6	7.37	40.52	31.57	16.77	107.26	20.77	82.49

如图 10 所示,浅蓝色线代表 PSTNN 算法的 ROC 曲线,绿色线代表 TopHat 算法的 ROC 曲线,深蓝色线代表 ADMD 算法的 ROC 曲线,黄色

色线代表 LIG 算法的 ROC 曲线,紫色线代表 PTCTV 算法的 ROC 曲线,红色线代表 MPCM 算法的 ROC 曲线,本文所提算法的 ROC 曲线为

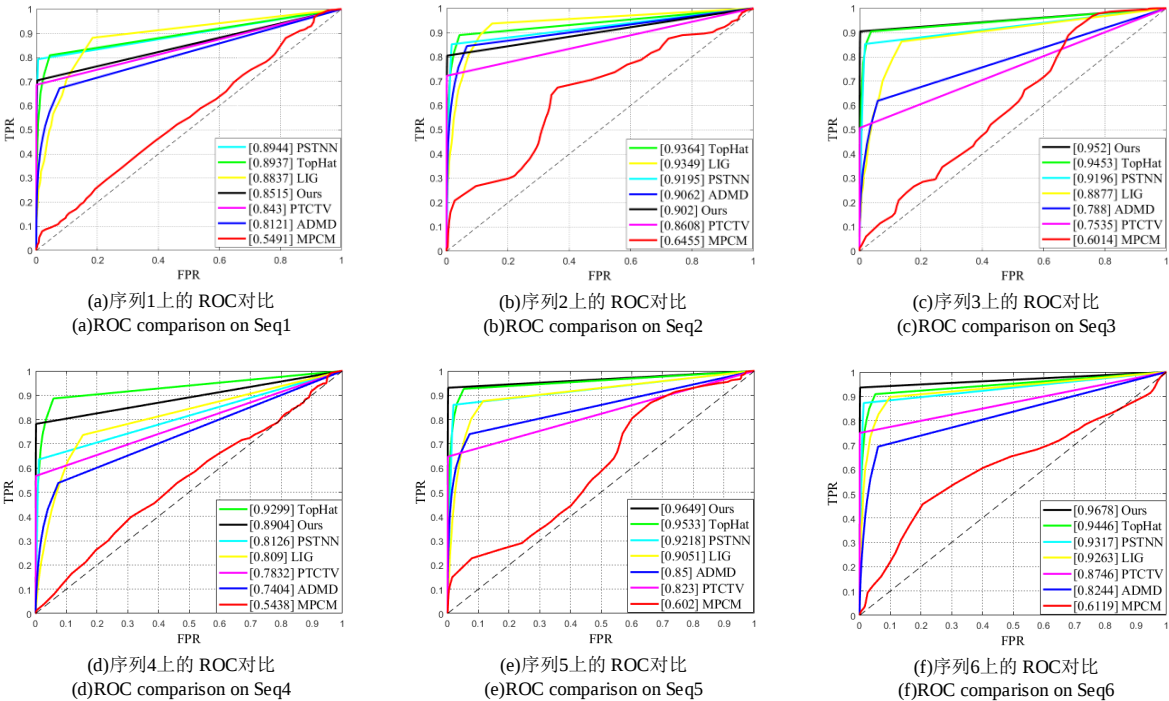


图 10 ROC 曲线对比图

Fig. 10 Comparison of ROC curves

黑色。由图 9 可知, PSTNN 算法在 seq2、seq3、seq5 和 seq6 四组红外序列图像中的检测在 90% 以上, 在 seq1 和 seq4 中的检测率在 80% 以上; LIG 算法在 seq2、seq5 和 seq6 的检测率达到 90% 以上, 在 seq1、seq3 和 seq4 中的检测率在 80%~90% 之间; TopHat 算法在六组序列图像中的检测率均在 89% 以上; PTCTV 算法在六组序列图像中的表现略差, 仅在 70%-90% 之间; MPCM 算法在几组算法中表现最差, 检测率仅在 50%~60% 之间; 而本文算法在 seq3、seq5 和 seq6 的检测率在几组对比算法中均为最优, 在 seq1、seq2 和 seq4 中的检测率也在 85% 以上。综上所述, 本文所提算法在抑制背景噪声、降低虚警率和提

高检测准确率方面相比于现有传统方法都有一定程度的提升。

4.5 平均运行时间分析

为评估所提方法的计算效率, 本文在相同硬件环境下统计了各算法在 2 个序列上的平均单帧处理时间, 并取其均值作为运行时间指标, 结果如表 3 所示。由于本文方法融合了新型 Top-hat 滤波、小波分解以及低频/高频特征融合等多个处理步骤, 在提升背景抑制能力和目标检测精度的同时, 也相应增加了运算开销。尽管如此, 结合本文方法在综合性能上的提升, 其时间成本处于可接受范围内, 体现出较好的性能与效率平衡。

表 3 不同算法的平均单帧处理时间(s)

Tab. 3 Average single frame processing time for different algorithms(s)

	MPCM	TopHat	PSTNN	ADMD	PTCTV	LIG	OURS
seq1	0.184 9	0.104 1	0.709 3	0.067 5	3.068 4	3.568 5	12.847 4
seq2	0.189 9	0.102 3	0.934 5	0.072 2	2.793 3	3.363 4	11.447 9

5 结 论

针对复杂背景下红外弱小目标检测存在检测率低和虚警率高的问题, 本文提出一种结合新型 Top-Hat 和小波变换的红外弱小目标检测方法。该方法利用形态学滤波, 滤除大部分背景和噪声, 减少虚警率。并充分利用小波变换对点状奇异性的优秀刻画能力, 在低频和低频分量中对点状目标

信号进行筛选, 极大提高了检测准确率。实验结果表明, 本文算法在信杂比增益(SCRG)和背景抑制系数(BSF)方面取得了较好的表现, 其中在 seq6 上 SCRG 和 BSF 分别达到 14.16 和 82.49。同时, 在 seq3、seq5 和 seq6 上的 ROC 性能均超过 95%。相较于现有传统方法, 本文算法在抑制背景噪声、降低虚警率和提升检测率方面有一定程度的改进, 进一步验证了算法的有效性和鲁棒性。

参 考 文 献:

[1] 张涛, 刘帅, 任小广, 等. 基于计算机视觉的弱小目标检测算法综述[J]. 激光与红外, 2026, 56(03): 323-332.
ZHANG T, LIU S, REN X G, *et al.* Survey of dim and small target detection algorithms based on computer vision [J]. *LASER & INFRARED*, 2026, 56(3): 323-332. (in Chinese)

[2] 赵德民, 孙扬, 林再平, 等. 基于 L_{1-2} 时空域总变分正则项的红外弱小目标检测算法[J]. 中国光学, 2023, 16(5): 1066-1080.
ZHAO D M, SUN Y, LIN Z P, *et al.* Infrared small target detection via L_{1-2} spatial-temporal total variation regularization[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1066-1080. (in Chinese)

[3] 薛驰, 陈小梅, 李海彤. 融合背景估计与相对局部对比度的天基短波红外弱小目标检测[J]. 光学精密工程, 2026, 34(03): 450-465.
XUE C, CHEN X M, LI H T. SWIR weak targets detection on space-based platform integrating background estimation and relative local contrast[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2026, 34(03): 450-465. (in Chinese)

[4] 王怡雯, 郑伟, 邢成龙. 方向显著性特征分布的加权散度红外弱小目标增强检测[J]. 空间科学学报, 2025, 45

- (01): 215-225.
- WANG Y W, ZHENG W, XING C L. Weighted Divergence of Directionally Salient Features for Infrared Small Target Detection Enhancement[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(1): 215-225. (in Chinese)
- [5] 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*, 2014, 52(1): 574-581.
- [6] JIANG Y, XI Y Y, ZHANG L W, *et al.* Infrared small target detection based on local contrast measure with a flexible window[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 1-5.
- [7] ZHANG Y T, LI Z Z. A Gaussian Weighted Multi-Scale Method for Infrared Small Target Detection[C]//2025 First International Conference on Advances in Computer Science, Electrical, Electronics, and Communication Technologies (CE2CT). 2025: 465-469.
- [8] LIU T, YANG J G, LI B Y, *et al.* Infrared Small Target Detection via Nonconvex Tensor Tucker Decomposition with Factor Prior[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-17.
- [9] TOM V T, PELI T, LEUNG M, *et al.* Morphology-Based Algorithm for Point Target Detection in Infrared Backgrounds[C]// Signal and Data Processing of Small Targets 1993. SPIE, 1993, 1954: 2-11.
- [10] DESHPANDE S D, ER M H, VENKATESWARLU R, *et al.* Max-Mean and Max-Median Filters for Detection of Small Targets[C]//Optics & Photonics. 1999.
- [11] HADHOUD M M, THOMAS D W. The Two-Dimensional Adaptive LMS (TDLMS) Algorithm[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, 35(5): 485-494.
- [12] XU Y K, SHAO A, KONG X F, *et al.* Infrared Small Target Detection Based on Sub-Maximum Filtering and Local Intensity Weighted Gradient Measure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(14): 22236-22248.
- [13] 苏新主,姬红兵,高新波. 一种基于数学形态学的红外弱小目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(3): 307-310.
- SU X Z, JI H B, GAO X B. Detection method for dim small IR targets based on mathematical morphology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 307-310. (in Chinese)
- [14] 白相志,周付根,解永春,等. 新型 Top-hat 变换及其在红外小目标检测中的应用[J]. *数据采集与处理*, 2009, 24(5): 643-649.
- BAI X Z, ZHOU F G, XIE Y C, *et al.* New Top-Hat Transformation and Application on Infrared Small Target Detection[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, 24(5): 643-649. (in Chinese)
- [15] 饶俊民,穆靖,刘士建,等. 基于聚类思想的红外弱小目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2023, 42(4): 527-537.
- RAO J M, MU J, LIU S J, *et al.* Infrared small target detection based on clustering idea[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2023, 42(4): 527-537. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 李士刚,王维佳,朱圣杰,等. 基于时空三维卷积网络的复杂背景下红外弱小目标检测方法[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(11): 1688-1699.
- LI S G, WANG W J, ZHU S J, *et al.* Detection method for infrared dim and small targets under complex backgrounds via a spatio-temporal three-dimensional convolutional network[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(11): 1688-1699. (in Chinese)
- [18] MALLAT S, HWANG W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(2): 617 - 643.
- [19] 陈莹,郝应光,王洪玉,等. 基于局部梯度强度图的动态规划检测前跟踪算法[J]. *计算机科学*, 2022, 49(8): 150-156.
- CHEN Y, HAO Y G, WANG H Y, *et al.* Dynamic Programming Track-Before-Detect Algorithm Based on Local Gradient and Intensity Map.[J] *Computer Science*, 2022, 49(8): 150-156. (in Chinese)
- [20] XU L, WEI Y, ZHANG H Y, *et al.* Robust and fast infrared small target detection based on pareto frontier optimization[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 123: 104192.
- [21] WEI Y, YOU H, LIU J. Multiscale Patch-Based Contrast Measure for Small Infrared Target Detection[J].

- Pattern Recognition*, 2016, 58: 216-226.
- [22] 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.
- [23] ZHANG L D , PENG Z M. Infrared Small Target Detection Based on Partial Sum of the Tensor Nuclear Norm [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 382.
- [24] MORADI S, MOALLEM P, SABAH M F. Fast and robust small infrared target detection using absolute directional mean difference algorithm[J]. *Signal Processing*, 2020, 177: 107727.
- [25] HUANG Z X, ZHAO E W, ZHENG W, *et al.* Pctv-kmc: Infrared small target detection using joint partial tensor correlated total variation and k-means clustering [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, 18: 1252-1271.

作者简介:



申晓茹,女,硕士研究生,2024年于商洛学院获得学士学位,主要从事红外弱小目标检测方面的研究。E-mail: shenxr0125@163.com



常霞,女,博士,副教授,2010年于西安电子科技大学获得博士学位,主要从事图像处理、智能信息处理算法的研究。E-mail: changxia0104@163.com