

WANG Yiwen, ZHENG Wei, XING Chenglong. Weighted Divergence of Directionally Salient Features for Infrared Small Target Detection Enhancement (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(1): 215–225. CSTR:32142.14.cjss.2024-0025. DOI:10.11728/cjss2025.01.2024-0025

方向显著性特征分布的加权散度红外弱小目标增强检测*

王怡雯¹ 郑伟² 邢成龙¹

1(河南工业大学电气工程学院 郑州 450001)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

摘要 红外弱小目标检测广泛应用于暗弱天体检测等领域, 是空间环境安全预警的重要手段. 基于熵的理论并结合目标扩散的方向性, 提出了一种方向显著性特征分布的加权散度红外弱小目标增强检测方法 (DSWD). 在多层嵌套窗口中评估图像局部显著性, 基于点目标在红外图像中由中心向八个方向扩展的特征对图像进行多向空间滤波, 在复杂背景中增强目标. 鉴于显著性特征各向分布与平均背景分布之间的差异, 使用散度将目标区域与背景之间概率分布量化, 推断区域内感兴趣的部分. 为解决复杂背景中存在的高亮背景等混淆元素会对目标提取造成干扰的问题, 进一步采用改进的绝对均方差方法增强目标, 确保从复杂背景中准确分离出目标, 进而采用自适应阈值处理方法提取目标. 实验结果表明, 针对多变空间环境, 所提出的方法能够在空间环境中准确检测出弱小目标, 降低虚警率, 为未来空间环境安全预警系统提供参考.

关键词 红外弱小目标检测, 能量加权, 局部对比度, 散度

中图分类号 TP391.4

Weighted Divergence of Directionally Salient Features for Infrared Small Target Detection Enhancement

WANG Yiwen¹ ZHENG Wei² XING Chenglong¹

1(College of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001)

2(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Infrared small target detection is widely used in fields such as dark and weak object detection, which is an important means of early warning for space environment safety. Drawing on entropy theory and incorporating the directionality of target diffusion, this study introduces a method for Infrared Small Target Detection Enhancement named Weighted Divergence of Directionally Salient Features (DSWD). Initially, this method assesses the local saliency of an image using a multi-layer nested

* 载人航天工程航天医学实验领域项目资助 (HYZHXM01012)

2024-02-20 收到原稿, 2024-03-21 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

window approach, and applies multidirectional spatial filtering to highlight point targets that radiate outward from the center to eight directions within the infrared spectrum, thereby enhancing the target against a complex backdrop. To address the disparity between the anisotropic distribution of saliency features and the homogeneous background distribution, this study employs a scatter measure to quantify the probabilistic distribution between the target area and the background, thus identifying regions of interest. Nevertheless, the efficacy of target extraction can be compromised by obfuscating elements, such as prominently illuminated backgrounds. To mitigate this, the study leverages an enhanced absolute mean square deviation technique for further target refinement, ensuring precise separation and extraction from the intricate background. The process culminates with the application of an adaptive threshold segmentation method for final target extraction. The experimental results show that for the variable space environment, the method proposed in this paper can accurately detect the weak targets in the space environment and reduce the false alarm rate, which is expected to be applied in the future space environment safety warning system or for reference.

Key words Infrared small target detection, Energy weighting, Local contrast, Dispersion

0 引言

随着航天技术的不断发展,在轨航天器数量不断增加,未知因素随之出现,使得空间环境复杂多变,因此红外弱小目标检测愈加重要.通过对红外弱小目标的检测,能够监测和识别空间中的弱小目标,例如小行星和空间碎片等^[1],同时能对卫星图像进行分析和解译,提取目标信息,为地理信息系统提供支持^[2].小行星表面可能因为受到太阳光的强烈照射,使得可见光探测受到干扰,而红外光能够穿透尘埃和气体,不受大气影响.红外探测有独特的成像特点^[3],观测覆盖范围广,在空间探测场景中具有明显优势.因此,红外探测被广泛应用于空间预警侦察领域^[4],能帮助及时发现潜在的目标威胁,提前采取相应的防御措施,保障安全.

空间观测技术的进步对红外监控预警系统的算法提出了更高的要求,对虚警率要求严格,对红外弱小目标在复杂空间背景中的检测研究越来越重视.这里的红外弱小目标是指红外遥感图像中辐射较弱、同时在图像中所占面积较小的目标,不具有形状信息.这类目标通常与背景的对比如度低,其信噪比低于3,容易因为受到背景杂波和噪声干扰而难以分辨^[5].对该类目标的检测有两个难点.其一是缺乏特征或特征不明显,目标强度低.由于目标较小,因此缺乏形状、纹理、颜色等特征^[6].基于形状和纹理分析的目标检测方法无法直接应用于红外弱小目标检测.相比于可见光成像系统,红外成像系统所捕获的图像会存在对

比如度低的问题^[7].此外,大部分红外热成像仪的驱动电路和散热系统会引起更大的噪声和杂波^[8],这导致弱小目标更容易被杂波淹没和干扰.其二是背景环境复杂.空间遥感红外弱小目标检测场景复杂多变,例如存在高亮度背景、背景边缘和高亮度孤立噪声等^[9]其他随机因素^[10],背景灰度分布起伏剧烈,对空间目标检测系统的鲁棒性提出了更高的要求.

由于这些难点的存在,现有的算法虽然能完成弱小目标的检测但是不适用于复杂的空间场景^[11],在各种复杂背景下准确完成目标检测的难题还没有被完全解决.因此,在复杂空间背景下检测弱小目标,在保证高检测率的同时降低虚警率^[12],是当前的热点研究课题.

目前,根据处理的图像,红外弱小目标检测算法分为单帧检测和多帧检测.多帧检测算法依赖于多帧间所有可疑目标的关联校验,场景中的光电设备抖动或目标快速移动^[13]会导致多帧检测算法的性能显著降低.相较于多帧检测算法,单帧检测算法不依赖于连续帧之间的关联性,更具鲁棒性和适应性,能够有效处理目标快速移动和光电设备抖动等问题.同时,单帧检测算法仅使用单个帧中的信息,具有较快的检测速度,可作为某些多帧检测算法的基础模块进行使用,因此得到了广泛应用.传统的单帧检测方法,提取弱小目标在红外图像中的梯度、灰度、对比如度等特征,通过增强目标和抑制背景等方式^[14]提取目标,以实现弱小目标的检测.其中,采用空间域滤波和变换域滤波的滤波算法,利用像素灰度差以突出弱小目标,抑

制周围背景噪声干扰. 空间域滤波常采用空域高通滤波、中值滤波、最大均值滤波、高斯差分滤波器 (Difference of Gaussian, DoG) 等方法, 在空域上对红外图像进行预处理, 通过阈值分割检测红外弱小目标. 空间域滤波算法易于实现. Han 等^[15]针对 DoG 滤波器的缺点, 对其进行改进并提出了实现背景边缘抑制的 Gabor 差分滤波器. 滤波窗口形状和尺寸会影响空间域滤波算法的检测效果, 导致虚警率高^[16]. 变换域滤波的检测算法常采用频域高通滤波和小波变换滤波等, 将原始红外图像进行数学变换, 由空间域变换到变换域, 再逆变换回空间域以实现弱小目标检测. Sun 等^[17]提出了一种小波域自适应滤波的检测算法, 利用图像小波分解后高低频分离的特点实现目标检测. 变换域滤波算法与空间域滤波相比能更直观地凸显出目标和背景特征, 背景抑制效果更强, 但加大了算法的计算难度. 近年来, 发现人眼根据对比度的区别, 能够快速定位到感兴趣的区域, 并获取其中感兴趣的目标, 即 HVS (Human Visual System) 特性^[18]. 根据 HVS 特性, 计算当前位置与其邻域之间的相似性以获取显著性区域^[19]. Chen 等^[20]依据 HVS 特性, 提出局部对比度测量方法 (Local Contrast Measure, LCM), 该方法利用目标灰度值大于邻域的灰度值的特点提取目标. 此后 Han 等^[21]提出加强局部对比度测量的红外弱小目标检测, 利用匹配滤波器和背景估计的思想, 通过比例和差值运算计算强化局部对比度, 并引入目标和背景特征差异的加权函数, 在复杂背景下达到更好的小目标检测性能. 目前, 局部对比度方法的背景值多采用当前位置的局部相邻区域, 但背景不同的复杂程度可能导致基准值不准确, 进而影响对比度信息的准确性. 近年来, 研究学者将图像数据结构应用在红外弱小目标检测中, 由于背景块具有低秩子空间的属性, 而目标在整体图像中尺寸相对较小, 因此利用红外图像背景的非局部自相似性和目标的稀疏特性进行目标提取. Sun 等^[22]构建一种张量数据结构, 提出基于时空张量数据结构的方法检测弱小目标. 传统红外弱小目标检测算法的选取特征如灰度值、邻域信息等大多数是基于人工选择, 而近年提出的深度学习检测算法能训练提取数据中更深层次特征, 提高算法的可靠性. Li 等^[23]提出了密集嵌套注意力网络的深度学习方法, 解决现有基于 CNN (Convolutional Neural Network) 的方法无法

直接应用于红外弱小目标的问题. Nie 等^[24]提出了基于稀疏约束的神经网络模型和完备的矩特征集的方法, 采用符号函数作为分类层激活函数, 通过逐步回归实现参数求解, 并引入范数约束以实现参数一致性和稀疏化. 该方法性能优于传统方法, 同时满足了实时处理需求. Liu 等^[25]在复杂背景下利用变换器进行红外小尺寸目标探测方法中, 提出了一种 Transformer 模型的鲁棒性强且通用的红外小目标检测方法, 采用 Transformer 的自注意机制来学习图像特征的更大范围内的交互信息, 学习区分性的小目标特征. 为了避免目标信息的丢失采用了具有 U-Net 式跳跃连接操作的解码器, 以包含更多的小目标信息. 但深度学习方法需要大量样本作为先验知识进行训练, 通常情况下样本的获取比较困难, 因此只有当样本与待测场景的数量符合独立分布时, 才能够获得较好的结果.

上述单帧局部对比度红外小目标检测方法中, 在目标信号非常弱的情况下, 差值型局部对比度侧重于目标与邻域背景的差异信息, 并未对实际目标进行强化处理^[26], 因此检测率较低. 当图像中存在高亮背景时, 使用比值型对比度计算也并未对背景信息进行抑制, 容易导致虚警率较高. 因此使用局部信息对目标进行检测时需要满足目标在局部是最突出的基本条件, 导致这种方法难以应对复杂的真实背景. 若目标靠近亮度较高的背景, 则难以从局部中将其提取出来而被背景淹没.

针对复杂空间背景下的真实目标难以提取的问题, 提出了一种方向显著性特征分布的加权散度红外弱小目标增强检测方法, 通过局部显著性和平均背景在各个方向上的分布统计差异的深入分析, 设计了一种局部显著性散度量方法. 充分利用局部显著性散度量方法, 融合空间方向性和红外小目标扩散的信息, 使目标显著性更突出. 该方法提高了图像的整体结构表达, 有效减弱了局部噪声, 解决了在复杂背景下提取真实目标的问题, 体现出了良好的鲁棒性和适应性, 提高了红外弱小目标检测效率.

1 算法

1.1 算法流程

基于熵的理论设计了一种方向显著性特征分布

的加权散度红外弱小目标增强检测方法,该方法结合空间方向性和目标扩散的特征,突出目标的显著性.算法流程如图1所示.建立一个多层嵌套窗口,参考局部对比度的计算方法,基于点目标在红外图像中从中心向八个方向扩散的形态特征对图像进行空间滤波,在复杂背景中增强目标信号,评估图像局部显著性.基于显著性特征各向分布与平均背景分布的差异,利用散度对于分布差异的敏感性,使用散度计算将目标区域与背景区域之间的概率分布差异量化,以估计区域内元素的感兴趣程度.然而从复杂杂波干扰中提取目标信号进行增强,仍无法保证可以很好地将目标提取出来,仍需进一步增强能量以应对杂波中的混淆因素.采用改进的绝对方向均方差方法强化目标并使其从背景中清晰地被分离出来,进而采用自适应阈值处理提取目标.

1.2 图像显著性分布估计

当红外图像中存在点目标时,目标会逐渐向周围扩散,呈现点状.扩散的过程在左上、上、右上、左、右下、下、左下、右八个不同的方向上呈现出相似的特征,如图2所示.根据这一特征,模拟目标从中心向周围扩散构造方向滤波器,进行融合空间多维度特征的目标局部显著评估,方向滤波核如图3所示.使用多个方向的滤波器能够帮助增强目标的边缘,在复杂背景中增强目标信号,从而更好地捕捉到目标扩散全方面信息.对图像进行多方向的均值滤波和最大值滤波,使算法更加适应目标扩散的特征,提高目标的显著性.

提出如下方法评估图像局部显著性 K_{LS} :

$$K'_{LS}(i, j, k) = \frac{I(i, j)}{I_{\text{mean}}(k)} \times \frac{I(i, j)}{I_{\text{max}}(k)}, \quad (1)$$

$$I_{\text{mean}}(k) = \text{mean}(I, K_{\text{kernal}}(k)), \quad (2)$$

$$I_{\text{max}}(k) = \max(I, K_{\text{kernal}}(k)), \quad (3)$$

$$K_{LS}(i, j, k) = \frac{K'_{LS}(i, j, k)}{\sum_{k=1}^K K'_{LS}(i, j, k)}. \quad (4)$$

其中, (i, j) 为像素的坐标, $k=1, 2, \dots, 9$ 为多向滤波核中的编号, 对应 9 个带方向的滤波核; I 为 $N \times M$ 的原始图像; I_{mean} 和 I_{max} 分别为图像在图3多向滤波核 K_{kernal} 中经过均值滤波和最大值滤波后的结果, 代表图像的平均能量和最大能量; K_{LS} 为 K'_{LS} 经过归一化处理的结果. 通过均值与最大值的比值, K_{LS} 为 $N \times M \times K$ 的三维矩阵, $K=9$, 突出了图像中相对较亮和相对较暗的区域. 在红外图像中, 目标往往表现为相对明亮或者暗的区域, 评估图像局部显著性有助于提高目标与背景的对比度, 使得弱小目标更容易被检测到.

在图像局部显著性评估的基础上, 构造全局平均背景图. 全局平均背景图可以捕捉图像中不包含目标的区域的统计特性, 降低复杂背景对显著性分布的影响, 使目标得到聚焦. 通过对局部结构的处理, 形成一个结构性图像集合, 强调图像中整体背景的平均特征. 全局平均背景分布定义如下:

$$K_{LB}(i, j) = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 K_{LS}(i, j, k). \quad (5)$$

其中, k 为去除中心区域外的 8 个方向, 对应图3中的 1~8. 通过对局部显著性特征在除去中心区域的

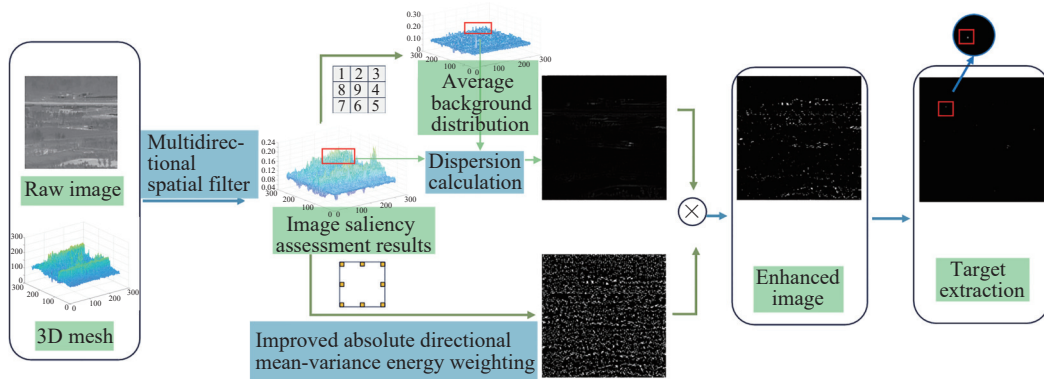


图1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow chart

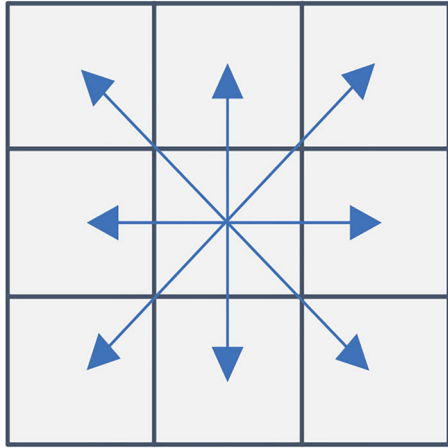


图2 点目标扩散

Fig. 2 Spread of point targets

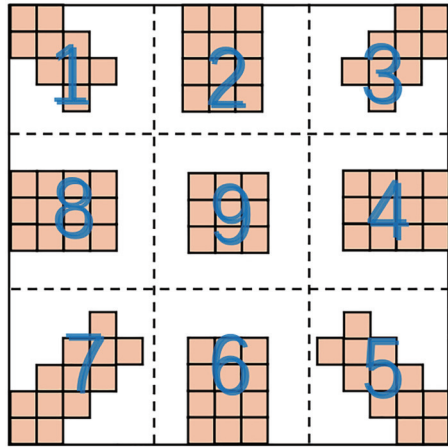


图3 多向滤波核

Fig. 3 Multidirectional spatial filtering kernel

8个背景子块进行滤波, 捕捉图像的整体平均特征, 期望更全面反映出图像中的平均背景信息. 对 I_{LB} 进行 3×3 均值滤波操作, 使全局背景特征更为平滑一致, 有

$$I_{LB}(i, j) = \frac{K_{LB}(i, j)}{H(K_{LB}(i, j))}. \quad (6)$$

其中, $H(K_{LB}(i, j))$ 为对 K_{LB} 进行滤波后的结果, 滤波核为 3×3 的各元素为 1 的模板.

考虑到 K_{LS} 为 $N \times M \times K$ 的三维矩阵, 第三维度包含了 K 个方向上的显著性特征, 为了更好地让背景分布估计同方向显著性特征对应, 这里按照图 3 所示的方向滤波器编号顺序, 以各元素为中心在 I_{LB} 中开 3×3 的窗口, 并将窗口内元素向量化为 1×9 的向

量, 最终输出结果 I_{LB} 的大小为 $N \times M \times K$. 在每个方向上使用 3×3 窗口, 关注 9 个子块的像素位置信息, 突出全局平均背景在不同方向上的一致性的特征, 表达出图像的整体结构, 并使平均背景的表达更加丰富和有层次感, 同时具有灵活性和有效性.

1.3 显著性散度差异评估

通过评估图像的局部显著性能够在一定程度上反映出目标和背景的差异, 但在目标特征不够明显或者与背景相似度较高的复杂背景情况下, 仅使用图像的局部显著性进行目标提取准确率可能不高. 在此基础上引入散度的计算, 进一步提高目标检测在复杂背景下的检测性能. 通过散度比较目标在各个方向上的分布与全局背景的一致性, 对图像中显著性高的区域进行更全面和多维度的分析. 散度计算窗口如图 4 所示.

用于评估图像显著性的参数 K_{LS} 可以被视为图像局部区域显著性的分布, 全局平均背景图反映了整体图像的平均背景分布, 可以作为基准用于衡量图像显著性分布和背景之间的差异. 因此依据人类视觉显著注意力机制的特点, 可以利用 D_{KL} 以量化的方式判断在复杂背景下目标存在与否, 降低从复杂背景中准确检测出信号强度弱的小目标的难度, 公式如下:

$$D_{KL}(i, j) = \sum_{k=1}^K K_{LS}(i, j) \cdot \lg \left(\frac{K_{LS}(i, j)}{I_{LB}(i, j)} \right). \quad (7)$$

其中, D_{KL} 为一种相对熵, 可以用来衡量局部显著性与全局平均背景之间的差异. 通过数值定量评估图像中局部区域的显著性水平, D_{KL} 越大代表局部显著性与全局背景分布存在显著差异, 如特定区域与整体背景有明显的不同, 则该区域中可能存在潜在目标. D_{KL} 趋于 0 代表局部显著性与全局背景分布近似相同, 则该区域可能不包含潜在目标. 使用这种对差异更敏感的方式, 更有针对性地准确定位图像中显著性差异较大的区域, 进而提取可能存在的目标.

1.4 能量加权

若图像中存在小尺寸的目标, 经过滤波处理后可能使得目标在图像中的强度不够显著. 此外, 杂波中容易导致目标混淆的高亮噪点、边缘轮廓等元素可能也会被增强, 使其无法与目标区分. 为了抑制这些情况的发生, 可以对图像中显著区域进行能量加权. 改进的绝对方向均方差方法通过局部平均和差分操作计算具有方向性的内部窗口和外部窗口之间的均值

差异,对图像中显著性差异大的区域进行能量加权,进一步突出真实目标区域与局部背景之间的对比度,从而实现对显著性目标的增强检测.

通过计算图像在8个方向的最大值,捕捉整体图像的显著性特征.对所得结果进行最小值计算,对比每个像素及其邻域内的最小值,从而实现对图像的局部平均滤波,获取内部窗口用以提取图像的整体特征.利用形态学上的膨胀操作,选择合适的邻域尺寸,在此选择 11×11 的尺寸,如图5所示.进一步处理平均滤波后的图像以获得最大方向值,得到外部窗口,从而突出图像中的显著性区域.内部窗口和外部窗口如图5所示.

计算差分图像,即内部窗口和外部窗口之间的绝

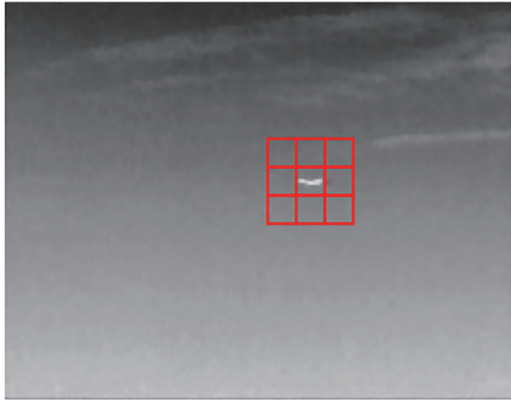


图4 散度计算窗口

Fig. 4 Divergence calculation window

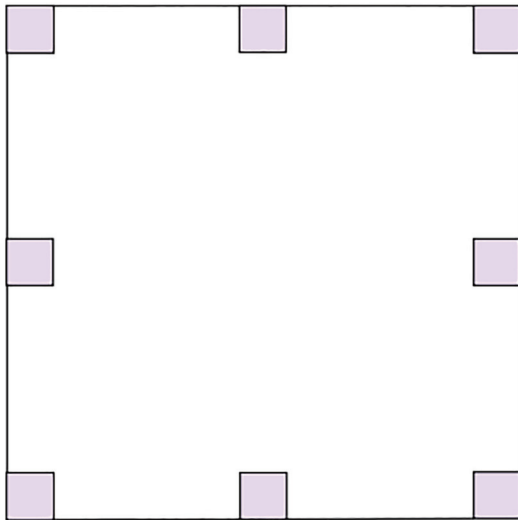


图5 内部窗口和外部窗口

Fig. 5 Internal and external windows

对差异,反映对比度的显著性,以强调图像中显著性区域的存在,有

$$I_{\text{gain}} = (I_{\text{diff}} - I_{\text{dil}}) \times (I_{\text{diff}} - I_{\text{dil}})^2. \quad (8)$$

其中, I_{diff} 表示图像中每个像素与局部最大值的差, I_{dil} 为对差 I_{diff} 进行膨胀操作后的结果, $I_{\text{diff}} - I_{\text{dil}}$ 为绝对差值图像的二值图像,用于强调差异较大的区域.将二值图像与差分图像相乘,保留显著性区域的加权信息,得到最终显著性区域能量加权值,即

$$I_{\text{DSWD}}(i, j) = I_{\text{gain}} \times D_{\text{KL}}(i, j). \quad (9)$$

对加权图 I_{gain} 结合获得的图像显著性进行修正,得到调整后的显著性图 I_{DSWD} ,并将其调整到 $[0, 255]$ 的范围,以获得最终的修正显著性图,上述过程考虑了图像的局部结构性和方向性.

1.5 自适应阈值分割

显著性图突显了图像中真实目标,有效抑制了背景和杂波信号的干扰.随着能量权重的增加,目标信号得到进一步增强.采用自适应阈值分割方法准确完成目标提取.

2 实验与分析

为验证本文算法在复杂背景下的有效性,选取真实图像进行实验.将本文算法与经典的 WSLCM, ADMD^[27], TLLCM^[28], PSTNN^[29], MPCM^[30] 以及 LGDC^[31] 算法进行比较,客观指标使用信杂比 (Signal Clutter Ratio, SCR)、信杂比增益 (Signal Clutter Ratio Gain, SCRG) 以及背景抑制因子 (Background Suppress Factor, BSF),验证算法的有效性.

2.1 数据集与评估指标

采用文献 [32] 发布的目标检测跟踪数据集对算法有效性进行验证.数据采集用到的主要设施和设备为高塔和二轴电控转台,为获取不同环境背景、不同观测视角下的目标动态红外序列图像提供了保障.每幅红外图像的分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 8 bit 位深,大小为 193 kByte.实验选用的四组序列详细信息如表1所示.实验在 Intel Core i7 2.10 GHz 处理器、16 GByte 内存的计算机上进行,软件环境为 MATLAB.

信杂比 F_{SCR} 、信杂比增益 F_{SCRG} 以及背景抑制因子 F_{BSF} 是对目标检测能力、算法对信号对比度提升效

表 1 四组序列详细信息
Table 1 Four sets of sequence details

序列	帧数	平均SCR	SCR方差	场景说明
序列1	399	6.07	0.16	由远及近、单个目标、地面背景
序列2	1500	5.20	2.23	目标由远及近、单个目标、目标中途机动、地面背景
序列3	751	3.42	0.97	单个目标、目标机动、地面背景
序列4	500	2.20	0.15	目标由远及近、单个目标、地面背景

果和对背景抑制程度的描述, 其值越高, 说明效果越好, 公式如下:

$$F_{\text{SCR}} = \frac{|G_t - \mu_b|}{\sigma_b}, \quad (10)$$

$$F_{\text{SCRG}} = \frac{F_{\text{SCR}_{\text{in}}}}{F_{\text{SCR}_{\text{out}}}}, \quad (11)$$

$$F_{\text{BSF}} = \frac{\sigma_{\text{in}}}{\sigma_{\text{out}}}. \quad (12)$$

式 (10) 中, G_t 为目标中心能量, μ_b 为目标周围区域的像素大小, σ_b 为目标周围的像素标准差, F_{SCR} 越大, 目标与背景之间对比度越高, 更容易与背景区分. 式 (11) 中, $F_{\text{SCR}_{\text{out}}}$ 为输出图像的信杂比, $F_{\text{SCR}_{\text{in}}}$ 为输入图像的信杂比, F_{SCRG} 越大代表算法对信号对比度的改善越显著. 式 (12) 中, σ_{in} 和 σ_{out} 分别为原始图像和经过处理后的输出图像的标准差, 高 F_{BSF} 值代表着算法对背景的抑制效果越显著, 在减少背景干扰方面取得了良好的效果.

对于结果, 使用真实目标在总目标中占比的检测率 (F_{FA}), 以及检测到真实目标在总目标中占比的虚警率评价目标的检测精度 (F_{PD}), 公式如下:

$$F_{\text{FA}} = \frac{N_f}{N_n}, \quad (13)$$

$$F_{\text{PD}} = \frac{N_p}{N_r}. \quad (14)$$

通常较好的检测结果是在保证较高的检测率的同时拥有较低的虚警率.

2.2 结果和比较

本文算法与经典的 WSLCM, TLLCM, PSTNN, MPCM, LGDC 以及 ADMD 算法进行比较, 图 6 给出了以上算法在不同序列下的检测结果.

不同算法在四组序列下计算的 F_{SCRG} 值如表 2 所示, 由实验结果可以看出, 本文算法在四组序列中, 对红外图像真实目标的增强能力较好. 对图像显著部分

进行多向局部均值滤波平滑整体特征, 有效减少了图像中的噪声. 采用改进的绝对方向均差对图像进行能量加权, 计算所构造的内部窗口和外部窗口之间的绝对差异, 进一步提取实际目标, 降低了噪声的影响. 在四组的目标由远及近的序列中本文算法也表现出了较好的效果, 在能量加权步骤中形态学扩张的增强效果有助于提取图像中的最大方向值, 进一步增强了目标的边缘和整体效果, 使得远近目标在图像中都更为清晰. 在对比实验中, PSTNN 和 LGDC 算法在复杂背景下目标增强效果较好, 其计算的 F_{SCRG} 值和本文算法接近, 但本文算法在不同序列下计算得到的 F_{SCRG} 都是最大值, 能够有效提升检测的准确性和鲁棒性.

不同算法在四组序列下计算的 F_{BSF} 值如表 3 所示, 本文算法在这四组序列中有较高 F_{BSF} 值, 在提取红外弱小目标时在背景抑制方面表现较好. 本文算法能够在局部显著性评估和散度计算中评估图像中目标与背景之间的差异, 并据此进行有效的背景抑制, 能够处理不同场景和复杂背景下的红外图像. WSLCM 和 TLLCM 在序列 1 和序列 2 中的 BSF 值相对较低, 在某些特定类型的背景或场景能有效抑制背景, 但在复杂背景下的背景抑制能力较差. TLLCM 存在未检测到的图像, WSLCM 在背景抑制方面和检测率优于 TLLCM. PSTNN 虽未表现出很好的性能, 但相较于 WSLCM 和 TLLCM, 其在背景抑制方面能力较强, 但没有完全过滤背景信息, 最终的处理结果中还能看到部分背景. MPCM 和 LGDC 对目标有较高的检测率, 但相对于本文提出的方法略显不足. ADMD 算法在对比实验当中表现最差, 对目标的检测率低, 同时对背景抑制能力不强.

为进一步验证本文提出算法的优势, 对四个图像序列绘制 ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲线, 如图 7 所示. 本文算法的 ROC 曲线均位于其

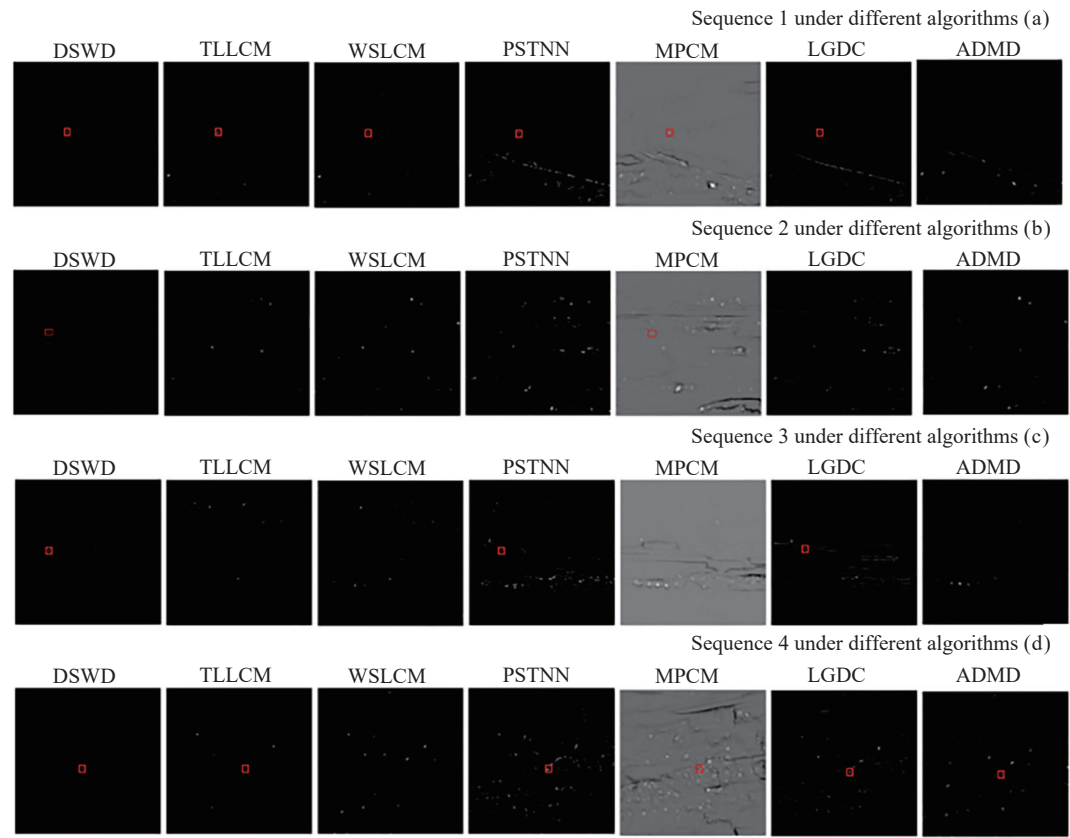


图 6 不同算法在不同序列下的红外弱小目标图像检测结果
Fig. 6 Infrared small target image detection results under different sequences

表 2 利用不同算法在四组序列下计算的 F_{SCRG} 值
Table 2 F_{SCRG} values calculated by different algorithms under four sets of sequences

序列	DSWD	WSLCM	TLLCM	PSTNN	MPCM	LGDC	ADMD
序列1	26.95886	3.389853	2.41065	7.060763	2.132392	5.077733	0.289776
序列2	29.08403	3.114348	4.14042	7.535866	0.89089	1.659468	0.087604
序列3	4.342124	1.845483	3.6071	3.443729	0.549783	0.374816	0.038264
序列4	86.61648	1.818613	0.970138	22.27447	1.676713	4.845257	0.288661

表 3 利用不同算法在四组序列下计算的 F_{BSF} 值
Table 3 F_{BSF} values calculated by different algorithms under four sets of sequences

序列	DSWD	WSLCM	TLLCM	PSTNN	MPCM	LGDC	ADMD
序列1	14.25265	8.344599	6.071986	3.597427	3.578278	5.140639	3.99592
序列2	11.28658	5.699201	3.898466	2.658014	2.113583	3.541101	3.420808
序列3	14.26926	9.906523	7.195343	3.441276	4.485798	10.69522	7.449242
序列4	41.467	21.04057	13.6944	10.56703	7.350093	12.689	8.624328

他经典算法的 ROC 曲线的左上方, 表明本文算法检测性能更稳定, 优于其他算法. PSTNN 方法的 ROC 曲线和本文方法接近, 在每个序列中的结果均

优于其余方法. 但在序列 3 的结果中, ROC 曲线下的面积 (AUC) 较低, 则表明该方法仅在特定背景下的检测性能更稳定. 在序列 4 的 ROC 曲线下, ADMD,

MPCM, TLLCM, WSLCM 以及 LGDC 的 ROC 曲线接近于横轴, 不能有效捕捉到真实目标, 检测率低.

为验证本文算法的实用性, 对比计算了不同算法之间的运行效率, 如表 4 所示. 在红外弱小目标检测中, 运行效率是评估算法的重要指标之一, 是算法在速度和性能方面的体现. 针对四组序列图像, 对不同算法进行了测试, 并记录单帧平均处理时间. 绝对方向平均差分算法的 ADMD 的计算效率最高, DSWD 运行效率紧随其后. 本文提出的算法运行效率虽然比 ADMD 算法稍慢, 但两者的差距并不显著.

3 结语

小行星、空间碎片等弱小目标导致空间环境复杂多变, 给在轨航天器的运行带来了极大的风险和挑
战. 针对复杂背景下弱小目标检测难的问题, 提出了一种方向显著性特征分布的加权散度红外弱小目标增强检测方法. 通过多向空间滤波对图像显著性进行预处理, 在复杂背景中增强目标信号. 通过散度分布准确评估目标区域和背景区域的概率差异, 精确定位显著性差异较大的区域. 为抑制混淆杂波、高亮噪声和边缘信息同时被增强, 采用了改进的绝对方向均方

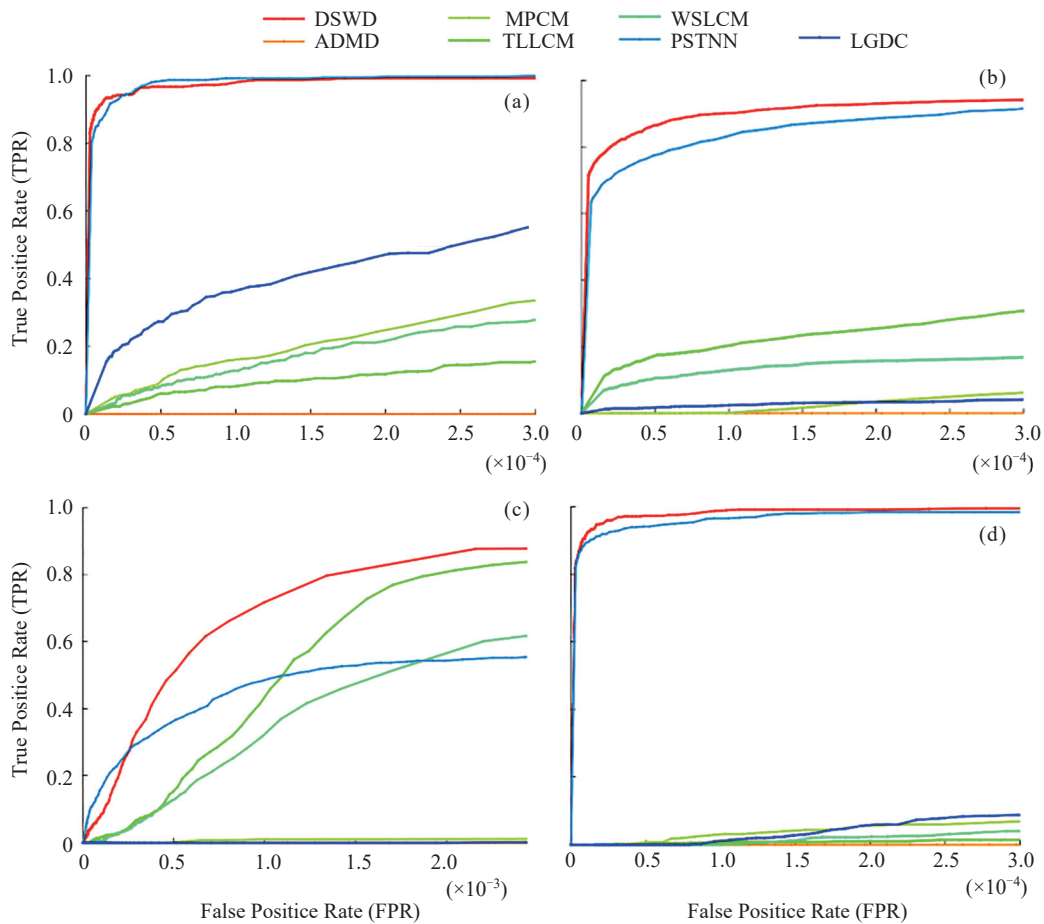


图 7 利用不同算法在四组序列下的 ROC 曲线

Fig. 7 ROC curves of different algorithms under four sets of sequences

表 4 单帧算法的平均运行效率

Table 4 Average operational efficiency of single-frame algorithms

算法	DSWD	WSLCM	TLLCM	PSTNN	MPCM	LGDC	ADMD
运行效率	0.075509	2.243401	0.555400	0.468005	0.112141	1.187946	0.066555

差方法对真实目标进行能量加权, 以确保目标能清晰地被从背景提取出来. 通过自适应阈值实现目标的有效提取. 实验结果验证了所提出方法的有效性, 能在复杂背景下增强目标信息, 抑制背景和杂波信号的干扰, 准确地检测出图像中的弱小目标, 同时减少实际检测中的虚警率. 通过多组实验结果表明, 这种方法在一定程度上能提高检测的鲁棒性, 有望应用于空间环境预警, 及时发现潜在的目标威胁, 提前采取相应的防御措施, 保障安全.

参考文献

- [1] NIU Haipeng. Research on Target Detection Technology of Space-Based Space Surveillance System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2023 (牛海鹏. 天基空间监视系统目标检测技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2023)
- [2] KONG X, YANG C P, CAO S Y, *et al.* Infrared small target detection via nonconvex tensor fibered rank approximation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 5000321
- [3] ZHANG K, LI X G. Infrared small dim target detection based on region proposal[J]. *Optik*, 2019, **182**: 961-973
- [4] LU R T, YANG X G, JING X, *et al.* Infrared small target detection based on local hypergraph dissimilarity measure [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 7000405
- [5] LU S, CHEN P F, WOŹNIAK M. Image enhancement-based detection with small infrared targets[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(13): 3232
- [6] LIU C, XIE F Y, ZHANG H P, *et al.* Infrared small target detection based on multi-perception of target features[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, **135**: 104927
- [7] FAN Zunlin, WANG Hao, GUAN Naiyang, *et al.* Review of dim small target detection research in single infrared image[J]. *Infrared Technology*, 2023, **45**(11): 1133-1140 (凡遵林, 王浩, 管乃洋, 等. 单帧红外图像弱小目标检测研究综述 [J]. 红外技术, 2023, **45**(11): 1133-1140)
- [8] SUN Xiongwei. Research on the Rapid Detection of infrared Small Targets under Complex Marine Backgrounds [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019 (孙熊伟. 复杂背景下海面红外小目标快速检测技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019)
- [9] DU Peng. Research on Key Technology of Infrared Detection of Dim and Small Target Under Complex Background Conditions[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020 (杜鹏. 复杂背景条件下红外弱小目标检测关键技术研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020)
- [10] LIU Zheng, YANG Dezhen, LI Jiangyong, *et al.* A review of infrared single-frame dim small target detection algorithms[J]. *Laser & Infrared*, 2022, **52**(2): 154-162 (刘征, 杨德振, 李江勇, 等. 红外单帧弱小目标检测算法研究综述 [J]. 激光与红外, 2022, **52**(2): 154-162)
- [11] MA Liang, GUO Yutao, LEI Tao, *et al.* Small object detection based on multi-scale feature fusion using remote sensing images[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, **49**(4): 47-63 (马梁, 苟于涛, 雷涛, 等. 基于多尺度特征融合的遥感图像小目标检测 [J]. 光电工程, 2022, **49**(4): 47-63)
- [12] YANG Bencheng, SONG Wannan, JIN Haibo, *et al.* Infrared small target detection using gradient differential anisotropic Gaussian filtering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, **60**(16): 1612003 (杨本臣, 宋婉妮, 金海波, 等. 梯度差各向异性高斯滤波的红外小目标检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, **60**(16): 1612003)
- [13] 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 (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)
- [14] RAO Junmin, MU Jing, LIU Shijian, *et al.* Infrared small target detection based on clustering idea[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023, **42**(4): 527-537 (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)
- [15] HAN Jinhui, MA Yong, HUANG Jun, *et al.* An infrared small target detecting algorithm based on human visual system[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, **13**(3): 452-456
- [16] XUE Xirui, HUANG Shucui, MA Jiashun, *et al.* RPCA infrared small target detection based on local entropy reference in preprocessing[J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(7): 649-657 (薛锡瑞, 黄树彩, 马佳顺, 等. 基于局部熵参考预处理的RPCA红外小目标检测 [J]. 红外技术, 2021, **43**(7): 649-657)
- [17] SUN Guodong, JI Shupeng, ZHOU Zhen. Dim small IR target detection based on the wavelet domain adaptive filtering[J]. *Aero Weaponry*, 2011(3): 20-23 (孙国栋, 吉书鹏, 周楨. 小波域自适应滤波的红外弱小目标检测 [J]. 航空兵器, 2011(3): 20-23)
- [18] ZHAO Qian, HAN Jinhui, XU Mao, *et al.* Infrared small-target detection utilizing background estimation combined with local contrast[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2022, **17**(2): 314-324 (赵骞, 韩金辉, 徐茂, 等. 基于局部对比度背景估计的红外小目标检测方法 [J]. 智能系统学报, 2022, **17**(2): 314-324)
- [19] HU J, YU Y, LIU F. Small and dim target detection by background estimation[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **73**: 141-148
- [20] CHEN C L P, LI H, WEI Y T, *et al.* A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Trans-*

- actions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(1): 574-581
- [21] HAN J H, MORADI S, FARAMARZI I, *et al.* Infrared small target detection based on the weighted strengthened local contrast measure[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, **18**(9): 1670-1674
- [22] SUN Y, YANG J G, AN W. Infrared dim and small target detection via multiple subspace learning and spatial-temporal patch-tensor model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(5): 3737-3752
- [23] LI B Y, XIAO C, WANG L G, *et al.* Dense nested attention network for infrared small target detection[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2023, **32**: 1745-1758
- [24] NIE Qingfeng, LIU Yingjie, LIANG Yun. Infrared dim target detection based on neural network model with sparsity constraint[J]. *Electronics Optics & Control*, 2022, **29**(8): 40-44 (聂青凤, 刘应杰, 梁赟. 基于稀疏约束神经网络的红外弱小目标检测技术 [J]. *电光与控制*, 2022, **29**(8): 40-44)
- [25] LIU F C, GAO C Q, CHEN F, *et al.* Infrared small-dim target detection with transformer under complex backgrounds[OL]. arXiv preprint arXiv: 2109.14379, 2021
- [26] HAN Jinhui, WEI Yantao, PENG Zhenming, *et al.* Infrared dim and small target detection: a review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, **51**(4): 20210393 (韩金辉, 魏艳涛, 彭真明, 等. 红外弱小目标检测方法综述 [J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(4): 20210393)
- [27] MORADI S, MOALLEM P, SABAHI F M. Fast and robust small infrared target detection using absolute directional mean difference algorithm[J]. *Signal Processing*, 2020, **177**: 107727
- [28] HAN J H, 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*, 2020, **17**(10): 1822-1826
- [29] 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
- [30] 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
- [31] WAN M J, XU Y K, HUANG Q Y, *et al.* Single frame infrared small target detection based on local gradient and directional curvature[C]//Proceedings of SPIE 11897, Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology VIII. Nantong: SPIE, 2021: 99-107
- [32] HUI Bingwei, SONG Zhiyong, FAN Hongqi, *et al.* A dataset for infrared detection and tracking of dim-small aircraft targets under ground/air background[J]. *China Scientific Data*, 2020, **5**(3): 286-297 (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*, 2020, **5**(3): 286-297)

作者简介



王怡雯 女, 出生于 2002 年, 河南工业大学电气工程学院在读本科生, 主要从事微弱信号处理等方面研究。

E-mail: wangyiwen@stu.haut.edu.cn



郑伟(通信作者) 男, 工学博士, 副研究员, 硕士生导师, 1996 年于西北工业大学获得学士学位, 2001 年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位, 2009 年于中国科学院国家空间中心获得博士学位, 主要从事微弱信号处理、非线性信号处理与天基信息处理方面的研究。

E-mail: zhengwei@nssc.ac.cn



邢成龙(通信作者) 男, 现任职于河南工业大学电气工程学院控制工程系, 主要研究方向为流动控制与优化、机器学习和智能检测技术等。

E-mail: chenglong.xing@haut.edu.cn