2022年4月

文章编号: 2095-4980(2022)04-0346-08

基于光谱尺度空间与管道滤波的红外目标检测

罗群1,刘俊2

(1.重庆城市职业学院,信息与智能制造学院,重庆 永川 402160; 2.重庆邮电大学 软件工程学院,重庆 南岸区 400065)

摘 要:为了准确地从复杂干扰背景下检测出真实弱小目标,本文引入视觉显著性,设计了 基于快速光谱尺度空间与动态管道滤波的红外目标检测算法。基于真实目标与背景内容之间的整 体差异,引入快速光谱尺度空间与阈值分割技术,设计视觉显著性机制,对红外图像完成处理, 输出全局显著性映射,以高效过滤干扰背景内容。考虑目标与背景的局部特征差异,构建自适应 局部对比度增强机制,对粗检测结果实施处理,获取对应的局部显著性映射,改善视觉显著性区 域内目标的对比度。引入高斯差分理论,通过估算每一帧红外图像中的目标像素直径,形成动态 管道滤波,充分消除虚警,准确识别出弱小目标。多组实验数据显示:较已有的红外目标检测技 术而言,在各种不同的复杂背景干扰下,所提算法呈现出更好的检测能力,拥有更理想的接收机 工作特性(ROC)曲线。

关键词:红外目标检测;光谱尺度空间;显著性映射;自适应局部对比度;高斯差分;动态管道滤波
 中图分类号:TP391
 文献标志码:A
 doi:10.11805/TKYDA2020605

Infrared target detection algorithm based on fast spectral scale space and dynamic pipeline filtering

LUO Qun¹, LIU Jun²

(1.School of Information and Intelligent Engineering, Chongqing City Vocational College, Yongchuan Chognqing 402160, China; 2.School of Software Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Nan'an Chognqing 400065, China)

Abstract: In order to detect the real dim target from the complex jamming background quickly and accurately, visual saliency is introduced to design an infrared target detection algorithm based on fast spectral scale space and dynamic pipeline filtering. According to the difference of global characteristics between target and background, the visual saliency model is designed by introducing the fast spectral scale space and threshold segmentation technology to complete the rough detection of infrared image for outputting the global saliency map, which can suppress the complex background, area effectively. Considering the local feature difference between the target and the background, an adaptive local contrast enhancement mechanism is designed to process the coarse detection results for obtaining the corresponding local saliency map, which can improve the contrast of the target in the visual saliency region. The Gaussian difference theory is introduced to estimate the diameter of the target pixel in each frame of infrared image for forming a dynamic pipeline filter, which can eliminate the false alarm and accurately identify the weak and small targets. Several groups of experimental data show that the proposed algorithm has better detection ability and better ReceiverOperating Characteristic(ROC) curve under various complex background interferences compared with the existing infrared target detection technology.

Keywords: infrared target detection; spectral scale space; saliency mapping; adaptive local contrast; Gaussian difference; dynamic pipeline filtering

收稿日期: 2020-11-08; 修回日期: 2021-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403053);重庆市教委计划科学研究资助项目(KJ1752485);重庆市教委科学技术研究资助项目 (KJQN201803903);重庆市教育科学"十三五"规划重点资助项目(2020-GX-175);重庆市教委科学技术研究资助项目 (KJQN202103901);重庆市永川区自然科学基金计划资助项目(2021yc-jckx20025)

红外弱小目标检测在红外搜索跟踪系统和红外制导系统中发挥着巨大作用。在实际应用中,现代红外搜索 与跟踪系统要求具有宽视场、高精确度、高帧频的特点。而且红外图像是通过远距离成像,并受到大量杂波和 噪声的干扰,导致目标的对比度与信噪比较低^[1-2]。因此,从大量低分辨力图像中快速、准确地检测红外弱小目 标是红外遥感系统的一个重要而富有挑战性的课题^[3-4]。

多年来,国内外学者设计多种红外目标检测技术,由于其内在的选择注意特性,基于人类视觉系统(Human Visual System, HVS)的检测方法较为流行,如向涛等^[5]为降低虚警率,准确地识别出海面背景下红外图像舰船目标,提出了一种显著区域提取和目标精确分割相结合的红外舰船目标检测方法,基于视觉显著性模型来增强目标区域信息,再结合舰船目标先验信息,提取关注的显著区域,并借助模糊分割方法,从提取区域中检测出目标。但是该方法只考虑了红外弱小目标的灰度分布特性,检测结果既包含目标区域,又包含复杂背景区域,导致误报率高,定位精确度差。为了克服该问题,XIA等^[6]提出了基于多尺度局部对比度的红外小目标检测算法,与传统方法不同,该技术从局部差异性和局部亮度差两个方面对局部对比度进行了测量,首先,提出了一种新的差异性度量方法,称为局部能量因子来描述小目标与周围背景的差异性。再利用小目标与背景亮度差的特点来测量局部对比度,最后,采用自适应分割方法从背景中提取小目标。但是这种方法需要逐像素计算,而且非常耗时,另外,由于缺乏对局部环境的描述,其对突出背景区域的抑制效果受到限制,导致检测性能不理想。为了克服上述两种技术存在的不足,HU等^[7]提出了基于多种特征融合的红外目标检测算法,该方法通过将静态目标模式分析和动态多帧相关检测方法结合来提取不同层次的红外目标特征,并通过改进的卷积神经网络来融合这些特征,借助网络增强模块对目标进行了增强和筛选,实现了红外图像的背景抑制。该方法简单地结合了显著性模型的几个检测结果,但是采用的管道滤波直径为一个固定值,限制了它的检测精确度。

为了能够快速识别出目标,并有效降低检测结果中的虚警,本文基于视觉显著性,设计了快速光谱尺度空间耦合动态管道滤波的红外目标检测算法。该方法是一种先粗后精的检测过程,融合了空域与频域特征来提取视觉显著区域。并借助高斯差分理论,通过估算每一帧红外图像中的目标像素直径来改进传统的管道滤波,有效消除虚警。最后,采用多组样本来验证所提算法的检测准确率。

1 所提红外弱小目标检测算法

所提的快速光谱尺度空间耦合动态管道滤波的红外目标检测过程见图1。根据图1发现,该方法分为3个过程,分别是:1)基于快速光谱尺度空间的粗检测;2)基于自适应局部对比度增强机制的细检测;3)基于动态管道滤波的弱小目标检测。

1.1 基于快速光谱尺度空间的粗检测

光谱尺度空间(Spectral Scale Space, SSS)^[8]通常用 于提取红外图像的视觉显著性区域, 它主要依赖频域 分析,但其仅采用了灰度分布差分,使其误警率高, 定位精确度不佳。为此,本文通过综合利用红外目标 的多个特定特征来改进 SSS, 以快速获得弱小红外目 标的突出区域。首先,针对红外弱小目标是图像的高 频部分,且其尺寸较小,采用高通滤波器去除均匀背 景。然后,利用基于光谱分析的全局视觉显著性检测 方法,进一步快速抑制复杂背景。根据弱小目标的小 尺寸和隔离分布特点可知,目标在振幅谱上普遍呈现 低峰,背景为高峰值^[9]。因此,无需在SSS中计算多 尺度显著映射,而只需选择一个合适的高斯核(用大尺 度因子来突出包含目标的小区域)来平滑背景在幅度谱 中的峰值,就可以得到对应的全局视觉显著映射。最 后,根据HVS的大小自适应选择性注意机制,通过自 适应阈值分割,可以提取出包含弱小目标和部分高频





图1所提弱小目标检测算法的过程

背景的视觉显著区域。所以,改进后的SSS不仅可以抑制大部分非视觉显著区域,准确分割出包括目标在内的 全局显著区域,而且可以消除SSS的多尺度计算,有效降低计算复杂度。 给定一幅红外图像I(x,y),则基于快速光谱尺度空间的粗检测过程如下:

1) 使用一个大小为9×9的高斯模板(比弱小目标的尺寸大)来平滑 *I*(*x*,*y*),再从输入图像中减去滤波后的图像,以充分去除均匀背景中的干扰,得到高频区域 *I*_b(*x*,*y*)。该区域包括真实目标、复杂背景和噪声在内。

2) 基于傅里叶变换(Fourier Transform, FT)^[10],根据 $I_h(x,y)$ 的频谱信息,从 $I_h(x,y)$ 中提取视觉显著性区域,其 幅度频谱A(f)和相位频谱P(f)分别为:

$$A(f) = R\left(F\left(I_{h}(x,y)\right)\right) \tag{1}$$

$$P(f) = S\left(F\left(I_{h}(x,y)\right)\right)$$
(2)

式中:F是傅里叶变换;R为FT频谱的实部提取运算结果;S为FT频谱的虚部提取运算结果。

3) 借助一个尺度因子为 σ_k 的高斯核函数 $h(\sigma_k)$ 来卷积幅度频谱A(f),以抑制高峰值背景,从而突出可能包含弱小目标的视觉显著区域 $A_k(f)$:

$$A_k(f) = A(f) * h(\sigma_k)$$
(3)

$$h(\sigma_k) = \frac{1}{2\pi\sigma_k^2} e^{-(x^2 + y^2)/2\sigma_k^2}$$
(4)

式中:*为卷积运算; σ_k 为尺度因子,在本文算法中,取经验值64;e是自然底数。

4) 根据可逆 FT 方法来处理视觉显著区域 $A_k(f)$, 以获取全局显著性映射 S_k :

$$S_{k} = g \ast F^{-1} \left\{ A_{k}(f) \exp\left(P(f)\right) \right\}^{2}$$
(5)

$$g = \frac{1}{2\pi} \times e^{-(x^2 + y^2)/2}$$
(6)

式中:F¹是可逆FT;g代表一个高斯低通滤波,其模板尺寸为5×5。

5) 最后,对*S*_k实施归一化处理,并借助一个阈值*th*来分割。由于显著性映射中的背景区域被有效压缩,可能包含目标的显著区域的灰度值远大于背景区域。也就是说,真实目标的灰度值大于显著性映射的平均值。此外,标准偏差值可以表示给定变量与平均值之间的距离。因此,通过简单地将显著性映射的平均灰度值与其标准差值相加所得到的阈值*th*,基于文献[11]的阈值分割方法,可提取出显著区域内的目标:

$$th = \operatorname{mean}(S_k) + t * \operatorname{std}(S_k) \tag{7}$$

式中: t是一个经验值,取2,用于更好地分割; mean、 std 分别是归一化 S_k 均值和标准差。

对于输入红外图像,根据上述过程,可以获取对应 的全局显著性映射。以图2(a)为标准样本,对其执行步 骤1)~5),得到的全局显著性映射如图2(b)所示。可见, 通过快速光谱尺度空间处理后,复杂背景中的大部分 非视觉显著区域被有效抑制,而且真实目标也被检测 出来。



(a) initial sample (b) global sample (b) global sample (b) global sample (c) global samely mathematical field of the samelmatical field of the samelmatematical fiel

1.2 基于自适应局部对比度增强机制的细检测

从图 2(b)可以发现,虽然粗检测能够准确提取目标的显著性区域,但其结果中存在较多的背景内容。为此,本文引入局部对比度方法(Local Contrast Method, LCM)^[12]来优化粗检测结果。在实际场合中,红外弱小目标的尺寸很小,不能占据多个尺度。此外,红外弱小目标的局部环境特征也不同于边缘等高频干扰。根据这两个特性,本文对传统的LCM^[12]实施改进,以进一步消除各种背景(特别是突出背景)的干扰,增强目标的对比度,从粗检测得到的全局显著区域中准确地识别出目标。

首先,根据LCM,首先将全局显著性映射分割为多个子区域U_i(*i*=1,2,3,…,*m*),并计算每个U_i的高度和宽度。再将二者中的最大值标记为s_i。为了有利于弱小目标的检测,在本文算法中,设置临界值为9,如果s_i>9,

则将其设置为9。为了减少多尺度计算,根据文献[12]的方法,利用粗检测得到的分割子区域的尺寸参数 s_i 来确定待分析区域。然后定义了一个通用特征系数来区分目标区域和突出背景区域。如图3所示,滑动窗口遍历输入图像I中分割的显著子区域 U_i 的每个像素。以每个像素 $j = (x, y) \in U_i$ 为中心,可以定义目标块P,并将其周围区域划分为8个相邻的子块 N_i ($h = 1, 2, 3 \cdots, 8$)。根据 HVS 的大小适应选择性注意机制,目标块P的大小等于 s_i 。通

常,每个子块的大小也等于目标块的大小。然后,通过分析目标块P与相邻8个子块 N_h 之间的分布差异来定义一个特征系数 λ_i 。因此,对于 U_i 中的每个像素, λ_i 可定义为如下:

$$\lambda_{j} = \sup_{h=1,2,\dots,8} \left| \max\left(I_{P}^{j} \right) - \operatorname{mean}\left(I_{Nh}^{j} \right) \right|$$
(8)

式中: $\max(I_P^i)$ 代表以像素j为中心的目标子块P中像素的最大值; $\max(I_{M_h}^i)$ 表示 N_h 的像素均值; sum()为求和运算。

可见,当滑动窗口移动到高亮度的背景区域时,由于整个

区域的分布是均匀的,因此,λ_j的值很小。相反,由于真实目标与其邻域之间的灰度是不同的,因此弱小目标的 λ_j值较大。根据这个特性,高亮度背景区域就可以被充分抑制,而真实目标可被显著增强,且不会引入额外的背 景内容,从而有效克服了传统LCM方法存在的高虚警率等问题^[13]。

随后,根据式(8)的λ,来计算局部显著性映射C的每个像素值C:

$$C^{j} = \frac{\max\left(I_{P}^{j}\right) * \lambda_{j}}{\max_{h=1,2,\dots,8} \left(\max\left(I_{Nh}^{j}\right)\right)}$$

$$\tag{9}$$

显然,局部显著性映射C的信噪比远远大于输入图像,这为精确目标检测奠定了良好的基础。此外,改进的 LCM方法只在适当尺寸参数s_i下进行视觉显著区域的分割,有效避免了多尺度计算过程,大幅降低了计算复 杂度。

最后,为了得到候选目标,本文利用C的均值和标准差来计算分割阈值th₂:

$$th_2 = \operatorname{mean}(C) + t_2 * \operatorname{std}(C) \tag{10}$$

式中t,是一个经验值,本文设置为2。

以图 2(b)为输入样本,根据上述过程,得到的局部显著性映射 C 见图 4。由图发现,局部显著性映射有效增强了目标,并进一步清除了背景信息。



Fig.4 Detailed test results 图 4 细检测结果

1.3 基于动态管道滤波的弱小目标检测

虽然局部显著性映射消除了大部分背景内容,但是细检测结果还是存在诸如暗点、镜像点与陡峭边缘等少量虚警,如图4(a)所示,其对应的强度分布不均匀,见图4(b)。因此,仅通过单帧检测是无法清除这些虚警内容。而同一个虚警无法在多个红外序列图像中出现,所以,本文根据这个特性,引入管道滤波(Pipeline Filtering, PF)^[14]来消除局部显著性映射中的虚警,其对应的结构见图5(a)。但是,PF的管道直径d在整个过滤期间是一个固定值,从而使其只能识别出尺寸小于d的目标。为了改善PF的过滤能力,本文借助高斯差分理论^[15]来改进PF



Fig.3 Local contrast enhancement method (sliding window on the left, image sub block on the right)

图3局部对比度增强方法(左为滑动窗口,右为图像子块)

方法,以动态更新d值。改进后的PF过程如下:

1) 根据尺度理论^[16]可知,对于任意的红外序列图像,均可借助 Gaussian 核卷积来处理:

$$L(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2 + y^2)/2\pi\sigma^2} *f(x, y)$$
(11)

式中: f(x,y)为输入红外图像; $L(x,y,\sigma)$ 为卷积图像; σ 是尺度参数。

2) 再根据 L(x,y,σ), 引入高斯差分(Difference of Gaussian, DoG)方法来定义尺度空间:

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, n\sigma) - L(x, y, \sigma)$$
(12)

式中 $L(x, y, n\sigma)$ 是尺度空间,根据经验值,设置为 $\sigma=0.5, n=1.2$ 。

3) 随后,采用DoG^[15]来计算极值空间点。并把得到的极值点视为候选目标,同时记录其空间坐标(x,y),以 获取对应的直径d:

$$d = 2\sqrt{2}\sigma\tag{13}$$

4) 对于后续的红外序列,重复1)~3),可获取尺度 σ_i 的空间坐标 (x_i, y_i) ,并根据式(13)来计算新的 d_i 值,再根 据文献[14]的管道滤波方法来过滤虚警。

根据上述过程来处理图4(a),得到的检测结果见图5(b),其对应的强度分布见图5(c)。由图发现,细检测结 果中的虚警内容被有效过滤,真实目标被准确识别出来,其强度分布也较为均匀。



(a) pipeline filtering result



(b) detection result Fig.5 Detection results of infrared target 图5红外目标检测结果



2 实验结果与分析

为了验证所提技术在不同红外背景下的检测能力,利用 Matlab 2016 工具来完成标准样本的测试。实验环境 为: 3.30 GHz Intel Core i7 处理器, 512 GB 固态硬盘, 和 16 GB 内存的联想 PC 机。并将图 6(a)、图 7(a)、图 8(a)所 示的3幅红外图像视为测试数据,且其目标的尺寸均处于[3×3,10×10]之间。同时,为了突出该技术的优势,设置 了两个比对组: 文献[6]与文献[7]。测试参数设置为: $\sigma_k=64$, 高斯滤波的模板尺寸为 5×5, $t=t_2=2, \sigma=0.5$, $n = 1.2_{\circ}$



(a) cloud infrared image

(b) reference [6] algorithm (c) reference [7] algorithm Fig.6 Detection results of cloud infrared image 图6云层红外图像的检测结果



Fig.7 Detection results of infrared image of sea surface 图7海面红外图像的检测结果



罗

(a) sky infrared image



(b) reference [6] algorithm



(c) reference [7] algorithm





(d) this algorithm

Fig.8 Detection results of sky infrared image 图8天空红外图像的检测结果

2.1 弱小目标检测结果

3个测试样本均是经典的标准红外序列图像,包括起伏较大的云层背景、对比度较低的海面目标等。在 图 6(a)中,云层的亮度与对比度均高于目标,且起伏较大,检测弱小目标难度较大。尤其是图 7(a),真实目标完 全被背景淹没,整个图像的对比度很低。而图8(a)中的云层亮度接近真实目标,同样存在较大的云层起伏。

3种算法对上述标准样本的检测结果如图6~图8所示。从整体的识别结果来看,所提算法的检测能力要优于 其他两个对照组,复杂背景得到了充分抑制,检测结果中所含的虚警也更少,真实目标被完整地检测出来。而 文献[6]的整体检测效果不理想,所含的虚警内容较多,尤其是对于图 6(a)、图 7(a),虽然目标被识别出来,但是 检测结果中夹杂了较多的背景信息。相对于文献[6]而言,文献[7]呈现出较好的识别准确度,对于3个样本,均 有较好的检测能力,所含的虚警也比较少。主要原因是所提算法考虑了目标与背景的全局特征差异,通过设计 视觉显著性模型来计算全局显著性映射,以抑制复杂背景区域,并兼顾局部特征差异,设计了自适应局部对比 度增强机制,获取局部显著性映射,有效提高了视觉显著性区域内目标的对比度,而且通过改进的管道滤波来 充分消除局部显著性映射中的虚警,使其呈现出较强的检测准确率。文献[6]虽然考虑弱小目标与其周围背景的 特征差异,但其只利用了局部信息,没有兼顾红外图像的全局特征,而且缺乏对局部环境的描述,使其对突出 背景区域的抑制效果受到限制,另外,其采用的方法是一种单帧检测技术,难以过滤检测结果中的虚警内容。 文献[7]通过联合静态目标模式分析和动态多帧相关检测方法来识别真实目标,虽然其结合了多个显著性模型的 结果,但其采用的管道滤波直径是一个固定值,限制了其过滤虚警的能力。

2.2 客观评价

引用信杂比增益(Signal to Clutter Ratio Gain, SCRG)与背景抑制因子(Background Suppression Factor, BSF)来客观评 价上述实验的差异[17]:

$$\begin{cases}
G_{SCR} = \frac{\left(S/C\right)_{out}}{\left(S/C\right)_{in}} \\
B_{SF} = \frac{C_{in}}{C_{out}}
\end{cases}$$
(14)

式中: S为弱小目标的信号幅度; C是红外背景的标准差; out, in 分别代表检测结果、原始图像; GscR代表信杂 比增益值; B_{sr}代表背景抑制因子值。

根据图 6~图 8 的检测结果,通过式(14)来测量初始样本与其对应的检测图像之间的 G_{SCR} 与 B_{SF}值,得到的数据如表 1 所示。可见,对于测试样本,所提技术呈现出更好的检测性能,对应的 G_{SCR}、B_{SF}值均超过其他两个对照组。选择检测难度较大的图 7 而言,本文技术的 G_{SCR}、B_{SF}值分别为 6.251、4.916。而文献[6]的 G_{SCR}、B_{SF}值最小,分别为 5.735、3.825。

表1	各算法的客观评价结果	
----	------------	--

algorithm	evaluation factor	Fig.6	Fig.7	Fig.8
this alcouithm	$G_{\rm SCR}$	8.032	6.251	7.984
this algorithm	$B_{\rm SF}$	5.177	4.916	5.082
nofonon og [6]	$G_{ m SCR}$	6.383	5.735	6.834
reference [6]	$B_{ m SF}$	3.563	3.825	4.379
nofonon og [7]	$G_{ m SCR}$	7.886	6.189	7.722
reference [/]	$B_{\rm SF}$	4.929	4.703	4.834

接收机工作曲线(ROC)也是评价红外目标检测精确度的常用指标^[18]。在本次测试中,以图 9(a)为对象,并对 其设置 20 个虚警率,然后采用所提技术与其他两个对照组来检测目标。对于每个虚警率,记录其对应的准确度, 以此来形成 ROC 曲线,如图 9(b)所示。从中可知,相对于其他两个对照组而言,本文技术表现出更好的 ROC 曲线。



3 结论

为了提高复杂背景下的红外弱小目标的识别能力,本文提出了一种新的高性能红外弱小目标检测算法。首 先,充分利用目标与背景之间的多特征差异作为显著性检测的基础,设计视觉显著性模型,获取全局显著性映 射,以减少背景干扰。并借助自适应局部对比度增强机制来改善视觉显著性区域内目标的对比度,从而完成了 由粗到细的检测策略。根据红外图像的多尺度空间来计算对应的管道直径,形成一种动态管道滤波,以有效过 滤局部显著性映射中的虚警,从而准确识别出弱小目标。测试数据表明所提算法具有较高的检测准确性和较低 的误报率。

参考文献:

- [1] 刘炎,王涛,陈凡胜. 基于时域信噪比的红外弱小目标检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(1):118-123. (LIU Yan, WANG Tao, CHEN Fansheng. Infrared dim small target detection based on time domain SNR[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(1):118-123.)
- [2] PENG Lingbing, ZHANG Tianfang, LIU Yuhan. Infrared dim target detection using shearlet's kurtosis maximization under nonuniform background[J]. Symmetry, 2019,11(5):723-731.
- [3] 李雪琦.复杂背景弱小目标特征分析与识别策略研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2019. (LI Xueqi. Feature analysis and recognition strategy of dim small target in complex background[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2019.)
- [4] FAN Xiangsuo, XU Zhiyong, ZHANG Jianlin. Dim small target detection based on high-order cumulant of motion estimation[J]. 2020,99(8):86-101.
- [5] 向涛. 基于显著区域提取的红外图像舰船目标检测[J]. 电讯技术, 2020,60(7):785-790. (XIANG Tao. Ship detection in

infrared image based on salient region extraction[J]. Telecommunication Engineering, 2020,60(7):785-790.

- [6] XIA Chaoqun,LI Xiaorun,ZHAO Liaoying. Infrared small target detection based on multiscale local contrast measure using local energy factor[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020,17(1):157–161.
- [7] HU Xiaodong, WANG Xinqing, YANG Xin. An infrared target intrusion detection method based on feature fusion and enhancement[J]. Defence Technology, 2020,16(3):737-746.
- [8] XIN Yunhong, ZHOU Jiao, CHEN Yishuan. Dual multi-scale filter with SSS and GW for infrared small target detection[J]. Infrared Physics and Technology, 2017,81(3):97-108.
- [9] LI J, LEVINE M D, AN X J. Visual saliency based on scale-space analysis in the frequency domain[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013,35(4):996-1010.
- [10] SUN Xiaoliang, HOU Wang, YU Qifeng. Small infrared target detection using frequency-spatial cues in a single image[J]. Journal of Electronic Imaging, 2014,23(4):043003-043012.
- [11] 蔡军,黄袁园,李鹏泽. 基于视觉对比度机制的红外弱小目标检测算法[J]. 系统工程与电子技术, 2019,41(11):2416-2423.
 (CAI Jun,HUANG Yuanyuan,LI Pengze. Infrared dim target detection algorithm based on visual contrast mechanism[J]. System Engineering and Electronic Technology, 2019,41(11):2416-2423.
- [12] CUI Zheng,YANG Jing,LI Junbao. An infrared small target detection framework based on local contrast method[J]. Measurement, 2016,91(5):405-413.
- [13] QIN Yao, BRUZZONE Lorenzo, GAO Chengqiang. Infrared small target detection based on facet kernel and random walker[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2019,57(9):7104-7118.
- [14] 刘刚,梁晓庚. 基于小波变换和管道滤波的红外空中小目标检测[J]. 计算机工程与应用, 2012,47(30):198-201. (LIU Gang, LIANG Xiaogeng. Infrared small target detection in the air based on wavelet transform and pipeline filtering[J]. Computer Engineering and Application, 2012,47(30):198-201.)
- [15] 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. (SUN Xiongwei. Research on fast detection technology of infrared small target on sea surface under complex background[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2019.)
- [16] 谷雨,刘俊,沈宏海. 基于改进多尺度分形特征的红外图像弱小目标检测[J]. 光学精密工程, 2020,28(6):1375-1386. (GU Yu, LIU Jun, SHEN Honghai. Dim and small target detection in infrared image based on improved multi-scale fractal feature[J]. Optical Precision Engineering, 2020,28(6):1375-1386.)
- [17] 潘良,邱建林. 基于时空高阶累积量与各向异性背景抑制的红外弱小目标检测算法[D]. 电子测量与仪器学报, 2018,32(11): 118-124. (PAN Liang, QIU Jianlin. Infrared dim target detection algorithm based on temporal-spatial higher-order cumulation and anisotropic background suppression[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32(11):118-124.)
- [18] WAN Minjie, REN Kan, GU Guohua. Infrared small moving target detection via saliency histogram and geometrical invariability[J]. Applied Sciences, 2018,7(6):569-577.

作者简介:

罗 群(1981-), 女,四川省内江市人,硕士,副 教授,高级工程师,主要研究方向为模式识别、红外 探测、计算机应用技术.email:Luoqn1981cqy@sohu.com. **刘** 俊(1978-),男,南昌市人,博士,讲师,主 要研究方向为机器学习、模式识别、信息安全.