

doi:10.3788/gzxb20174606.0610002

# 基于多特征的快速红外弱小目标检测算法

易翔, 王炳健

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

**摘 要:**为了从全向红外搜索和跟踪系统采集的海量大视场高分辨率红外图像中快速准确地检测出红外弱小目标,本文提出了一种基于由粗到细的分阶段检测策略和时空域特征融合的红外弱小目标检测算法.首先,通过引入基于频域的快速显著性检测算法预先检测出目标可能存在的候选区域;其次,对候选区域进行角点检测以判定是否存在候选目标;最后,通过结合帧间时空域特征对候选目标进行进一步判定,以提取真实目标、删除虚假目标.多种实际场景的实验结果表明,该目标检测算法不仅运算量小而且探测概率高、虚警率低,是一种工程实用性能很好的红外弱小目标检测算法.

**关键词:**红外夜视技术;目标检测;多特征;图像处理;弱小目标;显著性检测;角点检测

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)06-0610002-6

## Fast Infrared and Dim Target Detection Algorithm Based on Multi-feature

YI Xiang, WANG Bing-jian

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to detect dim infrared targets from a mass of high resolution images in wide field of view system rapidly and accurately, a novel target detection method based on a phased strategy for research and multi-feature fusion is proposed in this paper. First of all, a saliency detection algorithm based on frequency-domain is carried out to extract candidate region which may contain targets. Then, invariant corner detection algorithm is adopted in candidate region to determine the presence of suspicious targets. Finally, the real targets can be confirmed by time-space coherence in multi frames. The experiment proves that the proposed method can detect dim infrared targets with small calculating amount, high detection probability and low false alarm rate. It is suitable for Infrared Search and Track system in practical engineering.

**Key words:** Infrared night vision technique; Target detection; Multi-feature; Image processing; Dim and small target detection; Saliency detection; Corner detection

**OCIS Codes:** 100.4999;110.2970;110.3080;330.1880

## 0 引言

全向红外搜索和跟踪系统(Infrared Search and Track,IRST)通过接收目标和复杂背景的红外辐射来检测、识别和跟踪飞机或导弹等威胁目标,具有大视场、体积小、隐蔽性强、全天时工作和不容易被电磁干扰影响等优点,因此它在机动平台预警、飞行器全向感知等军事领域中有着举足轻重的地位<sup>[1]</sup>.其中,复杂背景下的快速红外弱小目标检测技术是IRST系统的核心技术和热门研究课题,其具体难点表现在以下3个方面:1)系统采集的图像数据量较大,以致硬件设备难以完成目标的实时检测与跟踪;2)采集的全向图像背景复杂,干扰面积大,图像信噪比低;3)红外弱小目标无明显的几何特征.这使得众多传统的目标检测算法无法有效地直接应用于全向IRST系统中<sup>[2-3]</sup>.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61107007, 61265006, 61401343)资助

第一作者:易翔(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为光电成像处理. Email:alanyi7@163.com

导师(通讯作者):王炳健(1977-),男,教授,博士,主要研究方向为光电成像处理及实现. Email:bjwang@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2016-12-30;录用日期:2017-03-16

<http://www.photon.ac.cn>

近年来,基于显著性检测的红外目标检测方法已获得较多的关注并取得了一定的成果:如文献[4]提出了一种结合区域显著性的局部对比度算法,通过对弱小目标可能出现的显著性区域进行局部对比度计算和自适应阈值分割,得到弱小目标检测结果,此方法可有效地提高目标的信噪比,但该算法计算复杂度较高且检测结果依赖于先验参量的设定;文献[5]提出了一种基于显著性与尺度空间的红外弱小目标检测算法,该方法检测效果尚可,但尺度空间的构建计算量较大,耗时偏多. 综上,该类算法都存在着引入的检测算法过于复杂、耗时偏多且结果较多地依赖于参量选择等问题. 针对这一问题,本文从工程实际出发,通过对频域显著性检测算法进行分析,并结合局部角检测的思想,提出一种由粗到细的分阶段检测和结合目标时空域特征的红外弱小目标检测算法,大大提高了算法的检测效率,得到了较好的检测结果.

## 1 基于显著性区域的目标预检测

图像中的目标区域与背景区域之间会存在一些差异,而人类视觉感知系统(Human Visual System, HSV)可以依据这些差异通过选择性注意机制,有效地选择出这些显著性区域. 对于红外弱小目标检测而言,图像的背景通常为大片天空、云层或者海面等变化较为缓慢的区域,因而它们占据了图像的中低频部分. 目标的灰度值会略高于局部背景,呈现出灰度局部显著性,即目标为图像的高频成分,因此,可以通过频域显著性区域检测算法快速定位出红外弱小目标可能存在的候选区域<sup>[6]</sup>.

Hou等<sup>[7]</sup>提出频谱残差(Spectral Residual, SR)方法通过处理图像幅度谱获取其残差谱,再利用其傅里叶逆变换得到显著图. 它具有算法简单、计算快的优点,但将它直接应用于红外弱小目标检测时出现了检测准确度较差,容易受到复杂背景的干扰等问题<sup>[8-9]</sup>. 针对以上不足,本文提出了一种改进的频谱残差法(Enhanced Spectral Residual, ESR),通过对图像幅度谱进行自适应调谐以抑制图像中冗余的背景信息,进而增强目标检测效果.

对于给定的红外图像  $I(x, y)$ , 对其进行 2D 傅里叶变换, 得到幅度谱  $A(f)$  和相位谱  $P(f)$ . 幅度谱包含了图像的灰度信息, 而相位谱  $P(f)$  包含了图像的纹理结构信息<sup>[10]</sup>, 即

$$A(f) = R(F(I[x, y])) \quad (1)$$

$$P(f) = S(F(I(x, y))) \quad (2)$$

式中,  $F$  和  $F^{-1}$  分别代表傅里叶变换和其逆变换,  $R$  和  $S$  分别代表对函数求其实部和虚部.

SR 算法首先通过对幅度谱  $A(f)$  做  $\log$  运算以减少运算量, 并利用平均滤波器  $h(f)$  与  $\log$  幅度谱  $L(f)$  进行卷积并与原始  $\log$  幅度谱的相减获取残差谱  $R(f)$ , 即

$$L(f) = \log(A(f)) \quad (3)$$

$$R(f) = L(f) - h(f) \cdot L(f) \quad (4)$$

其次, 将残差谱  $R(f)$  和相位谱  $P(f)$  进行二维离散傅里叶逆变换, 最后与高斯平滑滤波器  $g(x, y)$  卷积即可重构出显著图  $I^*(f)$ , 即

$$I^*(f) = g(x, y) \cdot F^{-1}\{\exp(R(f) + P(f))\}^2 \quad (5)$$

本文采用频率调谐法对其进行改进, 通过设定自适应阈值, 将小于阈值的幅度谱进行抑制同时将大于阈值的幅度谱进行增强, 进而有效突显并定位出目标可能存在的局部显著性区域. 自适应阈值  $T$  的表达式为

$$T = u + t \cdot \text{std} \quad (6)$$

式中,  $u$  和  $\text{std}$  分别为幅度谱的均值和方差,  $t$  为系数(本文取  $t=2$ ), 即

$$u = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n A(x, y) \quad (7)$$

$$\text{std} = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (A(x, y) - u)^2 \quad (8)$$

因此, 增强后的幅度谱  $A^*$  为

$$A^*(x, y) = \begin{cases} A(x, y) \times \gamma & A(x, y) \leq T \\ A(x, y) \times \beta & A(x, y) > T \end{cases} \quad (9)$$

$\alpha$  和  $\beta$  分别为调整系数(本文  $\gamma=1.2, \beta=0.8$ ), 然后利用式(5)获得最终增强后的显著图.

## 2 基于时空域特征的目标精确检测

ESR 算法可以快速有效地在复杂背景中定位出红外弱小目标可能存在的候选区域,而大量研究表明仅依靠单一特征难以在复杂背景中精确识别出红外弱小目标.通过进一步分析红外弱小目标与背景的特性差异可知,目标通常在图像水平和垂直两个方向梯度变化都会较为明显且在局部邻域内也表现为极值,这与图像中角点的特性一致<sup>[11]</sup>.因此,本文通过对图像中的显著性区域进行 Harris 角点检测<sup>[12]</sup>以提取出候选目标点.这种对局部邻域求取极值的操作不仅可以进一步排除复杂背景的干扰,不容易漏检弱小目标,同时有着操作简单,计算量小等优点.

Harris 角点检测算法的计算过程为:首先,在计算两方向梯度变化时定义了一个用于替代并简化自相关函数计算的矩阵  $\mathbf{M}$ .然后,遍历图像计算每个点的  $\mathbf{M}$  值并进行判定.矩阵  $\mathbf{M}$  经分解后得到的两个特征值即为自相关函数的一阶曲率,若某个点的两个特征值都大于某一阈值,那么就可以将这一点定义为候选点,通常这一步骤采用响应函数  $R$  来简化判定.

$$\mathbf{M}(x, y) = \omega \otimes \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

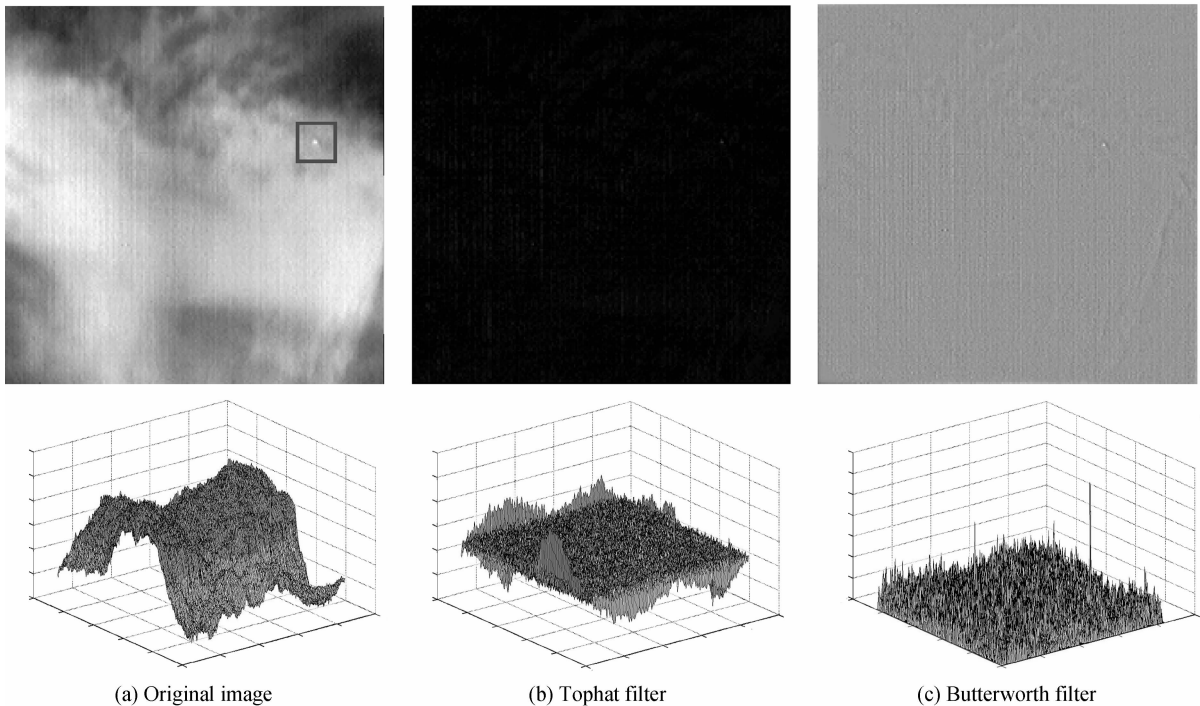
$$R = \det \mathbf{M} - \alpha (\text{trace} \mathbf{M})^2 \quad (11)$$

式中,  $\omega$  为加权函数,可为常量或者高斯函数.  $I_x$  和  $I_y$  分别表示图像在  $x$  和  $y$  方向的一阶梯度,  $\det \mathbf{M}$  为矩阵的行列式,  $\text{trace} \mathbf{M}$  为它的迹,  $\alpha$  为系数,一般取值为 0.04~0.06.当某点的响应值大于所设阈值且为邻域内局部最大时,即可判定为角点.由于红外弱小目标一般不会超过  $9 \times 9$  像素,因此本文选取的局部邻域为  $9 \times 9$ .

经显著性区域检测和角点提取后,候选区域中大多虚假目标已得到有效地滤除.为进一步提高系统的检测性能,本文依据目标的时域特征对其作进一步的判决.通常,目标在序列图像中出现的位置会有一定的连续性,而噪声和虚假目标的出现位置存在一定的随机性.因此,可以通过判决连续帧间检测出的目标位置是否连续可以进一步剔除虚假目标,假定候选目标在连续 10 帧中有至少 8 帧出现即判断其为真实目标,这样确保了最终检测的目标真实可靠<sup>[13]</sup>.

## 3 实验结果及分析

利用全向 IRST 系统的光图采集机构采集的包含红外弱小目标的全向各方位视场图像序列进行仿真实验,其中图像大小为  $256 \times 256$ ,实验平台为 matlab2013a, Intel(R)Core™i3-2120CPU@3.30GH.为验证本



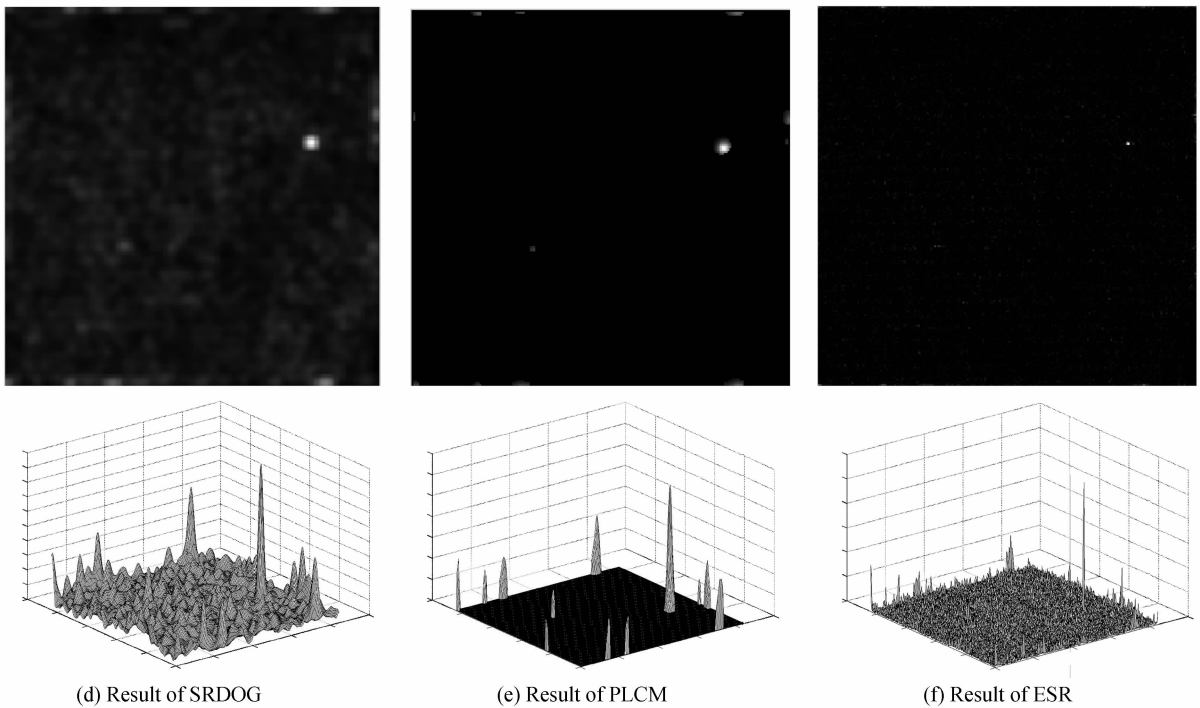


图1 不同算法检测结果的二维图和三维图对比

Fig. 1 Comparison of detection results and corresponding 3D surfaces through different methods

文算法的有效性,采用全向IRST系统采集视频中含弱小目标的红外云层图像进行测试,并将本文提出的ESR算法分别与传统滤波检测算法中的Tophat、巴特沃斯(Butterworth)高通滤波法、文献[5]提出的基于显著性区域和尺度空间(SRDOG)的目标检测算法及文献[4]提出局部显著度检测算法(PLCM)的检测效果进行比较,仿真结果如图1所示。

首先,对比这五种检测算法的二维图像可以看出,Tophat和Butterworth算法的检测效果不理想,目标几乎湮没在背景中.理论分析可知,Tophat算子的检测效果依赖于选取的形态学结构元素的尺寸大小而Butterworth算法的检测效果依赖于最优截止频率的选取,因此,二者都无法有效地应对复杂背景的干扰.其余三种检测算法都较好地抑制了显著性较低的背景云层区域.而进一步分析三维图像可以明显看到,本文算法最为精确地突显了图中最显著的目标区域.相较其他两种检测算法而言,本文算法通过对图像幅度谱进行自适应调谐,有效地抑制了复杂背景区域,大减少了虚警点,因而后续操作只需在这些显著区域内对红外弱小目标进行进一步的精确识别和定位,这大大提升了红外全向系统的检测性能。

上述分析结论是基于视觉主观性对比而得到的,为进一步定量表明本文算法的优越性,引入信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)和算法耗时来评价各算法的性能,其中,算法的信噪比越大,耗时越少,则其性能越优<sup>[14-15]</sup>.结果如表1所示,相较其它四种算法而言,本文算法可以在耗时较短的前提下有效地抑制背景,提升了目标区域的信噪比,有利于在复杂背景分割出真实的红外弱小目标。

表1 不同算法对同一图像的检测性能比较

Table 1 Comparison of detection performance through mentioned methods in the same image						
	Original image	Tophat	Butterworth	SRDOG	PLCM	ESR
SNR	2.891 6	14	7.050 4	8.196 9	12.027 0	26.378 0
Time/s	0	0.669 3	0.172 5	0.874 0	1.273 0	0.116 7

本文算法的主要优势在于它可快速有效地利用频谱显著性特征、空域角点特征和时域特征,使红外弱小目标检测算法的性能达到最优.以三组不同的红外测试图像为例对本文算法的检测性能进行评估,包括两组复杂云层背景和一组整体偏暗的序列图像,最终检测结果如图2所示.这三组实际场景的仿真结果可以证明,本文提出的红外弱小目标检测算法对各类复杂背景都有着较高的适应性。

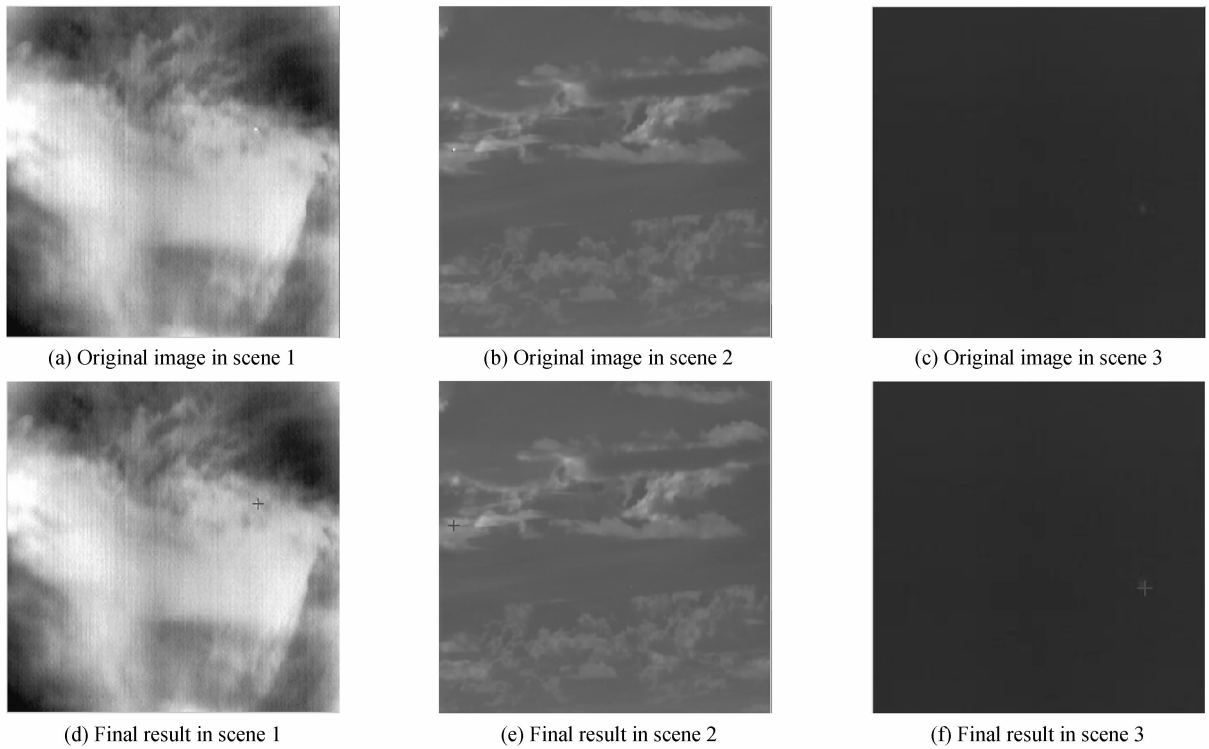


图2 本文算法对不同场景图像的检测结果

Fig. 2 Comparison of detection results of the proposed method in different scenes

为验证本文算法对多帧图像的检测效果,采用探测概率、虚警率和整体耗时三个指标,将本文算法结果分别与帧间差法(frame difference method)、混合高斯模型法(Gaussian mixture model)、文献[5]提出的SRDOG算法和文献[4]提出的PLCM算法的检测结果进行比较.表2给出了连续100帧图像的检测结果,由表可知,本文算法有着最优的探测概率且耗时最少.分析可知,虽然帧间差法和混合高斯模型法为常用的多帧目标检测算法,但帧间差法由于抗噪声干扰性不强而易出现漏检的情况,高斯混合模型则由于背景建模更新时间过长且在帧数较少时容易出现虚警点,因此二者都无法有效保证检测结果的精确可靠性.两种文献提出的算法都存在着耗时过长的问題,而本文算法采用由粗到细的分阶段检测的策略,并通过联合时空域多种特征,在保证探测概率和虚警率的基础上有效地降低了耗时,确保其在红外全向系统上具有较好的工程实用价值

表2 不同算法对连续帧图像检测性能比较

Algorithm	Detection ratio	False alarm ratio	Detection time/s
Frame difference	92.5%	0.012 5	7.795 5
Gaussian mixture model	95%	0.037 5	27.262 0
SRDOG	95%	0.012 5	70.304 5
PLCM	98%	0	90.127 6
Proposed method	100%	0	5.110 8

## 4 结论

全向IRST系统可有效地进行战场态势感知与评估,随着系统朝着多波段、大阵列方向发展,如何从海量的高分辨率红外图像中快速准确地检测出目标成为了当今的研究热点.本文提出了一种由粗到细分阶段检测策略的红外弱小目标检测算法.首先通过引入基于频域的快速显著性检测算法预先检测出目标可能存在的显著性区域,再对显著性区域进行进一步Harris角点检测以判定出候选目标,并在后续处理中通过帧间时域特征对目标进行进一步判定以删除虚警点.多种实际场景的仿真结果表明,本文提出的算法相对于传统目标检测算法,不仅探测性能好,而且耗时较少,工程实用性高.由于本文算法未曾考虑地面复杂背景对算法带来的影响,因此下一步研究也应着重于此.

## 参考文献

- [1] KIM S, LEE J. Small infrared target detection by region-adaptive clutter rejection for sea-based infrared search and track [J]. *Sensors*, 2014, **14**(7): 13210-42.
- [2] HUANG Fu-yu, SHEN Xue-ju, LIU Xu-min, *et al.* Detection of super wide-field infrared target based on spatial-temporal fusion processing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(8): 2328-2338.  
黄富瑜, 沈学举, 刘旭敏, 等. 基于空时域联合处理检测超大视场红外目标[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(8): 2328-2338.
- [3] SUN Gang, GUO Shi-jian, CHEN Zeng-ping. Real-time target detection algorithm of infrared imaging alarm system in panoramic field-of-view[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(7): 2152-2158.  
孙刚, 郭仕剑, 陈曾平. 周视红外成像搜索系统中的实时目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(7): 2152-2158.
- [4] WANG Xiao-yang, PENG Zhen-ming, ZHANG Ping. Infrared small dim target detection based on local contrast combined with region saliency[J]. *High Power Laser Particle Beams* 2015, **27**(9): 32-38.  
王晓阳, 彭真明, 张萍, 等. 局部对比度结合区域显著性红外弱小目标检测[J]. *强激光与粒子束*, 2015, **27**(9): 32-38.
- [5] ZHOU Jiao, XIN Yun-hong. Infrared dim small target detection based on saliency and scale-space [J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(4): 452-456.  
周姣, 辛云宏. 基于显著性与尺度空间的红外弱小目标检测[J]. *激光与红外*, 2015, **45**(4): 452-456.
- [6] QI Sheng-xiang. A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2013, **10**(3): 495-499.
- [7] HOU Xiao-di, ZHANG Li-qing. Saliency detection: A spectral residual approach [C]. 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, Minnesota, USA. IEEE, 2007:1-8.
- [8] GUO Chen-lei, MA Q, ZHANG L. Spatio-temporal Saliency detection using phase spectrum of quaternion fourier transform[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition IEEE Computer Society Conference on CVPR, Anchorage, Alaska, USA. CVPR, 2008: 1-8.
- [9] CUI Xin-yi, LIU Q, METAXAS D. Temporal spectral residual: fast motion saliency detection [C]. International Conference on Multimedia 2009, Vancouver, British Columbia, Canada, IEEE, 2009: 617-620.
- [10] CAO Xiang-hai, ZHANG P, HE L. Saliency detection: Some ideas about spectral residual [C]. IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing. Kunming, China, IEEE, 2013: 1-6.
- [11] LU J, LEI Y, CHEN J. A target detection method in dynamic scene based on Harris algorithm with sub-block threshold [C]. Intelligent Control and Automation (WCICA), 2012 10th World Congress on. IEEE, 2012: 4842-4847.
- [12] GUO Chen-guang. A fast and accurate corner detector based on harris algorithm [C]. International Symposium on Intelligent Information Technology Application IEEE, 2009:49-52.
- [13] CHEN Zhong. A novel spatial-temporal detection method of dim infrared moving small target [J]. *Infrared Physics & Technology* 2014, **66**(9): 84-96.
- [14] GREENE, HAROLD H, BROWN J M, *et al.* Luminance contrast and the visual span during visual target localization [J]. *Displays*, 2013. **1**(34): 27-32.
- [15] CHEN Fang-han, WANG Wen-sheng, YANG Kun, *et al.* Detection and recognition of infrared target based on the multiwavelet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 295-298  
陈方涵, 王文生, 杨坤, 等. 基于多小波变换的红外目标探测与识别 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 295-299.