

基于空间距离改进的视觉显著性弱小目标检测

杨林娜 安 玮 林再平 李安冬

国防科学技术大学电子科学与工程学院 湖南 长沙 410073

摘要 在人类视觉系统(HVS)中,占据重要部分的是对比度值而不是亮度。现有的基于HVS的红外弱小目标检测算法可以有效提高目标信噪比和检测率,但也存在虚警率较高、易受噪声影响等问题。针对这些问题,提出一种基于空间距离改进的视觉显著性红外弱小目标检测算法。用目标所在像素块均值与其周围像素块加权值的比值来加权目标点灰度,得到一幅显著图。在计算周围像素的灰度加权值时,将视觉注意机制中关键因素之一的空间关系考虑进去,根据空间距离加权计算,较远的地方分配较小的权值。实验表明,本文算法不仅可以降低虚警率,而且抗噪能力也比较强。

关键词 机器视觉;空间距离;视觉显著性;弱小目标检测

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0715004

Small Target Detection Based on Visual Saliency Improved by Spatial Distance

Yang Linna An Wei Lin Zaiping Li Andong

*School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract In human visual system (HVS), is the contrast value occupies the most important part rather than the brightness. The existing infrared small target detection algorithm based on HVS can get a higher signal to noise ratio and detection rate, but it also has shortcomings of higher false alarm rate and easily effected by noise. Considering those shortcomings, An infrared small target detection algorithm based on visual saliency improved by spatial distance is proposed. The gray value of target is weighted by the ratio of the target pixel block and its surrounding blocks, and a saliency map is got. Spatial distance is one of the most important factors in visual attention mechanism and is used in the calculation of the weighted sum of the surrounding blocks. Smaller weight value is distributed to fruther distance according to the weighted space distance. Experimental results show that the proposed algorithm can not only get a lower false alarm rate, but also has robustness for noise.

Key words machine vision; spatial distance; visual saliency; small target detection

OCIS codes 150.0155; .330.7326; 110.2970

1 引 言

红外弱小目标检测作为红外图像技术中的关键技术,在远程预警、精确制导及打击中有着及其重要的地位。近年来,随着弱小目标检测系统的不断发展,涌现出很多检测和识别的新算法^[1-4],但因目标自身特性和背景复杂度等问题,使得对其的检测依然是个技术难题。

实际上,即使目标的信噪比较低,其相对周围背景区域总是灰度突出的点,而人类视觉系统(HVS)能够根据这种差异迅速发现图像中的这些区域^[5]。通过建立由生物学启发下的视觉注意模型,可以利用视觉注意机制得到图像中最容易引起注意的部分,并用一幅灰度图像表示这种显著程度^[6]。现今视觉注意大致分为两类:1)快速的、下意识的、自底向上的、数据驱动的显著性特征提取^[7];2)慢速的、任务依赖的、自顶向下

收稿日期:2015-01-06;收到修改稿日期:2015-03-18

作者简介:杨林娜(1991-),女,硕士研究生,主要从事空间红外图像获取与处理方面的研究。E-mail:yanglinna3@163.com

导师简介:安 玮(1969-),女,博士,教授,主要从事空间红外图像获取与处理方面的研究。E-mail:nudtanwei@tom.com

的、目标驱动的显著性提取^[8,9]。

现有的显著性检测模型基本上都是基于1987年Koch等^[10]最早提出的生物启发模型,即视觉注意模型。Itti等^[11]于1998年最先提出基于center-surround的显著性检测算法。该算法将三个特征(亮度、颜色和方向)表示成多尺度的高斯金字塔,最后得到显著图。之后陆续有学者提出基于视觉显著性的检测算法,其中2011年Cheng等^[12]提出的基于全局对比度的显著性检测算法引起了广泛的注意。其中的区域对比度(RC)方法,不仅考虑颜色对比度,还考虑了空间关系,相比当时最好的八种算法都有着更好的检测效果,但时间复杂度更高。Chen等^[13]提出一种局部对比度算法(LCM),在此之前,视觉显著性在目标检测中更多的是用于区域目标的检测,而该算法将视觉显著性引入弱小目标检测,并取得较好的效果。算法通过测量当前位置和局部邻域的不同得到局部对比图,再针对对比图做目标检测。但这种算法易受噪声影响,同时在运算过程中会加强虚警点,使得虚警率增高。Han等^[14]在LCM算法^[13]的基础上,提出一种改进的LCM(ILCM)算法,算法先将图像处理成子像素块,再用均值替换LCM算法中的最大值,使得虚警率有所降低,但仍易受到噪声影响。

无论LCM算法还是ILCM算法,在算法步骤中都没有充分利用每一个像素点的灰度信息。其次,在对比度定义中没有将视觉注意机制中关键因素之一的空间关系考虑进去。本文提出一种在LCM算法基础上改进的,基于空间距离改进的视觉显著性红外弱小目标检测算法。用目标像素块均值与周围像素加权值的比值来加权目标,充分利用每一个像素点的灰度信息,降低噪声点的影响;在计算周围像素灰度加权值时,将空间距离考虑进去,较远的地方分配较小的权值,更加符合人类视觉机制。单帧仿真实验表明,本文算法可以达到提高目标信噪比(SNR)的目的;与其他三种算法的正试着操作特征曲线(ROC)作对比,验证了本文算法可以降低虚警率;在主场景实验条件下,将相机噪声(高斯白噪声)增大一倍,对比加噪前后算法的ROC曲线,表明本文算法抗噪能力比较强。

2 LCM算法概述与分析

如图1所示,对任一幅红外图像 w [图1(a)], v 作为其中的滑动窗,在图像 w 中自上而下、从左到右滑动,其中 v (通常窗口 v 的大小为 u 的3倍)包含目标区域 u 及 u 的局部背景。

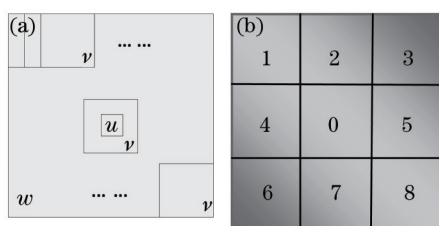


图1 (a)滑动窗示意图;(b)每一个 v 的分块图

Fig.1 (a) Schematic diagram of sliding window; (b) block diagram of each v

针对每个窗口 v ,平均将其分为9块,为了方便后面说明,对其编号如图1(b)所示。每一个子块的均值为 $m_i(i=1,2...8)$

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j^i, \quad (1)$$

定义中心像素块和周围像素的对比值为

$$c_i^n = \frac{L_n}{m_i}, \quad (2)$$

式中 L_n 为中间第0像素块的最大值。为了加强目标,定义LCM值为

$$C_n = \min_i L_n \times c_i^n = \min_i L_n \times \frac{L_n}{m_i} = \min_i \frac{L_n^2}{m_i}. \quad (3)$$

分析LCM算法流程可以发现,虽然LCM算法通过用对比度值加权目标点灰度,达到了提高目标SNR和检测率的目的,但仍存在以下两个主要缺点:

- 1) 增加虚警点。 L_n 代表第0像素块(滑动窗 u)中的极值,如果某一像素点[目标点或噪声点,记为 $I(i,j)$]

是灰度突出的点,那么所有能够包含 $I(i,j)$ 的滑动窗 u , 其中的极值 L_n 都是相同的,而周围背景区域 $\max m_i$ 值相差不大,则会导致 $I(i,j)$ 周围的像素点会同 $I(i,j)$ 一样被偏大的 $c_i^n = \frac{L_n}{m_i}$ 加权,导致 LCM 值比正常值偏大,在接下来的检测中,成为虚警点。

2) 受噪声影响大。LCM 计算公式中 L_n 和 m_i 都是局部极值;根据(3)式,每一个像素点的 LCM 值都为所有窗口尺寸下 LCM 的最大值。这些都使得 LCM 值极易受到噪声点的影响,即在噪声强度较大时,个别灰度值偏大的噪声点,极易被误判为目标点,导致算法性能受到较大的影响。

3 基于空间距离改进的视觉显著性弱小目标检测

除了对比度,空间关系在人类视觉注意方面也起到非常大的作用,相邻区域的高对比度比很远区域的高对比度更容易导致一个区域引起视觉注意^[1]。受这一原理启发,并针对 LCM 算法存在的问题,提出了基于空间距离改进的视觉显著性红外弱小目标检测算法。图 2 为算法流程图。

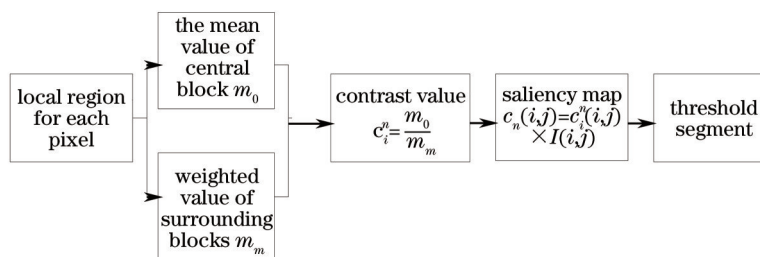


图 2 算法流程图

Fig.2 Flow chart of the proposed algorithm

类似 LCM 算法,在图像中设置相同的滑动窗[图 1(a)],滑动窗将每个区域划分为目标像素块和局部背景区域。定义新的中心像素块和周围像素的对比度为

$$c_i^n = \frac{m_0^n}{m_m^n}, \quad (4)$$

式中 m_0^n 为 v 中第 0 像素块[图 1(b)]的均值, m_m^n 为周围像素块的灰度加权。用均值和加权来定义对比度值,不仅可以充分利用每一个像素点的灰度信息,而且当所有像素求均值或做加权求和后,个别噪声点对算法的影响就可以得到有效抑制。周围像素加权和 m_m^n 的计算公式为

$$m_m^n = \sum_{i=1}^8 w_i \times m_i, \quad (5)$$

式中 w_i 为周围第 $i(i=1,2,3...8)$ 像素块的均值 $m_i(i=1,2,3...8)$ 的权值,大小与其距离中心像素块的欧式距离成反比。在人类视觉系统(HVS)中,对比度不仅和周围每个像素点的灰度值有关,同时和空间距离也有关系,距离越近的像素对对比度值的影响越大,相反,距离越远影响越小。故权值 w_i 计算公式为

$$w_i = \frac{1/l_i}{\sum_{i=1}^8 1/l_i}, \quad (6)$$

式中 l_i 为第 $i(i=1,2,3...8)$ 像素块的中心像素点与第 0 像素块中心像素点之间的欧氏距离。在根据距离加权运算时,用每一块的均值代表整块的灰度值,用每一块中心像素的距离代表整块的距离,这样避免了针对每一个像素的灰度值做加权和,可以在一定程度上减小计算量。

则针对图像中的每一点,用对比度值 c_i^n 加权其灰度值,得到显著图 c_n 为

$$c_n = c_i^n \times I_{i,j} = \frac{m_0^n}{m_m^n} \times I_{i,j}, \quad (7)$$

式中用对比度值加权当前像素点 $I_{i,j}$ 的灰度值,避免了 LCM 算法中加权局部最大值 L_n 带来的增加虚警点的缺点。

针对每个像素点 I_{ij} , c_i^n 描述了该点所在像素块与其周围像素块的对比度。因为目标一般都是灰度值突出的点, 即其灰度值大于周围背景灰度值。如果第 0 像素块是目标所在点, $m_0^n > m_m^n$, 则 $c_i^n > 1$, $c_n > I_{ij}$, 目标灰度值得到加强; 而如果第 0 像素块处于目标像素块周围, $m_0^n < m_m^n$, 则 $c_i^n < 1$, $c_n < I_{ij}$, 目标灰度值被削弱。所以通过这一对比度值的加权, 使得目标在显著图中更加突出, 更易于被检测出来。

对得到的显著图 c_n 做阈值分割, 得到目标。门限计算公式为

$$T = \mu_{c_n} + k\sigma_{c_n}, \quad (8)$$

式中 μ_{c_n} 和 σ_{c_n} 分别为显著图 c_n 局部去心邻域内的均值和方差, k 为常数。对于滑动窗 μ 的尺寸选择, 经大量仿真实验表明, 应尽量与目标大小相当, 则滑动窗 v 的尺寸大小为目标大小的 3 倍, 此时算法效果最佳。

4 仿真实验结果与分析

参考 LCM 算法^[13]中的测试图像, 仿真实验用大小为 256 pixel × 200 pixel 的红外图像 a 和 200 pixel × 200 pixel 的红外图像 b 测试算法性能, 它们是由风云卫星真实获取的图像反演得到, 使用 Matlab 软件, 在配置有 3.10GHz Intel i3 处理器的电脑上完成。首先定量分析算法提高 SNR 的性能, 然后为了更好地研究其有效性, 将其与传统的环形中值滤波、Chen 等^[13]提出的 LCM 算法以及 Han 等^[14]提出的 ILCM 算法作比较。

因为相机光学系统的点扩散效应, 点目标的辐射能量会分布在以其投影中心为圆心的周围几个像素中, 所以仿真实验中, 以目标为 3 pixel × 3 pixel 大小考虑窗口的选择。环形中值滤波窗口大小取 11 pixel × 11 pixel 减 5 pixel × 5 pixel; LCM 算法中窗口 μ 与目标大小相当, 即取 3 pixel × 3 pixel; ILCM 算法中 sblk(即 μ) 的大小与目标大小相当, 而步长为 sblk 大小的 1/2, 故仿真中 sblk 大小取 3 × 3, 步长取 1。

首先, 在图像 a 上加五个高斯点扩散目标, 目标用灰色方框框出如图 3(a) 所示, 目标点坐标和目标投影中心随机生成, 所以目标位置和灰度信息都是随机的。用 LCM 算法和本文算法对其进行目标检测, 得到显著图 c_n [图 3(b)] 和显著图中目标的局部放大图 [图 3(c)]。可以看出, 经过两种算法, 显著图中目标灰度都更加突出, 更有利于接下来的阈值分割。

但是对比两种算法的目标局部放大图, 可以发现, LCM 算法因其自身缺陷, 会将原本 3 pixel × 3 pixel 大小的目标扩大为 5 pixel × 5 pixel, 这些点因其灰度值较高, 在后面的目标检测中都有可能大于阈值而被判为目标点, 即增加虚警点, 而本文提出的算法目标大小仍为 3 pixel × 3 pixel, 故在后面的目标检测中本文算法虚警率较 LCM 算法低。

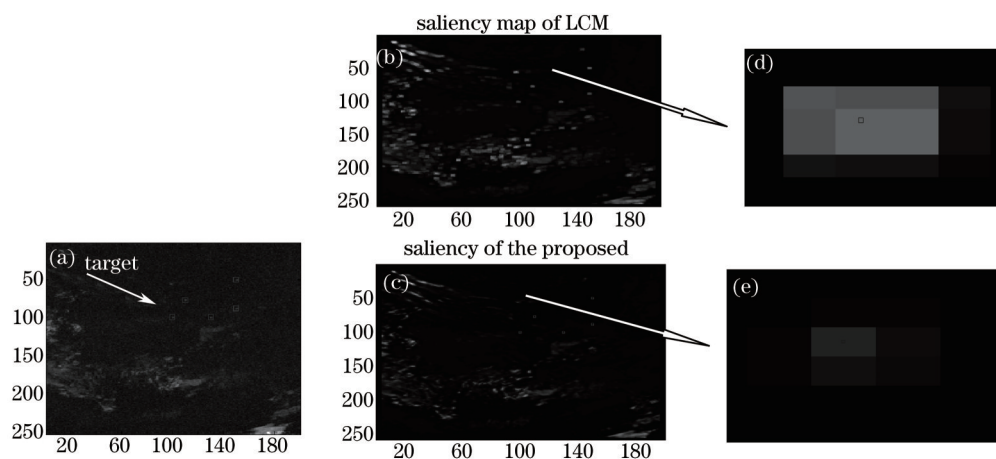


图 3 图像 a 仿真实验结果。(a) 原图 a; (b) LCM 算法的显著图; (c) 本文算法的显著图; (d) LCM 算法的目标局部放大图; (e) 本文算法的目标局部放大图

Fig.3 Simulation results of image a. (a) Original image a; (b) saliency map of LCM algorithm; (c) saliency map of proposed algorithm; (d) local magnify map of target with LCM; (e) local magnify map of target with proposed algorithm

为了更进一步的描述算法前后目标 SNR 得到了提升, 针对图像 a, 计算经过本文算法前后的输入、输出 SNR, 可表示为

$$S_{NR} = \frac{I(i,j) - \mu}{\sigma}, \quad (9)$$

式中 $I(i,j)$ 为目标所在点的灰度值, μ 和 σ 分别为局部去心邻域内的均值和方差。实验结果如表1所示,可以看出本文算法使显著图中目标的SNR得到了提升,为后续的目标检测提供了很好的支持。

表1 原图与显著图的信噪比

Table 1 SNR of the original image and the saliency map

Location		SNR of original image	SNR of saliency map
x	y		
150	50	3.6068	10.0855
110	77	1.3530	4.8889
150	88	1.6327	3.4863
110	100	3.9180	7.9894
130	100	3.3921	7.7440

为进一步说明算法性能,针对图像 a 和 b,用本文算法和其他三种算法(环形中值滤波、LCM 和 ILCM 算法)分别采用 40 次蒙特卡罗仿真做目标检测。针对某一像素点,目标检测中的阈值与(8)式中的 k 有关, k 越大, 阈值越高,虚警率越低,故可以选取不同的 k 绘制 ROC 曲线,对比四种算法性能,结果如图 5 所示。图中检测率 $T_d = D_i/N_i \times 100\%$, 虚警率 $F_d = \log(F_i/N)$ 。 D_i 代表正确检测出的目标数, N_i 代表目标总数, F_i 代表检测出的虚警点, N 代表图像像素总数。

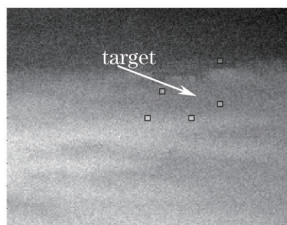


图4 原图 b

Fig.4 Original image b

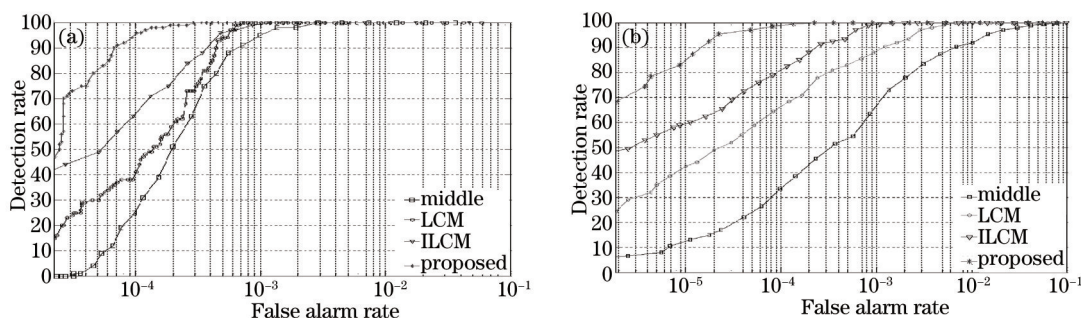


图5 ROC曲线 (a) 图像 a; (b) 图像 b

Fig.5 ROC curves (a)Image a; (b) image b

由图 5 可知,无论晴空条件下(图像 a)还是多云条件下(图像 b)的云层图像,用本文算法,性能相比环形中值滤波、LCM 算法和 ILCM 算法都有所提升,即都可以实现较高的检测率和较低的虚警率。

测试图像由背景云图、目标点和相机噪声三部分组成,单独将相机噪声(高斯白噪声)增大一倍生成新图像,加噪后的图像如图 6 所示,绘制加噪后的 LCM 算法和本文提出算法的 ROC 曲线,并与加噪前两种算法的 ROC 曲线作对比如图 7 所示。

由图 7 可知,图像中相机噪声增大一倍后,LCM 性能下降幅度较本文算法大,即用仿真实验充分证明了 LCM 更易受到噪声影响的结论。

5 结 论

提出了一种基于空间距离改进的视觉显著性红外弱小目标检测算法。主要通过计算当前像素块均值与周围各个像素块加权和对的对比度值,对中心像素点的灰度值进行加权,充分利用每个像素点的灰度信息,

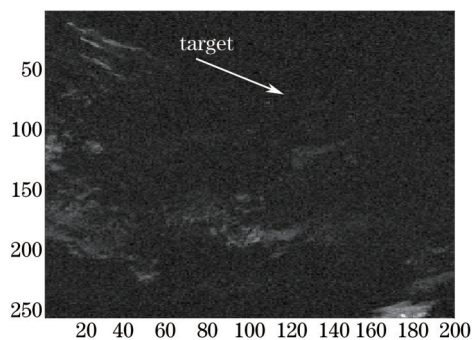


图 6 加噪后的图像

Fig. 6 Noisy image

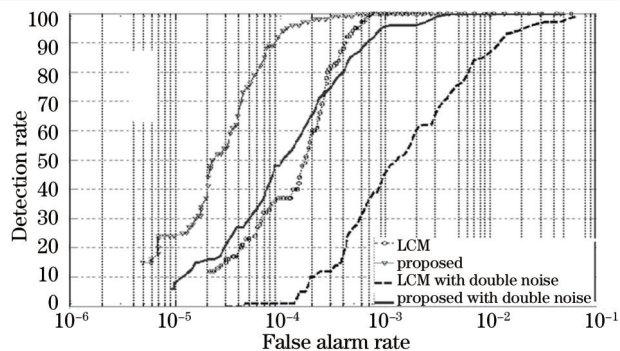


图 7 图像 a 加噪前后两种算法的 ROC 曲线

Fig.7 ROC curves of image a before and after noise addition with two algorithms

有效减小了噪声对算法的影响,降低虚警率。同时,在计算过程中,将视觉注意机制中关键因素之一的空间关系考虑进去。实验结果表明,本文算法在提高目标 SNR 和检测率的基础上,可以很好的降低虚警率,而且抗噪声能力比较强。虽然仿真实验表明,算法可以达到比较良好的性能,但仍存在很多待改良的地方。在下一步工作中,将对图像进行分块处理等以优化性能。

参 考 文 献

- 1 Desimone R, Duncan J. Neural mechanisms of selective visual attention[J]. Annual Review of Neuroscience, 1995, 18(1): 193-222.
- 2 Han J H, Ma Y, Zhou B, *et al.*. A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system[J]. IEEE Geoscience Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2168-2172.
- 3 Zhang Libao, Zhang Jue. A new adaptive fusion method based on saliency analysis for remote sensing images[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0114001.
张立保, 章 珏. 基于显著性分析的自适应遥感图像融合[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0114001.
- 4 Lin Chang, He Bingwei, Dong Shengsheng. An indoor object fast detection method based on visual attention mechanism of fusion depth information in RGB image[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1108005.
林 昌, 何炳蔚, 董升升. 融合深度信息的室内 RGB 图像视觉显著物体快速检测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1108005.
- 5 Xu Ling, Tan Xiansi. Infrared small target detection algorithm based on visual attention[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2013, 27(6): 397-401.
徐 凌, 谭贤四. 基于视觉显著性的红外图像弱小目标检测方法[J]. 空军预警学报, 2013, 27(6): 397-401.
- 6 Zhang Jing, Shen Lansun, Gao Jingjing. Region of interest detection based on visual attention model and evolutionary programming[J]. Journal of technology Electronics & Information, 2009, 31(7): 1646-1652.
张 菁, 沈兰荪, 高静静. 基于视觉注意模型和进化规划的感兴趣区检测方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1646-1652.
- 7 Sun J, Chen R, He J. A Modified GBVS Method with Entropy for Extracting Bottom-up Attention Information[M]. Heidelberg: Springer, 2012: 765-770.
- 8 Hansen L K, Karadogan S, Marchegiani L. What to measure next to improve decision making? On top-down task driven feature saliency [C]. Computational Intelligence, Cognitive Algorithms, Mind, and Brain (CCMB), Symposium on. IEEE, 2011: 1-7.
- 9 Baluch F, Itti L. Mechanisms of top-down attention[J]. Trends in Neurosciences, 2011, 34(4): 210-224.
- 10 Koch C, Ullman S. Shifts In Selective Visual Attention: Towards the Underlying Neural Circuitry[M]. Netherlands: Springer, 1987: 115-141.
- 11 Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11): 1254-1259.
- 12 Cheng M M, Zhang G X, Mitra N J, *et al.*. Global contrast based salient region detection[C]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Conference on. IEEE, 2011: 409-416.
- 13 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.
- 14 Han J, Ma Y, Zhou B, *et al.* A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2168-2172.

栏目编辑: 苏 岑