

多尺度匹配的红外变分辨率弱小目标检测

赵 晓, 张 伟, 侯晴宇, 巩晋南

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对云层背景下红外变分辨率弱小目标的成像特性, 提出一种基于尺度空间理论的红外弱小目标检测方法。首先建立高斯小目标参数模型, 以高斯核生成待检测图像的尺度空间, 进而对尺度空间进行最佳尺度匹配, 提取目标感兴趣区域(ROI)。然后构造 ROI 尺度自适应对比度作为检测判据, 剔除虚警, 实现弱小目标最终检测。实验结果显示, 算法不仅能够准确检测目标, 且可以估计目标像尺寸, 同时具有较高的检测概率和执行效率。可有效地实现对变分辨率弱小目标的检测。

关键词: 弱小目标检测; 红外图像; 变分辨率; 尺度匹配

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)11-2913-06

Infrared variable resolution dim target detection with multi-scale matching

Zhao Xiao, Zhang Wei, Hou Qingyu, Gong Jinnan

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: According to the imaging characteristics of infrared variable resolution dim target in cloudy background, a method for small target detection based on scale space theory was proposed in this paper. Firstly, a Gaussian parameter model was established for small target, and then the scale space of the detected image was generated by using Gaussian kernel. Next, with optimal scale matching for scale space, the target region of interest (ROI) was extracted. Finally, the scale adaptive contrast (SAC) of ROI was calculated as detection criterion to remove the false alarms, achieving small target detection. The results of experiments show that the method proposed in this paper can not only accurately detect the target, but also estimate the size of target, and has high detection rate and efficiency.

Key words: dim target detection; infrared image; variable resolution; scale matching

收稿日期: 2013-03-10; 修订日期: 2013-04-25

基金项目: 基础科研项目(k1402060311)

作者简介: 赵晓(1989-), 男, 硕士生, 主要从事空间目标探测与识别等方面的研究。Email: 827689449@qq.com

导师简介: 张伟(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光电信息获取等方面的研究。Email: wzhang@hit.edu.cn

0 引言

红外弱小目标检测是红外搜寻与跟踪系统的首要关键技术，其检测结果直接制约着后续目标的跟踪与识别。由于红外小目标图像具有低对比度，低信杂比等特点，且目标像大小会随着目标相对探测器的运动而变化，因而红外小目标检测技术一直以来是国内外图像处理领域研究的热点和难点。

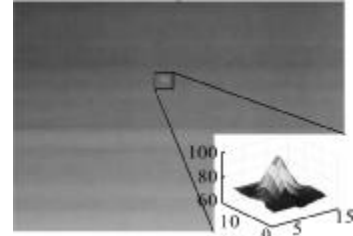
早期的红外小目标检测方法大多是基于背景估计的空域滤波法，包括线性滤波和非线性滤波两大类^[1]。此类方法通过空域滤波预测图像的背景信息，再同输入图像进行相减运算，得到包含目标像素的残差图像，然后设定恰当的阈值进行类聚，提取目标。线性滤波法计算简单，但对杂波，边缘敏感；非线性滤波能够有效地抑制噪声，保护边缘，但其计算过于复杂，工程难以实施。除此之外，另一类方法则是直接对目标进行检测。如最小均方(LSM)滤波^[2]和匹配滤波^[3]，这些方法基于目标的精确形态信息和给定的噪声统计模型来实现目标与背景的分，但对于云层边缘及背景杂波效果较差，且大部分情况下图像中噪声统计模型是未知的。为弥补上述方法的不足，近年来，国内外很多学者将信息论和模式识别的思想引入到小目标检测中，其中具有代表性的有马尔可夫变换^[4]检测算法，粒子滤波法^[5]，最大似然比^[6]算法，多尺度小波变换法^[7]以及神经网络模型^[8]等。尽管这些算法性能良好，在一定程度上可实现变分辨率目标检测，但计算量较大，不利于信息实时，快速处理。

为有效地对变分辨率弱小目标进行检测，并满足实时性的要求。文中基于尺度空间理论，建立目标参数模型，生成原图像的尺度空间。然后对其进行自动尺度匹配，利用目标感兴趣区域的图像特征，构造其尺度自适应信杂比作为阈值，剔除伪目标，从而实现小目标的快速检测。

1 小目标成像特性分析与建模

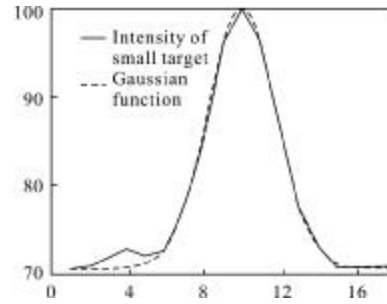
红外目标远距离成像过程中，光学系统受到大气的折射，散射，光学散焦，物镜的象差，畸变及衍射效应等因素的影响，使目标像点发生模糊，经模糊后的小目标可用高斯点扩散函数进行参数建模^[9]。图 1

为小目标径向灰度分布曲线与高斯函数的拟合结果，可以看到，目标灰度分布曲线与高斯函数曲线非常接近，高斯模型很好地描述了目标的灰度分布。



(a) 红外小目标图像

(a) Infrared small target image



(b) 高斯函数拟合结果

(b) Gaussian function fitting

图 1 目标灰度分布拟合效果

Fig.1 Curve fitting for small target gray distribution

据上述分析，可建立形如公式(1)的小目标参数模型，式中， (x_c, y_c) 为目标中心位置， I_p 为目标峰值强度。根据高斯分布(正态分布)的小概率事件原理，以 $s_z=6s$ 来表示目标像尺寸(直径)得：

$$I(x, y, s) = I_p e^{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2s^2}} \tag{1}$$

2 算法总体流程

变分辨率小目标检测算法流程如图 2 所示，包括最佳尺度匹配和 SAC 阈值滤波两个过程。

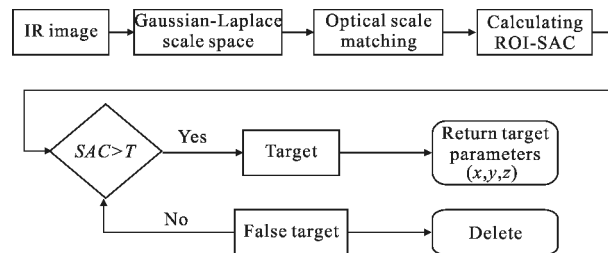


图 2 小目标检测总体流程

Fig.2 Overall process of small target detection

首先生成输入红外图像的高斯尺度空间, 求取该尺度空间的二阶导函数, 并利用尺度因子对其标准化处理, 得到标准化高斯-拉普拉斯尺度空间。然后利用图像各区域的尺度特性, 对所得的标准化高斯-拉普拉斯尺度空间进行最佳尺度匹配, 获取目标 ROI, 进而利用尺度自适应对比度(SAC)进行阈值滤波, 检测出真实目标, 同时返回目标位置参数(x,y)和目标像尺寸 6s。

3 变分辨率小目标检测

3.1 最佳尺度匹配

尺度空间理论(Scale-Space Theory)是为研究图像分辨率与尺度因子之间的关系而创建的一种新的理论。其起源最早可以追溯到 1983 年, Witkin 提出的利用不同尺度来呈现图像细节的思想, 这便是早期尺度空间理论的内容^[10]。如今, 尺度空间理论已广泛应用于立体图像匹配, 物体识别, 机器视觉等领域。

尺度空间定义如下: 将一幅图像与某一核函数作卷积, 可得到一组具有不同尺度参数(分辨率)的图像集, 称之为尺度空间^[11]。公式(2)为尺度空间的构造过程, 其中 I(x,y)为原图像, K(s)为核函数, G(x,y,s)代表尺度空间, s 为尺度空间的特征尺度。

$$G(x,y,s)=I(x,y)*K(s) \tag{2}$$

根据文中建立的小目标参数模型, 同时为保证极值点的单一性和稳定性。选取公式(3)所示的高斯核函数作为尺度空间的基函数, 相应的尺度空间则称为高斯尺度空间。

$$g(x,y,s)=\frac{1}{2\pi s^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2s^2}} \tag{3}$$

式中:s 为高斯核函数的尺度因子, 它表征了高斯核函数的宽度, 并决定输出图像的模糊程度。尺度因子越大, 图像的视觉效果越差。由不同尺度的高斯核函数作用生成的尺度空间, 可以看作为一组具有不同分辨率的图像集合。

尺度空间的导函数可用于目标多尺度分析(MSA)^[12]。由于梯度算子(Sobel)具有方向性, 不适用于提出的小目标模型, 因此, 文中引入求取二阶导函数的拉普拉斯算子来进行特征尺度选取。同时, 为了维持尺度不变性, 需利用尺度因子 s 对导函数进行

标准化处理, 如公式(4)所示, 其计算结果称之为标准化的高斯-拉普拉斯尺度空间(Normal Gauss-Laplace Scale-Space), 以 GL 表示。

$$GL=|s^2 \nabla^2 G(x,y,s)*I(x,y)| \tag{4}$$

红外小目标图像中往往包含较多的伪目标, 如图 3 所示。伪目标大致可分为 3 类, 即高亮背景区, 背景边缘区, 杂波或噪声奇点。图 4 为各区域的尺度特性 GL(s)。

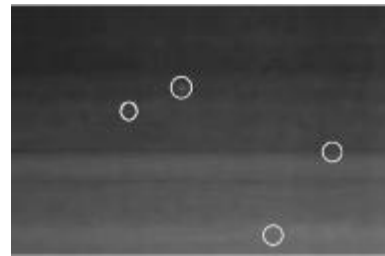


图 3 红外图像中的目标及伪目标

Fig.3 Real target and false target of IR image

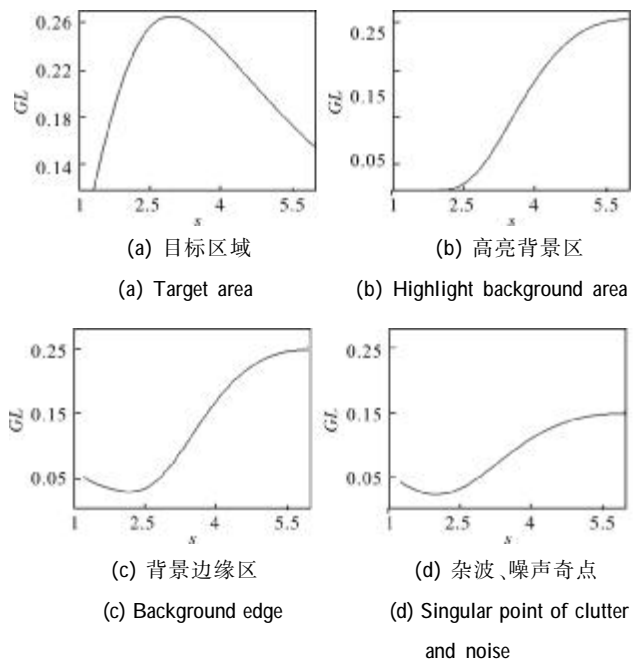


图 4 疑似目标区域尺度特性曲线

Fig.4 Scale property curve of suspected target areas

可见, 目标尺度特性曲线达到极大值时(特征尺度 s=2.8), 伪目标参考值相对很小, 且不存在极值。因此可以得出结论: 高斯尺度空间的导函数, 即标准化的高斯-拉普拉斯尺度空间具有抑制背景, 杂波及噪声的性能。根据图像各区域的尺度特性, 进行特征尺度选择, 可分割出目标, 算法具体

描述如下：

(1) 构造输入 IR 图像的标准化高斯-拉普拉斯尺度空间。

(2) 求取尺度空间关于坐标的极大值，确定疑似目标点的位置。

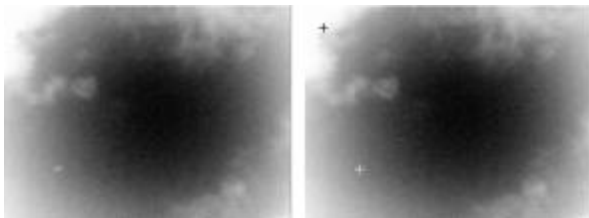
$$GL(x_c, y_c, s_i) > GL(x, y, s_i) \quad (5)$$

(3) 针对疑似目标区域，求取其尺度空间关于尺度因子的极值。

$$GL(x_c, y_c, s_T) = \max[GL(x, y, s_i)] \quad (6)$$

3.2 尺度自适应滤波

对输入红外图像进行最佳尺度匹配,提取目标 ROI 区域。如图 5 所示。



(a) 原始 IR 图像 (b) 尺度匹配结果
(a) Original IR image (b) Scale matching results

图 5 尺度匹配结果

Fig.5 Result of scale matching

经最佳尺度匹配后,分割出的目标 ROI 区域含有少量虚警。通过尺度特性分析可知,高亮背景及边缘区域往往呈现大尺度特性。因此,为进一步剔除伪目标,文中提出一种基于区域尺度特性的滤波方法—尺度自适应对比度阈值法。尺度自适应对比度(Scale Adaptive Contrast, SAC)定义如公式(7)所示：

$$SAC = (I_T - I_B) / [GL_{\max} I_B] \quad (7)$$

式中： I_T 与 I_B 分别代表候选目标及背景的平均灰度,取背景区域为 9×9 , GL_{\max} 为候选目标归一化尺度空间函数 $GL(s)$ 的极大值。设定适当的阈值,对 ROI 区域进行尺度自适应滤波,可有效剔除虚警,提取真实目标。

4 实验及分析

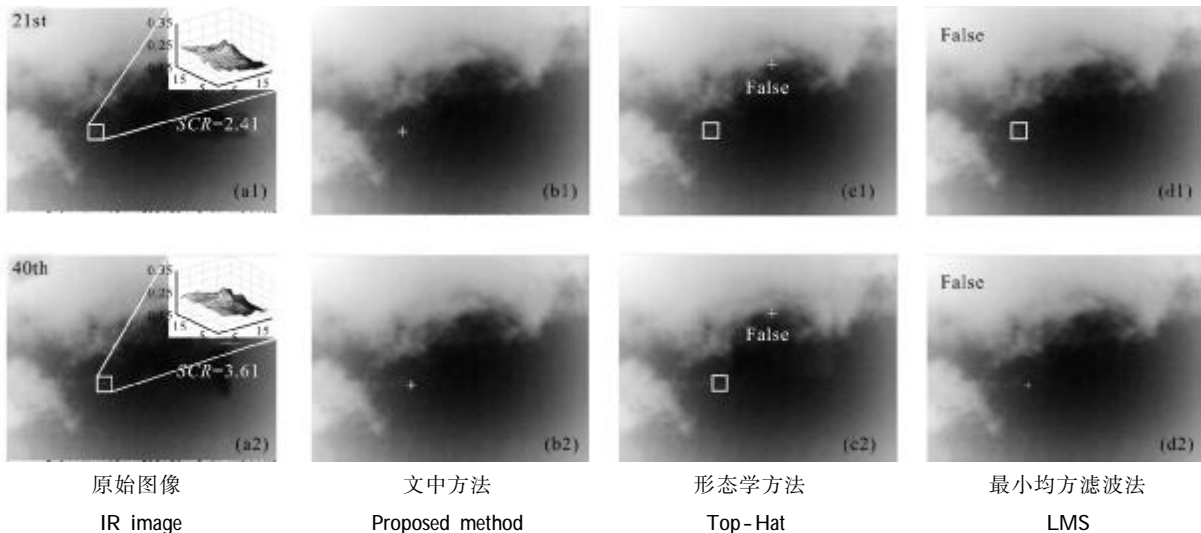
以云层背景下的红外小目标视频为实验对象进行算法验证实验,视频序列共 359 帧。视频中目标为尺寸渐变(3 pixels~43 pixels)的运动目标。实验分别从检测信杂比,检测概率,尺度估计精度及算法执行效率四个方面进行分析。

4.1 算法检测性能测试

在红外图像中通常用信杂比来表征弱小目标与背景及噪声之间的关系,目标信杂比定义如下：

$$SCR = \frac{I_T - I_B}{\sigma_B} \quad (8)$$

式中： I_T 与 I_B 的物理含义与公式(7)相同, σ_B 为背景杂波及空间噪声的均方差。计算红外图像的平均灰度,将其作为 I_B 的近似。计算红外图像的灰度均方差,作为 σ_B 的估计值,结合所需检测目标信杂比 SCR,以公式(8)计算目标与背景的平均灰度差 $I_T - I_B$ 。此外,由于伪目标的归一化尺度空间函数 GL_{\max} 在大尺度范围内 ($s \approx 10$) 变化不大,可看作常量处理。因此,针对特定场景的红外图像,可通过公式(7)计算 SAC 阈值。取 $SCR = 2.4$, 计算 SAC 阈值为 1.35。将文中算法并与最小均方滤波法、形态学方法进行对比。图 6 给出了其



原始图像
IR image

文中方法
Proposed method

形态学方法
Top-Hat

最小均方滤波法
LMS

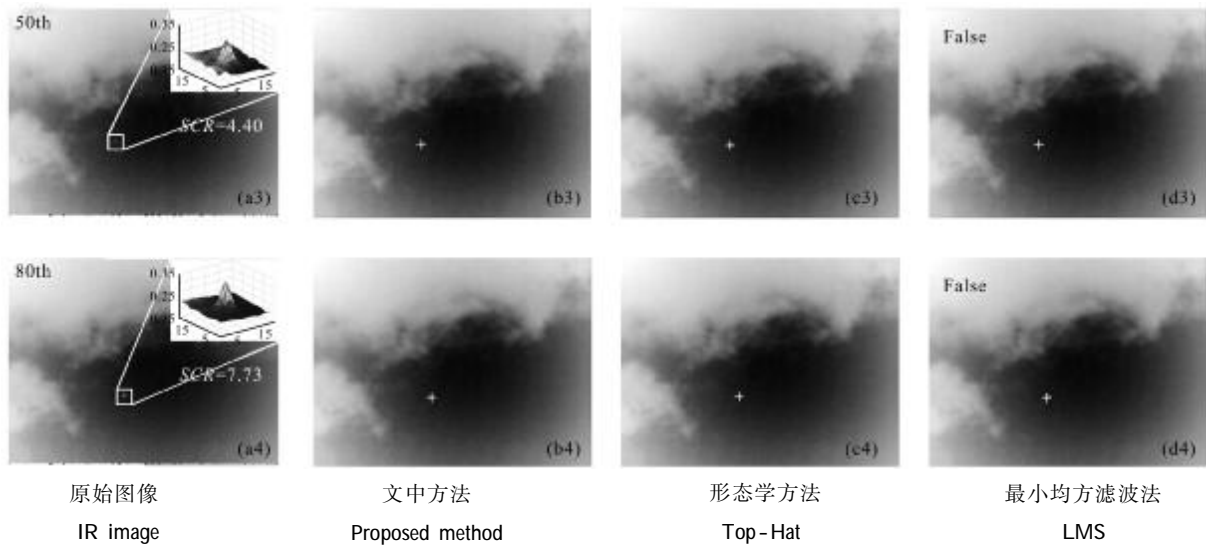


图 6 算法性能测试对比

Fig.6 Method performance comparison

中四帧的检测结果。

以公式(9)计算并对比各方法的检测概率,如图7所示。

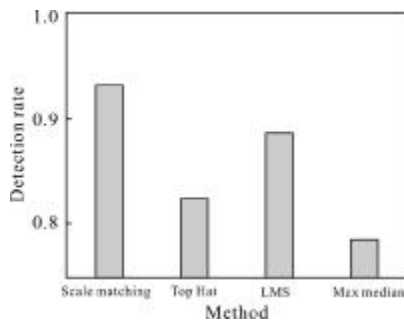


图 7 检测概率对比

Fig.7 Comparison of detection rates

$$DR = \frac{\text{正确检测图像数}}{\text{红外视频帧数}} \quad (9)$$

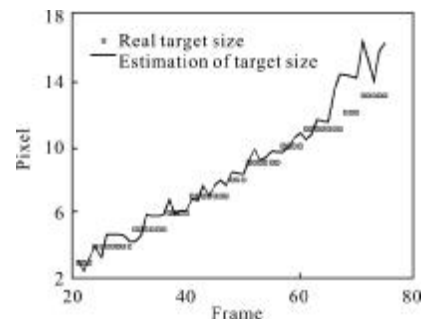
从检测结果来看,文中所提出检测方法的检测率为 93.31%,高于其他三种方法。且在弱小目标(信杂比<2.5)检测方面,文中方法表现最佳,其次是最小均方滤波法。这是由于该方法结合了目标尺度与强度双重信息,进一步完善了检测性能。

4.2 尺度估计精度测试

相比于其他检测方法,文中方法可提供目标位置和尺度双重信息,可用于估计目标像尺寸大小。图8为其对目标像尺寸的估计结果曲线,目标像尺寸为目标径向像素个数。

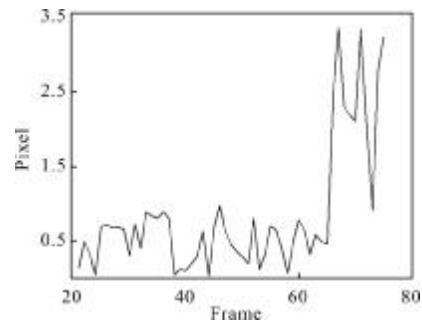
可见,在前 65 帧图像中,算法对目标像尺寸估

计结果准确,误差在±1 个像素之间,而在 65 帧图像后,算法估计结果偏差较大,达到 3 个像素。由于在后续图像中,随着目标与探测器距离的减小,目标像呈现出了一定的形态信息,不再是严格的高斯结构,为尺度估计引入偏差。



(a) 目标像尺寸估计曲线

(a) Estimation of target sizes



(b) 尺寸估计误差曲线

(b) Estimation error

图 8 目标像尺寸估计结果

Fig.8 Target sizes estimation

4.3 算法执行效率对比

为进一步测试文中算法性能,将文中算法与其他三种方法进行了对比如表 1 所示,仿真环境为 32

位操作系统下的 Matlab2010b。

文中算法的耗时明显少于其他三种方法,由于 LMS 法为线性运算,故其与文中算法效率相当。可

表 1 算法执行效率对比(单位:s)

Tab.1 Comparison for time consumption(Unit:s)

IR Image	Size/pixel ²	Max - median	LMS	Top - Hat	Proposed method
51st frame	240×320	2.652 267	0.187 855	3.627 670	0.132 806
70th frame	240×320	2.718 928	0.200 195	3.599 603	0.115 416
90th frame	240×320	2.685 047	0.197 595	3.789 316	0.120 223
110th frame	240×320	2.675 648	0.194 876	3.802 831	0.113 890

见,文中算法更适用于红外图像实时信息处理。

5 结 论

文中研究了一种基于尺度空间理论的变分辨率弱小目标检测方法,利用最佳尺度匹配进行小目标初检,而后又提出了尺度自适应对比度阈值的概念,用于伪目标的剔除,最终实现变分辨率弱小目标的检测。

实验结果表明,相比于其它检测方法,文中算法能够提供目标的位置和尺寸双重信息,对于估计目标与探测器件的相对距离具有重要意义。由于算法采用线性运算形式,其执行效率要优于一般非线性算法。在对微弱信号进行检测,算法亦表现出良好的性能,若能够结合时序信息,在可检测目标信杂比方面的性能将会进一步提升。

参考文献:

- [1] Pitas Ioannis, Venetsanopoulos Anastasios N. Order statistics in digital image processing[C]// IEEE, 1992, 80(11): 1893-1921.
- [2] Bae TaeWuk, Zhang Fei, Kweon In-So. Edge directional 2D LMS filter for infrared small target detection [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2012, 55(7): 137-145.
- [3] Philip B, Chapple D C, Bertilone R S C. Stochastic model-based processing for detection of small targets in non-gaussian natural im-agery [J]. *IEEE Tans on Image Processing*, 2001, 10(4): 554-564.
- [4] Lafferty J, McCallum A, Pereira F. Conditional random fields: Probabilis tic models for segmenting and labeling sequence data[C]//Conference on Machine Learning, 2001: 693-723.
- [5] Li Shaojun, Zhu Zhenfu. Track-before-detect algorithm via particle filtering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 943-949. (in Chinese)
- [6] Zhang Luping, Li Biao, Wang Luping. Dim target detection method under complex spatial background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2048-2053. (in Chinese)
- [7] Gregoris D J. Detection of dim targets in FLIR imagery using multiscale transforms[C]//SPIE, 1994: 62-71.
- [8] Liu Tianhua, Yang Shaoqing, Liu Songtao. Research of sea-aero target detection from photo electricity image based on cellular neural networks [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 655-658. (in Chinese)
- [9] Kim Sungho, Yang Yukyung, Lee Joohyoung, et al. Small target detection utilizing robust methods of the human visual system forIRST [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2009, 30(10): 994-1011.
- [10] Witkin A P. Scale-space filtering [C]//Proc 8th Internat Joint Conf Art Intell Karlsruhe, 1983: 1019-1022.
- [11] Gregoris D J, Yu S K, Tritchew S, et al. Detection of dim targets in flir imagery using multiscale transforms [C]//SPIE, 1994, 2269: 62-71.
- [12] Tony Lindeberg. Scale-space for discrete signals [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 41(12): 224-239.