

基于各向异性的红外小目标背景预测及分割

郭红伟,赵伶俐,李娟,刘帅
(红河学院工学院,云南 蒙自 661100)

摘要: 红外小目标易淹没在复杂的起伏背景中,为提高目标的检测能力,往往通过抑制背景来增强目标信号。针对各向同性背景在含有较多边缘轮廓的复杂起伏背景预测方法的不足,提出了各向异性的红外背景预测方法,结合目标与背景在局部梯度间的差异,考虑各向异性微分原理,并改进其边缘停止函数,然后利用其两个最小方向值的均值作为背景预测值,并将背景图灰度变换为0~255,最后采用恒虚警阈值法对差分图像进行分割处理,达到提取候选目标的目的,降低真实目标的虚警率。实验表明,各向异性取得良好的背景预测效果,而利用恒虚警阈值对差分图像进行分割有效地减小了虚警,提高目标检测率。

关键词: 各向异性;背景预测;恒虚警阈值;目标分割

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.024

Background prediction and segmentation of infrared small target based on anisotropy

GUO Hong-wei, ZHAO Ling-li, LI Juan, LIU Shuai
(Engineering College, Honghe University, Mengzi 661100, China)

Abstract: To improve the detection of infrared small target in the complex background, the target signals are generally enhanced by restraining the background. For the shortcomings of the isotropic background prediction method, a kind of anisotropic infrared background prediction method was proposed. According to the difference of local gradient features between the target and the background, the edge stopping function of anisotropic partial differential equation was improved. Then the mean of the two least direction values was set as the prediction value of the background, and the background gray level changed 0~255. Finally in order to extract the candidate target and reduce the false alarm rate of the target, the difference image was segmented by the method of constant false alarm threshold. Experimental results show that this method has a good background prediction, and it can effectively reduce the false alarm and improve the detection rate of the target.

Key words: anisotropy; background prediction; constant false alarm threshold (CFAR); target segmentation

1 引言

由于红外成像系统和空中飞行器目标的距离通常较远,红外图像中的背景往往包含有云层、杂波、

红外校正带来的不均匀起伏或条纹以及各种噪声^[1]。同时图像中弱小目标所占像素少,缺乏形状和纹理等信息,信噪比低,极易淹没在复杂背景中,

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41201418, 41301442); 云南省教育厅科学基金项目(No. 2012Y449); 红河学院科学基金项目(No. XJ14Y02)资助。

作者简介: 郭红伟(1980-),男,彝族,副教授,硕士,主要从事图像处理,计算机视觉等方面的研究。E-mail: ghw202@foxmail.com

收稿日期: 2015-12-23

这使得红外弱小目标的识别和跟踪非常困难^[2]。要提高红外弱小目标的检测识别能力,就必须对红外图像中的复杂背景进行有效的抑制。而抑制复杂背景的有效方法就是背景预测,然后将原图像与预测背景差分获得背景被极大抑制并且目标得到有效保留的差分图像。常用的背景预测算法有低通滤波^[3]、Top-Hat^[4]、形态学滤波^[5]、二维最小均方滤波^[6](Two Dimensional Least Mean Square, TDLMS)和混合高斯背景建模^[7-8]等方法。上述背景预测法基于各向同性的思想,对于复杂背景的场景效果不佳。针对上述方法的不足,张耀等提出了局部自适应背景预测法,它考虑了背景图像中的方向特性差异,取得了比各向同性背景预测方法更好的背景预测效果,但是对平稳和非平稳两种性质背景的判断不够准确,影响预测效果,同时目标位置会出现漂移现象^[9];张路等在TDLMS的基础上提出了多向背景预测方法,该方法充分考虑TDLMS方向特性的不足,但对图像起伏背景的边缘轮廓的保留依旧有限^[10]。为此,本文在充分考虑红外图像背景方向特性的基础上,引入各向异性的算法来抑制背景,在此基础上,利用恒虚警阈值对差分图像进行分割有效降低虚警率,取得良好的效果。

2 各向异性背景预测法

红外图像背景由两部分构成,分别为低频的平稳背景和高频非平稳背景^[11]。具体公式为:

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_B(x, y) + f_E(x, y) \quad (1)$$

其中, $f_T(x, y)$ 表示奇异区域; $f_B(x, y)$ 表示平稳背景区域; $f_E(x, y)$ 表示非平稳背景区域。

局部区域中各个方向可由梯度关系表示,梯度算子的具体如下:

$$\begin{pmatrix} f(i, j) - f(i - \text{step}, j) \\ f(i, j) - f(i, j - \text{step}) \quad f(i, j) \quad f(i, j) - f(i, j + \text{step}) \\ f(i, j) - f(i + \text{step}, j) \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, step 为移动步长,梯度算子具有以下特征:奇异区域中不同方向的梯度值较大,平稳区域中四个方向的梯度较小,非平稳区域中一般有一到两个方向值趋于0,余下值较大。为此可充分利用以上的特性来加以区分处理,达到背景预测的目的。

2.1 各向异性微分原理

各向异性微分的特点在于能够平滑平稳背景区域,保留背景中的边缘细节和突变区域^[12]。其表达式为:

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}[c(\nabla u)] \nabla u \quad (3)$$

其中, u 为灰度图像; ∇u 为梯度; $c(\nabla u)$ 为边缘停止函数; div 为散度算子。边缘停止函数 $c(\nabla u)$ 根据不同方向上的梯度关系来求算平滑系数。同时给出了两个边缘停止函数如(4)式:

$$\begin{cases} c_1(\nabla u) = \frac{1}{1 + (|\nabla u|/k)^2} \\ c_2(\nabla u) = \exp[-(|\nabla u|/k)^2] \end{cases} \quad (4)$$

其中, k 为大于0的常数,对于梯度小的平坦区域, $c(\nabla u)$ 的值较大,采取较多的平滑;对于梯度较大的突变区域, $c(\nabla u)$ 值较小,采取较少或不平滑处理,从而保留这些区域。

2.2 背景预测算法描述

在红外图像预处理过程中,需要抑制平稳、非平稳区域,保留突变区域。实际应用中,若能借助各向异性微分保留红外图像中平稳、非平稳区域,而平滑掉突变区域,最后通过与原图像的差分就可保留仅有小目标和少量噪声的图像。为了让各向异性适应红外小目标图像特性,对其边缘停止函数改进如下:

$$\begin{cases} c_1(\nabla u) = 1 - \frac{1}{1 + (|\nabla u|/k)^2} \\ c_2(\nabla u) = 1 - \exp[-(|\nabla u|/k)^2] \end{cases} \quad (5)$$

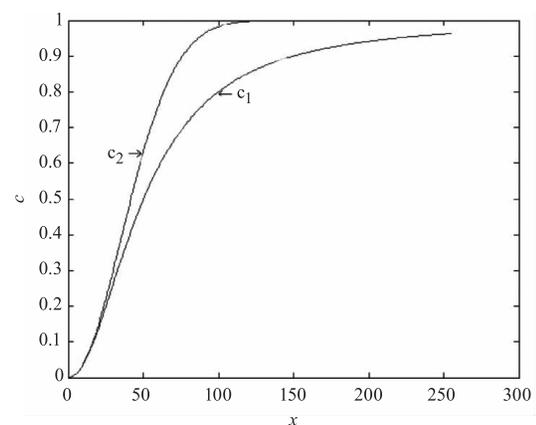


图1 边缘停止函数 c_1 、 c_2 图像

Fig. 1 The image of edge stop function c_1 and c_2

图1中横轴是方向梯度值,纵轴是函数值,改进后的边缘停止函数为单调递增函数,对于红外图像

的平稳区域,梯度较小,边缘停止函数值较小,对图像不做或做较少的平滑;对于非平稳或突变区域,梯度较大,边缘停止函数值较大。

红外弱小目标研究发现,可充分利用奇异与背景区域间的差异来实现差别化处理,即对奇异部分进行平滑处理,同时保留平稳和非平稳背景区域。局部区域梯度算子的边缘停止函数如下:

$$\begin{pmatrix} c(f(i,j) - f(i - \text{step},j)) \\ c(f(i,j) - f(i,j - \text{step})) \quad f(i,j) \quad c(f(i,j) - f(i,j + \text{step})) \\ c(f(i,j) - f(i + \text{step},j)) \end{pmatrix} \quad (6)$$

如图2所示,选择两个最小的方向作为边缘停止函数的参数,如此就可保证奇异区域中的参数较大值,而平稳和非平稳背景的参数值较小,从而有效区分奇异和背景区域,保留平稳和非平稳区域。

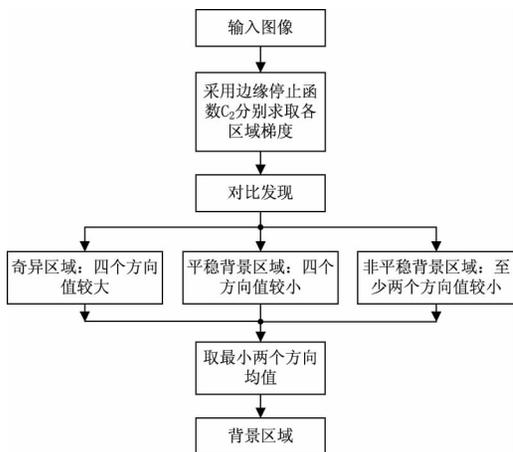


图2 背景预测示意图

Fig.2 The flowchart of background prediction

由上述分析可知,将各向异性算法用于红外弱小目标的背景预测,公式如下:

$$\begin{cases} \min_1 = \min \{ c(f(i,j) - f(i - \text{step},j)), c(f(i,j) - f(i + \text{step},j)), \\ c(f(i,j) - f(i,j - \text{step})), c(f(i,j) - f(i,j + \text{step})) \} \\ \min_2 = \min \{ c(f(i,j) - f(i - \text{step},j)), c(f(i,j) - f(i + \text{step},j)), \\ c(f(i,j) - f(i,j - \text{step})), c(f(i,j) - f(i,j + \text{step})) \mid \text{not min1} \} \end{cases} \quad (7)$$

其中, \min_1 和 \min_2 分别为边缘停止最小的两个函数值。各向异性背景预测的滤波模板为:

$$\begin{pmatrix} c(f(i,j) - f(i - \text{step},j)) \\ c(f(i,j) - f(i,j - \text{step})) \quad (\min_1 + \min_2)/2 \quad c(f(i,j) - f(i,j + \text{step})) \\ c(f(i,j) - f(i + \text{step},j)) \end{pmatrix} \quad (8)$$

3 恒虚警阈值分割法

经过背景预测后,为便于与原图做差分处理,先将背景图灰度变换为0~255,最后采用恒虚警阈值从差分图像中分割出候选目标像素。通过设定固定门限值L,将像素值大于L值判定为候选目标。此种方法称作恒虚警率(CFAR)门限值^[13]。一般噪声服从正态分布,概率密度函数为:

$$P(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(X-u)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (9)$$

其中, X 表示噪声的随机变量,构建新的随机变量 X_1 :

$$X_1 = (X - u)/\sigma \quad (10)$$

新的随机变量概率密度为:

$$P(X_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{X_1^2}{2}\right] \quad (11)$$

分割步骤^[14]是:选定门限值 L_1 ,同时满足 $L = L_1\sigma + \mu$,若 $f(i,j) > L$,则判定 $f(i,j)$ 为候选目标;若 $f(i,j) \leq L$,则作为非目标并置零处理。因此首先选定 L_1 ,使虚警率为已知值。

设虚警率为 P_f ,结合 Neyman-Pearson 准则^[15]可知 P_f :

$$\begin{aligned} P_f &= \int_{L_1}^{\infty} P(X_1) dX_1 = \int_{L_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{X_1^2}{2}\right] dX_1 \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{L_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{X_1^2}{2}\right] dX_1 \end{aligned} \quad (12)$$

给定虚警率 P_f ,根据式(11)查表求出 L_1 ,进一步求解 L,文中取虚警率 $P_f = 10^{-3}$ 。

4 仿真实验及分析

采用实际场景中获得的红外图像序列,选择其中具有代表性的6帧作为实验图像。运用本文的各向异性背景预测方法,对背景进行了预测,边缘停止函数选择 c_2 , $k = 120$, $\text{step} = 4$,并且与 Hop-Hat、形态学滤波、TDLMS 和混合高斯作比较分析,分别选用均方误差 E_{ms} 、结构相似性 S_{st} 和局部信噪比增益 G_{SNR} 三个指标来评价红外图像的背景预测效果。各个实验结果如表1~4所示。

表1 6帧图像的信噪比情况

Tab.1 The SNR situation of six frame image

帧数	1	2	3	4	5	6
信噪比	0.73	0.96	0.85	0.82	0.91	0.87

表2 各背景预测法 E_{ms} 值比较Tab. 2 The E_{ms} value of different background prediction method

E_{ms}	1	2	3	4	5	6
Top-Hat	60.899	86.109	65.732	62.849	64.743	94.068
形态学滤波	184.418	192.079	198.765	196.426	199.741	198.251
TDLMS	58.961	65.875	72.176	68.656	79.322	79.028
混合高斯	8.2064	9.701	13.497	10.593	12.622	14.269
各向异性	5.653	8.035	10.712	8.434	14.223	13.791

表3 各背景预测方法值 S_{st} 比较Tab. 3 The S_{st} value of different background prediction method

S_{st}	1	2	3	4	5	6
Top-Hat	0.675	0.692	0.745	0.712	0.721	0.743
形态学滤波	0.494	0.481	0.527	0.552	0.467	0.483
TDLMS	0.769	0.712	0.785	0.716	0.723	0.793
混合高斯	0.901	0.915	0.901	0.908	0.906	0.920
各向异性	0.999	0.997	0.993	0.996	0.995	0.998

表4 各背景预测方法 G_{SNR} 值比较Tab. 4 The G_{SNR} value of different background prediction method

G_{SNR}	Top-Hat	形态学滤波	TDLMS	混合高斯	各向异性
数值	4.564	3.223	5.724	7.532	8.6754

通过对 E_{ms} 、 S_{st} 和 G_{SNR} 三个性能指标的分析可以看出,各向异性红外背景预测方法的预测效果明显优于其他背景预测算法。 E_{ms} 用于计算真实背景与预测背景对应像素值平均误差的大小,其值越小,误差越小,说明预测效果越好。 S_{st} 用于评价真实背景与预测背景几何结构间信息的相似程度,当值越接近1,说明背景预测效果越好。 G_{SNR} 表示 N 帧图像信噪比均值,其值越大,说明背景预测后的差分图像对目标增强效果越好。

为进一步验证恒虚警阈值法对目标分割的有效性,从选择其中6帧图像中选择信噪比为0.87的一帧图像,分别采用 Hop-Hat、形态学滤波、TDLMS、混合高斯和各向异性对背景进行预测,之后采用恒虚警阈值法对目标进行分割。实验结果如图3~7所示:其中(a)是原红外图像,已用白色矩形标记出目标位置;(b)为不同背景预测方法获得的背景图像;(c)为原图像与预测背景的差分图像;(d)为采用恒虚警阈值分割所得的二值图像。

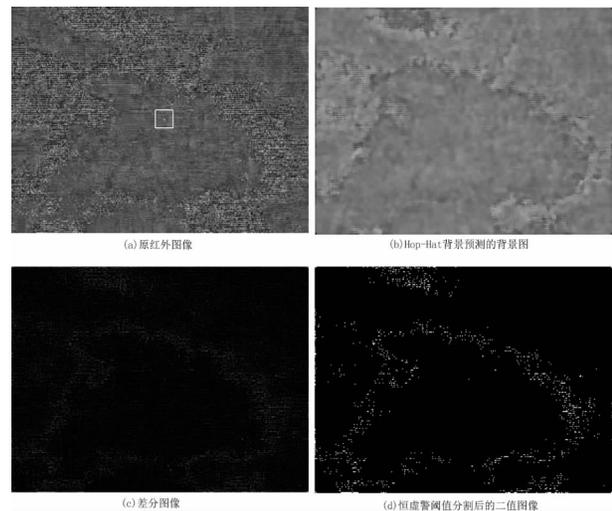


图3 Top-Hat 背景预测法

Fig. 3 The background prediction of Top-Hat

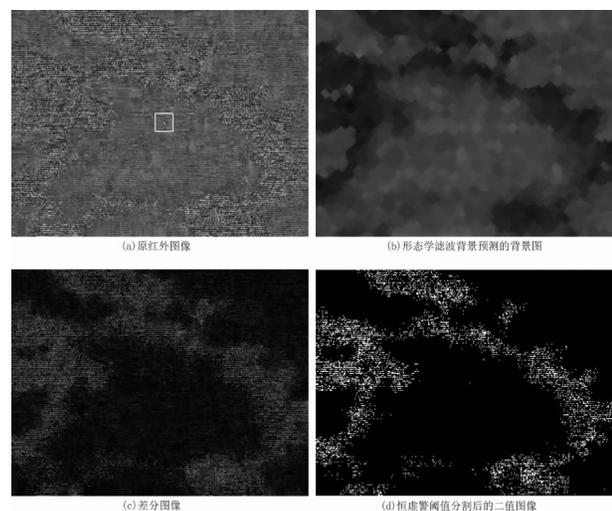


图4 形态学滤波背景预测法

Fig. 4 The background prediction of morphological filter

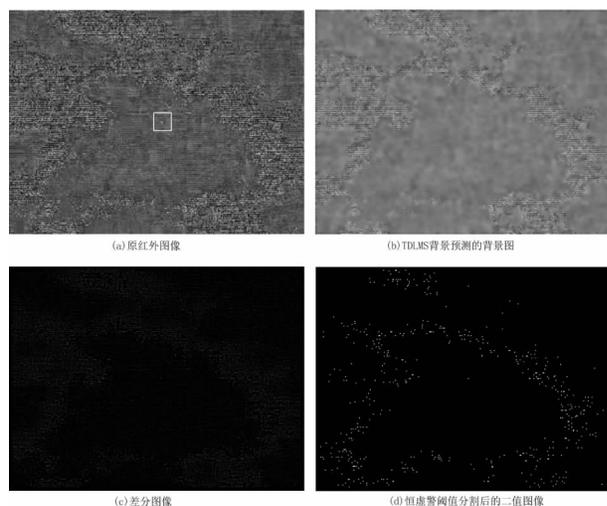


图5 TDLMS 背景预测法

Fig.5 The background prediction of TDLMS

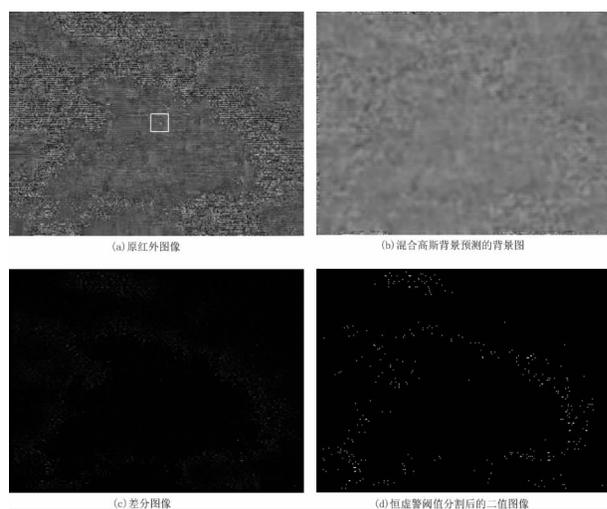


图6 混合高斯背景预测法

Fig.6 The background prediction of Mixture Gaussian

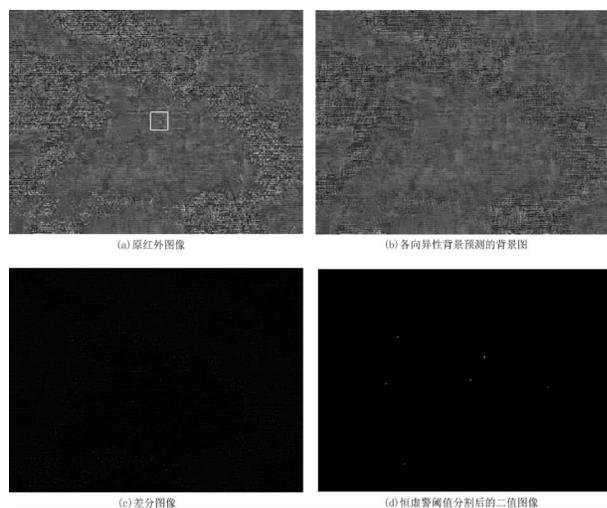


图7 各向异性背景预测法

Fig.7 The background prediction of anisotropic

由图3~7可知,传统的背景预测(Hop-Hat、形态学滤波、TDLMS和混合高斯)得到的背景会被模糊化,并存在明显的块效应,差分图像中的目标容易出现漂移或丢失的现象,且噪声较多。而异性背景预测法可有效的消除图像中的大部分背景,它既保留了平稳背景和非平稳背景的边缘轮廓,又不存在块效应和目标漂移的问题,通过与原图像差分后,利用恒虚警阈值法对差分图进行分割,可有效提取候选目标,降低目标的虚警率,在后期处理中只要利用红外弱小目标运动轨迹的连续性和邻域特性,就能够顺利的剔除二值图像中的噪声点,成功检测出真实的弱小目标。

5 结论

本文将各向异性算法用于红外小目标的背景预测,结合各个梯度算子的方向特性,选择两个方向中最小边缘停止函数作为参数值,能有效预测背景。为便于与原图做差分处理,先将背景图灰度变换为0~255,最后利用恒虚警阈值法对差分图像进行分割处理,可有效提取候选目标,降低目标的虚警率。仿真实验证明,各向异性取得良好的背景预测效果,性能上明显优于其他各向同性的背景预测算法。

参考文献:

- [1] HONG L, YAB W, LUO Q L, et al. Infrared moving target detection and tracking based on tensor locality preserving projection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53: 77-83.
- [2] SHENG W, DENG B, LIU J. Multi-resolving distance map based small target detection in infrared image[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 30(1): 42-45.
- [3] XIANG Z B, FU G Z. Infrared small target enhancement and detection based on modified top-hat transformations[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2010, (36): 1193-1201.
- [4] XIANG Z B, FU G Z. The application for infrared dim small target detection[J]. *Pattern Recognition*. 2010, (43): 2145-2156.
- [5] BRAGE U, GOUTSIAS J. Automatic target detection and tracking in forward looking infrared image sequences using morphological connected operators[J]. *Electronic Imaging*, 2009, 13(4): 802-813.
- [6] CAO Yuan, YANG Jie, LIU Ruiming. Small target detec-

- tion in infrared image with TDLMS[J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 28(3): 235 - 210. (in Chinese)
- 曹原, 杨杰, 刘瑞明. 基于邻域分析 TDLMS 滤波器的红外小目标检测[J]. *计算机应用*, 2009, 28(3): 235 - 210.
- [7] HUA Yuanlei, LIU Wanjun. Moving object detection algorithm of improved Gaussian mixture model[J]. *Journal of Computer Applications*, 2014, 34(2): 580 - 584. (in Chinese)
- 华媛蕾, 刘万军. 改进混合高斯模型的运动目标检测算法[J]. *计算机应用*, 2014, 34(2): 580 - 584.
- [8] HUANG Xinjuan, ZHOU Jiemin, LIU Boyang. Moving objects detection approach based on adaptive mixture Gaussian background model[J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 46(30): 184 - 187. (in Chinese)
- 黄鑫娟, 周洁敏, 刘伯扬. 自适应混合高斯背景模型的运动目标检测方法[J]. *计算机应用*, 2010, 46(30): 184 - 187.
- [9] ZHANG Yao, YONG Yang, ZHANG Qiheng, et al. Detection of dim point target with low contrast[J]. *High Power Laser and Partial Beams*, 2010, 22(11): 2566 - 2570. (in Chinese)
- 张耀, 雍杨, 张启衡, 等. 低对比度小目标检测[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11): 2566 - 2570.
- [10] ZHANG Lu, ZHANG Zhiyong, XIAO Shanzhu, et al. Detection of dim infrared targets by mtil - direction prediction of background[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(11): 1646 - 1651. (in Chinese)
- 张路, 张志勇, 肖山竹, 等. 基于多向背景预测的红外弱小目标检测[J]. *信号处理*, 2010, 26(11): 1646 - 1651.
- [11] LI Ke, HUANG Xiyue, LI Jianke, et al. The infrared target detection algorithm based on fractal theory[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(10): 1115 - 1118. (in Chinese)
- 李柯, 黄席樾, 李建科, 等. 基于分形理论的红外目标检测算法[J]. *激光与红外*, 2009, 39(10): 1115 - 1118.
- [12] PENRONA P, MALIK J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. *IEEE Trans on Pattern Anal Mach Intell*, 1990, 12(4): 629 - 639.
- [13] FEI Z, CHENG F L, LI N S. Detecting and tracking dim moving point target in IR image sequence[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 46(9): 323 - 328.
- [14] WANG Z C, TIAN J W, LIU J. Small infrared target fusion detection based on support vector machines in the wavelet domain[J]. *Optical Engineering*, 2010, 45(7): 1 - 9.
- [15] LI G K, PENG J X, LI H. Small target detection based on multi - wavelet transform[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology*, 2009, 28(1): 72 - 75.