

文章编号: 0253-2239(2009)09-2408-05

红外弱小目标检测中的特征选择性滤波方法

曹 琦 毕笃彦

(空军工程大学工程学院信号与信息处理实验室, 陕西 西安 710038)

摘要 针对红外图像弱小目标检测中的预处理问题, 提出了一种特征选择性滤波方法(CSF), 该方法创造性地将各向异性滤波应用到图像空域, 通过分析红外图像中不同特征区域的特性, 改进了系数分布函数, 使 CSF 在消除背景、平滑边缘的同时, 增强目标信号。最后给出了该方法的滤波特性分析和实验结果, 并与其他滤波方法做了比较。实验结果表明该方法具有良好的背景抑制和目标增强性能, 且结构简单, 有利于实时实现。

关键词 图像处理; 特征选择性滤波器; 各向异性滤波; 小目标检测

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2408

Characteristic-Selecting Filtering in Infrared Small Target Detection

Cao Qi Bi Duyan

(Signal Lab., Engineering College, Airforce Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract For solving the pre-processing problem of dim small target detection in infrared images, a characteristic-selecting filtering (CSF) method is proposed. The method applied anisotropic diffusion to images' spatial domain creatively. Through analyzing the properties of various kinds of characteristic regions, the method improved the coefficient distribution function to suppress clutter, smooth edge and enhance target. The filtering characteristic analysis and experimental results were given, which were compared with those by some other methods. The results show that this approach can provide good performance of suppressing clutter and enhancing target signal, and its structure is simple to be implemented in real-time system.

Key words image processing; characteristic-selecting filter; anisotropic filtering; small target detection

1 引 言

红外图像弱小目标检测问题中, 背景杂波强度往往比目标信号大很多, 图像信噪比极低, 使红外图像弱小目标检测工作变得相当困难。为了提升系统在强杂波背景中的弱小目标的检测能力, 必须先对图像进行预处理, 抑制背景, 增强信号。Reed 等提出了局部均值滤波(LMR)的非平稳背景中的目标检测算法^[1]。熊辉等研究了使用小波变换和形态学检测在帧间作快速运动的小目标的方法^[2]。杨磊等提出了一种方差加权信息熵滤波方法^[3]。上述算法经典的 LMR 滤波虽然结构简单但对强杂波适应性不强^[1], 其他算法需要小波变换^[4]、边缘提取^[5]等, 算法结构复杂, 难以满足实时性要求。其他的一些

方法, 如中值滤波^[6]等方法, 滤波效果差强人意。Perona 和 Malik 在 1990 年提出各向异性微分方法用于提取图像边缘, 抑制图像平稳区域取得了很好的效果^[7]。但是, 将其用于对红外图像中弱小运动目标的检测存在以下缺点: 在灰度剧烈变化的边缘区域, 梯度很大, 微分系数很小, 微分作用也很小, 使得图像边缘没有得到很好的抑制; 灰度变化较小或只有孤立目标点的区域, 采用了较强的平滑处理, 使得目标信号没有得到很好的增强。但各向异性微分方法有一个很大的特点: 微分过程具有很强的方向性。在此基础上, 本文提出了一种特征选择性滤波(CSF)方法, 抑制背景和边缘, 增强目标信号。实验结果表明这是一种实用和有效的弱小目标检测方法。

收稿日期: 2009-03-06; 收到修改稿日期: 2009-03-28

基金项目: 国家 863 计划(2007AA701206)资助课题。

作者简介: 曹 琦(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事信号与信息检测方面的研究。E-mail: cq_supass@sina.com

导师简介: 毕笃彦(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事语音图像处理与模式识别方面的研究。

E-mail: biduyan@126.com

2 红外图像特征描述

不同种类的背景具有不同的特性,但总的说来一幅含有小目标的红外图像主要包括三部分:背景图像、噪声图像和目标图像。因此,在起伏背景下,红外场景图像 $f(x, y)$ 可以描述为^[8]

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

$f_B(x, y)$ 为背景图像,主要是大面积缓慢变化的云层或海平面,通常具有“强相关”特点,并占据了整个场景图像的低频空间。背景杂波虽然从整幅图像上看具有非平稳特性,但在局部范围内呈现准平稳特性^[9]。背景图像中主要包含两类区域,一类是局部平稳区域,另外一类是边缘区域。 $f_T(x, y)$ 为目标信号,在图像中,点状目标表现为亮度较周围背景高,与背景不相关的孤立亮点。 $n(x, y)$ 为噪声,它们各个像素不相关,与背景像素也不相关,在空间域表现为和小目标类似的高频特征,但在空间分布上是随机的,帧间分布不具有运动小目标所具有的时域相关性。经过以上分析,可以将红外图像区分为三类特征区域。A: 平稳特征区域。该区域像素值和其邻域像素值相差不大,且表现出局部平稳特性。B: 边缘特征区域,如云层的边缘。该区域像素值和其邻域像素值沿某个方向相差较大,但垂直于该方向时,相差较小。C: 目标特征区域,该区域是在红外图像中的孤立奇异点,包括随机噪声^[10]。如图 1 所示。

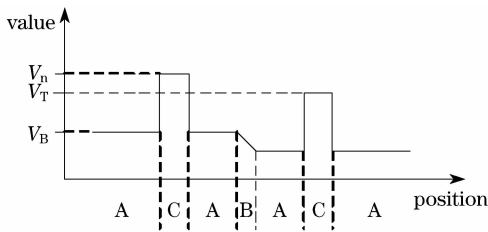


图 1 特征区域(A: 平稳区域, B: 边缘区域, C: 目标区域)

Fig. 1 Characteristic regions (A: Steady region, B: Edge region, C: Target region)

3 特征选择性滤波(CSF)

上文将红外图像分成了三类特征区域。要实现红外弱小目标的检测,首先要对红外图像进行预处理(滤波),处理的目的是抑制背景图像,增强目标信号。本文给出了一种特征选择性滤波(Characteristic-Selecting Filtering)方法,它能针对红外图像不同特征区域,抑制红外图像中的平稳背景和边缘,增强目标信号,下面给出推导过程。

3.1 各向异性微分(Anisotropic Diffusion)^[7]

对图像滤波过程的处理,可以用偏微分方程予以表达。以 u_0 表示一幅灰度图像,灰度值为 $u_0(x, y)$ 。引入时间因子 t , 则对图像的处理以偏微分方程表示可写为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F[u(x, y, t)], \quad (2)$$

式中 $u(x, y, t)$ 为变化过程中的图像, F 表示给定某种算法,通常依赖于图像及其空间上一、二阶导数。原始图像 u_0 为初始条件。偏微分方程的解 $u(x, y, t)$ 即给出了迭代 t 次时的图像,通常在得到满意的图像时即停止迭代。这就是偏微分方程表达的图像处理过程。

微分去噪通过求解偏微分方程实现

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

初始条件为 $u(x, y, 0)$, 表示原始(含噪或降质)图像, (x, y) 为空间位置, t 是时间参数, ∇u 为图像灰度梯度。

为了保证图像在各方向上的特征,有必要将偏微分方程(2)改进为各向异性分布形式。在各方向不同程度平滑图像以 Perona 和 Malik 提出的一种非线性的微分方法用于克服线性微分方法所带来的模糊和位置偏移等缺陷最具代表性。

Perona 和 Malik 给出的各向异性微分方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}[c(\nabla u)]\nabla u, \quad (4)$$

式中 u 为一幅灰度图像的灰度值; ∇u 为梯度; $c(\nabla u)$ 为系数分布函数,又称为“边缘停止”函数用来保持边缘; div 表示散度算子。 $c(\nabla u)$ 的选取对各向异性微分的抑噪和边缘保持能力有着非常重要的影响,其选取原则为:在梯度较小的平坦区域, $c(\nabla u)$ 的值较大,梯度较大的突变区域,如边缘,值较小,从而保留这些局部特征。文献[7]给出了两个函数:

$$c(\nabla u) = \exp[-(|\nabla u|/k)^2],$$

$$c(\nabla u) = \frac{1}{1 + (|\nabla u|/k)^2}, \quad (5)$$

式中 k 为大于 0 的常数。

3.2 特征选择性滤波推导过程

各向异性微分方法虽然能够抑制平稳的背景区域,但同时它也保持了背景中的边缘细节,而且各向异性微分实际上是一个时域微分迭代的过程,实时性不好。红外弱小目标检测的目的是要抑制背景图像,包括平稳特征区域和边缘特征区域,增强信噪比,实时性要求较高。因此,本文在空域范围进行各

向异性微分,对红外图像的各种特征区域进行选择滤波,合理地选择系数分布函数,抑制平稳特征区

域和边缘特征区域的同时,增强了目标特征信号。
令准则函数

$$J_{\varphi}(u) = \varphi(|\nabla_{i,j}^+ u|) + \varphi(|\nabla_{i,j}^- u|) + \varphi(|\nabla_{i,j}^{\downarrow} u|) + \varphi(|\nabla_{i,j}^{\uparrow} u|), \quad (6)$$

式中 $\nabla_{i,j}^+ u = u_{i,j+1} - u_{i,j}$, $\nabla_{i,j}^- u = u_{i,j} - u_{i,j-1}$, $\nabla_{i,j}^{\downarrow} u = u_{i+1,j} - u_{i,j}$, $\nabla_{i,j}^{\uparrow} u = u_{i,j} - u_{i-1,j}$; $u_{i,j}$ 表示图像在 (i,j) 位置的像素值, $\varphi(\cdot)$ 为势函数。

求 $J_{\varphi}(u)$ 对 $u_{i,j}$ 的偏导数

$$\partial J_{\varphi}(u)/\partial u_{i,j} = \partial/\partial u_{i,j} [\varphi(|u_{i,j+1} - u_{i,j}|) + \varphi(|u_{i,j} - u_{i,j-1}|) + \varphi(|u_{i+1,j} - u_{i,j}|) + \varphi(|u_{i,j} - u_{i-1,j}|)] = -\varphi'(|u_{i,j+1} - u_{i,j}|) + \varphi'(|u_{i,j} - u_{i,j-1}|) - \varphi'(|u_{i+1,j} - u_{i,j}|) + \varphi'(|u_{i,j} - u_{i-1,j}|). \quad (7)$$

令 $c(|\nabla u|) = \varphi'(|\nabla u|)/(2|\nabla u|)$, 则 $\varphi'(|\nabla u|) = 2|\nabla u|c(|\nabla u|)$, 此处 $c(|\nabla u|)$ 为系数分布函数, 则(7)式等价于

$$\partial J_{\varphi}/\partial u_{i,j} = -2(\lambda_E u_{i,j+1} + \lambda_W u_{i,j-1} + \lambda_S u_{i+1,j} + \lambda_N u_{i-1,j} - \lambda_{\Sigma} u_{i,j}), \quad (8)$$

式中 $\lambda_E = c(|u_{i,j+1} - u_{i,j}|)$, $\lambda_W = c(|u_{i,j-1} - u_{i,j}|)$, $\lambda_S = c(|u_{i+1,j} - u_{i,j}|)$, $\lambda_N = c(|u_{i-1,j} - u_{i,j}|)$, $\lambda_{\Sigma} = \lambda_E + \lambda_W + \lambda_S + \lambda_N$ 。

模板 $H(i,j)$ 表示为

$$H(i,j) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_N & 0 \\ -\lambda_W & \lambda_{\Sigma} & -\lambda_E \\ 0 & -\lambda_S & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

则(6)式等价于

$$\partial J_{\varphi}/\partial u_{i,j} = \text{sum} \left\{ H(i,j) \cdot \begin{bmatrix} 0 & u_{i-1,j} & 0 \\ u_{i,j-1} & u_{i,j} & u_{i,j+1} \\ 0 & u_{i+1,j} & 0 \end{bmatrix} \right\}, \quad (10)$$

式中 \cdot 代表点乘; $\text{sum}(\cdot)$ 表示矩阵内各个元素之和。

目标特征区域特性与边缘特征区域的差别在于,边缘特征区域存在空间相干性,即沿某方向梯度必等于或接近于0;平稳特征区域梯度沿各个方向都等于或接近于0^[11]。为了抑制背景中的平稳和边缘特征区域,增强目标信号,需要选择合适的系数分布函数。对 $c(\nabla u)$ 作如下要求。

① $\lim_{|\nabla u| \rightarrow 0} c(\nabla u) = 0$, 在平稳区域进行各项同性平滑消除背景;

② $\lim_{|\nabla u| \rightarrow \infty} c(\nabla u) = M, M \in (0, +\infty)$, 各向异性平滑边缘抑制纹理杂波背景,增强目标;

③ $c(\nabla u)$ 是连续严格单调增函数,保证滤波平稳性。

选择满足上面三个条件的系数分布函数如下所示:

$$c(\nabla u) = 1 - \frac{1}{1 + (|\nabla u|/k)^2},$$

$$c(\nabla u) = 1 - \exp[-(|\nabla u|/k)^2], \quad (11)$$

式中 σ 为图像方差。

3.3 CSF 滤波特性分析

(1) 平稳特征区域: 此类区域多为背景杂波, 具

有较强的相关性, 梯度均接近于0。 $|\nabla u|$ 值较小, $c(|\nabla u|)$ 很小。可知 $H(i,j)$ 的系数均接近于0, λ_{Σ} 值接近于0。由条件①知, 像素 $u_{i,j}$ 将作为背景而被抑制或消除;

(2) 边缘特征区域: 四个方向的梯度至少有2个梯度较小。 $H(i,j)$ 中四个邻域系数至少有两个系数均接近于0。 λ_{Σ} 值较小。由条件②知, 该类像素 $u_{i,j}$ 将视作边缘纹理, 被平滑;

(3) 目标特征区域: 四个方向梯度都大于0, $H(i,j)$ 中四个邻域系数均较大, λ_{Σ} 值较大。由条件③知, 这是一个随梯度单调递增函数, 此时像素 $u_{i,j}$ 将被明显的增强。

各特征区域 $H(i,j)$ 值如下:

$$\text{平稳特征区域: } \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \text{ 目标特征区域:}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\lambda_N & 0 \\ -\lambda_W & \lambda_{\Sigma} & -\lambda_E \\ 0 & -\lambda_S & 0 \end{bmatrix}; \text{ 边缘特征区域:}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\lambda_N & 0 \\ 0 & \lambda_{\Sigma} & 0 \\ 0 & -\lambda_S & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\lambda_W & \lambda_{\Sigma} & -\lambda_E \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\lambda_W & \lambda_{\Sigma} & 0 \\ 0 & -\lambda_S & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_N & 0 \\ 0 & \lambda_{\Sigma} & -\lambda_E \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

4 实验结果

实验运行环境为: CPU 双核 2.4 GHz; 内存 2 GB; 仿真软件 Matlab7.01。图 2(A1) 是地面红外

摄像头拍摄的天空红外视频序列的第 15 帧,2(B1)是另外一幅场景的红外视频序列的第 26 帧,2(C1)是海杂波背景下的红外视频序列的第 600 帧,分辨率为 320×240 。实验中,(9)式中的 k 值取为 30。根据式(9)中的模板,对每个像素点在 3×3 的窗口内进行特征选择性滤波。

将本文滤波方法分别和中值滤波^[6]、形态学滤波^[12]、方差加权信息熵滤波^[3]进行比较,其中中值滤波,方差加权信息熵滤波均选用 5×5 的窗口,在形态学滤波中为了凸显点目标,图 2 中 A,B 图像结

构元选择为 $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 9 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$,C 图像结构元选择为

$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 9 & 9 & 9 & 1 \\ 1 & 9 & 9 & 9 & 1 \\ 1 & 9 & 9 & 9 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$,得到实验图像如图 2 所示。从

实验图像看出,均值滤波和标准差滤波对增加图像信噪比的效果不是很理想;方差加权信息熵滤波虽然能够将小目标凸显出来,但是背景的灰度值也有所增加,且背景边缘没有得到很好的抑制和平滑。CSF 则维持了比以上滤波方法更好的性能,背景中的平稳部分和边缘部分都抑制的很好,目标信号亮度也被增强,其三维特性如图 3~5 所示。

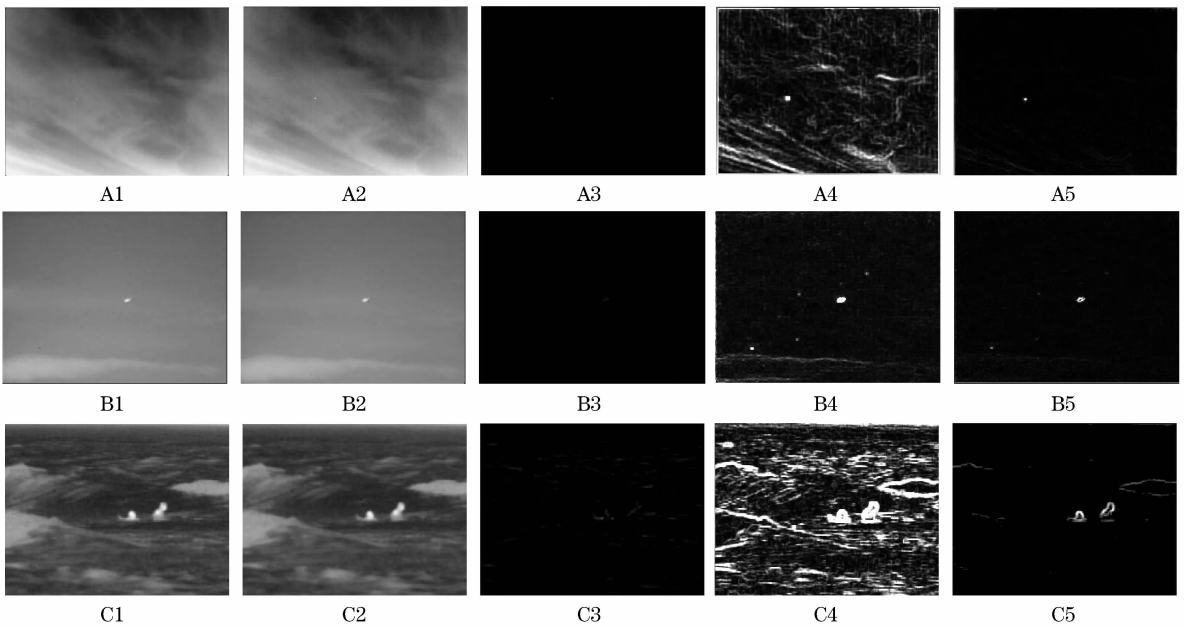


图 2 原始图像与各种滤波图像。A1,B1,C1:原始图像;A2,B2,C2:中值滤波结果;A3,B3,C3:形态学滤波结果;A4,B4,C4:方差加权信息熵滤波结果;A5,B5,C5:CSF 滤波结果

Fig.2 Original images and filtering results. A1, B1,C1: Original images; A2,B2,C2: Med-filtering results; A2,B2, C3: Morphology filtering results; A4,B4,C4: Variance-WIE filtering results; A5,B5,C5: CSF results

为了更好的说明 CSF 方法的有效性,分别计算各滤波方法与原始图像的信噪比增益 g_{SNR} ,并统计各种方法的仿真时间。信噪比增益 $g_{SNR} = R_{SN}^{out} / R_{SN}^{in}$,其中 $R_{SN} = (g_t - g_b) / \sigma$, g_t 为目标区域均值, g_b 为背景均值, σ 为背景方差。对 1000 帧图像进行统计,其中 g_{SNR} 为对 1000 帧图像处理的平均增益,Time 为 1000 帧图像的平均处理时间,结果如表 1 所示。可以看出本文滤波方法实时性较好,且大大提高了目标信噪比。

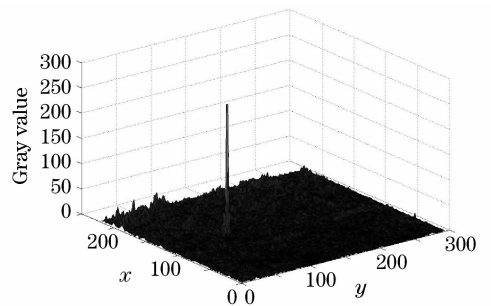


图 3 图像 A1 CSF 滤波三维图

Fig. 3 A1 CSF 3-D Plot

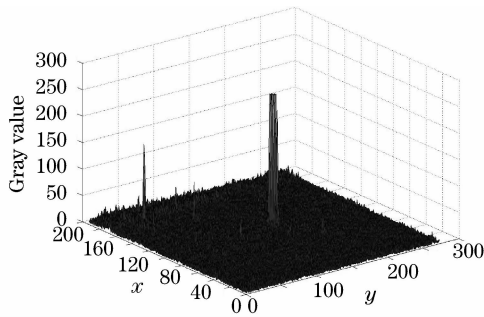


图4 图像 B1 CSF 滤波三维图

Fig. 4 B1 CSF 3-D Plot

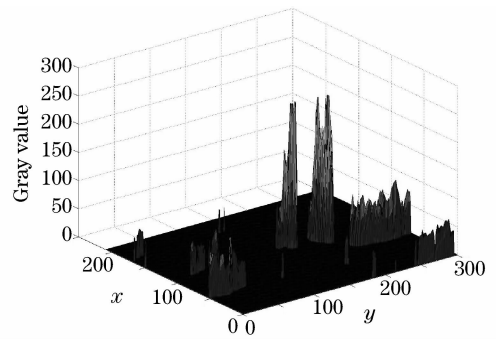


图5 图像 C1 CSF 滤波三维图

Fig. 5 C1 CSF 3-D Plot

表1 红外图像各种滤波方法比较

Table 1 Comparisons of several infrared images filtering methods

Images	Med-filtering		Morphology filtering		Variance-WIE filtering		CS filtering	
	g_{SNR}	Time /s	g_{SNR}	Time /s	g_{SNR}	Time /s	g_{SNR}	Time /s
A	1.1546	0.106	4.4788	0.276	10.4354	0.530	11.6436	0.467
B	1.1452	0.087	3.3456	0.245	10.6789	0.535	12.8433	0.308
C	1.0037	0.152	5.8565	0.357	6.6345	0.786	9.6438	0.387

5 结 论

红外图像中弱小目标的检测问题一直是红外图像处理的一个难点和重点,为此本文提出了一种特征选择性滤波方法(CSF)。本文创造性地将各向异性滤波应用到图像空域,通过分析红外图像不同特征区域的特性,改进系数分布函数 $c(\nabla u)$,使其能够在消除背景、平滑边缘的同时,增强目标信号。本文还分析了该方法的滤波特性,给出了实验结果,并与其他滤波方法做了比较。实验结果表明该方法具有良好的背景抑制和目标增强性能,且运算量小,结构简单,有利于实时实现。

参 考 文 献

- 1 Chen J. Y., Reed I. S.. A detection algorithm for optical targets in clutter [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic System*, 1987, **23**(1):46~591
- 2 Xiong Hui, Shen Zhenkang, Wei Jibo *et al.*. Moving infrared low SNR target detection algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, **27**(12):26~29
熊 辉,沈振康,魏急波等. 低信噪比运动红外点目标的检测 [J]. *电子学报*, 1999, **27**(12):26~29
- 3 L. Yang, Y. Zhou, J. Yang *et al.*. WIE Based Infrared Images Processing [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(15):857~859
- 4 Zhu Hong, Zhao Yigong. Detection of weak and small moving infrared targets by adaptive prediction of background [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, **25**(1):41~45
朱 红,赵亦工. 基于背景自适应预测的红外弱小运动目标检测 [J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(1):41~45
- 5 Wu Bin, Ji Hongbing, Li Peng. New method for moving dim

- target detection based on third-order cumulant in infrared image [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, **25**(5):364~367
- 武 斌,姬红兵,李 鹏. 基于三阶累积的红外弱小运动目标检测新方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(5):364~367
- 6 Barnett J. Statistical analysis of median subtraction filtering with application to point target detection in infrared background[C]. *SPIE*, 1989, **1050**:10~18
- 7 P. Perona, J. Malik. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1990, **12**(4): 629~639
- 8 Soni Zeidler James R., Walter H. Ku. Performance evaluation of 2-Dadaptive prediction filters for detection of small objects in image data [J]. *IEEE Trans. On Image Process.*, 1993, **2**(3): 327~340
- 9 Wu Honggang. *Study of the Technology of Spatial-Temporal Non-Stational Heavy Clutter Suppression and Dim Ssamll Moving Target Detection* [D]. Xi'an: Electronic Science and Technology University, 2008. 44~49
吴宏刚. 时空非平稳强杂波抑制与微弱运动目标检测技术[D]. 西安:电子科技大学, 2008. 44~49
- 10 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. An adaptive background adjusting algorithm for dim target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12):2163~2168
管志强,陈 钱,钱惟贤等. 一种背景自适应调整的弱点目标探测算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12):2163~2168
- 11 Zhang Biyin, Zhang Tianxu, Sang Nong. Novel regularizing filtering method for real-time detecting IR dim small moving target[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2008, **27**(2):95~100
张必银,张天序,桑 农. 红外弱小目标实时检测的规整化滤波方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(2):95~100
- 12 Zong Siguang, Wang Jiangan. Multi-scale mathematical morphology fusion filtering and the evaluation of the filtered image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1176~1180
宗思光,王江安. 多尺度形态算子融合图像滤波技术及滤波质量评价[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1176~1180