

文章编号: 0253-2239(2007)12-2163-6

# 一种背景自适应调整的弱点目标探测算法

管志强 陈 钱 钱惟贤 胡永生

(南京理工大学电子科学与光电技术学院 441 教研室, 南京 210094)

**摘要:** 针对因复杂背景导致低信噪比的弱点目标探测率降低的问题,首先分析了从红外图像中探测弱点目标时,由于复杂和缓变背景下潜在目标探测率不同,而导致目标探测率降低的理论依据;并在该分析的基础上,提出了一种基于背景自适应调整的红外点目标探测算法。该方法利用鲁宾逊(Robinson)保护滤波器从经过预处理的图像中提取潜在目标;通过复杂背景模糊隶属度函数将图像映射到模糊特征平面,并由该特征平面计算背景调整因子,以对提取的潜在目标进行加权调整,从而降低了复杂背景的影响。实验结果表明,该算法可以显著提高复杂背景下红点目标的检测概率,并且能够探测出信噪比为 1 的目标。

**关键词:** 图像处理; 红外技术; 目标检测; 背景自适应调整; Robinson 滤波器

中图分类号: TN911 文献标识码: A

## An Adaptive Background Adjusting Algorithm for Dim Target Detection

Guan Zhiqiang Chen Qian Qian Weixian Hu Yongsheng

(College of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

**Abstract:** In order to advance the detection ratio of dim target in clutter background, the reason of low target detected ratio from infrared image that contain both complex and flat background is analysed. And based on this analysis, an algorithm of dim target detection based on adaptive background adjusting is advanced. This algorithm uses Robinson guard filter to distill potential target point. And clutter image fuzzy membership function is defined to map the image to fuzzy plane. The background adjusting coefficient is computed by this fuzzy plane to modulate the potential target point. So the influence of the clutter background of the image is reduced. The experimental results have proved that this algorithm can obviously improve the probability of the point target detection, and it can detect dim targets within infrared image with signal-to-noise ratio higher than 1.

**Key words:** image processing; infrared technique; target detection; adaptive background adjusting; Robinson filter

## 1 引 言

复杂背景下低信噪比的点目标探测一直是红外图像检测与处理研究的热点和难点。探测后跟踪(DBT)由于其计算量少,速度快等特点,使其得到了广泛应用,该技术主要有三步:1)使用线性或者非线性高通滤波器进行背景抑制;2)通过一定的分割算法分割出潜在目标;3)通过目标的运动特征将

分割出的潜在目标点进行轨迹关联以最终判别是否是真实目标。

目前国内外学者已经提出的很多抑制背景的高通滤波器,如自适应背景预测检测<sup>[1]</sup>、形态学方法<sup>[2,3]</sup>、小波变换和 Karhunen-Loeve 变换(K-L)等<sup>[4]</sup>,这些滤波器在背景具有缓变结构时效果较好,但当背景具有较大起伏时,具有较高的虚警率,不能

作者简介:管志强(1982—),男,内蒙古人,博士研究生,主要从事红外图像处理和目标探测识别技术等方面的研究。

E-mail: gzq\_njust@163.com

导师简介:陈 钱(1964—),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,主要从事光电探测与成像技术等方面的研究。

E-mail: developer\_plus@163.com

收稿日期:2007-04-02;收到修改稿日期:2007-07-05

取得令人满意的效果。

由于弱点目标本身没有几何形状或纹理特征,因此,研究单帧图像弱点目标的检测算法,必须从新的角度进行研究。我们认为图像中弱点目标的检测,从数学角度看是有关奇异函数的分析,而从图像分析的观点看是判断图像中的孤立奇异点。红外弱点目标呈现的奇异性与图像边缘构成的奇异性的差别,在于后者构成的奇异性具有空间相关性<sup>[5,6]</sup>。另一方面,由于图像复杂背景区域自身的奇异性比较明显,并且背景亮度可能高于目标亮度,与背景比较平坦的区域相比,复杂背景区域的产生虚警干扰的概率大于平坦区域。因此在恒虚警率的探测条件下,平坦区域的目标被复杂背景区域的干扰所淹没的概率较大。

鉴于此,本文提出了基于背景自适应调整的目标探测算法,该算法利用点目标和边缘的奇异性和空间相关性的差别,并且结合背景调整因子,减少了复杂背景的干扰,提高了目标的探测率。

## 2 背景调整算法依据推导

对一幅包含弱点目标的红外图像序列可以用下式描述:

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

式中  $f(x, y, k)$  表示在图像上点  $(x, y)$  在第  $k$  帧的灰度值,  $f_T(x, y, k)$  表示目标经过该点时的灰度值,  $f_B(x, y, k)$  表示背景的灰度值,  $f_B$  可认为由复杂背景  $B_1$  和缓变背景  $B_2$  组成,复杂背景  $B_1$  指高频分量丰富的区域,如云层的边缘、地面边缘等,缓变背景  $B_2$  则是背景较为单一的区域,如天空背景等区域。 $N$  表示噪声的灰度值。 $N(x, y, k)$  可以等效为由电路部分引起的白噪声  $N_\delta$  和由探测器盲元引起的椒盐噪声  $N_{sp}$  的总和,因此包含目标的图像可以重新描述为

$$f(x, y, k) = f_T(x, y, k) + f_{B_1}(x, y, k) + f_{B_2}(x, y, k) + N_{sp}(x, y, k) + N_\delta(x, y, k). \quad (2)$$

实际的探测过程中,因为目标出现在探测器视场内的位置是未知的,可假设目标出现在图像每个区域的概率分布  $P(T)$  是均匀分布的,图像中复杂背景的概率为  $P(B_1)$ ,缓变背景的概率为  $P(B_2)$ ,其中  $P(B_2) = 1 - P(B_1)$ ;因目标出现的位置与复杂背景是相互独立的,因此由条件概率的定义可知,目标

出现在图像中复杂背景区域  $B_1$  的概率  $P(T|B_1)$  和缓变背景区域  $B_2$  的概率  $P(T|B_2)$  也是相等的,即

$$P(T|B_1) = P(T|B_2). \quad (3)$$

设经过处理后提取出潜在目标的概率密度为  $P(A)$ ,潜在目标既可能是真实目标,也可能是噪声或云层边缘等引起的干扰。潜在目标是真实目标的概率表示为  $P(A \cap T)$ ," $\cap$ " 为交运算。

在复杂背景下探测出潜在目标的概率为条件概率  $P(A|B_1)$ ;在此背景下探测出目标的概率为  $P(A|B_2)$ ;因此潜在目标的探测概率由全概率公式可以表示为

$$P(A) = P(A|B_1)P(B_1) + P(A|B_2)P(B_2). \quad (4)$$

因为目标、高频噪声和图像的边缘等成分均处于图像的高频成分,而目标提取算法是将图像中高频成分中的目标分量提取出来,因此可以认为是一种高通滤波器;经过高通滤波之后,不可避免地会将同处于高频成分的噪声、边缘等分量残留下来。使得在图像高频成分丰富的区域,经过一定阈值分割之后,提取出潜在目标的概率要高于平坦区域,可用如下条件概率表示:

$$P(A|B_1) > P(A|B_2), \quad (5)$$

由条件概率的定义可以得到

$$\frac{P(A \cap B_1)}{P(B_1)} > \frac{P(A \cap B_2)}{P(B_2)}, \quad (6)$$

$P(A \cap B_1)$  和  $P(A \cap B_2)$  分别表示潜在目标出现在复杂背景和缓变背景下的概率。将(6)式两端均除以  $P(A \cap T)$ ,其含义是潜在目标点为真实目标的概率,再将不等式两端进行翻转,得到

$$\frac{P(A \cap B_1 \cap T)}{P(A \cap B_1)} < \frac{P(A \cap B_2 \cap T)}{P(A \cap B_2)}, \quad (7)$$

由条件概率定义可得:

$$P(T|A \cap B_1) < P(T|A \cap B_2). \quad (8)$$

(8)式说明在复杂背景区域的探测率低于缓变背景区域。而(3)式说明目标出现在图像每个区域的概率是均等的,因此在图像各区域目标的探测率也应当是相等的,即

$$P(T|A \cap B_1) = P(T|A \cap B_2). \quad (9)$$

为使目标探测概率为均匀分布,减少复杂背景引起的探测率降低的问题,就应当使在不同的背景下,目标的探测率相同,即

$$P(A|B_1) = P(A|B_2). \quad (10)$$

因此目标探测算法必须根据其所在背景的复杂程度,对所提取的潜在目标的强度分布进行重新调整,以减小复杂背景对目标探测率的影响。

### 3 目标检测算法

基于上面的分析,本文提出了基于背景自适应调整的目标检测算法,检测算法流程如图 1 所示。

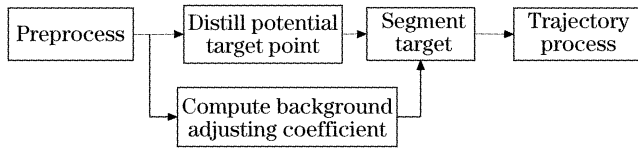


图 1 检测算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the algorithm

下面将各部分分别进行阐述。

#### 3.1 预处理

由于受探测器工艺的影响,红外图像存在很多盲元点,这些盲元点可以等效成椒盐噪声,这些噪声在空间灰度分布上与目标有很大的相似性。而与点目标特征不同的是其与邻域空间的像素完全不相关,因此为消除这些干扰,采用非线性统计排序滤波最为合适。为使预处理过程尽可能保留目标的能量和背景的边缘,滤波器的窗口选择与目标尺寸相当。本文使用  $3 \times 3$  最大中值滤波方法<sup>[7]</sup>,该方法比传统的中值滤波能够更好地保留图像中目标的能量,并且对盲元噪声具有同样的抑制作用,而且其计算量更小,更容易在硬件系统中实现。

$N \times N$  最大中值滤波的计算公式为

$$f_{\text{pre}}(i, j) = \max(z_1, z_2, z_3, z_4), \quad (11)$$

式中

$$z_1 = \text{med}[f(i, j - N), \dots, f(i, j), \dots, f(i, j + N)],$$

$$z_2 = \text{med}[f(i - N, j), \dots, f(i, j), \dots, f(i + N, j)],$$

$$z_3 = \text{med}[f(i + N, j - N), \dots, f(i, j), \dots, f(i - N, j + N)],$$

$$z_4 = \text{med}[f(i - N, j - N), \dots, f(i, j), \dots, f(i + N, j + N)],$$

其中  $f$  为输入图像,  $\text{med}$  表示取集合的中间值。

#### 3.2 潜在目标提取与分割

原始图像经过预处理后,其中的盲元点都被消除,并且随机噪声也得到一定的抑制。将预处理后的图像进行背景调整并提取目标。

从第 2 节的分析可以得出:在图像的不同区域,由于复杂背景的潜在目标提取概率高于缓变背景的,在目标出现在图像区域的概率密度为均匀分布的假设下,为使(10)式成立或近似成立,必须根据当前区域是否为复杂背景区域来调整潜在目标的探测率。

该算法分为三步,

##### 1) 潜在目标提取

对从图像提取点目标的探测算法,都可以认为是一种潜在目标探测。而点目标检测可以看作是对图像中奇异点的判别。点目标在其空间的分布表现为在某个尺度下为极大值,并且具有全向奇异性<sup>[8]</sup>,鲁宾逊滤波器正是依据此特性设计的,该滤波器通过比较中心像素与其邻域像素极值间的差异来抑制背景,其对缓变的平坦和空间相关性强的边缘背景区域都有很好的抑制作用。

由于靠近目标像素周围的杂波子集,它们的分布特征与目标像素有关联,使用保护带(Guard band)来实现保留一部分杂波子集。本系统采用改进的非线性非参量型鲁宾逊保护滤波器(Robinson filter with a guard band)完成背景杂波的抑制。公式如下:

$$f_{\text{Robinson}}(i, j) = \begin{cases} f_{\text{pre}}(i, j) - \max(z_1, z_2, z_3, z_4), & f_{\text{pre}}(i, j) > \max(z_1, z_2, z_3, z_4) \\ f_{\text{pre}}(i, j) - \min(z_1, z_2, z_3, z_4), & f_{\text{pre}}(i, j) < \min(z_1, z_2, z_3, z_4) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

式中

$$z_1 = \max[f_{\text{pre}}(m - N; m + N, n - N)],$$

$$z_2 = \max[f_{\text{pre}}(m - N; m + N, n + N)],$$

$$z_3 = \max[f_{\text{pre}}(m - N, n - N; n + N)],$$

$$z_4 = \max[f_{\text{pre}}(m + N, n - N; n + N)].$$

普通边缘滤波器只给出点目标边缘信息而滤除了目标内部信息,而鲁宾逊保护滤波器由于具有保护带,在目标不太大的情况下能给出目标的完整信息。本系统采用的滤波器尺寸为  $7 \times 7$ ,保护带宽度为 2,对最大尺寸为  $3 \times 3$  的目标不失真。

经过鲁宾逊保护滤波的结果后,缓变背景和空间相关性较强的边缘都被抑制,而目标和部分干扰都作为潜在目标被保留下来。

##### 2) 计算背景调整因子

在第 1 节中,为表述简单,将背景划分为复杂背景和缓变背景,而实际中复杂背景和缓变背景很难用确定的界限描述,并且复杂程度越高的背景所造成的干扰越严重,因此引入模糊集合对事物的描述方法,模糊集合的描述方法不对事物做简单的肯定和否定,而是用隶属度来反映某一事物属于某一范畴的程度。因此对背景的复杂程度建立隶属度函数,将图像映射到模糊特征平面,其每个元素用来描述该像素背景的复杂程度。

则(4)式、(5)式和(8)式分别改写为

$$P(A) = \int P(A|B_\mu)P(B_\mu)d\mu, \quad (13)$$

$$P(A|B_{\mu_i}) > P(A|B_{\mu_j}), \quad \mu_i > \mu_j \quad (14)$$

$$P(T|A \cap B_{\mu_i}) < P(T|A \cap B_{\mu_j}), \quad \mu_i > \mu_j \quad (15)$$

其中  $\mu$  表示复杂背景的隶属度。

为计算复杂背景隶属度,首先将图像经过高通滤波器以提取高频分量,然后将图像经过高通滤波器计算得到的图像映射到模糊特征平面,得到复杂背景隶属度的特征平面。由于形态学滤波器的抗噪性能较好,并且易于硬件实现,本文高通滤波器选择形态学滤波器。计算公式如下:

$$f_H = f_{pre} - (f_{pre} \circ b) \quad (16)$$

$f_{pre} \circ b$  表示开运算, $b$  为结构元素,其尺寸与鲁宾逊滤波器一样为  $7 \times 7$ 。

将  $f_H$  映射到模糊特征平面,其元素表示图像的该区域的背景复杂程度。选取线性隶属度函数如下:

$$\mu(i, j) = \frac{f_H(i, j) - f_{H \min}}{f_{H \max} - f_{H \min}}, \quad (17)$$

其中  $f_{H \min}$ 、 $f_{H \max}$  分别为  $f_H$  中的最小值与最大值。

为使在不同复杂度的背景下潜在目标的探测率近似相同,须根据其背景的复杂隶属度计算当前背景自适应调整因子  $k_\mu$ ,调整经过鲁宾逊滤波器后潜在目标的能量,以满足潜在目标在图像中各个区域的探测概率近似相同。

对模糊特征平面进行非线性变换  $\Psi(\cdot)$ ,计算不同区域的潜在目标探测概率如下,其中  $W$  是窗口大小, $\alpha$  是加权系数,mean 表示取平均值,max 表示取最大值。

$$k_\mu(i, j) = \Psi(\mu) = f_{pre}(i, j) \cdot \left\{ 1 - \alpha \sqrt{\frac{\text{mean}[\mu(i-W:i+W, j-W:j+W)]}{\max[\mu(i-W:i+W, j-W:j+W)]}} \right\}. \quad (18)$$

对 Robinson 滤波后输出的图像通过  $k_\mu$  重新计算。得到背景调整后的图像  $f_{out}$ 。

$$f_{out}(i, j) = \frac{f_{Robinson}(i, j)}{k_\mu(i, j)}. \quad (19)$$

经过修正后的潜在目标,在不同复杂隶属度的背景下的探测概率区域趋于均匀分布:

$$P'(T|A \cap B_{\mu_i}) \approx P'(T|A \cap B_{\mu_j}), \quad \mu_i \neq \mu_j \quad (20)$$

### 3) 目标分割

为使目标点数不超过后端的航迹处理的能力,对输出图像  $f_{out}$  利用恒虚警率分割。假设  $p(x)$  为经过背景自适应调整后的输出图像  $f_{out}$  的概率密度分布,令

$$F(x) = \int_0^x p(t)dt, \quad (21)$$

可见  $F(x)$  是递增函数。通过求解方程

$$1 - P_{fa} = \int_0^T p(x)dx, \quad (22)$$

可以得到阈值  $T$ ,其中  $P_{fa}$  为恒虚警率,本文  $P_{fa}$  选取为  $10^{-4}$ 。

## 4 实验仿真与分析

仿真实验选取一段以天空和地面结合为背景的红外图像序列(图 2),在方框中为低空飞行的飞机,定义目标的信噪比  $r_{SN}$  如下:

$$r_{SN} = (f_T - f_C) / \sigma_C, \quad (23)$$

其中  $f_T$  为目标的灰度, $f_C$  为目标周围背景的平均灰度, $\sigma_C$  为背景的标准差。

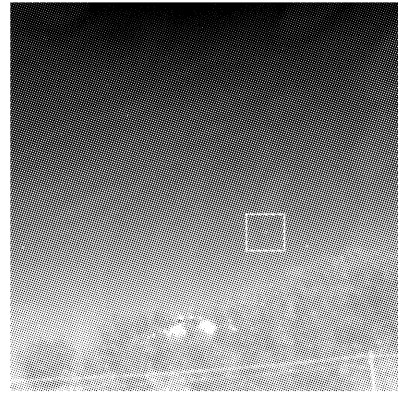


图 2 原图像

Fig. 2 Original image

由(23)式计算目标的信噪比为 0.9,虽然目标所在背景较为单一,但是目标的能量较弱,地面背景边缘丰富。分别使用鲁宾逊保护滤波和形态学滤波<sup>[10~12]</sup>进行背景自适应调整,在恒虚警率为  $10^{-4}$  时分割检测结果如图 3、图 4,由于地面背景的干扰,

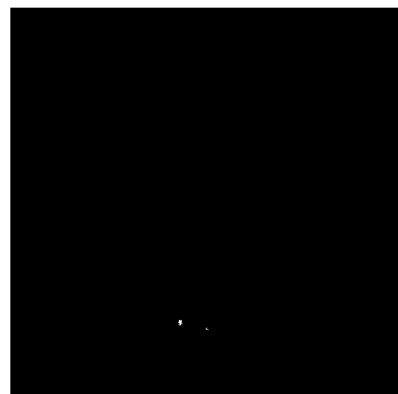


图 3 鲁宾逊滤波分割结果

Fig. 3 Robinson filtered and segmented image

目标被当作干扰去除；而通过图 1 所示的检测流程，经过背景自适应调整处理后(图 5)，真实目标被分割出来。由于采用恒虚警率的分割方法，图 3~图 5 中均存在一些干扰点，该干扰点的多少与恒虚警率有关，去除这些干扰点主要依据目标的轨迹特征，这不是本文的主要内容，故不再赘述。

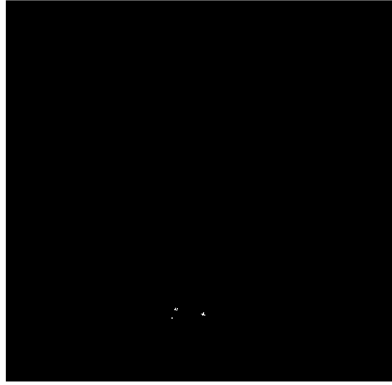


图 4 形态学滤波分割结果

Fig. 4 Morphological filtered and segmented image

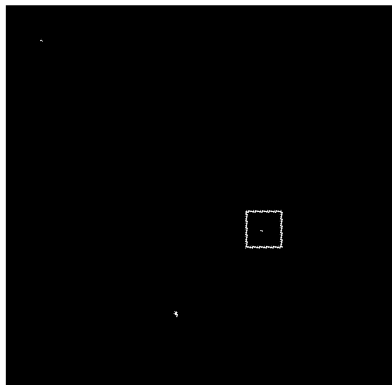


图 5 本文算法结果

Fig. 5 The segmented image of filtered based on adaptive background adjusting

在不同恒虚警率分割条件下，分别向 5 幅测试图像中随机加入信噪比为 1 的仿真目标，每幅图像

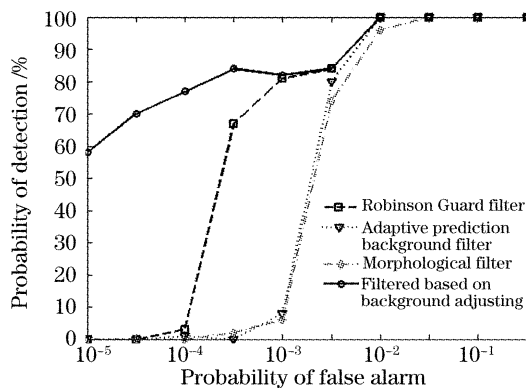


图 6 在不同虚警率下不同算法探测率比较

Fig. 6 Probability of detection versus different probability of false alarm by different algorithm

均实验 100 次，分别将鲁宾逊保护滤波器，自适应背景预测、形态学滤波和本文算法的探测率进行比较，得到探测率曲线如图 6 所示。

由此可见本文算法的目标探测率均明显优于其它三种算法。

## 5 结 论

点目标检测是红外预警和制导中的一个关键问题。传统的检测方法由于没有考虑复杂背景边缘的作用，因此在信噪比较低的情况下，检测性能将严重下降。本文提出的基于背景自适应调整的检测方法，由于利用了复杂背景隶属度对潜在目标点的自适应调整作用，使得在低信噪比的复杂背景下，其检测性能优于传统方法。并且由于该方法均采用空域滤波的方法，易于硬件实现，从而使该方法具有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 B. S. Denney, R. J. P. de Figueiredo. Optimal point target detection using adaptive auto regressive background[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4048**: 46~57
- 2 David B. Reiss. Spatial signal processing for infrared detection [C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2235**: 38~51
- 3 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 (in Chinese)
- 4 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
- 5 Peng FuYuan, Zhou XinJie, Hu Yingsong. Detection and analysis of weak target with infrared image based on K-L transform[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **20**(3): 238~240 (in Chinese)
- 6 彭复员,周鑫杰,胡颖嵩. 基于 K-L 变换的红外图像弱小目标检测与分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(3): 238~240
- 7 Li Hong, Zheng Chengyong, Gao Jingli. Weak and small object detection based on wavelet multi-scale analysis and Fisher algorithm[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2003, **22**(5): 353~356 (in Chinese)
- 8 李红,郑成勇,高景丽. 基于小波多尺度分析及 Fisher 分割的红外弱小目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, **22**(5): 353~356
- 9 Zhao Peng, Pu Zhaobang, Zhang Tianwen. A new tracking method of dynamic contour based on image fusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 760~767 (in Chinese)
- 10 赵鹏,浦昭邦,张田文. 基于图像融合的动态轮廓线跟踪新方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 760~767
- 11 S. D. Deshpande, M. H. Er, V. Ronda *et al.*. Max-mean and max-median filters for detection of small targets [C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3809**: 74~84
- 12 Ye Zengjun, Wang Jiangan, Ruan Yu *et al.*. Detection algorithm of weak infrared point targets under complicated background of sea and sky [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2000, **19**(2): 121~124 (in Chinese)
- 13 叶增军,王江安,阮玉等. 海空复杂背景下红外弱点目标的检测算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2000, **19**(2): 121~124

- 9 Zheng Wenlong, Zhang Yong, Tang Xinyi *et al.*. Real-time recognition of infrared small targets in complicated IR background [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **20**(6): 433~436 (in Chinese)  
郑文龙,张涌,汤心溢等. 复杂背景下红外小目标实时识别方法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(6): 433~436
- 10 Li Qi, Xu Zhihai, Feng Huajun *et al.*. A descriptive method for image stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 427~430 (in Chinese)  
李奇,徐之海,冯华君等. 一种图像稳定程度的描述方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 427~430
- 11 Zeng Ming, Li Jianxun. Optimized design of morphological improved top-hat filter based on improved genetic algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 510~515 (in Chinese)  
曾明,李建勋. 基于改进遗传算法优化的形态学修正 TOP-HAT 滤波器设计方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 510~515
- 12 Liu Guixi, Shao Mingli, Liu Xianhong *et al.*. Video moving object auto-extraction in real scene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1150~1155 (in Chinese)  
刘贵喜,邵明礼,刘先红等. 真实场景下视频运动目标自动提取方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1150~1155