

红外小目标图像的背景杂波量化方法

黄康¹ 毛峡¹ 梁晓庚^{1,2}

(¹ 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)
² 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要 分析了背景杂波对红外小目标检测的影响,研究了一种针对红外小目标图像的背景杂波定量描述方法。提出了背景杂波定量描述方法需要满足的三个条件:与主观判断的结果一致、对于不同的红外图像具有适应性和能够辅助改进目标检测算法。综合考虑了目标与背景的特征,融合了4种特征,提出了一种新的红外背景杂波量化方法。首先采用支持向量机对背景杂波强度进行分类,然后对每类图像分别采用层次分析法计算各特征的权重,从而实现杂波强度的量化。设计与传统方法的对比实验,实验结果表明该方法是一种有效的背景杂波强度量化方法。

关键词 图像处理;红外图像;小目标;背景杂波;定量描述

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0310001

Background Clutter Quantification Method for Infrared Image of Small Targets

Huang Kang¹ Mao Xia¹ Liang Xiaogeng^{1,2}

(¹ School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)
² China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan, 471009, China)

Abstract By analyzing the influence of background clutter on infrared small targets detection, we have researched a background clutter description method for infrared images of small targets. Three conditions of a background clutter description method are proposed: consistent with subjective judgment; suitable for different infrared images; assistant with improvement of target detection algorithms. Four features are synthesized by considering the relation between targets and backgrounds, and a novel method is proposed for describing the background clutter quantitatively in infrared images of small targets. Firstly, supporting vector machine is employed to classify the backgrounds. Secondly, the weight of each feature is calculated by analytic hierarchic process for each class of background images. Then the quantification problem is solved. Compared with the conventional methods, the validity of the proposed method has been demonstrated by the experimental results.

Key words image processing; infrared images; small targets; background clutter; quantitative description

OCIS codes 100.0100; 100.2000; 100.2960

1 引言

背景杂波是影响红外小目标检测的重要因素,强烈的背景杂波使目标检测变得困难^[1~8]。背景杂波是一个与目标相对的概念,图像中目标以外的部分均可被认为是杂波^[3]。背景杂波越强烈,目标检

测越困难。对红外背景杂波进行定量描述,可以用于分析不同背景杂波对算法检测性能的影响,对算法性能进行有效地评估。因此,定量描述红外背景具有重要意义。

目前研究者已经对红外背景杂波的定量描述进

收稿日期: 2010-03-30; 收到修改稿日期: 2010-10-26

基金项目: 航空科学基金(20070112001)和航天支撑技术基金资助课题。

作者简介: 黄康(1984—),博士研究生,主要从事红外图像信号处理方面的研究。

E-mail: huangkang.buaa@gmail.com

导师简介: 毛峡(1952—),教授,博士生导师,主要从事信号处理、模式识别与人工智能等方面的研究。

E-mail: moukyoun@yahoo.com.cn(通信联系人)

行了一些研究,主要方法有基于结构的杂波描述方法^[3]、基于数学统计的方法^[4]、基于高对比度敏感尺度的方法^[5]和基于功率谱密度的方法^[6]等。传统方法的缺点是:1)缺少对不同特征优点的综合利用;2)在某些情况下无法正确反映杂波强度对目标检测的干扰程度。本文主要研究了红外小目标图像中的背景杂波定量描述方法。

2 背景杂波定量描述方法

2.1 量化背景杂波的准则

在一般情况下,如果具有丰富先验知识的人无法准确检测目标,则算法也很难做出准确判别。一个有效的定量描述背景杂波的方法应该满足下列3个条件^[3]:1)与主观判断的结果一致;2)对于不同的红外图像具有适应性;3)能够辅助改进目标检测算法。

2.2 传统背景杂波描述的方法

背景杂波是一个相对于目标的概念,背景杂波的强度与目标和背景均相关。背景杂波强度越大,检测出目标的难度就越大。传统的背景杂波描述算子可以分为两类^[8~13]:第一类仅考虑了背景的影响,如各种背景灰度统计特征(均值、标准偏差等),这类算法虽然在一定程度上可以反映背景信息,但是没有考虑到目标的信息;第二类综合考虑了背景和背景的影响,例如信杂比(SCR)是一种广泛用于量化背景与红外小目标差异的指标,在一定程度上可以反映背景杂波强度,但也存在着不足。

在小目标图像中,小目标在图像中表现为一个微小的斑点状目标,如在128 pixel×128 pixel大小的图像中,小目标的尺寸不大于3 pixel×3 pixel。因此一般采用局部信杂比(LSCR)来描述局部背景杂波强度,其定义为

$$n_{\text{LSCR}} = 10\text{lb}\left(\frac{m_t^2}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中 m_t 表示目标的灰度均值, σ 表示局部背景的标准差。分析LSCR的定义[(1)式],可知LSCR综合考虑了目标的均值和背景标准差,但只是简单的用除法进行结合,并没有采用一个更为合理的处理方式。因此,在部分情况下可能无法正确反映背景杂波对目标的干扰,将在实验部分进行详细分析。

3 新的背景杂波定量描述方法

针对传统方法的不足,本文提出了一种新的思路:首先分析影响背景杂波强度的因素,并采用典型

的特征算子描述各个因素,然后提出一种合理的特征融合方法,综合各特征算子的优点,最终完成背景杂波的定量描述。

3.1 典型特征

背景杂波的强度主要取决于目标和背景的相对特性。因此,需要同时考虑背景的灰度分布以及目标与背景的相对关系。本文采用4种典型的特征算子分别计算目标和背景的特征,且该4种特征相互不具备明显的相关性。为了便于比较,将4种特征均进行了归一化处理:

1) 归一化差异均值 $\overline{\Delta m}$

$$\overline{\Delta m} = \frac{|m_t - m_B|}{(L-1)}. \quad (2)$$

2) 归一化背景标准偏差 $\overline{\sigma}$

$$\overline{\sigma} = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{(L-1)^2}. \quad (3)$$

3) 灰度一致性 $U, 0 < U \leq 1$

$$U = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i). \quad (4)$$

4) 背景的归一化三阶矩 $\overline{\mu}_3, \overline{\mu}_3 < 0.5$ 表示背景灰度直方图向左偏斜,反之,向右偏斜:

$$\overline{\mu}_3 = 0.5 \left[\frac{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m_B)^3 p(z_i)}{(L-1)^2} + 1 \right], \quad (5)$$

(2)式~(5)式中, m_t 为目标灰度均值, m_B 为背景灰度均值, L 表示图像的灰度级, σ 表示标准差, z_i 表示灰度变量, $p(z_i)$ 表示 z_i 的分布概率。

3.2 基于支持向量机与层次分析法的背景杂波描述方法

本文提出了一种基于支持向量机(SVM)与层次分析法(AHP)的方法。支持向量机将特征映射到高维线性可分的空间中,优点在于适用于样本数较少的情况。只要选用适当的核函数,就能够得到高维空间的线性分类函数。支持向量机适合解决分类问题,但是无法把不同的特征融合成为一个统一的指标。层次分析法是一种能够把半定性和半定量问题转化为定量计算的方法。其核心思想是通过一个成对比较判断矩阵来确定每个特征的权重,然后将所有的因素合成为一个量化的指标,但无法采用一个固定的成对比较判断矩阵对所有情况进行处理。

方法的流程如图1所示。首先提取4个基本的特征[(2)式~(5)式],利用支持向量机对背景分类,然后对每一类别的图像分别构造对应的成对比较判

断矩阵,然后得到最终的特征融合结果。

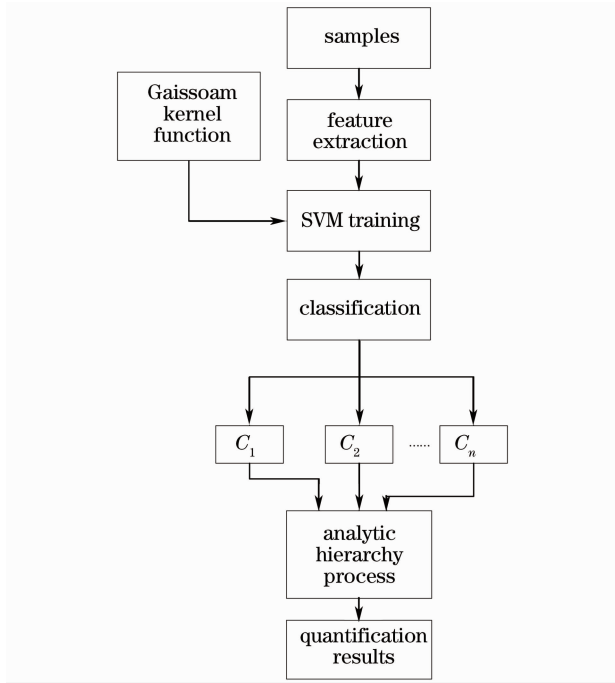


图1 基于SVM与AHP的背景杂波描述方法流程
Fig.1 Flow chart of background clutter description method based on SVM and AHP

支持向量机的关键是核函数,高斯径向核函数具有泛化误差小的特点。因此本文采用高斯径向核函数作为核函数,如下式所示:

$$k(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right). \quad (6)$$

层次分析法的关键是构造一个合适的成对比较判断矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_n$ (a_{ij} 表示特征 i 和特征 j 的相对权重), 求解出 \mathbf{A} 的最大特征根 λ_{\max} 及其对应的归一化特征向量 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 。设由(2)~(5)式计算的基本特征向量为 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, $n = 4$, 背景杂波强度 I 可用下式计算:

$$I = \mathbf{X} \cdot \mathbf{W}. \quad (7)$$

4 实验及分析

4.1 实验说明

本文采用蒙特卡洛实验方法规划实验数据。实验图像数据包括 50 个不同成像场景的图像数据集, 每个数据集中包括 20 个图像序列, 每个图像序列包括 30 frame 图像。

4.2 参数确定

需要确定 3 个部分的实验参数: 1) 局部区域的尺寸; 2) 支持向量机的参数; 3) 成对比较判断矩阵的

参数。

4.2.1 局部区域的尺寸

影响小目标检测主要是目标局部背景中杂波的干扰, 局部区域的尺寸选取对局部背景杂波的计算结果有影响。文中小目标的尺寸不大于 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$, 常用的局部背景滤波模板的大小一般为 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 或者 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ 。因此, 分别对两种尺寸的局部区域进行杂波计算。

4.2.2 支持向量机的参数

支持向量机的主要作用是分类。将图像数据中的 10 个图像数据集作为支持向量机的训练样本, 采用高斯径向核函数[(6)式]进行训练, 因此, 需要确定一个最佳的 σ^2 。为了达到这一目的, 将背景杂波干扰程度分为 5 类: 很强、强、一般、弱、很弱。让具有足够先验知识的被测者对训练样本中的数据进行人工分类, 将人工分类的结果作为参考分类标准。

然后进行支持向量机训练, 采用 5 折交叉验证法计算最佳的支持向量机参数: 将所有训练样本随机分为 5 个子集, 每次将 4 个子集用于训练, 剩下的 1 个子集用于分类测试, 重复上述过程, 直到所有子集都参加了测试, 计算 5 次平均分类错误率, 选取平均分类错误率最小的参数 σ^2 为模型参数。训练结果如表 1 所示, 其中 C 为惩罚因子。最终选择 $\sigma^2 = 0.50$, $C = 1000$ 。

表 1 支持向量机的训练结果
Table 1 Training results of SVM

σ^2	Classification error rate / %			
	$C=1$	$C=10$	$C=100$	$C=1000$
0.25	8.9	7.3	6.2	4.8
0.50	7.2	6.3	4.7	3.2
1.00	11.3	10.7	8.5	7.4
2.00	15.2	13.4	12.5	10.1

4.2.3 成对比较判断矩阵的参数

成对比较判断矩阵 \mathbf{A} 的确定需要满足两个条件:

- 1) 相对权重与具有足够先验知识人的判别一致;
- 2) 满足一致性条件:

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} < 0.1, \quad (8)$$

式中 $C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, n 为 \mathbf{A} 的阶数, R_1 为一致性指标。

一般情况下 $n \leq 9$, R_1 的标准参考值如表 2 所示, 本文取 $n = 4$ 。

表 2 R_1 的标准参考值

Table 2 Standard reference values of R_1

n	R_1
1	0
2	0
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
/	/

具体实验方案如下:

采用 4 个基本特征模拟生成图像,以便于定量统计各个特征算子之间的相对权重。具体方法如下:固定 3 个特征,以 0.05 为步长调整第 4 个特征,模拟生成图像,共获得 4 个图像集。对于每个图像集采用支持向量机进行背景杂波干扰程度粗分类,获得 5 个子集。统计每个子集和每个特征的改变增量,将此作为该干扰程度下该特征的权重。最终得到 5 个成对比较矩阵 $A_1 \sim A_5$:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 9 \\ 0.5 & 1 & 2 & 2 \\ 0.33 & 0.5 & 1 & 2 \\ 0.11 & 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}, \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 7 \\ 0.5 & 1 & 2 & 3 \\ 0.33 & 0.5 & 1 & 2 \\ 0.16 & 0.33 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}, \\
 A_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 5 \\ 0.5 & 1 & 1 & 2 \\ 0.5 & 1 & 1 & 2 \\ 0.2 & 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}, \\
 A_4 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 4 \\ 1 & 1 & 2 & 2 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 2 \\ 0.25 & 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}, \\
 A_5 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 \\ 0.5 & 1 & 2 & 2 \\ 0.33 & 0.5 & 1 & 2 \\ 0.2 & 0.33 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

4.3 与主观判断对比实验

图 2 为两幅红外小目标图像,图 2(a)中有 3 个小目标位于海面杂波之中,图 2(b)中有 2 个目标位

于地面杂波之中。在局部区域大小为 7×7 和 9×9 的情况下,分别计算图 2(a),(b)中每个目标的本文方法得到的背景杂波强度(I),LSCR,归一化对比均值(NCM) n_{NCM} 以及方差加权信息熵^[9,10] (VWIE) n_{VWIE} ,结果如表 3 和表 4 所示。

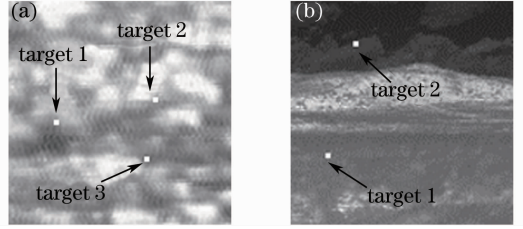


图 2 典型红外小目标图像。(a)海面背景图像, (b)地面背景图像

Fig. 2 Images of typical small infrared targets. (a) sea background image, (b) terrain background image

表 3 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 局部背景杂波的计算结果

Table 3 Calculated of $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ local background clutter results

Target	I	LSCR	NCM	VWIE
Target 1 in Fig. 2(a)	0.574	13.9	0.73	1357.2
Target 2 in Fig. 2(a)	0.789	6.83	0.39	2568.1
Target 3 in Fig. 2(a)	0.642	4.51	0.41	2782.9
Target 1 in Fig. 2(b)	0.326	41.4	0.61	690.1
Target 2 in Fig. 2(b)	0.391	23.9	0.87	700.3

表 4 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ 局部背景杂波的计算结果

Table 4 Calculated of $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ local background clutter results

Target	I	LSCR	NCM	VWIE
Target 1 in Fig. 2(a)	0.653	12.6	0.62	1957.2
Target 2 in Fig. 2(a)	0.894	5.25	0.28	2968.1
Target 3 in Fig. 2(a)	0.727	3.41	0.33	3782.9
Target 1 in Fig. 2(b)	0.287	30.2	0.47	692.1
Target 2 in Fig. 2(b)	0.372	19.2	0.75	770.3

LSCR 表示目标与背景杂波的对比,LSCR 越大表示背景杂波的强度越小;NCM 越大表示背景杂波的强度越小;VWIE 越大表示背景越复杂,即背景杂波强度越大。以下通过 2 个例子说明本文方法的有效性。

1) 图 2(a)的目标 2(target 2)和目标 3(target 3)

目标 3 与周围背景的反差要大于目标 2,则目标 3 的局部背景杂波强度应小于目标 2,因此,目标 2 与目标 3 正确的关系应该为

$$I(\text{target 2}) > I(\text{target 3})$$

$$n_{LSCR}(\text{target 2}) < n_{LSCR}(\text{target 3})$$

$$n_{NCM}(\text{target 2}) < n_{NCM}(\text{target 3})$$

$$n_{VWIE}(\text{target 2}) > n_{VWIE}(\text{target 3})$$

而表 3 和表 4 的数据表示:此时,LSCR 与

VWIE 的计算结果与实际情况不符。

2) 图 2(b) 的目标 1(target 1) 和目标 2(target 2)

目标 1 所在背景的灰度变化更为平缓, 因此, 目标 1 与目标 2 正确的关系应该为

$$I(\text{target 1}) < I(\text{target 2})$$

$$n_{\text{LSCR}}(\text{target 1}) > n_{\text{LSCR}}(\text{target 2})$$

$$n_{\text{NCM}}(\text{target 1}) > n_{\text{NCM}}(\text{target 2})$$

$$n_{\text{VWIE}}(\text{target 1}) < n_{\text{VWIE}}(\text{target 2})$$

而表 3 和表 4 的数据表示: 此时, NCM 的计算结果与实际情况不符。

4.4 基于局部背景杂波强度阈值的小目标检测

采用局部背景杂波强度作为阈值, 对小目标进行检测, 以比较不同背景杂波描述方法的性能。小目标检测算法框架如图 3 所示: 在背景抑制阶段, 采用文献[1]提出的红外背景抑制方法, 以抑制背景并增加目标信号的强度; 在预检测阶段采用背景杂波强度作为阈值, 实现单帧图像中的目标检测; 最后采用加权管道滤波和卡尔曼滤波的方法实现多帧图像中的目标确认和跟踪。

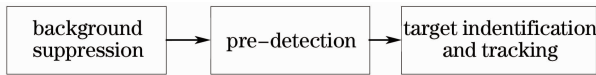


图 3 小目标检测算法框架

Fig. 3 Framework of small target detection algorithm

目标检测算法的性能采用受试者工作特征(ROC)曲线表示, ROC 曲线的横坐标表示算法的平均虚警数, 纵坐标表示算法的检测概率。在相同虚警数的情况下, 检测概率越高说明算法性能越好。分别采用本文提出的背景杂波强度计算方法 NCM, LSCR 以及 VWIE 作为目标检测阈值进行目标检测算法性能的测试。图 4 为分别采用 4 种背景杂波强度阈值的检测算法的 ROC 曲线。从图

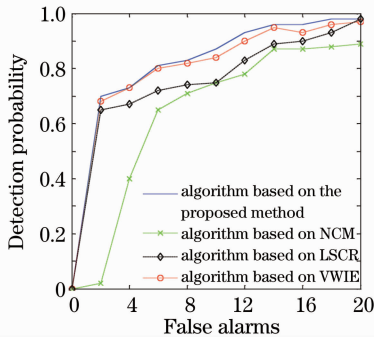


图 4 基于不同背景杂波描述子的小目标检测算法的 ROC 曲线

Fig. 4 ROC curves of small target detection algorithms based on different background clutter descriptors

中可以看出, 基于本文方法的目标检测算法性能优于其余 3 个算法, 因此, 本文方法是一种较为有效的背景杂波量化方法。

5 结 论

提出了一种有效的背景杂波量化方法, 该方法可以用于指导红外图像数据库的规划, 并且可以根据红外背景杂波干扰程度的不同, 选择相应的目标检测算法。

参 考 文 献

- Huang Kang, Mao Xia, Liang Xiaogeng. A novel background suppression algorithm for infrared images[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, **31**(6): 1239~1244
黄康, 毛峡, 梁晓庚. 一种新的红外背景抑制滤波算法[J]. *航空学报*, 2010, **31**(6): 1239~1244
- Huang Kang, Mao Xia. Detectability of infrared small targets [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2010, **53**(3): 208~217
- H. Chang, J. Zhang. New metrics for clutter affecting Human target acquisition [J]. *IEEE Transactions on Aero Space & Electronic System*, 2006, **42**(1): 361~368
- Gao Chenqiang, Tian Jinwen, Wang Peng *et al.*. Detection of infrared spot small targets against complex sky background by using GST [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Technol. (Natural Science Ed.)*, 2009, **31**(7): 10~13
高陈强, 田金文, 王鹏等. 复杂天空背景下基于 GST 的红外斑点小目标检测[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2009, **31**(7): 10~13
- Guo Wei, Zhao Yigong, Xie Zhenhua *et al.*. New method for cloud description and dim small infrared target detection based on nonparametric statistics [J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 2008, **27**(5): 383~388
郭伟, 赵亦工, 谢振华等. 基于非参数统计的云层背景描述与红外弱小目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(5): 383~388
- Wei Changan, Jiang Shouda. Infrared small target detection algorithm based on morphological reconstruction operator and tracking[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, **37**(4): 850~853
魏长安, 姜守达. 基于形态重构与跟踪的红外小目标检测算法[J]. *电子学报*, 2009, **37**(4): 850~853
- Zhu Jinbiao, Li Jianxun. Novel matching filter design and its application in dim point target detection in infrared image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2128~2133
朱金标, 李建勋. 匹配滤波器优化设计及在红外弱小点目标检测中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2128~2133
- Li Xin, Zhao Yigong, Chen Bing. A new approach of small and dim target detection in cloud clutter infrared image based on classification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3036~3042
李欣, 赵亦工, 陈冰. 基于分类的红外云层背景弱小目标检测方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3036~3042
- Yang Lei, Yang Jie, Zheng Zhonglong. Detecting infrared small targets based on adaptive local energy threshold under sea-sky complex backgrounds [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(1): 41~45
杨磊, 杨杰, 郑忠龙. 海空复杂背景下基于自适应局部能量阈值的红外弱小目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(1): 41~45
- L. Yang, Y. Zhou, J. Yang *et al.*. Variance WIE based infrared images processing[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(15): 857~859

- 11 Zhang Hui, Zhao Baojun, Tang Linbo *et al.*. Infrared object tracking based on adaptive multi-features integration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1291~1296
张 辉, 赵保军, 唐林波 等. 基于自适应多特征整合的红外目标跟踪 [J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1291~1296
- 12 Luo Huan, Wang Fang, Chen Zhongqi *et al.*. Infrared target detecting based on symmetrical displaced frame difference and optical flow estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1715~1720
罗 寰, 王 芳, 陈中起 等. 基于对称差分和光流估计的红外弱小目标检测 [J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1715~1720
- 13 Cao Qi, Bi Duyan. Characteristic-selecting filtering in infrared small target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2408~2412
曹 琦, 毕笃彦. 红外弱小目标检测中的特征选择性滤波方法 [J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2408~2412