

# 匹配滤波器优化设计及在红外弱小点 目标检测中的应用

朱金标 李建勋

(上海交通大学自动化系, 上海 200240)

**摘要** 针对红外传感器成像信噪比低且易受噪声、背景杂波干扰的问题,结合红外图像中点目标成像的特性,充分利用目标、背景杂波及噪声在空间域中的分布特性,进行空间匹配滤波器的优化设计。首先对红外点目标特性进行了分析,在此基础上进行一维匹配滤波器的优化设计,进而构建了优化设计的空间匹配滤波器。结合优化设计匹配滤波器、形态学背景抑制和自适应门限的红外弱小目标检测算法由于充分考虑了红外点目标的衍射效应和目标与背景的灰度差异,使滤波过程智能地融入了目标和背景的特性,极大地提高了红外弱小目标的检测性能。实测数据验证表明,本检测算法对低信噪比( $f_{\text{SNR}} \leq 2$ )的红外图像,在保证  $10^{-5}$  虚警概率前提下,检测概率不小于 95%。

**关键词** 图像处理; 匹配滤波器; 低信噪比; 点目标检测; 红外图像

中图分类号 TN911.73 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2128

## Novel Matching Filter Design and its Application on Dim Point Target Detection in Infrared Image

Zhu Jinbiao Li Jianxun

(Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** The characteristics of dim point target during infrared image acquisition is analyzed, aiming at detecting them under a very low signal-to-noise ratio (SNR) and strong background interferences. Based on spatial distributions of targets, background and noise, a novel spatial matching filter is proposed to raise SNR from original low level. This spatial matching filter is optimized from 1D version considering the diffraction effects of targets. Then a novel morphology is presented to reduce background and enhance target saliency. A threshold selection algorithm is adopted to extract dim point targets adaptively. In all three stages, diffraction effects of targets and intensity difference of targets with background are taken into account to improve detection performance. Experimental results prove that under a low SNR ( $\leq 2$ ), the successful detection rate of proposed method is over 95% with  $10^{-5}$  false detection rate.

**Key words** image processing; matching filter; low signal-to-noise ratio; infrared target detection; infrared image

### 1 引言

低信噪比的红外弱小目标检测一直是红外图像检测与处理研究中的热点和难题,已成为世界各国大力研发的一项高新技术<sup>[1, 2]</sup>。低信噪比条件下的

红外弱小目标实时检测与跟踪技术可实现扩展作用距离的目的。

对于光学成像目标检测系统,通常目标总是隐藏在强背景下。目标检测技术的关键就是进行背景

收稿日期: 2008-08-03; 收到修改稿日期: 2008-12-08

基金项目: 航空科学基金(20075157007)、航天支撑基金(2008-HT-SHJD003)、目标与环境光学特征重点实验室基金和教育部重大专项培育计划(706022)资助课题。

作者简介: 朱金标(1984—),男,硕士研究生,主要从事图象处理及计算机应用等方面的研究。

E-mail: jbzhu@sjtu.edu.cn

导师简介: 李建勋(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事智能信号与信息处理等方面的研究。

E-mail: lijx@sjtu.edu.cn (通信联系人)

估计和背景抑制。自然背景由于在成像时受物理规律的制约,在图像灰度空间分布上具有一定的相关性。文献[4]将它们假设为均值空间非平稳、方差缓变的高斯过程。文献[5]将它们假设为一阶马尔科夫过程。在这些假设前提下,学者们先后研究了不同的背景抑制技术。较为广泛的滤波器是高通滤波器<sup>[6]</sup>、匹配滤波器<sup>[7,8]</sup>和形态学滤波器<sup>[9]</sup>,以及它们的一些组和改进形式<sup>[10]</sup>。文献[11]利用三种高通模板实现了复杂背景下的红外点目标检测的预处理,对变化缓慢的背景抑制效果明显,但这三种高通模板没有考虑到红外点目标的空间分布特性,其处理效果在使用过程中表现出不稳定性。文献[12]设计了三维匹配滤波器,当假设的目标轨迹和真实目标轨迹一致时,输出信噪比最大,但必须预先知道目标、背景和光学传感器的特性。采用经典的形态学滤波方法<sup>[9]</sup>进行目标检测,其结果与高通滤波器相似,但在抑制噪声方面有一些优势。

低信噪比条件下,目标点极易被噪声所淹没,如何有效提高图像的信噪比以有利于目标的检测与跟踪就成为了一个关键。本文首先分析了红外图像中

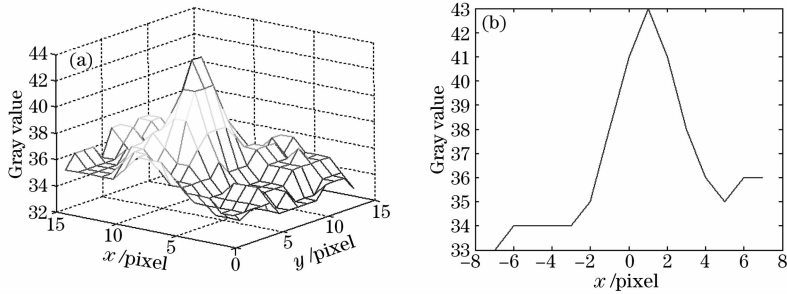


图1 目标的空间分布特性。(a) 目标的三维空间分布;(b) 目标的截面轮廓空间分布

Fig. 1 Spatial distribution characteristics of infrared point targets. (a) Spatial shape of targets; (b) vertical section of targets

红外线的波长比可见光长,因此红外光学系统在成像过程中的衍射效应很明显。在超视距条件下,红外目标成像为弥散斑,即艾里圆,其目标能量分布结构是已知的。在这种情况下,根据检测理论,采用匹配滤波器是最优的。

### 3 经典空间匹配滤波介绍及性能分析

匹配滤波的实质是要设计一个和图像感兴趣的图像信息或目标对象相关的滤波器,经过匹配滤波提高测量信息的信噪比,进而改善目标检测的性能,即空间匹配滤波器的最大信噪比的设计准则<sup>[15]</sup>。红外弱小目标检测的目标是提取被噪声淹没的点目标。

设输入图像为  $i(x, y)$ , 其中包括待识别目标和背景,这里的背景是广泛意义上的背景,包括大气、空中

点目标成像的特性<sup>[13]</sup>,并分析了经典二维匹配滤波器的设计准则及其性能易受噪声干扰的弊端,在此基础上,充分利用目标、背景杂波及噪声在空间域中的分布特性,提出了一种空间匹配滤波器的优化设计方法,达到提高信噪比的目的。结合优化设计的匹配滤波器、形态学背景抑制和自适应门限的检测算法由于更智能地融入了应用背景的特性,真实地感知背景,进行背景估计和检测,从而实现对低信噪比的弱小目标检测的良好检测性能。

## 2 红外图像中点目标的空间分布特性

理想情况下,点源经红外光学系统成像也是一个点。但是实际光学系统由于存在着像差以及光的衍射效应<sup>[14]</sup>,成像的目标点并非是一个几何点,而是一个亮的扩散圆斑,呈现为一个“凸包”,类似于二次曲线中的开口向下的椭圆抛物面。图1(a)为点目标的空间分布特性图,目标出现的位置表现出的是局部邻域内的突变,并且在所有的截面轮廓线均保持了这种突变特性,类似于一个开口向下的抛物线[如图1(b)所示]。

的云层、干扰点、传感器等的系统噪声、随机噪声等。待识别目标空间分布特性为  $t(x, y)$ , 其傅里叶频谱为  $T(u, v)$ ; 背景空间分布特性为  $b(x, y)$ , 其傅里叶频谱为  $B(u, v)$ 。并假定目标和背景不相关,即

$$i(x, y) = t(x, y) + b(x, y), \quad (1)$$

其傅里叶变换为  $I(u, v)$

$$I(u, v) = T(u, v) + B(u, v), \quad (2)$$

则由匹配滤波器光学相关识别的原理,匹配滤波输出图像为目标空间分布特性与输入图像空间分布特性的卷积

$$\mathcal{F}^{-1}[I(u, v)T^*(u, v)] = t(x, y) \otimes t(x, y) + b(x, y) \otimes t(x, y), \quad (3)$$

其中  $\otimes$  表示相关,  $T^*(u, v)$  为待识别目标的匹配滤波函数。

可以看出,当输入图像中含有背景噪声时,匹配滤波输出图像中不仅仅包括点目标的自相关,同时还伴随着目标与背景噪声的互相关。当红外图像中点目标的空间分布特性受到噪声的干扰,与点目标先验特性不相匹配时,经典的二维匹配滤波算法将无法实现提高信噪比的目的。

#### 4 匹配滤波器优化设计

空间匹配滤波器由于同时考虑到了点目标的空间分布和背景噪声的特性,利用先验的点目标空间分布特性与红外图像作卷积,当先验点目标与红外图像中待检测的点目标相匹配时,理论上能够极大地提高图像信噪比。但是,在复杂背景条件下,实际的红外图像中存在强烈噪声的影响,点目标的空间分布特性受到噪声干扰会发生一些改变,利用经典的空间匹配滤波器进行处理性能将迅速下降,往往不能有效地提高信噪比,严重影响目标检测的性能,往往难以达到预期的效果。鉴于此,提出了一种空间匹配滤波器的优化设计方法。

空间匹配滤波器优化设计旨在用多重一维匹配滤波器去拟合二维匹配滤波器的滤波性能。在分析

红外点目标的分布特性的基础上,根据目标、背景、噪声之间形态上的差异,以及点目标成像的空间分布在各个方向的截面轮廓线上均保持了在目标出现位置的局部邻域内突变的特征;同时,充分考虑到噪声干扰的随机性和局部突变性,噪声破坏只可能是目标出现位置二维分布中的某一个方向上的分布特性,通过优化设计的匹配滤波器综合的多重一维匹配滤波结果能够有效地平衡目标分布特性在某一方向上受到的干扰。

结合前面所讨论的红外图像点目标的空间分布特性,根据应用背景选取适当大小的窗口模板,并将二维窗口模板充分分解为若干个一维窗口,分解具有完备性。选取的窗口模板大小不同,分解的一维窗口的个数和包含的像素点的个数也不同。窗口越大,分解的一维窗口越多,一维窗口包含的像素点的个数也越多。在此,主要考虑红外图像中弱小点目标成像的检测,弱小点目标在图像中仅占据一个像素点大小,通常选取  $3 \times 3$  的窗口模板,其分解示意图如图 2 所示。每个一维窗口是以当前像素为中心,令其位置为  $(x, y)$ ,其灰度值为  $f(x, y)$ ;令四个方向的定义域分别为  $D_1, D_2, D_3, D_4$ 。

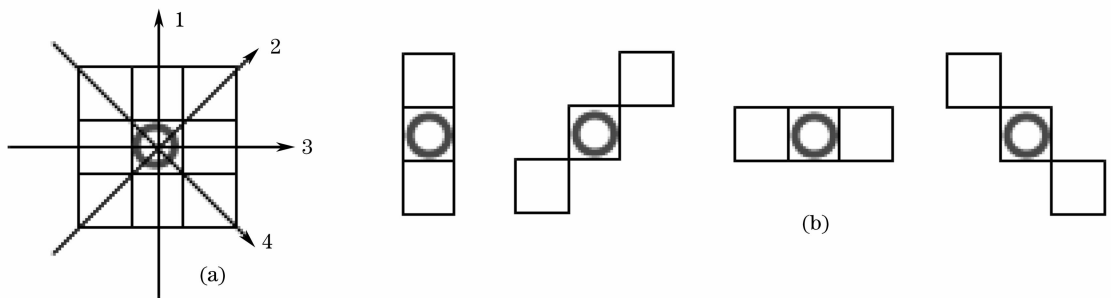


图 2  $3 \times 3$  窗口分解示意图。(a) 四个不同的方向; (b)  $3 \times 3$  窗口分解的一维窗口

Fig. 2 Example of window decomposition. (a) Four different directions for  $3 \times 3$  window; (b) one-dimensional structure decomposed from  $3 \times 3$  window

优化设计的匹配滤波器在每一个一维窗口中,分别用先验的点目标的一维分布特性对其进行卷积,即进行一维匹配滤波处理:

$$y(k) = g(k) * h(k) = \sum_{j=0}^{N-1} g(j)h(k-j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [G(n)H(n)] \exp(2\pi ink/N), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中  $g(k)$  为实际目标的分布特性,  $G(n)$  为  $g(k)$  的离散傅里叶变换;  $h(k)$  为先验目标的分布特性,  $H(n)$  为  $h(k)$  的离散傅里叶变换;  $y(k)$  为离散卷积结果。

结合点目标的空间分布特性,图 3(a)示出了先验的空间点目标的轮廓截面图,目标出现位置局部区域内突变,形成一个类似于抛物线的形状,图 3(b)为实际图像中点目标分解的一个一维窗口。为了消除光照强度引起的背景灰度值大小的整体影响,在进行卷积之前,截面轮廓图和分解的一维窗口分布均进行了“归零化”处理,即将一维分布中的最小值归为零,只保留截面轮廓和分解窗口的“凸包”特性。图 3(c)为匹配结果,其中实线为先验目标与实际目标的卷积结果,点划线为先验目标与背景的卷积结果,由此可见,卷积结果明显地分辨出了目标和背景的空间分布特性,准确地定位出了目标出现的位置。

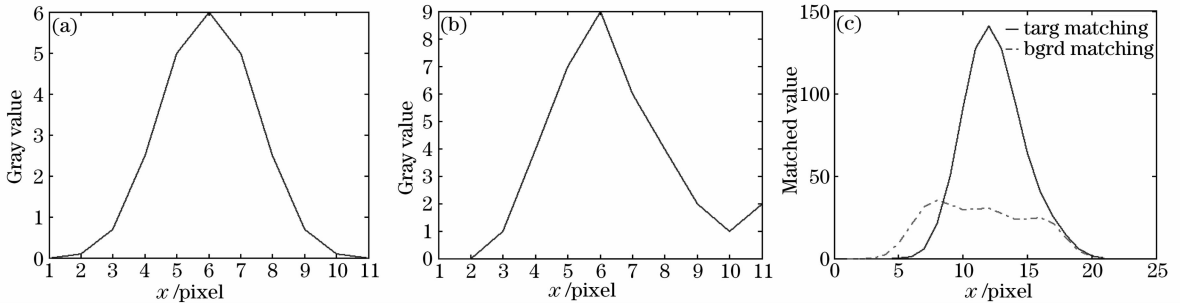


图 3 一维匹配滤波。(a)先验目标分布；(b)实际目标分布；(c)匹配结果

Fig. 3 One-dimensional spatial matching filtering. (a) Prior spatial distribution characteristics of point targets; (b) true spatial distribution characteristics of point targets; (c) matching filtering result

分别获取不同方向一维窗口卷积结果定义域中心点的峰值。定义优化设计的匹配滤波结果为各个方向一维窗口匹配的峰值的均值,即

$$F(x, y) = f(x, y) + \frac{1}{N} \sum_{i=1,2,\dots,N} \text{medPeak}[g_i(n) * h(n)], \quad (5)$$

式中,函数 medPeak()表示取值定义域中心点的

值;  $g_i(m)$  表示  $i$  方向分解的一维窗口,其定义域为  $D_i$ ;  $h(n)$  表示先验的点目标的一维分布特性,  $N$  为分解的一维窗口的数目。

对整幅图像逐像素进行处理。相比原始图像,经过优化设计的匹配滤波处理后目标信号大大增强。滤波前后图像的空间分布特性对比可以清楚地显示目标位置灰度值的增强,如图 4 所示。

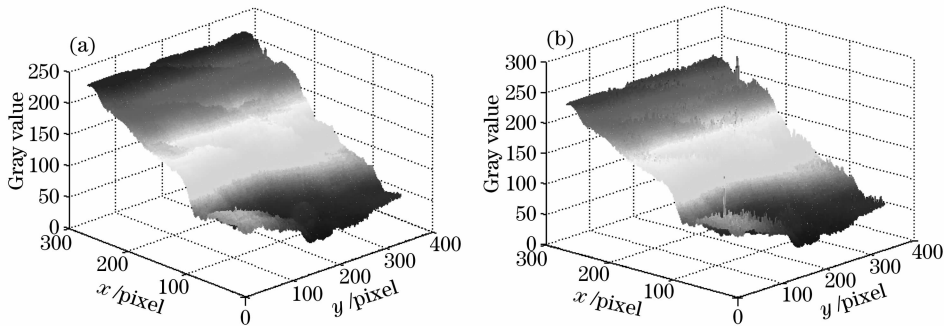


图 4 滤波前后图像空间分布特性。(a)滤波前图像空间分布特性；(b)滤波后图像空间分布特性

Fig. 4 Comparison of spatial distribution characteristics before and after filtering. (a) Before filtering; (b) after filtering

### 5 实验仿真与分析

实验中采用法国 Sofradir 中波热成像仪采集到的  $320 \times 240, 6733$  帧 8 位真实红外对空序列图像,截取其中的 1000 帧低信噪比图像验证。

选取  $1 \times 1$  目标像素的红外图像,计算图像信噪比约为 1.6,属于典型的低信噪比条件下的弱小目

标检测问题。如图 5(a)为红外原始图像,此时目标完全淹没在了杂波噪声中。图 5(b)为原始图像的空间分布特征图,可以看到在目标位置目标与背景灰度差异很小。图 5(c)为经过经典空间匹配滤波器处理后的图像的空间分布特性,可以看到因为原始图像遭噪声干扰的影响,经过匹配后目标点的位

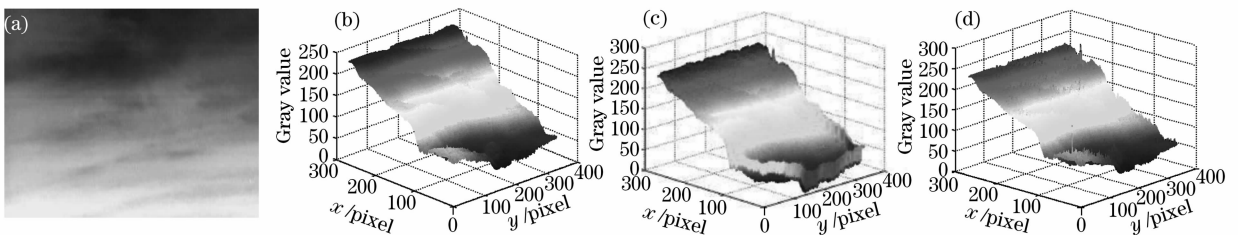


图 5 滤波前后图像及空间分布特性

Fig. 5 Comparison images of spatial distribution characteristics before and after filtering

置并没有完全体现出优势。图 5(d)为经过优化设计的空间匹配滤波后的图像的空间分布特性图,可以看到目标位置灰度值得到明显提升,目标的位置像素值被提升到已经隐约可见。

Test 1: 不同匹配滤波器滤波信噪比增益对比不同信噪比(SNR)的点目标图像进行对比实验,定义信噪比:

$$f_{\text{SNR}} = (s - u) / \sigma,$$

式中  $s$  为目标信号幅度,  $u$  为图像背景灰度均值,  $\sigma$  为图像背景灰度标准差。实验结果如表 1 所示。

表 1 匹配滤波前后图像信噪比对比表

Table 1 Comparison table of SNR variation before and after matching filtering

Original image	Traditional matching filtering image	Proposed matched filtering image
$f_{\text{SNR}}$	1.5	5.31
	2.88	5.14
2.0	3.92	5.96
	4.13	6.55

由此可见,在原始图像中目标的二维空间分布特性遭噪声干扰,发生局部改变时,经典的二维空间匹配滤波并不能有效地提高图像的信噪比,而采用本文提出的空间匹配滤波处理能有效地提高点目标图像的信噪比。

Test 2: 匹配滤波器优化设计在红外弱小目标

检测中的应用

在低信噪比条件下的红外图像目标检测,点目标常常淹没在复杂的起伏背景中,极易受到干扰噪声的影响,在与背景的灰度值相对差上并没有相对明显的优势,在进行目标检测前,一般需要对图像进行预处理,以提高图像的信噪比,抑制噪声。在此基础上,利用形态学滤波器进行背景自适应感知和抑制,当背景被很好地抑制后,则红外弱小目标检测问题就转变为噪声中的点目标检测问题,引入自适应门限方法对背景抑制后的图像进行自适应门限分割,便可以获取目标点。

对 1000 幅不同信噪比的图像分两种方式进行单帧滤波处理比较,方式(1)图像预处理采用经典空间滤波处理;方式(2)预处理采用采用本文提出的空间匹配滤波提高图像信噪比。滤波处理后图像如图 7 所示,原始图像中箭头指向的位置为真实目标所在位置,滤波结果图像中检测候选目标用一黑框加以标注。实验结果如表 2 所示(虚警概率为  $10^{-5}$ )。

表 2 空间匹配滤波优化设计对检测性能影响对比表

Table 2 Comparison of detection probability between traditional and proposed matching filters

$f_{\text{SNR}}$	Test 1	Test 2
1.5	90%	95%
2	94%	98%
5	100%	100%



图 7 匹配滤波器设计对红外弱小目标检测性能的影响。(a) 原始图像;(b) 经典空间匹配滤波;(c) 优化设计空间匹配滤波

Fig. 7 Application of proposed matching filter on detection of dim infrared targets. (a) Original image;

(b) traditional matching filter; (c) proposed matching filter

由此可见,就单帧检测来说,经典空间匹配滤波图像预处理与优化设计的空间匹配滤波处理对于信噪比较高的点目标检测效果差别不大,但是对于信噪比较低的弱小点目标检测效果却有着明显的差别。

## 6 结 论

结合红外图像中点目标成像的特性,充分利用目标、背景杂波及噪声在空间域中的分布特性,提出了一种空间匹配滤波的优化设计算法。将其应用于

低信噪比的真实红外点目标图像,有效地提高了图像的信噪比。实验结果表明,本文提出的结合优化设计的匹配滤波、形态学背景抑制和自适应门限的检测算法对低信噪比条件的弱小目标具有良好的检测性能。

## 参 考 文 献

- 1 Alex Lipchen Chan, Sandor Z. Der, Nasser M. Nasrabadi. Multistage infrared target detection [J]. *Opt. Eng.*, 2003, 42(9): 2746~2754

- 2 Lei Yang, Jie Yang. Detection of small targets with adaptive binarization threshold in infrared video sequences[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 152~154
- 3 S. D. Blostein, T. S. Huang. Detecting small, moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, **39**(7): 1611~1629
- 4 Liu Delian, Zhang Jianqi, He Guojing. Target detection for remote sensing image based on Gaussian transformation of background[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 638~642  
刘德连, 张建奇, 何国经. 背景高斯化的遥感图像目标检测[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 638~642
- 5 Fu Zhizhong. Moving Target Detection and Tracking Technology of Infrared Rosette Scan Imaging and Its DSP Real-Time Realization[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2002  
傅志中. 红外扫描成像动目标检测跟踪技术与 DSP 实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2002
- 6 Xu Ying. Small moving target detection in infrared image sequences[J]. *Infrared Technology*, 2002, **24**(6): 27~30  
徐英. 红外图像序列中运动弱小目标检测的方法研究[J]. *红外技术*, 2002, **24**(6): 27~30
- 7 Markus Mueller. Saliency measures in cluttered IR images for ATR[C]. *SPIE*, 2003, **3699**: 150~154
- 8 L. L. Scharf, B. Friedlander. Matched subspace detectors[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, **42**(8): 2146~2157
- 9 Yonggwan Won, Gader P D, Coffield P C. Morphological shared-weight networks with applications to automatic target recognition [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1997, **8**(5): 1195~1203
- 10 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixia. 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. 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 Han Kesong. The pretreatment for detecting infrared point targets under complex background[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, **22**(1): 52~54  
韩客松. 复杂背景下红外点目标检测的预处理[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, **22**(1): 52~54
- 12 I. S. Reed, R. M. Gagliardi, L. B. Stotts. Optical moving target detection with 3-D matched filtering [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, **24**(4): 327~336
- 13 Li Qi, Dong Guofeng, Wang Qi. Object classification simulation for lidar-passive-infrared imaging combination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1347~1352  
李琦, 董国峰, 王骥. 用于激光成像雷达和被动红外成像复合的目标分类仿真[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1347~1352
- 14 Li Junchang, Li Tianying. Real-time measurement of power density distribution of a high power infrared laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **22**(3): 209~213  
李俊昌, 李天婴. 大功率红外激光功率密度分布的实时检测[J]. *中国激光*, 1995, **22**(3): 209~213
- 15 Bo Liang, Weibiao Chen. Diversity reception and equalization techniques for laser communication in space [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 197~200