

文章编号 1674-2915(2013)01-0073-07

# 光子成像静止点目标的管道滤波探测方法

黄宇, 张晓芳, 俞信\*  
(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 构建了具有单光子成像能力的光子成像系统, 提出应用管道滤波方法实现对光子受限静止点目标的探测。分析了光子图像静止点目标与点状噪声特征, 根据静止点目标在序列图像中位置的确定性以及噪声点的不相关性, 研究了基于管道滤波的光子成像静止点目标探测方法。为降低目标探测的虚警概率, 优化了管道滤波直径。以实验采集得到的多组光子图像序列为样本, 获得了探测概率、虚警概率与信号光子数、噪声光子数、管道长度以及检测阈值的关系。检测结果显示, 对信号与噪声的平均发生率为 0.4 和 5.215 的序列图像, 当管道长度为 9、检测阈值为 2 时, 探测概率达 0.9 以上且虚警概率 < 0.08。对比多组图像序列的检测结果表明, 影响探测概率的主要参数是信号光子数, 而影响虚警概率的主要参数是噪声光子数。

**关键词:** 光子成像; 静止点目标; 目标探测; 管道滤波

**中图分类号:** TP391; O431.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20130601.0073

## Pipeline filtering detection of stationary point targets in photon images

HUANG Yu, ZHANG Xiao-fang, YU Xin\*

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: yuxin@bit.edu.cn

**Abstract:** A photon imaging system with single photon detecting and imaging capabilities is constructed and a detection method based on pipeline filtering is proposed to detect the stationary point target under a photon limited condition. The stationary point target detection method based on pipeline filtering is studied on the characteristics of position and noise for stationary point targets in photon images. The diameter of pipeline filter is optimized to reduce the false alarm rate. The relationships of detection performance with the number of signal photons and noise photons, the pipeline length and the detection threshold are explored through photon image sequences. For the image sequence with the average incidences of signal and noise of 0.4 and 5.215 respectively, the detection rate can be more than 0.9 and the false alarm rate less than 0.08 when the pipeline length is 9 and detection threshold is 2. The conclusion from experimental results is that the detection rate is mainly affected by the number of signal photons and the false alarm rate is dependent on the number of noise

收稿日期: 2012-09-16; 修订日期: 2012-11-16

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2009CB72400601)

photons.

**Key words:** photon imaging; stationary point target; target detection; pipeline filtering

## 1 引言

由于具有超高的探测灵敏度,光子成像在天文观测<sup>[1]</sup>、三维激光雷达成像<sup>[2]</sup>、生物超微弱发光<sup>[3]</sup>等领域具有广泛的应用。研究基于光子成像的点目标探测技术,对提高系统的探测能力有着重要的意义。

在光子成像中,超微弱的光信号更多地呈现出粒子特性,同时伴随着随机的量子涨落,这种粒子性和随机性在成像系统中形成了与图像信息相关的离散信号,与普通光照条件下的成像有较大区别,因此是光子成像研究中备受关注的课题。

关于光子受限下静止点目标的探测方法,国内外的学者已做过一些研究。在研究生物体超微弱发光现象中,陈天明<sup>[4]</sup>、马瑜<sup>[5]</sup>采取了数理统计的方法,利用信号与噪声统计分布性质的不同,将探测生物超微弱发光所得到的光子图像划分为信号区域和噪声区域,仅保留信号区域内的光子点,从而滤除了光子图像中的噪声点。由于该方法仅能去除噪声区域内的噪声点,保留了信号区域内的噪声点,且最终只能确定信号所在的区域,

无法得到信号点的具体位置,因此,其探测能力受到了限制。赵磊<sup>[6]</sup>在 AhmadAbu-Naser<sup>[7]</sup>的工作基础上,将改进的广义似然比检测(GLRT)算法应用到光子图像静止点目标的探测研究中,根据散粒状光子图像在空间上服从泊松分布的特点,推导出了目标检测的检验器公式,在强噪声背景中检测出了点目标,但该方法无法解决检验器阈值获取、降低算法复杂度等问题。

在借鉴了红外图像弱小目标探测方法的基础上,本文研究了基于管道滤波的光子图像静止点目标探测方法。根据光子图像中信号与噪声的特点,对管道滤波参数进行了优化,在保持较高探测概率的同时,降低了探测的虚警率。本文仅讨论成像视场中只有一个光子受限静止点目标的探测问题,未考虑存在多个点目标的情况。

## 2 光子成像系统

为了研究光子受限下静止点目标的探测方法,搭建了具有单光子成像能力的光子成像实验系统,结构如图1所示。

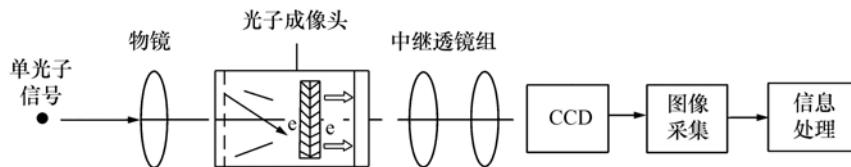


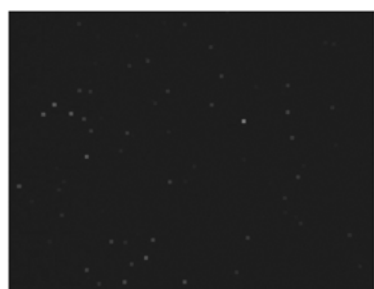
图1 光子成像系统结构示意图

Fig.1 Framework diagram of photon imaging system

该系统中起信号放大作用的核心器件是光子成像头,内部关键装置是两级微通道板(Micro-Channel Plate, MCP)。MCP为聚集了上百万个细微的平行纤维通道的薄圆片,每个纤维通道相当于一个光电倍增管,放大倍数可达 $10^7$ 。由于MCP上各通道之间相互隔绝,因此,在将光电子放大过程中,能够保持光电子的空间位置信息不会丢失,具有较好的空间分辨率和时间分辨率。为了消除外界环境光的影响,从单光子信号至

CCD部分的实验器件被放置在一个大暗箱中。由该实验系统采集的光子图像如图2(a)所示。从光子成像的本质来看,在一个曝光周期内,光子图像上的一个像素点仅可能是“接收到一个光子”或“无光子出现”两种情况,因此光子图像本质上为二值图像。经阈值处理<sup>[8]</sup>后得到的二值图像如图2(b)所示,为了使图像中的曝光点更清晰,将曝光点进行了膨胀<sup>[9]</sup>处理。

从图2(b)可以看出,在一帧光子图像中,点



(a) 原始光子图像  
(a) Original photon image



(b) 阈值处理后的光子图像  
(b) Photon image after threshold processing

图2 光子图像的预处理

Fig. 2 Preprocessing of photon image

状噪声与信号光子所形成的曝光点在性状、位置等特征上没有任何差异,且缺少点目标的先验知识,无法在单帧光子图像中完成信号与噪声的甄别任务。因此,必须在序列光子图像中研究光子受限静止点目标的探测方法。信号点与噪声点的最大区别在于:噪声点在图像中出现的位置和时间都具有极强的随机性,且散布于整幅图像;而静止信号点在图像中的初始位置虽然不能预先得到,但在序列图像中,其只可能出现在一个较小的区域范围内。因此,可利用信号与噪声的这种差异,利用管道滤波法在序列图像中检测出真实的信号点目标。

为了定量说明光子图像中信号与噪声的强度,这里引入光子图像信噪比的概念。借鉴了文献[10]中光子数信噪比公式的形式,定义信噪比公式为:

$$\text{SNR} = \bar{n}_{\text{signal}} / (\bar{n}_{\text{noise}} + \sqrt{\bar{n}_{\text{signal}}}), \quad (1)$$

式中,  $\bar{n}_{\text{signal}}$ ,  $\bar{n}_{\text{noise}}$  分别为序列光子图像中信号点数

与噪声点数的均值。

### 3 管道滤波法

在二值光子图像序列中,曝光点因灰度高于阈值被赋值为“1”,这些曝光点中至多有一个为真实的信号点目标,也可能全部为噪声点,而大部分暗背景像素点因灰度值低于阈值被赋值为“0”。为了检测出静止的信号点目标,利用信号点目标在序列图像中仅可能出现在一个较小的区域内且具有一定连续性的特点,将二值图像序列推入流水线结构,利用管道滤波的方法来进行检测。

#### 3.1 流水线结构

流水线结构<sup>[11]</sup>是由  $N$  帧图像组成的一个先进先出阵列结构,如图3所示。其更新方法是:每经过一个图像帧周期,图像序列就在流水线结构中沿序列轴依次向前推进一帧,然后从尾部推进一帧,并将头部的一帧删除,从而保持流水线结构内的图像序列帧总数不变。流水线结构每次更新后,采用管道滤波方法来检测信号点目标。

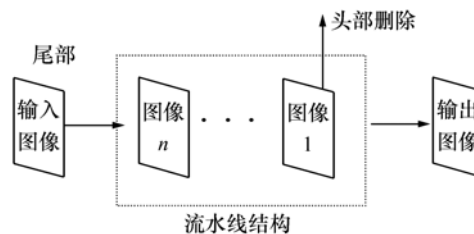


图 流水线结构示意图

Fig. 3 Framework diagram of pipeline structure

#### 3.2 管道滤波法

管道滤波<sup>[12-15]</sup>是一种较为常用的多帧相关检测方法,其理论基础是目标的准连续性和随机噪声的不相关性。在序列图像的空间位置上以目标为中心建立一个空间管道(一般为圆形,直径为  $a$ ),如图4所示,管道的直径代表了空间的作用范围,管道的长度(对应着管道内图像序列的帧数)代表了检测的时间长度。假设检测时间对应图像的帧数为  $N$ ,若在  $N$  帧图像中同一个管道内有  $m$  ( $m \leq N$ ) 帧检测到了曝光点,则认为此管道内存在信号,保留管道内的曝光点不变,否则即

认为管道内仅含有噪声,并将流水线结构中该管道内的所有像素点置零。这样就可以将信号点提取出来,从而极大地抑制了噪声。

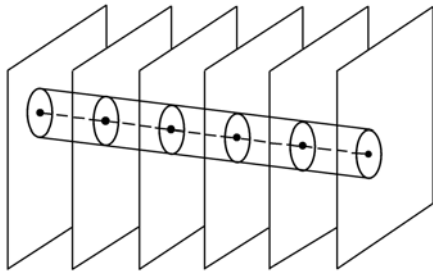


图4 管道滤波示意图

Fig. 4 Framework diagram of pipeline filtering

### 3.3 改进的管道滤波法

光子图像中的微弱点目标与普通二值序列图像中的点目标的显著区别在于点目标信号在序列图像中的缺失情况非常严重,因此,管道滤波的长度  $N$  通常需大于普通灰度图像和红外图像中所取的长度,且检测阈值  $m$  要比  $N$  小得多。

经管道滤波后,少量噪声点因相互之间的相关性较强,处于同一个检测管道内,而误作为信号点被保留了下来,使得检测的虚警概率增大。当噪声强度增大时,这种情况就愈加突出。因此,为

了降低虚警率,在应用管道滤波法通过前  $K$  帧序列图像获得静止点目标的位置后,可根据该位置信息,剔除位置偏离较大的虚假目标点。本文的实验研究中,位置偏离的判定阈值取为管道直径的2倍,这样既可剔除大量的虚假目标点,又可减小因前  $K$  帧图像探测点目标初始位置不准确而漏检真实目标点,增强探测方法的适应性。

## 4 实验结果

利用管道滤波方法探测光子图像中的静止点目标时,探测性能与管道的参数(主要是管道长度  $N$  和检测阈值  $m$ )以及点目标信号光子数、噪声光子数等都有直接关系,需进行详细分析。为此,在多种实验条件下,各采集了200 frame 连续的光子图像,每组序列图像的实验条件、信号光子数、噪声光子数以及信号、噪声的平均发生率等参数如表1所示。实验中保持光子成像头的增益不变,调整光子成像头的温度和信号光源的强度,得到了信号光子数和噪声光子数不同的光子图像序列。其中的平均发生率由信号/噪声光子数除以图像序列总帧数(200 frame)所得到,即式(1)中的  $\bar{n}_{\text{signal}}, \bar{n}_{\text{noise}}$ 。

表1 静止点目标探测的光子图像序列

Tab. 1 Photon image sequences of stationary point target

	光子成像头温度/ $^{\circ}\text{C}$	信号光子数(平均发生率)	噪声光子数(平均发生率)	信噪比
序列一	18	80(0.40)	1 043(5.215)	0.068 4
序列二	10	80(0.40)	296(1.48)	0.189 4
序列三	0	94(0.47)	108(0.54)	0.383 5
序列四	-10	45(0.225)	55(0.275)	0.300 3

在实验过程中,为了数据处理的方便,将管道的形状取为正方形,考虑到曝光点本身的大小以及曝光点中心位置的跳跃性,正方形管道大小取  $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ 。由于全图像大小为  $480 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$ ,该正方形管道仅占全图像非常小的区域,因此,可认为噪声点在该区域出现的几率很小。将管道滤波的长度  $N$  从5 frame 取到15 frame,并调整检测阈值  $m$  分别为2,3,4,得到的探测概率与虚警概率分别如图5~图8中的

(a)、(b)所示。

从图5~图8中可以看出,当检测阈值  $m$  一定时,探测概率和虚警概率都随着管道长度  $N$  的增加而增大;对于同一管道长度  $N$ ,探测概率和虚警概率都随着检测阈值  $m$  的增大而减小。这是比较容易理解的,因为管道越长,处于同一管道内的信号光子数与噪声光子数就可能越多,在同一检测阈值  $m$  下,也就更容易通过管道的阈值检测而被保留下来。

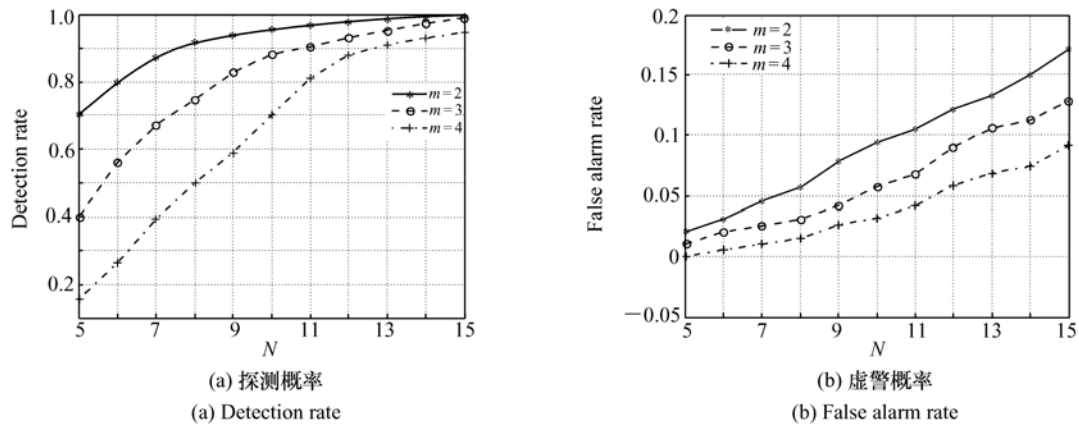


图 5 “图像序列一”的管道滤波检测结果

Fig. 5 Pipeline filtering detection results of the first image sequence

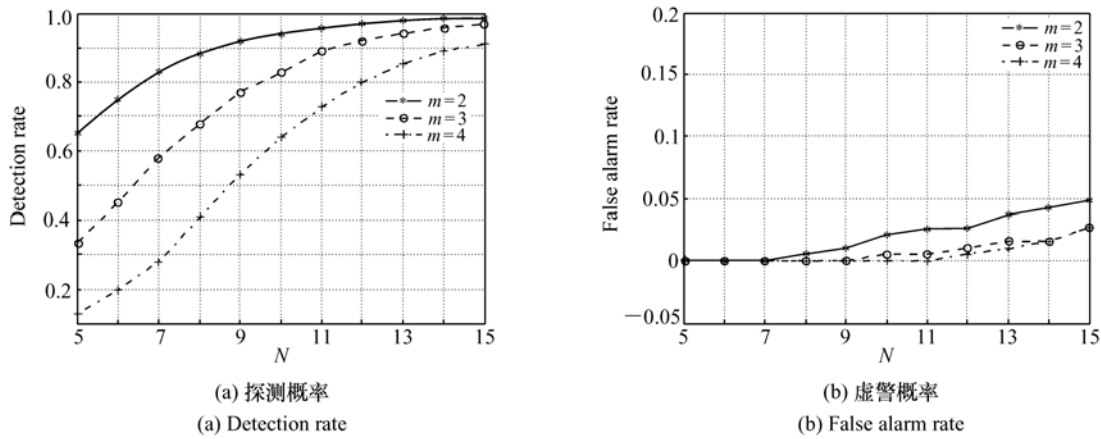


图 6 “图像序列二”的管道滤波检测结果

Fig. 6 Pipeline filtering detection results of the second image sequence

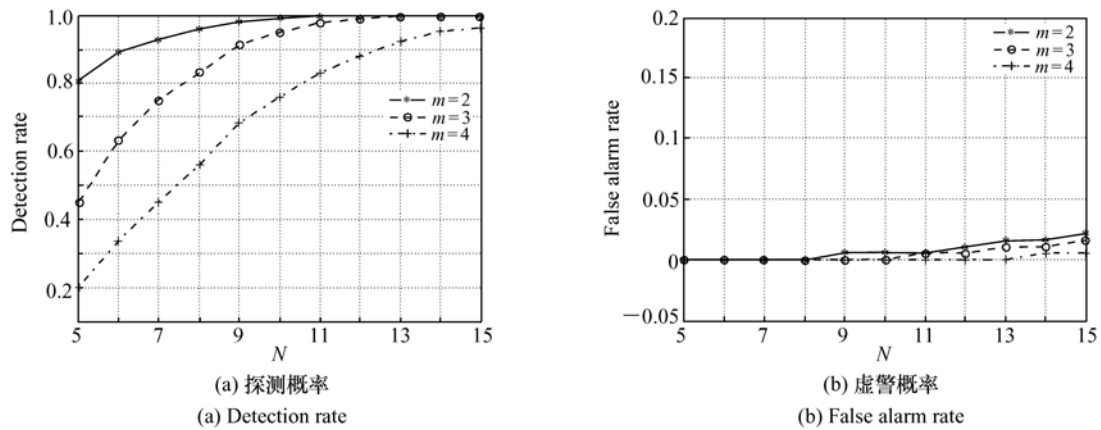


图 7 “图像序列三”的管道滤波检测结果

Fig. 7 Pipeline filtering detection results of the third image sequence

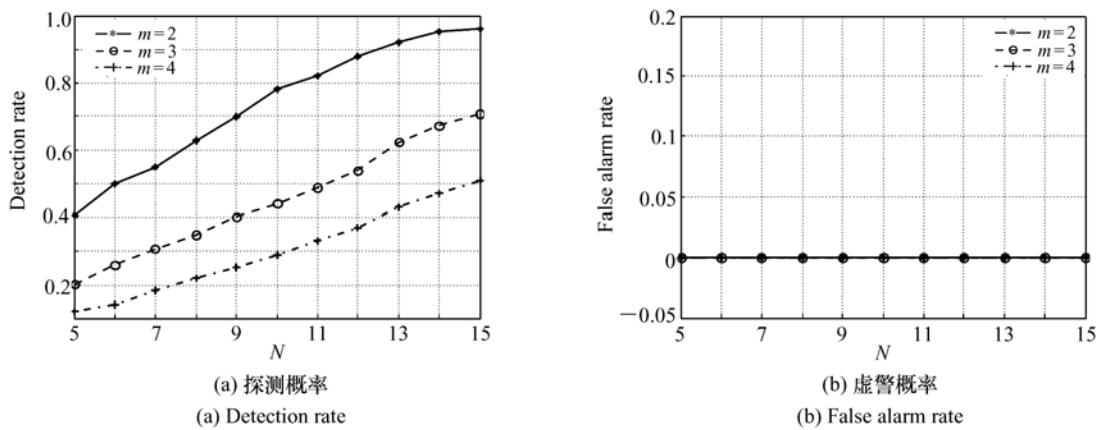


图8 “图像序列四”的管道滤波检测结果

Fig. 8 Pipeline filtering detection results of the fourth image sequence

以“图像序列一”探测结果为例,其信号与噪声的平均发生率分别为 0.4 和 5.215,选取管道滤波长度为 9、检测阈值为 2 时,探测概率在 0.9 以上,而虚警概率  $< 0.08$ ,说明了所提出的基于管道滤波光子受限静止点目标探测方法的有效性。

比较图 5 ~ 图 8 的结果还可以发现,“序列一”与“序列二”中的信号光子数相同,在管道长度与检测阈值一定时,其探测概率也基本相等;“序列三”中的信号光子数多于“序列一”,其对应的探测概率高于“序列一”,而“序列四”中的信号光子数比“序列一”少,对应的探测概率也相对较低。同样,从“序列一”至“序列四”,随着噪声光子数的减少,虚警概率也对应地逐渐降低。

#### 参考文献:

- [1] 姜崇国,何妙婵,郑向明. 可门控单光子探测器在天文观测中的应用[J]. 光电子技术与信息,2011,14(4):35-38.  
JIANG CH G, HE M CH, ZHENG X M. The application of the gateable single photon detectors in astronomical observation [J]. *Optoelectronic Technol. Information*, 2011, 14(4): 35-38. (in Chinese)
- [2] MIN S O, HONG J K, TAE H K, *et al.*. Development and analysis of a photon-counting three-dimensional imaging laser detection and ranging (LADAR) system[J]. *J. Opt. Soc. AM. A*, 2011, 28(5): 7591765.
- [3] 赵菲菲,赵宝升,刘永安,等. 感应读出方式紫外光子计数成像技术的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(9): 6306-6311.  
ZHAO F F, ZHAO B SH, LIU Y A, *et al.*. Study of ultraviolet photon counting imaging technology based on induction readout[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(9): 6306-6311. (in Chinese)
- [4] 陈天明,王苏生,俞信. 光子图像统计处理的计算机模拟[J]. 光电工程, 1997, 24(3): 26-32.  
CHEN T M, WANG S SH, YU X. Computer simulation of statistical processing for photon images [J]. *Opto-Electronic Eng.*, 1997, 24(3): 26-32. (in Chinese)
- [5] 马瑜,俞信. 光子图像统计处理[J]. 光学学报, 2002, 22(4): 422-426.  
MA Y, YU X. The statistic processing of photon image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4): 422-426. (in Chinese)
- [6] 赵磊,俞信,陈翼男,等. 光子图像中基于广义似然比检验的目标探测方法[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 91-96.

## 5 结 论

本文研究了利用管道滤波方法探测光子图像中静止点目标的性能。对所采用的目标探测方法进行了多组实验研究,对比分析了探测方法的性能与信号光子数、噪声光子数、管道长度、检测阈值之间的关系,得到了影响探测概率的主要参数是信号光子数,影响虚警概率的主要参数是噪声光子数的重要结论。该探测方法避免了复杂的数学计算过程,实验结果验证该方法简单、有效,具有较强的实用性。

- ZHAO L, YU X, CHEN Y N, *et al.*. Object detection method based on generalized likelihood ratio tests method in photon images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1):91-96. (in Chinese)
- [7] ABU-NASER A, GALATSANOS N P, WERNICK M N. Generalized likelihood ratio test based algorithms for object recognition in photon-limited images [C]//IEEE International Conference on Image Processing, Sept 11-14, 2005, Chicago, USA, 2005, (3):525-528.
- [8] 黄宇, 张晓芳, 俞信. 光子成像系统信号与噪声的统计特性分析[J]. *光学技术*, 2012, 38(3):340-344.  
HUANG Y, ZHANG X F, YU X. Statistical property analyses of signal and noise in photon imaging system[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(3):340-344. (in Chinese)
- [9] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. *Digital Image Processing Using MATLAB*[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [10] 王学伟, 王春歆, 张玉叶. 点目标图像信噪比计算方法[J]. *电光与控制*, 2010, 17(1):18-21.  
WANG X W, WANG CH X, ZHANG Y Y. Research on SNR of point target image[J]. *Electronics Optics Control*, 2010, 17(1):18-21. (in Chinese)
- [11] 彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. *电子学报*, 1999, 27(12):47-52.  
PENG J X, ZHOU W L. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(12):47-52. (in Chinese)
- [12] 周花. 一种空背景下红外弱小目标检测算法[J]. *西安邮电学院学报*, 2010, 15(3):116-118.  
ZHOU H. Detection algorithm of infrared weak targets in the sky background image[J]. *J. Xi'an University Posts and Telecommunications*, 2010, 15(3):116-118. (in Chinese)
- [13] 刘刚, 梁晓庚. 基于小波变换和管道滤波的红外空中小目标检测[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(30):198-201.  
LIU G, LIANG X G. Detection of aerial small target in infrared image based on wavelet transform and pipeline filter[J]. *Computer Eng. Appl.*, 2011, 47(30):198-201. (in Chinese)
- [14] 刘伟宁. 基于小波域扩散滤波的弱小目标检测[J]. *中国光学*, 2011, 4(5):503-508.  
LIU W N. Dim target detection based on wavelet field diffusion filter[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5):503-508. (in Chinese)
- [15] 靳永亮, 王延杰, 刘艳滢, 等. 红外弱小目标的分割预检测[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1):171-178.  
JIN Y L, WANG Y J, LIU Y Y, *et al.* Pre-detection method for small infrared target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1):171-178. (in Chinese)

#### 作者简介:



黄宇(1983—),男,湖北随州人,博士研究生,2007年于郑州大学获得学士学位,2007年至今于北京理工大学硕博连读,主要从事光子成像、自适应光学、图像处理等方面的研究。E-mail:hyu@bit.edu.cn



俞信(1941—),男,浙江人,教授,博士生导师,1963年于北京理工大学(原北京工业学院)获得学士学位,1984年至1986年作为国家公派访问学者进修于美国纽约州立大学石溪分校。主要从事自适应光学与空间光学、生物光子学等方面的研究。E-mail:yuxin@bit.edu.cn



张晓芳(1973—),女,天津人,博士,副教授,1996年于天津大学获得学士学位,2002年于天津大学获得博士学位,主要从事自适应光、空间光学等方面的研究。E-mail:zhangxf@bit.edu.cn