

文章编号: 0253-2239(2010)04-1009-06

# 白天暗小恒星目标电视实时探测

冯小勇<sup>1</sup> 朱 明<sup>2</sup> 向治强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431; <sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031)

**摘要** 为了满足船载光学测量设备昼夜实际测星需要, 解决电视系统白天测星数量偏少的问题, 保证惯导系统全天不间断航向误差校准, 使远望号航天测量船实现昼夜精密测控, 采用了“多级实时可变光谱滤光技术”, 实现了暗小恒星目标与明亮天空背景的分离; 并利用“暗小目标稳定识别跟踪算法”, 完成了快速稳定的目标识别跟踪; 还引入“软件无线电技术的设计思想”, 实现了处理系统的构成和算法的应用。在光学设备系统口径 180 mm, 焦距 3000 mm 的情况下, 白天可以探测的恒星星等高于 4.5 等, 白天可以探测的恒星数量高于 250 颗。白天可以探测的最高星等达到了和晚上测星相同的能力, 使原有光学设备光学系统的实际使用效能发挥到了极限, 方法可以推广应用在电视弱小目标探测的各个方面。

**关键词** 光学设计; 空间观测; 电视系统; 白天测星; 光谱滤波; 暗小目标; 实时探测

中图分类号 O433; V556; TP751 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1009

## Method of Television Real-time Detection on Dark and Small Stars Targets in the Daytime

Feng Xiaoyong<sup>1</sup> Zhu Ming<sup>2</sup> Xiang Zhiqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> China Satellite Maritime Tracking & Controlling Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China  
<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 310027, China

**Abstract** To meet the demand for stars detection by all-time optical measure equipment in the ship, and remove the problem of observable stars in the daytime by TV measurement as well as keep inertial navigation equipment emending its direction continuously, so that Space Tracking, Telemetering and Commanding ships “YUAN WANG” can realize their sophisticated measuring and tracking, the technique of “real-time variable multi-levels spectrum filtering”, which can distinguish dark and small star target from the bright background of the sky, “the algorithm of dark and small target’s stable recognition”, which realizes quick and stable targets recognition and tracking, and “the methods in software radio design”, which realizes the composition of the processing system and the application of the algorithm are adopted. The optical measure equipment can detect the stars of magnitude 4.5 or even bigger, and the amount of stars that can be detected in the daytime can reach 250 or more, based on that optical equipment’s aperture equals 180 mm and its focal length equals 3000 mm. The ability of maximum grades of star detection in the daytime can reach the grades in night, which expands working ability of the optical equipment that now uses in ships to its limitation. The method can be popularized and applied in many other fields of dark and small targets detection by TV.

**Key words** optical design; space observation; television system; star detection in the daytime; spectrum filtering; dark and small targets; real-time detection

## 1 引 言

电视跟踪测量技术因其成像动态范围较宽、图

像处理实时性强和易于实现自动跟踪等优点, 广泛应用在航天测量、天文观测和深空探测等技术领域,

收稿日期: 2009-04-30; 收到修改稿日期: 2009-06-01

基金项目: 总装备部试验技术研究重点资助课题。

作者简介: 冯小勇(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事航天测控、光测船姿及设备标校等方面的研究。

E-mail: fxxxxxy@yahoo.cn(中国光学学会会员号: S040M500S)

同时正是由于电视测量技术的应用,才使得光学设备白天恒星探测成为可能<sup>[1,2]</sup>。

为保证航天测量船船载测控设备能够稳定跟踪和精确测量目标,通常都在航天测量船上配置了导航定位设备用于船姿船位参数测量。惯性导航设备的各种漂移误差,特别是惯导输出的航向误差,需要通过光测设备实时测星进行校准。按照海上航天测控任务的实际需要,不仅需要进行晚上测星,而且还要进行白天测星。同时为了保证测星校准惯导航向误差的数据精度,通常要求单次测星数量达到 12 颗以上。

本文采用“多级实时可变光谱滤光技术”、“暗小目标稳定识别跟踪算法”等软硬件综合技术,解决了白天测星中长期存在的屏幕上可见而实际不可测的难题。使白天可以探测的恒星数量由以前的小于 5 颗,提高到了现在的 250 颗以上,可以探测的恒星星等由以前的 3.0 等以上,提高到了现在的 4.5 等以上。白天可以探测的最高星等达到了和晚上相同的指标,使得原有设备光学系统的实际使用效能发挥到了极限。

白天恒星目标的电视实时探测,属于明亮背景下弱小目标探测,其探测能力受目标背景发光特性、大气传输特性和光测设备技术参数等的综合影响,在海上船摇的动态环境进行白天测星,影响探测能力的因素无疑将会更加复杂<sup>[3,4]</sup>。

## 2 白天测星系统的实现

### 2.1 探测能力的影响因素

在白天时暗小的恒星目标被淹没在明亮的天空背景当中,要实现光测设备对恒星目标的稳定跟踪和实时测量,需要对目标背景的光学特性、光测设备的跟踪性能和电视系统的接收处理等问题进行综合研究。其中实现弱小恒星目标与明亮天空背景分离,提高白天恒星目标与天空背景对比度(信噪比),是提高极限探测星等和实际探测概率的关键。在参考有关文献资料并进行理论分析的基础上,结合多年的设备研制和实际试验情况,我们认为影响恒星实际探测能力的因素主要包括以下若干方面<sup>[5,6]</sup>:

1) 恒星目标发光特性,包括亮度特性和光谱特性等;

2) 天空背景光学特性,包括亮度特性和光谱特

性等;

3) 大气光学传输特性,包括大气消光、大气抖动和大气折光等;

4) 光学系统参数设计,包括通光口径、相对孔径、镜头焦距和有效视场的设计等;

5) 伺服系统跟踪误差,即伺服系统跟踪随机误差对暗小目标探测影响情况;

6) 探测器件性能选择,主要需要考虑探测原理、光电特性、探测能力和选择原则等;

7) 设备探测极限星等,包括极限星等、影响因素和关键环节等;

8) 光谱滤光实现方法,包括影响原理和实现方法等;

9) 视频图像处理算法,包括滤波方法和目标提取等。

研究恒星目标发光特性和天空背景光学特性是实现白天测星的基础。与大气光学传输特性有关的主要因素是指大气抖动,它会导致目标像点能量扩散从而降低设备探测星等。光学系统参数设计、伺服系统跟踪误差和探测器件性能选择是实现白天测星的保障,特别是在海上船摇情况下进行动态测星时,伺服系统对船摇数据处理效果会对测星结果产生很大影响。设备探测极限星等是反映设备性能的总体指标,其计算设计需要综合考虑各种影响因素。光谱滤光实现方法、视频图像处理算法是实现白天测星的关键。

### 2.2 探测设备的组成原理

这里恒星目标的电视探测是指实时(25 Hz)对恒星的:自动引导、捕获、识别、跟踪和测量等过程。在进行白天恒星探测设备系统设计时,利用恒星目标和天空背景辐射光谱的不同,通过采用多级可变光谱滤光技术,实现了恒星目标与天空背景在像面的初步分离。在进行电视视频图像处理时,通过采用了暗小目标稳定识别算法,在提高目标背景对比度的同时,实现了恒星的稳定跟踪和实时探测。在进行探测设备电视系统的设计实现时,通过采用软件无线电技术的设计思想,提高了系统的实时性、通用性和稳定性。

白天恒星目标电视探测系统总体组成原理如图 1 所示。

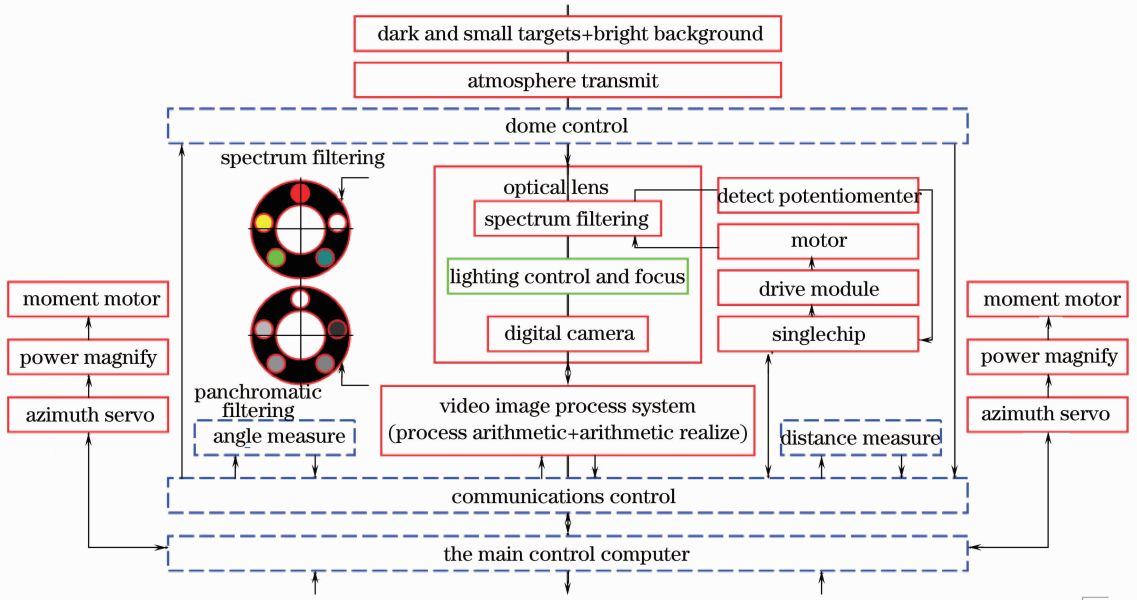


图 1 白天恒星目标电视探测系统总体组成原理

Fig. 1 Overall composition principle block diagram about TV detection system of stars in the daytime

暗小恒星目标和明亮天空背景经过大气传输进入光测设备的光学系统,恒星目标和天空背景经过光学系统会聚在像面成像,光电接收探测器器件将光学能量图像转为数字灰度图像送给图像跟踪处理系统,图像跟踪处理系统完成对恒星目标的识别跟踪和处理测量,调光系统使像面照度合适均匀,调焦系统使恒星目标能够清晰成像,光谱滤光装置利用恒星目标光谱和天空背景光谱的不同实现目标和背景的初步分离,方位伺服跟踪系统和俯仰伺服跟踪系统驱动光测设备运转以使视轴指向目标。

力的主要因素除星体的星等外,星体的光谱特性显得更加重要<sup>[7~9]</sup>。

恒星目标与天空背景的有效光子分布曲线如图 2 所示。

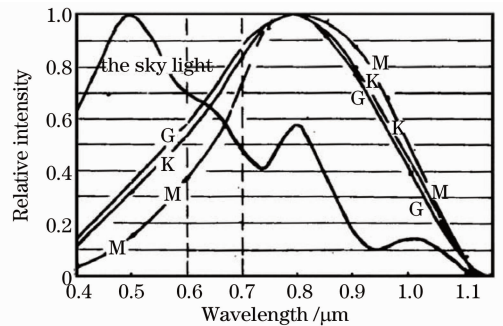


图 2 有效光子分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of effective photons

可以看出,晴朗天空的背景为波长较短的蓝色光,峰值波长为 0.5 μm 左右,而恒星(如 M, K, G 星)为波长较长的红色光,峰值波长为 0.8 μm 左右。在进行白天测星时引入短波截止的光谱滤光(波长小于截止波长的光波会被吸收不能到达像面成像),对光谱为长波的恒星探测是很有利的。可以在尽量多衰减背景能量时,尽量少衰减恒星目标信号能量,从而有效提高星体目标与天空背景的对比度。所以,在进行白天测星时引入光谱滤光是非常重要的。

光谱滤光滤波效果如表 1 所示。

### 3 白天恒星电视探测关键技术

恒星目标能否稳定跟踪并被识别探测,主要是看对比度是否满足最低提取条件。在诸多影响恒星实时电视探测效果因素当中,影响白天星体探测的关键环节主要包括:实时光谱滤光装置、探测器性能选择、实时图像处理算法。为了提高极限探测星等和实际探测概率,对观测设备的设计目标是:在尽量提高目标与背景对比度的同时,尽量降低目标识别提取对对比度的要求。

#### 3.1 光谱滤光装置实现

因为白天和晚上天空背景亮度特性和光谱特性的变化,白天测星与晚上测星的光电探测原理和信号处理方法有很大的不同。影响晚上星体探测能力的主要因素是星体的亮度,而影响白天星体探测能

表 1 光谱滤光滤波效果  
Table 1 Filtering effect of spectrum filtering

Spectrum filtering	No filter		Spectrum filtering(HB10)		Spectrum filtering(HB16)		Panchromatic filtering	
	Transmission through /%	Attenuation /%	Transmission through /%	Attenuation /%	Transmission through /%	Attenuation /%	Transmission through /%	Attenuation /%
Sky background	100	0	51	49	33	67	51	49
Star of M	100	0	90	10	76	24	51	49
Star of K	100	0	85	15	70	30	51	49
Star of G	100	0	84	16	68	32	51	49

光谱滤光装置截止波长设计如表 2 所示。

表 2 光谱滤光装置截止波长设计(8 级)  
Table 2 Cut-off wavelength design of spectrum filtering device(8 Levels)

Filter number	1	2	3	4	5	6	7	8
Cut-off wavelength / $\mu\text{m}$	0.40	0.60	0.63	0.66	0.70	0.73	0.76	0.82
Transmission through light wave / $\mu\text{m}$	0.40~1.10	0.60~1.10	0.63~1.10	0.66~1.10	0.70~1.10	0.73~1.10	0.76~1.10	0.82~1.10

由于不同恒星的光谱曲线和峰值波长不同,为了实际能够探测不同光谱类型恒星,在系统实现时采用了多级实时可变光谱滤光技术,如 5 级、8 级……这一设计方案在实际应用中取得了良好的效果。

### 3.2 实时图像处理算法

在观测设备的电视跟踪与测量系统中,图像处理部分是系统核心部件之一。图像处理器接收来自电视摄像机的视频信号,采用数字信号处理技术对恒星目标进行检测和参数提取。图像处理器的主要任务是改善输入图像质量,进一步提高恒星目标与天空背景信噪比,解决低信噪比情况下目标的识别检测问题。图像处理与跟踪系统(VIPT)的主要算法包括图像预处理、图像分割、目标检测,模板匹配和目标跟踪等<sup>[10~14]</sup>。

视频图像处理系统软件处理流程如图 3 所示。

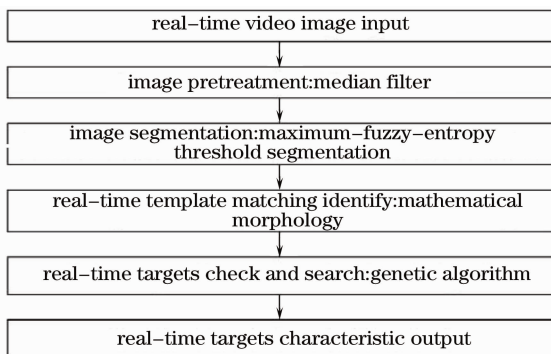


图 3 视频图像处理系统软件处理流程

Fig. 3 Flow chart of video image manipulation system by software

在实时视频图像处理算法方面,考虑了算法实现的复杂程度和系统实时性的要求,实现了暗小目

标稳定识别跟踪算法。图像预处理技术采用经典的中值滤波方法(也可用小波变换法,但实现过程较复杂,其实时性相对也较差)提高信噪比。图像阈值分割方法着重选用了最大模糊熵阈值分割方法自适应求取阈值。在模板匹配算法中使用了数学形态学方法,并采用了遗传算法进行目标搜索。实践证明:这些图像处理算法不仅稳定有效,而且能够满足系统实时性要求,可实现白天强背景下弱小目标的实时检测(25 Hz)。

### 3.3 电视系统组成原理

在进行白天测星电视系统设计时,探测器件(CCD)的选择是重要环节,要综合系统的任务和功能要求综合考虑。一般来说应该选择:动态范围宽、量子效率高、存储特性好和良好零惰性的探测器件,但分辨率和灵敏度选择要适中。分辨率过高会降低探测的信噪比,灵敏度太高系统容易过早饱和,而且会使调光滤波措施复杂化。考虑到天空背景与恒星目标的辐射光谱的不同,探测器件的峰值波长应该在近红外区(0.7~0.9  $\mu\text{m}$ )<sup>[15]</sup>。

文中选择探测器件的型号为加拿大 DALSA 公司的 Pantera TF 1M30 黑白数字面阵 CCD。白天测星电视系统组成原理框图如图 1 所示。

在电视系统设计方面采用软件无线电技术的设计思想,提高了电视系统的实时性、通用性和稳定性。利用双数字信号处理(DSP)结构等高度并行的处理方法,解决了实时大数据量处理的问题。利用 DSP 与现场可编程门阵列(FPGA)相结合的结构,以数字信号处理器 TMS320C6203B 为核心,结合可编程逻辑器件(CPLD)和 FPGA,构成视频图像跟

踪处理系统,实现了处理系统的构成和算法的应用,完成了白天强背景下对空间弱小目标的实时跟踪、测量和输出。

## 4 白天测星试验结果

为了验证白天测星实现方法的外场实际使用效

果,利用类型不同的设备进行了多次测星试验,测星试验结果表明,在天气晴朗的标准气象条件下,白天和晚上设备最高可探测星等都达到 4.5 等,亦即白天达到了和晚上相同的星等探测能力。

### 4.1 现场实际的测星结果

实际测星试验结果如表 3 所示。

表 3 实际测星试验结果

Table 3 Result of practical measuring stars experiment

Observation equipment	Use mode	Clear aperture	Selective focal length	Stellar magnitude which can be defecfed	Stellar total number which can be defecfed	Observation time
Calibration theodolite	Dynamic at ship	180 mm	3000 mm	4.5 <sup>m</sup>	762	Night;20~24 h
Calibration theodolite	Dynamic at ship	180 mm	3000 mm	4.5 <sup>m</sup>	252	Daytime;09~15 h

测星试验均在标准气象条件进行,测星数量多少直接影响校准惯导航向精度。

由测星结果可以看出:同类设备白天和晚上测星能力均为 4.5 等,但白天可探测的恒星总数却少

于晚上。这一试验结果应该还是比较满意的,因为它已完全满足海上测星校准惯导航向误差的要求。

### 4.2 实时图像的处理效果

视频图像处理效果如图 4 所示。

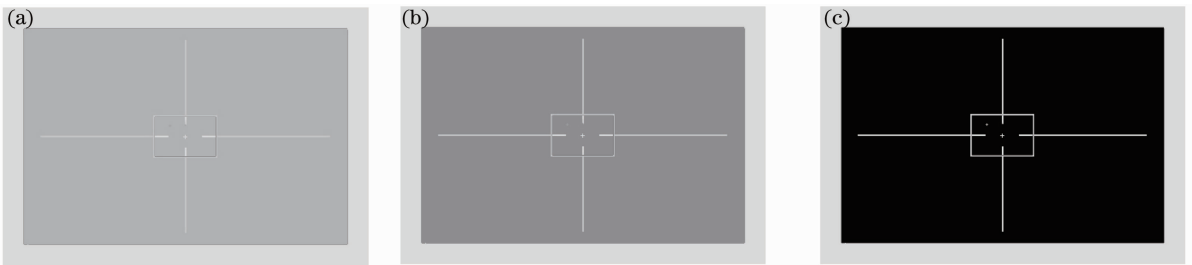


图 4 视频图像处理效果。(a)原始输入的视频图像;(b)光谱滤光后视频图像;(c)图像处理后输出图像

Fig. 4 Mmanipulation effect of video image. (a) the video image of origin input; (b) the video image after spectrum filtering; (c) the output image after image manipulation

由图像效果可以看出:原始输入的图像中几乎完全被天空背景所淹没的恒星目标,经过光谱滤光装置对天空背景的选择性吸收衰减,再经电视信号处理系统进行实时视频图像处理,目标信号与背景信号的对比度(信噪比)大大提高。

## 5 结 论

白天测星实践证明这一系统设计方法对暗小目标实时探测是有效的。

多级实时可变光谱滤光技术可以成功实现白天恒星与天空背景在像面的分离。暗小目标稳定识别跟踪算法可以实时完成了图像滤波、阈值求取、图像分割、模板匹配和目标检测等功能,有效地提高了白天对恒星目标的探测概率,解决了白天测星中长期存在的屏幕上可见而实际不可测的难题。软件无线电技术的设计思想实现了处理系统的构成和算法应

用,是提高电视系统实时性、通用性和稳定性等的有效方法。

该方法使车载动态光学星体观测设备,在光学系统口径为 180 mm,焦距为 3000 mm 的情况下,白天可以探测的恒星数量由以前的少于 5 颗,提高到了现在的 250 颗以上,可以探测的恒星星等由以前的高于 3.0 等,提高到了现在的高于 4.5 等。作为暗小目标电视实时探测问题基础性的研究成果,其方法可以推广应用在电视弱小目标实时探测的各个方面,例如:航天测量、天文观测和深空探测等技术领域。

目前,白天可测的星数还少于晚上可测的星数,这是课题需要继续努力和解决的问题。

## 参 考 文 献

1 Jin Guang. A technical study of the automation demarcation and

- correction and the day light steller measurement for electro-optical tracking systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1991, **8**(2): 87~90
- 金光. 光电经纬仪的自动化标校与白天测星技术的研究[J]. 光学精密工程, 1991, **8**(2): 87~90
- 2 Shen Xiangheng, Li Qingjun, Wang Jianjun. Measuring star with video interpretation in daytime [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(2): 189~191
- 沈湘衡, 李清军, 王建军. 利用视频判读进行白天测星方法的研究[J]. 光学精密工程, 2000, **8**(2): 189~191
- 3 Feng Xiaoyong, Zhu Weikang. Single error separation arithmetic for astronomical calibration of optical measurement equipments [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(12): 28~33
- 冯晓勇, 朱伟康. 光测设备天文标校误差解算分离算法[J]. 光电工程, 2008, **35**(12): 28~33
- 4 Wang Weiguo. Research of Space Object Detecting under Bright Background[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2005
- 王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005
- 5 Wei Helin, Chen Xiuhong, Yu Kai *et al.*. Analysis of the detectable stellar magnitude limit using CCD camera in daytime sky background[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(02): 187~192
- 魏合理, 陈秀红, 余凯, 田永青. 白天 CCD 观星可探测极限星等值分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(02): 187~192
- 6 Tan Bitao, Jing Chunyun, Wang Baoguo *et al.*. Measuring the star magnitude of manmade satellites with visual TV [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(S4): 397~400
- 谭碧涛, 景春元, 王宝国等. 卫星星等的可见光电视测量方法[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(S4): 397~400
- 7 Xu Weian. Application of spectral filter device in measuring stellar in daytime[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, **4**(4): 84~88
- 徐维安. 光谱滤波装置在白天测星中的应用[J]. 光学精密工程, 1996, **4**(4): 84~88
- 8 Xu Min, Wang Jinli, Chen Tao. Study on application of short wave infrared to detecting satellites in the daytime[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(2): 277~280
- 续敏, 王建立, 陈涛. 短波红外用于白天卫星探测的研究[J]. 光学技术, 2008, **34**(2): 277~280
- 9 Gao Xin, Wang Jinli, Zhou Sizhong *et al.*. Photometric characteristic measurement of space target [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(3): 42~45
- 高昕, 王建立, 周泗忠等. 空间目标光度特性测量方法研究[J]. 光电工程, 2007, **34**(3): 42~45
- 10 Li Zhe, Huang Lianqing, Li He. A new quick segmentation method of CR images based on mathematical morphology [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 6~10
- 李哲, 黄廉卿, 李鹤. 基于数学形态学的 CR 图像实时快速分割算法[J]. 光学技术, 2007, **33**(1): 6~10
- 11 Wang Haihong, Zeng ni, Lu Wei *et al.*. Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology [J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(6): 903~906
- 王海虹, 曾妮, 陆威等. 基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测[J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 903~906
- 12 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目标探测算法[J]. 光学学报, 2007, **27**(12): 2163~2168
- 13 Liu Guixi, Liu Dongmei, Liu Fengpeng *et al.*. A robust image registration algorithm based on feature points matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 454~461
- 刘贵喜, 刘冬梅, 刘凤鹏等. 一种稳健的特征点配准算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 454~461
- 14 Zheng Yi, Liu Shangqian. Image segmentation based on maximum fuzzy entropy and genetic algorithm [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(4): 578~580
- 郑毅, 刘上乾. 基于最大模糊熵和遗传算法的图像分割[J]. 光学技术, 2006, **32**(4): 578~580
- 15 Shang Hailin. A detection algorithm of small targets in complex background implemented by FPGA [J]. *Aero Weaponry*, 2007, (4): 22~24
- 尚海林. 复杂场景下弱小目标检测算法的 FPGA 实现[J]. 航空兵器, 2007, (4): 22~24