

文章编号 1004-924X(2011)12-2900-07

机载导航白天星敏感器的探测性能及总体设计

钟 兴*, 贾继强, 金 光, 曲宏松, 刘国嵩

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:理论分析和试验研究了机载导航白天星敏感器的探测性能,建立了白天观星的信噪比和调制度在噪声影响下的数学模型,对比了焦距一定,不同入瞳直径和入瞳直径一定,不同焦距情况下的计算结果。归纳了光学系统的性能要求及系统参数对探测效果的影响,得出光学系统相对孔径为 1/15 较为合适的结论。在此基础上提出了用于 3 等星全天时观测的白天星敏原理样机的光机及电子学处理总体方案。利用相对孔径为 1/15 的望远物镜进行地面实验,获得了对北极星从日出到正午的持续观测结果。对比不同时刻星点图像的亮度和对比度变化显示,随着太阳高度角增大,星点图像的对比度由上午 5:00 的 1.55 下降到正午 12:00 的 1.2 左右,据此换算出样机方案的探测性能指标。计算结果表明,采用口径为 $\Phi 70$ mm,相对孔径为 1/15 的光学系统可满足对 3 等星的探测最小调制度为 0.03 的要求。实验表明,本文进行的理论分析正确,方案合理可行,可为小型高精度机载导航星敏感器的研制提供参考。

关键词:星敏感器;白天星敏;探测性能;对比度;信噪比;调制度

中图分类号:V448.22 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111912.2900

Detecting performance and overall design of airborne daytime star sensor for navigation

ZHONG Xing*, JIAO Ji-qiang, JIN Guang, QU Hong-song, LIU Guo-song

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: ciomper@163.com

Abstract: The detecting performance of an airborne daytime star sensor for navigation is analyzed and a daytime star sensor prototype is researched. Mathematical models of Signal to Noise-Ratio(SNR) and contrast of a photoelectric imaging system in daytime under noises are established, and calculated results by different focal lengths and different apertures are compared to conclude the influence of system parameters on the detection results and the requirements of optical system. The conclusion shows that the proper relative aperture of optical system is 1/15. A daytime star sensor prototype for tracking stars of magnitude 3 is designed. Tracking images of the polestar from sunrise to noon are acquired by a ground experiment using a F/15 objective, and brightnesses and contrasts of star images at different time are compared. It shows that the contrast of star image has descended from 1.55 at 5:00 a. m. to 1.2 at 12:00 a. m. The minimal degree of modulation is more than 0.03 by calculating with the

收稿日期:2011-02-18;修订日期:2011-05-25.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA7020103)

prototype's parameters, which shows that the optical system with $\Phi 70$ mm and $F/15$ can satisfy the detecting requirements. The theoretic analysis and design is proved to be available, and the research can be a reference for developing of miniaturized and precise airborne daytime navigation star sensors.

Key words: star sensor; daytime star sensing; detecting performance; contrast; Signal to Noise Ratio (SNR); degree of modulation

1 引 言

机载白天型星敏感器是飞机导航定位系统专用的光学测量设备,其利用天球坐标系中恒星的位置,通过昼夜测量恒星确定视轴指向来确定在惯性坐标系的姿态,从而为载体提供精确位置和姿态信息。它可用于修正惯性导航系统的偏差,精度一般可达 $10''$ 以内,具有高精度和全天时的特点。因此,白天型星敏感器对于大型客机全球飞行、航空飞行器自主导航等具有重要意义。

国外对白天型星敏感器的研究始于 20 世纪 80 年代后期,以美国为代表^[1-3],Ball Electro-Optics 公司的实验装置在白天天空亮度 1.3×10^4 cd/m^2 的背景下,追踪到了 57 颗 2.5 等星。Northrop 公司研制的第四代导航系统 NAS-26 能够在 2.74×10^4 cd/m^2 天空背景亮度下观测到 3.5 等星。Microcosm 公司的 DayStar 系统采用三视场原理,同时观测 3 个方向,可直接对平台的三轴姿态进行高精度的解算。2006 年公布的实验结果表明,午后太阳位于天顶时,DayStar 系统仍能探测到 7.1 等星,该系统是目前白天星敏感器达到的最高水平。

国内虽然在大型经纬仪地面白天观星方面做了大量工作^[4-6],但在机载白天型星敏感器技术方面近乎空白,因此,有必要在现有基础上深入开展和加强白天型星敏感器技术的研究,探索在小型化系统中提高全天时探测能力的途径,争取早日使白天星敏实用化。本文在理论分析了白天型星敏感器探测性能的基础上,研制出原理样机,并通过实验对其性能进行了测试。

2 白天型星敏感器探测性能的理论分析

全天恒星 M, K, G 3 种光谱占 90% 以上,也

就是说,大部分恒星的光波长大于 600 nm,其光谱在短波较弱,峰值在 800 nm 左右。天空背景光以短波段为主,峰值大约在 450~550 nm,长波光谱相对强度下降很快^[7]。因此,在白天型星敏中采用 600 nm 前截止滤光片可有效提升其探测效率。

机载导航白天型星敏感器观星时,天空背景的亮度与飞行器的高度、太阳的方位等因素有关。在地面观测太阳附近的天空区域,其亮度可达到 2×10^4 cd/m^2 以上,晴朗天气下整个天空大部分区域的亮度在 $2 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3$ cd/m^2 。随着高度增加,大气变稀薄,太阳光的散射效应减弱,天空背景的亮度相应变暗。与目前研究较多的星载星敏感器不同,机载导航白天型星敏感器在大气层内使用,受到天空背景散射,大气湍流等因素的干扰。

根据天体光度的测量结果^[8],大气层外每平方度的零等星的亮度 $\Phi_0 = 0.84 \times 10^{-2}$ cd/m^2 ,其照度 $E_0 = 2.65 \times 10^{-6}$ lx,根据天文学的视星等定义,可知 m 等星在大气层外的照度为:

$$E_m = E_0 \times 10^{-0.4m}.$$

按照经典光学的照度公式,恒星为点光源,其像面照度正比于光学系统的入瞳面积:

$$E_{\text{scdd}} = E_m \cdot k \cdot \tau \cdot \frac{a}{a_s}, \quad (1)$$

其中, k 为大气衰减系数, τ 为光学系统透过率, a 为入瞳面积, a_s 为星点像面积。

而天空背景为面光源,像面照度与光学系统相对孔径的平方成正比:

$$E_{\text{bcd}} = \pi \cdot B \frac{\tau}{4F^2}, \quad (2)$$

其中, B 为天空光的入瞳亮度, F 为光学系统相对孔径的倒数。

因此,当使用较大相对孔径的光学系统时,在强天空背景的作用下,CCD 极有可能饱和,“淹没”星点。为了保证探测星点能量的同时将星点像从天空背景中分离,需要系统有一定口径的同

时具有较小的相对孔径。

建立白天观星的信噪比和传递函数在噪声影响下的模型进行进一步分析：

$$S = \frac{1}{N^2} \phi_s \cdot a \cdot q_s \cdot f_s \cdot \tau_s \cdot t$$

其中, N 为星点像弥散因子, ϕ_s 为恒星亮度, q_s 为目标光谱量子效率, f_s 为目标光谱透过率, τ_s 为光学系统目标透过率, t 为积分时间。

$$B_b = \phi_b \cdot a \cdot q_b \cdot f_b \cdot \tau_b \cdot \sigma^2 \cdot t$$

其中, ϕ_b 为背景亮度, q_b 为背景光谱量子效率, f_b 为背景光谱透过率, τ_b 为光学系统背景透过率。

白天星敏传感器所获得图像上星点与背景的对比度表示为：

$$C = \frac{K_e \cdot S + B_b + (n_D \cdot t)^2 + n_r^2}{B_b + (n_D \cdot t)^2 + n_r^2} \quad (3)$$

其中, K_e 为处理电路附加因子, 一般取 0.8; n_D 为暗电流噪声, n_r 为读出噪声 RMS 值, 一般根据器件手册选取。

信噪比可由下式计算：

$$SNR = 20 \cdot \log\left(\frac{K_e \cdot S}{\sqrt{(S + B_b) + (n_D \cdot t)^2 + n_r^2}}\right) \quad (4)$$

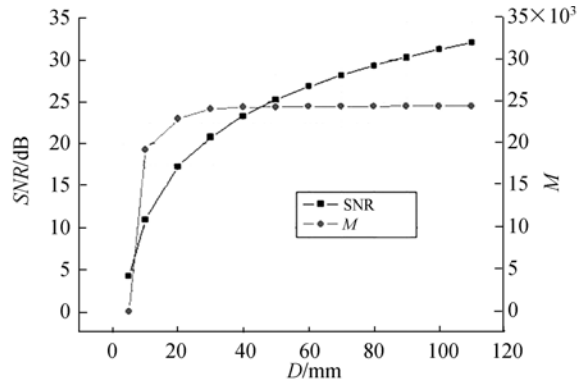
目标跟踪要求的信噪比一般在 6 dB 以上, 而系统稳定工作要求的信噪比应优于 10 dB。除了信噪比, 光电系统的探测性能还一般用调制度 M 表示, 根据调制度定义：

$$M = \frac{C - 1}{C + 1} = \frac{K_e \cdot S}{(K_e \cdot S + 2B_b) + 2(n_D \cdot t)^2 + 2n_r^2} \quad (5)$$

对于后续电子学处理, 光电成像系统输出信号的调制度 M 应优于 $0.03^{[9]}$ 。

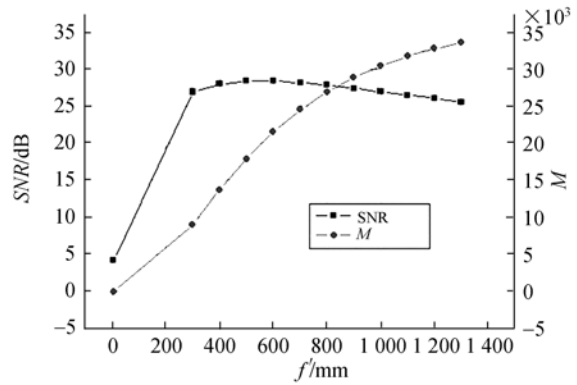
实验选取了 ORT-8318 面阵 CCD 相关指标, 积分时间 20 ms, 对在 6×10^3 cd/m² 天空背景下观测 3 等星目标的情况进行了计算。计算中考虑到大气扰动及载体晃动造成的星点弥散为 5×5 个像元, 即 $N=5$ 。

图 1 是计算结果, 为方便对比, 将信噪比和调制度的计算结果合并到了一个图中表示, 纵坐标为 1000 倍的调制度和以 dB 为单位的信噪比。分析图 1(a) 可以看出, 望远镜焦距一定时, 口径的增加可有效地提高系统的信噪比; 但对调制度的增加却十分有限, 当口径达到一定值后, 调制度几乎不会随口径的增加而增加。分析图 1(b) 可以看出, 在入瞳直径一定时, 增加焦距可在一定程度上提高信噪比, 但焦距过长 (即相对口径过小), 信噪比反而会有所下降, 但下降的趋势较缓; 增加



(a) 焦距 700 mm, 不同入瞳直径的计算结果

(a) Results of 700 m focal length with different apertures



(b) 入瞳直径 $\Phi 70$ mm, 不同焦距的计算结果

(b) Results of $\Phi 70$ mm aperture with different focal lengths

图 1 信噪比和调制对比度计算结果

Fig. 1 Theoretical calculation of SNR and modulate contrast

焦距对于调制度的提高作用是十分明显的, 调制度要在 0.03 以上, 同时考虑信噪比和调制度两个因素, 相对孔径取 1/15 是比较合适的。要达到好的观星效果, 光学系统必须满足口径大、焦距长、光谱滤波能力和像质好, 弥散斑小的条件。

显然, 相对于地面白天对恒星的观测而言, 机载导航的白天星敏所处的环境不同, 由于具有一定的飞行高度, 天空背景更暗, 因此, 系统的口径可以更小。

3 机载白天型星敏传感器样机的设计

根据理论分析和实验结果, 对第一台白天星敏传感器的原理样机方案进行了考虑。望远物镜采用口径 $\Phi 70$ mm, 相对孔径为 1/15 全球面马克苏托夫-卡塞格林折反式光学系统。在地面和机载

飞行条件下,均具备全天时探测 3 等以上恒星,信噪比优于 10 dB 的能力。

采用传统的机载经纬仪结构来实现方位和俯仰方向的二维转动。其中由方位轴系实现方位方向的转动,然后通过 U 形架式的俯仰轴系实现俯仰方向的转动。为保证转动精度,电机通过涡轮蜗杆结构对转轴进行控制,由小型高精度编码器提供转向角度信息。整机质量不大于 5 kg,外形尺寸不超过 300 mm,如图 2 所示。

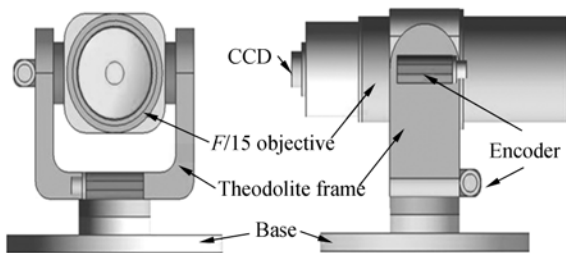


图 2 样机外形示意图

Fig. 2 Sketch map of prototype

作为白天星敏感器的接收器件,CCD 需要有大动态范围和较高的灵敏度,同时要具备饱和和溢出功能。选取的 CCD 主要指标如下:

- CCD 像元数: 1 Kpixel×1 Kpixel;
- CCD 像元尺寸: 13 μm;
- 动态范围: 50 000:1;
- 读出噪声: 3e⁻ (rms);
- 暗电流噪声: <200 e⁻/pixel·s⁻¹

电子学系统采用“FPGA+DSP”方案,FPGA 用于原始图像的缓存与预处理,DSP 用于对星点信号的提取,如图 3 所示。

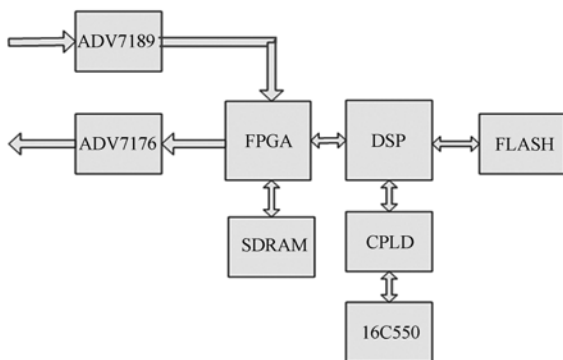


图 3 电子学系统框图

Fig. 3 Frame of electronic system

在样机方案中,为了实现小型化和提高系统的精度,应重点考虑的措施包括^[10-11]:

- (1)通过消杂光设计提高杂光抑制能力,避免太阳光干扰;
- (2)提高 CCD 的灵敏度,降低噪声,以有效减少需要的口径尺寸;
- (3)通过结构设计,减小曝光期间的光轴晃动;
- (4)与机载惯导安装在同一基准,减少传递误差。

4 探测性能实验验证

4.1 实验搭建

为累积实验数据,掌握机载白天星敏探测灵敏度规律。2010 年 8 月 17 日,搭建地面实验装置对北极星(2.12 等)进行了持续观测。使用的设备包括:博冠牌望远物镜(口径 Φ127 mm,相对孔径 1/15)、具有自动增益功能的 ORT-8318 面阵黑白 CCD 相机、MATROX Meteor II Standard 图像采集卡及计算机。

4.2 探测性能随时间的变化

8 月 17 日当天的日出时间为上午 4:40,日出期间,天空背景变化明显。从上午 4:15—4:55,背景的相对亮度由 11.2%变为 62.2%(假设星点亮度为 100%)。日出期间的星点图像变化如图 4 (a)~(e)所示。



(a) 4:15 (b) 4:25 (c) 4:35 (d) 4:45 (e) 4:55

图 4 日出期间北极星图像

Fig. 4 Polestar images during sunrise

上午 5:00~12:00,星点图像的对比度变化相对缓慢,获取的图像如图 5(a)~(h)所示。

对上午 5:00~12:00 的天空背景和星点图像灰度统计的结果如图 6(a)所示,纵坐标为 8 位量化的图像灰度值,0 代表全黑,255 代表全白,横坐标为时刻。由于一直观察北极星,目标亮度没有改变,可认为图 6(a)中的星点亮度变化是系统增益自动调整所致,因此,为获得天空背景的真实变

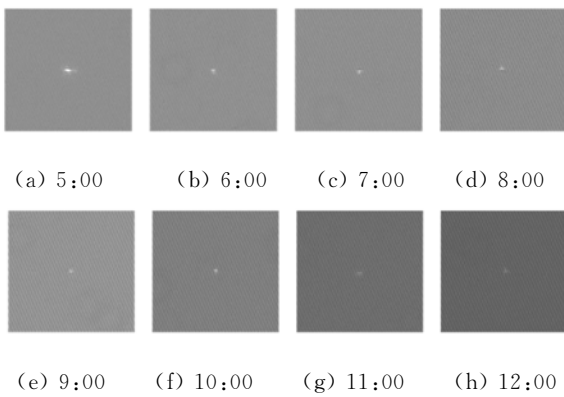


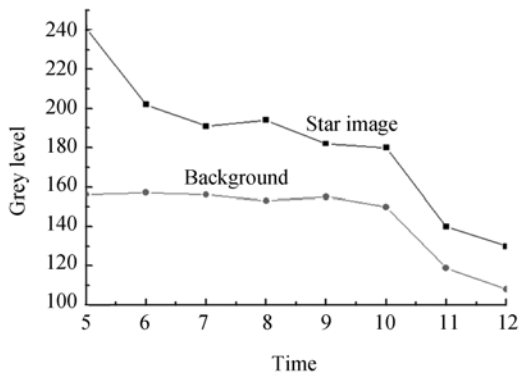
图 5 上午 5:00~12:00 北极星图像变化

Fig. 5 Polestar images from 5:00 a. m. to 12:00 a. m.

化情况,将 i 时刻的原始图像背景亮度 $B(i)$ 变换为:

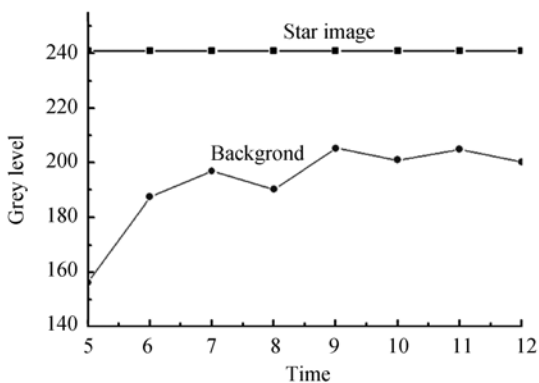
$$B'(i) = \frac{B(i) \cdot \max(S)}{S(i)}, \quad (6)$$

其中, $S(i)$ 为 i 时刻的原始星点像亮度, $\max(S)$ 为采集到的原始星点像最大亮度。



(a) 原始图像上的星点像和背景亮度

(a) Star image and background brightness on original photos



(b) 去掉 CCD 自动增益后的星点像和背景亮度

(b) Star image and background brightness after removing CCD auto-gain

图 6 天空背景和星点像随时间的亮度变化

Fig. 6 Brightness changes of background sky and star image

由变换后的数据得到星点像对比度和调制度随时间变化的曲线如图 6(b) 所示。由于实验装置的手动云台存在一定程度的晃动,加上大气扰动等客观因素,致使亮度变化曲线并不是十分平滑,但还是可以看出,随着太阳高度角的增加,天空背景的总体趋势是变亮,亮度增加了约 40%。

星点与目标的对比度随时间趋势的下降如图 7 所示,对比度由 1.55 下降到 1.2 左右,根据式 (5),即调制度从 0.22 下降到 0.09 左右。

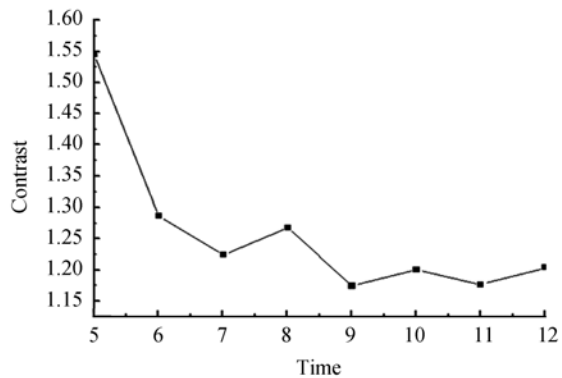


图 7 星点像与天空背景随时间的对比度变化

Fig. 7 Contrast change of background sky and star image

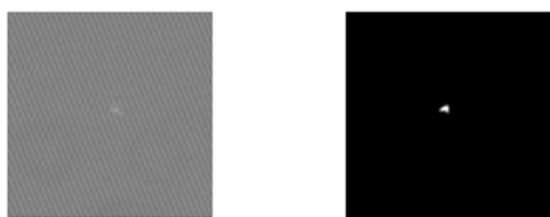
利用第 2 节中分析的公式,将原理样机的光学系统指标代入地面实验得到的中午 12:00 的结果进行换算,即光学系统缩小 0.55 倍 ($70/127 = 0.55$)、CCD 参数不变、目标星等由 2.12^m 换为 3^m ,得到调制度为 0.037。要满足正常探测要求,调制度在 0.03 就已足够。因此,在使用性能更好的 CCD 和镜头后,原理样机可获得的调制度应远高于 0.03,完全可以满足星的 3^m 白天探测要求。

4.3 星点像的处理算法

采用多帧累积和滤波的处理方法^[12-15]实现天空背景下星点像提取处理。 n 帧累加后进行滤波的算法表达式如下:

$$\hat{I}(x, y) = \sum_n I(x, y) \otimes f, \quad (7)$$

其中 f 为星点滤波器。原始视频中典型一帧星点图像如图 8(a) 所示,利用原理实验中获得的中午 12:00 星点视频图像处理得到的效果如图 8(b) 所示。明显可见,通过 10 帧累积图像和滤波处理,星点和背景的对比度得到了大幅度增强,同时,消除了固定图形噪声引起的天空背景的不均匀和亮度起伏。



(a) 原始图像 (b) 处理后图像
(a) Original image (b) Processed image

图 8 星点像处理效果

Fig. 8 Processing effects of star image

5 结 论

本文围绕机载白天星敏感器的探测性能和总体设计,推导了白天星敏器的焦距和相对孔径参

数对信噪比和调制对比度探测性能的影响,并通过原理实验对比了日出至正午不同时刻的星点图像,验证了理论计算的正确性。实验得出,在现有条件下,在总体参数中合理选用相对孔径,适当增加焦距,采用光谱滤波和视频图像处理技术等是提高白天星敏探测性能的有效手段。根据实验结果进行的计算表明,光学系统的样机口径为 $\Phi 70$ mm,相对孔径为 1/15,质量不大于 5 kg,外形尺寸不超过 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 时,其具备全天时探测 3 级以上恒星的能力,并且在采用高性能光学系统和 CCD 器件后,有可能进一步小型化。

根据本文研究得出的初步结论,计划进一步梳理白天星敏的关键技术,重点围绕小型化和探测系统性能的稳定性展开。

参考文献:

- [1] DUNCAN T M. A daylight stellar sensor using a charge-coupled device[J]. *SPIE*,1989,1111:1-14.
- [2] DIETZ K L, RAMSEY B D. Daytime aspect camera for balloon altitudes [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(10):2641-2651.
- [3] SANDVEN S C, BROWNE S L. Tip-tilt tracker for image stabilization in a daylight speckle imaging system [J]. *SPIE*, 1995, 2468: 246-251.
- [4] 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.
- SHEN X H, LI Q J, WANG J J. Measuring star with video interpretation in daytime[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(2):189-191. (in Chinese)
- [5] 张双同,李清军,沈湘衡. 提高海上白天测星能力的方法研究[J]. *光学精密工程*,2000,8(3):261-264.
- ZHANG SH T, LI Q J, SHEN X H. Method of measuring star at sea in daytime[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(3): 261-264. (in Chinese)
- [6] 王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院博士学位论文,2005.
- WANG W G. *Research of space object detecting under bright background* [D]. Beijing: Doctor Degree Dissertation of Graduate School of the Chinese Academy of Sciences,2005. (in Chinese)
- [7] 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.
- XU W A. Application of spectral filter device in measuring stellar in daytime [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(4):202-206. (in Chinese)
- [8] 张己化,姚东升,谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. *光学学报*,2008,28(6):1178-1182.
- ZHANG J H, YAO D SH, TAN B. Analysis on effect factors of ground based electro-optic system detection ability on space object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,28(6):1178-1182. (in Chinese)
- [9] 王建军. 白天强天空背景条件下空间目标探测能力分析[J]. *飞行器测控学报*,2007,26(6):45-49.
- WANG J J. An analysis of detection capability to space object in daytime strong sky background [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2007, 26(6):45-49. (in Chinese)
- [10] 王晶,高利民,姚俊峰. 机载测量平台中的坐标转换误差分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 388-394.
- WANG J, GAO L M, YAO J F. Analysis on coordinate conversion error of airborne measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):388-394. (in Chinese)
- [11] 耿文豹,翟林培,丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2):314-320.
- GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):314-320. (in Chinese)

- [12] 李欣,赵亦工,陈冰,等.基于模糊分类的弱小目标检测方法[J].光学精密工程,2009,17(9):2311-2320.
LI X, ZHAO Y G, CHEN B, *et al.*. Approach to dim and small target detection based on fuzzy classification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2311-2320. (in Chinese)
- [13] 管志强,陈钱,钱惟贤,等.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.
GUAN ZH Q, CHEN Q, QIAN W X, *et al.*. An adaptive background adjusting algorithm for dim target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12):2163-2168. (in Chinese)
- [14] 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.
SHANG H L. A detection algorithm of small targets in complex background implemented by FPGA [J]. *Aero Weaponry*, 2007(4):22-24. (in Chinese)
- [15] 冯小勇,朱明,向治强.白天暗小恒星目标电视实时探测[J].光学学报,2010,30(4):1009-1014.
FENG X Y, ZHU M, XIANG ZH Q. Method of television real-time detection on dark and small stars targets in the daytime [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4):1009-1014. (in Chinese)

作者简介:



钟兴(1982—),男,四川自贡人,博士,副研究员,2004年于吉林大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位,主要从事光学遥感技术、光学测量与光学导航设备方面的研究。E-mail: ciomper@163.com



金光(1958—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,1982年于长春光学精密机械学院获学士学位,1991年,2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获硕士、博士学位,现为长春光学精密机械与物理研究所新技术室主任,长期从事光机仪器总体、机载与星载光学仪器方面的研究工作。E-mail: jing@ciomp.ac.cn



贾继强(1966—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,1987年于吉林工学院获学士学位,主要从事测绘相机及相机稳定技术方面的研究。E-mail: jiajiqiang@sohu.com



刘国嵩(1974—),男,吉林长春人,博士,助理研究员。2006年于吉林大学机械工程学院机械设计专业获博士学位,主要研究方向为精密驱动。E-mail: liugs@ciomp.ac.cn



曲宏松(1980—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,2004年于吉林大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位,主要从事CCD视频信号处理、图像处理方面的研究。E-mail: sathouse@126.com

(本栏目编辑:严寒)