

文章编号 1004-924X(2017)增-0066-06

宽光谱大视场光学系统设计

任峰^{1,2*}, 张志杰², 付贝贝³, 刘勃良³, 贾雪枫³

- (1. 长春师范大学 工程学院, 吉林 长春 130031;
2. 富奥汽车零部件股份有限公司 研发中心, 吉林 长春 130022;
3. 一汽-大众汽车有限公司, 吉林 长春 130011)

摘要: 为了满足深空探测相机大范围的探测需要, 设计了一种宽光谱大视场光学系统。对该系统的结构、性能指标和成像质量进行研究, 利用3个平行光管对一幅图像进行理想像面拼接, 以此实现探测相机对无穷远目标的模拟探测, 然后对探测到的目标进行图像扫描, 并将模拟图像与扫描图像进行对比评价, 从而实现了探测相机动态参数的实验室检测。仿真与实验结果表明: 该系统的焦距为100 mm, F数为 $\Phi 27$, 口径为25 mm, 探测得到的无穷远目标图像清晰, 成像质量高, 光学传递函数接近衍射极限, 畸变优于1%。该系统可以对深空相机进行室内模拟, 对深空相机的动态检测具有重要的意义, 为产品试验与定型提供了技术保障。

关键词: 光学系统设计; 深空探测; 宽光谱; 图像拼接

中图分类号: O433.1; TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0066

Design of optical system with wide spectrum and large field of view

REN Feng^{1,2*}, ZHANG Zhi-jie², FU Bei-bei³, LIU Bo-Liang³, JIA Xue-feng³

- (1. School of Engineering, Changchun Normal University, Changchun 130031, China;
2. Research and Development Center, Fawer Automotive Parts Limited Company, Changchun 130022, China;
3. Faw-Volkswagen Automotive Company Ltd., Changchun 130011, China)

* Corresponding author, E-mail: rfcust@126.com

Abstract: An optical System with wide spectrum and large field of view was designed to meet the needs of the large detection range of space cameras. For further study of the structure, performance index and imaging quality of the optical system, three parallel optical tubes were used for ideal image plane mosaic with one image, so as to realize simulation detection and image scanning of infinite targets of the camera. Then the scanning image was compared with the simulated image, thus achieving dynamic parameter detection of the camera in laboratories. The simulation and experiment results show that the focal length of the optical system is 100 mm, the F is 27 and the aperture diameter is 25 mm. The target image is clear with high quality, the optical transfer function reaches the diffraction limit and the distortion is better than 1%. The system has important significance for dynamic detection of space cameras and provides technical guarantee for product test and finalization.

Key words: optical system design; deep space exploration; wide spectrum; image stitching

收稿日期: 2017-06-30; 修订日期: 2017-07-16.

基金项目: 重大横向课题(No. YSSB10B1212-91)

1 引 言

在现代战争中,如何获取有效的战斗信息成为战争决胜的关键点之一。飞机是航空遥感信息获取设备主要的搭载平台,并逐渐向智能无人化方向发展^[1-4]。在诸多的航空遥感信息获取手段中,普通相机可以获得目标的二维图像,以此了解目标的空间影像信息^[5];光谱仪可以获得目标的光谱特性曲线,以此研究目标的特性。随着成像技术的发展,将成像相机与光谱仪相结合,通过光谱成像相机获取目标的二维空间和一维光谱信息,形成图谱合一的综合图像信息,得到可以反映出被测物体几何影像和物理化信息的光谱图像,实现对目标的探测与识别^[6-7]。因此,相比于传统单一的照相机或光谱仪,将光谱成像探测技术应用于无人机平台来获取战场信息,将极大提高航空遥感信息获取的水平,不仅具有极大的优越性,还具有较强的技术先进性和现实意义。

鉴于无人机载宽光谱成像仪器的军事应用价值和社会效益^[8-10],本文设计了一种宽光谱无限远动态目标模拟系统。该系统可在实验室内模拟宽光谱航空相机实时的工作状态,产生运动的宽光谱地面景物目标,准确评估航空相机工作及成像质量;同时,还能够仿真航空相机的动态分辨率、成像幅宽等参数测试手段,建立外场试飞测试技术模型,指导鉴定试飞方案,并可解算和分析不同飞控条件下的参数测试结果,评估航空相机的自身性能,为测试试验提供可靠的试验依据,从而提高航空相机整体的检测效率,降低试验风险和成本。

2 光学系统设计

2.1 光学系统的性能指标

根据被测相机的技术指标要求,即进行大视场的地物目标成像,这里采用 3 组平行光管拼接来实现大视场、宽光谱无限远目标模拟。平行光管物面与数字光处理(Digital Light Processing,

DLP)图像发生装置相连接,其内部的数字微镜装置(Digital Micromirror Device, DMD)芯片微镜阵列数为 $1\ 920 \times 1\ 080$,光谱波段为 $0.4 \sim 1.0\ \mu\text{m}$,微镜的偏转角度为 $\pm 12^\circ$,同时平行光管视场角要与被测相机视场角相匹配。由于被测相机的焦深固定,无限远动态目标模拟光学系统成像要在其范围内,才能准确评价被测相机的成像质量。

综上,计算得出光学系统的设计指标如下:

- (1) 焦距: 200 mm;
- (2) 物空间数值孔径: 0.04;
- (3) 视场角: $\pm 8^\circ$;
- (4) 谱段: 450~1 000 nm;
- (5) 调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)(平均): $\text{MTF} \geq 0.7(60\ \text{lp/mm})$;
- (6) 温度: $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

2.2 光学系统设计结果

平行光管是一种可以实现对无穷远目标的模拟,同时还可以射出平行光束的精密光学仪器。根据几何光学原理,有限远的点光源从焦平面处发出的光经过透镜组后成为一束平行光,分划板的像在物镜像空间的无穷远处,从而实现了无穷远目标的模拟。

根据光学系统的指标要求,设计单个平行光管的初始光学结构,由于需要三组平行光管拼接,应用 ZEMAX 中的多重结构,并经过玻璃选择及透镜优化达到理想的像质要求,得到的光学系统光路如图 1 所示。

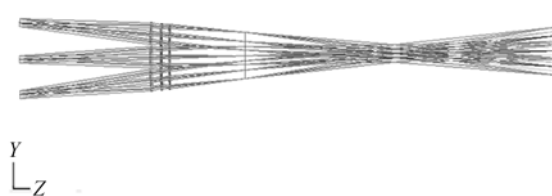


图 1 宽光谱无限远光学系统的光路图

Fig. 1 Layout of optical system with wide spectrum and infinite field

改进的平行光管焦距为 100 mm,单组视场为 $\pm 8^\circ$, F 数为 27,口径为 $\varphi 25\ \text{mm}$,仿真得到的结构光学数据如图 2 所示。

Surf.Type	Comment	Radius	Thickness	Glass
OBJ	Standard	Infinity	143.015245	
1*	Standard	55.016927	2.301161	H-ZK11
2*	Standard	-797.083855	9.588171	
3*	Standard	-55.810827	1.150981	H-LAF4
4*	Standard	98.282591	7.402068	
5*	Standard	-295.392381	1.917634	1.49,50.8
6*	Standard	-43.798766	82.074746	
7	Coordinate B..		0.000000	-
STO	Paraxial		338.975522	M
IMA	Standard	Infinity	-	

图 2 光学数据列表
Fig. 2 List of optical data

3 光学系统优化

3.1 仿真分析结果

该光学系统的成像质量评价指标主要有点列图、调制传递函数(MTF)以及包围能量。由于本系统具有一定的特殊性,它将狭缝色散到探测器上形成若干狭缝的光谱像,系统的 MTF 曲线和包围能量曲线的评价都是针对物体形成单个像的情况而言,对单个物体成多个像的情形无法给出

很好的评价。在 ZEMAX 仿真设计时,基于一定的光谱特性曲线,设定 450,490,540,610,680,780,880 和 1 000 nm 8 个中心波长进行分析。图 3 为全系统点列图,由图可以看出,不同中心波长在被测目标上色散开的尺度及其对应的 8 个点像。

从单色光成像的角度可以评价各中心波长的成像质量。各中心波长的点列图如图 4 所示,可以看出所有波长的均方根(Root Mean Square, RMS)直径都在 8 μm 内,基本接近艾里斑尺寸,满足探测器的探测要求。

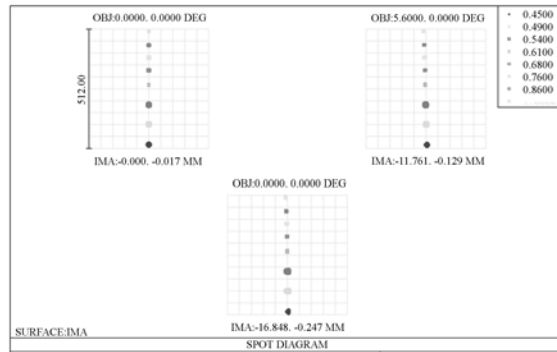
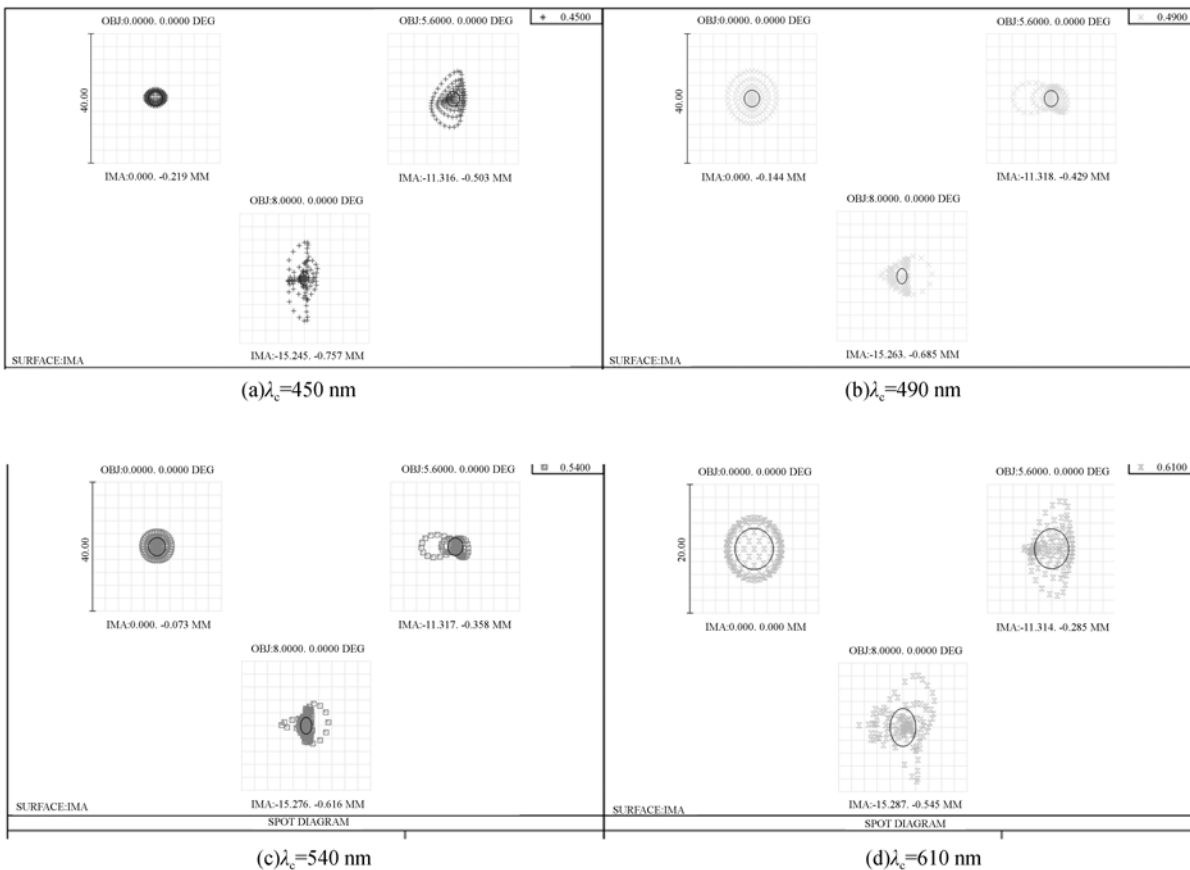


图 3 光学系统点列图
Fig. 3 Spot diagram of optical system



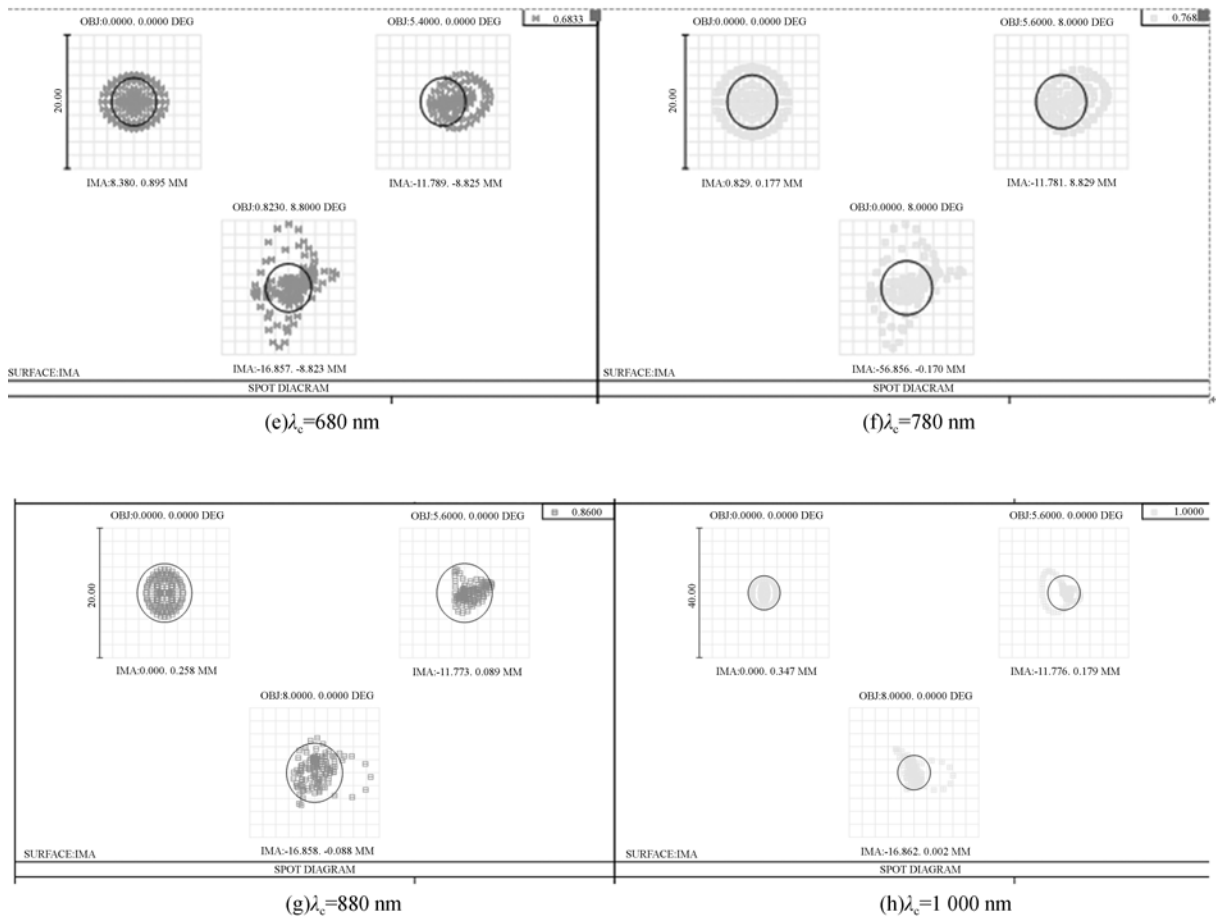


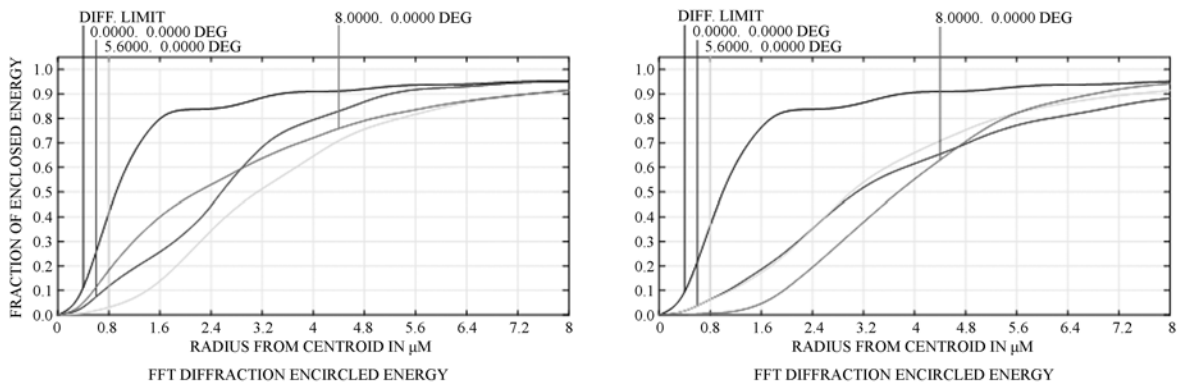
图 4 8 种单色光下光学系统的点列图

Fig. 4 Spot diagrams of optical system with eight monochromatic lights

3.2 实验结果分析

通过仿真得出了各中心波长在 $3 \mu\text{m}$ 内的包围能量, 由此可知, 在像元尺寸的范围基本集中了 75% 以上的能量, 能够满足使用要求, 仿真结果如图 5 所示。

为了进一步验证仿真分析的准确性, 本文针对该光学系统进行了实验测试, 系统主要由 CCD 相机、平行光管、DLP 图像发生装置、控制系统和机械系统等组成。实验结果如图 6 所示。



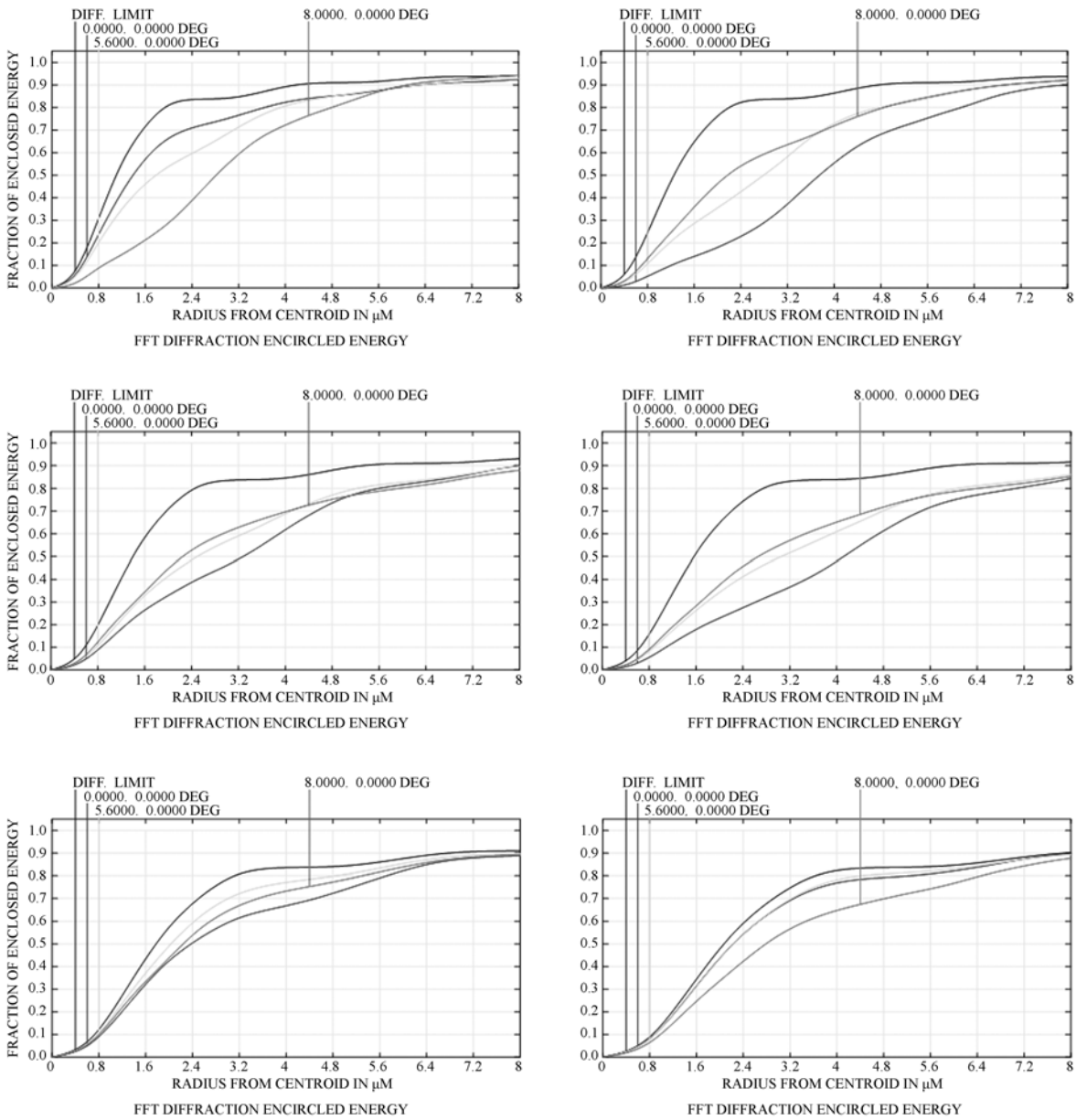


图 5 8 种单色光下系统的能量包围曲线

Fig. 5 Simulation of enclosed energy curves of optical system with eight monochromatic lights

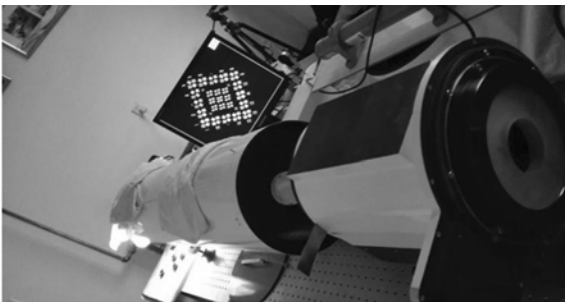


图 6 实验结果

Fig. 6 Experimental results

5 结 论

本文根据系统要求设计了一种宽光谱、大视场的准直光学系统,其波段为 450~1 000 nm,该系统利用 3 组平行光管进行高分辨率大图像拼接,实现了无限远动态目标的清晰成像,然后对系统结构进行优化。在其光谱波段 0.4~1.0 nm,取 8 个典型中心波长评价各个波长的成像质量。仿真与实验结果表明,该光学系统的成像质量达

到了衍射极限, 畸变优于 1%, 满足各种对陆探测

任务的需求。

参考文献:

- [1] 汪伟, 沈志学. LCTF 机载高光谱相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2015, 44(7): 0711003
WANG W, SHEN ZH X. Optical system design of LCTF-based airborne high spectral resolution camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7): 0711003. (in Chinese)
- [2] 杜言鲁, 丁亚林, 许永森, 等. TDI-CCD 全景式航空相机对地目标定位的算法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0328003.
YAN Y L, DING Y L, XU Y S, *et al.*. Geo-location algorithm for TDI-CCD Aerial panoramic camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0328003. (in Chinese)
- [3] 任焕焕, 阮萍, 何建伟, 等. TDI-CCD 空间立体相机辐射定标研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3476-3480.
REN H H, RUAN P, HE J W, *et al.*. Study of the radiometric calibration of TDI-CCD spatial stereo camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3476-3480. (in Chinese)
- [4] 何玲平, 陈波, 张宏吉, 等. 极紫外波段空间相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1036-1041.
HE L P, CHEN B, ZHANG H J, *et al.*. Radiation calibration of EUV space cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1036-1041. (in Chinese)
- [5] 檀立刚, 戴明, 刘晶红, 等. 机载光电测量设备目标自主定位误差分析 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3133-3139.
TAN L G, DAI M, LIU J H, *et al.* Error analysis of target automatic positioning for airborne photoelectric measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3133-3139. (in Chinese)
- [6] 周前飞, 刘晶红, 熊文卓, 等. 机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3133-3139.
ZHOU Q F, LIU J H, XIONG W ZH, *et al.*. Multi-target self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 3133-3139. (in Chinese)
- [7] 徐诚, 黄大庆. 无人机光电侦测平台目标定位误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2265-2270.
XU CH, HUANG D Q. Error analysis for target location with unmanned aerial vehicle electro-optical detection platform[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(10): 2265-2270. (in Chinese)
- [8] 刘志明, 朱明, 陈黎, 等. 长焦距全景式航空遥感器像拖影分析及补偿抑制方法[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711001.
LIU ZH M, ZHU M, CHEN L, *et al.* Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0711001. (in Chinese)
- [9] 宁永慧, 郭永飞. TDICCD 拼接相机的像元响应非均匀性校正方法[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 386-394.
NING Y H, GUO Y F. Correction of pixel response non-uniformity in TDICCD mosaic camera[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(7): 386-394. (in Chinese)
- [10] 吴厚德, 许文海. 多输出 CCD 接缝的校正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 454-461.
WU H D, XU W H. Correction of seams for multiple output CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 454-461. (in Chinese)

作者简介:



任 峰(1982—), 男, 吉林镇赉人, 博士, 讲师, 2005 年、2012 年于长春理工大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事光机电一体化产品的研发工作。E-mail: rfcust@126.com



张志杰(1983—), 男, 黑龙江肇州人, 硕士, 工程师, 2006 年、2012 年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事机电一体化产品的研发工作。E-mail: zjzcom@126.com