

# 地球临边紫外环形成像仪几何定标技术研究

杨小虎 王淑荣\* 黄煜

(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** 针对地球临边紫外环形成像仪的结构特点及高精度几何定标的需要, 提出了一种基于紫外平行光管、高精度经纬仪及六维转台等设备进行的几何定标新方法。通过构建相应的几何定标新装置, 实现了地球临边紫外环形成像仪超大临边视场的几何定标。几何定标结果显示, 仪器在临边高度方向与理论设计符合程度在 2 pixel 以内, 而在临边方位方向与理想情况偏差最大为 25 pixel。不确定度分析表明, 仪器在临边高度和方位方向上的几何定标不确定度分别为 0.488 pixel 和 0.612 pixel, 均达到亚像素级精度。几何定标新方法及装置对后续同类型仪器的前期光机装调及检测提供了重要参考和实现平台。

**关键词** 几何光学; 紫外环形成像仪; 几何定标; 临边高度方向; 临边方位方向; 不确定度

**中图分类号** TP706 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0913004

## Research of Geometric Calibration of the Earth Annular Ultraviolet Limb Imager

Yang Xiaohu Wang Shurong Huang Yu

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

**Abstract** Considering the design feature and requirement in high precision of geometric calibration of the earth annular ultraviolet (UV) limb imager, a new method based on UV collimator, high precision theodolite and six-dimension rotator is proposed. Geometric calibration is done as soon as the new device is built-up. The result shows an agreement of 2 pixel or less with the theoretical design in limb altitude and a biggest deviation of 25 pixel in limb azimuth orientation. The combined standard uncertainty analysis indicates a 0.488 pixel and a 0.612 pixel uncertainty in limb altitude and azimuth orientation respectively, both reaching sub-pixel precision. With the successful accomplishment of the geometric calibration, the method and the device offer an important reference and a realized platform for the pre-optic-mechanical installing and measuring of the similar type of instrument.

**Key words** geometric optics; annular UV imager; geometric calibration; limb altitude; limb azimuth; uncertainty

**OCIS codes** 010.0280; 350.5610; 150.1488

## 1 引 言

光学遥感成像类仪器用于研究大气层中臭氧等痕量气体及气溶胶的含量及相对分布时, 其探测数据不仅需要通过辐射定标来确定其大小, 而且还要通过几何定标来确定仪器像素与视场角或观测目标之间的对应关系, 两者缺一不可。成像类仪器各像素与视场角或观测目标之间的对应关系, 一般通过仪器在卫星平台上的坐标及卫星自身的姿态、轨道

参数以及仪器自身的成像几何模型给出<sup>[1-6]</sup>。目前, 国内外常用的航空测绘相机几何标定方法有室内或野外检校场法、自标定方法等, 其标定过程完善且精度较高, 但对于空间分辨率低的航天成像仪例如超大视场紫外(UV)成像类仪器而言, 检校场的建设及标定成本太大, 自标定法成像不够清晰使得标定精度较低, 同时紫外波段能量较弱也是制约标定精度的关键一环<sup>[7-12]</sup>。

收稿日期: 2014-04-18; 收到修改稿日期: 2014-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(41074126)、国家 863 计划(2009AA12Z151)

作者简介: 杨小虎(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事空间紫外遥感仪器性能检测及辐射定标等方面的研究。

E-mail: yangxiaohu861106@163.com

\* 通信联系人。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

本文基于地球临边紫外环形成像仪的结构特点及高精度几何定标的需要,提出了一种适用于超大视场且紫外信号足够强的几何定标新方法。通过构建相应的几何定标新装置,对地球临边紫外环形成像仪超大临边视场进行了高精度的几何定标研究。

## 2 仪器简介

地球临边紫外环形成像仪是一台天基多方位探测的滤光片型成像仪,其主要技术指标如表 1 所示<sup>[13-15]</sup>。

表 1 地球临边紫外环形成像仪主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of the earth annular UV limb imager

Item	Value
Focal length /mm	22.37
$F$	3.3
Field of view /( $^{\circ}$ )	0~10 (center) 140~146 (limb)
Spatial resolution /km	4(3 pixel binned)
	265±10
Spectral range /nm	295±5 360±3
Charge coupled device pixel size / $\mu\text{m}$	13×13
Charge coupled device array size /pixel	1024×1024

在结构形式上,其采用折反射式视场压缩器将临边半视场角  $70^{\circ}\sim 73^{\circ}$  压缩后以  $13^{\circ}\sim 16^{\circ}$  进入后续光学镜头成像,而中心  $10^{\circ}$  视场不通过压缩直接成像,依据光线轨迹,反射锥底角应为  $61.5^{\circ}$ 。此外,电机驱动下的滤光片轮结构可依据探测需要选择相应的滤光片,从而保证进入仪器内部的波段准确。仪器在轨运行期间,中心视场观测天底  $10^{\circ}$  视场角内的大气辐射及地面亮度分布,临边视场的径向和径向垂直方向则分别代表地球临边辐射随临边高度和方位变化的情况。图 1 即为仪器整机结构及探测模式示意图。

地球临边紫外环形成像仪的研制目的在于通过对地球临边多个方位大气的同时探测,反演同一时间不同方位下大气中臭氧及二氧化氮的浓度及相对分布规律,同时也为地球大气环境探测和空间物理研究提供新的信息源和发展新的设备,并可获得地球紫外背景辐射场,为目标识别和跟踪定位等应用提供基础<sup>[13,16]</sup>。依据其成像机理,仪器像面上每个像素均代表一个特定的探测方位,其单像素对应临边高度或方位方向均为  $1.33\text{ km}$ ,对应角分辨率约为  $0.03^{\circ}$ ,由于其紫外工作波段及临边超大视场 ( $140^{\circ}\sim 146^{\circ}$ ) 的限制,传统的航空相机几何标定法成本太大,且无法满足其能量、视场以及高精度几何定标的要求。基于此,提出了一种能逐点精确模拟仪器实际几何观测情况的新方法。

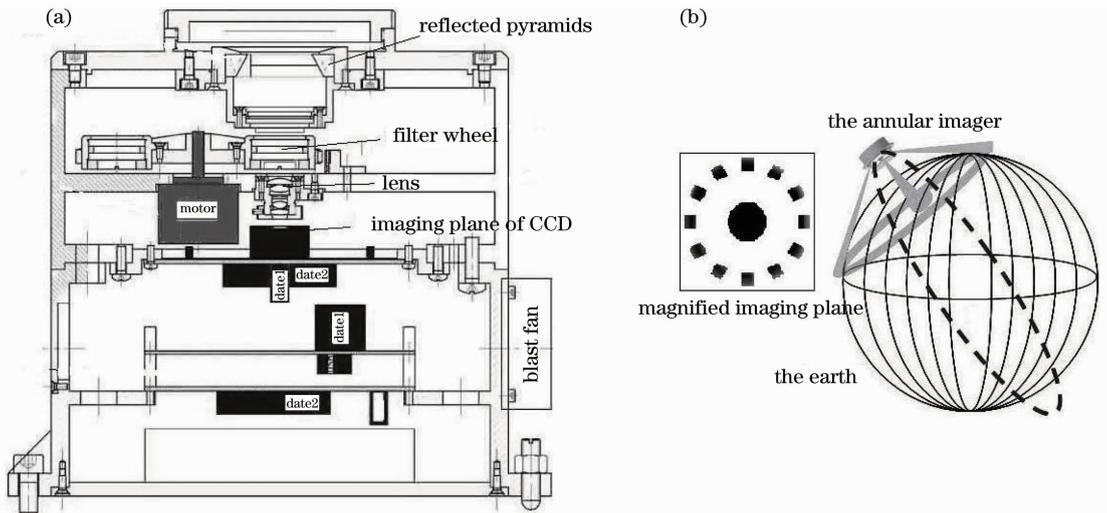


图 1 仪器整机结构及探测模式示意图。(a) 仪器整机结构;(b) 仪器探测模式

Fig. 1 Structural drawing and detecting modes of the whole imager. (a) Structural drawing; (b) detecting mode

## 3 新方法原理及装置构建

地球临边紫外环形成像仪几何定标新方法的原理主要是利用平行光管和折转平面反射镜模拟仪器

任意临边方位的无穷远观测目标,并通过高精度莱卡经纬仪及六维转台系统,建立仪器像面上不同像素点与无穷远观测目标之间的一一对应关系,再结

合无穷远观测目标在仪器安装面上精测立方镜坐标系下的坐标,从而得到仪器像面各像素在精测立方镜坐标系下的相对坐标,其中,中心视场可看作临边视场入射角趋向于0过程中的特例。仪器在轨运行时,通过精测立方镜坐标系与卫星坐标系的转换关系,即可将该相对坐标转换为仪器的实际观测方向。

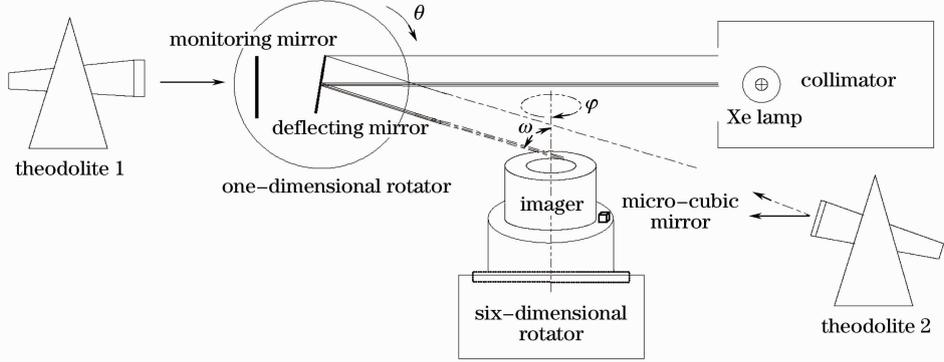


图2 仪器几何定标装置结构及光路示意图

Fig. 2 Structural and optical path drawing of geometric calibration device of the imager

图2中,仪器水平放置的前提下,莱卡经纬仪2的俯仰角即为折转光束相对仪器光轴的夹角 $\omega$ ,通过设置莱卡经纬仪2的俯仰角读数,调节一维转台带动折转反射镜旋转,使折转光束沿仪器临边观测高度方向不断变化,在保持折转光束相对仪器光轴夹角 $\omega$ 一定的前提下,通过六维转台带动仪器在水平面内沿光轴旋转 $\varphi$ ,使折转光束相对仪器沿临边观测方位方向不断变化,通过折转光束相对仪器沿临边高度及方位方向的组合变化,即可得到仪器像面上对应临边任意方位无穷远目标的成像位置,其中折转光束模拟的仪器临边高度及方位方向任意角度值可通过莱卡经纬仪2以及高精度六维转台导入精测立方镜坐标系下。此外,莱卡经纬仪2观测精测立方镜后,莱卡经纬仪1负责监测及调节折转光束的角度,尤其对于 $\omega$ 趋近于0过程中对应的中心视场几何定标情况,莱卡经纬仪2观测调节折转光束角度已比较困难,此时莱卡经纬仪1监测调节折转光束角度起主要作用,需要注意的是当莱卡经纬仪1监测的监视平面镜旋转 $\theta$ 角,折转光束相对仪器光轴的夹角 $\omega$ 将变化 $2\theta$ 角。

#### 4 几何定标及结果分析

理想情况下,通过光学设计模拟,可知地球临边紫外环形成像仪的像面由中心 $5^\circ$ 视场形成的圆以及临边 $13^\circ\sim 16^\circ$ 视场形成的正12边形构成,且中心圆及临边12边形均以像面中心像素(512,512)为中

整套装置主要包括紫外平行光管、折转反射镜、六维转台及监测经纬仪等设备,其结构及光路如图2所示。光源采用日本滨松300W大功率氙灯,折转反射镜表面蒸镀Al+MgF<sub>2</sub>膜层提高紫外波段反射率,同时折转反射镜使得光路折转,整套装置体积大大缩小。

心。仪器像面理想视场分布如图3所示,为叙述方便,将地球临边紫外环形成像仪像面临边视场按时钟位置进行编号。

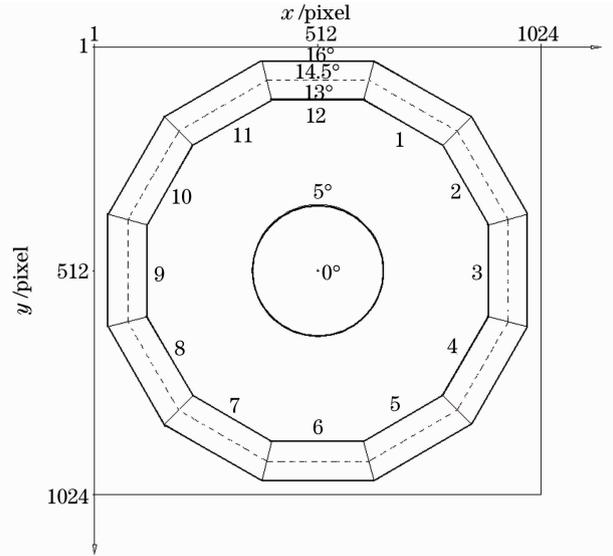


图3 仪器像面理想视场分布示意图

Fig. 3 Drawing of field distribution of ideal image surface of the imager

依据图2所示,将地球临边紫外环形成像仪同轴固定在六维转台旋转面中心,通过莱卡经纬仪对准固定在仪器安装面上的精测立方镜从而指导六维转台调节仪器始终处于水平状态。依次调节折转光束角度 $\omega$ 等于 $70^\circ$ 和 $73^\circ$ ,通过六维转台在水平面内旋转,得到对应内外侧 $\omega$ 角的仪器像面几何视场定标结果,如图4所示。

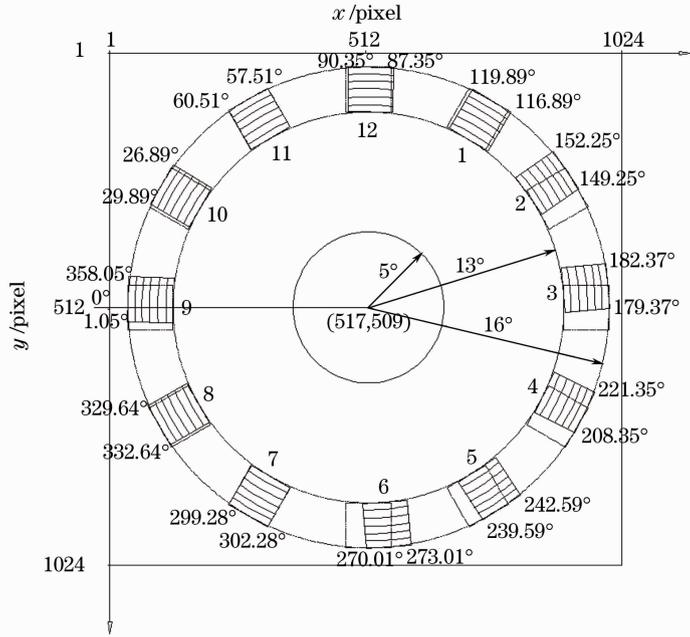


图 4 仪器像面实际视场分布示意图

Fig. 4 Drawing of field distribution of real image surface of the imager

图 4 中,中心小圆为中心  $5^\circ$  视场在像面的实际成像区域,临边圆环为临边  $13^\circ \sim 16^\circ$  视场在像面上的分布上下限位置,圆环内侧  $13^\circ$  圆经反射锥对应临边  $70^\circ$  方向,圆环外侧  $16^\circ$  圆经反射锥对应临边  $73^\circ$  方向。临边圆环中,阴影区域为 12 块反射锥方向实际有效的不受相邻反射锥干扰的入射方位角度定标结果,与之相邻的非阴影矩形框为其理想情况下的位置,圆环外侧的角度值为阴影区域边界相对于像面左侧水平线基准  $0^\circ$  的角度差。

由图 4 可知,仪器  $\pm 5^\circ$  中心视场及  $140^\circ \sim 146^\circ$  临边视场在探测器上的成像区域关于像素点 (517, 509) 对称分布,这是由于仪器前面的光学系统光轴延长线与探测器相交于 (517, 509)。临边 12 块分视场在俯仰方向基本位于临边圆环内,偏差不超过 2 pixel,这说明各反射锥角度一致性好,且精度很高,事实上,由 12 棱锥加工、切割过程可知,各棱锥母线与底面的夹角尽管可能不是精确的  $61.5^\circ$ ,但各块之间差异在  $30''$  之内,同时由于粘接过程始终保持各棱锥底面在同一水平面上,安装时该底面平面严格与透镜组系统光轴垂直,因而各棱锥沿临边俯仰相同角度下对应的像素离中心点的距离也基本相同。临边 12 块分视场在方位方向与理想成像位置存在差异,尤其是第 2~6 块以及第 9 块与理想位置偏差明显,最大偏差为第 6 块的 25 pixel,显然第 1~2 块以及第 6~7 块反射锥之间存在一个较大的偏差,第 9 块反射锥也稍微偏离了理论方向一点,这

些偏差均是在反射锥粘接过程中,反射锥加压点胶不均匀造成的,同时可以看出,某一方向反射锥粘接出现大偏差可能影响相邻好几块粘接方向。由几何定标结果可知,临边方位角随反射锥整体沿顺时针方向逐渐增大,此与各反射锥本身对应的临边子视场方位增大方向刚好相反,这主要是为了减小紫外波段的多次反射损失,各子视场经过反射锥一次反射变成镜像的缘故。

## 5 不确定度分析

地球临边紫外环形成像仪几何定标过程中,不确定度主要包括:莱卡经纬仪对准及读数不确定度,精测立方镜自身及固定后角度不确定度,一维及六维转台当量不确定度以及仪器自身测量不确定度等。

莱卡经纬仪采用十字丝自准直,对准精度为  $10''$ ,在实验中,由地面轻微震动引起其自水平调节气泡移动范围也为  $10''$ ,其读数精度为  $0.5''$ ;

精测立方镜各垂直面与底面的角度最大不确定度为  $6''$ ,其固定在仪器水平安装面过程中引入的不确定度为  $28.3''$ ;

一维及六维转台一度均细分为 800 步,对应当量为  $4.5''$ ,方位角测试时由六维转台停顿引起的转动角度不确定度最大不超过  $40''$ ;

由于整套装置中某一刻进入仪器视场的并非绝对平行光,因而仪器像面上对应任意方向都是一

个小弥散斑,对小弥散斑高斯拟合确定中心像元位置时,偏差最大不超过 0.3 pixel,对应 36'';

以上各不确定度分析按照 NIST 的 TN1297 综合不确定度公式<sup>[17-18]</sup>:

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \mu^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \mu(x, y), \quad (1)$$

表 2 地球临边紫外环形成像仪几何定标不确定度分析

Table 2 Uncertainty analysis of geometric calibration of the earth annular UV limb imager

Source of uncertainty		Value of uncertainty	
		Pitching angle	Azimuth angle
Leica theodolite	Auto-collimate		10''
	Shaking of ground		10''
	Reading precision		0.5''
Cubic mirror	Self-precision		6''
	Viscid fixation		28.3''
One-dimensional rotator	Footsteps		4.5''
Six-dimensional rotator	Footsteps		4.5''
	Halt error	/	40''
Imager	Gauss fitting error		36''
Combined standard uncertainty		52.67''	66.14''

表 2 中,地球临边紫外环形成像仪在临边高度和方位方向的几何定标不确定度分别为 52.67'' 和 66.14'', 结合仪器单像素角分辨率 0.03° 可知其分别对应 0.488 pixel 和 0.612 pixel。需要注意的是在临边高度及方位方向的几何定标中,莱卡经纬仪均被独立的使用 3 次,分别是经纬仪 2 调节入射光方向或经纬仪 1 监测入射光方向各 1 次以及两台经纬仪同时监视精测立方镜两垂直面调节仪器水平 2 次,因此合成标准不确定度中由莱卡经纬仪引入的不确定度有一个 $\sqrt{3}$ 倍。

## 6 结 论

地球临边紫外环形成像仪几何定标结果显示,其在临边高度及方位方向的定标不确定度分别为 0.488 pixel 和 0.612 pixel,均达到亚像素级精度,这也从侧面证明了所采用高精度几何定标方法的有效性。此外,几何定标的整套装置及方法还可以反过来用于后续同类型仪器如全景成像仪及姿态敏感器等的前期光机装调及检测,避免后期样机集成后出现镜头光轴与探测器中心不重合、反射锥粘接理论与实际偏差较大等情况。

## 参 考 文 献

1 Li Deren, Wang Mi. On-orbit geometric calibration and accuracy

由于各不确定度不相关联,(1)式改为

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \mu^2(x_i). \quad (2)$$

由(2)式计算可得总的合成标准不确定度如表 2 所示。

assessment of ZY-3[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(3): 1-6.  
 李德仁,王 密.“资源三号”卫星在轨几何定标及精度评估[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 1-6.  
 2 Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen, et al.. Grouped approach algorithm for mapping camera calibration based on method of exact measuring angle[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0112005.  
 远国勤,丁亚林,惠守文,等. 基于精密测角法的测绘相机分组渐进标定算法[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0112005.  
 3 Wu Fanlu, Liu Jianjun, Ren Xin, et al.. Deep space exploration panoramic camera calibration technique based on circular markers [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1115002.  
 吴凡路,刘建军,任 鑫,等. 基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1115002.  
 4 Wu Guodong. Calibration of inner orientation parameters and distortion for three-mirror off-axis TDICCD camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 462-467.  
 吴国栋. 离轴三反时间延迟积分 CCD 相机内方位元素和畸变的标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 462-467.  
 5 Xu Yong, Guo Pengyu, Long Gucan, et al.. Research on fully automatic camera calibration method [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612007.  
 许 勇,郭鹏宇,龙古灿,等. 摄像机全自动标定方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612007.  
 6 Gu Feifei, Zhao Hong, Bu Penghui, et al.. Analysis and correction of projection error of camera calibration ball[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1215001.  
 谷飞飞,赵 宏,卜鹏辉,等. 用于相机标定的球靶标投影误差分析与校正[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1215001.  
 7 Zheng Fengjie, Yu Tao, Chen Xingfeng, et al.. Application of direct linear transformation in geometric calibration for remote sensing camera [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2011, 34(2): 26-29.  
 郑逢杰,余 涛,陈兴峰,等. DLT 方法在遥感相机几何定标中

- 的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(2): 26-29.
- 8 Huang Jing, Gao Xiaodong, Ma Wenli, *et al.*. Accurate geometric calibration of large resolution digital aerial survey camera[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 138-140.
- 黄 静, 高晓东, 马文礼, 等. 大面阵数字航测相机的精密几何标定[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 138-140.
- 9 Zhang Xiaojuan, Zhang Guoyu, Sun Gaofei, *et al.*. Calibration of star simulator based on LCOS splicing technology with wide-field [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11): 2996-3001.
- 张晓娟, 张国玉, 孙高飞, 等. 大视场 LCOS 拼接星模拟器标定方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 2996-3001.
- 10 Wang Meizhen, Liu Xuejun, Lu Yue, *et al.*. Camera self-calibration using multiple geometric constraints in a single image [J]. Journal of Geo\Information Science, 2012, 14(5): 644-651.
- 王美珍, 刘学军, 卢 玥, 等. 多几何特征约束的单幅图像相机自标定方法[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(5): 644-651.
- 11 Hui Shouwen. Geometric calibration of airborne mapping camera [J]. Infrared, 2013, 34(9): 13-18.
- 惠守文. 航空测绘相机几何标定方法[J]. 红外, 2013, 34(9): 13-18.
- 12 Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Gao Yujun, *et al.*. Design of star sensor ground calibration equipment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2822-2827.
- 孙高飞, 张国玉, 高玉军, 等. 星传感器地面标定设备的设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2822-2827.
- 13 Yu Xiangyang, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Development of ultraviolet annular imager for earth limb and nadir sounding simultaneously[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1211004.
- 于向阳, 王淑荣, 黄 煜, 等. 地球临边/天底同时探测的紫外环形成像仪[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1211004.
- 14 Wei Zhijun, Liu Xiaojun. Three-axis ultraviolet optical sensor [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(11): 86-90.
- 尉志军, 刘晓军. 三轴紫外光学成像敏感器[J]. 光电工程, 2008, 35(11): 86-90.
- 15 Douglas Pledger, James Billing-Ross, Ralph Castain, *et al.*. Low cost ultraviolet 3 axis attitude sensor system [J]. SPIE, 1993, 1940: 231-238.
- 16 Yang Xiaohu. Study on Performance Evaluation and Radiometric Calibration of the Earth Limb Annular Imager[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. 21-103.
- 杨小虎. 地球临边环形成像仪性能评价及辐射定标研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012. 21-103.
- 17 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101004.
- 杨小虎, 王淑荣, 黄 煜. 大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101004.
- 18 Xu Wenbin, Zheng Xiaobing, Yi Weining. Cross-calibration method based on hyperspectral imager Hyperion[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0528002.
- 徐文斌, 郑小兵, 易维宁. 基于超光谱成像仪 Hyperion 的交叉定标方法[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0528002.

栏目编辑:何卓铭