

# 比值辐射计响应特性

李孟凡<sup>1,2,3</sup> 徐伟伟<sup>1,3</sup> 邹 鹏<sup>1,3</sup> 张黎明<sup>1,3</sup> 孟炳寰<sup>1,3</sup> 杨本永<sup>1,3</sup> 洪津<sup>1,3</sup> 乔延利<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

<sup>3</sup>中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 比值辐射计是一种监视漫反板双向反射分布函数(BRDF)在轨衰变的有效装置, 太阳观测通道相对几何因子(简称几何因子)是比值辐射计在轨应用前需要精确测量的关键参数之一。对比值辐射计工作原理进行了介绍, 在实验室内以卤钨灯代替室外的太阳对比值辐射计几何因子进行了重复测试, 根据几何因子统计结果结合测试误差进行比值辐射计 470、650、825 nm 波段几何因子测试不确定度的分析。结果表明, 比值辐射计几何因子测试不确定度在 470 nm 波段为 0.48%, 在后两个波段均优于 0.16%, 符合该参数的测试需求, 为后期星上定标不确定度的评估以及星上定标系数的获取提供了有效的数据支撑。

**关键词** 遥感; 星上定标; 比值辐射计; 漫射板稳定性监视; 几何因子; 不确定度

中图分类号 V557+4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0212005

## Response Characteristic of the Ratioing Radiometer

Li Mengfan<sup>1,2,3</sup> Xu Weiwei<sup>1,3</sup> Zou Peng<sup>1,3</sup> Zhang Liming<sup>1,3</sup> Meng Binghuan<sup>1,3</sup>

Yang Benyong<sup>1,3</sup> Hong Jin<sup>1,3</sup> Qiao Yanli<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Ratioing radiometer (RR) is a key instrument which can track the on-orbit degradation in bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of on-board solar diffuser (SD), and its response to sun angle of incidence ( $K$  factor) is an important parameter which need to be measured pre-launch. A brief overview of the principle of RR is provided in this paper,  $K$  factor of each band of RR is acquired after several round of tests, which take halogen lamp in the lab instead of sunlight outdoor as light source. Uncertainty of  $K$  factors at 470, 650, 825 nm are acquired on the base of the data and error analysis. Result shows that the uncertainty of the  $K$  factor at 470 nm is 0.48% and within 0.16% at 650 nm and 825 nm, which meet the requirement of  $K$  factor uncertainty, providing valid basis for estimation of on-orbit calibration uncertainty and correction of the calibration coefficient.

**Key words** remote sensing; on-board calibration; ratioing radiometer; solar diffuser stability monitor;  $K$  factor; uncertainty

**OCIS codes** 280.4788; 010.0280; 120.6085; 150.1488

## 1 引言

近年来, 世界各国愈发重视地球环境、气候变化和资源开发情况, 相继开展了空间对地观测工作, 空间

收稿日期: 2015-8-25; 收到修改稿日期: 2015-10-15

基金项目: 中国科学院科技创新重点项目(KGFZD-125-13-006)、国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金(U1331111)

作者简介: 李孟凡(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事基于比值辐射计的星上定标方法及测试方法方面的研究。

E-mail: limengfan1989@163.com

导师简介: 洪津(1969—), 男, 研究员, 主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术方面的研究。

E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn(通信联系人)

遥测数据的应用已由定性描述地物目标基本特征逐渐发展为定量化诠释地球物理信息。绝对辐射定标将传感器的数字响应转化为绝对物理量,是遥感信息定量化过程的关键技术之一<sup>[1-2]</sup>。遥感器的地面辐射定标可保证它随卫星发射入轨后进行辐射度量的定量测量,但由于在轨运行期间空间环境的改变和光学元件、电子元器件的老化,地面辐射定标建立的数字响应与物理量之间的关系将不再适用,星上绝对辐射定标可以在空间平台上实时、高效地对遥感器进行在轨定标,是提高定量化遥感精度的重要环节,对遥感数据的可靠应用具有重要作用<sup>[3-4]</sup>。

基于太阳-漫射板(SD)的星上定标技术采用稳定的太阳照明漫反板,产生已知光谱辐亮度的近似朗伯面光源,实现对空间遥感器的太阳反射波段全系统、全口径的定标,该技术是星上绝对辐射定标的主要发展方向之一<sup>[5-6]</sup>。由于空间辐照、高能粒子轰击等因素的影响,漫射板的反射特性会发生衰变,导致星上定标精度下降。为此 James M Palmer 等<sup>[7-8]</sup>提出使用比值辐射计(RR)监视并校正漫射板在轨衰变,可以有效确保太阳-漫反板星上定标器在寿命期内具有较高的绝对辐射定标精度。该方法在美国的 Terra、Aqua 卫星的 MODIS, 以及 Suomi-NPP 卫星的 VIIRS 上均取得较好的应用效果,其中前者已在轨正常工作超过 12 年<sup>[9]</sup>。

为满足我国卫星遥感器定量化研究与应用,中国科学院安徽光学精密机械研究所开展了基于“太阳-漫反板-比值辐射计”的星上定标装置研制,要求辐射定标不确定度优于 5%,比值辐射计对漫反板双向反射分布函数(BRDF)的监视精度优于 1.5%。为达到上述研制目标,比值辐射计的各项光学特性参数需要精确测量。由于卫星在轨姿态以及定标季节的变化,太阳是以一定角度范围照明定标装置。比值辐射计太阳观测相对几何因子(简称几何因子)反映了太阳照明角度变化时比值辐射计输出的相对关系,是校正太阳入射角度影响、保证星上定标精度的关键参数之一,该参数的测试不确定度期望优于 0.5%。本文介绍了星上太阳-漫射板定标原理以及比值辐射计监视漫反板 BRDF 的方法,讨论了几何因子的实验室测试方法,最后对几何因子测试结果进行分析讨论。

## 2 理论介绍

### 2.1 星上定标原理

星上比辐射定标器主要由定标舱体、漫反板和漫反板稳定性监视器—比值辐射计构成,如图 1 所示。太阳照明漫反板形成已知辐亮度的漫射光源,作为星载遥感器在太阳反射波段的星上辐射标准,结合遥感器观测漫射板响应值得到其响应系数。在定标过程中,比值辐射计对漫射板反射特性进行监测跟踪,以实时校正辐射标准。

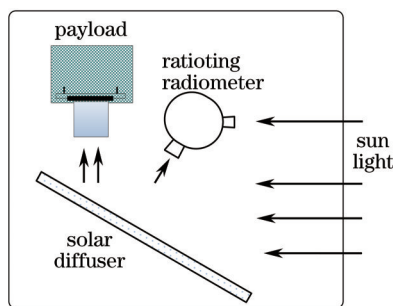


图 1 星上比辐射定标器原理图  
Fig.1 Principle of on-board calibrator

漫射板辐亮度  $L$  为

$$L = \cos \theta_{SD,t} E_{sun,t} \rho_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{PL,t_0}, \phi_{PL,t_0}) \Delta_{SD}, \quad (1)$$

上式中  $\theta_{SD}$ 、 $\phi_{SD}$  为漫射板坐标系下的太阳照明天顶角、方位角,根据卫星轨道、定标时刻,结合漫射板坐标系与卫星坐标系转换关系计算得到;  $\theta_{PL}$ 、 $\phi_{PL}$  为漫射板坐标系下星载遥感器观测漫射板的天顶角、方位角;  $t$  表示定标时间,  $t_0$  代表卫星发射后初次定标时刻;  $E_{sun,t}$  为大气外太阳辐照度,可根据定标时刻日地距离算出;  $\rho$  代表漫反板 BRDF,  $\rho_{lab}$  为卫星发射前最后一次实验室测量得到的漫射板双向反射分布函数<sup>[10-11]</sup>,此处假设卫星发射至初次定标时刻,漫反板 BRDF 未发生衰变;  $\Delta_{SD}$  为漫射板 BRDF 衰变因子:

$$\begin{aligned} \Delta_{SD} &= \frac{\rho_t(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{PL,t_0}, \phi_{PL,t_0})}{\rho_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{PL,t_0}, \phi_{PL,t_0})} \\ &= \frac{\rho_t(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{RR,t_0}, \phi_{RR,t_0})}{\rho_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{RR,t_0}, \phi_{RR,t_0})} \cdot \frac{\rho_t(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{PL,t_0}, \phi_{PL,t_0})/\rho_t(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{RR,t_0}, \phi_{RR,t_0})}{\rho_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{PL,t_0}, \phi_{PL,t_0})/\rho_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{RR,t_0}, \phi_{RR,t_0})} \end{aligned} \quad (2)$$

假设漫反板不同角度BRDF的衰变程度一致,那么(2)式可转换为:

$$\Delta_{SD} = \frac{\rho_t(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{RR,t_0}, \phi_{RR,t_0})}{\rho_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{RR,t_0}, \phi_{RR,t_0})} \quad (3)$$

式中  $\theta_{RR}$ 、 $\phi_{RR}$  分别为漫射板坐标系下比值辐射计观测漫射板的天顶角、方位角。

## 2.2 比值辐射计工作原理

比值辐射计原理如图2所示。比值辐射计有两个观测通道,分别用于观测太阳辐照度和漫反板辐亮度。以小型积分球作为以上两路的匀光器,采用多路辐亮度探测器(中心波长分别为470、650、825 nm)对积分球内壁辐亮度进行探测。通过观测立体角、入射孔径的设计,使两观测通道入射能量值相当。通过定标门控制,可便捷有效地实现太阳观测、漫射板观测与暗背景观测的切换<sup>[12]</sup>,得到漫射板/太阳辐射比值(简称辐射比)。将定标时刻获得的辐射比与卫星发射后首次定标时刻获得的初始辐射比相比对,通过角度修正,即可获得  $\Delta_{SD}$ 。

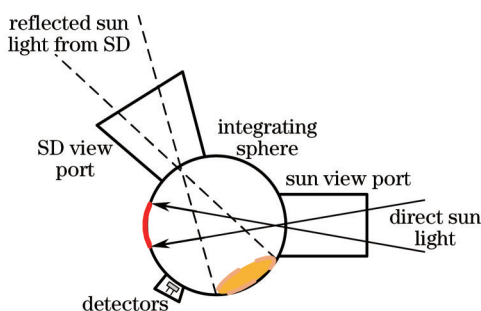


图2 比值辐射计原理图

Fig.2 Principle of ratioing radiometer

比值辐射计不同时刻太阳、漫反板观测的响应值为:

$$V_{SD,t}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}) = \cos \theta_{SD,t_0} E_{sun,t} \rho_t(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{PL,t_0}, \phi_{PL,t_0}) \eta_{SD,t} R_t \quad (4)$$

$$V_{SD,t_0}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}) = \cos \theta_{SD,t_0} E_{sun,t_0} \rho_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{PL,t_0}, \phi_{PL,t_0}) \eta_{SD,t_0} R_{t_0} \quad (5)$$

$$V_{sun,t}(\alpha_{t_0}) = E_{sun,t} \cos \alpha_{t_0} S_{sun} \eta_{sun,t} R_t \quad (6)$$

$$V_{sun,t_0}(\alpha_{t_0}) = E_{sun,t_0} \cos \alpha_{t_0} S_{sun} \eta_{sun,t_0} R_{t_0} \quad (7)$$

式中  $V_{SD}$  与  $V_{sun}$  分别表示比值辐射计对漫射板、对太阳的观测响应值;  $\alpha$  表示比值辐射计太阳观测轴线与太阳照明方向的夹角;  $\eta_{SD}$  与  $\eta_{sun}$  分别表示比值辐射计漫射板观测、太阳观测光调制因子,假设  $\eta_{SD}$  与  $\eta_{sun}$  的衰变程度一致;  $R$  表示探测器组件的响应率,认为单次定标过程中  $R$  不变。

将  $t$  时刻、 $t_0$  时刻获得的辐射比值进行比对,结果为:

$$\frac{V_{SD,t}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0})/V_{sun,t}(\alpha_{t_0})}{V_{SD,t_0}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0})/V_{sun,t_0}(\alpha_{t_0})} = \frac{\cos \theta_{SD,t} \rho_t(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{RR,t_0}, \phi_{RR,t_0}) K(\alpha_{t_0})}{\cos \theta_{SD,t_0} \rho_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_{RR,t_0}, \phi_{RR,t_0}) K(\alpha_{t_0})} \quad (8)$$

其中,  $K(\alpha)$  即为后文所讨论的几何因子:

$$K(\alpha) = \frac{V_{sun}(\alpha)}{V_{sun}(0^\circ)} \quad (9)$$

表征比值辐射计观测太阳时(漫射板观测口封闭),各波段探测器响应随太阳入射角度的变化规律,即各太阳入射角度响应以零度为参照进行归一化处理的结果。结合(3)、(8)式,得到漫射板 BRDF 修正因子为

$$\Delta_{SD} = \frac{V_{SD,i}(\theta_{SD,i}, \phi_{SD,i})/V_{sun,i}(\alpha_i)}{V_{SD,i_0}(\theta_{SD,i_0}, \phi_{SD,i_0})/V_{sun,i_0}(\alpha_{i_0})} \frac{\cos \theta_{SD,i_0} \rho_{lab}(\theta_{SD,i_0}, \phi_{SD,i_0}; \theta_{RR,i_0}, \phi_{RR,i_0}) K(\alpha_i)}{\cos \theta_{SD,i} \rho_{lab}(\theta_{SD,i}, \phi_{SD,i}; \theta_{RR,i}, \phi_{RR,i}) K(\alpha_{i_0})}, \quad (10)$$

式中第二项为太阳照明漫射板角度的修正系数,其测试方法不再做叙述;第三项为比值辐射计太阳观测角度变化的修正系数,由几何因子测量值计算得到。

### 2.3 比值辐射计太阳观测结构简介

比值辐射计太阳观测结构包括太阳观测孔径光阑和光阑筒,光阑筒结构如图 3 所示。太阳观测孔径光阑薄片安装于光阑筒底部中心位置,孔径光阑直径 0.5 mm,厚度仅为 0.02 mm,可有效减小光阑片厚度对实际受光面积的削减影响。光阑筒共有三级长条形狭缝光阑,用于接收狭缝长度方向 $\pm 10^\circ$ 、宽度方向 $\pm 1^\circ$ 范围内的照明光线,同时消除杂散光。

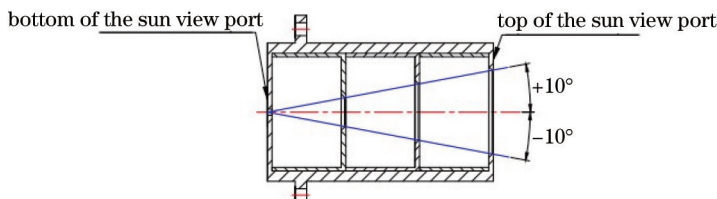


图 3 比值辐射计太阳观测结构图

Fig.3 Structure of the sun view port of RR

选取光阑筒前端面作为太阳观测孔径光阑的参考面,通过测定该基准面与卫星平台的角关系,可以在星上定标时换算出太阳照明光阑筒前端面的角度,进而查找相应角度几何因子测量值,得出漫射板修正因子。

## 3 几何因子测试方法

为保证测试精度,测试光源参数应接近于比值辐射计在轨定标时的太阳光参数,尽可能满足以下条件:

- 1) 发散角小于 $\pm 1^\circ$ ,确保光阑筒内部的长条形消杂光光阑不影响太阳观测孔径光阑对照度的接收;
- 2) 入射能量达到 0.1 个太阳常数,保证测试信噪比;
- 3) 非稳定性优于 0.2%,减少对测试结果的直接影响。

室外的太阳光与在轨接收的太阳能量和发散角最为接近,但其照明角度以每分钟  $0.25^\circ$  的速度变化,为了确定太阳方位并在测试过程中减小太阳入射角度误差,需要在室外搭建太阳跟踪测试系统。该测试系统复杂,易受天气影响,且测试过层中的云层变化会影响几何因子结果,因此选择在实验室内采用替代光源进行几何因子测试。一般的室内平行光能量较弱,仅约 0.01 个太阳常数;太阳模拟器稳定性又较差,一般为 0.5%~3%;卤钨灯具有较高的稳定性,可达 0.1% 以上,2 kW 卤钨灯距离 1 m 处的发散角约为 $\pm 0.85^\circ$ ,能量在比值辐射计 650 nm 和 825 nm 波段约为 0.1 个太阳常数,在 470 nm 波段稍弱,约为 0.02 个太阳常数,基本满足测试需求,为此选用 2 kW 卤钨灯作为几何因子实验室测试光源。

为获取几何因子,需测得太阳观测孔径光阑不同角度观测光源时的输出响应值,测试原理如图 4 所示,测试设备如表所示。

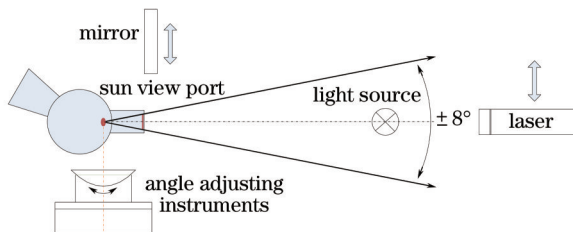


图 4 几何因子测试原理图

Fig.4 Principle of K factor measurement

比值辐射计位于光学导轨上方,能够进行四维调整,包括二维平移和二维转动。卤钨灯为点光源,不同位置处的照度存在一定差异。采用专用夹具将比值辐射计固定于二维转动台,令太阳观测孔径光阑中心位

于二维转动台的转轴交点附近,以保证比值辐射计太阳观测孔径光阑不同角度观测光源时的位置基本不变。辅助激光位于光学导轨上方并与之平行,反射镜贴于太阳观测光阑筒前端面,调整比值辐射计角度使反射镜反射的激光斑落在激光器出光口位置,实现激光与光阑筒前端面的准直。取下反射镜,平移比值辐射计,使太阳观测孔径光阑落在激光光斑中心位置附近。将卤钨灯放置于光学导轨上,调整灯的位置使其与太阳观测孔径光阑距离 1 m,灯丝面正对比值辐射计太阳观测筒,同时激光光斑落在灯丝面中心位置附近,此时认为比值辐射计太阳观测孔径光阑以 0°观测卤钨灯。

表 1 几何因子测试设备

Table 1 Instrument for K factor measurement

Instrument	Main characteristic	Application
Lamp	Power: 2000W Non-stability:0.08%/h	Light source
Direct current power supply 1	Power: 2400W Non-stability:0.05%/h	Light source power supply
Direct current power supply 2	Voltage:±20V Current:0.5A	RR power supply
Data acquisition	Output precision:±0.5% Digitalizing bit: 6.5 bit Voltage precision: 0.004%	RR data acquisition
Motorized rotary stage	Output accuracy: 0.005°	Direction adjustment
Goniometer	Range: ±15°	Tilt angle adjustment
Optical rail	/	Distance adjustment
Translation stage	Adjustment rage: 125mm	Position adjustment
Vertical translation stage	Adjustment rage: 100~220mm	Hight adjustment
Front surface mirror	/	Laser reflection
Laser	Beam divergence: 1.04mrad	RR direct adjustment

太阳照明比值辐射计的角度为-6°~7°,为留有一定余量,调整比值辐射计的俯仰角度,令其以 1°为间隔在±8°范围内观测光源,将各角度响应值根据(9)式进行计算,获得几何因子。对几何因子进行重复测试,以其均值作为几何因子最终实测值,同时得出几何因子测试标准偏差。

#### 4 测试结果与讨论

比值辐射计几何因子各波段的测试结果如图 5 所示。

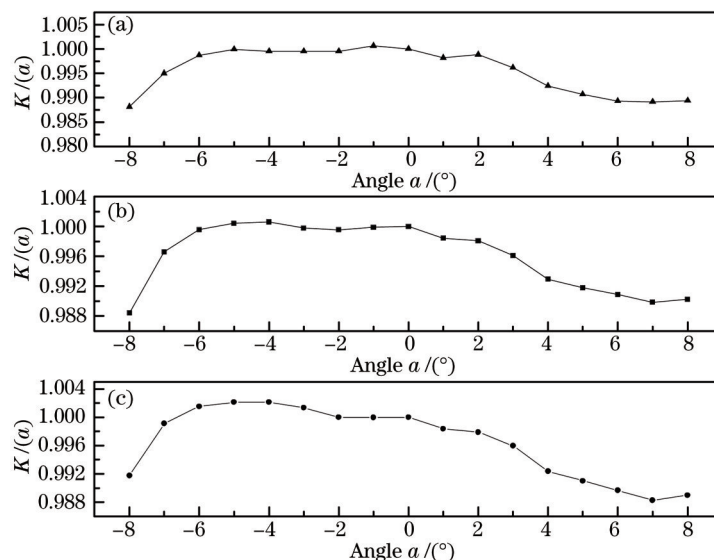


图 5 几何因子测试结果。(a) 470 nm; (b) 650 nm; (c) 825 nm

Fig.5 Results of K factor measurement. (a) 470 nm; (b) 650 nm; (c) 825 nm

由图 5 可见,各个波段几何因子曲线存在一定的差异,该现象可能来源于积分球的非均匀性,即积分球

内壁不同位置的反射率存在一定差异。光线通过太阳观测孔径光阑进入积分球,经历复杂的漫反射过程后叠加在各探测器光敏面处,各探测器位置的漫反射光叠加效果存在一定差异。当入射角度发生变化时,各探测器所接收到的漫射光叠加能量变化关系不完全一致,使角度因子出现差异。

比值辐射计各波段几何因子重复测试标准偏差如图6所示,在470、650、825 nm波段分别优于0.47%、0.1%以及0.13%,影响因素主要包括比值辐射计探测器的信噪比、非线性、非稳定性,光源非稳定性,角度调整误差等。几何因子在470 nm波段的测试标准偏差较大,这是由于卤钨灯在该波段能量较小,信噪比相对较低所致。实际在轨应用时,太阳在此波段能量较强,可以保证足够的信噪比。

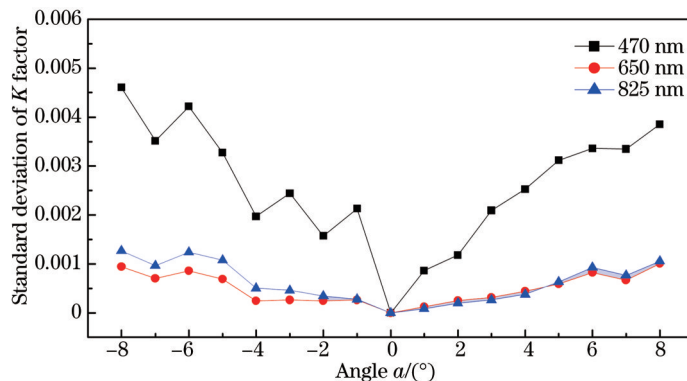


图6 几何因子测试标准偏差统计结果

Fig.6 Standard deviation statistics result of K factor

除重复测试标准偏差外,几何因子测试不确定度的主要来源还包括太阳观测孔径光阑中心位置偏离二维转动轴线交点引起的测试不确定度、太阳观测光阑筒法线偏离几何因子测试角度调整方向引起的观测响应不确定度以及其他不确定度。经分析,前两项分别小于0.01%、0.001%,第三项预估为0.1%。因此,比值辐射计太阳观测相对几何因子测试的合成不确定度均优于0.48%,其中650 nm和825 nm波段几何因子测试的合成不确定度分别达到0.14%和0.16%,满足几何因子测试不确定度的要求。

## 5 结 论

比值辐射计太阳观测相对几何因子是保证星上比辐射定标器定标精度的关键参数之一。在实验室对相对几何因子进行了测试,并对测试不确定度进行了评估,结果表明在470、650、825 nm波段的不确定度分别优于0.48%、0.14%、0.16%,其中470 nm波段的不确定度较高是由于信噪比较低所致。为了进一步提高470 nm波段的几何因子测试不确定度,下一步工作将着重于提高测试光源在该波段的能量,可通过更换高功率测试光源如氙灯实现。

比值辐射计太阳观测几何因子的精确获取,是比值辐射计性能评估的关键环节之一,可以为比值辐射计监视不确定度以及星上定标不确定度的评估提供依据,并为星上比辐射定标器的在轨应用提供数据支撑,对比值辐射计的实际应用具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 Zheng Xiaobing. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(1): 2-8.  
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 2-8.
- 2 Yang Benyong, Zhang Liming, Shen Zhengguo, et al.. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1851-1858.  
杨本永, 张黎明, 沈政国, 等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1851-1858.
- 3 Li Xiaohui, Yan Changxiang. Onboard calibration technologies for hyperspectral imager[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(4): 309-315.  
李晓晖, 颜昌翔. 成像光谱仪星上定标技术[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4): 309-315.

- 4 Gu Mingli. The spaceborne radiant calibration system of multispectral scanner[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1998, 19(3): 21-25.  
顾名澧. 多光谱扫描仪的星上辐射定标系统[J]. *航天返回与遥感*, 1998, 19(3): 21-25.
- 5 Zha Peng. Research on spaceborne radiant calibration technology of space camera[J]. *Infrared*, 2006, 27(3): 32-38.  
查 鹏. 空间相机星上辐射定标技术的研究[J]. *红外*, 2006, 27(3): 32-38.
- 6 Yang Benyong, Zhang Liming, Yang Baoyun, *et al.*. Space stability measurement and analysis of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 3026-3030.  
杨本永, 张黎明, 杨宝云, 等. 光学传感器星上定标漫射板空间稳定性测试与分析[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 3026-3030.
- 7 Slater P N, Palmer J M. Solar-diffuser panel and ratioing radiometer approach to satellite sensor on-board calibration[C]. *SPIE*, 1991, 1: 100-105.
- 8 Palmer J M, Slater P N. Ratioing radiometer for use with a solar diffuser[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1991: 106-117.
- 9 Xiong X, Angal A, Sun J, *et al.*. On-orbit performance of MODIS solar diffuser stability monitor[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083514.
- 10 Shi Jiading, Zhang Liming, Cao Xingjia, *et al.*. Design and research of diffuser panel used for on-board calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0828001.  
施家定, 张黎明, 曹兴家, 等. 星上定标漫反板设计研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0828001.
- 11 Li Junling, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. Development of BRDF absolute measurement device[J]. *Acta Optical Sinica*, 2014, 34(5): 0528002.  
李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0528002.
- 12 Xu Jun, Yang Benyong, Li Pingfu, *et al.*. Design and finite element analysis of ratioing radiance calibration on board[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2013, 5: 36-39.  
徐 骏, 杨本永, 李平付, 等. 比辐射星上定标器结构设计及有限元分析[J]. *机械设计与制造*, 2013, 5: 36-39.

栏目编辑: 韩 峰