

星上定标衰减屏特性的测试方法

汪伟^{1,2**}, 张黎明^{1*}, 黄文薪¹, 杨宝云¹, 王戟翔¹, 许和鱼^{1,2}, 包诗薇^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 介绍了一套测量太阳光衰减屏透过率的测量装置。该装置需要测量两组数据: 安装太阳光衰减屏和不安装太阳光衰减屏透过的信号值, 通过求两者在相同几何条件下比值的方式得出了衰减屏的透过率。提出采用多项式拟合插值的方式解决在轨角度密集的问题, 计算可知拟合插值引入的不确定度优于 0.04%。数据结果显示, 衰减屏的平均透过率为 13.3%, 结果的总不确定性优于 0.54% (覆盖因子 $k=2$)。结果表明, 该装置能够为太阳光衰减屏在轨使用提供数据支持。

关键词 遥感; 透过率; 测量装置; 太阳光衰减屏; 多项式拟合

中图分类号 TP721.2; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0928001

Measurement Method of Solar Attenuation Screen Characteristic for On-Orbit Calibration

Wang Wei^{1,2**}, Zhang Liming^{1*}, Huang Wenxin¹, Yang Baoyun¹,
Wang Jixiang¹, Xu Heyu^{1,2}, Bao Shiwei^{1,2}

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A set of measuring device for the transmittance of the solar attenuation screen is introduced. Two set of data are required: light signals transmitted through the test fixture with and without the solar attenuation screen. Then the solar attenuation screen transmittance is the ratio of the screen-on data to the screen-off data under the same geometric condition. The method of polynomial fitting interpolation is proposed, which is used to solve the problem of dense on-orbit angle. The error of the method is less than 0.04%. The results show that the average transmittance of the solar attenuation screen is 13.3%, and the uncertainty of the device is better than 0.54% (covering factor $k=2$). The results indicate that the device can provide data support for the use of the solar attenuation screen on orbit.

Key words remote sensing; transmittance; measurement device; solar attenuation screen; polynomial fitting

OCIS codes 120.0280; 280.4788; 350.4800

1 引 言

随着遥感应用的发展,对遥感数据的定量化需求愈加迫切,因此对遥感器的定标精度要求也越来越高。星上定标避免了大气的影 响,缩短了传递链路,具备高效率、高精度的优点,成为了遥感器定标的主要手段^[1]。“太阳+漫射板+比辐射计”方法越来越广泛地应用于星上定标,它是一种将太阳光源

作为标准光源,经过漫射板(SD)反射后被遥感器探测,从而建立标准传递,同时使用比辐射计(SDSM)来监测漫射板反射率变化的定标方式^[2-4]。但是当定标观测低亮度目标任务的星上载荷,这种方法对星载的动态范围产生很大的影响^[5]。针对这一问题,常见的解决方案有两大类:1)使用低反射率的漫反射板(通常为灰板或者铝板);2)在太阳照射漫射板的光路上增加一个多孔板衰减结构。考虑到灰板

收稿日期: 2018-02-28; 修回日期: 2018-03-16; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(41601388)

* E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn; ** E-mail: 932880281@qq.com

和铝板朗伯性差的问题,国际上一般采用太阳光衰减屏(SAS)对太阳光能量进行一次衰减,常用的比较典型的方案有中分辨率成像光谱仪(MODIS)和可见光红外成像辐射仪(VIIRS)。MODIS的载荷具有多个增益档位,可以观测不同亮度的地物目标。它在漫射板前端安置了一个带有SAS的太阳漫射板门,通过控制太阳漫射板门可以实现开和关两种状态,当载荷定标低亮度目标档位时,太阳漫射板门被控制到关闭状态,此时进入漫射板的太阳光经过SAS得到了一定程度的衰减。VIIRS同样利用SAS衰减进入漫射板的太阳光,不同于MODIS的是,VIIRS没有设置多个档位的增益,不需要移开SAS,SAS被直接固定在漫射板前端^[6]。

为了提高我国遥感定量化水平,中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了一种用于水温水色勘测时使用的定标仪器。太阳光经过SAS进入漫射板,探测器观测漫射板反射光得到标准辐亮度。比辐射计能够分别接收太阳光和漫射板反射光,比辐射计衰减屏可以将比辐射计观测所得太阳光能量衰减到观测漫射板所得能量的量级,并由比辐射计的两个观测口的几何因子测出。这两个观测口能量经由同一探测器测得,相比之后消去了探测器响应的

影响,因此根据比值的时间序列可以推算出漫射板的变化。从上述的定标传递中可以看出,漫射板双向反射率分布函数(BRDF)的测量、SAS衰减特性的测量以及比辐射计两个口的几何因子测量是决定最终定标精度的关键性因素。

本文主要介绍了太阳衰减屏测量装置,该装置主要采用平行光管和积分球产生发散角为 0.5° 的准直光光源,采用自主研发的多维转动台实现半球空间内角度的调整,采用积分球探测器收集信号。该装置的不确定度评估优于 0.54% 。

2 定标原理

在太阳漫射板定标系统中添加一块衰减屏,实现了传感器在动态范围内定标。该套系统的定标示意图如图1所示,太阳光经过衰减屏后到达漫射板形成辐亮度源;比辐射计转动反射镜可以分别探测漫射板和太阳光的信号,通过两者比值的方式监测漫射板表面特性的变化。漫射板的双向反射率分布函数和SAS的透过率在发射前可以测出,同时比辐射计通过比值的时间序列可以监测出漫射板的反射率修正系数,从而可以计算出漫射板实时的辐亮度,如

$$L_{SD}(\lambda_i, t) = \frac{E_s(\lambda_i) \cdot \cos(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}) \cdot \alpha_{launch}(\lambda_i) \cdot H_{on-orbit}(\lambda_i, t) \cdot \tau(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t})}{R(t)^2} \times f_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_v, \phi_v; \lambda_i), \quad (1)$$

式中: $L_{SD}(\lambda_i, t)$ 为星上定标 t 时刻扫描成像辐射计观测方向上漫射板 λ_i 处实时光谱辐亮度; $E_s(\lambda_i)$ 为 λ_i 处大气外太阳光谱辐照度; $\alpha_{launch}(\lambda_i)$ 表示发射前的太阳漫射板BRDF衰减系数(跟踪样品监测); $H_{on-orbit}(\lambda_i, t)$ 表示星上太阳漫射板BRDF在轨衰减系数(比辐射计实时监测); $\tau(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t})$ 为以入射天顶角 $\theta_{SD,t}$ 和入射方位角 $\phi_{SD,t}$ 照明太阳漫射板时衰减屏的透过率; $R(t)$ 为定标 t 时刻的日-地相对距离,与时间有关,每年周期性变化; $f_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_v, \phi_v; \lambda_i)$ 为实验室以入射天顶角 $\theta_{SD,t}$ 和入射方位角 $\phi_{SD,t}$ 照明太阳漫射板以观测天顶角 θ_v 和观测方位角 ϕ_v 方向观测 λ_i 谱段处的漫射板BRDF量值。

同时载荷根据实时参数同样计算出一个测量辐亮度,该辐亮度与漫射板得到的标准辐亮度的比值即为定标修正系数。因此,定标修正系数模型可以为

$$F(\lambda_i, t) = \frac{L_{SD}(\lambda_i, t)}{L(N_{SD,\lambda_i}, G_{\lambda_i}, R_{m,\lambda_i}, T_{elec,\lambda_i}, t)}, \quad (2)$$

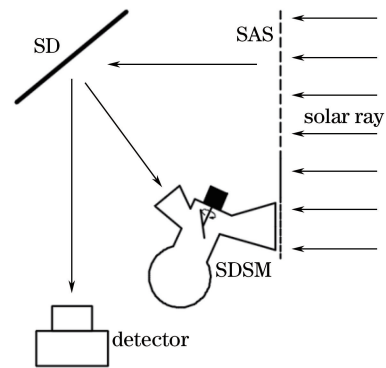


图1 星上定标示意图

Fig. 1 Schematic of on-orbit calibration

式中: $L(N_{SD,\lambda_i}, G_{\lambda_i}, R_{m,\lambda_i}, T_{elec,\lambda_i}, t)$ 为根据分别受到相应谱段探测器对太阳漫射板的观测计数值 N_{SD,λ_i} 、不同谱段探测器增益 G_{λ_i} 、反射镜不同角度反射率 R_{m,λ_i} 和电子学部分温度 T_{elec,λ_i} 等因素影响的太阳漫射板星上定标 t 时刻的光谱辐亮度。定标修正系数可以实时地对定标系数作修正,从而

实现定标功能。

从上述定标系数修正模型来看,衰减屏透过率是影响修正系数的关键因素之一,因此,在地面精确测量出衰减屏的透过率对星上高精度定标有重要意义。

3 SAS 测试原理与方法

SAS 实际上是在一块金属板上开有很多跑道形通孔,如图 2 所示,衰减屏的孔小而密。太阳对漫射板照射越均匀,漫射板面反射率变化的一致性越好,但是,孔径越小厚度效应带来的影响就越大。结合在轨定标的方位角变化大、天顶角变化小的特点,设计出跑道形通孔,其长度方向为方位角变化方向。SAS 的透过率是指 SAS 对太阳光通量的衰减系数。太阳光以不同的角度照射 SAS,照射到的孔径数量及孔径的厚度效应使得 SAS 的透过率在一定范围内存在波动,故称 SAS 的透过率随着角度变化的特性为 SAS 的衰减特性^[7-9]。

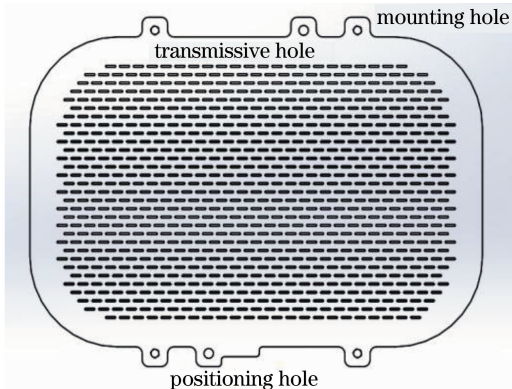


图 2 太阳光衰减屏模型图

Fig. 2 Model diagram of the solar attenuation screen

SAS 衰减特性测试的系统装置如图 3 所示。衰减屏装置被置于两个准直光管之间,一个准直光管用于发射平行光测试光线,另一个用于收集透过 SAS 的光线,并由探测器探测。测试装置以积分球作为光源,该积分球出光口径和准直光管的焦平面相匹配,形成准直光线(0.5°发散角)来模拟太阳光。准直光管发出的光线经过一个视场光阑进入收集光线的准直光管,该光阑的大小与探测器探测漫射板的视场范围一致,经过光阑的信号被积分球探测器探测,探测器的信号首先经过放大器再由计算机进行收集和存储。依据漫射板在轨定标应用时的入射太阳光照的角度变化,通过改变 SAS 的空间位置来变换 SAS 与光线的相对几何关系。计算出不同角度下 SAS 的透过率,得到 SAS 的衰减特性。

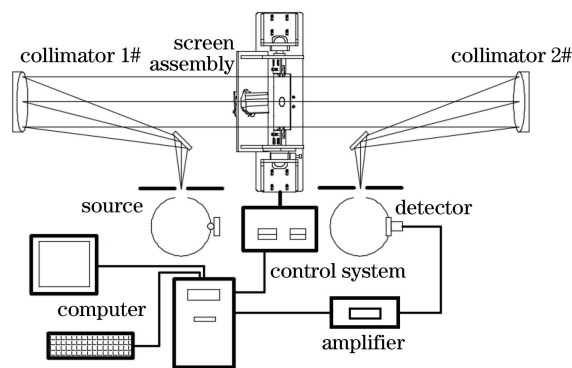


图 3 太阳衰减屏透过率测量系统示意图

Fig. 3 Schematic of the measurement system for the transmittance of the SAS

SAS 在轨使用时,太阳光矢量相对于卫星坐标系是确定的,而漫射板和 SAS 的几何关系在卫星坐标系也是确定的,那么三者漫射板坐标系中同样相对确定。其中漫射板坐标系以垂直漫射板方向为 z 轴,漫射板标记方向为 x 轴,建立右手坐标系;实验室坐标系以垂直水平面方向为 Z 轴,平行光管方向为 Y 轴,建立右手坐标系。多维转动架的转动轴有两个,一个垂直于水平面,一个平行于水平面,两个轴的交点就是漫射板坐标系的原点。安置多维转动架时,令漫射板坐标系 xOy 与实验室坐标系 XOY 关系如图 4 所示,那么太阳矢量即平行光入射方向就是 Y 轴方向^[10-11]。太阳矢量相对于漫射板坐标系关系确定,定为太阳理论矢量。当转动多维转动架时,太阳理论矢量会跟着漫射板坐标系同步运动,当理论矢量与实验室太阳矢量(即实验室坐标系 Y 轴)重合时,即记为在轨定标时的几何姿态。

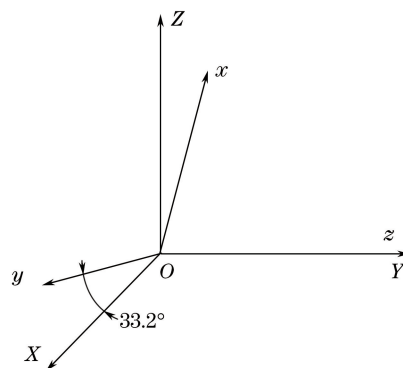


图 4 坐标示意图

Fig. 4 Coordinates sketch-map

当实际转到目标姿态时,多维转动架先绕实验室坐标系 X 轴转动 α (此时多维转动架垂直方向的转轴和实验室坐标系 Z 轴仍然重合),再绕实验室坐标系 Z 轴转动 γ ,则有以下关系:

$$\begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \mathbf{n}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中： $\mathbf{n}(\theta, \varphi)$ 为光线理论矢量的单位矢量，可以用太阳在漫射板坐标系中的天顶角与方位角来表示。当天顶角和方位角 (θ, φ) 确定后即得出太阳矢量 $\mathbf{n}(\theta, \varphi)$ ，进而可解出 α, γ 。

当二维转动架转动到指定角度 α, γ 时，在安装衰减屏的情况下，探测器探测到信号的计数值（即电压值）为 $N(\theta, \varphi)$ ，暗背景为 $N_{\text{dark}}(\theta, \varphi)$ ；不安装衰减屏的情况下，探测器探测到信号的计数值为 $N(\theta, \varphi)'$ ，暗背景为 $N_{\text{dark}}(\theta, \varphi)'$ 。在角度 (θ, φ) 下透过率 $\eta(\theta, \varphi)$ ，如公式(4)所示：

$$\eta(\theta, \varphi) = \frac{N(\theta, \varphi) - N_{\text{dark}}(\theta, \varphi)}{N(\theta, \varphi)' - N_{\text{dark}}(\theta, \varphi)'} \times 100\%。 \quad (4)$$

4 SAS 测试装置

4.1 光源与探测装置

SAS 测试装置的光源主要包括三个部分：积分球光源、离轴抛物式平行光管、积分球探测装置。由于 SAS 衰减属于光源能量机械式衰减，SAS 孔径大小为 2 mm，远大于可见光波长，光学传递属于几何光学范畴，其衰减特性不依赖于波长，所以，对积分球光源的光谱并没有特别要求，但是当灯被点亮时光谱需要保持稳定。将 250 W 的卤钨灯置于积分球内作为光源，实际工作时功率开到 80% 额定功率，即 200 W。积分球光源的出光口位于离轴式平行光管的焦平面处（即离轴抛物镜经镜面反射后的焦平面），其开口大小与离轴抛物镜的焦平面大小相近，直径为 14.7 mm。积分球出射的光经过离轴抛物镜形成发散角为 0.5° 准直光束，再经过另一离轴抛物镜会聚收集^[12]。

该系统的探测部分主要是由一个线性良好的 Si 探测器、积分球、皮安表和电流放大器组成。积分球中一个直径为 14.6 mm 的开口置于接收端的准直镜焦平面，接收的光经积分球匀光后被探测器探测。探测器探测到的信号经电流放大器后传到皮安表，然后由计算机记录。

4.2 多维转动架

多维转动架是实现星上照明的关键仪器，图 5 所示的是转动架初始姿态在实验室坐标系下的状态。由于平行光源比较笨重，不方便移动，所以通过移动 SAS 来得到所需要照明的相对几何姿态。

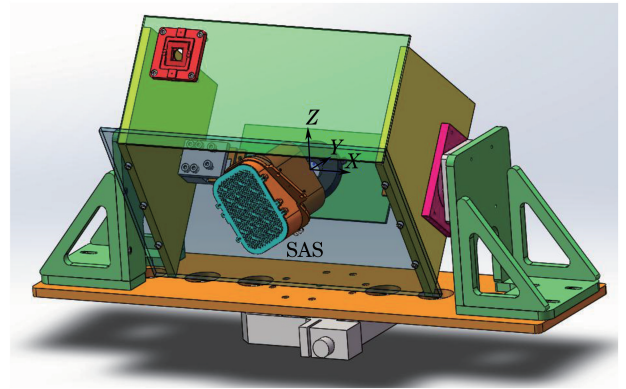


图 5 多维转动架示意图

Fig. 5 Schematic of multi-dimensions rotational stand

多维转动架构件主要包括：法向转轴、水平转轴、光阑承载盘、SAS 安装板。两个方向的转轴可以实现半球空间内的相对几何姿态；光阑承载盘上安装有一个椭圆形光阑，这个光阑的大小和相对位置与定标时刻遥感器在漫射板上照明区域的大小和位置相同；SAS 安装板与椭圆光阑的相对位置与 SAS 在卫星上的安装位置相对一致。实际组装时重点装调的是 SAS 与光阑相对位置、光阑中心位置与 Z 轴和 X 轴交点，保持 SAS 与光阑相对位置一致，光阑中心位置与 Z 轴和 X 轴交点一致。

5 SAS 测试结果

实验室测量了入射光线在卫星坐标系下天顶角（未作说明的情况下均指卫星坐标系下）为 15°~21° 间隔为 0.2°，方位角为 -33°~-13°，间隔为 0.5° 的 SAS 透过率，其结果如图 6 所示。

如图 6 所示，SAS 的透过率在测量角度范围内的均值约为 13.3%，这一结果符合设计要求（14%±1%）。从图中可以看到，透过率随着方位角变化呈规律性变化，为此，随机选取天顶角为 15.4° 不变的情况下观察透过率随方位角的变化，如图 7 所示。从图中可以看到，透过率随着方位角增加呈先升后降的趋势。

这样分布的透过率与理想的透过率分布是不同的，为此，探讨了导致这一现象的原因。首先，在测试过程中观察发现，在 SAS 姿态变换时，能被探测器探测到的孔的位置与数量都在变化，而且孔的数量是波动性变化，同时不同孔的加工尺寸不能保证

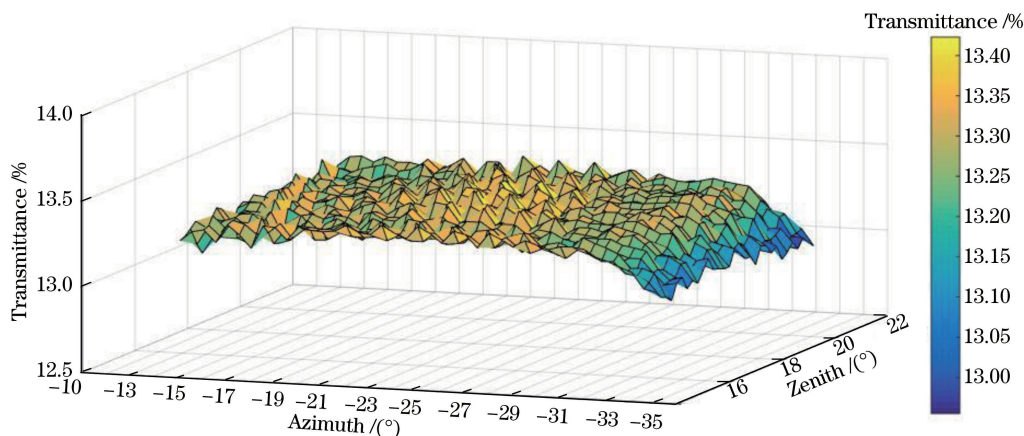


图 6 太阳衰减屏透过率分布示意图

Fig. 6 Distribution diagram of the SAS transmittance

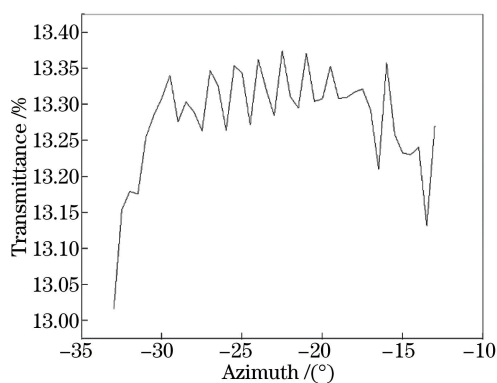


图 7 太阳衰减屏透过率随方位角变化分布示意图

Fig. 7 Diagram of the SAS transmittance with the azimuth

一致,这势必会导致透过率的非均匀性变化。其次,小孔厚度也会使透射率发生先升后降的变化,如图 8 所示,当光线与 SAS 法线成 δ 角度时,实际通过 SAS 的信号能量 E_{actual} 与理想状态通过的信号能量 E_{theory} 并不相等,关系表示为

$$\frac{E_{\text{actual}}}{E_{\text{theory}}} = \frac{\omega \cos |\delta| - h \sin |\delta|}{\omega \cos |\delta|} = 1 - \frac{h}{\omega} \tan |\delta|, \quad (5)$$

式中: ω 为小孔宽度; h 为小孔厚度。根据 SAS 的安装位置与卫星坐标系的关系,可以计算出 δ 在 $-15^\circ \sim 11^\circ$ 之间变化,这个角度代入(5)式,得到 E_{actual} 的增减趋势与上述结果一致。

另外,虽然衰减屏和椭圆光阑同步变化,但是实际上两者与光线的角度不同,因此孔径通光面积(安装衰减屏)的变化与有效通光面积(不安装衰减屏)的变化不一致,从而使得不同角度透过率不一致。

6 结果分析与评估

衰减屏地面测量与在轨使用在温度上存在差异,地面测量时实验室温度一般在 20°C 左右,而在

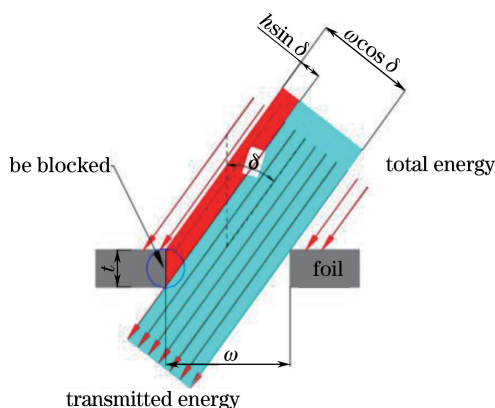


图 8 厚度影响的示意图

Fig. 8 Schematic of foil thickness vignetting

轨使用时由于衰减屏处于向阳面,其温度在 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 之间。考虑到材料的热膨胀特性,衰减屏在使用时会发生一定量的形变。但是衰减屏是铝材,热膨胀具有各向同性(由金属微观排布的随机性决定),从单元角度看,总面积和孔的面积会同比例变化,从而透过率不变。因此,衰减屏地面测量的透过率可以在轨使用。

从测试结果可以看到,数据存在着波动性,这一结果与 MODIS 的测试结果^[7]很相似。考虑到在轨使用时,太阳入射角度会随着实际时刻的变化而变化,地面无法实际测出每个时刻对应的角度,因此在实际使用测量数据时,根据所测角度,用多项式插值的方式计算实际角度下的衰减屏透过率。拟合插值的结果与实际值会存在差异,所以有必要讨论拟合插值对数据使用造成的不确定度影响。

根据数据的样本数量以及整体分布,选取了 4 次多项式用于数据拟合,拟合结果与残差分布如图 9(a)和 9(b)所示。从残差分布图可以看出,残差的分布近似于正态分布,因此可以用标准差(即均方

根误差)来表征拟合数据的不确定度,标准差可表示为

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum (d_{\text{fit}}^i - d^i)^2}{n}}, \quad (6)$$

式中: ϵ 表示拟合结果的标准差; d^i 表示数据的样本值; d_{fit}^i 表示样本点的拟合值; n 表示样本总量。经计算标准差结果为0.04%。从计算结果可以看出,通过多角度测量后拟合插值的方式测试在轨使用的数据,方便有效。

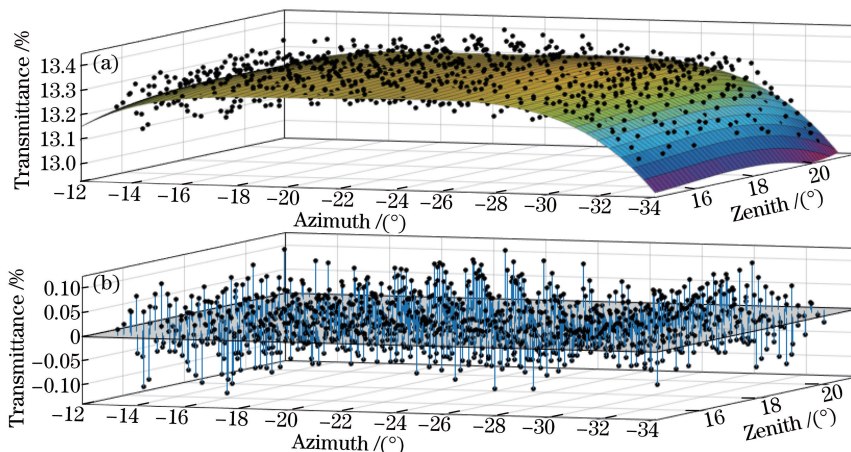


图9 不确定度的数值模拟图。(a)数据拟合示意图;(b)拟合残差示意图

Fig. 9 Numerical simulation of uncertainty. (a) Diagram of data fitting; (b) diagram of residual

SAS透过率测试的不确定度主要由光源非稳定性、运动机构的角精度、结构与安装误差、探测系统性能、杂散光影响等组成。其中光源在3h内变化优于0.01%;旋转台角精度优于0.005°,折算到对透过率的影响优于0.1%;探测器误差主要由其稳定性和动态范围内的线性产生,其不确定度优于0.1%;受到机械加工精度的限制,难免会导致尺寸的误差,同时存在重复安装的非一致性影响,其尺寸误差和安装误差对透过率的影响优于0.2%;环境杂散光、温湿度等其他因素导致的不确定度优于0.1%;由于各影响因素不相关,按照不确定度合成原则,对各项求平方和再开方得到其综合不确定度为0.265%,如表1所示。

表1 SAS透过率测试不确定度

Table 1 Uncertainty of SAS transmittance test

Source	Uncertainty / %
Light stability	0.01
Angle accuracy	0.1
Detector error	0.1
Mechanical error	0.2
Other uncertainties	0.1
Combined uncertainty	0.265

综合考虑透过率的总不确定度,合成了拟合不确定度和测量不确定度,计算结果优于0.27%,因此,在置信区间为95%(即覆盖因子 $k=2$)时,衰减屏透过率的总不确定度优于0.54%。

7 结 论

为了满足定标的动态范围要求,在漫反射板前端增加了SAS,从而引入了SAS透过率测量的问题。介绍了用于测量SAS透过率的测量装置,该装置采用了“积分球+平行光管”的方式模拟准直光,使用中国科学院安徽光学精密机械研究所自主研发的多维转动架变换SAS的测试方法,使用“单片探测器+积分球”的形式探测待测目标。该测量装置考虑到SAS实际使用的特点,通过多维转动架控制不同几何姿态,将一个椭圆光阑置于载荷观测视场的相应位置,从而更准确地模拟了在轨使用的场景,所测数据接近实际使用值。同时介绍了地面测试数据在轨使用的方法,计算分析了拟合插值引入的误差优于0.04%。装置评估表明,该套装置测量衰减屏透过率的综合不确定度优于0.54%($k=2$)。综上所述,该套装置测试数据有效,其测试精度满足星上定标使用要求,为衰减屏在轨使用提供了地面数据的测试支持。

参 考 文 献

[1] Huang W X. The research of on-orbit calibration method based on solar diffuser [D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 26-35.
黄文薪. 基于太阳漫射板的星上定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学院大学, 2016: 26-35.

- [2] Huang W X, Zhang L M, Si X L, *et al.* Theory and precision maintenance method of on-orbit reflectance calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0623001.
黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 等. 星上反射率定标原理及其精度保持方法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0623001.
- [3] Yang B Y, Zhang L M, Shen Z G, *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.
- [4] Huang W X, Zhang L M, Si X L, *et al.* Design of solar diffuser degeneration monitor and its performance evaluation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 732-739.
黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 等. 太阳漫反射板衰减监测辐射计的设计及性能评估[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 732-739.
- [5] Eplee R E, Turpie K R, Fireman G F, *et al.* VIIRS on-orbit calibration for ocean color data processing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8510: 85101G.
- [6] Xiong X X, Fulbright J, Angal A, *et al.* Assessment of MODIS and VIIRS solar diffuser on-orbit degradation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9607: 96071T.
- [7] Waluschka E, Xiong X X, Moyer D, *et al.* Modeling studies of the MODIS solar diffuser attenuation screen and comparison with on-orbit measurements [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5542: 342-354.
- [8] Waluschka E, Xiong X X, Moyer D, *et al.* MODIS solar calibration transmission screen modeling [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5652: 189-200.
- [9] Lei N, Chen X X, Xiong X X. Determination of the SNPP VIIRS SDSM screen transmittance from both yaw maneuver and regular on-orbit data[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9218: 921803.
- [10] Li J L, Zhang L M, Chen H Y, *et al.* Development of BRDF absolute measuring device[J]. *Acta Optica 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.
- [11] Li J L, Zhang L M, Si X L, *et al.* BRDF device based on six-axis robot [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 2983-2989.
李俊麟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于六轴串联机械手的双向反射分布函数测量装置[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 2983-2989.
- [12] Che C C, Li Y C, Fan X W, *et al.* Optical design for off-axis two mirror collimator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1793-1796.
车驰骋, 李英才, 樊学武, 等. 离轴二镜平行光管的光学设计[J]. *光子学报*, 2008, 37(9): 1793-1796.