

太阳漫射板反射率在轨衰退监测技术研究

汪伟^{1,2*}, 张黎明^{1**}, 司孝龙^{1,2}, 黄文薪¹, 王戟翔¹

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 多通道扫描成像辐射计搭载于风云四号气象卫星上, 为了使其实现高精度定量遥感, 其上配备了星上定标装置。该装置主要是引太阳漫射板(SD)反射的太阳光作为标准辐亮度源, 太阳漫射板反射率衰减监测仪(简称比辐射计)定期监测漫射板反射率的变化。主要介绍了比辐射计的工作原理, 并针对在轨返回的数据特点建立了太阳漫射板双向反射分布函数衰减因子计算模型。数据表明: 比辐射计探测器受到了温度的影响, 其不确定度为 0.165%/°C, 比值监测的方式消除了温度的影响。计算了 3 个通道衰减因子的合成监测不确定度, 第一通道的合成监测不确定度为 1.48% ($k=2$), 第二、第三通道合成监测不确定度为 1.16% ($k=2$)。结果表明: 比辐射计可以实现漫射板反射率的衰减监测。

关键词 遥感; 星上定标; 太阳漫射板反射率衰减监测仪; 双向反射分布函数; 衰减因子

中图分类号 V441

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0728005

On-Orbit Degradation Monitoring Technology for Solar Diffuser Reflectance

Wang Wei^{1,2*}, Zhang Liming^{1**}, Si Xiaolong^{1,2}, Huang Wenxin¹, Wang Jixiang¹

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 multi-channel scanning imaging radiometer is installed on the FY-4 meteorological satellite. To realize high-precision quantitative remote sensing, an on-board calibration device is provided. The device primarily uses a solar diffuser (SD) to reflect sunlight as a standard radiance source, and the solar diffuser reflectance degradation monitoring (SDRDM) device regularly monitors the reflectance variation of the SD. This study introduces the working principle of SDRDM and establishes a calculation model of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) degradation factor of the SD based on the characteristics of on-orbit data. The data show that the SDRDM device is affected by temperature and its uncertainty is 0.165% per °C. The ratio monitoring method eliminates the influence of temperature. The combined monitoring uncertainties of three channels' degradation factors are calculated, which is 1.48% ($k=2$) for the first channel and 1.16% ($k=2$) for the second and third channels, respectively. These results suggest that the SDRDM device can effectively monitor the degradation of the SD's reflectance.

Key words remote sensing; on-board calibration; solar diffuser reflectance degradation monitoring device; bidirectional reflectance distribution function; degradation factor

OCIS codes 280.4788; 120.0280; 350.4800

1 引 言

星上定标由于传递链路短、定标精度高而成为了主要的定标方式^[1]。太阳漫射板(SD)定标是目前在太阳反射波段的主流星上定标方式。该定标方

式是以常年稳定的太阳作为光源, 以漫射板反射的太阳光作为标准辐亮度源。载荷的响应度变化可以通过载荷观测漫射板的方式监测^[2-3]。由于漫射板在太空环境下的表面特性易发生改变, 因此该定标方法还携带了漫射板稳定性监测装置^[4-5]。美国的

收稿日期: 2019-01-20; 修回日期: 2019-03-06; 录用日期: 2019-03-22

基金项目: 国防创新基金(CXJJ-17-M101)

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

中分辨率成像光谱仪(MODIS)携带的漫射板的稳定监测装置为比值辐射计,它可以同时观测太阳和太阳漫射板,通过计算太阳漫射板响应信号与太阳响应信号的比值,然后将当下时刻该比值与初始时刻该比值相比,就可以得出太阳漫射板的衰减因子^[6-7]。欧洲航天局的中分辨率成像光谱仪(MERIS)携带的是一块不常暴露的标准太阳漫射板^[8]。MERIS主要是通过这一标准漫射板来定期修正定标漫射板,由于前期标准漫射板不常暴露,可以合理地假定其反射特性稳定,因此其表面反射特性近似等同地面测量值。随着在轨时间变长,标准太阳漫射板的反射率会发生衰减,由于标准漫射板与定标板是同源同批次漫射板,可假定两块漫射板的在轨反射率基于暴露时间的变化曲线一致,利用该变化曲线反修正标准漫射板,就可以实现长期高精度定标。

多通道扫描成像辐射计是运行在地球同步轨道三轴稳定卫星平台上的14波段成像探测器,包括0.45~2.35 μm范围内的6个太阳反射波段。为了能够长期获取地表信息,多通道扫描成像辐射计配备了基于太阳+太阳漫射板+比辐射计(SDRDM)的太阳反射波段星上定标器。综合考虑,多通道扫描成像辐射计的比辐射计配了3个波段探测器(中心波长分别为0.470,0.650,0.825 μm),用来监测太阳漫射板的稳定性。

与MODIS不同的是,本文采用的是双向对称观测,积分球内部配有石英匀光片,该种形式的结构不仅避免了折转镜衰减带来的监测不确定性,还避免了入射光直接进入探测器,消除了入射方向差异的影响。本文首先简要阐述了太阳+太阳漫射板+比辐射计定标器的星上定标流程,以及比辐射计的监测原理,然后分析了比辐射计数据,计算出了从遥感器发射到实施星上定标这段时间比辐射计的比值变化,分析结果表明,比辐射计的监测结果符合预期。

2 监测流程与原理

2.1 监测流程的实现

若要实现长期高精度定标,监测太阳漫射板双向反射分布函数(BRDF)的变化是关键^[9]。扫描辐射计的定标装置如图1所示。比辐射计的两个端口分别用来观测漫射板和太阳,其内置的匀光片法线平分两个观测方向,以减小不同端口进入的光的探测差异性。交替观测漫射板和太阳信号主要通过定标门的开与关来实现。定标舱门处于闭合状态时,比辐射计采集的是暗电流信号数据。暗电流信号采

集结束后,门轴电机开始连续转动,定标舱门逐渐被打开,定标舱门被打开15°左右时,太阳光透过门光阑进入比辐射计的太阳观测孔,此时比辐射计采集观测太阳数据,如图2(a)所示。定标舱门打开85°,门轴电机停顿片刻,舱门静止,此时太阳光照满漫射板的有效照明区,比辐射计采集观测漫射板的数据(太阳观测口不入光),如图2(b)所示。最后门轴电机反向连续转动,定标舱门逐渐被关闭。定标舱门关闭到15°附近时,比辐射计再次观测太阳数据。舱门完全关闭后,定标流程结束。

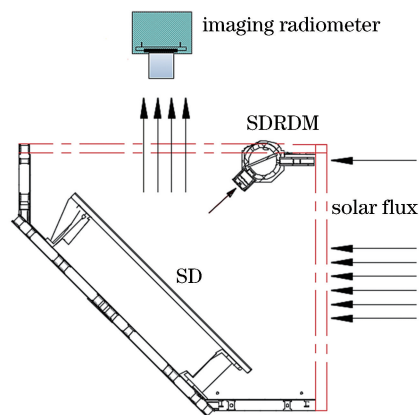


图1 扫描成像辐射计的定标装置示意图

Fig. 1 Schematic of calibration device in scanning

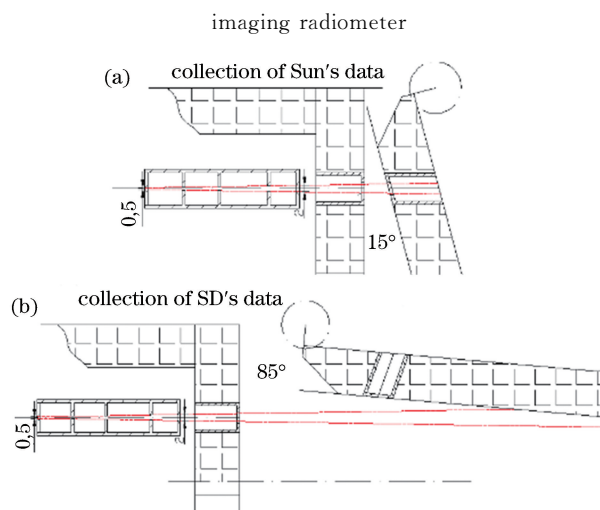


图2 比辐射计数据交替采集示意图。(a)采集太阳数据; (b)采集漫射板数据

Fig. 2 Schematic of alternate data collected in SDRDM.

(a) Collection of Sun's data; (b) collection of SD's data

2.2 比辐射计监测溯源

为实现各谱段的绝对辐射定标,要求得到与各谱段相对应的太阳漫射板谱段的标准辐亮度 $L_{SD}(\theta_s, \phi_s; \theta_v, \phi_v; B_i)$ 。根据星上定标漫射板的光谱辐亮度,结合各谱段的光谱响应函数 $R_{SR, B_i}(\lambda)$,积分

得到漫射板各谱段的标准辐亮度为

$$L_{SD}(\theta_s, \phi_s; \theta_v, \phi_v; B_i) = \frac{\cos \theta_s \cdot \int E_s(\lambda) H_i(\lambda) f_{lab}(\theta_s, \phi_s; \theta_v, \phi_v; \lambda) R_{SR, B_i}(\lambda) d\lambda}{R_{s-e}^2 \cdot \int R_{SR, B_i}(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中: θ_s, ϕ_s 分别为星上定标时刻太阳入射方向的天顶角、方位角; θ_v, ϕ_v 分别为扫描辐射计观测方向的天顶角、方位角; B_i 为波段; $E_s(\lambda)$ 为大气外太阳光谱辐照度常数; R_{s-e} 为定标时刻的日-地相对距离; $f_{lab}(\theta_s, \phi_s; \theta_v, \phi_v; \lambda)$ 为发射前实验室测量的星上定标漫射板的 BRDF; $H_i(\lambda)$ 为星上漫射板 t 时刻 BRDF 的衰减因子。

从漫射板辐亮度表达式中可以看出, 监测漫射板 BRDF 的变化是准确计算辐亮度的重要因素之一。这一部分主要通过推导 SD 衰减因子的计算过程, 从而介绍衰减因子的溯源链路, 说明 SD 衰减因子的可靠性。计算 SD 衰减因子需要测量两个数值: 漫射板观测信号和太阳观测信号(扣除暗电流)。这两种信号在被探测器探测前经过了比辐射计积分球以及匀光片匀光, 消除了入射光角度不同带来的非一致性。

观测同时包括辐亮度和辐照度, 所以从辐射通量出发进行推导, SDRDM 在 t 时刻观测太阳得到的信号可以表示为

$$D_{sun}(B_i, t) = R(B_i, t) \cdot \frac{E_s(\lambda)}{R_{s-e}^2} \cdot \tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t}) \cdot$$

$$A_{SDRDM}(0^\circ_{SDRDM}), \quad (2)$$

式中: $R(B_i, t)$ 为 t 时刻探测器对 B_i 谱段的光通量响应度; $D_{sun}(B_i, t)$ 为 t 时刻 B_i 波段扣除暗电流后的太阳信号响应值; $\tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t})$ 为 SDRDM 观测太阳的几何因子; $\theta_{SDRDM, t}$ 为 t 时刻太阳光线与太阳观测筒轴线的夹角; $A_{SDRDM}(0^\circ_{SDRDM})$ 为太阳端口被太阳垂直入射时太阳沿观测筒轴线入射时的有效通过面积。

SDRDM 观测漫射板得到的信号可以表示为

$$D_{SD}(B_i, t) = R(B_i, t) \cdot \frac{E_s(B_i)}{R_{s-e}^2} \cdot \cos(\theta_{SD, t}) \cdot f(B_i, t) \cdot \Omega_{SD} \cdot A_{SD}, \quad (3)$$

式中: $D_{SD}(B_i, t)$ 为 t 时刻 B_i 波段扣除暗电流后的漫射板响应值; $\theta_{SD, t}$ 为太阳入射漫射板的天顶角; $f(B_i, t)$ 为 t 时刻 B_i 波段的 BRDF; Ω_{SD} 为 SDRDM 观测漫射板的立体角; A_{SD} 为 SDRDM 观测漫射板的有效面积。

两个信号求比值, 即

$$\frac{D_{sun}(B_i, t)}{D_{SD}(B_i, t)} = \frac{R(B_i, t) \cdot \frac{E_s(B_i)}{R_{s-e}^2} \cdot \tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t}) \cdot A_{SDRDM}(0^\circ_{SDRDM})}{R(B_i, t) \cdot \frac{E_s(B_i)}{R_{s-e}^2} \cdot \cos(\theta_{SD, t}) \cdot f(B_i, t) \cdot \Omega_{SD} \cdot A_{SD}}, \quad (4)$$

消去光通量响应度, 化简为

$$\frac{D_{sun}(B_i, t)}{D_{SD}(B_i, t)} = \frac{\tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t}) A_{SDRDM}(0^\circ_{SDRDM})}{\cos(\theta_{SD, t}) \Omega_{SD} A_{SD}} \cdot \frac{1}{f(B_i, t)}. \quad (5)$$

如果记 t 时刻 SD 的衰减因子为 $H(B_i, t)$, 那么 t 时刻 BRDF 可表示为

$$f(B_i, t) = H(B_i, t) f_{lab}(B_i), \quad (6)$$

式中: $f_{lab}(B_i)$ 为实验室测量 B_i 波段的 BRDF。将其代入(5)式后得

$$\frac{D_{sun}(B_i, t)}{D_{SD}(B_i, t)} = \frac{\tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t}) A_{SDRDM}(0^\circ_{SDRDM})}{\cos(\theta_{SD, t}) \Omega_{SD} A_{SD}} \cdot$$

$$\frac{1}{H(B_i, t) f_{lab}(B_i)}. \quad (7)$$

假定, 首次 BRDF 未变化, $H(B_i, t=0) = 1$, 从而可得到

$$\frac{D_{sun}(B, t_0)}{D_{SD}(B, t_0)} = \frac{\tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t_0}) A_{SDRDM}(0^\circ_{SDRDM})}{\cos(\theta_{SD, t_0}) \Omega_{SD} A_{SD}} \cdot \frac{1}{f_{lab}(B_i)}. \quad (8)$$

将 t 时刻与 t_0 时刻相除, 消去仪器常数, 得到衰减系数与观测值的关系为

$$H(B_i, t) = \frac{D_{SD}(B_i, t)}{D_{SD}(B_i, t_0)} \frac{D_{sun}(B_i, t_0)}{D_{sun}(B_i, t)} \frac{\tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t}, B_i)}{\tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t_0}, B_i)} \frac{f_{lab}(B_i, \theta_{SDRDM, t_0}) \cos(\theta_{SD, t_0})}{f_{lab}(B_i, \theta_{SDRDM, t}) \cos(\theta_{SD, t})}, \quad (9)$$

式中： $\tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t})$ 、 $\tau_{SDRDM}(\theta_{SDRDM, t_0})$ 分别为 t 时刻与 t_0 时刻 SDRDM 观测太阳的几何因子； $f_{lab}(B_i, \theta_{SDRDM, t})$ 、 $f_{lab}(B_i, \theta_{SDRDM, t_0})$ 分别为 t 时刻与 t_0 时刻 B_i 谱段的 BRDF。以上均由实验室测量得到，据此计算漫射板 BRDF 随时间衰减的变化关系。

3 漫射板衰减监测数据

3.1 比辐射计响应数据

实际上，SDRDM 返回的数据有 3 种，通过定标门的开关分别测量出暗电流采集信号计数值、漫射板观测信号计数值和太阳观测信号计数值，漫射板和太阳的观测信号（扣除暗电流）如图 3 所

示。漫射板出射到 SDRDM 的信号除了受自身衰减的影响外，还受太阳入射角度的影响。太阳入射角度的影响主要包括角度对照度产生的余弦影响，以及对双向反射比因子(BRF)的影响。太阳入射到 SDRDM 中的信号值会随着太阳入射角度的变化而变化。产生这一变化的原因主要来自于太阳端口的结构局限性：1) 孔的厚度效应。实际加工的孔必然存在厚度，那么随着角度的变化，端口的入光有效面积也会随之改变。2) 消光筒的加工偏差和组装偏差。消光筒主要是由多段光阑套筒组成，光阑之间的同轴差异使得不同角度入射的影响具有随机性。

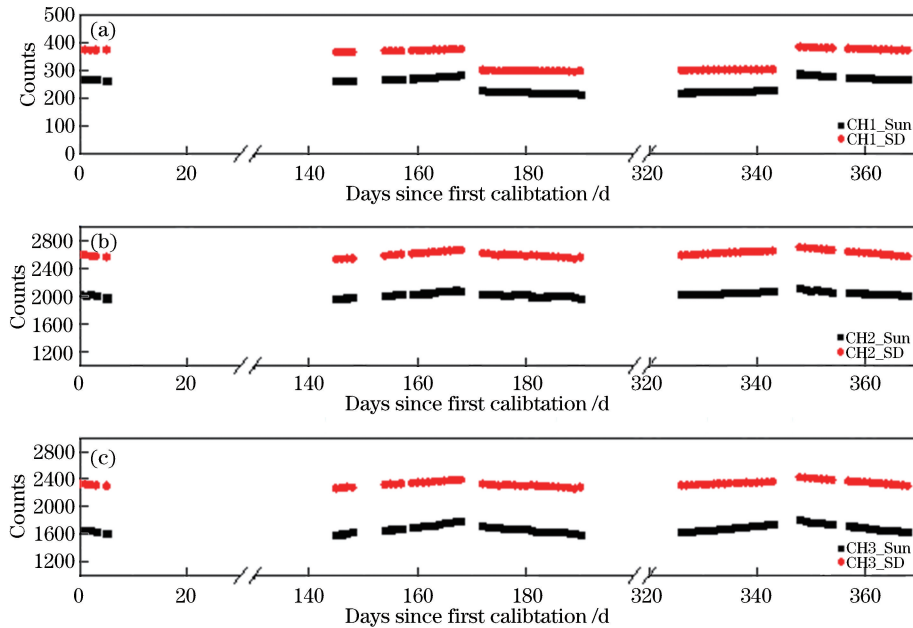


图 3 各通道的 SDRDM 的原始信号。(a)通道一(CH1);(b)通道二(CH2);(c)通道三(CH3)

Fig. 3 Original signal of each channel of SDRDM. (a) Channel 1 (CH1); (b) channel 2 (CH2); (c) channel 3 (CH3)

实际上，除了上述影响外，温度也会影响 SDRDM 探测器对信号的响应。为了避免辐射计制冷直接被太阳照射，卫星在首次定标后的第 170 天和第 345 天发生偏航 180° 事件(后简称“偏航事件”)，从而使得定标时间发生早晚更替，定标器的环境温度发生变化，产生温差。基于偏航事件，计算了各通道探测器的温度敏感性，结果如表 1 所示。为了考察温度的影响，这里修正了角度带来的余弦、BRDF 和几何因子的影响。单一信号会受到温度影响，第一通道 SD 观测值受温度的影响尤为明显，影响达到了 $0.165\%/^\circ\text{C}$ ，但当计算衰减因子时会除去

探测器的影响，从表 1 可以看到，太阳观测与漫射板观测受温度影响的差异性小于 $0.014\%/^\circ\text{C}$ ，可以忽略不计。

表 1 各通道探测器的温度敏感性

Table 1 Temperature sensitivity of detectors of three different channels

Channel	Band center / μm	Sun view(effect of temperature) / $^\circ\text{C}$	SD view(effect of temperature) / $^\circ\text{C}$
CH1	0.470	0.77(0.151%)	1.65(0.165%)
CH2	0.650	0.46(0.011%)	0.95(0.012%)
CH3	0.825	0.61(0.017%)	1.18(0.017%)

3.2 角度数据

比辐射计数据计算所需的角数据主要分为3种:用于确定光照输入的太阳矢量、用于计算比辐射计太阳观测几何因子参数的角度、用于计算漫射板观测参数的角度。

根据太阳和卫星相对于地球的位置计算出仪器坐标系 O -XYZ 下的太阳光矢量,这是传递到各个局部坐标系的基准。对于计算比辐射计太阳观测几何因子参数的角度,比辐射计太阳观测口在南北方向(即太阳赤纬角变化方向)的覆盖角度范围是 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$,在 XOY 平面内,与 X 轴平行的方向定义为南北 0° ,绕 Z 轴逆时针旋转为正角度,绕 Z 轴顺时针旋转为负角度;比辐射计太阳观测口在东西方向(即太阳时角变化方向)的覆盖角度范围是 $-1^{\circ}\sim 1^{\circ}$,在 XOZ 平面内,与 X 轴平行的方向定义为东西 0° ,绕 Y 轴顺时针旋转为正角度,绕 Y 轴逆时针旋转为负角度。用于计算漫射板观测参数的角度是基于漫射板坐标系下的天顶角和

方位角的。在发射前已经实际定标出漫射板坐标和仪器坐标的转换矩阵,从而可以根据仪器坐标系下的太阳矢量计算出漫射板坐标下的太阳矢量。

3.3 太阳观测的几何因子和 SD 的 BRDF 查找表

从原始信号中可以看到,对太阳观测的几何因子的修正以及漫射板观测的 BRDF 修正是十分重要的。这两个参数在发射前是可以被实际测出的,但测试过程中存在步长,因此这两个参数被做成查找表的形式,在实际使用时,使用多项式插值的方式来提取有效参数。

比辐射计安装在一个可以二维平移和二维转动的平台上,以卤钨灯作为点光源,使用激光器、准直镜等辅助设备确定“零”角度。调整卤钨灯位置至一个合适的照度,转动比辐射计测得不同角度下的信号值,并对“零”角度信号值归一化得到太阳观测几何因子。图4所示为比辐射计太阳观测端口的几何因子测试结果,其测量精度优于 $0.48\%^{[10]}$ 。

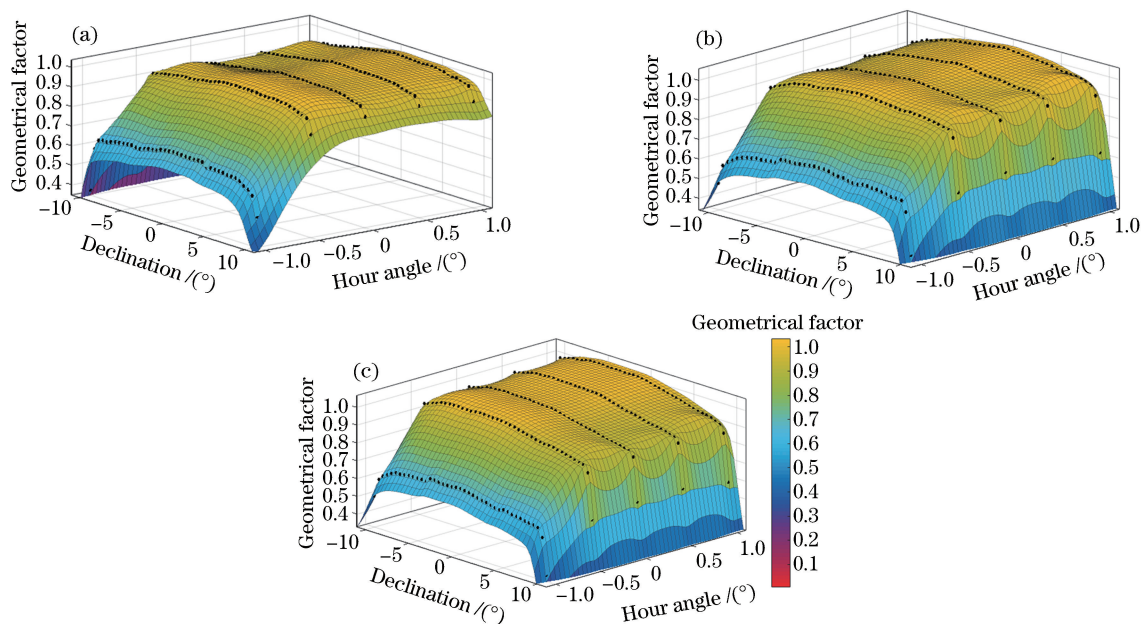


图4 不同通道的几何因子趋势图。(a)通道一;(b)通道二;(c)通道三

Fig. 4 Trend of geometrical factor of each channel. (a) Channel 1; (b) channel 2; (c) channel 3

漫射板 BRDF 采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的紫外-可见-近红外高精度 BRDF 绝对测量系统进行测量。该测量系统以高亮度、高均匀性积分球辐射源为照明光源,以高精度的串联式六轴机器人和中空分度盘为 BRDF 转角主体,以宽光谱大动态范围辐射计为光电信号探测单元,通过几何、电子等相关物理量的高精度溯源及标校,实现星上定标漫射板 BRDF 的高精度测量。测试结

果如图5所示,其相对精度优于 $0.5\%^{[11]}$ 。

4 计算结果与分析

4.1 SD 衰减系数

探测器光通量响应度变化会导致响应值变化,但是双口比值监测的方式在计算过程中消除了仪器自身响应的影 响,因此探测器响应度的变化不会影响漫射板衰减监测。SD 衰减因子是当前时刻的辐

射比与初始时刻辐射比的比值,而计算辐射比的两种信号是同一组探测器短时间内交替观测得到的,

监测计算过程中消除了探测器自身的影响。计算结果如图 6 所示, H 表示衰减因子。

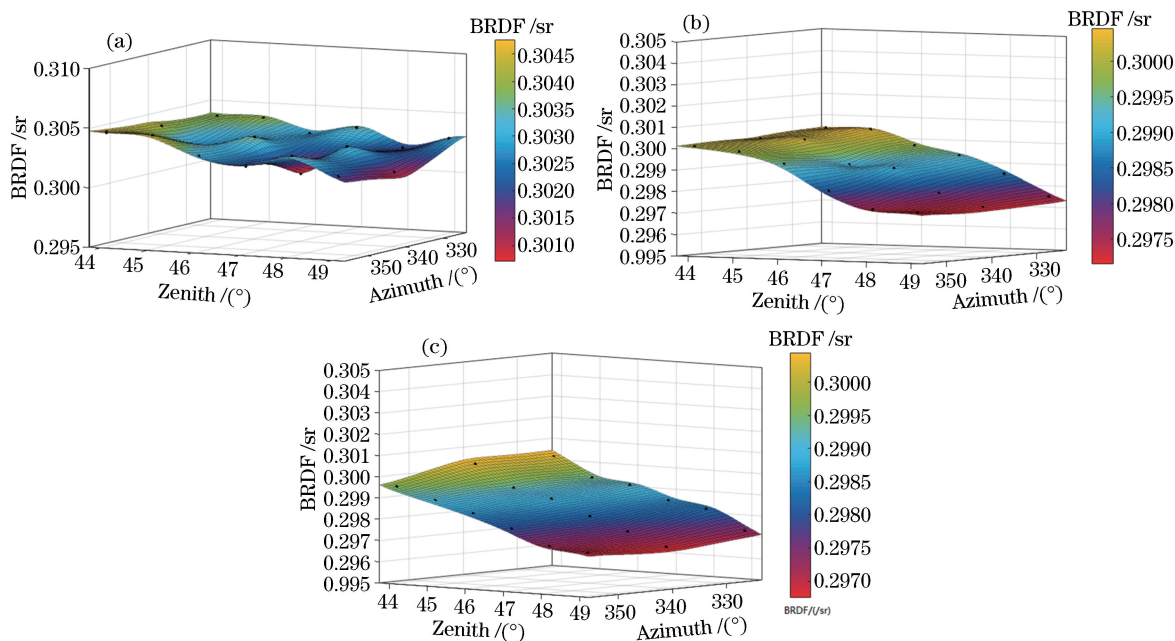


图 5 不同通道的 BRDF 分布。(a)通道一;(b)通道二;(c)通道三

Fig. 5 BRDF distributions of three different channels. (a) Channel 1; (b) channel 2; (c) channel 3

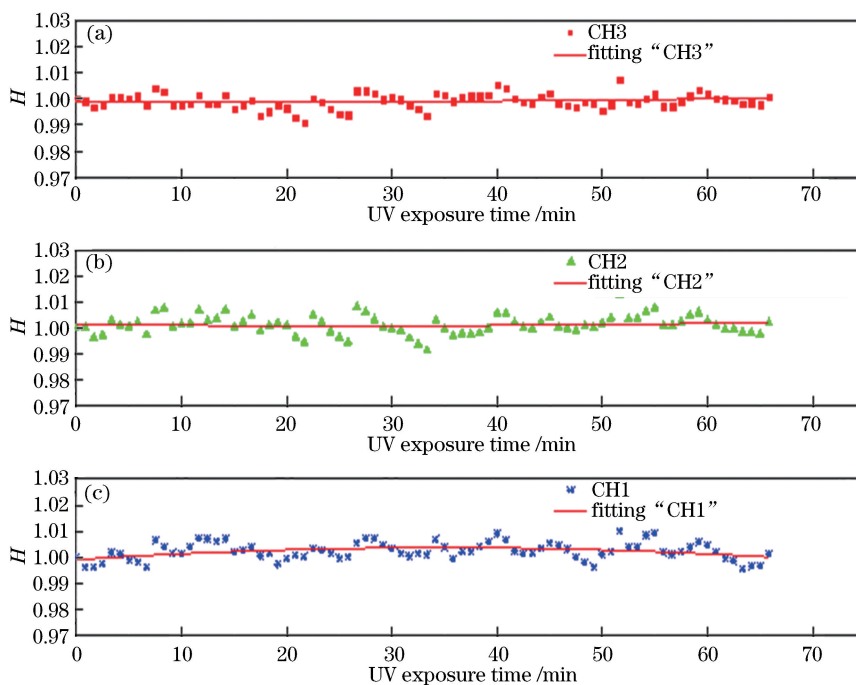


图 6 不同通道的衰减因子。(a)通道一;(b)通道二;(c)通道三

Fig. 6 Degradation factors of three different channels. (a) Channel 1; (b) channel 2; (c) channel 3

实际上,漫射板衰减与漫射板受到紫外照射的时间是相关的,因此图 6 使用紫外曝光时间作为自变量。从变化趋势中可以看出,在当前紫外曝光时间范围内,漫射板的表面特性并未发生衰减。3 个通道衰减因子的统计结果显示,第一通道

的监测稳定性(相对标准偏差)为 0.33%,第二通道的监测稳定性为 0.36%,第三通道的监测稳定性为 0.29%。

4.2 误差分析

在轨监测的溯源不确定性主要源自以下几个方

面:1) 相对 BRDF 的不确定性。监测的精度与 BRDF 的绝对值没有关联,不同时间的 BRDF 相对校正是影响监测精度的重要因素之一,根据目前 BRDF 的测量水平,其相对测量结果优于 0.5%。2) 角度误差引入的不确定度。角度误差主要包括卫星自身的姿态控制、漫射板安装角度误差以及比辐射计安装角度误差,其中卫星姿态误差根据主体返回数据来看优于 0.01° ,漫射板和比辐射计安装角度误差优于 0.1° 。这一部分误差的影响体现在 BRDF 和几何因子插值时产生误差以及对照明角度作余弦校正时产生误差。实际上, BRDF 和几何因子随着角度变化得很小,这么小的角度误差不会对插值结果产生影响;余弦修正产生的影响按照最大照明角度 50° 估算,余弦误差引入的不确定度为 $[\cos 50^\circ - \cos(50^\circ \pm 0.1^\circ)] \div \cos 50^\circ$, 得到 0.1° 的误差会产生 0.21% 的偏差。3) 几何因子测量误差。几何因子的

表 2 不确定度分析结果

Table 2 Uncertainty analysis results

Source	Uncertainty / %
Relative BRDF uncertainty	0.50
Uncertainty introduced by angular error	0.21
Geometric factor measurement error	0.48(CH1), 0.16(CH2 & CH3)
Other factors such as stray light	0.13
Combined uncertainty	0.74(CH1), 0.58(CH2 & CH3)

5 结 论

定期监测漫射板反射率衰减是实现漫射板在轨高精度定标的重要手段之一。本研究介绍了比辐射计的监测流程,并通过公式推导说明了衰减因子的溯源链路。比辐射计采用双观测口的形式工作,使信号对称入射到匀光片后被探测器接收,同时控制定标门开与关来实现交替观测漫射板和太阳。通过对星上获取数据的分析,建立了在轨数据处理模型。在分析数据时发现温度对探测器响应具有一定影响,尤其是对第一通道的影响达到了 $0.165\%/^\circ\text{C}$,但是比辐射计是基于比值的方式监测的,因此可以消除温度的影响。将衰减因子按照紫外曝光时间拟合,可以得出漫射板反射率的实际衰减量。结果表明:在轨一年的时间内,漫射板表面特性仍然稳定,并无明显衰减,3 个通道监测的稳定性(相对标准偏差)分别为 0.33%、0.36%、0.29%。根据溯源链路计算了 3 个通道衰减因子监测的合成不确定度,第二、第三通道在置信度为 95% 时的合成监测不确定

精度直接决定了太阳观测信号的精度,地面实验室测试水平几何因子测量不确定度优于 0.16% (不包括第一通道),其中第一通道由于其波段的特殊性,其测试不确定度仅优于 0.48%。比辐射计材料使用的是表面经过发黑处理的铝合金,且观测筒设有多级光阑,杂散光的影响小于 0.13%。

综合考虑上述因素得到第二、第三通道在置信因子 $k=2$ (即置信度为 95%) 时的合成监测不确定度为 1.16%,第一通道的合成监测不确定度则为 1.48%。这里的合成监测不确定度是指计算监测结果时各个参数的测量误差对最终检测结果的影响。由于各个参数没有相关性,因此计算合成监测不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_m^2}, \quad (10)$$

式中: u_1, u_2, \dots, u_m 为各个参数的不确定度。不确定度的分析结果如表 2 所示。

度为 1.16%,第一通道的合成监测不确定度为 1.48%。本研究仍存在不足之处,目前,漫射板的暴露时间仅为 1 h,漫射板尚未产生明显的衰减趋势,因此建立的衰减模型不具代表性。随着后续数据的补充,衰减模型可以进一步优化,在轨监测会更加可靠。可靠的在轨监测技术可以实现遥感器全寿命期内的精度定标,在一定程度上推动遥感定量化水平。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] Lei N, Chen X X, Xiong X X. Determination of the SNPP VIIRS SDSM screen relative transmittance from both yaw maneuver and regular on-orbit data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(3): 1390-1398.
- [4] Lei N, Xiong X X. Estimation of the accuracy of the SNPP VIIRS SD BRDF degradation factor determined by the solar diffuser stability monitor [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9607: 96071V.
- [5] Sun J Q, Xiong X X, Barnes W L. MODIS solar diffuser stability monitor sun view modeling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(8): 1845-1854.
- [6] Chen H D, Xiong X X. MODIS solar diffuser stability monitor: function and applications [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7452: 745218.
- [7] 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.
- [8] Olij C, Schaarsberg J G, Werij H G C, *et al.* Spectralon diffuser calibration for MERIS [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3221: 63-74.
- [9] Lei N, Xiong X X. Products of the SNPP VIIRS SD screen transmittance and the SD BRDFs from both yaw maneuver and regular on-orbit data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(4): 1975-1987.
- [10] Li M F, Xu W W, Zou P, *et al.* Response characteristic of the ratioing radiometer [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0212005.
李孟凡, 徐伟伟, 邹鹏, 等. 比值辐射计响应特性 [J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0212005.
- [11] 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.