

# 星上反射率定标原理及其精度保持方法研究

黄文薪<sup>1,2</sup> 张黎明<sup>1,2</sup> 司孝龙<sup>1,2</sup> 曹兴家<sup>1,2</sup> 朱雪梅<sup>1,2</sup> 李孟凡<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031

<sup>2</sup>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

**摘要** 论述了太阳漫反射板星上反射率定标原理,建立了基于太阳漫反射板的星上反射率定标物理模型。太阳漫反射板双向反射分布函数(BRDF)会随时间发生衰减,是星上定标不确定度的主要来源,为此对监测太阳漫射板 BRDF 方法展开了研究。建立了中分辨率成像光谱仪(MODIS)太阳漫射板稳定性监测辐射计的监测物理模型,分析其在在轨性能评估中发现的问题。提出了一种积分球“双入光口+挡板”的光学结构,在保证功能实现的基础上简化了物理模型,减少了影响仪器不确定的因素。实验验证了该光学结构可防止太阳观测端口响应出现波纹。根据新光学结构的监测物理模型,参照目前国内对其相关参数的测试水平,对其监测不确定度进行了预估。结果表明,其监测不确定度可优于 0.68%。

**关键词** 光学器件; 星上定标; 太阳漫反射板; 双向反射分布函数; 积分球

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0623001

## Theory and Precision Maintenance Method of On-Orbit Reflectance Calibration

Huang Wenxin<sup>1,2</sup> Zhang Liming<sup>1,2</sup> Si Xiaolong<sup>1,2</sup> Cao Xingjia<sup>1,2</sup>

Zhu Xuemei<sup>1,2</sup> Li Mengfan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** The theory of on-orbit reflectance calibration of the solar diffuser panel is expounded and the physical model of on-orbit reflectance calibration is established. As the precision of on-orbit calibration is affected mostly by the degeneration of the solar diffuser's bidirectional reflectance distribution function (BRDF), the method of monitoring the degeneration of BRDF is discussed. According to the monitoring physical model of the solar diffuser stability monitor of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and the problem founded in the on-orbit performance evaluation, an optical structure of integrating sphere with two imports for light and a baffle inside is proposed. The parameters in its physical model are decreased and some factors that bring uncertainties are cut down while the function can be ensured. It is validated that the optical structure can prevent the sun view response from the ripple signal response in experiment. Based on the physical model of the new optical structure and the domestic testing level, the uncertainty of this system is estimated, and it can be less than 0.68%.

**Key words** optical devices; on-orbit calibration; solar diffuser panel; bidirectional reflectance distribution function; integrating sphere

**OCIS codes** 230.0250; 280.4991; 290.1483; 130.3120

**收稿日期:** 2016-01-22; **收到修改稿日期:** 2016-02-04

**基金项目:** 国家自然科学基金(41301374)

**作者简介:** 黄文薪(1988—),男,博士研究生,主要从事光学遥感器星上定标方面的研究。

E-mail: huangwenxin.060569@163.com

**导师简介:** 张黎明(1958—),男,本科,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感器辐射定标与标准传递等方面的研究。

E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

遥感仪器在发射前已在实验室完成了定标,但是受发射过程中的振动、剧烈变化的温度以及在轨运行期间受到的辐照、污染和元件自身衰减等因素的影响,其系统参数会产生突变或渐变,遥感器性能也会与发射前的地面定标存在差异。为了提高所获取的遥感数据的定量化应用水平,真实地反映目标,必须对遥感器性能参数进行长期的在轨监测和校正。而基于太阳漫反射板(漫射板)的星上定标技术以太阳为参考光源,通过照明双向反射分布函数(BRDF,  $f$ )已知的漫射板,为遥感器定标建立星上辐射基准/反射率基准,可实现遥感器全孔径全光路端到端的高精度、高频次和高效率的绝对辐射定标及反射率定标。目前该方式所能达到的星上反射率定标不确定度优于2%<sup>[1-3]</sup>。然而,在空间环境中,太阳漫射板(SD)受真空紫外辐照及有机污染等因素影响,其BRDF随时间有一定的衰变,导致星上定标精度下降。中分辨率成像光谱仪(MODIS)在轨监测的十四年期间,其漫射板BRDF在0.41~0.94  $\mu\text{m}$ 监测的9个波段出现了不同程度的衰减,其中0.41  $\mu\text{m}$ 附近BRDF衰减为48%,0.94  $\mu\text{m}$ 处为3%。因此,MODIS采用了太阳漫射板稳定性监测辐射计(SDSM),通过比对测量太阳辐射量与太阳照明的漫射板反射辐射量监测太阳漫射板长期的在轨稳定性<sup>[2]</sup>。欧洲航天局中分辨率成像分光计(MERIS)在相同照明条件下将一块与定标漫射板同源的漫射板2与定标漫射板进行比对,从而确定定标漫射板的衰变系数,其中漫射板2很少曝光使用,认为它的BRDF在卫星全寿命期的衰减是可忽略的<sup>[3]</sup>。通过星上监测与修正来确保在太阳漫射板BRDF持续衰减的情况下星上太阳漫反射板的反射率精度满足要求,因此,对太阳漫射板反射率量值的监测是保障遥感器全寿命期星上反射率定标精度的关键,对保证遥感数据质量有重要意义。

为保证太阳漫反射板全寿命期都可实现高精度星上定标,中国科学院安徽光学精密机械研究所开展了太阳漫射板星上定标技术及其星上BRDF精度保持方法的研究。本文在论述太阳漫射板星上反射率定标原理的基础上,结合定标模型分析得到:太阳漫射板星上定标在轨不确定度来源主要是太阳漫射板BRDF的衰减。为此,对目前世界上已取得成功的一种太阳漫反射板衰减监测方式(MODIS所采用的SDSM监测原理)进行了研究,结合SDSM的监测模型及在其在轨性能评估中发现的问题,提出了一种积分球“双入光口+挡板”光学结构的太阳漫射板衰减监测辐射计(SDDM)设计方案,并设计了SDDM太阳观测端口的响应信号验证实验。最后,根据目前国内的相关参数测试水平,对SDDM监测不确定度进行了预估。

## 2 太阳漫射板星上反射率定标原理

太阳漫射板星上定标系统主要由太阳漫射板和太阳漫射板衰减监测两部分组成。定标时太阳漫射板展开于遥感器入瞳前端,选择BRDF已知的太阳漫射板,以产生反射率已知的参照。通过比对观测太阳漫射板与观测地物的辐亮度,消去遥感器和探测器的响应度,得到地物大气层顶表观反射率,进而实现高精度星上反射率定标。太阳漫射板衰减监测手段用于太阳漫射板的BRDF衰减的监测及修正,确保长期的星上定标精度。太阳漫射板星上定标及其衰减监测原理如图1所示。

星上定标时刻太阳漫射板展开后,星上定标 $t$ 时刻,遥感器观测方向的太阳漫射板光谱辐亮度为

$$L_{\text{cal,SD}}(\lambda, t) = \frac{E_s(\lambda) \cos[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t)] \tau_{\text{SAS}}[\theta_s(t), \phi_s(t)]}{R^2} \times f[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_v, \phi_v; \lambda], \quad (1)$$

式中 $E_s(\lambda)$ 为大气外太阳光谱辐照度; $[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t)]$ 、 $[\theta_v, \phi_v]$ 分别为星上定标 $t$ 时刻太阳漫射板坐标系下的太阳入射天顶角与方位角及遥感器观测天顶角与方位角; $[\theta_s(t), \phi_s(t)]$ 为星上定标 $t$ 时刻卫星坐标系下太阳照明卫星的天顶角及方位角; $\tau_{\text{SAS}}[\theta_s(t), \phi_s(t)]$ 为星上定标 $t$ 时刻卫星坐标系下太阳以角度 $[\theta_s(t), \phi_s(t)]$ 入射漫射板衰减屏的透射率,如图1中“attenuation screen for the SD”所示,置于漫射板前端作为衰减入射到漫射板的太阳能量使用,不需要衰减太阳入射能量时其值为1; $R$ 为日地距离因子; $f[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_v, \phi_v; \lambda]$ 为星上定标 $t$ 时刻,太阳以角度 $[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t)]$ 照明太阳漫射板,并在 $[\theta_v, \phi_v]$ 方向观测的太阳漫射板BRDF; $\lambda$ 为波长。

太阳漫射板在空间环境中,其BRDF会随时间发生衰减,存在如下关系:

$$f[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_v, \phi_v; \lambda] = H(\lambda, t) f_{\text{lab}}[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_v, \phi_v; \lambda], \quad (2)$$

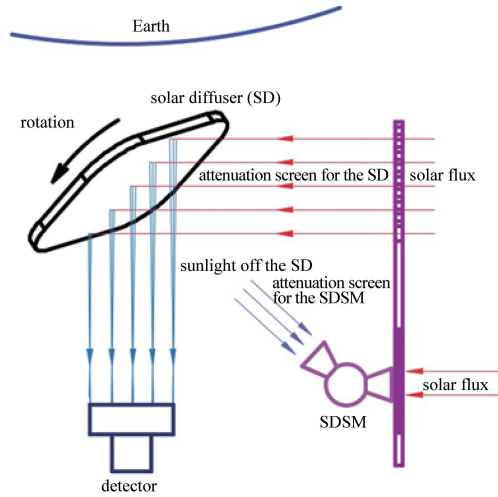


图 1 星上定标及漫射板监测原理示意图

Fig. 1 Diagram of on-orbit calibration and the monitoring principle of solar diffuser

式中  $H(\lambda, t)$  为星上定标  $t$  时刻的太阳漫射板综合衰减系数;  $f_{\text{lab}}[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_v, \phi_v; \lambda]$  为星上定标  $t$  时刻太阳漫射板所对应角度的实验室测量的 BRDF。

定标数据获取后, 遥感器所观测的地物目标表观辐亮度可表示为

$$L_{\text{cal, target}}(\lambda, t) = \frac{E_s(\lambda) \cos[\theta_{\text{EV}}(t), \phi_{\text{EV}}(t)]}{R^2} f_{\text{target}}[\theta_{\text{EV}}(t), \phi_{\text{EV}}(t); \theta_{\text{ev}}(t), \phi_{\text{ev}}(t); \lambda], \quad (3)$$

式中  $[\theta_{\text{EV}}(t), \phi_{\text{EV}}(t)]$ 、 $[\theta_{\text{ev}}(t), \phi_{\text{ev}}(t)]$  分别为遥感器观测地物目标时太阳照明目标的天顶角与方位角及遥感器观测天顶角与方位角。

根据(1)~(3)式可得所观测地物目标的表观反射率为

$$f_{\text{target}}[\theta_{\text{EV}}(t), \phi_{\text{EV}}(t); \theta_{\text{ev}}(t), \phi_{\text{ev}}(t); \lambda] = \frac{\cos[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t)] \tau_{\text{SAS}}[\theta_{\text{S}}(t), \phi_{\text{S}}(t)] H(\lambda, t) f_{\text{lab}}[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_v, \phi_v; \lambda] L_{\text{cal, target}}(\lambda, t)}{\cos[\theta_{\text{EV}}(t), \phi_{\text{EV}}(t)] L_{\text{cal, SD}}(\lambda, t)}. \quad (4)$$

(3)式中, 大气外太阳光谱辐照度  $E_s(\lambda)$  通常均匀稳定, 可由科学观测得到<sup>[4]</sup>; 日地距离因子  $R$  和太阳照明角度  $[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t)]$ 、 $[\theta_{\text{EV}}(t), \phi_{\text{EV}}(t)]$  及  $[\theta_{\text{S}}(t), \phi_{\text{S}}(t)]$  可根据卫星轨道等计算给出;  $L_{\text{cal, target}}(\lambda, t)$  与  $L_{\text{cal, SD}}(\lambda, t)$  可由遥感器的实时响应模型建立与探测器输出的关系, 两者比较消去探测器响应度后可确定该比值。因此一旦太阳漫射板衰减系数  $H(\lambda, t)$  确定, 结合技术已成熟的高精度  $f_{\text{lab}}(\theta_{\text{SD}, t}, \phi_{\text{SD}, t}; \theta_v, \phi_v; \lambda)$  实验室测量<sup>[5]</sup>, 则可根据(4)式计算得到所观测地物目标的表观反射率, 实现高精度星上反射率定标。

### 3 太阳漫射板 BRDF 星上精度保持方法研究

从反射率定标模型(4)式的参数分析可知, 太阳漫射板星上反射率定标精度取决于对漫射板 BRDF 量值的实时确定, 因此, 需要对太阳漫射板 BRDF 衰减系数进行监测。基于太阳漫射板 BRDF 衰减具有各向同性的特点<sup>[6]</sup>, 可采用相对测量的方式进行监测。通过以测量太阳辐射量信号为参照, 与同时测量的太阳漫射板反射辐射量比对消去探测器响应度及入射角度变化等影响后, 确定太阳漫射板 BRDF 的衰变系数  $H(\lambda, t)$ , 实时对太阳漫射板 BRDF 进行修正, 确保太阳漫射板 BRDF 的量值精度。从某种意义上说, 对星上太阳漫射板 BRDF 长期监测的不确定度决定了遥感器长期的星上反射率定标精度。下面对美国 MODIS 所采用的监测方法实现过程及发现的问题进行分析, 据此提出一种新的监测实现方式。

#### 3.1 太阳漫射板稳定性监测辐射计

美国 MODIS 设置了 SDSM 对漫射板 BRDF 衰变系数进行监测, 图 2(a)为 MODIS SDSM 实物图, 主要由电机、反射镜、积分球、滤光片探测器及 SDSM 太阳衰减屏等组成。要实现对太阳漫射板 BRDF 衰减监测, SDSM 需要测量 3 个物理量: 自身滤光片探测器暗电流、太阳辐射量以及太阳漫射板反射辐射量。不同的入射光经 SDSM 中的反射镜反射至积分球同一入口, 进入积分球匀光, 再由滤光片探测器进行探测, 通过

内部电机驱动反射镜旋转来实现入射光信号的切换,如图 2(b)所示。

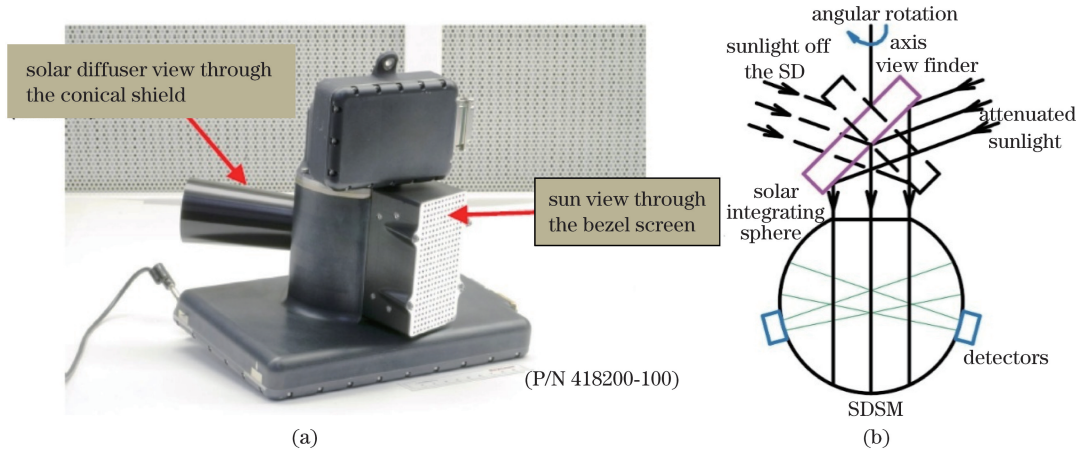


图 2 (a)SDSM 实物图;(b)SDSM 工作光路示意图

Fig. 2 (a) Diagram of SDSM; (b) principle diagram of SDSM working optical path

根据 SDSM 的实际工作过程,星上定标时刻  $t$ ,由太阳观测端口进入积分球的辐射通量  $\Phi_{\text{SUN}}(\lambda, t)$ 可表示为

$$\Phi_{\text{SUN}}(\lambda, t) = E_s(\lambda) \cos[\theta_{\text{SV}}(t), \phi_{\text{SV}}(t)] \tau_{\text{SDSM}}[\theta_{\text{SV}}(t), \phi_{\text{SV}}(t)] A_{\text{SDSM}}, \quad (5)$$

式中  $\theta_{\text{SV}}(t)$  和  $\phi_{\text{SV}}(t)$  分别为星上定标  $t$  时刻 SDSM 坐标系下的太阳入射天顶角和方位角;  $\tau_{\text{SDSM}}[\theta_{\text{SV}}(t), \phi_{\text{SV}}(t)]$  为星上定标  $t$  时刻太阳以角度  $[\theta_{\text{SV}}(t), \phi_{\text{SV}}(t)]$  入射的 SDSM 衰减屏透射率;  $A_{\text{SDSM}}$  为 SDSM 积分球入光口面积。

由太阳漫射板入射端口入射的辐射通量  $\Phi_{\text{SD}}(\lambda, t)$  为

$$\Phi_{\text{SD}}(\lambda, t) = E_s(\lambda) \tau_{\text{SAS}}(\theta_{\text{S},t}, \phi_{\text{S},t}) \cos[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t)] \Omega_{\text{SD}} A_{\text{SDSM}} F[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda] / \pi, \quad (6)$$

式中  $[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t)]$  和  $[\theta_r, \phi_r]$  分别为星上定标  $t$  时刻,太阳漫射板坐标系下的太阳入射高度角和方位角以及 SDSM 对漫射板观测的高度角与方位角;  $F[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda]$  为星上定标  $t$  时刻,SDSM 观测方向的太阳漫射板双向反射比因子(BRF,  $F$ ), BRF 与 BRDF 相差立体角因子,即  $f = F/\pi$ ;  $\Omega_{\text{SD}}$  为 SDSM 观测漫射板所张立体角,且  $\Omega_{\text{SD}} = \pi \sin^2 \theta$ ,  $\theta$  为 SDSM 观测漫射板的视场半角,是不变的。

由(5)~(6)式可得 SDSM 比率模型

$$R_{\text{SDSM}}(\lambda, t) = \frac{D_{\text{SD}}(\lambda, t)}{D_{\text{SUN}}(\lambda, t)} = \frac{\tau_{\text{SAS}}[\theta_{\text{S}}(t), \phi_{\text{S}}(t)] \cos[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t)]}{\tau_{\text{SDSM}}[\theta_{\text{SV}}(t), \phi_{\text{SV}}(t)] \cos[\theta_{\text{SV}}(t), \phi_{\text{SV}}(t)]} F[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda] \sin^2 \theta, \quad (7)$$

式中  $D_{\text{SD}}(\lambda, t)$  和  $D_{\text{SUN}}(\lambda, t)$  分别为扣除过暗电流的滤光片探测器测量的来自太阳漫射板反射与太阳入射 SDSM 的响应值。

若  $R_{\text{SDSM}}(\lambda, t_0)$  为发射后 SDSM 星上首次测量所得的比率,星上首次定标时刻的漫射板未经衰减,合理地假定为实验室测量 BRF 值,则有

$$F[\theta_{\text{SD}}(t_0), \phi_{\text{SD}}(t_0); \theta_r, \phi_r; \lambda] = F_{\text{lab}}[\theta_{\text{SD}}(t_0), \phi_{\text{SD}}(t_0); \theta_r, \phi_r; \lambda], \quad (8)$$

则由(2)、(7)、(8)式,星上定标  $t$  时刻的太阳漫反射板衰减系数  $H_{\text{SDSM}}(\lambda, t)$  可表示为

$$H_{\text{SDSM}}(\lambda, t) = \frac{R_{\text{SDSM}}(\lambda, t_0) \tau_{\text{SDSM}}(\theta_{\text{SV},t_0}, \phi_{\text{SV},t_0}) \tau_{\text{SAS}}[\theta_{\text{S}}(t_0), \phi_{\text{S}}(t_0)]}{R_{\text{SDSM}}(\lambda, t) \tau_{\text{SDSM}}(\theta_{\text{SV},t}, \phi_{\text{SV},t}) \tau_{\text{SAS}}[\theta_{\text{S}}(t), \phi_{\text{S}}(t)]} \cdot \frac{\cos[\theta_{\text{SD}}(t_0), \phi_{\text{SD}}(t_0)] \cos[\theta_{\text{SV}}(t), \phi_{\text{SV}}(t)] F_{\text{lab}}[\theta_{\text{SD}}(t_0), \phi_{\text{SD}}(t_0); \theta_r, \phi_r; \lambda]}{\cos[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t)] \cos[\theta_{\text{SV}}(t_0), \phi_{\text{SV}}(t_0)] F_{\text{lab}}[\theta_{\text{SD}}(t), \phi_{\text{SD}}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda]} \quad (9)$$

### 3.2 太阳漫反射板衰减监测辐射计

MODIS SDSM 太阳观测端口采用了针孔阵列衰减屏对太阳辐射量进行衰减,其结构特殊且设计参数和安装存在问题导致该端口入射信号出现较大波纹<sup>[2]</sup>。从图 2(b)易知,SDSM 的积分球结构使得滤光片探

测器可观测到进入积分球的二次反射光,因此太阳观测端入射光角度的变化对探测器响应一致性影响会比较大<sup>[6]</sup>。结合 SDSM 的成功经验,本文提出一种积分球“双人光口+挡板”的太阳漫射板衰减监测辐射计(SDDM)的设计方案,其结构如图 3 所示,主要由积分球、挡板、滤光片探测器、太阳观测端口、漫射板观测端口及电磁阀快门组成。通过合理设计将两端口入射光调整为在球内等高度角入射,经 4 次以上反射才被探测器探测,可减小太阳入射角度变化带来的影响。

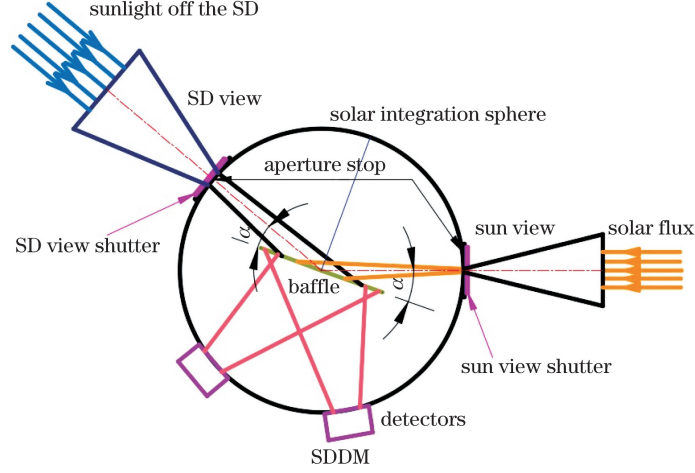


图 3 太阳漫反射板衰减监测辐射计光学结构图

Fig. 3 Optical structure of solar diffuser degeneration monitor

与 SDSM 监测比率模型建立类似,SDDM 比率模型可表示为

$$R_{SDDM}(\lambda, t) = \frac{D_{SD}(\lambda, t)}{D_{SUN}(\lambda, t)} = \frac{\cos[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t)]}{\cos[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)]} \frac{A_{SDV} F[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda] \sin^2 \theta}{A_{SV}[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)]}, \quad (10)$$

式中  $A_{SV}[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)]$  为星上定标  $t$  时刻,太阳以角度  $[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)]$  入射到 SDDM 太阳观测端口的透光面积; $A_{SDV}$  为 SDDM 太阳漫射板观测端口的孔径光阑在固定观测角度下的透光面积, $A_{SDV}$  为定值。

大量的地面模拟实验及 MODIS 等载荷对漫射板的衰减监测结果表明,太阳漫射板的衰减与波长有很大的依赖关系。MODIS 在轨监测的十二年期间,其漫射板 BRDF 在  $0.94 \mu\text{m}$  处衰减为  $0.6\%$ ,平均年衰减量为  $0.05\%$ ,衰减曲线如图 4 所示<sup>[7]</sup>。由于不同波段为同时测量,若以此波段为参照,对(10)式对应的波段测量比再求比值,可消去面积因子等的影响,得到

$$\frac{D_{SD}(\lambda, t) / D_{SD}(\lambda_0, t)}{D_{SUN}(\lambda, t) / D_{SUN}(\lambda_0, t)} = \frac{F[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda]}{F[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda_0]}, \quad (11)$$

式中  $\lambda_0$  为参比波长,取  $\lambda_0 = 0.94 \mu\text{m}$ 。

由于参比波段漫射板 BRDF 衰减很少,故可近似等于实验室测量的漫射板 BRDF,即

$$F[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda_0] \approx F_{lab}[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda_0]. \quad (12)$$

将(2)式和(12)式代入(11)式,整理后得到基于波段比的漫射板衰减监测模型为

$$H_{SDDM}(\lambda, t) = \frac{F_{lab}[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda_0]}{F_{lab}[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda]} \frac{D_{SD}(\lambda, t)}{D_{SD}(\lambda_0, t)} \frac{D_{SUN}(\lambda_0, t)}{D_{SUN}(\lambda, t)}. \quad (13)$$

基于波段比的漫射板衰减监测模型忽略了参比波段  $\lambda_0$  处的漫射板衰减系数,将对定标精度带来一定的影响,但可作为对 SDDM 单次测量的数据处理,提高单次测量数据精度。而 SDDM 对太阳漫反射板的监测是一个长期的过程,需要得到 SDDM 监测时间序列模型,因此以长期监测测量所得时间序列比求比值,以首次星上定标时刻  $t_0$  测量比值为参照。

根据(10)式对不同时刻测量求比值

$$\frac{R_{SDDM}(\lambda, t)}{R_{SDDM}(\lambda, t_0)} = \frac{F[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda]}{F[\theta_{SD}(t_0), \phi_{SD}(t_0); \theta_r, \phi_r; \lambda]} \frac{A_{SV}[\theta_{SV}(t_0), \phi_{SV}(t_0)]}{A_{SV}[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)]} \cdot \frac{\cos[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t)] / \cos[\theta_{SD}(t_0), \phi_{SD}(t_0)]}{\cos[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)] / \cos[\theta_{SV}(t_0), \phi_{SV}(t_0)]}. \quad (14)$$

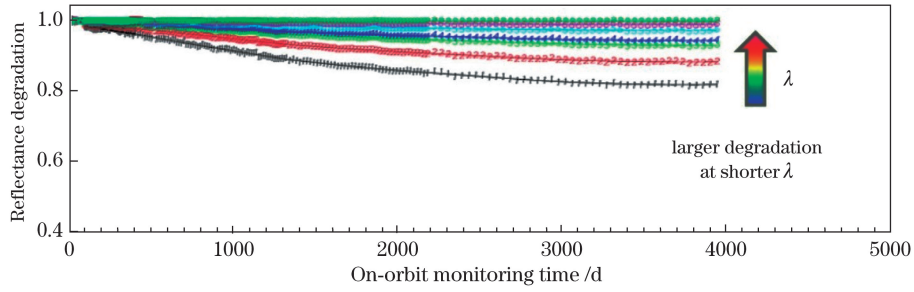


图 4 MODIS SD 在轨监测的十二年间反射率衰减曲线图

Fig. 4 Diagram of MODIS SD's reflectance degeneration in 12 years

实际上,受孔径厚度及加工误差等影响,太阳入射孔径实际通光面积与其相对透射率  $\tau[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)]$  有关,设相对透射率满足

$$\tau[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)] = A_{SV}[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)] / A_{SV}(0, 0). \quad (15)$$

星上首次定标时刻的漫射板未经衰减,因此

$$F[\theta_{SD}(t_0), \phi_{SD}(t_0); \theta_r, \phi_r; \lambda] = F_{lab}[\theta_{SD}(t_0), \phi_{SD}(t_0); \theta_r, \phi_r; \lambda], \quad (16)$$

将上述关系及(2)式代入(14)式,经整理,得到基于时间序列比的漫射板衰减监测模型

$$H_{SDDM}(\lambda, t) = \frac{R_{SDDM}(\lambda, t)}{R_{SDDM}(\lambda, t_0)} \frac{F_{lab}[\theta_{SD}(t_0), \phi_{SD}(t_0); \theta_r, \phi_r; \lambda]}{F_{lab}[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t); \theta_r, \phi_r; \lambda]} \frac{\tau[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)]}{\tau[\theta_{SV}(t_0), \phi_{SV}(t_0)]} \cdot \frac{\cos[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)] \cos[\theta_{SD}(t_0), \phi_{SD}(t_0)]}{\cos[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t)] \cos[\theta_{SV}(t_0), \phi_{SV}(t_0)]}, \quad (17)$$

式中 BRDF 参数和相对透射率  $\tau[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)]$  可由实验室测量得到,结合星上 SDDM 测量比值及定标时刻的角度,可计算得到  $H_{SDDM}(\lambda, t)$  的值。比较 SDDM 与 SDSM 监测物理模型,即(9)式和(17)式,可发现, SDDM 监测模型参数更少,不包含衰减屏透射率模型  $\tau_{SDSM}[\theta_{SV}(t), \phi_{SV}(t)]$  及  $\tau_{SAS}[\theta_{SD}(t), \phi_{SD}(t)]$ ,简化了模型的同时减少了引入测量不确定度的因素。由图 4 可知,星上太阳漫反射板的衰减是一个长期缓慢的过程,并不是一次或几次监测测量就能确定其衰减系数的,结合历史时间序列数据才能准确确定太阳漫反射板衰减系数  $H(\lambda, t)$ ,之后通过(4)式就能实现星上高精度反射率定标。

SDDM 自身的电子元器件等随时间也会发生退化,但该变化也是一个长期缓慢的过程。SDDM 的测量是与星上定标同时进行的,一般在 90 s 内就要完成 10 轮左右的测量,每轮需要测量 3 个物理量:探测器暗电流、太阳辐射量及太阳漫反射板反射辐射量。探测器在每次 90 s 的测量时间段内可合理认为是稳定不变的,且其响应度及 SDDM 自身的其他变化是可以“比掉”的。因此,只要探测器不失效,作为相对测量系统的 SDDM 监测测量数据就是有效的。

### 3.3 SDDM 太阳观测端口响应测试实验

MODIS SDSM 太阳观测端口 940 nm 通道的响应曲线如图 5 所示,响应出现的波纹对准确判断所监测的太阳漫射板 BRDF 衰变系数会引入不确定度,虽然后期通过模型算法(波段比模型)将这一现象改善,但并没有消除。为此,在实验室对所设计的 SDDM 太阳观测端口的响应进行了验证,测试原理图如图 6 所示。将图 3 所示的“双入光口+挡板”积分球固定在由 360°旋转台与 ±10°角位移台组合的二维转台上,使两转台转动中心都通过太阳观测端口孔径光阑中心。采用平行光管作为光源,保持光源发散角与太阳接近,通过调节二维转台来改变照明天顶角  $\theta_s$  与方位角  $\phi_s$ ,实现太阳照明角度变化的模拟,测试结果如图 7 所示。由于地面实验室光源强度达不到一个太阳常数,同时该通道是带滤光片测试的,因此输出响应值与 MODIS SDSM 相比偏小,但信号并没有出现起伏。

## 4 SDDM 监测不确定度预估与讨论

监测星上太阳漫射板的主要目的是保证太阳漫射板 BRDF 精度,确保遥感器长期在轨反射率的定标精度。根据监测模型,地面实验室所测量的监测仪/遥感器观测方向的 BRDF/BRDF 不确定度、对输入辐射量的测量不确定度、太阳漫射板在卫星上的安装误差以及卫星在轨姿态不确定度等是 SDDM 监测不确

定度的主要来源。结合目前国内的实际测量水平,对 SDDM 监测不确定度进行预估,不确定度组成如表 1 所示。

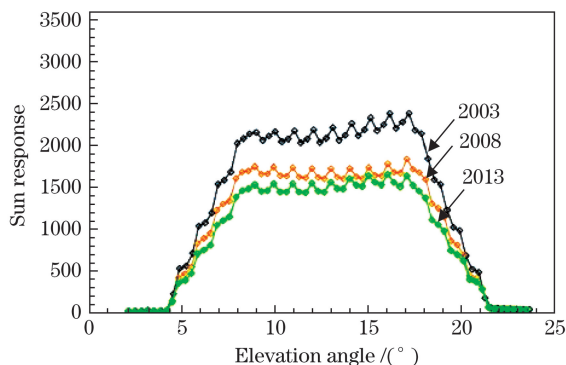


图 5 不同年份下 MODIS SDSM 940 nm 通道随仰角变化的响应值

Fig. 5 MODIS SDSM response with the changing of elevation angle at 940 nm under different years

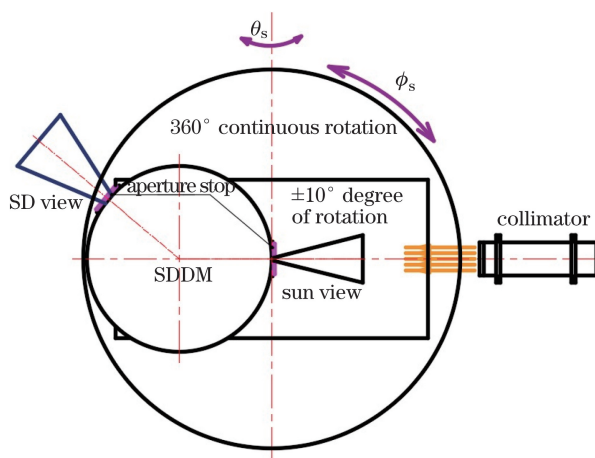


图 6 SDDM 太阳观测端口响应测试原理图

Fig. 6 Principle diagram of SDDM sun view response test

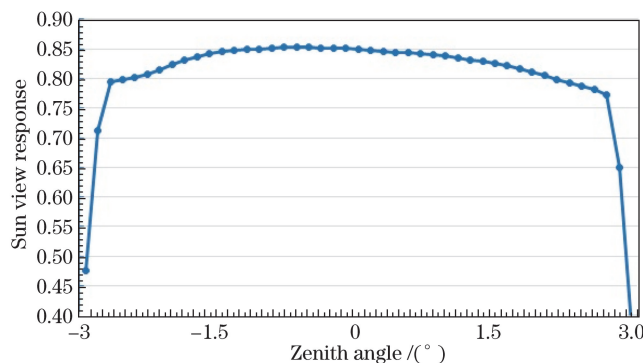


图 7 SDDM 太阳观测端口 900 nm 通道随俯仰角变化的响应函数

Fig. 7 SDDM sun view response with the changing of zenith angle at 900 nm

表 1 SDDM 监测不确定度估计表  
Table 1 Uncertainty estimate of SDDM

Source	Uncertainty / %
SD relative BRF measurement	0.5
Sun view transmittance repeatability	0.35
Pose of satellite	0.03
SD cosine error of incidence	0.1
Measurement of $R_{SDDM}(\lambda, t)$	0.3
Unknown factor	0.2
Total uncertainty	0.68

表 1 中:1)漫射板 SDDM 观测方向的相对 BRF 是指星上首次定标  $t_0$  时刻漫射板 SDDM 观测方向的 BRF 与星上定标  $t$  时刻的(未衰减)BRF 之比,由实验室测量给出,漫射板相对 BRF 测量的不确定度优于 0.5%<sup>[8]</sup>;2)SDDM 应具有很高的信噪比,以应对长期运行后漫射板等衰减导致信噪比下降,SDDM 比值  $R_{SDDM}(\lambda, t)$  的测量不确定度须优于 0.3%;3)考虑测试光源稳定性、入射角度模拟机构精度和测试安装误差等,SDDM 太阳入射相对透射率  $\tau[\theta_{sv}(t), \phi_{sv}(t)]$  测量不确定度可优于 0.35%;由于安装或卫星姿态等角度误差引起的余弦因子不确定度主要由漫射板入射角度误差及太阳入射角度误差所引起,太阳入射角度误差所引起的余弦误差约为 0.03%;当太阳以  $10^\circ \sim 60^\circ$  入射照明漫射板,其安装及姿态角度误差以  $0.1^\circ$  计,漫射

板入射余弦误差仅为 0.1%<sup>[8]</sup>。据此预估基于 SDDM 比值测量的漫射板衰减监测合成不确定度可优于 0.68%，能满足长期在轨定标的技术指标要求。

## 5 结 论

根据太阳漫反射板的星上反射率定标过程,建立了基于漫射板的星上反射率定标模型。通过分析反射率定标模型,发现星上定标精度主要取决于太阳漫射板在轨的 BRDF 衰减,因此太阳漫反射板在星上作为参照的量值精度保持的能力是决定星上定标精度的关键。为此,对目前已取得成功的 MODIS SDSM 监测方式及监测模型进行了分析研究。结合在 SDSM 在轨运行的性能评估中发现的如 SDSM 太阳观测端信号出现波纹,且 SDSM 滤光片探测器受进入积分球二次光影响,及其探测器间响应差异较大等问题,提出了一种不同于 SDSM 的积分球“双入光口+挡板”的光学结构,使光从两观测端口以近似等高度角入射积分球,并经 4 次以上反射匀光后进入滤光片探测器视场。经实验验证,SDDM 光学结构可避免太阳入射角度变化引起的响应波纹情况。SDDM 将设置电磁阀快门取代 SDSM 电机及反射镜的作用,通过快门交替开关实现入光信号间的切换,降低了整个仪器的体积重量功耗。根据 SDDM 监测物理模型,结合现有水平对影响其监测不确定度的几项参数的测试不确定度进行了估计,最后得出 SDDM 监测不确定度可达 0.68%,可满足星上太阳漫射板 BRDF 衰变的高精度监测。由于地面实验室并不可能创造出如大气外太阳般稳定、照度相当及均匀的光源,但实际仪器是在空间中使用,因此实验室对其性能的评价是不准确的。根据 MODIS SDSM 经验,实际使用表现出的性能比地面实验室评价的要好。本文仅在太阳漫反射板衰减监测原理与模型可行性上作了分析讨论,下一步将研究 SDDM 整机性能。基于太阳漫射板的星上定标技术可实现高精度星上反射率定标及绝对辐射定标,可应用于色散型传感器、偏振传感器及干涉型传感器等。而太阳漫射板在定标中作为参照或空间辐射基准,其量值的保持能力,也就是对其 BRDF 的监测精度,直接影响卫星全寿命期的星上定标精度,是实现高精度星上定标必不可少的一部分,对该技术的深入研究是当下提高及保持星上定标精度迫切需要的,它对保证卫星全寿命期遥感数据质量具有重要意义。

## 参 考 文 献

- Justice C O, Vermote E, Townshend J R G, *et al.*. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1228-1249.
- Xiong X J, Angal A, Sun J Q, *et al.*. On-orbit performance of MODIS solar diffuser stability monitor[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083514.
- Olij C, Schaarsberg J G, Werij H G, *et al.*. Spectral on diffuser calibration for MERIS[C]. SPIE, 1997, 3221: 63-74.
- Thuillier G, Floyd L, Woods T N, *et al.*. Solar irradiance reference spectra for two solar active levels[J]. Advances in Space Research, 2004, 34(2): 256-261.
- Li Junlin, Zhang Liming, Si Xiaolong, *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.
- Xiong X, Sun J, Esposito J A, *et al.*. On-orbit characterization of a solar diffuser's bi-directional reflectance factor using spacecraft maneuvers[C]. SPIE, 2003, 5151: 375-383.
- Murgai Vijay, Yu Kristie, Zakharenkov Yuri, *et al.*. Characterization of JPSS solar diffuser stability monitor response to sun angle of incidence[C]. Conference on Characterization and Radiometric Calibration for Remote Sensing, 2013.
- 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): 1851-1868.  
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): 1851-1868.