

文章编号 1004-924X(2016)04-0732-08

太阳漫反射板衰减监测辐射计的设计及性能评估

黄文薪*, 张黎明, 司孝龙, 徐伟伟, 邹 鹏, 王戟翔, 朱雪梅

(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上定标原理, 研究了太阳漫反射板衰减监测方法。针对星上太阳漫反射板双向反射分布函数(BRDF)的衰变, 设计了以太阳为参照, 通过与星上漫反射板反射辐射量比对测量实现监测功能的多波段星上漫反射板衰减监测辐射计(SDDM)。介绍了星上定标与漫射板监测的关系, 设计了 SDDM 积分球两开口入光+挡板的光机结构, 消除了入射光角度变化与探测器响应的相关性。根据光机结构设置的监测过程, 给出了 SDDM 的监测物理模型, 并对 SDDM 滤光片探测器动态范围设置及信噪比进行了验证和分析。在实验室模拟了太阳照射 SDDM 太阳观测端口的角度变化, 对其透过率模型进行了多次重复测量, 结合漫射板相对双向反射比因子(BRF)测量不确定度、卫星姿态及漫射板安装误差进行分析, 得到 SDDM 测量的漫射板监测不确定度优于 0.88%。

关键词: 太阳漫反射板; 漫反射板衰减监测辐射计; 双向反射分布函数; 星上定标

中图分类号: TP73; P414.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0732

Design of solar diffuser degeneration monitor and its performance evaluation

HUANG Wen-xin*, ZHANG Li-ming, SI Xiao-long, XU Wei-wei,
ZOU Peng, WANG Ji-xiang, ZHU Xue-mei

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

* Corresponding author, E-mail: huangwenxin.060569@163.com

Abstract: The principle of on-board calibration for a solar diffuser was expounded, and a method to monitor the degeneration of the solar diffuser was researched. A Solar Diffuser Degeneration Monitor (SDDM) was designed to monitor the degeneration of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) of the solar diffuser by measuring the ratio of the reflected radiance of solar diffuser to sun irradiance. The relationship between on-board calibration and the monitor of the solar diffuser was described. An integrating sphere with two light imports and a baffle for the SDDM was designed to eliminate the dependence of the changed incident angles on the detector response. According to the monitor process, the physics models of SDDM were given, and the dynamic range and Signal to Noise Ratio (SNR) of detectors in the SDDM were validated and analyzed. Finally, the illumination of the sun on the SDDM was simulated in a lab to test the transmittance model repeatedly for several times. By a-

收稿日期: 2015-12-02; 修订日期: 2016-01-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41301374)

analysis of the measurement uncertainty related to the Bidirectional Reflectance Factor(BRF) of the solar diffuser, satellite attitude and the mounting error of the SDDM, it shows that the monitoring uncertainty of the solar diffuser is better than 0.88%.

Key words: solar diffuser; Solar Diffuser Degeneration Monitor(SDDM); Bidirectional Reflectance Distribution Function(BRDF); on board calibration

1 引言

随着卫星遥感技术的深入发展,遥感数据定量化应用的需求日趋迫切,对传感器的定标精度要求也越来越高。星上定标方式具有高效率、高频次和高精度等优点。美国 Terra 和 Aqua 搭载的 MODIS 及欧洲航空航天局 ENVISAT 搭载的 MERIS 均采用了基于太阳漫反射板(简称“漫射板”)的星上定标方式,即以大气外稳定的太阳作为参考光源,照明双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)已知的漫射板,产生光谱辐亮度已知的朗伯面光源,进而实现传感器全孔径全光路星上定标。该方式在太阳反射波段星上反射率定标的不确定度达到了优于 2% 的水平,绝对辐射定标优于 5%^[1-4],是目前国内外一致认可的全孔径全光路和端到端的高精度星上定标方式。

在空间环境中,漫射板受真空紫外辐照、原子氧剥蚀、质子轰击和有机污染等因素的影响,其 BRDF 随时间有一定的衰变,会导致星上定标精度下降。Aqua MODIS 在轨 12 年期间,其漫射板 BRDF 在 0.41~0.94 μm 监测的 9 个波段出现了不同程度的衰减,其中 0.41 μm 附近 BRDF 的衰减为 19%,0.94 μm 处为 0.6%^[2]。因此,MODIS 采用了太阳漫射板稳定性监测辐射计(SDSM)来监测太阳漫射板长期的在轨稳定性,确保在漫射板持续衰减的情况下星上定标的不确定度仍能保持在优于 2% 的水平。也就是说,太阳漫射板稳定性监测辐射计及其衰减监测方法的研究是确保传感器全寿命期星上定标精度的关键,对保证遥感数据质量具有重要意义。

为提高我国传感器的星上定标精度,本文在论述太阳漫反射板星上定标原理的基础上,给出了一种以太阳光源为参照的漫射板衰减监测辐射

计(Solar Diffuser Degeneration Monitor, SDDM)设计方案,据此分析给出了基于 SDDM 测量结合地面实验室测量数据的漫射板衰减监测模型,并对所研制的 SDDM 关键参数进行了验证测试,最后对设计结果及测试结果进行了分析和讨论。

2 太阳漫射板定标及监测原理

太阳漫射板星上定标系统由太阳漫射板和 SDDM 组成。定标时刻漫射板展开于遥感器的入瞳前端,太阳照明 BRDF 已知的太阳漫射板,产生已知光谱辐亮度的朗伯面光源,遥感器通过观测已知光谱辐亮度的漫射板,建立辐射输入与遥感器响应输出的关系,进而实现全孔径、全视场、全光路的高精度星上定标。SDDM 用于监测和修正太阳漫射板 BRDF 的衰减,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。

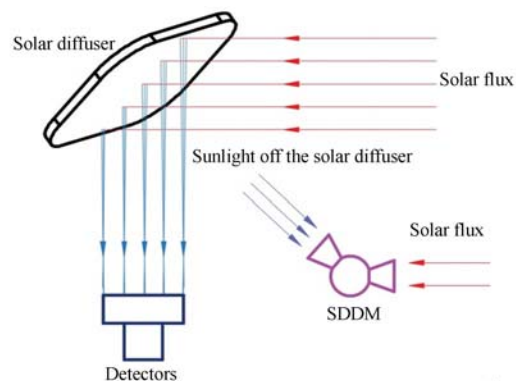


图 1 星上定标及漫射板监测原理示意图

Fig. 1 Principle schematic of on-board calibration and solar diffuser monitoring

定标时刻太阳漫射板展开后,遥感器观测方向漫射板的光谱辐亮度为:

$$L_{SD,t}(\lambda) = \frac{E_s(\lambda) \cos \theta_{SD,t}}{R^2} \times f_t(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_v, \phi_v; \lambda), \quad (1)$$

其中: $L_{SD,t}(\lambda)$ 为星上定标 t 时刻漫射板在遥感器观测方向的光谱辐亮度; $E_s(\lambda)$ 为大气外日地平均距离处的太阳光谱辐照度; $\theta_{SD,t}$, $\phi_{SD,t}$ 和 θ_v , ϕ_v 分别为星上定标 t 时刻漫射板坐标系下太阳入射的天顶角与方位角及遥感器观测的天顶角与方位角; $f_t(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_v, \phi_v; \lambda)$ 为定标 t 时刻遥感器观测方向的漫射板 BRDF; R 为日地距离因子。

研究表明,漫射板 BRDF 随时间的衰减模型可表述为^[2]:

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

其中: $H(\lambda, t)$ 为星上定标 t 时刻的漫射板衰减系数; $f_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_v, \phi_v; \lambda)$ 为星上定标 t 时刻的漫射板所对应角度的实验室测量 BRDF。

式(1)和式(2)中,大气外太阳光谱辐照度非常均匀、稳定,可由科学观测得到^[5];日地距离因子、太阳照明角度可根据卫星轨道等计算给出,因此一旦精确监测得到漫射板的衰减系数 $H(\lambda, t)$,结合实验室测量的漫射板 BRDF,则可根据式(1)与式(2)计算得到星上定标时刻漫射板的光谱辐亮度,实现高精度星上定标。

3 太阳漫射板衰减监测辐射计(SDDM)设计

为实现漫射板衰减的高精度监测,设计了 SDDM,其中 SDDM 的响应度衰变影响是需要考虑的重要因素。SDDM 采用了相对比值测量形式,通过以太阳光源为参照的比值测量消去 SDDM 响应度的影响,并通过对比对初始星上定标时刻的测量比值,结合地面测量参数计算得到星上定标时刻漫射板的衰减系数。

所设计的 SDDM 由太阳入射端口、漫射板入射端口、积分球匀光器、多波段滤光片探测器和电子学部件等组成,如图 2 所示。其中,太阳/漫射板入口分别安装有电磁阀快门,通过交替开关切换实现定标时刻太阳照度、漫射板反射辐亮度及滤光片探测器暗电流 3 个量的交替测量。积分球匀光器内部安装有高反射率、朗伯性良好且空间环境适应性很好的挡板,由太阳/漫射板入口入射的光照射于挡板上接近一致的区域,且相对于积分球坐标系具有相近的入射高度角 α 。根据载荷

定标需要,结合漫射板衰减规律在积分球内分别安装了多波段滤光片探测器,各探测器的视场均对准积分球挡板的背面,进入积分球的光至少经过 4 次匀光反射进入探测器视场。

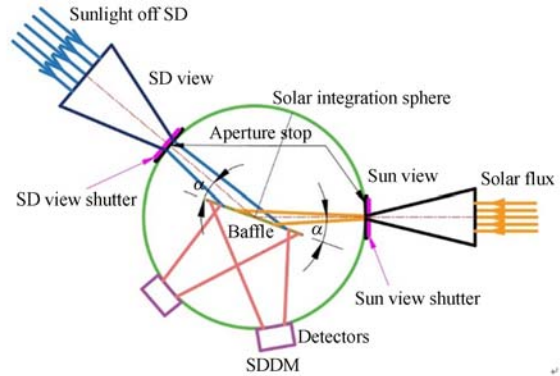


图 2 SDDM 结构示意图
Fig. 2 Configuration of SDDM

SDDM 太阳入射端口孔径光阑的总面积不等于漫射板入射端口孔径光阑面积,通过调整两者比值使得太阳入射/漫射板入射的光通量接近一致,且探测信号均保持较高的信噪比,同时可降低探测器的响应非线性影响。

太阳同步轨道卫星的星上定标时刻一般选择在星下点未被太阳照亮的卫星出影或入影附近,根据太阳入射高度角与方位角随季节的变化,SDDM 坐标系下太阳入射角度设计为高度角在 $\pm 2^\circ$ 、方位角在 $\pm 9^\circ$ 的范围内。

根据所设计的 SDDM,星上定标 t 时刻由太阳入射端口进入积分球的辐射通量为:

$$\Phi_{SUN}(\lambda, t) = \frac{E_s(\lambda)}{R^2} \cos \theta_{SV,t} A_{SV}(\theta_{SV,t}). \quad (3)$$

由漫射板入射端口入射的辐射通量为:

$$\Phi_{SD}(\lambda, t) = \frac{E_s(\lambda)}{R^2} \cos \theta_{SD,t} BRF_t(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda) \Omega_{SD} A_{SD} / \pi, \quad (4)$$

其中: $\theta_{SD,t}$, $\phi_{SD,t}$ 和 θ_r , ϕ_r 分别为定标时刻漫射板坐标系下太阳入射的高度角、方位角以及 SDDM 对漫射板观测的高度角与方位角; $\theta_{SV,t}$ 为定标时刻 SDDM 坐标系下太阳入射端口的太阳入射角; $A_{SV}(\theta_{SV,t})$ 为定标时刻太阳入射端口的面积因子,与太阳入射角度有关; $BRF_t(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda)$ 为定标时刻 SDDM 观测方向的 BRDF 因子, BRF 与 BRDF 相差立体角因子, $BRDF = BRF / \pi$; Ω_{SD}

为 SDDM 观测漫射板所张的立体角, $\Omega_{SD} = \pi \sin^2 \theta$, θ 为立体角所成的光锥半角; A_{SDV} 为 SDDM 漫射板入射端口孔径光阑的面积因子。

根据探测器线性响应模型, 星上定标时刻 SDDM 的响应值与接收光通量成正比, 式(3)与式(4)之比为:

$$\frac{DN_{SD}(\lambda, t)}{DN_{SUN}(\lambda, t)} = \frac{\cos \theta_{SD,t}}{\cos \theta_{SV,t}} \cdot \frac{A_{SDV} \sin^2 \theta BRF_t(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{A_{SV}(\theta_{SV,t})}, \quad (5)$$

其中: $DN_{SD}(\lambda, t)$, $DN_{SUN}(\lambda, t)$ 分别为漫射板辐射量与太阳辐射量的滤光片探测器扣除暗电流后的响应值。

由式(5)可见, 通过以太阳为参比的测量, 消去了探测器响应的影响, 初步建立了 SDDM 测量比值与漫射板 BRF 的关系, 但面积、立体角等几何因素依然存在, 需要进一步的分析, 以尽可能地消去几何因素的影响, 得到较高精度的漫射板衰减监测系数。

4 太阳漫射板衰减监测模型

4.1 基于波段比的漫射板衰减监测模型

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, 漫射板的衰减与波长有很大的依赖关系。Aqua MODIS 在轨 12 年期间, 其漫射板 BRDF 在 $0.94 \mu\text{m}$ 处为 0.6% ^[2], 平均年衰减量为 0.05% /年。若以此波段为参照, 对式(5)的波段测量比再求比值, 由于不同波段为同时测量, 可消去随角度变化的 $A_{SV}(\theta_{SV,t})$, 有:

$$\frac{DN_{SD}(\lambda, t) / DN_{SUN}(\lambda, t)}{DN_{SD}(\lambda_0, t) / DN_{SUN}(\lambda_0, t)} = \frac{BRF_t(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{BRF_t(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda_0)}, \quad (6)$$

其中: λ_0 为参比波长, 这里取 $\lambda_0 = 0.94 \mu\text{m}$ 。

由于参比波段漫射板 BRF 的衰减很少, 近似等于实验室测量的漫射板 BRF, 即有:

$$BRF_t(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda_0) \approx BRF_{lab}(\theta_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda_0), \quad (7)$$

将式(2)、式(7)带入式(6), 经整理后得到基于波段比的漫射板衰减监测模型为:

$$H(\lambda, t) = \frac{BRF_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda_0)}{BRF_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda)} \cdot \frac{DN_{SD}(\lambda, t) / DN_{SUN}(\lambda_0, t)}{DN_{SD}(\lambda_0, t) / DN_{SUN}(\lambda, t)}. \quad (8)$$

根据 SDDM 星上监测的波段比值, 结合实验室测量的漫射板波段 BRF 比值, 可计算得到不同监测波段的漫射板衰减系数, 经波段拟合后得到漫射板随波长的衰减变化关系。该模型可一定程度上减小单次测量引入的误差, 提高单次监测数据质量, 但不能以此模型来确定漫射板的衰减监测系数。

4.2 基于时间序列比的漫射板衰减监测模型

基于波段比的漫射板衰减监测模型忽略了参比波段 λ_0 处的漫射板衰减系数, 将对定标精度带来一定的影响, 为此以 SDDM 监测测量的时间序列求比值, 以首次星上定标时刻 t_0 测量比值为参照。

令 $K(\lambda, t) = \frac{DN_{SD}(\lambda, t)}{DN_{SUN}(\lambda, t)}$, 根据式(5)对不同时刻测量求比值有:

$$\frac{K(\lambda, t)}{K(\lambda, t_0)} = \frac{BRF_t(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{BRF_{t_0}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_r, \phi_r; \lambda)} \cdot \frac{A_{SV}(\theta_{SV,t_0}) \cos \theta_{SD,t} / \cos \theta_{SD,t_0}}{A_{SV}(\theta_{SV,t}) \cos \theta_{SV,t} \cos \theta_{SV,t_0}}. \quad (9)$$

实际上, 受孔径厚度影响, 太阳入射孔径面积因子与其相对透过率 $\tau(\theta_{SV,t})$ 有关, 定义相对透过率 $\tau(\theta_{SV,t}) = A_{SV}(\theta_{SV,t}) / A_{SV}(0)$ 。

星上首次定标 t_0 时刻的漫射板未经衰减, 合理地假定为实验室测量 BRF 值:

$$BRF_{t_0}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_r, \phi_r; \lambda) = BRF_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_r, \phi_r; \lambda)$$

将上述关系及式(5)代入式(9), 整理得到基于时间序列比的漫射板衰减监测模型为:

$$H(\lambda, t) = \frac{K(\lambda, t)}{K(\lambda, t_0)} \frac{BRF_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \phi_{SD,t_0}; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{BRF_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda)} \cdot \frac{\tau(\theta_{SV,t}) \cos \theta_{SV,t} \cos \theta_{SD,t_0}}{\tau(\theta_{SV,t_0}) \cos \theta_{SD,t} \cos \theta_{SV,t_0}}, \quad (10)$$

式中 BRF 参数、相对透过率 $\tau(\theta_{SV,t})$ 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以计算得到 $H(\lambda, t)$, 据此可对漫射板遥感器观测方向的 BRDF 进行修正。

4.3 漫射板衰减联合监测模型

监测星上漫射板的主要目的是保证漫射板的辐亮度精度, 确保遥感器的长期在轨定标精度。卫星发射后, 经过一定时间的在轨运行, 积累了一定数量的不同时期的 SDDM 观测比值数据, 利用某些波段衰减小的特点, 采用时间序列的低级多项式拟合, 再进行最小二乘法求解, 建立时间序列/波段比联合衰减监测模型, 进而提高长期监测精度。

根据式(10)所述方法,定义 λ_0 波段由漫射板时间序列测量比值计算得到的衰减系数为 $H_s(\lambda_0, t)$ 。此时,式(8)中的波段随时间无衰减已不准确,因此式(8)中的 $BRF_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda_0)$ 应改写为 $H_s(\lambda_0, t) BRF_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda_0)$ 。据此,式(8)可改写为:

$$H(\lambda, t) = H_s(\lambda_0, t) \frac{K(\lambda, t)}{K(\lambda, t_0)} \cdot \frac{BRF_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda_0)}{BRF_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda)} \quad (11)$$

对式(11)再进行时间序列及波段拟合,得到连续波段的漫射板时间序列衰减系数 $H_s(\lambda, t)$, 结合实验室测量的漫射板 BRDF 参数及大气外太阳常数等,则可根据式(12)精确确定定标时刻漫射板的光谱辐亮度。

$$L_{SD,t}(\lambda) = \frac{E_s(\lambda) \cos \theta_{SD,t}}{R^2} \times H_s(\lambda, t) \times f_{lab}(\theta_{SD,t}, \phi_{SD,t}; \theta_r, \phi_r; \lambda) \quad (12)$$

5 SDDM 参数测试

为评估 SDDM 性能,对 SDDM 的性能及关键参数,即信噪比、探测器动态范围和太阳观测端口相对透过率模型进行了实验检测与测量,关于太阳漫射板 BRDF 及 BRDF 的测量与分析将另文给出。

5.1 信噪比、太阳/漫射板入射比值评估实验

为验证 SDDM 设计的合理性,对 SDDM 的信噪比和太阳/漫射板入射时探测器响应的比值进行了评估。图 3 为 SDDM 信噪比测试及太阳/漫射板入射比值评估测量的原理示意图,其中积分球为经过预定标的多亮度等级稳定光源。SDDM 漫射板观测端口正对积分球出光口,进行 SDDM 漫射板观测端口辐亮度定标,同时采集多组数据作为信噪比评估依据。通过参照辐亮度计来监测积分球光源的稳定性,排除光源不稳定带来的干扰。然后,关闭 SDDM 漫射板观测端口电磁阀快门,将 SDDM 太阳观测端口转至正对标准灯的方向,进行 SDDM 太阳观测端口辐照度定标。

星上定标时漫射板相对于各通道的辐亮度为 $L_{i,SD}$,调整积分球亮度与 $L_{i,SD}$ 一致,采集 SDDM 信噪比评估数据,并对漫射板观测端口进行定标。实验室标准灯的光谱辐照度与大气外太阳辐照度

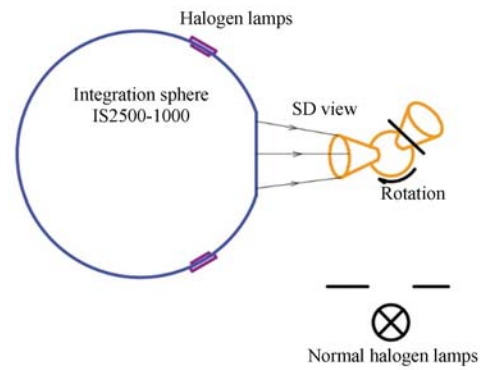


图 3 SDDM 太阳/漫射板入射比值评估测量及信噪比测试原理示意图

Fig. 3 Measurement of SDDM's response ratio of sun view/SD view and SNR

有差异,将其等效太阳常数用 $e_{i,NHL}$ 表示。SDDM 信噪比 SNR 和 SDDM 太阳/漫射板入射比值的计算公式如下:

$$SNR_i = \frac{\bar{V}_i}{V_{i,std}} \quad (13)$$

$$R_i = \frac{\bar{V}_{i,S} - V_{i,d}}{e_{i,NHL} (\bar{V}_i - V'_{i,d})} \quad (14)$$

式中: i 为通道号; \bar{V}_i 是 SDDM 多次采样数据的均值, $V_{i,std}$ 是 SDDM 多次采样数据的标准偏差; R_i 为 SDDM 太阳/漫射板入射响应比值; $\bar{V}_{i,S} - V_{i,d}$ 是太阳观测端口对标准灯多次测量扣除暗电流后的均值; $\bar{V}_i - V'_{i,d}$ 为漫射板观测端口积分球光源多次测量扣除暗电流后的均值; $e_{i,NHL}$ 为标准灯等效太阳常数。信噪比评估及太阳/漫射板入射响应比值测量结果如表 1 所示。

表 1 SDDM 信噪比测试及各通道端口入射响应比

Tab. 1 Result of SDDM SNR and response ratio of sun view/SD view			
	CH1 (450 nm)	CH2 (680 nm)	CH3 (940 nm)
积分球等效辐亮度/ $(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$	0.063 0	0.200 2	0.130 0
信噪比	4 350	4 817	5 854
太阳入射响应/ 漫射板入射响应	1.17	1.07	1.16

5.2 相对透过率测量试验

由于星上定标时段太阳照明卫星的角度是变化的,为确定 SDDM 太阳观测端口随太阳入射角

度变化的相对透过率, 对 SDDM 太阳观测端口的相对透过率进行了重复测试。图 4 为 SDDM 太阳观测端口相对透过率测试的原理示意图, 通过电控调节角位移台及旋转台分别改变入射天顶角和方位角, 并使用标准探测器来监测光源稳定性。

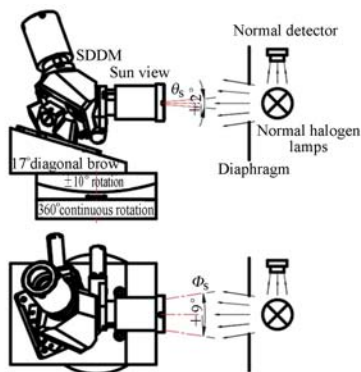


图 4 SDDM 太阳观测口相对透过率测试的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of SDDM sun view transmittance measurement

各个入射组合角度下测量所得响应值以正入射时的响应值归一化即可得到相对透过率, 对多次测量的相对透过率结果进行统计得到测量重复性, 以此评估该参数的测试不确定度。

测试光源入射天顶角 θ_s 及方位角 ϕ_s 的变化范围相对于 SDDM 太阳观测头孔径光阑法线分别为 $-2^\circ \sim 2^\circ$ 及 $-9^\circ \sim 9^\circ$ 。通过 10 次重复测量由式(15) 计算得到平均相对透过率, 由于测试结果数据量庞大, 提取了其中的 $\overline{\tau_i(\theta_0, \phi_s)}$ 和 $\overline{\tau_i(\theta_s, \phi_0)}$ 两组数据评估测试的不确定度, 其中最大标准偏差值即为相对透过率测试不确定度。测量的相对透过率均值及标准偏差结果如表 2 所示。

$$\overline{\tau_i(\theta_s, \phi_s)} = \frac{1}{10} \sum_{m=1}^{10} \frac{\overline{V_{im,s}(\theta_s, \phi_s)} - \overline{V_{im,d}}}{\overline{V_{im,s}(0^\circ, 0^\circ)} - \overline{V'_{im,d}}}, \quad (15)$$

式中: i 为通道号; $\overline{\tau_i(\theta_s, \phi_s)}$ 为天顶角 θ_s 和方位角 ϕ_s 入射时 10 次测量的透过率均值; $\overline{V_{im,s}(\theta_s, \phi_s)} - \overline{V_{im,d}}$ 为天顶角 θ_s 和方位角 ϕ_s 入射时探测器扣除暗电流后的响应值; $\overline{V_{im,s}(0^\circ, 0^\circ)} - \overline{V'_{im,d}}$ 为正入射时探测器扣除暗电流后的响应值。

表 2 SDDM 各通道相对透过率重复性测试结果

Tab. 2 Results of measurement uncertainty of SDDM sun view transmittance in each channel

$\Phi_s / (^\circ)$	CH1(450 nm)		CH2(680 nm)		CH3(940 nm)	
	$\tau_1(0, \Phi_s)$ 均值	标准偏差	$\tau_2(0, \Phi_s)$ 均值	标准偏差	$\tau_3(0, \Phi_s)$ 均值	标准偏差
9	0.778 5	0.002 5	0.768 7	0.002 8	0.710 9	0.002 6
7.5	1.007 9	0.001 6	1.003 7	0.001 4	0.959 5	0.001 8
6	1.013 5	0.001 1	1.011 0	0.001 3	0.974 5	0.002 1
4.5	1.012 5	0.000 7	1.011 2	0.001 1	0.983 6	0.002 0
3	1.008 1	0.001 0	1.007 8	0.001 1	0.989 4	0.001 9
1.5	1.002 0	0.000 7	1.010 5	0.002 9	1.027 0	0.002 2
0	1	0.000 4	1	0.000 2	1	0.000 1
-1.5	0.985 8	0.000 6	0.990 1	0.000 1	0.996 2	0.000 3
-3	0.976 9	0.001 8	0.982 9	0.000 7	0.996 0	0.000 4
-4.5	0.966 1	0.001 9	0.973 8	0.001 1	0.992 3	0.000 4
-6	0.950 0	0.002 0	0.959 2	0.001 8	0.981 8	0.000 3
-7.5	0.934 4	0.002 8	0.945 0	0.002 5	0.969 8	0.000 7
-9	0.593 3	0.002 8	0.608 6	0.002 4	0.741 0	0.002 8
$\theta_s / (^\circ)$	CH1(450 nm)		CH2(680 nm)		CH3(940 nm)	
	$\tau_1(\theta_s, 0)$ 均值	标准偏差	$\tau_2(\theta_s, 0)$ 均值	标准偏差	$\tau_3(\theta_s, 0)$ 均值	标准偏差
2	0.989 8	0.000 7	1.001 2	0.000 5	1.001 2	0.000 3
1.5	0.990 8	0.000 6	0.999 4	0.000 7	0.999 4	0.000 2
1	0.991 6	0.000 6	0.997 5	0.000 5	0.997 5	0.000 2
0.5	0.991 5	0.000 5	0.994 8	0.000 3	0.994 8	0.000 3
0	1	0.000 2	1	0.000 4	1	0.000 5
-0.5	0.994 3	0.000 4	0.997 1	0.000 2	0.995 7	0.000 1
-1	0.999 0	0.000 2	0.996 4	0.000 1	0.996 4	0
-1.5	0.998 9	0.000 3	0.994 2	0	0.994 2	0.000 2
-2	0.949 6	0.000 5	0.939 0	0.000 7	0.938 7	0.000 7

6 结果分析与讨论

本文设计了一种基于太阳光源为参照的积分球与挡板配合结构形式的 SDDM, 分析给出了基于 SDDM 比值测量的时间/波段比漫射板衰减监测模型, 实现对漫射板衰减的长期在轨监测。根据分析, SDDM 对来自于太阳、漫射板入射信号的辐射响应一致性是影响比值测量结果准确性的重要因素, 如何消除其辐射响应的非一致性是设计的关键。本文采用积分球坐标系下太阳/漫射板的入射高度角接近一致的设计, 结合入射光在积分球内至少经 4 次反射到达滤光片探测器的匀光设计, 实现了辐射响应的入射角度无关性。与 MODIS 的 SDSM^[2] 所采用的积分球内 2 次反射匀光相比较, 该设计增加了入射光在积分球内的匀光次数, 进而提高了太阳、漫射板入射探测器间响应的一致性。同时, 该 SDDM 采用双开口设计, 减少了转动部件, 简化了结构, 减轻了质量, 降低了功耗, 从而提高了可靠性。

本文采用积分球辐射源模拟星上漫射板反射辐亮度对 SDDM 进行了测试, 并对 SDDM 信噪比进行了评估。由表 1 可见, SDDM 各个滤光片通道的信噪比均达到了 4 000 以上; 在此基础上, 以光谱辐照度标准灯模拟太阳入射对 SDDM 进行了测量, 并与用积分球光源测试的太阳漫反射板入射端口响应相比较, 结果显示, 星上定标时的太阳入射/漫射板入射信号比值均在 1.0~2.0, 验证了 SDDM 光机结构设计及其电路设计的合理性。

SDDM 太阳观测端口随太阳入射角度变化的透过率测量精度是影响 SDDM 漫射板衰减监测不确定度的重要因素。本文通过优化设计太阳入射端口的结构, 扩展了太阳入射在积分球内挡板上的照射面积, 降低了照度, 各波段的透过率测试数据中未出现类似 MODIS 的 SDSM 所产生的响应跳变^[6]; 同时选用朗伯性、光谱平坦性良好的抗辐照材料制作积分球内挡板, 提高了其长期稳定性。在实验室模拟太阳光入射, 对 SDDM 太阳观测端口的透过率进行了重复测试, 测试结果如表 2 所示。由表可见, 各监测波段透过率标准偏差的最大值小于 0.28%。

根据式(10)所给出的时间序列漫射板衰减系数计算公式, 影响漫射板衰减监测的主要误差来源有漫射板 SDDM 观测方向的相对 BRF 不确定

度、SDDM 太阳入射相对透过率测量不确定度, 以及角度误差引起的余弦因子不确定度等。

漫射板 SDDM 观测方向的相对 BRF 是指星上首次定标 t_0 时刻与星上定标 t 时刻, 太阳照明角度下 SDDM 观测漫射板方向的 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%^[7-8]。SDDM 信噪比的测试结果优于 4 000, 太阳、漫射板入射辐射的光通量比值均在 1 附近, 在此条件下基本可忽略探测器的响应线性误差。此外, SDDM 对太阳、漫射板入射的观测几乎同时进行, 温度差异引起的探测器测量误差亦可忽略。综上可知, 不确定度贡献主要来自信噪比。据此, 根据表 1 的测量结果综合探测器信噪比长期衰减 1 个量级, 得到了 SDDM 比值测量的不确定度优于 0.3%。SDDM 太阳入射相对透过率测量的不确定度优于 0.28%。本文采用时间、波段序列联合的监测方式, 余弦因子虽然在波段比重消去, 但考虑到太阳、漫射板观测存在不大于 0.1 s 的时间差, 因此保留了约 0.03% 的余弦误差, 实际可忽略。极端情况下太阳以 75° 入射照明漫射板, 其安装及姿态角度误差计为 0.1°, 漫射板的入射余弦误差为 0.65%^[7], 据此分析基于 SDDM 比值测量的漫射板衰减监测的合成不确定度为 0.88%, 满足长期在轨定标的技术指标要求。基于 SDDM 比值测量的漫射板衰减监测不确定度如表 3 所示。

表 3 基于 SDDM 比值测量的漫射板衰减监测不确定度
Tab. 3 Measurement uncertainties of SDDM (%)

引入不确定度因素	不确定度	合成不确定度
漫射板相对 BRF 测量	0.5	0.88
SDDM 太阳观测端口透过率测量重复性	0.28	
卫星姿态及漫射板安装角度误差	0.03	
漫射板入射余弦误差	0.65	

星上漫射板的衰减监测是一个长期过程, 仅依赖于单次的 SDDM 比值测量是不够的, 从策略上, 表征漫射板的衰变系数应是一个时间序列。对多次测量所得关于波长的衰减系数进行时间的多项式拟合, 得到最终的漫射板衰减系数 $H_s(\lambda, t)$, 如式(13)所示。关于时间的衰减监测模型能进一步消除或减小系统的测量误差, 提高 SDDM 的监测精度, 确保遥感器全寿命期的星上定标精度。

7 结 论

SDDM 采用双入光口积分球+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经4次以上反射匀光后才能进入探测器探测视场,消除了入射光角度变化与探测器响应的相关性。根据 SDDM 监测原理给出了以 940 nm 波段参比的监测模型,可消除和减小测试过程中的非随机误差。而漫射板的衰减实际是一个缓慢的过程,单次监测测量结果并不能表征其 BRDF 衰变系数,因此对 SDDM 基于波段参比模型的单次测量结果进行关于时间的拟合,得到漫射板 BRDF 的时间序列衰变系数,从而降低系统单次测量产生的随机误差,进一步提高监测精度。在地面实验室对 SDDM 信噪比、太阳光入射与漫射板反射光入射的探测器响应进行了评估验证,同

时对随入射角度变化的太阳入射端口透过率模型进行了重复测量,结合漫射板相对 BRF 的测量不确定度以及卫星姿态及漫射板安装误差等分析,得到 SDDM 比值测量的漫射板衰减监测不确定度优于 0.88%。虽然地面实验室不可能模拟出卫星工作环境以及如大气外太阳般稳定、发散角小和照度相当的光源,不过根据 MODIS SDSM 在轨性能优于实验室测试评估结果的先例,SDDM 在星上使用中应该有更出色的表现。

本文中 SDDM 只监测了漫射板 3 个太阳反射波段,若增加监测波段数,其监测精度还能进一步提高。基于漫射板的高精度星上定标技术可满足目前遥感数据量化应用的需求,而传感器全寿命期的星上定标精度须靠 SDDM 对漫射板 BRDF 的监测及修正,SDDM 的应用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:

- [1] JUSTICE C O. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1998, 36: 1228-1249.
- [2] XIONG X X, ANGAL A, SUN J Q, et al.. On-orbit performance of MODIS solar diffuser stability monitor[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 083514: 08351401-08351414.
- [3] OLIJ O, BAUDIN G, BEZY J L, et al.. Spectralon diffuser calibration for MERIS[J]. *SPIE*, 1997, 3221: 63-74.
- [4] KNEUBÜHLER M, SCHAEPMAN M, THOME K, et al.. Calibration and validation of Envisat Meris Part 1: vicarious calibration at rail road valley playa (NV) [J]. *Oteomon Economic Studies*, 2012, 39(3): 552-557.
- [5] 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: 256-261.
- [6] XIONG X X, ANGAL A, CHOI J. On-orbit performance of MODIS solar diffuser stability monitor [J]. *SPIE*, 2012, 8510: 85100H-9.
- [7] 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.
YANG B Y, ZHANG L M, SHEN ZH G, et al.. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1851-1868. (in Chinese)
- [8] 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.
LI J L, ZHANG L M, SI X L, et al.. BRDF device based on six-axis robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2983-2989. (in Chinese)

作者简介:



黄文薪(1988—),男,贵州贵阳人,博士研究生,2010年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事光电探测方面的研究。E-mail: huangwenxin_060569@163.com