

AGRI 中太阳漫反射板反射率衰减监测仪的 角度因子在轨校验研究

汪伟^{1,2*}, 张黎明^{1**}, 徐伟伟¹, 司孝龙^{1,2}, 黄文薪¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学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 太阳漫反射板反射率衰减监测仪(后简称比辐射计, SDRDM)被用来监测漫反射板反射率的变化。其太阳观测端口的透过率和太阳漫射板的相对双向反射分布函数(BRDF)是随角度变化的变量,因此比辐射计观测信号会受到入射光线角度的影响,该影响因子被叫作比辐射计角度因子(简称角度因子)。提出一种使用星上数据计算角度因子的方法,该方法被使用的前提是太阳漫射板在轨前期不发生衰退。采用相同太阳角度比值计算,在不使用比辐射计角度因子的前提下验证了太阳漫反射板在轨前期的稳定性。随后计算 SDRDM 的角度因子,并与实验室测量结果进行比对。结果显示星上计算值与实验室测量值偏差小于 0.5%,发射前测量的角度因子可以用于计算太阳漫反射板的退化因子。

关键词 遥感; 星上定标; 太阳漫反射板反射率衰减监测仪; 角度因子; 退化因子

中图分类号 TP73

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1128002

Angle Factor On-Orbit Calibration Method of Solar Diffuser Reflectance Degradation Monitor in Advanced Geosynchronous Radiation Imager

Wang Wei^{1,2*}, Zhang Liming^{1**}, Xu Weiwei¹, Si Xiaolong^{1,2}, Huang Wenxin¹

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 Solar diffuser reflectance degradation monitor (SDRDM) is used to gain the reflectance of a solar diffuser (SD). The transmittance of the sun view port and the relative bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of the solar diffuser vary with the angle. Therefore, the SDRDM observation signals are affected by the angle of the incident light. The effect factor is called the SDRDM angle factor (abbreviated as the angle factor). This study proposes a method for calculating the SDRDM angle factor using on-board data employed on the premise that the solar diffuser plate does not decay in the early orbit stage. The same solar angle ratio calculation is used, thereby verifying the stability of the solar diffuser reflector without discussing the angle factor. The angle factor is calculated and compared with laboratory measurements. Results show that the deviation between the calculated values and the measured values of the laboratory is less than 0.5%. The angle factor measured prior to the launch can be used to calculate the BRDF degradation factor of the SD.

Key words remote sensing; on-board calibration; solar diffuser reflectance degradation monitor; angle factor; degradation factor

OCIS codes 280.4991; 290.1483; 230.3120

1 引言

风云四号 A 星是我国第二代静止气象卫星的首发星,达到国际领先水平,具有里程碑意义。其设

计充分考虑了海洋、农业、林业、水利以及环境、空间科学等领域的需求,以实现综合利用。先进的静止轨道辐射成像仪(AGRI)是 FY-4A 气象卫星上的关键仪器之一。其局部时间分辨率为 1~5 min,全圆

收稿日期: 2020-02-13; 修回日期: 2020-03-04; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 十三五航天预研基金(GFZX0401430407)

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

盘的时间分辨率为 15 min。AGRI 有 14 个波段,其中:波段 1~3 的空间分辨率为 0.5~1.0 km;波段 4~7 的空间分辨率为 2~4 km;波段 8~14 的空间分辨率为 4 km。这些波段中有 6 个太阳反射波段 (RSB), 8 个热辐射波段 (TEB) [1]。RSB 覆盖波长范围从 0.45 μm 至 2.35 μm [包括可见 (VIS)、近红外 (NIR) 和短波红外 (SWIR)], 可通过星上太阳漫反射板 (SD) 和场地进行定标。TEB 的波长范围从 3.5 μm 到 13.8 μm , 可通过在轨黑体 (BB) 进行星上校准。

为了实现准确的气象预报与气候监测, 需要实现高精度定量遥感, 因此在太阳反射波段为先进轨道辐射成像仪配备了基于太阳漫反射板的星上定标器。国际上一些极轨卫星遥感器已经率先使用了类似的定标方式, 诸如 MODIS、SeaWiFS、VIIRS 等, 其数据结果显示这类定标方法的反射率定标精度均优于 2%, 辐射定标精度均优于 3% [2-13]。FY-4A 气象卫星位于对地静止轨道, 该轨道具有高能电子流 [14-15]。传统的 SD 由聚四氟乙烯 (PTFE) 制成, PTFE 是一种电导率为 $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ 的绝缘材料 [16]。然而, 使用 PTFE 会导致电荷积聚, 增加了放电风险。因此, 一些研究人员使用熔融石英材料 [17]。该熔融石英包含不规则形状的空隙, 空隙的宽度约为 20 μm , 约占熔融石英体积的 2.3%。这种结构使得该材料具有比常规 PTFE 更出色的光学和物理性能。这些优势包括反射和透射中高朗伯散射, 高温下的热稳定性, 极低的热膨胀系数, 以及对极性和非极性溶剂不敏感的特性 [18]。研究表明, 熔融石英材料的电导率范围为 $10^6 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$, 可有效降低电

荷积累的风险 [19]。

太阳漫反射板反射率由太阳漫反射板反射率衰减监测仪 (后简称比辐射计, SDRDM) 监测修正。SDRDM 主体为一个匀光积分球 (LDIS), 该积分球具有两个输入孔和三个滤波探测器。三个探测器都有一个窄的光谱带通, 其中心波长分别为 0.470, 0.650, 0.825 μm 。SD 反射率变化是通过跟踪太阳观测值和 SD 观测值之间的比率随时间的变化来确定的。星上定标时刻太阳光的角度会发生变化, 进而导致 SDRDM 探测的信号发生变化, 这一特性被叫作 SDRDM 的角度因子。角度因子包含了太阳观测的几何因子、相对双向反射分布函数 (BRDF) 和余弦因子, 实验室中角度因子可被分项测出 [20-21]。鉴于实验室测量状态与星上使用状态不同, 且光源光谱存在差异, 使用前必须检验实验室测量的角度因子的可靠性。本研究介绍了 SDRDM 的工作原理, 并提出了一个星上计算 SDRDM 的角度因子的方法。该研究推导了 SDRDM 的角度因子的星上数据表达形式, 比较了星上计算值和地面测量结果。

2 方法原理

2.1 定标原理

图 1 所示的是星上定标的原理图。本研究主要依靠漫反射板反射太阳光作为标准辐亮度源实现遥感器的星上定标, 基于 SDRDM 监测漫反射板的 BRDF 变化实现寿命期内的高精度定标。根据星上定标漫反射板光谱辐亮度, 结合各谱段的光谱响应函数 $R_{\text{SR}, B_i}(\lambda)$, 积分得到漫反射板各谱段标准辐亮度为

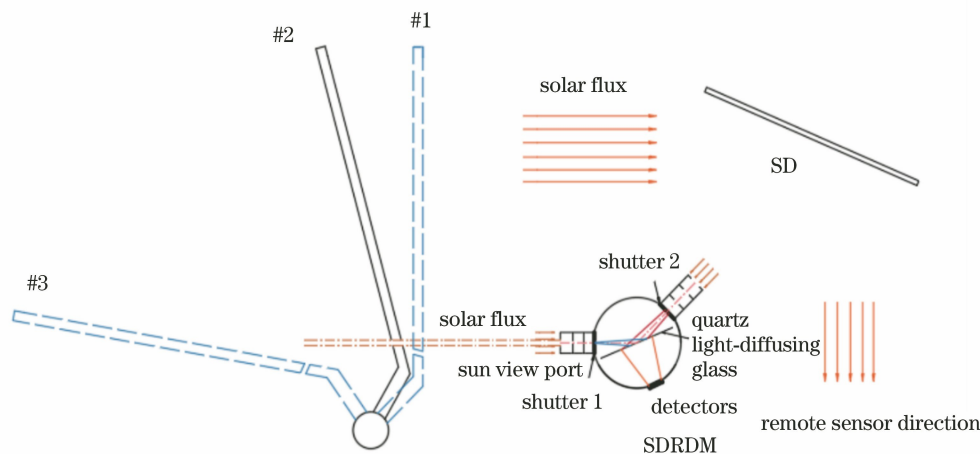


图 1 星上定标原理

Fig. 1 On-board calibration principle

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

式中: $\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v$ 分别为星上定标时刻的太阳入射方向的天顶角、方位角以及 AGRI 观测方向的天顶角、方位角; B_i 表示不同波段; $E_s(\lambda)$ 表示大气外太阳光谱辐照度常数; λ 表示波长; R_{s-e} 为定标时刻的日-地相对距离; $f_{lab}(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v; \lambda)$ 表示发射前实验室测量的星上定标漫反射板的 BRDF; $H_t(\lambda)$ 表示星上漫反射板 BRDF 的退化因子。

2.2 SDRDM 角度因子在轨验证方法

SDRDM 被设计为双口对称观测式结构, 玻璃匀光片被置于 LDIS 分型面, 使两个端口的入射光在积分球内的被探测条件接近一致。这种设计不仅在计算辐射比的时候消去很多系统变量, 还减小了两个端口入射光角度差异引入的不确定度。SDRDM 主要由太阳观测部件、漫反射板观测部件、LDIS 以及探测器部件组成。太阳光入射角度会使得探测太阳的信号发生变化, 这里被称为 SDRDM 的太阳观测几何因子。SDRDM 观测漫反射板的方向固定, 但是漫反射板的亮度会随着太阳入射角度的变化而变化, 这里主要受到相对 BRDF 和余弦的影响。本研究把 SDRDM 的太阳观测几何因子、相对 BRDF 以及余弦因子等角度相关因素统称为 SDRDM 的角度因子。下面从 SDRDM 的监测模型出发, 推导了星上计算角度因子的计算模型。

SDRDM 在 t 时刻观测太阳得到的信号可以表

示为

$$D_{sun}(B_i, t) = R(B_i, t) \cdot \frac{E_s}{R_{s-e}^2} \cdot S_{SDRC} \cdot \tau_{SDRC}(\theta, \varphi), \quad (2)$$

SDRDM 在 t 时刻观测漫射板得到的信号可以表示为

$$D_{SD}(B_i, t) = R(B_i, t) \cdot \frac{E_s(B_i)}{R_{s-e}^2} \cdot \Omega_{SD} \cdot S_{SD} \cdot \cos[\alpha(\theta, \varphi)] \cdot f[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i, t], \quad (3)$$

式中: $R(B_i, t)$ 表示 t 时刻探测器对 B_i 谱段的光通量响应度; $D_{sun}(B_i, t)$ 表示 t 时刻 B_i 波段扣除暗电流的观测太阳响应值; E_s 表示大气外太阳辐照度; $\tau_{SDRC}(\theta, \varphi)$ 表示 SDRDM 的太阳观测几何因子; θ, φ 分别表示太阳的时角和赤纬角; S_{SDRC} 表示沿太阳观测部件轴线观测时的有效透光面积; $D_{SD}(B_i, t)$ 表示 t 时刻 B_i 波段扣除暗电流的观测漫射板响应值; Ω_{SD} 表示观测漫反射板的立体角; S_{SD} 表示观测漫反射板的有效透光面积; $\alpha(\theta, \varphi)$ 表示太阳以 (θ, φ) 角度照明漫反射板的天顶角; $\beta(\theta, \varphi)$ 表示太阳以 (θ, φ) 角度照明漫反射板的方位角; $f_{lab}[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i, t]$ 表示太阳以 (θ, φ) 角度照射漫反射板, 漫反射板在 SDRDM 观测方向 (固定方向) 下的 BRDF 值。

BRDF 采用相对形式可表示为 (观测角度为定值, 这里简化为仅采用只有入射角的形式)

$$f_{BRDF}[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i, t] = f_{BRDF}^r[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i, t] \cdot f_{BRDF}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, t], \quad (4)$$

这里 $f_{BRDF}^r[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i, t]$ 表示相对 BRDF, 当 θ, φ 都为 0 时其值为 1。那么 SDRDM 探测太阳漫反射板的计数值可以表示为

$$D_{SD}(B_i, t) = R(B_i, t) \cdot \frac{E_s}{R_{s-e}^2} \cdot \Omega_{SD} \cdot S_{SD} \cdot \cos[\alpha(\theta, \varphi)] \cdot f_{BRDF}^r[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i, t] \cdot f_{BRDF}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, t]. \quad (5)$$

我们把观测漫反射板计数值与观测太阳计数值的比值称为辐射比, 其表达形式为

$$R(\alpha, \theta) = \frac{R(B_i, t) \cdot \frac{E_s}{R_{s-e}^2} \cdot \Omega_{SD} \cdot S_{SD} \cdot \cos[\alpha(\theta, \varphi)] \cdot f_{BRDF}^r[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i, t] \cdot f_{BRDF}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, t]}{R(B_i, t) \cdot \frac{E_s}{R_{s-e}^2} \cdot S_{SDRC} \cdot \tau_{SDRC}(\theta, \varphi)}. \quad (6)$$

式中: $S_{SDRC}, \Omega_{SD}, S_{SD}$ 是由 SDRDM 结构所决定的常量。定标过程中, 完成一次定标需要 10 s, 观察太阳和观察 SD 之间的时间间隔小于 5 s。在这么短的时间内, SDRDM 探测器的响应、太阳光谱和日地距离的差异都

可以忽略不计^[13],即分子分母中的 SDRDM 探测器的响应、太阳光谱和日地距离都可以消去,故式中不变量可以合并,记作 $C_{\text{ont}}^{\text{SDRDM}}$ 。(6)式化简可得

$$R(\alpha, \theta) = \frac{\cos[\alpha(\theta, \varphi)] \cdot f_{\text{BRDF}}^{\text{r}}[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i, t] \cdot f_{\text{BRDF}}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, t]}{\tau_{\text{SDRC}}(\theta, \varphi)} \cdot C_{\text{ont}}^{\text{SDRDM}}。 \quad (7)$$

通常认为,SD 的相对 BRDF 变化很小且可以忽略。实际上,SD 的 BRDF 在入射方向和传出方向上均会不均匀地退化,但是累积的 SD 退化不均匀性对 SD 监测的影响很小^[13],故 $f_{\text{BRDF}}^{\text{r}}[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i, t]$ 可被认为是不随时间变化只随着角度变化的变量,后面记作 $f_{\text{BRDF}}^{\text{r}}[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i]$ 。令漫反射板绝对 BRDF 随时间的衰减系数为

$$H(t) = \frac{f_{\text{BRDF}}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, t]}{f_{\text{BRDF}}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, 0]}, \quad (8)$$

其中: $H(t)$ 表示漫反射板发射后 t 时刻的衰减系数; $f_{\text{BRDF}}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, t]$ 表示 t 时刻赤纬角和时角为 0° 时照射漫反射板,SDRDM 观测角度下的 BRDF 值; $f_{\text{BRDF}}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, 0]$ 表示实验室对应赤纬角和时角为 0° 状态下测量时照射漫反射板,SDRDM 观测角度下的 BRDF 值。 t 时刻辐射比可以表示为

$$R(\theta, \varphi; t) = \frac{D_{\text{SD}}(\theta, \varphi)}{D_{\text{sun}}(\theta, \varphi)} = \frac{H(t) \cdot f_{\text{BRDF}}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, t] \cdot f_{\text{BRDF}}^{\text{r}}[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i] \cdot \cos[\alpha(\theta, \varphi)]}{\tau_{\text{SDRC}}(\theta, \varphi)} \cdot C_{\text{ont}}^{\text{SDRDM}}。 \quad (9)$$

同样初次定标 t_0 时刻辐射比可以表示为

$$R(\theta_0, \varphi_0; t_0) = \frac{D_{\text{SD}}(\theta_0, \varphi_0)}{D_{\text{sun}}(\theta_0, \varphi_0)} = \frac{H(t_0) \cdot f_{\text{BRDF}}[\alpha(0, 0), \beta(0, 0); B_i, t_0] \cdot f_{\text{BRDF}}^{\text{r}}[\alpha(\theta_0, \varphi_0), \beta(\theta_0, \varphi_0); B_i] \cdot \cos[\alpha(\theta_0, \varphi_0)]}{\tau_{\text{SDRC}}(\theta_0, \varphi_0)} \cdot C_{\text{ont}}^{\text{SDRDM}}。 \quad (10)$$

初次定标前漫反射板从未暴露,这里 $H(t_0)$ 为 1。将(9)式和(10)式相比可得

$$\frac{R(\theta, \varphi; t)}{R(\theta_0, \varphi_0; t_0)} = \frac{H(t) \cdot f_{\text{BRDF}}^{\text{r}}[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i] \cdot \cos[\alpha(\theta, \varphi)] \cdot \tau_{\text{SDRC}}(\theta_0, \varphi_0)}{H(t_0) \cdot f_{\text{BRDF}}^{\text{r}}[\alpha(\theta_0, \varphi_0), \beta(\theta_0, \varphi_0); B_i] \cdot \cos[\alpha(\theta_0, \varphi_0)] \cdot \tau_{\text{SDRC}}(\theta, \varphi)}。 \quad (11)$$

角度因子表示为

$$A_{\text{factor}}(\theta, \varphi) = \frac{f_{\text{BRDF}}^{\text{r}}[\alpha(\theta, \varphi), \beta(\theta, \varphi); B_i] \cdot \cos[\alpha(\theta, \varphi)]}{\tau_{\text{SDRC}}(\theta, \varphi)}, \quad (12)$$

故(11)式可表示为

$$\frac{R(\theta, \varphi; t)}{R(\theta_0, \varphi_0; t_0)} = \frac{A_{\text{factor}}(\theta, \varphi) \cdot H(t)}{A_{\text{factor}}(\theta_0, \varphi_0)}。 \quad (13)$$

因此衰减因子可以表示为

$$H(t) = \frac{A_{\text{factor}}(\theta_0, \varphi_0) \cdot R(\theta, \varphi; t)}{A_{\text{factor}}(\theta, \varphi) \cdot R(\theta_0, \varphi_0; t_0)} = \frac{A_{\text{factor}}(\theta_0, \varphi_0)}{A_{\text{factor}}(\theta, \varphi)} \cdot \frac{D_{\text{SD}}(\theta, \varphi)}{D_{\text{sun}}(\theta, \varphi)} \cdot \frac{D_{\text{sun}}(\theta_0, \varphi_0)}{D_{\text{SD}}(\theta_0, \varphi_0)}。 \quad (14)$$

角度因子可以在实验室测出,太阳观测值和 SD 观测值都可以从星上返回数据中获取,进而可实现漫反射板 BRDF 衰退监测。

角度因子采用分项测试,且光源光谱与星上使用的光源(即太阳)不同,因此星上测量角度因子是十分必要的。(14)式可被改为

$$\frac{A_{\text{factor}}(\theta, \varphi)}{A_{\text{factor}}(\theta_0, \varphi_0)} = \frac{1}{H(t)} \cdot \frac{D_{\text{SD}}(\theta, \varphi)}{D_{\text{sun}}(\theta, \varphi)} \cdot \frac{D_{\text{sun}}(\theta_0, \varphi_0)}{D_{\text{SD}}(\theta_0, \varphi_0)}。 \quad (15)$$

角度因子本身为一个相对概念,这里可以将初次定标几何状态下的角度因子设定为 1,即 $A_{\text{factor}}(\theta_0, \varphi_0) = 1$ 。在定标前期漫反射板没有发生

变化时(即 $H(t)$ 近似看作 1),角度因子可以利用角度回归计算。

3 数据结果与讨论

3.1 角度因子的实验室测量

为了测量太阳观测几何因子,需要测量不同角度下 SDRDM 观测光源时得到的信号值。地面测量时的测试原理如图 2 所示,SDRDM 安装在一个

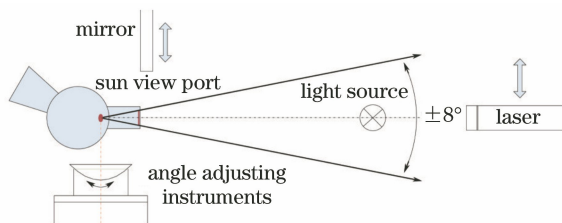


图 2 实验室测量太阳观测几何因子装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laboratory measurement of sun view geometric factors

图 3 给出漫反射板 BRDF 测量原理和系统示意图。该测量系统以高亮度、高均匀性积分球辐射源为照明光源,采用高精度串联式六轴机器人控制测量样品的位置姿态,中控分度盘为光源方位角的

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 SDRDM 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。其测量不确定度为小于 0.5%^[20]。

控制载体,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,实现太阳漫反射板 BRDF 的高精度测量。其测量不确定度小于 0.5%^[21]。

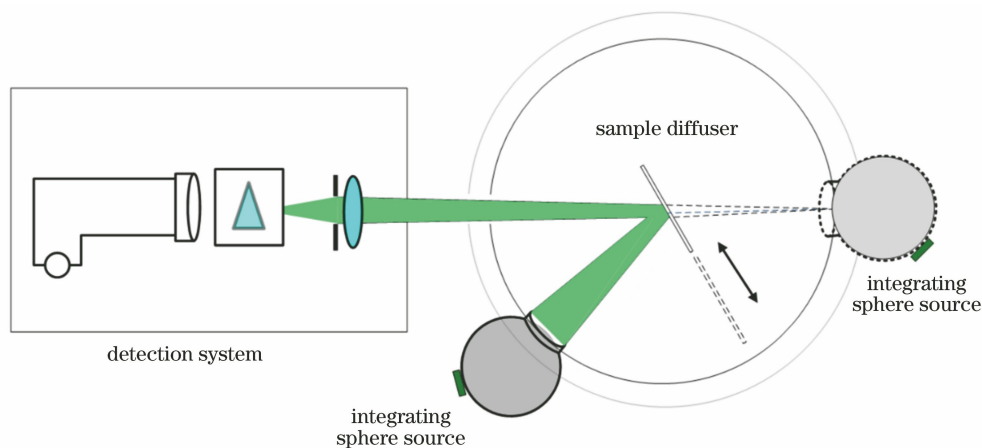


图 3 BRDF 测量原理示意图

Fig. 3 BRDF measurement principle diagram

3.2 星上数据获取

SDRDM 的数据主要包括 SDRDM 观测太阳的信号、SDRDM 观测漫反射板的信号、SDRDM 观测暗背景的信号以及各个数据对应的采集时间和太阳的角度数据(赤纬角和时角)。初始定标时间为 2017 年 4 月 8 日。SDRDM 的位置和结构限制了 SDRDM 的工作角度,只有当赤纬角为 $-9^{\circ} \sim +9^{\circ}$ 时,SDRDM 才能有效地获取数据。实际上为了避免辐射计制冷器被太阳直射,每半年卫星进行一次 180° 的偏航动作,从而太阳光可进入 SDRDM 的倾角为 $-9^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 。因此,定标日期集中在每年的春秋分前后。传感器已在一年的 85 d 中进行定标。为了提高数据采集的准确性,在校准过程中多次采集数

据,并通过插值获得零时角数据。其中在前 48 d 中,校准过程每天执行 20 次,而在其余天中则每天进行 5 次。

图 4 为太阳口遥感影像像元亮度值(DN 值)随时角的变化趋势图,可以看到在 $-0.7^{\circ} \sim 0.7^{\circ}$ 范围内,其变化几乎是线性的,从而对于同时角处理方式采用 $-0.7^{\circ} \sim 0.7^{\circ}$ 范围内数据的拟合方式,统一使用零时角的插值结果。

实际上时角对漫射板的影响较大,如图 5 所示。但是变化趋势近似呈线性关系,故同样可以采用线性拟合插值出零时角的值。

这 85 d 的零时角的数据如图 6 所示(横坐标表示初次定标后的天数)。图中可以看到,每个波段呈

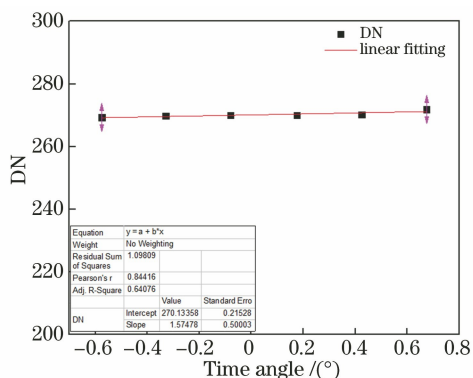


图 4 太阳 DN 值变化图

Fig. 4 Schematic of sun view DN

规律性波动变化,这些波动主要来自于 SDRDM 的角度因子、日地距离因子以及太阳辐照度等影响。这里注意到每个变化周期期间的数值变化很小,这意味着 SDRDM 的探测器响应在一年的时间内变化

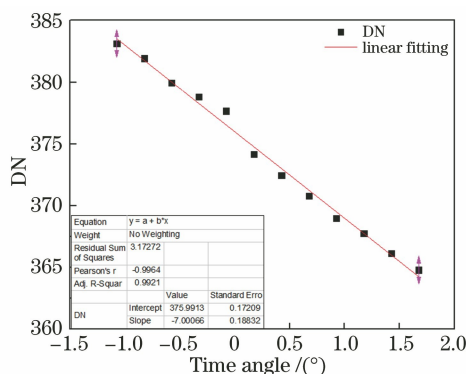


图 5 漫射板 DN 值变化图

Fig. 5 Schematic of diffuser view DN

较小。可见一次定标中观测太阳与观测漫反射板的 SDRDM 探测器响应差异可忽略的假设是成立的,即 SDRDM 当前状态下辐射比不受探测器响应影响。

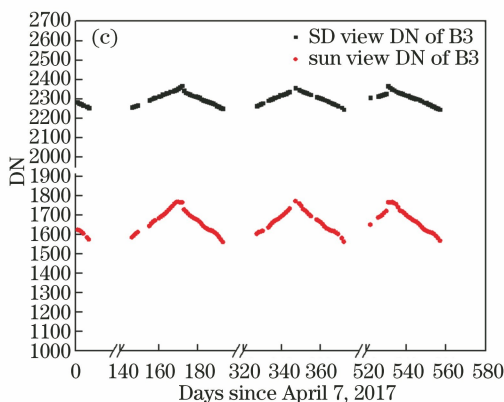
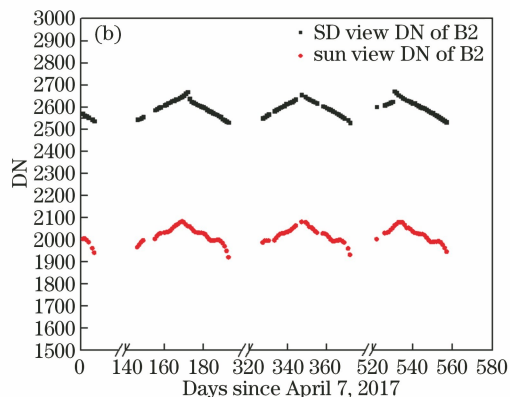
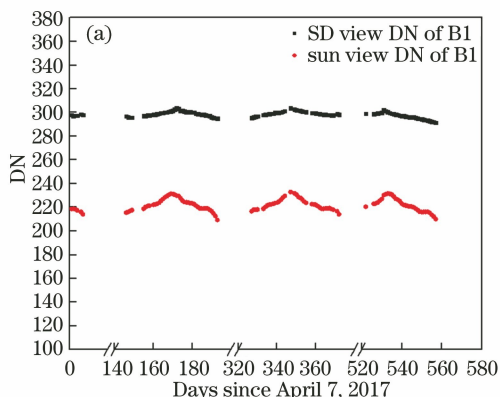


图 6 不同波段下比辐射计零时角信号数据。(a)波段 1(B1);(b)波段 2(B2);(c)波段 3(B3)

Fig. 6 Signal data of SDRDM at time angle of 0° for different bands. (a) B1; (b) B2; (c) B3

3.3 漫射板前期稳定性验证

根据地球同步轨道的特点,定标数据采集过程中会出现角度回归的数据。SD 的反射率退化因子可以采用不同时间相同太阳角度的数据计算。通常情况下,通过 SDRDM 角度因子来确定 BRDF 退化因子,本研究可以不同时间但太阳角相同的情况下

获得的探测器计数值进行比例计算,从而抵消 SDRDM 角度因子,获得 SD 的反射率退化因子^[22]。这种方法对定标时刻的太阳角度要求苛刻,需要不同时刻的相同角度的数据。这里挑选了符合该条件的数据,计算了 SD 的退化因子,如表 1 所示。表中显示漫反射板的衰退因子呈水平波动变

表 1 不同波段的衰减因子

Table 1 Degradation factor diagram of different bands

Date	Degradation factor		
	B1	B2	B3
2017-04-08	1.0000	1.0000	1.0000
2017-04-09	1.0000	1.0000	1.0000
2017-04-10	1.0000	1.0000	1.0000
2017-04-11	1.0000	1.0000	1.0000
2017-04-13	1.0000	1.0000	1.0000
2017-08-31	0.9971	0.9973	0.9981
2017-09-01	1.0017	1.0025	1.0028
2017-09-02	1.0012	1.0009	1.0011
2017-09-03	1.0003	1.0012	1.0019
2017-10-11	0.9979	1.0008	1.0009
2017-10-12	0.9997	1.0021	1.0025
2017-10-13	1.0004	1.0010	1.0017
2017-10-14	0.9984	0.9995	1.0007
2017-10-16	1.0049	1.0029	1.0033
2018-02-28	1.0020	1.0022	1.0026
2018-03-01	0.9993	1.0015	1.0023
2018-03-02	0.9990	1.0004	1.0017
2018-04-08	0.9989	1.0016	1.0008
2018-04-09	0.9991	1.0024	1.0016
2018-04-10	0.9997	1.0010	1.0007
2018-04-11	0.9980	0.9998	0.9999
2018-04-13	0.9986	0.9997	1.0001
Standard deviation	0.001609	0.001250	0.001222

化,计算其标准偏差分别为:0.001609,0.001250,0.001222。数据表明,SD 反射率的变化可忽略不计。

3.4 角度因子在轨验证与分析

此时,按照(15)式即可得到每天零时角下的角度因子。SDRDM 在遥感器发射前已经在实验室测量过太阳观测几何因子,漫反射板 BRDF 也在实验室中测量过,因此可以根据(12)式计算角度因子,并将结果拟合为平滑的曲线,为了方便比较,将两种结果放置于同一坐标系中,结果如图 7 所示,图中的散点表示星上数据计算的结果,图中的曲线表示实验室测量数据的拟合曲线。这里要注意的是,角度因子本身是随二维角度(时角和赤纬角)变化的,但是星上数据处理时统一采用插值得到的零时角的数据进行计算,因此这里的角度因子也只需验证零时角的数据。

从定性的角度看,三个波段的两种结果都基本重合,但是部分角度又存在一些差异。其中第一波段在赤纬角 $-8^{\circ}\sim-4^{\circ}$ 存在差异;第二波段整体重合度都很高,但是在赤纬角为 $-1^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 的星上计算值都低于实验室插值数据, -6° 赤纬角附近的星上计算值都高于实验室插值数据;第三波段两者整体趋势的倾斜度存在差异。

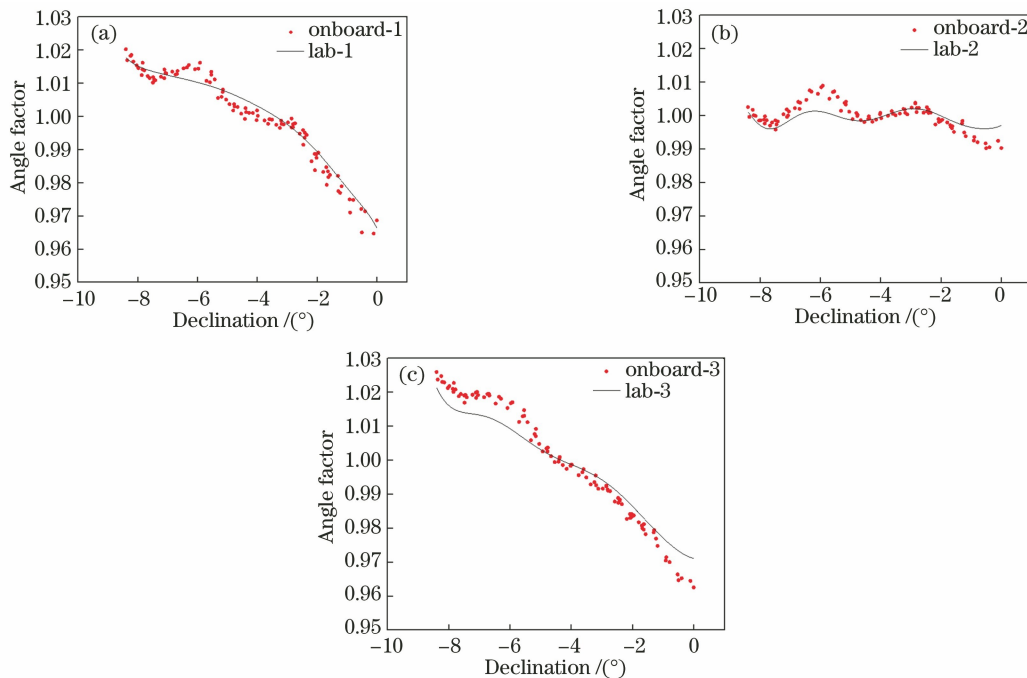


图 7 不同波段下角度因子实验室测量值与星上计算值的比较。(a)波段 1(B1);(b)波段 2(B2);(c)波段 3(B3)

Fig. 7 Comparison of measurement data in the laboratory and on-board data for different bands. (a) B1; (b) B2; (c) B3

从定量的角度看。实验室测量结果可以被看作期望值,星上数据计算值则可以看成采样值,两者的

均方根误差(RSME)可以衡量两种结果的一致性。计算公式为

$$R_{\text{SME}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i^{\text{onboard}} - A_i^{\text{lab}})^2}{n}} \quad (19)$$

其计算的结果如表 2 所示。结果显示,三个波段中 RSME 最大值小于 0.005,这说明星上计算值与实验室测量值相近。验证结果表明,发射前分项测得的角度因子可用于计算 SD 的退化因子。

表 2 测量值与计算值的均方差

Table 2 RMSE between laboratory data and on-board data

Band	B1	B2	B3
RSME	0.003412	0.003697	0.004915

综上所述,SDRDM 在一年半的时间内表现稳定,其探测器工作状态不影响辐射比计算;SD 经历一年半的在轨运行其反射率几乎没有发生变化,SD 当前状态符合星上辐射定标要求。该研究重点讨论了实验室分项测试 SDRDM 的角度因子的可靠性。这里在 SD 前期反射率稳定的特性基础上,使用星上数据计算了 SDRDM 的角度因子。比较了实验室数据与星上计算结果,得到两者 RSME 小于 0.005,说明实验室测量数据可以用于计算 SD 反射率的退化因子。本文提出的角度因子在轨验证方法同时可以成为在轨测量的方法,直接使用星上数据计算角度因子避免了发射过程引入的误差,同时也更为直接,降低了数据的不确定度。

4 结 论

太阳漫反射板星上定标是实现遥感器高精度定量遥感的重要手段,SDRDM 可被用来监测漫反射板的反射率变化。SDRDM 的角度因子的准确性是影响监测精度的重要因素之一,实验室中难以直接测量角度因子,但可分别测量 SDRDM 的几何因子和漫反射板的相对 BRDF。本研究介绍了 SDRDM 的监测模型,并从角度因子推导过程出发,使用星上数据计算了一组角度因子。使用同角度比值法,在不使用实验室测量参数的情况下计算漫射板的衰减,得到了漫射板前期衰减小于 0.161% 的结论,故前期漫射板衰减可以忽略。比较两种角度因子得到星上数据与实验室插值数据的均方根误差小于 0.005,符合角度因子使用的精度要求。同时该方法可以用来直接在星上测量角度因子,这样可以更为直接地获取角度因子,并且避免发射过程中引入的不确定度。星上计算角度因子使得漫射板监测更为可靠,提高了星上定标的可靠性。

致谢 感谢中国科学院上海技术物理研究所李秀举等研究人员提供的星上比辐射计观测数据以及对计算星上几何关系的帮助。

参 考 文 献

- [1] Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2017, 37(2): 1-12. 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景 [J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(2): 1-12.
- [2] Xiong X X, Sun J Q, Barnes W, et al. Multiyear on-orbit calibration and performance of terra MODIS reflective solar bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(4): 879-889.
- [3] 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, 8(1): 083514.
- [4] Fulbright J, Lei N, Efremova B, et al. Suomi-NPP VIIRS solar diffuser stability monitor performance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 631-639.
- [5] Xiong X, Xie X, Angal A, et al. Characterization of MODIS solar diffuser on-orbit degradation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6677: 66770O.
- [6] Xiong X, Eplee R E, Jr, Sun J, et al. Characterization of MODIS and SeaWiFS solar diffuser on-orbit degradation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7452: 74520Y.
- [7] Chen H, Wang Z, Sun J, et al. Recent progress of MODIS solar diffuser on-orbit degradation characterization [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8510: 85100I.
- [8] Jeffrey C, Thome K, Nikolaus A, et al. The absolute radiometric calibration of terra imaging sensors: MODIS, MISR, and ASTER [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9218: 92180Y.
- [9] Xiong X X, Jon F, Amit A, et al. Assessment of MODIS and VIIRS solar diffuser on-orbit degradation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9607: 96071T.
- [10] Olij C, Jos G, Henri G, et al. Spectral on diffuser calibration for MERIS [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3221: 63-74.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Lei N, Wang Z P, Xiong X X. On-orbit radiometric calibration of Suomi NPP VIIRS reflective solar bands through observations of a sunlit solar diffuser panel[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(11): 5983-5990.
- [14] Cai Z B. Effects of xenon ion engine on GEO satellite surface charging/discharging [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(3): 137-140.
蔡震波. 氙离子发动机对 GEO 卫星表面充/放电效应的影响[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(3): 137-140.
- [15] Matéo-Vélez J C, Sicard A, Payan D, et al. Spacecraft surface charging induced by severe environments at geosynchronous orbit [J]. Space Weather, 2018, 16: 89-106.
- [16] Bruegge C J. Use of spectral on as a diffuse reflectance standard for in-flight calibration of earth-orbiting sensors[J]. Optical Engineering, 1993, 32(4): 805-814.
- [17] Kang G, Coste P, Youn H, et al. An in-orbit radiometric calibration method of the geostationary ocean color imager [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12): 4322-4328.
- [18] Donald F, Georgi G. A new approach for spectroradiometric calibration consistency on the ground and in space[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8528: 85280R.
- [19] Zhou Q. Characteristics of the internal dielectric charging process of satellites [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2013, 36(S2): 102-104.
周庆. 卫星深层充电特征研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(S2): 102-104.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.