

GF-5 全谱段光谱成像仪星上定标组件在轨性能评价

黄文薪^{1*}, 张黎明¹, 司孝龙¹, 许和鱼¹, 陈洪耀¹, 李鑫¹, 赵艳华²

¹中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 介绍了高分五号全谱段光谱成像仪(VIMI)可见近红外波段星上定标组件的组成和工作方式,分析了 VIMI 发射后星上 12 次太阳漫反射板(SD)双向反射分布函数(BRDF)的量值衰减情况。对比 SD 反射率衰减监测仪(SDRDM)长期观测的太阳数据表明,不同监测波段探测器的衰减程度不同,其中 900 nm 监测波段的硅探测器衰减最大,约为 4.3%。当入射角与观测方位夹角接近时,SD BRDF 的衰减因子(H 因子)变化很小。根据 H 因子的物理模型得到 SDRDM 实际监测的测量不确定度小于 0.86%,满足小于 1.5%的指标要求,且 VIMI 星上定标组件全寿命期输出光谱的辐亮度不确定度小于 3.4%。

关键词 双向反射分布函数; 太阳漫反射板; 辐射定标; 硅探测器

中图分类号 O432.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2029001

On-Orbit Performance Evaluation of On-Board Calibration Component of GF-5 Visible and Infrared Multispectral Imager

Huang Wenxin^{1*}, Zhang Liming¹, Si Xiaolong¹, Xu Heyu¹, Chen Hongyao¹,
Li Xin¹, Zhao Yanhua²

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences,
Hefei, Anhui 230031, China;

²Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract In this paper, the composition and working mode of the on-board calibration component on the visible and near infrared band of GF-5 visible and infrared multispectral imager (VIMI) is introduced. The attenuation of on-board 12-time solar diffuser (SD) bidirectional reflection distribution function (BRDF) on the satellite after VIMI launch is analyzed. Comparing the long-term solar data observed by SD reflectance degradation monitor (SDRDM) shows that the attenuation degree of different monitoring band detectors is different. Among them, the 900 nm monitoring band silicon detector has the largest attenuation, about 4.3%. When the incident angle is close to the observation azimuth, the attenuation factor (H factor) of SD BRDF changes little. According to the physical model of the H factor, the measurement uncertainty of actual monitoring by SDRDM is less than 0.86%, which meets the index requirement of less than 1.5%, and the radiance uncertainty of the output spectrum of the calibration component on the VIMI satellite is less than 3.4% during the lifetime.

Key words bidirectional reflectance distribution function; solar diffuser; radiometric calibration; silicon detector

OCIS codes 290.1483; 230.1980; 150.1488; 040.6040

1 引 言

光学遥感器发射前会在实验室建立各种参数组合下辐射输入与探测器输出的关系。发射后,光学遥感器只能将太阳辐射源的单一能级输入作为参考进行单点绝对辐射定标,包括基于典型目标反射率

的在轨同步检测以及基于朗伯散射介质的星上定标技术。基于太阳漫反射板(SD)的星上定标主要通过 SD 将太阳辐照度转换为辐亮度,在遥感器观测方向输出稳定的光谱辐射,结合遥感器发射前同能量水平下的辐射响应规律得到星上的绝对辐射定标系数。因此,SD 在遥感器观测方向的出射辐亮度不

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-06-18; 录用日期: 2020-07-03

基金项目: “十三五”规划重点支持项目(Y73H9q1801)

* E-mail: huangwx@aiofm.ac.cn

确定度是光学遥感器星上定标不确定度的主要来源。用 SD 作为星上定标空间辐射标准建立的媒介,如 Aqua 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和国家极轨环境卫星系统预备计划 (NPP) 卫星平台的可见近红外成像辐射计 (VIIRS),已取得了较好的定量化应用效果。基于 SD 的高精度星上绝对辐射定标方法是实现光学遥感器星上高精度、高效率、高频次定标的主要手段之一。SD 双向反射分布函数 (SD BRDF) 在空间环境中随时间会发生衰减,从而影响定标时刻出射光谱辐亮度的精度,因此,需要长期对星上 SD BRDF 的量值衰减进行监测修正。保证 SD 在遥感器观测方向星上全寿命期内的出射辐亮度精度和稳定性是确保遥感器具有长期星上高定标精度的必要条件。目前主流的两种星上监测 SD BRDF 量值衰减方式为美国的 MODIS 和欧洲航天局的中分辨率成像光谱仪 (MERIS)。MODIS 以太阳为参照,基于比值辐射测量地表反射率; MERIS 以曝光时间短、防护较好的同源 SD 为反射率不变的参照,比对测量定标常用板和参考监测板获取 SD 反射率的长期变化规律^[1-4]。

2016 年 12 月,风云四号气象卫星成功发射,其搭载的多通道扫描成像辐射计星上定标采用了 SD 与 SD 反射率衰减监测仪 (SDRDM) 配合的星上定标方式。2018 年 5 月 9 日,首颗大气和陆地综合观测的全谱段高光谱卫星——高分五号卫星成功发射,其搭载的全谱段光谱成像仪 (VIMI) 配置了 SD 和 SDRDM 星上定标组件,是我国首台可进行全口径、全光路星上定标的多光谱成像仪。该定标组件中的 SD 主要为 VIMI 前 6 个波段 (0.40 ~ 2.35 μm) 在定标时段提供的已知光谱辐亮度输入,同时采用 4 波段监测的 SDRDM 对 SD 进行长期的 BRDF 衰减监测及修正^[5]。VIMI 进行星上定标时,SD 由运动机构驱动至其对地成像口的最前端替代地球,被太阳照射后在 VIMI 观测方向输出已知的光谱辐亮度,SDRDM 同时开始对 SD 进行监测测量。

VIMI 星上定标组件的 SD 和 SDRDM 由中国科学院安徽光学精密机械研究所根据 VIMI 的结构特点和可用空间定制设计^[5-13]。本文主要分析了 VIMI 的 SD 在发射后至 2020 年 3 月 17 日的在轨性能,为后续基于 SD 定标技术的应用及发展提供改进的参考依据。以太阳为参照,通过 SDRDM 长期观测太阳的响应信号消除日地距离等几何因素的

影响后,对 SDRDM 自身的状态进行了评价分析。结果表明,SDRDM 4 波段监测系统响应的衰减情况不同,其中,波长为 900 nm 的监测波段衰减最大,约为 4.3%。对 SD BRDF 量值的衰减监测,主要以 SDRDM 长期测量的太阳信号为参照,与同时测量的 SD 反射信号进行对比,得到 SD BRDF 的衰减系数。计算结果表明,SD 从发射至 2020 年 3 月 17 日星上监测的 4 个波段 SD BRDF 量值都未发生衰减。最后,结合地面实验室对 SDRDM 的性能及星上实际观测数据进行分析,得到 SDRDM 实际监测的测量不确定度小于 0.86%,满足监测测量不确定度小于 1.5% 的总体设计指标要求,在此基础上得到 VIMI 星上全寿命期的出射光谱辐亮度不确定度小于 3.4%。

2 SD BRDF 衰减监测原理及测量方程

2.1 基于 SD 和 SDRDM 的星上定标测量流程

基于 SD 的星上辐射定标都是通过 SD 将大气外太阳光谱辐照度转换为已知的光谱辐亮度作为遥感器星上的辐射输入,结合遥感器观测计数值完成定标。SDRDM 作为确保 SD BRDF 量值精度的相对监测测量仪器,与遥感器定标测量同时工作。VIMI 在整个星上的定标过程约 10 min,定标有效测量都在每轨卫星见光但星下点还未见光的时间段内完成。首先,VIMI 在预定时间开机后将 SD 以固定姿态展开至其对地成像口替代地球。然后,在 SDRDM 上电 4 min 后,VIMI 与 SDRDM 同时开始测量工作,其中,SDRDM 交替测量 SD、太阳以及自身暗电流信号,在该测量过程持续的 6 min 内,SD 从黑暗至被照亮约 70 s 左右,VIMI 可获取暗目标观测和已知辐射标准观测的计数值。定标测量结束后,SD 被收回指定位置,SDRDM 断电。最后,由 VIMI 打包定标数据下传至地面站,一次星上定标过程结束,定标中的数据获取过程如图 1 所示。

图 1 中, $C(B_i)_{\text{SD},t_m}$ 和 $C(B_i)_{\text{sun},t_m}$ 分别为 t_m 时刻 SDRDM 测量 SD 和太阳扣除暗背景信号后的计数值, $D(t_m)$ 、 $D(t)$ 分别为 t_m 时刻的日地距离和平均日地距离, $D(t_m)/D(t)$ 为 t_m 时刻的日地距离修正因子, t_m 为第 m 次星上定标的时刻, B_i 为第 i 个监测波段, $C(B_i)_{\text{V},t_m}$ 为 VIMI 中 B_i 波段 t_m 时刻观测 SD 的响应值, $E_s(\lambda_i)$ 为大气外太阳光谱辐照度, L_s 为 t_m 时刻漫反射板的出射辐亮度。获取星上定标测量数据后,结合地面实验室测试的部分基础数据可对 SD BRDF 的衰减情况进行监测和定标计算。

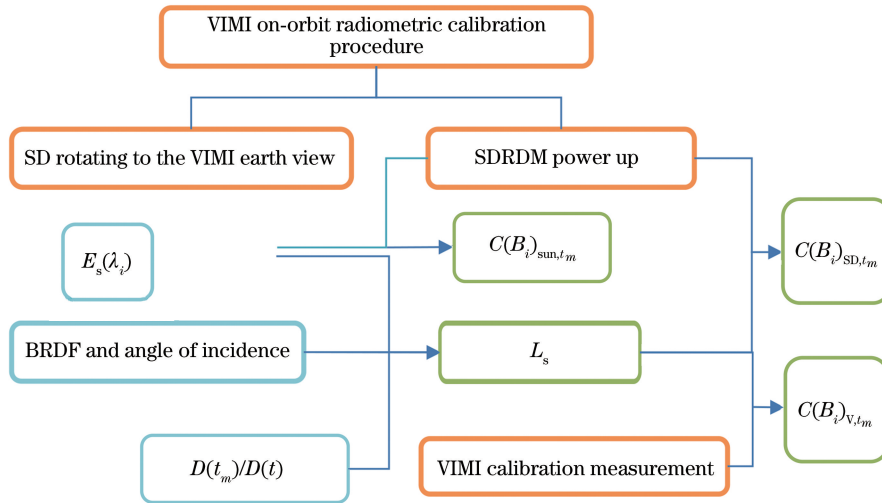


图 1 VIMI 的星上定标流程

Fig. 1 On-board calibration process on VIMI

2.2 星上 SD BRDF 的监测原理

SDRDM 有两个入光口,可分别收集来自太阳和 SD 反射的光,4 个监测波段及中心波长分别为 B_1 (485 nm)、 B_3 (660 nm)、 B_r (900 nm) 和 B_5 (1625 nm)。SDRDM 工作时,通过控制光路开关切换测量太阳照度、SD 反射辐亮度和暗电流信号。以测量的太阳信号为参照,与同时测量的 SD 漫反射信号进行对比,以消除探测器响应度并扣除光照角度、余弦等几何因素的影响后,可获得星上 SD BRDF 的衰减系数 $H(B_i, t_m)$ (H 因子),其测量工作示意图如图 2 所示。星上 t_m 时刻的 $H(B_i, t_m)$ 由发射前的衰减系数和星上对比测量得到的星上

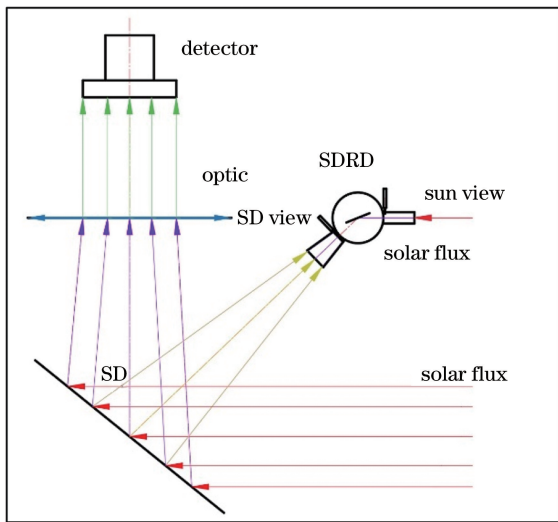


图 2 SDRDM 的工作原理图

Fig. 2 Working schematic diagram of SDRDM

SD BRDF 衰减系数确定,可表示为

$$H(B_i, t_m) = \alpha(B_i, t_0) \times H_{\text{on-orbit}}(B_i, t_m), \quad (1)$$

式中, t_0 为首次星上定标时刻, $\alpha(B_i, t_0)$ 为 SD 出厂至发射时 BRDF 的量值衰减修正系数,表征 SD 出厂至发射时的反射率变化情况, $H_{\text{on-orbit}}(B_i, t_m)$ 为 SD 发射后第 m 次定标在 t_m 时刻的 BRDF 衰减修正系数^[6]。实验只讨论由 SDRDM 星上测量数据确定的 SD BRDF 星上衰减系数 $H_{\text{on-orbit}}(B_i, t_m)$ 。

2.3 SDRDM 监测测量的物理模型

根据 SDRDM 光机结构可建立从两观测口进入 SDRDM 积分球内的辐射通量与其响应值的关系。用去除日地距离变化和几何因子影响后太阳观测口长期测量的太阳信号表征 SDRDM 系统的响应变化情况,可表示为

$$C(B_i)_{\text{sun},t_m} \cdot \frac{\int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} k(\lambda_i) A_{\text{sun}} E_s(\lambda_i) d\lambda_i}{\int k(\lambda_i) d\lambda_i} = C(B_i)_{\text{SD},t_m} \cdot \left[\frac{D(t_m)}{D(t)} \right]^2 / [\tau_i(\theta_{s,t}, \varphi_{s,t})], \quad (2)$$

式中, λ_{i1} 和 λ_{i2} 分别为第 i 波段滤光片通光光谱范围的下限和上限波长, $k(\lambda_i)$ 为 SDRDM 系统的光谱响应率, A_{sun} 为 SDRDM 太阳观测口的通光孔径面积, $\tau_i(\theta_{s,t}, \varphi_{s,t})$ 为 SDRDM 坐标系下入射天顶角 $\theta_{s,t}$ 和方位角 $\varphi_{s,t}$ 的通光率函数^[5-6]。SDRDM 测量得到的 SD 反射信号入射光通量与输出响应值的关系可表示为

$$A_{SD} \cdot \pi \sin^2 \theta \frac{\int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} k(\lambda_i) E_s(\lambda_i) d\lambda_i}{\int k(\lambda_i) d\lambda_i} \cdot H_{\text{on-orbit}}(B_i, t_m) f_{\text{lab}}(\theta_{SD, t_m}, \phi_{SD, t_m}; \theta_r, \phi_r; \lambda_i) = \frac{C(B_i)_{SD, t_m}}{\cos \theta_{SD, t_m}} \cdot \frac{D(t_m)^2}{D(t)^2}, \quad (3)$$

式中, A_{SD} 为 SDRDM SD 观测口的通光孔径面积, θ 为 SDRDM 观测 SD 的半视场角, $f_{\text{lab}}(\theta_{SD, t_m}, \phi_{SD, t_m}; \theta_r, \phi_r; \lambda_i)$ 为波长 λ_i 处以入射天顶角 θ_{SD, t_m} 和方位角 ϕ_{SD, t_m} 照明 SD, 反射天顶角和方位角分别为 θ_r, ϕ_r 时的 BRDF。

SDRDM 系统自身的变化如积分球涂层反射率的衰减、探测器响应度的衰减, 最终都会体现为 SDRDM 的系统响应变化。从 SDRDM 两个入光口进入积分球内的均匀光和被探测器接收的过程相同, 且两入光口的辐射通量相同。因此, 每次成对测量来自两观测口信号的比值可消除 SDRDM 系统响应变化的影响, 使最终得到的比值变化只体现 SD BRDF 量值变化引起的辐射通量变化。根据(2)式和(3)式, 以首次星上定标测量时 SD BRDF 的 H 因子为参考, 得到

$$\frac{H_{\text{on-orbit}}(B_i, t_m)}{H_{\text{on-orbit}}(B_i, t_0)} = \frac{f_{\text{lab}}(\theta_{SD, t_0}, \phi_{SD, t_0}; \theta_r, \phi_r; \lambda_i)}{f_{\text{lab}}(\theta_{SD, t_m}, \phi_{SD, t_m}; \theta_r, \phi_r; \lambda_i)} \cdot \frac{C(B_i)_{\text{sun}, t_0}}{C(B_i)_{SD, t_0}} \cdot \frac{C(B_i)_{SD, t_m}}{C(B_i)_{\text{sun}, t_m}} \cdot \frac{\cos \theta_{SD, t_0}}{\cos \theta_{SD, t_m}} \cdot \frac{\tau_i(\theta_{s,t}, \phi_{s,t})}{\tau_i(\theta_{s,0}, \phi_{s,0})} \quad (4)$$

随着 SDRDM 星上监测测量次数的增加, SD

BRDF 的衰减系数可累积形成时间序列, 从而得到 SD BRDF 4 个监测波段衰减量随时间的变化趋势。

3 SDRDM 星上测量数据的分析

VIMI 首次获得星上定标的有效数据是在 2018 年 8 月 28 日, 至 2020 年 3 月 17 日共有 12 次有效星上定标测量数据。SDRDM 完成一组数据采集的过程: 暗电流测量-太阳光测量-SD 测量-暗电流测量, 总共耗时 2.8 s。其中, 测量太阳与 SD 的时间间隔约为 120 ms, 在此期间内光照角度变化带来的影响可以忽略不计, 近似认为两者是同时测量。按照(2)式可计算得到 SDRDM 在 4 监测波段太阳等效辐照度下的响应值, 以第一次的测量值为参考进行归一化, 得到不同波段探测器的响应变化趋势, 如图 3 所示, 其中, 横坐标为定标日期及 SDRDM 太阳观测口的入射方位角。可以发现, SDRDM 的系统响应存在衰减, 其中, B_r 波段的相对衰减更大, 约为 4.3%。还可以发现, SDRDM 可见近红外监测波段的系统响应衰减随波长的增加而增大, 与 Aqua MODIS SD 稳定性监测辐射计星上性能变化的结论一致^[1]。

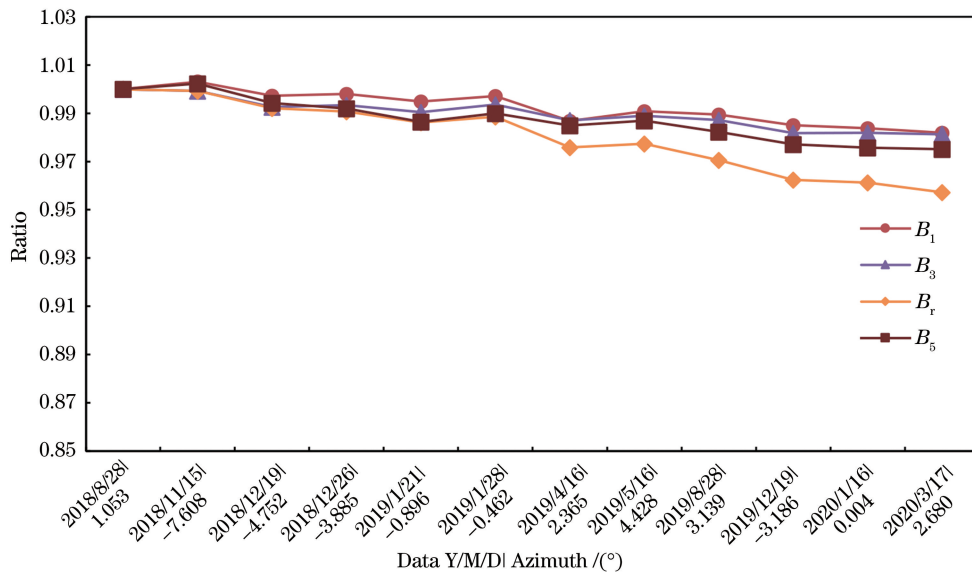


图 3 SDRDM 太阳观测口信号随方位角的变化曲线

Fig. 3 Change curve of SDRDM solar observation port signal with azimuth

考虑到轨道漂移后 1 年内可进行星上定标的太阳光入射方位与 VIMI 和 SDRDM 观测方位的夹角范围分别为 $145^{\circ}\sim 168^{\circ}$ 和 $73.1^{\circ}\sim 96.1^{\circ}$, 入射天顶角为 $69^{\circ}\sim 74^{\circ}$ 。理想情况下, 根据(4)式可得到 SD BRDF 量值衰减 H 因子的时间序列, 结果如图 4 所示。根据 SDRDM 太阳观测信号可判断 H 因子随时间的起伏变化与 SDRDM 自身工作性能无关, 主要由 SD 反射辐亮度相对偏高引起。结合多次测量的太阳入射与 VISM 观测角度分析发

现, 图 4 中各监测波段的 H 因子与太阳入射及 VISM 观测 SD 的方位夹角、波长有关, 总体来看, H 因子越大, 太阳入射与观测方位的夹角越小。现有测量数据中太阳入射与观测方位的夹角为 158.967° 时, H 因子相对最小。还可以发现, 太阳入射与观测方位的夹角大于 157.739° 时, H 因子都非常接近。同时, 各波段受方位夹角变化的影响程度并不完全相同, 即图 4 中 H 因子的变化规律非单一因素导致。

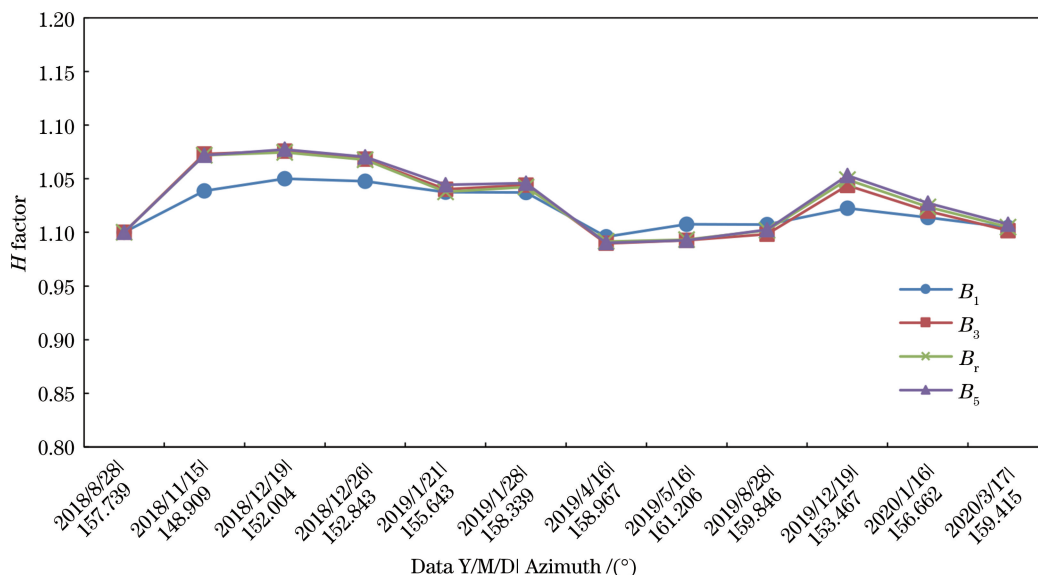


图 4 H 因子随时间及方位角的变化曲线

Fig. 4 H factor change curve with time and azimuth

为降低 SD 入射角、杂散光等因素引入的误差对 H 因子计算结果的影响, 选择比首次测量太阳入射与观测方位夹角更大的 5 次 H 因子计算结果进行对比, 如表 1 所示。表中的 5 次测量时间均在 VIMI 发

射后至 2020 年 3 月 17 日内, 各监测波段测量得到的 H 因子相对标准偏差最小为 0.50% , 最大为 0.71% , 且首次与最后一次测量的差异中, 除 B_5 波段外都小于 0.5% , 这表明 SD BRDF 未发生衰减。

表 1 相近方位夹角下的 H 因子

Table 1 H factor under the angle of similar azimuth

Date Azimuth / (°)	B_1	B_3	B_r	B_5
2018/8/28 157.739	1	1	1	1
2019/4/16 158.967	0.9961	0.9899	0.9917	0.9905
2019/5/16 161.206	1.0076	0.9926	0.9932	0.9926
2019/8/28 159.846	1.0073	0.9984	1.0020	1.0025
2020/3/17 159.415	1.0046	1.0016	1.0050	1.0076
Average	0.0049	0.0050	0.0058	0.0071

到 2020 年 3 月 17 日为止, VIMI SD 星上累计曝光时间不足 2 min, 表 1 中星上监测的测量结果也表明 SD BRDF 在 900 nm 中心波长波段未发生衰减。选择稳定的 B_r 监测波段作为 SD BRDF 无

衰减的参比波段, 通过(5)式得到相对 B_r 波段其他波段的 H 因子, 与(4)式相比, 消除了太阳入射 SD 余弦误差的影响, 在发射初期或测量数据较少的情况下可进一步提高测量精度。对 B_3 和 B_5 监测波

段按(5)式以 B_r 为参照,得到 H 因子从发射至 2020 年 3 月 17 日的波动分别为 0.27% 和 0.23%, 变化曲线如图 5 所示。由图 4 中 B_1 与其他 3 个波

段的 H 因子曲线图可以发现,SD 出射辐亮度在 B_1 波段受到的影响更小,因此(5)式的方法不适用于对 B_1 波段进行分析。

$$\frac{H_{\text{on-orbit}}(B_i, t_m)}{H_{\text{on-orbit}}(B_r, t_m)} = \frac{f_{\text{lab}}(\theta_{\text{SD}, t_m}, \varphi_{\text{SD}, t_m}; \theta_r, \phi_r; \lambda_r)}{f_{\text{lab}}(\theta_{\text{SD}, t_m}, \varphi_{\text{SD}, t_m}; \theta_r, \phi_r; \lambda_i)} \cdot \frac{C(B_r)_{\text{sun}, t_m}}{C(B_r)_{\text{SD}, t_m}} \cdot \frac{C(B_i)_{\text{SD}, t_m}}{C(B_i)_{\text{sun}, t_m}} \frac{\tau_i(\theta_{s, t_m}, \varphi_{s, t_m})}{\tau_r(\theta_{s, t_m}, \varphi_{s, t_m})} \quad (5)$$

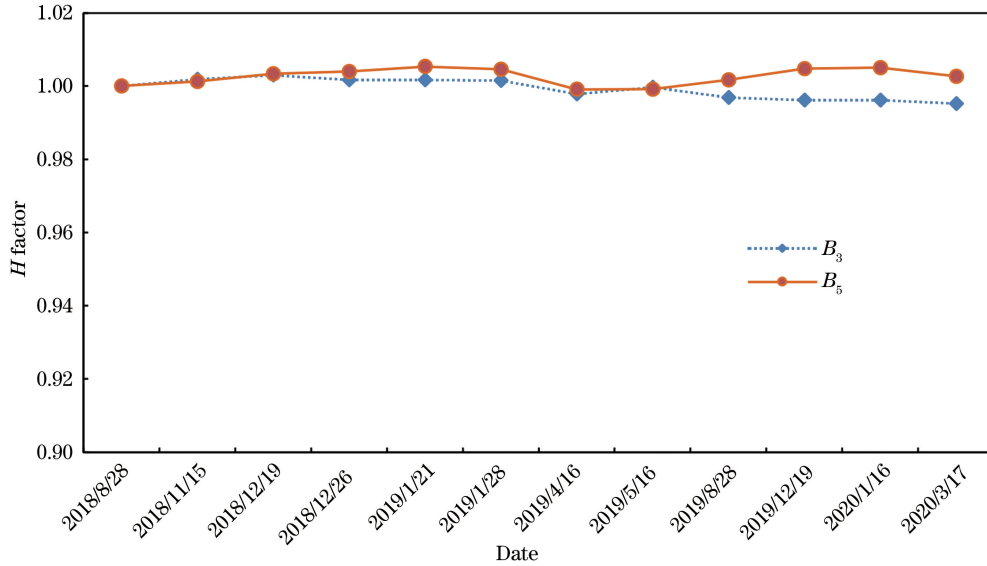


图 5 B_3 、 B_5 波段修正后的 H 因子曲线

Fig. 5 H factor curve after correction for B_3 and B_5 bands

4 SDRDM 监测测量不确定度分析

由(3)式可知,各监测波段 $H_{\text{on-orbit}}(B_i, t)$ 的不确定度主要与实验室 SDRDM 观测方向 BRDF 的相对测量不确定度、SDRDM 的测量稳定性、SD 运动机构重复定位的精度以及 SDRDM 光通过率角度函数的测量不确定度等参数相关。其中,太阳光照 SD 天顶角余弦误差主要来源于各次测量相对首次测量的余弦误差,由 SD 每次定标时展开的重复定位精度决定。根据地面运动至定标工作状态得到 SD 法向标识镜的重复测试角度误差为 0.1° 。

以定标时段每次必定出现的中间照明天顶角 72° 为误差分析参考,得到光照角度的余弦误差为

$$\frac{\cos \theta_{\text{SD}, t_m} - \cos(\theta_{\text{SD}, t_m} + 0.1)}{\cos(\theta_{\text{SD}, t_m} + 0.1)} \times 100 = 0.54\% \quad (6)$$

SDRDM 太阳观测口光通过率角度函数的测量不确定度小于 0.35% ^[5-6], $f_{\text{lab}}(\theta_{\text{SD}, t_m}, \varphi_{\text{SD}, t_m}; \theta_r, \phi_r; \lambda_i)$ 的相对测量不确定度小于 0.5% ^[11-12], SDRDM 的测量稳定性主要由地面实验室在接近星上 SD 出射能量输入水平下测量的信噪比估计,得到相对最

差的监测波段稳定性小于 0.1% 。基于 B_r 波段修正 B_3 与 B_5 SD 信号后得到的 H 因子相对偏差是由杂散光引入的不确定度,最大为 0.27% 。

监测测量的合成不确定度可表示为

$$U = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \dots + \mu_n^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \mu_i \mu_j} \quad (7)$$

式中, μ_n 为 SDRDM 监测测量模型中各参数的不确定度,各参数间的相关系数 ρ_{ij} 假定为 0。计算得到 SDRDM 的 4 监测波段的监测测量不确定度最大为 0.86% ,具体各项不确定度如表 2 所示。

表 2 SDRDM 监测测量的不确定度

Table 2 Uncertainty of SDRDM monitoring measurement

Source	Uncertainty / %
Relative SD BRDF measurement (μ_1)	0.50
Relative SD cosine error of incidence (μ_2)	0.54
Relationship between transmittance distribution and incident angle (μ_3)	0.35
Stability of SDRDM (μ_4)	0.10
Stray light (μ_5)	0.27
Total uncertainty (U)	0.86

在 SDRDM 实际星上监测测量不确定度的基础上,对 VIMI 星上定标时段 SD 的出射辐亮度标准量值不确定度进行更新。根据 SD 星上光谱辐亮度物理模型,VIMI 采用的 SD+SDRDM 星上定标方式主要受大气外太阳光谱辐照度不确定度、日地距离因子确定度、太阳入射 SD 余弦误差和杂散光等因素影响。按照(7)式得到 VIMI SD 星上长期出射光谱辐亮度的合成不确定度,如表 3 所示^[13]。其中,杂散光的影响为遥感器研制时分析得出,日地距离因子的影响通过考虑轨道漂移情况下对半年内的日地距离计算分析得到;大气外太阳光谱辐照度(如 E490 等)不确定度根据相关国际观测组织公布的数据得到^[2],其他项均根据实际测量评价得到。

表 3 SD 星上出射光谱辐亮度不确定度
Table 3 Uncertainty of the SD on-board emitted spectrum radiance

Source	Uncertainty / %
SD BRDF measurement (μ_1)	1
SD cosine error of incidence (μ_2)	0.54
SD radiance non-uniformity (μ_3)	0.90
Earth-sun distance correction factor (μ_4)	0.20
SD stability monitor (μ_5)	0.86
Measurement of SD H factor before launch (μ_6)	0.50
Solar spectral irradiance (μ_7)	1
Stray light (μ_8)	2.72
Total uncertainty (U)	3.40

5 结 论

为保证 VIMI 星上全寿命期具有稳定的星上绝对辐射定标精度,对 VIMI 近两年的在轨 SD 光学性能和 SDRDM 工作稳定性及监测测量不确定度进行了分析。通过 SDRDM 对大气外太阳长期观测测量的时间序列变化分析了 SDRDM 系统响应的变化,结果表明,除 B_5 监测波段外,其余 3 个监测波段的衰减程度均随波长的增加而增大, B_1 (900 nm) 波段相对星上首次监测测量时衰减了约 4.3%。按照 SDRDM 监测测量原理得到 4 监测波段各自的 H 因子时间序列,证明了 SD BRDF 发射后至 2020 年 3 月 17 日还未发生衰减。以 B_1 波段无衰减作为参考,修正后 B_3 和 B_5 监测波段的 H 因子变化波动分别为 0.27% 和 0.23%。最后,根据 H 因子测量模型,按照 B 类不确定度合成方式得到

实际的星上监测测量不确定度小于 0.86%,满足设计指标小于 1.5% 的要求。在 SDRDM 实际监测测量不确定度的基础上,分析了 VIMI 星上全寿命期 SD 出射光谱的辐亮度,得到其辐亮度不确定度小于 3.4%。

从 SDRDM 太阳观测数据来看,间隔时间较长的两次数据差异偏大,且监测测量间隔时间越短,测量频率越固定,测量数据的差异越小,越容易获取仪器的细微变化情况,从而进一步提高测量精度。光学遥感器要获得可靠的星上定标结果还需对辐射参考不确定度进行评价,而 SDRDM 经过绝对辐射定标后可作为标准辐亮度计使用,长期观测稳定的大气外太阳数据进行自校准,再作为相对测量仪器对 SD 进行监测测量可获得较高的监测精度,确保辐射参考星上全寿命期的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Xiong X, Angal A, Choi T, et al. On-orbit performance of MODIS solar diffuser stability monitor [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8510: 85100H.
- [2] 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.
- [3] Wu A S, Xiong X X, Doelling D R, et al. Characterization of terra and aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR spectral bands' calibration stability [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 4330-4338.
- [4] Olij C, Baudin G, Bezy J L, et al. Spectralon diffuser calibration for MERIS [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3221: 63-74.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Xu H Y, Zhang L M, Li X, et al. A relative radiometric calibration method based on solar diffuser

- research for a linear array CCD detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0628002.
- 许和鱼, 张黎明, 李鑫, 等. 基于太阳漫反射板线阵 CCD 相对辐射定标方法研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0628002.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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] 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.
- [13] Huang W X, Zhang L M, Si X L, et al. Influence of non-uniformity of light attenuated by solar attenuation screen on on-board calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0429002.
- 黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 等. 太阳衰减屏光衰减非均匀性对星上定标的影响 [J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0429002.