

太阳衰减屏光衰减非均匀性对星上定标的影响

黄文薪*, 张黎明**, 司孝龙, 陈洪耀, 郝军, 包诗薇, 杨宝云, 王戟翔

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

摘要 利用定标光谱仪(SCS)实际光学系统参数,分析了经太阳衰减屏(SAC)衰减后的太阳漫反射板(SD)的出射辐亮度非均匀性来源。基于星上定标时刻漫反射板光谱辐亮度物理模型,结合实验室部分实测参数计算得到整年星上定标时段的漫反射板出射辐亮度角度变化规律,并与以实验室小发散角太阳模拟器作为照明光源测得的SCS漫反射板出射辐亮度随照明角度变化的规律进行了比较,验证了星上漫反射板定标时刻光谱辐亮度物理模型的正确性,且光通过太阳衰减屏照明漫反射板得到的出射辐亮度在SCS焦平面的能量非均匀性可优于 $0.47\%/(\circ)$,满足SCS相对辐射定标对辐射源工作区域在其焦平面均匀性优于 99.5% 的要求。最后,根据实际应用状态,分析得到太阳衰减屏+漫反射板方式形成的星上光谱辐亮度标准面源量值不确定度可优于 2.13% 。

关键词 散射; 太阳漫反射板; 太阳衰减屏; 不确定度; 光谱辐亮度

中图分类号 O432.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0429002

Influence of Non-uniformity of Light Attenuated by Solar Attenuation Screen on On-board Calibration

Huang Wenxin*, Zhang Liming**, Si Xiaolong, Chen Hongyao,

Hao Jun, Bao Shiwei, Yang Baoyun, Wang Jixiang

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

Abstract Based on the actual optical system parameters of the calibration spectrometer (SCS), the source of the radiance non-uniformity of the solar diffuser (SD) attenuated by the solar attenuation screen (SAC) is analyzed. Based on the physical model of the SD spectral radiance in orbit while calibration, combined with part of the parameters measured in the laboratory, the variation law of the SD's radiance versus the angle of incidence (AOI) during the calibration measuring in a year is obtained. And comparing with the variation law of the SD radiance versus AOI set on SCS measured with a small divergence solar simulator as the source for illuminating in the laboratory, the correctness of the physical model of spectral radiance at the calibration time of the SD in orbit is verified. The emission radiance obtained by the illuminating SD can achieve energy non-uniformity in the SCS focal plane of better than $0.47\%/(\circ)$, which satisfies the requirement that the SCS relative radiation calibration has a focal plane uniformity better than 99.5% at the working area of the radiation source. Finally, according to the actual application state, the uncertainty of the on-board spectral radiance standard surface source value formed by the SAC+SD method can be better than 2.13% .

Key words scattering; solar diffuser; solar attenuation screen; uncertainty; spectral radiance

OCIS codes 290.1483; 290.5820

1 引言

光学载荷发射前都会在实验室进行全面充分的测试及标定,完善地建立光学载荷各种光输入与其对应输出的关系,得到对载荷在各种工作参数下的输入与输出都有准确描述的辐射响应模型。载荷在

空间环境中运行,受到空间环境中的原子氧、紫外辐照以及总剂量辐照等影响,其光学系统透镜的膜层、探测器等电子元器件难免会发生变化,这会影响到传感器的探测性能。为此,对光学载荷进行有频次规律的星上全寿命期辐射定标显得尤为重要,监测修正载荷辐射响应的变化,保障遥感数据质量,提高遥

收稿日期: 2019-09-20; 修回日期: 2019-10-23; 录用日期: 2019-11-06

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

感数据量化应用水平。近年来,对遥感数据量化应用已提出了更高要求,对不同功能及特点的遥感器的高精度实时定标技术也有了更多更高需求。国际上以太阳漫射板作为星上定标标准辐射源所建立的媒介已有三十多年,到目前为止基于太阳漫射板的高精度星上绝对辐射定标方法依然是实现遥感器星上高精度高效率高频次定标的主要手段之一。太阳漫射板具有高均匀性高反射率的特点,一般地物目标的表观辐亮度相对星上太阳漫射板的出射辐亮度都偏低,而在与遥感器观测的典型目标能量水平输入不同的情况下进行定标会引入更大的不确定性因素,为此需要对太阳漫射板出射辐亮度进行衰减以匹配遥感器工作时的一般探测目标能量水平^[1]。

1999年,Terra卫星搭载的MODIS星上定标系统就已设置了太阳衰减屏(solar attenuation screen,SAC),并将衰减屏设计为运动部件,通过切换太阳漫射板前有衰减屏和没有衰减屏两种模式实现不同入射能量水平的星上绝对辐射定标。其中,有太阳衰减屏的定标模式主要适用于遥感器观测低辐亮度目标时所设置的成像参数。2002年,欧洲航天局发射的Envisat所搭载的MERIS星上定标系统主要是通过使用较大的入射天顶角对入射辐照度进行衰减以实现太阳漫射板出射辐亮度的调整匹配。作为MODIS的后续继承遥感器,2011年,成功发射的NPP卫星所搭载的VIIRS仍然采用了在太阳漫反射板(SD)前端加太阳衰减屏的方式来降低漫反射板出射辐亮度,选择增加一项会额外引入定标不确定度的因素,并要避免太阳漫反射板在大入射天顶角的状态下工作^[2-7]。

相对而言,我国在星上定标技术领域的发展与世界先进水平差距较大。中国科学院安徽光学精密机械研究所开展了基于太阳漫射板的星上定标技术研究,结合基于太阳漫射板部分孔径全光路及全视场全光路两种星上定标器的研制经验,设计了海洋1C定标光谱仪(SCS)星上定标漫射板组件。该组件主要包括太阳衰减屏、定标板、参考板以及波长板,首次使用了以太阳衰减屏限制太阳漫射板接受照度的光学结构。为了评价衰减屏引入的误差因素对星上绝对辐射定标的影响,首先分析了通过太阳衰减屏到达太阳漫射板的辐照度非一致性,同时根据几何成像光学原理,评价了从漫射板到遥感器焦平面的非均匀程度。首先,使用太阳模拟器和二维转角装置模拟了海洋1C定标光谱仪漫射板组件的

整年星上受照明情况。其次,将地物光谱仪替代SCS,以相同观测角度测量各照明条件下的漫反射板出射辐亮度,得到对应的响应计数值。然后,将测试数据归一化,并与计算的漫反射板出射辐亮度变化规律进行比较,充分验证了增加太阳衰减屏后的漫反射板出射辐亮度实测值与计算规律的一致性。并分析得到相对相机焦平面能量分布非均匀性可优于0.47%/°的结果,表明经过太阳衰减屏后照明的漫反射板形成的辐射面源仍然能满足SCS每次定标时焦平面能量均匀性优于99.5%的要求。按照太阳衰减屏-漫反射板出射光谱辐亮度物理模型对其星上定标时刻的量值不确定度进行了分析,通过不确定度合成得到SCS漫反射板星上光谱辐亮度不确定度可优于2.13%。

2 漫射板星上定标原理及衰减屏光通过率

2.1 太阳衰减屏+漫反射板星上定标原理

基于太阳漫反射板的高精度星上定标是以大气外太阳为稳定光谱辐照度源,照明双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)已知的漫反射板,形成光谱辐亮度已知的近似朗伯面源,建立星上辐亮度工作标准,为遥感器提供已知辐射输入,完成星上绝对辐射定标。基于太阳漫反射板的定标原理如图1所示。从物理模型中可知,若不使用衰减屏则 $\tau(\theta_{sc}, \phi_{sc})=1$ (SC表示卫星坐标系, θ_{sc} 、 ϕ_{sc} 分别为卫星坐标系下的入射天顶角和方位角),太阳漫反射板出射辐亮度只能通过入射天顶角的余弦值进行调整。太阳漫反射板并非理想朗伯体,通常太阳漫射板在0°~65°天顶角照明情况下都具有较好的朗伯性,大天顶角(>65°)照明对实验室测量以及安装几何精度要求非常高,0.1°的角度误差将引入0.5%出射辐亮度量值误差^[8]。MODIS星上定标系统采用了多孔透光板(太阳衰减屏),对入射至太阳漫射板的能量进行衰减,实现遥感器低辐亮度目标探测模式的定标。相对单纯通过增大入射天顶角对入射能量进行衰减的方式而言,太阳衰减屏+太阳漫射板形式可使用小天顶角照明,对几何误差更不敏感,易于获得更高的精度。太阳漫反射板的光谱辐亮度物理模型为

$$L_{SD}(\theta_{SD}, \phi_{SD}; \theta_v, \phi; \lambda_j) = \frac{E_s(\lambda_j) \cos \theta_{SD,t}}{R(t)^2} \alpha(\lambda_j, t_0) H_{on-orbit}(\lambda_j, t) \times f_{lab}(\theta_{SD}, \phi_{SD}; \theta_v, \phi; \lambda_j) \times \tau(\theta_{sc}, \phi_{sc}), \quad (1)$$

式中： $L_{SD}(\theta_{SD}, \phi_{SD}; \theta_v, \phi; \lambda_j)$ 为定标时刻遥感器观测方向太阳漫反射板波长 λ_j 处的光谱辐亮度；

$E_s(\lambda_j)$ 为大气外波长 λ_j 处的辐照度， j 表示第 j 波段， s 表示太阳；

$R(t)$ 为定标 t 时刻的日-地相对距离修正因子；

θ_{SD}, ϕ_{SD} 分别为太阳漫反射板坐标系下太阳入射天顶角、方位角， $\theta_v, \phi, \lambda_j$ 分别为遥感器观测太阳漫射板的天顶角、方位角与波长；

$f_{lab}(\theta_{SD}, \phi_{SD}; \theta_v, \phi; \lambda_j)$ 为实验室测量的定标时刻遥感器观测方向太阳漫反射板的双向反射分布函数；

$\alpha(\lambda_j, t_0)$ 为表征漫反射板出厂至发射时的反射率变化，是发射前漫反射板 BRDF 量值衰减修正系数， t_0 为初始时刻；

$H_{on-orbit}(\lambda_j, t)$ 为漫反射板发射后在空间环境中各方面辐射引起的定标 t 时刻的 BRDF 量值衰减修正系数^[9]；

$\tau(\theta_{SC}, \phi_{SC})$ 为太阳衰减屏的光通过率，是太阳照明太阳衰减屏角度的函数。

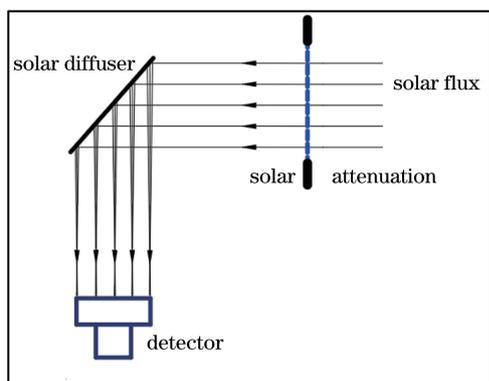


图 1 太阳衰减屏+太阳漫射板星上定标原理图
Fig. 1 Calibration principle based on solar diffuser with solar attenuation screen

2.2 太阳衰减屏光通过率测试结果

太阳衰减屏配合太阳漫射板使用，放置于太阳漫射板前端，通过控制零件通光孔的大小与间距(孔占比)来降低到达太阳漫射板的太阳光谱辐照度，在可确保太阳漫射板具有极佳朗伯性的照明条件下得到低辐亮度面源，实现匹配遥感器观测目标典型辐亮度的高精度星上定标。同时，太阳衰减屏具有抑制来自地球、大气的杂散光功能，在衰减屏通光孔背光一侧，设计了类似“百叶窗”的结构，使整年定标时段内的光可通过，其余杂光均被阻挡^[10]。由于制造能力限制，太阳衰减屏通光孔大小和间距不可能完全一致，图 2 所示为衰减屏表面通光孔光学显微镜成像测量的结果，其中最大通光孔径为 $518 \mu\text{m}$ ，与最小通光孔径 $505 \mu\text{m}$ 相差 $13 \mu\text{m}$ ，且衰减屏通光孔处厚度不可能为 0，因此随太阳照明角度变化，经衰减屏到达漫反射板的能量会有差异。太阳-衰减屏-漫反射板三者间的几何关系都相对固定，在实验室可测出依赖照明角度变化的衰减屏的光通过率的相对分布，用于消除辐射定标计算时的几何因素影响。为此，在实验室使用双平行光管衰减屏专用光通过率测量装置，对衰减屏光通过率进行了测量^[11]，测量结果如图 3 所示。

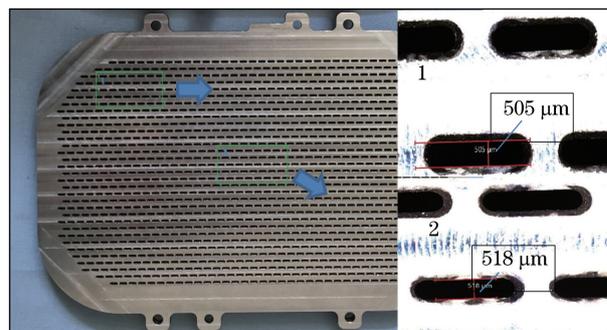


图 2 太阳衰减屏通光孔径测量结果
Fig. 2 Measurement results of SAC pass aperture

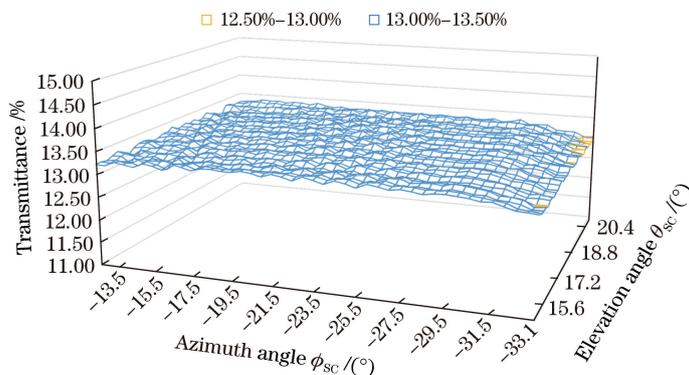


图 3 太阳衰减屏光通过率的角度分布
Fig. 3 Angular distribution of SAC transmittance

3 SCS 漫反射板出射辐亮度非均匀性分析

从太阳衰减屏光通过率的角度分布测试结果可知,在整年星上定标时段的光照角度范围内,太阳衰减屏的光通过率随角度有波动变化。按照几何成像光学进行分析,如图 4 所示,其中 D_1 为漫射板到遥感器入瞳距离。漫反射板 SCS 观测区域内的每个点所散射的光都能充满入瞳并经成像系统后均匀照明整

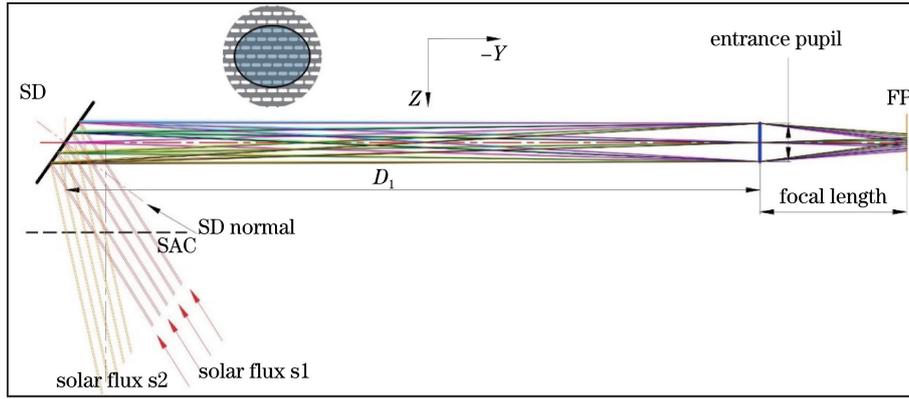


图 4 焦平面能量均匀性光线追迹示意图

Fig. 4 Ray tracing schematic of energy uniformity on focal plane

个焦平面,即通过衰减屏衰减后到达漫反射板所形成的亮暗光斑实际仅对到达焦平面(Focal Plane,FP)的能量进行了衰减,不会产生焦平面能量分布不均匀而导致光谱仪探测器像元间响应有差异。定标时段太阳相对卫星的光照角度在不断变化,到达漫反射板前所通过的衰减屏通光孔区域不同,因此漫射板上定标光谱仪观测区域的亮暗光斑面积占比略有差异,使相同位置漫射板出射辐亮度也出现不同,因此最终探测器的响应值有类似衰减屏光通过率的波动变化。

定标时段太阳光照角度一直处于变化中,某时刻漫反射板出射辐亮度与太阳衰减屏光通过率、漫反射板 BRDF 量值以及光照余弦有关,取决于实际照明角度。为了评价太阳衰减屏通光孔大小及间距不一致导致的漫射板出射辐亮度波动对 SCS 星上定标的影响,在实验室采用太阳模拟器作为光源,通过设计测试夹具保证与实际定标光谱仪定标时观测漫反射板方向一致,采用野外地物光谱仪替代定标

光谱仪,由二维转动装置带动地物光谱仪和漫反射板组件旋转模拟星上整年工作时段和被照明状态,验证测试原理如图 5 所示,其中 θ 为出射光发散角。以 4° 间隔和 2° 间隔分别抽取了整年太阳光照在方位角 $-13^\circ \sim -33^\circ$ 、俯仰角 $15^\circ \sim 21^\circ$ 的范围内共 24 组角度作为验证测试点,在 355 nm 波段地物光谱仪采集的及理论计算的归一化漫射板出射辐亮度随角度的变化如图 6 所示(其他波段也呈相同趋势)。

$$\eta_2 = \frac{\max[C_{DN}(\theta_{SD,m}, \phi_{SD}; \lambda_j)] - \min[C_{DN}(\theta_{SD,m}, \phi_{SD}; \lambda_j)]}{\min[C_{DN}(\theta_{SD,m}, \phi_{SD}; \lambda_j)] \times 6} \times 100\%, \quad (2)$$

$$\eta_1 = \frac{\max[C_{DN}(\theta_{SD}, \phi_{SD,n}; \lambda_j)] - \min[C_{DN}(\theta_{SD}, \phi_{SD,n}; \lambda_j)]}{\min[C_{DN}(\theta_{SD}, \phi_{SD,n}; \lambda_j)] \times 21} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: η_2 为入射方位角 ϕ_{SC} 不变状态下俯仰角在 $15^\circ \sim 21^\circ$ 范围内的每度变化的相对能量变化率; η_1 为入射俯仰角 θ_{SC} 不变状态下方位角在 $-13^\circ \sim -33^\circ$ 范围内的每度变化的相对能量变化率; $\max[C_{DN}(\theta_{SD,m}, \phi_{SD}; \lambda_j)]$ 和 $\min[C_{DN}(\theta_{SD,m}, \phi_{SD}; \lambda_j)]$ 分别为方位角固定不变时俯仰角在 $15^\circ \sim 21^\circ$ 范围内的最大计数值和最小计数值; $\max[C_{DN}(\theta_{SD}, \phi_{SD,n}; \lambda_j)]$ 和 $\min[C_{DN}(\theta_{SD}, \phi_{SD,n}; \lambda_j)]$ 分别为俯仰角固定不变时方位角在 $-13^\circ \sim -33^\circ$ 范围内的最大计

数值和最小计数值; n, m 表示第 n 个、第 m 个角度。

按照(1)、(2)式,对相同的照明俯仰角(方位角为变量)和相同的照明方位角(俯仰角为变量),分别统计地物光谱仪所测得的 C_{DN} 值(仪器测量的输出计数值)在整年照明角度范围内的起伏变化。计算结果如表 1 所示,可知,整年光照角度范围内照明角度变化引起的漫射板出射辐亮度非均匀性小于 $0.47\%/(\circ)$ 。定标光谱仪星上定标有效时间较短(约 20 s),在天顶角变化 1° 的时间范围内定标

测量已经完成,因此该非均匀性可满足海洋 1C 定标光谱仪星上以漫反射板为近似朗伯源参照进行像

元间辐射响应不一致的相对校正要求,同样也能满足光谱仪星上绝对辐射定标精度要求。

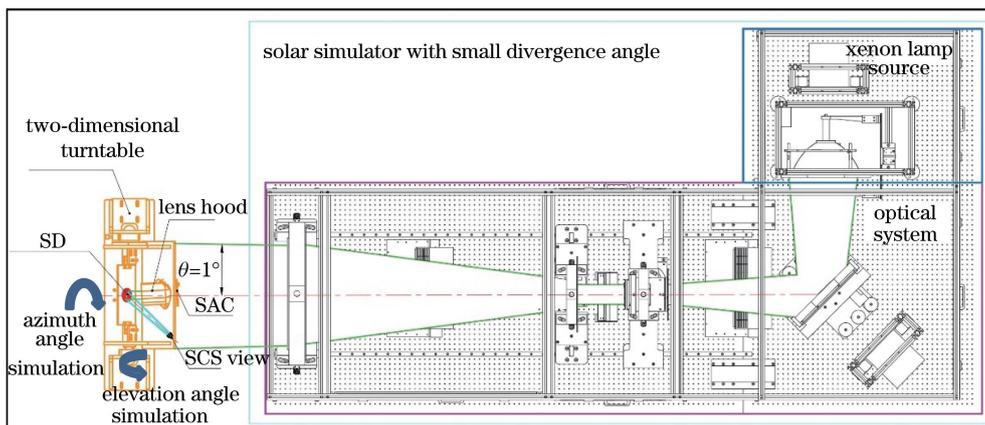


图 5 漫射板出射辐亮度角度变化趋势验证测试示意图

Fig. 5 Test schematic of change trend verification of SD radiance-angle

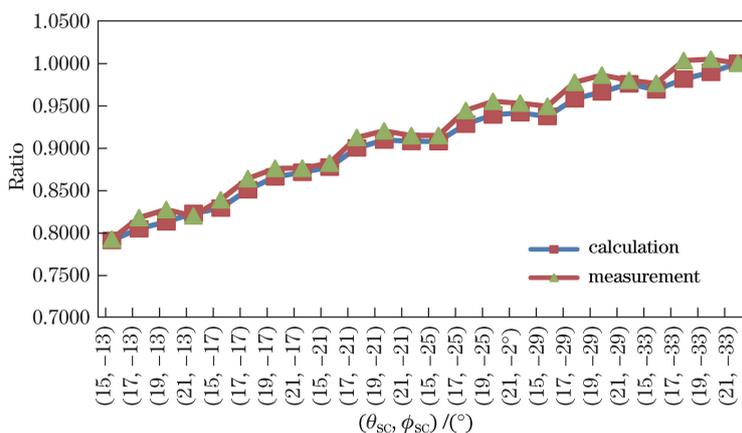


图 6 355 nm 波长下漫射板出射辐亮度随角度的变化趋势

Fig. 6 Change trend of SD radiance-angle at 355 nm

表 1 漫射板出射辐亮度差异

Table 1 Difference of SD radiance

Wavelength /nm	Relative difference η_1 / [%/°]				Relative difference η_2 / [%/°]					
	$\theta_{sc} = 15^\circ$	$\theta_{sc} = 17^\circ$	$\theta_{sc} = 19^\circ$	$\theta_{sc} = 21^\circ$	$\phi_{sc} = -13^\circ$	$\phi_{sc} = -17^\circ$	$\phi_{sc} = -21^\circ$	$\phi_{sc} = -25^\circ$	$\phi_{sc} = -29^\circ$	$\phi_{sc} = -33^\circ$
355	0.0676	0.0852	0.1076	0.1077	0.4157	0.2721	0.3451	0.3392	0.3018	0.3439
385	0.0757	0.0808	0.1058	0.1144	0.4373	0.3461	0.3140	0.3862	0.3213	0.3590
412	0.0791	0.0836	0.1101	0.1166	0.4635	0.4112	0.3240	0.4472	0.3451	0.3702
443	0.0737	0.0838	0.1057	0.1147	0.4600	0.4400	0.3414	0.4651	0.3690	0.3729
490	0.0668	0.0859	0.0915	0.1068	0.4392	0.4111	0.3758	0.4455	0.3502	0.3385
520	0.0726	0.0934	0.0883	0.1034	0.4056	0.3729	0.3882	0.3976	0.3315	0.2992
565	0.0657	0.0938	0.0814	0.0885	0.3626	0.2930	0.4006	0.3464	0.3164	0.2454
670	0.0777	0.0921	0.1010	0.0885	0.3399	0.2801	0.3869	0.3337	0.3018	0.2356
750	0.0656	0.0788	0.0843	0.0750	0.3270	0.2578	0.3679	0.3671	0.2937	0.2184
865	0.0376	0.0418	0.0712	0.0552	0.3364	0.2661	0.3784	0.3889	0.2960	0.2880

4 漫反射板光谱辐亮度不确定度分析

根据(1)式可知,星上定标时刻 SCS 的漫反射板单次出射光谱辐亮度不确定度主要由大气外太阳光谱辐照度 $E_s(\lambda_j)$ 、入射天顶角余弦 $\cos\theta_{SD,t}$ 、太阳衰减屏相对光通过率 $\tau(\theta_{SC}, \phi_{SC})$ 、漫反射板双向反射分布函数 $f_{lab}(\theta_{SD}, \phi_{SD}; \theta_v, \phi; \lambda_j)$ 和日地距离 $R(t)^2$ 等几项参数的不确定度决定。考虑长期漫反射板反射率衰减修正环节,定标光谱仪星上全寿命期漫反射板出射光谱辐亮度不确定度还受 BRDF 量值衰减修正因子 $H_{on-orbit}(\lambda_j, t)$ 的测量不确定度影响。其中,太阳光照明漫射板天顶角余弦 $\cos\theta_{SD,t}$ 误差主要来源于漫射板安装后的法线方向误差,由于漫反射板安装后板面与安装面平行度不可测,这里按漫反射板法线方向与理论偏离最大误差 0.13° (加工误差)进行分析计算,即

$$\frac{\cos\theta_{SD,max} - \cos(\theta_{SD,max} + 0.13)}{\cos(\theta_{SD,max} + 0.13)} \times 100 = 0.23\%, \quad (4)$$

式中: $\theta_{SD,max}$ 是漫反射板最大入射天顶角。

根据模拟星上整年光照条件下的漫射板出射辐亮度变化结果可知,太阳衰减屏-漫反射板出射辐亮度非均匀性误差 $< 0.47\% / (^\circ)$; 太阳衰减屏相对光通过率测量不确定度优于 $0.54\% [11]$; $f_{lab}(\theta_{SD}, \phi_{SD}; \theta_v, \phi; \lambda_j)$ 测量不确定度主要由装置决定^[12-13], 根据实际使用的测量角度分析,紫外波段可优于 1.2% , 可见近红外波段可优于 0.8% 。漫反射板 BRDF 测量至发射时,漫反射板性能跟踪样片可作为衰减监测替代测量试片,主要通过分光光度计的比对测量实现发射前衰减系数的获取,其测量不确定度由分光光度计稳定性决定,经评价 $\alpha(\lambda, t_0)$ 不确定度优于 0.5% ; 而 $H_{on-orbit}(\lambda_j, t)$ 由发射后定标光谱仪星上比对测量定标板和参考板确定,由于监测时的观测模式是顺序测量并非交替测量,因此过程中两者之间还存在几何误差,且观测漫反射板与观测参考板间也有几十秒时间差,光谱仪稳定性也会引入测量不确定度。最后,漫反射板周围物体表面反射至漫反射板的杂散光对漫反射板出射光谱辐亮度不确定度的贡献是 1% 。

B 类不确定度合成公式为

$$U = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \dots + \mu_n^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n'} \rho_{ij'} \mu_i \mu_{j'}}, \quad (5)$$

式中: μ_i 分别为漫反射星上定标时刻光谱辐亮度物

理模型中各参数的不确定度; n' 表示对最终不确定度有贡献的参数个数;各参数间相关系数 $\rho_{ij'}$ 假定为 0,具体各项参数不确定度值如表 2 所示(UV 为紫外波段,VN 为可见近红外波段)。按照(5)式计算得到 SCS 定标时段漫反射板出射光谱辐亮度不确定度为紫外波段优于 2.13% ,可见近红外波段优于 1.94% 。

表 2 SCS 漫反射板光谱辐亮度量值不确定度分析

Table 2 Uncertainty analysis of SD spectral radiance of SCS

Source	Uncertainty / %
SD BRDF measurement	1.2(UV) 0.8(VN)
Transmittance distribution of SAC	0.54
SD radiance non-uniformity	0.4
SD cosine error of incidence	0.35
SD stability monitor	0.54
Degeneration of SD before launch	0.5
Solar spectral irradiance	1
Stray light and unknown factor	1
U	2.13(UV) 1.94(VN)

5 结 论

海洋 1C 定标光谱仪的星上定标方式是将机械式多孔太阳衰减屏作为入射能量衰减手段应用于光学遥感器的星上定标中。从几何成像光学角度分析了被衰减屏衰减后的太阳光照明的漫反射板出射辐亮度在光照角度不变的情况下到达焦平面的能量分布均匀性。在实验室用 1° 发散角太阳模拟器作为照明光源,模拟了星上太阳照明状态下的漫射板组件工作情况,通过比较地物光谱仪采集的各照明角度下漫射板出射能量与单项测试参数下计算的能量趋势随角度的变化规律,验证了太阳衰减屏-漫反射板星上绝对辐射定标物理模型的正确性。 1° 入射角变化范围内漫反射板出射辐亮度非均匀性优于 $0.47\% / (^\circ)$,满足 SCS 星上相对辐射定标对辐射源在其焦平面均匀性优于 99.5% 的要求,漫反射板可作为均匀目标对 SCS 像元间响应不一致性进行星上相对辐射校正。增加太阳衰减屏作为能量衰减的 SCS 漫射板组件星上漫射板出射光谱辐亮度不确定度优于 2.13% ,即太阳衰减屏引入的各项不确定度对星上辐射定标的影响甚微。

基于太阳漫反射板的星上定标方法依然是目前

遥感器星上定标成熟首选的定标方法之一,增加太阳衰减屏主要为了将漫射板出射辐亮度衰减至遥感器响应动态范围内,保证定标的相机参数与观测应用时使用的参数一致,从而确保定标精度。针对漫反射板前端增加衰减屏对入射能量进行衰减的星上定标形式,后续也将通过星上实际的测量数据进一步分析评价。太阳衰减屏自身为机械式多孔结构,受机械加工能力制约,衰减太阳光的能力有限。光通过率较大时,衰减屏多孔间距相应会变小,超过60%的光通过率需求就已较难实现。同时,在小于1%的小光通过率需求情况下,通光孔壁厚度与孔大小的矛盾也难以通过机械加工解决,且结构强度也很难保证。相对而言,基于散射的漫透射式星上定标方法在低辐亮度模式的定标中更有优势,可通过增加漫透射板厚度使光在通过材料过程中被散射的次数增多以达到衰减能量以及匀光的目的。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Xiong X J, Angal A, Sun J, et al. On-orbit performance of MODIS solar diffuser stability monitor[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083514.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Olij C, Schaarsberg J G, Werij H G C, et al. Spectralon diffuser calibration for MERIS [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3221: 63-74.
- [6] 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.
- [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] 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.
- [9] 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.
- [10] Xu H Y, Zhang L M, Si X L, et al. Design and performance evaluation of solar attenuation screen [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(3): 359-365.
许和鱼, 张黎明, 司孝龙, 等. 太阳衰减屏的设计及性能评估 [J]. 量子电子学报, 2018, 35(3): 359-365.
- [11] Wang W, Zhang L M, Huang W X, et al. Measurement method of solar attenuation screen characteristic for on-orbit calibration [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0928001.
汪伟, 张黎明, 黄文薪, 等. 星上定标衰减屏特性的测试方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0928001.
- [12] 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.
- [13] 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.