

## 星上定标器漫透射板外场标定技术研究

陈帅帅<sup>1,2,3</sup>, 钮新华<sup>1,2\*</sup>, 王阳<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;<sup>2</sup>中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在轨辐射定标是极轨气象卫星光谱成像仪定标的重要组成部分,是实现高量化遥感的重要技术手段。星上定标器以太阳作为长期稳定的参考光源,以定标器漫透射板作为基准传递媒介,漫透射板的标定精度直接决定了星上定标精度。根据风云三号E星轨道特点和光谱成像仪工作模式,星上定标器采用了漫透射板这一特殊形式。针对星上定标器的高精度性能测试技术开展研究,提出了一种基于标准光谱仪的外场漫透射板标定方法,以解决漫透射板双向透射分布函数(BTDF)所需的大口径、高亮度均匀测试光源以及高精度自动控制覆盖测试角度矩阵等标定难题。所提方法以外场太阳作为参考光源,标准光谱仪作溯源传递,秒级高精度自动跟踪转台作角度变换,获得漫透射板的BTDF。结果表明,该方法能获得准确的漫透射板BTDF,标定精度优于2.5%,满足星上定标器的在轨定标精度要求。仪器在轨测试阶段的星上定标系数与同类载荷交叉定标的偏差优于2%。

**关键词** 漫透射板; BTDF; 外场定标; 定标精度; 极轨气象卫星

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230701

## 1 前言

星上辐射定标作为光学载荷数据定量化的一环,是遥感数据应用的重要组成部分。目前在轨的光谱成像仪类载荷,如美国的中分辨率成像光谱仪(MODIS)、可见光红外成像辐射仪(VIIRS),日本的SGLI(second-generation global imager),欧洲的METOP(meteorological operational satellite)等,均配备了全口径全视场的星上定标器。针对极轨气象卫星,常见的星上定标主要以太阳作为高度稳定的参考光源,以漫反(透)射板作为辐射传递媒介,使用标准探测器等监视手段修正在轨定标系数。其中:美国AQUA卫星上的MODIS<sup>[1-2]</sup>和NPP(national polar-orbiting partnership)卫星上的VIIRS<sup>[3]</sup>采用了“漫反射板+漫反射板监视器”的星上定标方案;欧洲航天局ENVISAT(environmental satellite)平台上的MERIS(medium resolution imaging spectrometer)<sup>[4-5]</sup>则采用漫反射板组的定标方案,即利用多个漫反射板进行太阳光定标;俄罗斯“和平号”空间站(MIR)上的MOS(modular optoelectronic scanner)<sup>[6]</sup>则利用漫透射板完成星上辐射定标。

风云三号E星中分辨率光谱成像仪(以下简称中

分)在继承前两代中分星上定标技术的基础上,根据E星轨道的太阳入射情况,提出了基于“太阳-漫透射板和监视辐射计”的星上定标方式,可以对中分实现全光路、全视场、全口径的高精度在轨实时定标,有效提高遥感数据定量化精度。该定标方式利用太阳作为标准辐照度源照射漫透射板,形成标准辐亮度源,从而模拟地球目标,对成像仪器进行在轨辐亮度定标。漫透射板的朗伯性是形成标准辐亮度源的核心指标,因此,其双向透射分布函数(BTDF)的准确标定是实现高精度定标的关键因素和重要保障。

目前,在轨卫星普遍使用漫反射板,各国标准实验室均建立了漫反射板BRDF测试系统,其测量不确定度最高能达到1%,而漫透射板的使用相对较少,相关测试系统未见报道。本文针对大尺寸漫透射板中BTDF函数的高精度、大角度的标定需求,提出了一种基于太阳光源和标准光谱仪的外场BTDF标定方法,经验证,其测试精度优于2.5%。

## 2 星上定标方法

风云三号E星为极轨晨昏轨道卫星,星上的光谱成像仪采用扫描镜扫描成像方式依次观测冷空、地球、漫透射板和黑体目标,其中漫透射板作为太阳反射光

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-04-14; 录用日期: 2023-04-24; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504901)

通信作者: \*nxh@mail.sitp.ac.cn

谱波段的星上辐射基准,能够接收太阳的直射光形成近朗伯体光源。通过成像仪扫描镜以漫透射板法线方向观测漫透射板可以获得辐射输入,完成太阳反射波段的辐射定标工作。仪器在轨定标示意图如图 1 所示。

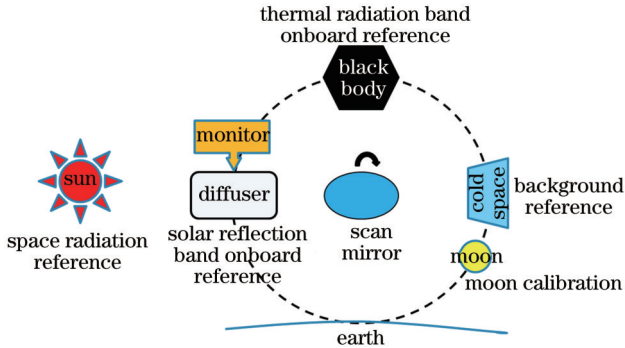


图 1 成像仪星上定标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the imager's on-star calibration

如图 2 所示,根据轨道特点,风云三号 E 星在轨运行时,太阳总是处于卫星的 -Y 侧,据此可以仿真获得太阳全年的入射角度分布。同时,考虑晨昏卫星轨道地方时对全年太阳光角度入射范围的影响,不同轨道地方时对应的全年太阳光入射范围分布如表 1 所示。

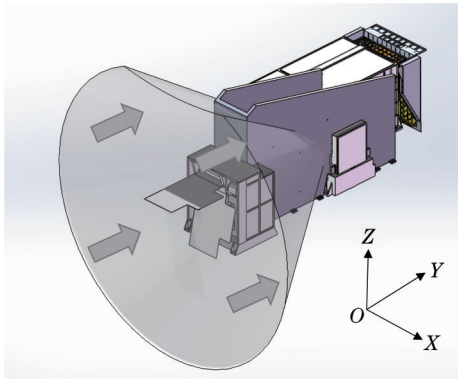


图 2 全年太阳光入射包络

Fig. 2 Incident envelope of sunlight throughout the year

表 1 轨道地方时与太阳入射角度的分布关系

Table 1 Distribution of the orbital local time and solar incidence angle

Local time	Angle with XOY plane	Angle with YOZ plane
05:00	28.4°~35.6°	±39.2°
05:15	28.4°~34.2°	±37.9°
05:30	28.4°~33.2°	±36.8°
05:45	28.4°~32.5°	±36.4°
06:00	28.4°~32.2°	±36.2°

根据整星布局及在轨定标流程,定标器漫透射板开口视场设计为:与卫星坐标系 YOZ 平面的夹角范围为 -8°~+8°,与 XOY 平面的夹角范围为 0°~36°,从

而满足成像仪全年全轨道的星上定标需求。图 3 为定标器在卫星坐标系下的光线入射示意图,其中,标出的坐标系为卫星坐标系。

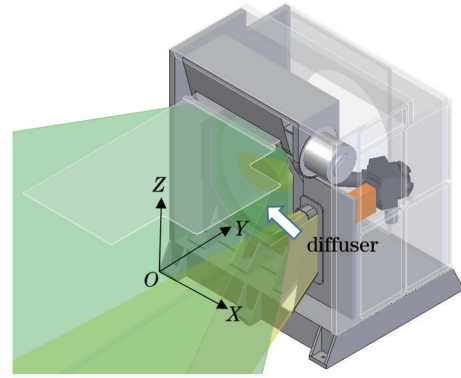


图 3 太阳光入射漫透射板示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a diffuse plate with sunlight incident

E 星中分漫透射板采用多孔石英材料,通过材料内部气孔对入射光进行匀化,形成漫透射光源,出射光具有良好的朗伯性。整个漫透射板尺寸达到 290 mm×308 mm×10 mm,能够充满成像仪  $\Phi=200$  mm 的光学口径。星上定标时,定标器挡板打开,漫透射板在稳定的太阳光照射下,形成充满成像仪口径和视场的近似朗伯面光源。由已知太阳入射漫透射板的几何参数所确定的漫透射板透射光谱辐亮度模型为

$$L_{SD}(\theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2; \lambda) = \frac{E_s(\lambda) \cos \theta_s}{R^2(t)} \times B_{BTDF}(\theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2; \lambda), \quad (1)$$

式中:  $L_{SD}(\theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2; \lambda)$  为定标时刻成像仪观测方向上的漫透射板透射光谱辐亮度;  $\theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2, \lambda$  分别为定标时刻漫透射板坐标系下的太阳入射天顶角、太阳方位角、成像仪观测天顶角、成像仪观测方位角和波长;  $E_s(\lambda)$  为大气外太阳光谱辐照度常数;  $R(t)$  为定标时刻的日地相对距离因子(随季节变化,约为 1);  $B_{BTDF}(\theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2; \lambda)$  为定标时刻的漫透射板 BTDF。

在获得了漫透射板辐亮度的基础上,可以对光谱成像仪进行辐射定标,得到星上定标系数(斜率,  $m_1$ )和地球目标的辐亮度  $L_{EV}$ :

$$m_1 = \frac{L_{SD}}{D_{SD} - D_{SV}}, \quad (2)$$

$$L_{EV} = m_1(D_{EV} - D_{SV}), \quad (3)$$

式中:  $D_{EV}$  为仪器观测地球的码值;  $D_{SV}$  为仪器观测冷空的码值;  $D_{SD}$  为仪器观测漫透射板的码值。

从上述辐射定标模型可以看出,E 星中分中二维宽角度入射、大光学口径漫透射板 BTDF 的精确测定是保证整个定标模型精度的关键。

### 3 外场 BTDF 标定方法

#### 3.1 外场 BTDF 标定原理

漫透射板 BTDF 定义为

$$B_{\text{BTDF}}(\theta_i, \phi_i; \theta_T, \phi_T; \lambda) = \frac{dL_T(\theta_i, \phi_i; \theta_T, \phi_T; \lambda)}{dE_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)}, \quad (4)$$

表示物体表面透射方向 $(\theta_T, \phi_T)$ 小立体角 $d\omega$ 内的透射辐射亮度增量 $dL_T(\theta_i, \phi_i; \theta_T, \phi_T; \lambda)$ 与入射方向 $(\theta_i, \phi_i)$ 小立体角 $d\omega_i$ 内入射辐照度增量 $dE_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)$ 的比值。

为了获得随入射角变化的漫透射板的 BTDF, 采用基于外场太阳光源, 溯源至标准光谱仪的标定方案。利用与在轨标光源一致的太阳光源能够有效减少光源本身对测试的影响。以标准光谱仪作为标准源获取漫透射板的输出辐亮度, 用于计算漫透射板的绝对 BTDF 数据, 能够保证有效的在轨辐射定标精度。但是由于外场测试条件的限制, 测试过程中的大气稳定性、大气吸收以及周围环境光会对部分波段的测试结果造成影响。

整个标定测试项目包括 BTDF 光谱维分布和角度维分布两个方面:

1) 光谱维分布测试。当太阳正入射(法线方向, 天顶角为 0)时, 利用一天不同时间下大气质量  $m$  的改变, 获得不同的  $\ln(L)$ , 进行线性拟合得到斜率和截距, 即光学厚度  $\tau$  和  $\ln(E_{\text{sun}} \cos \theta B_{\text{BTDF}})$ 。由于太阳常数已知, 可以得到漫透射板入射天顶角为 0 时的 BTDF 光谱分布数据。太阳正入射漫透射板后, 标准光谱仪获得的漫透射板出射辐亮度数学模型为

$$E_{\text{sun}} e^{-m\tau} B_{\text{BTDF}} = L, \quad (5)$$

$$\ln(E_{\text{sun}} B_{\text{BTDF}}) - m\tau = \ln(L), \quad (6)$$

式中:  $E_{\text{sun}}$  为太阳常数;  $\tau$  为大气垂直光学厚度;  $m$  为大气质量;  $L$  为漫透射板出射辐亮度。

2) 角度维分布测试。在正午太阳高度角缓慢变化的时间段内, 通过改变定标器的俯仰角和水平角, 使得太阳光线的入射天顶角  $\theta$  发生改变, 从而获得不同太阳入射角下的漫透射板 BTDF 相对分布。其公式为

$$rB_{\text{BTDF}}(\theta, \varphi; \lambda) = \frac{L(\theta, \varphi, \lambda)}{L(0, 90, \lambda) \cos \theta}, \quad (7)$$

式中:  $rB_{\text{BTDF}}(\theta, \varphi; \lambda)$  是波长  $\lambda$  处漫透射板入射天顶角及方位角下的 BTDF 角度分布;  $L(\theta, \varphi; \lambda)$  是波长  $\lambda$  处漫透射板入射天顶角及方位角的辐亮度;  $L(0, 90; \lambda)$  是漫透射板入射天顶角为 0、方位角为  $90^\circ$  的辐亮度。

将两者数据相结合, 能够获得漫透射板在不同入射天顶角、方位角下的 BTDF(光谱维、角度维)。表示为

$$B_{\text{BTDF, SD}}(\theta, \varphi; \lambda) = B_{\text{BTDF, SD}}(0, 90; \lambda) \cdot rB_{\text{BTDF, SD}}(\theta, \varphi; \lambda), \quad (8)$$

式中:  $B_{\text{BTDF, SD}}$  是来自光谱成像仪方向上的太阳漫透

射板 BTDF;  $B_{\text{BTDF, SD}}(0, 90; \lambda)$  是漫透射板入射天顶角为 0、方位角为  $90^\circ$  的 BTDF 光谱分布。

#### 3.2 外场标定测试系统

根据外场 BTDF 标定原理, 获取漫透射板高精度 BTDF(光谱维、角度维)的关键因素为: 1) 稳定的入射太阳光源; 2) 高稳定度、高精度的太阳自动跟踪; 3) 辐射定标基准传递方法。

接下来详细介绍外场 BTDF 标定测试系统。

##### 3.2.1 系统构成

如图 4 所示, 整个标定系统包括二维跟踪转台和标准光谱仪, 跟踪转台跟踪精度优于 1 s, 能够补偿地球自转, 实现对太阳的长时间序列自动跟踪; 标准光谱仪以成像仪观测方向对漫透射板进行观测, 获得漫透射板的辐亮度输出, 并提供辐射定标基准。

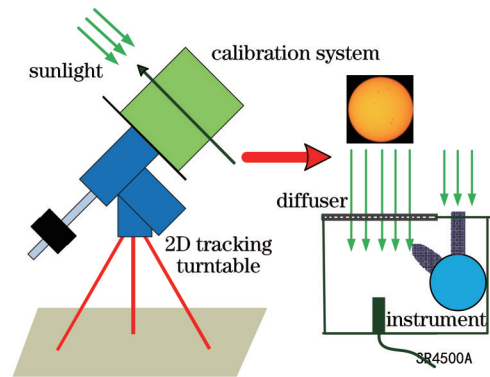


图 4 外场定标器太阳观测系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the outfield scaler solar observation system

外场定标实验需要稳定的太阳辐射作为光源, 为此必须选择合适的地点。为了保证观测数据的质量, 选择海拔高、大气干洁且变化不剧烈的地点作为实验区域较为适宜。本实验选择以云南丽江为观测地点, 其地理坐标为北纬  $26^\circ 45' 40''$ , 东经  $100^\circ 02' 33''$ , 海拔为 3175 m, 晴空日数多, 温度适宜。实验区域海拔位置较高, 距离市区较远, 周围是大片的森林, 几乎不受地面杂散光的影响, 非常适合地基外场实验的开展。

##### 3.2.2 数据获取工作原理

在天气条件满足要求的情况下进行外场实验, 星上定标器外场测试步骤如下:

1) 二维转台连续跟踪和指向太阳, 在间隔时间内获取实验所需要的原始数据, 包括定标器标准探测器、光谱仪及太阳矢量等数据。

2) 通过二维转台系统, 在太阳到达中天附近时, 改变入射到漫透射板上的太阳矢量方向(赤经, 赤纬), 保存实验所需要的原始角度和辐亮度数据。实验应尽可能缩短时间, 以减小太阳移动的影响。

3) 获取大气透过率, 以计算所需要的原始数据, 包括 CE318 太阳光度计数据。

4) 通过挡光板来获得环境背景光, 保证挡光板以



最有效的角度挡住太阳直射光,而且尽量远离漫透射板。采集挡光数据时,挡光前后挡光板的位置以及人员位置尽量保持不变,以避免背景光的改变给辐射定标结果带来影响。

3.2.3 基准传递及误差分析

从外场标定公式[式(6)]可以看出,漫透射板的标溯源主要包括标准光谱仪和标准太阳光谱。

1) 太阳定标光源

国际上研究者对太阳辐照的探测已持续多年,探测到的数据也在不断地被比较,目前应用比较多的是法国科学家 Thuillier 等<sup>[7]</sup>在 2002 年发布的通过 ATLAS (Atmospheric Laboratory for Applications and Science) 计划和 ERUECA (European Retrieval Carrier) 计划取得的数据,一般称为 Thuillier2002,其光谱数据如图 5 所示。数据不确定度一般能达到每年 1%~2%。

2) 标准辐射计

太阳漫透射板的辐亮度采用光谱辐射亮度响应度已知的光谱辐射计 SR4500A 光谱仪直接测量获得。SPECTRAL EVOLUTION 公司(美国)的 SR 系列地物光谱仪(SR4500A)可以实时测量反射、透射、辐射和辐照度光谱曲线。仪器全部使用固定全息光栅和全

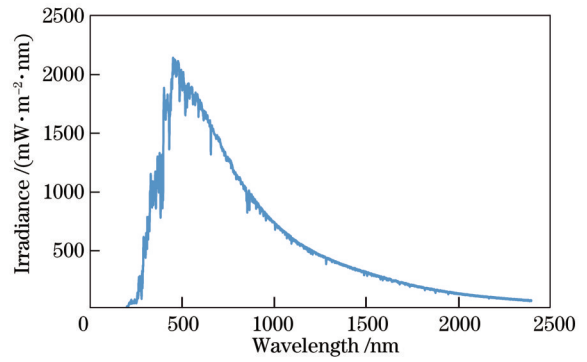


图 5 太阳辐射光谱(Thuillier2002)  
Fig. 5 Solar irradiance spectra (Thuillier2002)

制冷型线阵列光学探测器,它们具有高灵敏度和高分辨率的特性,避免了因使用内置分叉光纤、窄狭缝和运动光栅造成的仪器定标失效。通过中国计量科学研究院传递的光谱辐射照度灯和漫反射标准板组成的标准灯,即漫反射板定标系统实现定标。溯源不确定度如表 2 所示,其中,  $k$  为统计学标准差取的倍乘因子,  $k=2$  即在正态分布的分布中心左右各 2 个标准偏差 ( $\pm 2\sigma$  的区间范围内)所分布的数据点占整个统计样本组的 95.45%,表示测量结果有 95.45% 的置信度。

表 2 标准光谱仪溯源不确定度

Table 2 Traceability uncertainty of the standard spectrometer

Wavelength /nm	Uncertainty /% ( $k=2$ )	Wavelength /nm	Uncertainty /% ( $k=2$ )	Wavelength /nm	Uncertainty /% ( $k=2$ )
420	1.6	1100	1.9	1780	2.2
460	1.6	1140	1.9	1820	2.8
500	1.5	1180	1.9	1860	2.8
540	1.5	1220	1.9	1900	2.8
580	1.5	1260	1.9	1940	2.8
620	1.5	1300	1.9	1980	2.4
660	1.5	1340	2.5	2020	2.4
700	1.5	1380	2.5	2060	2.4
740	1.5	1420	2.5	2100	2.5
780	1.5	1460	2.0	2140	2.5
820	1.5	1500	2.0	2180	2.6
860	1.5	1540	2.1	2220	2.7
900	1.6	1580	2.1	2260	2.8
940	1.6	1620	2.1	2300	2.8
980	2.2	1660	2.1	2340	2.8
1020	1.8	1700	2.1	2380	2.9
1060	1.8	1740	2.2	2420	3.3

3) 标定精度分析

根据标定方法,BTDF 的标定误差为

$$\frac{dB_{BTDF}}{B_{BTDF}} = \sqrt{\left(\frac{dL}{L}\right)^2 + (\tan\theta d\theta)^2 + \left(\frac{dE}{E}\right)^2 + (mda)^2 + (adm)^2}, \quad (9)$$

式中:误差项包括标准光谱仪误差  $dL/L=1.6\%$ ;变角系统角度误差  $\tan \theta d\theta \leq 0.1\%$ ;测试当天的太阳辐照度波动误差  $dE/E=0.25\%$ ;大气垂直透过率拟合误差  $mda=1.4\%$ ;大气质量在测试中的变化误差  $adm \leq 0.32\%$ 。由此 BTDF 综合测试误差为  $2.17\%$ 。

## 4 外场标定及结果分析

在地球南北极处利用仪器进行星上定标,太阳光线入射角范围为  $0 \sim 36^\circ$ ,对应的方位范围在  $-10^\circ \sim 10^\circ$  之间。因此,星上定标器外场测试具体内容如下:

### 1) 光谱分布测试

利用定标器太阳外场观测系统,在太阳升起到落下期间,连续跟踪太阳,此时保持漫透射板法线方向指向太阳。SR4500A 光谱仪沿着漫透射板法线方向观测来自漫透射板的太阳漫透射光,每间隔一段时间采集数据(不同大气质量数),由此获得漫透射板法线处入射 BTDF 的光谱分布。

### 2) 角度分布测试

当观测时刻为太阳在天顶附近时,利用二维转台改变太阳入射到漫透射板上的入射矢量,其数据角度范围及采集点为:①当赤纬为中天对应角度时,相对中天的赤经角度,二维转台在赤经方向从  $-10^\circ$  到  $+10^\circ$  变化,采集间隔为  $4^\circ$ ,共采集 5 个点;②当赤经为中天对应角度时,相对中天的赤纬角度,二维转台在赤纬方向从  $0$  到  $40^\circ$  变化,采集间隔为  $5^\circ$ ,共采集 9 个点。由此,可以获得不同太阳入射角下漫透射板的相对 BTDF 角度分布。

### 4.1 漫透射板 BTDF 光谱分布

利用一天中太阳入射角为  $0$ ,不同大气质量的漫透射板辐亮度数据,根据式(6)可以得到实验当天的大气透过率以及漫透射板入射角为  $0$  的 BTDF 光谱分布。

图 6 展示了不同波段下  $\ln(L)$  和大气质量  $m$  之间的线性关系,可以看到,测试当天的大气透过率稳定,两者之间具有良好的线性,各线性曲线的斜率也表征了不同波段大气透过率的不同。图 7 是由图 6 中的线性曲线计算得到的大气透过率随波长的变化,反映了

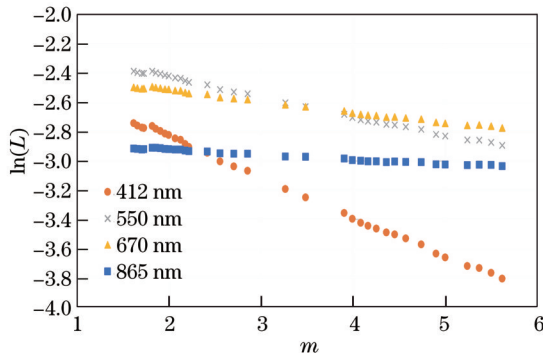


图 6 漫透射板出射辐亮度与大气质量的关系

Fig. 6 Diffuse plate radiant brightness varies with air quality

大气对不同波段的吸收情况。图 8 是由图 6 中的线性曲线计算得到的漫透射板 BTDF 光谱分布,反映了太阳天顶角为  $0$  时的不同波段漫透射板 BTDF。

从上述测试数据可以看出:实验当天大气透过率高且稳定,具有较高的线性度;漫透射板在  $400 \sim 1000$  nm 波长范围内的光谱透过率平坦(除  $760$ 、 $940$  nm 等大气吸收峰),透过率量值符合设计预期,能够满足星上定标设计要求。

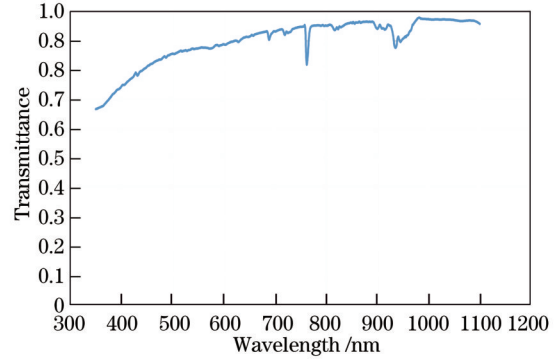


图 7 漫透射板出射辐亮度获得的大气垂直光学厚度

Fig. 7 Atmospheric vertical optical depth obtained from diffuse plate exit radiance brightness

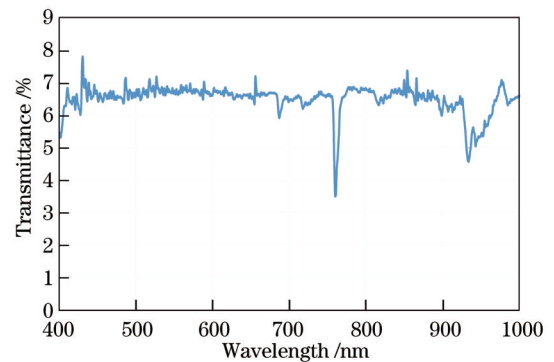


图 8 漫透射板 BTDF 光谱分布

Fig. 8 BTDF spectral distribution of diffuse plate

### 4.2 漫透射板 BTDF 角度分布

利用正午时刻太阳入射角变化缓慢的特点,根据式(7)通过高精度二维平台获得漫透射板在不同太阳入射角下的辐射输出,并对  $0$  入射角作归一化处理,得到漫透射板二维的角度入射分布。图 9 反映了漫透射板 BTDF 随太阳入射俯仰角的分布情况;图 10 反映了漫透射板 BTDF 随太阳入射水平角的分布情况;图 11 反映了漫透射板 BTDF 随太阳入射角二维的分布情况。从图 9~11 中可以看出,在仪器俯仰方向和水平方向上,漫透射板的 BTDF 随角度变化不明显,均接近  $1$ ,这表明了漫透射板具有较好的郎伯性。

### 4.3 在轨应用及效果

根据星上定标模型,星上定标主要误差来源包括以下 5 个方面:1)星上标准源。太阳辐照度误差。2)地面标准源。标准灯、标准光谱仪的计量误差。3)标准传

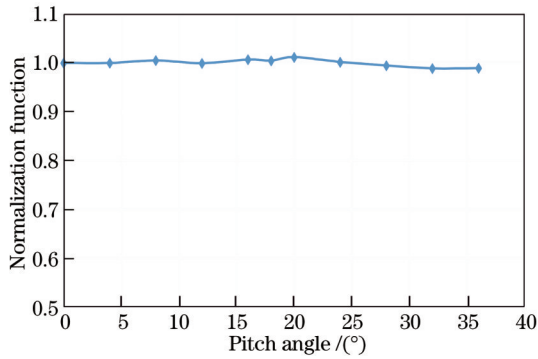


图 9 漫透射板随太阳入射俯仰角的 BTDF  
Fig. 9 BTDF of diffuse plate with solar pitch angle

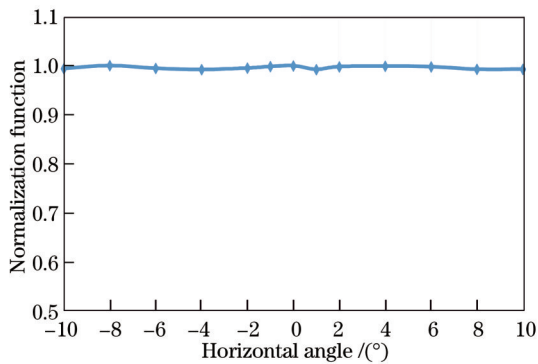


图 10 漫透射板随太阳入射水平角的 BTDF  
Fig. 10 BTDF of diffuse plate with solar horizontal angle

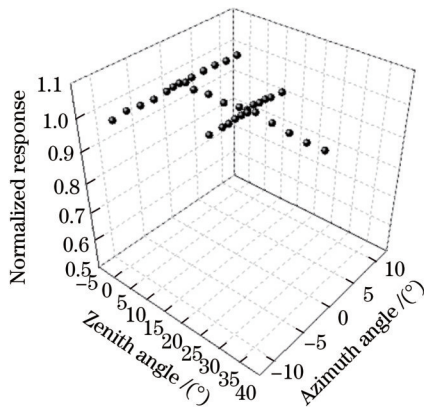


图 11 漫透射板随太阳入射角的二维 BTDF  
Fig. 11 2D BTDF of diffuse plate with solar incident angle

递系统。灯板传递系统的传递误差。4)定标器系统响应。标准探测器稳定性误差。5)星上定标杂散光。

由以上误差来源可以对星上定标精度进行估计,结果如表 3 所示。

从目前开展的在轨测试结果来看,利用星上定标器获取的成像仪定标系数与成像仪和国际载荷交叉定标所获得的定标系数相比,整体偏差优于 2%,表明星上定标器的在轨应用达到了设计预期。

表 3 星上定标误差来源

Table 3 Error sources of onboard calibration

Error source	Deviation / %
Solar irradiance error	0.25
Solar vector angular error	0.25
Diffuse plate BTDF calibration error	2.17
Diffuse plate non-homogeneity error	2.00
Stray light error	2.00
Specific radiometer correction factor error	1.30
Comprehensive error	3.81

## 5 结 论

针对极轨晨昏轨道“太阳+漫透射板+监测辐射计”的星上定标器漫透射板 BTDF 测试需求,提出了一种基于标准光谱仪的漫透射板外场辐射定标方案。以外场太阳源为参考光源,测试地点选取高海拔、高纬度的大气透过率稳定地区,通过合理设计测试流程及时段选取,获得了漫透射板 BTDF 的光谱分布和角度分布。从测试结果来看,E 星中分漫透射板在实际使用角度范围内具有良好的朗伯特特性,光谱透过率平坦;从在轨测试结果来看,星上定标系数与同类载荷交叉定标的偏差优于 2%,标定数据能够满足成像仪在轨定标的使用需求。综上所述,经在轨验证,该方法是准确有效的,可为同类定标漫透射板的地面测试及标定提供一种可借鉴的技术手段,并可为星载成像仪的高量化探测及应用提供保障。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Xiong X X, Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(1): 69-79.
- [3] Xiong X X, Fulbright J, Wang Z, et al. Assessment of MODIS and VIIRS solar diffuser on-orbit degradation[C/OL]//Spie Optical Engineering+Applications International Society for Optics and Photonics, 2015[2023-03-24]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3888479>.
- [4] Delwart S, Bourg L. Radiometric calibration of MERIS[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8176: 817613.
- [5] Baudin G, Matthews S, Bessudo R, et al. Medium-resolution imaging spectrometer (MERIS) calibration sequence[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2819: 141-150.
- [6] Zimmermann G, Neumann A, Suemnich K H, et al. MOS/PRIRODA: an imaging VIS/NIR spectrometer for ocean remote sensing[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1937: 201-206.
- [7] Thuillier G, Hersé M, Labs D, et al. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC spectrometer from the atlas and Eureka missions[J]. Solar Physics, 2003, 214: 1-22.

# Outfield Calibration Technique for Diffuse Transmission Plate of Onboard Calibrator

Chen Shuaishuai<sup>1,2,3</sup>, Niu Xinhua<sup>1,2\*</sup>, Wang Yang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Infrared Detecting & Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

## Abstract

**Objective** On-orbit radiation calibration is part of spectral imager calibration of polar-orbiting meteorological satellites, and also an important technical means to achieve highly quantitative remote sensing data. Onboard calibrators take the sun as a long-term stable reference light source and the diffuse transmission plate of the calibrators as the reference transmission medium, the calibration accuracy of which directly determines the onboard calibration accuracy. According to the orbital characteristics of the Fengyun-3E satellite and the working mode of the spectral imager, the onboard calibrator adopts the special form of diffuse transmission plate. Meanwhile, we study the high-precision performance testing technology of the calibrator and propose an outfield calibration method for diffuse transmission plate based on a standard spectrometer. We solve the calibration problems such as large-aperture and high-brightness uniform test light source and high-precision automatic control overlay of test angle matrix in the bidirectional transmittance distribution function (BTDF) of diffuse transmission plates.

Fengyun-3E satellite is in the morning and dusk polar orbit, and its spectral imager employs scanning mirror to observe cold space, earth, diffuse transmission plate, and black body in turn. As an onboard radiation reference in the solar reflection spectral band, the diffuse transmission plate can receive direct light from the sun to form a near-Lambertian light source. The imager scanning mirror observes the diffuse plate in the normal direction to obtain radiation input and complete the radiation calibration of the solar reflection band. The imager calibration in orbit is shown in Fig. 1.

**Methods** The whole calibration test project includes two aspects of diffuse plate BTDF, spectral dimension distribution and angular dimension distribution. 1) Spectral dimension distribution test: under the perpendicular incidence of the sun (normal direction, zenith angle is 0), different radial brightness is obtained by the changing atmospheric quality at different times of the day for BTDF spectral distribution data of 0 incident zenith angle of the diffuse plate. When the sun shines on the diffuse plate, the standard spectrometer obtains a mathematical model of the diffuse plate outgoing radiation brightness, as shown in Equation 5. 2) Angular dimension distribution test: during the period of slow changes in the sun zenith angle at noon, the incidence angle  $\theta$  of the solar rays changes by adjusting the pitch angle and horizontal angle of the scaler to obtain the relative distribution of the diffuse plate BTDF under different solar incidence angle  $\theta$ , as shown in Equation 6.

**Results and Discussions** The test data of Figs. 6–8 show that the atmospheric transmittance on the test day is high and stable, with high linearity of the fitting curve. The spectral transmittance of the diffuse transmission plate in the range of 400–1000 nm is flat (except for atmospheric absorption peaks such as 760 nm and 940 nm), and the transmittance value can meet the design expectations and on-star calibration design. Figs. 9–11 demonstrate that in the pitch direction and horizontal direction, the BTDF does not change significantly with the angle and is close to 1, indicating that the diffuse transmission plate has better Lambertian properties. According to the results of the current on-orbit test, the overall deviation between the calibration coefficient obtained by the onboard scaler and the cross-calibration coefficient of the imager from the international load is better than 2%, revealing that the on-orbit application of the scaler has reached the design expectations.

**Conclusions** We propose an outfield radiation calibration method of diffuse transmission plate based on standard spectrometer. The test site is selected in the stable atmospheric transmittance area at high altitude and high latitude. The spectral distribution and angle distribution of the diffuse plate BTDF are obtained through the reasonable design of the test process and time period selection. The method adopts the outfield sun as the reference light source, the standard spectrometer for traceability transmission, and the 2D high-precision automatic tracking turntable for angle transformation to obtain the BTDF of the diffuse transmission plate. The results show that this method can obtain an accurate BTDF of the diffuse transmission plate, and the calibration accuracy is better than 2.5%, which can meet the on-orbit calibration accuracy requirements of the on-orbit calibrator. The consistency of the onboard calibration coefficient of the instrument in the orbit test stage with the cross-calibration of similar loads is better than 2%.

**Key words** diffuse transmission plate; BTDF; outfield calibration; calibration accuracy; polar-orbiting meteorological satellites