

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.01.008

比值辐射计辐射响应特性

邹鹏, 李从飞, 李孟凡, 路美娜, 孙真, 李朕阳, 洪津, 司孝龙, 裘祯炜
(中国科学院安徽光学精密机械研究所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: 比辐射星上定标器以太阳照射的漫反射板为参考光源, 通过比值辐射计对漫反射板在轨衰变进行修正, 实现光学遥感的绝对辐射定标及长期稳定性监测。比值辐射计辐射响应特性是影响在轨定标精度的主要因素之一。对比值辐射计辐射响应特性进行了评估, 获取了绝对响应度, 并测量了响应非线性、非稳定性。结果表明绝对辐射响应度定标合成不确定度优于 2.88%, 非线性优于 0.93%, 非稳定性优于 0.52%, 满足在轨定标应用需求。

关键词: 光学遥感; 星上定标; 比值辐射计; 辐射响应特性

中图分类号: O432; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6141(2019)01-0074-07

Radiation Response Characteristics of the Ratioing Radiometer

ZOU Peng, LI Congfei, LI Mengfan, LU Meina, SUN Zhen, LI Zhenyang,
HONG Jin, SI Xiaolong, QIU Zhenwei

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

Abstract: The absolute radiation calibration and long-term stability monitoring of the optical remote sensor can be realized by the ratioing radiation on-board calibrator, in which the diffuser illuminated by the sun is used as the reference light source, and the on-orbit degradation of the solar diffuser is corrected by the ratioing radiometer(RRM). The radiation response characteristics of the RRM is one of the main factors affecting the accuracy of the on-orbit calibration. The radiation response characteristics of the RRM is evaluated. The absolute responsivity is obtained, and the response nonlinearity and response instability are measured. The results show that the uncertainty of absolute response calibration is better than 2.88%, the nonlinearity is better than 0.93%, and the instability is better than 0.52%, which satisfies the requirements of on-orbit calibration applications.

Key words: optical remote sensing; on-board calibration; ratioing radiometer; radiation response characteristics

1 引言

遥感器发射前的实验室定标、外场定标, 发射后的在轨定标是实现遥感信息定量化的主要手段^[1]。星上定标作为在轨定标的一种, 可以在空间平台上实现对遥感器的标准传递和稳定性监测, 有效保证遥感数据的真实性和可靠性^[2]。

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 41405037)

作者简介: 邹鹏(1983-), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 副研究员, 主要从事光电探测与信号处理方面的研究。

E-mail: pzou@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-10-22; **修改日期:** 2018-12-06

太阳光谱分布是一个常量且与地物目标的光谱分布近似, 是一种理想的定标基准光源。聚四氟乙烯制作的漫射板具有高反射率、良好的朗伯性以及面均匀性等特点, 被作为漫反射参照标准广泛应用于遥感领域。“太阳 + 漫反射板”的星上定标方案可以实现遥感器全视场、全孔径以及全动态范围的绝对辐射定标以及稳定性监测, 具有广阔的发展前景^[3-4]。然而由于有机物污染、空间辐照及原子氧剥蚀等因素的影响, 漫反射板光谱反射特性会发生衰变, 进而影响星上定标精度^[5]。20 世纪 90 年代, Palmer 等提出了基于比值方式的漫反射板稳定性监视方案^[6], 即采用光路切换的方式轮流观测太阳光和被其照射的漫反射板, 通过两者的比值监测漫反射板反射特性的变化, 实时修正漫反射板输出辐亮度量值, 完成遥感器高精度在轨定标。美国的中分辨率成像光谱仪 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)^[7] 和可见红外成像辐射仪 (Visible infrared imaging radiometer, VIIRS)^[8] 等载荷均采用此种星上定标方案。我国自行研制的基于“太阳 + 漫反射板 + 比值辐射计”的星上定标装置已搭载于高分五号卫星发射升空, 发射前在实验室内完成了充分的性能测试^[9-10], 其在轨应用性能待后续评估。

比值辐射计能够对漫射板衰减进行长期、高精度监测的关键在于其通过比对测量的方式将绝对测量转化为等量辐射比测量, 大大降低了探测器辐射测量精度对稳定性监测结果的影响。但其辐射特性仍需要准确评估, 原因在于: 为实现遥感器在轨定标, 需保证定标器动态范围与遥感器动态范围相匹配, 避免出现信号值过高使观测响应信号出现饱和, 或者信号值过低造成信噪比差、辐射比测量精度低的情况, 因此需要对比值辐射计进行绝对辐射响应度定标来验证其动态范围。此外, 为保证地面测试以及在轨定标过程中的参数测量精度, 比值辐射计需要具有良好的响应非线性以及非稳定性。本文详细介绍了比值辐射计辐射响应特性的评估方法, 并对其测试结果进行了分析。

2 比辐射定标器原理及构成

2.1 比辐射定标器工作原理

比辐射星上定标器通过太阳照射反射率已知的漫反射板 (Solar diffuser, SD), 建立星上定标辐亮度基准, 比值辐射计对漫射板反射特性进行在轨监测和修正, 从而实现遥感器在轨定标及稳定性监测。定标原理如图 1 所示。

比值辐射计共有两个观测口, 分别用于太阳以及漫反射板的观测, 内部以小型积分球实现两观测模式的匀光, 以辐亮度探测器实现多个通道 (中心波长 450, 680, 940, 1610 nm) 的辐射探测。

根据比辐射定标器的定标原理, 太阳照明漫射板产生的辐射亮度 L 为

$$L = \cos \theta_{SD,t} E_{sun,t} \rho_{lab,t_0} \Delta_{SD}, \quad (1)$$

式中 t 为定标时刻; t_0 为卫星入轨后首次定标时刻; $E_{sun,t}$ 为大气外太阳辐照度; ρ_{lab,t_0} 为发射前实验室测量得到的漫射板 BRDF^[11-12]; Δ_{SD} 为漫射板 BRDF 衰变因子

$$\Delta_{SD} = \frac{h}{h^0} = \left\langle \frac{d_{RR-dif}}{d_{RR-sun}} \right\rangle / \left\langle \frac{d_{RR-dif}^0}{d_{RR-sun}^0} \right\rangle, \quad (2)$$

式中 h 、 h^0 分别为在轨定标及初始表征时的辐射比; d_{RR-dif} 、 d_{RR-dif}^0 分别为在轨定标时和初始表征时

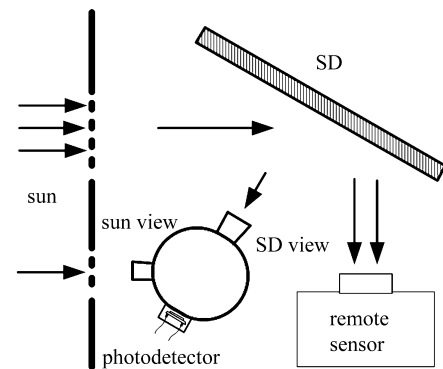


图 1 比辐射定标器原理图

Fig.1 Principle of on-board calibrator

比值辐射计对漫反射板的观测值; d_{RR-sun} 、 d_{RR-sun}^0 分别为在轨定标时和初始表征时比值辐射计对太阳照度的观测值; d_{RR-dif} 可表征为

$$d_{RR-dif} = (E_0/\pi)\rho_{RR-SD}S_{dif}\Omega_{dif}R_D, \quad (3)$$

式中 E_0 为入射至定标器的太阳辐照度; ρ_{RR-SD} 为比值辐射计观测角度下漫反射板反射比因子; S_{dif} 为比值辐射计漫反射板观测孔面积; Ω_{dif} 为比值辐射计漫反射板观测立体角; R_D 为比值辐射计探测器光谱响应度。

d_{RR-sun} 可以表征为

$$d_{RR-sun} = E_0S_{sun}\cos\beta R_D, \quad (4)$$

式中 S_{sun} 为比值辐射计太阳观测孔面积; β 为太阳观测孔太阳入射角度; R_D 为比值辐射计探测器光谱响应度。

将式 (3)、式 (4) 代入式 (2) 得到

$$\Delta_{SD} = \frac{(E_0/\pi)\rho_{RR-SD}S_{dif}\Omega_{dif}R_D}{E_0S_{sun}\cos\beta h^0 R_D} = \frac{\rho_{RR-SD}S_{dif}\Omega_{dif}}{\pi S_{sun}\cos\beta h^0}, \quad (5)$$

式中 h^0 为固定值; $\cos\beta$ 在已知太阳入射角度的情况下, 可以计算获得; 在比值辐射计漫反射板观测孔和太阳观测孔机械尺寸稳定的前提下, Δ_{SD} 反映的是漫反射板反射率的变化。

根据式 (5), 在执行定标动作的短时间内探测器响应稳定的前提下 R_D 即可比掉, 即比值辐射计探测器的绝对光谱响应度对定标结果不会产生影响。但是执行在轨定标操作过程中, 太阳观测及漫反射板观测为分时执行, 探测器响应度由于其稳定性影响不可避免地存在微小变化, 为此需要评估比值辐射计辐射响应的稳定性。此外, 由于测试条件的限制, 比值辐射计主要参数均在实验室内少数能级下测试获得, 为保证比值辐射计测量参数具有代表性, 需要对其非线性进行评估。根据比值辐射计在轨定标精度需求, 比值辐射计非线性需优于 1%, 非稳定性优于 0.6%。

2.2 比值辐射计光辐射测量原理及构成

比值辐射计光辐射测量原理如图 2 所示。光电探测器选用日本滨松 (HAMAMATSU) 公司的 Si 光电二极管以及 InGaAs 光电二极管。其中 Si 光电二极管覆盖 450, 680, 940 nm 波段, InGaAs 光电二极管覆盖 1610 nm 波段。比值辐射计光电流信号为 nA 量级, 探测器前放选取了具有极低偏置电流的 FET 型放大器。此外, 前放电路设计重点考虑低噪声、高稳定性以及在工作区间的响应线性。选用 16 位模数转换器辅以模拟开关完成模拟信号的采集及量化。主控由反熔丝型 FPGA 完成, 实现三线串行通讯、电磁阀开关控制等功能。

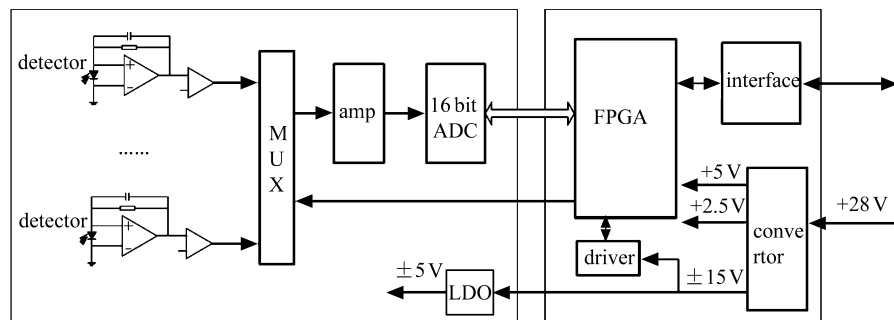


图 2 比值辐射计光电测量组成框图

Fig.2 Photoelectric measurement block diagram of ratioing radiometer

3 比值辐射计辐射特性评估

比值辐射计的辐射响应特性测试包括绝对辐亮度定标、响应非线性以及非稳定性测试, 均使用经过预定的多能级的积分球光源完成, 同时配置参考辐亮度计对积分球稳定性进行同步监测。测试原理如图 3 所示。

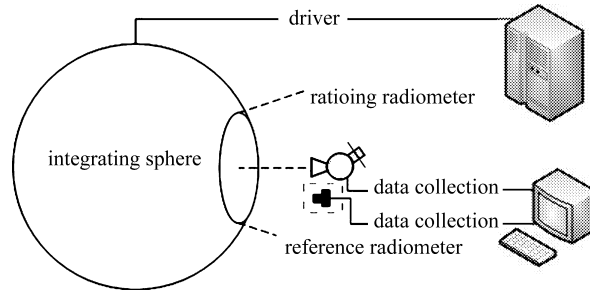


图 3 辐射特性测试示意图

Fig.3 Schematic of radiation characteristic test

3.1 响应度

星上定标时漫射板各通道等效光谱辐亮度 $L_{i,obcdif}$ 为

$$L_{i,obcdif} = \frac{\rho \cos \theta_{\text{sun-dif}} \int E_{\text{sun}}(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda}{\pi \int R_i(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

测试过程中积分球各通道不同灯数对应的等效光谱辐亮度值 $L_{i,lamp}$ 为

$$L_{i,lamp} = \frac{\int L_{\text{lamp}}(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda}{\int R_i(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

进行在轨漫射板观测响应 $V_{i,obcdif}$ 的估算为

$$V_{i,obcdif} = \frac{V_{i,lamp}}{L_{i,lamp}} L_{i,obcdif}, \quad (8)$$

式中 i 为通道号; ρ 为漫射板反射率, 取 0.95; 相对光谱响应函数 $R_i(\lambda) = \tau_i(\lambda) R_{D_i}(\lambda)$, 即滤光片透过率与探测器光谱响应函数的乘积; $\theta_{\text{sun-dif}}$ 为星上定标时太阳照明漫射板的天顶角; $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 为大气外太阳光谱辐照度; $R_i(\lambda)$ 为比值辐射计的相对光谱响应函数; $L_{\text{lamp}}(\lambda)$ 为积分球各级光谱辐亮度定标值; $V_{i,lamp}$ 为比值辐射计各通道响应输出。根据比值辐射计观测几何条件, 在 $62.95^\circ \sim 75.93^\circ$ 天顶角范围内, 比值辐射计响应输出处于有效量程内, 其动态范围可与待定标传感器相匹配。

根据定标系数以及大气层外太阳光谱辐照度数据, 可以推算星上定标时的漫射板辐亮度 (太阳照明漫射板的天顶角范围 $62.95^\circ \sim 75.93^\circ$), 结合式 (8) 可以获取星上定标比值辐射计观测漫射板的各通道响应输出数据, 结果如表 1 所示。可知, 在轨漫反射板辐亮度条件下, 比值辐射计输出电压介于 2.06~4.12 V 之间, 处于比值辐射计数据采集电路有效量程范围内 (0~5 V)。

3.2 非线性

非线性用于表征不同辐亮度量级下比值辐射计响应输出的相对变化。测试过程中将比值辐射计漫反射板观测口正对积分球辐射源, 积分球出射面充满漫反射板观测口视场, 调节积分球的输出辐亮度能级, 参考辐亮度计用于监测积分球的输出变化, 表示积分球不同的辐亮度等级。比值辐射计非线性误差为

表 1 比值辐射计在轨输出信号估算

Table 1 Estimation of the on-orbit output signal of the ratio radiometer

Parameter	Center wavelength(nm)			
	450	680	940	1610
Equivalent spectral radiance at 62.95° zenith angle[W/(m ² ·nm·sr)]	0.269	0.214	0.124	0.0337
Equivalent spectral radiance at 75.93° zenith angle[W/(m ² ·nm·sr)]	0.144	0.114	0.0665	0.0180
Equivalent spectral radiance under measured conditions[W/(m ² ·nm·sr)]	0.215	0.176	0.130	0.0331
Expected output of RRM at 62.95° zenith angle(V)	4.12	3.94	4.02	3.86
Expected output of RRM at 75.93° zenith angle(V)	2.20	2.10	2.15	2.06

$$u_L = \left(\frac{V_{1/4}}{V} \cdot \frac{V_A}{V_{A1/4}} - 1 \right) \times 100\% , \quad (9)$$

式中 U_L 为非线性误差; V 、 $V_{1/4}$ 分别为比值辐射计在接近满度输出和约四分之一满度的输出; V_A 、 $V_{A1/4}$ 分别为参考辐亮度计对应输出电压值, 代表积分球的辐亮度相对输出。

比值辐射计的非线性测试结果如图 4 所示, 比值辐射计各通道响应非线性分别为 0.27%、0.16%、0.73%、0.93%。

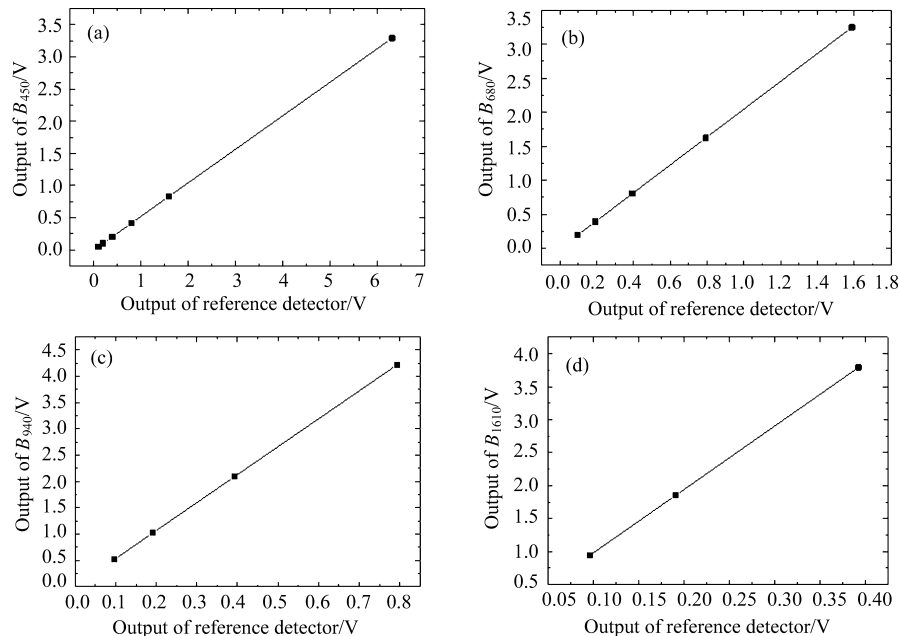


图 4 比值辐射计非线性

Fig.4 Non-linearity of ratioing radiometer

3.3 非稳定性

非稳定性表征的是比值辐射计辐射响应随时间的漂移特性, 待积分球光源和比值辐射计预热至稳定状态后开始测量, 在 1 h 内每间隔 30 s 钟测量一次。比值辐射计探测器非稳定性为

$$U_S = \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} - 1 \right) \times 100\% , \tag{10}$$

式中 U_S 为探测器的稳定性误差; V_{\max} 为探测器输出最大值; V_{\min} 为探测器输出最小值。

各通道稳定性测试结果如图 9 所示, 各通道非稳定性分别为 0.52%、0.23%、0.07%、0.31%, 满足 0.6% 的设计指标要求。

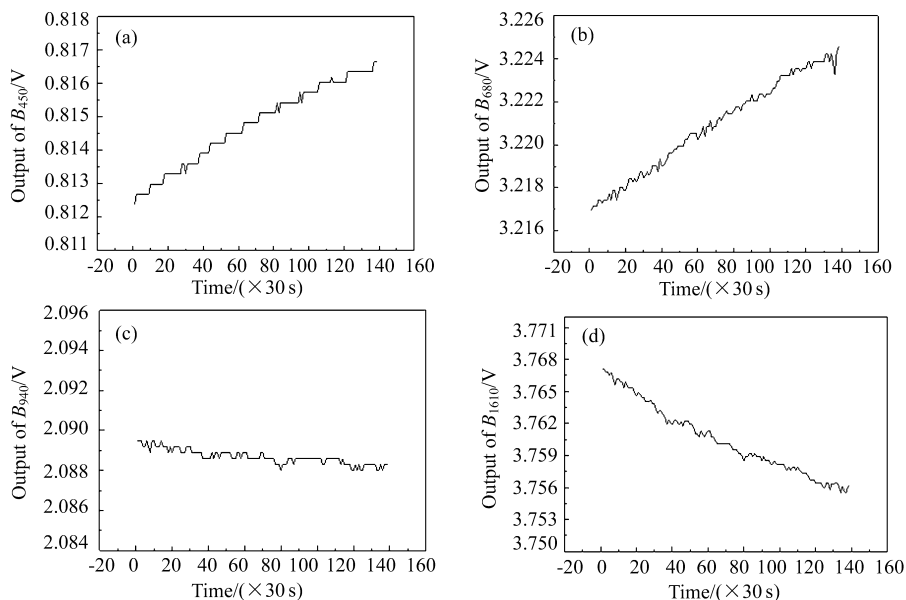


图 5 比值辐射计非稳定性

Fig.5 Instability of ratioing radiometer

4 比值辐射计响应度不确定度

比值辐射计响应度定标不确定度来源包含定标源的不确定度、仪器的非线性, 以及仪器的非稳定性。结合积分球各波段绝对不确定度, 比值辐射计各波段响应系数合成不确定如表 2 所示。响应度定标不确定度优于 2.88%。

表 2 比值辐射计响应度定标不确定度

Table 2 Uncertainty for response calibration of ratioing radiometer

Uncertainty($\times 10^{-2}$)	Center wavelength(nm)			
	450	680	940	1610
Light source	2.55	2.55	2.55	2.71
Non-linearity	0.27	0.16	0.73	0.93
Instability	0.52	0.23	0.07	0.31
Combined standard uncertainty	2.62	2.57	2.65	2.88

5 结束语

比值辐射计作为比辐射星上定标器的核心部组件, 其光辐射测量特性需要进行准确评估。在实验室内完成比值辐射计绝对响应度定标, 获取了辐射响应系数, 辐射定标不确定度优于 2.88%, 验证了比值辐射

计动态范围设计的合理性。比值辐射计非线性优于 0.93%、非稳定性优于 0.52%，满足比值辐射计辐射测量精度需求。辐射响应参数的获取，可以为比值辐射计在轨辐射定标精度评估提供数据支撑。

参考文献：

- [1] Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua, *et al.* Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(5): 616-623(in Chinese).
乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标 [J]. *遥感学报*, 2006, **10**(5): 616-623.
- [2] Zheng Xiaobing. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, **9**(1): 2-8(in Chinese).
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考 [J]. *大气与环境光学学报*, 2014, **9**(1): 2-8.
- [3] Slater P N, Palmer J M. Solar-diffuser panel and ratioing radiometer approach to satellite sensor on-board calibration [C]. *Calibration of Passive Remote Observing Optical and Microwave Instrumentation*, 1991, **1493**: 100-105.
- [4] Yang Benyong, Zhang Liming, Shen Zhengguo, *et al.* Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1858, **17**(8): 1851-1858(in Chinese).
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.
- [5] Yang Benyong, Zhang Liming, Yang Baoyun, *et al.* Space stability measurement and analysis of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(11): 3026-3030(in Chinese).
杨本永, 张黎明, 杨宝云, 等. 光学传感器星上定标漫射板空间稳定性测试与分析 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3026-3030.
- [6] Palmer J M, Slater P N. A ratioing radiometer for use with a solar diffuser [C]. *Calibration of Passive Remote Observing Optical and Microwave Instrumentation*, 1991, **1493**: 106-117.
- [7] 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.
- [8] Fulbright J P, Lei N, Chiang K, *et al.* Characterization and performance of the suomi-NPP VIIRS solar diffuser stability monitor [C]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8510**: 851015.
- [9] Li Mengfan, Xu Weiwei, Zou Peng, *et al.* Study of the response characteristic of ratioing radiometer [J]. *Acta Optical Sinica*, 2016, **36**(2): 0212005(in Chinese).
李孟凡, 徐伟伟, 邹鹏, 等. 比值辐射计响应特性研究 [J]. *光学学报*, 2016, **36**(2): 0212005.
- [10] Huang WenXin, Zhang Liming, Si Xiaolong, *et al.* Design of solar diffuser degeneration monitor and its performance evaluation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(4): 732-739(in Chinese).
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.
- [11] Shi Jiading, Zhang Liming, Cao Xingjia, *et al.* Design and research of diffuser panel used for on-board calibration [J]. *Acta Optical Sinica*, 2015, **35**(8): 0828001(in Chinese).
施家定, 张黎明, 曹兴家, 等. 星上定标漫射板设计研究 [J]. *光学学报*, 2015, **35**(8): 0828001.
- [12] Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.* Development of BRDF absolute measurement device [J]. *Acta Optical Sinica*, 2014, **34**(5): 0528002(in Chinese).
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.