

文章编号: 1672-8785(2017)06-0008-05

星上定标用分谱比辐射计的 辐射探测性能研究

张崇丙^{1,2} 危 峻¹ 黄小仙¹ 汤瑜瑜¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083 ;

2. 上海科技大学, 上海 201210)

摘 要: 采用比辐射计进行比对测量是监测光学遥感仪器星上定标光源载体漫射板反射性能在轨变化的有效手段。用于海洋水色遥感的新一代星载成像光谱仪必须设计成以太阳作光源的在轨绝对辐射定标系统, 才能满足定量化产品反演的使用要求。国外星上定标器的漫反射板长期跟踪测量结果表明, 漫射板的反射性能一直在发生变化, 且波长越短变化越大, 而海洋水色遥感要素的探测恰恰集中在靠近紫外的波长区域。针对这个问题, 设计了分谱比辐射计, 并对其辐射探测性能进行了理论分析与实验测量。结果表明, 在整个动态测量范围内线性相关系数优于 0.9991, 在轨输入能量条件下的分谱信噪比在整个使用波长范围内优于 100, 可以满足成像光谱仪星上定标源反射特性标定的精度要求。

关键词: 遥感; 分谱比辐射计; 漫射板稳定性监测; 信噪比; 响应线性度

中图分类号: V474.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.06.002

Study of Radiation Detection Performance of Spectrum Ratioing Radiometer for in-orbit Calibration

ZHANG Chong-bing^{1,2}, WEI Jun¹, HUANG Xiao-xian¹, TANG Yu-yu¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201210, China)

Abstract: For a diffuser which is used as the light source carrier for in-orbit calibration of an optical remote sensor, to use a ratioing radiometer to monitor the variation of its reflection performance in orbit is an effective means. In order to meet the inversion requirement of quantitative products, the absolute radiation in-orbit calibration system for a new generation of spaceborne High Resolution Imaging Spectrometer (HRIS) should be designed to use the sun as its light source. The long-term tracking measurement results of a foreign in-orbit calibrator show that the reflectance of the diffuser is changing all the time. Moreover, the shorter the wavelength is, the greater the change is. However, the remote sensing of ocean color elements just concentrates on the wavelength region close to UV. To solve this problem, a spectrum ratioing radiometer is designed. Its radiation detection performance is analyzed theoretically and measured experimentally. The results show that its linear correlation coefficient is better than 0.9991 in the whole dynamic measurement range and its spectrum signal-to-noise ratio under

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 国防科技工业民用专项科研技术研究项目 (Y5X77329N0X)

作者简介: 张崇丙 (1987-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事成像光谱定标技术方面的研究。

E-mail: chongbingzhang@sina.cn

the in-orbit irradiation input condition is better than 100. It can meet the calibration precision requirement of the reflection performance of the spaceborne diffuser for a spaceborne HRIS.

Key words: remote sensing; spectrum ratioing radiometer; solar diffuser stability monitoring; SNR; response linearity

0 引言

空间遥感的应用以量化的数据为基础, 辐射定标将遥感的数字响应输出转化为目标绝对物理量的转换系数, 是遥感信息量化过程的关键技术之一^[1,2]。为满足对海洋进行更细致观测的需求, 人们对遥感的定量化精度提出了更高的要求。采用星上绝对辐射定标技术可实现对遥感的在轨绝对定标, 从而保证遥感数据的定量化精度^[3,4]。

基于太阳—漫射板的星上定标技术, 遥感器在整个光谱响应范围(太阳反射波段)内能够以全光路、全孔径、全视场的方式实现绝对辐射定标^[5]。在轨期间, 漫射板受空间环境的影响, 其反射性能可能随时间发生衰变, 若不加以监测与修正, 将导致星上定标器的定标精度下降。James M. Palmer 等^[6,7]提出, 使用比辐射计监测漫射板的在轨衰变可以确保星上定标器的绝对辐射定标精度。该定标技术在美国 Terra、Aqua 卫星的 MODIS、HIRIS 上均取得较好的应用效果^[8,9]。本文针对某星载成像光谱仪星上辐射定标的需求, 设计了用于星上定标光源载体监测的分谱比辐射计, 构建了相应的实验模型, 对其辐射探测性能进行了理论分析, 并对其在

350 nm 至 650 nm 波段的辐射探测性能进行了实验测量与结果分析。

1 分谱比辐射计方案设计与分析结果

1.1 分谱比辐射计

基于分通道比辐射计的监测原理, 设计了用于监测漫射板反射性能在轨变化的分谱比辐射计。它包含分光系统和光谱探测系统两个部分, 如图 1 所示。分光系统由能量收集匀化积分球、太阳入射端口、漫射板入射端口和 V10M 分光组件组成, 光谱探测系统由可见近红外探测器(Visible Near Infrared Detector, CMOS)、运放、模数转换和控制传输电路组成。积分球中设计了用于分时收集太阳直射光、漫射板反射光的两个进光口和一个入射光经匀光后的出光口。太阳/漫射板入射端口用于限制入射光的角度, 太阳入射端口与漫射板入射端口的孔径光阑面积不相等。为保证较高的信噪比和探测器工作于线性响应范围内, 将太阳/漫射板入射端口的孔径光阑面积比值设计为合理的定值, 使两个入射端口入射的光通量接近相等。在太阳/漫射板入射端口处分别设计了挡光板, 工作时, 两个入射端口的挡光板分时开启; 不工作时, 两块挡光板关闭, 封闭光阑开口, 对积分球进行保护。

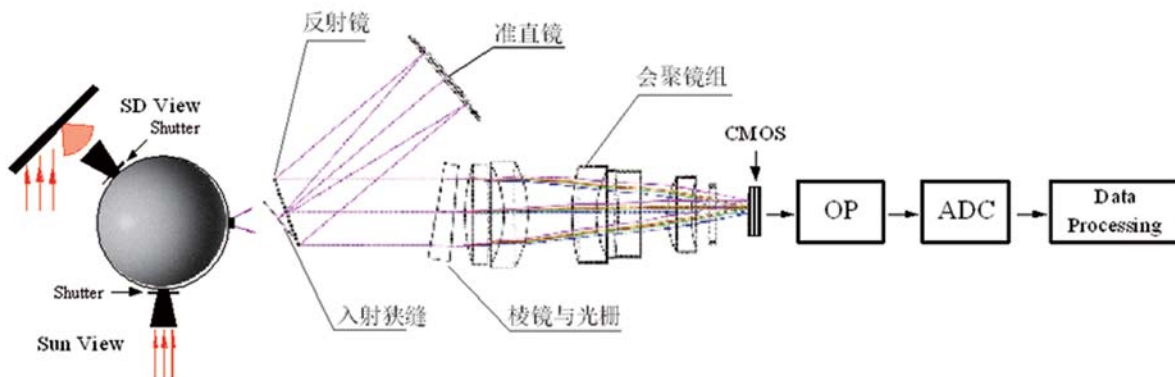


图 1 分谱比辐射计的设计示意图

分光组件使用的是芬兰 Specim 公司生产的光栅色散型分光器 V10M。积分球的出射光辐射到狭缝光栏上,经准直镜准直后,由分光组件色散,再由会聚镜会聚到探测器的光敏像元上,实现探测器对光谱信号的采集和转换。电子学电路部分主要包括探测器、电压放大器 (Operational Amplifier, OP)、模数转换器 (Analog Digital Converter, ADC)、控制与信息处理的 FPGA 和数据传输接口电路。数据传输采用具有接口简单、通信速度快、传输距离远和工作性能稳定等优点的以太网接口,以满足数据采集速率的需求。

积分球由 Labsphere 制作,内壁涂层为 spectralon 涂料 (350~650 nm 波段,反射率大于 97%), CMOS 使用的是 HAMAMATSU 公司生产的 S8378-512Q 探测器。CMOS 探测器与 V10M 分光组件的性能参数见表 1。

表 1 器件的相关参数

Spectral response range	200~1000 nm (CMOS-S8378)	
Pixel size	25um*0.5mm	
Number of pixels	512	
Readout noise	1.3mV(High gain) 0.3mV(Low gain)	CMOS-S8378
Dark output voltage ¹	2mV(High gain) 0.4mV(Low gain)	
Saturation charge	6.3pC	
Saturation output voltage	3.2V(High gain) 2.5V(Low gain)	
Spectral response range	350~1000 nm (V10M)	
F#	2.4	
Nominal magnification	0.75	
Reciprocal dispersion	111 nm/mm	V10M
Flat field image	22.5 (spatial) mm x 5.85 (spectral) mm	
Grating diffraction efficiency	50%	
Max DE wavelength region	450-550 nm	

1.2 分谱信噪比分析

信噪比作为系统的核心指标之一,其值的高低直接影响星上定标精度。在光电转换和辐射传输过程中,将不可避免地受到各种随机因素的干扰,这些干扰表现为各种类型的噪声,而探测器噪声是系统噪声的主要成分。本文仅就探测器噪声对信噪比的影响进行分析和估算。本文采用等效电子法计算信噪比,即将信号和噪声都折算为以电子个数为单位进行计算。系统的信噪比为

$$SNR(\lambda) = \frac{N_s(\lambda)}{N_n(\lambda)} \tag{1}$$

式中, $N_s(\lambda)$ 为探测器像元接受的光能被转换为信号电子的个数, $N_n(\lambda)$ 为总的噪声电子数。

图 2 为理论计算的信噪比曲线。可以看出,开 4 盏卤钨灯,探测器选择高增益工作模式,积分时间为 17.28 ms 时,信噪比最小为 5,最大为 320,无饱和现象出现。

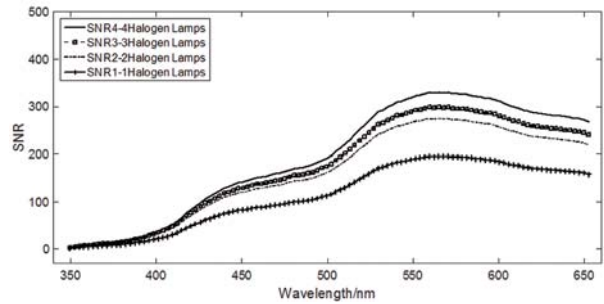


图 2 理论信噪比曲线

2 测试方法与测量结果

实验测量在暗室中进行。搭建的分谱比辐射计模型如图 3 所示。实验过程中,保持分谱比辐射计与积分球光源的相对角度和距离不变,以太阳光口作为入射光进光口,漫射板进光口保持封闭状态,实验所使用的积分球已标定不同辐射能级状态下的光谱辐亮度,图 4 为实验测量示意图。

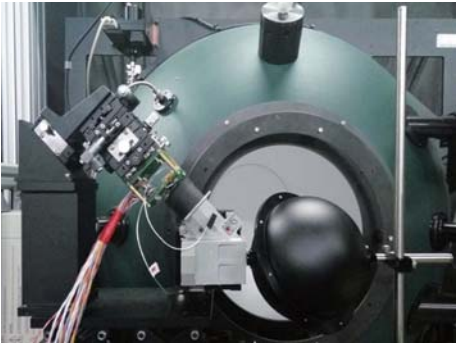


图 3 分谱比辐射计的测试图

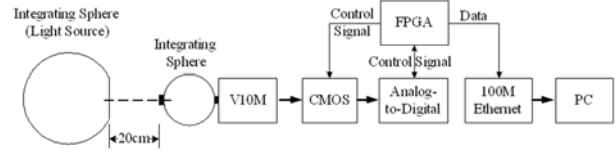


图 4 关键参数的测量示意图

2.1 响应线性度测试

用于比辐射计的探测器应具有良好的响应线性。若探测器的响应率不随入射光功率的变化

而变化,则认为探测器是线性响应的。通过调节积分球中卤素灯开启的数量控制探测器的入射能量,探测器将产生相应的响应值,根据响应值与入射能量之间的关系可以评价其线性度。如果探测器的响应值与入射光的能量成比例增加,则它的响应具有良好的线性度。

$$DN(\lambda_i) = \alpha_i E(\lambda_i) \quad (2)$$

式中, $DN(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 处探测器的响应值, $E(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 处仪器的入射光谱辐照度, α_i 为比例因子。

通过设置积分球光源,输出不同等级的辐射能量,采集相应光谱辐亮度下的响应值,采用最小二乘法对其进行线性拟合,并计算相关系数。图 5 为随机选取 5 个中心波长进行线性拟合的结果。可以看出,系统响应随光谱辐亮度线性变化,其拟合曲线的标准差均小于 5。图 6 给出了在各波长处系统响应随光源光谱辐亮度变化线性拟合的相关系数,其值优于 0.9991。结果表明,分谱比辐射计对光谱辐亮度的响应具有良好的线性度。

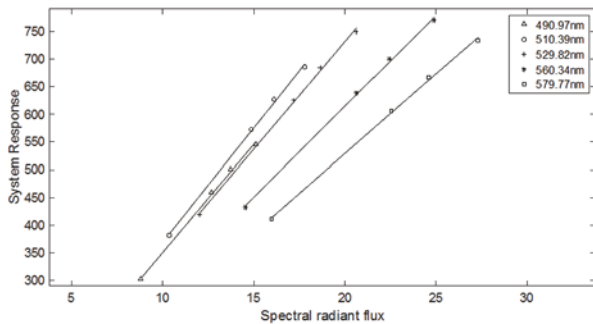


图 5 探测器的响应线性度(随机选取 5 处光谱)

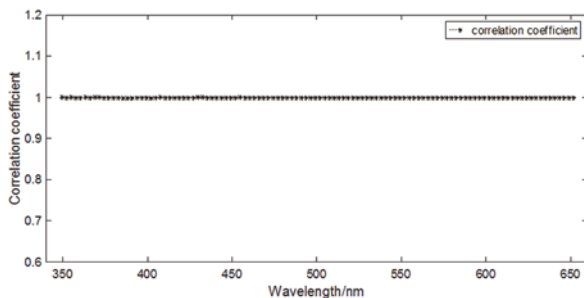


图 6 探测器的响应线性度

2.2 信噪比测试

为了验证前述信噪比理论模型的正确性,利用积分球光源对分谱比辐射计进行测量。整个测量过程在暗室中进行,积分球光源充满分谱比辐射计的进光口。调节积分球输出的光谱辐亮度,采集数帧相应辐亮度下的光谱响应值。以每一像元扣除暗背景下灰度值后的灰度平均值作为仪器的光谱响应的信号值 $S(\lambda)$,并以对应的像元灰度值随时间随机变化的标准偏差作为噪声 N ,用光谱响应的信号值 $S(\lambda)$ 与噪声 N 的比值求得仪器的信噪比,即

$$SNR(\lambda) = (S(\lambda))/N \quad (3)$$

由实验测量数据计算,得到的分谱比辐射计的信噪比曲线如图 7 所示。比较图 2 和图 7 可知,理论计算和实验测量的信噪比都随入射辐射信号的增强而增大,理论计算与实验测量的误差小于 9%。其中,在 350~450 nm 波段,积分球的光谱辐亮度较小,导致系统的信噪比较小。在 500~650 nm 波段中,由于探测器的响应噪声变化幅度较大,信噪比波动明显。

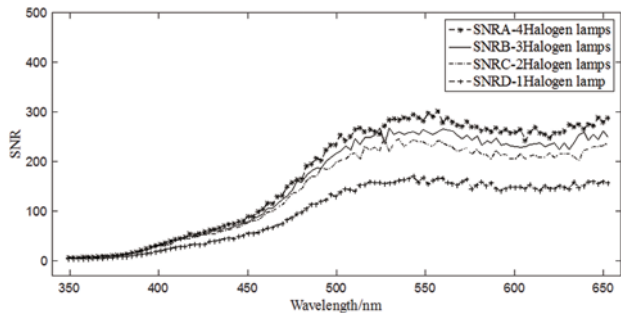


图 7 分谱比辐射计的信噪比

基于上述信噪比的理论计算与实验测量结果,可得到星载成像光谱仪在轨定标时分谱比辐射计在轨输入能量条件下的分谱信噪比,如图 8 所示。可以看出,在整个使用波长范围内,分谱信噪比不小于 100,可满足星上定标器的信噪比要求。

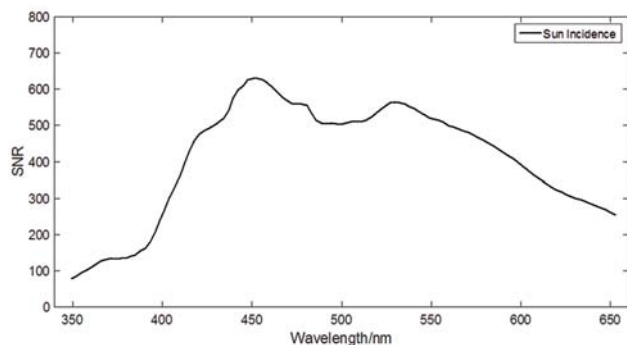


图 8 分谱比辐射计的太阳入射信噪比

3 结论

响应线性度、信噪比是保证分谱比辐射计性能的两个关键参数。在实验室对响应线性度、信噪比进行了测试。测量结果表明,在整个使用波长范围内,线性相关系数不小于 0.9991,表明分谱比辐射计响应具有良好的线性度,其信噪比不低于 5,且与理论计算结果一致。但在 350~450 nm 波段内信噪比较低,这主要是由于积分球的辐射能量较弱所致。而在轨输入能量条件下,分谱比辐射计的信噪比将优于 100,满足星上定标的信噪比要求。

完成了用于监测星载成像光谱仪星上定标光源载体漫射板反射性能在轨变化的分谱比辐射计设计,搭建了相应的实验模型,并对其性能进行了理论分析和实验测量。基于光栅分光原理,实现了靠近紫外、可见近红外波段光谱数据的连续采集。实验测量结果表明,该分谱比辐射计的性能可以满足星上定标的精度要求。

参考文献

- [1] 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): 1-7.
- [2] 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] 马亮,危峻,黄小仙,等. 光栅色散型成像光谱仪的实验室光谱定标方法研究[J]. 激光与光电子进展, 2013, 34(2): 023001.
- [4] 李晓晖,颜昌翔. 成像光谱仪星上定标技术[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4): 309-315.
- [5] 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] Philip N S, Palmer J M. Solar-diffuser Panel and Ratioing Radiometer Approach to Satellite Sensor on-board Calibration [C]. SPIE, 1991, 1493: 100-105.
- [7] Palmer J M, Slater P N. Ratioing Radiometer for Use with a Solar Diffuser [C]. SPIE, 1991, 1493: 106-117.
- [8] Fulbright J P, Lei N, Kwofu C, et al. Characterization and Performance of the Suomi-NPP VIIRS Solar Diffuser Stability Monitor [C]. SPIE, 2012, 8510: 851015.
- [9] Sun J, Xiong X, Guenther B. MODIS Solar Diffuser Stability Performance [C]. SPIE, 2001, 4483: 156-164.
- [10] 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] 陈风,李双,王骥,等. 高精度光电探测器的线性测量[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 889-893.

新闻动态 News

美国洛克希德·马丁公司获得 导弹预警卫星追加合同

据 <http://spacenews.com> 网站报道,美国洛克希德·马丁公司最近从美国空军获得了一份价值 4599 万美元的追加合同,他们将在 2014 年所签合同 (18.6 亿美元) 的基础上继续为后者研制第五/六颗天基红外系统 (SBIRS) 地球同步轨道 (GEO) 卫星。这笔资金主要用于集成一个附加的子系统 and 优化推进装置。此项工作预计在

2022 年 7 月 31 日之前完成。另外, SBIRS GEO-4 卫星计划于 2017 年 11 月发射升空。



图 1 SBIRS GEO-5/6 卫星将采用 A2100 卫星平台

□ 岳桢干