

多波段辐亮度标准传递探测器的研制

邹 鹏^{1,2} 郑小兵^{1,2} 吴浩宇^{1,2} 李 新^{1,2} 谢 萍^{1,2} 李健军^{1,2} 刘恩超^{1,2}

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031
² 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 为了实现基于“标准探测器”的高精度辐亮度基准的传递,提高遥感器定标精度,研制了基于陷阱探测器的多波段辐亮度标准传递探测器(MRSTD)。该探测器具有 8 个测量通道,工作波段分布于 400~1000 nm 之间。其主要特点在于以硅陷阱探测器作为光功率测量部件,以窄带干涉滤光片进行分光,辅以视场光阑、孔径光阑限制入射孔径以及入射立体角,使用微弱电流测量电路测量探测器输出光电流,利用闭环温控系统对滤光片和陷阱探测器进行温控。详细介绍了该辐亮度探测器的工作原理、研制过程,并对其光谱辐亮度响应率定标不确定度进行了评估,其定标不确定度优于 1.26%。

关键词 遥感;辐亮度;标准传递;陷阱探测器;弱电流测量

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0404002

Development of Multi-Band Radiance Standard Transfer Detector

Zou Peng^{1,2} Zheng Xiaobing^{1,2} Wu Haoyu^{1,2} Li Xin^{1,2}

Xie Ping^{1,2} Li Jianjun^{1,2} Liu Enchao^{1,2}

(¹ Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Key Laboratory of Optics Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract In order to provide radiance reference based on standard detector and improve the calibration accuracy of remote sensor, a multi-band radiance standard transfer detector (MRSTD) based on trap structure has been developed. There are eight channels in MRSTD and the operation wavelengths of MRSTD are from 400 to 1000 nm. A Si trap detector is used for radiometric power measurement, an interference filter is used to limit the spectral band of the incident light, and a field stop and an aperture stop are used to limit receiving area and solid angle of the input flux. A weak current detection circuit is designed to measure the photocurrent of the detector accurately. The filter and the detector are temperature controlled by a closed-loop control system. The principle and development process of the facility are introduced and the uncertainties of its absolute spectral radiance responsivity are evaluated in detail. The relative uncertainty of MRSTD is less than 1.26%.

Key words remote sensing; radiance; standard transfer; trap detector; weak current detection

OCIS codes 040.0040; 040.5160; 040.1880

1 引 言

在各种卫星平台上获取地物的遥感信息时,由于受到诸多因素的影响,如遥感器系统的畸变、仪器老化、大气传输干扰、地形影响以及同一地物辐亮度在不同观测时间内随太阳高度角的变化等,都会使遥感器收集到的光辐射能量和地物实际的辐射能量

之间产生较大的偏差。为了尽可能精确地获得遥感器的定标系数,需要通过高精度辐射定标和辐射校正来减小这种偏差,而高精度辐射定标方法和技术关键在于有高精度的初级标准、传递标准和工作标准作为保障。传统的基于辐射源的定标方法,采用黑体作为初级标准、积分球和漫反射板作为传递标

收稿日期: 2010-11-16; 收到修改稿日期: 2010-12-30

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z106)资助课题。

作者简介: 邹 鹏(1983—),男,博士研究生,主要从事光电探测与信号处理等方面的研究。E-mail: pzou@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

准,由于采用了“辐照度标准灯→积分球(漫反射板)”的标准传递过程,传递过程中涉及到辐照度→辐亮度的物理量转换以及反射比、立体角与视场的近似处理、传递辐射计等诸多因素影响,将积分球(漫反射板)的绝对辐亮度不确定度限制在4%~5%(可见波段)^[1],其精度已无法满足现代定量遥感应用对辐射定标的高精度需求。

随着低温绝对辐射计和陷阱探测器的出现,使传统的基于“标准辐射源”的辐射标准传递方法经历了一次突破性的飞跃,低温绝对辐射计逐渐取代传统的黑体成为辐射初级标准,基于陷阱探测器的标准传递链正逐步取代传统的基于辐射源的标准传递链^[2]。通过构建“低温绝对辐射计→辐亮度标准探测器→积分球(漫反射板)”的标准传递过程,使用辐亮度标准探测器直接标定待标定遥感器,进行“辐亮度”到“辐亮度”的直接比对测量,省去了辐照度→辐亮度的物理量转换过程,可以将现有积分球(漫反射板)的绝对辐亮度不确定度降低至1%~2%^[3]。因此,通过基于辐亮度标准探测器的高精度辐射定标方法,可以有效提高卫星遥感器发射前实验室定标、发射后的星上定标和场地替代定标各个阶段的辐射定标精度,在现代定量遥感应用中具有广阔的应用前景。

目前国外遥感技术先进国家,相继开展了基于辐亮度标准探测器的辐射定标方法的研究,并在相关卫星遥感器的实验室定标中和星上定标中得到了具体应用。如美国 NASA 的 SeaWiFS, LandSat7 ETM+ 和 EOS 计划的多个星载遥感器的发射前定标,均采用了基于探测器的辐亮度基准传递并得到了成功应用^[4~6]。

设计和研制绝对精度高、稳定性好、性能优良的多波段辐亮度标准传递探测器,是实现这种高精度辐射定标方法与技术的首要前提条件。本文基于辐亮度测量的基本原理,以可溯源于绝对低温辐射计的陷阱探测器作为核心探测部件,成功研制了400~1000 nm波段范围内的多波段辐亮度标准传递探测器。

2 工作原理

根据辐射亮度的定义,辐射亮度 L 是指离开、到达或者穿过某一表面单位立体角 $d\Omega$ 、单位投影面积 $dS \cdot \cos \theta$ 上的辐射通量 $d\Phi$, 有如下公式

$$L = d\Phi / (d\Omega \cdot dS \cdot \cos \theta).$$

依据上述关系,实现绝对辐亮度的测量关键在于选用高精度的光电探测器实现辐射通量的精确测量以及设计一个能限制入射孔径和立体角的光学系统,并对该入射孔径和立体角进行精确测量。同时利用分光装置进行分光,并对其光谱透射率精确测量,最终可实现不同波段的光谱辐亮度精确测量。

依据上述原理,确定了结构如图1所示的辐亮度测量方案。该方案中辐亮度测量由光学头部和主控机箱两部分构成。光学头部实现光信号至电信号的转换,并进行信号的预处理,光电转换过程如下:光束首先经过光阑筒,光阑筒内装有视场光阑、孔径光阑,用于限制光辐射通亮接收面积及接收立体角。光线离开孔径光阑后,经过滤光片后由光电探测器接收,滤光片用于分光,实现不同波段光通量的测量,陷阱探测器用于光辐射功率的精确测量。主控机箱对测试数据量化处理后进行辐亮度反演,并实时显示,上传至计算机。

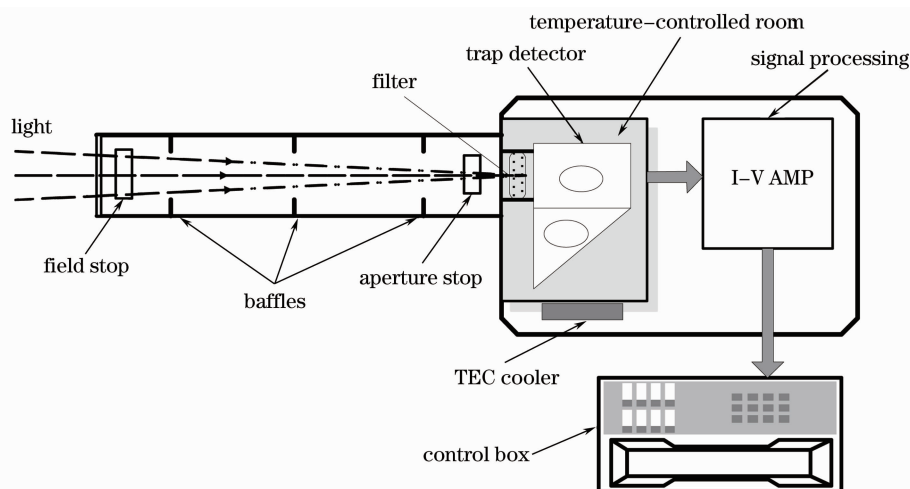


图1 辐亮度测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle of radiance measurement

3 研制内容

依据图 1 所提出的辐亮度测量方案,设计了 8 波段辐亮度探测器,以下分模块详细介绍设计过程。

3.1 光学设计

辐亮度探测器的光学设计主要内容是精确地确定入射立体角及观测面积。入射立体角及观测面积是由孔径光阑和视场光阑共同决定的。辐亮度探测器的光学设计,就是要确定出合适的孔径光阑和视场光阑尺寸,以及二者间距。

图 2 所示是辐亮度探测器的入射光路原理图。入射光束依次经过视场光阑(r_2)、孔径光阑(r_1)后被探测器光敏面(PD)接收。其中 H 为光阑间距; D 为物距,即物面与孔径光阑的间距。为了抑制杂散光,在两光阑之间加入消杂散光光阑。

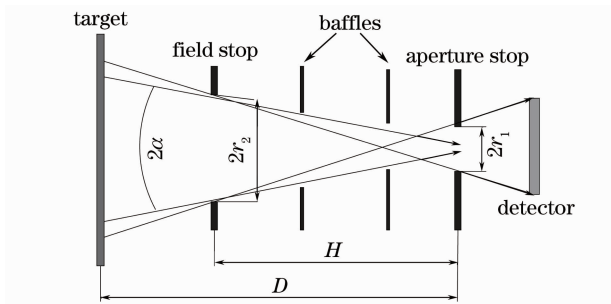


图 2 辐亮度探测器光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of beam path of radiance detector

为了保证入射光束完全经过陷阱探测器每一光敏面内,同时保证在测量过程中避免视场内目标表面的局部非均匀性影响测量结果,综合考虑到便于加工和测量以及外观体积的要求,确定辐亮度探测器光学几何参数如表 1 所示。

表 1 辐亮度探测器光学参数

Table 1 Optical parameters of radiance detector

Parameters	Value
Distance between the two stops H /mm	200
Aperture stop radius $2r_1$ /mm	2.8
Field stop radius $2r_2$ /mm	10
Field of view (FOV) 2α /($^\circ$)	2.86

考虑到仪器使用的简单、可靠以及便携性,8 波段辐亮度探测器选用窄带干涉滤光片作为分光器件。滤光片与光栅、棱镜等分光器件相比具有结构紧凑,轻便,无需复杂的机械及电学驱动等优点,而且其透射率测量相对较容易,测量不确定度易于评估。缺点是中心波长随温度变化会产生漂移,为此我们设计了温控系统,保证其性能稳定性。

3.2 光辐射功率探测器

辐亮度标准探测器选用硅陷阱探测器作为光辐射功率测量部件。其光谱响应范围为 350~1100 nm,光功率响应率直接溯源于绝对低温辐射计,定标不确定度可达到 0.035%,是实现高精度辐亮度测量的关键。它是由 3 片硅光电二极管以图 3 所示的由反射式陷阱结构组合而成的复合型光电探测器。该探测器具有光谱响应范围宽、量子效率高、光谱灵敏度高、空间响应均匀性高、偏振敏感性低以及具有良好的线性、稳定性等诸多优点,是光辐射功率探测器的理想选择^[7]。

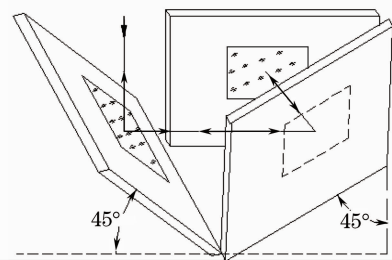


图 3 陷阱探测器光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of beam path of trap detector

3.3 微弱电流测量电路设计

光辐射功率探测器实现了光信号至电信号的转换,而其输出的光电流信号能否精确测量直接影响辐亮度测量的最终精度。为此,依据硅陷阱探测器特性分析,设计了精密微弱电流检测电路。

辐亮度探测器主要应用于各种均匀面光源(积分球、漫射板和校正场等)以及外场地物的光谱辐亮度测量,被测目标之间辐亮度差别较大,因此辐亮度探测器测量电路的设计既要保证仪器具有足够的动态范围,同时具备精确测量较弱光信号的能力。依据对辐亮度探测器观测最弱目标信号光通量的估算,探测器输出光电流最低在 10^{-10} A 左右,为此需要研制能够实现最小 10^{-10} A 量级的微电流测量电路,同时要求其具有 60 dB 的动态范围。

为此我们设计了如图 4 所示的微电流测量电路。该测量电路的核心是设计高性能 $I-V$ 放大电路,使得光电流信号实现高增益、高稳定、低噪声的高精度 $I-V$ 转换。光电流转换为电压信号后,进入程控放大器进行二级放大,程控放大器增益变化范围为 1~60 dB。

利用上述 $I-V$ 放大电路实现 10^{-10} A 弱电流测量,运放以及反馈电阻的选取是关键。选取具有业界极低偏置电流的微电流放大器 OPA128LM 作为 $I-V$ 放大器。微弱光信号测量场合, $I-V$ 放大电

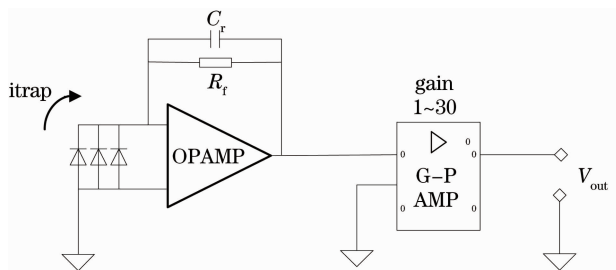


图 4 微电流测量电路原理示意图

Fig. 4 Principle diagram of weak current measurement circuit. The feedback resistance of the measurement circuit is larger, the signal-to-noise ratio is higher^[8], so under the allowed conditions, combined with the estimation of the photocurrent magnitude, it is as far as possible to choose a high resistance value feedback resistor. The resistor should choose high stability, low temperature coefficient and low noise precision resistor. The feedback resistor chose 100 M Ω metal film resistor, the temperature coefficient is 25×10^{-6} .

同时在电路的设计过程中,需要注意以下几点:放大器供电电源做好去耦及滤波,保证供电电源的稳定以及低噪声。光电信号使用屏蔽线接入印制电路板(PCB),PCB上的微电流走线使用包地处理。电路板板面保持干净,减小表面污渍引起的漏电。前放电路板整体放置于屏蔽盒内,并保证接地良好^[9]。

3.4 温控电路设计

当环境温度发生变化时,陷阱探测器自身暗电流以及前置放大器的跨导阻抗会随温度发生改变,

滤光片透射率及其中心波长位置会随温度的变化而改变^[10]。以上因素的变化均会对辐亮度测量产生明显影响,为保证辐亮度测量的绝对精度,需加入温控系统对以上关键部件进行精密控温。

图 5 为设计的温控系统原理框图,整个系统是一个基于比例积分微分(PID)算法的闭环反馈控制系统。数字温度传感器实时监测温控对象(滤光片、Trap)温度,并将测量温度值送入微处理器,经处理器运算后输出数字控制量(DAC),该 DAC 经过数模转换器转换为模拟电压,经功率放大后,驱动半导体热电致冷器(TEC)完成控温工作。温控稳定后,温度稳定在在 $(23 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 范围内。

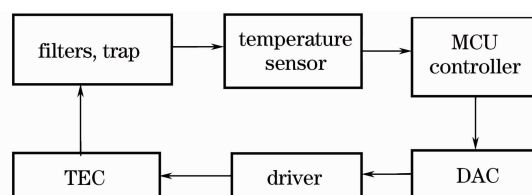


图 5 温控系统原理框图

Fig. 5 Principle diagram of closed-loop temperature controlled system

3.5 机械设计

辐亮度标准传递探测器的机械设计和整体布局的原则为在保证各安装部件紧凑、牢固的基础上,利于对温度敏感部件进行温度控制。图 6 为 8 波段辐亮度探测器光学头部的机械装配示意图。

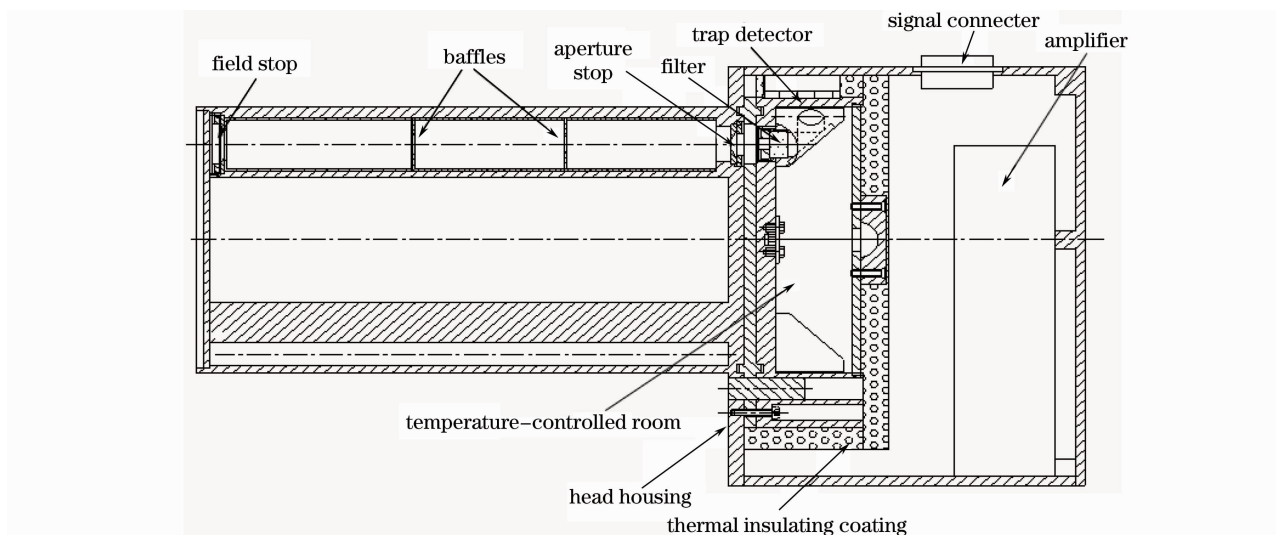


图 6 8 波段辐亮度探测器光学头部结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cross-section of MRSTD's head

辐亮度探测器共有 8 个测量通道,为了保证各测量通道光路的共轴性及稳定性,8 个光阑筒做成一个整体。光阑筒内依次安装有视场光阑、两个消杂散光光阑、孔径光阑及不同中心波长的窄带干涉

滤光片。光阑筒的末端伸入温控盒内,并与温控盒内部的陷阱探测器对接,8 只陷阱探测器按圆周对称排列于温控盒内。温控盒为四方体结构,材料为硬铝,对陷阱探测器起支撑及电屏蔽作用,其内部中

心处放置温度传感器,外侧使用绝缘隔热泡沫密封隔热,温控盒与外壳面板的固定连接使用高强度尼龙螺钉,最大限度减小热传导。

温控腔的制冷器件为半导体热电致冷器,它具有两个端面,当加载了某个方向的电流后,一个是冷端面,另一个是热端面。温控盒侧面外壁留有温控凸台,方便与制冷器温控端面紧密连接,制冷器另一端面与光学头部外壳紧密接触,整个头部外壳作为散热器。接触面之间均涂有导热硅脂,保证良好的热接触。

4 不确定度的评估

依据文献[11~14]测试方法对 8 波段辐亮度探

测器各关键部件进行了测试。主要包含以下几个方面:探测器绝对光谱响应率定标,其中包括单波长点绝对光功率响应率定标、探测器相对光谱响应率定标;滤光片相对光谱响应率定标;微电流测量电路定标;几何参数测量,包括孔径光阑、视场光阑面积测量、光阑间距测量,以及仪器测试过程中杂散光影响的评估。由于篇幅限制,具体测量过程就不赘述。

8 波段辐亮度探测器的辐亮度测量不确定度通过光谱辐亮度响应率定标不确定度来表示,光谱响应率定标不确定度如表 2 所示。

表 2 绝对光谱辐亮度响应率的不确定度评估

Table 2 Uncertainties of absolute spectral radiance responsivity

Uncertainty component / 10 ⁻³	Center wavelength /nm							
	510	550	620	672	750	860	900	1030
Absolute radiant power response	0.39	0.61	0.29	0.86	0.75	1.46	0.67	1.14
Trap detector	Relative spectral power response			4.87				
	Spatial uniformity			1.7				
	Polarization sensitivity			1				
	Filter transmittance			5.27				
Current measurement	1.38	1.64	1.14	1.75	1.88	1.41	1.89	1.74
Field stop area	0.35	0.41	0.32	0.35	0.32	0.32	0.41	0.39
Aperture stop area	2.1	2.6	1.3	1.9	2.8	1.9	3.7	2.1
Distance between two stops	0.22	0.16	0.16	0.15	0.18	0.16	0.15	0.27
Non-linearity	0.74	1.35	1.46	1.15	1.14	0.27	1.84	1.41
Instability	3.54	1.94	0.97	0.95	0.74	1.03	2.65	0.63
Stray light	8.60							
Combined standard uncertainty	12.21	12.03	11.65	11.79	11.99	11.71	12.57	11.82

鉴于以上测量结果,8 波段辐亮度探测器绝对光谱辐亮度响应率定标不确定度优于 1.26%。从各分项不确定度来源看,个别通道孔径光阑测量带来的不确定度所占比重最大,这是因为孔径光阑直径较小(2.8 mm),而小孔直径的测量是通过万能工具显微镜完成,测量精度受到限制,目前实验室正研制基于辐照度测量的小孔面积测量系统,届时光阑面积的测量精度将会进一步提高。

另外两项较大的不确定来源于相对光谱响应率及滤光片透射率测量,这两项均与宽光谱测量系统^[13]的应用相关,实验室现有宽光谱测量系统信号源较弱,信噪比不够高,测量不确定度较大,不确定因素的评估还不够完善,需要进一步的改进,实验室也正在进行这方面的研究工作。

5 结 论

以高精度陷阱探测器作为光电探测部件,辅以

光学、电子学、机械设计,成功研制了 8 波段辐亮度标准传递探测器,其绝对光谱辐亮度响应率定标不确定度优于 1.26%,实现了基于标准探测器的辐亮度基准的传递。通过使用多波段辐亮度标准探测器,可以在与待定标卫星遥感器波段相匹配的多个波长点上,对各种均匀面光源(例如积分球、漫射板、校正场等)的光谱辐亮度进行绝对定标、验证和相互间比对,从而降低面源的不确定度,提高遥感器定标的精度。2006 年 4 月,在云南天文台使用多波段辐亮度探测器对 FY-2(05)星扫描辐射计的可见光通道(0.55~0.90 μm)进行了发射前外场定标实验,并与其他定标方法进行了比较,结果具有很好的一致性^[15]。另外,我国已发射升空的 FY-3 气象卫星,也采用了我们所设计研制的多通道辐亮度标准探测器作为其天上定标核心设备,具体应用效果将在在轨运行过程中进一步评估和验证。

参 考 文 献

- 1 J. H. Walker, R. D. Saunders, J. K. Jackson *et al.*. Spectral irradiance calibrations [S]. Natl. Bur. Stand. (U. S.) Spec. Publ., 1987, 250-20,102
- 2 N. P. Fox. Radiometry with cryogenic radiometers and semiconductor photodiodes [J]. *Metrologia*, 1995, **32**(6): 535~543
- 3 H. W. Yoon, Gibson. Comparison of the absolute detector-based spectral radiance assignment with the current NIST-assigned spectral radiance of tungsten strip lamps [J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 429~432
- 4 B. C. Johnson, J. B. Fowler, C. L. Cromer. The SeaWiFS Transfer Radiometer [M]. NASA Technical Memorandum, 1998, **1**: 20689 21998
- 5 B. L. Markham, J. L. Barker, E. Kaita *et al.*. On-orbit performance of the Landsat-7 ETM+ radiometric calibrators [J]. *International J. Remote Sensing*, 2003, **24**(2): 265~285
- 6 B. C. Johnson, S. W. Brown, G. P. Eppeldauer *et al.*. System-level calibration of a transfer radiometer used to validate EOS radiance scales [J]. *International J. Remote Sensing*, 2003, **24**(2): 339~356
- 7 Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 749~752
郑小兵, 吴浩宇, 章俊平等. 不确定度优于0.035%的绝对光谱响应率标准探测器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 749~752
- 8 G. Epeidauer, J. E. Hardis. Fourteen-decade photocurrent measurements with large-area silicon photodiodes at room temperature[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(22): 3091~3099
- 9 Keithley Inc. Low Level Measurement Handbook[M]. <http://www.keithley.com.cn/>
吉时利公司. 低电平测量手册[M]. <http://www.keithley.com.cn/>
- 10 Li Zhaozhou, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu *et al.*. Temperature characteristics research of high precision spectral radiometer standard detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 401~407
李照洲, 郑小兵, 吴浩宇等. 高精度光谱辐射标准探测器的温度特性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 401~407
- 11 Peng Zou, Haoyu Wu, Qiuyun Xu *et al.*. Absolute spectral radiance responsivity calibration of the radiance transfer standard detector[C]. *SPIE*, 2007, **6621**: 66211B
- 12 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun *et al.*. Absolute calibration of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 350 nm and 1064 nm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6273~6278
李健军, 郑小兵, 卢云君等. 硅陷阱探测器在350~1064 nm波段的绝对光谱响应度定标 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(9): 6273~6278
- 13 Zhou Lei, Wu Haoyu, Zheng Xiaobin. Calibration for relative spectral responsivity of multichannel radiometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, **28**(1): 37~41
周磊, 吴浩宇, 郑小兵. 通道式辐射计的相对光谱响应率定标 [J]. *计量学报*, 2007, **28**(1): 37~41
- 14 Li Zhaozhou. Studies of Highly Accurate Radiometric Calibration and Application Based on Radiance Standard Detector[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, 2005
李照洲. 基于辐亮度标准探测器的高精度辐射定标方法与应用研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士论文, 2005
- 15 Zhou Lei, Peng Nina, Zhang Liming *et al.*. Detector based field radiometric calibration for the visible band of multi-channel scanning radiometer of satellite FY-2-05 [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, **22**(1): 20~25
周磊, 彭妮娜, 张黎明等. 基于标准探测器的FY-2(05)星扫描辐射计可见光通道外场辐射定标 [J]. *遥感技术与应用*, 2007, **22**(1): 20~25