

文章编号: 1007-4619(2007)04-0581-08

光学有效载荷高精度绝对辐射定标技术研究

李照洲¹, 郑小兵², 唐伶俐¹, 李传荣¹, 刁晓环¹

(1 中国科学院 光电研究院, 北京 100080 2 中国科学院 安徽光学精密机械研究所遥感研究室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 随着多波段、多平台、高光谱分辨率遥感仪器的迅速发展, 要求光谱辐射定标技术具有前所未有的高精度和长期测量稳定性。目前, 传统辐射定标方法的精度已逐渐难以满足定量遥感应用的需求。本文提出了一种新型基于辐亮度标准探测器的高精度光谱辐射定标先进方法和技术, 由于该方法可直接溯源至低温绝对辐射计, 其绝对精度和长期稳定性优于传统的基于标准光源法, 是提高中国目前光学传感器实验室、星上和场地替代定标精度的有效途径。该方法已两次成功应用于中国“FY-2”气象卫星 04 和 05 星发射前外场定标, 实际应用效果表明, 它能够有效提高中国卫星遥感器的外场定标精度, 对改善中国当前卫星传感器各阶段定标精度, 具有潜在的应用价值。

关键词: 光辐射计量; 卫星传感器; 高精度辐射定标; 辐亮度标准探测器

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

An Advanced Technology of Absolute Radiometric Calibration for Optical Remote Sensors

LIZhaozhou, ZHENG Xiaobing, TANG Lingli, LIChuanrong, DIAOXiaohuan

(1 Academy of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Anhui Hefei 230031, China)

Abstract: For sensor radiometric calibration, there are source-based radiometry which is based on blackbody physics referenced to the freezing temperature of gold and detector-based radiometry which is based on electrical substitution radiometer at cryogenic temperatures respectively. The source-based radiometry is a traditional method with poor accuracy compared to detector-based radiometry owing to the difficulty of high accuracy measurement of blackbody temperature. With the development of multi-spectrum, multi-platform and high-resolution response remote sensors, the traditional absolute radiometric calibration technology source-based is facing the challenge since its accuracy doesn't meet the remote sensing application requirements. In this paper, a new calibration method and its application technology based on radiance standard detector are presented in detail. The absolute accuracy of the new calibration technology is far higher than before, since it can directly trace to the cryogenic absolute radiometer which measures the radiant power with the lowest uncertainties currently. The new calibration method has been successfully used to FY-2 No. 04 and No. 05 satellite sensor preflight absolute calibration two times in Kunming in 2004. The results show that the new method can effectively improve the calibration accuracy of satellite sensors and has potential applications in preflight on-board and vicarious calibration of sensors.

Key words: optical metrology, satellite sensor, high accuracy radiometric calibration, radiance standard detector

收稿日期: 2006-09-04 修订日期: 2006-10-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性项目 (编号: KGCX3-SYW-401)

作者简介: 李照洲 (1975—), 男, 博士, 2002 年获中国科学院安徽光学精密机械研究所硕士学位, 2005 年获中科院安徽光学精密机械研究所光学遥感专业博士学位。主要从事光辐射计量、卫星传感器高精度辐射定标、传感器高精度定标器设计等方面研究。已发表学术论文 10 余篇, 申请国家专利 9 项。Email: lz@aoe.ac.cn

1 引 言

经过 20 世纪 70—90 年代的遥感技术发展及积累,中国航天器平台和传感器本身的技术已渐趋成熟。在遥感数据应用方面,目前已不满足于仅仅通过遥感影像的目视解译来定性判断目标的有和无,还要力图实现由传感器收集到的光辐射数据定量地反演或推算地球物理参量,并建立相应的测算与识别数值模型,即定量化遥感。

然而,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,如传感器系统的畸变、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,都会使传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。通过辐射定标和辐射校正,可以减小这种偏差,而这种偏差最终所能减小到的程度,则依赖于辐射定标和辐射校正的精度。

传感器的辐射定标包括 3 个阶段:发射前的实验室定标、星上定标和场地替代定标。实验室定标主要作用是确定传感器的响应并评估其不确定度。星上定标则长期地监测传感器响应的衰变,并可以进行阵列传感器响应均匀性校正。场地替代定标可以验证传感器的辐射响应并进行多个传感器的交叉定标。

当前,中国传感器多采用“黑体标准辐射源 + 传递标准灯”传统定标方式,其辐射定标精度已逐渐难以满足定量遥感应用需求。本文设计并提出了一种基于辐亮度标准探测器的高精度辐射定标新方

法与技术,给出了这种新型定标方法在卫星传感器各阶段定标中的具体应用方案。文中所提出的方法已两次成功应用于中国风云二号气象卫星 04 和 05 星发射前外场定标试验,初步试验结果表明,它能有效地提高中国卫星传感器的外场定标精度。

2 基于辐亮度标准探测器的新型光谱辐射标准传递方法

传感器绝对辐射定标实际上是一个建立标准和传递标准的过程,即由较高级的初级标准逐级向较低级的标准传递,直至用户传感器。故,绝对辐射定标的精度取决于两个方面:(1)初级标准本身的精度;(2)辐射标准的传递方法及传递链的长度。

光谱辐射定标和标准传递有 2 种基本方法:一种基于标准辐射源(图 1 左半部所示),其初级标准是根据普朗克定律确定的黑体辐射,传递标准是各种级别的标准灯(可见—短波红外波段)和黑体(热红外波段),这是目前应用最广的传统辐射定标方法;另外一种是在定量化空间遥感需求推动下逐步发展起来的基于标准探测器的新型辐射标准传递方法(图 1 右半部所示),其初级标准是利用电替代测量原理建立的低温绝对辐射计^[1,2],在可见—短波红外采用高稳定的半导体探测器作为传递标准。

图 1 还分别给出了两种光谱辐射标准传递方法及其各级标准不确定度数值,比较二者可以明显看出,相对于传统的基于辐射源的传递方法,新型基于标准探测器的辐射标准的建立和传递,将各级标准的不确定度降低了 1—2 个数量级。如图 2 所示,在基

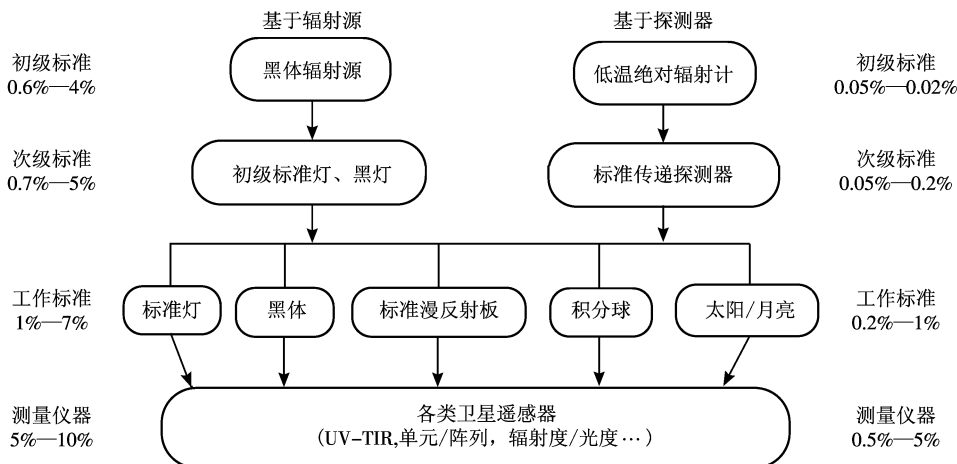


图 1 光谱辐射标准传递方法

Fig 1 Transfer method of spectral radiometric standard

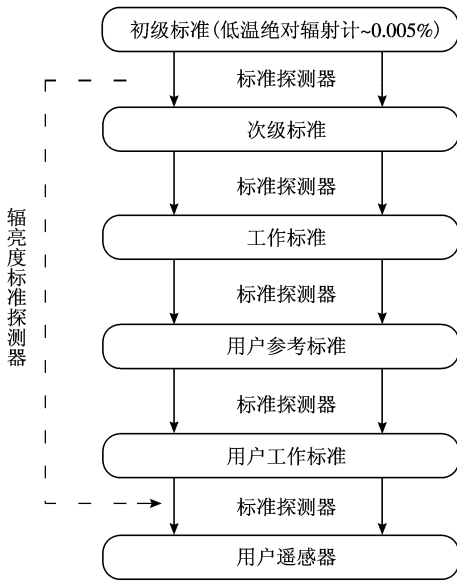


图 2 基于辐亮度标准探测器的光谱辐射标准传递方法
 Fig 2 Radiometric standard transfer method based on radiance standard detector

于辐亮度标准探测器的新型光谱辐射标准传递方法中, 辐亮度标准探测器是目前精度最高的标准传递装置, 它可以直接联系低温绝对辐射计等初级辐射标准与各级工作标准及用户标准, 从而大大缩短了初级辐射标准与工作标准及用户标准之间的传递链长度^[3], 使最终传递至用户遥感器的辐射标准不确定度明显降低, 达到有效提高遥感器绝对辐射定标精度的目的。

如上所述, 基于辐亮度标准探测器的高精度绝对辐射定标方法, 由于: (1) 采用了新型基于标准探测器的光辐射标准传递方法, 其初级标准及各级标准本身的不确定度都远优于传统方法; (2) 辐亮度标准探测器使辐射标准传递链的长度大大缩短。因而, 根据辐射标准传递及不确定度累积原理, 基于辐亮度标准探测器的高精度绝对辐射定标方法可以大大提高卫星遥感器的绝对辐射定标精度。事实上, 传统基于辐射源的定标方法, 定标卫星遥感器时不确定度约为 4%—5% (可见光波段), 红外波段约为 8%—10%; 而基于辐亮度标准探测器的定标方法, 可将不确定度降低到约 2%。

3 辐亮度标准探测器的绝对量测量原理

辐亮度标准探测器的设计是基于三片反射式

Trap探测器设计而成的。三片反射式 Trap探测器是由三片硅光电二极管按照一定的空间结构组合而成的一种复合型光电探测器, 其结构如图 3 所示^[4]。入射光在三个光敏面上依次经历了 5 次反射后沿原路返回, 这种设计结构使得入射光经过多次反射后, 几乎完全被光电二极管吸收, 加之其光谱响应范围宽、光谱灵敏度高、偏振态无关等诸多优良的性能, 使 Trap探测器非常适合作为光辐射功率标准探测器。图 4 为本课题已经研制成功的基于上述结构的三片反射式硅陷阱探测器 Trap的实物照。

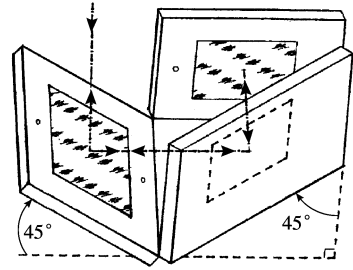


图 3 硅陷阱探测器 (Trap) 工作原理图
 Fig 3 Geometry of Trap detector

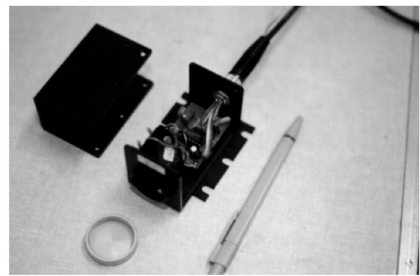


图 4 硅陷阱探测器 (Trap) 实物照
 Fig 4 The photo of Trap detector

搭建图 5 所示的实验装置, 通过低温绝对辐射计对硅陷阱探测器 Trap进行绝对辐射标定, 得到 Trap绝对功率响应率, 这样 Trap即成为一个光辐射功率标准探测器, 可用于光辐射功率的绝对量测量。已研制成功的 Trap光谱辐射功率标准探测

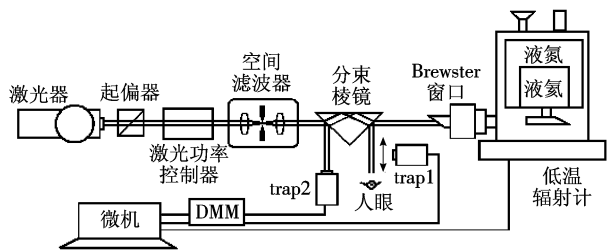


图 5 低温绝对辐射计标定陷阱探测器 Trap实验装置
 Fig 5 Experiment setup of trap detector absolute calibration against cryogenic radiometric

器,在可见光短波红外波段相对于低温绝对辐射计作了绝对辐射定标,不确定度达到了 0.035% 之高^[5]。

依据辐射功率和辐亮度的定义,辐射功率(辐射通量) ϕ 指单位时间 d 通过某空间位置辐射能 dQ 有:

$$\phi = dQ/dt \quad (1)$$

辐亮度 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 $dS \cos\theta$ 上的辐射通量 $d\phi$, 有:

$$L = d\phi / d\Omega \cdot dS \cdot \cos\theta \quad (2)$$

对比以上辐射通量与辐亮度定义式的区别,可以看出,相对于辐射通量,辐亮度的定义式中仅多了一个几何因子 ($d\Omega \cdot dS \cdot \cos\theta$), 而该几何因子实际上是由入射孔径和立体角共同决定的。即,辐亮度的测量相对于辐射通量的测量,仅多了一个由入射孔径和立体角共同决定的几何因子的精确测定。

这样,在用于辐射通量绝对量测量的 Trap 入射光路前方,加入一个可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精确测定后,辐射功率标准探测器即转换成了辐亮度标准探测器。辐亮度标准探测器的设计结构如图 6 所示。

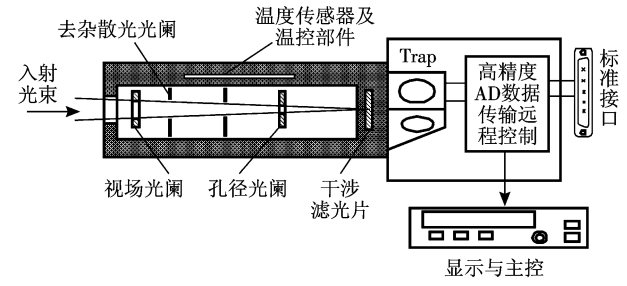


图 6 辐亮度标准探测器设计结构

Fig 6 Schematic diagram of radiance standard detector system

图 6 所示的辐亮度标准探测器,其光学部分可简化为图 7 所示的主要光路。图中, $2\theta_a$ 和 $2\theta_v$ 分别是孔径全角和视场全角; D 是物面 (Target) 与孔径光阑 (Aperture) 的间距; H 为视场光阑 (FOV stop) 与孔径光阑 (Aperture) 的间距; 视场光阑直径为 $2b$ 孔径光阑的直径为 $2a$ 。

辐亮度标准探测器接收到的辐通量 P 为:

$$P = I_\theta \cdot S \cdot \omega_0 \quad (3)$$

式中, I_θ 是与方向及视场中位置均无关的常数辐亮度 (理想漫射体), S 是视场面积, ω_0 是孔径光阑对

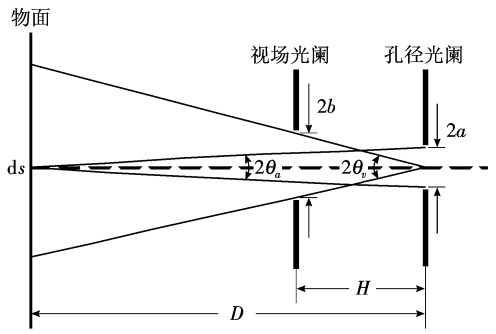


图 7 辐亮度标准探测器主要光路图

Fig 7 Schematic diagram of radiance standard detector critical optical components

物面中心所张的立体角,由于 $D \gg 2a$, 视场内所有点的孔径立体角都近似等于 ω_0 。

$$S = \pi (D \cdot \tan\theta_v)^2 \quad (4)$$

由于 $D \gg a$, 故有:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot a^2}{D^2} \quad (5)$$

于是

$$P = I_\theta \cdot \pi^2 \tan^2\theta_v \cdot a^2 \quad (6)$$

上式中的 I_θ 和 P 应该分别是目标的光谱辐亮度 $I_\theta(\lambda)$ (单位 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot m^{-1}$) 和入射到辐亮度计入瞳处的光谱通量 $P(\lambda)$ (单位 $W \cdot m^{-1}$)。在辐亮度标准探测器前安装干涉滤光片,构成波段式辐亮度标准探测器,则在滤光片的带宽内,辐亮度标准探测器接收到的辐通量为

$$P_\Sigma = \int P(\lambda) T(\lambda) d\lambda = \pi^2 \tan^2\theta_v a^2 \int I_\theta(\lambda) T(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

式中, $T(\lambda)$ 为干涉滤光片的光谱透过率。

考虑到 Trap 光辐射功率标准探测器的辐通量响应率 $R(\lambda)$, 则基于 Trap 的辐亮度标准探测器的输出电压 V 为:

$$V = \int P(\lambda) T(\lambda) R(\lambda) d\lambda = \pi^2 \tan^2\theta_v a^2 \int I_\theta(\lambda) T(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

由于 $\tan\theta_v = \frac{b}{H}$ 式中 b 为视场光阑半径, H 为视场光阑和孔径光阑的间距,故上式可写为:

$$V = \frac{\pi^2 \cdot a^2 \cdot b}{H^2} \int I_\theta(\lambda) T(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

假定,在较窄的带宽 (如 10nm) 内 $L(\lambda)$ 的色温分布可忽略,即 $L(\lambda)$ 在较窄带宽内可当作一常量处理时,则上式可写为:

$$V = \frac{\pi^2 \cdot \hat{a} \cdot \hat{b} \cdot L(\lambda)}{H} \int T(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

这样, 在滤光片的带宽内, 辐亮度标准探测器的等效辐亮度 L 可写为:

$$L = \frac{VH}{\pi^2 \cdot \hat{a} \cdot \hat{b} \int T(\lambda) R(\lambda) d\lambda} = \frac{H}{\pi^2 \hat{a} \hat{b}} \cdot \frac{V}{\int T(\lambda) R(\lambda) d\lambda} \quad (11)$$

令 $\frac{H}{\pi^2 \hat{a} \hat{b}} = A$ 则

$$L = A \cdot \frac{V}{\int T(\lambda) R(\lambda) d\lambda} \quad (12)$$

上式即为辐亮度标准探测器的绝对辐亮度测量方程。式中 A 为几何因子常数, 由孔径光阑半径 a 、视场光阑半径 b 及孔径光阑与视场光阑的间距 H 共同确定; V 为辐亮度标准探测器的输出电压值, 可采用高精度电压表测得; $R(\lambda)$ 是 Trap 光功率标准探测器的光谱响应率, 由图 5 所示实验装置精确标定; $T(\lambda)$ 是滤光片的光谱透过率, 由图 8 所示的双光栅单色仪系统精确测得。

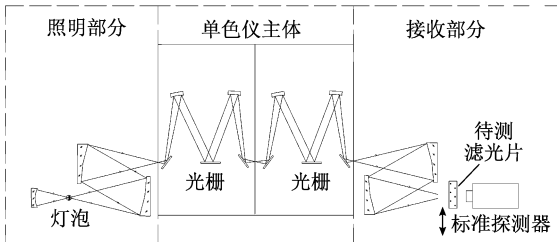


图 8 滤光片光谱透过率测定装置

Fig 8 Measurement setup of filter transmission

最终所设计的辐亮度标准探测器如图 9 所示, 其主要性能指标如表 1。



图 9 辐亮度标准探测器实物照

Fig 9 Photo of radiance standard detector

表 1 多波段辐亮度标准探测器主要设计指标
Table 1 Design specification of radiance standard detector

波段范围	350—1000nm
波段数	8
带宽	10 nm
绝对不确定度	<2%
温度系数	<0.1%/°C
动态范围	2个量级以上
功耗	600mW
温控	PD控温: ±0.1°C
显示	VFD荧光显示屏
接口	RS32C
体积	230mm×200mm×240mm(含电源及控制部分)
重量	5kg(含电源及控制部分)

4 基于辐亮度标准探测器的绝对辐射定标新方法实施方案

4.1 实验室定标

目前, 中国遥感器的实验室定标, 通常都采用图 10(a)所示的“积分球→星载传感器”的基于辐射源定标方式。其传递链可描述为“黑体→标准照度灯→光谱辐射计→传递积分球→末级积分球→星载传感器”。这种方法的最终不确定度来源是“标准照度灯→末级积分球”这一环节。由于引入了辐照度→辐亮度的物理量转换、几何尺寸的近似, 以及光谱辐射计的误差等因素, 末级积分球辐亮度的最终不确定度大约为 4%—5% (可见波段), 在红外波段约为 8%—15%。根据对多年定标数据的分析, 由末级积分球自身的空间均匀性和稳定性所引入的不确定度仅占了不到 1%。可见, 为了提高末级积分球辐亮度的最终精度, 最重要的是要降低末级积分球绝对辐亮度的不确定度。

图 10(b)所示的基于辐亮度标准探测器的新型实验室定标方法, 可将末级积分球的综合不确定度降低到约 2%, 实现对末级积分球绝对辐亮度的高精度测量。这种定标方法, 其标准传递过程可以描述为“低温绝对辐射计→辐亮度标准探测器(基于陷阱探测器)→末级积分球→星载传感器”。精度的提高一方面是由于采用了高精度的探测器标准,

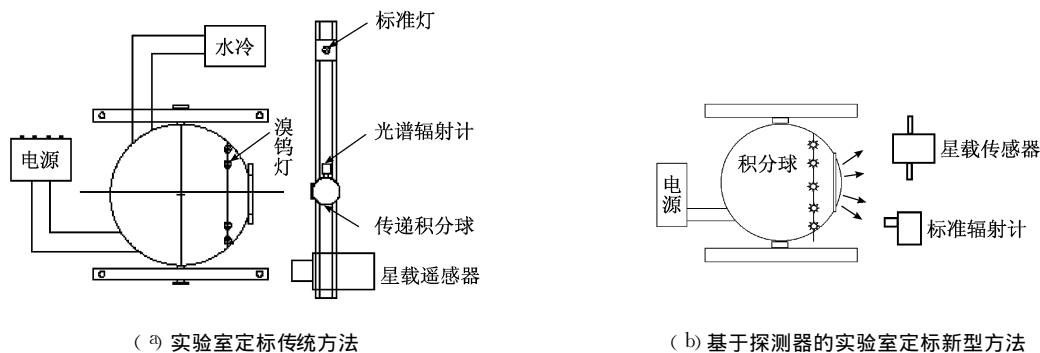


图 10 实验室定标方案

Fig 10 Method of laboratory calibration

另一方面，“辐亮度→辐亮度”的物理量直接比较，明显减少了标准传递的环节。这种方案也为定标系统的工程实用化提供了很好的技术可行性。标准探测器不需要大功率的电源，也不需要漫射板、光谱辐射计等一系列中间设备，因此定标工作不再依赖于标准实验室内的复杂保障条件，可以在预研、工程研制、发射前的总装车间里随时进行。这种新型实验室定标方法已在 SeaWiFS^[6]、LandSat EIM+、SMBIOS和 EOS^[7-9] 计划中的多个星载传感器实验室定标中得到多次成功应用。

4.2 星上定标

早期的星上定标，基本上沿用如图 11(a)所示的“灯+漫射板”基于辐射源的定标方式，它用标准照度灯通过反射率已知漫射板将辐照度转化为辐亮度，对传感器进行定标。这种方法的重要缺陷是：(1)由于灯和漫射板位于卫星平台内部，无法置于整个光路最前端，只能从光路中间某个部位切入，不能进行全光路定标，无法评估未标定到的光路中光学元件变化；(2)标准灯与太阳光谱分布差异较大，致使定标结果产生较大偏差，必须进行光谱匹配校正。

正。作为改进方案，将漫射板置于卫星外部整个光路的最前方，采用可展开和收起的机械结构，即如图 11(b)所示的“太阳+漫射板”的星上定标方式。该方法利用太阳辐射可根据日地距离计算并且保持相对稳定的特点，用太阳辐射取代标准灯，与漫射板一起，构成绝对基准。这种方法很好地解决了全光路定标和光谱分布差异的技术难题。

然而，“太阳+漫射板”的定标方式，其绝对基准依赖于太阳辐射的稳定及漫射板反射率稳定两个前提条件。漫射板在外太空强紫外照射下，其制作材料会逐渐发生分解，其次航天器的排出物也会污染漫射板表面。这些因素都会导致漫射板反射率变化，带来辐射定标的误差。这些误差是基于辐射源的定标方法本身无法消除的。

基于辐亮度标准探测器的新型星上定标方案(图 12)，可从根本上克服基于辐射源定标法精度难以实质性提高的缺陷，彻底解决“太阳+漫射板”星上定标方案中漫射板反射率变化的难题。该方法借鉴了可收放式漫射板能够全光路定标的优点，采用日光作为辐射源(在动态范围的低端可采用月光)，解决了光谱差异问题。其绝对标准不依赖于

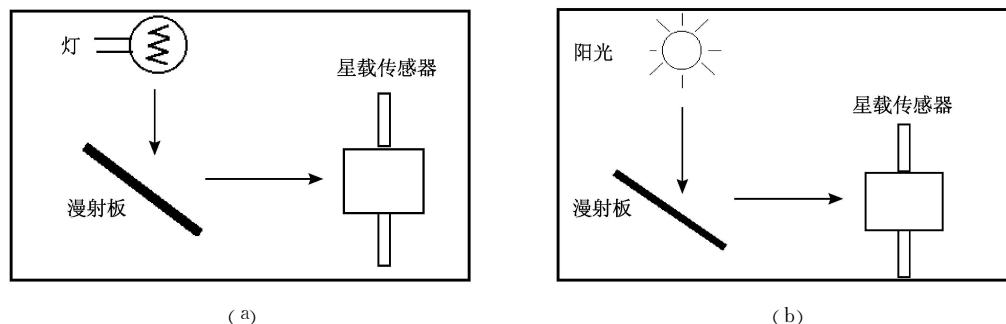


图 11 星上定标传统方案

Fig 11 Traditional method of onboard calibration

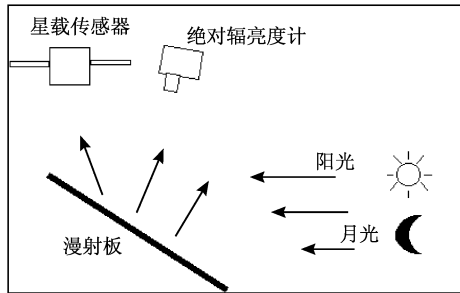


图 12 基于辐亮度标准探测器的新型星上定标方案

Fig 12 Novel method of onboard calibration based on radiance standard detector

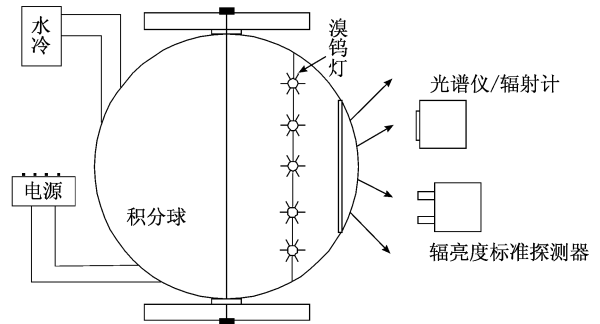


图 13 用于外场替代定标的光谱仪实验室定标方案

Fig 13 Method of radiance standard detector used to calibrate vicarious calibration instruments

漫射板和太阳(或月亮)辐射数据, 而由星上绝对辐亮度计提供。这种定标方法不必担心太阳辐射变化会对定标结果带来误差, 同时解决了漫射板反射率变化的难题。

新型基于标准探测器的星上定标方法, 其绝对标准依赖于辐亮度标准探测器。标准探测器为全固化结构, 采用成熟的半导体器件, 国外相关研究表明^[8,9], 其温度系数、响应长期稳定性和抗辐照性能等方面均可满足工程应用需求。从整体上考虑, 基于辐亮度标准探测器的星上定标方法传递环节较少, 精度较高, 长期稳定性更好, 体积、重量和功耗相对较低。上述诸多优点, 都为基于辐亮度标准探测器的新型星上定标方法的工程实用化提供了很好的技术可行性和保证。美国喷气推进实验室在其 1999 年底开始运行的多角度成像光谱仪(MISR)上, 即采用了这种新型星上定标方案^[10], 共安装了 4 只辐亮度标准探测器, 分别提供 4 个波段的绝对辐亮度标准。其 3 年间的不确定度约为 3%, 是目前所有在轨星载遥感器中绝对精度最高的。事实上, 如此高的绝对定标精度和长期稳定性, 也是基于辐射源的定标方法无法达到的。

4.3 外场替代定标

卫星遥感器开展外场替代定标试验时, 需采用多种光谱辐射计, 用于卫星过顶时进行地表参数同步观测。试验前后需要对这些光谱辐射计在实验室精心进行辐射定标^[11], 目前中国仍采用的是图 10(a)所示的传统定标方法, 与实验室定标同理, 基于辐射源的定标方法, 辐射标准传递链长, 精度难以提高。采用图 13 所示的基于辐亮度标准探测器的定标方法, 可以明显提高用于外场替代定标的光

谱辐射计实验室定标精度, 从而达到有效提高外场替代定标精度的目的。

5 实际应用

2004 年 3 月和 2004 年 7 月, 采用文中所提出的这种绝对辐射定标新方法, 对中国气象卫星“FY-2”04 星和 05 星的多通道扫描辐射计, 分别在昆明进行了两次发射前的外场定标试验。试验中采用了“多波段辐亮度标准探测器+连续光谱测量仪器(如 ASD 等)”的方式, 依次观测反射率不同的多块灰阶漫射板, 对“FY-2”扫描辐射计进行了辐亮度法定标。

常规的辐亮度法定标中, 为保证定标精度, 试验前后通常采用“辐照度标准灯→漫反射板”的标准传递过程对 ASD 进行标定, 由于涉及辐照度→辐亮度的物理量转换, 以及反射比、立体角、视场的近似处理等诸多因素影响, 使 ASD 自身标定的不确定度高达 4%—5% 左右, 这样采用 ASD 对遥感器进行辐亮度法定标时, 其不确定度会更大, 精度很难提高。本试验中以多通道辐亮度标准探测器在多个波长点上给出的绝对辐亮度值, 在试验中对 ASD 进行实时绝对标定, 进而对“FY-2”扫描辐射计完成辐亮度定标。扫描辐射计入瞳处辐亮度的不确定度分析见表 2 可以明显看出 ASD 的绝对标定不确定度明显降低, 最终的联合不确定度也大大降低了。

以上仅是基于辐亮度标准探测器的绝对辐射定标新方法在“FY-2”卫星 04 星和 05 星发射前外场绝对定标中的一个实际应用案例, 可以看到该方法应用于卫星遥感器的绝对辐射定标中, 有效提高了定标精度, 显现出了潜在的应用价值。

表 2 FY-2多通道扫描辐射计入瞳处辐亮度定标的
不确定度分析

Table 2 Uncertainty analysis of radiance calibration for
FY-2 multi-channel scan radiometer

不确定度来源	不确定度 U/%
多波段辐亮度标准探测器对 ASD实时绝对标定	1.5—2.5
ASD测量重复性	0.7
ASD波长位置	0.8
波长配准误差	1.8
ASD线性	2
漫射板均匀性	2
漫射板朗伯性	2
同步非一致性	3
太阳常数引入误差	2.5
联合不确定度	6.0—6.2

注:该不确定度分析中,将天气、环境、扫描辐射计视场匹配、漫射板更换位置的位移、水平不一致、ASD的对准及人工遮挡抖动等因素全部归结到了漫射板的不确定度因素中。

6 结 语

文中提出了一种基于辐亮度标准探测器的高精度绝对辐射定标的先进方法与技术,系统介绍了这种新型定标方法的辐射标准传递方法及其工作原理,并给出了该方法在卫星遥感器各阶段定标中的具体实施技术方案。该新型定标方法被成功应用于中国“FY-2”气象卫星04和05星的发射前定标试验中,有效提高了其外场定标精度,显现出独特的技术优势,这也是国内首次将这种先进定标方法实际应用于卫星遥感器定标中,该技术为提高中国光学遥感器辐射定标精度技术提供了新的技术途径。

参 考 文 献 (References)

[1] Martin J E, Fox N P, Key P J. A Cryogenic Radiometer for

Absolute Radiometric Measurement [J]. Metrologia, 1985, 21 (3): 147—155

[2] Fox N P, Harrison N J, Hunt T M, et al. Improved Transfer Standard Sources for Calibration of Earth Observation Instruments [J]. Proc SPIE, 2002, 4483: 176—184

[3] Fox N P. Primary Radiometric Quantities and Units [J]. Metrologia, 2000, 37: 507—513

[4] Li Z Z, Zheng X B, Wu H Y, 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.]

[5] Zheng X B, Wu H Y, Zhang J P, et al. Absolute Spectral Responsivity Standard Detectors with Uncertainty Less Than 0.035% [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 21(6): 749—752. [郑小兵, 吴浩宇, 章骏平等. 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, 2004, 21(6): 749—752.]

[6] Johnson B C, Fowler J B, Croner C L. The SeaWiFS Transfer Radiometer [R]. NASA Technical Memorandum 1998—206892, Volume 1

[7] Johnson B C, Brown S W, Fppeklauer G P, et al. System-level Calibration of a Transfer Radiometer Used to Validate EOS Radiance Scales [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(2): 339—356

[8] Kurbashev T K, Akhmedov M, Manoochev F, et al. Spectral Irradiance Measurements of Tungsten Lamps with Filter Radiometers in the Spectral Range 290 nm to 900 nm [J]. Metrologia, 2000, 37: 305—312

[9] Carlos B, Joquera Virginia G, Ford Valerie G, Duval et al. State of the Art Radiometer Standards for NASA's Earth Observing System [R]. NIST Technology Report, 1995

[10] Carol J, Bruegge Valerie G, Duval Nadine L, Chrien et al. MISR Pre-launch Instrument Calibration and Characterization Results [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1186—1198

[11] Slater P N, Bregar S F, Horn R G, et al. Reflectance and Radiance-based Methods for the in-flight Absolute Calibration of Multispectral Sensors [J]. Rem Sens Environ, 1987, 22: 11—27