

用于光谱基准定标传递技术的传递辐射计研究综述

赵维宁^{1,2}, 方伟², 姜明², 骆杨², 王玉鹏^{2*}

1. 中国科学院大学, 北京 100049

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 传递辐射计是实现卫星遥感仪器在轨光谱辐射定标传递的核心设备,也是地面实验室高精度光谱定标系统的关键。介绍了不同机构研制的覆盖 350~700, 700~2 500 nm 谱段的多个传递辐射计的结构组成、工作原理及辐射定标基准传递方式,及其异同点的比对,再通过它们在不同谱段的定标过程中所应用的关键技术的分析,说明每种技术的优缺点和所能达到的精度,及其应用条件。文中通过对国际上标准计量机构采用的光谱辐亮度基准定标传递过程的介绍,突出了传递辐射计系统的重要作用,再结合其对光谱仪等遥感器定标光源的定标监测应用,说明了传递辐射计在航天辐射定标领域的不可或缺性。最后,通过国内设计的新型传递辐射计的介绍,对传递辐射计未来研究的发展方向 and 关键问题进行了展望,并对传递辐射计搭配低温辐射计组成的未来实现可溯源国际单位制在轨基准定标传递系统所存在的研究难点予以预测分析。

关键词 传递辐射计; 光谱辐射基准传递链; 光源定标监测; 可溯源 SI 在轨定标

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)09-2984-07

引言

对于卫星遥感器而言,光学方面的辐射定标是重要环节,辐射定标的精度直接决定了遥感器获得数据的使用价值。各国的宇航部门对所有研制应用的遥感器的定标工作都非常重视,美国 NASA 对 SeaWiFS 和 MODIS 等项目的仪器载荷要求获得 15 年的良好定标数据^[1],而中国风云系列气象卫星的辐射定标要求是至少稳定监测 8 年。严格的定标要求使得探测器-对探测器的定标方式得到关注,其中可见到短波红外波段(350~2 500 nm)的光谱定标应用广泛,涉及用积分球和卤钨灯做发射前定标;用积分球、卤钨灯和太阳能漫反射板做在轨定标;通过地面或飞行器测量数据的飞行替代定标^[1]。在这些应用中,传递辐射计在多个方面起到了重要作用。

传递辐射计的概念由 NASA 在 SeaWiFS(the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)项目中提出,它可以用来检查卫星遥感器发射前定标用的积分球及其再定标^[2],SeaWiFS 传递辐射计(SXR)的研发目的是实现 SeaWiFS 项目的循

环定标。SXR 的成功研制,使得在其他地球观测系统(EOS)设备中陆续启用了以此为参考原型的传递辐射计来进行相关的光谱辐射定标应用。传递辐射计应用于遥感器校准领域时,有着多方面的优势:它可以提供独立的发射前定标源,也可以对实验室光源性能进行随时监测以得到置信度高的定标结果,并用来对光源自身进行光谱辐照度和辐亮度的绝对定标;由于传递辐射计所具备的便携性还可以允许其在各种遥感器和辐射计之间进行交叉定标,交叉定标有助于从发射前测试中确定遥感器的地面和在轨定标补偿,传递辐射计可持续 10 年交叉定标多个遥感器。此外,传递辐射计可以确定卫星下传数据的辐射量尺度,减少甚至消除定标误差。

通过介绍不同机构开发研制的覆盖可见及短波红外谱段的多个传递辐射计的结构组成、工作原理、仪器定标及定标传递和不确定度水平等方面的相关技术,对它们各自功能特性的异同点进行对比说明,并展望了未来传递辐射计的设计及应用发展方向。最后结合当前国际上对在轨辐射定标的高精度需求,配合可溯源国际基本单位制(SI)在轨基准源的研制及溯源传递链搭建的热点问题,提出传递辐射计应用于在轨绝对定标的前景趋势和需要重点研究的难点问题。

收稿日期: 2015-04-28, 修订日期: 2015-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41474161), 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2015AA123703)和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所领域前沿创新项目(Y3CX1SS14A)资助

作者简介: 赵维宁, 1989 年生, 中国科学院大学博士研究生 e-mail: acgdream@126.com

* 通讯联系人 e-mail: wangyp@ciomp.ac.cn

1 应用于 NASA 的 EOS 项目的传递辐射计

1.1 EOS 项目使用的传递辐射计

美国 NASA 的 EOS 项目于 1991 年开始实施,意在通过不同系统平台的卫星载荷实现对地球表面、大气、环境和资源等领域进行详细深入的系统化科学探测,加深人们对所生存的地球及其周遭变化的理解认知。目前 NASA 已成功发射了种类众多的相关卫星仪器,它们都需要进行完善的发射前和在轨定标监测,美国国家标准技术研究所(NIST)受 NASA 委托,根据每个项目各自的特殊需求设计了多个原理类似但功能细节不尽相同的传递辐射计,包括为 SeaWiFS 系列卫星循环定标而研制的 SXR、为 SIMBIOS 项目制造的 SXRII,为 MODIS, ASTER 和 MISR 等成像光谱仪可见波段光谱定标设计的 VXR 以及为 Landsat ETM+ 仪器各波段对应开发的 LXR 等^[3-4]。这些传递辐射计都采用通道式滤光片配合光电探测器的测量原理,覆盖 400~900 nm 波段范围,它们自身的光谱辐射定标也利用 NIST 的相关基准及定标传递系统完成。上述各传递辐射计大多以 SXR 为原型设计,下文以 SXR 为例对其测量原理、结构设计以及性能表现的定标方法进行概述。

1.2 SXR 测量原理及结构设计

SXR 是多通道成像辐射计,用来校验和测量比对 SeaWiFS 中的多个标定源所产生的可见和近红外范围内的六个离散波段的光谱辐亮度^[5]。同时, SXR 也用来将 NIST 的光谱辐亮度标准传递到这些标定源上。SXR 的六个独立光路采用独特的光学设计,利用干涉滤光片进行光谱筛选,具有稳定可靠的特点,覆盖 412~775 nm 光谱范围,光辐射来自积分球和被照亮的漫反射板,依据测量方程将直流电压与光源的光谱辐亮度相关联。该设计使 SXR 多通道公用一个光源,测量观测光源的同一区域,每个通道可以对 SXR 视场范围内对应该通道的唯一立体角的光线进行采样,从而利于对空

间均匀的朗伯光源进行测量,实现所有通道同时采样,但会导致各通道的光通量有所减少, SXR 的结构设计如图 1 所示。

1.3 SXR 定标方法介绍

SXR 可以用来对积分球光源做辐亮度定标,使用前,需要对其自身性能进行一系列的标定测试。NIST 采用两种不同的方法对 SXR 进行定标,一种使用典型白炽灯照明积分球,一种使用激光照明积分球。白炽灯照明积分球光源的光谱辐亮度定标在 NIST 的 FASCAL 上完成^[6],该设备可溯源至金点黑体的可变温黑体基准。NIST 利用(spectral comparator facility, SCF)对 SXR 的相对光谱响应进行测量^[7],利用定标过的积分球光源对 SXR 的绝对光谱辐射亮度响应灵敏度进行标定,最终由定标测量方程得到总响应函数,此方法得出的 SXR 测量定标不确定度在 0.5% 左右。激光照明积分球光源可以覆盖 0.2~20 μm 的光谱范围,这种光源被应用在 NIST 的(the spectral irradiance and radiance response calibrations with a uniform source, SIRCUS)设备上^[8]。一系列激光被导入积分球,用作均匀单色的朗伯光源来对辐照度和辐亮度响应定标。SIRCUS 装置的定标方法是基于探测器的直接替代法,其精度可溯源至 NIST 的 HACR 基准,由此获得的最终标准不确定度是 0.25%。影响 SXR 定标测量不确定度的因素主要包括,各部分测量精度对整体的亮度响应的贡献,以及测量的重复性、再现性和热效应及任何探测器的老化引起的额外不确定度。

2 短波红外 SWIR 传递辐射计

2.1 亚利桑那大学 RSG 开发的传递辐射计

美国亚利桑那大学(UA)光学科学中心遥感组(RSG)是美国权威的定标机构之一,参与了 NASA 多个航天项目的辐射定标工作。RSG 一直致力于高精度实验室定标的工作,可重复使用的高精度传递辐射计作为定标的重要部分被开发, RSG 主要利用 VNIR 和 SWIR 辐射计对实验室光源进行性能监测,同时对光源进行光谱辐照度和辐亮度的绝对定标,并利用插值算法将多光谱测量转变为超光谱水平光源定标^[9]。RSG 从 1990 年至今共开发设计了两代传递辐射计,第一代包括 VNIR 和 SWIR 两台传递辐射计,其中 VNIR 覆盖 400~1 050 nm 波段,利用 Si 陷阱探测器,注重热稳定性控制、低噪声电子信号采集和高精度光机系统设计;而 SWIR 覆盖 700~2 500 nm 波段,采用 InSb 探测器,利用液氮杜瓦制冷技术配合低温滤光片和斩光器的设计来获得近红外波段辐射量的高精度测量。第二代传递辐射计是在第一代的基础上,配合电子学、光学和机械设备最新的发展,在多方面进行了技术升级,使其具备了更强的自动化操控运行能力、更好的便携性以及更合理的光谱通道选择和更精确的超光谱辐射定标转换插值算法,迎合了客户更高的需求。

VNIR 和 SWIR 传递辐射计之间许多相同的特性都被作为传递辐射计的设计标准,包括无动力 FOV 设计、光谱选择的窄带滤光片转轮设计、多数敏感组分的热控制和探测器信号放大电路设计等。VNIR 传递辐射计在整体设计上与

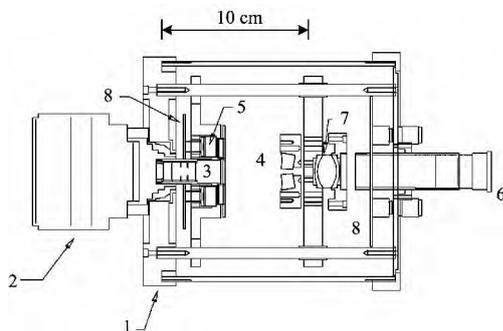


图 1 SXR 剖视图

1: 三脚架安装点; 2: 焦距物镜; 3: 精密视场孔径光阑; 4: 楔形折叠镜; 5: 干涉滤光片和探测器; 6: 准直调整目镜; 7: 转像透镜组; 8: 电路板

Fig 1 Cut away schematic of the SXR

1: Mounting point for the tripod; 2: Focal length objective lens; 3: Precision field stop aperture; 4: Wedge-shaped fold mirrors; 5: Interference filter and detector; 6: Alignment eyepiece; 7: Alignment relay lens; 8: Circuit boards

SXR 类似，二代升级集中在各部件产品的直接换新上。而 SWIR 辐射计的升级过程中却需要采用较多的技术革新^[10-11]，下文对 SWIR 辐射计的测量原理、结构设计、性能表现及定标方法做概括介绍。

2.2 SWIR 传递辐射计结构功能及定标方法

SWIR 辐射计的整体设计如图 2 所示，定标测量时，光线从左侧入射，穿过前级孔径盘的孔径传播到斩波器系统，斩波器可以将入射光接收频率调制到一个常数，之后入射光经过滤光片转轮的 9 个可调带通滤光片之一，进入由液氮制冷的杜瓦瓶并照射在 InSb 探测器上^[1]，最终输出信号由 CMOS 放大器及数字锁相放大器(LIA)配合斩光器的参考频率，对所需电信号进行过滤、放大及编码。由于定标波段的不同，SWIR 传递辐射计与可见近红外波段传递辐射计(如 SXR 和 VNIR)的设计差别主要体现在：为低温条件设计的三组过滤器和特殊为滤除背景信号而设计的斩光器。其中三组过滤器是指杜瓦窗口、低温过滤器和带通滤波器。杜瓦窗口利用增透膜对波长 700~2 500 nm 波段进行选择，低温过滤器主要通过 5 片滤波板光阑的设计减少杂散光、背景热辐射和系统的水汽，带通滤波器由于光谱带宽很窄所以主要用来决定光谱响应度。

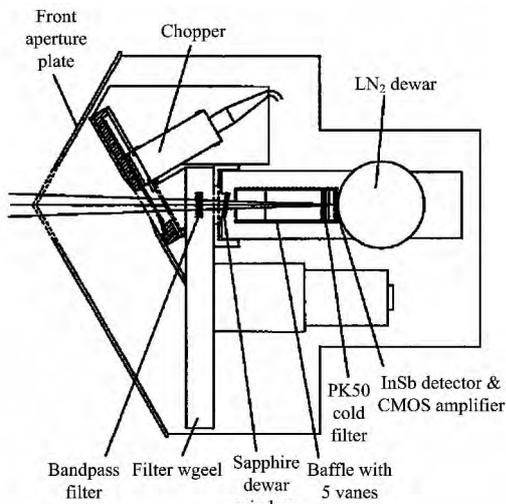


图 2 SWIR 传递辐射计结构组成示意图

Fig 2 SWIR transfer radiometer schematic of configuration

在第二代 SWIR 传递辐射计的升级设计中，最核心的改变是利用封装好的 TE 制冷的 InGaAs 探测器单元替换了整套杜瓦液氮制冷 InSb 探测器系统，提升了仪器的便携性及自动化操作程度。但是由于采用上述方案，导致了仪器整体的制冷能力大幅下降，制冷温度由 77 K 上升至 258 K，并且只能对探测器制冷而不能对光阑和窗口等背景热源制冷，所以信噪比下降严重，因此加入了聚光抛物面镜来加强滤光片输出在 InGaAs 探测器上的光功率，增强了测量信噪比。第二代辐射计基于对超光谱曲线重构的优化算法模型，选择了 10~12 个滤光片波段，利用遗传算法对 1 nm 分辨率超光谱曲线进行插值计算，得到了重构误差 0.22%~0.43% 的拟合曲线^[12]。不过若不考虑便携性和自动化操控，第一代辐射计

由于所用制冷系统的优势，拥有更好的测量定标精度。

SWIR 传递辐射计采用光谱辐亮度的定标方法，利用实验室光谱标准石英卤素灯，将辐射计放置在侧向辐照系统中，用压紧的 Spectralon 漫反射板作为定标反射基准，利用 1 000 W 基准辐射灯测定所有光谱范围内的漫反射板的双向反射系数，最终使反射光以 45°角入射辐射计进行辐亮度定标。该辐射计定标基准传递过程中，不确定度来源主要包括辐射光源的定标、双向反射率的测量、传递辐射计滤波器精度、光源辐照度从定标源传递到探测器的整体不确定性等，最终整体全谱段的定标不确定度均低于 3.9%。

3 传递辐射计在遥感器光谱辐射定标中的应用

3.1 德国 PTB 定标传递链中传递辐射计作用

德国 PTB 作为世界最好的定标机构之一，具备完整的高精度可溯源 SI 基准的绝对辐射定标的传递链系统。PTB 发展了基于光谱辐亮度、辐射强度和辐照度的空间仪器可溯源定标的专用设备和方法，包括 SPICE, SRCF 和 RBCF 三个大型精密的覆盖 0.2~45 μm 光谱段的定标平台^[13]，在相关定标溯源传递过程中，传递辐射计都起到了对辐射光源的定标监测以及不同标准之间的传递作用，以基于光谱辐照度的溯源 SI 的定标传递为例，整体传递链如图 3 所示。

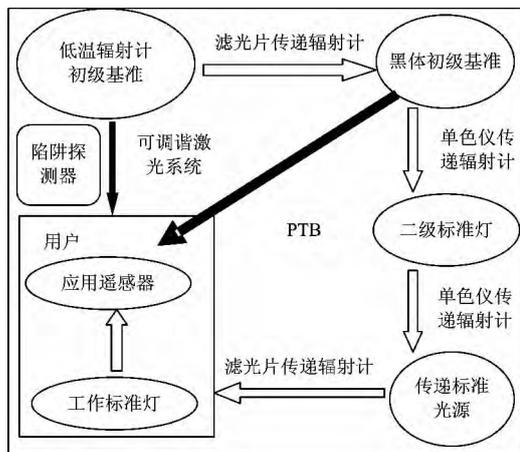


图 3 PTB 基于光谱辐照度定标传递链

Fig 3 The traceability chain for the spectral irradiance in the PTB

基于光谱辐照度的绝对定标溯源到 PTB 的黑体辐射计初级基准，而黑体辐射计的温度是通过滤光片传递辐射计系统测量可溯源至 PTB 的低温辐射计基准。黑体辐射计配合基于双级联单色仪的分光传递辐射计系统对二级标准灯进行定标，二级标准灯被 PTB 用来定标用户的标准灯，用户使用这些被定标的标准灯作传递标准来定标自己的工作标准灯，最后这些工作标准灯被用来定标用户自己的分光辐射计或辐射光源。该传递过程所构建的复杂传递链使得工作标准灯的定标能够达到高要求的低传递不确定度水平，并具备必需的稳定性和可重复性。上述 PTB 利用黑体辐射计所完成的辐

照度定标传递被公认为具有世界最低的拓展测量不确定度(在宽光谱范围内远低于 1%), 甚至可以直接利用黑体辐射计和低温辐射计对用户的工作标准和辐射分光设备进行定标, 这种做法在耗费更多精力和金钱的同时也带来了缩短定标传递链的益处, 可以降低传递过程引入的不确定度, 提高最终测量精度^[14]。

3.2 应用于 RASAT 定标设备的传递辐射计

用于航天项目传感器载荷定标的光源都是要先经过诸如 SRCF 和 RBCF 这样的大型精密平台设备的严格定标后, 才可以使用。但是, 每个光源都有其使用稳定性, 对它们在长时间使用过程中的性能监测就需要利用精确的传递辐射计系统。德国宇航中心 DLR 为了给类似 APEX 和 ARES 这样的空基超光谱成像光谱仪进行定标^[15-16], 建立了最新的光学实验室作为传感器辐射定标基地 CHB 使用^[17]。CHB 为了对传感器的辐射学特性、光谱特性和几何特性进行优化, 开发了 RASTA 系统设备作为最新的辐亮度参考标准, 并且委托 PTB 为它设计了专用的可溯源 SI 的定标技术^[18], 以此提供了多次定标和高精度的监测特性, 使其可以用作辐射光源和传感器定标的可靠标准。CHB 的光谱辐亮度绝对定标可溯源至被 PTB 良好标定的覆盖 350~2 500 nm 谱段范围的积分球光源和配合标准漫反射板使用的二级标准灯, 为了满足大量传感器定标工作的高精度需求, 在对传感器所用的辐射光源(积分球和标准灯等)定标时, CHB 专门设计了一套对其进行稳定性监测的传递辐射计系统, 该系统由 5 个高度稳定的滤光片辐射计组成, 其中每个滤光片辐射计由探测器、信号放大器和温度控制器构成, 利用工作光谱段各不相同的 5 个探测器实现了仪器整体覆盖 350~2 500 nm 谱段范围及 10⁸ 的动态测量范围, 它们均在 NIST 进行了溯源至 SI 的高精度定标^[19]。利用该系统可以随时发现定标光源出现的性能偏差, 以便将其送回 PTB 进行重新标定, 由此形成了一个基于传递辐射计二级标准的可反馈工作标准稳定性的定标传递系统, 实现了可溯源 SI 的高精度定标实时测量的连续性和一致性, 提高了对辐射光源辐亮度基准绝对定标的精度。CHB 未来的绝对辐射定标精度就由该传递辐射计决定, 因此对传递辐射计光谱辐亮度的测量不确定度进行定量研究是未来对 RASTA 这类定标设备升级改造的主要工作^[20]。图 4 展示了 DLR 作为 PTB 的用户方所设计的基于上述辐亮度标准的光谱仪传感器定标溯源传递系统。

3.3 传递辐射计在辐亮度定标传递中的拓展应用

与 DLR 在 CHB 辐亮度定标中所使用的传递辐射计系统类似, 美国 NASA 的戈达德空间中心(GSFC)辐射定标实验室(RCL)为了对其所使用的覆盖可见到短波红外谱段的大型积分球光源进行持续的定标监测, 开发了滤光片传递辐射计监测系统(FRMS)^[21]。FRMS 主要对影响积分球性能表现并作为系统误差源的瞬时稳定性和重复性进行覆盖 400~2 400 nm 谱段范围的实时定标监测, 一旦发现积分球光源输出发生偏差, 就会将相关光源送返回 NIST 进行辐照度及辐亮度的重新定标。FRMS 的整体结构与 UA 的第二代 SWIR 辐射计相似, 由斩光器、TE 制冷 InGaAs 探测器、锁相放大器和包含 11 个光谱通道的滤光片转轮组成, 滤光片中心波长/带

宽(nm)分别为, 410/10, 440/10, 460/10, 640/10, 840/10, 1 050/15, 1 240/20, 1 380/20, 1 640/20, 2 130/30 和 2 210/25, 这种波长选择针对照明灯衰减、积分球内表面涂层老化以及周围环境湿度变化的监测, 该传递辐射计具有噪声控制水平高, 信噪比高的特点, 对光源输出变化的监测可以达到 0.008%~0.013%的水平。同时, FRMS 配合小视场光阑使用可以用来定标测量积分球辐亮度的空间均匀性, 配合偏振薄片可以用来测量光源输出的偏振性以及平板起偏器的透射率。

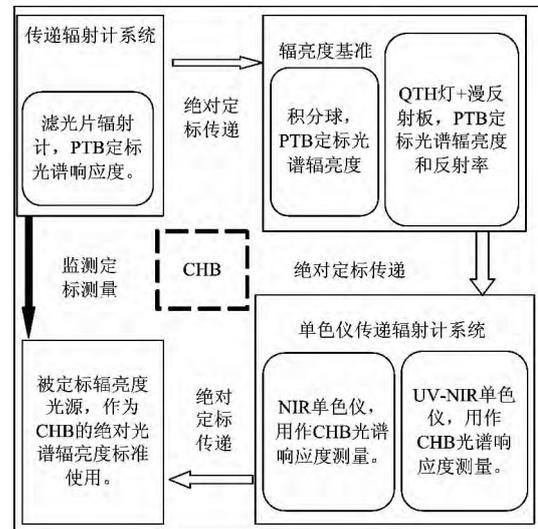


图 4 CHB 辐亮度光源绝对定标传递系统

Fig 4 Transfer system for absolute calibration of radiance sources in the CHB

对高空间分辨率(1 m 以上)的地球观测设备进行发射前的光谱辐亮度定标时, 由于不可能直接利用现有可靠的定标平台对开口直径 2m 的积分球光源进行定标, 所以需要便携可移动的传递辐射计来将小口径积分球标准传递给大口径积分球, 之后再利用它对传感器进行大面积的辐亮度定标, 白俄罗斯 NII PFP BGU 研究院设计了 PVS-02 便携分光传递辐射计来完成上述标准传递过程^[22]。为了适应传感器光谱分辨率越来越高的趋势, PVS-02 采用了基于光栅分光而非滤光片分光的设计原理, 提供了 0.4~1.05 μm 谱段范围 3 nm 的光谱分辨率, 1.05~2.5 μm 谱段范围 10 nm 的光谱分辨率。PVS-02 以上两通道的光学结构设计类似, 整体组成包括入口物镜、入口狭缝、凹面衍射光栅、可转动平面反射镜、衍射级次修正滤光片、探测器及其制冷系统。就全谱段定标精度来说, 在低能量测量模式下, 仪器的信噪比在 50~100 之间(随波长不同而变化); 在高能量模式下, 信噪比可以达到全谱段 500 以上。

4 未来传递辐射计发展趋势及研究展望

从上述国际传递辐射计的发展来看, 在可见及近红外谱段, 经典的滤光片式辐射计设计理念一直得到广泛的应用, 同时为了满足更高分辨率及波长精度的要求, 利用光栅分光

以及傅里叶变换光强分光原理的传递辐射计设计也在最新研究中得到应用^[22-23]。随着光学、电子学、机械及自动化控制领域技术水平的不断发展,传递辐射计的设计正在向着小型便携以及集成系统化两个方向发展,其应用的领域越来越广,可实现功能越来越多。小型仪器适用于不同组织机构间进行相互比对定标的合作项目,微型紧凑的结构特点使得这种传递辐射计稳定便携,从而使其更容易实现保持同一仪器在不同地点定标的连续性的要求。集成化的传递辐射计系统更适合应用于对标准计量实验室使用的严格溯源初级基准定标的积分球等光源进行辐射特性监测,这种系统往往设计精密不易随意移动,具有满足更高测量定标精度需求的能力。虽然上述不同类型的传递辐射计应用领域有所不同,但是随着相关器件加工和测量等技术水平的不断提高,无论大型还是小型的传递辐射计都将具备更宽的光谱覆盖范围、更高的光谱分辨率、更高的信噪比以及更精确的超光谱拟合响应度曲线等特性,并达到可溯源至 SI 的满足更高应用需求(例如环境监测)的低不确定度水平^[24]。为适应这样广泛的应用需求,传递辐射计的研究应集中在以下几个重点方面。

(1) 从传递辐射计概念提出至今的 20 年间,传递辐射计所依据的测量理论已经相当成熟,当前对传递辐射计的研究重点已经从可实现功能的初级设计阶段转向了根据不同定标测量的应用要求进行优化定制的层面,并逐步向更成熟的商业化方向发展,不断开发以传递辐射计为核心辅以其他设备共同进行多样科学测量的更广泛的应用领域。同时,未来会采用更先进的方法对传递辐射计性能进行高精度的定标,并对其使用系统级和分量级定标方法配合在一起的不确定度及性能表现的评价方式会成为研究焦点。

(2) 目前的传递辐射计主要对星上定标光源进行定标,而星上诸如积分球光源等光源都是以高温黑体辐射为基准的。由于卫星受到复杂的空间宇宙环境的影响,定标的不确定度很难突破 5% 的限制。为了使传感器获得更精确的光学电子学信息,国际上正在讨论尝试将低温辐射计发射入太空,建立空间基于低温辐射计的辐射定标计量实验室。空间辐射定标基准传递链与当前地面基于低温辐射计定标的基准传递装置是有较大差别的,因此未来将会设计与积分球光源集成在一起的新型传递辐射计系统来配合空间低温辐射计使用,由此建立的定标传递链及不确定度的分析研究将是重点方向。

(3) 利用传递辐射计结合低温定标技术,在太空搭配低温辐射计作为功率基准使用,以太阳光作为恒定光源,由此完成卫星传感器的在轨光谱定标,这是未来高精度可溯源 SI (International System of Units) 在轨辐射绝对定标传递系统的重点研究内容之一。同时利用离散多光谱波段传递辐射计光谱数据来插值计算光谱分辨率 1 nm 以下的超光谱太阳光谱辐射分布曲线的低误差优化算法的研究,将是实现未来以太阳光源为基准的,利用低温辐射计实现卫星传感器可溯源 SI 高精度在轨绝对辐射定标的关键问题。

(4) 在向紫外和红外波段延展定标时,需要使用二级标准来拓展波长覆盖性,而未来对于二级标准的研究及其与整体在轨光谱辐射定标传递链的配合以实现这些波段定标不确

定度达到 0.5% 或更低的目标的研究,将成为重点方向。

(5) 未来可以将便携型单体专用定标的传递辐射计与静止型系统级监测用传递辐射计配合使用,来完善不同机构间可溯源 SI 高精度辐亮度绝对定标的传递链及其定标结果的一致性比对。传递辐射计今后不仅可以用于为特定的遥感器定标其自带的积分球光源或进行遥感器间相互交叉定标,它还可以用来确定发射前定标带来的传感器校准偏移和在轨定标校准偏移。

当前国内遥感器在轨辐射定标领域对传递辐射计的研究还是空白,随着对遥感器辐射定标重要性认识的不断加深^[25],国内研究机构开始表现出对高精度可溯源 SI 的在轨光谱辐射定标系统的需求^[26]。中科院长春光机所在“可溯源至 SI 的高精度天基太阳光谱辐射基准源研制”的项目中提出了实现辐亮度基准传递的光谱定标积分球传递辐射计 (ISTR) 系统的设计,整体结构如图 5 所示。ISTR 主要由陷阱探测器、滤光片辐射计和积分球组成,由此将标准定标和测量传递的功能合二为一。首先利用可溯源至低温辐射计基准的入射光来定标陷阱探测器,再将陷阱探测器作为二级标准来定标滤光片辐射计。当光经过积分球开口处的两个精密光阑后,功率基准被转化为辐亮度标准,由此定标后的 ISTR 将整体被作为辐亮度传递标准使用,最终配合漫射板对其他在轨地球成像光谱仪进行基于辐亮度标准的定标,实现低温辐射计基准的传递。综合考虑定标过程涉及的各环节的不确定度水平,包括太阳光谱辐射基准测量、精密光阑面积测量、探测器测量和滤光片透射率测量等,最终预期 ISTR 可达到的基准传递不确定度在 1% 水平。

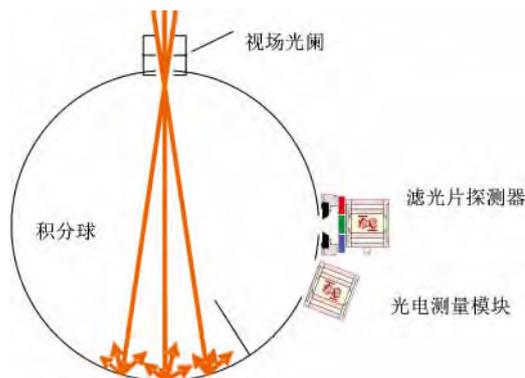


图 5 ISTR 结构原理示意图

Fig 5 ISTR schematic of configuration and principle

5 结 论

主要介绍了依据滤光片分光原理设计的不同机构研制的多个传递辐射计的测量过程和自身性能的定标方法,强调了传递辐射计对积分球等光源辐亮度定标监测的重要作用。根据 PTB 光谱辐亮度基准传递过程的描述,说明最新发展的传递辐射计系统在定标过程中的作用,再结合 DLR 对光谱仪遥感器的定标方案设计和 GSFC 使用的积分球光源变化监测系统介绍,说明了传递辐射计维系了标准计量机构和用户方对光源性能进行可溯源 SI 高精度定标的一致性及基准传

递链连续性的特点。同时还介绍了基于光栅分光原理设计的新型传递辐射计,由此展望了未来传递辐射计的设计研究方向。随着人类对全球气候变暖、高分辨率对地观测、极端灾害预报等若干重大问题的持续深入研究,对可溯源至统一辐射基准的高质量航天遥感数据的需求越来越迫切,构建基于空间低温辐射计的可溯源至SI的高精度空间在轨太阳光谱辐射基准系统,是实现这一高精度诉求的最佳方案路线。在这个方案中,系统整体的定标基准来自高精度在轨低温辐射计,而传递辐射计需用作标准传递探测器,将高精

度的绝对太阳光谱辐射基准测量传递到其他地球光谱成像仪等在轨遥感器上,实现绝对辐射定标。传递辐射计是连接在轨基准和遥感数据应用的纽带,其所能实现的高精度基准传递技术是未来研究的重点问题。

致谢:感谢长春光机所空间一部太阳辐射定标课题组的杨振岭博士在定标传递方面的指导,感谢夏志伟师兄在光学设计上的探讨启迪,感谢崔立红同学在文献整理方面的辛勤工作。

References

- [1] Spyak P R, Smith D S, Thiry J, et al. *Applied Optics*, 2000, 39: 31.
- [2] Johnson B C, Sakuma F, Butler J J, et al. *J. Res. NIST*, 1997, 102: 627.
- [3] Meister G P, et al. 2002 The First SIMBIOS Radiometric Inter Comparison (SIMRIC-1) NASA Technical Memorandum 210006, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 60.
- [4] James J Butler, Robert A Barnes. *Metrologia*, 2003, 40(2003): S70.
- [5] Johnson B C, Fowler J B, Cromer C L, 1998: The SeaWiFS Transfer Radiometer(SXR). NASA Tech. Memo. 1998-206892, Vol. 1, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md.
- [6] Walker J H, Saunders R D, Hattenburg A T, 1987, *Spectral Radiance Calibrations*. Special Publication SP 250-1, National Bureau of Standards, Washington, DC, USA.
- [7] Larason T C, Bruce S B, Cromer C L. *J. Res. Natl. Inst. Stan.*, 1996 101(02): 133.
- [8] Brown S W, Eppeldauer G P, Lykke K R, et al. *Applied Optics*, 2006, 45(32): .
- [9] Thome Kurtis J, Keef James L. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, 3: 1.
- [10] Stuart F, Kurtis J Thome, Ronald B Lockwood, et al. 2007, *Proc. of SPIE Vol. 6677*, 66770W, doi: 10.1117/12.740231.
- [11] Nik Anderson, Kurt Thome, Stuart Biggar, et al. 2008, *Proc. of SPIE Vol. 7081*, 708104, doi: 10.1117/12.795478.
- [12] Keef James L. *Dissertation Abstracts International, Supple B*, 2008, 69: 3.
- [13] Taubert E D, Monte C, Gutschwager B, et al. 2009, *Proc. of SPIE*, Vol. 7474, 747413, doi:10.1117/12.830082.
- [14] Spereld P, Pape S, Nevas S, 2013, *AIP Conf. Proce.* 1531, 801(2013), doi:10.1063/1.4804891.
- [15] Michael Jehle, Andreas Hueni, Karim Lenhard, et al. *IEEE Geosci Remote S*, 2015, 12: 5.
- [16] Michael E Schaezman, Michael Jehle, et al. *Remote Sens. Environ.*, 2015, 158: 207.
- [17] Peter Gege, Jochen Fries, Peter Haschberger, et al. *ISPRS J. Photogramm*, 2009, 64: 387.
- [18] Taubert D R, Hollandt J, Sperfeld P, et al. *API Conf. Proc.*, 2013, 1531, 376(2013), doi:10.1063/1.4804785.
- [19] Gege P, Fries J, Haschberger P, et al. 2010, *Proc. Hyperspectral Workshop*, ESRIN, Frascati, Italy.
- [20] Schwarzmaier T, Baumgartner A, Gege P, et al. 2013, *Proc. of SPIE Vol. 8533*, 85331U, doi:10.1117/12.974599.
- [21] Leibo Ding, Matthew G Kowalewski, et al. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 113603.
- [22] Belyaev Yu V, Rogovets A V, Khomitsevich A D, et al. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2010, 77: 5.
- [23] Timothy M Jung, Adriaan C Carter, Solomon I, et al. 2011, *Proc. of SPIE*, 8015, 80150C-1, doi:10.1117/12.883415.
- [24] Liu Enchao, Zheng Xiaobing, Li Xin, et al. *Optical and Precision Engineering*, 2013, 21(03): 0608.
- [25] Cao Haixia, Wu Na, Feng Shulong, et al. *Optical and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2585.
- [26] ZHOU Guan-hua, JIANG He, ZHAO Hui-jie, et al(周冠华, 姜禾, 赵慧洁, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2012, 32(12): 3416.

Overview of the Study for Transfer Radiometer with Spectral Standard Calibration and Transferring Technology

ZHAO Wei-ning^{1, 2}, FANG Wei², JIANG Ming², LUO Yang², WANG Yu-peng^{2*}

1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract Transfer radiometer is the critical calibration facility of remote sensing instruments on satellites to achieve spectral radiometric calibration on-orbit. It's also the core for spectral calibration with high accuracy in the laboratory on earth. This paper compares the similarities and differences between several transfer radiometers developed by various institutes covering 200~700, 700~2 000 nm spectrum bandwidth separately through describing their construction, design and operational principles and the method of transferring radiometric calibration benchmark. It shows the realizable accuracy of every transfer radiometers by introducing their central technology applied in the calibration procedures of different wavelength range. The advantages and shortcomings together with every transfer radiometer determine the application circumstance. According to the introduction of the process of the calibration traceability based on radiance standard in international institutes of standard technology, it emphasizes the importance of transfer radiometers in the procedure. It demonstrates the significance of transfer radiometer in radiometric calibration of aeronautics and space through its application of monitoring the calibration light source for spectrometers. Finally, it presents the prospect for the development and crucial issues of transfer radiometer's technology in the future research through describing the new transfer radiometer designed in internal institute. Simultaneously, it predicts and summarizes difficult problems required to be solved in the future as to high-accuracy calibration transferring system on-orbit against SI-traceable primary standard, which consists of cryogenic radiometers and transfer radiometers.

Keywords Transfer radiometer; Traceability chain for spectral radiance standard; Monitoring calibration of source; SI-traceability calibration on-orbit

(Received Apr. 28, 2015; accepted Aug. 6, 2015)

* Corresponding author