

文章编号 2095-1531(2015)06-0909-10

基于探测器标准的高精度光谱辐射标准光源

李志刚

(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: 本文在评述低温绝对辐射计和 SIRCUS 发展的基础上, 讨论了基于探测器标准的光谱可调谐自校准标准光源的工作原理、发展与应用前景。在探测器型光谱辐射标准研究方面, 工作在液氦温度的低温绝对辐射计不确定度达 0.01%。美国国家标准与技术研究院(NIST)建立的均匀光源光谱辐照度和光谱辐亮度响应度定标装置(SIRCUS)采用一系列激光器, 由低温绝对辐射计传递的硅陷阱探测器定标, 不确定度已达到 0.1%, 成功应用于空间遥感仪器高精度辐射定标。分析认为, 发展中的基于探测器标准的光谱可调谐自校准标准光源, 定标精度高, 自行校正老化、衰减, 保证了定标精度长期稳定。

关键词: 光谱辐照度; 光谱辐亮度; 标准光源; 光谱辐射定标

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150806.0909

High accuracy spectroradiometric standard light source based on detector standard

LI Zhi-gang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: lizhg@ciomp.ac.cn

Abstract: In this paper, based on reviewing the developments of absolute cryogenic radiometers and SIRCUS, the operating principle, developments, and application prospects of detector standard based, spectrally tunable, self-calibrated standard light sources are discussed. In detector-based spectroradiometric standards, absolute cryogenic radiometer operated at liquid helium temperature can achieve an uncertainty of 0.01%. The facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources(SIRCUS) established at National Institute of Standards and Technology(NIST) in the United States, which uses a series of lasers and conducts calibrations with silicon trap detectors calibrated against cryogenic radiometer, has achieved an uncertainty level of 0.1% and has been successfully applied to radiometric calibrations for space remote sensing instruments. Analysis indicates that developing detector standard based, spectrally tunable, self-calibrated standard light source with high calibration accuracy, can self-correct aging and attenuation and ensure the long-term stability of calibration accuracy.

Key words: spectral radiance; spectral irradiance; standard light source; spectroradiometric calibration

收稿日期: 2015-09-25; 修订日期: 2015-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61378063)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61378063)

1 引言

早在 20 世纪 70 年代美国宇航局 (NASA) Goddard 空间飞行中心研制了星载太阳后向散射紫外谱仪 (SBUV) 和臭氧总量绘图谱仪 (TOMS), 取得地外太阳光谱、大气臭氧垂直分布及大气臭氧总量全球分布的重要信息, 用于环境科学、大气物理、太阳物理、气象学、气候学等项目研究^[1]。近二、三十年, 在全球变化研究的推动下, 国际上高精度大气定量光谱遥感技术发展迅速。美国宇航局 (NASA) 和欧空局 (ESA) 又先后研制了全球臭氧监测实验仪 (GOME)、大气绘图扫描成像吸收谱仪 (SCIAMACHY)、臭氧监测仪 (OMI) 以及在轨二氧化碳观测站 (OCO) 等, 用于全球在轨大气痕量气体高精度定量监测^[2-5]。我国也相继研制了太阳紫外光谱监视器、臭氧垂直探测仪、臭氧总量探测仪并正在研制二氧化碳探测仪、紫外高光谱臭氧轮廓探测仪等大气定量光谱遥感仪器^[6-9], 已用于或将用于全球大气臭氧和二氧化碳含量高精度定量监测。这些空间遥感仪器的共同特点是对光谱辐射定标精度要求很高。

在需求的推动下, 国际上光谱辐射标准计量技术的得到迅速发展。在探测器型光谱辐射标准研究方面, 工作在液氮温度的低温绝对辐射计, 不确定度达 0.01%。NIST 研制的均匀光源光谱辐照度和光谱辐亮度响应度定标装置 (SIRCUS) 采用一系列激光器, 覆盖波长范围从紫外到红外, 由低温绝对辐射计传递的陷阱探测器定标, 不确定度达到 0.1% 的水平, 已成功应用于空间遥感仪器高精度辐射定标。发展中的基于探测器标准的光谱可调谐自校准标准光源, 有两种工作模式, 采用标准探测器定标, 定标精度高, 自行校正老化、衰减, 保证了定标精度长期稳定。

本文首先评述作为探测器标准的低温辐射计的诞生、发展、标准传递与所涉及的关键技术。在此基础上, 讨论高精度探测器标准在遥感仪器辐射定标中的相关应用问题。与标准光源不同, 标准探测器一般不能直接用于遥感仪器光谱辐亮度响应度或光谱辐亮度响应度定标。为此各国竞相

研制以标准探测器定标的单色或准单色光源装置, 用于遥感仪器高精度辐射定标。在以激光作单色光源研究方面, 以 NIST 的 SIRCUS 研究工作为代表, 已实现定标不确定度为 0.1%, 并应用于遥感仪器高精度辐射定标。在数字显微镜 (DMD) 准单色光源研究方面, 国际上, 包括中国科学院长春光机所, 发展了基于探测器标准的光谱可调谐自校准标准光源, 定标精度高, 自行校正老化、衰减, 保证定标精度长期稳定, 研究工作亦颇具特色。

2 探测器型光谱辐射标准—低温绝对辐射计

国际上, 通常有两类光谱辐射标准: 一类是光源型, 如黑体和同步辐射光源; 另一类是探测器型, 如低温绝对辐射计。低温绝对辐射计工作于液氮温度, 主要由接收腔、加热器和温度传感器三部分组成。当入射辐射照射低温辐射计接收腔时, 接收腔上升到一定温度, 温度传感器记录下这一变化。挡掉光辐射, 加热器通电, 接收腔升温, 通过改变电加热功率, 直至接收腔再现其温度变化, 此时通过测量电加热功率即给出光辐射功率。国际上, 一直以电功率再现光功率原理工作的电替代绝对辐射计作为探测器型光谱辐射标准。这一技术的发展始于 19 世纪末^[10]。工作在环境温度的电替代辐射计不确定度为 0.1% ~ 0.3%, 其不确定度的进一步降低受限于材料热特性、入射辐射非完全吸收及替代的电加热功率非完全等效于吸收的入射辐射功率等^[11]。

20 世纪 70 年代, 低温电替代辐射计量技术首先在 NIST 发展并用于温度计量, 随后用于低温真空黑体定标^[12]。英国国家物理实验室 (NPL) 研制了类似的装置, 用于 Stefan-Boltzmann 常数测量。期间, Quinn 和 Martin 曾指出如果将常温水替代辐射计致冷到液氮温度, 其灵敏度和准确度将会提高约 100 倍。基于这一思想, 在 NPL 设计了一台专用于光辐射测量的低温辐射计, 并由 Oxford Instruments PLC 公司制造成功^[11]。

基于 NPL-OXFORD 设计, 经改进后, 美国

NIST 研制了高精度低温辐射计 (HACR)^[12]。HACR 在 0.8 mW 光功率下的相对标准不确定度达 0.021%。德国 PTB 也使用了基于 NPL-OXFORD 设计的低温辐射计^[13]。

在 HACR 基础上, NIST 设计的低温辐射计 POWR (Primary Optical Watt Radiometer) 是美国国家光功率单位基准^[14], 曾称作 HACR2, 已取代 HACR, 如图 1 所示。POWR 的设计具有模块化特点, 由探测器模块、遮光罩模块及前置光学模块组成。POWR 在大多情况下工作在 4.2 K, 在极低光功率测量下, 为减少热噪声, 可工作在 2 K 温度。低温保持器装约 100 L 液氮, 通常可用 14

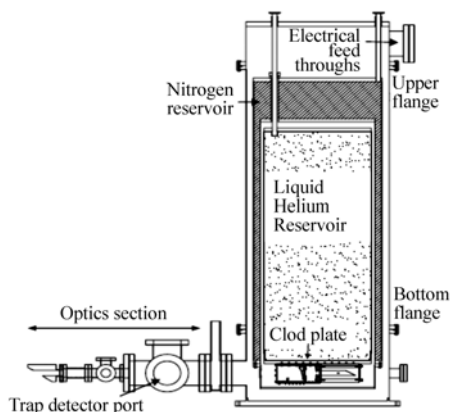


图 1 NIST POWR 结构

Fig. 1 Construction of NIST POWR

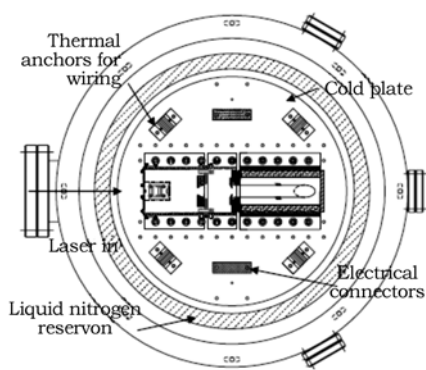


图 2 冷板及安装在冷板上的主要实验件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cold plate and the critical experimental components mounted on the cold plate

天。液氮池环绕液氦池周围, 用以绝热。在液氦

池下的冷板上有一组丝孔, 如图 2 所示, 中央部位用于安装探测器模块和遮光罩模块, 周围用于安装测温的电连接器、导线热锚。探测器模块的馈线是磷青铜的, 从冷板开始、穿过冷屏直到真空馈线口。

探测器模块如图 3 所示。探测器模块由冷块、热锚、热沉和接收腔等组成。冷块提供环绕接收腔的液氮温度的冷背景, 连接到冷板, 通过热锚, 连接到液氦池。其接收腔是电成型的铜的柱形腔, 直径 20 mm, 长 150 mm, 腔的后端倾斜 30°, 腔内面涂以镜反射黑漆, 在 633 nm 处腔吸收率为 0.999 995。一个加热器无感应地包裹在腔体封闭端, 两个片状加热器贴在后倾斜面上。铂电阻温度计 (GRT) 位于圆柱筒上。通过 Kapton 热锚将接收腔固定到热沉上。热沉和冷块都由 OFHC 铜制成, 先镀镍, 后镀金。所有表面都抛光、高反, 以减少辐射影响。在探测器模块前放置一个遮光罩, 连接到冷块。遮光罩模块的离轴抛物面镜收集杂散辐射并反射到硅光电二极管探测器, 进行测量。反射镜中心有一孔, 以便激光光束通过。前置光学模块可以实现用陷阱探测器在线测量布儒斯特窗口透过率。POWR 在 633 nm 处典型窗口透过率为 0.999 921。

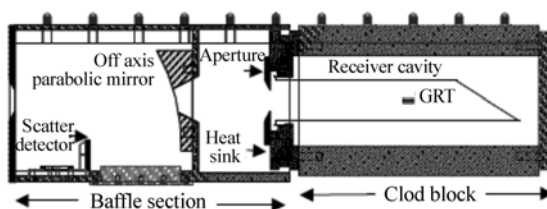


图 3 探测器和遮光罩模块示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the detector module and baffle section

NIST POWR 低温绝对辐射计探测器模块设计目标为在毫瓦和微瓦水平的激光功率下测量不确定度为 0.01%。后文提到的 L-1 标准与技术公司制造的 L-1 ACR 低温辐射计较之 POWR 体积小、易于操作, 用于标准传递。POWR 与 L-1 ACR 间一致性在 0.02% 以内。

光谱能量响应度测量传递链路如图 4 所示^[15]。链路顶端是低温辐射计 POWR。L-1 ACR

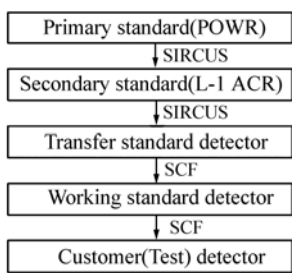


图 4 光谱能量响应度定标链路

Fig. 4 Calibration chain for the spectral power response measurements

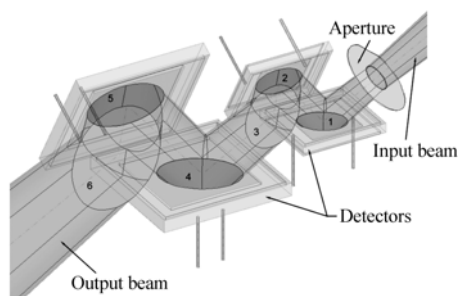


图 7 陷阱探测器光电二极管布局

Fig. 7 Trap detector arrangement of photodiodes

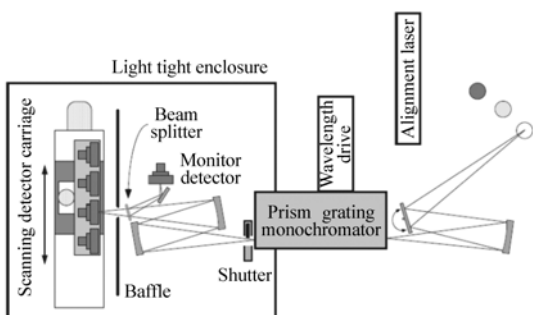


图 5 可见-近红外光谱比对器装置 (Vis/NIR SCF)

Fig. 5 Spectral comparator facility from visible to near-infrared (Vis/NIR SCF)

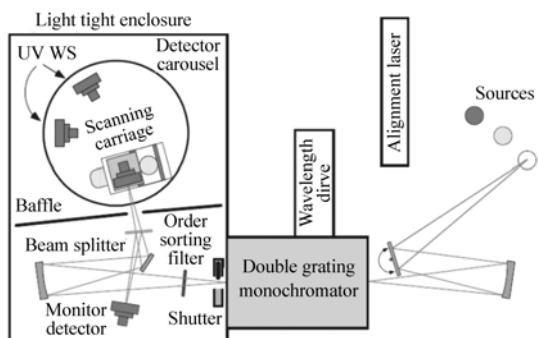


图 6 紫外光谱比对器装置 (UV SCF)

Fig. 6 Ultraviolet spectral comparator facility (UV SCF)

为低温绝对辐射计,用作副基准,在 SIRCUS 上定标 200 ~ 1 800 nm 波段范围的传递标准探测器。传递标准探测器转而在可见/近红外和紫外光谱比对器装置 (Vis/NIR SCF 和 UV SCF, 图 5 和图 6) 上用来定标工作标准探测器。工作标准探测器通常在可见/近红外和紫外光谱比对器装置

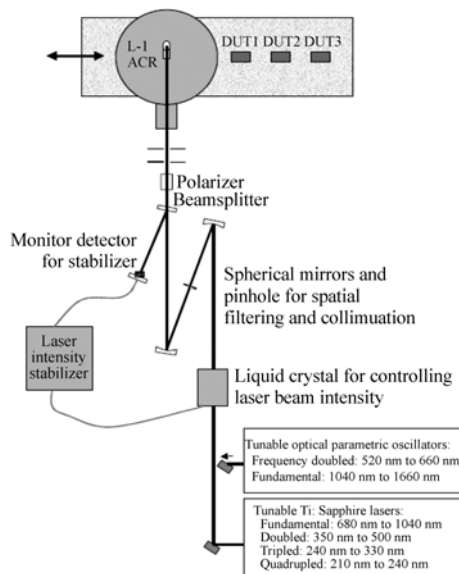


图 8 在 SIRCUS 使用低温辐射计定标传递标准探测器光路图

Fig. 8 Optical configuration for the calibration of the transfer standards with cryogenic radiometer at the SIRCUS facility

SCF 上用来定标用户的探测器。在 350 ~ 950 nm 波长范围采用硅光电二级管陷阱探测器作传递标准探测器。如图 7 所示,陷阱探测器由 6 个无窗硅光电二级管构成,有卓越的稳定性、区域响应度均匀性、线性、低噪声且使用激光时无干涉问题。图 8 给出使用替代法从低温辐射计到传递标准探测器的标准传递示意图。为获得尽可能低的不确定度,低温辐射计要求单色、准直、强度稳定的激光束。光学系统中,采用激光强度稳定器控制测量期间激光光束强度,稳定性优于 0.01%。两个可见硅陷阱探测器 (325 ~ 950 nm), 两个温控错

光电二极管传递标准(850 ~ 1 650 nm) (Ge TS), 两个温控 InGaAs 光电二极管传递标准(700 ~ 1 800 nm) (IGA TS), 数个紫外传递标准和紫外陷阱探测器(210 ~ 400 nm) 作为传递标准探测器在 SIRCUS 中由低温辐射计定标。

4 个可见区工作标准在可见/近红外 SCF 装置中由可见硅陷阱探测器传递标准和锗传递标准分别在 350 ~ 950 nm 和 955 ~ 1 100 nm 定标。这两种传递标准探测器在 SIRCUS 中由 L-1 ACR 低温辐射计定标, 以确定外量子效率并计算光谱能量响应度。定标链如图 9 所示。

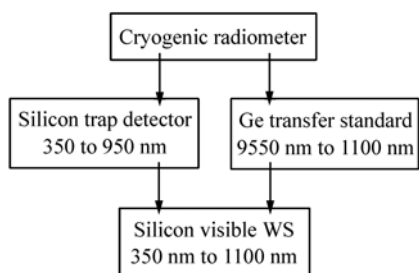


图 9 可见工作标准(Vis WS)定标链

Fig.9 Calibration chain for the visible working standards(Vis WS)

紫外光谱区工作标准传递链路如图 10 所示。两个紫外光谱区工作标准从 200 ~ 400 nm 在紫外光谱比较器 UV SCF、可见/近红外光谱比较器 Vis/NIR SCF、SIRCUS 及 NIST 同步辐射紫外辐射

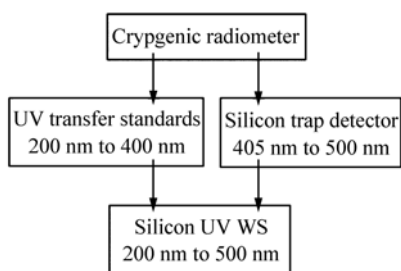


图 10 紫外工作标准(UV WS)定标链

Fig.10 Calibration chain for the ultraviolet working standards(UV WS)

装置(SURF)上由硅光电二极管紫外传递标准和陷阱探测器传递标准定标。两个紫外光谱区工作标准在 405 ~ 500 nm 由可见陷阱传递标准和在可见/近红外光谱比较器 SCF 定标。硅光电二极管

紫外传递标准和可见陷阱探测器传递标准组合使紫外光谱区工作标准在其整个紫外工作标准定标的光谱区内不确定度最小。

IGA 工作标准响应度在可见/近红外光谱比较器 Vis/NIR SCF 上由可见工作标准在 700 ~ 950 nm 波段和 IGA 传递标准在 955 ~ 1 600 nm 波段确定。IGA 传递标准在 SIRCUS 装置中由低温辐射计在 700 ~ 1 800 nm 光谱区定标, 以确定外量子效率。图 11 给出 IGA 工作标准传递链路。

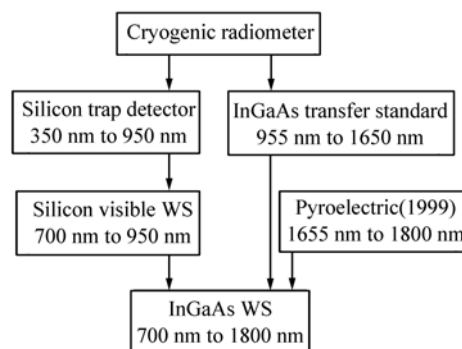


图 11 InGaAs 工作标准(IGA WS)定标链

Fig.11 Calibration chain for InGaAs working standards (IGA WS)

由于在 1 650 ~ 1 800 nm 波段 IGA 光谱响应度低, 在 SIRCUS 由低温辐射计定标有困难, 仍沿用 1999 年定标方案, 即 IGA 700 ~ 920 nm 工作标准光谱能量响应度在可见/近红外光谱比较器 Vis/NIR SCF 上由可见陷阱探测器传递标准标定。由低温辐射计在 SURF 上的低温辐射计-单色仪系统定标给出 700 ~ 1 800 nm 热电探测器

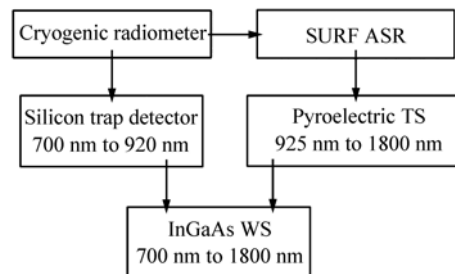


图 12 1999 InGaAs 工作标准(IGA WS)定标链

Fig.12 Calibration chain for InGaAs working standards (IGA WS) in 1999

(Pyrometer) 相对光谱响应度。然后由热电探测器在可见/近红外光谱比较器 Vis/NIR SCF 定标给出 IGA 工作标准相对光谱响应度,由可见陷阱探测器传递标准给出绝对值。1999 年传递链路如图 12 所示。3 种类型的 SCF 工作标准相对综合标准不确定度如图 13 所示。

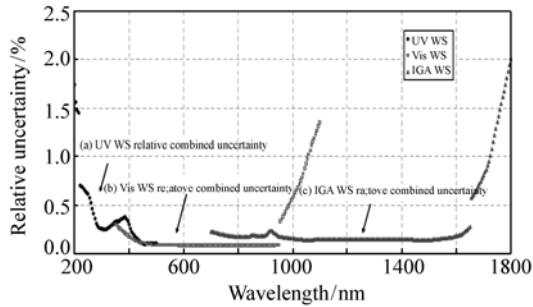


图 13 NIST 光谱功率响应度工作标准相对综合标准不确定度

Fig. 13 Relative combined standard uncertainties for NIST spectral power responsivity working standards

3 基于探测器标准的均匀光源光谱辐照度和光谱辐亮度响应度定标装置 (SIRCUS)

与标准光源不同,标准探测器一般不能直接用于遥感仪器光谱辐亮度响应度或光谱辐照度响应度定标。为此,英国国家物理实验室(NPL)、美国国家标准与技术研究院(NIST)、德国物理技术研究院(PTB)及芬兰赫尔辛基技术大学(HUT)等相继发展了可调谐单色激光照射积分球的窄带光源,其光谱辐亮度由低温辐射计定标^[15-19]。以 NIST 研制的均匀光源光谱辐照度和光谱辐亮度响应度定标装置(SIRCUS)为例,这种装置可以直接为遥感仪器进行光谱辐照度和辐亮度响应度定标。在 SIRCUS 中,高功率、可调谐激光引入到积分球,产生均匀、准朗伯、高亮度单色光源。SIRCUS 如图 14 所示,高功率、可调谐激光器首先经过强度稳定器后相对光功率控制在设定值的 0.01% 内。激光光束一部分被反射到波长计用来

测量入射激光波长,测量精度在 0.001 nm 内。光束另一部分通过分束器反射到 Fabry-Perot 干涉仪,用来测量激光光谱带宽与模式稳定度。最后,通过光纤将激光导入积分球。期间采用摆镜扫描光束或将部分光纤放入超声池中以消除源于激光相干性的散斑。由 NIST 光谱功率响应度基准定标的参考标准辐照度探测器,配备由 NIST 光阑面积装置测得的精密光阑,得以精确确定参考面辐照度。光源辐亮度亦可通过几何关系相应得出。光谱辐照度和光谱辐亮度响应度定标综合标准不确定度小于 0.1%。根据辐射定标应用需求,可选择不同尺寸的积分球。一个光电二极管监测器位于积分球上,用来修正测量中积分球输出辐通量的变化。光源位于一个暗箱内。为降低杂散光对测量的影响,光源与探测器之间通常安装两片挡光板。

SIRCUS 按工作波段分为紫外-可见-近红外 SIRCUS 与红外 SIRCUS,前者波段范围 200 nm ~ 1.6 μm ,后者 780 nm ~ 5 μm 。二者主要区别在于使用了不同的激光器和不同的参考传递标准。用多个不同激光覆盖 210 nm ~ 5 μm 光谱范围。

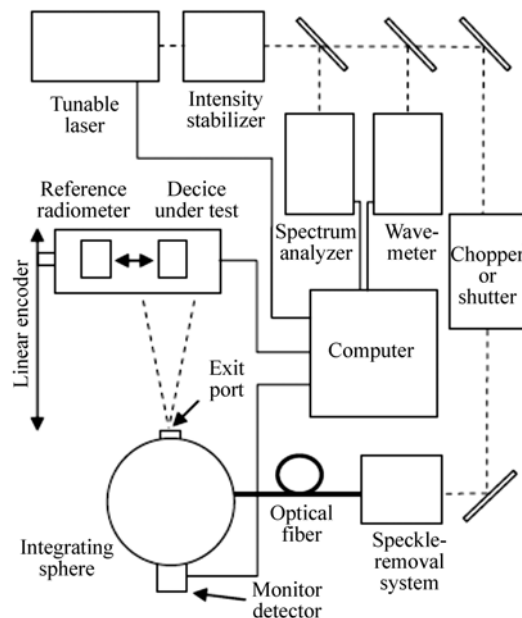


图 14 NIST SIRCUS 示意图

Fig. 14 Schematic diagram of SIRCUS at NIST

SIRCUS 已成功用于多种遥感仪器辐射定标,如海洋光学浮标(MOBY)、SCRIPPS-NIST 先进辐

射计(NISTAR)、太阳光度计及搭载 NASA 太阳辐射与气候实验(SORCE)卫星的光谱辐照度监测仪(SIM)等^[20-21]。

4 基于探测器标准的光谱可调谐自校准标准光源

宽带标准光源具有结构紧凑、便于移动、定标时间短、使用方便等优点,但是精度相对较低,老化衰减较快,如光谱辐照度标准 1 000 W 石英卤钨灯光源。

窄带标准光源定标精度相对较高(不确定度可达 0.1%),但是有系统复杂、不易移动、定标时间较长等缺点,如 SIRCUS 均匀光源。

较理想的光谱辐射标准光源应该具有两种工作模式,在窄带模式下以探测器标准定标,在宽带模式下工作,为仪器或遥感仪器定标。美国国家标准与技术研究院 Brown 等人在概念研究基础上,构建了基于探测器标准的绝对光谱可调谐标准光源实验装置^[22],如图 15 所示,主要由光谱可调谐光源(One Light Spectral Engine)、积分球和 Gershun 管辐射计组成。其中光谱可调谐光源由氙灯光源和采用 DMD 的光谱可调谐谱仪构成,光谱范围 430 ~ 630 nm。Gershun 管辐射计光谱辐亮度响应度在 NIST SIRCUS 中定标。绝对光谱可调谐标准光源有两种工作模式,在窄带模式下,计算机控制 DMD 在特定工作波段顺序发送具有特定光谱带宽的准单色光,用 Gershun 管辐射计测量定标。在宽带模式下,各准单色光合成

具有已知光谱辐亮度的“白光”,供遥感仪器定标使用。

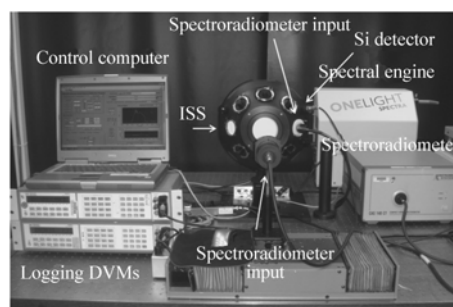


图 15 基于探测器标准的绝对光谱可调谐标准光源实验装置

Fig. 15 Set-up of absolute spectrum tunable standard light source based on detector standard

2013 年,中国科学院长春光机所(CIOMP)开展了具有两种工作模式的自校准光谱辐亮度标准光源研制。研制了由氙灯^[23]和超连续光纤激光器作光源、单凹面光栅和双平面光栅加 DMD 作光谱调谐器、基于探测器标准的自校准标准光源。这里给出以超连续光纤激光作光源、单凹面光栅加 DMD 作光谱调谐器的自校准标准光源实例。该自校准标准光源由 NKT Photonics 公司 Super K EXTREME EXB-6 型超连续光纤激光光源、滤光片、前置光学系统、入射狭缝、凹面光栅、DMD、后置聚光系统和积分球组成,如图 16 所示。超连续光纤激光光源光谱范围为 405 ~ 2 350 nm,激光经滤光片,经两片凹面镜扩束,由平面镜反射后,经凹柱面反射镜聚焦至入射狭缝。入射光经平面反射镜至凹面全息反射光栅,经色散后在 DMD

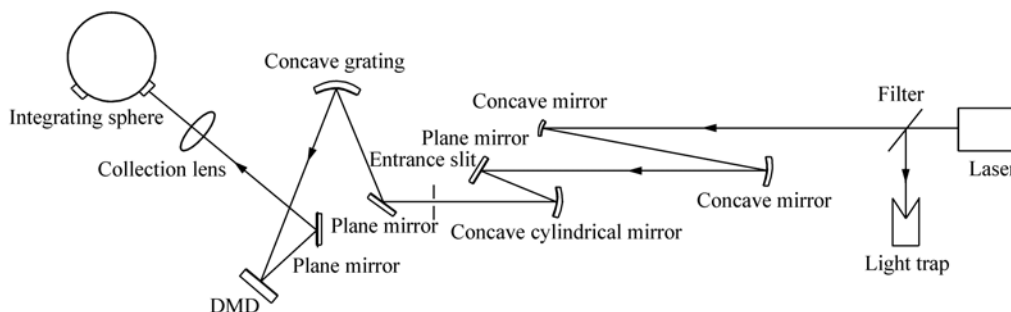


图 16 CIOMP 自校准标准光源

Fig. 16 Self-calibrated standard light source by CIOMP

表面形成光谱。凹面全息反射光栅表面镀铝,刻线密度为 430 g/mm ,工作光谱区间为 $300 \sim 850 \text{ nm}$ 。后置聚光系统将经计算机编程控制的 DMD 微镜阵列反射选取后的光汇集至内径约为 135 mm 、内涂层为 PTFE 的积分球内。积分球入口直径 12.7 mm ,出口直径 25.4 mm 。

以 Instrument Systems 公司 CAS140CT-152 型阵列光谱仪和以 NIST 定标的硅光电二极管为探测器的 Gershun 管辐射计分别测量积分球输出光辐射。CAS140CT-152 采用优化的交叉式 Czerny-Turner 光学结构,其特点是高效抑制杂散光和宽动态范围,集成了滤光片轮,将强度测量范围扩大 9 个数量级。以致冷背照式 1024×768 像素 CCD 为探测器,工作光谱范围为 $200 \sim 800 \text{ nm}$,光谱分辨率为 2.7 nm ,数据点间隔为 0.6 nm 。

将 DMD 微镜阵列分成 16 组,在自校准光谱辐亮度标准光源积分球出口处测量光辐射。图 17 和图 18 分别给出了采用 CAS 光谱仪和 Gershun 管辐射计的实验测量结果。

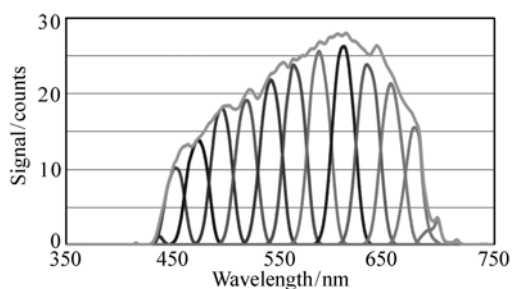


图 17 采用 CAS 光谱仪辐射计测得的窄带和宽带模式下的光谱分布

Fig. 17 Measured spectral distribution in narrow-band and broad-band modes using CAS spectrometer radiometer

自校准标准光源,其光谱分布可根据需要而改变。可自行校正光源光强老化衰减,光源光谱辐亮度较大,可以根据需要自行改变光强,能满足在实际大气光谱辐亮度水平下定标的要求。在窄

参考文献:

- [1] KRUEGER A J, ROEDER H A, HENDERSON B D. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for NIMBUS Ge[J]. *Opt. Eng.*, 1975, 14:323-331.
- [2] HARING R, POLLOCK R, SUTIN B, *et al.*. Current development status of the orbiting carbon observatory instrument opti-

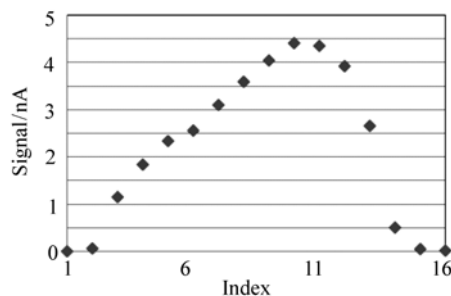


图 18 窄带模式下 Gershun 管辐射计的测量结果
Fig. 18 Measurements of Gershun tube radiometer in narrow-band mode

带模式下采用 Gershun 管辐射计定标,而 Gershun 管辐射计响应度通过作为探测器基准的低温辐射计直接追溯到国际制单位(SI),光谱辐亮度定标精度高。光源主体不需要送回辐射计量单位进行重复定标,辐亮度标准的维护可通过对其标准探测器光谱响应度的周期性定标得以简化。这一研究为提高光谱辐亮度标准光源精度、满足空间遥感仪器的高精度定标需求,提供了一条行之有效的途径。

5 结束语

低温绝对辐射计工作在液氦温度,不确定度比常温绝对辐射计降低约一个量级,经数十年发展,NIST 低温绝对辐射计 POWR 不确定度达 0.01% 。NIST SIRCUS 采用一系列激光器,如染料激光器和钛宝石激光器,由低温绝对辐射计传递的陷阱探测器定标,不确定度可达到 0.1% ,已用于 NASA 高精度大气定量遥感仪器辐射定标。发展中的基于探测器标准的光谱可调谐自校准标准光源,有两种工作模式,采用标准探测器定标,定标精度高,自行校正老化、衰减,保证了定标精度长期稳定,能满足在实际大气光谱辐亮度水平下定标的需求。

- cal design[J]. *SPIE*,2005,5883:58830C.
- [3] HOOGEN R,ROZANOV V V,BRAMSTEDT K,*et al.*. Validation of ozone profiles from GOME satellite data[J]. *SPIE*,1998,3495:367-378.
- [4] NOË L S,BOVENSMANN H,BURROWS J P,*et al.*. The SCIAMACHY instrument on ENVISAT-1[J]. *SPIE*,1998,3498:94-104.
- [5] DIRKSEN R,DOBBER M,VOORS R,*et al.*. Prelaunch characterization of the Ozone Monitoring Instrument transfer function in the spectral domain[J]. *Appl. Opt.*,2006,45(17):3972 - 3981.
- [6] 王淑荣,李福田,宋克非,等. FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪[J]. *光学学报*,2009,29(9):2590-2593.
Wang SH R,Li F T,Song K F,*et al.*. Ultraviolet Ozone vertical profile probe for FY-3A meteorological satellite[J]. *Acta Optica Sinica*,2009,29(9):2590-2593. (in Chinese)
- [7] 王咏梅,王英鉴,王维和,等. “FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪”[J]. *科学通报*,2009,54(23):3778-3783.
WANG Y M,WANG Y J,WANG W H,*et al.*. FY-3 satellite ultraviolet total ozone unit[J]. *Chinese Sci Bull*,2009,54(23):3778-3783. (in Chinese)
- [8] 王淑荣,宋克非,李福田. “星载太阳紫外光谱监视器的地面辐射定标”[J]. *光学学报*,2007,27(12):2256-2261.
WANG SH R,SONG K F,LI F T. Radiometric calibration on ground of satellite-borne solar ultraviolet spectral monitor[J]. *Acta Optica Sinica*,2007,27(12):2256-2261. (in Chinese)
- [9] 梁彪,刘伟. 二氧化碳探测仪典型透镜支撑结构的设计及分析[J]. *中国光学*,2011,4(4):388-396.
LIANG B,LIU W. Design and analysis of support structure for typical lens of carbon dioxide detector[J]. *Chinese Optics*,2011,4(4):388-396. (in Chinese)
- [10] FOX N P,RICE J P. Absolute Radiometers in Optical Radiometry, Volume 41 of Experimental methods in the Physical Sciences,edited by A. C. Parr,R. U. Datla,and J. L. Gardner[M]. Elsevier Inc,2005:35-96.
- [11] MARTIN J E,KEY P J. A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements[J]. *Metrologia*,1985,21:147-155.
- [12] GENTILE T R,HOUSTON J M,HARDIS J E,*et al.*. National institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer[J]. *Appl. Opt.*,1996,35(7):1056-1068.
- [13] LEI F,FISCHER J. Characterization of photodiodes in the UV and visible spectral region based on cryogenic radiometry[J]. *Metrologia*,1993,30:297-303.
- [14] HOUSTON J M,RICE J P. NIST reference cryogenic radiometer designed for versatile performance[J]. *Metrologia*,2006,43:S31-S35.
- [15] ANDERSON V E,FOX N P,NETTLETON D H. Highly stable, monochromatic and tunable optical radiation source and its application to high accuracy spectrophotometry[J]. *Appl. Opt.*,1992,31:536-545.
- [16] BROWN S W,EPELDAUER G P,LYKKE K R. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources[J]. *Appl. Opt.*,2006,45:8218-8237.
- [17] SCHUSTER M,NEVAS S,SPERLING A,*et al.*. Spectral calibration of radiometric detectors using tunable laser sources[J]. *Appl. Opt.*,2012,51:1950-1961.
- [18] NOORMA M,TOIVANEN P,MANOCHERI F,*et al.*. Characterization of filter radiometers with a wavelength-tunable laser source[J]. *Metrologia*,2003,40,S220-S223.
- [19] AHTEE V,BROWN S W,LARASON T C,*et al.*. Comparison of absolute spectral irradiance responsivity measurement techniques using wavelength-tunable lasers[J]. *Appl. Opt.*,2007,46:4228-4236.
- [20] BROWN S W,EPELDAUER G P,RICE J P,*et al.*. Spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources(SIRCUS) facility at NIST[J]. *SPIE*,2004,5542:363-374.
- [21] HARDER J W,THUILLIER G,RICHARD E C,*et al.*. The SORCE SIM solar spectrum:comparison with recent observations[J]. *Solar Phys.*,2010,263:3-24.
- [22] BROWN S W,SAUNDERS R D,LI Z,*et al.*. An absolute detector-based spectral radiance source[J]. *SPIE*,2010,7807:78070A.

- [23] 李志刚. 基于数字微镜器件的光谱可调谐光源[J]. 发光学报, 2014, 35(9): 1120-1123.
LI ZH G. Spectrally tunable light source based on digital micromirror device[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(9): 1120-1123. (in Chinese)

作者简介:



李志刚(1972—),男,吉林长春人,博士,研究员,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术及辐射定标方面的研究。E-mail:lizhg@ciomp.ac.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50元/期

网 址:www.yjyxs.com