文章编号:1000-7032(2017)08-1097-05

太阳光谱辐照度绝对测量及其定标单色仪

贾瑞栋,夏志伟,王玉鹏*,方 伟

(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:为满足高精度太阳光谱辐照度绝对测量的需求,研制了太阳光谱辐照度绝对测量系统及其定标单色仪。介绍了太阳光谱辐照度绝对测量的现状,并着重介绍了太阳定标单色仪和积分球太阳光谱仪的设计方案,以及高精度辐射定标传递链路。设计用于太阳光谱辐照度绝对测量的太阳定标单色仪和积分球太阳光谱仪,通过低温绝对辐射计和太阳定标单色仪实现绝对定标,使积分球太阳光谱仪测量数据可溯源至国际基本单位(SI)。结果表明:太阳定标单色仪的光谱范围覆盖 300~2 400 nm,光谱分辨率为 3~10 nm,输出单色太阳光功率的不确定度为 0.2%~0.5%;积分球太阳光谱仪的光谱范围覆盖 300~2 500 nm,光谱分辨率为 1~8 nm,太阳光谱辐照度绝对测量精度最高可达 0.5%。用低温绝对辐射计和太阳定标单色仪绝对定标积分球太阳光谱仪,可以实现高精度太阳光谱辐照度的绝对测量。

关 键 词: 单色仪; 低温绝对辐射计; 绝对测量; 空间遥感 中图分类号: TP73 **文献标识码:** A **DOI**: 10.3788/fgxb20173808.1097

Absolute Solar Spectral Irradiance Measurement and Its Calibration Monochromator

JIA Rui-dong, XIA Zhi-wei, WANG Yu-peng*, FANG Wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China) * Corresponding Author, E-mail: wangyp@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to meet the demand of high precision of absolute solar spectral irradiance(ASSI) measurement, ASSI measurement and its calibration monochromator were researched. The present situation of ASSI measurement was introduced, and the project of the solar calibration monochromator (SCM) and the solar spectrometer with integrating sphere (SSIS) was emphatically recommended. The SCM and SSIM for ASSI measurement were designed. The absolute calibration of SCM was performed by the space cryogenic absolute radiometer (SCAR), and the measurement data of SSIS was made traceable to the international system of units (SI). The spectral range of SCM covers 300 - 2400 nm, the spectral resolution is 3 - 10 nm, and the uncertainty of solar homochromy power is 0.2% - 0.5%. The spectral range of SSIS covers 300 - 2500 nm, the spectral resolution is 1 - 8 nm, and the highest accuracy of ASSI measurement is 0.5%. The results show that the SSIS calibrated by SCAR and SCM can achieve high precision ASSI measurement data.

Key words: monochromator; cryogenic radiometer; absolute measurement; space remote sensing

收稿日期: 2017-03-22;修订日期: 2017-05-26

基金项目:国家自然科学基金(41474161);863 国家高技术研究发展计划 (2015AA123703) 资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (41474161); 863 National High Technology Research and Development Program (2015AA123703)

1引言

太阳是地球能源的主要来源,实现对太阳总 辐照度和其光谱辐照度的高精度监测对全球气候 变化、天气预报、环境监测等具有重要意义[1-2]。 气候研究专家指出:为满足气候研究的需求,太阳 总辐照度和太阳光谱辐照度的不确定度应分别为 0.01%(*k*=1)和0.1%(*k*=1)^[3]。但是目前这些 遥感数据的测量精度仍然偏低,例如,太阳光谱分 光计(SOLSPEC)测量 200~2 500 nm 的平均太阳 光谱辐射精度为 3% $(\pm 2\sigma)^{[4]}$,远远不能满足气 候研究所需要的0.1%精度。另外,在高精度测 量太阳光谱辐照度的基础上,构建太阳光谱辐射 标准,使不同遥感器测量的数据可相互比对乃至 绝对定标,从而提高不同有效载荷之间的一致性, 使不同年份、不同卫星间的数据具有可比性,建立 多源遥感数据之间的物理联系,对遥感数据的综 合应用具有重要意义^[5]。

国际上在太阳光谱辐照度测量方面已经做了 许多的研究工作,如太阳光谱分光计(SOL-SPEC)^[6]、太阳辐射和气候实验(SORCE)^[7]、可 溯源的太阳和地球辐射基准研究(TRUTHS)^[8] 等。尤其值得提出的是 TRUTHS 项目,其系统包 括光谱定标单色仪、低温辐射计、太阳光谱辐照度 监测仪等。光谱定标单色仪的目的在于为 TRUTHS 提供一个连续单色光源,以光纤束输出, 并通过 20 K 低温辐射计来测量,其输出功率为 1~35 μW(0.5 nm 带宽),输出功率的不确定度 为0.2%。太阳光谱辐照度监测仪采用 20 K 低 温定标系统定标后,其预期绝对测量精度约为 0.2%^[3]。

本文详细阐述了所研制的用于太阳光谱绝对 测量的太阳定标单色仪和积分球太阳光谱仪的组 成、工作原理和技术参数,以及积分球太阳光谱仪 的绝对定标的传递链路。

2 太阳光谱辐照度绝对测量仪器及 辐射定标传递链路

2.1 20 K 空间低温绝对辐射计(SCAR)

定标系统由 20 K 空间低温绝对辐射计和太 阳定标单色仪组成,由太阳辐照度监测仪实现太 阳光谱辐照度的绝对测量。 20 K 空间低温绝对辐射计是太阳光谱辐照 度绝对测量的核心部件,其结构如图 1 所示。低 温绝对辐射计主要由低温系统和绝对辐射测量系 统组成,其中绝对辐射测量系统由热电式探测腔 组成,可进行高精度的太阳光谱功率测量,并实现 光谱辐射标准溯源至国际基本单位(SI)。



图1 空间低温绝对辐射计结构



低温绝对辐射计是工作在低温下的电替代辐射计,其基本原理是以探测器上辐射功率和电功率的热变换等效性进行测量。低温环境大大降低 了探测器热噪声、热传导、热沉温度漂移、电加热 丝欧姆损耗、光电等效性等对测量不利的影响,使 低温绝对辐射计的测量不确定度下降到极低的水 平。且在低温绝对辐射计中专门设计有测量太阳 光谱辐照度的高响应度腔,并且能够溯源到国际 单位制,作为整个系统的基准探测器,绝对精度在 10 μW~10 mW 动态范围内为0.5%~0.2%。

绝对辐射计的电替代测量是用可精确测量的 电功率复现吸收腔吸收光功率产生的温度升高实 现辐射功率测量。当测量到电功率 P_e产生的温 度变化与被测光功率相同,则被测的光功率 P₁为

$$P_1 = \frac{1}{T} \left(\frac{NP_e}{A} + P_b \right), \tag{1}$$

其中T为光学窗口透过率,N为光电不等效系数,





A为黑体腔吸收率,P_b为背景噪声。

使用空间低温辐射计原理样机对 632.8 nm 波长的激光功率进行测量,结果如图 2 所示,不同 激光功率的相对测量精度为 0.02%。

2.2 积分球太阳光谱仪(SSIS)

积分球太阳光谱仪(SSIS)可实现太阳光谱 辐照度的高光谱分辨率快速测量,其原理光路如 图 3 所示。太阳光经积分球后分别进入 3 个摄谱 仪的入射狭缝,经准直反射镜准直为平行光后,照 射到平面衍射光栅上,经光栅衍射分光,不同波长 的入射光经光栅衍射后的出射光线的角度各不相 同,最后由成像反射镜成像到接收探测器上。不 同波长的光线成像于探测器的不同位置的探测单 元上,从而实现了光谱的波长和强度的测量。探 测器把光信号转化成电信号,然后由电子学系统 进行数据采集和处理。

积分球太阳光谱仪的技术参数如表1 所示。 由于光谱范围较宽, SSIS 分为3 个测量通道,共 用一个直径80 mm 的积分球,3 个狭缝开口分别 位于积分球侧面的3 个不同位置,如图3 所示。

表1 积分球太阳光谱仪参数

Tab. 1 Parameters of the solar spectral radiation monitor

通道	1	2	3
光谱范围/nm	300 ~1 000	900 ~1 600	1 500 ~2 500
光谱分辨率/nm	1	4	8
绝对精度	0.35%	0.5%	0.6%
探测器	Si	InGaAs	InGaAs
视场(FOV)	3°	3°	3°





Fig. 3 Basic optical path of the solar spectral radiation monitor

为保证积分球太阳光谱仪的在轨测量精度及 长期稳定性,运行期间需要定期进行在轨定标,并 实现太阳光谱辐照度的绝对测量(可溯源至 SI)。 定标过程如图 4 所示:(1)太阳定标单色仪(SCM)以太阳为光源,通过滤光片单色仪获得单 色太阳光辐射,并以光纤输出;(2)用低温绝对辐 射计高响应度光谱腔对单色太阳光辐射功率进行 测量;(3)利用光纤移动定位机构,将光纤切换到 SSIS 的积分球入口,使其输出的单色太阳光辐射 完全进入;(4)用标定过的单色光功率定标 SSIS。



图 4 积分球太阳光谱仪定标过程

Fig. 4 Process of the solar spectral radiation monitor calibration

3 太阳定标单色仪(SCM)

由于空间低温绝对辐射计测量动态范围的限制,其最小可探测功率和高精度的测量要求导致 对太阳定标单色仪出射的单色光的功率有较高的 要求(>10 μW)。为提高单色仪输出光功率,采 用大有效口径的窄带滤光片作为分光元件。

太阳定标单色仪(SCM)以太阳光为光源,经 窄带滤光片上滤光后形成单色光,再经光学系统 将单色光会聚后耦合到光纤内进行传输并输出, 其结构和原理光路如图 5 和图 6 所示。这里采用 的滤光片的直径为 25 mm,会聚镜为离轴抛物面 反射镜,光纤由 19 根纤芯内径为 550 µm、外径为 600 µm、长度均为 1 m 的单根光纤圆形排列而 成,光纤数值孔径为 0.22。该装置的特点是有效 口径大、各通道中心波长处的光能量损耗小、系统 透过率高,能满足低温绝对辐射计黑体腔实现高





精度测量的最小功率(>10 µW)要求。

在工作过程中,多片滤光片层叠分布在滤光 片预备通道中,根据定标需求波段,利用升降控制 电机、升降轴和滤光片转换套筒选取合适的滤光 片,通过转动控制电机将该滤光片转动到滤光片 工作通道中。切换滤光片时,可先利用转动控制 电机将工作滤光片转回预备通道中,再重复滤光 片选取过程。



Fig. 6 Basic optical path of the calibration monochromator

太阳光在300~2400 nm内的光谱辐照度曲 线如图7所示。一般根据太阳光谱辐照度变化的 快慢程度来选择各通道滤光片的波长,在300~ 2400 nm光谱范围内选取15个波长,其中心波 长、光谱半高宽和最大透过率等参数如表2所示。

在 300 ~ 2 400 nm 光谱范围内,由太阳光谱 辐照度值和滤光片的光谱透过率可得到光纤预期 的光谱输出功率,如图 8 所示。该光谱输出功率 明显大于 TRUTHS 的光谱定标单色仪输出,即在 D = 25 nm 的情况下,最小输出光功率为 13 μ W (300 nm 处)。且采用 20 K 低温绝对辐射计的高 响应度腔测量,可以确保太阳定标单色仪的输出 功率的绝对精度达到 0.2% ~ 0.5%。

采用 100 W 卤钨灯经 F 数为 5 的准直镜准 直后,垂直入射到 SCM 的入口处,出射光入射到 带积分球的探测器,得到光纤出射功率如图 9 所示。



Fig. 7 Solar spectral irradiance (300 - 2 400 nm)

表 2 滤光片参数 Tab. 2 Parameters of the filter

通道	中心波长/nm	半高宽/nm	透过率/%
1	300	3 ± 0.5	≥8
2	345	3 ± 0.5	≥10
3	390	3 ± 0.5	≥20
4	430	3 ± 0.5	≥30
5	460	3 ± 0.5	≥40
6	480	3 ± 0.5	≥45
7	520	3 ± 0.5	≥50
8	600	3 ± 0.5	≥50
9	700	3 ± 0.5	≥50
10	850	3 ± 0.5	≥50
11	1 000	3 ± 0.5	≥50
12	1 300	5 ± 1	≥40
13	1 600	5 ± 1	≥50
14	2 050	10 ± 2	≥60
15	2 400	10 ± 2	≥60



图 8 通过 SCM 和光纤的光谱辐射能量

Fig. 8 Spectral radiation power after though SCM and fiber



图 9 卤钨灯光源通过 SCM 和光纤的光谱辐射能量

Fig. 9 Spectral radiation power of the halogen tungsten lamp after though SCM and fiber

该在轨定标过程由太阳定标单色仪提供高 质量的单色光源,以低温绝对辐射计为主基准 探测器,克服了以往与传感器增益漂移有关的 不确定度影响;采用高精度辐射计量数据定标, 保证了 SSIS 的可溯源至 SI。太阳定标单色仪的 输出单色光功率的绝对精度为0.2% ~0.5%, 考虑到其通道数的有限性(本例中为15个)带 来的插值误差和其他不确定因素,如光纤移动、 电信号输出响应、视场^[9]等,该过程的定标精度 为0.3%。

4 结 论

本文研制的太阳光谱辐照度绝对测量及其定标 单色仪,采用 300~2 400 nm 太阳光为光源,并以低 温绝对辐射计为主基准,可选择输出 15 个波长的单 色光辐射(绝对精度为 0.2% ~0.5%),实现积分球 太阳光谱仪的高精度绝对定标,测量数据的绝对精 度最高可达 0.5%,且可溯源至 SI,对提高空间绝对 辐射测量精度具有重要意义,为建立我国独立自主 的空间辐射定标基准提供了理论与实验基础。

参考文献:

- [1] 杨东军, 方伟, 叶新, 等. 星载太阳辐射监测仪的高精度太阳跟踪 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9):2483-2490.
 YANG D J, FANG W, YE X, et al. High precision sun-tracking of spaceborne solar irradiance monitor [J]. Opt. Precision Eng., 2014, 22(9):2483-2490. (in Chinese)
- [2] 王玉鵰,方伟,弓成虎,等.双锥腔互补偿型绝对辐射计 [J]. 光学 精密工程,2007,15(11):1662-1667.
 WANG Y P, FANG W, GONG C H, et al.. Dual cavity inter-compensating absolute radiometer [J]. Opt. Precision Eng., 2007, 15(11):1662-1667. (in Chinese)
- [3] FOX N, KAISER-WEISS A, SCHMUTZ W, et al. Accurate radiometry from space: an essential tool for climate studies
 [J]. Philos. Trans. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci., 2011, 369(1953):4028-4063.
- [4] HARDER J W, THUILLIER G, RICHARD E C, et al. The SORCE SIM solar spectrum: comparison with recent observations [J]. Solar Phys., 2010, 263(1-2):3-24.
- [5]高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展 [J]. 遥感信息, 2010(4): 117-128.

GAO H L, GU X F, YU T, et al.. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors [J]. Remote Sens. Inform., 2010(4):117-128. (in Chinese)

- [6] THUILLIER G, HERSÉ M, LABS D, et al. The solar spectral irradiance from 200 to 2 400 nm as measured by the SOL-SPEC spectrometer from the ATLAS and EURECA missions [J]. Solar Phys., 2003, 214(1):1-22.
- [7] KRIVOVA N A, SOLANKI S K, UNRUH Y C. Towards a long-term record of solar total and spectral irradiance [J]. J. Atmos. Solar-Terrest. Phys., 2011, 73(2-3):223-234.
- [8] FOX N P, AIKEN J, BARNETT J J, et al. Traceable radiometry underpinning terrestrial- and helio-studies (TRUTHS)
 [J]. SPIE, 2003, 4881:395-407.
- [9]杨振岭,方伟,王凯,等.小视场绝对辐射计视场测量及修正项计算[J].光学精密工程,2013,21(4):870-875.
 YANG Z L, FANG W, WANG K, et al.. Field of view measurement and correction term calculation for small-field radiometer [J]. Opt. Precision Eng., 2013, 21(4):870-875. (in Chinese)



贾瑞栋(1989 -),男,内蒙古呼和 浩特人,硕士,助理研究员,2014 年 于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 主要从事太阳辐射监测仪机械结构 设计等方面的研究。 E-mail: 1016463342@qq.com



王玉鹏(1972 -),男,山东沂水人,博 士,副研究员,2008 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,主要从事空间遥感技术、精 密太阳跟踪、太阳光谱及总辐射测量 等方面的研究。

E-mail: wangyp@ ciomp. ac. cn