

文章编号 1004-924X(2014)09-2345-07

基于多光源的光谱分布可调谐光源系统

刘洪兴,刘则洵,李葆勇,万志,李宪圣,任建伟*,孙景旭
(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:针对定标光源和遥感器在轨探测目标的光谱非匹配对空间光学遥感器实验室辐射定标精度的影响,设计了一种基于发光二极管(LED)和基底光源的光谱分布可调谐光源。采用该光源模拟了典型地物目标光谱,用于遥感器的实验室绝对辐射定标,大幅降低了光谱非匹配带来的影响。首先,从理论上分析了光谱非匹配影响遥感器绝对辐射定标精度的机理;然后,根据设计指标确定了光源的设计方案,解决了光源的选型与光谱匹配算法设计、光谱分布可调谐光源驱动和控制系统、目标光谱匹配与光谱反馈调整、光谱分布可调谐光源光机设计等四项关键技术问题;最后,对光源进行了性能测试。测试结果显示:等能光谱和6 000 K黑体光谱的光谱匹配误差分别为6.37%和8.76%,出光口的辐照度非均匀度为0.53%,30 min内的辐照度不稳定性为0.03%,水平方向 $\pm 30^\circ$ 内的辐亮度角度非均匀度为0.80%,各波长处光谱辐亮度值均高于 $0.07 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$,410~900 nm波段积分辐亮度为 $58.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,均满足设计指标。

关键词:光学遥感;光谱分布可调谐光源;辐射定标;光谱非匹配;发光二极管

中图分类号:TP73;TN312.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142209.2345

Spectrum-tunable light source based on multi-sources

LIU Hong-xing, LIU Ze-xun, LI Bao-yong, WAN Zhi, LI Xian-sheng, REN Jian-wei*, SUN Jing-xu

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

Abstract: A spectrum-tunable integrating sphere light source based on a Light Emitting diode(LED) and basis sources was developed to eliminate the effect of spectral non-matching between calibration source and an on-orbit detecting target on the calibration accuracy of space optical remote sensor in a laboratory. The developed source was used to produce typical ground object spectra and to calibrate space optical remote sensors, which significantly diminishes the absolute radiometric calibration error caused by spectral non-matching mentioned above. Firstly, the affecting mechanism of the spectral non-matching on the absolute radiometric calibration accuracy of space optical remote sensor was analyzed. Then, the design scheme of the spectrum-tunable light source was given according to technical requirements. The scheme was mainly divided into four key issues: the determination of light source and design of spectral matching algorithm, the design of light source drive circuit and control system, the matching of target spectrum and spectral adjustment, and the optical-mechanical design of spectrum-tunable light source. In the end, the performance of calibrated spectrum-tunable light source was tested. The results show that the spectral non-matching errors of equi-energy

收稿日期:2013-07-01;修订日期:2013-09-03.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

spectrum and 6 000 K blackbody spectrum are 6.37% and 8.76% respectively, the irradiance non-uniformity is 0.53%, the irradiance instability of the spectrum-tunable light source within 30 min is 0.03%, and the radiance angular non-uniformity of the spectrum-tunable light source within horizontally $\pm 30^\circ$ is 0.80%. Moreover, it offers the spectral radiance above $0.07 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ and the integral radiance in 410—900 nm of $58.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$. These data all meet the design requirements of spectrum-tunable light sources.

Key words: optical remote sensing; spectral tunable source; radiometric calibration; spectral non-matching; Light Emitting Diode(LED)

1 引言

遥感技术作为当前发展最为迅速的科学技术之一,具有探测范围大、获取资料速度快、受地面条件限制少等优点。近年来,发达国家相继开展了空间对地遥感观测计划,我国政府也非常重视该研究领域的发展,并取得了令人瞩目的成就。其中,定量遥感是遥感技术应用的一个重要发展方向,而定量遥感的前提是对传感器进行辐射定标。传感器的辐射定标是一项十分困难和复杂的任务,它与定标光源以及环境辐射在光谱、空间、时间以及偏振上的多变性相关^[1]。

在传感器的实验室辐射定标中,应尽量模拟传感器在轨运行时的工作状态,采用与传感器在轨运行时相同的照明条件。积分球光源作为实验室辐射定标光源,常用卤钨灯和氙灯作为内置光源,但它们的光谱分布相对固定,与传感器在轨探测目标的光谱分布不匹配(简称光谱非匹配),因此是传感器实验室绝对辐射定标不确定度的主要误差源之一^[2]。采用光谱分布可调谐光源模拟典型地物光谱作为传感器的实验室辐射定标光源,可大幅降低由光谱非匹配对实验室绝对辐射定标精度的影响,从而最终提高遥感图像数据产品的反演精度^[2]。

英国国家物理实验室(NPL)和美国国家标准与技术研究院(NIST)曾分别设计了光谱分布可调谐光源系统^[3-4]。NPL以溴钨灯作为光源,经过透镜聚焦、透镜准直、光栅分光、空间滤波器滤光以及积分球匀光后输出均匀的朗伯光,调整空间滤波器的光谱透过特性即可改变光源的输出光谱分布。但该系统的蓝绿光波段的光谱能量偏低,并且结构相对复杂。NIST以不同峰值波长的小功率LED作为发光介质并放入积分球进行匀光,调整LED的驱动电流即可改变光源的输出

光谱分布,该系统同样面临能量偏低的问题,并且该系统的迭代算法的光谱匹配效率偏低^[5]。因此,本文设计并研制了基于多光源的光谱分布可调谐光源系统,在积分球内安装了基底光源和小功率LED,在基底光源基础上调整LED的点亮组合即可得到目标光谱分布,文中用改进型模拟退火算法作为光谱匹配算法。该光源系统系统不仅达到了实用光强,而且具有较强的光谱分布可调谐能力。

2 光谱非匹配影响辐射定标精度的理论分析

传感器的实验室辐射定标首先要建立传感器输出与传感器辐射输入的关系,辐射响应方程为:

$$DN = C \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) \cdot R_{\text{det}}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

其中:DN为传感器的输出数码值,C为由光学系统、探测器和电子学系统决定的常量, $L(\lambda)$ 为传感器入瞳处接收的光谱辐亮度, $R_{\text{det}}(\lambda)$ 为传感器探测的光谱响应度, λ_1 和 λ_2 分别为传感器光谱波段的下限和上限。

宽波段传感器的实验室辐射定标时,积分球定标光源的光谱辐亮度是已知的,忽略传感器的暗信号输出和高次响应系数,定标系数为:

$$P_{\text{cal}} = \frac{DN_0}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda) d\lambda} = \frac{C \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda) \cdot R_{\text{det}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

其中:DN₀为传感器的输出数码值, $L_0(\lambda)$ 为光谱辐亮度输入。传感器在轨运行时,探测目标 $L_1(\lambda)$ 定量反演得到的辐亮度 L_{cal} 为:

$$L_{\text{cal}} = \frac{DN_1}{P_{\text{cal}}} = \frac{C \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_1(\lambda) \cdot R_{\text{det}}(\lambda) d\lambda}{\left[\frac{DN_0}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda) d\lambda} \right]} =$$

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_1(\lambda) \cdot R_{\text{det}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda) \cdot R_{\text{det}}(\lambda) d\lambda} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

目标物体的积分辐亮度 L_{obj} 为:

$$L_{\text{obj}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_1(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

由于实验室辐射定标光源与探测目标的光谱分布不一致,根据绝对定标系数反演的地物辐亮度 L_{cal} 与目标物体的真实辐亮度 L_{obj} 存在误差,定标实验常以 L_{cal} 与 L_{obj} 的相对误差来评价光谱非匹配对于遥感器辐射定标精度的影响^[6],但研制光谱分布可调谐光源可大幅降低此影响。

3 光谱分布可调谐光源系统设计

3.1 光谱分布可调谐光源的工作原理

光谱分布可调谐光源系统主要由积分球、LED 模块、基底光源模块、电源控制箱、光纤光谱仪和主控计算机等组成。LED 模块和基底光源模块安装在积分球上,LED 模块由不同峰值波长和光谱分布的 LED 构成,通过调整 LED 的驱动电流或点亮组合以及基底光源进入积分球的功率即可改变积分球的输出光谱分布。光纤光谱仪用于监测和反馈光源的输出光谱,主控计算机根据光谱仪的反馈调整输出光谱,直至得到满意的目标光谱。表 1 给出了光谱分布可调谐积分球光源系统的设计指标。

表 1 光谱分布可调谐积分球光源的设计指标

Tab.1 Design indexes for spectral turnable integrating sphere light source

| 性能参数 | 设计指标 |
|----------------------------|---------------------------------|
| 光谱 | 410~900 nm |
| 积分球直径 | 500 mm |
| 积分球开口 | 120 mm |
| 70 mm×70 mm 区域 辐照度面非均匀度 | <1% |
| 水平方向上±30°以内的 辐亮度角度非均匀度 | <1% |
| 30 min 内辐照度不稳定性 | <0.2% |
| 光谱辐亮度 | >0.06 W/(m ² ·sr·nm) |
| 积分辐亮度 | >50 W/(m ² ·sr) |
| 典型目标光谱的光谱匹配误差 | <10% |

3.2 光源选择与光谱匹配算法

丰富的单色 LED 会很好地解决光谱分布可调谐光源的光谱匹配问题;然而光源要达到实用功率需要大量的小功率 LED,这不仅增加了光源的成本和控制电路的复杂程度,而且大量的 LED 还会增大积分球的开口比,从而影响积分球光源的辐射特性。但选用大功率 LED 也存在弊端:首先,受工艺水平的限制,大功率 LED 的种类不如小功率 LED 丰富,这将会削弱光源的光谱可调谐能力;其次,大功率 LED 存在散热问题,如果该问题不能很好地解决,将严重影响 LED 的寿命以及光源的稳定性。针对以上问题,本文提出了采用基底光源和小功率 LED 的多光源组合方案,选择合适的基底光源既可以减少 LED 的使用数量,又可以保证光源系统的输出功率,而 LED 则保证了光谱分布可调谐光源的光谱可调谐能力^[7]。

选择基底光源的原则是:稳定性好、410~900 nm 波段光谱分布连续平滑、尺寸小、对环境要求比较低、性价比高。综合考虑以上因素,确定了溴钨灯和“溴钨灯+升色温滤光片”两种基底光源,溴钨灯的色温为 3 000 K,升色温滤光片可将溴钨灯的色温提高到 6 000 K 左右。两种基底光源的归一化相对光谱分布曲线如图 1 所示。

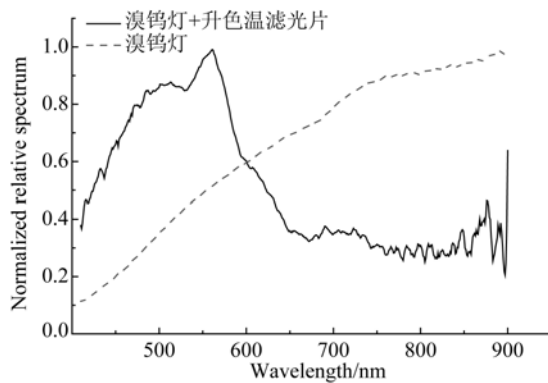


图 1 基底光源归一化相对光谱分布曲线

Fig.1 Normalized spectral distribution of basis sources

光谱分布可调谐光源对 LED 的选择也提出了严格的要求:单色 LED 的种类应尽量多,LED 的寿命应尽量长,同一种类的 LED 需要保持良好

的光谱一致性。单色 LED 已经能够遍布紫外、可见光以及近红外波段,但是,除了最常用的红、绿、蓝 3 种 LED 之外,其他波段的单色 LED 的需求较少,价格偏高。本文在经济允许的范围内,经过充分调研、采购、老化筛选试验后选择了 22 种 LED 组成光谱分布可调谐光源,包括 19 种单色 LED 和 3 种白光 LED。19 种单色 LED 的峰值波长分别为 410, 455, 470, 475, 515, 545, 585, 605, 625, 637, 670, 680, 700, 720, 760, 770, 810, 830 和 900 nm, 3 种白光 LED 的色温分别为 3 000, 4 000 和 6 000 K。

3.3 光谱分布可调谐光源的驱动和控制系统

由于可变电流驱动会引起 LED 峰值波长的漂移、光谱半峰宽度以及相对光谱分布的变化,本文采用恒流驱动 LED 的方案,并通过改变 LED 的点亮组合改变输出光谱分布。所采用的“单片机+CPLD”控制方案的示意图如图 2 所示。电脑通过串口来控制单片机,单片机给 CPLD 发送 LED 选择位和数据位,LED 选择位确定被控制 LED 的型号,而数据位则给出了该型号 LED 的点亮组合,从而实现了控制电脑对各型号 LED 的控制。

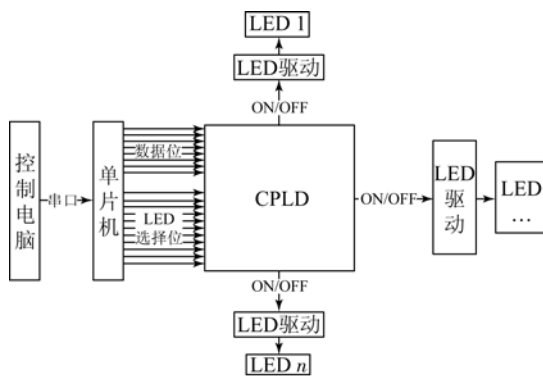


图 2 LED 控制方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of LED control project

在基底光源和积分球之间安装电动可调光阑,通过调整光阑开口改变溴钨灯进入积分球的辐射通量。光阑开口可由主控计算机通过串口来控制。

3.4 目标光谱匹配与光谱反馈调整

目标光谱匹配可看作优化组合问题,对于特定的目标光谱 $S_T(\lambda)$,通过改变 LED 的点亮组合和基底光源的入射通量使得叠加光谱 $S(\lambda)$ 逐步逼近目标光谱,所以有:

$$k_i \cdot S_{LED_i}(\lambda) + k_j \cdot S_{Bj}(\lambda) \xrightarrow{\text{approach}} S_T(\lambda). \quad (5)$$

通过调研智能优化算法,尝试引进模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)作为光谱匹配算法^[8]。SA 算法思想简单,易理解,可以很智能地得到整数最优解;但是如果把解区间定义为正整数区间,在整个正整数区间寻找最优整数解,模拟退火算法的效率将大大降低。因此,本文提出了改进型 SA 算法。改进型 SA 算法分为两步:第一步,采用最小二乘法求解 LED 光谱匹配的非负最小二乘解,根据非负最小二乘解确定 LED 的取值区间;第二步,在确定的 LED 整数解区间内,利用 SA 算法求得最优整数 LED 组合,从而大大提高了光谱匹配效率。

在实际应用中,光谱匹配分为目标光谱的光谱匹配与光谱反馈调整两部分。其中,光谱反馈调整的目的是当光源输出光谱与目标光谱存在差距时,根据反馈不断调整 LED 组合直至得到理想光谱,其流程如图 3 所示。

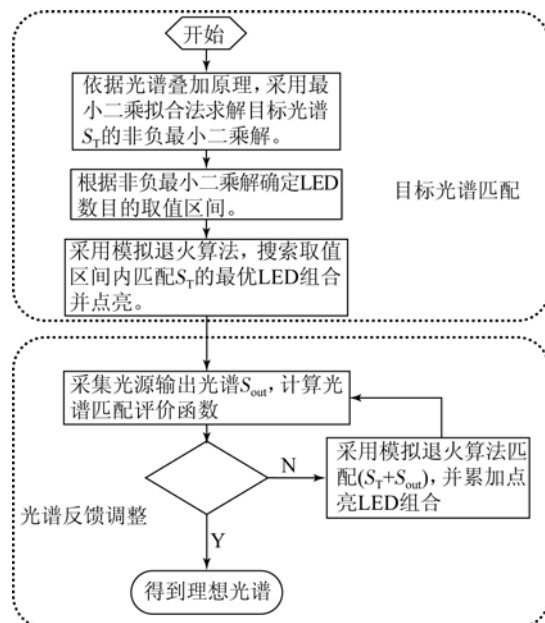


图 3 光谱匹配流程图

Fig. 3 Flowchart of spectral matching

3.5 光谱分布可调谐光源的结构设计

光谱分布可调谐光源主要包括积分球内部光源、LED模块和基底光源模块。其中,积分球内部光源为设计重点,设计时必需考虑照明模式和光源位置对积分球辐射特性的影响^[8]。图4为光谱分布可调谐光源的结构设计图。

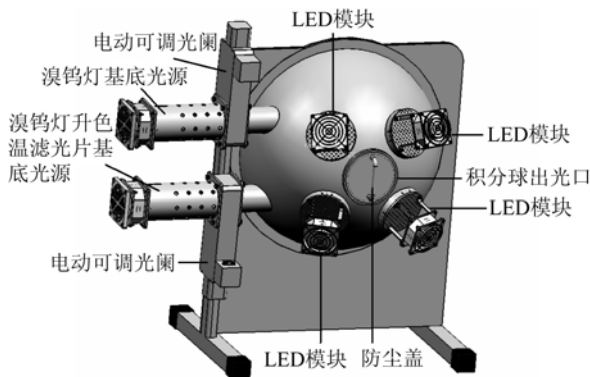


图4 光谱分布可调谐光源的结构设计图

Fig. 4 Structure of spectrum-tunable integrating sphere light source

4 光谱分布可调谐光源的标定与性能测试

在光谱分布可调谐光源中,选择美国海洋光学公司的HR2000+高分辨率光纤光谱仪作为光谱实时监测模块,实时测量光源的输出辐亮度并反馈到电脑。HR2000+作为小型模块化光谱仪,尺寸小、重量轻、其光谱波段覆盖可见光近红外,并且支持二次开发。

4.1 光谱分布可调谐光源的标定

使用之前,需要标定光谱分布可调谐光源。首先标定HR2000+光纤光谱仪,用标定好的光纤光谱仪监视光谱分布可调谐光源开口处的输出辐亮度。标定中所用的光谱辐亮度计为Photo Research公司的PR735 SpectraScan,该光谱辐亮度计由中国计量科学研究院标定。光谱仪标定现场如图5所示,具体的标定步骤如下:

(1)在光源最高输出辐亮度下确定光谱仪的积分时间,确保在此时光谱仪未饱和。

(2)在暗场和最高输出辐亮度之间选取多个辐亮度等级(包括暗场和最高输出辐亮度两个等级),用PR735 SpectraScan测量每个辐亮度等级下的光谱辐亮度,同时记录HR2000+光纤光谱仪的光谱数据。在410~900 nm波段对两者采集的数据进行插值,波长间隔为1 nm。

(3)在各个波长点,以HR2000+作为输入,PR735 SpectraScan作为输出,对HR2000+和PR735 SpectraScan的光谱数据进行多点线性拟合,得到HR2000+的校正系数。

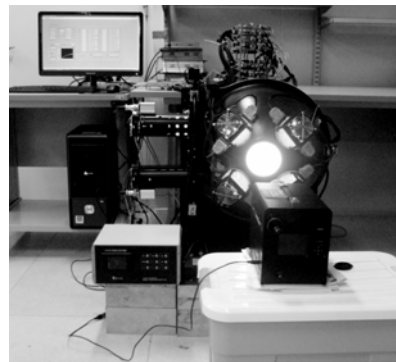


图5 光谱仪标定现场图

Fig. 5 Calibration scene of optical spectrometer

光谱仪的积分时间为50 ms,标定中划分了18个辐亮度等级,得到的HR2000+光谱仪的光谱校正系数如图6所示。

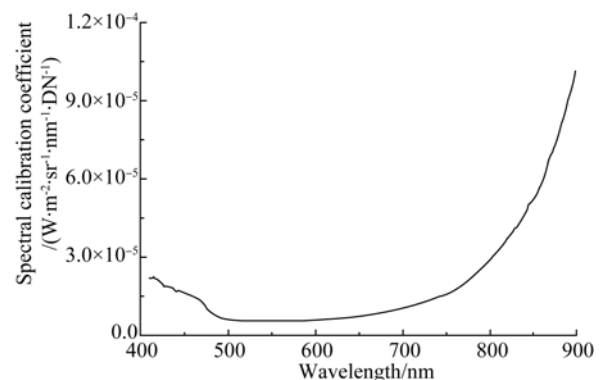


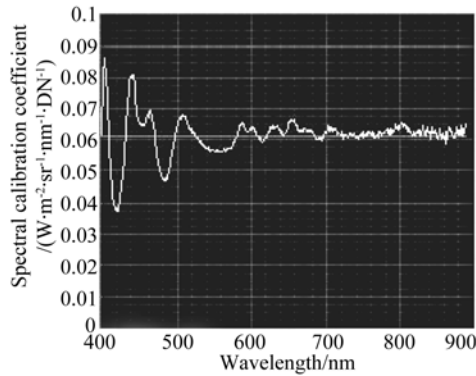
图6 HR2000+光谱仪的校正系数

Fig. 6 Calibration coefficients of optical spectrometer

4.2 光谱分布可调谐光源性能评价

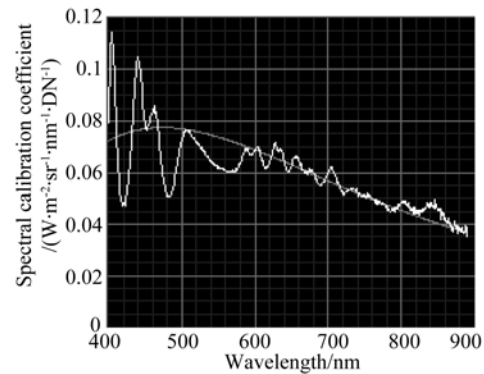
对标定好的光谱分布可调谐光源进行了性能

测试,采用该光源分别匹配了等能光谱和6 000 K 黑体光谱,光谱匹配误差^[5]分别为 6.37% 和 8.76%,匹配效果如图 7(a)和 7(b)所示。待光源稳定后,光谱分布可调谐光源的出光口 70 mm×70 mm 矩形区域内的辐照度非均匀度^[9]为 0.53%;光源出光口中心 30 min 内的辐照度不稳定性^[7]为 0.03%;光源出光口中心水平方向±30° 内的辐亮度角度非均匀度^[9]为 0.80%;光谱分布可调谐光源在最高辐亮度输出状态时,各波长处的光谱辐亮度值均高于 0.07 W/(m²·sr·nm),410~900 nm 波段的积分辐亮度为 58.3 W/(m²·sr),均满足光谱分布可调谐光源的设计指标。



(a) 6000 K 黑体光谱

(a) 6000 K blackbody spectrum



(b) 等能光谱

(b) Equi-energy spectra

图 7 匹配效果

Fig. 7 Spectral matching results

5 结 论

本文介绍了基于多光源的光谱分布可调谐光源系统,将积分球作为理想的匀光器,不仅实现了基底光源和 LED 的充分混光,而且提供了一个均匀性好、稳定性高的面光源。基底光源保证了光源系统的输出功率,而 LED 则保证了光谱分布可调谐光源的光谱可调谐能力。

光谱分布可调谐光源除了可以用于消除光谱非匹配对辐射定标精度带来的影响之外,还可以应用于光电探测器的相对光谱响应曲线测试,光电色度计的校准以及不同光谱下的植物生长实验等领域,因而具有重大的科研价值。

参考文献:

- [1] PROKHOROV A, HENRY P J, MIKHAYLOV O M, *et al.*. Spaceborne optoelectronic sensors and their radiometric calibration terms and definitions part 1. Calibration techniques [R]. NIST *Inter-agency/Internal Report* (NISTIR), 2005.
- [2] 万志,李葆勇,李宪圣,等. 积分球光源分布温度对宽波段光学遥感器绝对辐射定标的影响及其校正 [J]. *发光学报*, 2012, 33(8): 863-868.
WAN ZH, LI B Y, LI X SH, *et al.*. Influence of integrating sphere source's distribution temperature on broadband optical remote sensor's absolute radiometric calibration and correcting methods [J]. *Chinese Journal of Luminescence.*, 2012, 33(8): 863-868. (in Chinese)
- [3] WALL C F, HANSON A R, TAYLOR A F. Construction of a programmable light source for use as a display calibration artifact [J]. *SPIE*, 2001, 4295: 259-266.
- [4] BROWN W, SANTANA C, EPELDAUER P. Development of a tunable LED-based colorimetric source [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2002, 107(4): 363-371.
- [5] 刘洪兴,任建伟,李葆勇,等. 基于溴钨灯和 LED 积分球光源的可调谐光谱分布及光谱匹配 [J]. *发光学报*, 2011, 32(10): 1074-1080.
LIU H X, REN J W, LI B Y, *et al.*. Spectrum-tunable distribution and spectral matching for

- integrating sphere light source based on bromine tungsten lamps and LEDs [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32 (10): 1074-1080. (in Chinese)
- [6] 陈凤,郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 415-419. CHEN F, ZHENG X B. Influence of spectrum mismatching on calibration precision of remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (3): 415-419. (in Chinese)
- [7] 刘洪兴,孙景旭,刘则洵,等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1447-1454. LIU H X, SUN J X, LIU Z X, *et al.*. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1447-1454. (in Chinese)
- [8] 汪定伟,王俊伟,王洪峰,等. 智能优化算法[M]. 北京:高等教育出版社,2007. WANG D W, WANG J W, WANG H F, *et al.*. *Intelligent Optimization Methods* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 刘洪兴,任建伟,李宪圣,等. 基于 LightTools 的大口径积分球光源辐射特性仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 960-965. LIU H X, REN J W, LI X SH, *et al.*. Radiometric characteristics simulation of large aperture integrating sphere base on LightTools [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 960-965. (in Chinese)

作者简介:

刘洪兴(1986—),男,山东聊城人,博士,主要从事光学遥感器辐射定标以及光谱分布可调谐光源方面的研究。E-mail:lhxing_888@126.com

通讯作者:

任建伟(1956—),男,吉林长春人,高级工程师,研究生导师,主要从事光谱/辐射测试设备的开发研制和光学遥感辐射校正方面的研究。E-mail:Renjw@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)