大口径空间滤波调制红外光谱仪定标方法

佟惠原,马勇辉,逯 祎,朱小芳

(光学辐射重点实验室,北京 100854)

摘 要: 红外辐射特性是对弱小目标进行探测与识别的重要依据,进行过辐射定标的大口径观测设 备适用于弱小目标红外辐射特性的获取。大口径空间滤波调制红外光谱仪就是用于观测弱小目标的 设备之一。文中讨论了一种适合应用于大口径空间滤波调制红外光谱测量系统的辐射定标方法,该 方法由腔黑体加平行光管这种组合提供红外全谱段的标准辐射,计算了待定标光谱仪测量系统口面 处各通道的辐射照度,用于红外短中长波的标校。用最小二乘法拟合得到光谱仪响应 DN 值与辐射照 度之间的定标曲线,并给出了实际定标结果。最后分析了辐射定标不确定度的来源及合成结果,合成 定标不确定度在 10%之内,满足大口径空间滤波调制红外光谱仪的定标需求。

关键词:辐射定标; 红外光谱仪; 大口径

中图分类号: TN216 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)03-0569-05

Calibration method for large diameter spatial filter IR spectrometer

Tong Huiyuan, Ma Yonghui, Lu Yi, Zhu Xiaofang

(The Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: The infrared radiation characteristic is an important basis for detection and identification of dim target. The acquisition of the infrared radiation characteristic of dim target needs to utilize the large diameter calibrated equipment. Spatial filter IR spectrometer can be utilized in the observation of dim target. A radiant calibration method was studied in this paper which could be applied in large diameter IR spectrometer calibration system. With this method, the radiant existance of channels around the aperture of the spectrometer measuring system was calculated according to the standard multispectral infrared radiation supplied by the combination of blackbody and collimator tube, and it was applied into the calibration of long, short and medium wave infrared. The calibration curve was fitted with the least square method and the actual calibration result was presented. The origin and combined result of calibration uncertainty was analyzed, the combined calibration uncertainty was below 10%, which met the calibration requirement of large diameter spectrometers.

Key words: calibration; IR spectrometer; large diameter

收稿日期:2012-07-05; 修订日期:2012-08-03

基金项目:国家自然科学基金(40905011)

作者简介:佟惠原(1986-),男,硕士,主要从事红外辐射定标方面的研究。Email:thy115mac@yahoo.com.cn

0引 言

为了获取弱小辐射源的红外光谱信息,需要使 用大口径的红外光谱测量系统。探索与其相适应的 辐射定标技术,才能使其测量数据准确有效。这不仅 关系到测量的成败,也直接影响到对辐射测量结果 的解释。传统的红外光谱仪定标方法是在室内使用 黑体或平行光管进行全孔径照射标校,但这种方法 对于大口径观测系统需要大口径面源黑体或大口径 平行光管,设备造价成本高,实现难度大,当口径大 到一定程度甚至无法实现。

文中针对大口径空间滤波调制红外光谱测量系统 进行定标方法研究。利用腔式黑体加小口径平行光管 的方法提供标准红外辐射,将测量系统的原始测量信 号转换为用于定量描述辐射源光谱信息的辐射照度 值,使得大口径测量系统能够满足定量测量的需求。

1 定标原理

对于大口径的光谱测量系统,该方法用于定标 的平行光管口径小于待定标测量系统的口径,如图1 所示。使用标准黑体作为定标源,黑体发出的辐射 通过光阑进入平行光管,光阑放在平行光管的焦面 处,实现对辐射源的模拟,光阑装有测温传感器,透 过光阑的辐射经平行光管转化为平行光输出到大口 径光谱测量系统入瞳处,同时入射到大口径光谱测 量系统入瞳处的还有光阑孔附近光阑盘的辐射以及 背景辐射。





Fig.1 Calibration schematic using parallel fluorescent tube and blackbody

对于采用空间滤波调制的大口径红外光谱仪,输 出信号由测量系统两列探测器差分得出信号,因此, 在工作过程中,一列探测器接收到的能量包括三部 分:黑体辐射、光阑盘辐射和背景辐射,另一列探测器 接收到的能量包括两部分:光阑盘辐射和背景辐射。 定表系统与测量系统框图如图 2 所示。



Fig.2 Calibration system block diagram

设第 i 个探测器单元面积为 A_d, 它经过光谱测 量系统的光学系统和平行光管后在定标黑体上的投 影面积为 A_{di}, 光谱测量系统的入瞳面积为 A₀, 焦距 为 f₀, 平行光管出射面积为 A_c, 焦距为 f, 平行光管对 光谱仪 n 个通道的透过率分别为 τ_i(i=1,2,3,…,n), 黑体温度为 T_{bb}, 黑体发射率为 ε_{bb}, 光阑盘温度为T_{dp}, 光阑盘发射率为 ε_{dph}, 定标黑体在测量设备波段范围 的积分辐亮度为 L_{bb}(T_{bb}), 光阑盘在测量设备波段范 围的积分辐亮度为 L_{dp}(T_{dp})。

黑体通过光阑孔能被第 i 个探测器接收到的辐 通量为:

$$\Phi_{1} = \mathbf{L}_{bb}(\mathbf{T}_{bb}) \mathbf{A}_{bb} \frac{\mathbf{A}_{c}}{\mathbf{f}^{2}} \tau_{i}$$
(1)

光阑孔附近的部分光阑盘能被第i个探测器接 收到的辐通量为 Φ_{20} 第i个探测器接收到的背景辐 通量为 Φ_{30}

观测到目标的探测器上接收到的入瞳处的能量 照度可表示为:

$$\mathbf{E}_{A} = \left[\mathbf{L}_{bb}(\mathbf{T}_{bb}) \mathbf{A}_{bb} \frac{\mathbf{A}_{c}}{\mathbf{f}^{2}} \tau_{i} + \Phi_{2} + \Phi_{3} \right] \frac{1}{\mathbf{A}_{0}}, (\mathbf{i} = 1, 2, \cdots, \mathbf{n}) \quad (2)$$

观测背景的探测器上接收到的入瞳处能量照度 可表示为:

$$\mathbf{E}_{B} = \left[\mathbf{L}_{dph}(\mathbf{T}_{dph}) \mathbf{A}_{bb} \frac{\mathbf{A}_{c}}{\mathbf{f}^{2}} \tau_{i} + \Phi_{2} + \Phi_{3} \right] \frac{1}{\mathbf{A}_{0}}, (i=1,2,\cdots,n) (3)$$

光谱仪对消后的信号可以用等效于直接照射到 光谱仪全孔径的有效照度来表示,即入射的辐通量 平均分配到光谱仪全孔径面积上,不妨在此称它为 等效辐射照度:

$$E = E_A - E_B = (L_{bb}(T_{bb}) - L_{dph}(T_{dph})) A_{bb} \frac{A_c}{f^2} \frac{\tau_i}{A_0},$$

 $(i=1, 2, \cdots, 45)$ (4)

由上式即可确定光谱测量系统入瞳处的等效辐射照度,再根据系统输出的响应灰度信号,就可以实现对光谱测量系统的光谱辐射标校。

一元回归是处理两个变量之间的关系,即两个 变量 x 和 y 之间若存在一定的关系,则通过实验,分 析所得数据,找出两者之间关系的模型。假如两个变 量之间的关系是线性的就称为一元线性回归,这就 是工程上和科研中常遇到的曲线拟合问题。而最小 二乘法又是科学实验中求取最佳值及误差估计的有 力数学工具,在曲线拟合中又具有独到的好处。

定标过程主要针对几个温度点,而对于整个温 度范围来说,必须知道任意温度所对应的探测器输 出值,因此,需要根据已设定的温度得到成像系统在 整个工作温度范围内的定标曲线,从而完成整个定 标过程。探测器输出与入射辐照度成线性关系,因 此,使用方法为线性曲线拟合。

2 试验方法与结果

在辐射定标过程中,在设定温度上连续采样 600 次,并将最终观测结果求平均值,从而得到每个亮度 对应的系统输出灰度值,最后利用曲线拟合的方法 得到定标曲线。定标流程如图 3 所示。



Fig.3 Calibration flow diagram



表 1 测量数据表 Tab.1 Calibration data

Channel		100 °C	150 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °С
1	Normalized illuminance	1.05e-03	4.36e-03	1.33e-02	6.89e-02	2.18e-01	5.15e-01	1.00e+00
	DN	3 734	3 897	4 281	6 342	11 485	21 091	36 702
2	Normalized illuminance	7.54e-03	2.11e-02	4.66e-02	1.50e-01	3.39e-01	6.23e-01	1.00e+00
	DN	3 943	4 459	5 377	8 999	15 884	25 813	39 119
3	Normalized illuminance	6.15e-02	1.13e-01	1.78e-01	3.41e-01	5.38e-01	7.60e-01	1.00e+00
	DN	4 458	5 254	6 195	8 566	11 551	14 852	18 314

中,通道1、2为中波两通道,通道3为长波通道。

利用线性回归方法拟合出定标曲线 y=a₀+a₁x, 光谱仪部分通道定标系数如下,红外光谱仪振镜方 式部分通道拟合结果如表 2 所示。

表 2 定标结果表

Tab.2 Calibration result							
Channel	a ₀	a ₁					
1	3 934.443	32 955.79					
2	3 729.724	35 438.57					
3	3 559.894	14 796.79					

通道1、通道2、通道3的坐标曲线分别如图4~6

所示。





3 误差分析

误差分析是衡量定标系统和方法的重要标准, 保证测量系统能够满足定量测量的置信度要求。计 算光谱仪等效辐射照度的公式如公式(4)所示,可以 得知等效辐射照度 E 的不确定度与输入量 _{7i}, A_{bb}, A_c, A_o, ε_{bb}, T_{bb}, ε_{qph}, T_{qph}, f 的不确定度有关,这些物理 量的不确定度如下:

τ: 平行光管反射率。在包含因子 k=2(95%置信)
 时给出的相对扩展不确定度 U_{rel}(τ_i)=3%,相对标准
 不确定度 u_{rel}(τ_i)=1.5%。

 A_{c} :平行光管出瞳面积。平行光管出瞳有效口径 d_{c} 测量值在不确定范围内的概率分布为均匀分布, 此时包含因子 $k = \sqrt{3}$,出瞳面积的相对标准不确定 度 $u_{rel}(A_{c}) = \frac{u(A_{c})}{A_{c}} = 0.06\%$ 。

 $A_{o:}$ 望远镜入瞳面积。望远镜入瞳有效口径 d_{o} 在 不确定范围内的概率分布为均匀分布,此时包含因 子 $k = \sqrt{3}$,出瞳面积的相对标准不确定度 $u_{rel}(A_{o}) = \frac{u(A_{o})}{A_{o}} = 0.19\%$ 。 ϵ_{bb} :定标黑体的发射率。黑体发射率 ϵ_{bb} =0.92,在 包含因子 k=2 (95%置信)时给出的相对扩展不确定度 U_{rel}(ϵ_{bb})=0.4%,相对标准不确定度 u_{rel}(ϵ_{bb})= $\frac{u(\epsilon_{bb})}{c}$ =0.2%。

T_{bb}: 定标黑体的温度。在包含因子 k=2(95%置 信)时给出的扩展不确定度 U(**T**_{bb})=0.5 K,标准不确定 度 u(**T**_{bb})= $\frac{U(T_{bb})}{k}$ =0.25 K。当**T**_{bb}= $\frac{U(T_{bb})}{k}$ =50 ℃=323.15 K 时,相对标准不确定度最大,u_{rel}(**T**_{bb})= $\frac{u(T_{bb})}{T_{bb}}$ =0.08%。

 A_{bb} : 光阑孔面积。光阑孔有效口径 d_{bb} 测量值在 不确定范围内的概率分布为均匀分布,此时包含因 子 $k = \sqrt{3}$, 光阑孔面积的相对标准不确定度 $u_{rel}(A_{bb}) = \frac{u(A_{bb})}{A_{bb}} = 0.28\%$ 。

 ε_{dph} : 光阑盘发射率。背景参考板发射率 $\varepsilon_{dph}=0.9$, 在包含因子 k=2(95%置信)时给出的相对扩展不确 定度 u_{rel}(ε_{bkg})=2%,相对标准不确定度 u_{rel}(ε_{bkg})= $\frac{u(\varepsilon_{bkg})}{\varepsilon_{bkg}}$ = 1%。

 T_{tph} :光阑盘温度。在包含因子 k=2(95%置信)时 给出的扩展不确定度 U(T_{tkg})=0.5 K,相对标准不确定 度 $u_{rel}(T_{tkg})=\frac{u(T_{tkg})}{T_{tem}}=0.085\%$ 。

f:平行光管焦距。在包含因子 k=2(95%置信)时 给出的相对扩展不确定度 U_{rel}(f)=2%,相对标准不确 定度 u_{rel}(f)=1%。

合成标准不确定度

$$\mathbf{u}_{crel} = ([\mathbf{u}_{rel}(\tau_i)]^2 + [\mathbf{u}_{rel}(\mathbf{A}_{bb})]^2 + [\mathbf{u}_{rel}(\mathbf{A}_c)]^2 + [\mathbf{u}_{rel}(\mathbf{A}_o)]^2 + [\mathbf{u$$

 $[\mathbf{u}_{rel}(\mathbf{f})]^2 + [\mathbf{u}_{rel}(\boldsymbol{\varepsilon}_{bb})]^2 + [4\mathbf{u}_{rel}(\mathbf{T}_{bb})]^2 + [\mathbf{u}_{rel}(\boldsymbol{\varepsilon}_{dph})]^2 +$

 $[4u_{rel}(T_{dph})]^2)^{\frac{1}{2}} = 2.15\%$

在包含因子 k=2(95%置信)时给出相对扩展不确定度 U_{ref}(E)=4.3%。

在包含因子 k=2.6(99%置信)时给出相对扩展不确定度 U_{ref}(E)=5.59%。

4 结 论

文中讨论了适合应用于大口径空间滤波红外光 谱测量系统的定标方法,由腔黑体加平行光管这种 组合提供红外全谱段的标准辐射,满足各种光谱仪 设备的定标需求,利用空间滤波调制对消背景辐射 提高了定标的精度,受环境影响小,定标不确定度控 制在 10%之内,满足大口径光谱测量系统定标需求。 但由于黑体温度范围、平行光管口径及该方法的局 限性,只能实现中温段的定标。线性拟合算法只适用 于探测器响应的线性区定标,如需扩展定标范围,可 采用高次多项式拟合算法。同时,该方法稍作改进也 可用于红外 FPA 的辐射定标。

参考文献:

下期预览

- [1] Tang Jia, Gao Xin. Calibration method for infrared radiation characteristics measuring system of test range [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 266-270. (in Chinese) 唐嘉, 高昕. 靶场红外特性测量系统标定方法研究 [J]. 红 外与激光工程, 2006, 35(2): 266-270.
- [2] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared Physics [M]. Xi'an:

Xidian University Press, 2004: 57-74. (in Chinese) 张建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 西安电子科技大学出版 社, 2004: 57-74.

- [3] Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguo, et al. Research on calibration device for a large aperture infrared opto-electric system on spot [J]. Journal of Optoeletronics Laser, 2006, 17(2): 175-178. (in Chinese)
 李宪圣, 任建伟, 张立国, 等. 大口径红外光电系统现场辐射 定标装置的研制[J]. 光电子·激光, 2006, 17(2): 175-178.
- [4] Greg Matis, Jack Grigor, Jay James, et al. Radiance calibration of target projectors for infrared testing [C]//SPIE, 2006, 6207: 1-11.
- [5] Wang Xia, Gao Zhiyun, Zhang Jianyong, et al. Research on calibration method of three band infrared integrated radiometer [J]. Optical Design and Testing, 2002, 4927: 133-138.

大口径望远镜主镜保护盖设计研究

陈宝刚,王 帅,杨 飞,张景旭

(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:针对某米级光学望远镜设计了四门对开花瓣式主镜保护盖。简要介绍了国内外已建成大口径望远镜主镜保护盖的主要结构形式,利用铰链四杆机构的演化偏置曲柄滑块机构为基体进行优化设计,得出一种 不需曲柄存在的四杆机构,建立运动学模型,对其受力状态进行分析,计算了电机所需的驱动力矩、滑块的移 动位移及镜盖开关时间。实际工程应用表明,该保护盖对主镜能够有效防尘及保护,单次打开或关闭时间约 为 62.5 s,在长春地区无故障使用时间大于一年,免维护开关次数大于 500 次。满足系统设计要求,为后续研 究者提供了设计参考。