

# 一种 2~14 $\mu\text{m}$ 红外光谱辐射计的辐射定标方法

刘加庆<sup>1,2,3\*</sup>, 韩顺利<sup>2,3</sup>, 孟鑫<sup>1,2,3</sup>, 胡德信<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555;

<sup>2</sup> 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555;

<sup>3</sup> 中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555

**摘要** 提出了一种分区多点标定的辐射定标方法。定标原理如下:将测量目标的温度区间分为  $n$  个子区间,测量并记录目标温度区间内  $n+1$  个不同温度黑体对应的红外光谱辐射计输出数据,并分别计算各个子区间的定标系数;进行红外光谱辐射测量时,比对红外光谱辐射计输出数据和记录数据,确定待测目标所属温度子区间;使用对应子区间的定标系数进行辐射定标,以提高测量精度。使用该方法对研制的渐变滤光片型红外光谱辐射计进行辐射定标,并根据定标结果反演测量黑体的等效亮温温差。实验结果表明,该方法的辐射定标精度优于 1.5 K,可应用于红外光谱辐射计的辐射定标。

**关键词** 测量; 红外光谱辐射计; 线性渐变滤光片; 分区多点标定法; 辐射定标

中图分类号 TP732.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0212003

## Radiometric Calibration Method of 2–14 $\mu\text{m}$ Infrared Spectroradiometer

Liu Jiaqing<sup>1,2,3\*</sup>, Han Shunli<sup>2,3</sup>, Meng Xin<sup>1,2,3</sup>, Hu Dexin<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao, Shandong 266555, China;

<sup>2</sup> The 41<sup>st</sup> Research Institute of CETC, Qingdao, Shandong 266555, China;

<sup>3</sup> China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266555, China

**Abstract** As a wide spectral range and high resolution infrared spectroradiometer based on linear variable filters has been developed, a new sub-region multi-point calibration method is proposed. Its calibration principle is as follows. First, divide the target temperature region into  $n$  sub-regions, measure and record the infrared spectroradiometer data corresponding to  $n+1$  blackbodies with different temperatures in the target region, and calculate the calibration coefficient for each sub-region. During the measurement of an unknown radiation spectrum, compare the blackbody spectra previously measured at calibration temperatures in order to find the proper sub-region. Use the corresponding calibration coefficient for calibration in order to improve measurement accuracy. We use this calibration method to calibrate a self-developed linear variable filter-based spectroradiometer and inverse the blackbody temperature error according to calibration results. The experiment results show that the calibration accuracy better than 1.5 K is achieved, and the proposed method can be used for radiometric calibration of infrared spectroradiometers.

**Key words** measurement; infrared spectroradiometer; linear variable filter; sub-region multi-point calibration method; radiometric calibration

**OCIS codes** 120.0280; 120.2440; 120.5630; 040.3060

## 1 引 言

目前,红外光谱辐射计不断向宽工作波段、高光谱分辨率、高探测灵敏度以及高测量速度等方向发展,已广泛应用于目标识别、大气与环境探测、光电系统测试和计量等领域。红外光谱辐射计按分光机

理可分为四类:滤光片轮型、棱镜型、光栅型和干涉分光型。每类辐射计各有其优缺点,适用于不同场合<sup>[1-3]</sup>。目前商用红外光谱辐射计多采用滤光片和干涉分光方式。本文提出的红外光谱辐射计是一类集光谱仪与辐射计于一身的红外测量仪器,主要用于获取目标的红外光谱辐射信息。通过比较已知红

收稿日期: 2018-06-05; 修回日期: 2018-09-12; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61727821)、安徽省自然科学基金(1808085QF201)

\* E-mail: jiaqing@mail.ustc.edu.cn

外光谱辐射特性黑体的测量结果,实现仪器输出信号向辐射信号的转换,这一过程又称为辐射定标。红外光谱辐射计的测量精度受辐射定标精度的影响很大<sup>[4-5]</sup>。

目前,常用的辐射定标方法主要有单点法、两点法等<sup>[6-12]</sup>。单点法适用于分辨率低、光谱辐射测量点数较少的情况,标定过程简单、快速。两点法在仪器线性度好的情况下,标定精度很高,适用于光谱辐射测量点数较多的情况<sup>[13-14]</sup>。研制的 6364D 渐变滤光片型红外光谱辐射计采用现有两点定标方法进行辐射定标时,标定结果表明测量的红外光谱辐射谱存在较大偏差,标定误差达到 4 K,这主要是由红外光谱辐射计的非线性响应、仪器测量目标的大温度范围及宽工作波段等因素造成。因此,两点定标方法难以实现 1.5 K 标定精度的宽波段红外光谱辐射计的辐射定标。

针对以上问题,本文提出了一种分区多点标定的辐射定标方法,将待测目标温度区间分为多个子区间,分别计算红外光谱辐射计对应的定标系数;测量红外光谱辐射时,确定目标所处温度子区间,并使用最佳定标系数进行辐射定标,以提高测量精度。实验测试表明,该方法的辐射标定精度优于 1.5 K。

## 2 高精度宽波段红外光谱辐射计

需要进行辐射定标的 6364D 红外光谱辐射计如图 1 所示,由主机和光学单元组成,红外光谱辐射测量范围为 2~14  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率为测量波长的 2%,测量速度为 0.015~10 scan/s。该辐射计采用渐变滤光片作为分光元件,采用三明治结构 InSb/HgCdTe 双色探测器实现 2~14  $\mu\text{m}$  波段覆盖。6364D 型红外光谱辐射计的主要性能参数见表 1。

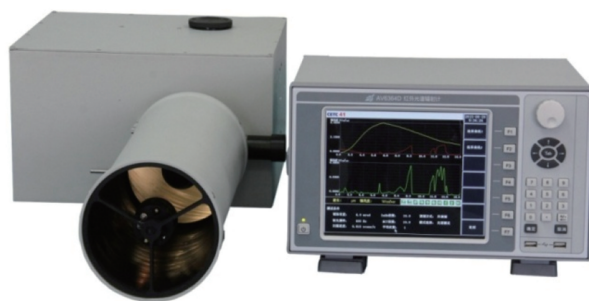


图 1 6364D 红外光谱辐射计

Fig. 1 6364D infrared spectroradiometer

渐变滤光片(LVF)是一种特殊的新型超窄带滤光片,滤光片膜层厚度沿某一方向均匀增加或减小,使得滤光片的通道中心波长等指标发生线性变化。渐变式滤光片的分光原理是利用高精度步进电机驱动渐变滤光片运动,使入射光依次通过渐变滤光片波长变化方向上的不同位置,即可得到中心波长依次变化的出射光,从而实现入射光的光谱分光,如图 2 所示。图 3 所示为 6364D 红外光谱辐射计所用三明治 InSb/HgCdTe 双色探测器的光谱响应曲线。

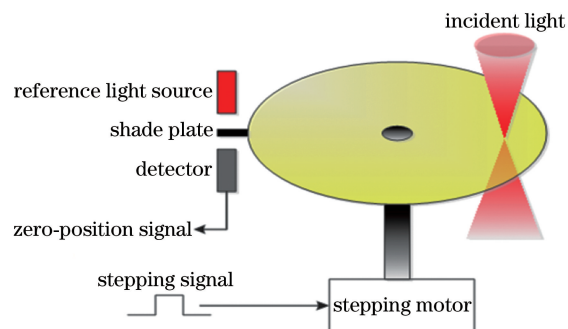


图 2 基于渐变滤光片的光谱分光原理

Fig. 2 Principle of spectrum split based on LVF

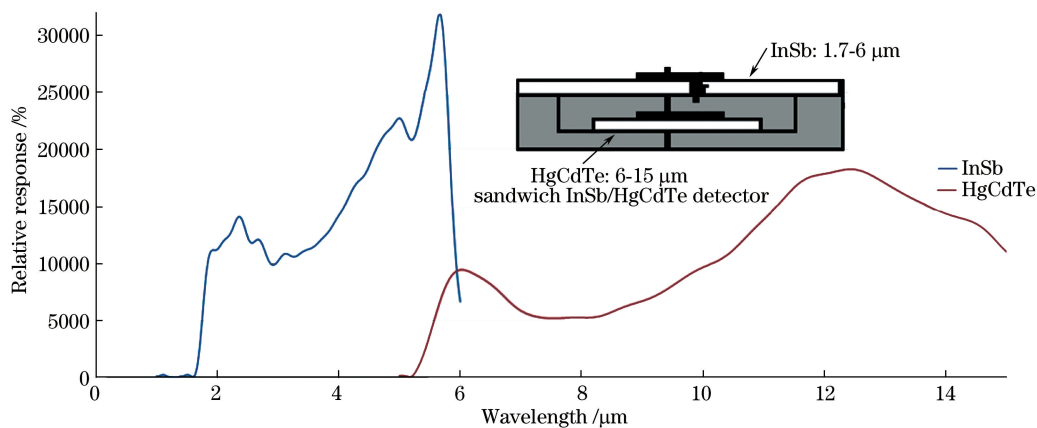


图 3 三明治 InSb/HgCdTe 双色探测器响应曲线

Fig. 3 Response curve of a sandwich InSb/HgCdTe detector

表 1 6364D 型红外光谱辐射计的主要性能参数  
Table 1 Specifications of 6364D infrared spectroradiometer

Specification	Parameter
Spectral range	2-14 $\mu\text{m}$
Spectral resolution	2% of wavelength
Spectral scan rate	0.015, 0.1, 1, 5, 10 scan/s
Noise equivalent temperature difference	$\leq 40$ mK@13 $\mu\text{m}$ , 1 Hz bandwidth, 370 K blackbody
Field of view	0.3, 0.5, 1, 1.5, 2.4, 4, 5, 6 mrad
Entrance pupil diameter	120 mm
Field of view uniformity	$\pm 8\%$
Focusing distance	2.5 m to $\infty$
Saturation radiation	5.4 mW (typical, InSb)
Chopping frequency	600, 900, 1800 Hz
Size (width $\times$ high $\times$ depth)	Optics unit: $\leq 400$ mm $\times$ 400 mm $\times$ 800 mm IPC: $\leq 319$ mm $\times$ 177 mm $\times$ 300 mm
Weight	22.5 kg

### 3 分区多点辐射定标原理

#### 3.1 红外光谱辐射计的辐射模型

红外光谱辐射计的系统结构如图 4 所示,采用斩光加锁相放大方案,以改善对微弱红外信号的探测能力。进行红外光谱辐射测量时,探测器接收的红外辐射主要为外部辐射与仪器自身辐射之和。

探测器接收的辐射中,由光学系统入瞳处进入的红外辐射  $W_{op}(\lambda)$  可表示为

$$W_{op}(\lambda) = W(\lambda)\tau(\lambda, p) + P(\lambda, T_{air})[1 - \tau(\lambda, p)], \quad (1)$$

式中:  $W(\lambda)$  为观测目标的红外辐射,  $\lambda$  为波长;  $\tau(\lambda, p)$  为观测目标与光谱辐射测量系统间路径长度为  $p$  时的大气透过率;  $P(\lambda, T_{air})$  为大气温度  $T_{air}$  时的理想透过率。某些情况下,例如大气窗口、实验室环境下路径长度  $p$  很小时,可近似认为  $\tau(\lambda, p) \approx 1$ 。

将前光路、结构组件作为整体考虑时,斩光器处接收的入射辐射  $W_{is}(\lambda)$  为光学入瞳处接收的辐射与前光路自身辐射之和,即

$$W_{is}(\lambda) = W_{op}(\lambda)\tau_{fo}(\lambda) + \epsilon_{fo}(\lambda)B_{fo}(\lambda, T_{fo}), \quad (2)$$

式中:  $\tau_{fo}(\lambda)$  为前光路透过率;  $B_{fo}(\lambda, T_{fo})$  为前光路的自身辐射;  $\epsilon_{fo}(\lambda)$  为前光路的辐射率。

经斩光器调制后的入射辐射可表示为

$$W_{ch}(\lambda) = W_{is}(\lambda)\tau_{ch}(\lambda) + [1 - \tau_{ch}(\lambda)]B_{ch}(\lambda, T_{ch}), \quad (3)$$

式中:  $\tau_{ch}(\lambda)$  为斩光器透过率;  $B_{ch}(\lambda, T_{ch})$  为斩光器的自身辐射。

由于后光路自身辐射信号未经调制,理论上其对红外光谱辐射计的输出信号无贡献;考虑到光学系统缺陷、温漂、杂散光等因素,可将此类缺陷或误差当作噪声项  $\sigma(\lambda)$ 。

最终到达探测器的入射辐射  $W_{det}(\lambda)$  可表示为

$$W_{det}(\lambda) = W_{ch}(\lambda)\tau_{ao}(\lambda) + \sigma(\lambda), \quad (4)$$

式中:  $\tau_{ao}$  为后光路的透过率。

由于红外光谱辐射计工作在室温条件下,故前光路、斩光器等温度均为室温  $T_{amb}$ , 即  $T_{fo} = T_{ch} = T_{amb}$ 。根据(1)~(4)式可得探测器接收的入射红外辐射为

$$W_{det}(\lambda) = W(\lambda)\tau_{fo}(\lambda)\tau_{ch}(\lambda)\tau_{ao}(\lambda) + B_{amb}(\lambda, T_{amb}) \cdot$$

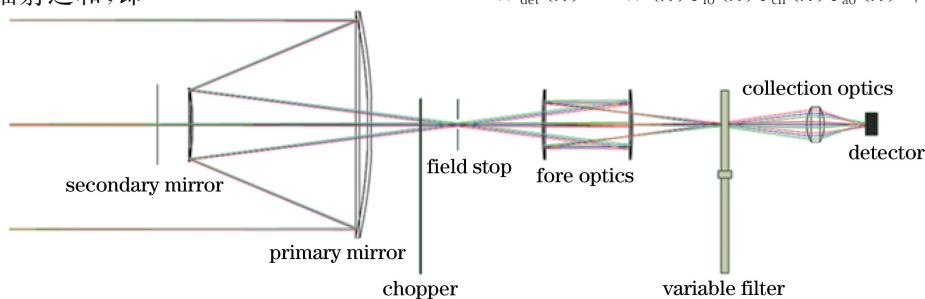


图 4 红外光谱辐射计系统结构

Fig. 4 System configuration of infrared spectroradiometer

$$\{\epsilon_{fo}(\lambda)\tau_{ch}(\lambda) + [1 - \tau_{ch}(\lambda)]\} + \sigma(\lambda), \quad (5)$$

式中: $B_{amb}(\lambda, T_{amb})$ 表示黑体为室温时的理论红外光谱辐射值。

### 3.2 分区多点辐射定标方法

红外光谱辐射计输出信号  $S(\lambda)$  与探测器接收入射红外辐射  $W_{det}(\lambda)$  的关系为

$$S(\lambda) = G(\lambda)W_{det}(\lambda) + O(\lambda), \quad (6)$$

式中: $G(\lambda)$ 为系统增益; $O(\lambda)$ 为系统偏置。确定  $G(\lambda)$  和  $O(\lambda)$ , 并将(5)式代入(6)式, 即可得到目标的红外光谱辐射值。

分区多点辐射定标算法的数学描述如下: 将红外光谱辐射计测量目标的温度区间分为  $n$  个子区间, 测量待测目标温度范围内  $n+1$  个不同温度黑体对应的红外光谱辐射计输出谱  $S^i(\lambda)$ ; 分别测量并计算得到各个子区间对应的辐射标定系数  $G^i(\lambda)$  和  $O^i(\lambda)$ ; 进行红外光谱辐射测量时, 比较测量谱  $S_m(\lambda)$  与  $n+1$  个不同温度黑体对应的输出谱

$S^i(\lambda)$ , 以判断测试目标所在温度子区间, 并用对应的辐射定标系数对测量谱  $S_m(\lambda)$  进行辐射定标, 得到观测目标的红外光谱辐射强度值。对用于计算辐射标定系数的测量数据进行叠加均值处理, 以提高信噪比。

辐射定标时, 假定各子区间内的定标系数是与仪器测量温度无关的常数。分别测量子区间温度上限  $T_{hot}^i$  和温度下限  $T_{cold}^i$  对应的定标黑体, 则红外光谱辐射计输出信号与探测器接收的入射辐射满足

$$S_{cold}^i(\lambda) = G^i(\lambda)W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i) + O^i(\lambda), \quad (7)$$

$$S_{hot}^i(\lambda) = G^i(\lambda)W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) + O^i(\lambda), \quad (8)$$

式中: $S_{hot}^i(\lambda)$ 、 $S_{cold}^i(\lambda)$ 为测量  $T_{hot}^i$ 、 $T_{cold}^i$  温度黑体的红外光谱辐射计输出信号;  $W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i)$ 、 $W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)$ 为测量  $T_{hot}^i$ 、 $T_{cold}^i$  温度黑体时探测器接收的入射红外辐射;  $G^i(\lambda)$ 、 $O^i(\lambda)$ 为红外光谱辐射计在温度子区间  $[T_{cold}^i, T_{hot}^i]$  内的辐射定标系数。

联立(7)、(8)式, 可得辐射定标系数为

$$G^i(\lambda) = [S_{hot}^i(\lambda) - S_{cold}^i(\lambda)] / [W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) - W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)], \quad (9)$$

$$O^i(\lambda) = [S_{cold}^i(\lambda)W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) - S_{hot}^i(\lambda)W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)] / [W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) - W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)]. \quad (10)$$

红外光谱辐射计测量未知目标时, 确定目标辐射等效亮温温度所属温度子区间后, 目标的红外光谱辐射值  $W(\lambda)$  计算公式为

$$W(\lambda) = [S(\lambda) - O^i(\lambda)] / G^i(\lambda). \quad (11)$$

联立(5)、(9)、(10)式, 整理得到子区间的辐射定标系数:

$$G^i(\lambda) = [S_{hot}^i(\lambda) - S_{cold}^i(\lambda)] / \{ [W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) - W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)] \tau_{fo}(\lambda) \tau_{ch}(\lambda) \tau_{ao}(\lambda) \}, \quad (12)$$

$$O^i(\lambda) = [S_{cold}^i(\lambda)W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) - S_{hot}^i(\lambda)W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)] / [S_{hot}^i(\lambda) - S_{cold}^i(\lambda)] + [\sigma_{hot}^i(\lambda) - \sigma_{cold}^i(\lambda)] / \{ [S_{hot}^i(\lambda) - S_{cold}^i(\lambda)] \tau_{fo}(\lambda) \tau_{ch}(\lambda) \tau_{ao}(\lambda) \}, \quad (13)$$

式中: $\sigma_{hot}(\lambda)$ 、 $\sigma_{cold}(\lambda)$ 分别为红外光谱辐射计测量  $T_{hot}^i$ 、 $T_{cold}^i$  温度黑体时的噪声项。

将(12)、(13)式代入(11)式, 便可得到辐射定标后红外光谱辐射计测量获得的目标红外光谱辐射值:

$$W(\lambda) = S(\lambda) [W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) - W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)] / [S_{hot}^i(\lambda) - S_{cold}^i(\lambda)] - [S_{cold}^i(\lambda)W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) - S_{hot}^i(\lambda)W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)] / [S_{hot}^i(\lambda) - S_{cold}^i(\lambda)] + [\sigma_{hot}^i(\lambda) - \sigma_{cold}^i(\lambda)] / \{ [S_{hot}^i(\lambda) - S_{cold}^i(\lambda)] \tau_{fo}(\lambda) \tau_{ch}(\lambda) \tau_{ao}(\lambda) \}. \quad (14)$$

(14)式中最后一项表示光学系统、结构等引入的误差及噪声, 这也是辐射定标的主要误差项及定标不确定性的主要来源。考虑到后续电子学系统的误差

及噪声, 可将两者合并, 用噪声项  $n$  表示, 因此(14)式, 即测量目标的定标红外光谱辐射值可表示为

$$W(\lambda) = S(\lambda) [W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) - W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)] / [S_{hot}^i(\lambda) - S_{cold}^i(\lambda)] - [S_{cold}^i(\lambda)W_{det}^{hot}(\lambda, T_{hot}^i) - S_{hot}^i(\lambda)W_{det}^{cold}(\lambda, T_{cold}^i)] / [S_{hot}^i(\lambda) - S_{cold}^i(\lambda)] + n. \quad (15)$$

## 4 分析与讨论

辐射定标时,定标源采用自主研发的 6522 型面型黑体,发射率优于 0.97。定标源靠近待定标的仪器,以尽可能充满待标仪器视场。为减弱环境背景对测量的影响,辐射定标实验在具备温度控制功能的光学超净间实施,实验装置如图 5 所示。在室温(293 K)条件下,采用两点法辐射定标对红外光谱辐射计进行标定,标定误差对应的等效亮温温差,结果如图 6 所示。可见采用传统两点法标定,难以实现 1.5 K 定标精度的高精度红外光谱辐射测量。

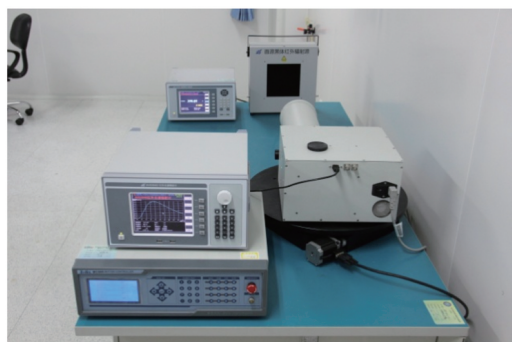


图 5 辐射定标实验装置

Fig. 5 Experimental setup for radiometric calibration

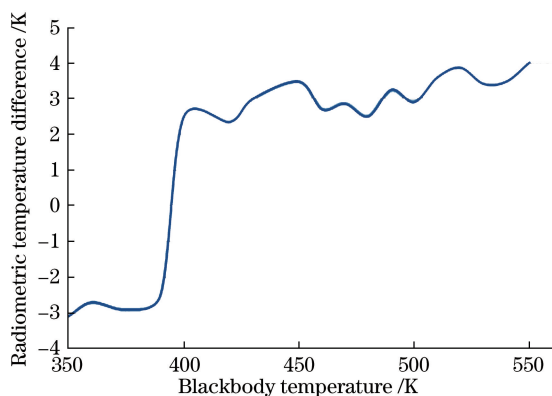


图 6 两点法定标误差

Fig. 6 Calibration error of two-point method

### 4.1 仪器响应特性测试与分析

利用光学超净间的温度调节功能,分别将环境温度设定为 285, 295, 310 K, 面型黑体温度设置为 400 K, 测量得到的仪器响应曲线如图 7(a) 所示。由图可知,环境温度变化时,仪器的系统响应曲线也随之变化。环境温度变化较大时,系统响应波动随之增大。针对这一问题,每次测量前,先对 6364D 红外光谱辐射计进行辐射定标,并通过在仪器若干位置内贴加热片的方式,降低环境温度变化对红外光谱辐射测量精度的影响。随后,将实验室环境温

度设置为 295 K, 将面型黑体设置为不同温度, 测量得到的仪器响应曲线如图 7(b) 所示, 可见测量目标温度不同, 仪器系统响应曲线偏差较大, 这也与前文分析一致。

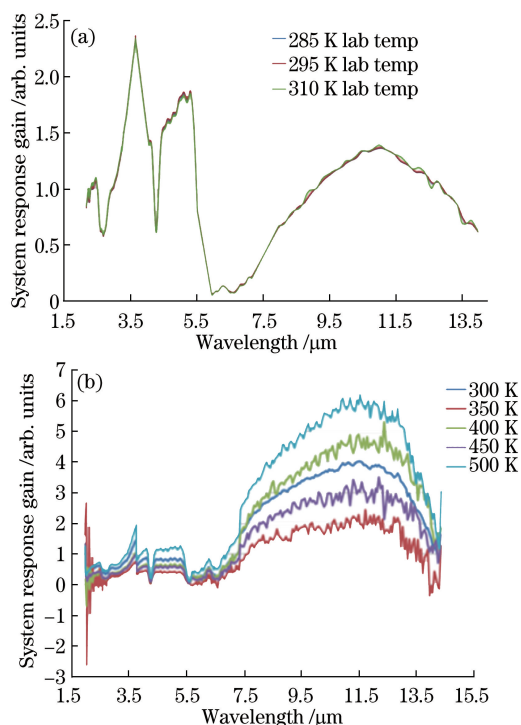


图 7 系统响应特性。(a)不同环境温度;(b)不同测量目标温度

Fig. 7 System response. (a) At different environment temperatures; (b) at different measured target temperatures

在 295 K 实验室环境温度及辐射模式下,在不同目标温度和不同波长处测量得到的仪器噪声等效温差  $\Delta T_{NE}$  可表示为

$$\Delta T_{NE} = \frac{1}{2\pi} \frac{n_{pp}}{S_2 - S_1} \frac{\Delta T}{\sqrt{\omega_B}}, \quad (16)$$

式中:  $S_1$ 、 $S_2$  是充满仪器视场情况下, 测量两个不同黑体温度对应的仪器输出的电子学信号;  $n_{pp}$  是遮住仪器入瞳即无外部辐射输入时, 使用测量结果计算得到的峰峰值噪声;  $1/2\pi$  是考虑  $n_{pp}$  为随机噪声而引入的修正因子;  $\omega_B$  为电子学系统等效带宽。6364D 红外光谱辐射计采用辐射模式, 即连续测量某一波长处的目标红外辐射。6364D 红外光谱辐射计采用锁相放大改善获取信号信噪比, 且通过仿真及实验确定合理的锁相放大参数, 此时, 红外光谱辐射计的电子学系统等效带宽为 10 Hz。测量时间为 30 s, 并进行叠加均值处理, 以降低噪声影响。红外光谱辐射计的噪声等效温差

表 2 红外光谱辐射计的噪声等效温差

Table 2 Noise equivalent temperature difference of the infrared spectroradiometer

Wavelength / $\mu\text{m}$	$\Delta T_{\text{NE}}/\text{mK}$				
	320 K	370 K	400 K	450 K	500 K
2.3	39	34	30	27	23
5.6	34	30	22	20	19
10.0	37	32	28	26	22
12.4	36	31	26	24	21

测量结果见表 2。

#### 4.2 分区多点法辐射标定实验

辐射定标时,根据测量目标温度区间(300~550 K),比较分为不同数目子区间时的标定精确度,并根据对比结果确定合适分区数。将 300~550 K 温度区间分为 14 个子区间,对每一子区间,分别采用(12)、(13)式计算相应的辐射定标系数,并利用标准黑体校验辐射定标精度,将标准黑体设置为不同温度,进行红外光谱辐射测量及辐射定标。采用多波长辐射测温理论和最小二乘法,反推等效亮温温度。标定偏差,即测量得到的等效亮温温度和真实温度之差,结果如图 8 所示。图 8 中温度误差上限和下限分别对应等效 $\pm 1\%$ 红外光谱辐射值的误差,可见辐射定标结果的反演温度偏差对应的红外光谱辐射误差小于 1%。

由图 3 所示双色探测器光谱响应曲线可知,6364D 红外光谱辐射计所用三明治 InSb/HgCdTe 双色探测器在不同波长处的光谱响应率不同。由普朗克辐射定律、维恩位移定律等红外辐射理论可知,不同温度目标对应的人射辐射强度不同,也就意味着不同入射辐射对应不同的光谱辐射分布,且系统也存在光谱波长相关的传输效率差异。因此不同温

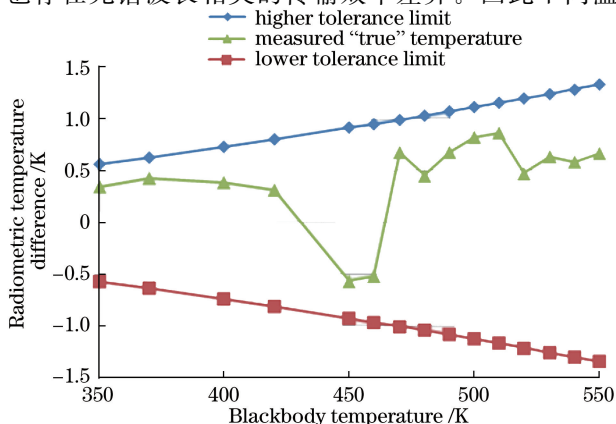


图 8 分区多点法辐射标定误差

Fig. 8 Radiometric calibration error of sub-region multi-point calibration method

度目标的入射辐射对应不同的探测器响应率,且仪器测量目标的温度范围大,工作波段较宽,使得红外光谱辐射计存在明显的非线性效应。此外,外界环境及其温度变化、仪器自身辐射等因素也需要在定标时予以考虑。本文提出的标定方法通过分区多点分别获取仪器标定系数,可有效降低系统的非线性效应、外界环境干扰、仪器自身辐射等造成的误差,与常规的两点法相比,显著提高了辐射定标精度。

在测量目标的 300~550 K 温度区间内,等间距获取 10 个温度点的定标系数,采用最小二乘拟合法得出仪器的定标系数,对 6364D 型红外光谱辐射计进行辐射定标,并分析定标误差,结果如图 9 所示。由图 9 可知,待测目标温度区间和分区间隔选取合理的情况下,本文提出的分区多点标定方法可直接得到仪器的定标参数,与目前国内外红外仪器定标常采用的多黑体温度非线性拟合方法相比,可在某些温度点改善非线性拟合引入的拟合误差,辐射定标误差有所减小。此外,分区多点标定方法考虑了不同入射辐射时的探测器响应效率波动,可有效降低探测器非线性效应引入的辐射测量误差。分区多点标定方法在每次红外光谱辐射测量前先进行辐射定标,这可有效降低环境温度变化和系统响应非线性等引入的辐射测量误差。

## 5 结 论

提出了一种新的分区多点标定的辐射定标方法,通过分区多点分别获取仪器的标定系数,可有效

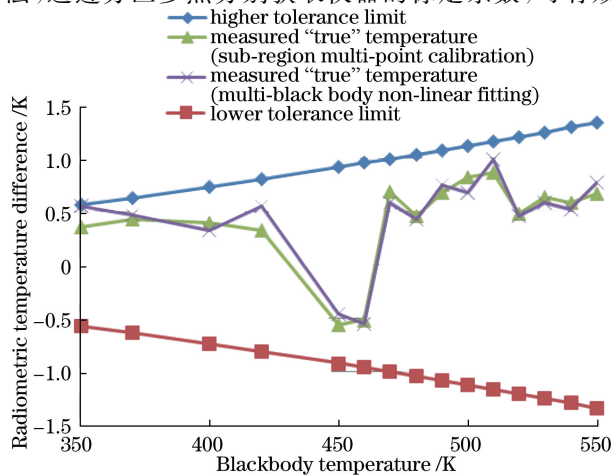


图 9 分区多点法与多黑体温度非线性拟合法的辐射标定误差

Fig. 9 Radiometric calibration error of sub-region multi-point method and multi-blackbody non-linear fitting method

解决探测器非线性导致的传统两点法定标误差较大等问题,具有较强的实用性。实验结果表明,该方法能够满足宽波段、高分辨率红外光谱辐射测量的标定需求,辐射定标精度优于 1.5 K,较常用的两点法优势明显。该方法也可用于其他分光机理的红外光谱辐射计的辐射定标,对于研究宽波段、高分辨率红外光谱测试技术具有实际意义。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou S C. Introduction to advanced infrared electro-optical engineering [M]. Beijing: Science Press, 2014: 277-327.  
周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 277-327.
- [2] Accetta J S. The infrared & electro-optical systems handbook [M]. Washington: ERIM/SPIE Optical Engineering Press, 1993: 52-78.
- [3] Wolfe W L, Zissis G J. The infrared handbook[M]. Washington: The Office of Naval Research, 1978: 36-68.
- [4] ASTM International Technical Committee G03 on Weathering and Durability. Standard test method for calibration of a spectroradiometer using a standard source of irradiance: ASTM G138-96 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2003.
- [5] Diaz S, Booth C R, Armstrong R, *et al.* Multichannel radiometer calibration: A new approach [J]. Applied Optics, 2005, 44(26): 5374-5380.
- [6] Jessen W, Wilbert S, Nouri B, *et al.* Calibration methods for rotating shadowband irradiometers and optimizing the calibration duration[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(4): 1601-1612.
- [7] Lü J Y, He M Y, Chen L, *et al.* Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0801003.  
吕佳彦, 何明元, 陈林, 等. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0801003.
- [8] Wang L, Hu X Q, Zheng Z J, *et al.* Radiometric calibration tracking detection for FY-3A/MERSI by joint use of snow targets in south and north poles[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0212003.  
王玲, 胡秀清, 郑照军, 等. 联合南北极冰雪目标的FY-3A/MERSI辐射定标跟踪监测[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0212003.
- [9] Yin L M, Qiao B, Liu J C, *et al.* Combined radiation calibration method for ground-based infrared radiation measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0412001.  
殷丽梅, 乔兵, 刘俊池, 等. 地基红外辐射测量系统联合辐射定标法[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0412001.
- [10] Sun Z Y, Chang S T, Zhu W. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0712006.  
孙志远, 常松涛, 朱玮. 大口径宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0712006.
- [11] Cabib D, Gil A, Buckwald R A. New user interface and features of the SR 5000: Revival of infrared CVF-based spectroradiometry [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5431: 46-57.
- [12] Zhang Y N, Zheng X B, Li J J, *et al.* Research on system level calibration method of multi-band filter radiometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0812004.  
张艳娜, 郑小兵, 李健军, 等. 多波段滤光片辐亮度计的系统级定标方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812004.
- [13] Tian Q J, Chang S T, Qiao Y F, *et al.* Radiometric calibration based on low-temperature area blackbody for infrared systems with high dynamic range [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 0412003.  
田棋杰, 常松涛, 乔彦峰, 等. 采用低温面源黑体实现红外系统宽动态范围定标[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 0412003.
- [14] Cabib D, Gil A, Buckwald R A. High performance spectroradiometer for very accurate radiometric calibrations and testing of blackbody sources and EO test equipment [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6207: 62070L.