

圆形渐变滤光片光谱辐射计辐射定标

向昆竹^{1,2,3}, 施海亮^{1,2,3*}, 孙熊伟^{1,3}, 朱锋^{1,3}, 王先华^{1,2,3}, 叶函函^{1,3}¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;³中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 基于分区线性法对圆形渐变滤光片型光谱辐射计开展辐射定标研究,以解决温度范围大、工作波段宽的测量目标对该类型光谱辐射计造成的非线性问题。所提光谱辐射计的主要技术原理是将待测目标的温度区间分为多个子区间,采集目标温度区间内多个不同温度黑体对应的测量光谱,并计算各个温度下的响应度函数。在进行红外光谱测量时,将目标光谱与区间内记录的不同温度点光谱进行比对,从而确定待测目标所属温度子区间的上下限。根据子区间计算的响应度函数,通过线性插值求得待测目标的响应度函数并进行辐射定标。基于该方法的实验结果表明,待测目标理论辐亮度与使用分区线性法进行辐射定标得到的辐亮度在波长范围内的平均偏差小于1%。通过定标结果反演测量黑体的等效温度,等效温度误差小于2%。

关键词 测量; 红外光谱辐射计; 圆形渐变滤光片; 辐射定标; 黑体; 分区线性标定法

中图分类号 TP732.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230473

1 引言

光谱辐射计主要用于辐射源光谱特性与辐射亮度的测定,凭借其分光能力对光信号进行表征和区分,已被广泛运用于工业、科研和大气遥感等领域^[1-3]。光谱辐射计按照分光方式主要分为干涉型、光栅型、棱镜型以及滤光片型,每一类辐射计基于自身特性适用于不同的场景。目前,国内外发展较为迅速的是基于色散型与干涉型的光谱辐射计^[4-5]。本文主要基于圆形渐变滤光片(CVF)型光谱辐射计,其主要分光器件CVF传输的波长与角度呈线性关系,且与单元探测器构建光谱辐射计。该类型辐射计具有宽波段、可测目标温度范围广等优点,因此其应用范围更广。然而国内外针对CVF型光谱辐射计的研究较少,国外发展较成熟的有以色列CI公司研制的SR5000N仪器^[6]。目前国内在逐步开展CVF型光谱辐射计的国产机研制,本课题组也同步开展对该类仪器辐射定标的研究。

辐射定标是将仪器测量的原始信号转化为有实际意义的物理量的过程,目前红外光谱辐射计的辐射定标方法主要有单点法、两点法与多点法^[7-9]。单点法适用于分辨率低、光谱辐射测量数据量较少的情况。两点法适用于仪器线性度高、测量点数较多的情况。CVF型红外光谱辐射计测量的工作波段宽、目标温度

范围广,从而造成了非线性问题,导致传统的两点定标法不能实现精确的辐射定标。针对该问题,本文提出一种基于分区线性的响应度辐射定标方法。其主要技术原理是将测量目标的温度区间分为多个子区间,测量并记录目标温度区间内多个不同温度黑体对应的红外光谱辐射计输出数据,分别计算区间内多个温度点的响应度函数。在进行光谱测量时,比对目标光谱数据与区间内所记录的光谱数据,从而确定待测目标所属温度子区间的上下限。根据子区间计算的响应度函数,通过线性插值求得待测目标的响应度函数并进行辐射定标。实验结果表明,待测目标的理论辐亮度与使用分区线性法进行辐射定标得到的辐亮度在其波长范围内的平均偏差小于1%。通过定标结果反演测量黑体的等效温度,该方法的等效温度误差小于2%。

2 CVF型光谱辐射计

2.1 CVF分光原理

CVF基于法布里-珀罗干涉滤光片这种多层介质膜系,这种膜系的透过光谱特性与组成该膜系的每层膜的几何厚度、基片种类、折射率与入射媒介有关^[10-13]。当膜系膜料的基片种类、折射率与入射媒介确定时,滤光片的峰值透过波长和截止波长与各膜的几何厚度直接相关。若每层膜的几何厚度均随圆形基

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-02-17; 录用日期: 2023-03-12; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRW-KT-2020-3)

通信作者: *hlshi@aiofm.ac.cn

片的角位置呈线性变化,则形成圆楔形多层膜^[14],且该多层膜的特征波长也随圆形基片的角位置呈线性变化,由此形成 CVF。如图 1 所示,膜厚度从角度为 0° 的

t 线性变化到角度为 180° 的 $2t$ 。若 $\varphi_0 = 0^\circ$ 处的特征波长为 λ_0 ,则随着膜层厚度的增加,特征波长逐渐增大,到达 $\varphi_1 = 180^\circ$ 处,特征波长将变为 $2\lambda_0$ 。

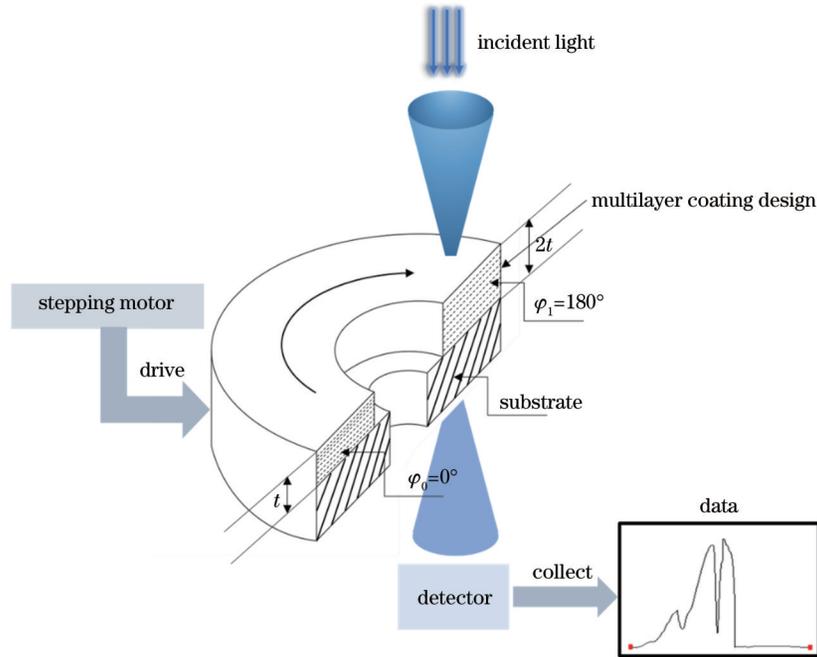


图 1 CVF 分光原理

Fig. 1 Principle of spectrum split based on CVF

使用 CVF 作为仪器的核心分光器件,需要使用高精度步进电机驱动 CVF 旋转。在每次旋转过程中,位置传感器发出步进驱动起始位置的基准信号,步进电机将 CVF 初始化至起始位置。在高精度步进电机的驱动下,入射光依次通过其波长变化方向上的不同位置,在渐变滤光片上形成一条圆弧轨迹。不同位置的出射光波长依次变化,从而实现光谱分光。

受到高次干涉条纹的限制, CVF 的最长透过波长不能超过最短透过波长的 2 倍。因此光谱辐射计中使用的渐变滤光片若想覆盖 $1.3 \sim 14.3 \mu\text{m}$ 的宽波段,需要采用 4 块扇形滤光片拼接的方式,所用 4 个扇区渐变滤光片的主要参数如表 1 所示。由表 1 可知, CVF 共分为 4 个扇区,除去扇区间隔,其有效区域大约占据 330° 。

表 1 CVF 四扇区参数表

Table 1 Specification for four-segment of CVF

Segment	1	2	3	4
Nominal wavelength range / μm	1.292-2.493	2.529-4.527	4.603-7.940	8.040-14.351
Blocking range / μm	1-5	1-7	1-15	1-15
FHWM / %	2.0	1.8	1.5	1.8
Transmittance at peak wavelength / %	>25	>25	>60	>30
Out-of-band average transmittance / %	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

2.2 光谱辐射计系统结构

CVF 型光谱辐射计主要由 CVF、斩波器、CCD、光阑、内部黑体精密反射镜组(含聚光镜、 45° 平面折叠镜组件)、探测器等构成,图 2 为辐射计的基本光路图。当待测目标的红外辐射进入光路后,先通过一个带有中心光圈的 45° 平面折叠镜反射到对焦聚光镜,再经过聚光镜反射,穿过中心光圈到达分光镜。可见光会穿过分光镜在 CCD 形成目标和背景的图像,而红外辐射会被反射。CCD 的光路与测量红外辐射的光路是同

轴的,其在测量目标辐射量的同时可方便且实时地观察目标与视场。

分色镜后反射的红外辐射会通过斩波器调制为交流信号。在仪器测量时斩波器是旋转的,当斩波器位于开启位置时,目标的红外辐射信号将通过,而当斩波器位于关闭位置时,仪器内部的标准参考黑体辐射信号将通过,由此形成交流信号。信号被调制后传输至视场光阑,经过旋转的 CVF 分光后,由探测器完成光信号到电信号的转换输出。

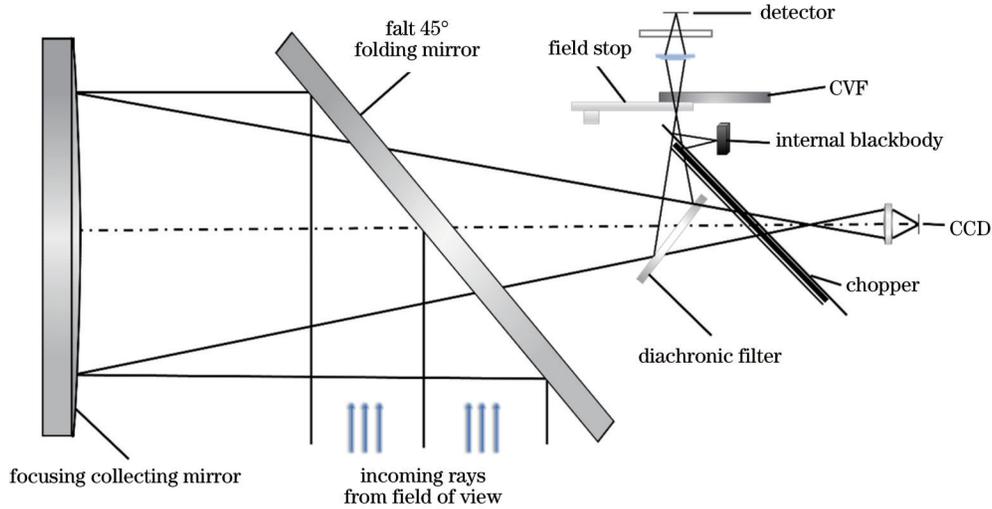


图 2 CVF 型光谱辐射计的基本光路图

Fig. 2 Lightpath diagram of CVF type spectroradiometer

CVF 透过的波长范围可以达到 1.3~14.3 μm, 采用 InSb、MCT 两个探测器实现该波长范围内的信号采集。表 2 所示为 CVF 型光谱辐射计的主要性能参数。

表 2 CVF 型光谱辐射计主要性能参数

Table 2 Specification of CVF type spectroradiometer

Specification	Parameter
Spectral range	1.3-14.3 μm
Spectral resolution	2% of wavelength
Spectral scanning rate	Up to 30 scans·s ⁻¹
Noise equivalent temperature difference (NETD)	<5 mK NETD with InSb detector, 1 Hz bandwidth, 100 °C target filling 7.5 mrad FOV
Field of view (FOV)	7.0-0.5 mrad
Field of view uniformity	±5%
Focusing distance	3 m to ∞ uniformity (max)
Internal blackbody reference	Floating temperature ambient reference (better than 0.1 °C)
Chopping frequency	Up to 4000 Hz
Weight	15 kg

3 红外光谱辐射计辐射定标原理

3.1 红外光谱辐射计的辐射模型

由 2.2 节可知, CVF 型红外光谱辐射计采用锁相放大实现对微弱红外信号的探测。在探测器接收的辐射中, 待测目标到达光学系统入瞳处的红外辐射 $W_{op}(\lambda)$ 可表示为

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

式中: $W(\lambda)$ 为观测目标的红外辐射, λ 为波长; $\tau(\lambda, l)$ 表示观测目标与光谱辐射测量系统间路径长度为 l 时的大气透过率; $L(\lambda, T_{air})$ 表示环境温度为 T_{air} 时的辐射亮度。

根据普朗克辐射定律, 当温度为 T 时, 理想黑体以波长 λ 为变量的辐射亮度为

$$L(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi\lambda^5 \{ \exp[c_2 / (kT)] - 1 \}}, \quad (2)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; 常数 c_1, c_2 采用国际科技数据委员会最新数值, $c_1 = 2\pi^5 hc^2 \approx 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 为第一辐射常数, $c_2 = hc/K \approx 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 为第二辐射常数。

探测器接收的红外辐射除了仪器外部待测目标的辐射外, 还包括仪器自身的热辐射。考虑到仪器自身热辐射的影响, 在仪器内部放置一个内部参考黑体, 其温度基于仪器内部环境温度自适应调节。因此, 待测目标最终到达探测器的入射辐射 $W_{det}(\lambda)$ 可表示为

$$W_{det}(\lambda) = W(\lambda)\tau(\lambda, l) + L(\lambda, T_{air})[1 - \tau(\lambda, l)] - L(\lambda, T_0), \quad (3)$$

式中: $L(\lambda, T_0)$ 为内部参考黑体温度为 T_0 时的辐射亮度。

在测量目标时,探测器发出的原始信号与目标的辐射量和仪器系统的响应度函数相关,即

$$S(\lambda) = K(\lambda)W_{\text{det}}(\lambda) = K(\lambda)\{W(\lambda)\tau(\lambda, l) + L(\lambda, T_{\text{air}}) \times [1 - \tau(\lambda, l)] - L(\lambda, T_0)\}, \quad (4)$$

式中: $K(\lambda)$ 为仪器的光谱响应度函数。当求解 $W(\lambda)$ 时,式(4)变为

$$W(\lambda) = \frac{S(\lambda)/K(\lambda) + L(\lambda, T_0) - L(\lambda, T_{\text{air}})[1 - \tau(\lambda, l)]}{\tau(\lambda, l)}. \quad (5)$$

在某些情况如大气窗口、实验室环境下,路径长度 l 较短时,可以近似 $\tau(\lambda, l) \approx 1^{[15]}$, 因此式(5)可以化简为

$$W(\lambda) = S(\lambda)/K(\lambda) + L(\lambda, T_0). \quad (6)$$

式(5)中的原始信号值 $S(\lambda)$ 可以通过测量获得。在测量过程中会实时记录光谱辐射计中内置黑体的温度,通过理论普朗克公式可计算得到 $L(\lambda, T_0)$ 。 $\tau(\lambda, l)$ 可根据测量过程中实时的气象参数并代入辐射传输模型计算得出,也为已知值。因此,标定的过程实则是确定仪器的系统响应度函数 $K(\lambda)$ 。与传统的傅里叶变换式光谱辐射计标定方法不同,光谱辐射计响应度函数是通过测量与待测目标温度相同的标准黑体的光谱数据后计算得到的。

由图 2 所示的光路可知,在响应测量过程中,随着斩波器旋转,斩波器会有开启与关闭两种状态。当斩波器开启时,目标黑体到达探测器的辐射可以表示为

$$W(\lambda) = \tau_{\text{BB}}(\lambda, l) [\epsilon_{\text{BB}} L(\lambda, T_{\text{BB}}) + (1 - \epsilon_{\text{BB}}) L(\lambda, T_{\text{Amb}})], \quad (7)$$

式中: $\tau_{\text{BB}}(\lambda, l)$ 为外部目标黑体到探测器之间路径 l 的大气透过率; ϵ_{BB} 为目标黑体的发射率; $L(\lambda, T_{\text{BB}})$ 表示波长为 λ 、温度为目标黑体温度 T_{BB} 的辐射亮度; $L(\lambda, T_{\text{Amb}})$ 表示波长为 λ 、温度为仪器内部环境温度 T_{Amb} 的辐射亮度。

当斩波器关闭时,内部黑体到达探测器的辐射可以表示为

$$W(\lambda) = \tau_{\text{IBB}}(\lambda, l) \{R_c [\epsilon_{\text{IBB}} L(\lambda, T_{\text{IBB}}) + (1 - \epsilon_{\text{IBB}}) L(\lambda, T_{\text{Amb}})] + (1 - R_c) L(\lambda, T_c)\}, \quad (8)$$

式中: $\tau_{\text{IBB}}(\lambda, l)$ 为内部黑体到探测器之间路径的大气透过率; R_c 为斩波器反射率; ϵ_{IBB} 为目标黑体的发射率; $L(\lambda, T_{\text{IBB}})$ 表示波长为、温度为内部黑体温度 T_{IBB} 的辐射亮度; $L(\lambda, T_c)$ 表示波长为 λ 、温度为斩波器温度 T_c 的辐射亮度。

由于仪器内部黑体温度随着仪器内部温度进行自适应调节,因此 $T_{\text{Amb}} \approx T_{\text{IBB}}$ 。假设斩波器的反射率 $R_c \approx 1$, 则式(8)可以改写为

$$W(\lambda) = \tau_{\text{IBB}}(\lambda, l) L(\lambda, T_{\text{IBB}}). \quad (9)$$

将大气透过率包含在响应度函数中,响应测量得到的光谱信号为

$$S_{\text{BB}}(\lambda) = K(\lambda) \{ [\epsilon_{\text{BB}} L(\lambda, T_{\text{BB}}) + (1 - \epsilon_{\text{BB}}) L(\lambda, T_{\text{Amb}})] - L(\lambda, T_{\text{IBB}}) \}, \quad (10)$$

则响应度函数为

$$K(\lambda) = \frac{S_{\text{BB}}(\lambda)}{\epsilon_{\text{BB}} L(\lambda, T_{\text{BB}}) + (1 - \epsilon_{\text{BB}}) L(\lambda, T_{\text{Amb}}) - L(\lambda, T_{\text{IBB}})}. \quad (11)$$

3.2 分区线性响应度辐射定标算法

根据 3.1 节所述,辐射定标过程的响应度函数 $K(\lambda)$ 需要对一个与待测目标相同的标准黑体进行测量并计算得到,但实际测量过程中无法对待测目标进行精确的温度估计。针对这一问题,本文提出一种基于分区线性的响应度标定算法。

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成 n 个子区间,测量并记录待测目标温度区间内 $n+1$ 个不同黑体温度对应的光谱 $S_c^{(i)}(\lambda)$ 。在测量红外光谱辐射时,通过比较测量谱 $S_m(\lambda)$ 与区间内不同温度黑体对应的输出谱 $S_c^{(i)}(\lambda)$, 确定待测目标所在温度子区间的上限 $T_{\text{BB}}^{(\text{hot})}$ 和下限 $T_{\text{BB}}^{(\text{cold})}$, 即

$$S_c^{(\text{hot})}(\lambda) = K_{\text{hot}}(\lambda) \{ \epsilon_{\text{BB}} L[\lambda, T_{\text{BB}}^{(\text{hot})}] + (1 - \epsilon_{\text{BB}}) L(\lambda, T_{\text{Amb}}) - L(\lambda, T_{\text{IBB}}) \}, \quad (12)$$

$$S_c^{(\text{cold})}(\lambda) = K_{\text{cold}}(\lambda) \{ \epsilon_{\text{BB}} L[\lambda, T_{\text{BB}}^{(\text{cold})}] + (1 - \epsilon_{\text{BB}}) L(\lambda, T_{\text{Amb}}) - L(\lambda, T_{\text{IBB}}) \}, \quad (13)$$

式中: $K_{\text{hot}}(\lambda)$ 、 $K_{\text{cold}}(\lambda)$ 分别为上限温度点与下限温度点的响应度函数; $L[\lambda, T_{\text{BB}}^{(\text{hot})}]$ 为上限温度点的辐射亮度; $L[\lambda, T_{\text{BB}}^{(\text{cold})}]$ 为下限温度点的辐射亮度。

在确定待测目标所在温度子区间后,需要求解待测目标的响应度函数 $K_m(\lambda)$ 。通过对待测目标的对应温度子区间 $K_{\text{hot}}(\lambda)$ 、 $K_{\text{cold}}(\lambda)$ 进行线性插值计算,得到

$$K_m(\lambda) = (1 - \alpha) K_{\text{cold}}(\lambda) + \alpha K_{\text{hot}}(\lambda), \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{I_m - I_c^{(\text{cold})}}{I_c^{(\text{hot})} - I_c^{(\text{cold})}}, \quad (15)$$

式中: α 为插值系数; I_m 与 $I_c^{(i)}$ ($i = \text{hot}, \text{cold}$) 分别为测量光谱信号在探测器波长响应区间内的积分。

$$I_m = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_m(\lambda) d\lambda, \quad (16)$$

$$I_c^{(i)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_c^{(i)}(\lambda) d\lambda. \quad (17)$$

联立式(12)~(14)即可求得待测目标的响应度函数 $K_m(\lambda)$, 将计算求得的 $K_m(\lambda)$ 代入式(5)或式(6)即可得到待测目标的红外辐射值。

4 实验与分析

4.1 实验系统

为了对定标方法进行准确度验证与分析,采用红外亮度温度标准的黑体辐射源进行标定实验。黑体在

不同波长区间的发射率如图 3 所示, 30 min 内温度稳定性优于 0.1 °C。将黑体放置在离仪器最近焦点 3 m 的水平距离, 黑体辐射面源充满辐射计的整个视场。将 CVF 扫描速率设置为 1 Hz, 斩波器频率设置为 800 Hz。采用视场角为 7.5 mrad 的窄视场进行测量, 实验系统如图 4 所示。受到仪器焦距的限制, 在测量过程中无法将黑体辐射源贴紧光谱辐射计, 因此在测量过程中会引入大气吸收的干扰。

为了验证目标充满视场下辐射定标的正确性, 采用标准黑体同时作为目标和辐射标定的基准源, 对不同温度下的黑体进行响应度函数计算以及辐射定标。

4.2 黑体光谱测量

在测量过程中, 探测器将采集的光信号转换为电信号, 经过锁相放大器进行放大与滤波。锁相后的电信号被打包成数据指令通过网线传输到计算机的数据处理软件进行处理。数据处理过程主要包括数据解析校验、漂移修正以及波长重配准, 其中: 解析校验用来保证数据的有效性; 漂移修正用来解决步进

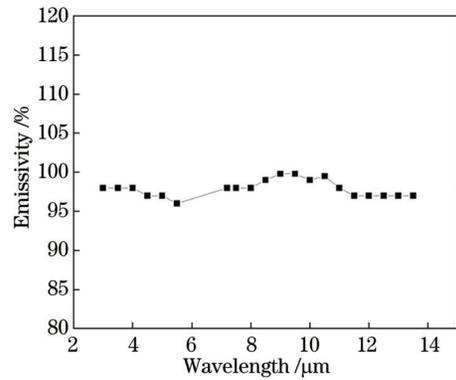


图 3 黑体发射率

Fig. 3 Blackbody emissivity

电机驱动 CVF 旋转过程中的误差所导致的整体漂移问题, 保证光谱重配准过程中光谱数据的准确性; 波长重配准是将漂移修正后的探测器数据与波长进行匹配, 并通过配准筛选去除其中的无效值。数据处理流程如图 5 所示。采集的探测器原始数据经过处理后进一步转换为光谱数据。

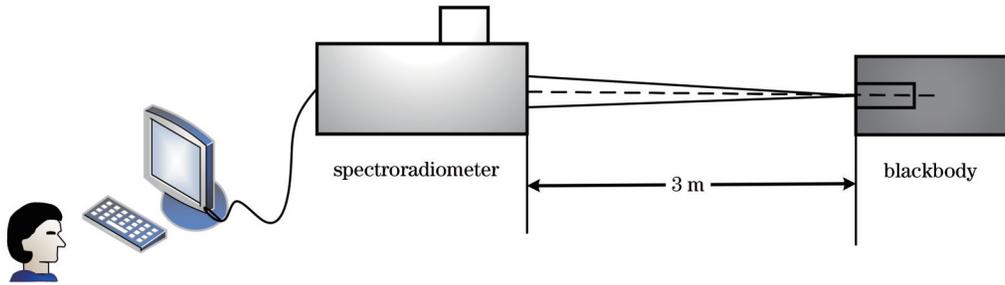


图 4 实验系统示意图

Fig. 4 Diagram of experimental system

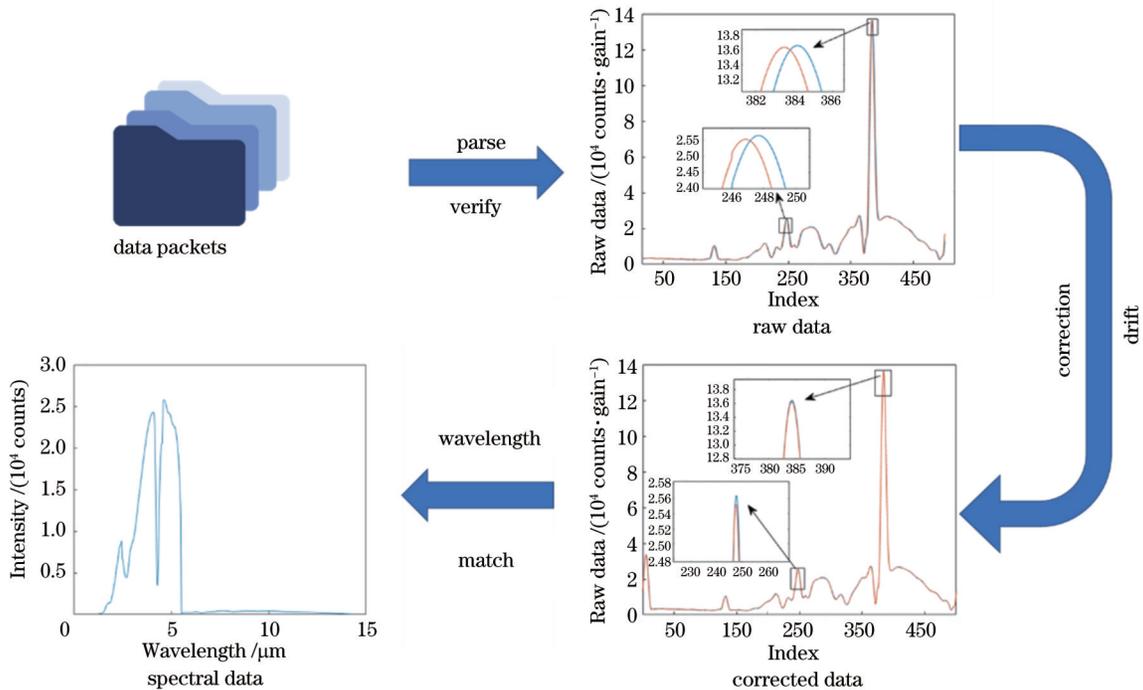


图 5 数据处理流程图

Fig. 5 Flow diagram of data processing

将温度 T 为 90、100、150、200、250、300、500、600、1000 °C 的标准黑体作为待测目标。使用光谱辐射计测量各温度点的光谱曲线,为了保证测量信号的可靠性,对每个温度点进行 10 次数据采集,取其平均值作为每一温度点的光谱信号 $S_m(\lambda)$ 。由于 InSb (1.292~5.500 μm) 和 MCT (5.5~14.3 μm) 两个探测器在各

自响应区间的增益相差较大,为了便于分析,图 6(a)、(b) 分别给出两个探测器在各自波长响应区间的光谱曲线。由于标准黑体辐射源与辐射计存在 3 m 的距离,引入了大气吸收的干扰。如图 6 所示,4.35 μm 波长附近存在明显的 CO_2 吸收峰。

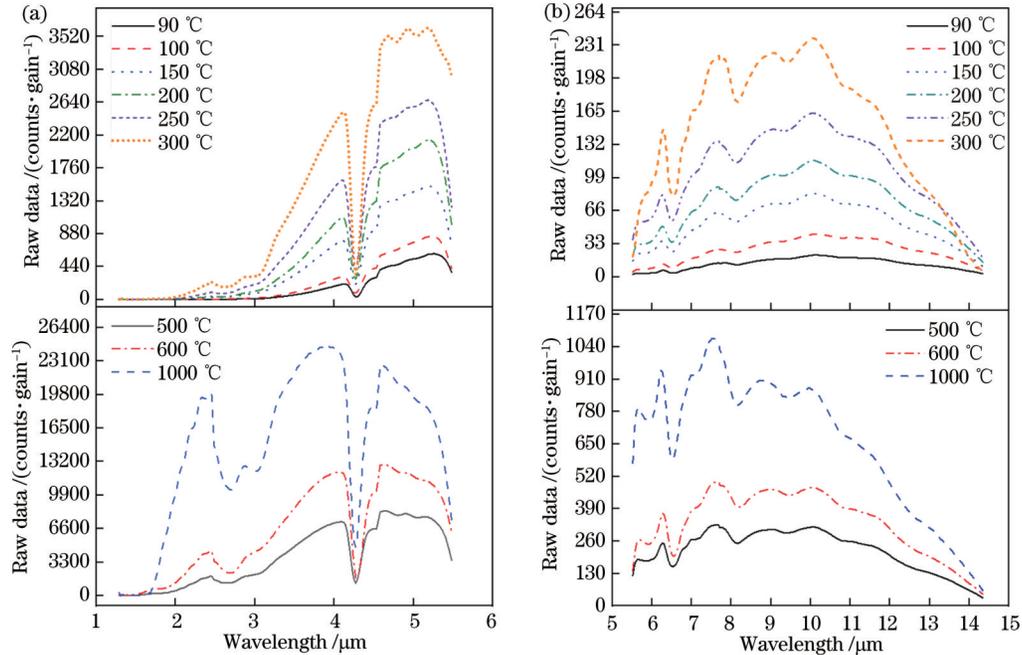


图 6 不同温度黑体的光谱图。(a) InSb 探测器波段; (b) MCT 探测器波段

Fig. 6 Spectra of blackbody at different temperatures. (a) Band of InSb detector; (b) band of MCT detector

4.3 分区线性响应度辐射定标

为了实现 50~1000 °C 宽动态范围的测量,通过比较不同数目子区间的标定精度来确定合适的分区数。将温度以不同间隔分为 3 部分:将 0~100 °C 以 10 °C 为间隔,100~500 °C 以 25 °C 为间隔,500~1000 °C 以 50 °C 为间隔进行划分。

当以 200 °C 的黑体为待测目标时,将测量光谱与区间内不同温度黑体对应的输出谱进行对比,以确定待测目标所在温度子区间的上限 $T_{\text{BB}}^{(\text{hot})}$ 和下限 $T_{\text{BB}}^{(\text{cold})}$,通过积分比值计算线性插值系数 α 。由于在测量过程

中使用两个探测器,因此需要分别计算线性插值系数 α 。将求得的系数 α 与温度子区间上下限的响应度函数代入式 (14) 即可求出该温度下的响应度函数 $K_m(\lambda)$ 。图 7 给出了待测目标的温度为 200 °C 时的光谱响应度 $K_m(\lambda)$,其中图 7(a) 所示为 InSb 探测器波长区间的光谱响应度,图 7(b) 所示为 MCT 探测器波长区间的光谱响应度。从图 7 可以看出:InSb 探测器的光谱响应度明显优于 MCT 探测器;在 4.35 μm 处仍然能够观察到明显的 CO_2 吸收峰;MCT 探测器的 $K_m(\lambda)$ 在 11.5 μm 波长附近取得最大值。

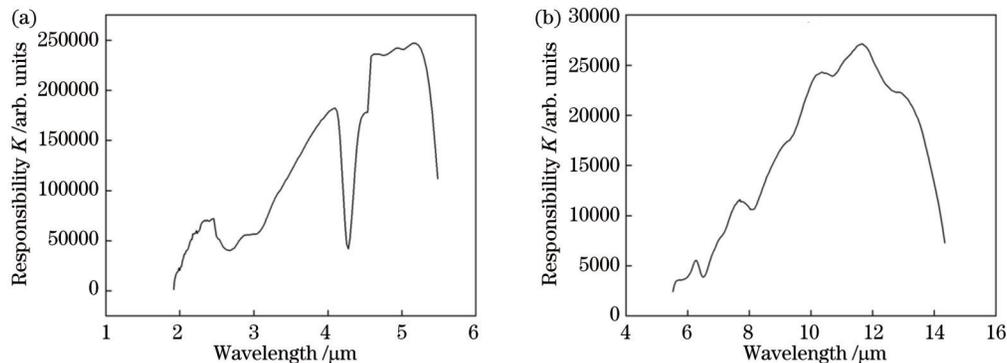


图 7 测量 200 °C 黑体目标时的系统响应度曲线。(a) InSb 探测器波段; (b) MCT 探测器波段

Fig. 7 Responsibility curves of blackbody at 200 °C. (a) Band of InSb detector; (b) band of MCT detector

由上述分析可知,受到实验条件的限制,在标定过程中仪器与黑体的 3 m 距离引入了大气吸收干扰,因此需要考虑该部分影响并将其消除。使用辐射传输模型 MODTRAN 进行大气路径的透过率计算,将计算得到的透过率与仪器的分辨率进行插值拟合,从而得

到最终的透过率曲线。由于实验在室内进行,因此只考虑 CO₂ 与水汽的吸收影响,两种气体的透过率曲线如图 8 所示。影响最大的为 4.35 μm 附近的 CO₂ 气体吸收,该结论与前文测得的光谱数据相符。

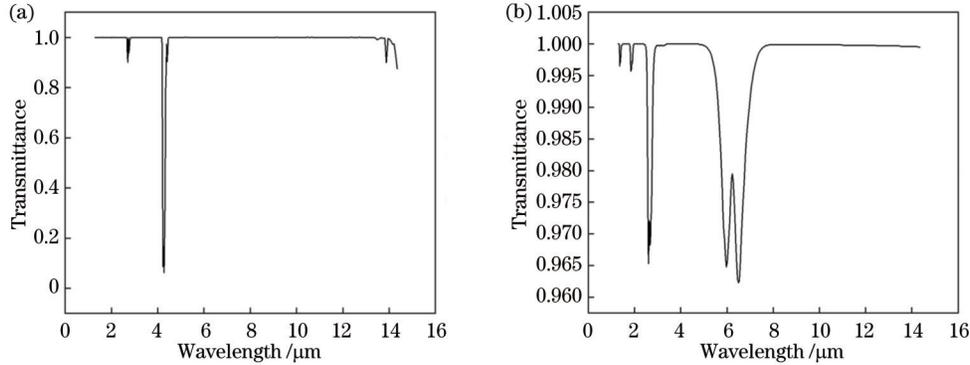


图 8 气体透过率曲线。(a)CO₂; (b)H₂O

Fig. 8 Gas transmittance curves. (a) CO₂; (b) H₂O

利用已知的大气吸收透过率对温度子区间上下限的光谱曲线进行大气吸收线的剔除并重新计算各自响

应度函数后,求解 200 °C 目标的响应度曲线。图 9 为大气吸收剔除前后的响应度曲线对比图。

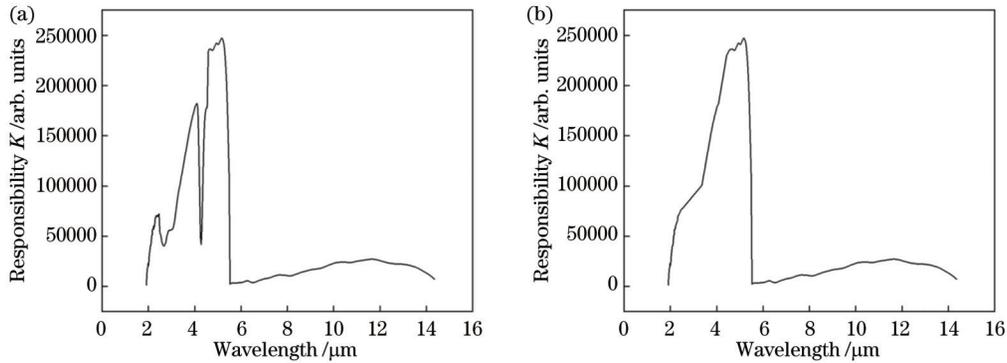


图 9 大气吸收剔除前后的响应度曲线对比。(a)剔除前;(b)剔除后

Fig. 9 Comparison of responsibility curves before and after atmospheric absorption rejection. (a) Before rejection; (b) after rejection

选择两个探测器中无大气吸收影响且信号较强的 4.515 μm 和 11.560 μm 波长点,图 10 所示为在 200 °C 的温度区间中两个波长点处测算得到的响应度。可以看出,不同黑体温度下得到的响应度值存在明显差异,侧面说明传统的两点定标并不能满足定标的精度需求。

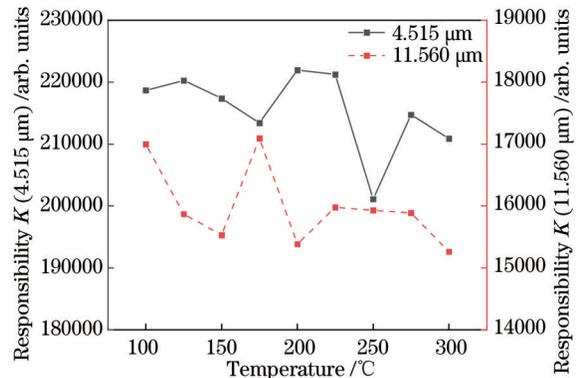


图 10 不同黑体温度下 4.515 μm 和 11.560 μm 处的响应度
Fig. 10 Measured responsibility at 4.515 μm and 11.560 μm at different calibration temperatures

测量过程中实时反馈并记录内部黑体温度,因此将计算得到的响应度函数 $K_m(\lambda)$ 代入式(6),即可求出待测目标的辐射量。图 11 所示为内部黑体温度为 23.75 °C 时测量的 200 °C 黑体光谱辐射亮度测量值与使用普朗克函数计算得到的理论值的对比,二者具有较好的一致性。

4.4 辐射定标结果定量分析

根据上述响应度计算方法,对其余温度的黑体待测目标展开辐射定标实验。将实测标定数据与理论普朗克曲线进行差值对比,图 12(a)、(b)所示分别为两

个探测器在不同黑体温度下的辐射定标相对偏差。从图 12 可以看出,对于两个探测器的大部分波段区间,

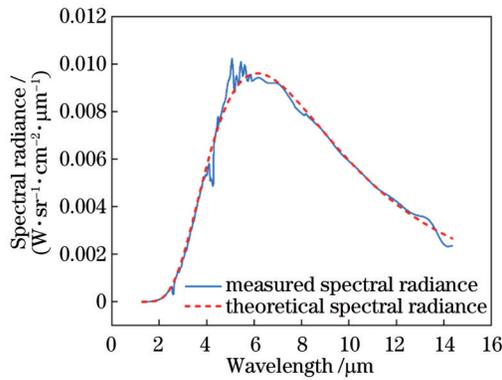


图 11 200 °C 黑体光谱辐射亮度测量值与理论值的对比
Fig. 11 Comparison of measured and theoretical radiance of blackbody at 200 °C

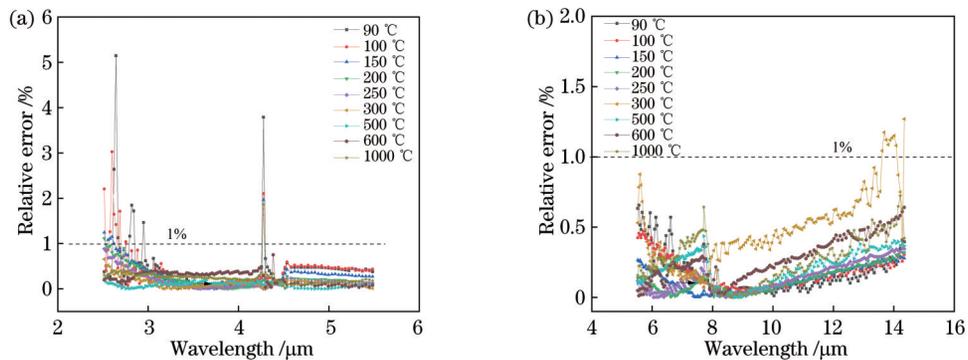


图 12 不同黑体温度下的辐射定标相对偏差。(a)InSb 探测器波段;(b)MCT 探测器波段

Fig. 12 Relative errors in radiometric calibrations at different blackbody temperatures. (a) Band of InSb detector; (b) band of MCT detector

表 3 等效温度计算与误差结果

Table 3 Equivalent temperature calculation and error results

Temperature /°C	Effective temperature /°C					Average	Error /%
	1	2	3	4	5		
90	88.49	88.52	88.37	88.53	88.41	88.46	-1.70
100	98.30	98.24	98.17	98.04	98.08	98.17	-1.80
150	148.30	148.20	148.30	148.10	148.50	148.30	-1.10
200	198.20	197.20	196.50	198.80	197.50	197.40	-1.30
250	247.80	247.70	248.50	246.80	246.10	247.40	-1.00
300	295.80	296.20	297.20	297.70	295.50	296.50	-1.10
500	496.80	495.40	495.50	497.60	496.20	496.30	-0.74
600	593.60	594.40	594.50	593.70	594.10	594.10	-0.98
1000	991.80	990.80	991.00	990.20	992.50	991.30	-0.87

4.5 辐射定标结果不确定度分析

CVF 型光谱辐射计辐射定标过程中的不确定度主要包括标准黑体辐射源的不确定度、仪器本身的不确定度与数据处理的不确定度。

标准黑体溯源产生的不确定度分量包括标准黑体温度引起的最大不确定度 $u_1=0.68\%$ 、标准黑体有效发射率引起的不确定度 $u_2=0.86\%$ ，以及标准黑体温度稳定性引起的不确定度 $u_3=0.79\%$ 。

其辐射定标的相对偏差均优于 1%。某些波段相对偏差较大的原因是：1) 在 InSb 探测器的 2.4~3.0 μm 区域与 MCT 探测器的 13.5~14.3 μm 区域，探测器的响应率低，导致采集信号的信噪比较低，从而影响其定标精度；2) 在 InSb 探测器的 4.2~4.5 μm 区域，存在 CO₂ 吸收的干扰。

采用普朗克理论公式与最小二乘法，反推不同温度下黑体在整个波段范围的等效温度，结果如表 3 所示。使用分区线性法对宽动态范围的黑体进行辐射定标后计算的等效温度偏差小于 2%。由于目标的温度越高，辐射能量越大，测量过程中噪声对其干扰程度越小，温度较高的待测目标的测量准确度越高。

仪器本身的不确定度主要包括响应的非线性与重复性不确定度。响应的非线性不确定度计算过程如下：将标准黑体设置为不同温度，对辐射计响应信号和标准辐射亮度进行最小二乘线性拟合^[16]，并计算各温度下的非线性度，所计算的最大非线性程度即为仪器非线性不确定度，结果为 $u_4=1.7\%$ (1.292~5.500 μm)、 $u_4=1.9\%$ (5.5~14.3 μm)。响应的重复性不确定度的计算过程如下：对实验进行重复性测试，

根据贝塞尔公式计算测量重复性标准差,比较得到各温度下两波段的最大相对实验标准差,即为仪器的非稳定性不确定度,结果为 $u_5=0.96\%$ (1.292~5.500 μm)、 $u_5=0.93\%$ (5.5~14.3 μm)。

数据处理的不确定度主要包括数据采集过程中进行数据转换的不确定度与数据计算中简化舍入带来的不确定度。通过对数据处理过程中各步骤的分析,该部分的不确定度为 $u_6=1.8\%$ 。

最终的辐射定标不确定度由 $u_{\text{cal}}=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2+u_5^2+u_6^2}$ 计算,结果为 3.0% (1.292~5.500 μm)、3.2% (5.5~14.3 μm)。

5 结 论

CVF 型光谱辐射计测量目标的温度范围大、工作波段宽,会使得辐射定标过程中存在明显的非线性响应。不同温度的目标也会具有不同的响应度,因此传统的两点法并不能很好地实现辐射定标。除此之外,在定标过程中也考虑了外界环境温度变化、大气干扰和仪器自身热辐射等因素。本文提出一种基于分区线性的响应度辐射定标方法,通过将目标温度进行子区域划分的方式,有效地解决了目标测量波长范围宽、温度范围广所造成的非线性问题。从实验结果可以看出,该方法可以满足辐射定标需求,其定标结果与理论值具有良好的一致性,等效温度偏差小于 2%。所提分区线性辐射定标方法也适用于其他分光类型光谱辐射计,用于解决测量波段宽、温度范围大的目标所造成的非线性问题。

参 考 文 献

- [1] 张彤,代晓东,陈春生,等.非全视场条件下目标红外发射率的测试和计算[J].红外与激光工程,2015,44(1):1-5.
Zhang T, Dai X D, Chen C S, et al. Measurement and calculation of infrared emissivity of target with non-full field of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 1-5.
- [2] 姚凯凯,王浩,许帆,等.光谱仪在发动机红外隐身测评中的应用研究[J].激光与红外,2020,50(8):975-980.
Yao K K, Wang H, Xu F, et al. Application research of spectrometer in evaluation of infrared stealth effect of aero-engine[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(8): 975-980.
- [3] 赵非玉,张静元,王亮,等.红外诱饵光谱数据分析方法研究[J].光电技术应用,2022,37(2):67-73.
Zhao F Y, Zhang J Y, Wang L, et al. Research on spectrum data analysis method of infrared flare[J]. Electro-Optic

- Technology Application, 2022, 37(2): 67-73.
- [4] Wolfe W L, Zissis G J. The infrared handbook[M]. Washington: The Office of Naval Research, 1978.
- [5] 万上宾.红外辐射计绝对定标技术研究[D].西安:西安工业大学,2022:17-20.
Wan S B. Research on absolute calibration technology of infrared radiometer[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022: 17-20.
- [6] Cabib D, Shapira S, Lavi M, et al. SR 5000N: a new IR spectroradiometer implementation[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8541: 854116.
- [7] 施海亮,熊伟,邹铭敏,等.空间外差光谱仪定标方法研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(6):1683-1687.
Shi H L, Xiong W, Zou M M, et al. Study on calibration method of spatial heterodyne spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1683-1687.
- [8] 刘志明,高闽光,刘文清,等.傅里叶变换红外光谱(FTIR)非线性多点定标方法研究[J].光谱学与光谱分析,2008,28(9):2077-2080.
Liu Z M, Gao M G, Liu W Q, et al. Study on the method of FTIR spectrum non linear multiple point calibration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(9): 2077-2080.
- [9] Kopolovich Z, Sapir E, Buckwald R A, et al. Capabilities and applications of A computerized infrared spectroradiometer: the SR-5000[J]. Proceedings of SPIE, 1986, 0590: 211-221.
- [10] 邢作清.圆盘形红外渐变滤光片[J].红外研究,1987,6(2):141-146.
Xing Z Q. Circular infrared variable filter[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1987, 6(2): 141-146.
- [11] 周嘉穆,王世林.可见-近红外区圆形波长渐变滤光片[J].光学工程,1985,12(2):41-50.
Zhou J M, Wang S L. Visual-near infrared circular variable filters (CVF) [J]. Opto-Electronic Engineering, 1985, 12(2): 41-50.
- [12] Cabib D, Orr H. Circular Variable Filters (CVF) at CI: progress and new performance[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8542: 85420U.
- [13] Thelen A. Circularly wedged optical coatings I theory[J]. Applied Optics, 1965, 4(8): 977.
- [14] Kitchens Dennis, 孟涛.可见区圆形渐变滤光片[J].仪器制造,1979(1):29-33.
Kitchens D, Meng T. Visual circular variable filters[J]. Instrument Technique and Sensor, 1979(1): 29-33.
- [15] 刘加庆,韩顺利,孟鑫,等.一种2~14 μm 红外光谱辐射计的辐射定标方法[J].光学学报,2019,39(2):0212003.
Liu J Q, Han S L, Meng X, et al. Radiometric calibration method of 2-14 μm infrared spectroradiometer[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0212003.
- [16] Wang H C, Liu H Y, Ying C P, et al. Testing of infrared spectroradiometer using blackbody[C]//2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), July 16-18, 2015, Qingdao, China. New York: IEEE Press, 2016: 1289-1292.

Radiometric Calibration of Circular Variable Filter Type Spectroradiometer

Xiang Kunzhu^{1,2,3*}, Shi Hailiang^{1,2,3*}, Sun Xiongwei^{1,3}, Zhu Feng^{1,3}, Wang Xianhua^{1,2,3},
Ye Hanhan^{1,3}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract

Objective Spectroradiometers are used to determine the spectral characteristics and brightness of radiation sources, which are widely used in many different fields. This study is based on the circular variable filter type spectroradiometer, where the wavelength transmitted by the main spectroscopic component, the circular variable filter is linearly related to the angle, and the spectroradiometer is constructed with a unit detector. This type of spectroradiometer has the advantages of a wide spectral range and a wide temperature range for the target, so it has a wider range of applications. However, there are fewer studies on circular variable filter spectroradiometers in China and abroad, and the development of domestic machines for circular variable filter spectroradiometers is gradually being carried out in China. Radiation calibration is the process of converting the original signal measured by the instrument into a physical quantity with practical significance. The main methods of radiation calibration for infrared spectroradiometers are currently the single point method, the two points method, and so on. The single point method is suitable for cases with low resolution and a small amount of spectral measurement data. The two-point method is suitable for situations where the instrument has good linearity, and the number of measurement points is high. Due to the wide operating band of the circular variable filter type infrared spectroradiometer and the wide range of the target temperature, which causes non-linearity problems, the traditional two-point calibration method cannot achieve accurate radiation calibration. In this paper, a divisional linearity-based responsivity radiometric calibration method is proposed to solve this problem.

Methods The radiometric calibration of circular variable filter spectroradiometers is based on the divisional linearity method, which is used to solve the non-linearity problem of this type of spectroradiometer due to the large temperature range of the measurement target and the wide operating band. The main technical principle is to divide the temperature interval of the target to be measured into several subintervals, collect the measured spectrums corresponding to several different temperature blackbodies in the target temperature interval, and calculate the responsivity function at each temperature. During the infrared spectroscopy measurements, the target spectrum is compared with the spectrums of different temperature points recorded in the interval to determine the upper and lower limits of the temperature subinterval to which the target to be measured belongs. Based on the responsivity function calculated for the subinterval, a linear interpolation is performed to find the responsivity function of the target to be measured for radiometric calibration. In addition, external ambient temperature variations, atmospheric disturbances, and the instrument's thermal radiation are taken into account in the calibration process.

Results and Discussions In this paper, we propose a divisional linearity-based responsivity radiometric calibration method, which can effectively solve the non-linearity problem caused by the wide wavelength range and wide temperature range of the target measurement by zoning the target temperature into sub-regions. We compare the difference between the measured calibration data and the theoretical Planck curve at different temperatures. Figure 12 shows the relative deviation of the radiometric calibrations of two detectors at different blackbody temperatures. Figure 12 shows that the relative deviations of the radiometric calibrations are better than 1% for most of the band intervals for both detectors. The large relative deviations in some bands are due to two reasons: 1) the low responses of the InSb detector in the 2.4–3 μm region and the MCT detector in the 13.5–14.3 μm region are due to the low signal-to-noise ratio of the collected signals in this region, which affects the calibration accuracy; 2) the InSb detector in the 4.2–4.5 μm region is due to the interference of CO₂ atmospheric absorption in this band. The interference of CO₂ atmospheric absorption exists. The experimental results show that this method can effectively meet the radiometric calibration requirements, and the calibration results are in good agreement with the theoretical values, with an equivalent temperature deviation of less than 2%.

Conclusions The large temperature range and the wide operating band of the circular variable filter spectroradiometer make for a significant non-linear response in the radiometric calibration process. Different temperature targets also have different degrees of responsiveness, so the traditional two-point method does not work well for radiometric calibrations. In addition, external ambient temperature variations, atmospheric disturbances, and the instrument's thermal radiation are taken into account in the calibration process. In this paper, a divisional linearity-based radiometric calibration method is proposed, which can effectively solve the non-linearity problem caused by the wide wavelength range and temperature range of the target measurement by zoning the target temperature into sub-regions. The experimental results show that the method can effectively meet the radiometric calibration requirements, and the calibration results are in good agreement with the theoretical values, with an equivalent temperature deviation of less than 2%. The zoned linear radiometric calibration method in this paper is also applicable to other spectroradiometers of the spectral type to solve the non-linearity problem caused by the measurement of targets with a wide wavelength and temperature range.

Key words measurement; infrared spectroradiometer; circular variable filter; radiometric calibration; blackbody; divisional linear calibration method