

# 非制冷型长波红外光谱仪的辐射定标方法

吴越<sup>1,2</sup>, 朱之贞<sup>1,2</sup>, 方勇华<sup>1,2\*</sup>, 张蕾蕾<sup>2</sup>, 杨文康<sup>1,2</sup>, 陶孟琪<sup>1,2</sup>, 宁志强<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 提出一种根据环境温度变化量补偿红外光谱仪系统输出灰度值的辐射定标方法。首先分析了在辐射定标和测量过程中红外光谱仪系统输出灰度值漂移的原因,推导出漂移变化量和环境温度辐射度变化量的函数关系;然后利用自主研发的非制冷型长波红外光栅光谱仪进行辐射定标实验,确定了实验室辐射定标方程和环境温度改变后通过补偿得到的辐射定标方程;最后通过实验验证了在不同环境温度下利用补偿后的辐射定标方程进行辐射测量的准确性。结果表明:在不同的环境温度下,通过漂移补偿可使光谱仪系统输出灰度值误差明显减小,其误差不超过 2.4%,显著提高了非制冷型长波红外光谱仪对红外辐射的测量精度。

**关键词** 探测器; 辐射定标; 漂移补偿; 黑体辐射; 长波红外

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0904001

## Radiation Calibration Method Using Uncooled Long-Wave Infrared Spectrometer

Wu Yue<sup>1,2</sup>, Zhu Zhizhen<sup>1,2</sup>, Fang Yonghua<sup>1,2\*</sup>, Zhang Leilei<sup>2</sup>, Yang Wenkang<sup>1,2</sup>,  
Tao Mengqi<sup>1,2</sup>, Ning Zhiqiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** A radiation calibration method is proposed for the compensation of output gray values of an infrared spectrometer system based on the variation in ambient temperature. First, the reasons for the output gray-value shift of the infrared spectrometer system in the process of radiation calibration and measurement are analyzed; subsequently, the functional relationship between the change of drift and ambient temperature radiation is obtained. Then, the laboratory radiation calibration equation and radiation calibration equation at different ambient temperatures after compensation are determined by experimental radiation calibration using the uncooled long-wave infrared grating spectrometer developed in our laboratory. Finally, the accuracy of the radiation measurement using the compensated radiation calibration equation at different ambient temperatures is experimentally verified. The results show that the output gray-value error of the spectrometer system can be significantly reduced by drift compensation at different ambient temperatures, and the error is less than 2.4%. The measurement accuracy of the uncooled long-wave infrared spectrometer for infrared radiation is greatly improved in this research.

**Key words** detector; radiation calibration; drift compensation; blackbody radiation; long-wave infrared

**OCIS codes** 040.3060; 040.6808; 120.5630

## 1 引 言

动态红外探测波段是光学遥感中的常用波段,各种平台上光学传感器的几何和光谱分辨能力都与其红外辐射的准确测量能力直接相关。为了实现目标红外辐射的精确测量,需对红外测量仪器进行辐射定标。红外辐射定标是客观评价红外光谱测量仪

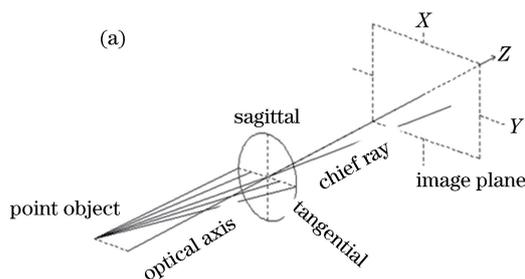
器及有关器件的重要手段,是红外遥感信息定量化的关键技术之一<sup>[1-4]</sup>。

辐射定标的基本原理是采用辐射输出已知的红外辐射源照明被定标的红外系统,根据不同辐射照明下的系统输出信号,建立系统的入瞳辐射量与系统输出之间的响应关系,获得系统绝对辐射响应度。国内不少学者对红外光谱仪辐射定标进行了研究,

收稿日期: 2019-04-01; 修回日期: 2019-04-22; 录用日期: 2019-05-13

\* E-mail: yhfang@aiofm.ac.cn

例如袁小春等<sup>[5]</sup>用黑体对自行研制的长波红外高光谱成像光谱仪实验装置进行两点线性标定;庄晓琼等<sup>[6]</sup>基于可编程的短波红外焦平面探测技术,采用背景参考行的方法对背景辐射进行实时监测,并利用采集的背景辐射值对光谱图像进行辐射校正处理。目前,许多红外波段的光谱仪基本使用制冷的光子型红外探测器作为接收元件,制冷型长波红外光谱仪具有灵敏度高、响应时间短、响应波长宽、受限背景噪声小、探测距离远等特点,可用于高端军事装备。与制冷型长波红外光谱仪相比,非制冷型长波红外光谱仪具有价格低、体积小、质量轻、启动速度快、功耗低、操作简单等优点。在实际的定标和测量过程中,环境温度的变化会导致非制冷型长波红外光谱仪系统输出灰度值的漂移,从而影响到目标



红外辐射的精确测量。

本课题组研制的非制冷型长波红外光谱仪采用的是平板波导压缩光束的原理,如图1所示,将光束限制在一块很薄且具有高折射率的介质中,当光束在沿Z轴方向传播时,在Y方向上正常传播,而在X方向上却被限制了,可以认为光束的传播路径变成二维路径。基于交叉非对称 Czerny-Turner 结构设计了非成像红外光谱仪,其光谱范围为  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ,分辨率为  $80 \text{ nm}$ ,探测器采用的是德国 Micro-Hybrid 公司研制的 TPL640Xe 型非制冷线阵  $1 \times 64$  像元探测器,噪声等效功率为  $0.08 \text{ nW/Hz}^{1/2}$ ,比探测率  $D^*$  值为  $1.08 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ ,时间常数为  $110 \text{ ms}$ ,响应度为  $115 \text{ V/W}$ 。光谱仪的具体参数如表1所示<sup>[7]</sup>。

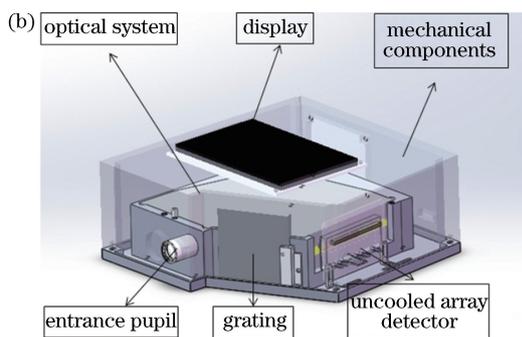


图1 非制冷型长波红外光谱仪。(a)原理图;(b)结构图

Fig. 1 Uncooled long-wave infrared spectrometer. (a) Schematic; (b) structural diagram

表1 非制冷型长波红外光谱仪参数

Table 1 Parameters of uncooled long-wave infrared spectrometer

Parameter	Value
Spectrometer size / (mm × mm × mm)	176 × 173 × 62
Wavelength range / $\mu\text{m}$	8-12
Spectral resolution / nm	80
Numerical aperture	0.22
Detector array size	64 × 1

针对环境温度变化对非制冷型红外光谱仪输出灰度值漂移量的影响进行了研究,并建立了漂移变化量与环境温度辐射变化量的函数关系,在此基础上提出一种利用环境温度变化量进行光谱仪输出灰度值漂移补偿的辐射定标方法。本文提出的方法不用选择背景参考行及各波段进行增益调整,且在室温条件下定标后,只需得到与任意环境温度的差异即可补偿修正辐射漂移,进行任意温度下的辐射定标。最后,设计了相关对该方法进行验证。

## 2 理论分析

### 2.1 辐射定标方法

常用的辐射定标方法主要有三种:直接成像法、平行光管法和近距离扩展源法<sup>[8-10]</sup>。直接成像法是将黑体置于探测器前较近的位置,使其直接成像在像面上,实现数据的采集,该方法需要多次测量才能完成所有像素的定标;平行光管法通过一次测量即可完成定标过程,该方法采用平行光管将腔型黑体投射到入瞳处,并在探测器上成像,适用于在室内对大口径系统进行定标;近距离扩展源法是将面源黑体放在镜头前覆盖系统入瞳,该方法能实现对光学系统和红外探测器的一体化辐射定标。本文采用的是近距离扩展源法,在小型高低温箱中进行辐射定标。对于近距离扩展源定标而言,在高低温箱中,由于目标与探测器的距离近,可以忽略大气吸收、湿度和气压等因素的影响。如图2所示,全部实验装置放置在小型高低温箱中,对红外系统进行辐射测量时,需要提供覆盖红外系统视场的高精度面黑体辐射源,

因为红外光谱仪的系统入射孔径较小,只需将黑体放置在光学系统入射镜筒前,并尽量靠近入射镜筒。

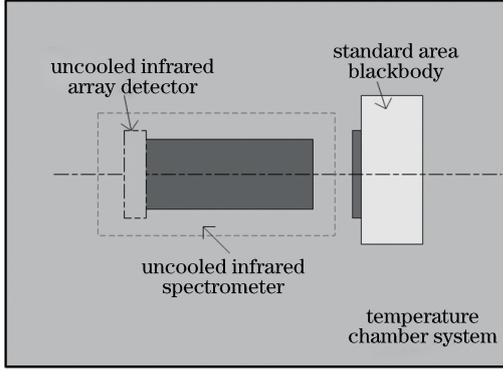


图 2 非制冷型红外光谱仪辐射定标示意图

Fig. 2 Schematic of radiation calibration using uncooled infrared spectrometer

## 2.2 辐射定标模型

非制冷型长波红外光谱仪采用近距离扩展源方法进行定标,在某一固定增益系数下,目标(标准黑体辐射源)辐射亮度与光谱仪系统探测器输出灰度值的关系可表示为<sup>[11]</sup>

$$D(T_b) = G \cdot L_s(T_b) + H, \quad (1)$$

式中: $D(T_b)$ 为光谱仪系统探测器单个像元输出灰度值,单位为DN; $G$ 为该像元对入射辐亮度的响应率; $T_b$ 为标准面源黑体的温度,单位为K; $L_s(T_b)$ 为入射辐射亮度; $H$ 为偏置,此时默认环境温度是不变的。

由普朗克公式<sup>[12-13]</sup>确定黑体表面辐射亮度 $L_s(T_b)$ 的公式为

$$L_s(T_b) = \frac{\epsilon}{\pi} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_b}\right) - 1} d\lambda, \quad (2)$$

式中: $\epsilon$ 为黑体的发射率; $\lambda_1, \lambda_2$ 为波长; $c_1$ 为第一辐射常数; $c_2$ 为第二辐射常数; $K_B$ 为玻尔兹曼常数。其中  $c_1 = 2\pi h c^2 = 3.7418 \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2})$ ,  $c_2 = hc/K_B = 1.4388 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 。

标准黑体辐射源入射到探测器单个像元的辐射通量 $\phi_t$ 为

$$\phi_t = \frac{\pi \cdot \epsilon \tau_0}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \frac{A_d}{n} \cdot L_s(T_b) = k_t L_s(T_b), \quad (3)$$

式中: $k_t = \frac{\pi \cdot \tau_0}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \frac{A_d}{n}$ ,其中 $\tau_0$ 为光学系统的透过率; $D$ 为入瞳直径; $f$ 为焦距; $A_d$ 为探测器单个像元的面积; $n$ 为非制冷阵列探测器像元数目。对于红外光谱仪系统来说, $k_t$ 是一个常数。

在实际应用中,红外光谱仪系统自身的杂散辐射和探测器暗电流噪声等因素会对探测器输出信号产生很大的影响,假定黑体辐射源入射到光谱仪探测器单个像元的辐射通量为 $\phi_t$ ,到达光谱仪探测器像元的杂散辐射通量为 $\phi_s$ ,红外光谱仪系统的杂散辐射和暗电流噪声(包括仪器自身电子学发热部件)等内部因素引起的偏置为 $h_{\text{det}}$ ,其红外光谱仪的实际辐射定标模型为

$$D(T_b) = G' \cdot (\phi_t + \phi_s) + h_{\text{det}}, \quad (4)$$

式中: $G'$ 为探测器单个像元对入射辐射通量的响应。假定每个像元对入射辐亮度的响应率相同,即 $G' = G/k_t$ ,且不随环境温度而改变。当标准黑体温度一定时,入射到单个像元的辐射通量 $\phi_t$ 不变,红外光谱仪输出值的漂移现象主要是由系统自身背景辐射及暗电流等因素导致的。而光谱仪系统的自身背景辐射主要来源于镜筒和机械构件内壁的辐射及光学元件的辐射<sup>[14]</sup>。

单个像元接收到所有来自镜筒和机械构件内壁的辐射通量 $\phi_{s1}$ 可以表示为

$$\phi_{s1}(T_e) = \sum_{i=1}^M \epsilon_i(\theta, \varphi) \cdot S_i \cdot L_s(T_e) \cdot P \cdot R/n = k_1 \cdot L_s(T_e), \quad (5)$$

式中: $k_1 = \sum_{i=1}^M \epsilon_i(\theta, \varphi) \cdot S_i \cdot P \cdot R/n$ ; $\epsilon_i$ 为面元的发射率; $i$ 为正整数; $P$ 和 $R$ 分别为传输路径上的透射率和反射率; $S$ 为面元面积; $M$ 为面元总数; $\theta$ 和 $\varphi$ 分别为辐射入射角和出射角; $T_e$ 为环境温度; $L_s(T_e)$ 为环境温度 $T_e$ 对应的辐射亮度。

由光学元件的表面反射到达单个像元的辐射通量 $\phi_{s2}$ 可以表示为

$$\phi_{s2}(T_e) = \frac{\pi(1-\epsilon_i)\tau_0}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \frac{A_d}{n} \cdot L_s(T_e) = k_2 \cdot L_s(T_e), \quad (6)$$

$$\text{式中: } k_2 = \frac{\pi(1-\epsilon_i)\tau_0}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \frac{A_d}{n}。$$

自身背景辐射总量为

$$\phi_s = \phi_{s1} + \phi_{s2} = k_1 \cdot L_s(T_e) + k_2 \cdot L_s(T_e) = (k_1 + k_2) \cdot L_s(T_e). \quad (7)$$

对于红外光谱仪系统来说, $(k_1 + k_2)$ 是一个常数,将其代入(4)式,可得

$$\begin{aligned} D(T_b, T_e) &= G' \cdot [k_t L_s(T_b) + (k_1 + k_2) \cdot L_s(T_e)] + h_{\text{det}} = \\ &= G \cdot L_s(T_b) + G' \cdot (k_1 + k_2) \cdot L_s(T_e) + h_{\text{det}}. \end{aligned} \quad (8)$$

当环境温度 $T_{e0}$ 变化至 $T_{e1}$ 时,光谱仪系统输出

灰度值变化量为

$$\begin{aligned} \Delta D &= D(T_b, T_{e1}) - D(T_b, T_{e0}) = \\ &G' \cdot (k_1 + k_2) \cdot [L_s(T_{e1}) - L_s(T_{e0})] = \\ &G' \cdot (k_1 + k_2) \cdot \Delta L_s(\Delta T), \end{aligned} \quad (9)$$

式中： $\Delta T$  为温度变化量， $\Delta T = T_{e1} - T_{e0}$ 。则通过探测器输出灰度值补偿后得到的  $D(T_b, T_{e1})$  可表示为

$$D(T_b, T_{e1}) = D(T_b, T_{e0}) + \Delta D. \quad (10)$$

当黑体温度不变，即  $L_s(T_b)$  不变时，改变环境温度，即改变  $L_s(T_e)$ ，就可得到不同的  $D(T_b, T_e)$  值和  $L_s(T_e)$ ，由 (9) 式就可以计算得到系数  $G' \cdot (k_1 + k_2)$  的值，它是一个与环境温度无关的常量。在实际应用中，环境温度的变化会引起光谱仪系统输出灰度值的漂移，若仍采用在实验室温度下得到的辐射定标方程就会影响测量的精度，此时只需将

$\Delta L_s(\Delta T)$  代入 (9) 式就可以求得探测器输出灰度值的补偿量  $\Delta D$ ，然后由 (10) 式求得补偿后的  $D(T_b, T_{e1})$ ，使得在环境温度变化较大的情况下，制冷型长波红外光谱仪系统输出的灰度值的波动减小，最后根据补偿后的输出灰度值进行辐射定标。

### 3 辐射定标实验

#### 3.1 输出灰度值漂移补偿实验

根据环境温度的变化对光谱仪系统输出灰度值的影响，设计了基于标准面源黑体的光谱仪系统输出灰度值漂移补偿实验，实验装置如图 3 所示。采用一个小型的高低温箱来模拟不同的环境温度，温度范围控制在  $20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ，温度误差为  $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。标准面源黑体采用的 EOI 公司的 CES100-04-MG 黑体，其具体参数如表 2 所示。

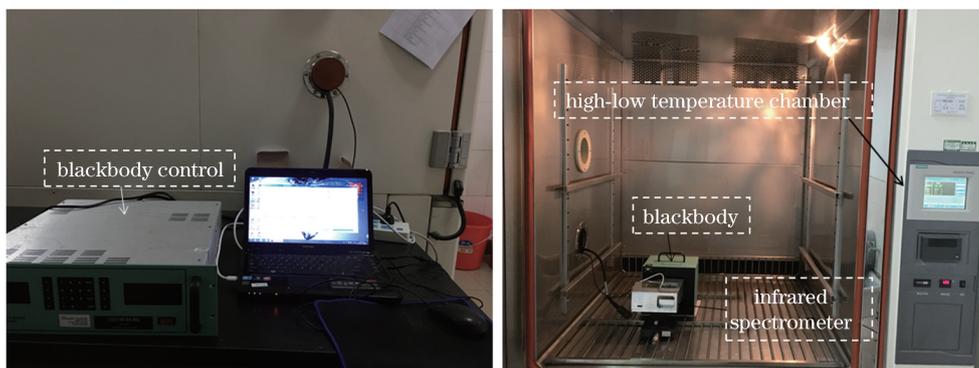


图 3 非制冷型红外光谱仪辐射定标实验装置的实物图

Fig. 3 Photos of experimental setup for radiation calibration using uncooled infrared spectrometer

表 2 标准面源黑体参数

Table 2 Parameters of standard area-source blackbody

Parameter	Value
Temperature range / $^\circ\text{C}$	0-100
Emitter size / (mm $\times$ mm)	102 $\times$ 102
Emissivity	0.97 $\pm$ 0.02
Stability / $^\circ\text{C}$	$\pm$ 0.003
Temperature resolution / $^\circ\text{C}$	$\pm$ 0.03

将非制冷型长波红外光谱仪安置在高低温箱中，使光谱仪的入瞳对准、贴近面源黑体，将高低温箱的温度调至某一温度点，达到平衡状态后调节标准面源黑体温度至实验温度点，在每个实验温度点上，间隔 30 s 采集 2 个数据，取平均值为一组定标数据。

#### 3.2 根据输出灰度值漂移补偿的辐射定标

实验时，首先在  $20 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$  的标准面源黑体温度

范围内，以  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  为间隔，共设置 4 个实验温度点，该过程为某一环境温度的实验周期。结束后，改变高低温箱温度进行下一个环境温度实验周期，高低温箱温度从  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  变化至  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ，间隔为  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，共 5 个环境温度点。以标准面源黑体温度的辐射亮度为横坐标，探测器输出灰度值为纵坐标，得到不同环境温度下的标准面源黑体辐射亮度  $L_s(T_b)$  与系统输出灰度值之间的关系，如图 4 所示。

从图 4 可以看出，探测器对同一标准面源黑体温度进行测量时，其输出灰度值随环境温度而变化。因此，当环境温度发生改变时，继续使用在实验室温度下得到的辐射定标方程进行测量时，目标红外辐射的测量结果会出现误差。

对图 4 所示的实验室环境温度 ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 下测量得到的定标数据进行线性拟合，得到辐射定标方程：

$$D(T_b, T_{25}) = 45.7 \cdot L_s(T_b) + 993. \quad (11)$$

在上述定标数据中任意选择 2 个环境温度和 1

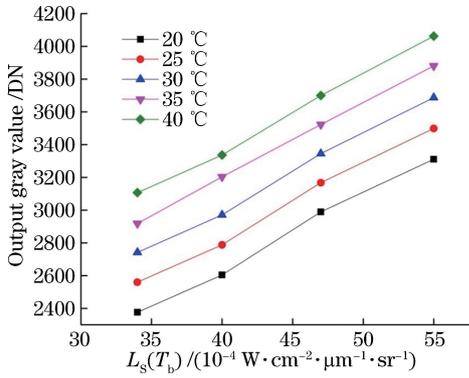


图 4 不同环境温度下标准面源黑体辐射亮度  $L_s(T_b)$  与系统输出灰度值的变化关系

Fig. 4 Relations between radiances  $L_s(T_b)$  of standard area-source blackbody and output gray values of system at different ambient temperatures

个黑体温度,本研究选择的环境温度为 20 °C 和 25 °C,黑体温度为 20 °C,探测器输出灰度值  $D(T_{20}, T_{20})$ 、 $D(T_{20}, T_{25})$  分别为 2377 和 2560,将其代入(9)式,计算得到  $G' \cdot (k_1 + k_2) = 55.5$ 。

当环境温度变化至任意温度  $T_x$  时,只需将  $\Delta L_s(T_x - T_{25})$  代入(9)式就可以求得探测器输出灰度值的补偿量  $\Delta D$ ,然后由(10)式可得到温度为 20,30,40,50 °C 的黑体在环境温度  $T_x$  下的光谱仪系统输出补偿值  $D(T_{20}, T_x)$ 、 $D(T_{30}, T_x)$ 、 $D(T_{40},$

$T_x)$ 、 $D(T_{50}, T_x)$ 。最后,在环境温度为  $T_x$  下,对以上光谱仪系统输出补偿值进行线性拟合,得到任意温度  $T_x$  下的辐射定标方程。该定标方程可表示为

$$D(T_b, T_x) = G_x \cdot L_s(T_b, T_x) + H_x, \quad (12)$$

式中: $G_x$ 、 $H_x$  分别为拟合得到的斜率和截距。

由于野外条件的限制,定标过程只能在实验室内完成。在实际应用中,可以根据野外环境温度与实验室环境温度的变化量来对光谱仪系统的输出灰度值进行漂移补偿,得到任意野外环境温度下的辐射定标方程,从而提高光谱仪的环境适应性。

### 3.3 漂移补偿验证

为了验证根据环境温度进行系统输出灰度值补偿修正的可行性,选择在不同的环境温度下,对黑体温度分别为 20,30,40,50 °C 的系统输出灰度值进行补偿,得到环境温度为 25 °C 下修正后的系统输出灰度值,具体数据如表 3 所示。某一环境温度下光谱仪系统的实际输出灰度值为  $D(T_x)$ ,其根据环境温度进行系统漂移后的输出灰度值进行补偿,得到环境温度为 25 °C 下的补偿值  $D(T_x, T_{25})$ ,利用实验室环境温度(25 °C)下的定标方程(11)式得到理论计算值  $D(T_{25})$ ,以及漂移补偿值  $D(T_x, T_{25})$  与理论计算值  $D(T_{25})$  的误差值  $E_{T_x}(T_{25})$ 。

表 3 不同环境温度下系统输出灰度值的修正结果

Table 3 Correction results of output gray values of system at different ambient temperatures

$T_b / ^\circ\text{C}$	$D(T_{25})$	$T_e = 20 ^\circ\text{C}$			$T_e = 30 ^\circ\text{C}$			$T_e = 35 ^\circ\text{C}$			$T_e = 40 ^\circ\text{C}$		
		$D(T_{20})$	$D(T_{20}, T_{25})$	$E_{T_{20}}(T_{25}) / \%$	$D(T_{30})$	$D(T_{30}, T_{25})$	$E_{T_{30}}(T_{25}) / \%$	$D(T_{35})$	$D(T_{35}, T_{25})$	$E_{T_{35}}(T_{25}) / \%$	$D(T_{40})$	$D(T_{40}, T_{25})$	$E_{T_{40}}(T_{25}) / \%$
20	2560	2377	2543.5	-0.6	2742	2575.5	0.6	2919	2530.5	-1.2	3107	2552	-0.3
30	2840.8	2605	2771.5	-2.4	2971	2804.5	-1.2	3203	2814.5	-0.9	3337	2782	-2.0
40	3168.4	2990	3156.5	-0.4	3345	3178.5	0.3	3523	3134.5	-1.1	3700	3145	-0.7
50	3542.8	3311	3477.5	-1.8	3687	3520.5	-0.6	3881	3492.5	-1.4	4063	3508	-0.9

图 5 所示为不同环境温度下,光谱仪系统的输出灰度值随标准面源黑体出射辐射的变化关系。其中,方形实点曲线表示实验室温度下(25 °C)光谱仪系统输出灰度理论计算值与标准面源黑体出射辐射的变化关系,其他形状的曲线分别表示环境温度为 20,30,35,40 °C 时,光谱仪系统经过漂移补偿到环境温度为 25 °C 时输出灰度修正值随标准面源黑体出射辐射的变化关系。

从图 5 可以看出,通过补偿修正得到的曲线和

在实验室环境温度(25 °C)下辐射定标得到的曲线的变化趋势基本一致。

图 6 所示为不同环境温度下通过漂移补偿到环境温度为 25 °C 时输出灰度修正值与实验室环境温度下(25 °C)理论计算值的相对误差。

从图 6 可以看出,不同环境温度下通过漂移补偿到环境温度为 25 °C 时输出灰度修正值与实验室环境温度下(25 °C)理论计算值的最大误差不超过 2.4%。

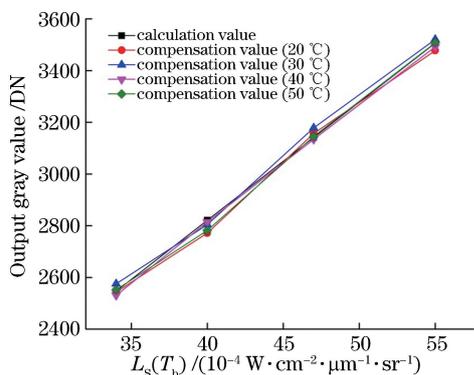


图5 不同环境温度下标准面源黑体辐射亮度  $L_S(T_b)$  与系统输出补偿后灰度值的变化关系

Fig. 5 Relations between radiances  $L_S(T_b)$  of standard area-source blackbody and output gray values of system obtained by drift compensation at different ambient temperatures

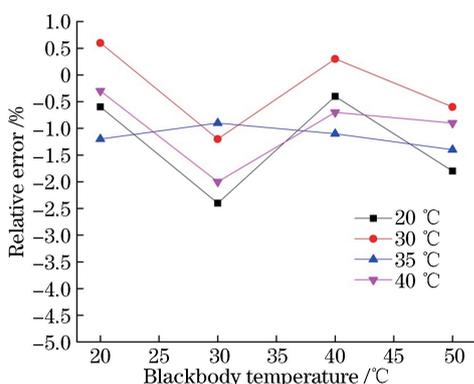


图6 不同环境温度下通过漂移补偿得到的输出灰度值与实验室环境温度下(25°C)理论计算值的误差

Fig. 6 Errors between output gray values obtained by drift compensation at different ambient temperatures and theoretically calculated values at laboratory ambient temperature (25°C)

## 4 结 论

为实现非制冷型红外光谱仪的精确辐射定标,首先分析了在辐射定标和测量过程中红外光谱仪系统输出灰度值漂移的原因,推导出漂移变化量和环境温度辐射度变化量的函数关系,在此基础上提出一种根据环境温度变化量补偿红外光谱仪系统输出灰度值的辐射定标方法。其次设计了相应的漂移补偿实验来确定辐射定标模型,同时通过实验验证该定标模型在不同环境温度下进行辐射测量的准确性。根据环境温度变化量补偿输出灰度值的辐射定标方法,可使光谱仪系统输出灰度值误差明显减小,漂移补偿后的输出灰度值与理论计算值的最大误差不超过2.4%,明显提高了非制冷型长波红外光谱仪

对红外辐射的测量精度。非制冷型红外探测器是发展迅速的新一代红外探测器件,非制冷型红外光谱仪无需制冷设备,具有体积小、成本低、功耗小等优点。本研究结果对非制冷型长波红外光谱仪的实际应用具有一定的现实意义。为了进一步提高光谱仪辐射定标精度,可在控制环境温度稳定性的同时,增大可调范围,使光谱仪适用范围变广,或者增加定标实验次数,缩小温度间隔,使辐射定标误差进一步减小。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang L, Zheng X B, Li S, *et al.* High accurate calibration of optical radiation at middle infrared and far infrared spectrum [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(3): 178-183.  
张磊, 郑小兵, 李双, 等. 高精度中远红外辐射定标技术研究[J]. *红外技术*, 2006, 28(3): 178-183.
- [2] Yang C Y, Cao L H. Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared opto-electric system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1624-1628.  
杨词银, 曹立华. 大口径红外光电系统辐射定标及误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1624-1628.
- [3] Li N, Yang C Y, Cao L H, *et al.* Radiance calibration for 3-5  $\mu\text{m}$  infrared focal plane array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2319-2325.  
李宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5  $\mu\text{m}$  红外焦平面阵列的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2319-2325.
- [4] Xing H, Zhao H J, Cheng X, *et al.* Radiometric calibration of hyperspectral imaging spectrometer based on AOTF[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 205-209.  
邢辉, 赵慧洁, 程宣, 等. AOTF的高光谱成像光谱仪的辐射定标技术[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 205-209.
- [5] Yuan X C, Yang Z X, Yu C C, *et al.* Study of radiation calibration for LWIR hyperspectral imager spectrometer[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(5): 431-434.  
袁小春, 杨智雄, 余春超, 等. 长波红外高光谱成像光谱仪的辐射定标[J]. *红外技术*, 2015, 37(5): 431-434.
- [6] Zhuang X Q, Wang S W, Wang Y M. Study on programmable infrared hyperspectral imaging technology[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(s1): 20-24.

- 庄晓琼, 王晟玮, 王跃明. 可编程红外焦平面光谱成像技术研究[J]. 遥感学报, 2014, 18(s1): 20-24.
- [7] Wu Y, Liu J X, Fang Y H, *et al.* Wavelength calibration of infrared spectrometer based on hollow planar waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1130002.
- 吴越, 刘家祥, 方勇华, 等. 中空型平板波导红外光谱仪的波长定标[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1130002.
- [8] Nan T L, Shen H H, Yang M Y, *et al.* Fast radiometric calibration method for long wave infrared detectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 122501.
- 南童凌, 沈宏海, 杨名宇, 等. 一种长波红外探测器的快速辐射定标方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 122501.
- [9] Chang S T, Sun Z Y, Zhang Y Y, *et al.* Internal stray radiation measurement for cooled infrared imaging systems[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(5): 050702.
- 常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 制冷型红外成像系统内部杂散辐射测量方法[J]. 物理学报, 2015, 64(5): 050702.
- [10] Sun Z Y, Chang S T, Zhu W, *et al.* Radiation calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibrations [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 356-362.
- 孙志远, 常松涛, 朱玮, 等. 应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 356-362.
- [11] Zhang X L, Liu Y, Sun Q, *et al.* Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision[J]. Chinese Optics, 2012, 5(3): 235-241.
- 张晓龙, 刘英, 孙强, 等. 高精度非制冷长波红外热像仪的辐射定标[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 235-241.
- [12] Che N Z, Yan D Y. Radiometry and photometry [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990.
- 车念曾, 阎达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [13] Zhang J Q, Fang X P. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 57-74.
- 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 57-74.
- [14] Yu Y, Wang M, Chang S T, *et al.* Drift compensation of infrared imaging system using ambient temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1004002.
- 余毅, 王旻, 常松涛, 等. 根据环境温度进行红外成像系统漂移补偿[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1004002.