

文章编号:1001-9014(2004)02-0131-04

红外光谱仪多点定标方法及环境温度校正

黄 焯, 方勇华, 荀毓龙, 熊 伟, 乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:在红外光谱仪的定标中,为了减小误差,可以选取多温度点的测量来进行定标;此外对于测量较弱红外辐射的光谱仪,环境温度对定标结果也有不可忽视的影响.本文主要讨论利用测量多温度点的标准黑体进行定标的方法、试验结果分析以及环境温度对定标结果的影响.

关键词:红外;光谱仪;定标;温度校正

中图分类号:043 **文献标识码:**A

CALIBRATION METHODS OF INFRARED SPECTRUM RADIOMETER AT VARIOUS TEMPERATURES AND BACKGROUND TEMPERATURE ADJUSTMENT

HUANG Ye, FANG Yong-Hua, XUN Yu-Long, XIONG Wei, QIAO Yan-Li

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In calibration of a infrared spectrum radiometer, we calibrate an infrared radiometer by measuring on various temperatures of the blackbody in order to reduce error. For the radiometer measuring weak radiation, the background temperature has unavoidable effect on calibration. The methods of calibration by measuring the standard blackbody at different temperature was discussed. The experimentation results were analysed, and the effect of the background temperature on the calibration result was given.

Key words: infrared; radiometer; calibration; temperature adjustment

引言

红外光谱仪(以下简称“光谱仪”)在使用前必须要进行定标.对光谱仪响应度的定标采用的通常方法是,在确保视场内没有能够与定标源竞争的辐射源和屏蔽恒温的条件下,采用标准黑体辐射源作为定标源,使用光谱仪分别对不同温度下的标准黑体辐射源进行测量,计算出2个温度下的辐射计读数差值与已知的黑体辐射量值之比,即为光谱仪的响应度.

$$R(\nu) = \frac{S_1(\nu) - S_2(\nu)}{X_1(\nu) - X_2(\nu)} \quad (1)$$

式(1)中 $R(\nu)$ ——仪器的光谱响应函数; $S_1(\nu)$, $S_2(\nu)$ ——2个温度下的仪器读数; $X_1(\nu)$, $X_2(\nu)$ ——

2个温度下的黑体辐射量值,可以是辐出度、辐亮度或辐照度.

很显然,如果仅仅在2个温度点下各进行一次测量,则定标的误差就可能比较大.这是因为,实际的黑体辐射源在某一个温度点可能不符合黑体辐射的理论值,而黑体本身存在着温度不稳定的现象,且被定标仪器即使是对于同一辐射量值也存在着读数不稳定的现象.为了减小单次测量误差带来的影响,我们可以选取多个温度点的标准黑体辐射源进行多次测量.同时在实际使用时,光谱仪的环境温度也不可能保持不变,不同环境温度下的定标结果可能是不一样的.本文讨论的就是利用多个温度点的标准黑体辐射源进行定标的方法和环境温度对定标结果的影响以及对定标不确定度的分析.

收稿日期:2003-09-15,修回日期:2004-01-04

Received date: 2003-09-15, revised date: 2004-01-04

作者简介:黄焯(1972-),男,安徽合肥人,中科院安徽光学精密机械研究所博士研究生,主要从事遥感技术研究.

1 定标的原理和方法

1.1 在一个环境温度下进行的定标和线性拟合算法

在进行定标时,投射到光谱仪探测器响应面上的辐射,除给定的定标源辐射以外,还包括光学系统自身的热辐射、散射到入射光瞳上的外界背景辐射、路径中大气的热辐射和散射的太阳辐射.为了避免在定标时有太多的不确定因素,以得到数学上的相对简单,我们以近距离扩展源法对光谱辐亮度响应度定标为例,来给出定标的方法.

由于是近距离扩展源法定标,散射到入射光瞳上的外界背景辐射、路径中大气的热辐射和散射的太阳辐射基本上可以忽略,因此,此时的干扰辐射主要是光学系统自身的热辐射,可以认为干扰辐射,与某一个附加的入射辐射等效,该辐射是仪器本身温度的函数,如果是在一个恒温的条件下,仪器温度等于环境温度 T' ,这个辐射可以用 $L_{opp}(T', \nu)$ 表示.

现在我们使用一个标准面源黑体作为定标源,黑体的发射面正对光谱仪探测器的接收面且充满视场,该黑体的有效发射率 $\alpha(\nu)$ 已知,温度为 T ,其光谱辐亮度为 $L_{bb}(T, \nu)$. 这样,投射到探测器上的总光谱辐亮度 $L(\nu)$ 应该为

$$L(\nu) = L_{bb}(T, \nu) + L_{opp}(T', \nu). \quad (2)$$

尽管在实际中探测器并不一定总是严格线性响应的,但在辐射值不是很大且变化范围有限的情况下,我们可以假设探测器是严格线性响应的.如果光谱仪的辐亮度响应度为 $R(\nu)$,很显然,此时仪器的读数 $S(\nu)$ 可由下面的公式给出

$$S(\nu) = R(\nu)(L_{bb}(T, \nu) + L_{opp}(T', \nu)). \quad (3)$$

由式(3)可知,即使我们通过定标得到了准确的响应度函数 $R(\nu)$,也无法将仪器的读数准确地转换为待测目标的实际光谱辐亮度值.因此,对红外光谱仪的定标,不仅仅是求出 $R(\nu)$,还要得知 $L_{opp}(T', \nu)$.

但在实际测量中, $L_{opp}(T', \nu)$ 是无法直接测量的.为此,我们必须通过对黑体多个温度点进行测量,以得到与 $L_{opp}(T', \nu)$ 相关的量.

根据前面的假设,探测器是线性响应的,因此我们可以建立一个线性的数学模型,对于某一个被测值 $L_{bb}(T, \nu)$,理论上的仪器读数 $S'(\nu)$ 应符合下面的公式

$$S'(\nu) = A(T', \nu) + R(\nu)L_{bb}(T, \nu). \quad (4)$$

式(4)中 $A(T', \nu)$ ——零输入响应,数值上等于 $R(\nu)L_{bb}(T, \nu)$.

如果要想得到式(4)中的 $A(T', \nu)$ 和 $R(\nu)$,我们只需要对2个温度 T_1 和 T_2 下的标准面源黑体进行测量,并利用下面的式(5)进行计算即可.

$$\begin{cases} A(T', \nu) = \frac{L_2(\nu) \cdot S_1(\nu) - L_1(\nu) \cdot S_2(\nu)}{L_2(\nu) - L_1(\nu)}, \\ R(\nu) = \frac{S_2(\nu) - S_1(\nu)}{L_2(\nu) - L_1(\nu)}. \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中 $S_1(\nu), S_2(\nu)$ ——2个温度下的仪器读数; $L_1(\nu), L_2(\nu)$ ——2个温度下的黑体辐亮度.

但是该种测量容易带来较大的误差,特别是在2个温度相差不大的情况下进行的定标.由于辐亮度的差值较小,测量时的微小误差对响应度会产生很大的影响.

为减小该种误差,可采取多个温度点、多次测量的方法来进行定标.我们选取若干个温度点,使用光谱仪对每个温度点的标准黑体面源进行多次测量,可以得到每个温度点下的光谱仪读数的平均测量值.然后再对定标的光谱范围内的每个波长点,对各个温度点的平均测量值以最小二乘法进行线性拟合,最后得到两个合适的函数 $A(T', \nu)$ 和 $R(\nu)$.

我们采用上面的方法进行求解.显然,根据最小二乘原理,必须要找到最合适的两个函数 $A(T', \nu)$ 和 $R(\nu)$,使得按照这两个函数计算出的仪器读数 $S'(\nu)$ 与每一温度下光谱仪实际读数 $S(\nu)$ 的平均测量值之间的差值平方和最小.

假设我们共对 m 个温度点的标准面源黑体进行测试,对每一个温度点都进行了 n 次测量,得到读数 $S_{ij}(\nu)$ ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$),因此我们可以得到每一温度点下的光谱仪读数的平均测量值 $S_i(\nu)$

$$S_i(\nu) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_{ij}(\nu). \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

我们可以计算出这 m 个温度下的标准面源黑体的表面辐亮度 $L_i(T_i, \nu)$,对某给定的函数 $A(T', \nu)$ 和 $R(\nu)$ 来说,由式(4)可以计算得到理论上的仪器读数 $S'_i(\nu)$. 实测的仪器读数和计算得到的仪器读数之间差的平方和由式(7)给出

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^m [S'_i(\nu) - S_i(\nu)]^2. \quad (7)$$

我们可以将 δ^2 分别对 $A(T', \nu)$ 和 $R(\nu)$ 求偏导数,并令偏导数为零,求出如下的 $A(T', \nu)$ 和 $R(\nu)$.

$$\begin{cases} A(\nu) = \frac{\overline{L_i^2(\nu)} \cdot \overline{S_i(\nu)} - \overline{L_i(\nu)} \cdot \overline{L_i(\nu)} \overline{S_i(\nu)}}{\overline{L_i^2(\nu)} - \overline{L_i(\nu)}^2} \\ R(\nu) = \frac{\overline{L_i(\nu)} \overline{S_i(\nu)} - \overline{L_i(\nu)} \cdot \overline{S_i(\nu)}}{\overline{L_i^2(\nu)} - \overline{L_i(\nu)}^2} \end{cases} \quad (8)$$

得到了 $A(T', \nu)$ 和 $R(\nu)$ 之后, 对于任何一个测量所得的仪器读数, 我们都可以利用式(4)将其转换为测量目标的实际光谱辐亮度值, 反之亦然. 并且可以认为对于线性响应的探测器, 所导致的误差最小.

1.2 环境温度校正

我们有必要讨论一下 $A(T', \nu)$ 和 $R(\nu)$ 的物理意义, 通过上述的分析, 可以看到: $R(\nu)$ 是真正的光谱辐亮度响应度, 代表待测目标的光谱辐亮度每增加 1 个单位 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{Sr})$] 时光谱仪读数的增加量, 与环境温度基本无关, 或者说在光谱仪工作温度范围内基本保持不变; 而 $A(T', \nu)$ 是附加的入射辐射 (在此处主要来源于光学系统本身的热辐射) 对仪器读数的贡献, 是 $R(\nu)$ 和 $L_{\text{opp}}(T', \nu)$ 的乘积, 随环境温度变化而变化.

在定标过程中, 环境温度在很长的时间内保持不变, 因而, 可以认为, 在定标过程中, 光学系统自身的热辐射也是保持不变的, 然而, 在实际的测量工作中, 尤其是野外测量, 几乎无法保证环境温度与实验室定标时的环境温度一样. 而等效于干扰辐射的附加的入射辐射 $L_{\text{opp}}(T', \nu)$, 是环境温度 T' 的函数, 随着环境温度的变化而变化. 因此, 在实验室定标的结果, 并不一定适合于分析野外测量的结果. 只有在野外测量的实际温度和实验室定标的温度相同时, 定标的结果才适用. 为了得到精确的定标结果, 就要在不同的环境温度下均按照上面的方法对光谱仪进行定标, 以得到光谱仪可能工作的每一个环境温度下的 $A(T', \nu)$ 和 $R(\nu)$, 这样就会导致定标工作量大量增加.

由于 $R(\nu)$ 不随温度变化, 我们仅仅需要测量在不同环境温度下的 $A(T', \nu)$. 考虑在 2 个环境温度下对同一辐射量进行的测量, 根据式(4), 可以得到式(9)

$$\begin{cases} S(T'_1, \nu) = A(T'_1, \nu) + L_{\text{bb}}(\nu) \cdot R(\nu), \\ S(T'_2, \nu) = A(T'_2, \nu) + L_{\text{bb}}(\nu) \cdot R(\nu). \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 $S(T'_1, \nu)$ 和 $S(T'_2, \nu)$ ——环境温度为 T'_1 和 T'_2 时同一辐射量值的仪器读数.

假设 T'_1 温度下已经按照上面的方法进行定标, $A(T'_1, \nu)$ 和 $R(\nu)$ 已知. 这样, 我们就很容易得到 T'_2 温度下的 $A(T'_2, \nu)$

$$A(T'_2, \nu) = A(T'_1, \nu) + S_0(T'_2, \nu) - S_0(T'_1, \nu). \quad (10)$$

由此可见, 我们只需要对几个环境温度下的同一个辐射量值进行测量, 即可得到这几个温度下的 $A(T', \nu)$. 对于其他的环境温度, 我们可以用内插法计算出这些环境温度下的 $A(T', \nu)$.

2 实验结果和分析

2.1 在某一环境温度下的定标结果和分析

利用上述方法, 我们对一台 WQF-410 型红外傅里叶光谱仪进行了定标.

在环境温度为 27°C 的情况下, 采用的定标源是标准面源黑体, 分别将黑体温度设为 32°C 、 37°C 、 42°C 、 47°C 和 52°C , 在每个温度下进行了 5 次测量, 取 5 次测量的平均值. 我们取 $\nu = 1\,000\text{cm}^{-1}$ 时的测量数据, 如表 1 所列.

对上面的数据进行线性拟合以后, 我们得到在 $\nu = 1\,000\text{cm}^{-1}$ 时, $A(27^\circ\text{C}, 1\,000\text{cm}^{-1}) = 12.527$; $R(1\,000\text{cm}^{-1}) = 2.9697 \times 10^6 (\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{Sr})$.

如果我们不采用多点定标的方法, 而只是考虑其中的 2 个温度点, 例如, 仅仅取黑体温度为 32°C 和 52°C 时的 2 个读数平均值, 根据式(5), 也可以得到红外光谱仪的表面辐亮度响应函数 $R'(1\,000\text{cm}^{-1})$ 和零输入响应 $A'(23^\circ\text{C}, 1\,000\text{cm}^{-1})$. 其值如下:

$$A'(23^\circ\text{C}, 1\,000\text{cm}^{-1}) = 13.598,$$

$$R'(1\,000\text{cm}^{-1}) = 2.8838 \times 10^6 (\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{Sr}).$$

对这 2 组数据进行比较, 我们可以按照式(7)计算因此产生的仪器读数和定标计算值之间的差值的平方和. 采用多点定标的方法, 计算出差值的平方和 $\sigma^2 = 0.373\,23$; 如果只取 32°C 和 52°C 两点定标,

表 1 $\nu = 1000\text{cm}^{-1}$ 时的仪器读数和黑体辐亮度

Table 1 Measured data and radiance of the blackbody when $\nu = 1000\text{cm}^{-1}$

| | 32°C | 37°C | 42°C | 47°C | 52°C |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 仪器读数平均值(%) | 44.608 | 46.555 | 49.962 | 52.633 | 55.177 |
| 黑体辐亮度 | 1.0753 × | 1.1611 × | 1.2508 × | 1.3443 × | 1.4418 × |
| $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{Sr})$ | 10^{-5} | 10^{-5} | 10^{-5} | 10^{-5} | 10^{-5} |

计算出差值的平方和 $\sigma^2 = 0.43549$. 显然, 多点定标的方法导致的误差比点定标的小. 通过不确定度的分析我们可以看到其原因.

由于在定标时采用的是近距离扩展源法, 散射到光谱仪的辐射已经降到最低, 因此, 我们认为这里不确定度的来源主要有下面几个方面: 黑体温度的示值误差和不稳定性、对同一辐射量值测量时光谱仪读数的离散性.

对同一辐射量值测量时光谱仪读数的离散性, 如果取平均值, 显然测量次数越多, 所导致的不确定度越小, 在这里我们不需要作详细讨论. 由于对某一个温度的黑体测量时间是非常之短, 因此, 我们也可以忽略黑体温度的不稳定性, 只考虑黑体温度的示值误差. 对于黑体温度示值误差导致辐射量值误差的标准不确定度采用 B 类评定.

黑体的示值误差我们用一个相对差值和绝对差值的和来代替, L_i 的误差在 $\pm(a + bL_i)$ 之间, 并假设是均匀分布. 即对于任一个黑体温度下的黑体, 其辐射亮度的标准不确定度应为

$$u_i = (a + bL_i) / \sqrt{3}. \quad (11)$$

将 $R(\nu)$ 对 $L_i(\nu)$ 求偏导数, 可得

$$\frac{\partial R(\nu)}{\partial L_i(\nu)} = \frac{S_k(\nu) - \overline{S_i(\nu)}}{m(L_i^2(\nu) - \overline{L_i(\nu)^2})} - \frac{2R(\nu)(L_k(\nu) - \overline{L_i(\nu)})}{m(L_i^2(\nu) - \overline{L_i(\nu)^2})}. \quad (12)$$

如果我们将 u_i 看成一个不变量 u , 则其合成标准不确定度 U 由下式确定

$$U^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial R(\nu)}{\partial L_i(\nu)} \right)^2 u_i^2 = \frac{\overline{S_i^2(\nu)} - \overline{S_i(\nu)}^2 + 4R(\nu)(\overline{S_i(\nu)L_i(\nu)} - \overline{S_i(\nu)} \cdot \overline{L_i(\nu)})}{m(L_i^2(\nu) - \overline{L_i(\nu)^2})^2} + \frac{4R^2(\nu)(\overline{L_i^2(\nu)} - \overline{L_i(\nu)}^2)}{m(L_i^2(\nu) - \overline{L_i(\nu)^2})^2} u^2. \quad (13)$$

由公式(13)可以看出, 当 m 越大时, U 就越小. 因此我们可以得出结论: 多点定标的方法导致的误差比点定标的小.

2.2 环境温度校正实验结果及分析

在上面的实验之后, 我们又分别在 22℃ 和 32℃ 的环境温度下, 对 42℃ 标准面源黑体各进行了 5 次测量. 结果发现在 22℃ 下, 光谱仪在 $\nu = 1000\text{cm}^{-1}$ 时的读数平均值是 49.799; 在 32℃ 下, 光谱仪在 $\nu = 1000\text{cm}^{-1}$ 时的读数平均值是 50.184. 这样根据式(9)和我们在上面已经得到的 27℃ 下光谱仪在 $\nu =$

1000cm^{-1} 时的读数平均值和 $A(T', \nu)$, 我们就可以得到 22℃ 和 32℃ 下的 $A(T', \nu)$ 分别为

$$A(22^\circ\text{C}, 1000\text{cm}^{-1}) = 12.364,$$

$$A(32^\circ\text{C}, 1000\text{cm}^{-1}) = 12.769.$$

对 22℃ 到 27℃ 之间任一个环境温度 T'_1 , 都可以通过内插法得到其零输入响应 $A(T'_1, \nu)$; 同样, 对 27℃ 和 32℃ 之间的任一个环境温度 T'_2 , 也都可以通过内插法得到 $A(T'_2, \nu)$.

从 1.2 的分析中我们可以看到, 造成这种情况的原因是入射的干扰辐射 $L_{\text{opp}}(T', \nu)$ 也随着环境温度的改变而改变, 从而使得光谱仪对同一辐射量值的标准面源黑体产生不一样的响应.

为了验证 $A(T', \nu)$ 是否仅仅是环境温度的函数, 而与黑体辐射量值无关, 我们进行了下面的实验. 我们继续在 22℃ 和 32℃ 的环境温度下, 分别对 52℃ 标准面源黑体进行了测量, 得到了结果如下. 在 22℃ 下, 光谱仪在 $\nu = 1000\text{cm}^{-1}$ 时的读数平均值是 55.008; 在 32℃ 下, 光谱仪在 $\nu = 1000\text{cm}^{-1}$ 时的读数平均值是 55.418. 由此得到了另一组 $A(T', \nu)$.

$$A(22^\circ\text{C}, 1000\text{cm}^{-1}) = 12.358,$$

$$A(32^\circ\text{C}, 1000\text{cm}^{-1}) = 12.767.$$

比较两组数据, 基本相符. 由此可见, 在近距离扩展源法定标中, 光谱仪的零输入响应基本上是环境温度的函数.

5 结语

本文描述了对红外光谱仪多温度点、多次测量结合线性拟合算法的定标方法, 并进行了验证试验. 通过不确定度的分析得知, 该方法确实可以降低定标数据的不确定度; 本文还提到了在实际测量中对于不同的环境温度对光谱仪的测量数据环境温度校正的方法和实验依据.

REFERENCES

- [1] CHENG Heng. *Infrared Physics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press (陈衡. 红外物理学. 北京: 国防工业出版社), 1985, 26—42
- [2] SHI Miao-Gen, GU Li-Zhen. *The basis of scientific and engineering calculation* [M]. Beijing: Tsinghua University Press (施妙根, 顾丽珍. 科学和工程计算基础. 北京: 清华大学出版社), 1999, 146—158
- [3] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P. P. China. *The Theory and Practice of Quality* [M]. Beijing: Chinese Personnel Press (国家质量监督检验检疫局. 质量专业理论和实务. 北京: 中国人事出版社), 2001, 350—380