第32卷，第7期
2012年7月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 32, No. 7, pp1994-1998
July, 2012

大口径红外辐射计的光谱定标

叶　钊[1,2]，万　志[1]，李宪圣[1]，任建伟[1*]，刘洪兴[1,2]

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春　130033
2. 中国科学院研究生院，北京　100049

摘　要　介绍了大口径红外辐射计的光谱定标方法。研制了大口径红外辐射计。该辐射计主要由前置光学系统，红外探测器(热释电探测器和碲镉汞探测器 2～14 μm)，机械斩波器，锁相放大器，信号采集器等组成。首先对大口径红外辐射计的光谱定标方法进行了分析，然后建立红外辐射计光谱定标的测量装置，并分别测试腔体热释电探测器和 HgCdTe 探测器的响应非线性，最后用腔体热释电探测器在该测量装置上对 HgCdTe 探测器进行红外光谱响应度校准实验。通过两种相对光谱响应度测量方法的对比，给出多次测量结果的平均值及两种方法的对比分析。分析结果表明，测量系统的不确定度优于 3.4%。

关键词　大口径；红外辐射计；光谱定标；腔体热释电探测器；HgCdTe 探测器
中图分类号：TN215；O433.1　**文献标识码**：A　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2012)07-1994-05

引　言

自然界中的物体都会产生辐射，通过分析景物产生的红外辐射就可以得到实际景物的相关信息。红外探测器是把不可见的红外辐射能转变为可测量信号的转换器，是红外辐射计的核心。随着半导体材料、器件工艺、加工工艺的发展，红外辐射计被广泛应用于成像、跟踪、制导、侦查、预警、遥感、辐射测量等领域[1]。目前在我国“神州系类”载人飞船上就安装有中分辨率红外光谱辐射计。

红外辐射计的光谱定标主要是确定红外辐射计的相对光谱响应，并得出红外辐射计的光谱响应范围。相对光谱响应是指红外辐射计接收不同波长光照射时，其响应率随波长变化的情况，是探测器的相对响应与入射波长的函数关系[2]。目前红外探测器的光谱响应性能参量的检测技术已经成熟，但是对于红外辐射计的光谱定标方法还有待改进。采用辐射响应函数[3]概念来表述红外辐射计光谱定标的新方法，并以大口径红外辐射计为例，测试各参量并对其光谱性能进行了评价。

1　红外辐射计的组成

该辐射计包括前置光学系统、精密机械斩波器、单元红外探测器(碲镉汞和热释电)、锁相放大器以及信号采集器等。为了满足大口径红外光电系统的定标要求，红外辐射计前置光学系统的设计采用卡塞格林系统，如图1。该光学系统将辐射能量经二次成像收集到红外探测器上，主要技术指标为：口径 310 mm；焦距 800 mm；有效入瞳直径 310 mm。

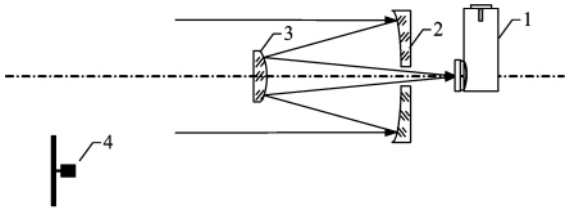

Fig. 1　Optical principle of the radiometer
1：红外探测器；2：光管主镜；
3：光管次镜；4：精密机械斩波器

在结构上，将机械斩波器放置在单色仪入射狭缝前，这样可以减少背景辐射的干扰，获得较好的调制效果，将单元探测器摆放在前置卡式系统的焦面位置处，保证探测器接收面积与光学系统成像大小相同[4]。调制出的信号经过前置放大器，锁相放大器后可获得高信噪比的输出信号，该信号经信号采集器数字化处理后，通过串行接口对计算机传输数据。系统信号处理原理框图如图2所示。

收稿日期：2011-10-03，修订日期：2012-03-20
基金项目：国家(863计划)高技术项目(863-5-1-13B)资助
作者简介：叶　钊，1985年生，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生　e-mail：sunyeath@gmail.com
*通讯联系人　e-mail：renjw@ciomp.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

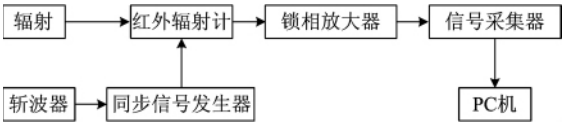

Fig. 2　Principle of the radiometer signal processing

2　光谱定标的原理与方法

大口径红外辐射计是一辐射通量测量系统，输出值与入射辐射通量成正比。由于系统的入瞳口径较大，平行光管的口径必须大于辐射计入瞳直径，以便尽可能缩小因平行光管的像差对定标结果带来的影响[5]。由于标准辐射板和面源黑体的温度均匀性很难保证，所以测试时选用腔型黑体辐射源作为标准辐射源。红外辐射计的前置光学系统相对光谱透过率可以通过大面积面源黑体进行测定。大口径红外辐射计光谱定标原理如图 3 所示[6]。

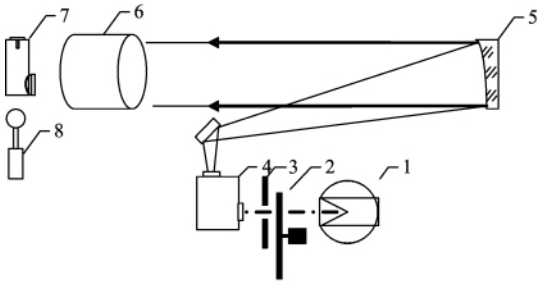

Fig. 3　Sketch of spectral calibration for the large aperture infrared radiometer

1：腔型黑体辐射源；2：斩波器；3：入射狭缝；4：单色仪；5：大口径平行光管；6：大口径红外辐射计前置光学系统；7：HgCdTe 探测器；8：腔体热释电探测器

(1)红外单色仪波长定标。红外单色仪为红外辐射计提供标准的单色辐射，单色仪本身是否标准非常关键。用氦氖激光器 632.8 nm 波长的二级、三级光谱建立单色仪扫描与波长位置间的关系。

(2)实验过程中可以预先设定一个温度最大值和一个温度最小值，分别测试探测器饱和情况、信噪比、锁相放大器的工作范围。

(3)热释电探测器为光谱选择中性的探测器，该探测器对波长的响应几乎为一个常数，性能比较稳定，光谱透射比在测量波段是平坦的[7]。将热释电探测器置于红外辐射计前置光学系统后，启动单色仪使各单色辐射依次入射到热释电探测器接收面上，当波长为 λ，温度为 T 的单色光辐照时，红外辐射计热释电探测器输出数码值与单色辐射亮度的关系

$$DN_{\mathrm{PT}}(\lambda) = DN_{\mathrm{PT0}} + M_{\mathrm{bb}}(\lambda, T) \cdot \tau(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot R_{\mathrm{PT}}(\lambda, T) \cdot C_{\mathrm{sys}} \tag{1}$$

$M_{\mathrm{bb}}(\lambda, T)$ 为标准辐射源的辐射出射度；$\tau(\lambda)$ 为大气投射比；$R_{\mathrm{PT}}(\lambda, T)$ 为腔体热释电探测器的光谱响应度，可以用常数 C_1 表示；$K(\lambda)$ 为系统的仪器函数；C_{sys} 为光学系统相对光谱透过率，由于红外辐射计光学系统表面镀银，测量波段内的光谱透过率是平坦的，因此 C_{sys} 是常数。$DN_{\mathrm{PT}}(\lambda)$ 为辐射计在辐射亮度 $M_{\mathrm{bb}}(\lambda, T)$ 下的数码输出，DN_{PT0} 为辐射计探测器零辐照下的数码输出。保持探测器不变，等温度间隔改变标准辐射源温度，重复上面的测试并记录数据。

(4)在单色仪不变的情况下，用 HgCdTe 探测器替换热释电探测器，HgCdTe 探测器在波长为 λ，温度为 T 的单色光辐照时，输出数码值与单色辐射亮度的关系

$$DN_{\mathrm{MCT}}(\lambda) = DN_{\mathrm{MCT0}} + M_{\mathrm{bb}}(\lambda, T) \cdot \tau(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot R_{\mathrm{MCT}}(\lambda, T) \cdot C_{\mathrm{sys}} \tag{2}$$

$R_{\mathrm{MCT}}(\lambda, T)$ 为 HgCdTe 探测器的光谱响应度。保持 HgCdTe 探测器不变，等温度间隔改变标准辐射源温度，重复上面的测试并记录数据。

(5)若红外探测器响应线性，相对光谱响应与温度无关。式(2)除以式(1)，整理得

$$\frac{DN_{\mathrm{MCT}}(\lambda) - DN_{\mathrm{MCT}}}{\mathrm{DN}_{PT}(\lambda) - \mathrm{DN}_{PT0}} = \frac{\mathrm{M}_{bb}(\lambda, \mathrm{T}) \cdot \tau(\lambda) \cdot \mathrm{K}(\lambda) \cdot \mathrm{R}_{MCT}(\lambda, \mathrm{T}) \cdot \mathrm{C}_{sys}}{\mathrm{M}_{bb}(\lambda, \mathrm{T}) \cdot \tau(\lambda) \cdot \mathrm{K}(\lambda) \cdot \mathrm{R}_{PT}(\lambda, \mathrm{T}) \cdot \mathrm{C}_{sys}} = \frac{\mathrm{R}_{MCT}(\lambda, \mathrm{T})}{\mathrm{R}_{PT}(\lambda, \mathrm{T})} \tag{3}$$

$$\mathrm{R}_{MCT}(\lambda) = \frac{\mathrm{DN}_{MCT}(\lambda) - \mathrm{DN}_{MCT0}}{\mathrm{DN}_{PT}(\lambda) - \mathrm{DN}_{PT0}} \cdot \mathrm{C}_1 \tag{4}$$

$R_{\mathrm{MCT}}(\lambda)$ 即为红外探测器的相对光谱响应度。

(6)用所有相对光谱响应度数据 $R_{\mathrm{MCT}}(\lambda)$ 除以峰值相对光谱响应度 $R_{\mathrm{MAX}}(\lambda)$，得到归一化的相对光谱响应度

$$R'(\lambda) = \frac{R_{\mathrm{MCT}}(\lambda)}{R_{\mathrm{MAX}}(\lambda)} \tag{5}$$

(7)若红外探测器响应非线性，则需分别建立每个波长 λ 下的相对光谱响应，即对每个波长 λ 下的热释电探测器和 HgCdTe 探测器的 DN 值在不同温度下进行最小二乘拟合。该相对光谱响应关系可用泰勒级数描述

$$DN(\lambda) = DN_0 + R_1(\lambda) \cdot E + R_2(\lambda) \cdot E^2 + \cdots + R_n(\lambda) \cdot E^n \tag{6}$$

其中，DN_0 的物理含义是红外探测器在零辐照下的信号响应，$DN(\lambda)$ 的物理含义是红外探测器在该波长位置处总辐照的数码输出。$R_1(\lambda)$ 是红外探测器的线性相对光谱响应系数，$R_2(\lambda)$，…，$R_n(\lambda)$ 为二次以上的高次响应系数。

(8)式(6)中，高次项系数越接近于 0，HgCdTe 探测器响应越接近线性。若高次项系数为 0，则 HgCdTe 探测器的相对光谱响应度

$$R_{\mathrm{MCT}}(\lambda) = \frac{DN_{\mathrm{MCT}}(\lambda) - DN_{\mathrm{MCT0}}}{DN_{\mathrm{PT}}(\lambda) - DN_{\mathrm{PT0}}} \cdot C_1$$

与式(4)相同。

3　红外探测器非线性响应测试

检验热释电探测器、HgCdTe 探测器的非线性响应[8,9]，进一步保证光谱定标的准确性。非线性度测试示意图如图 4。

测试方法如下。

(1)按图 5 所示连接测试系统，进行系统预置并确保探测器处于正常工作的状态。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(2)改变腔型黑体辐射源的温度，测出不同温度条件下(不少于 5 个点)的探测器输出 DN 值(正比于探测器接收的辐射强度)。

(3)通过普朗克公式得到不同温度条件下的辐射功率 M，通过最小二乘拟合建立 DN 与 M 的关系，若拟合出一条直线，说明探测器响应线性。

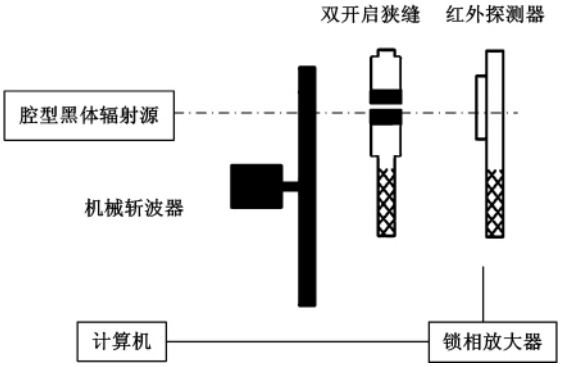

Fig. 4 Principle of non-linear response test

4 光谱定标测试数据与分析

4.1 单色仪波长定标

在标准平台上按定标要求摆放标准辐射源，红外单色仪，锁相放大器，热释电探测器进行单色仪定标。定标结果如图 5，实测特征谱线位置和标准数据吻合度极高，而光谱定标过程中，单色仪扫描间隔为 0.1 μm，波长偏差几乎不会影响扫描的准确性。

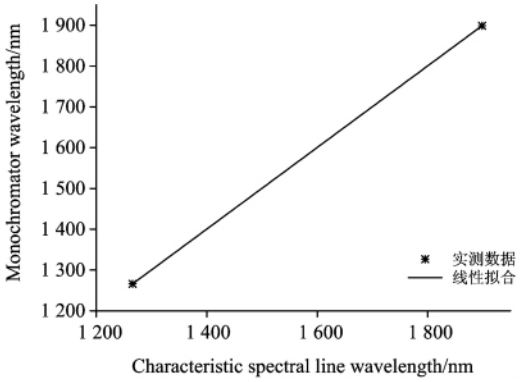

Fig. 5 Monochromator wavelength calibration

4.2 非线性度测试

在实验室温度 27 ℃，相对湿度 46%环境下，按实验要求设定 100，200，300，400，500，600，700 ℃，7 个温度点，单色仪扫描范围 2～10 μm，扫描间隔 0.1 μm，分别进行三次测试，取三次测量的平均值。实验数据如下表 1 和图 6。

两种探测器在黑体温度 100℃ 时的响应稍稍偏差于拟合曲线。HgCdTe 探测器与黑体辐射的线性拟合相关系数 0.999，热释电探测器与黑体辐射的线性拟合相关系数 0.999，相关系数越高说明线性越好。通过实验证明两种探测器都有很好的线性响应。

Table 1 Infrared detector non-linear test data

黑体温度 /K	黑体辐射 /(W·m^{-2})	HgCdTe 探测器(DN 值)	热释电探测器(DN 值)
373	471.37	445	790
473	1695.52	1 250	2 590
573	4 351.08	2 760	6 190
673	9 136.79	5 220	12 420
773	16 775.44	8 890	22 550
873	27 934.11	14 050	37 900
973	43 157.13	21 050	60 700

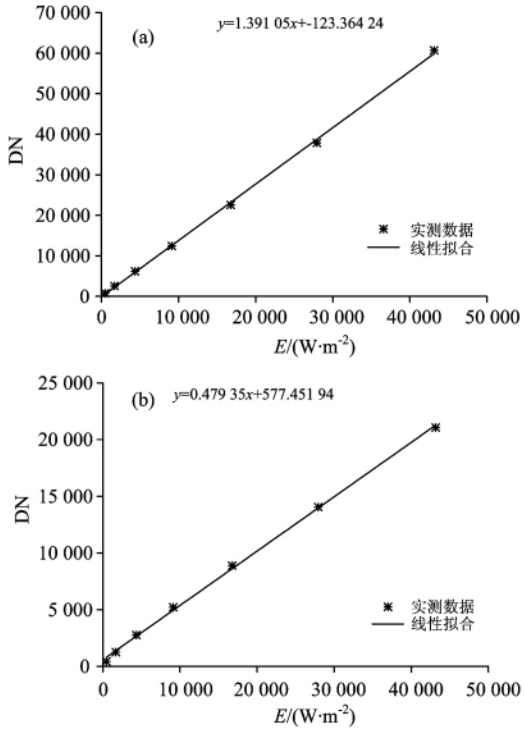

Fig. 6 Nonlinear response of infrared detector

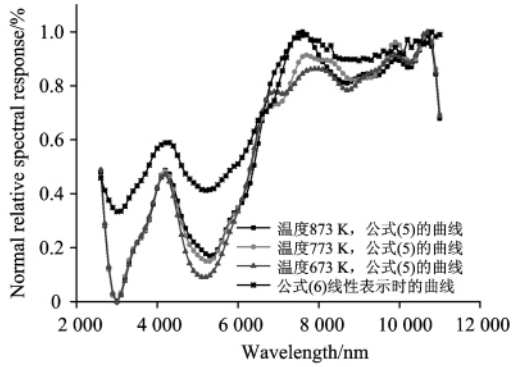

Fig. 7 Infrared detector relative spectral response

图 7 中，4～6 μm 处曲线下降的趋势，经分析原因如下：(1)大气的吸收作用；(2)单色仪充氮不完全，没有隔绝大气的影响；(3) 单色仪内部光学元件是镀铝件，有吸收作用。

式(6)的曲线比式(4)曲线整体偏高，尤其是在 3～5 μm 处，偏离大概 15%，而实验中使用的 HgCdTe 探测器光谱范

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

围 2～14 μm，在 3～5 μm 处相对光谱响应大概在 0.3～0.6 之间，与式(6)实测更为接近。通常使用的式(4)的测试方法其精确度还有待提高。

4.3 光谱定标

在实验室温度 27 ℃，相对湿度 46%环境下，按光谱定标实验要求设定温度从 100～600 ℃，11 个温度点依次间隔 50 ℃，使用 HgCdTe 探测器时调制频率 1 000 Hz，使用热释电探测器时调制频率 10 Hz。因为 3～5 μm 和 8～14 μm 为“大气窗口”，所以单色仪扫描范围定为 2～7 μm 和 7～11 μm，扫面间隔 0.1 μm。每个温度点重复测量三次，取三次测量的平均值。实验数据如图 7。

4.4 误差分析与光谱定标精度

红外辐射计光谱定标的误差来源[10]主要有：(1)腔型黑体辐射源的温度误差 $\Delta T=\pm 1$ ℃。在实际定标过程中发现，温度 $T=600$ ℃时，温度每变化 2 ℃，辐射输出变化为 3%；温度 $T=100$ ℃时，温度每变化 2 ℃，辐射输出变化为 1%以下。辐射源温度变化引入误差 3%。

(2)测量时间内腔型黑体辐射源的稳定性和单色仪的波长重复性引入误差为 0.15%。

(3)锁相放大器非线性，机械斩波器的稳定性，信号采集器的稳定性引入误差 1%。

(4)实验室内大气扰动，杂散光干扰，背景辐射等引入误差 1%。

(5)腔体热释电探测器光谱不均匀性，两种红外探测器的非线性引入误差为 0.11%。

$$\sigma=\sqrt{0.03^2+0.001\,5^2+0.01^2+0.01^2+0.001\,1^2}=3.4\%$$

因此红外辐射计光谱定标的精度可以保证在 3.4%以内。

5 结　论

通过上述实验和分析可以得出以下结论。

(1)实验中所使用的热释电探测器和 HgCdTe 探测器，在较低温度时响应有一定的非线性。光谱定标时应该避免在较低温度下进行，减小辐射信号弱来带的影响。

(2)文中提到的采用多个温度点，分别拟合曲线求相对光谱响应的方法。与在单一温度下测量直接用除法求相对光谱响应的方法相比，减小了探测器非线性和系统不稳定带来的影响，使测量结果更准确、更科学。

(3)实验发现，斩波器的平整度，稳定性，输出参考信号的波形，摆放位置等都会对实验结果产生很大的影响。如何制作精度更高，参考信号更准确的斩波器有待进一步研究。

(4)该红外辐射计实验室光谱定标的精度优于 4%。现已被用来在现场给大口径红外光电系统定标。整个光谱定标过程可以借鉴到红外探测器及其他相关系统的光谱定标过程中，具有广泛的实际应用价值，对定标研究具有重要意义。

References

[1] HU Xiu-qing, ZHANG Li-yang, ZHENG Zhao-jun, et al(胡秀清，张里阳，郑照军，等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(9): 1972.

[2] SUN Xue-jin, LIU Jian, MAO Jie-tai(孙学金，刘　剑，毛节泰). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2009, 28(1): 54.

[3] REN Jian-wei, WAN Zhi, LI Xian-sheng, et al(任建伟，万　志，李宪圣，等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2007, 15(8):1186.

[4] Theocharous E, Engtrakul C, Dillon A C, et al. Applied Optics, 2008, 47(22): 3999.

[5] James G A, Philip A, Gail B, et al. Transactions American Geophysical Union, 2007, 88(11): 136.

[6] ZHENG Yu-quan(郑玉权). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(11): 2347.

[7] Theocharous E. Metrologia, 2006, 43: 115.

[8] Theocharous E, Ishii J, Fox N P. Applied Optics, 2004, 43(21): 4182.

[9] Theocharous E, Ishii J, Fox N P. Infrared Physics And Technology, 2005, 46(4): 309.

[10] REN Jian-wei, LIU Ze-xun, WAN Zhi, et al(任建伟，刘则洵，万　志，等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(7): 1491.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Spectral Calibration for the Large Aperture Infrared Radiometer

YE Zhao[1,2], WAN Zhi[1], LI Xian-sheng[1], REN Jian-wei[1*], LIU Hong-xing[1,2]
1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The present paper introduced a spectral calibration method to calibrate a large aperture infrared radiation facility. We developed a radiometer which consisted of optical system, infrared detectors(cavity pyroelectric detector and HgCdTe detector 2 ~14 μm), fine mechanical modulator, lock in amplifier, signal processor, etc. At first, we analyzed the method on how to measure the spectral calibration of the large aperture infrared radiometer, and established the spectral calibration facility. Then, we tested the nonlinear response for the cavity pyroelectric detector and HgCdTe detector. Finally, we used the cavity pyroelectric detector to calibrate the relative spectral responsivity of HgCdTe detector at several wavelengths on the facility. Through the comparison of the two methods for measuring the relative spectral responsivity, the average of multiple measurements and comparative analysis of two methods were given. The uncertainty analysis of the whole system showed that the measurement uncertainty of the facility was better than 3.4%.

Keywords Large aperture; Infrared radiometer; Spectral calibration; Cavity pyroelectric detector; HgCdTe detector

(Received Oct. 3, 2011; accepted Mar. 20, 2012)

* Corresponding author

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net