

大口径红外光电系统辐射定标及误差分析

杨词银¹, 曹立华^{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. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 为了实现对大口径红外光电系统的辐射定标, 建立了基于大面源黑体的辐射定标系统以及基于红外单色照明光管的光谱定标系统。利用腔型黑体、连续可变滤光片 CVF 和平行光管组成红外单色照明光管, 对红外系统进行光谱定标, 确定系统归一化相对光谱响应函数。利用大面源黑体覆盖红外系统入瞳和视场, 对红外系统进行辐射定标, 确定系统绝对辐射亮度响应度 α 。对 α 的误差源进行了分析计算: α 的不确定度主要来自于红外系统输出数码值、大面源黑体辐射、光谱定标和背景辐射的不确定度, 经测量和计算分别为 0.4%、4.9%、2.5%、1.9%。计算结果表明, 响应度 α 的不确定度为 6.1%, 满足红外系统 10% 定标精度的要求。

关键词: 辐射测量; 辐射定标; 光谱定标; 不确定度

中图分类号: TP732.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)09-1624-05

Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared opto-electric system

Yang Ciyin¹, Cao Lihua^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: To perform radiation calibration on infrared opto-electric system with a large-aperture, a radiation calibration system based on extended area blackbody and a spectral calibration system based on infrared monochroic collimator were established. The infrared monochroic collimator was composed of a cavity blackbody, a circular variable filter (CVF) and a collimator. It was used to calibrate the infrared opto-electric system spectrally in order to determine its normalized relative spectral response function. A large extended area blackbody, which covered the input pupil and the view field of the infrared opto-electric system, was used to perform radiation calibration on the infrared system in order to determine its absolute radiance responsivity. Analysis on error sources of the radiance responsivity was performed, and the uncertainty of the responsivity came from uncertainties for the output value of the infrared opto-electric system, radiation emitting from the extended area blackbody, the spectral calibration and the background radiation, which were 0.4%、4.9%、2.5%、1.9% respectively after measuring and calculating. The calculation results show that the uncertainty of the radiance responsivity is 6.1% which is smaller than the uncertainty requirement of 10% for the infrared opto-electric system.

Key words: radiation measurement; radiation calibration; spectral calibration; uncertainty

收稿日期: 2011-01-17; 修订日期: 2011-02-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

作者简介: 杨词银(1975-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事红外辐射定标、辐射测量、红外仿真等方面的研究工作。Email: yangciyin@163.com

0 引言

近年来,空间目标探测已成为国内外的研究领域,尤其是采用红外手段对空间目标进行探测更受到各国的广泛关注。目标红外辐射测量是获取目标信息、对目标进行探测识别的基础技术之一。在导弹防御系统中,红外探测是导弹预警和识别的主要手段之一,同时,可为红外光电系统的波段优化设计和探测能力分析提供依据。各国对目标特性测量极为重视,先后建立了涵盖从紫外到长波红外波段的地基、空基和天基目标光学测量系统^[1-5]。

红外光电系统要完成对空间目标的探测与红外辐射特性测量,在研制过程中和外场使用前都必须对其进行精确的红外辐射定标。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^[6]。

面源黑体作为标准红外辐射源用于模拟不同温度的目标,是红外光电系统辐射定标的关键设备之一。文中采用大面源黑体源对研制的大口径红外光电系统进行辐射定标,并给出定标精度分析。

1 大口径红外光电系统的辐射定标方法

研制的大口径红外光电系统主要用于空间目标的探测和辐射测量,测量波段为8~9.2 μm。采用高精度大面源黑体对该红外系统进行辐射定标,原理如图1所示。将大面源黑体置于红外光电系统的入瞳前,且覆盖系统入瞳及视场,可保证对红外系统的全孔径、全视场高精度辐射定标。要求红外系统辐射定标精度优于10%。

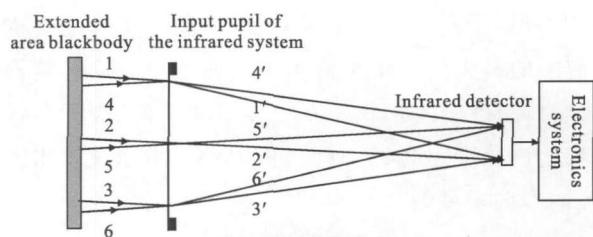


图1 用大面源黑体标定红外光电系统的原理图

Fig.1 Schematic diagram of radiation calibration for the infrared opto-electric system using an extended area blackbody

由于空间目标温度通常较低,因此,定标用面源黑体的温度范围需扩展到零下。面源黑体的主要技术指标为:口径为800 mm×800 mm,温度范围为-50~+300℃,发射率为0.95,温度分布均匀性为±0.5℃,温度精度为±0.5℃。

2 辐射定标原理

设面源黑体的工作温度为 T ,黑体表面的光谱辐射亮度为 $L_{\text{bb}}(T)$,红外光电系统的归一化相对光谱响应函数为 R_{λ} ,则在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内,红外光电系统探测器观测到的有效黑体辐射亮度为:

$$L_{\text{tb}}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\text{bb}}(T) R_{\lambda} d\lambda \quad (1)$$

其中, R_{λ} 可通过对红外系统进行光谱定标获得, $L_{\text{bb}}(T)$ 可利用普朗克公式计算得到:

$$L_{\text{bb}}(T) = \frac{\varepsilon_{\text{bb}}}{\pi} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (2)$$

式中: ε_{bb} 、 C_1 、 C_2 分别为黑体表面发射率、第一辐射常数和第二辐射常数,且 $C_1 = (3.741\,5 \pm 0.000\,3) \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$, $C_2 = (1.438\,79 \pm 0.000\,19) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

在红外系统线性响应范围内,系统输入辐射亮度和输出数码值之间的关系如下:

$$DN = \alpha L_{\text{bb}}(T) + DN_{\text{bg}} = \alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\text{bb}}(T) R_{\lambda} d\lambda + DN_{\text{bg}} \quad (3)$$

式中: DN 为系统输出数码值; α 为待标定的系统绝对辐射亮度响应度; DN_{bg} 为背景辐射(包括红外系统自身辐射和环境杂散辐射)和探测器暗电流等引起的输出值。

定标过程如下:设定不同的黑体工作温度 T_i ,红外系统对准黑体测量得到对应温度下的输出值 DN_i ,并利用公式(1)、(2)计算黑体有效辐射亮度 $L_{\text{bb}}(T_i)$ 。根据公式(3),对获得的多组 $(DN_i, L_{\text{bb}}(T_i))$ 进行最小二乘线性拟合,从而获得系统绝对辐射亮度响应度 α 。

3 光谱定标

光谱定标的目的是确定红外系统的归一化相对光谱响应函数 R_{λ} 。如图2所示,采用由腔型黑体、连续可变滤光片CVF和小口径平行光管组成的照明光管,对红外系统进行光谱定标。腔型黑体的主要技术

指标为:口径为 40 mm,发射率大于 0.99,温度范围为 50~600 ℃,温度精度为±0.3 ℃。平行光管的口径为 200 mm,焦距为 1 200 mm,输出非均匀性为 1%。

如图 2 所示,连续可变滤光片 CVF 位于黑体腔口前、且位于平行光管焦面,以实现准单色平行光输出。通过改变 CVF 的旋转角度来改变其通带(窄带),假定角度 θ_0 对应的通带中心波长为 λ_0 ,通带带宽为 $\Delta\lambda$ 。

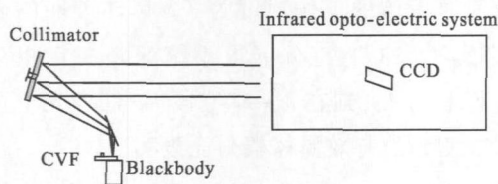


图 2 基于红外单色照明光管的光谱定标原理图

Fig.2 Schematic diagram of spectral calibration for the infrared opto-electric system using an infrared monochronic collimator

设定腔型黑体的工作温度为 T ,利用红外辐射计测量平行光管输出的窄带 $\Delta\lambda$ 内的辐射亮度 $L_{\Delta\lambda}(T)$,且红外系统对准平行光管测量得到输出值为 $DN_{\Delta\lambda}$,则红外系统输入辐射量与输出值之间的关系如下:

$$DN_{\Delta\lambda} = r_{\lambda_0} \cdot L_{\Delta\lambda}(T) + DN_{\Delta\lambda, bg} \quad (4)$$

式中: r_{λ_0} 为红外系统对波长为 λ_0 的准单色光的辐射亮度响应度; $DN_{\Delta\lambda, bg}$ 为背景辐射和探测器暗电流等引起的输出值。同样,在不同黑体温度下测量多组 $L_{\Delta\lambda}(T)$ 和 $DN_{\Delta\lambda}$ 值,根据公式(4)、利用最小二乘线性拟合法计算得到单色响应度 r_{λ_0} 。

由于照明光管口径小于红外系统,需要对单色辐射响应度 r_{λ_0} 进行如下修正:

$$r_{\lambda_0}' = r_{\lambda_0} \cdot \frac{A_0}{A_C} \quad (5)$$

式中: A_0 、 A_C 分别为红外系统有效入瞳面积和平行光管出瞳面积。

改变 CVF 通带,重复上述方法,可获得红外系统对不同波长单色辐射的响应度 r_{λ}' 。假定光谱响应度 r_{λ}' 的最大值为 $r'_{\lambda, max}$,则系统归一化相对光谱响应函数为:

$$R_{\lambda} = r_{\lambda}' / r'_{\lambda, max} \quad (6)$$

4 辐射定标误差分析

由公式(3)可知,红外系统辐射亮度响应度 α 的

不确定度来自于系统输出值 DN 、800 mm 口径黑体光谱辐射亮度 $L_{\lambda bb}$ 、系统相对光谱响应函数 R_{λ} 和背景辐射输出 DN_{bg} 的不确定度^[7]:

$$\left[\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right]^2 = \left[\frac{\Delta DN}{DN} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L_{\lambda bb}}{L_{\lambda bb}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_{\lambda}}{R_{\lambda}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta DN_{bg}}{DN_{bg}} \right]^2 \quad (7)$$

4.1 系统输出值的不确定度

系统输出值 DN 的不确定度主要来自系统红外探测器输出的稳定性。借助一个 100 mm×100 mm 小面源标准黑体和长波(8~9.2 μm)红外镜头进行探测器的稳定性测量实验。红外镜头用于和探测器构成红外成像组件,镜头焦距为 50 mm, F 数为 #2。使该面源黑体稳定工作在温度 T_{bb} 下,并使红外相机在 2 m 远处对准黑体进行测量。探测器输出位数为 14,积分时间 IT 设为 0.5 ms。表 1 给出了长波红外探测器中心像元的稳定性测量结果。

表 1 长波红外探测器中心像元输出的稳定性测量结果(积分时间 $IT=0.5$ ms)

Tab.1 Stability measurement result for the central pixel of the longwave infrared detector ($IT=0.5$ ms)

Measurement time	Output of the infrared detector		
	$T_{bb}=20$ ℃	$T_{bb}=60$ ℃	$T_{bb}=100$ ℃
12:00	2 872	5 437	9 653
12:10	2 883	5 458	9 689
12:20	2 891	5 469	9 672
12:30	2 878	5 463	9 705
12:40	2 869	5 474	9 683
12:50	2 885	5 462	9 662
13:00	2 877	5 346	9 675

定义 $(DN_{max} - \overline{DN})/\overline{DN}$ 和 $(\overline{DN} - DN_{min})/\overline{DN}$ 两者中的较大值为探测器输出稳定性测量结果, DN_{max} 、 DN_{min} 和 \overline{DN} 分别为同一温度下、不同时间的多个探测器输出值中的最大值、最小值和平均值。由表 1 计算得到,黑体温度 T_{bb} 为 20 ℃、60 ℃和 100 ℃时,探测器输出稳定性分别为 0.4%、0.4%和 0.3%。取系统输出值 DN 的不确定度为:

$$\Delta DN / DN = 0.4\% \quad (8)$$

4.2 800 mm 口径黑体光谱辐射亮度 $L_{\lambda bb}$ 的不确定度

800 mm 口径面源黑体辐射源的温度精度和温

度分布非均匀性都为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 将给辐射定标带来误差。在红外系统低温段定标过程中(面源黑体工作在零下温度时), 为防止黑体表面结霜结露, 需要向黑体表面吹干燥氮气, 这将进一步影响黑体表面温度精度和非均匀性。经测量, 当工作在 -40°C 时, 向 800 mm 口径黑体表面吹干燥氮气造成的黑体温度精度和非均匀性约为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

为计算黑体光谱辐射亮度不确定度, 将 8~9.2 μm 波段分成 6 个光谱带, 每个谱带带宽为 0.2 μm 。利用公式(2)在谱带内的积分来计算该黑体在 -40°C 及 $-40\pm 1^\circ\text{C}$ 工作温度下各谱带内的辐射亮度(黑体发射率 $\varepsilon_{\text{abb}}=0.95$)。表 2 给出了计算结果。

表 2 800 mm 面源口径黑体在不同温度下各光谱带内的辐射亮度

Tab.2 Radiance in each spectral band of the extended area blackbody of 800 mm at various temperature

$T/^\circ\text{C}$	Spectral band/ μm					
	8-8.2	8.2-8.4	8.4-8.6	8.6-8.8	8.8-9	9-9.2
-39	0.328	0.348	0.368	0.387	0.405	0.422
-40	0.317	0.337	0.357	0.375	0.393	0.410
-41	0.307	0.327	0.346	0.364	0.381	0.398

由表 2 计算可知, 当黑体温度偏差 $\pm 1^\circ\text{C}$ 时, 造成黑体在这 6 个谱带内的辐射亮度相对误差分别为 3.5%、3.3%、3.1%、3.2%、3.1%、2.9%。取最大值 3.5% 作为由黑体温度精度引起的光谱辐射亮度不确定度 σ_1 。

由黑体温度分布非均匀性引起的光谱辐射亮度不确定度 σ_2 和不确定度 σ_1 相同。因而, 总的黑体光谱辐射亮度不确定度为:

$$\Delta L_{\text{abb}}/L_{\text{abb}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{3.5^2 + 3.5^2}/100 = 4.9\% \quad (9)$$

4.3 背景辐射的不确定度

在红外系统的辐射定标过程中, 环境温度会产生变化, 将造成环境辐射的变化以及红外系统某些光机部件的温度和辐射的变化, 这些辐射都是背景辐射, 它们将以直射、反射或散射的方式照射到红外探测器, 从而造成探测器输出中背景辐射分量 DN_{bg} 的变化, 产生定标误差。

假定在 20°C 常温下对红外系统进行辐射定标, 通过空调等手段将定标实验室环境温度稳定在 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 。

经计算, 环境温度变化 $\pm 1^\circ\text{C}$ 造成的背景辐射不确定度为:

$$\Delta DN_{\text{bg}}/DN_{\text{bg}} = 1.9\% \quad (10)$$

4.4 相对光谱响应函数 R_λ 的不确定度

由公式(4)可知, 在红外系统的光谱定标中, 相对光谱响应函数 R_λ 的不确定度来自照明光管输出辐射亮度 $L_{\Delta\lambda}$ 、红外系统输出值 $DN_{\Delta\lambda}$ 和背景辐射输出 $DN_{\Delta\lambda, \text{bg}}$ 的不确定度:

$$\left[\frac{\Delta R_\lambda}{R_\lambda} \right]^2 = \left[\frac{\Delta L_{\Delta\lambda}}{L_{\Delta\lambda}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta DN_{\Delta\lambda}}{DN_{\Delta\lambda}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta DN_{\Delta\lambda, \text{bg}}}{DN_{\Delta\lambda, \text{bg}}} \right]^2 \quad (11)$$

(1) 平行光管输出辐射亮度 $L_{\Delta\lambda}$ 的不确定度

在光谱定标中, 利用红外辐射计来测量平行光管在各个谱带输出的辐射亮度 $L_{\Delta\lambda}$ 。其不确定度主要来自照明光管中腔型黑体辐射源的温度精度、红外辐射计的精度以及平行光管的输出非均匀性。

经计算, 该腔型黑体在 50°C 工作温度下由 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 的温度精度造成的黑体辐射不确定度为 0.5%。红外辐射计选用 D&P 公式的 IR-FT 102F 辐射计, 其测量精度为 2%。平行光管的输出非均匀性为 1%。因而, 平行光管输出辐射亮度 $L_{\Delta\lambda}$ 的不确定度为:

$$\Delta L_{\Delta\lambda}/L_{\Delta\lambda} = \sqrt{0.5^2 + 2^2 + 1^2}/100 = 2.3\% \quad (12)$$

(2) 系统输出值 $DN_{\Delta\lambda}$ 的不确定度

系统窄带输出值 $DN_{\Delta\lambda}$ 的不确定度取 8~9.2 μm 宽带情况下, 系统输出值 DN 的不确定度为:

$$\Delta DN_{\Delta\lambda}/DN_{\Delta\lambda} = \Delta DN/DN = 0.4\% \quad (13)$$

(3) 背景辐射 $DN_{\Delta\lambda, \text{bg}}$ 的稳定性

背景辐射输出 $DN_{\Delta\lambda, \text{bg}}$ 的不确定度取 8~9.2 μm 宽带情况下, 背景辐射输出 DN_{bg} 的不确定度为:

$$\Delta DN_{\Delta\lambda, \text{bg}}/DN_{\Delta\lambda, \text{bg}} = \Delta DN_{\text{bg}}/DN_{\text{bg}} = 1.9\% \quad (14)$$

因而, 相对光谱响应函数 R_λ 的不确定度为:

$$\Delta R_\lambda/R_\lambda = \sqrt{2.3^2 + 0.4^2 + 1.9^2}/100 = 3\% \quad (15)$$

4.5 系统辐射亮度响应度 α 的不确定度

综上所述, 红外系统辐射亮度响应度 α 的不确定度为:

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \sqrt{\left[\frac{\Delta DN}{DN} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L_{\text{abb}}}{L_{\text{abb}}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_\lambda}{R_\lambda} \right]^2 + \left[\frac{\Delta DN_{\text{bg}}}{DN_{\text{bg}}} \right]^2} = \sqrt{0.4^2 + 4.9^2 + 3^2 + 1.9^2}/100 = 6.1\% \quad (16)$$

5 结 论

利用腔型黑体、连续可变滤光片 CVF 和平行光管组成照明光管, 对大口径红外光电系统进行光谱定标, 并利用大口径面源黑体对该大口径红外系统进行辐射定标。对影响红外系统辐射亮度响应度 α 不确定度的因素进行了分析和计算: α 的不确定度主要来自于红外系统输出值、大口径面源黑体辐射、光谱定标和背景辐射的不确定度, 计算得到响应度 α 的不确定度为 6.1%, 满足红外系统 10% 定标精度的要求, 证明了该光谱定标和辐射定标方法应用于大口径红外光电系统的可行性。

在以上误差源中, 大口径面源黑体辐射不确定度对辐射定标不确定度的贡献最大。因此, 减小定标不确定度的有效措施之一就是提高大口径面源黑体的制造工艺水平和技术指标, 这也是今后的研究方向之一。另外, 需要严格控制定标环境, 使得环境对黑体辐射和红外系统自身辐射的影响降到最低。

参考文献:

- [1] Wu Xia, Zhou Yan, Cui Jian, et al. Analyses on infrared optoelectronics recognition technology in missile defense system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 759–766. (in Chinese)
吴瑕, 周焰, 崔建, 等. 导弹防御系统中红外光电识别技术分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 759–766.
- [2] Zhang Jun, Wang Yicheng, Lv Xiangyin, et al. Numerical analysis of infrared characteristics of exoatmospheric ballistic target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(10): 765–769. (in Chinese)
张骏, 王一程, 吕相银, 等. 大气层外弹道式目标红外特征的数值分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 765–769.
- [3] Xing Qianglin, Tan Qian, Tang Jia. Overview of optical signature measurement system of USA [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2007, 26(1): 7–12. (in Chinese)
邢强林, 谭谦, 唐嘉. 美国光学特性测量技术发展情况及特点[J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(1): 7–12.
- [4] Chen Du, Xu Xiufang, Liu Yinnian, et al. Research on technologies of radiation spectrum measurement of space object [J]. *Infrared*, 2005(7): 8–12. (in Chinese)
陈杜, 徐秀芳, 刘银年, 等. 空间目标红外辐射谱测量技术研究[J]. 红外, 2005(7): 8–12.
- [5] Liu Decheng, Zhang Guoying. Flight test measurement of infrared radiation characteristics of an airplane [J]. *Flight Test*, 2003, 19(2): 22–26. (in Chinese)
刘德成, 张国英. 飞机红外辐射特性飞行试验测量[J]. 飞行试验, 2003, 19(2): 22–26.
- [6] Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguang, et al. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electrics system on spot [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, 17(2): 175–178. (in Chinese)
李宪圣, 任建伟, 张立国, 等. 大口径红外光电系统现场辐射定标装置的研究[J]. 光电子·激光, 2006, 17(2): 175–178.
- [7] Engel M, Balfour L S. Quantative evaluation of errors in remote measurements using of thermal imager [C]//SPIE, 1990, 1442: 298–307.