

## 空间目标红外辐射测量系统标定技术

王建军, 黄 晨, 李舰艇

(北京跟踪与通信技术研究所 空间目标测量重点实验室, 北京 100094)

**摘 要:** 为实现对空间目标红外辐射进行定量测量, 需要解决红外辐射测量系统的标定问题。针对常规标定方法对大口径红外辐射测量系统标定存在的不足, 在对其测量原理分析的基础上, 提出了一种内置黑体标定与天文恒星标定相结合的新方法。采用内置黑体作为标准辐射源对匹配镜组和探测器进行标定, 采用恒星标准辐射源对大口径主光学系统透过率进行标定, 并推导出了红外辐射测量系统整体的响应关系。试验验证表明, 该方法与传统的全孔径标定方法相比, 曲线斜率误差在 4% 以内, 具有操作简单易行、标定系统的研制难度低、标定效率高等优点。

**关键词:** 标定; 天文标定; 空间目标; 红外辐射测量

中图分类号: TN21 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0404002

## Calibration technology of infrared radiation measurement for space object

Wang Jianjun, Huang Chen, Li Jianting

(Key Laboratory of Space Object Measurement, Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology,  
Beijing 100094, China)

**Abstract:** To realize the quantitative measurement of space target infrared radiation, infrared radiation measurement system must be calibrated in advance. Based on the deficiencies of conventional calibration method for large aperture infrared radiation measurement system, through analysis of calibration and measurement working principle of space object infrared radiation measurement system, a new calibration method was proposed which combined inner blackbody calibration and astronomical star calibration. Respond relation between matching mirror and detector was deduced when using inner blackbody as standard radiation source. Besides, calibration relation between infrared star radiation and transmittance of large-aperture primary mirror system was also deduced when using infrared star as standard radiation source. Then response relation of infrared measurement system was also advanced. The experiments show that the curve slope accuracy of new method is within 4% compared with traditional full-aperture blackbody calibration method. This new method reduces manufacture difficulty of calibration system, has advantages of easy operation, high efficiency of calibration etc.

**Key words:** calibration; astronomical calibration; space object; infrared radiation measurement

收稿日期: 2015-08-21; 修订日期: 2015-09-15

基金项目: 总部重点试验技术研究(2011SY5306002)

作者简介: 王建军(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事光学测量设备总体方面的研究。Email: 126wangjianjun@126.com

## 0 引言

近年来,空间目标的红外辐射特性测量越来越受到重视,应用也日益广泛<sup>[1-3]</sup>。空间目标距离远、温度低,要在地基上实现其红外辐射特性测量,需要采用大口径红外辐射测量系统。为确保辐射测量精度,需要利用标准辐射源对测量系统进行标定<sup>[4]</sup>。目前我国红外辐射测量系统主要采用外置式黑体标定方案,由于系统口径增大,要求黑体辐射源的口径也相应增大,造成标定系统成本高、研制难度大、标定效率低等问题<sup>[5]</sup>。文中针对在理论分析空间目标红外辐射测量的基础上,提出了一种基于内标定与天文标定相结合的大口径红外辐射测量系统标定新方法。

## 1 红外辐射测量系统标定及测量原理

红外辐射测量系统的标定是利用标准辐射源作为测量系统的输入量,获取的图像灰度等级作为系统的输出量,通过改变标准辐射源的辐亮度,从而得到系统在不同输入量时的输出图像灰度等级,建立起系统输出量(图像灰度等级  $DN$ )与输入量(标准辐射源的辐亮度)之间关系模型。当黑体为标准辐射源时,通过控制黑体的温度来改变黑体辐亮度,作为红外辐射测量系统输入量。

当红外辐射测量系统经过标定系统标定后,得到输出图像灰度  $DN$  与标准源辐射亮度  $P$  相对应的关系曲线。

$$DN = g \cdot P + b \quad (1)$$

式中: $g$ 、 $b$  为标定系数; $g$  为标定曲线斜率,单位  $1/(W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2})$ ;  $b$  为标定曲线的截距。不同光学系统、不同衰减片和器件不同积分时间条件下,标定系数不同。

当空间目标成像为面目标时,通过测得的目标处的图像灰度  $DN_m$  和背景处的图像灰度  $DN_b$ ,利用标定结果系数  $g$  和  $b$ ,即可得到目标的辐射亮度:

$$L_m = \frac{P_m - P_b}{\tau_a} = \frac{DN_m - DN_b}{g \cdot \tau_a} \quad (2)$$

式中: $P_m$  和  $P_b$  分别为目标和背景对应的辐亮度; $\tau_a$  为大气衰减系数。

当空间目标成像为点目标时,红外辐射测量系统测得的是目标在接收口径前的辐照度  $E_m$ ,实际计

算目标辐射特性时,首先根据提取的目标位置和大小,分别计算目标中每个像素点的视在辐射照度,并扣除背景的影响。目标辐射通量密度计算公式为:

$$E_m = \sum_{\Omega} E_{mi} - \sum_{\Omega} P_b = \sum_{\Omega} \frac{DN_{mi} - DN_b}{g} \quad (3)$$

式中: $E_{mi}$ 、 $DN_{mi}$  分别为组成目标的第  $i$  个像素的视在辐射通量密度和图像灰度值; $\sum_{\Omega}$  表示为目标在探测器上成像区域; $\sum_{\Omega} P_b$ 、 $\sum_{\Omega} DN_b$  分别为与目标区域相同大小内的背景通量密度和图像灰度值总和。

最后计算得到空间目标的真实辐射强度:

$$I = \frac{E_m \cdot \omega_0 \cdot R^2}{\tau_a} \quad (4)$$

式中: $\omega_0$  为探测器单元的立体视场角。

从上面可以看出,对于大气层外的空间目标,无论成像是面目标还是点目标,测量结果只与标定曲线的斜率  $g$  有关,与标定曲线的截距  $b$  无关。

## 2 红外辐射测量系统常用标定方法介绍

目前红外辐射特性测量标定方法有多种,可以简单划分为天文标定(或恒星标定)和黑体标定两类。

天文标定是指利用红外标准星库中大气层外恒星辐射照度数据,与测量数据进行对比计算,扣除大气透过率和天空背景影响,对红外辐射测量系统的现场标校。

黑体标定根据黑体辐射引入点不同可分为内置式黑体标定(内标定)和外置式黑体标定。内置式标定方案是将黑体辐射通过专门设计的光路直接引入探测器,只是对探测器与部分光学系统的响应曲线进行标定,其标定过程简单、方便,但是未考虑到整个光学系统的影响。外置式标定方案中黑体辐射由主光学系统入射,综合考虑了光学系统和探测器的影响。外置式标定可分为全孔径标定、部分孔径标定、小视场物象共轭标定三类<sup>[6-7]</sup>。全孔径标定是将辐射源放置于主光学系统入瞳处,辐射源面积大于光学系统入瞳面积并覆盖整个入瞳,以此进行标定。但对大口径测量系统,要求配置大口径面源黑体或大口径平行光管,研制难度大、成本较高,另外黑体升温稳定速度慢,标定时间长;部分孔径标定是将辐射源放置于主光学系统入瞳处,辐射源面积小入瞳面积、并只能覆盖部分入瞳,以此进行标定。由于辐

射源未覆盖部分无法阻挡环境辐射能量入射，且辐射光线仅穿过主光学系统部分孔径，使得该方法标定精度较低；小视场物象共轭标定是在测量系统主光学系统前较远距离处放置一黑体，使黑体辐射面在焦面上成像清晰，且成像尺寸大于  $5 \times 5$  单元，对此进行辐射标定。该方案设备简单、成本低，但是受环境影响大，精度较低，工作效率低。图 1 给出了红外辐射测量系统标定方法的分类。

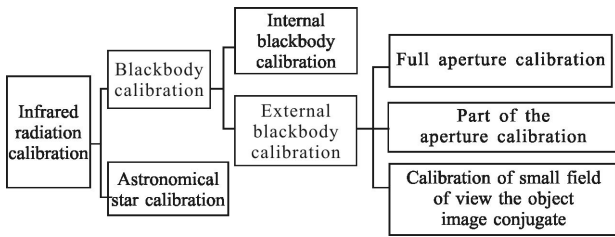


图 1 红外辐射系统标定分类  
Fig.1 Classification of infrared radiation calibration

### 3 空间目标红外辐射测量系统标定新方法

空间目标红外辐射测量系统主要由大口径主光学系统(主镜、次镜、第三反射镜)、切换镜、衰减片、匹配光学镜组、探测器，以及标定黑体等部分组成，如图 2 所示。若待测目标在系统入瞳处的辐亮度为

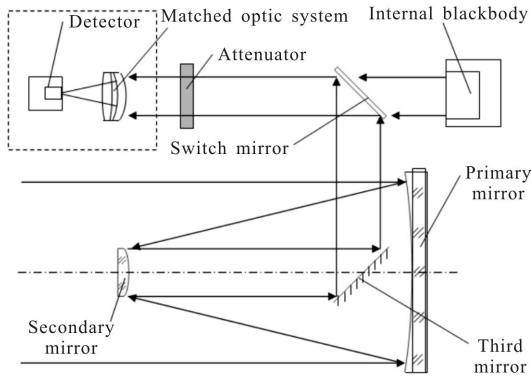


图 2 大口径光学系统及标定示意图  
Fig.2 Diagram of large aperture optical system and calibration

$P$ ，则在入射到单元探测器靶面的辐射通量为：

$$\Phi = \frac{\pi P A_d \tau_0}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 (1 - Q^2) \quad (5)$$

式中： $f$ 、 $D$ 、 $Q$ 、 $\tau_0$  分别为光学系统焦距、口径、遮拦比和透过率； $A_d$  为单元探测器有效光敏面面积。 $f$ 、 $D$ 、 $Q$ 、 $A_d$  为已知量，固定不变。 $\tau_0$  可以分为两部分：一是主光学系统透过率  $\tau_m$ ，主要包括主镜、次镜、第三反

射镜、切换棱镜；二是匹配光学镜组及衰减片的透过率，即  $\tau_0'$ 。

$$\tau_0 = \tau_m \tau_0' \quad (6)$$

我国以往的标定方法都是将红外辐射测量系统作为一个“黑匣子”，对整个系统的输入输出关系进行标定。文中对空间目标红外辐射测量系统进行了分解，采用分解方法对系统进行标定。首先采用内置黑体对红外探测器、衰减片、部分匹配光学系统进行标定。

黑体入射到探测器单元的辐射通量为：

$$\Phi = \frac{L_s \pi A_d \tau_0'}{4} \left( \frac{D'}{f'} \right)^2 \quad (7)$$

式中： $L_s$  为内置黑体辐射源辐亮度； $D'$ 、 $f'$ 、 $\tau_0'$  分别为匹配光学镜组的口径、焦距、透过率； $A_d$  为单元探测器有效光敏面面积。其中， $D'$ 、 $f'$ 、 $A_d$  是已知量，固定不变。

探测器输出图像的灰度值：

$$DN = F(\Phi, t) \quad (8)$$

式中： $t$  为探测器积分时间。图像灰度值与入射探测器单元的辐射通量、积分时间有关，在非饱和情况下，积分时间越长， $DN$  值越大；入射辐射通量越大， $DN$  值也越大。在某一积分时间情况下， $DN$  值是入射辐射通量  $\Phi$  单调上升函数。通过标定，建立  $DN$  与  $\Phi$  的关系。在测量情况下，探测器工作在线性响应区<sup>[8]</sup>，在某一积分时间下，即公式(8)可表述为：

$$DN = k\Phi + b \quad (9)$$

将公式(9)代入公式(7)，即可建立内置黑体辐射源辐亮度与探测器输出图像灰度值的对应关系。匹配光学系统及探测器的响应关系为：

$$DN = k \frac{\pi A_d \tau_0'}{4} \left( \frac{D'}{f'} \right)^2 L_s + b = g \cdot L_s + b \quad (10)$$

式中： $g = k \frac{\pi A_d \tau_0'}{4} \left( \frac{D'}{f'} \right)^2$ ，为匹配光学系统及探测器的响应曲线斜率。

如果不考虑主光学系统自身辐射，则联合公式(5)、(6)、(9)、(10)，有：

$$DN = \tau_m \left( \frac{Df'}{D'f} \right)^2 (1 - Q^2) g P + b = \eta \tau_m g P + b \quad (11)$$

式中： $\eta = (1 - Q^2) \left( \frac{Df'}{D'f} \right)^2$ ，只与主光学系统及匹配光学镜组口径、焦距、遮拦比有关，是一个常值。

如果考虑主光学系统的自身辐射，假设其自身辐射在探测器靶面上产生灰度值为  $DN_0$ ，则全系统

响应关系为:

$$DN=k \frac{\pi P A_d \tau_m \tau_o'}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 (1-Q^2)+b+DN_0 \quad (12)$$

根据全系统响应曲线斜率与内置黑体标定响应曲线斜率之间的比例关系,得到全系统响应关系为:

$$DN=\eta \tau_m g P+b+DN_0 \quad (13)$$

由此可见,如果知道主光学系统透过率  $\tau_m$ 、内置黑体的标定斜率  $g$  和主光学系统与匹配镜组的光学常值  $\eta$ ,即可得到系统的响应曲线斜率,由此可计算出目标的红外辐射量。

内置黑体的标定斜率  $g$  可通过内置黑体标定得到,主光学系统与匹配镜组的光学常值  $\eta$  为系统固有参数,在设备研制过程中已经确定,因此只需知道主光学系统的透过率。下面介绍主光学系统透过率的天文标定方法。

恒星的红外辐照度可视为不变,可作为标准的红外标定辐射源<sup>[9-10]</sup>。恒星通过光学系统入射到探测器的辐射通量由目标辐射和背景辐射两部分组成,即有:

$$\Phi=\Phi_m+\Phi_b \quad (14)$$

则在探测器上,目标区域的图像灰度为:

$$DN_i=k(\Phi_m+\Phi_b)+b \quad (15)$$

式中: $i$  表示目标区域中第  $i$  个探测器单元。背景区域的图像灰度为:

$$DN_b=k\Phi_b+b \quad (16)$$

目标在探测器靶面的辐射通量总和为:

$$\Phi_m=\sum_{i=1}^N \Phi_{mi} \quad (17)$$

式中: $N$  表示目标在探测器靶面所占像元数。目标辐射(扣除背景辐射)产生的图像灰度和为:

$$DN_m=\sum_{i=1}^N DN_i-N \cdot DN_b=k \sum_{i=1}^N \Phi_{mi}=k\Phi_m \quad (18)$$

如果已知某恒星在大气层外的辐照度为  $E_m$ ,则入射到探测器靶面的辐射通量总和为:

$$\Phi_m=E_m \cdot \tau_a \cdot \tau_o \cdot \frac{\pi D^2(1-Q^2)}{4} \quad (19)$$

式中: $\tau_a$  为大气透过率。 $\tau_a$  可利用大气水汽分析仪、地面气象参数实时测量系统、地面气溶胶粒子测量系统、微脉冲激光雷达(测量气溶胶消光)等大气参数测量设备和专用大气传输模型软件计算给出。

联合公式(18)、(19)以及  $g$ 、 $\eta$  的定义有:

$$DN_m=g \cdot \tau_a \cdot \tau_m \cdot (1-Q^2) \left(\frac{Df'}{D}\right)^2 E_m=\eta \frac{f^2}{A_d} g \tau_a \tau_m E_m \quad (20)$$

因此:

$$\tau_m=\frac{\omega_0^2 DN_m}{g \eta \tau_a E_m} \quad (21)$$

式中: $\omega_0^2=\frac{A_d}{f^2}$  为探测器单元所对应的立体张角。

### 4 试验及结果

为检验上述原理的正确性,采用某型号的地基红外辐射测量设备进行了标定试验。该设备口径为 400 mm,具有内置黑体标定手段。由于匹配光学系统和整个系统的光学系统  $F$  数为 2,即有  $f/D=f'/D'=2$ ,光学系统的遮拦比  $Q=1/3$ ,计算出  $\eta=8/9$ ;探测器单元尺寸 30  $\mu\text{m}$ ,光学系统焦距为 800 mm。利用短波红外辐射测量分系统进行原理验证试验,首先利用内置黑体获得匹配镜组及探测器的标定曲线,如图 3 所示。在外场利用短波红外对红外恒星进行测量,其结果如表 1 所示。

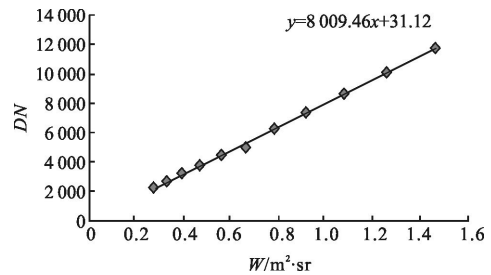


图 3 短波红外内标定结果

Fig.3 Internal calibration results of SW infrared

表 1 天文标定结果

Tab.1 Result of astronomical calibration

SN	Illumination standard	Elevation	Atmospheric transmittance	Sum of measurement gray	Main optical system transmittance
1	$6.14 \times 10^{-9}$	56.3	0.546	13 521	0.80
2	$4.17 \times 10^{-9}$	37.5	0.499	8 211	0.78
3	$2.00 \times 10^{-9}$	51.1	0.537	3 774	0.70
4	$1.97 \times 10^{-9}$	48.3	0.530	5 046	0.95
5	$3.50 \times 10^{-8}$	56.6	0.547	64 065	0.66
6	$3.90 \times 10^{-9}$	41.0	0.511	7 208	0.72
7	$2.43 \times 10^{-8}$	28.3	0.457	42 860	0.76
8	$5.83 \times 10^{-9}$	57.8	0.549	12 434	0.77
9	$3.59 \times 10^{-9}$	41.1	0.511	7 073	0.76
10	$4.51 \times 10^{-9}$	32.7	0.479	8 305	0.76
11	$1.28 \times 10^{-9}$	40.5	0.509	2 916	0.88

对上面十一颗红外恒星测量结果,取平均得到主光学系统透过率的测量值为 0.776,将其代入公式(13)即可得到系统的响应关系为:

$$DN=6\ 215.43P+DN_x \quad (22)$$

为验证上述结果的准确性,利用外置黑体对系统进行了标定,标定结果如图 4 所示。

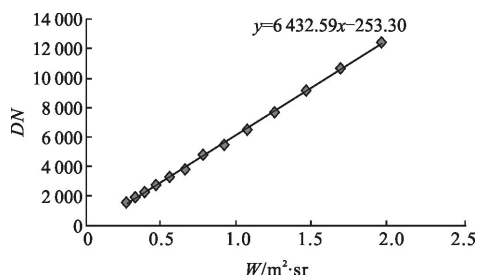


图 4 短波红外标定结果

Fig.4 Calibration results of SW infrared

从上面比较结果可以看出,采用文中提出的内标定与天文标定相结合的方法获取的标定曲线,与外置黑体标定曲线的斜率误差为 3.4%。

## 5 结论

为实现对空间目标红外辐射进行定量测量,首先需要对红外辐射测量系统进行标定。针对当前红外辐射测量系统标定部分存在的研制成本高、研制难度大、标定时间长等一系列问题,在对大口径红外辐射测量系统测量与标定原理的理论分析的基础上,提出一种基于内置式黑体标定与天文标定相结合的红外标定新方法。通过对某型号红外辐射测量设备进行标定试验验证,文中方法与常规的大型面源黑体标定方法的斜率误差在 4%以内。但文中的方法直接采用红外恒星作为标准辐射源,避免了大面源黑体的使用,降低了系统的研制难度,同时提高了标定效率,为空间目标红外辐射测量系统的标定提供了新的途径,在大口径红外辐射测量系统的标定

系统研制与辐射测量精度检验校准方面具有很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Shu Rui, Zhou Yanping, Tao Kunyu, et al. The study of infrared spectrum of space target [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 196-199. (in Chinese)
- [2] Wang Guoqiang, Wu Yuanhao. Ground-based measurement on the infrared characteristic of space object[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 16346-1639. (in Chinese)
- [3] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Ground-based spatial object infrared radiation feature measurement technique [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34 (2): 304-310. (in Chinese)
- [4] Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguo, 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)
- [5] Wang Jianjun, Huang Chen, Gao Xin, et al. Study on internal and external calibration technology of infrared radiation measurement [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2014, 43(6): 1767-1771. (in Chinese)
- [6] Tang Jia, Gao Xin. Calibration method for infrared radiation characteristics measuring system of test range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35: 266-271. (in Chinese)
- [7] Xing Qianglin. Calibration for FPA infrared radiation measuring system [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2007, 26(4): 68-71. (in Chinese)
- [8] Li Ning, Yang Ciyin, Cao Lihua, et al. Radiance calibration for 3-5 μm infrared focal plane array [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2319-2325. (in Chinese)
- [9] Huang Chen, Wang Jianjun, Gao Xin, et al. Application of infrared star catalog in ground-based infrared radiation measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2901-2905. (in Chinese)
- [10] Yin Limei, Liu Junchi, Wang Jianli, et al. Infrared Calibration based on infrared calibration stars [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(12): 1204004. (in Chinese)