

## 红外辐射测量系统内外标定技术

王建军, 黄 晨, 高 昕, 李舰艇

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 为确保辐射测量精度, 需要对红外辐射测量系统进行标定。在分析红外辐射测量系统工作原理的基础上, 提出了内、外标定相结合的标定方法, 区别于传统的标定方法, 不再把测量系统当作“黑盒子”, 而是对其内部分解进行分步标定, 通过理论推导给出了内外标定方法计算公式。实验验证表明, 该方法的标定精度与传统的全孔径黑体标定方法基本一致, 两者之间的相对误差在 1% 以内, 但该方法对外置大孔径面源黑体温度范围要求比较低, 降低了黑体的研制难度和成本。

**关键词:** 红外辐射测量系统; 标定; 黑体; 内标定; 外标定

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)06-1767-05

## Inner and outer calibration technology of infrared radiation measurement

Wang Jianjun, Huang Chen, Gao Xin, Li Jianting

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To ensure the accuracy of radiation measurement, it is necessary to calibrate the infrared radiation measurement system. Based on the analysis of working principle of infrared radiation measurement system, a calibration method combined internal and external calibration was proposed which was different from the traditional calibration method. It separated measurement system to calibration step-by-step, no longer as a whole "black box". Through theoretical derivation the internal and external calibration calculated formula was given. The experiments show that the calibration accuracy of the new method is accord with traditional full-aperture blackbody calibration method, within 1% relative error. This method reduces the requirements of temperature range of the external full-aperture blackbody, also reduces the development difficulty and cost of blackbody.

**Key words:** infrared radiation measurement system; calibration; blackbody; internal calibration; external calibration

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-09

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: wangjianjun@netease.com

## 0 引言

红外辐射特性测量越来越受到重视,尤其是对导弹目标与空间目标的探测识别、突防特性测量、以及目标特性测量的作用和地位越来越显著<sup>[1-2]</sup>。而辐射特性测量的关键是需要利用标准辐射源进行标定,通过标定建立红外辐射测量系统输出量与输入量之间的关系,在实际测量输出量后反演出系统的输入量,从而推算出目标的辐射亮度或强度<sup>[3]</sup>。目前,国内对红外辐射特性测量系统的标定大都是采用黑体标定技术,为保证标定精度,一般采用全孔径标定技术,但是要制造口径大、温度动态范围宽的黑体辐射源或大口径平行光管的难度大、成本高,且标定操作过程复杂,标定时间过长。国外对大口径红外辐射测量系统标定主要是采用内标定和天文标定相结合的方式,而我国天文标定技术正处于探索阶段。文中探讨性提出了一种基于黑体的内、外标定相结合的大口径红外辐射测量系统标定方法,旨在降低黑体研制难度并提高标定效率。

## 1 原有标定方法

红外辐射特性测量结果的准确与否,与系统各部分都密切相关。对于探测器,其响应曲线在不同环境温度、不同积分时间均不一样,随着时间的推移,器件也会逐步老化,其响应曲线也有所不同;对于光学系统,由于光学镜片污染、膜系老化等因素会导致光学透过率、反射率发生变化,从而影响整个系统的辐射测量精度。因此,为获得准确的测量结果,在测量前需要对整个辐射测量系统进行标定。标定方法有很多种,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,与地基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实时标定。黑体标定是将黑体辐射通过光学系统入射到探测器,对系统的响应曲线进行标定,其标定过程简单、方便,黑体标定根据黑体辐射的引入方式不同,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>[4-5]</sup>。有时考虑到大口径中高温面源黑体难以实现,对于中高温部分经常采用平行光管加中高温黑体作为标定的辐

射源,即将小口径中高温黑体放置在平行光管的焦平面。无论辐射源是直接采用黑体,还是采用平行光管加黑体的方案,其对整个系统标定结果基本是一致的,唯一的差别是:采用平行光管后需要考虑平行光管光学系统透过率的影响。

全孔径标定:将黑体辐射源放置在主光学系统入瞳处,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。不考虑光学系统的自身辐射,则入射到单元探测器的辐射通量为:

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

$$M_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (2)$$

式中: $M_t$ 为黑体辐射源辐射出射度; $f$ 、 $D$ 、 $Q$ 、 $\tau_0$ 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; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为探测波段; $T$ 为黑体温度, $K$ ;  $c_1$ 为第一辐射常数, $c_1 = 3.741832 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}^4$ ;  $c_2$ 为第二辐射常数, $c_2 = 1.438786 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。该方案可以有效消除环境的影响,标定精度高,可同时对所有像元进行标定,标定工作效率高。但对大口径测量系统,该方案要求配置温度动态范围大的大口径面源黑体或大口径平行光管,研制难度大、成本较高。

部分孔径标定:黑体辐射源放置在主光学系统入瞳处,辐射源面积小于入瞳面积,并只能覆盖部分入瞳,以此进行标定。不考虑光学系统的自身辐射,黑体入射到单像元的辐射功率为:

$$\Phi = \frac{M_t \tau_0}{\pi} \cdot \frac{A_d}{f^2} \cdot A_s = \frac{M_t A_d A_s \tau_0}{\pi f^2} \quad (3)$$

式中: $A_s$ 为黑体有效辐射面积。由于辐射源未覆盖部分无法阻挡环境辐射能量入射,因此,探测器接收到的辐射能量同时包含了辐射源的辐射能量和环境的辐射能量,此时以辐射源辐射能量作为基准势必会带来较大的误差。同时,辐射光线仅穿过主光学系统部分孔径,其标定结果仅为部分孔径标定结果,不能准确代替全孔径标定结果,使得该方法标定精度较低。

小视场物象共轭标定: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,为确保中间单元探测器与面源黑体对应面积元严格的物像及辐射量映射关系,一般要求黑体成像尺寸大于 $5 \times 5$ 单元探测器(具体由光学系统弥散大小和探测器单元尺寸决定)。据此可对该单元

探测器进行辐射标定。不考虑光学系统的自身辐射, 入射到单像元的黑体辐射功率为:

$$\Phi = \frac{M_t}{\pi} \cdot \frac{R^2 A_d}{f^2} \cdot \frac{\pi D^2 (1-Q)^2}{4R^2} \cdot \tau_0 \tau_a = \frac{M_t A_d \tau_0 \tau_a}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 (1-Q)^2 \quad (4)$$

式中:  $R$ 、 $\tau_a$  分别为黑体与主光学系统之间的距离和大气透过率。该方案受环境影响大, 从而导致精度较低, 同时, 对红外焦平面成像测量系统来说, 该方法一次只能对少量几个像元进行标定, 工作效率低, 但该方法设备简单、成本低。

内标定和天文标定相结合: 该标定方式目前主要是美国用于大口径光学测量设备, 如空军毛伊岛光学观测站的 3.6 m 望远镜 AEOS (Advanced Electro-optical System) 等。其关键点是: 首先采用内置红外辐射源对探测器进行标定, 其次利用恒星在大气层外的照度稳定不变对光学系统进行标定, 具体技术手段尚未详细报道。该方法要求系统具有足够探测灵敏度, 在红外波段能探测一定数量的恒星, 目前只适用于大口径红外辐射测量系统。同时该方法要求已知红外恒星准确照度或某红外波段的星等。

## 2 内外标定相结合方法

为提高标定效率, 降低标定系统的研制成本和难度, 文中提出基于黑体内、外标定相结合的方法。内标定主要对红外探测器、衰减片、部分匹配光学系统进行标定; 外标定对整个系统进行标定, 但主要是在内标定基础上获取主光学系统(主镜、次镜、第三反射镜、切换镜)相关参数。如图 1 所示, 当切换镜移走时, 探测器主要接收来自内置黑体的辐射, 此时处于内标定状态; 当切入切换镜时, 探测器主要接收来自外置黑体的辐射, 此时处于外标定状态。

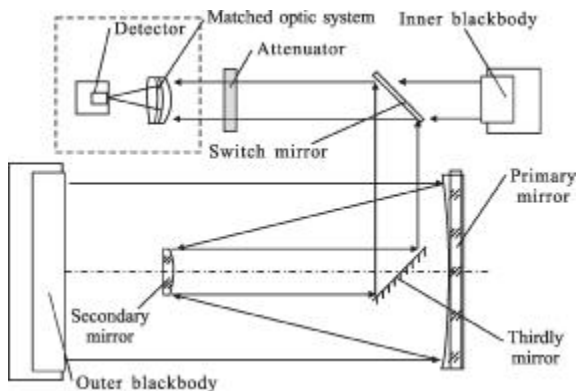


图 1 内外标定示意图

Fig.1 Sketch map of internal-external calibration

内标定时, 黑体入射到探测器单元的辐射通量为:

$$\Phi = \frac{M_t A_d \tau_0 \tau_a'}{4} \left(\frac{D'}{f'}\right)^2 \quad (5)$$

式中:  $M_t$  为内置黑体辐射源辐射出射度;  $D'$ 、 $f'$ 、 $\tau_a'$  分别为匹配光学镜组的口径、焦距、透过率;  $\tau_0$  为衰减片的透过率;  $A_d$  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为:

$$DN = F(\Phi, t) \quad (6)$$

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。在测量时, 知道测量值  $DN$ , 便可以通过标定, 建立  $DN$  与  $\Phi$  的关系式。

通过内标定, 不仅需要建立探测器图像灰度值与内置黑体辐射出射度的对应关系, 同时还需确定探测器的线性响应范围。

考虑到匹配光学系统的自身辐射, 内标定时入射到探测器单元的辐射通量为:

$$\Phi = \frac{(M_2 + L_2) \pi A_d \tau_0'}{4} \left(\frac{D'}{f'}\right)^2 \triangleq k_2 (M_2 + L_2) \quad (7)$$

式中:  $M_2$  为内置黑体辐射源辐射亮度;  $L_2$  为匹配光学镜组对应到镜组前的辐射亮度;  $D'$ 、 $f'$ 、 $\tau_0'$  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,  $D'$ 、 $f'$ 、 $A_d$  是固定不变。同样考虑光学系统辐射的影响, 外标定时入射到探测器单元的辐射通量为:

$$\Phi = \frac{(M_1 + L_1) \pi A_d \tau_0}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 (1-Q)^2 \triangleq k_1 (M_1 + L_1) \quad (8)$$

式中:  $M_1$  为外置黑体辐射源辐射亮度;  $L_1$  为系统光学镜组对应到入瞳前的辐射亮度;  $D$ 、 $f$ 、 $Q$ 、 $\tau_0$  分别为光学系统的口径、焦距、遮拦比、透过率。其中,  $D$ 、 $f$ 、 $A_d$  是固定不变。

红外辐射特性测量系统均工作在探测器的线性响应范围内, 假设其探测器在线性范围内的响应关系为:

$$DN = \alpha \Phi + DN_0 \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  为探测器响应曲线的斜率;  $DN_0$  为截距。

则内标定响应关系式为:

$$DN = \alpha k_2 (M_2 + L_2) + DN_0 \triangleq \beta_2 M_2 + DN_{02} \quad (10)$$

外标定响应关系式为:

$$DN = \alpha k_1(M_1 + L_1) + DN_0 \triangleq \beta_1 M_1 + DN_{01} \quad (11)$$

根据上面两式有：

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{\alpha k_1}{\alpha k_2} = \frac{k_1}{k_2} \cdot k$$

$$DN_{01} - DN_{02} = \alpha(k_1 L_1 - k_2 L_2) \cdot \alpha \delta$$

由此可见，内标定和外标定响应曲线斜率之比  $k$  只与光学系统有关，与器件积分时间无关。上式中  $\delta$  也只与光学系统有关，与探测器积分时间无关，在不同积分时间情况下，有：

$$\frac{DN_{01} - DN_{02}}{DN_{01}' - DN_{02}'} = \frac{\alpha}{\alpha'} \frac{\alpha k_2}{\alpha' k_2} = \frac{\beta_2}{\beta_2'} \quad (12)$$

考虑到大动态范围、大口径面源黑体研制比较困难，因此要求外标定大口径面源黑体温度范围变化不大，一般为常温至 100℃；内标定小口径黑体温度变化范围宽，一般要求为常温至 1100℃。

在标定时，首先选用积分时间较长的系统状态进行标定，确保外标定黑体温度为常温至 100℃变化范围内，探测器能部分或全部处于线性响应区。在该积分时间  $t'$  的系统状态下，通过内标定和外标定的线性响应关系式中的参数  $\beta_2'$ 、 $DN_{02}'$ 、 $\beta_1'$ 、 $DN_{01}'$ ，从而得到比例系数  $k$ 。

然后选用任务时系统状态下的积分时间，通过内标定获得在该积分时间  $t$  下的线性响应参数  $\beta_2$ 、 $DN_{02}$ ，则此时整个系统的线性响应参数  $k\beta_2$ 、 $DN_{02} + \frac{\beta_2}{\beta_2'}(DN_{01}' - DN_{02}')$ 。

### 3 实验验证

在某型号设备上开展了中波红外辐射测量的内外标定新方法实验验证工作。为达到验证目的，外置黑体的温度范围与内置黑体一样，均为常温至 1100℃。首先将积分时间设为 5 ms，通过内标定与外标定分别得到结果如图 2 所示。其响应关系式为：

$$DN_2' = 8333.1 \times M_2 + 3758.4 \quad (13)$$

$$DN_1' = 6825.4 \times M_1 + 3592.0 \quad (14)$$

此时内置黑体和外置黑体的温度范围均在常温至 50℃之间。由上面两式可知， $k=0.819$ ， $\beta_2'=8333.1$ ， $DN_{01}'=3592.0$ ， $DN_{02}'=3758.4$ 。

然后将积分时间设为 2.5 ms、0.6 ms、0.3 ms，分别进行内标定与外标定，结果如图 3~图 5 所示，响应关系式如表 1 第二、三行所示。此时，根据 5 ms 积分时间的内外标定结果和积分时间为 2.5 ms、0.6 ms、0.3 ms 的内标定结果，采用文中的内外标定方法分

别计算出系统的响应关系，将该计算结果与外标定结果进行比较，如图 6~图 8 所示。比较结果表明：在标定区间内，两种方法的标定误差值均小于 1%。

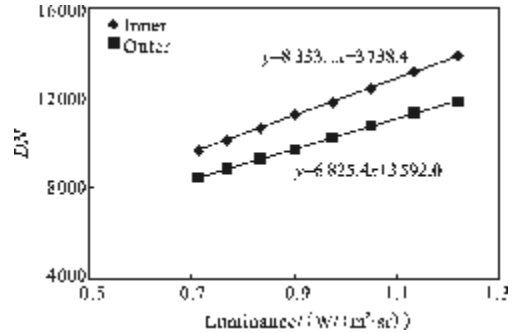


图 2 积分时间 5 ms, 内外标定结果

Fig.2 Result of calibration in 5 ms

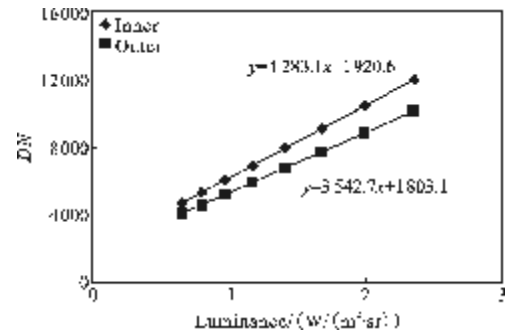


图 3 积分时间 2.5 ms, 内外标定结果

Fig.3 Result of calibration in 2.5 ms

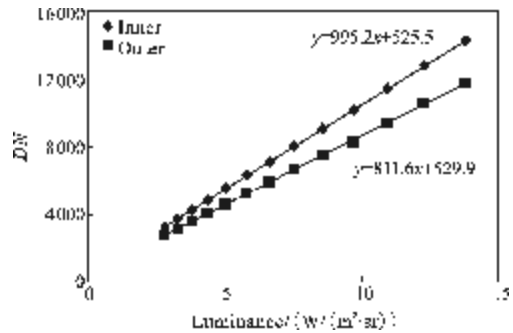


图 4 积分时间 0.6 ms, 内外标定结果

Fig.4 Result of calibration in 0.6 ms

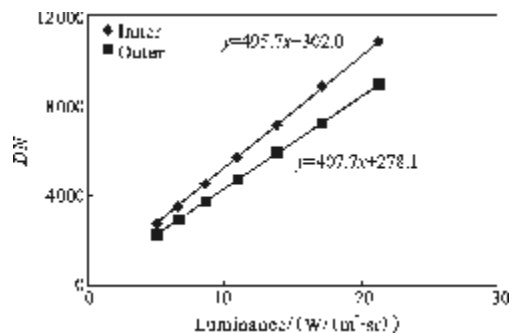


图 5 积分时间 0.3 ms, 内外标定结果

Fig.5 Result of calibration in 0.3 ms

表 1 实验验证结果

Tab.1 Experimental result

Integration time	2.5 ms	0.6 ms	0.3 ms
Internal calibration results	$DN=4\ 283.2 \times M_2 + 1920.5$	$DN=995.9 \times M_2 + 522.5$	$DN=495.1 \times M_2 + 305.6$
External calibration results	$DN=3\ 542.7 \times M_1 + 1803.1$	$DN=811.6 \times M_1 + 529.9$	$DN=407.7 \times M_1 + 278.1$
Results in this paper	$DN=3\ 507.9 \times M_1 + 1845.4$	$DN=815.1 \times M_1 + 508.0$	$DN=406.0 \times M_1 + 293.3$
Calibration interval / ( $W/(m^2 \cdot sr)$ )	$0.6 \leq M_1 \leq 3.0$	$2 \leq M_1 \leq 15$	$2.5 \leq M_1 \leq 21$
Calibrated error	0.54%	0.69%	0.84%
	Error curve is shown in Fig.6	Error curve is shown in Fig.7	Error curve is shown in Fig.8

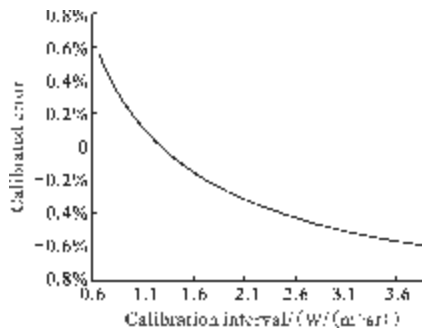


图 6 积分时间 2.5 ms 标定误差曲线  
Fig.6 Curve of calibration error in 2.5 ms

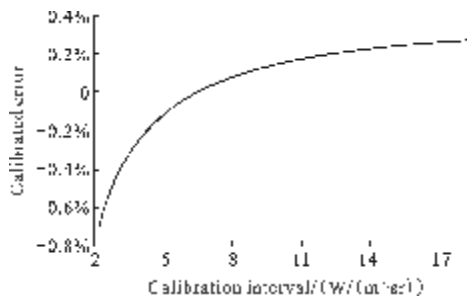


图 7 积分时间 0.6 ms 标定误差曲线  
Fig.7 Curve of calibration error in 0.6 ms

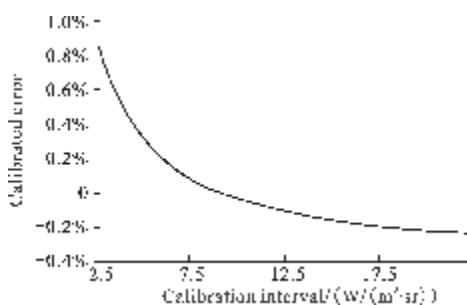


图 8 积分时间 0.3 ms 标定误差曲线  
Fig.8 Curve of calibration error in 0.3 ms

### 4 结 论

采用内外标定相结合的方法, 即内标定对红外辐射测量系统的探测器及匹配光学系统进行标定; 外标定通过对全系统进行标定, 主要是获得主光学系统对辐射测量的影响。通过实验证明, 内外标定相结合的方法与传统的外标定方法相比, 标定误差在 1% 以内。内外标定相结合的方法, 对大孔径面源黑体温度范围要求比较低, 大大降低了黑体的研制难度和成本, 同时可提高标定效率。

### 参考文献:

- [1] Li Ning, Yang Ciyin, Cao Lihua, et al. Radiance calibration for 3-5  $\mu\text{m}$  infrared focal plane array [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19 (10): 2319-2325. (in Chinese)  
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.
- [2] Yang Ciyin, Cao Lihua. Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared opto-electric system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (9): 1624-1628. (in Chinese)  
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 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.
- [4] 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)  
唐嘉, 高昕. 靶场红外辐射特性测量系统标定方法研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35: 266-271.
- [5] Xing Qianglin. Calibration for FPA infrared radiation measuring system [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2007, 26(4): 68-71. (in Chinese)  
邢强林. 红外焦平面成像探测辐射特性测量标定方法研究 [J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(4): 68-71.