

## 考虑积分时间变量的红外系统辐射响应定标

罗茂捷<sup>1,2</sup>, 周金梅<sup>1</sup>, 傅景能<sup>1,2</sup>, 廖胜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 辐射定标是红外系统辐射特性测量的基础。文中采用间接扩展源法对红外系统进行定标, 分析了红外焦平面阵列探测元的响应模型以及响应特性与目标黑体辐射、积分时间的关系。提出了采用最小二乘法拟合得到红外焦平面像元响应灰度值对辐射量和积分时间的响应函数的定标算法。通过分析不同环境温度下的响应函数, 进一步验证了其有效性。该方法可简化定标过程, 节省定标时间。定标方程不仅可用于定量分析辐射定标的影响因素, 而且有利于动态范围较大时的辐射测量。

**关键词:** 辐射定标; 积分时间; 响应模型; 红外辐射

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)01-0036-05

## Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system

Luo Maojie<sup>1,2</sup>, Zhou Jinmei<sup>1</sup>, Fu Jingneng<sup>1,2</sup>, Liao Sheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Radiometric calibration is very important for radiation characteristic measurement of the infrared system. The indirect calibration system was adopted, which was equipped with the collimator collected with the area blackbody as the extended radiant source. Firstly response model of the infrared focal plane arrays and the response characteristics related with the blackbody radiation and integration time were analyzed. Then through the least square fit method, response function of pixel respon gray value versus target radiation and integration time was demonstrated. Finally, the response function at different ambient temperature was compared with the former function, which further verified the effectiveness of the equation. This method can simplify the calibration process and save time. Besides, the calibration equation can be used to conduct quantitative analysis on impact factors of the calibration, and measure radiance in a wide dynamic range.

**Key words:** radiometric calibration; integration time; response model; infrared radiation

收稿日期: 2012-05-05; 修订日期: 2012-06-03

基金项目: 国防预研项目

作者简介: 罗茂捷(1986-), 女, 硕士生, 主要从事 IRFPA 的辐射响应特性方面的研究。Email: jielmj@163.com

导师简介: 周金梅(1977-), 女, 副研究员, 硕士, 主要从事红外测量与红外系统定标方面的研究。Email: Zhoujm@ioe.ac.cn

## 0 引言

辐射定标即采用已知的红外辐射源照射被定标的红外系统,建立系统输出信号与辐射量的响应关系的过程。由于暗电流、光谱响应、量子效率及 A/D 转换器动态范围的限制等因素的影响<sup>[1]</sup>,在辐射量变化很大时,系统输出随辐射量近似呈“S”型曲线变化<sup>[2]</sup>。但根据红外系统工作环境和探测目标的不同,在一定的标定区间内,系统输出一般随辐射量呈线性或二次曲线规律变化。采用线性方程对红外焦平面定标,方法简单、快速。但在动态范围较大时,会产生较大的误差,且积分时间改变时需要重新定标。

在一定的动态范围内,响应对辐射量的二次拟合已能达到较高的拟合度,减小测量误差。积分时间对响应灰度的影响,受帧频、读出时间、动态范围以及积分噪声的限制。当积分时间不显著长时,辐射响应随积分时间呈正比例变化。采用二次拟合能较好地反映其变化的非线性。

结合积分时间对辐射响应进行多项式拟合,可充分利用所有有效测量数据,实现不同积分时间下的快速定标。响应方程的建立有利于实时测量时积分时间的扩展和调整,使响应灰度值始终落在适宜的灰度区间。对于辐射剧烈变化的目标以及大动态范围下辐射量的测量具有一定的优越性。并且为定量分析红外焦平面阵列(IRFPA)上各辐射因素的影响以及环境对响应特性的影响提供了参考。

## 1 红外焦平面阵列的响应特性

### 1.1 IRFPA 探测元的响应模型

采用间接扩展源法<sup>[3]</sup>对红外系统进行定标,装置如图 1 所示。目标黑体辐射照射在靶标上,经靶标图

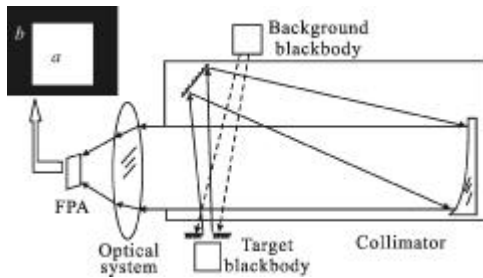


图 1 间接扩展源定标系统

Fig.1 Calibration system with indirect extension

案出射,并通过平行光管进入光学系统,最终在红外焦平面阵列上成像。背景黑体直接照射在靶标背面,经背面反射后,通过平行光管进入光学系统在焦平面阵列上表现为背景辐照。图 1 左上角为积分时间 1.5 ms 下,120 °C 的黑体通过方孔靶在 FPA 上所成的像。其中 a 部分为目标黑体辐照,b 部分为背景黑体辐照。

由于黑体非理想黑体,考虑表面发射率的影响,红外焦平面阵列上中心区域像元单位波长的辐照度<sup>[4]</sup>可表示为:

$$E_{FPA}(\lambda) = \Delta E_{uf} + \frac{D^2}{4f^2} \tau [\varepsilon_1 M_e(\lambda, T_t) + (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 M_e(\lambda, T_b) + \frac{1 - \tau_a(\lambda)}{\tau_a(\lambda)} M_a(\lambda, T_a)] \quad (1)$$

式中:  $\tau = \tau_{sys}(\lambda) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda)$ ,  $\tau_{sys}(\lambda)$ 、 $\tau_0(\lambda)$ 、 $\tau_a(\lambda)$  分别为光学系统、平行光管和大气的光谱透射率;  $f$  与  $D$  为光学系统的焦距与口径;  $M_a(\lambda, T_a)$  为环境干扰辐射,如散射到入瞳上的外界环境辐射,插入大气的热辐射;  $T_a$  为环境温度;  $\Delta E_{uf}$  为相机和光学系统内部的非聚焦能<sup>[5]</sup>;  $\varepsilon_1 M_e(\lambda, T_t)$  为目标黑体辐射,  $T_t$  为目标黑体的温度,  $\varepsilon_1$  为目标黑体的发射率;  $(1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 M_e(\lambda, T_b)$  为背景黑体辐射通过目标黑体表面反射的辐射度,  $T_b$  为背景黑体温度,  $\varepsilon_2$  为背景黑体的发射率。外场测量时该部分对应于周围环境的辐射通过目标的反射辐射。

波段  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  间的像元响应灰度值  $GV$  表示为:

$$GV = G * t_{int} * \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) * E_{FPA}(\lambda) d\lambda + h_0 \quad (2)$$

式中:  $G$  为响应系数;  $R(\lambda)$  为 FPA 的相对光谱响应<sup>[6]</sup>;  $t_{int}$  为积分时间;  $h_0$  为设备内部电路噪声引起的灰度偏移。

令光学系统、平行光管和大气的光谱透射率为常数。将公式(1)代入公式(2),整理可得简化的响应灰度值方程<sup>[7]</sup>:

$$GV = c_1 * t_{int} * M + c_2 * t_{int} + c_3 \quad (3)$$

式中:  $M$  表示已加权光谱响应和黑体发射率影响的目标黑体的辐射出射度。按 Plank 定律计算  $M_e(\lambda, T_t)$ , 辐射度  $M$  采用梯形积分计算。

$$M = \varepsilon_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) M_e(\lambda, T_t) d\lambda \quad (4)$$

$$M_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) [(1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 M_e(\lambda, T_b) + \frac{1 - \tau_a}{\tau_a} M_a(\lambda, T_a) + \frac{4f^2}{TD^2} \Delta E_{uf}] d\lambda \quad (5)$$

式中:  $c_1 = \frac{D^2}{4f^2} \cdot \tau^* G$ ,  $c_2 = c_1 \cdot M_0$ ,  $c_3 = h_0$

### 1.2 探测元响应与目标黑体辐射的关系

分别固定积分时间与背景黑体温度。令背景黑体温度接近环境温度(291.3 K), 仅改变目标黑体温度(辐射度为 1.35~332 W/m<sup>2</sup>)。图 2 为像元灰度响应平均值在 4 个固定积分时间下的变化曲线(去除饱和和温度点测量值)。

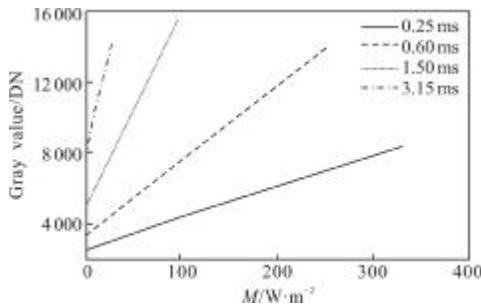


图 2 目标辐射的响应曲线

Fig.2 Response curves of target radiance

### 1.3 探测元响应与积分时间的关系

固定黑体入射辐射与环境温度(291.3K), 仅改变积分时间(0.25 ms/0.6 ms/1.5 ms/3.15 ms)。图 3 显示了 IRFPA 中心像元灰度响应平均值在 4 个固定目标黑体辐射下随积分时间的变化曲线。

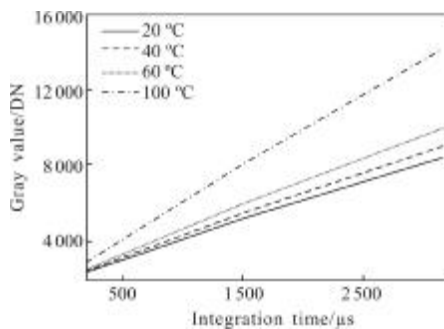


图 3 平均灰度值随积分时间的变化曲线

Fig.3 Mean gray value versus integration time

可以看出焦平面各像元平均输出值与积分时间近似呈线性关系。焦平面正常工作时存在一个合适的积分时间区域, 在该区域中, 随着积分时间的增加各像元输出的响应值也逐渐增加。实际红外系统若读出时间较长, 那么在一定的帧频下, 积分时间较大处的响应可能有变缓的趋势。

综上所述, 若采用辐射度和响应时间的二次函数理论上可较好地描述像元的响应特性。

## 2 实验采集数据的计算拟合

实验焦平面阵列为 256×320, 选取中心 25×25 范围内的像元进行响应度分析, 背景黑体温度为 291 K, 环境温度为 291.3 K; 采集的数据如表 1 所示。拟合数据恰为饱和或反之前的一个测试温度点(辐射度)的响应值, 共 52 组数据。

表 1 数据范围

Tab.1 Database

Integration time/ $\mu$ s	Target blackbody temperature range/ $^{\circ}$ C	Radiance/ $W \cdot m^{-2}$	Data number
250	5-240	1.35-332	16
600	5-220	1.35-253	10
1 500	5-160	1.35-97.6	12
3 150	5-100	1.35-28.5	9

### 2.1 数据拟合

令响应拟合方程为:

$$F(M, t_{int}) = a_6 \times M^2 t_{int}^2 + a_7 \times M t_{int}^2 + a_8 \times t_{int}^2 + a_5 \times M^2 t_{int} + a_4 \times M t_{int} + a_3 \times t_{int} + a_2 \times M^2 + a_1 \times M + a_0 \quad (6)$$

另外, 由图 2 可知, 积分时间越大, 响应率越大。相同的拟合残差值, 在积分时间较小处代表的辐射度差比积分时间较大处代表的辐射度差要大。为了产生较一致的拟合效果, 对最小二乘法中的误差平方和加权。

误差平方和表示为:

$$S = \sum_{i=1}^N w_j \cdot (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

式中:  $y_i$  为测量值;  $\hat{y}_i$  为拟合值;  $i$  表示进行拟合数据个数;  $w_j$  表示第  $j$  个积分时间处拟合的误差平方和权值,  $w_j = k_{max}/k_j$ ,  $j$  代表积分时间数,  $k_j$  为第  $j$  个积分时间值,  $k_{max}$  为最大积分时间值。

计算得到加权前和加权后各积分时间处的响应误差平方和值如表 2 所示。从表中可以看出加权后较低积分时间处的误差平方和显著减小, 而较高积分时间处的误差平方和有所增加。

采用拟合度来评价线性函数的拟合效果:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中:  $\bar{y}$  为测量值的均值; 其中  $1 > R^2 > 0$ , 且  $R^2$  越接近于 1, 拟合效果越好。

表 2 误差平方和比较

Tab.2 Comparison of errors' square sum(ESS)

Integration time/ $\mu\text{s}$	Weighted value	ESS before weighted value added/DN	ESS after weighted value added/DN
250	12.6	2 462	398
600	5.25	8 954	5 653
1 500	2.1	5 535	12 228
3 150	1	4 424	8 727
Sum/DN		21 376	27 006

2.2 数据点的取舍

采集的数据由于实验条件和环境的不稳定,会有部分数据点偏离响应曲线。去除加权误差平方和最大的数据点,再进行拟合;若去除后的拟合误差平方和小于原拟合数据(不加去除点)的误差平方和,则去除该点。去除 5 个点后,已能得到较好的拟合效果。误差平方和为 9 526.6;625 个像元的拟合度平均值为 1,拟合度偏差小于  $10e^{-5}$ 。

2.3 拟合结果的分析

分别计算各像元响应拟合方程中每一项在不同温度点和积分时间处的值。表 3 显示了 0.25 ms 和 1.5 ms 积分时间处在低高温目标辐射下响应方程的每一项计算所得的灰度均值占总灰度均响应 S 的比例(小于 0.01%的值为 0)。

表 3 各拟合项的灰度值比值

Tab.3 Ratio of gray value of fitting terms (S)

Time/ms	0.25	0.25	1.5	1.5
$T_i/^\circ\text{C}$	5	240	5	160
S/DN	2 504	8 398	5 082	15 657
$a_8 \times M^2 \times t_{int}^2 / S\%$	0	0.08	0	0.13
$a_7 \times M \times t_{int}^2 / S\%$	0	-0.56	-0.14	-3.2
$a_6 \times t_{int}^2 / S\%$	-0.13	-0.04	-2.37	-0.77
$a_5 \times M^2 \times t_{int} / S\%$	0	-7.82	0	-2.18
$a_4 \times M t_{int} / S\%$	1.07	78.57	3.17	74.31
$a_3 \times t_{int} / S\%$	20.32	6.08	60.30	19.52
$a_2 \times M^2 / S\%$	0	4.83	0	0.22
$a_1 \times M / S\%$	-0.06	-4.71	-0.03	-0.74
$a_0 / S\%$	78.78	23.55	38.96	12.62

$a_4$ 、 $a_3$  以及  $a_0$  分别与公式(3)中的  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  相对应,也占据了大部分的响应灰度值。从公式(3)可看出  $a_4$  为与灵敏度有关的系数, $a_4$  的分布体现了响应非均匀性。 $a_3$  反映了背景的反射辐射和环境或大气的干扰辐射、相机内部的非聚焦能量、热噪声(与环

境温度相关)随积分时间的变化情况。 $a_0$  为探测器响应的偏置系数, $a_0$  的分布也体现了偏置非均匀性,受暗电流、低频噪声、 $1/f$  噪声及非聚焦能量使灰度值随时间的漂移量的影响。图 4 为各像元响应系数  $a_4$ 、 $a_0$  在  $25 \times 25$  区域的分布情况:近似高斯分布反映了随机误差是影响响应非均匀性的重要因素。其他项为辐射响应和积分时间变化非线性引起的偏差,该偏差随着积分时间或目标辐射度的增加而增加。由表 3 可见在各个积分时间处,其中  $a_8 \times M^2 \times t_{int}^2$ 、 $a_7 \times M \times t_{int}^2$ 、 $a_2 \times M^2$  和  $a_1 \times M$  项的值较小,为了使响应方程更简洁,考虑去除该 4 项重新拟合得简化模型。图 5 显示了各积分时间处简化模型加权拟合并剔除粗大误差点后的相对拟合残差。可以看出简化模型下的相对拟合误差可以控制在 0.6%以内,计算得到拟合度平均值为 1,具有较好的拟合效果。

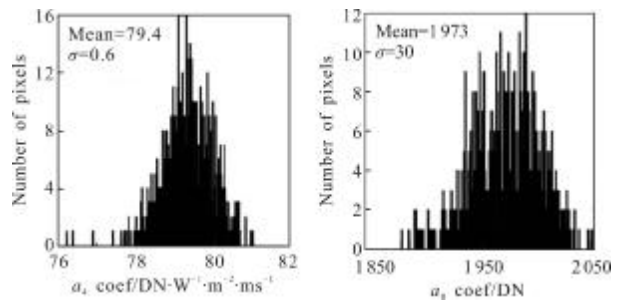


图 4 各像元  $a_4$ 、 $a_0$  值的概率分布

Fig.4 Probability distribution of  $a_4$  and  $a_0$

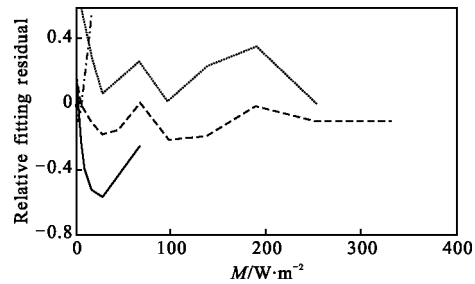


图 5 不同积分时间处随辐射度变化的相对拟合残差  
Fig.5 Relative fitting residual versus radiance in different integration times

最后的拟合方程可表示为:

$$F(M, t_{int}) = a_5 \times t_{int} M^2 + a_4 \times t_{int} M + a_6 \times t_{int}^2 + a_3 \times t_{int} + a_0 \quad (9)$$

式中: $a_5 \times M^2 \times t_{int} + a_4 \times M t_{int}$  表征了与目标辐射响应的灰度总和(目标辐射响应); $a_6 \times t_{int}^2 + a_3 \times t_{int}$  表征了背景的背景的反射辐射和环境或大气的干扰辐射等的响应灰度总和(附加辐射响应)。

响应度随目标辐射的变化率 RRate 可表示为:

$$\text{RRate}(M, t_{\text{int}}) = 2 \times a_5 \times t_{\text{int}} M + a_4 \times M \quad (10)$$

### 3 不同环境温度下的响应拟合结果比较

表 4 为两个环境温度下所得的简化模型的定标系数值。环境 1 下数据采集的目标温度范围及数据数如表 1 所示。环境 2 的背景黑体温度为 25 °C, 环境温度为 24.45 °C; 使用相同的目标黑体和定标装置, 对相同区域的像元进行响应拟合定标; 定标最低温度由 5 °C 改为 20 °C, 其余数据点相同, 共 35 组数据。最终得拟合误差小于 1%, 平均拟合度为 0.9999。

表 4 不同环境温度下的定标系数

Tab.4 Calibration coefficients for different ambient temperatures

Coefficient	1	2
$a_6$	-72.48	-88.31
$a_5$	-0.007 7	-0.009 1
$a_4$	73.51	71.60
$a_3$	2 088	2 497
$a_0$	1 966	1 954

由表 4 可以看出, 当环境和背景黑体温度升高时, 偏置系数  $a_0$  基本没有变化; 但背景的反射辐射和环境或大气的干扰辐射、热噪声增加, 从而代表该部分值的  $a_3$  值有显著增加。 $a_5$ 、 $a_4$  值减小, 表明了目标辐射响应随着环境温度和背景黑体温度的升高而减小, 目标辐射响应比例也减小。将  $a_5$ 、 $a_4$  带入公式(8)得环境 2 下的响应度变化率减小, 即响应上升趋势变缓。结合响应灰度值的整体提升, 可推知背景黑体和环境温度的升高会使得响应曲线向饱和端移动。以上结果表明了在低温环境和低辐射背景条件下, FPA 系统具有更好的辐射响应线性度和灵敏度。不同环境下的拟合结果也从另一方面证明了拟合方法的有效性。

### 4 结论

文中分析了采用间接扩展源法对 IRFPA 系统定标的响应模型, 在此模型上发展并采用最小二乘法得到像元响应灰度对辐射量和积分时间的二元函数方程, 并分析各多项式的影响得到简化模型方程。各定标点的相对残差小于 1%, 拟合度大于 0.999。方程中辐射量和积分时间的一次项灰度值占很大的比例, 二次项进一步修正了拟合值。对比不同环境温度

下的响应系数, 环境温度接近 5 °C 的升高增加了环境干扰辐射及部分噪声量, 提高了灰度值, 一定程度上减小了响应率。另外, 由于实验条件的限制, 积分时间点较少。如果有更完整的数据, 可以将多项式拟合定标结果应用到更多的积分时间处辐射度的测量。

### 参考文献:

- [1] Liu Huitong, Wang Qi, Zheng Zhiwei, et al. Analysis and calculation of the nonlinear response in infrared focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 20(8): 253-258. (in Chinese)  
刘会通, 王骥, 郑志伟, 等. 红外焦平面阵列非线性响应的分析和计算[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, 20(8): 253-258.
- [2] Yin Shimin, Xiangli Bin, Zhou Jinsong, et al. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on radiation source scaling [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37 (5): 992-995. (in Chinese)  
殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 辐射源定标红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(5): 992-995.
- [3] Tang Jia, Gao Xin. Calibration method for radiation characteristics measuring system of test range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(10): 266-270. (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(10): 266-270.
- [4] Gerald C Holst. Testing and evaluation of infrared image systems [M]. JCD Publishing Winter Park: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [5] Sun Zhiyuan, Zhu Wei, Qiao Yanfeng, et al. Atmosphere amending research in infrared radiation characteristic measurement [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(2): 162-165. (in Chinese)  
孙志远, 朱玮, 乔彦峰, 等. 红外辐射特性测量中环境影响的修正研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(2): 162-165.
- [6] Yang Ciyin, Cao Lihua. Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared optoelectric 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.
- [7] Park Hye-Sook, Dobie D W, Ferretta T E, et al. Radiometric calibration system for IR cameras[C]//SPIE, 1992, 1686: 35-41.
- [8] Cao Lihua, Li Ning, Yang Ciyin, et al. Radiance calibration for 3-5  $\mu\text{m}$  infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 858-864. (in Chinese)  
曹立华, 李宁, 杨词银, 等. 3-5  $\mu\text{m}$  红外探测器的辐射定标[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 858-864.