

文章编号: 1007-2780(2012)06-0832-05

基于加权最小二乘法的红外辐射定标

张云峰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: zyfcjomp@126.com)

摘 要: 随着红外物理与红外技术的深入发展, 目标的辐射特性测量受到了广泛的重视, 红外探测器的辐射定标直接决定了辐射特性测量精度, 为此文中建立了辐射定标系统, 对 3~5 μm 的红外焦平面阵列相机进行了绝对辐射定标实验。文中给出了辐射定标的数学模型, 制定了定标的流程并进行了相应的辐射定标实验; 针对红外标准源和环境波动性的影响, 提出了加权最小二乘法的辐射定标优化方法; 通过外场辐射特性测量实验表明, 该方法的反演误差优于 4%, 提高了辐射定标的精度, 结果满足实际工程的需要。

关 键 词: 红外焦平面阵列; 辐射定标; 加权最小二乘法; 辐射特性测量

中图分类号: O432

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122706.0832

Radiance Calibration Based on Weighted Least Square Method

ZHANG Yun-feng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China, E-mail: zyfcjomp@126.com)

Abstract: With the in-depth development of the infrared physics and infrared technology, the measurement of target radiation characteristics is widely appreciated. And the infrared detector radiometric calibration is a fundamental work. This paper establish a radiometric calibration system, the absolute radiometric calibration of the 3~5 μm infrared focal plane arrays. Firstly, give the radiometric calibration mathematical model, developed a calibration process and the radiometric calibration experiment. As infrared standard source and the impact of environmental volatility, a weighted least squares radiation calibration optimization is proposed. The radiation characteristic measurement experiment was carried out outside the field. Results show that the inversion error of optimization method is better than 4%. The accuracy of radiometric calibration was improved. And the results meet the actual needs of the project.

Key words: infrared focal plane array; radiance calibration; weighted least square; radiance characterization measurement

1 引 言

军事目标, 如飞机、导弹等的红外辐射特性测量数据, 在武器系统研制、红外制导、红外隐身与反隐身技术中起着至关重要的作用。目前红外探

测的主要传感器为红外焦平面阵列相机。为了从红外焦平面阵列相机输出的红外图像中得到目标的红外辐射特性数据, 需要对其进行绝对红外辐射定标。红外相机的绝对辐射定标就是要得到输入辐射量和输出灰度值之间的绝对关系, 即绝对

辐射响应度函数。目前国内普遍采用黑体为标准辐射源的定标方案,定标精度一般在 8% 左右^[1-4]。

本文以高精度面源黑体为标准辐射源,建立了 3~5 μm 红外焦平面阵列相机的辐射定标系统,确定了定标流程,对红外相机进行了全面的辐射定标,得到了红外相机的绝对响应度函数,并利用加权最小二乘法对辐射定标进行了优化。试验结果表明本文辐射定标精度优于 4%,满足实际测量的需要。

2 辐射定标的数学模型

本文定标原理如图 1 所示。

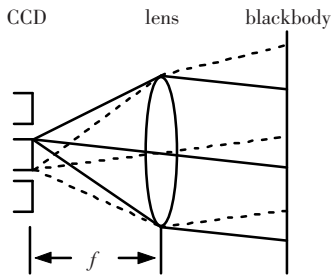


图 1 面元黑体辐射定标原理
Fig. 1 Calibration for plane blackbody

如图 1 所示,黑体直接放于镜头前,满足了定标的全口径、全视场和端对端的要求,而且排除了大气的影响,覆盖红外相机的入瞳视场^[5]。每个相机像元输出的灰度值 G 与接收到的辐射通量的关系如式(1)所示。

$$G = K\Omega_s A_d R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} d\lambda + b \tag{1}$$

其中, Ω_s 为像元对应的物方立体角; A_d 为光学系统的入瞳面积; R 为成像系统(光学系统和红外相机)在 3~5 μm 的平均光谱响应度; L_{λ} 为目标的光谱辐亮度, b 主要为相机暗电流引起的固定偏置值。

设 $K\Omega_s A_d R = a$, 对应相同的相机,在不改变相机参数(焦距、滤光片及入瞳)的情况下,上述值基本上不变,可认为 a 为一常数。 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} d\lambda = L_b$ 为黑体或者目标在 λ_1 到 λ_2 的光谱辐亮度。则式(1)换算为式(2)。

$$G = aL_b + b \tag{2}$$

相机像元的灰度值和对应目标的光谱辐亮度成线性关系,为了反演计算方便,将式(2)换算为

式(3)^[6]。

$$L_b = a_0 G + b_0 \tag{3}$$

只要得到一组 L_b 值和 G 值,就可以通过曲线拟合的方法得到探测的响应度函数,完成辐射定标。

3 辐射定标的流程

根据上述数学模型,需要得到一组相互独立的 L_b 和 G 值,其中 G 值通过保存相机输出的红外图像得到, L_b 值由高精度面源黑体提供。式(1)中的 a_0 受相机瞬时视场 Ω_s 、入瞳面积 A_d 和光谱响应率 R 等的影响,必须考虑相机和环境参数的影响。

3.1 L_b 值的抽样

L_b 值由温度可以设定的高精度面源黑体得到。黑体的参数如表 1 所示。

表 1 黑体参数
Table 1 Blackbody parameters

属 性	参 数
温度可调范围	环境温度~500 ℃
波长范围	1 ~ 99 μm
发射率	0.96 +/- 0.02
温度分辨率	0.1 ℃
发射面积	304 mm×304 mm

通过黑体控制器设定黑体温度,从环境温度 30 ℃到中波红外相机饱和时的温度 120 ℃(积分时间为 1 ms 时),温度间隔为 5 ℃。根据黑体的温度,通过普朗克黑体辐射计算公式得到黑体的辐亮度值^[7-8]。

3.2 D_N 值的抽样

为了得到黑体辐亮度 L_b 对应的 G 值,采用图像采集卡把数字图像保存下来。在定标的过程中,要保持实验室环境和相机参数不变,设定一个黑体温度,待黑体温度彻底稳定后,连续采集 200 帧图像保存起来,取其平均值图像作为定标图像,以减少相机随机噪声。改变黑体温度,重复上述过程。采集黑体从 30~120 ℃、间隔为 5 ℃的红外图像,并保存到硬盘上,这样就得到了一组对应的 G 值。改变相机参数,重复 3.1、3.2 步骤,就得到不同相机参数下的样本值,以便完成相机的全面辐射定标实验^[9-10]。

4 加权最小二乘法

得到每个像素的一组 L_b 和 G 的样本值后,就可以对每个像素对应的样本进行回归分析得到响应度函数。取像素点(278,192)为例,此点在各黑体温度 T 下的光谱辐亮度 L_b 和图像灰度值 G 如表 2 所示。

表 2 定标数据
Table 2 Calibration data

$T/^{\circ}\text{C}$	$L_b /$ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	G
30	2.077	2 672
35	2.476	2 840
40	2.935	3 043
45	3.462	3 275
50	4.065	3 542
55	4.750	3 861
60	5.526	4 223
65	6.403	4 626
70	7.389	5 050
75	8.494	5 563
80	9.729	6 125
85	11.104	6 760
90	12.630	7 475
95	14.319	8 268
100	16.184	9 108
105	18.236	9 991
110	20.489	10 886
115	22.956	11 726
120	25.651	12 319

表 2 中,定义每一组 G 和 L_b 值为 (G_n, L_{bn}) ,其中 $n=1,2\cdots,k$, k 为样本的大小,并称为定标点,这 k 组数据就是关于总体的一个样本。通常是利用最小二乘法对定标数据进行拟合,得到拟合的响应度曲线。但是在实际的辐射定标时,由于黑体标准源自身温度的不稳定,以及环境温度、湿度等的波动,造成在不同的定标温度时,标准源输出的辐射量和红外相机输出的数字值的波动有

差异,不考虑这种差异,会影响响应度曲线拟合的精度,为此本文提出了一种加权最小二乘法,即为每一个定标点附加上一个权值,表示该定标点的质量和对响应度曲线拟合的影响大小。用定标点输出 G 的方差 δ^2 来表示定标点的波动大小, δ^2 越大的定标点说明质量越差,因此权值也就越低,这使得这个定标点对拟合曲线的贡献就越小,影响也就越小。加权最小二乘法通过权值减小了曲线拟合的误差,拟合误差如式(4)所示。

$$S = \sum_{n=1}^k \omega_n (L_{bn} - \hat{L}_{bn})^2 \tag{4}$$

其中, S 为拟合误差; ω_n 为第 n 个定标点的权值。权值为一个相对值,可以通过在每个定标点 G 值的方差 δ^2 获得。如式(5)所示。

$$\omega_n = \frac{1}{\delta^2} \tag{5}$$

对应的权值可以通过对每个定标点存储的 200 幅数字图像进行统计分析得到。取第一个定标点(黑体温度为 30 $^{\circ}\text{C}$)为例,利用上面保存的 200 个样本值进行统计分布拟合,得到的统计直方图如图 2 所示。

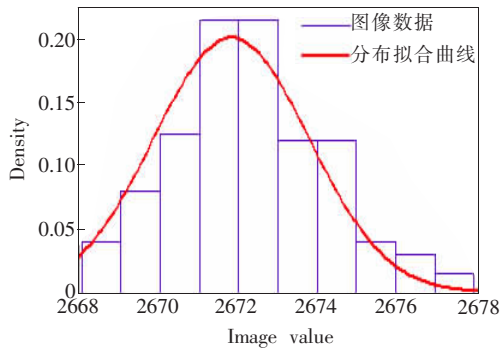


图 2 第一个定标点的统计分布拟曲线
Fig. 2 Distribution fitting curve of first calibration data

从拟合分布图可以得到,随机噪声是服从正态分布的,第一个定标点经过统计分析得到的平均值为 2 672,方差为:3.930 43。然后分别对每一个定标点都进行上述的统计分析,得到其对应的均值和方差,由 $\omega_n=1/\delta^2$ 得到每个定标点对应的权值 ω_n 。通过权值和试验获得的定标点,应用加权最小二乘法,得到响应度的拟合曲线和 L_b 的预测区间,并对相应度曲线进行评估。为了能够看出应用加权最小二乘法进行拟合优化的效果,给出优化前后的拟合曲线和 L_b 的预测区间,

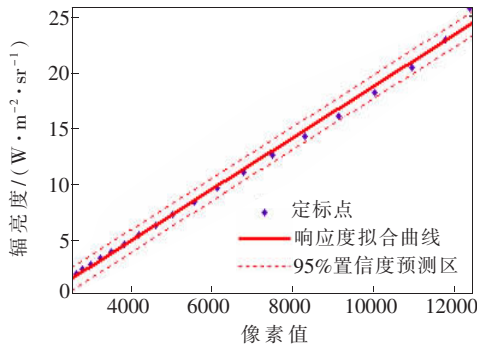


图 3 优化前的拟合曲线与预测区间

Fig. 3 Fitting curve and prediction bounds before improvement

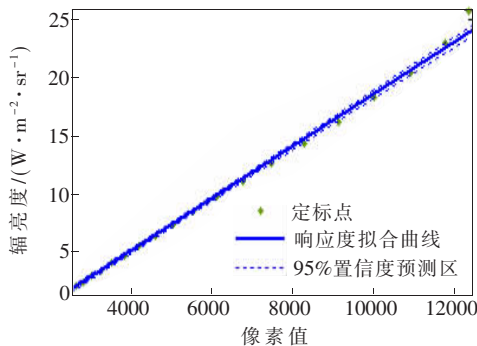


图 4 优化后的拟合曲线与预测区间

Fig. 4 Fitting curve and prediction bounds after improvement

如图 3、图 4 所示。

可以看出优化后的预测区间(95%置信度)明显缩短,优化前最大预测区间为 $L_b \pm 1.0881$,最小预测区间 $L_b \pm 0.99887$;优化后的最大预测区间 $L_b \pm 0.45675$,最小预测区间为 $L_b \pm 0.22110$ 。优化后 L_b 的预测区间平均缩短了大约 40%,说明优化后的响应度曲线对 L_b 的预测更加准确。

5 辐射特性测量与结果分析

为了验证响应度曲线拟合的精度,进行了外场辐射特性测量试验。面源黑体放在 0.4 km 的远处,中波红外相机在室内对其进行测量。室内环境温度保持与辐射定标时基本相同,设定相机的参数,获得远处黑体在特定温度下的数字图像。然后利用拟合的响应度曲线反演得到相机入瞳处的光谱辐亮度值,通过大气传输计算软件 MODTRAN,计算此时大气的透过率和程辐射数

据,修正后得到目标的光谱辐亮度,与当前黑体的理论光谱辐亮度进行比对。以验证辐射定标的误差。把上述参数输入到 MODTRAN 大气软件中,得到在 3~5 μm 的大气平均透过率为 $\alpha = 0.768$ 。由于在上述环境参数下的程辐射远远小于目标辐射量,因此程辐射可以忽略不计,这里主要考虑大气透过率的影响。试验获得的黑体数字图像如图 5 所示。



图 5 黑体图像

Fig. 5 Blackbody image

图 5 中的亮目标即为 0.4 km 外目标黑体的图像。黑体中心点落在(278,192)坐标点。为了验证加权最小二乘法对响应度曲线拟合精度的影响,分别用优化前、后的拟合响应度反演计算得到目标的辐亮度。此像素点在优化前、后的实验室标定的响应度函数分别为式(6)、(7)。

$$L_b = 0.002307G - 4.270 \quad (6)$$

$$L_b = 0.002257G - 3.986 \quad (7)$$

通过上式得到的 L_b 即为入瞳处光谱辐亮度,经过大气衰减修正后,即为目标的光谱辐亮度,在目标为黑体时,即为黑体的光谱辐亮度。设定远处黑体温度,然后通过图像采集系统,得到对应的数字图像,即得到 G 值,然后通过式(6)、(7)计算得到对应 L_b 值,在经过大气衰减系数修正后,和对应黑体的理论光谱辐亮度进行对比,其结果和相对误差如表 3 所示。

表 3 中实验数据表明利用加权最小二乘法进行拟合优化,减少了波动大(方差大)的定标点对曲线拟合的影响,提高了拟合精度。结果表明,优化后的响应度曲线在低端的反演相对误差明显减少,由优化前的最大 8.6%减少到 3.1%,说明响应度曲线拟合的精度有很大提高。

表 3 测量结果
Table 3 Result of observation

温度	黑体图像 D_N 值	黑体理论	优化前反演值/	优化后反演值/
		光谱辐亮度/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) (相对误差)	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) (相对误差)
40	2 744	2.935 5	2.682 8(8.6%)	2.873 9(2.1%)
50	3 107	4.064 7	3.773 2(7.2%)	3.940 8(3.0%)
60	3 604	5.526 3	5.266 2(4.7%)	5.401 3(2.3%)
75	4 637	8.494 2	8.369 2(1.5%)	8.437 1(0.7%)
85	5 579	11.104	11.199(0.8%)	11.206(0.9%)
95	6 733	14.319	14.665(2.4%)	14.597(1.9%)
105	8 155	18.236	18.937(3.8%)	18.776(2.9%)
115	9 817	22.956	23.930(4.2%)	23.660(3.1%)

6 结 论

给出了 3~5 μm 中波红外焦平面阵列相机辐射定标的数学模型和流程,提出了通过加权最小二乘法减少曲线拟合误差的方法,提高了辐射

定标的精度。并在外场进行了辐射特性测量实验,结果表明,本文优化后的辐射特性反演精度得到提高,测量相对误差优于 4%。本文算法在实际应用具有可行性,对今后开展红外辐射特性测量有重要的意义。

参 考 文 献:

[1] Jacobs P A. *Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds* [M]. Washington: SPIE,1996.

[2] Wack E C. Pre-launch infrared of the GOES I-M Imager and Sounder [J]. *SPIE*,2004,4135:140-149.

[3] Kiemme B J. A 1 cm collimated source for use in Infrared calibrations [J]. *SPIE*,2000,4028:411-419.

[4] 王锐,宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统 [J]. *光学 精密工程*,2009,17(3):469-474.

[5] 马宏,王金波. *误差理论与仪器精度* [M]. 北京:兵器工业出版社,2007.

[6] 李步蟾,肖峻. 基于定标的红外焦平面非均匀性校正算法研究 [J]. *红外*,2008,25(6):5-9.

[7] 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制 [J]. *光电子·激光*,2006,17(2):175-178.

[8] 林晓钢,顾乃庭,杨泽平. 基于小孔夫琅和费衍射法的 CCD 光电响应特性标定研究 [J]. *光学 精密工程*,2008,16(3):410-414.

[9] 陈风,郑小兵. 光谱非匹配对于光学遥感器定标精度影响的分析 [J]. *光学 精密工程*,2008,16(3):415-419.

[10] 赵玉环,闫丰,周跃,等. 紫外 ICCD 的辐射定标 [J]. *光学 精密工程*,2008,16(9):1572-1576.