

文章编号: 1672-8785(2024)01-0036-07

一种适用于外场条件的红外系统 分区域标定方法

甘世奇* 武佩剑 张 啸 裴文凯 倪 群

(中国人民解放军 95859 部队, 甘肃 酒泉 735000)

摘 要: 为了减小全画幅平均红外标定引起的非均匀性误差, 主要探究一种适用于外场条件的红外系统分区域标定方法。首先对增益系数矩阵进行估计, 然后利用估计矩阵对标定区域进行划分, 最后利用最小二乘法分别对不同区域进行标定, 得到增益系数标定矩阵。通过开展大口径地基红外测量系统标定实验, 对本文方法进行精度验证。结果表明, 与传统方法相比, 通过本文方法得到的标定方程进行目标辐射亮度反演时, 平均相对误差减小 13.07%, 平均误差偏离度减小 0.2877。该方法对于整个画幅标定精度更高, 目标特性反演准确性显著提升, 可为红外系统标定的实际工程应用提供有益的参考和借鉴。

关键词: 近距离拓展源法; 分区域; 红外系统标定; 增益系数

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.01.005

A Regionalized Calibration Method of Infrared Systems Suitable for External Field Conditions

GAN Shi-qi*, WU Pei-jian, ZHANG Xiao, PEI Wen-kai, NI Qun

(Unit 95859 of PLA, Jiuquan 735000, China)

Abstract: In order to reduce the non-uniformity error caused by full frame average infrared calibration, a segmented calibration method of infrared systems suitable for external field conditions is mainly explored in this paper. In this method, the gain coefficient matrix is estimated first, then the estimation matrix is used to divide the calibration region, and finally the gain coefficient calibration matrix is obtained by using the least square method. The accuracy of the proposed method is verified by carrying out calibration experiment of large aperture ground infrared measurement system. The results show that, compared with the traditional method, the average relative error is reduced by 13.07% and the average error deviation is reduced by 0.2877 when the calibration equation obtained in this paper is used to invert the target radiation brightness. This method has higher calibration accuracy for the whole frame, and the accuracy of the object characteristic inversion is significantly improved. This method can provide useful reference for the practical engineering application of infrared system calibration.

Key words: near-extended-source method; regional division; infrared system calibration; gain coefficient

收稿日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(5167506)

作者简介: 甘世奇(1991-), 男, 新疆昌吉人, 博士, 工程师, 主要从事光学测量、红外辐射特性方面的研究。

*通讯作者: E-mail: gsq1342@163.com

0 引言

开展空中动态目标的红外辐射特性研究对于航空武器建设、战场目标侦察搜索、空中作战单元突防等军事领域具有十分重要的意义。在红外辐射特性测量中, 标定是一项十分重要且必需的工作。自然界中的物体、背景或常见目标的辐射绝大多数不符合理想的黑体辐射, 其辐射特性往往无法通过物体的温度直接计算得到, 而只能利用测量设备来间接获取。计算时需要确定测量值与目标红外辐射特性的关系。红外辐射标定的目的是建立红外测量设备测量值与入射的红外辐射量之间的关系^[1-6]。在外场条件下, 红外辐射测量标定时通常采用近距离拓展源标定方法^[2,8], 即选择均匀的面源黑体辐射源, 分别将其设置在不同温度下工作, 然后将理论辐射值与测量设备灰度响应值关联得到标定系数。因此, 作为开展红外特性测量的“尺”, 标定的精度直接影响红外特性测量的最终精度。

在实际工程应用中, 受红外相机使用寿命、像元响应度的非均匀性和温度不稳定性等因素影响, 通常采用对整个画幅灰度值取平均的方式进行红外特性测量的标定。这种方法简便可行, 能够直接投入实践应用。罗茂捷等^[5]提出一种采用最小二乘法拟合得到红外焦平面像元响应灰度值与积分时间之间关系的定标方法, 并在实验室条件下采用间接拓展源法验证了其有效性。李满良等^[14]提出一种采用双腔室黑体的远距离实时标定方法, 能够有效消除由于测试环境温度和标定温度不一致引起的温度漂移误差。但该方法仅能对红外焦平面小区域进行标定, 不能满足全画幅标定的要求。李桂芝等^[15]基于中波红外探测器开展了不同红外焦平面区域选取对标定的影响分析, 分别对中心像元、100×100 区域、200×200 区域以及全靶面的标定数据进行对比, 认为定标误差随着靶面像元数的增加而逐渐减小, 但在分析过程中没有考虑红外焦平面不同像元响应度的非均匀性。

本文提出一种适用于外场条件的红外系统分区域标定方法。根据增益系数的平均估计矩阵对红外焦平面进行区域划分, 然后采用最小二乘法分别对不同区域进行线性拟合, 检查是否存在局外点并进一步优化标定方程, 最后开展大口径面源黑体标定实验。与传统标定方法相比, 本文方法在整个画幅标定精度和目标反演准确度方面都有一定的提升。

1 基本原理

在外场条件下, 利用大口径红外系统开展地空动态目标红外特性测试, 可以采用基于背景对消方法的计算模型得到目标辐射亮度^[8]:

$$L_{\text{target}} = \frac{h_{\text{target}} - h_{\text{b}}}{G_{\text{t}} \tau_{\text{atm}}} + \frac{L_{\text{back}} - L_{\text{path}}}{\tau_{\text{atm}}} \quad (1)$$

式中, L_{target} 为被测目标的辐射亮度, h_{target} 为目标灰度值, h_{b} 为背景灰度值, G_{t} 为标定增益系数, τ_{atm} 为目标到测量设备路径上的大气透过率, L_{back} 为天空背景辐射, L_{path} 为目标到测量设备路径上的大气程辐射。一般情况下, 为了简化运算, 在事前标定过程中 G_{t} 通常是指对整个画幅响应灰度取平均值后的标定增益系数。这就忽略了 G_{t} 在红外焦平面空间上的非均匀性对整体计算精度的影响。因此, 通过区域分割对红外焦平面不同区域进行标定, 能够在一定程度上提升最终计算结果的准确度。

1.1 红外焦平面区域分割及标定

在实际工程应用中, 通常认为红外系统响应灰度值 h 与输入辐射亮度 L 之间的关系是线性的:

$$h = G \times L + B \quad (2)$$

式中, G 为标定增益系数, B 为偏置。对于大口径红外系统, 可以采用近距离扩展源法进行标定(见图 1)^[10]。

黑体在不同温度点 T_i 的理论辐射亮度数值为

$$L_i(T_i, f_2, f_1) = \epsilon \int_{f_2}^{f_1} \frac{2hf^3}{c^2 e^{hf/(kT_i-1)}} df \quad (3)$$

式中, $L_i(T_i, f_2, f_1)$ 表示在 $f_2 \sim f_1$ 频率范围内温度为 T_i (单位为华氏度) 的黑体辐射亮度

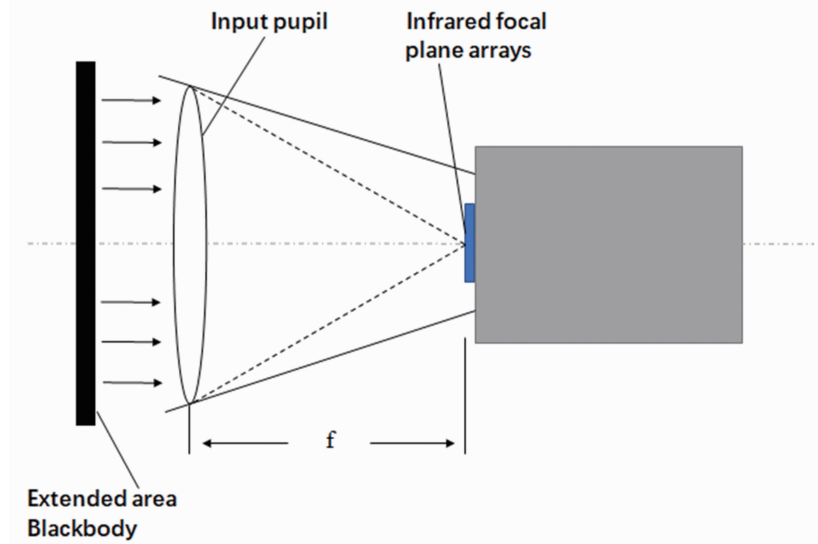


图 1 近距离拓展源方法的示意图

数值(单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$), h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, c 为光速, f 为频率。根据式(3)可以计算得到不同工作温度 T_i 对应的黑体辐射亮度 L_i 。红外系统对 T_i 温度下黑体的输出图像灰度为 h_i 。假设在黑体工作温度 T_i 中分别取 2 个不同温度点 T_x 和 T_y ($T_y > T_x$), 即 T_x 温度下对应的输出图像 h_x 为低温图像, T_y 温度下对应的输出图像 h_y 为高温图像。将 h_x 和 h_y 相减可以得到:

$$h_y - h_x = G_{xy}(L_y - L_x) \quad (4)$$

$$G_{xy} = \frac{h_y - h_x}{L_y - L_x} \quad (5)$$

式中, L_x 和 L_y 分别为 T_x 温度和 T_y 温度对应的黑体辐射亮度理论值, G_{xy} 为通过两个温度点计算(以下简称“两点法”)得到的估计增益系数矩阵。由于两点法利用的数据量较小, 估计增益系数 G_{xy} 与真实增益系数 G 存在一定偏差, 无法直接用于计算, 但二者数值的分布情况是一致的。因此可以利用估计增益系数矩阵 G_{xy} 的数值分布情况对红外焦平面进行区域划分, 并分别进行红外辐射响应度系数标定, 从而提升整个画幅的标定精度。在式(5)的基础上, 假设黑体共设置了 n 个温度, 按照高温和低温的不同组合, 对估计增益系数 G_{xy} 取平均值, 得到平均估计增益系数 $\bar{G}$:

$$\bar{G} = \frac{\sum_{x < y} G_{xy}}{0.5n(n-1)} \quad (6)$$

可以根据平均估计增益系数 $\bar{G}$ 求出最大值 $\bar{G}_{\max}$ 、最小值 $\bar{G}_{\min}$ 以及平均值 $\bar{G}_{\text{mean}}$, 并将其用来计算区域分割的阈值。以划分 4 个区域为例, 有

$$a_1 = \bar{G}_{\text{mean}} + (\bar{G}_{\max} - \bar{G}_{\text{mean}})/2 \quad (7)$$

$$a_2 = \bar{G}_{\text{mean}} \quad (8)$$

$$a_3 = \bar{G}_{\text{mean}} - (\bar{G}_{\text{mean}} - \bar{G}_{\min})/2 \quad (9)$$

式中, a_1 、 a_2 、 a_3 分别为划分区域的不同阈值。可以根据平均估计增益系数 $\bar{G}$ 的数值分布, 将红外焦平面阵列划分为 4 个区域。在每个区域内分别对不同温度 T_i 下的多组 (h_i, L_i) 进行最小二乘线性拟合, 从而分区域获得红外系统的 4 组标定系数。

1.2 局外点的剔除

在标定过程中, 相机自身会受内部杂散光、暗电流等各种噪声的影响, 响应值实际为包含误差的随机变量, 即某一温度下黑体辐射值 L_b 的灰度响应值 h_b 包含随机变量误差 ϵ_0 ^[2]:

$$L_b = \frac{1}{G} \times h_b - \frac{B}{G} + \epsilon_0 \quad (10)$$

式中, 随机变量误差 ϵ_0 受到相机不确定度、辐射源不确定度等非线性造成的不确定度影响。从误差分析的角度来看, 对于同一个 h_b

值, 可以由不同的 L_b 值引起。分别将式(10)中的 L_b 和 h_b 视为响应值和预测值, 上述关系可以看作回归分析数学模型, 即认为误差只存在于 L_b 中, 将 ϵ_0 看作服从正态分布的随机变量。因此, 通过最小二乘线性拟合得到增益系数 G 、偏置 B 以及随机变量误差 ϵ_0 的点估计和区间估计, 定义残差 R 为

$$R = L_{b1} - L_{b2} \quad (11)$$

式中, L_{b1} 为黑体辐射理论值, L_{b2} 为拟合得到的预测值。在期望的置信区间下, 可将超出范围的局外点批量剔除后对其余点重新拟合, 从而优化标定方程。

2 实验验证

在外场条件下, 开展大口径红外系统标定实验, 利用近距离扩展源法进行低温段标定。实验采用的面源黑体尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 发射率为 0.99。将其放置于红外系统镜头正前方, 使辐射面覆盖入瞳视场。调整工作温度, 使其依次稳定在 40°C 、 50°C 、 60°C 、 80°C 、 100°C ; 红外系统分别记录响应图像。红外系统相机的工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 像素为 640×512 , 记录时积分时间设置为 $2000 \mu\text{s}$ 。表 1 列出了实验标定原始数据。

表 1 实验标定原始数据

工作温度/ $^\circ\text{C}$	最大灰度值	最小灰度值	平均灰度值	理论辐射/ $(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$
40	3869	2683	3155	1.9775
50	4288	2955	3472	2.7408
60	4772	3248	3853	3.7267
80	6098	4052	4889	6.5480
100	8057	5193	6436	10.8460

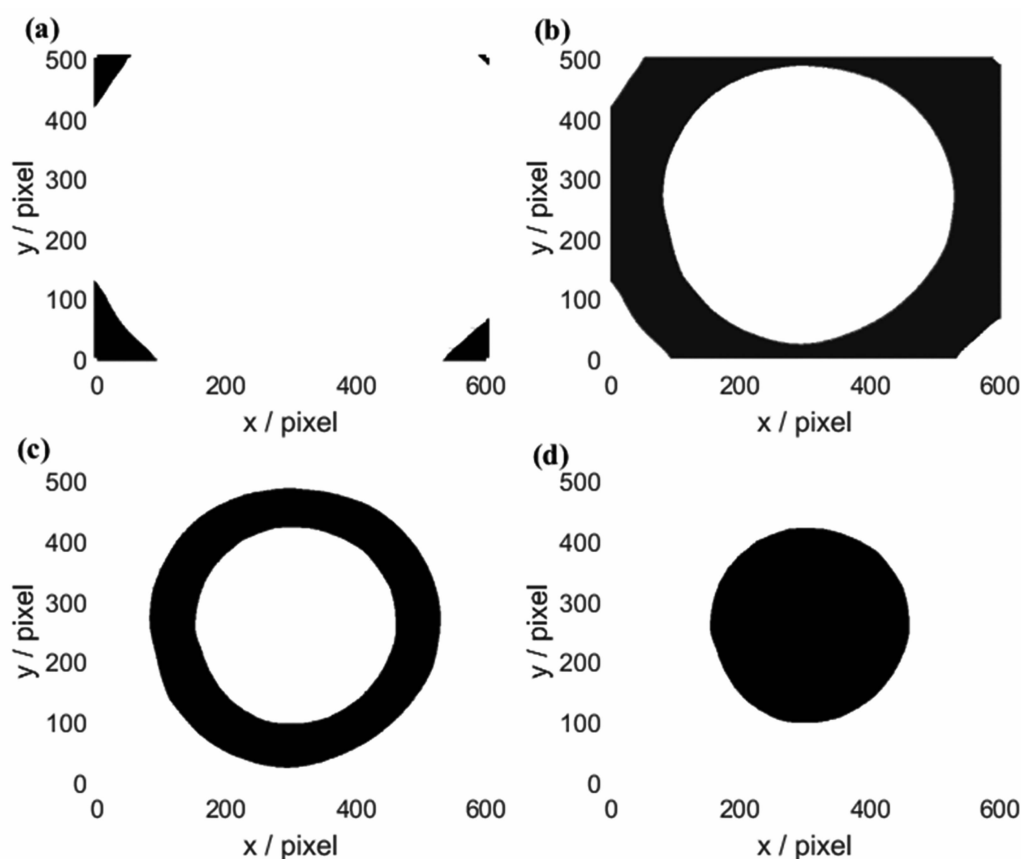


图 2 划分区域示意图: (a)区域 1; (b)区域 2; (c)区域 3; (d)区域 4

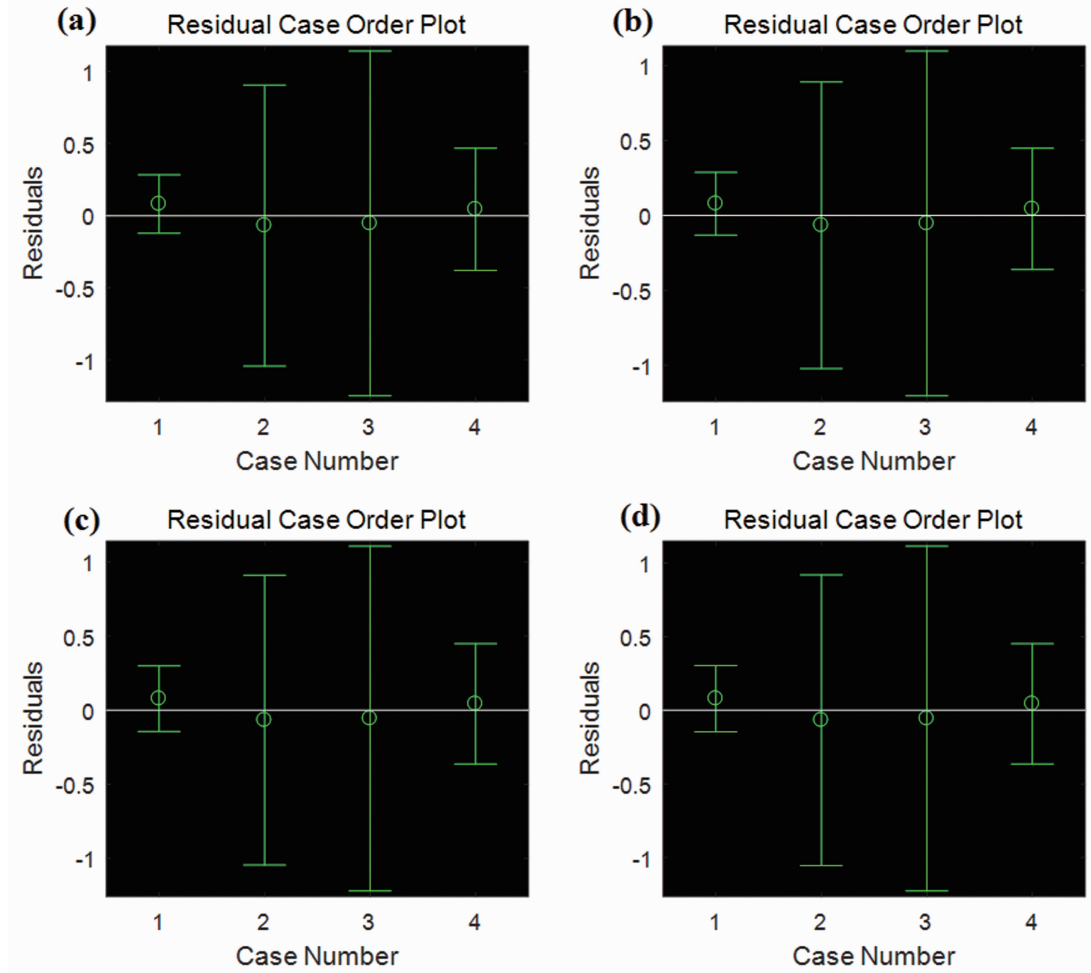


图 3 线性拟合的残差 R : (a)区域 1; (b)区域 2; (c)区域 3; (d)区域 4

根据式(4)~式(9),可以计算出平均估计增益系数 $\bar{G}$ 。该系数是一个矩阵,其中每个元素对应红外焦平面像元的平均估计增益系数数值。经计算得到 a_1 、 a_2 、 a_3 分别为 388.48、365.15、334.52,可以将红外焦平面划分为 4 个区域(见图 2)。

为了更好地对比传统方法和本文方法,取温度为 40℃、60℃、80℃、100℃时的数据用于标定,温度为 50℃时的数据用于验证。对整个画幅和 4 个区域分别进行标定,通过最小二乘线性拟合得到增益系数 G 、偏置 B 以及随机变量误差 ϵ_0 的点估计和区间估计,置信度为 95%。图 3 所示为 4 个区域标定后的残差 R ,图 4 所示为采用传统标定和本文方法得到的 4 个区域标定结果的对比情况。从图 3 中可以看出,4 个区域的拟合残差均符合置信度区

间的分布,无局外点需要剔除。由图 4 可知,在区域分割后的标定方程以及用传统方法对整个画幅取平均的标定方程中,线性响应关系存在明显的不同。这就导致反演计算出的目标辐射亮度必然存在差异。

分别采用传统全画幅方法和本文方法的标定结果对温度为 50℃的黑体辐射亮度进行反演计算。以整个画幅中心为中心点,根据式(2)分别计算 30×30 、 100×100 、 200×200 、 300×300 、 400×400 、 600×600 像素大小区域的辐射亮度数值。相对误差和误差偏离度的定义如下:

$$\delta = \frac{\bar{L}_{\text{target}} - L_{\text{theoretical}}}{L_{\text{theoretical}}} \times 100\% \quad (12)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum (L_{\text{target}}(x,y) - L_{\text{theoretical}})^2}{N_0}} \quad (13)$$

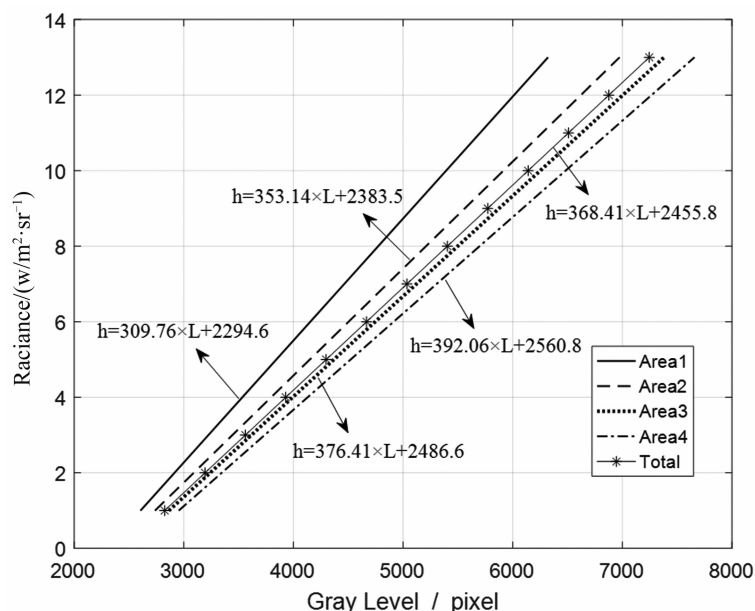


图 4 采用传统标定和本文方法得到的 4 个区域标定结果对比

表 2 传统方法与本文方法的计算结果对比

计算区域	目标辐射亮度 $L/W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$			相对误差 $\delta/\%$		误差偏离度 γ	
	理论值	传统方法 (平均)	本文方法 (平均)	传统方法 (平均)	本文方法 (平均)	传统方法	本文方法
30×30	2.7408	3.3782	2.9066	23.26	6.05	0.6767	0.2702
100×100	2.7408	3.3456	2.8760	22.07	4.93	0.6432	0.2461
200×200	2.7408	3.2995	2.8327	20.38	3.35	0.6229	0.2746
300×300	2.7408	3.1870	2.7805	16.27	1.45	0.5250	0.2534
400×400	2.7408	3.0467	2.7898	11.16	1.79	0.4496	0.2747
500×500	2.7408	2.8673	2.7880	4.62	1.72	0.4343	0.3061

式中, $\bar{L}_{\text{target}}$ 表示采用传统方法或本文方法计算得到的目标平均辐射亮度, $L_{\text{theoretical}}$ 表示采用普朗克公式计算得到的理论辐射亮度, $L_{\text{target}}(x, y)$ 表示计算得到的 (x, y) 处像元的辐射亮度, N_0 表示计算区域的像元数。

表 2 列出了采用传统方法与本文方法的计算结果。可以看出, 6 组数据中传统方法的相对误差平均值为 16.29%; 本文方法的相对误差平均值为 3.22%, 减小了 13.07%。传统方法的误差偏离度平均值为 0.5586; 本文方法的误差偏离度平均值为 0.2709, 减小了 0.2877。随着计算区域的增大, 相对误差逐渐减小, 计算得到的平均辐射亮度更加接近理论值。通过以上结果可以得出以下结论: (1) 当红外系统焦平面的响应度非均匀性差异较大时, 本文方

法对目标辐射亮度反演的准确度比传统方法更高; (2) 对于均匀的面辐射源目标而言, 在红外焦平面上成像占比越大, 其反演的平均辐射亮度越接近真实值。

3 结束语

本文提出了一种适用于外场条件的红外系统分区标定方法。首先通过不同黑体工作温度下的图像计算得到平均估计增益系数矩阵, 然后通过对该矩阵设定阈值进行区域划分, 最后对不同区域分别进行标定。该方法有效减小了全画幅平均标定引起的非均匀性误差。另外还开展了大口径面源黑体外场标定实验。结果表明, 与传统方法相比, 本文方法的相对误差平均值减小 13.07%, 误差偏离度平均值减小 0.2877, 整个画幅标定精度更高, 对目标辐射

亮度反演的准确度也更高。本文方法计算简便,可作为一种适用于外场条件的通用标定方法,具有广泛的工程应用价值。在后续工作中,需要结合不同波段焦平面的非均匀性,探索更为准确的区域划分方式,以验证该方法的通用性并进一步提升标定精度。

参考文献

- [1] 殷丽梅,刘俊池,王建立,等. 基于红外标准星的红外辐射标校方法 [J]. 光子学报, 2014, **43**(12): 92-96.
- [2] 李宁,杨词银,曹立华,等. 3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标 [J]. 光学精密工程, 2011, **19**(10): 2319-2325.
- [3] 孙志远,常松涛,朱玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法 [J]. 光学学报, 2014, **34**(7): 137-143.
- [4] 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.
- [5] 罗茂捷,周金梅,傅景能,等. 考虑积分时间变量的红外系统辐射响应定标 [J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(1): 36-40.
- [6] 樊宏杰,刘艳芳,刘连伟,等. 目标红外辐射特性测量定标方法研究 [J]. 激光与红外, 2014, **44**(5): 516-521.
- [7] 杨智慧,郭聚光,佟惠原,等. 平行光管杂散辐射对红外辐射定标影响的分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(10): 3199-3204.
- [8] 贺元兴,张浩元,司文涛,等. 空中目标红外辐射强度计算通用模型及其应用 [J]. 光学学报, 2019, **39**(6): 190-195.
- [9] 孙志远,常松涛,朱玮,等. 应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标 [J]. 光学精密工程, 2015, **23**(2): 356-362.
- [10] 余毅,常松涛,王旻,等. 宽动态范围红外测量系统的快速非均匀性校正 [J]. 光学精密工程, 2015, **23**(7): 1932-1938.
- [11] 张云峰. 基于加权最小二乘法的红外辐射定标 [J]. 液晶与显示, 2012, **27**(6): 832-836.
- [12] 霍晓江,郭肇敏,张志恒,等. 基于积分时间的IRFPA非均匀性校正方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(S2): 604-607.
- [13] 刘莹奇,刘祥意. 空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究 [J]. 光学学报, 2014, **34**(5): 123-129.
- [14] 李满良,胡小春,甄小龙,等. 外场红外辐射标定方法研究 [J]. 遥测遥控, 2014, **35**(6): 61-66.
- [15] 李桂芝,贾海萨,韩璐,等. 红外焦平面区域选取对辐射定标的影响分析 [J]. 红外, 2021, **42**(9): 26-29.
- [16] 南童凌,沈宏海,杨名宇,等. 一种长波红外探测器的快速辐射定标方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, **54**(12): 425-433.