

红外告警设备外场标定方法

王东 张恒伟 邹前进 彭锦超 路亚旭

Field calibration method of infrared warning equipment

WANG Dong, ZHANG Hengwei, ZOU Qianjin, PENG Jinchao, LU Yaxu

引用本文:

王东, 张恒伟, 邹前进, 等. 红外告警设备外场标定方法[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1164–1169. DOI: 10.5768/JAO202445.0601008

WANG Dong, ZHANG Hengwei, ZOU Qianjin, et al. Field calibration method of infrared warning equipment[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1164–1169. DOI: 10.5768/JAO202445.0601008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

目标辐射特性现场校准用大面积黑体辐射源技术研究

Research on technology of large area blackbody radiation source used in field calibration for target radiation characteristics

应用光学. 2021, 42(2): 292–298 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203001>

迎头方向隐身导弹红外辐射特性分析

Infrared radiation characteristics of head-on stealth missile

应用光学. 2022, 43(1): 41–44 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0101007>

运输机蒙皮红外辐射特性建模与分析

Modeling and analysis of infrared radiation characteristics of transport aircraft skin

应用光学. 2019, 40(5): 923–928 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0509002>

机载红外设备多平台协同探测无源定位方法

Method of passive location based on multi-platform collaborative detection by airborne infrared equipment

应用光学. 2021, 42(3): 392–397 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301003>

基于闪烁体3D剂量测量系统中光场重聚焦位置的标定方法

Calibration method of light field refocusing position in 3D dose measurement system based on scintillator

应用光学. 2020, 41(4): 822–828 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409804>

基于IMU的3D扫描仪倾角标定方法

Calibration method of 3D scanner tilt angle based on IMU

应用光学. 2022, 43(2): 291–297 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1164-06

红外告警设备外场标定方法

王东, 张恒伟, 邹前进, 彭锦超, 路亚旭

(63891 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 介绍了红外辐射标定方法, 分别用近距离直接扩展源法、远距离小源法对红外告警设备开展外场标定, 并进行了验证及误差分析。结果表明, 在 10℃~50℃ 温度范围, 近距离直接扩展源法的相对标定误差在 5.67%~15.73% 之间; 远距离小源法在 37 m 处的相对标定误差在 1.38%~5.72% 之间, 在 63 m 处的相对标定误差在 10.34%~29.66% 之间, 说明对于采取周扫方式工作的红外告警设备, 在适当的距离处, 远距离小源法是外场标定的有效方法。

关键词: 红外告警设备; 标定; 辐射特性; 响应关系

中图分类号: TN219

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0601008

Field calibration method of infrared warning equipment

WANG Dong, ZHANG Hengwei, ZOU Qianjin, PENG Jinchao, LU Yaxu

(Unit 63891 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: The infrared radiation calibration method was introduced, the field calibration of infrared warning equipment was carried out by short-range direct extended source method and long-distance small source method, and the verification and error analysis were carried out. The results show that the relative calibration errors of the short-range direct extended source method is between 5.67% to 15.73% at the temperature range of 10 °C~50 °C. The relative calibration errors of the long-distance small source method at 37 m ranging from 1.38% to 5.72%, and those at 63 m ranging from 10.34% to 29.66%, indicating that the long-distance small source method at an appropriate distance is an effective method for field calibration of infrared warning equipment operating in the mode of circular scanning.

Key words: infrared warning equipment; calibration; radiation characteristics; response relation

引言

飞机类目标作为现代战争的重要平台, 广泛应用于侦察、攻击、运输等领域。基于此, 其也成为红外探测系统、红外制导武器探测和打击的主要对象。准确获取来袭飞机的红外辐射特性, 对于红外预警探测具有重要意义^[1], 因此, 测量和研究飞机类目标的红外辐射特性是一项重要的基础工作, 需长期进行。受保障条件限制, 单独组织飞机类目标的红外辐射特性测量困难较大, 一般会采取“搭车”方式测量。例如组织侦察探测实验时, 利用已有的红外告警设备, 结合实验开展目标红外辐射特性测量。由于红外告警设备并非专用的目标红外辐射特性测量设备, 在具备原始图像采

集的基础上, 如何进行准确标定往往是测量前需要解决的关键问题^[2]。

针对红外探测系统辐射标定的研究已有诸多报道, 例如, 吕原等提出了绝对辐射标定和基于多温度场的场地绝对辐射标定方法, 实现了实时高精度绝对辐射标定^[3]。蔡李靖等提出了一种无黑体式红外热像仪测温标定和温度补偿技术, 并通过实验进行了验证^[4]。凌玲等对傅里叶变换红外光谱仪开展了实验室标定, 并分析了光谱仪测量过程中的不确定来源^[5]。李宁等针对 3 μm~5 μm 红外焦平面阵列的标定拟合及评估, 提出了利用剔除局外点的方法对拟合曲线进行优化处理, 改善了辐射标定拟合的不确定度^[6]。杨词银、李宪

收稿日期: 2023-10-26; 修回日期: 2024-03-29

基金项目: XX 科研项目 (2100110077)

作者简介: 王东 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电对抗技术研究。E-mail: wd.hardman@163.com

圣、李宁等针对大口径红外光电系统, 分别提出了基于大面源黑体的辐射标定方法、用小口径照明光管标定大口径红外探测系统的方法和基于光栅单色仪和标准辐射计的相对光谱标定方法, 并进行了实验验证及误差分析^[7-10]。邹前进等采用不同的标定方法对焦距固定红外探测系统进行了标定实验, 并对不同方法的适用情况进行了分析^[11]。禄晓飞等基于红外标定参数受外场环境影响因素, 提出了外场标定参数验证的方法流程, 并进行了精度检验^[12]。本文在此基础上, 针对外场实际使用需求, 分析验证了近距离直接扩展源法、远距离小源法对红外告警设备的标定误差, 并给出了使用建议。

1 辐射标定及方法

标定一般采用红外探测系统测量标准红外辐射源的方式进行, 目的是建立红外探测系统数字图像输出值(灰度)与其接收到的辐射亮度之间的对应关系, 以便在目标特性测量过程中, 准确得到目标的辐射亮度或强度。

标定过程首先将红外探测系统参数固定, 并依次对不同温度的黑体进行探测, 得到其在不同温度条件下的图像输出值(灰度) D , 通过式(1)计算其辐射亮度响应度 α 和自身偏移值 D_0 之间的对应关系, 标定模型如下^[13]:

$$D = \alpha L + D_0 \tag{1}$$

式中 L 为黑体在红外探测系统工作波段内的辐射亮度, 不同温度对应的黑体辐射亮度通过式(2)计算得到^[14]。

$$L = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \tag{2}$$

式中: $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为红外探测系统工作波段; ε 为黑体发射率; c_1 、 c_2 为辐射常数; T 为黑体温度。

目前, 针对红外探测系统的标定方法主要有近距离扩展源法、远距离小源法和平行光管法^[15]。

近距离扩展源法一般采用大面源黑体作为标准红外辐射源, 要求黑体辐射面覆盖红外探测系统光学镜头, 并靠近红外探测系统光学镜头, 以减小外界环境及背景的影响, 该方法可以对红外探测系统探测器的每个像元进行标定。

当黑体辐射面不能覆盖红外探测系统光学镜头, 或受现场条件限制, 黑体无法靠近红外探测系统光学镜头时, 可采用远距离小源法进行标定。远距离小源法一般将黑体置于距红外探测系统一

定距离处, 并保证红外探测系统能够对黑体清晰成像。

平行光管法需要使用大口径平行光管, 标定过程首先将红外探测系统与平行光管对接, 其次将黑体置于平行光管焦平面, 形成无穷远辐射源。该方法由于标定系统较为复杂, 一般不在外场使用。

本文主要探讨外场测量设备的标定, 因此主要对近距离扩展源法和远距离小源法进行分析, 不涉及平行光管法。

2 标定及结果

2.1 设备及参数

被标定设备为某长波红外告警设备, 工作波段为 $8\ \mu\text{m} \sim 12\ \mu\text{m}$, 像元尺寸为 $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$, 量化位数为16位。标准红外辐射源为以色列CI Systems公司生产的SR800扩展面黑体(见图1), 参数见表1。

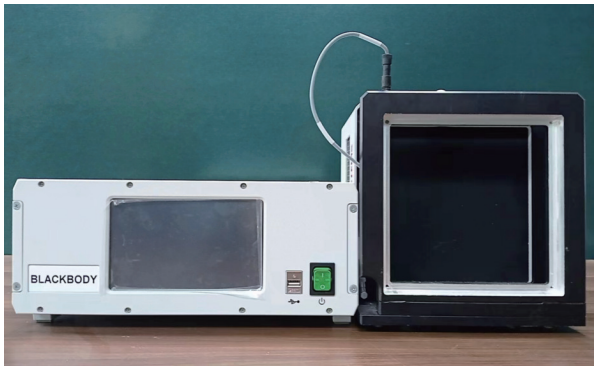


图1 SR800 扩展面黑体
Fig. 1 SR800 extended surface blackbody

表1 SR800 扩展面黑体参数 Table 1 Parameters of SR800 extended surface blackbody	
参数	参数值
温度范围/℃	-40~170
温度精度/℃	±0.02
辐射面积/mm ²	300×300
发射率	0.97

标定时环境温度为28℃左右, 为保证标定有效且标定温度分布在环境温度两侧, 将标定温度设置在10℃~50℃之间。SR800扩展面黑体温度依次设置为10℃、20℃、30℃、40℃、50℃, 利用长波红外告警设备对黑体进行测量, 由式(1)、式(2)得到其辐射亮度响应度 α 和偏移值 D_0 之间的对应关系。

2.2 近距离直接扩展源法标定结果

由于该长波红外告警设备采取旋转扫描方式对目标成像, 标定过程中黑体无法紧贴其光学镜头, 难以完全排除外界环境及背景的影响。近距离直接扩展源法的标定结果见图 2, 其中横坐标为黑体辐射亮度 L , 纵坐标为长波红外告警设备标定区域图像中心 10×10 个像元的输出灰度平均值。

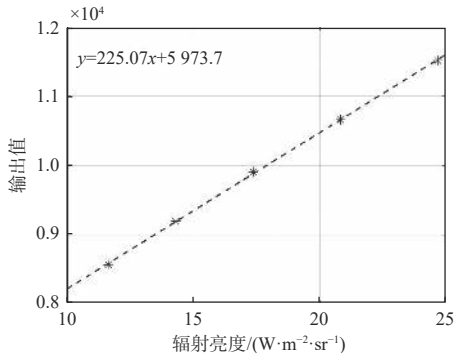


图 2 近距离直接扩展源法标定结果

Fig. 2 Calibration results of short-range direct extended source method

对近距离直接扩展源法的标定结果进行线性拟合, 得到长波红外告警设备的辐射亮度响应关系为 $D=225.07 \times L+5973.7$ 。

2.3 远距离小源法标定结果

标定时由于已将长波红外告警设备参数固定, 距离太近无法对黑体清晰成像, 距离太远大气及背景辐射对标定影响较大。因此, 选取 37 m 和 63 m 两个能够清晰成像且距离较近的位置进行标定, 37 m 处黑体红外图像见图 3。



图 3 37 m 处黑体红外图像

Fig. 3 Blackbody infrared image at 37 m

标定结果如图 4 所示, 其中横坐标为黑体辐射亮度 L , 纵坐标为长波红外告警设备标定区域图像中心 10×10 个像元的输出灰度平均值。

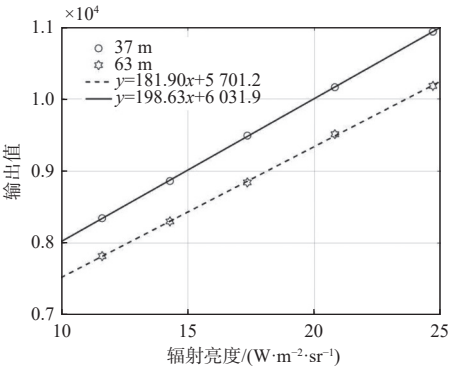


图 4 远距离小源法标定结果

Fig. 4 Calibration results of long-distance small source method

对远距离小源法的标定结果进行线性拟合, 得到长波红外告警设备在 37 m 处的辐射亮度响应关系为 $D=198.63 \times L+6031.9$, 在 63 m 处的辐射亮度响应关系为 $D=181.90 \times L+5701.2$ 。

3 结果分析

从式(1)可以看出, 在长波红外告警设备测量范围内, 理论上 2 个不同的温度点就可以确定其辐射亮度响应度 α 和偏移值 D_0 。表 2~表 4 分别给出了由相邻温度点得到的近距离扩展源法、远距离小源法标定结果。

表 2 近距离直接扩展源法两点标定结果

Table 2 Two points calibration results of short-range direct extended source method

标定温度/℃	10, 20	20, 30	30, 40	40, 50
响应度 α	232.3	231.5	218.4	222.2
偏移值 D_0	5873.8	5885.0	6112.5	6034.1

表 3 远距离小源法(37 m)两点标定结果

Table 3 Two points calibration results of long-distance small source method (37 m)

标定温度/℃	10, 20	20, 30	30, 40	40, 50
响应度 α	193.0	206.3	194.4	199.2
偏移值 D_0	6100.5	5910.6	6117.7	6018.1

表 4 远距离小源法(63 m)两点标定结果

Table 4 Two points calibration results of long-distance small source method (63 m)

标定温度/℃	10, 20	20, 30	30, 40	40, 50
响应度 α	179.9	176.8	193.9	173.2
偏移值 D_0	5727.7	5772.1	5475.3	5907.5

表 2 中相邻温度点的辐射亮度响应度 α 和偏移值 D_0 与 2.2 节中拟合结果的相对误差分别在 $-2.96\% \sim$

3.21% 和-1.67%~2.32% 之间。表 3 中相邻温度点的辐射亮度响应度 α 和偏移值 D_0 与 2.3 节中拟合结果的相对误差分别在-2.83%~3.86% 和-2.01%~1.42% 之间。表 4 中相邻温度点的辐射亮度响应度 α 和偏移值 D_0 与 2.3 节中拟合结果的相对误差分别在-4.78%~6.60% 和-3.96%~3.62% 之间。可以看出, 近距离扩展源法的两点标定结果一致性较好, 远距离小源法在 37 m 处的两点标定结果一致性也较好, 但 63 m 处的两点标定结果一致性有所下降, 说明随着距离的增加, 外界环境及背景的影响有所增强。

在不考虑大气辐射传输的情况下, 本次标定由设备带来的误差主要包括: SR800 扩展面黑体光谱辐射出射度误差, 长波红外告警设备光学系统透过率不确定度引起的误差, 输出信号引起的误差, 以及探测器响应不稳定引起的误差。SR800 扩展面黑体温度精度为 ± 0.02 , 结合文献 [8,15-16] 对黑体辐射出射度误差 2% 左右的分析, SR800 扩展面黑体引起的测量误差 σ_1 大约为 2%。长波红外告警设备光学系统的光谱透过率实测误差 σ_2 约为 2%。根据当前长波红外告警设备技术状态, 结合文献 [15-16] 的分析, 其信号输出值 D 的不确定度 σ_3 优于 1%, 探测器响应不稳定引起的误差 σ_4 约为 2%。

误差的合成标准不确定度可以表示为

$$\sigma_{\text{总}} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2)^{1/2} \tag{3}$$

经计算, 由设备带来的总误差约为 3.6%。

下面探讨不同标定方法带来的误差。为了验证 2 种标定结果的准确性, 将 SR800 扩展面黑体作为目标布设于距长波红外告警设备 140 m 处进行辐射特性测量, 利用式 (4) 对 SR800 扩展面黑体辐射亮度进行反演。

$$L_F = \left(\frac{D - D_0}{\alpha} - L_{\text{path}} \right) / \tau_a \tag{4}$$

式中: L_F 为反演的 SR800 扩展面黑体辐射亮度; τ_a 为 SR800 扩展面黑体与长波红外告警设备之间的大气透过率; L_{path} 为 SR800 扩展面黑体与长波红外告警设备之间的大气程辐射, 其结果通过大气辐射传输计算软件 MODTRAN 计算得到。测量期间, 大气能见度为 14.7 km, 湿度为 39%, 温度为 28℃, 通过 MODTRAN 计算得到 0 m、37 m、63 m 距离的大气透过率分别为 1、0.9495、0.9282; 大气程辐射分别为 0、0.5484 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 、0.7851 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。表 5~表 7 分别给出了采用近距离扩展源法、远距离小源法标定后的测量误差。

表 5 近距离直接扩展源法测量误差

Table 5 Measurement errors of short-range direct extended source method

温度/℃	黑体辐射亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	反演的辐射亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	相对 误差/%
10	11.63	10.97	-5.67
20	14.30	13.00	-9.09
30	17.36	15.36	-11.52
40	20.81	18.08	-13.12
50	24.67	20.79	-15.73

表 6 远距离小源法 (37 m) 测量误差

Table 6 Measurement errors of long-distance small source method (37 m)

温度/℃	黑体辐射亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	反演的辐射亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	相对 误差/%
10	11.63	12.18	4.75
20	14.30	14.60	2.07
30	17.36	17.12	-1.38
40	20.81	20.19	-2.98
50	24.67	23.26	-5.72

表 7 远距离小源法 (63 m) 测量误差

Table 7 Measurement errors of long-distance small source method (63 m)

温度/℃	黑体辐射亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	反演的辐射亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	相对 误差/%
10	11.63	15.08	29.66
20	14.30	17.59	23.01
30	17.36	20.51	18.15
40	20.81	23.87	14.70
50	24.67	27.22	10.34

表 5~表 7 中, 相对误差采用式 (5) 计算:

$$\delta = \left(\frac{L_F - L_H}{L_H} \right) \times 100\% \tag{5}$$

式中 L_H 为 SR800 扩展面黑体实际辐射亮度。

图 5 给出了采用近距离扩展源法、远距离小源法标定后的测量误差曲线。

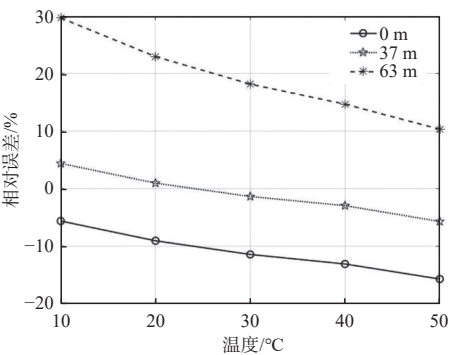


图 5 测量误差曲线

Fig. 5 Measurement error curves

从表 5、表 6、表 7 及图 5 可以得出以下结论。

1) 目标温度在 10℃~50℃ 范围内,采用近距离直接扩展源法标定的测量误差在 5.67%~15.73% 之间。采用远距离小源法在 37 m 处标定的测量误差在 1.38%~5.72% 之间,在 63 m 处标定的测量误差在 10.34%~29.66% 之间。

2) 由于长波红外告警设备以周扫方式工作,无法对目标凝视成像,采用近距离直接扩展源法标定时,无法将黑体紧靠其光学系统,导致部分外界环境及背景辐射进入长波红外告警设备光学系统。另外,长波红外告警设备光学系统焦距较长,周扫过程中,由于角速度大对近距离放置的黑体探测稳定度较差。除 3.6% 的设备误差外,根据式(6),标定过程中环境及背景辐射、标定方法造成的误差可能在 4.38%~15.31% 之间。

$$\sigma_1 = (\sigma_{\text{总}}^2 - \sigma_2^2)^{1/2} \quad (6)$$

3) 采用远距离小源法对长波红外告警设备进行标定,除 3.6% 的设备误差外,根据式(6),在 37 m 处,标定过程中环境及背景辐射、标定方法造成的误差优于 4.45%,在 63 m 处,标定过程中环境及背景辐射、标定方法造成的误差可能在 9.69%~29.44% 之间。37 m 处的标定误差明显优于 63 m 处的标定误差,由此可见,对于采取周扫方式工作的长波红外告警设备,远距离小源法是对其标定的有效手段。从验证结果可以看出,在保证长波红外告警设备能对黑体清晰成像的前提下,降低标定距离可有效减小环境及背景辐射对标定误差的影响。因此,在实际操作过程中,针对设备特点,找出其能对黑体清晰成像的最短距离,是远距离小源法标定的关键。

4 结 论

本文利用长波红外告警设备、SR800 扩展面黑体进行了外场标定实验,并验证了近距离直接扩展源法、远距离小源法的标定误差。结果表明,对于采取周扫方式工作的长波红外告警设备,近距离直接扩展源法误差较大,该方法适用性较差。远距离小源法是对周扫方式工作的长波红外告警设备进行标定的有效手段,但如何合理选择标定距离以提高其标定精度,是需要重点关注的问题。针对长波红外告警设备参数及特点,找出标定距离与标定误差的对应关系,总结规律并给出最优的标定方案,是未来研究的主要方向。

参考文献:

- [1] 王霄,高思莉,金璐,等.空中目标多波段红外辐射特性描述与仿真分析[J].光子学报,2020,49(5): 0511002-1-11.
WANG Xiao, GAO Sili, JIN Lu, et al. Multi-band infrared radiation characterization and simulation analysis for aerial target[J]. Acta Photonic Sinica, 2020, 49(5): 0511002-1-11.
- [2] 王敏,何明元,张水平,等.通道式可见光近红外卫星遥感辐射定标方法综述[J].遥感信息,2014,29(1): 114-120.
WANG Min, HE Mingyuan, ZHANG Shuiping, et al. Calibration methods of visible-near infrared channel-type satellite radiometric sensor[J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(1): 114-120.
- [3] 吕原,丛明煜,赵旖旎,等.红外相机实时绝对辐射定标技术研究[J].红外与激光工程,2022,51(7): 1-14.
LYU Yuan, CONG Mingyu, ZHAO Yini, et al. Research on real-time absolute radiometric calibration technology of infrared cameras[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7): 1-14.
- [4] 蔡李靖,周凯来,沈桂竹,等.红外热像仪高精度测温标定技术[J].红外与激光工程,2021,50(10): 1-8.
CAI Lijing, ZHOU Kailai, SHEN Guizhu, et al. High-precision temperature measurement and calibration technology of infrared thermal imager[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10): 1-8.
- [5] 凌玲,郝小鹏,谢臣瑜,等.自校准红外光谱仪的辐射定标与外场应用[J].计量学报,2023,44(9): 1395-1401.
LING Ling, HAO Xiaopeng, XIE Chenyu, et al. Radiometric calibration and field application of self-calibrating infrared spectrometer[J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(9): 1395-1401.
- [6] 李宁,杨词银,曹立华,等.3 μm~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.
LI Ning, YANG Ciyin, CAO Lihua, et al. Radiance calibration for 3 μm~5 μm infrared focal plane array[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2319-2325.
- [7] 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.
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.
- [8] 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.
- LI Xiansheng, REN Jianwei, ZHANG Ligu, 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.
- [9] 李宁, 张云峰, 刘春香, 等. 1 m 口径红外测量系统的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2054-2060.
- LI Ning, ZHANG Yunfeng, LIU Chunxiang, et al. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2054-2060.
- [10] 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(8): 137-143.
- SUN Zhiyuan, CHANG Songtao, ZHU Wei. Radiometric calibration method for infrared measuring system with large aperture and wide dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 137-143.
- [11] 邹前进, 刘连伟, 陈前荣, 等. 焦距固定红外探测系统定标实验[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1-5.
- ZOU Qianjin, LIU Lianwei, CHEN Qianrong, et al. Calibration experiments of infrared detecting system with fixed focal length[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 1-5.
- [12] 禄晓飞, 赵慧. 红外辐射测量设备外场标定精度鉴定方法[J]. 红外, 2019, 40(2): 19-24.
- LU Xiaofei, ZHAO Hui. Identification method of outdoor calibration accuracy of infrared radiation measuring equipment[J]. Infrared, 2019, 40(2): 19-24.
- [13] 王东, 赵威, 邵铭, 等. 固定翼飞机地面红外辐射特征测量及分析[J]. 红外技术, 2015, 37(6): 519-522.
- WANG Dong, ZHAO Wei, SHAO Ming, et al. IR radiation measurement and analysis of land airplane[J]. Infrared Technology, 2015, 37(6): 519-522.
- [14] 程丽鹏, 张猛, 王高, 等. 长波红外探测器的辐射定标[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(28): 195-198.
- CHENG Lipeng, ZHANG Meng, WANG Gao, et al. Radiance calibration for long wave infrared detector[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(28): 195-198.
- [15] 陆子凤. 红外热像仪的辐射定标和测温误差分析[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2009.
- LU Zifeng. Calibration and the measurement error analysis of infrared imaging system for temperature measurement[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, 2009.
- [16] 郭汉洲, 郭立红, 杨词银, 等. 基于大气程辐射比例修正的红外辐射特性测量[J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 198-202.
- GUO Hanzhou, GUO Lihong, YANG Ciyin, et al. Infrared radiation measurement based on proportional correction of atmospheric path radiation[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(2): 198-202.