

焦距固定红外探测系统定标实验

邹前进, 刘连伟, 陈前荣, 许振领, 陈洁, 姚梅

(洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 辐射定标数据在目标辐射特性数据测量和仿真试验应用中均有重要作用。首先对焦距固定红外探测系统外场定标方法进行了初步分析。采用近距离直接扩展源法、远距离扩展面源法和平行光管定标法对焦距固定红外探测系统进行了定标实验研究。实验发现: 近距离直接扩展源法对旋转的红外探测系统不适用; 远距离扩展面源法对路径辐射、路径透过率和环境辐射修正较为困难; 平行光管定标法操作较为麻烦, 但考虑目标特性数据的有效性和实用性, 需考虑平行光管定标。文中对焦距固定红外探测系统辐射外场定标技术改造研究、红外目标特性测量系统研制具有较大的参考意义。

关键词: 定标实验; 定标方法; 红外探测系统

中图分类号: TN219 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1204004

Calibration experiments of infrared detecting system with fixed focal length

Zou Qianjin, Liu Lianwei, Chen Qianrong, Xu Zhenling, Chen Jie, Yao Mei

(Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang 471003, China)

Abstract: The calibration data are meaningful in measurement of infrared radiometric characteristics for target and its background. They also play an important role in IR imaging guiding simulation test application. The field radiometric calibration methods for infrared detecting system with fixed focal length are analyzed at first. Three kinds of methods were briefly introduced and compared, and the applicability of different methods was pointed out. In order to compare the characteristic change of three methods, short distance radiometric calibration, a certain distance radiometric calibration and radiometric calibration using of extended area blackbody and collimator were used in this research. And then the experiments by different radiometric calibration methods were investigated. The short distance radiometric calibration results show that it isn't suitable for infrared reconnaissance and warning detecting system. The certain distance radiometric calibration results show that it needs further calculation of environment radiation, path radiation and path transmission. Then, the environmental parameters is loaded in MODTRAN soft ware to predict environment radiation, path radiation and path transmission. But it's difficult to obtain very accurate calculating results. To measure the target radiation characteristics, radiometric calibration using of

收稿日期: 2016-04-05; 修订日期: 2016-05-15

基金项目: 总装预研基金(9140A03040814KG33039)

作者简介: 邹前进(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: zouqianjin1982@163.com

extended area blackbody and collimator is necessary. The research is useful for technical innovation of the out-field radiometric calibration of infrared detecting system. It also can be applied to system design of target characteristics measuring system.

Key words: calibration experiment; calibration method; infrared detecting system

0 引言

红外侦察告警和捕获跟踪系统主要采用被动工作方式探测目标,是近程侦察监视、搜索跟踪的重要手段^[1-2];同时也是开展目标光学特性测量的有益补充。由于不是专用的目标辐射特性测量系统,需要进行相应的技术改造。目标辐射特性数据是装备论证、研制和开发的重要支撑。而红外探测系统测量获得的目标红外图像数据表征了目标辐射温度、辐射亮度或辐射强度等辐射特性分布,反映了目标物理特征^[3]。但目标红外辐射特性研究不但关注目标辐射分布,同时追求目标本身真实特性。结合利用或开发实际红外探测系统测量目标辐射是获取目标真实辐射特性的直接手段,也是当前唯一手段,是目标特性数据研究和应用的基础性工作^[1-3]。但在实际环境下进行的目标特性测量,需要考虑不同时刻、环境参数对红外探测系统辐射测量的影响,需要通过辐射定标和辐射反演等才能得到目标真实的辐射特性^[3-5]。可见,为获得有益的目标红外辐射特性数据需要对红外探测系统开展现场定标。但外场受条件所限,对焦距固定红外探测系统多采用远距离扩展面源法对红外探测系统进行定标^[6-8]。实际实验发现不同距离下所获得定标系数存在一定的差异,不利于目标红外辐射特性的测量,需要开展定标方法选择研究。另外,红外成像探测系统研究、研制和试验过程中,开展相关技术的红外成像仿真验证试验是一种非常重要的研究手段^[9-10]。注入式仿真试验通过图像注入设备经红外探测系统电子线路接口将红外灰度数字图像传递给信息处理子系统进行图像处理,从而考核红外成像探测系统信息处理能力和技术性能,此时光学系统和探测器不工作。仿真试验结果与红外灰度数字图像密切相关,因此如何提高红外图像目标和背景逼真度是红外成像仿真验证试验研究的核心问题之一。红外灰度数字图像一般由仿真亮度图像

实际经红外探测系统响应模型量化获得,因此实际红外成像系统定标参数获取研究,对红外探测系统的仿真实验应用具有重要意义。

文中分别采用近距离扩展面源法、远距离扩展面源法和平行光管定标法^[11],对某一焦距固定红外探测系统进行了定标实验研究,分析不同定标方法对焦距固定探测系统定标的适用性。

1 定标方法分析

红外探测系统的信号传递过程为:目标/背景红外辐射信号经过大气、光学系统传输后会聚到红外探测器上。定标的目的是建立输入辐亮度和探测器数字化输出之间的定量关系。

定标多选用均匀黑体进行线性定标:分别设置黑体工作在两个或多个温度,通过理论计算不同温度下辐射量与其测量灰度联立,可以得到红外探测系统定标系数,定标公式如下公式(1)所示^[11]:

$$H=AL_e+B \quad (1)$$

式中: A 为红外探测系统响应率; B 为红外探测系统响应偏置; L_e 为黑体到达红外探测系统辐射亮度。

当前主要采用近距离直接扩展源法、远距离扩展面源法和平行光管定标法对红外探测系统进行定标。近距离直接扩展源法是将大面积面源黑体放置在红外探测系统入瞳附近,通过调整面源黑体温度,获得不同温度下的红外探测系统灰度值,联立公式(1)获得红外探测系统定标系数;远距离扩展面源法是将面源黑体放置在距离红外探测系统入瞳一定距离处,同样通过调节面源黑体温度,获得红外探测系统定标系数,在无较大面源黑体时,且红外探测系统旋转时多采用此种方法;平行光管定标法是将黑体置于平行光管焦平面,形成无穷远辐射源,通过红外探测系统与平行光管对接,采用相同的方法获得红外探测系统定标系数。对某一实际探测系统采用上述三种定标方法进行实验研究。

2 红外探测系统定标实验

实验中红外探测系统光学系统为透射式光学系统;探测器为制冷型长波红外探测器。实验中定标黑体采用高精度面源黑体,温度精度为 0.01℃,表面发射率为 0.99,工作温度范围 0~50℃。分别将温度设定为 5、10、15、20、25、30、35 和 40℃,面源黑体为良好的朗伯体,结合普朗克公式可以获得不同温度下黑体辐射亮度。采用上述三种方法对红外探测系统进行了定标试验,获得了不同定标方法、不同温度下定标黑体红外灰度图像,利用公式(1)获得了红外探测系统定标系数,结合环境辐射、路径辐射和路径透过率等进行分析。

2.1 近距离直接扩展源法定标结果

近距离直接扩展源法定标数据处理过程如下:

(1) 取不同温度红外图像中心部分成像区域,并将其区域内灰度进行平均;(2) 利用普朗克公式求取不同温度对应的辐射亮度;(3) 对定标数据剔除异常点后,结合公式(1)进行回归分析,得到红外探测系统定标系数。

近距离定标结果如图 1 所示,未修正情况下红外探测系统定标系数 A 值约为 1179、 B 值约为 24329。由图 1 黑体温度 40℃时红外探测系统灰度突然增加,对其进行剔除,再次进行回归分析可以得到定标系数 A 值约为 1101、 B 值约为 24904。

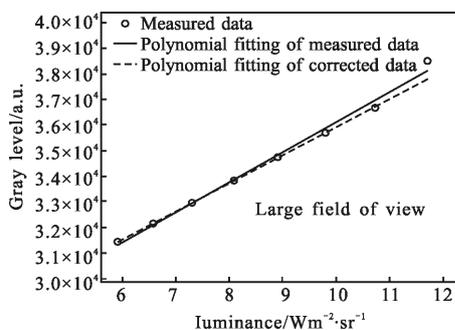


图 1 近距离直接扩展源法定标结果

Fig.1 Radiometric calibration result at short distance

2.2 远距离扩展面源法定标结果

采用 2.1 节相同的方法可以得到红外探测系统远距离扩展面源法定标结果,如图 2 所示,这里未考虑路径辐射和路径透过率。10 m 定标系数 A 约为 975、 B 约为 25916;20 m 定标系数 A 约为 914、 B 约

为 26416;40 m 定标系数 A 约为 815、 B 约为 27170;60m 定标系数 A 约为 726、 B 为约 27895。在距离 40m 之后,定标系数 A 出现剧烈的下降。此时黑体面源成像像素规模大于 4×4,理论上满足理想成像要求。下文将设计相应的实验查看不同成像大小下面源黑体灰度变化情况。

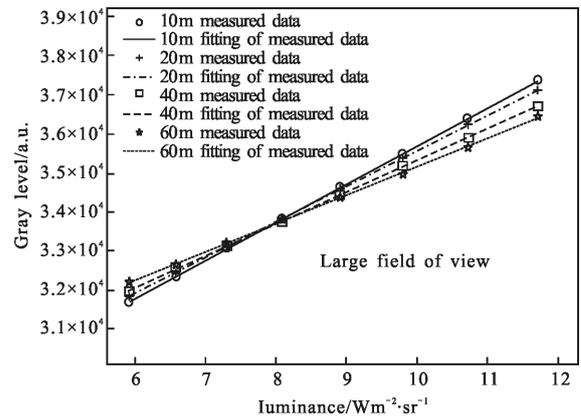


图 2 远距离扩展面源法定标结果

Fig.2 Radiometric calibration result at a long distance

2.3 平行光管定标法定标结果

同样可以得到红外探测系统平行光管定标结果,如图 3 所示,修正前定标系数 A 约为 1081、 B 约为 27658,修正后定标系数 A 约为 1080、 B 约为 27665。两种相差不大。

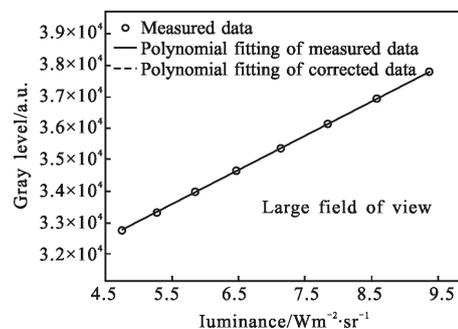


图 3 平行光管定标结果

Fig.3 Radiometric calibration result by using collimator

3 定标结果分析

从理论上,两个温度点就可以确定红外探测系统的定标系数 A 和 B 。对于近距离直接扩展源法,温度由 5℃开始,每两个温度点采用公式(1)计算一次

定标系数,可以得到近距离直接扩展源法不同相邻温度点的定标系数 A 如表 1 所示。可见其定标系数 A 变化较为剧烈。

表 1 近距离直接扩展源法相邻温度点定标结果

Tab.1 Result of radiometric calibration result at shortage distance

Two-point temperature / $^{\circ}\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35
Calibration A	1 068	1 114	1 124	1 103	1 090	1 090	1 841

可以看出外场试验中如果选择近距离定标,由于系统旋转,定标黑体无法紧贴旋转的光学系统,采用简单的、人工操作的两点定标,定标结果必然存在一定的偶然性。另外如果红外探测系统焦距较大,对近距离放置的黑体晃动等将更加敏感。对后期目标辐射特性计算带来一定影响。

对于远距离扩展面源法,定标系数随距离变化较为剧烈。在距离 60 m 情况下,面源黑体在红外探测系统仍能成数个像素,考虑理想成像,理论上只需要考虑大气路径辐射和透过率。文中使用 MODTRAN4.0 计算得到 60 m 距离下路径辐射为 $0.3033\text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$,路径透过率为 0.963 0,得到修正后定标系数 A 约为 754, B 约为 27 667。较其他定标方法结果仍有一定差别。

为了实验查看不同成像大小下面源黑体灰度变化情况。将上述黑体温度设置为 30°C ,放置在红外系统前 20 m 处。通过调焦使得黑体在红外系统中理想成像。在黑体前放置不同孔径大小的挡板控制黑体成像面积,取未遮挡成像区域中心列灰度,可以得到不同孔径大小下成像区域中心列灰度变化情况,如图 4 所示。

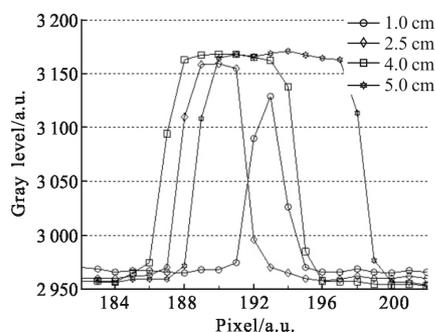


图 4 不同孔径大小灰度变化情况

Fig.4 Gray change of different aperture

根据红外系统瞬时视场,在 20 m 距离下像素成像区域为 $0.5\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$ 。在孔径大小为 1 cm 时,未遮挡区域黑体理想成像大小为 2×2 个像素;孔径大小为 2.5 cm 时,黑体理想成像大小为 5×5 ,从图像上看成像区域略大于上述像素规模。但在孔径为 1 cm 和 2.5 cm 情况下,黑体成像灰度明显下降。孔径为 1 cm 时成像区域灰度下降 31,约为黑体背景灰度差的 16%。可见即使在理想成像情况下,定标黑体成像区域大小将对定标响应灰度产生较大影响,此时周围环境辐射对定标结果带来了较大影响。而焦距固定红外探测系统由于其探测目标距离较远,本身对定标黑体非理想成像,产生离焦模糊;当黑体成像区域较小时,更容易使得成像区域黑体灰度发生变化,影响定标结果。可见在外场远距离扩展点源法需要较大的大面源的黑体,且需要更加精确的路径辐射、透过率和环境辐射修正。因此选择远距离扩展面源法定标应更加慎重。

对于平行光管定标法,其定标结果较为稳定,一致性好。当前未采用其进行外场定标的原因是平行光管体积较大,操作较为麻烦。但对于红外目标特性测量系统、特别是需要旋转的红外探测系统定标技术改造,应考虑研制和使用机动便携的平行光管定标系统对其进行定标,同时使用大面积均匀挡板隔离减少背景辐射对定标的影响,以保障目标特性数据的有效性和实用性。

4 结 论

对焦距固定红外探测系统定标进行了试验研究和分析,指出:近距离直接扩展源法操作简单,但需要直径较大的面源黑体和紧贴红外探测系统,对旋转的红外探测系统不适用,且容易人为引入误差;远距离扩展面源法由于非理想成像,一般成像面积较小、路径辐射和路径透过率修正较为困难,容易引人较大定标误差;平行光管定标结果较为稳定,但操作较为麻烦、便携性差,但考虑目标特性数据的有效性和实用性,特别针对红外目标特性测量系统和需要旋转的红外探测系统技术改造,需要考虑研制机动、便携的平行光管定标设备。

研究结果对焦距固定红外探测系统辐射外场定标研究、红外目标特性测量系统研制具有参考意义。但仍需进一步开展不同焦距红外探测系统平行光管

定标研究, 分析平行光管杂光辐射等对不同定标系数的影响。

参考文献:

- [1] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Ji Hua, et al. Application of the chalcogenide glass in modern infrared thermal imaging systems[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 449-454. (in Chinese)
白瑜, 廖志远, 季华, 等. 硫系玻璃在现代红外热成像系统中的应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 449-454.
- [2] Han Guangyu, Cao Lihua, Zhang Wenbao. Design of ground-based optical radiation signature measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 551-556. (in Chinese)
韩光宇, 曹立华, 张文豹. 地基目标光学辐射特性测量系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 551-556.
- [3] Liu Decheng, Zhang Guoying. Flight test measurement of infrared radiation characteristics of an airplane [J]. *Flight Test*, 2003, 19(2): 22-26. (in Chinese)
刘德成, 张国英. 飞机红外辐射特性飞行试验测量 [J]. *飞行试验*, 2003, 19(2): 22-26.
- [4] Wei Heli, Chen Xiuhong, Zhan Jie, et al. Atmosphere correction in the measurement of infrared radiation [J]. *Journal of Atmosphere and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 472-478. (in Chinese)
魏合理, 陈秀红, 詹杰, 等. 红外辐射测量的大气修正[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(6): 472-478.
- [5] Han Yuge, Xuan Yimin. Effect of atmosphere transmission on IR radiation feature of target and background[J]. *Applied Optics*, 2002, 23(6): 8-11. (in Chinese)
韩玉阁, 宣益民. 大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响[J]. *应用光学*, 2002, 23(6): 8-11.
- [6] 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. (in Chinese)
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.
- [7] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei, et al. Radiation calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibrations [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 22(8): 2254-2260. (in Chinese)
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, 22(8): 2254-2260.
- [8] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Simplifying method of radiance calibration for MWIR detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 43(7): 2132-2137. (in Chinese)
孙志远, 常松涛, 朱玮. 中波红外探测器辐射定标的简化方法. *红外与激光工程*, 2015, 43(7): 2132-2137.
- [9] Liu Mingqi, Wang Siyuan, He Yuqing, et al. Bullet radiation detection range analysis based on multiple infrared visual range prediction models [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 636-642. (in Chinese)
刘明奇, 王思远, 何玉青, 等. 采用多种红外视距模型的子弹辐射探测系统作用距离分析 [J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 636-642.
- [10] Wang Ying, Huang Jianming, Wei Xiangquan. Infrared imaging simulation of space target in orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2594-2597. (in Chinese)
王盈, 黄建明, 魏祥泉. 空间目标在轨红外成像仿真[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2594-2597.
- [11] Lu Zifeng. Calibration and the measurement error analysis of infrared imaging system for temperature measurement [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2009: 20-30.
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: 20-30.