

文章编号: 1672-8785(2021)09-0026-04

## 红外焦平面区域选取对辐射定标的影响分析

李桂芝 贾海萨 韩 璐 赵巨波\*

(中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000)

**摘 要:** 红外辐射定标是获取目标红外辐射特性的基础技术之一。辐射定标精度对后续目标的辐射特性测量具有重要的影响。针对中波红外辐射定标时探测靶面像元大小的选取, 研究了其对辐射定标中系统线性度的影响。基于  $640 \times 520$  元中波红外焦平面阵列, 选取中心像元、中心  $100 \times 100$  区域、中心  $200 \times 200$  区域以及全靶面区域进行了研究。在高温段, 中心  $20 \times 20$  区域的随机误差为  $5.27\%$ , 中心  $100 \times 100$  区域的最小误差为  $0.01\%$ 。在低温段, 中心  $20 \times 20$  区域的随机误差为  $1.78\%$ , 中心  $100 \times 100$  区域的最小误差为  $0.45\%$ 。在一定靶面区域内, 随着所选靶面的增大, 误差逐渐减小。研究结果对红外探测器辐射定标靶面的选取具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 红外成像; 焦平面阵列; 辐射定标; 红外探测器

中图分类号: O432.1 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.09.004

## Analysis of the Influence of Infrared Focal Plane Region Selection on Radiometric Calibration

LI Gui-zhi, JIA Hai-sa, HAN Lu, ZHAO Ju-bo\*

(No. 92941 Unit of PLA, Huludao 125000, China)

**Abstract:** Infrared radiometric calibration is one of the basic technologies to obtain the infrared radiation characteristics of the target. The accuracy of radiation calibration has an important influence on the subsequent target's radiation characteristic measurement. Aiming at the selection of the pixel size of the detection target during the mid-wave infrared radiation calibration, the influence on the linearity of the system during the radiation calibration is studied. Based on  $640 \times 520$  mid-wave focal plane array, the central pixel,  $100 \times 100$  central area,  $200 \times 200$  central area and the whole target area are selected for research. In the high temperature section, the random error in the  $20 \times 20$  area is  $5.27\%$ , and the minimum error in the center pixel  $100 \times 100$  area is  $0.01\%$ . In the low temperature section, the random error of the  $20 \times 20$  area is  $1.78\%$ , and the minimum error in the center pixel  $100 \times 100$  area is  $0.45\%$ . In a certain target area, as the selected target surface increases, the error gradually decreases. The research results have certain engineering application value for the selection of infrared detector radiation calibration target surface.

收稿日期: 2021-06-05

作者简介: 李桂芝(1967-), 女, 山东寿光人, 正高级工程师, 主要研究方向为光电测量技术及光学装备应用。

\*通讯作者: E-mail: 811074631@qq.com

**Key words:** infrared imaging; focal plane array; radiation calibration; infrared detector

## 0 引言

在靶场测控领域, 红外探测器具有重要的应用前景与价值, 被广泛应用于军事侦察、工业测量等领域。与可见光相比, 红外光的作用距离更远, 且不受白天和夜晚的限制; 与雷达相比, 红外探测属于被动探测, 隐蔽性更强。随着探测器制造水平的不断提高, 红外焦平面探测器被广泛应用于定量辐射测量, 以获取目标的辐射特性, 从而更好地分析目标属性和识别目标。因此, 它具有广阔的应用前景。

本文针对红外辐射特性测量中的辐射定标问题, 基于探测器的线性度对辐射定标精度的影响, 进行了数据分析。首先, 阐述了红外辐射定标的基本原理; 然后基于中波红外探测器和高精度黑体进行了定标数据采集; 最后对选取的不同大小区域的定标数据进行了分析。研究结果对探测器大小选取具有一定的指导意义。

## 1 红外辐射定标的基本原理

系统红外辐射定标可以消除测量自身的误差<sup>[7]</sup>。现在常见的辐射定标方法主要包括近距离定标法和远距离成像定标法。近距离定标法又包括近距离扩展源定标法和平行光管定标法。其中, 扩展源定标法主要是用理想的标准面源黑体对系统进行定标。该方法可以一次实现全靶面数据采集, 定标效率高, 主要应用于中、长波的定标, 其原理如图 1 所示。平行光管定标法是将标准定标源的辐射能利用平行光管扩束, 覆盖系统, 实现定标。该方法主要用于短波与中波的定标。远距离成像定标法是将标准源拉开一定距离, 然后利用标定源的已知亮度实现对系统的定标。常见的远距离成像定标法有恒星定标法和标准定标场定标法<sup>[8-10]</sup>。

下面介绍辐射定标的能量传递关系。若光学系统的主光线与光轴的夹角为  $\theta_{i,j}$ , 则其对应的立体角  $\Omega_{i,j}$  为<sup>[11]</sup>

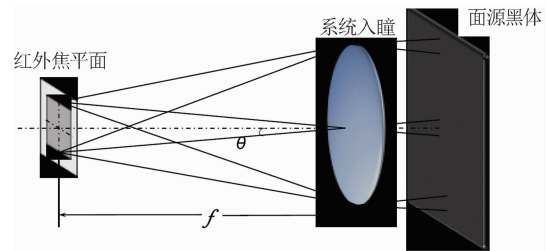


图 1 近距离面源黑体定标法

$$\Omega = \frac{A_d \cdot \cos\theta}{(f/\cos\theta)^2} = \frac{A_d \cdot \cos^3\theta}{f^2} \quad (1)$$

式中,  $A_d$  为单个像元的面积,  $f$  为光学系统的焦距。

假设入射光瞳的直径为  $D$ , 则在最终成像红外焦平面阵列位置  $(i, j)$  上接收到的辐射能为每个像元所接收的辐射通量  $\Phi$ , 即

$$\begin{aligned} \Phi(T) &= \tau_{opt} \cdot A_d \cdot \cos\theta \cdot \Omega \cdot L(T_b) \\ &= \frac{\tau_{opt} \cdot A_d \cdot \cos^4\theta}{f^2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L(T_b) \\ &= k_1 \cdot L(T_b) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\tau_{opt}$  为成像光学系统的透过率,  $T_b$  为黑体的辐射温度,  $L(T_b)$  对应黑体温度的辐射亮度。  $L(T_b)$  可以表述为

$$L(T_b) = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T_b) d\lambda \quad (3)$$

式中,  $E(\lambda, T_b)$  为辐射源发出的辐射照度。制冷型红外辐射特性系统输出的灰度值与辐射源发出的辐射通量成正比。

对长焦系统来说, 其视场角一般很小, 因此  $\cos^4\theta$  近似等于 1。因此,  $k = \tau_{opt} \cdot A \cdot \cos^4\theta \cdot \pi \cdot D^2 / 4f^2$  是一个与辐射温度或辐射亮度无关的量。

由式(3)可得到目标发出的辐射亮度与红外成像系统输出的响应值(单位为 DN)的关系:

$$G_{ij} = R_{ij} \cdot L(T_b) + B_{i,j} \quad (4)$$

式中,  $G_{i,j}$  为红外测量系统的数字灰度,  $R_{i,j}$  为响应率,  $B_{i,j}$  为系统的噪声偏置(单位为 DN)<sup>[12-14]</sup>。

从上述推导过程中可以发现,由于光线入射角度的影响,其在每个像元的定标系数并不相同。因此,本文利用系统不同区域的定标数据来分析其对最终定标误差的影响。

## 2 实验数据处理

### 2.1 辐射定标数据分析

验证时选用不同大小的区域进行分析,试验采用制冷型中波红外焦平面阵列。所用系统的具体指标见表1。

表1 红外辐射测量系统的参数

参数名称	数值
波段	3.7~4.8 $\mu\text{m}$
像元数	640×512
像元大小	15 $\mu\text{m}$
位深	14

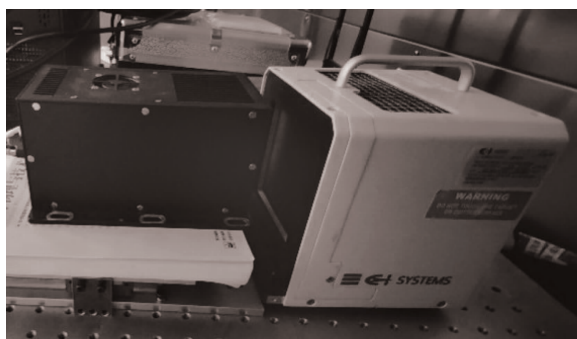
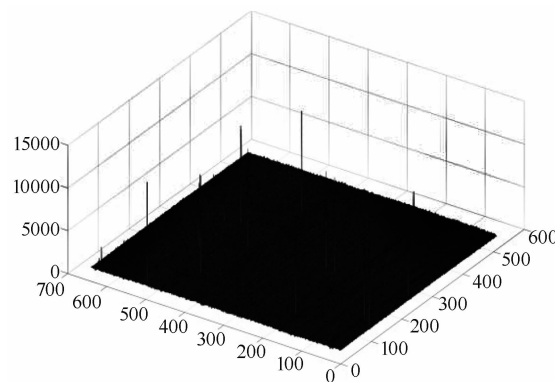


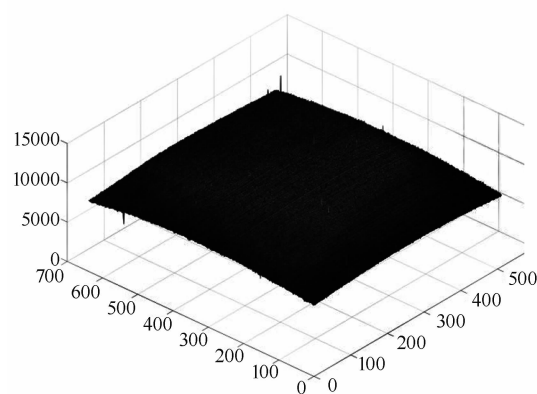
图2 辐射定标现场

中波红外焦平面探测器辐射定标采用 200 mm×200 mm 大小的高精度面源黑体。该标准辐射源的有效辐射面近距离定标可以覆盖探测器的光瞳。系统的标定场景如图2所示。验证时选取中心像元(320, 256)、中心 20×20 区域、中心 100×100 区域、中心 200×200 区域和全靶面进行分析。由于辐射定标时没有成像光学系统,饱和温度相对较低。因此将其分为低温区和高温区。辐射定标选择低温定标(-261~300 K)和高温定标(306~346 K)。图3(a)给出了低温段某温度下的原始图像。可以看出,图像在中心位置上具有良好的均匀性,在边缘位置上存在个别坏点,出现了响应不一致的现象。这种不均匀性会影响辐射定标。图3(b)为高温段的原始图像。高温段成像靶面出

现中心高、边缘低的现象,光学渐晕现象逐渐明显。分别分析图4所示的辐射定标结果。表2列出了系统在各个情况下的定标方程。



(a) 低温段原始图像



(b) 高温段原始图像

图3 原始图像

表2 低温段的辐射定标方程

区域	定标方程
(320, 256)	$y=2407x+973$
中心 20×20 区域	$y=2407x+1050$
中心 100×100 区域	$y=2400x+1033$
中心 200×200 区域	$y=2384x+1039$
全靶面	$y=2235x+1062$

表3 高温段的定标方程

区域	定标方程
(320, 256)	$y=2434x+963$
中心 20×20 区域	$y=2441x+1036$
中心 100×100 区域	$y=2435x+1019$
中心 200×200 区域	$y=2418x+1026$

红外成像光学系统的中心位置不受入射角度的影响,其定标方程相对较小。因此,只需分析其他情况下的相对误差。可以看出,随着

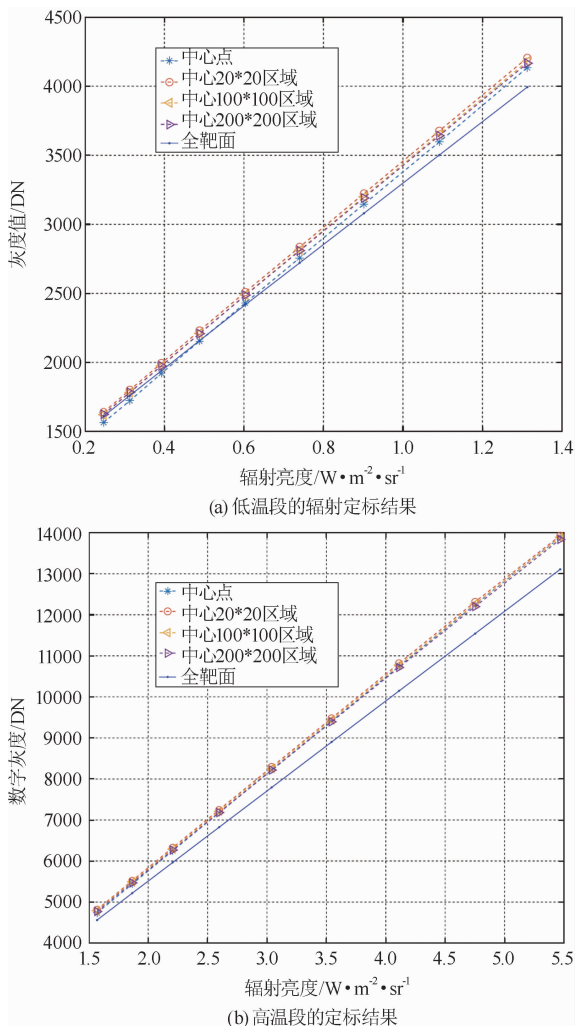


图 4 辐射定标结果

距离中心像元位置的偏离, 输入光的能力变弱, 导致系统的响应增益减小。其次, 由于杂散辐射的增多, 系统的响应偏置增大。

从定标误差的角度分析, 在一定的靶面区域内, 像元数的增加有利于消除随机误差。考虑到边缘像元的跟随误差大, 误差又增大。如图 5(a)所示, 在低温段, 中心  $20 \times 20$  区域的随机误差为 1.78%, 中心  $100 \times 100$  区域的最小误差为 0.45%。如图 5(b)所示, 在高温段, 中心  $20 \times 20$  区域的随机误差为 5.27%, 中心  $100 \times 100$  区域的最小误差为 0.01%。

### 3 结论

本文就辐射定标靶面像元数的拟合像元区域和数量对辐射定标的影响进行了初步探究。从理论上推导了不同位置像元与辐射通量的关

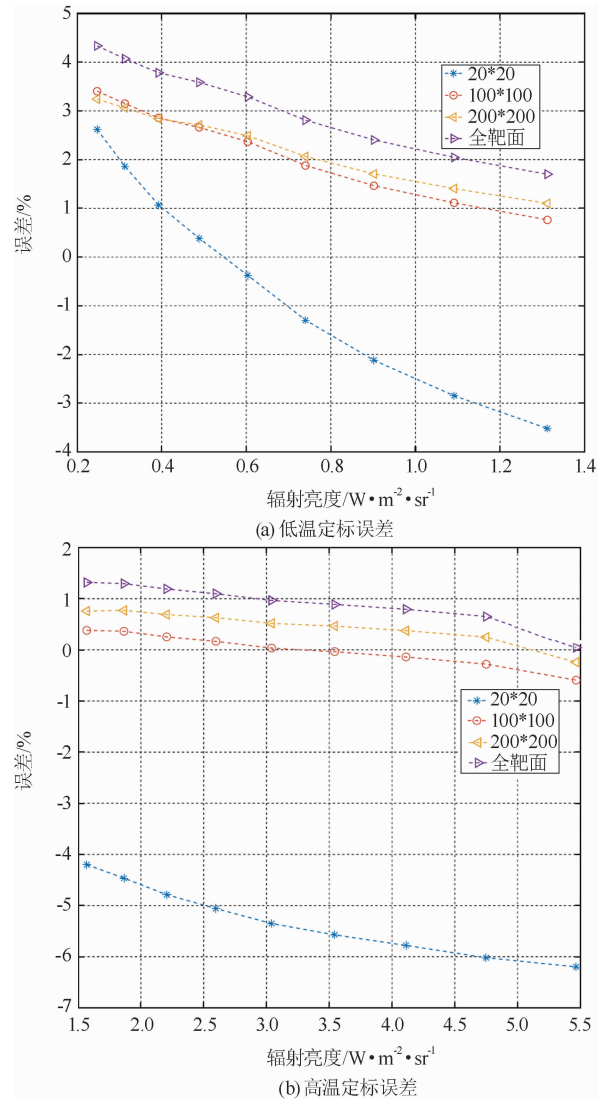


图 5 辐射定标误差

系, 并基于制冷型中波红外探测器定标数据选择中心像元、 $100 \times 100$  区域、 $200 \times 200$  区域以及全靶面的定标数据进行了分析, 证实了不同区域的辐射定标拟合对定标结果的影响。在一定的靶面区域内, 随着靶面像元数的增加, 定标误差逐渐减小。该结果对辐射定标中的靶面选择具有指导意义, 并对红外辐射特性的定标具有一定的工程应用价值。

### 参考文献

[1] 李宁, 杨词银, 曹立华, 等.  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  红外焦平面阵列的辐射定标 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2319-2325.

(下转第 41 页)

- merican Journal of Applied Sciences*, 2009, **6** (1): 157–166.
- [7] 彭光雄, 沈蔚, 胡德勇, 等. 基于烟羽掩膜的森林火点 MODIS 探测方法研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(3): 185–189.
- [8] 李亚君, 郑伟, 陈洁, 等. 气象卫星遥感火情监测应用 [J]. *上海航天*, 2017, **34**(4): 62–72.
- [9] 刘玉洁, 杨忠东. *MODIS 遥感信息处理原理与算法* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 全国卫星气象与空间天气标准化技术委员会. 卫星遥感火情监测方法 第 2 部分 火点判识: QX/T 344.2-2019 [S]. 北京: 中国气象局, 2019.
- [11] Giglio L, Descloitres J, Justice C O, et al. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **87**: 273–282.
- [12] Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of sub-pixel resolution [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, **11**: 221–229.
- [13] 刘诚, 李亚军, 赵长海, 等. 气象卫星亚像元火点面积和亮温估算方法 [J]. *应用气象学报*, 2004, **15**(3): 273–280.
- [14] 刘诚, 李亚军, 阎华, 等. 气象卫星遥感热源点强度估算方法初探 [J]. *气象*, 2003, **29**(S1): 41–45.
- [15] 全国卫星气象与空间天气标准化技术委员会. 卫星遥感火情监测方法 第 3 部分 火点强度估算: QX/T 344.3-2020 [S]. 北京: 中国气象局, 2020.
- [16] 何阳, 杨进, 马勇, 等. 基于 Landsat-8 陆地卫星数据的火点检测方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, **35**(5): 600–608.
- [17] 郑伟, 陈洁, 唐世浩, 等. 基于 FY-3D/MERSI-II 远红外数据的火情监测研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2020, **39**(1): 120–127.
- [18] 贺宝华, 陈良富, 陶金花, 等. 基于观测几何的环境卫星红外相机遥感火点监测算法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(2): 104–109.

(上接第 29 页)

- [2] 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, 2010.
- [3] 张磊, 郑小兵, 李双, 等. 高精度中远红外辐射定标技术研究 [J]. *红外技术*, 2006, **27**(3): 178–183.
- [4] 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.
- [5] 李周. 地基靶场红外辐射特性测量系统宽动态辐射测量研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [6] 乔铁英, 蔡立华, 李宁, 等. 基于红外辐射特性系统实现对面目标测量 [J]. *中国光学*, 2018, **11**(5): 804–811.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 常松涛. 红外经纬仪结构设计及提高其辐射测量精度的关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [10] 田棋杰, 李周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法 [J]. *光学学报*, 2017, **39**(10): 191–199.
- [11] 黄智国. 空间目标地基红外探测技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [12] Vigil M L, Witte D J, Levan P D, et al. Sensor Suite for the Advanced Electro-Optical System (AEOS) 3.6 m Telescope [C]. *SPIE*, 1996, **2819**: 151–169.
- [13] 孙航. 大口径红外辐射特性测量设备目标识别与跟踪关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [14] Cohen M, Walker R G, Barlow M J, et al. Spectral Irradiance Calibration in the Infrared. I: Ground-based and IRAS Broadband Calibrations [J]. *The Astronomical Journal*, 1992, **104**(4): 1650–1657.