

大型军用红外成像模拟器辐射校准方法研究

杨森, 张厚庆*

东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040

摘要 在采用红外辐射计开展大型军用红外成像模拟器视场光阑变化时的辐射校准时,需要采用像斑未充满探测器的测量模式。然而,现有研究未考虑该测量模式下标定和测量成像不一致对测量结果的不利影响,导致大型军用红外成像模拟器视场光阑变化时的辐射校准引入较大测量误差。针对上述问题,首先理论研究不同成像状态下探测面响应非均匀性问题对响应电压的影响。在此基础上,为降低成像不一致引入的测量误差,提出基于标定和测量成像一致性的辐射校准方法。最后,开展不同成像状态下红外辐射计标定实验和某型号红外成像模拟器辐射测量实验。实验结果表明,标定与测量成像状态不一致会引入较大测量误差。而基于本文方法可以有效避免被测源视场光阑变化时因成像状态不一致问题引入的测量误差,保证了大型军用红外成像模拟器视场光阑变化时辐射校准的有效性。

关键词 成像系统; 大型军用红外成像模拟器; 辐射校准; 像斑未充满探测器; 成像一致性

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2411003

Radiometric Calibration Method of Large Military Infrared Imaging Simulator

Yang Sen, Zhang Houqing*

College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China

Abstract In the radiometric calibration of a large military infrared imaging simulator when the field stop changes, the infrared radiometer needs to be used under the measurement mode of the underfilled detector. Yet, existing studies have neglected the adverse influences of the image inconsistency between calibration and measurement under this mode on the measured results that lead to large errors in radiometric calibration of large military infrared imaging simulators when the field stop changes. In response to the above problem, theoretical research is conducted on the effect of detector surface heterogeneity on the response voltage in different imaging states. Then, a radiometric calibration method based on the image consistency of calibration and measurement is proposed to reduce the measurement error caused by image inconsistency. Finally, experiments are carried out on calibration of the infrared radiometer and radiation measurement of a certain type of infrared imaging simulator in different imaging states. Experimental results show that if the imaging states of calibration and measurement are not consistent, a large measurement error will be produced. The measurement error introduced by the image inconsistency between calibration and measurement when the field stop changes can be effectively avoided by the proposed radiometric calibration method based on the image consistency of calibration and measurement, which ensures the effectiveness of radiometric calibration of large military infrared imaging simulators.

Key words imaging systems; large military infrared imaging simulator; radiometric calibration; underfilled detector; image consistency

OCIS codes 110.3080; 120.1680; 120.4640

收稿日期: 2021-05-19; 修回日期: 2021-06-08; 录用日期: 2021-06-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2572019BF01)

通信作者: *1695641968@qq.com

1 引言

军用红外成像模拟器针对真实作战环境中的目标、背景、干扰源等红外场景的红外辐射特性进行等效模拟,是检验红外制导武器抗干扰能力、目标识别能力的重要工具^[1]。其输出红外辐射特性的准确性直接关系到武器装备的性能评测,因此需要对其进行定期的辐射校准以保证有效性^[2-3]。

按照仿真原理,军用红外成像模拟器可分为两类:1)仅基于辐亮度变化的中小型模拟器;2)基于辐亮度和视场光阑变化的大型模拟器。目前针对中小型模拟器的研究较多,李旭东等^[4]采用红外傅里叶变换式光谱辐射计,实现了外场用模拟器 3.2~4.8 μm 波段光谱辐亮度测量。张建萍等^[5]采用两种红外相机校准模拟器输出辐射,3.7~4.8 μm 和 8.0~9.2 μm 波段的测量不确定度分别为 4.2% 和 3.5%。王智平等^[6]简化了红外辐射特性数据处理过程,利用中波红外辐射计分别对点源与面源进行辐射测量。然而,上述研究采用像斑充满探测器的测量模式,仅能实现中小型模拟器辐亮度变化时的辐射测量,无法实现大型模拟器视场光阑变化时的辐射测量。为此,Yang 等^[7-8]提出像斑未充满探测器的测量模式,可同时实现大型模拟器辐亮度和视场光阑变化时的辐射测量。但是,其仅针对固定视场光阑的大型模拟器开展实验,未考虑视场光阑变化时因标定和测量成像不一致对校准结果的影响。事实上,受探测面响应非均匀性问题影响^[9],若标定和测量时探测面成像光斑不同,即使红外辐射计接收辐射相同,其标定和测量电压也会存在偏差,即标定和测量成像状态不同时的响应电压偏差,会导致大型模拟器视场光阑变化时的辐射校准因测量误差较大而失效。

针对上述问题,本文首先理论研究不同成像状态下探测面响应非均匀性问题对响应电压的影响,并针对性地提出基于标定和测量成像一致性的辐射校准方法。然后,实验验证标定与测量成像不一致对辐射测量结果的影响,证明本文提出的基于成像一致性的辐射校准方法的有效性。

2 大型军用红外成像模拟器辐射测量体系

大型军用红外成像模拟器的两项重要性能指标分别为弹-目距离和弹-目接近速度。与中小型模拟器相比,大型模拟器加入视场光阑机构进行仿真功

能扩展,因此需要采用像斑未充满探测器的测量模式才能实现全仿真状态下的性能评估,此时红外辐射计视场角 ω_r 大于模拟器视场角 ω_i 。下面以弹-目距离仿真为例,介绍大型军用红外成像模拟器辐射测量体系。

1) 近距离(≤ 1400 m)弹-目距离模拟 $L_{\min} \rightarrow L_{\max}$

采用视角法实现近距离(≤ 1400 m)弹-目距离模拟,通过调整视场光阑直径 D_t 改变模拟器视角,进而为导引头提供不同的目标距离。 D_t 与弹-目距离 l 的关系为

$$\frac{D_t}{f_t} = \frac{y}{l}, \quad (1)$$

式中: f_t 是光学系统焦距。此时模拟器输出辐射 $E_{\max} \rightarrow E_{\min}$ 减小,辐射源辐射亮度 $L_i(\lambda)$ 不变,光学系统透过率 τ_{\max} 不变,视场角 $\omega_{\max} \rightarrow \omega_{\min}$ 减小。此时红外辐射计响应电压 V 随 ω_t 变化为

$$\begin{cases} V_{\text{kmax}} = K\omega_{\text{tmax}}\tau_{\text{tmax}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_i(\lambda) d\lambda \\ V_{\text{kmin}} = K\omega_{\text{tmin}}\tau_{\text{tmax}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_i(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (2)$$

2) 中远距(≥ 1400 m)弹-目距离模拟 $L_{\min} \rightarrow L_{\max}$

对于中远距离(≥ 1400 m)的弹-目距离模拟,受视场光阑大小限制,不能再采取视角法,而需要改用辐射照度法。通过调整能量衰减机构透过率实现 1400~4900 m 的弹-目距离模拟。此时模拟器输出辐射 $E_{\max} \rightarrow E_{\min}$ 减小,辐射源辐射亮度 $L_i(\lambda)$ 不变,视场角 ω_{\min} 固定,光学系统透过率 $\tau_{\max} \rightarrow \tau_{\min}$ 变小。此时红外辐射计响应电压 V 随 τ_t 变化为

$$\begin{cases} V_{\text{jmax}} = K\omega_{\text{tmin}}\tau_{\text{tmax}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_i(\lambda) d\lambda \\ V_{\text{jmin}} = K\omega_{\text{tmin}}\tau_{\text{tmin}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_i(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (3)$$

由(3)式可知,采用像斑未充满探测器的测量模式时,红外辐射计可以在原有像斑充满探测器测量模式基础上响应被测源 ω_t (光阑直径 D_t) 引起的辐射变化,即同时实现模拟器辐亮度和视场光阑变化时的辐射测量。

3 成像状态对辐射测量影响的理论研究

采用红外辐射计进行大型军用红外成像模拟器辐射测量时,所测得的辐射值溯源至标准直辐射源。针对像斑未充满探测器的测量模式,当标准源和模拟器 D/f 不同时,二者在红外辐射计内部探测器探测面上的像斑不同,即成像状态存在差异。受

探测器探测面非均匀性问题影响,上述差异会导致标定和测量时的响应电压偏差,进而产生辐射溯源误差。下面分为两种条件研究成像状态对辐射溯源的影响。

条件 1: 设标准源和被测源的视场光阑直径分别为 D_c 和 D_t , 光学焦距分别为 f_c 和 f_t 。当 $D_t/f_t = D_c/f_c$ 时, 标定和测量成像状态一致, 即像斑位置和大小相同, 不需考虑标定和测量时系统响应度 R_c 和 R_t 受探测面非均匀性的影响, 标定和测量中辐射与电压的关系为

$$\frac{V_t}{V_c} = \frac{E_t}{E_c} \quad (4)$$

若 $E_t = E_c$, 则有 $V_t = V_c$, 即标定和测量成像状态一致时, 辐射计接收辐射 E 相同时响应电压 V 相同。

条件 2: 当 $D_t/f_t \neq D_c/f_c$ 时, 标定和测量成像状态不一致, 即像斑位置相同但大小不同, 此时需考虑 R_t 与 R_c 受探测面非均匀性的影响, 辐射与电压关系为

$$E_t = \frac{V_t R_c}{V_c R_t} E_c \quad (5)$$

若控制标准源和被测源的辐亮度 L_c 和 L_t , 使得 $D_t/f_t \neq D_c/f_c$ 时 $E_t = E_c$, 则有:

$$\frac{V_t}{V_c} = \frac{R_t}{R_c} \quad (6)$$

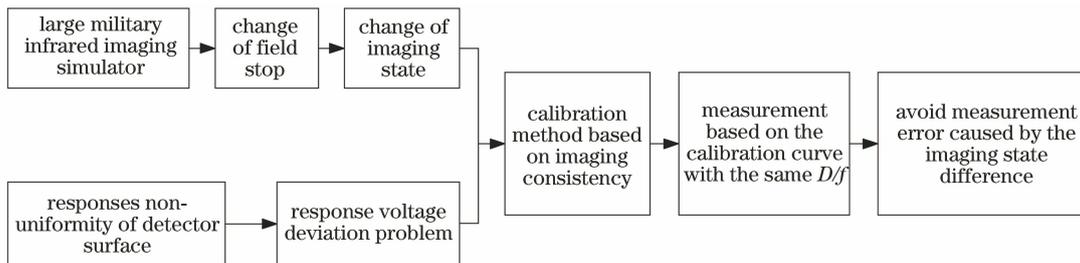


图 1 基于标定和测量成像一致性的辐射校准方法

Fig. 1 Radiation calibration method based on imaging consistency of calibration and measurement

当采用基于标定和测量成像一致性的辐射校准方法时, 由于被测源与标定源在测量系统的成像状态相同, 可以忽略探测器探测面非均匀性问题对辐射测量的不利影响, 避免了标定和测量成像状态不同时由响应电压偏差问题引入的测量误差。

5 实验验证

本节首先开展针对标准源不同视场光阑的红外辐射计响应电压测量, 获取不同成像状态下的标定曲线。然后基于标定好的红外辐射计开展某型号红外成像模拟器视场光阑变化时的辐射测量, 实验验

证了标定与测量成像状态不同对辐射测量的影响, 证明了本文提出的基于标定和测量成像一致性的辐射校准方法的有效性。

$$\frac{V_t}{V_c} = K_R \quad (7)$$

由(7)式可知, 当 $D_t/f_t \neq D_c/f_c$ 但是 $E_t = E_c$ 时, $V_t \neq V_c$, 即标定和测量成像状态不同时, 辐射计接收辐射 E 相同时响应电压 V 不同。探测面响应非均匀性问题会引入电压偏差因子 K_R , 引起标定和测量成像状态不同时的响应电压偏差, 从而增大辐射溯源误差。

4 基于标定和测量成像一致性的辐射校准方法

针对像斑未充满探测器的测量模式, 为降低标定和测量成像状态不同时引入的测量误差, 本文提出基于标定和测量成像一致性的辐射校准方法, 原理图如图 1 所示, 具体实施步骤如下:

1) 在进行被测源视场光阑为 D_t 的辐射测量时, 若标定源与被测源光学焦距 f 相同, 则采用 $D_c = D_t$ 时的标定曲线进行辐射测量。

2) 在进行被测源视场光阑为 D_t 的辐射测量时, 若标定源与被测源光学焦距 f 不同, 则采用 $D_c/f_c = D_t/f_t$ 时的标定曲线进行辐射测量。若 D_t 发生变化, 则采用的标定曲线也相应变换。

5.1 不同成像状态下标定曲线测量实验

采用标准直辐射源对红外辐射计进行标定, 标准直辐射源参数如表 1 所示, 标定装置示意图如图 2 所示。标定过程中, 改变黑体温度和视场光阑直径得到不同的辐射照度输出, 并采集对应条件下的标定电压。标定波段为短波 2.05~2.55 μm , 视场光阑直径 $D_c = 1 \sim 6 \text{ mm}$, 变化间隔为 1 mm, 黑体温度 $T = 200 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$, 变化间隔为 100 $^\circ\text{C}$ 。选用

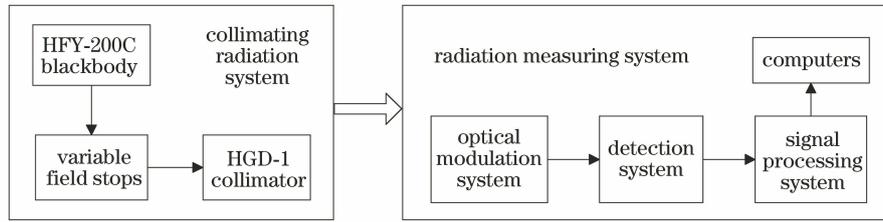


图 2 标定装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calibration equipment

表 1 标准准直辐射源参数

Table 1 Parameters of standard collimating radiation source

Index	Parameter
	Model: HFY-200C
Blackbody	Temperature range: 5-1000 °C
	Temperature precision: ±0.5 °C
Collimator	Structure: reflection
	Focal length: 650 mm
	Exit pupil diameter: 200 mm
Aperture	Structure: round light hole
	Aperture diameter: 0.5-13.5 mm

最大视场光阑直径 $D_c = 13.5$ mm 确定标定基准状态,此时标准源在探测面上像斑与探测面基本同心。

图 3 为不同成像状态下的标定曲线,其中 E_{bc} 为辐射照度计算值, V_c 为修正过的标定电压。由图 3 可知,当视场光阑不同但 E_{bc} 相同时, V_c 不同,即存在不同成像状态下的响应电压偏差,与第 3 节条件 2 中的分析结果相符。

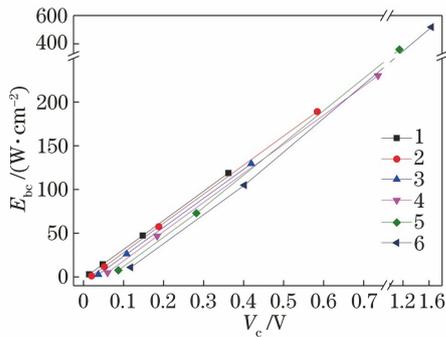


图 3 不同成像状态下的标定曲线

Fig. 3 Calibration curves under different imaging states

5.2 不同成像状态下红外成像模拟器辐射测量实验

基于图 3 所得标定曲线开展某型号红外成像模拟器视场光阑变化时的辐射测量实验,验证本文提出的基于标定和测量成像一致性的辐射校准方法的有效性。为了便于对比,选用的被测模拟器其输出辐射可计算获取。具体测量流程如下。

1) 选取 $D_c = 2$ 时的视场光阑作为特征光阑, $D_c/f_c = 0.0031$ 时的标定曲线作为特征标定曲线,

得到其一阶拟合函数的表达式为

$$E_{bc} = aV_c + b. \quad (8)$$

2) 以(8)式所得拟合函数 $f(V_c, E_{bc})$ 为基准,分别进行被测模拟器 $D_t/f_t = 0.0015$ 、 $D_t/f_t = 0.0031$ 和 $D_t/f_t = 0.0046$ 时的辐射照度测量,得到 E'_{t1} 、 E'_{t2} 和 E'_{t3} 。

3) 将步骤 2 所得 E'_t 和对应条件下 E_t 的计算值进行对比,求得测量偏差的绝对值 δ_L :

$$\delta_L = \frac{|E'_t - E_t|}{E_t}. \quad (9)$$

不同成像状态下的测量误差如图 4 所示。其中, δ_{L1} 、 δ_{L2} 和 δ_{L3} 分别代表被测源 $D_t/f_t = 0.0015$ 、 $D_t/f_t = 0.0031$ 和 $D_t/f_t = 0.0046$ 时的测量误差。由图 4 可知,当采用 $D_c/f_c = 0.0031$ 的标定函数进行 $D_t/f_t = 0.0031$ 的辐射测量时, δ_L 值很小。当采用 $D_c/f_c = 0.0031$ 的标定函数进行 $D_t/f_t = 0.0015$ 和 $D_t/f_t = 0.0046$ 的辐射测量时,受标定和测量成像状态不同引入的响应电压偏差问题影响, δ_L 值很大,已经无法满足测量要求。实验结果表明,采用本文方法避免了因标定和测量成像状态不同时由响应电压偏差问题引入的测量误差,可以有效保证大型军用红外成像模拟器视场光阑变化时的辐射校准精度。

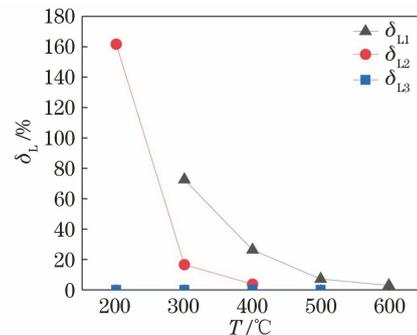


图 4 不同成像状态下的测量误差

Fig. 4 Measurement errors under different imaging conditions

6 结 论

本文提出了基于成像一致性的大型军用红外成像模拟器辐射校准方法,可以避免像斑未充满探测器测量模式下因成像状态不同导致的测量误差,进一步完善了大型军用红外成像模拟器的辐射校准体系。通过对某型号红外成像模拟器的校准应用,证明新方法可以保证被测源视场光阑变化时的校准精度,为大型军用红外成像模拟器全仿真状态下的性能评估提供了有效依据。

参 考 文 献

- [1] Song Y S, Yang J F, Zhao Y Y, et al. Optical system design for infrared target simulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0422007.
宋延松, 杨建峰, 赵意意, 等. 红外目标模拟器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0422007.
- [2] Kaplan S G, Woods S I, Carter A C, et al. Calibration of IR test Chambers with the missile defense transfer radiometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8707: 870709.
- [3] He Y X, Zhang H Y, Si W T, et al. General model for calculating infrared-radiation intensity of aerial target and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0612007.
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): 0612007.
- [4] Li X D, Feng A G, Zhou X N, et al. Radiation characteristics of IR target simulator used in field[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(2): 252-255.
李旭东, 冯爱国, 周新妮, 等. 外场用红外目标模拟器辐射特性测量研究[J]. *应用光学*, 2010, 31(2): 252-255.
- [5] Zhang J P, Yang C Y. Research on the radiation calibration method of infrared target simulator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(9): 2045-2050.
张建萍, 杨词银. 红外目标模拟器辐射校准方法的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(9): 2045-2050.
- [6] Wang Z P, Wu T B, Li Z, et al. A general technology of infrared radiation characteristics measurement[J]. *Infrared*, 2020, 41(8): 29-35.
王智平, 吴统邦, 李周, 等. 一种通用的红外辐射特性测量技术[J]. *红外*, 2020, 41(8): 29-35.
- [7] Yang S, Li C W. Development of two-band infrared radiometer for irradiance calibration of target simulators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(7): 073105.
- [8] Yang S, Li C W. Research on calibration method of relative infrared radiometer[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(2): 023103.
- [9] Liu F F, Wang X, Zhang L. Measurement method of random errors in spot target detection by flat-panel detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0404001.
刘负负, 王旭, 张亮. 面阵探测器点目标探测随机误差度量方法研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0404001.