

# 一种长波红外探测器的快速辐射定标方法

南童凌<sup>1,2</sup>, 沈宏海<sup>1</sup>, 杨名宇<sup>1</sup>, 陈成<sup>1</sup>, 朱丹彤<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 搭建了辐射定标系统,使用高精度的面源黑体作为标准辐射源,对长波红外相机进行辐射定标实验。利用实测数据分析了面阵探测器的响应值与入射辐射、积分时间的关系,确定了辐射定标模型,并在此基础上提出了快速辐射定标方法,即选择2个温度对应2个积分时间组合下的3幅图像,通过数据处理可实现对辐射定标模型中的参数求解。最后,使用420组实测数据中的398组有效数据对该简化辐射定标模型进行了可靠性验证,结果显示,各温度下模型计算值与实测值相对误差均小于1%,拟合度均大于0.999。实验表明,该辐射定标方法在实现对不同积分时间快速定标的同时保证了辐射定标的精度。

**关键词** 光电子学; 红外焦平面阵列; 辐射定标; 面源黑体; 积分时间

**中图分类号** TN215 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.122501

## Fast Radiometric Calibration Method for Long Wave Infrared Detectors

Nan Tongling<sup>1,2</sup>, Shen Honghai<sup>1</sup>, Yang Mingyu<sup>1</sup>, Chen Cheng<sup>1</sup>, Zhu Dantong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Using high-accuracy extend blackbody as the standard radiation source, we set up the radiometric calibration system and perform a radiometric calibration experiment for long wave infrared camera. Based on the practical response data, the relationship of response characteristics with incident radiation and integration time is analyzed, and a mathematical model of radiometric calibration is establish. Thereout, the fast radiation calibration method, which is choose of three pictures under two temperatures at two typical integral time, is proposed. The unknown parameters in the calibration model can be obtained by data processing. Finally, using 398 sets of available data from 420 sets of measured data, we verify the reliability of the simplified radiation calibration model. The results show that the relative error between the calculated and measured values is less than 1%, and the fitting degree is greater than 0.999. Experiments show that the calibration method can ensure the accuracy of rapid radiation calibration under different integral time.

**Key words** optoelectronics; infrared focal plane array; radiometric calibration; extend blackbody; integration time

**OCIS codes** 250.0040; 230.5160; 040.3060

## 1 引言

目标的红外辐射测量是获取目标信息、对目标进行探测识别的基础技术之一。为了精准地获得目标红外辐射特性信息,需要先对红外系统进行辐射定标。随着红外技术的发展及遥感应用需求的增加,国内对辐射定标的需求与日俱增<sup>[1-3]</sup>。实验室辐射定标技术主要包括相对辐射定标和绝对辐射定标。

**收稿日期:** 2017-07-10; **收到修改稿日期:** 2017-07-26

**基金项目:** 国家林业公益性资助项目(201204515)

**作者简介:** 南童凌(1992—),女,硕士研究生,主要从事红外辐射测量方面的研究。E-mail: tracy\_nantl@163.com

**导师简介:** 沈宏海(1976—),男,博士,研究员,主要从事航空光电遥感方面的研究。

E-mail: shenhh@ciomp.ac.cn(通信联系人)

相对辐射定标又称非均匀校正,是在系统入瞳处均匀光照的情况下,确定各像元输出的不均匀性,计算相对定标系数。理想情况下,红外面阵探测器在探测温度一致的辐射源下,输出的红外图像的每个像素灰度值都应该一致,然而,受工艺水平、杂质浓度、晶体缺陷和工作环境等因素的限制,输出的图像是不均匀的,这种响应的不一致性被称为非均匀性,需要预先进行校正。目前,常用的非均匀性校正方法主要有2种:温度定标校正法和基于场景的校正法<sup>[4]</sup>。实验室常用的方法是温度定标校正法中的单点法和两点法。

绝对辐射定标是为了确定探测器输出信号与输入辐射量或目标景物特性参量之间的定量关系,求出绝对辐射定标系数,再通过该系数进行校正的过程。国内,杨词银等<sup>[5-8]</sup>研究了大口径红外光电系统辐射定标及误差分析方法,王建军等<sup>[9-11]</sup>提出了内、外标定结合的定标方法,但以上定标是在积分时间固定的情况下,确定温度与响应的关系。罗茂捷等<sup>[12]</sup>提出了考虑积分时间的辐射定标方法,用最小二乘法拟合得到响应函数,该方法完善了定标模型,但辐射定标过程需采集多组数据进行算法拟合,方法较复杂。

在进行红外辐射测量时,需要根据目标特性选择合适的积分时间,因此,积分时间的辐射定标十分重要,而获取探测器线性工作区域内所有积分时间下的数据是一项较为复杂且低效的工作。为了提高辐射定标效率,本文提出了一种简化的快速辐射定标方法,对长波红外探测器进行了实验室辐射定标测试,实验结果证实了该方法的可靠性,能满足定标精度要求,可实现不同积分时间下的快速定标。

## 2 辐射定标模型

### 2.1 探测器像元响应模型

常用的辐射定标方法主要有3种:近距离扩展源法、直接成像法和平行光管法<sup>[13]</sup>。近距离扩展源法是将面源黑体放在镜头前,覆盖系统入瞳,该方法能实现对光学系统和红外探测器的一体化辐射定标;直接成像法是将黑体置于探测器前较近的位置,使其直接成像在靶面上,实现数据的采集,该方法需多次测量才能完成所有像素的定标;平行光管法通过一次测量即可完成定标过程,用腔型黑体经过平行光管投射到入瞳处,在探测器成像,适用于在室内对大口径系统定标。本文使用近距离扩展源法进行辐射定标,如图1所示,将黑体置于成像系统入瞳处,这样可对探测器的所有像元进行标定,并且能够将大气衰减和程辐射的影响降到最小。实际应用中,黑体和镜头入瞳不可能完全一致,应使两者位置尽可能靠近。

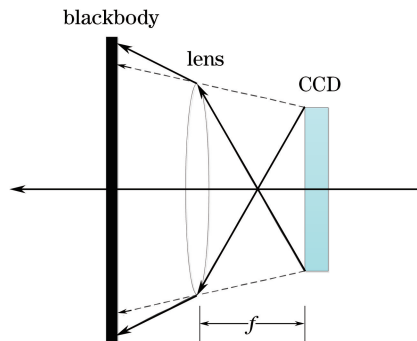


图1 近距离扩展源法定标原理图

Fig. 1 Principle diagram of the short range extended source method calibration

设黑体温度为  $T$  (单位为 K), 则由普朗克辐射公式可得黑体表面的光谱辐亮度为

$$L_T = \frac{\epsilon}{\pi} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} C_1 \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda, \quad (1)$$

式中  $\epsilon$  为发射率;  $\lambda$  为波长, 单位为  $\mu\text{m}$ ,  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  为相机工作波段;  $C_1$ 、 $C_2$  为第 1 和第 2 辐射常数,  $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.74 \times 10^8$ ,  $C_2 = hc/\lambda = 1.4387 \times 10^4$ , 其中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中的光速。

在红外系统的线性响应范围内, 探测器像元的响应灰度值可表示为<sup>[14]</sup>

$$h_{i,j} = f(t, L_T) + h_{i,j}^{\text{detector}}, \quad (2)$$

式中  $h_{i,j}$  为红外焦平面阵列第  $(i, j)$  像素的响应灰度值;  $t$  为探测器的积分时间;  $f(\ast)$  为响应与积分时间、

入射辐亮度的函数关系; $L_T$  为入射辐亮度  $h_{i,j}^{detector}$  为模型的偏置,包括成像系统杂散辐射和探测器暗电流等因素引起的灰度输出。

辐射定标流程主要包括 3 个步骤。1) 根据探测器波长范围确定工作区域,用维恩位移定律先判断一下探测器适宜的测温范围,明确定标过程中的温度间隔和积分时间范围。2) 搭建实验装置,将黑体设置为线性工作区域的某温度下,根据 1) 确定的积分时间范围,以一定的采样间隔改变积分时间,采集当前黑体温度下不同积分时间的图像。3) 改变黑体温度,重复 2),直到完成所有温度下的辐射定标。下面将通过实验获得实测数据,确定  $f(*)$  的函数关系式。

## 2.2 像元响应与入射辐射的关系

为了降低外界干扰、减小测试误差,将黑体与红外系统放在玻璃罩内进行实验,实验过程中保持室内温度为 20 °C,用两点法在黑体温度 20 °C 和 50 °C 下进行非均匀校正,实验装置如图 2 所示。

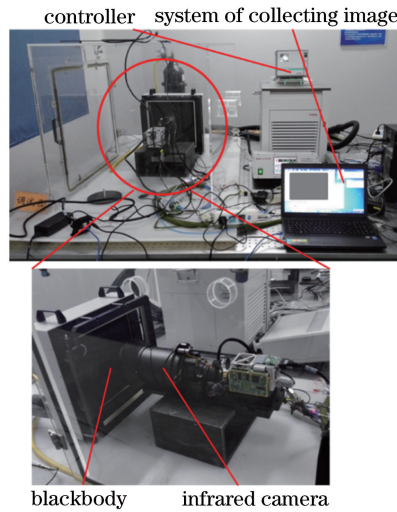


图 2 实验室定标装置

Fig. 2 Calibration device in laboratory

本文对 FLIR 公司制冷型 MINICORE LW F2 长波红外相机进行辐射定标,相机参数如表 1 所示。面源黑体采用 CI Systems 公司的 SR800-12LT,其参数如表 2 所示。

表 1 相机参数

Table 1 Camera parameter

Parameter	Wavelength range / $\mu\text{m}$	Resolution ratio / (pixel $\times$ pixel)	Pixel size / $\mu\text{m}^2$	Output bits /bit	Focal length /mm
Value	7.7~9.3	640 $\times$ 512	15 $\times$ 15	14	60~300

表 2 黑体参数

Table 2 Blackbody parameter

Parameter	Emitter size / (mm $\times$ mm)	Temperature range / $^{\circ}\text{C}$	Emissivity	Temperature resolution / $^{\circ}\text{C}$
Value	305 $\times$ 305	-40~150	0.97 $\pm$ 0.02	$\pm$ 0.03

探测器积分时间固定不变,改变黑体温度,得到入射辐射与响应之间的关系。图 3 给出了 4 组用最小二乘法拟合得到的辐亮度与响应遥感影像像元亮度值(DN, $h$ )之间的关系。可以看出:当积分时间一定,红外焦平面阵列(IRFPA)像元响应值随着黑体辐亮度的升高而线性升高,响应关系的斜率随着积分时间的增加而变大。

表 3 列出了不同积分时间下探测器像元响应与积分时间的关系式,从中可以看出,每组响应曲线的斜率与积分时间之比近似相等,且误差小于 1%。

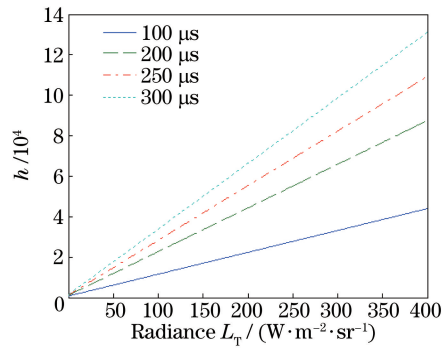


图3 响应与入射辐射的关系

Fig. 3 Output versus incident radiation

表3 不同积分时间的响应关系

Table 3 Output of different integral time

Integral time / $\mu\text{s}$	Relationship between response and incident radiation	Ratio of slope to integration time
100	$h = 108 \{L_T\}_{\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}} + 799.8$	1.0800
150	$h = 161.9 \{L_T\}_{\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}} + 985$	1.0790
200	$h = 215.9 \{L_T\}_{\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}} + 1171$	1.0795
250	$h = 266.9 \{L_T\}_{\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}} + 1357$	1.0796
300	$h = 323.9 \{L_T\}_{\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}} + 1543$	1.0797

### 2.3 像元响应与积分时间的关系

面源黑体温度保持不变,改变探测器的积分时间,得到积分时间与像元响应之间的关系。图4给出了4组用最小二乘法拟合得到的积分时间与响应值之间的关系。可以看出:入射辐射亮度一定,IRFPA像元响应 $h$ 随积分时间的升高而线性升高,响应关系的斜率随黑体温度升高而变大。

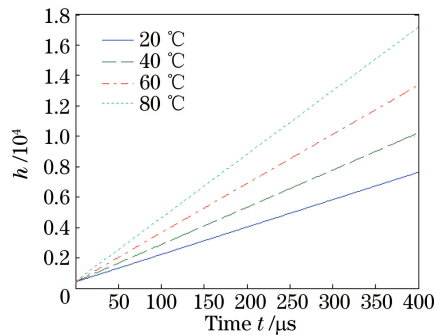


图4 响应与积分时间的关系

Fig. 4 Output versus integral time

表4中列出了黑体温度分别为20,40,60,80 °C时,像元响应与入射辐射的关系。

表4 不同入射辐射的响应关系

Table 4 Output of different incident radiations

$T / ^\circ\text{C}$	$L_T / (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	Relationship between response and integral time
20	13.23	$h = 18.03 \{t\}_{\mu\text{s}} + 428.1$
40	19.17	$h = 24.50 \{t\}_{\mu\text{s}} + 427.7$
60	26.59	$h = 32.36 \{t\}_{\mu\text{s}} + 428.3$
80	35.57	$h = 42.12 \{t\}_{\mu\text{s}} + 428.3$

### 2.4 温度、积分时间与像元响应的关系

在只考虑入射辐射的情况下,探测器像元响应与入射辐射之间关系为<sup>[15]</sup>

$$h_{i,j}^{\text{radiation}} = gL_T + h, \quad (3)$$

式中 $g$ 、 $h$ 为常数,由最小二乘法确定。根据分析积分时间与响应灰度值斜率的关系,并结合(2)、(3)式可获

得像元响应与温度、积分时间的函数:

$$h_{i,j} = t \times G'_{i,j} \times (gL_T + h) + h_{i,j}^{\text{detector}}, \quad (4)$$

式中  $G'_{i,j}$  为单位时间内积分时间对红外辐射的响应度。令  $G_{i,j} = G'_{i,j} \times g$ , 为系统响应度, 令  $h_{i,j}^{\text{stray}} = G'_{i,j} \times h$ , 为单位时间内由探测器外部因素导致的像素响应输出, 则(4)式可写为

$$h_{i,j} = t \times (G_{i,j} \times L_T + h_{i,j}^{\text{stray}}) + h_{i,j}^{\text{detector}}, \quad (5)$$

(5)式即为涉及积分时间的长波红外探测器辐射定标模型。当需要对相机进行辐射定标时, 只需在当前环境下确定模型中的定标系数即可。

## 3 简化的快速定标方法

### 3.1 方法简述

(5)式中, 积分时间  $t$ 、入射辐亮度  $L_T$  通过设定确定, 探测器响应  $h_{i,j}$  通过采集数据获得, 剩余的 3 个参数  $G_{i,j}$ 、 $h_{i,j}^{\text{stray}}$  和  $h_{i,j}^{\text{detector}}$  需要在定标过程中通过数据处理求得, 获得这 3 个参数即可得到当前环境任意积分时间下的数据。而 3 个未知数可通过选取 2 个线性工作区域内的黑体温度, 获得 2 个积分时间中的 3 幅图像求得。具体方法如下:

1) 温度点的选取: 选择 2 个积分时间  $t_1$ 、 $t_2$ , 进行探测器线性工作区域内所有温度点的定标, 利用回归分析去除局外点, 取 2 个积分时间下都符合条件的 2 个温度点  $T_1$  和  $T_2$ ;

2) 设置黑体温度为  $T_1$ , 积分时间分别设置为  $t_1$  和  $t_2$ , 得到 2 幅定标图像, 在不同积分时间下的探测器响应分别表示为

$$h_{i,j}(t_1, T_1) = t_1 \times [G_{i,j} \times L(T_1) + h_{i,j}^{\text{stray}}] + h_{i,j}^{\text{detector}}, \quad (6)$$

$$h_{i,j}(t_2, T_1) = t_2 \times [G_{i,j} \times L(T_1) + h_{i,j}^{\text{stray}}] + h_{i,j}^{\text{detector}}; \quad (7)$$

3) 将黑体温度设置为  $T_2$ , 采集黑体在积分时间  $t_2$  下的定标图像, 此时探测器响应表示为

$$h_{i,j}(t_2, T_2) = t_2 \times [G_{i,j} \times L(T_2) + h_{i,j}^{\text{stray}}] + h_{i,j}^{\text{detector}}, \quad (8)$$

通过求解(6)~(8)式即可求出  $G_{i,j}$ 、 $h_{i,j}^{\text{stray}}$  和  $h_{i,j}^{\text{detector}}$ 。下面具体说明数据点的选取原则。

### 3.2 数据点的选取

由于实验条件和环境的不稳定, 采集的实验数据会有部分数据点偏离响应曲线, 利用回归分析剔除残差较大的点, 选择 2 个合适的温度点即可保证精度。先选择 2 个积分时间 100  $\mu\text{s}$  和 200  $\mu\text{s}$ ; 然后根据该型号长波系统的波长范围确定线性工作区域, 定标时测温范围选择 20~80  $^{\circ}\text{C}$ , 温度间隔为 5  $^{\circ}\text{C}$ 。固定积分时间对相机进行辐射定标, 每个像素都会获得 1 组入射辐亮度  $L_T$  和响应值  $h$  的数据, 对每组数据进行回归分析。举个例子进行说明, 表 5 是积分时间 200  $\mu\text{s}$  时像素点(200, 150)的定标数据。

表 5 定标数据(200  $\mu\text{s}$ )  
Table 5 Calibration data(200  $\mu\text{s}$ )

$T / ^{\circ}\text{C}$	$L_T / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	$h$	$T / ^{\circ}\text{C}$	$L_T / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	$h$
20	13.2295	5828.1	55	24.5940	9509.2
30	16.0217	6732.5	60	26.5931	10156.7
35	17.5510	7227.9	65	28.6898	10835.9
40	19.1713	7752.7	70	30.8850	11546.9
45	20.8844	8307.6	75	33.1795	12290.1
50	22.6915	8893.0	80	35.5739	13065.7

数据中每一组定标点( $L_{T_n}, h_n$ )(其中,  $n=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为温度采样个数)是关于总体的一个样本。利用最小二乘法对  $h_{i,j}^{\text{radiation}} = gL_T + h$  中的参数进行拟合, 通过回归分析可以得到  $g$  和  $h$  的点估计和区间估计, 同时获得响应  $\hat{h}_n$  的点预测值<sup>[7]</sup>。定义残差  $R_{\text{fit},n}$  为

$$R_{\text{fit},n} = h_n - \hat{h}_n. \quad (9)$$

图 5 为  $R_{\text{fit},n}$  的 95% 置信度的区间估计, 从图中可以看出, 第 8 个点未通过零点, 被称为局外点(outlier)。局外点是指残差大于回归模型置信区间的定标点, 质量很差, 一般由探测器响应非线性引起, 其

存在会增大定标模型的不确定度,去除后能提高精度。剔除该点后对其他数据重新进行拟合及回归分析,直到所有数据的残差都在置信区间内。

剔除第 8 个点后模型的区间估计如图 6 所示,所有数据点的残差均过零点,符合回归分析的要求。剔除局外点后的残差区间与最初相比明显缩短,区间范围提高了 1 倍,说明该曲线能更好地反映入射辐亮度和响应之间的关系。

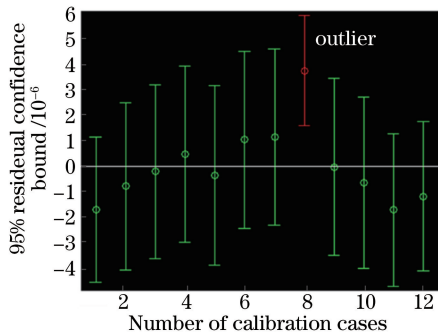


图 5 剔除局外点前的残差区间

Fig. 5 Residual bounds before eliminating outlier

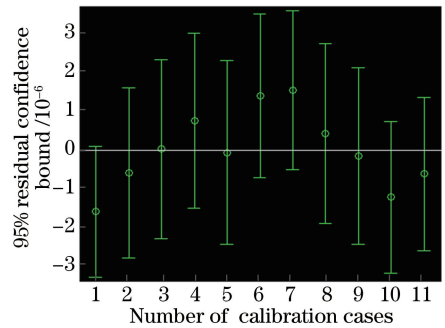


图 6 剔除局外点后的残差区间

Fig. 6 Residual bounds after eliminating outlier

进行回归模型分析后的定标点不存在系统误差,拟合效果好,能够提高辐射定标的精度。下面通过实验结果验证该快速定标方法的准确度和可靠性。

## 4 实验过程及结果

### 4.1 非均匀校正结果

非均匀校正是为了使探测器每个像素的响应值保持一致。图 7 为积分时间为  $300 \mu\text{s}$  时用两点法进行非均匀校正前后的响应对比图,平面坐标点表示探测器像素位置,纵坐标代表像元响应值。从图中可以看出,未进行校正时,有坏点,各像元响应值差异较大,均方差为 1.7904,不能满足实验要求;进行校正后,响应基本保持一致,均方差提高为 0.6399。

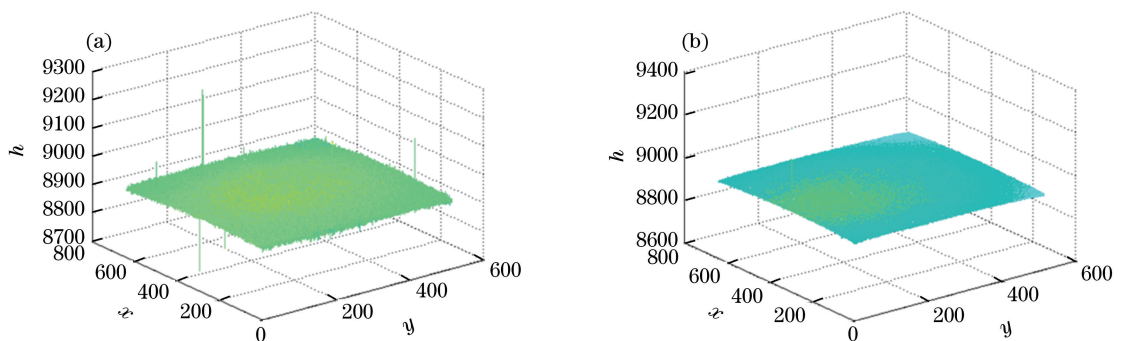


图 7 (a)未校正;(b)两点法校正

Fig. 7 (a) Without correction; (b) two-point correction

### 4.2 定标结果

实验中为了保存图像,需要用到图像采集设备,本文选用的是 Pleora Technologies 公司的 Camera-Link 转千兆网采集盒 PT1000-CL4-E,用 VC++ 编程开发。图像通过相机的 Camera-Link 接口传输到采集盒,再通过千兆网线传输到计算机上。为了减少实验中的随机误差,每一组定标连续采集 40 frame 图像取平均值。像元响应值表示为<sup>[16]</sup>

$$h_{i,j} = \sum_{k=1}^K h_{i,j}^k / K, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (10)$$

式中  $K$  为采集帧数,  $h_{i,j}^k$  为第  $k$  帧的响应值。

根据回归分析,60 °C 这一标点不符合要求,剔除掉,从其他温度点中选择任意 2 个,本实验选择的温度点是 20 °C 和 50 °C,积分时间选择 100  $\mu\text{s}$  和 200  $\mu\text{s}$ ,采集 3 个定标点的图像,以像元(200,150)为例,表 6 为定标数据,得到辐射定标模型中的 3 个参数: $G_{i,j} = 1.0797$ 、 $h_{i,j}^{\text{stray}} = 3.7155$ 、 $h_{i,j}^{\text{detector}} = 428.298$ ,则辐射定标模型方程为

$$h = t \times (1.0797 \times L_T + 3.7155) + 428.298. \quad (11)$$

表 6 在 2 个温度和 2 个积分时间下的 3 组辐射定标数据

Table 6 Three sets of radiation calibration data at two temperatures and two integral time

$T / ^\circ\text{C}$	$L_T / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	$t / \mu\text{s}$	$h$
20	13.2295	100	2228.3
20	13.2295	200	4028.3
50	22.6915	200	6071.6

### 4.3 误差分析

为了验证本文快速辐射定标方法在实际测量中的可行性,将不同温度、不同积分时间作为变量代入(11)式,计算出辐射定标结果,称为计算值。

以像素点(200,150)为例,给出了温度范围 20~80 °C、间隔 5 °C,积分时间范围 100~440  $\mu\text{s}$ 、间隔 10  $\mu\text{s}$  下的数据,将实验测试数据称为定标值,比较计算值与定标值的误差和拟合度 2 个参数来评定模型的正确性和精确度,结果如表 7 所示。其中误差为

$$E = \frac{z_i - \hat{z}_i}{z_i} \times 100\%, \quad (12)$$

式中  $z_i$  为定标值, $\hat{z}_i$  为计算值。

拟合度即 R-squared,比较其预测结果与实际发生情况的吻合程度,公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (z_i - \bar{z}_i)^2}{\sum (z_i - \bar{z}_i)^2}, \quad (13)$$

式中  $\bar{z}_i$  为定标值的均值, $R^2$  为拟合度, $0 < R^2 < 1$ ,且  $R^2$  越接近于 1,拟合效果越好。

表 7 不同温度、积分时间下误差和拟合度分析结果

Table 7 Analysis results of the error and the fitting degree at different temperatures and integral time

$T / ^\circ\text{C}$	$L_T / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	Integral time range / $\mu\text{s}$	Number of data	Maximum error / %	R-squared
20	13.2295	100~440	35	0.12	1
30	16.0217	100~440	35	0.25	0.9999
35	17.5510	100~440	35	0.52	0.9999
40	19.1713	100~440	35	0.34	0.9999
45	20.8844	100~440	35	0.26	1
50	22.6915	100~440	35	0.11	1
55	24.5940	100~440	35	0.22	1
60	26.5931	100~440	35	0.42	0.9999
65	28.6898	100~440	33	0.58	0.9998
70	30.8850	100~400	31	0.74	0.9996
75	33.1795	100~370	28	0.85	0.9994
80	35.5739	100~350	26	0.83	0.9998

表 7 中给出了每一温度下积分时间的数据个数,以及误差和拟合度的分析结果,随着温度和积分时间的共同增加,探测器像元响应达到饱和状态,因此分析中去除了这部分饱和和数据点。实验中共采集 420 组数据,使用去除饱和点后剩余的 398 组数据进行了误差和拟合度分析。从表 7 可以看出,不同温度和积分时间下,计算值和定标值相对误差均小于 1%,拟合度均优于 0.999,证实了快速辐射定标方法的精确性和可靠性。

## 5 结 论

为提高涉及积分时间的辐射定标效率,本文提出并验证了一种基于长波红外面阵探测器的快速辐射定

标方法。实验使用面源黑体作辐射源,对 FLIR 公司的制冷型 MINICORE LW F2 长波红外相机进行了辐射定标。利用实测数据建立像元响应与入射辐射、积分时间的关系,根据所提出的快速定标方法,用回归分析方法选择定标点,并验证了该方法的有效性。实验结果表明,用该方法进行辐射定标时,像元响应的计算值和定标值误差均小于 1%,拟合度均大于 0.999。该方法的优点在于通过简单的方法和计算就能获得所有积分时间下的定标数据,提高了定标效率,具有一定的工程应用意义。

### 参 考 文 献

- [1] Griggs M, Myers W A, Baker H V. Multispectral sensing of natural resources with the MSTI-3 satellite [C]. *Multispectral and Microwave Sensing of Forestry, Hydrology, and Natural Resources*, 1995, 2314: 192-200.
- [2] Lin Zhiqiang, Zheng Xiaobing, Zhang Lei, *et al.* Calibration of infrared radiation based on cryogenic radiometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(4): 62-67.  
林志强, 郑小兵, 张磊, 等. 基于低温辐射计的红外辐射定标方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(4): 62-67.
- [3] Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguang, *et al.* Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared optoelectric system on spot [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, 17(2): 175-178.  
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制 [J]. *光电子 • 激光*, 2006, 17(2): 175-178.
- [4] Liang Chao, Ma Tianxiang. Design of infrared imaging nonuniformity correction system based on black body calibration [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 385-393.  
梁超, 马天翔. 基于黑体标定的红外图像非均匀性校正系统设计 [J]. *中国光学*, 2016, 9(3): 385-393.
- [5] 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.  
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.
- [6] Cao Lihua, Li Ning, Yang Ciyin, *et al.* Radiance calibration for 3~5  $\mu\text{m}$  infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 858-864.  
曹立华, 李宁, 杨词银, 等. 3~5  $\mu\text{m}$  红外探测器的辐射定标 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 858-864.
- [7] Li Ning, Yang Ciyin, Cao Lihua, *et al.* Radiance calibration for 3~5  $\mu\text{m}$  infrared focal plane array [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2319-2325.  
李宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5  $\mu\text{m}$  红外焦平面阵列的辐射定标 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2319-2325.
- [8] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0712006.  
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): 0712006.
- [9] Wang Jianjun, Huang Chen, Gao Xin, *et al.* Inner and outer calibration technology of infrared radiation measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1767-1771.  
王建军, 黄晨, 高昕, 等. 红外辐射测量系统内外标定技术 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1767-1771.
- [10] Wang Jianjun, Huang Chen, Li Jianting, *et al.* Calibration technology of infrared radiation measurement for space object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 98-102.  
王建军, 黄晨, 李舰艇. 空间目标红外辐射测量系统标定技术 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 98-102.
- [11] Liu Yingqi, Liu Xiangyi. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512003.  
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): 0512003.
- [12] Luo Maojie, Zhou Jinmei, Fu Jingneng, *et al.* Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 36-40.  
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.
- [13] Lü You. Research on technology of middle-infrared-based dual-band target's radiation characteristics measurement [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.  
吕游. 基于中波红外的双波段目标辐射特性测量技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.



- [14] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Simplifying method of radiance calibration for MWIR detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2132-2137.  
孙志远, 常松涛, 朱玮. 中波红外探测器辐射定标的简化方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2132-2137.
- [15] Ma Hong, Wang Jinbo. *Theory of error and precision of instrument*[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007.  
马宏, 王金波. *误差理论与仪器精度*[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007.
- [16] Wu Xingxing, Liu Jinguo, Zhou Huaide, *et al.* An improved radiometric calibration method of interline transfer CCD camera based on time delay and integration working mode[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(s1): 126-130.  
武星星, 刘金国, 周怀得, 等. 一种改进的时延积分模式行间转移 CCD 相机辐射定标方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(s1): 126-130.