

中波红外探测器辐射定标的简化方法

孙志远¹, 常松涛^{1,2}, 朱 玮¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了提高红外辐射定标效率, 提出了简化的辐射定标方法。首先, 提出带有积分时间变量的辐射定标数学模型, 通过探测器像元响应灰度值随积分时间的变化曲线以及随黑体辐射亮度的变化曲线确定了辐射定标模型的具体形式, 并介绍了模型中各参数的物理意义。接着, 在不同环境温度下进行辐射定标实验, 绘出辐射定标模型中各未知参数随环境温度的变化曲线, 实验结果验证了辐射定标模型的正确性。然后, 在这个模型的基础上提出了简化的辐射定标模型, 即使用一元线性回归分析方法选择两个定标点, 在两个典型的积分时间下采集这两个定标温度点的共四幅图像, 经处理即可获取辐射定标模型的各项未知参数。最后对通过辐射定标模型计算得到的辐射定标数据与实际定标获取的辐射定标数据进行比较分析。实验结果表明: 计算值与定标值之间的误差优于 1%。辐射定标模型准确, 可以极大地提高辐射定标的效率。

关键词: 红外探测器; 辐射定标; 积分时间; 线性回归

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2132-06

Simplifying method of radiance calibration for MWIR detector

Sun Zhiyuan¹, Chang Songtao^{1,2}, Zhu Wei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to enhance the efficiency of infrared radiation calibration, a simple calibration method was brought forward. First, the radiation calibration model comprising integral time was put forward. Through the relation between integral time and cell's response gray in company with the relation between blackbody's radiation luminance and cell's response gray, the concrete form of radiation calibration model was confirmed, and physics meaning of parameters in the formula were introduced. The radiation calibration experiments at different environmental temperature were processed and the changes of the unknown parameters with environmental temperature were plotted. The experiment results validate the radiation calibration model. A simple method for radiation calibration basing the model was brought forward, choosing two calibration points with the help of unitary linear regression method and collecting the two calibration points at two typical integral times, then the unknown parameters in the radiation calibration model were calculated through these four figures. Finally, comparison between the calibration

收稿日期: 2013-11-09; 修订日期: 2013-12-13

基金项目: 国家 863 计划 (2012AA121502)

作者简介: 孙志远 (1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事红外辐射定标、红外辐射特性测量等方面的研究。

Email: 15843047922@163.com

data caught by calculating employing the model and actual calibration data caught by calibrating were took on. Experimental results indicate that the error between calculating and calibrating is small than 1%. The radiation calibration model is correct and the calibration efficiency could be boosted greatly.

Key words: infrared detector; radiance calibration; integral time; linear regression

0 引言

随着靶场测控技术的发展,越来越多的地基红外测量设备具备红外辐射特性测量功能。为了准确地完成目标的红外辐射特性测量,需要对红外系统进行精确地辐射定标^[1-4]。地基红外测量设备的辐射定标通常有两种方式:实验室定标及外场定标,其中,实验室定标是在实验室稳定环境下进行的辐射定标,标定数据重复稳定性好、标定精度高;外场定标是在实验室定标的基础上进行修正得到的,主要是为了修正环境温度变化对测量结果的影响^[5]。进行目标的红外辐射特性测量时,为了提高信噪比,需要根据目标的辐射特性选择一个合适的积分时间,所以在辐射定标时应当获取所有需要的积分时间下的辐射定标数据,这是一项较为繁琐的工作。

文中对中波制冷型红外探测器进行实验室辐射定标,建立了包括积分时间变量的辐射定标模型,通过相关实验验证了该模型的正确性。根据该模型提出了简化的辐射定标方法,即首先利用一元线性回归的统计方法对像元响应曲线进行拟合和评估,剔除局外点,选择两个合适的定标温度点;然后,分别在两个积分时间下采集这两个温度点的黑体图像,经过处理就可以获取整个系统在任意积分时间下的辐射定标数据,最后通过实验比较了辐射定标数学模型的计算值和实际定标数值之间的误差。

1 辐射定标的数学模型

1.1 探测器像元响应模型

对红外系统进行辐射定标时,需要提供覆盖红外系统视场的高精度面黑体辐射源,同时为了减小大气衰减和程辐射对辐射定标的影响,只有将黑体放置于红外系统镜头前并尽量靠近才能符合要求(当系统口径较大时,采用黑体加平行光管组合方式),如图 1 所示。

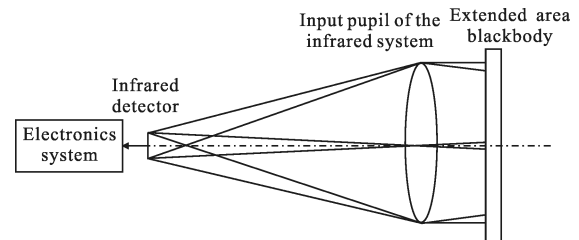


图 1 面源黑体辐射定标示意图

Fig.1 Sketch of radiation calibration for area blackbody

设面源黑体的温度为 T , 黑体表面的光谱辐射亮度为 $L^{BB}(T)$, 红外系统观测到的黑体辐射亮度可以表示为:

$$L^{BB}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L^{BB}(T) d\lambda \quad (1)$$

式中: $L^{BB}(T)$ 可以用普朗克公式计算得到:

$$L^{BB}(T) = \frac{\varepsilon_{\lambda BB}}{\pi} c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{\lambda BB}$ 、 c_1 、 c_2 分别为黑体的发射率、第一辐射常数和第二辐射常数。

在红外系统线性响应范围内, 红外探测器靶面上像元灰度值可以表示为^[6-7]:

$$h_{i,j} = f(\tau, L^{\text{incident}}(T)) + h_{i,j}^{\text{noise}} \quad (3)$$

式中: $h_{i,j}$ 为红外探测器靶面上像元 (i, j) 的响应灰度值; τ 为红外探测器的积分时间; $L^{\text{incident}}(T)$ 为入射到探测器上的辐射亮度; $f()$ 为待求解的函数关系; $h_{i,j}^{\text{noise}}$ 为探测器像元 (i, j) 的暗电流引起的探测器像元灰度输出。

$L^{\text{incident}}(T)$ 主要包括两部分:

$$L^{\text{incident}}(T) = L^{BB}(T) + L^{\text{stay}}(T) \quad (4)$$

式中: $L^{BB}(T)$ 为黑体辐射亮度; $L^{\text{stay}}(T)$ 为红外系统内部杂散辐射(包括镜头的辐射及结构件的辐射等)。

常规的辐射定标流程如下:

(1) 首先根据被测目标的温度来确定辐射定标的温度范围、温度间隔以及需要定标的积分时间;

(2) 黑体放置在红外系统前充满系统的视场, 将

红外探测器设定在某一积分时间,根据第(1)步确定的定标点逐一设定黑体温度并采集图像;

(3) 改变红外探测器的积分时间,重复步骤(2),直到所有积分时间均定标完毕。

下面通过实验找出黑体辐射亮度、积分时间与探测器像元响应灰度值之间的函数关系 $f()$ 。

1.2 像元响应与积分时间的关系

实验装置如图 2 所示。

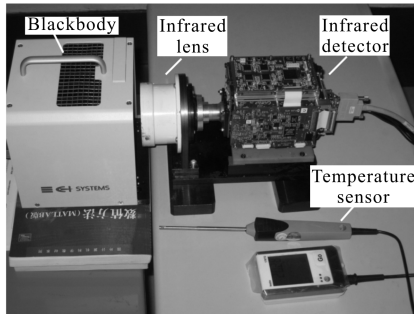


图 2 面源黑体辐射定标图

Fig.2 Calibration setup in virtue of area blackbody

实验使用 FLIR 制冷型中波红外探测器,测量波段为 3.7~4.8 μm ,探测器像元大小为 15 μm ,靶面大小为 640x512,输出位数 14 位, $F/\#=2$ 。红外镜头口径为 50 mm,焦距为 100 mm;辐射定标用黑体为 CI 公司的 SR-800 型高精度面源黑体,辐射面大小为 100 mmx100 mm,温度精度为 0.01 $^{\circ}\text{C}$,工作温度范围 0~50 $^{\circ}\text{C}$ 。

固定黑体的温度与环境温度,仅改变积分时间。图 3 显示了探测器中心像元(320,256)响应灰度值在固定黑体辐射下随积分时间的变化曲线。

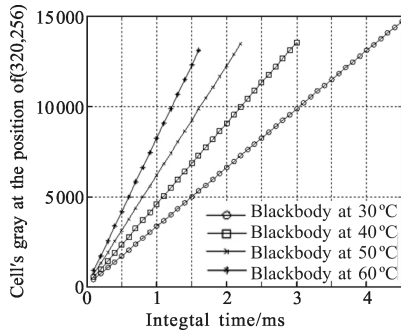


图 3 积分时间与像元响应灰度值之间关系曲线

Fig.3 Relation between integral time and cell's gray

从图 3 可以看出,黑体辐射亮度固定时,探测器像元的响应灰度值与积分时间成线性关系,而且随

着黑体温度的升高,响应曲线的斜率变大。

1.3 像元响应与黑体辐射亮度之间的关系

固定积分时间与环境温度,仅改变黑体的温度值。图 4 所示为探测器中心像元(320,256)响应灰度值随黑体辐射亮度的变化曲线。

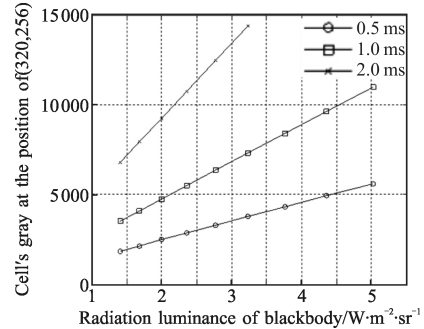


图 4 黑体辐射亮度与像元响应灰度值之间关系曲线

Fig.4 Relation between blackbody's radiation luminance and cell's gray

从图 4 可以看出,探测器像元响应灰度值与黑体辐射亮度成线性关系,而且随着积分时间的增加,响应曲线的斜率也变大。

计算图 4 中积分时间分别为 0.5 ms、1 ms 和 2 ms 的响应曲线的斜率,列入表 1,从表中数据发现:响应曲线的斜率比值近似等于积分时间的比值,且误差小于 2%。

表 1 不同积分时间下响应曲线斜率

Tab.1 Slope of different integral time

Integral time/ms	Slope/ $\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}$
0.5	1 040.8
1	2 072.4
2	4 169.6

1.4 带有积分时间变量的辐射定标公式

根据以上结论,公式(3)中的未知函数关系 $f()$ 可以展开为线性公式:

$$h_{i,j} = \tau \times G_{i,j} \times (L^{BB}(T) + L^{stay}(T)) + h_{i,j}^{noise} \quad (5)$$

式中: $G_{i,j}$ 为像元 (i,j) 对红外辐射的响应率 ($\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{ms}^{-1}$),令 $h_{i,j}^{OT} = G_{i,j} \times L^{stay}(T)$,定义为杂散辐射引起的探测器像元灰度输出。公式(5)整理为:

$$h_{i,j} = \tau \times (G_{i,j} \times L^{BB}(T) + h_{i,j}^{OT}) + h_{i,j}^{noise} \quad (6)$$

公式(6)即为中波红外探测器辐射定标的数学

模型。根据公式中各参数的物理意义,当环境温度变化时,反映红外探测器自身像元特性的 $G_{i,j}$ 和 $h_{i,j}^{noise}$ 变化较小,而与环境温度有关的 $h_{i,j}^{OT}$ 随环境温度变化会有相应的变化。

2 辐射定标模型的验证

在高、低温箱内进行不同环境温度下的辐射定标实验,如图 5 所示。将红外系统和黑体都放入高、低温箱内,黑体放置在红外系统前,充满红外系统的视场,设置高、低温箱的温度范围 0~50 °C,以 5 °C 为间隔,在不同环境温度下对红外系统进行辐射定标。同时使用温度传感器(温度精度为 0.1 °C)监测高、低温箱内的环境温度,由于高、低温箱存在温控误差,以温度传感器显示的温度值为高、低温箱内部温度基准值。

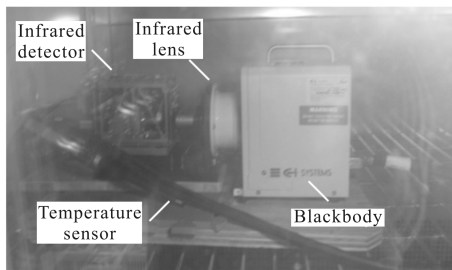
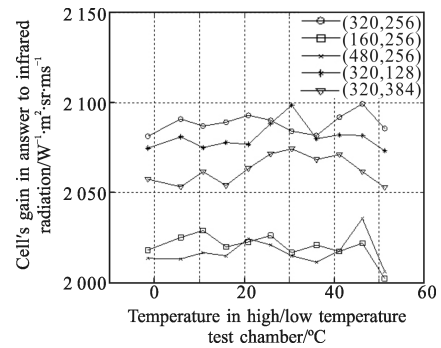


图 5 不同环境温度下辐射定标实验现场图

Fig.5 Figure of radiation calibration at different temperature

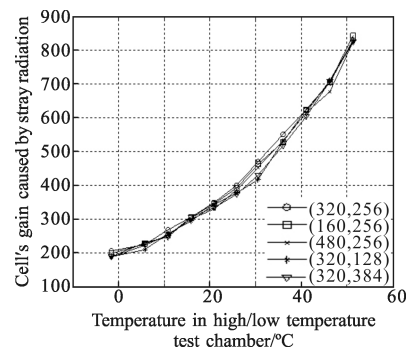
由于实验目的是找出各参数随环境温度变化规律,所以没有对整个靶面上的 327 680 个像元都进行处理,只是在靶面上选择 5 个典型的像元(320, 256)、(160, 256)、(480, 256)、(320, 128)和(320, 384)进行处理分析。根据不同环境温度下的辐射定标数据分别计算像元对红外辐射的响应率($G_{i,j}$)、杂散辐射引起的像元灰度输出($h_{i,j}^{OT}$)和像元暗电流引起的灰度输出($h_{i,j}^{noise}$),并绘出各变量随高、低温箱内温度的变化曲线,如图 6 所示。

从图 6(a)可以看出,虽然各探测器像元的响应率不同,但在 0~50 °C 的温度范围,响应率的变化小于 1%;图 6(b)所示的各像元杂散辐射引起的像元灰度输出近似相同,但随着温度升高而急剧增加;而探测器像元的暗电流引起的灰度输出量值很小,如图 6(c)所示,实验结果与理论分析一致,验证了公式(6)的正确性。



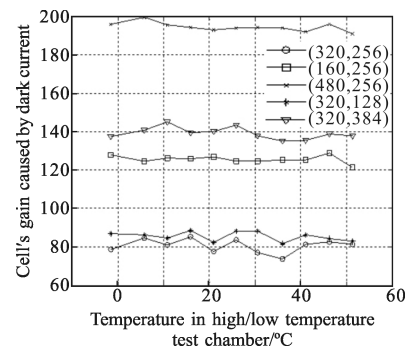
(a) $G_{i,j}$ 随环境温度变化情况

(a) Relation between $G_{i,j}$ and environmental temperature



(b) $h_{i,j}^{OT}$ 随环境温度变化情况

(b) Relation between $h_{i,j}^{OT}$ and environmental temperature



(c) $h_{i,j}^{noise}$ 随环境温度变化情况

(c) Relation between $h_{i,j}^{noise}$ and environmental temperature

图 6 $G_{i,j}$ 、 $h_{i,j}^{OT}$ 和 $h_{i,j}^{noise}$ 随环境温度变化情况

Fig.6 Relation between $G_{i,j}$, $h_{i,j}^{OT}$, $h_{i,j}^{noise}$ and environmental temperature

3 简化的定标方法

根据公式(6),计算出系统所处环境下的 $G_{i,j}$ 、 $h_{i,j}^{OT}$ 和 $h_{i,j}^{noise}$, 就可以得到红外系统在任何积分时间下的辐射定标数据。而计算上述三个参数,仅仅需要在两个积分时间条件下采集两个黑体的亮度就可以了。简化后的辐射定标流程如下:

(1) 在积分时间 τ_1 下进行全动态范围的辐射定标,对该积分时间下的定标数据进行回归分析,剔除残差较大的定标点,在剩余的定标点中选择两个温度点 T_1 和 T_2 ;

(2) 将黑体的温度分别设定为 T_1 和 T_2 ,在积分时间 τ_2 下采集这两个黑体的图像;

(3) 根据公式(6)对以上步骤获取的 τ_1 和 τ_2 积分时间下, T_1 和 T_2 两个温度点的共四幅黑体图像进行处理就可以得到 $G_{i,j}$ 、 $h_{i,j}^{OT}$ 和 $h_{i,j}^{noise}$ 。

下面通过实验数据验证该简化方法的可行性及精度。

4 标定实验与结果

4.1 选择合适的定标温度点

使用高精度面源黑体,在 1 ms 的积分时间下对红外相机进行辐射定标,定标的温度范围是 20~60 °C,温度间隔为 5 °C,得到每个像素的一组 $L^{BB}(T)$ 和 $h_{i,j}$ 的样本值后,就可以对每个像素对应的样本进行回归分析。

以像素点(320, 256)为例,此点在各黑体温度 T 下的光谱辐亮度 $L^{BB}(T)$ 和像元响应灰度值 h ,如表 2 所示。

表 2 中心像元的定标数据(1 ms)

Tab.2 Calibration data at center cell (1 ms)

$T/^\circ\text{C}$	$L^{BB}(T)/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	h
20	0.973 9	2 547
25	1.175 6	2 976
30	1.410 6	3 484
35	1.682 7	4 054
40	1.996 4	4 712
45	2.356 2	5 482
50	2.767	6 337
55	3.233 9	7 310
60	3.762 4	8 396

表 2 中,定义每一组 $L^{BB}(T)$ 和 h 值为 $(L^{BB}(T)_n, h_n)$ (其中, $n=1, 2, \dots, k, k$ 为样本的大小),对样本进行回归分析,给出 h 的点预测和区间预测,然后通过拟合

残差对拟合精度进行评估。拟合误差定义为^[8]:

$$h_{\text{fit},n} = h_{bn} - \hat{h}_{bn} \quad (7)$$

式中: \hat{h}_{bn} 即为点预测值; $h_{\text{fit},n}$ 是定标点处样本值与回归模型点预测值之差,得到 $h_{\text{fit},n}$ 的 95% 置信度的区间估计,如图 7 所示。

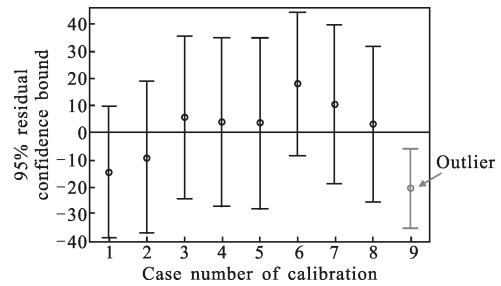


图 7 剔除局外点前的残差区间

Fig.7 Residual bounds before eliminating outlier

从图 7 看出,第九个定标点的残差置信区间没有通过零点,说明这个定标点的残差大于回归模型的 95% 置信度的预测区间。定义这样的定标点为局外点(outlier),剔除局外点后重新对响应曲线进行回归分析,直到所有的局外点被剔除。该实验应用上述方法去掉了第九点,剔除所有局外点残差估计区间如图 8 所示。

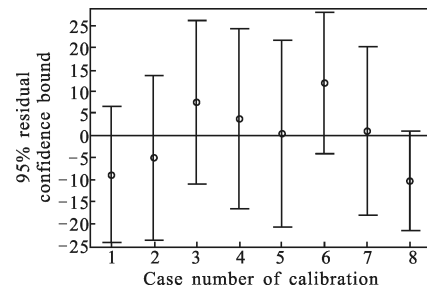


图 8 剔除局外点后的残差区间

Fig.8 Residual bounds after eliminating outlier

剔除局外点后残差区间明显缩短,通过剩余定标点对响应曲线拟合不存在系统误差或粗大误差,仅存在随机误差,拟合效果好。

4.2 误差比较

根据以上分析结果,只有 60 °C 这一定标点误差较大,其它定标点都可供选择,本例选择靠近定标区域中心的两个定标点: 35 °C 和 45 °C。分别在 0.5 ms 和 1.5 ms 这两个积分时间下采集 35 °C 和 45 °C 的黑体图像,以探测器中心像元(320, 256)为例,计算辐射定标模型中的三个未知参数 $G_{i,j}$ 、 $h_{i,j}^{OT}$ 和 $h_{i,j}^{noise}$,如表 3 所示。

表 3 G_{ij} 、 h_{ij}^{OT} 和 h_{ij}^{noise} 的计算结果Tab.3 Result of G_{ij} , h_{ij}^{OT} and h_{ij}^{noise}

Cell's position	$G_{ij}/W^{-1} \cdot m^2 \cdot sr \cdot ms^{-1}$	H_{ij}^{OT}	h_{ij}^{noise}
(320,256)	2 081.7	325.0	81.7

根据公式(6),像元(320,256)的辐射定标模型为:

$$h_{ij} = \tau \times (2081.7 \times L^{BB}(T) + 325) + 81.7 \quad (8)$$

将积分时间数值带入上式就可以计算不同积分时间下的辐射定标结果。

以积分时间 0.2 ms、0.8 ms、1.2 ms、2 ms 为例,通过理论模型计算像元(320,256)在以上四个积分时间下的辐射定标数据并记为计算值,使用黑体对红外探测器进行辐射定标,得到的数据记为定标值,比较计算值与定标值之间的误差,如表 4 所示。

表 4 计算值与定标值之间的误差

Tab.4 Gray error between calculating and calibrating

Calibration point/ $^{\circ}C$	Gray error at different integral time			
	0.2 ms	0.8 ms	1.2 ms	2 ms
25	-1.9 (-0.29%)	12.6 (0.55%)	23.5 (0.69%)	29.4 (0.53%)
30	-0.1 (-0.01)	9.8 (0.37)	7.4 (0.19)	7.5 (0.11)
35	-2.7 (-0.32)	1.1 (0.03)	-12.7 (-0.27)	-4.3 (-0.06)
40	-2.1 (-0.22)	-13.5 (-0.37)	-6.1 (-0.11)	-6.3 (-0.07)
45	-4.3 (-0.38)	-14.3 (-0.33)	-11.3 (-0.18)	-3.3 (-0.03)
50	-2.3 (-0.18)	-10.2 (-0.21)	-1.2 (-0.02)	6.9 (0.06)
55	-1.9 (-0.13)	-4.6 (-0.08)	12.2 (0.14)	-
RMS	2.5	10.5	12.4	13.1

表 4 中,括号内数据为灰度误差相对于灰度基数的百分比,其中,55 $^{\circ}C$ 黑体在 2 ms 时的数据已经饱和,故未列出。从表中数据可以看出:不同积分时间下,计算值与定标值之间的均方根误差小于 20,且相对于灰度基数的百分比优于 1%。

5 结论

文中给出了带积分时间变量的中波红外探测器辐射定标的数学模型,并通过不同环境温度下的辐

射定标实验验证了辐射定标数学模型的正确性。利用该数学模型可以对辐射定标过程进行简化,首先利用一元线性回归分析方法在响应曲线中选择两个温度点,在两个典型积分时间下采集这两个温度点的共四幅黑体图像,对四幅图像进行处理就可以获取辐射定标模型中的未知参数。实验结果显示,使用该模型计算得到的辐射定标数据与实际辐射定标数据之间误差优于 1%,结果表明使用该方法避免了对所有积分时间均进行辐射定标的繁琐步骤,大大地提高了辐射定标的效率,对今后开展红外辐射定标研究具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Tang Jia, Gao Xin. Calibration method for radiation characteristics measuring system of test range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(10): 266-270. (in Chinese)
- [2] Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguang, et al. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electric on spot [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(2): 175-178. (in Chinese)
- [3] Cao Lihua, Li Ning, Yang Ciyin, et al. Radiance calibration for 3-5 μm infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 858-864. (in Chinese)
- [4] Thomas Svensson, Ingmar Renhorn. A study of the radiometric calibration of spectral bands in the mid wave infrared(MWIR) spectral range, 1.5-5.5 μm [C]//SPIE, 2009, 7300, 73000Z.
- [5] Sun Zhiyuan, Zhu Wei, Qiao Yanfeng. Amendment of gray drift in infrared temperature measurement [J]. *Chinese J Opt Appl Opt*, 2010, 3(4): 391-396. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] Editor Board of 《Infrared and Laser Engineering》. Test and Evaluation of Infrared Imaging System [Z]. Tianjing: Editor Board of Infrared and Laser Engineering, 2006. (in Chinese)
- [8] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(7): 1626-1635. (in Chinese)