

文章编号 1004-924X(2011)10-2319-07

## 3~5 $\mu\text{m}$ 红外焦平面阵列的辐射定标

李 宁<sup>1,2\*</sup>, 杨词银<sup>1</sup>, 曹立华<sup>1,3</sup>, 郭立红<sup>1</sup>

- (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 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**设计了一套红外焦平面阵列探测器的实验室辐射定标系统,以实现对目标进行跟踪观测的同时得到目标的红外辐射特性。以高精度的面源黑体为标准辐射源,对在 3~5  $\mu\text{m}$  成像的中波红外相机进行了响应度标定。首先,建立定标数学模型,确定定标流程;然后,使用线性回归统计模型对响应度进行拟合和评估,并提出剔除局外点方法对拟合曲线进行优化;最后,在外场对温度和特性已知的目标进行测量。通过对实验室得到的响应度曲线和大气透过率参数进行红外辐射特性数据的反演,得到实际测量值,其与理论值的相对误差小于 3%。结果表明,该优化方法能有效改善红外焦平面阵列响应度非线性引起的反演不确定度。

**关键词:**红外焦平面阵列;辐射定标;线性回归

中图分类号:TN215 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111910.2319

## Radiance calibration for 3~5 $\mu\text{m}$ infrared focal plane array

LI Ning<sup>1,2\*</sup>, YANG Ci-Yin<sup>1</sup>, CAO Li-Hua<sup>1,3</sup>, GUO Li-Hong<sup>1</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*  
3. *School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)  
*\* Corresponding author, E-mail: ningli521@99.com*

**Abstract:** To get infrared radiance characteristics of a target while it was tracked, a radiance calibration system for infrared focal plane arrays (IFPA) was design. By taking a high-accuracy plane black-body as a standard source, a mid-wave camera whose spectral response range is 3  $\mu\text{m}$  to 5  $\mu\text{m}$  was calibrated. Firstly, the calibration methodology was established and calibration procedures were decided. Then, the linear regression model was used to fit and evaluate the goodness of response and a eliminating the outlier method was taken to improve the fitting curve of the response. Finally, the target of known temperature and characteristics on the spot was measured in a field, and the actual observed value of infrared radiance characterization was obtained by fitting response curve and atmosphere transmittance. Calculation indicates that relative errors of the actual observed value to the theoretical value are less than 3%. The result confirms that proposed method can improve the uncertainty caused

收稿日期:2010-10-26;修订日期:2011-02-14.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室 2009 年基金资助项目(No. SKLLIM0901)

by the nonlinear of IFPA response.

**Key words:** Infrared focal plane array; radiance calibration; linear regression

## 1 引言

在对目标进行红外跟踪识别时,除了要得到目标的空间位置和几何形状等信息外,目标的红外辐射特性数据也很重要。为了得到目标的红外辐射特性数据,通常需要进行以下 3 方面工作:红外相机的辐射定标<sup>[1-2]</sup>,大气传输影响定标和确定观测目标的特性。红外相机辐射定标的主要目的是要确定目标入射到每个 CCD 像元上的辐射通量与这个像元输出灰度值之间的关系。大气传输影响的定标主要是确定在观测当地当时的大气参数,包括:光谱透过率,散射系数和程辐射等。目标特性包括发射率、表面材料、内部和表面热分布等。最后根据上面 3 部分数据,从目标在 CCD 像元上对应的灰度值反演计算目标的辐亮度、辐射强度和温度等信息<sup>[3-4]</sup>,从而建立目标辐射特性数据库,为目标的识别、跟踪提供基础数据。

本文主要介绍在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  处成像的中波红外焦平面阵列的实验室定标,建立定标的数学模型和定标流程,利用一元线性回归的统计方法对响应度曲线进行拟合和评估,通过对定标点残差置信区间的界定,剔除局外点,减小响应度曲线拟合误差。最后利用温度和特性已知的目标(如黑体)在外场对定标精度进行评估,并给出分析结果。

## 2 定标数学模型

在实验室使用面源黑体对 CCD 进行定标时,因为要对 CCD 的每个像元进行标定,所以黑体必须覆盖相机的整个视场,得到全部的定标系数;而且应尽量扣除大气的衰减和程辐射的影响。实际上,只有将黑体直接放于镜头前才能符合要求(或者使用黑体加平行光管的组合模拟无穷远目标),如图 1 所示:

此时可以忽略大气的影响,则每个 CCD 像元输出的灰度值  $DN$  与接收到的辐射通量的关

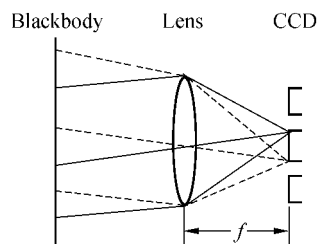


图 1 面元黑体实验室定标

Fig. 1 Calibration for plane blackbody

系如式(1):

$$DN = K\Omega_s A_d R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda d\lambda + b, \quad (1)$$

其中,  $\Omega_s$  为像元对应的物方立体角,  $A_d$  为光学系统的入瞳面积,  $R$  为成像系统(光学系统和 CCD 探测器)在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  的平均光谱响应度,  $L_\lambda$  为目标的光谱辐亮度,  $b$  主要为相机暗电流引起的固定偏置值,  $K$  为线性系数<sup>[5]</sup>。

设  $K\Omega_s A_d R = a$ , 对应相同的相机,在不改变相机参数(焦距、入瞳、滤光片等)的情况下,上述值基本上不变,可认为  $a$  为一常数。同时有  $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda d\lambda = L_b$  为黑体在  $\lambda_1$  到  $\lambda_2$  的光谱辐亮度,则上式可以写成:

$$DN = aL_b + b. \quad (2)$$

这样,相机像元的灰度值就和对对应目标的光谱辐亮度成线性关系<sup>[6]</sup>。但是,实际上相机自身受各种噪声的影响,对某一固定的  $L_b$  值,  $DN$  值为一个包含误差的随机变量。即上式为:

$$L_b = a_0 DN + b_0 + \epsilon_0, \quad (3)$$

式中  $\epsilon_0$  为误差项。它包含了相机自身的不确定度、辐射源的不确定度和由响应度非线性造成的不确定度。

上式表明,对于同一个像素值  $DN$ ,可以由不同的  $L_b$  值引起,这样,可认为  $L_b$  值是随机变量。把上式中的  $L_b$  看做响应值,  $DN$  看作预测值,并对上述模型提出如下 2 个假设:

(1) 误差只存在于  $L_b$  中,  $DN$  值中不存在误差。

(2) 误差  $\epsilon_0$  是服从正态分布的随机变量,其均值为 0 和方差恒定为  $\sigma^2$ , 即  $\epsilon_0 \sim N(0, \sigma^2)$ 。

首先,从式(5)看出误差只附加到  $L_b$  中,符合第一个假设的要求。其次,由于误差源是由大量相互独立且其各自影响微小的因素组成,在不存在系统误差的前提下,根据中心极限定理,则第二个假设也符合。上述两个假设正好是回归分析模型的前提,回归分析数学模型如图 2 所示。

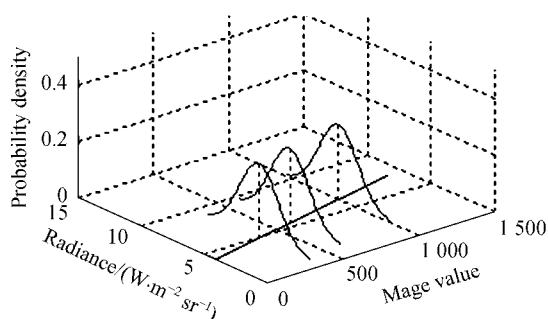


图 2 线性回归模型

Fig. 2 Model of linear regress

图 2 中直线为拟合响应度曲线,上方波形曲线为  $L_b$  的正态分布概率密度曲线。接下来应用一元线性回归对  $a_0$ ,  $b_0$  和  $\delta^2$  进行点估计和区间估计,对  $L_b$  进行点预测和区间预测,并对拟合曲线进行评估。

### 3 定标流程

根据上述数学模型进行定标,首先抽取关于总体分布的一个样本,即要测得一组相互独立的  $L_b$  和  $DN$  值,然后通过该样本对回归模型中的参数进行估计。式 1 还显示,  $a_0$  同时受相机瞬时视场  $\Omega_s$ , 入瞳面积  $A_d$  和光谱响应率  $R$  等的影响,所以必须考虑相机和环境参数的影响<sup>[7]</sup>,因此,这里首先设定中波红外相机的参数,如表 1。

表 1 相机参数

Tab. 1 Camera parameter

相机参数	数值
积分时间	1 ms(1~5 ms 可调)
非均匀性校正	单点 30 °C 黑体校正
光学系统调焦	无穷远处(焦点位置)

定标时,应保持实验室环境与实际测量环境基本一致,即确保相机的响应度和光学系统的透过率等参数与实际使用时相同,减少由此带来的测量误差。实验室定标装置如图 3 所示。

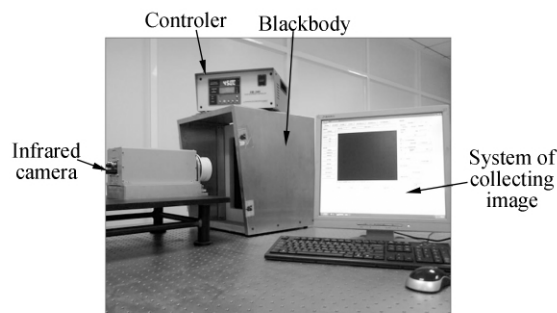


图 3 实验室定标装置

Fig. 3 Calibration device in lab

#### 3.1 $L_b$ 值的抽样

$L_b$  值由温度可以设定的高精度面源黑体得到。面源黑体为 Infrared Systems Development 公司的 IR-150,其参数如表 2。

表 2 黑体参数

Tab. 2 Blackbody parameter

黑体参数	数值
温度可调范围	环境温度~500 °C
波长	1~99 μm
发射率	0.96±0.02
温度分辨率	0.1 °C
发射面积	304 mm×304 mm

通过黑体控制器设定黑体温度,从接近环境温度的 30 °C 到中波红外相机饱和时的温度 120 °C(积分时间为 1 ms 时),温度间隔设为 5 °C。通过近似普朗克黑体辐射公式,计算得到对应的光谱辐亮度值。

#### 3.2 $DN$ 值的抽样

为了得到黑体光谱辐亮度  $L_b$  对应的  $DN$  值,用图像采集卡及相应的采集程序把数字图像保存下来。图像采集卡使用 DALSA 公司的 X64-CL iPro,使用 VC++ 进行编程开发。中波红外相机通过 CameraLink 接口把图像传输到采集卡上,再由 PCI 总线把经过缓存处理的图像传输到计算机硬盘中保存起来,并把计算  $L_b$  和定标流程加在图像采集程序中。

在定标的过程中,要保持实验室环境和相机参数不变,设定一个黑体温度,待黑体温度彻底稳定后,连续采集 200 帧图像,取其平均图像保存起来,以减少相机随机噪声。改变黑体温度,重复上

述过程。采集黑体 30~120 °C, 间隔为 5 °C 的图像, 得到不同黑体光谱辐亮度下的辐射定标图片, 即可得到一组对应的  $DN$  值。

改变相机参数, 再进行上述 3.1、3.2 相同试验, 即得到不同相机参数下的样本值, 由此全部完成了相机的实验室定标。

#### 4 定标数据处理

得到每个像素的一组  $L_b$  和  $DN$  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 (278, 192) 为例, 此点在各黑体温度  $T$  下的光谱辐亮度  $L_b$  和图像灰度值  $DN$  如表 3 所示。

表 3 定标数据  
Tab. 3 Calibration data

$t/$ °C	$L_b/$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	$DN$	$t/$ °C	$L_b/$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	$DN$
30	2.078 0	2 673	80	9.728 8	6 125
35	2.476 3	2 840	85	11.104	6 760
40	2.935 4	3 043	90	12.630	7 475
45	3.462 5	3 275	95	14.319	8 268
50	4.064 7	3 542	100	16.184	9 108
55	4.749 8	3 861	105	18.236	9 991
60	5.526 3	4 223	110	20.489	10 886
65	6.402 9	4 626	115	22.956	11 726
70	7.388 9	5 050	120	25.651	12 319
75	8.494 2	5563			

表 3 中, 定义每一组  $DN$  和  $L_b$  值为  $(DN_n, L_{bn})$ , (其中  $n=1, 2, \dots, k$ ,  $k$  为样本的大小), 并称为定标点, 这  $k$  组数据就是关于总体的一个样本。利用这个样本, 通过回归分析得到  $a_0, b_0, \epsilon_0$  的点估计和区间估计, 同时给出  $L_b$  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。拟合残差  $R_{fit,n}$  定义为:

$$R_{fit,n} = L_{bn} - \hat{L}_{bn}, \quad (4)$$

$R_{fit,n}$  是定标点处样本值与回归模型点预测值之差, 其中,  $\hat{L}_{bn}$  即为点预测值。同时得到  $R_{fit,n}$  的 95% 置信度的区间估计<sup>[8]</sup>, 如图 4 所示。

从图 4 看出, 第 19 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。本文定义这个

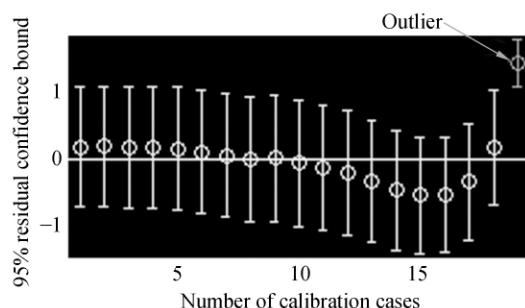


图 4 剔除局外点前的残差区间

Fig. 4 Residual bounds before eliminating outlier

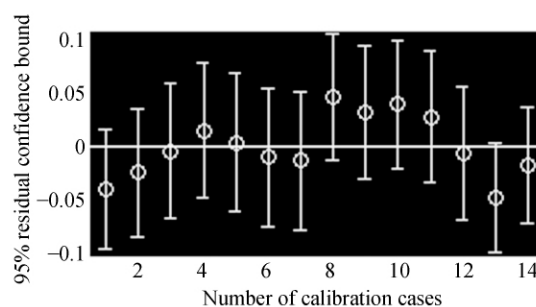


图 5 剔除局外点后的残差区间

Fig. 5 Residual bounds after eliminating outlier

定标点为局外点 (outlier), 即认为此点存在系统误差或者粗大误差。这个点的存在, 使最后拟合的响应度曲线的残差增大, 所以采用了直接剔除此局外点, 然后重新对响应度曲线进行拟合的方法。之后会再对拟合后的残差估计区间 (95% 置信度) 进行判断, 如果还有局外点, 剔除后再拟合, 直到所有的局外点都被剔除为止。

本实验应用上述方法去掉了第 1, 16, 17, 18, 19 等 5 个定标点, 剔除局外点后残差估计区间如图 5 所示。可以看出剔除局外点后的残差估计区间明显缩短, 已为原来的 1/10 左右, 并随机地分布在零点上下, 说明拟合曲线能很好地描述上述定标点, 通过这些点对响应度曲线拟合不存在系统误差或者粗大误差, 仅存在随机误差, 拟合效果很好。

剔除局外点前、后的拟合响应度曲线和  $L_b$  95% 置信度预测区间的比较<sup>[9-10]</sup> 如图 6、图 7 所示。

可以看出剔除局外点后的预测区间 (95% 置信度) 明显缩短, 说明剔除局外点后的响应度曲线对  $L_b$  的预测更加准确。为了进一步评估拟合效

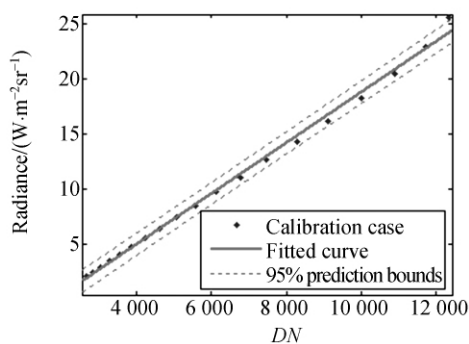


图 6 剔除局外点前的拟合曲线

Fig. 6 Fitted curve before eliminating outlier

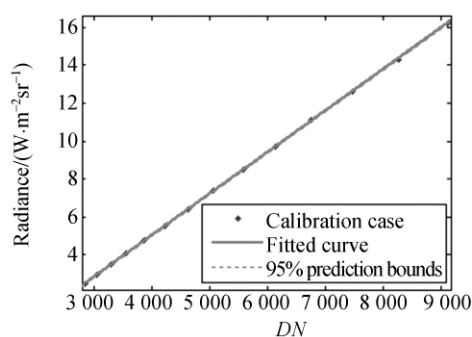


图 7 剔除局外点后的拟合曲线

Fig. 7 Fitted curve after eliminating outlier

果,文中给出了剔除局外点前后回归直线拟合参数点估计与 95%置信度的区间估计值,如表 4 所示。

表 4 拟合参数估计

Tab. 4 Estimation of fitted parameters

属性	剔除前	剔除后
$a_0$ 的点估计	0.002 307	0.002 183
和区间估计	(0.002 235, 0.002 379)	(0.002 174, 0.002 192)
$b_0$ 的点估计	-4.270	-3.683
和区间估计	(-4.783, -3.757)	(-3.734, -3.632)
$\delta^2$ 的点估计	0.212935576908426	0.000928867044626784

从表 4 可以看出,剔除局外点后  $a_0, b_0$  的估计区间和  $\delta^2$  的点估计值都有明显的改善,说明局外点在曲线拟合时对最后结果的影响非常大。在本试验中,在相机接近饱和和目标辐亮度较低时,响应度曲线的两端呈现非线性,在这个区域取的定标点会影响相机响应度曲线中间线性的部分,使最终对  $L_b$  的预测不确定度增大。所以本文采

取直接去除这些局外点,重新进行曲线拟合的方法。

## 5 辐射特性测量与结果分析

为了检验实验室对响应度曲线拟合的精度,进行了外场辐射特性测量试验。面源黑体放在 0.1 km 的远处,中波红外相机置于室内,室内环境参数保持与实验室内基本相同。首先,设定相机的参数,获得远处黑体在特定温度下的数字图像。然后,利用拟合的响应度曲线反演得到相机入瞳处的光谱辐亮度值。再通过大气传输计算软件 MODTRAN 计算此时大气的透过率和程辐射数据,修正后得到目标的光谱辐亮度。最后,将其与当前黑体的理论光谱辐亮度进行比对,以验证实验室标定的响应度的误差。外场环境参数如表 5。

表 5 环境参数

Tab. 5 Environment parameters

环境参数	数值
测量距离	0.1 km
测量时间	2010 年 6 月 1 日
海拔	0.214 km
温度	23.2 °C
相对湿度	38%

把上述参数输入到 MODTRAN 大气软件中,得到在 3~5 μm 的大气平均透过率为  $\alpha = 0.768$ 。由于在上述环境参数下的程辐射远远小于目标辐射量,因此程辐射可以忽略不计,这里主要考虑大气透过率的影响。试验获得的黑体数字图像如图 8 所示。

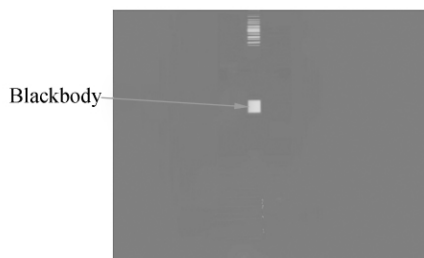


图 8 曲线黑体图像

Fig. 8 Blackbody image

图 8 中的亮目标即为 0.1 km 外目标黑体的图像。黑体中心点落在坐标点(278,192)处。为

了验证局外点对响应度曲线拟合精度的影响,分别用剔除局外点前、后的拟合曲线反演得到目标的表观辐亮度。此像素点在剔除局外点前、后的实验室标定响应度曲线分别为式(7)、(8):

$$L_b = 0.002307DN - 4.270, \quad (5)$$

$$L_b = 0.002183DN - 3.683. \quad (6)$$

这时的  $L_b$  即为入瞳处光谱辐亮度,经过大气衰减修正后,即为目标的表观光谱辐亮度,在目标为黑体时,即为黑体的光谱辐射亮度。设定远处黑体温度,通过图像采集系统,得到对应的数字图像,即得到  $DN$  值,然后通过式(7)、(8)计算得到对应  $L_b$  值,再经过大气衰减系数修正后,和对应黑体的理论光谱辐亮度进行对比,其结果和相对误差如表 6 所示。

表 6 测量结果  
Tab. 6 Result of observation

远处黑体温度 / $^{\circ}\text{C}$	黑体图像 $DN$ 值	黑体理论光谱辐亮度	剔除局外点前反演值/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ) (相对误差)	剔除局外点后反演值/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ) (相对误差)
40	2 744	2.935 5	2.682 8(8.6%)	3.004 1(2.3%)
50	3 107	4.064 7	3.773 2(7.2%)	4.035 9(0.7%)
60	3 604	5.526 3	5.266 2(4.7%)	5.448 6(1.4%)
75	4 637	8.494 2	8.369 2(1.5%)	8.384 9(1.3%)
85	5 579	11.104	11.199(0.8%)	11.062(0.3%)
95	6 733	14.319	14.665(2.4%)	14.343(0.2%)
105	8 155	18.236	18.937(3.8%)	18.385(0.8%)
115	9 817	22.956	23.930(4.2%)	23.109(0.7%)

#### 参考文献:

- [1] JACOBS PIETER A. Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds [J]. *SPIE*, 1996, TT23.
- [2] WACK EDWARD C. Pre-launch infrared of the GOES I-M Imager and Sounder [J]. *SPIE*, 2004, 4135: 140-149.
- [3] BEVERLY J. KIEMME. A 1 cm collimated source for use in infrared calibrations [J]. *SPIE*, 2000, 4028: 411-419.
- [4] 王锐, 宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统 [J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(3): 469-474.

从表中所示剔除局外点前后的反演相对误差看,剔除后对相机响应度两端非线性部分的拟合效果很好,尤其对  $L_b$  值很小的部分。原因在于  $L_b$  值接近相机饱和时,定标点偏离响应度中间线性部分的误差很大,这样包括这些局外点的拟合对整个响应度曲线影响较大,尤其是对  $L_b$  值较小的部分,因此此处的相对误差很大。

## 6 结 论

本文给出了中波红外焦平面阵列的实验室定标数学模型和流程,并使用一元线性回归分析方法对响应度曲线进行拟合和评估,提出了利用剔除局外点的方法对拟合的曲线进行优化处理,优化后的响应度曲线在两端的拟合精度大大提高。在外场通过黑体对拟合结果进行了验证,结果显示,在目标为面目标且大气波动较小时,测量相对误差小于 3%,结果表明该优化方法在辐射定标中能有效地改善拟合不确定度,并能用统计学的方法筛选定标数据,具有广泛的实际应用价值,对今后开展红外辐射定标研究具有重要的意义。

WANG R, SONG K F. High-accuracy calibration system for ultraviolet detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 469-474. (in Chinese)

- [5] 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.
- LI X S, REN J W, ZHANG L G, *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)
- [6] 林晓钢, 顾乃庭, 杨泽平. 基于小孔夫琅和费衍射法的 CCD 光电响应特性标定研究 [J]. *光学 精密工*

- 程,2008,16(3):410-414.
- LIN X G, GU N T, YANG Z P. The pinhole Fraunhofer diffraction method of calibrating CCD optics-electron characteristic Research on a Radio [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 410-414. (in Chinese)
- [7] 陈风,郑小兵. 光谱非匹配对于光学遥感器定标精度影响的分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 415-419.
- CHEN F, ZHENG X B. The analysis that spectrum not matching of source affects remote sensor precision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 415-419. (in Chinese)
- [8] 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.
- MA H, WANG J B. *Theory of Error and Precision of Instrument* [M]. Beijing, Weapon Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 赵玉环,闫丰,周跃,等. 紫外 ICCD 的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1572-1576.
- ZHAO Y H, YAN F, ZHOU Y, *et al.*. Radiometric calibration of ultraviolet ICCDE detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1572-1576. (in Chinese)
- [10] 董宁宁,李敏,刘震,等. 极紫外单色仪波长定标[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1660-1665.
- DONG N N, LI M, LIU Z, *et al.*. Wavelength calibration of extreme ultraviolet monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1660-1665.

## 作者简介:



李 宁(1983—),男,吉林白山人,博士研究生,主要从事红外辐射定标的研究。E-mail: ningli521@qq.com



杨词银(1975—),男,江西九江人,副研究员,主要从事辐射定标、辐射测量的研究。E-mail: yangciyin@163.com



曹立华(1971—),男,吉林磐石人,研究员,主要从事光电跟踪与数字通信技术方面的研究。E-mail: caohl@ciomp.ac.cn



郭立红(1964—),女,吉林舒兰人,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗装备的总体设计。E-mail: guolh@ciomp.ac.cn