

基于二次修正提高宽动态红外辐射测量精度

李 周¹, 李铭扬^{1,2}, 余 毅¹, 何锋贇¹, 蔡立华¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院天基动态
快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 随着高超音速武器的出现, 实现系统对目标从低温到高温宽动态的辐射测量是未来的发展趋势, 而现在对辐射测量宽动态范围的研究相对较少。文中针对宽动态辐射测量中的平行光管和衰减片带来的误差提出了二次修正方法, 进一步提高了高温红外辐射测量的目标反演的精度。为验证文中提出方法的实际效果, 对基于 600 mm 口径的中波红外辐射测量系统进行了实验。并利用文中的方法对 2%、10%、20% 的辐射测量结果进行了修正, 实验分析结果显示, 该修正方法分别将原有的测量精度提高 3.31%、3.27%、1.60%, 证实修正方法可以有效地提高辐射测量的精度, 具有一定的工程实践意义。

关键词: 辐射定标; 宽动态测量; 辐射特性; 红外成像系统

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200142

Improvement of wide dynamic infrared radiation measurement accuracy based on dual correction

Li Zhou¹, Li Mingyang^{1,2}, Yu Yi¹, He Fengyun¹, Cai Lihua¹

- (1. Key Laboratory of Space-based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, 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: With the appearance of hypersonic weapon, it is a coming tendency to measure radiation in wide dynamic range from low temperature to high temperature. At present, the research of wide dynamic range radiometric measurement is relatively few. In this paper, a dual correction of collimators and attenuators method was proposed for wide dynamic radiation measurement to further improve the accuracy of high temperature infrared radiation measurement. The experiment was carried out based on the mid-wave infrared radiation measurement system of 600 mm aperture. The radiation measurement results with attenuators 2%, 10% and 20% were corrected, and the original measurement accuracy was increased by 3.31%, 3.27%, 1.60% respectively. It is proved that the correction method can effectively improve the accuracy of radiation measurement, which has certain engineering practice significance.

Key words: radiometric calibration; wide dynamic measurement; radiation characteristics; infrared imaging system

收稿日期: 2020-04-26; 修订日期: 2020-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51675506)

作者简介: 李周 (1989-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事红外辐射特性测量方面的研究工作。Email: lizhou@ciomp.ac.cn

0 引言

战术与战略导弹是现代战争中的“杀手锏”武器之一,是各国国防发展的利器。为应对导弹对国家的安全威胁,各国着力发展导弹防御技术。因此,针对上述导弹打击威胁,研究宽动态范围的红外辐射测量技术可以有效地解决饱和和打击的手段,对防御体系建设具有重要的意义^[1-2]。国内对红外辐射特性测量的研究已经持续多年。特别是辐射定标方面,许多研究团队一直从事该方面的工作:杨词银等基于 800 mm 高精度面源黑体的对地基大口径红外系统进行辐射定标,并分析了实验误差^[3];唐嘉等提出了多种红外辐射定标的方法,包括扩展源定标、间接定标和点源定标,并分析了各自的优缺点^[4]。在辐射测量方面,吕游等提出双波段辐射测量算法,都推动了目标红外辐射特性的发展。而现在针对宽动态的辐射测量研究相对较少,对红外辐射特性测量系统,其所谓的宽动态就是要求系统能够实现从低温到高温的测量,获取不同温度的目标的不同的红外辐射特性,利用红外辐射特性的差异,进而实现对目标的发现与识别^[5-9]。

为研究宽动态的辐射测量的精度。文中首先介绍了制冷型红外光电探测系统的定标原理。在宽动态范围的辐射定标的基础上,提出了宽动态范围的二次辐射修正方法。并基于 600 mm 口径的中波红外辐射特性测量了系统外场,采集数据进行了精度验证,对修正前和修正后的辐射测量的精度进行了对比,证实了宽动态辐射测量修正的必要性。

1 制冷型红外辐射定标原理

假设入射到红外测量系统的光子数为 N_p , 光子辐射所激发的电荷数为 N_e 则探测器的光电转化效率 $\eta(\lambda)$ 为^[10]:

$$\eta(\lambda) = \frac{N_e}{N_p} \quad (1)$$

若探测器单个像元面积为 A , 在曝光时间 T_{int} 内, 则目标的辐射出射度 M (单位为 W/m^2) 与其光子数 N_e 之间的关系为:

$$M(\lambda, T) = \frac{h \cdot \nu \cdot N_p}{A \cdot T_{\text{int}}} = \frac{h \cdot c \cdot N_e}{A \cdot T_{\text{int}} \cdot \lambda \cdot \eta(\lambda)} \quad (2)$$

式中: c 为光速, 其值 $2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$; h 为普朗克常数, 其值为 $6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}$ 。

对朗伯体来说, 满足:

$$N_e(\lambda) = \frac{A \cdot T_{\text{int}} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot \eta(\lambda)}{hc} \cdot L(\lambda, T) \quad (3)$$

给出了理想情况下, 目标辐射亮度与激发电荷的关系。

对于带镜头的光学系统来说, 波段响应 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 的范围内, 每个像元上产生的灰度 G (单位为 DN), 与黑体辐射亮度的关系为:

$$G = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0 \frac{a \cdot A \cdot T_{\text{int}} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot \eta(\lambda)}{4F^2 hc} \cdot L(\lambda, T) d\lambda + B \quad (4)$$

式中: F 为光学系统的光圈数, 定义为 f/D , f 为系统的焦距, D 为光学系统的入瞳直径; τ_0 为光学系统的透过率; a 为电子放大系数; B 为光学系统和红外探测器产生的噪声偏置, 单位为 DN。

令 $k = a \cdot \frac{A \cdot \pi}{4F^2} \cdot \tau_0$, 红外辐射测量系统的光谱响应率 R 表述为 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{hc} d\lambda$, 而在中波窄波段的光电转化效率几乎为常数, $\frac{\lambda}{hc}$ 为窄波段单位能量中的光子数, 也是常数, 则上式简化为:

$$G = k \cdot T_{\text{int}} \cdot R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda + B \quad (5)$$

图 1 为传统辐射定标的基本原理。

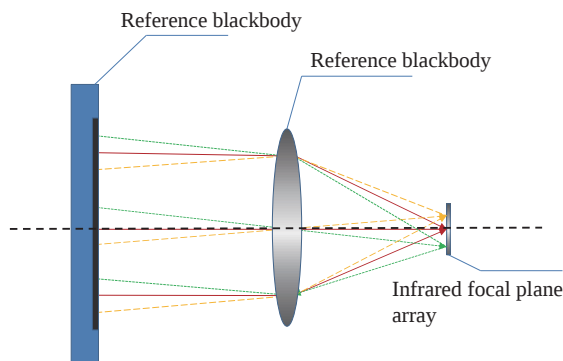


图 1 辐射定标能量传递原理

Fig.1 Principle of energy transfer in radiation calibration

2 基于平行光管宽动态的辐射定标与测量

2.1 基于平行光管的定标原理

宽动态的辐射定标是实现宽动态红外辐射特性测量的基础。而现在传统的面源黑体 (温度最高为 400°C) 定标很难满足宽动态辐射测量的需求。平行光管定标法是最为常见的宽动态定标方法之一, 利用平行光管实现对高温腔型黑体的均匀扩束, 如图 2

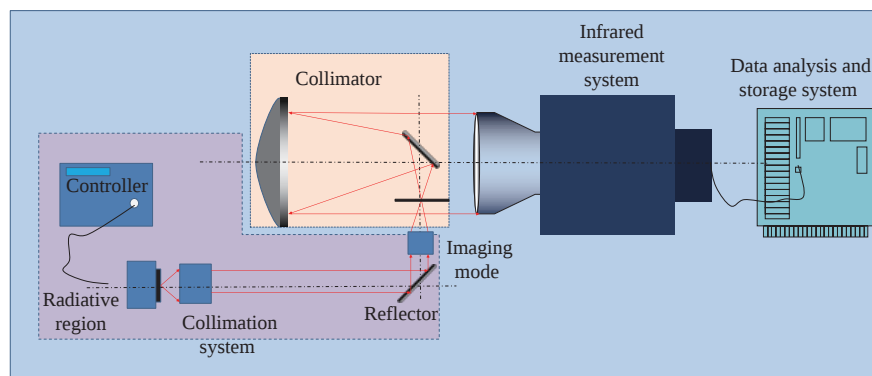


图 2 平行光管定标原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of collimator calibration principle

所示。高温腔型黑体配合平行光管更容易实现高温定标 (1200 ℃)。

同样平行光管相比面源黑体定标也带来了更多的定标误差。主要是由于平行光管自身的透过率 and 高温定标需要采用的中性衰减片的影响。因此要实现高精度宽动态范围的辐射定标与测量,需要对平行光管和中性衰减片对定标与测量带来的误差进行修正,其原理如下。

在理论透过率 $\tau_{100\%}$ 下,系统的辐射定标方程为:

$$G_1 = T_{\text{int}} \cdot R'_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda + B_1 = k \cdot T_{\text{int}} \cdot \tau_{100\%} \cdot R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda + B_1 \quad (6)$$

式中: $\tau_{100\%}$ 为衰减片的透过率; R'_1 为低温段拟合系数。

在高温段,相同的衰减片 $\tau_{100\%}$ 下,平行光管辐射定标方程为:

$$G_2 = T_{\text{int}} \cdot R'_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda + B_2 = k \cdot T_{\text{int}} \cdot \tau_{100\%} \cdot \tau_{\text{collimator}} \cdot R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda + B_2 \quad (7)$$

式中: $\tau_{\text{collimator}}$ 为平行光管的透过率; R'_2 为高温段拟合系数。

因此,修正后的平行光管的透过率表示为:

$$\tau_{\text{collimator}} = \frac{R'_2}{R'_1} \quad (8)$$

其次,由于在高衰减倍率的中性衰减片由于透过率较低,在不同的环境下,其透过率变化较大,因此需要对透过率进行标定,进行必要的修正。

将平行光管修正后的数据代入:

$$T_{\text{int}} \cdot R''_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda + B_2 = k \cdot T_{\text{int}} \cdot \tau_{100\%} \cdot \frac{R'_2}{R'_1} \cdot R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda \quad (9)$$

切换到 τ_{filter} ($\tau_{\text{filter}} \neq 100\%$), 得到其他衰减片的平行光管定标方程为:

$$T_{\text{int}} \cdot R''_3 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda = k \cdot T_{\text{int}} \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \frac{R'_2}{R'_1} \cdot R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda \quad (10)$$

得到实际测量时,衰减片修正透过率 τ_{filter} 为:

$$\tau_{\text{filter}} = \frac{R''_3}{R''_2} \quad (11)$$

最终得到宽动态范围下的定标方程为:

$$G = k \cdot T_{\text{int}} \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \tau_{\text{collimator}} \cdot R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda + B = k \cdot T_{\text{int}} \cdot \frac{R'_2}{R'_1} \cdot \frac{R''_3}{R''_2} \cdot R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda + B \quad (12)$$

2.2 宽动态范围的辐射测量原理

如图 3 所示,地基红外辐射特性测量系统观测目标时接收的红外辐射包括:①经过大气衰减后的目标自身辐射;②目标表面反射周围环境的辐射;③地表

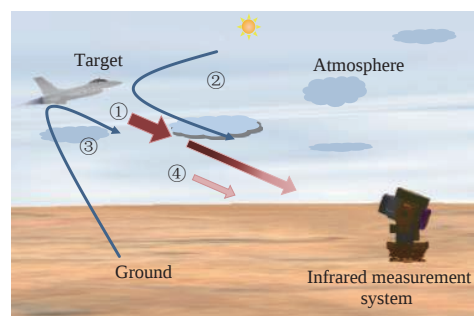


图 3 红外辐射特性测量的基本原理

Fig.3 Basic principle of infrared radiation characteristic measurement

散射的环境辐射;④大气程辐射。

因此,宽动态范围的红外辐射测量表述为:

$$G = \rho \cdot k \cdot \frac{R'_2}{R'_1} \cdot \frac{R''_3}{R''_2} \cdot R(\tau_{\text{atm}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L(\lambda, T_0) + L(T_{\text{path}})) d\lambda) + B + (1 - \rho) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_b) d\lambda \quad (13)$$

式中: ρ 为被测目标的反射率; $L(\lambda, T_0)$ 为被测目标的光谱辐射亮度; τ_{atm} 和 $L(T_{\text{path}})$ 分别为大气透过率和大气程辐射; $L(\lambda, T_b)$ 为背景的光谱辐射亮度。利用大气传输修正系统获取大气透过率和大气程辐射。

3 测量精度验证实验

3.1 辐射定标实验

为验证二次修正对宽动态范围的红外辐射测量精度影响,利用口径 600 mm 中波红外辐射测量系统进行辐射定标和测量实验。其采用系统的参数见表 1,系统定标采用高精度的常规面源黑体,黑体发射率为 0.94,温度范围为 0~100 ℃,辐射面积为 700 mm × 700 mm,温度精度为 0.01 ℃。高温腔型黑体辐射面为 25.4 mm,温度范围 50~1 200 ℃,发射率为 0.99,温度步长为 50 ℃,温度精度为 0.01 ℃。

表 1 红外系统的参数表

Tab.1 Parameters of infrared system

Parameters	Value
Band/ μm	3-5
Depth/bit	14
Pixel size/ μm^2	15 × 15
Pixel number	640 × 512
Focal length/mm	1 200
Aperture/mm	600

中低定标采用常规面源黑体,控制面源黑体从 20 ℃ 升温至 100 ℃,温度采样步长为 5 ℃。系统采集图像所用的积分时间为 1 ms,拟合定标结果如图 4 所示。

中波 1 ms 低温结果为:

$$G = 340.496\,7 \times L(T) + 16\,189.174\,63 \quad (14)$$

在 0.5 ms 得到全透高温中波定标结果为:

$$y = 160.273\,66x + 712.577\,63 \quad (15)$$

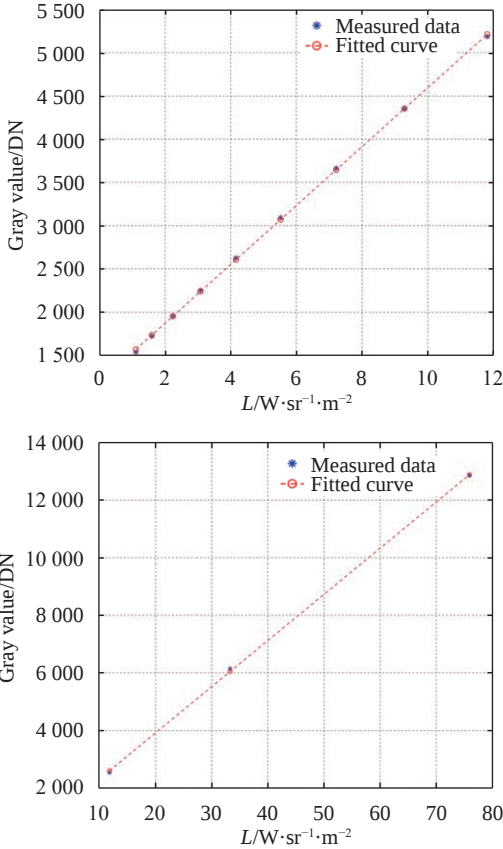


图 4 辐射定标结果

Fig.4 Radiation calibration results

根据公式 (9) 和公式 (10), 得到在当时测试环境下,实际光管的透过率为 0.9806。

3.2 衰减片透过率修正

在获取光管的透过率后,获取实际在 100%, 50%, 20%, 10%, 2% 衰减下的定标结果如表 2 所示,其数据拟合结果如图 5 所示。

表 2 不同档位的定标方程

Tab.2 Calibration equations of different grades

Transmissivity	Calibration equation
100%	$G = 333.740\,6 \times L(T) + 1\,071.849$
50%	$G = 163.873\,1 \times L(T) + 1\,090.452\,4$
20%	$G = 64.238\,8 \times L(T) + 1\,127.514\,2$
10%	$G = 41.309\,4 \times L(T) + 1\,140.888\,5$
2%	$G = 10.269\,8 \times L(T) + 1\,326.024\,8$

在不同透过率下实际得到的衰减片的透过率如表 3 所示。在不同的透过率下可以看出,衰减倍率越高其相对误差也越大,主要是衰减倍率高,其反射率

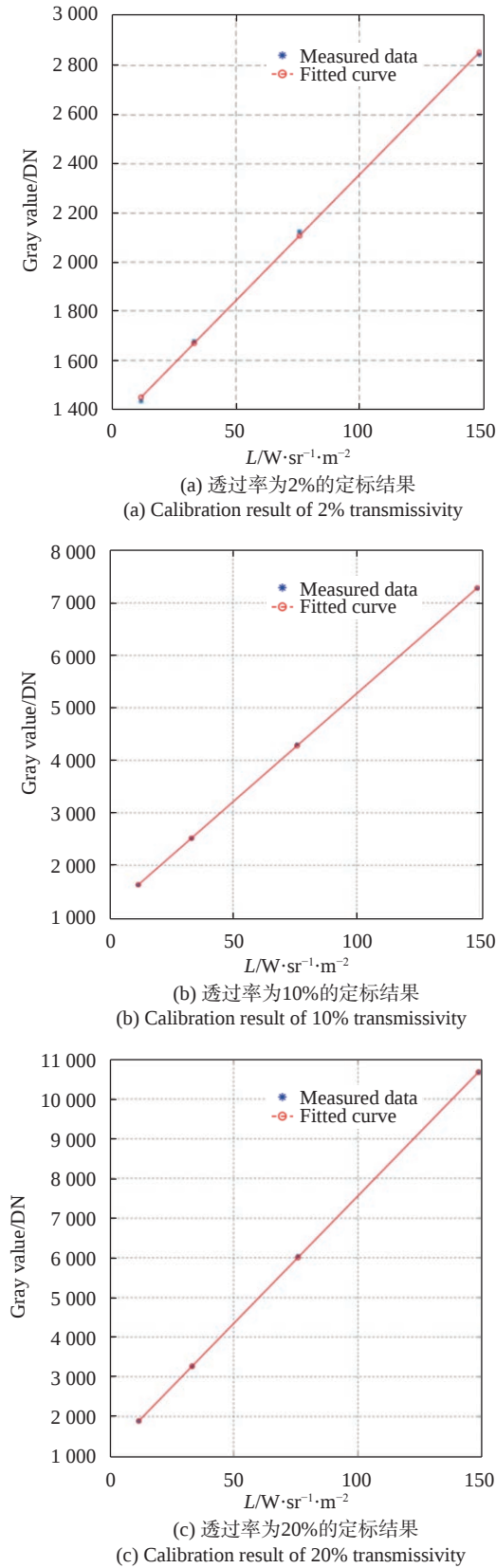


图 5 不同衰减倍率下的辐射定标数据

Fig.5 Radiation calibration data at different attenuation ratios

表 3 实际修正后透过率

Tab.3 Actual corrected transmittance

Ideal transmissivity	Actual transmissivity	Error
50%	49.08%	2.44%
20%	19.24%	3.5%
10%	12.37%	29.1%
2%	3.06%	60.5%

较大,受环境温度影响较大。

3.3 辐射测量实验

为验证平行光管和衰减片修正结果可以有效地提高宽动态范围的红外辐射测量的精度。采用上述红外辐射测量系统系统进行验证,目标距离系统 770 m,大气透过率和大气程辐射采用修正系统如表 4 所示。

计算得到的大气修正数据为:

$$\tau_{\text{atm}} = 0.7317$$

$$L_{\text{path}} = 0.2075 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (16)$$

系统分别在 2%, 10%, 20% 衰减片下采集 200~600 ℃ 的目标,得到在不同衰减片下的修正与未修正的对目标的测量精度。辐射测量实验时记录的环境条件(测量当天阴天)见表 4。

表 4 测量实验气象条件

Tab.4 Meteorological conditions of measurement experiment

Parameters	Value
Wind speed/m·s ⁻¹	7.1
View angle/(°)	0
Pressure/hPa	905
Visibility/km	20 km
Humidity	26.2%

在理论衰减倍率为 2%,修正前测量绝对误差平均值为 20.26%,对衰减片的透过率修正后的误差为 16.95%;在理论衰减倍率为 10%,修正前测量绝对误差平均值为 6.73%,对衰减片的透过率修正后的误差为 4.09%;在理论衰减倍率为 20%,修正前测量绝对误差平均值为 3.41%,对衰减片的透过率修正后的误差为 1.81%。最终的红外辐射测量数据如表 5 所示。

表 5 辐射测量数据对比
Tab.5 Comparison of radiometric data

Ideal transmissivity	Ideal temperature/°C	Ideal radiance/W·m ⁻² ·sr ⁻¹	Original radiance/W·m ⁻² ·sr ⁻¹	Revised radiance/W·m ⁻² ·sr ⁻¹
20%	200	72.852	77.744 2	72.937 4
	300	252.867	252.544 5	247.573 1
	400	609.562	618.075 7	607.692 3
	500	1 173.579	Saturation	Saturation
	600	1 947.853	Saturation	Saturation
10%	200	72.852	78.777 6	75.772 1
	300	252.867	265.334 3	245.248 1
	400	609.562	618.466 2	602.986 3
	500	1 173.579	1 028.563 0	949.088 1
	600	1 947.853	Saturation	Saturation
2%	200	72.852	81.713 7	75.987 0
	300	252.867	251.830 1	237.028 9
	400	609.562	600.893 0	598.888 8
	500	1 173.579	1 195.297 7	1 168.865 7
	600	1 947.853	2 008.890 6	1 998.229 2

4 结 论

文中针对宽动态范围的红外辐射特性需求, 首选推导了红外辐射定标的基本原理, 针对宽动态的辐射定标修正, 提出宽动态测量平行光管透过率修正方法和衰减片透过率修正方法。并采用 600 mm 的中波红外系统进行辐射定标验证。实验结果表明, 对平行光管的透过率和衰减片的透过率进行修正可以有效地提高辐射特性测量的精度, 具有一定的工程应用价值。

参考文献:

[1] Chen Chuan, Yi Weining, Cui Wenyu. Measurement of infrared radiation characteristics of spatial target based on reference source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0804004. (in Chinese)

[2] Wang Jianjun, Huang Chen, Li Jianting. Calibration technology of infrared radiation measurement for space object [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0404002. (in Chinese)

[3] 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): 1625-1629. (in Chinese)

[4] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Simplifying method of

radiance calibration for MWIR detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2132-2137. (in Chinese)

[5] You Lü, Xin He, Wei Zhonghui, et al. Ambient temperature-independent dual-band mid-infrared radiation thermometry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2169-2174.

[6] Chang Songtao, Zhang Yaoyu, Sun Zhiyuan, et al. Method to remove the effect of ambient temperature on radiometric calibration [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): 6274-6279.

[7] Bao Xingdong, Yu Xilong, Mao Hongxia, et al. Search on fluid field and infrared radiation of vacuum plume based on theoretical analytical method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0104003. (in Chinese)

[8] Tian Qijie, Chang Songtao, Qiao Yanfeng, et al. Radiometric calibration based on low-temperature area blackbody for infrared systems with high dynamic range [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 0412003. (in Chinese)

[9] Li Zhou. Research on ground-based infrared characteristics measurement systems in wide range radiometry[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)

[10] Li Zhou, Qiao Yanfeng, Chang Songtao, et al. High-speed calibration algorithm for wide dynamic range infrared radiometric system [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0617003. (in Chinese)