红外目标模拟器辐射校准方法的研究*

张建萍，杨词银

（中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033）

摘 要： 在利用红外目标模拟器对红外成像系统进行性能检测和定标之前，需要先对其输出的有效辐射进行校准，而现有的辐射校准方法没有考虑到红外目标模拟器自身光机结构所产生的背景辐射。建立了考虑到红外目标模拟器背景辐射的辐射校准模型，可同时确定红外目标模拟器中平行光管的透过率和背景辐射，并据此得到红外目标模拟器的有效辐亮度。分析了该校准方法的不确定度，在 3.7～4.8 μm、8～9.2 μm 波段分别为 4.2%、3.5%。最后，利用中波和长波红外相机，对由 HFY-302B 黑体和 LPS300 离轴平行光管组成的红外目标模拟器在 3.7～4.8 μm、8～9.2 μm 波段的有效辐射进行校准实验，给出了辐射校准结果。

关键词： 红外目标模拟器；透过率；背景辐射；辐射校准；黑体

中图分类号： TP732.2 **文献标识码：** A **国家标准学科分类代码：** 510.40

Research on the radiation calibration method of infrared target simulator

Zhang Jianping, Yang Ciyin

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China*)

Abstract: Before performing performance detection and calibration on an infrared imaging system using the infrared target simulator, it is necessary to calibrate the effective radiation of the simulator. The existing radiation calibration methods do not consider the background radiation generated by the optical and mechanical mechanism of the infrared target simulator itself. A simulator radiation calibration model considering the background radiation of the infrared target simulator itself was established, which can determine the transmittance of the collimator in the simulator and the background radiation of the simulator, and obtain the effective radiance of the simulator. The uncertainty of the calibration method was analyzed, which is about 4.2% at the waveband of 3.7—4.8 μm and about 3.5% at the waveband of 8—9.2 μm. A radiation calibration experiment was performed on the simulator consisting of the HFY-302B blackbody and the LPS300 off-axis collimator using a midwave infrared camera operating at the waveband of 3.7—4.8 μm and a longwave infrared camera operating at the waveband of 8—9.2 μm, and the calibration results are given.

Keywords: infrared target simulator; transmittance; background radiation; radiation calibration; blackbody

1 引 言

红外目标模拟器是各种红外成像系统如红外寻的弹头、地基和星载红外测量系统的性能检测与定标常用装置，一般由红外辐射源如黑体、光阑和离轴平行光管组成[1]。在红外寻的弹头实验中，利用红外目标模拟器来检测导弹红外寻的系统的灵敏度、捕获概率和跟踪特性等性能，红外目标模拟器输出辐射的准确度直接关系到红外寻的系统的性能检测精度。在利用红外目标模拟器对红外测量系统进行辐射定标时，红外目标模拟器输出辐射的准确度直接决定了红外系统定标精度[2-3]。

国内外先后开展了红外目标模拟器的辐射校准研究工作。如 John L. Grangaard[3] 采用红外辐射计对红外目标模拟器进行了测量和研究工作，在 3～5 μm 光谱区间的不确定度超过了 23%。1996 年，M. Wolk 等人[4] 用 SR-5000

收稿日期： 2013-02 Received Date: 2013-02

* 基金项目：国家自然科学基金（50902128）资助项目

红外光谱辐射计进行了红外目标模拟器辐照度测量研究工作。梁培等人[11-12]分别利用自制红外光谱辐射计、SR-5000 红外光谱辐射计和专用校准系统，对红外目标模拟器辐照度进行了校准，但没有考虑目标模拟器中的平行光管自身热辐射。梁培等人[13]虽然在红外目标模拟器校准模型中考虑到了背景辐射，但是最终由于无法进行计算而予以忽略。李旭东等人[14]利用傅里叶变换红外光谱辐射计作为传递标准，对野外红外目标模拟器辐射特性进行校准，但是也没有考虑目标模拟器自身热辐射的影响。戴景民等人[15]开展了基于探测器的红外目标模拟器辐射校准方法的研究，但并没有给出辐射校准模型和实验结果。

本文先利用标准黑体对某红外相机进行定标，然后利用经过标定的红外相机对红外目标模拟器的有效输出辐射及其自身热辐射进行校准，并给出辐射校准模型。最后，进行了红外目标模拟器辐射校准实验，并给出校准实验结果。

2 红外相机定标

2.1 辐射定标原理

本文采用的校准原理如下：首先利用标准面源黑体对红外相机进行定标，得到红外相机的辐射响应度和偏置；然后，用标定过的红外相机校准红外目标模拟器的有效辐射。

利用黑体标定红外相机的模型如下[16-17]：

$$DN = \alpha \cdot L + DN_0 \tag{1}$$

式中：DN 为相机输出值，α 为待标定的相机辐亮度响应度，L 为黑体在相机工作波段内的辐亮度，DN_0 是由相机自身光机结构热辐射、散射背景辐射以及探测器暗电流引起的偏置。黑体辐亮度 L 通过普朗克公式计算：

$$L = \frac{\varepsilon}{\pi}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1\lambda^{-5}\left(e^{C_2/\lambda T}-1\right)^{-1}\mathrm{d}\lambda \tag{2}$$

式中：$\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为相机工作波段，ε 为黑体发射率，T 为黑体工作温度(K)，C_1 分别为第一、第二辐射常数，$C_1 = (3.741\ 5 \pm 0.000\ 3) \times 10^8$ (W·m^{-2}·μm^4)，$C_2 = (1.438\ 79 \pm 0.000\ 19) \times 10^4$ (μm·K)。

在此，采用美国 ISDC IR150 型面源黑体对 SofradIR 中波红外相机和 FLIR 长波红外相机进行定标，表 1 给出了 ISDC 黑体技术指标，表 2、3 分别给出了中波和长波红外相机技术指标。

表 1 ISDC IR150 黑体技术指标

Table 1 Technical parameters of the ISDC IR150 blackbody

参数	值
辐射面积	300 mm×300 mm
工作温度范围	25～500℃
发射率	0.97
温度分辨率	0.1 ℃
温度精度	0.5%

表 2 中波红外相机技术指标

Table 2 Technical parameters of the MW IR camera

参数	值
工作波段	3.7～4.8 μm
输出位数	14 b
相机镜头口径	Φ70 mm
相机镜头焦距	140 mm

表 3 长波红外相机技术指标

Table 3 Technical parameters of the LW IR camera

参数	值
工作波段	8～9.2 μm
输出位数	16 b
相机镜头口径	Φ180 mm
相机镜头焦距	360 mm

图 1 和 2 分别给出了中波和长波红外相机的辐射定标装置图。将 ISDC IR150 黑体设置在不同的工作温度下，使红外相机对黑体进行测量，得到不同的测量值 DN_i 和对应黑体福亮度 L_i。图 3 和 4 分别给出了中波和长波红外相机的定标结果，其中横坐标代表黑体辐亮度 L(W·m^{-2}·sr^{-1})，纵坐标代表相机输出值 DN。

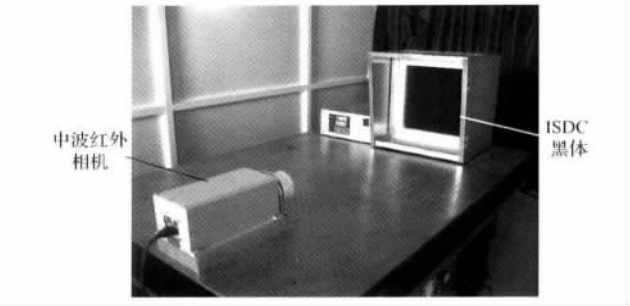

图 1 中波红外相机定标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the radiation calibration of the midwave IR camera

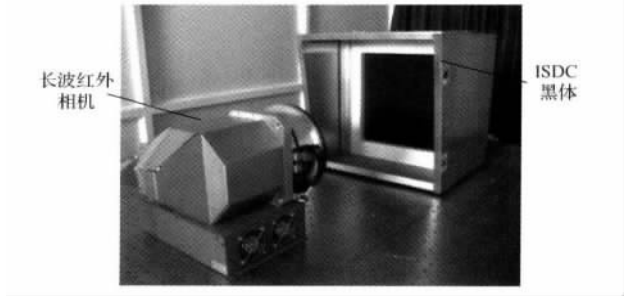

图 2 长波红外相机定标示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the radiation calibration of the longwave IR camera

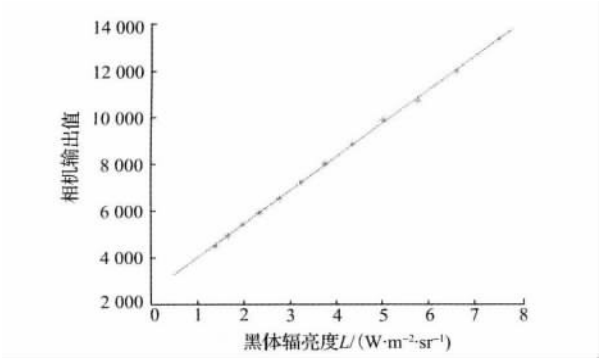

图 3　中波红外相机定标结果

Fig. 3 Calibration results of the midwave IR camera

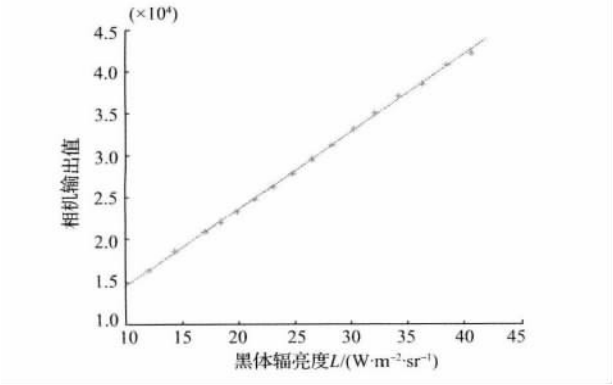

图 4　长波红外相机定标结果

Fig. 4 Calibration results of the longwave IR camera

根据式(1),对图 3 和 4 的定标结果进行线性拟合,得到中波红外相机的辐亮度响应关系为:

$$DN = 1\,466.9 \times L + 2\,530 \tag{3}$$

长波红外相机的辐亮度响应关系为:

$$DN = 925.5 \times L + 5\,174 \tag{4}$$

2.2　定标不确定度

由式(1)可知,红外相机辐亮度响应度 α 和偏置 DN_0 的不确定度取决于红外相机输出值 DN 和黑体辐亮度 L_{bb} 的不确定度,分析如下:

1) 红外相机输出值 DN 的不确定度取决于红外相机输出稳定性,在实验室对 SofradIR 中波和 FLIR 长波红外相机进行了多次实验,输出稳定性优于 1%;

2) ISDC IR150 面源黑体的温度精度均为 0.4%,温度均匀性为 1%,SofradIR 中波和 FLIR 长波红外相机定标所需温度范围为 30 ~ 100 ℃,经计算,在该温度范围内,黑体辐亮度在中波红外波段(3.7 ~ 4.8 μm)的最大误差为 2.7%,在长波红外波段(8 ~ 9.2 μm)的最大误差为 1.5%;

3) 另外,在相机定标过程中环境温度会变化,将造成环境辐射和相机自身热辐射等背景辐射的变化,假定在 20 ℃常温下进行相机定标,温度稳定性为 ±1 ℃,则环境温度变化带来的不确定度约为 2%。

根据以上分析,中波红外相机和长波红外相机的定标不确定度分别为 3.5% 和 2.7%。

3　红外目标模拟器辐射校准

3.1　校准原理

如图 5 所示,红外目标模拟器由离轴平行光管和位于平行光管焦面上的黑体组成,利用经过标定的红外相机对红外目标模拟器的有效辐射进行校准。图 6 为目标模拟器辐射校准实验装置图。

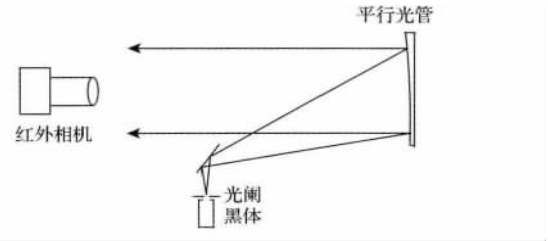

图 5　红外目标模拟器辐射校准原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the IR target simulator radiation calibration calibration

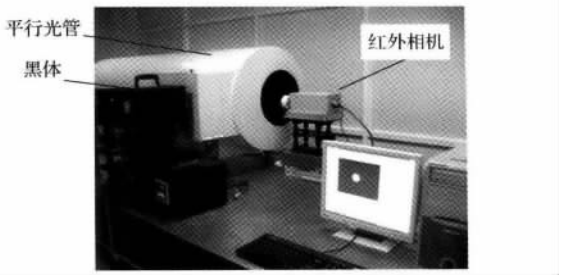

图 6　红外目标模拟器辐射校准装置图

Fig. 6 Set-up diagram of the IR target simulator radiation calibration

红外目标模拟器有效辐射校准模型如下:

$$DN = \alpha \cdot [\tau_C \cdot L_{bb} + L_{bg}] + DN_0 \tag{5}$$

式中: DN 为红外相机对目标模拟器测量的输出值,(为红外相机辐射响应度,DN_0 为红外相机定标偏置(α、DN_0 在第 1 节中已确定),L_{bb} 为位于平行光管焦面上的黑体的辐亮度,τ_C 为平行光管透过率,L_{bg} 为平行光管的平面反射镜、离轴抛物面反射镜、支撑机构和机械外壳等产生的背景辐射。

对式(5)进行整理得:

$$\frac{DN - DN_0}{\alpha} = \tau_C \cdot L_{bb} + L_{bg} \tag{6}$$

将红外目标模拟器的黑体设置在不同工作温度 T_i,

对应黑体辐亮度为 $L_{bb,i}$，红外相机对目标模拟器进行测量得到输出值 DN_i，并计算对应的($DN_i - DN_0$)/(。根据式(6)，利用多组 $L_{bb,i}$、($DN_i - DN_0$)/(进行线性拟合，得到平行光管透过率 τ_C 和背景辐射 L_{bg}。

在测得光管透过率 τ_C 和背景辐射 L_{bg} 后，当红外目标模拟器检测或标定某红外成像系统时，假定红外目标模拟器的黑体辐亮度为 L_{bb}'，则红外目标模拟器的有效输出辐亮度为:

$$L_C = \tau_C \cdot L_{bb}' + L_{bg} \tag{7}$$

红外目标模拟器在红外成像系统入瞳上产生的有效辐照度为:

$$E_C = L_C \Omega_d = (\tau_C \cdot L_{bb}' + L_{bg}) \cdot \Omega_d \tag{8}$$

式中: Ω_d 为该红外成像系统瞬时视场立体角。

3.2 不确定度分析

根据式(6)平行光管透过率 τ_C 和背景辐射 L_{bg} 的不确定度取决于红外相机输出值 DN、红外相机辐亮度响应度 α 和偏置 DN_0、黑体辐亮度 L_{bb} 的不确定度。根据1.2节结果，分析如下:

1) SofradIR 中波和 FLIR 长波红外相机输出值的不确定度均小于1%;

2) 中波和长波红外相机辐亮度响应度 α 和偏置 DN_0(两者作为整体考虑)的不确定度分别为3.5%、2.7%;

3) 红外目标模拟器所用黑体一般为腔型黑体，在当前黑体制造技术水平下，温度精度和均匀性一般可达0.3%，在中波和长波红外波段的不确定度均优于2%。

根据以上分析，平行光管透过率 τ_C 和背景辐射 L_{bg} 在中波红外波段(3.7~4.8 μm)的不确定度约为4.2%，在长波红外波段(8~9.2 μm)的不确定度约为3.5%。

4 辐射校准实验

在此，选用上海福源光电公司 HFY-302B 腔型黑体作为红外目标模拟器的黑体，选用南京天文仪器公司的 LPS300 型离轴平行光管作为红外目标模拟器的平行光管。表4、5分别给出了 HFY-302B 黑体和 LPS300 平行光管的技术指标。LPS300 平行光管的中波和长波红外波段透过率分别为0.90、0.92。

表4 HFY-302B 黑体的技术指标

Table 4 Technical parameters of the HFY-302B blackbody

参数	值
辐射面积	Φ50 mm
工作温度范围	-30 ~ +70℃
发射率	0.99
温度分辨率	0.01 ℃
温度精度	0.15%

表5 LPS300 离轴平行光管的技术指标

Table 5 Technical parameters of the LPS300 off-axis collimator

参数	值
口径	Φ300 mm
焦距	2 500 mm
中波红外透过率	0.90
长波红外透过率	0.92

将 HFY-302B 黑体分别设置在5 ℃、15 ℃、30 ℃、40 ℃、50 ℃、60 ℃、70 ℃温度下，并稳定工作，利用 SofradIR 中波红外相机和 FLIR 长波红外相机对红外目标模拟器进行测量。表6给出了红外目标模拟器的中波红外测量结果，表7给出了红外目标模拟器的长波红外测量结果。

表6 目标模拟器中波红外测量结果

Table 6 The midwave IR measurement results of the target simulator

黑体温度/℃	中波红外辐亮度 W·m^{-2}·sr^{-1}	相机测量值 DN	$(DN-DN_0)/\alpha$ W·m^{-2}·sr^{-1}
5	0.524	3 523	0.677
15	0.790	3 949	0.967
30	1.389	4 748	1.512
40	1.966	5 507	2.029
50	2.727	6 497	2.704
60	3.780	7 781	3.580
70	4.956	9 379	4.669

表7 目标模拟器长波红外测量结果

Table 7 The longwave IR measurement results of the target simulator

黑体温度/℃	中波红外辐亮度 W·m^{-2}·sr^{-1}	相机测量值 DN	$(DN-DN_0)/\alpha$ W·m^{-2}·sr^{-1}
5	7.304	13 222	8.696
15	9.007	14 738	10.334
30	12.021	17 183	12.976
40	14.354	19 212	15.168
50	16.955	21 313	17.438
60	19.832	23 805	20.131
70	22.990	26 410	22.945

对于中波红外波段，利用式(6)对表6数据进行线性拟合，得 LPS300 平行光管的中波红外透过率和背景辐射分别为:

$$\tau_{C,\mathrm{MW}} = 0.890 \tag{9}$$

$$L_{bg,\mathrm{MW}} = 0.255\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}} \tag{10}$$

式中: 下标 MW 代表中波红外波段 3.7~4.8 μm。

对于长波红外波段，根据式(6)对表7数据进行线性拟合，得 LPS300 平行光管的长波红外透过率和背景辐射分别为:

$$\tau_{C,\mathrm{LW}} = 0.907 \tag{11}$$

$$L_{bg,\mathrm{LW}} = 2.11\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}} \tag{12}$$

式中: 下标 LW 代表长波红外波段 8 ~ 9.2 μm。

LPS300 平行光管的中波红外波段透过率的测量值与理论值相对偏差为:

$$(0.9 - 0.89)/0.9 = 1.1\% \tag{13}$$

长波红外波段透过率测量值与理论值相对偏差为:

$$(0.92 - 0.907)/0.92 = 1.4\% \tag{14}$$

在校准 LPS300 平行光管的透过率和背景辐射后,根据 HFY-302B 黑体的温度和发射率,并考虑平行光管自身背景辐射,由式(7)确定红外目标模拟器的有效辐亮度。表 8、9 分别给出了红外目标模拟器校准后的中波和长波红外波段有效辐亮度。

表 8　红外目标模拟器中波红外辐射校准结果

Table 8 The midwave IR radiation calibration results of the target simulator

黑体温度/℃	中波红外辐亮度 W·m^{-2}·sr^{-1}	目标模拟器有效辐亮度 W·m^{-2}·sr^{-1}
5	0.524	0.721
15	0.790	0.958
30	1.389	1.491
40	1.966	2.005
50	2.727	2.682
60	3.780	3.619
70	4.956	4.666

表 9　红外目标模拟器长波红外辐射校准结果

Table 9 The longwave IR radiation calibration results of the target simulator

黑体温度/℃	中波红外辐亮度 W·m^{-2}·sr^{-1}	目标模拟器有效辐亮度 W·m^{-2}·sr^{-1}
5	7.304	8.734
15	9.007	10.279
30	12.021	13.013
40	14.354	15.129
50	16.955	17.488
60	19.832	20.097
70	22.990	22.962

由表 8、9 校准结果可知,当利用红外目标模拟器检测红外成像系统性能时,必须考虑红外目标模拟器自身背景辐射,尤其是在黑体温度较低时,否则会带来较大的误差。

5　结　　论

在利用红外目标模拟器对红外成像系统进行性能检测和定标之前,需要先确定红外目标模拟器的有效辐亮度。以前方法利用红外光谱辐射计或专用校准系统测量红外目标模拟器输出辐射时,没有考虑红外目标模拟器自身背景辐射。本文利用经过标定的中波红外相机对红外目标模拟器进行辐射校准,建立了考虑到红外目标模拟器自身背景辐射的校准模型。利用该校准模型,可确定红外目标模拟器的平行光管的透过率和背景辐射,据此得到红外目标模拟器的有效辐亮度。最后,进行了红外目标模拟器辐射校准实验,实验结果表明该辐射校准方法具有较高校准精度。

参考文献

[1] 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 SH,REN J W,ZHANG L G,et al. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electric system on spot [J]. Journal of Optoelectronics Laser,2006,17(2):175-178.

[2] 杨词银,张建萍,曹立华. 地基空间目标红外辐射特性测量技术 [J]. 仪器仪表学报,2013,34(2):304-310.
YANG C Y,ZHANG J P,CAO L H. Ground-based spatial object infrared radiation measurement technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2013,34(2):304-310.

[3] 曹立华,杨词银,万春明. 基于标校的双波段比色测温法 [J]. 仪器仪表学报,2012,33(8):1882-1888.
CAO L H,YANG C Y,WAN CH M. Correction-based dual-waveband color comparison thermometric method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2012,33(8):1882-1888.

[4] 原遵东. 辐射温度计的等效波长及其应用 [J]. 仪器仪表学报,2009,30(2):374-379.
YUAN Z D. Equivalent wavelength of radiation thermometer and its applications [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2009,30(2):374-379.

[5] 陈可中,谭翔,董建杰,等. 红外测温仪的设计 [J]. 电子测量技术,2007,30(10):11-14,25.
CHEN K ZH,TAN X,TAN J J,et al. Design of infrared thermometer [J]. Electronic measurement technology,2007,30(10):11-14,25.

[6] 孙元,彭小奇,严军. 基于彩色 CCD 的高温场辐射测温方法 [J]. 仪器仪表学报,2011,32(11):2579-2584.
SUN Y,PENG X Q,YAN J. High-temperature field radiation thermometry based on colored CCD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2011,32(11):2579-2584.

[7] 孙元,彭小奇,唐英. 基于彩色 CCD 的比色测温校正方法 [J]. 仪器仪表学报,2008,29(1):49-54.
SUN Y,PENG X Q,TANG Y. Revised method of temperature measurements using two-color thermometry based on CCD image sensor [J]. Chinese Journal of Scientific In-

strument,2008,29(1):49-54.

[8] 肖金球,徐树梅,夏时雷. 一种新型红外扫描测温仪的研制[J]. 电子测量与仪器学报,2004,18(4):46-50.
XIAO J Q,XU SH M,XIA SH L. Development of the new thermal scanner instrument [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2004,18(4):46-50.

[9] GRANGARRD J L. Calibration of a system of portable infrared collimator test sources [C]. SPIE,1983,416:187-196.

[10] WOLK M,AMSTRONG E P,MANN E L. Tow optical and infrared test and calibration capability [C]. SPIE,1996,2775:74-93.

[11] 梁培. 标准红外目标模拟器辐照度验证[J]. 计量技术,2001,1(3):3-5.
LIANG P. Irradiance verification of a standard infrared target simulator [J]. Measurement Techniques,2001,1(3):3-5.

[12] 梁培,高教波. 红外目标模拟器的光谱辐照度校准[J]. 激光与红外,2003,33(3):197-199.
LIANG P,GAO J B. Spectroradiometric Calibration of IR target simulator [J]. Laser & Infrared,2003,33(3):197-199.

[13] 梁培,朱明义. 红外目标模拟器校准系统的研制与应用[J]. 红外与毫米波学报,2003,22(4):251-255.
LIANG P,ZHU M Y. Development and application of infrared target simulator calibration system [J]. J. Infrared Millim. Waves,2003,22(4):251-255.

[14] 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.
LI X D,FENG AI 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.

[15] 戴景民,肖鹏. 红外目标模拟器校准系统研究与分析[J]. 仪器仪表学报,2007,28(增刊1):96-100.
DAI J M,XIAO P. Review of infrared target simulator calibration system and its applications [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2007,28(Suppl. 1):96-100.

[16] 杨词银,张建萍,曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. 红外与毫米波学报,2011,30(3):284-288.
YANG C Y,ZHANG J P,CAO L H. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. J. Infrared Millim. Waves,2011,30(3):284-288.

[17] 杨词银,张建萍,曹立华. 基于大气透过率比例校正的目标辐射测量方法[J]. 光学 精密工程,2012,20(7):1626-1635.
YANG C Y,ZHANG J P,CAO L H. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance [J]. Optics and Precision Engineering,2012,20(7):1626-1635.

作者简介

张建萍,1998 年于长春光学精密机械学院获学士学位,现为长春光机所副研究员,主要从事光学系统设计等方面的研究。
E-mail: zhjp-ycy@163.com

Zhang Jianping received B. Sc. in 1998 from Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics. Now she is an associate research fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. Her research direction is optical system design.

杨词银,1997 年于长春光学精密机械学院获学士学位,2000 年于长春光机所获硕士学位,2003 年于长春光机所获博士学位,现为长春光机所副研究员,主要研究方向为目标红外特性测量、辐射定标。
E-mail: yangciyin@163.com

Yang Ciyin received B. Sc. in 1997 from Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, obtained M. Sc. in 2000 and Ph. D. in 2003 both from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. Now he is an associate research fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His research direction is infrared feature measurement of target and infrared radiation calibration.