

文章编号 1004-924X(2015)02-0356-07

应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标

孙志远^{1*}, 常松涛^{1,2}, 朱 玮¹, 王 旻¹, 王晓明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: 由于现有的大口径短波红外测量系统的辐射定标需要制备大口径红外平行光管, 不仅机动性差且成本较高, 故提出了一种基于内、外定标修正的辐射定标新方法。该方法将一个中、高温腔型黑体置于红外系统内部, 通过切换反射镜, 将中、高温腔型黑体辐射引入红外光学系统, 并对部分光路进行中、高温段的内定标。然后, 使用大面源黑体对全系统中温段的外定标; 提取并处理公共温度范围的内、外定标数据以获取内、外定标之间的修正系数。最后, 对中、高温段的内定标数据进行修正从而获取全系统的辐射定标数据。使用该方法对某 $\Phi 400$ mm 口径的红外测量系统进行了辐射定标, 并根据定标结果反演了黑体的辐射亮度和温度。结果显示: 辐射亮度反演的最大误差为 1.67%, 温度反演的最大误差为 1.02 °C。实验结果证明了该方法可以准确、有效地对大口径短波红外测量系统进行辐射定标。

关键词: 红外测量系统; 短波红外; 辐射定标; 内定标; 外定标; 辐射反演

中图分类号: TP732.2; TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0356

Radiation calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibrations

SUN Zhi-yuan^{1*}, CHANG Song-tao^{1,2}, ZHU Wei¹, WANG Min¹, WANG Xiao-ming¹

(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)

* Corresponding author, E-mail: 15843047922@163.com

Abstract: As the existing radiation calibration for a shortwave infrared system with large aperture needs a huge infrared collimator and has poor motility and cost much, this paper proposes a new calibration method based on the amendment of inner and outer calibrations. This method sets a middle-high temperature cavity blackbody in the infrared system. By switching a mirror, it introduces the blackbody radiation into the infrared system to implement the inner calibration on parts of system at the middle-high temperature range. Then it uses a huge area blackbody to implement the outer calibration on the whole system at middle temperature range. The inner and outer calibration data at the common temperature range are picked up to calculate the amendatory coefficient in whole system. Finally, the radiation calibration data for whole system at the middle-high temperature range are cap-

收稿日期: 2014-04-09; 修订日期: 2014-05-26.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA121502)

tured by amending the inner calibration data. With this method, an $\Phi 400$ mm infrared system is calibrated, and the luminance error and temperature error are inverted based on the calibration results. The results show that the maximal luminance error is 1.67% and the maximal temperature error is 1.02 °C. The results indicate that the proposed method is precise and effective for the radiation calibration of shortwave infrared systems with large apertures.

Key words: infrared measuring system; shortwave infrared; radiation calibration; inner calibration; outer calibration; radiation inversion

1 引言

为了获取更丰富的目标信息,越来越多的地基红外测量系统加装短波红外(SWIR)探测器用于测量空间目标的红外辐射特性。根据大气光谱传输理论,短波红外波段近似为 $1.1 \sim 2.5 \mu\text{m}$,晴空对太阳辐射的散射和夜天光辐射的大部分能量都集中在这一区域^[1]。当观测常温目标时,短波红外系统的信噪比较低,严重影响辐射特性的测量精度,所以短波红外系统适合观测导弹、高速飞行器等温度较高的目标。为了实现大口径短波红外测量系统的辐射定标,需要有覆盖系统入瞳的中、高温段的均匀辐射源^[2-6]。现阶段,人们使用大口径红外平行光管对中、高温腔型黑体的红外辐射扩束后,投射到大口径短波红外测量系统的入瞳进行辐射定标^[7-8]。但是大口径红外平行光管存在制造周期长、成本高等缺点,同时该方法只能在室内进行,不能满足靶场设备更高的机动性要求。

为了解决以上问题,本文提出了一种基于内、外定标修正的辐射定标方法。首先,介绍了该定标方法的理论模型及操作流程;然后,使用该方法在 $\Phi 400$ mm 口径的某短波红外测量系统上进行了辐射定标实验,并获得了全系统的辐射定标数据;最后,使用定标数据反演高精度面源黑体的辐射亮度和温度,给出了反演误差。该方法在满足辐射定标精度要求的同时,使红外测量系统具有机动性高、操作简便和成本低等优点。

2 辐射定标的数学模型

图 1 为黑体辐射通过红外平行光管扩束后对红外测量系统进行辐射定标的示意图。

在红外探测器的线性响应区间,探测器像元

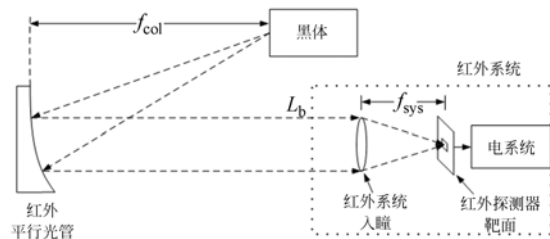


图 1 红外平行光管定标示意图

Fig. 1 Scheme of radiation calibration using infrared collimator

的响应灰度值 DN 为^[9-10]:

$$DN = t \cdot (\alpha \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b + W_{\text{stray}}) + DN_{\text{det}}, \quad (1)$$

式中: t 为红外探测器的积分时间; τ_{filter} 为中性衰减片在红外系统光谱响应波段内的平均透过率,通过标定方法获取; α 为单位积分时间及中性衰减片透过率为 100% 的条件下,红外系统对入射辐射亮度的响应率; L_b 为红外测量系统入瞳处的辐射亮度,计算时需要考虑红外平行光管的透过率和辐射常数,如果直接通过黑体定标,则该亮度为黑体的辐射亮度; W_{stray} 为单位积分时间条件下,红外测量系统内部杂散辐射引起的探测器的像元灰度响应; DN_{det} 为探测器暗电流引起的像元灰度响应。只要在两个积分时间条件下采集两个黑体温度下的 3 幅图像就可以计算出式(1)中的 3 个未知参数 α , W_{stray} 和 DN_{det} 。

从式(1)可以看出,只有 $t \cdot \alpha \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b$ 是包含入瞳辐射亮度 L_b 的信号量;由于 W_{stray} 随着环境温度的变化而改变,所以 $t \cdot W_{\text{stray}}$ 是响应灰度值 DN 中的噪声量; DN_{det} 是由探测器决定的固有偏置,为一个常数。因此,当信号量 $t \cdot \alpha \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b$ 较小,且低于噪声量 $t \cdot W_{\text{stray}}$ 时,辐射定标曲线的线性度受噪声的影响较大。所以,为了提高辐射定标精度,定标点的信噪比应该大于 1,即:

$$\frac{t \cdot \alpha \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b}{t \cdot W_{\text{stray}}} > 1. \quad (2)$$

将式(2)带入(1)得到:

$$DN = t \cdot (\alpha \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b + W_{\text{stray}}) + DN_{\text{det}} > 2 \cdot t \cdot W_{\text{stray}} + DN_{\text{det}} \quad (3)$$

根据 W_{stray} 和 DN_{det} 的计算结果,即可得到不同积分时间条件下的最低灰度要求,并剔除低于该灰度值的定标点。

3 基于内、外定标修正的辐射定标方法

将中、高温腔型黑体放置在红外系统内部一次像面的等效位置,在光学系统中通过切换反射镜引出一个光路,通过平移切换反射镜将中、高温腔型黑体辐射引入及引出红外系统。当切换反射镜移入光路时,红外系统进行外定标或目标图像采集,外定标使用大面源黑体,覆盖红外系统的入瞳对全系统进行辐射定标;当切换反射镜移出光路时,红外系统为内定标状态,中、高温腔型黑体辐射通过部分光学系统后覆盖红外探测器的靶面,对红外系统的部分光路进行内定标。内、外定标修正原理如图 2 所示。

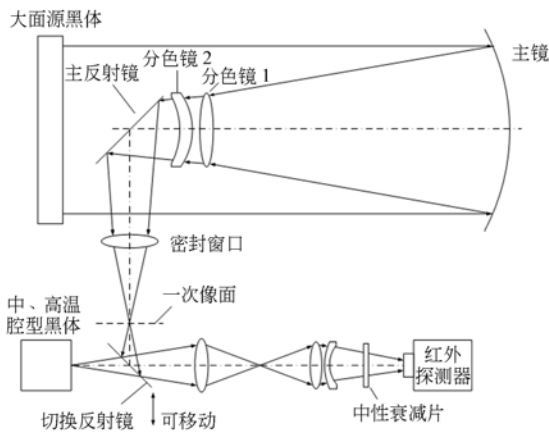


图 2 内、外定标修正原理图

Fig. 2 Scheme of amending between inner and outer calibrations

外定标的数学模型为:

$$DN = t \cdot (\alpha_w \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b + W_{\text{stray},w}) + DN_{\text{det},w} \quad (4)$$

式中: DN 为探测器像元的响应灰度值; t 为红外探测器的积分时间; α_w 为单位积分时间及中性衰

减片透过率为 100% 条件下,外定标系统对入射辐射亮度的响应率; L_b 为大面源黑体的辐射亮度; $W_{\text{stray},w}$ 为单位积分时间条件下,外定标系统内部杂散辐射引起的探测器的像元灰度响应; $DN_{\text{det},w}$ 为外定标时,红外探测器暗电流引起的灰度响应。

内定标的数学模型为:

$$DN = t \cdot (\alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b + W_{\text{stray},n}) + DN_{\text{det},n} \quad (5)$$

式中: α_n 为单位积分时间及中性衰减片透过率为 100% 条件下,内定标系统对入射辐射亮度的响应率; L_b 为中、高温腔型黑体的辐射亮度; $W_{\text{stray},n}$ 为单位积分时间条件下,内定标系统内部杂散辐射引起的探测器的像元灰度响应; $DN_{\text{det},n}$ 为内定标时,红外探测器暗电流引起的灰度响应。

根据图 2,内、外定标系统相差 6 个镜头,包括主镜、分色镜 1、分色镜 2、主反射镜、密封窗口和切换反射镜,将它们作为一个整体,称为“前系统”。根据内定标数学模型式(5),外定标还可以表示为:

$$DN = t \cdot (\alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot (\tau_{\text{ps}} \cdot L_b + B_{\text{ps}}) + W_{\text{stray},n}) + DN_{\text{det},n} = t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \tau_{\text{ps}} \cdot L_b + (t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot B_{\text{ps}} + t \cdot W_{\text{stray},n} + DN_{\text{det},n}) \quad (6)$$

式中: τ_{ps} 为前系统的增益, B_{ps} 为前系统的偏置。

联立式(6)与式(4)得到:

$$t \cdot \alpha_w \cdot \tau_{\text{filter}} = t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \tau_{\text{ps}} \quad (7)$$

$$t \cdot W_{\text{stray},w} + DN_{\text{det},w} = t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot B_{\text{ps}} + t \cdot W_{\text{stray},n} + DN_{\text{det},n} \quad (8)$$

整理可得:

$$\tau_{\text{ps}} = \frac{\alpha_w}{\alpha_n} \quad (9)$$

$$B_{\text{ps}} = \frac{t \cdot (W_{\text{stray},w} - W_{\text{stray},n}) + (DN_{\text{det},w} - DN_{\text{det},n})}{t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}}} \quad (10)$$

由于红外探测器内部暗电流引起的灰度响应近似为一个常量,所以式(10)可以简化为:

$$B_{\text{ps}} = \frac{W_{\text{stray},w} - W_{\text{stray},n}}{\alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}}} \quad (11)$$

提取公共温度范围的内、外定标数据并处理得到 $W_{\text{stray},n}$, $W_{\text{stray},w}$, α_n 和 α_w , 将它们代入式(9)和式(11)计算得到前系统的 τ_{ps} 及 B_{ps} 。

根据式(6),使用 τ_{ps} 和 B_{ps} 对中、高温段的内定标数据进行修正,得到:

$$DN = t \cdot \alpha_n^{m-h} \cdot \tau_{filter} \cdot \tau_{ps} \cdot L_b + (t \cdot \alpha_n^{m-h} \cdot \tau_{filter} \cdot B_{ps} + t \cdot W_{stray,n}^{m-h} + DN_{det,n}^{m-h}) = \alpha_Q^{m-h} \cdot L_b + DN_Q^{m-h}, \quad (12)$$

式中: α_Q^{m-h} 和 DN_Q^{m-h} 为全系统在中、高温段辐射亮度的响应度和偏置,分别表示为:

$$\alpha_Q^{m-h} = t \cdot \alpha_n^{m-h} \cdot \tau_{filter} \cdot \tau_{ps}, \quad (13)$$

$$DN_Q^{m-h} = t \cdot \alpha_n^{m-h} \cdot \tau_{filter} \cdot B_{ps} + t \cdot W_{stray,n}^{m-h} + DN_{det,n}^{m-h}, \quad (14)$$

式中: α_n^{m-h} , $W_{stray,n}^{m-h}$, $DN_{det,n}^{m-h}$ 可以通过计算中、高温段的内定标数据得到,再带入式(13)和式(14)就可以获取全系统的辐射定标数据。该定标方法的操作流程如图 3 所示。

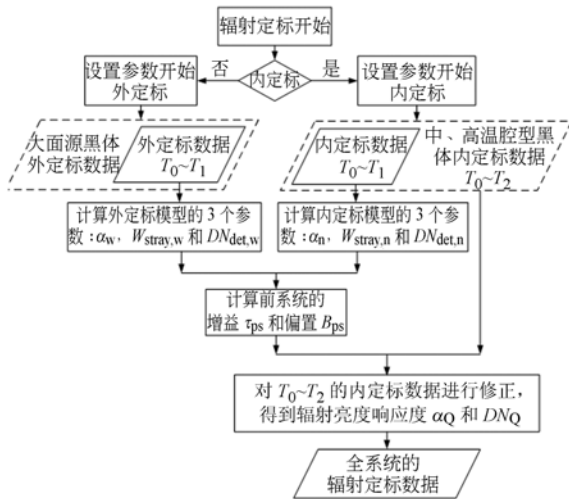


图 3 基于内外定标修正的红外系统辐射定标流程

Fig. 3 Flow chart of radiation calibration based on amendment of inner and outer calibrations for infrared system

4 实验

实验使用基于内、外定标修正的辐射定标方法对某短波红外测量系统进行了辐射定标。该红外系统的口径为 $\Phi 400$ mm, 焦距为 800 mm。红外探测器的工作波段为 $0.8 \sim 2.5 \mu\text{m}$, 像元大小为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 输出位数为 14, $f/\# = 2$, 可设置的积分时间为 0.1, 0.16, 0.25, 0.47, 0.74, 1.2, 2 和 4 ms 共 8 档。为了提高红外测量系统的动态范围, 在系统内部设置了透过率分别为 100%、20% 和 5% 的红外中性衰减片。

红外系统内部的内定标黑体采用以色列 CI

公司的 SR200 中、高温腔型黑体, 黑体的辐射面积为 $\Phi 1''$ (约为 $\Phi 25.4$ mm), 发射率为 0.99, 温度为 $50 \sim 1200$ °C, 温度精度为 0.3%。内定标的起始温度为 100 °C, 温度间隔为 10 °C。

4.1 外定标

采用以色列 CI 公司的 SR800-20A 高精度面源黑体对红外测量系统进行外定标^[11-12], 黑体的辐射面积为 $20'' \times 20''$ ($1'' = 25.4$ mm), 发射率为 0.97, 温度为 $5 \sim 150$ °C, 温度精度为 0.01 °C。外定标的温度设定为 $100 \sim 150$ °C, 温度间隔为 5 °C。

根据式(2), 如果中性衰减片的透过率和红外探测器的积分时间均较低, 探测器响应灰度值中的信号量所占比重较小, 导致定标曲线的线性度不好, 从而影响辐射定标模型中未知参数 α , W_{stray} 和 DN_{det} 的计算精度。所以在计算辐射定标模型时, 尽量选择较高积分时间下温度较高的定标点。在 100% 中性衰减片透过率下, 选择 2 ms 和 4 ms 积分时间下的两个温度点计算外定标的数学模型, 结果如表 1 所示。

表 1 外定标模型参数的计算结果

Tab. 1 Results for calculation of outer calibration parameters

衰减片透过率 / %	积分时间 / ms	温度 / °C	探测器灰度值	$\alpha_w / (\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{ms}^{-1})$	$W_{stray,w} / \text{ms}^{-1}$	$DN_{det,w}$
	2	150	4 062			
100	4	140	5 169	1 592.81	158	1 812
	4	150	6 312			

根据表 1 计算得到的 $W_{stray,w}$ 和 $DN_{det,w}$ 结果, 带入式(3)就可以计算各积分时间下的最低灰度要求。

图 4 为中性衰减片透过率为 100% 时, 不同积分时间下的外定标结果。图中水平线为不同积分时间下的最低灰度要求。从图中可以看出, 当中性衰减片的透过率较高时, 探测器响应灰度值较大, 剔除的响应较低的定标点较少, 可以通过最小二乘拟合算法获取不同积分时间下的定标曲线方程。

图 5 为中性衰减片透过率为 20% 时, 不同积分时间下的外定标结果。从图中可以看出, 剔除响应较低的点后, 不同积分时间下最多只剩 3 个定标点, 无法准确地获取定标方程。相同地, 中性

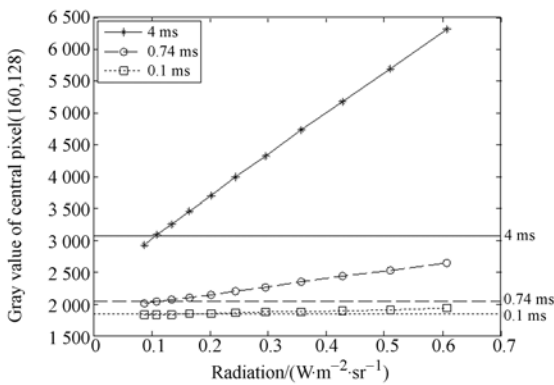


图 4 中性衰减片透过率为 100% 时的外定标结果
Fig. 4 Outer calibration results at 100% transmissivity

衰减片的透过率为 5% 时,也无法准确地获取定标方程。因此,当中性衰减片的透过率较低时,由于探测器的像元响应灰度值较低,无法准确地获取辐射定标曲线方程,需要进行内定标修正。

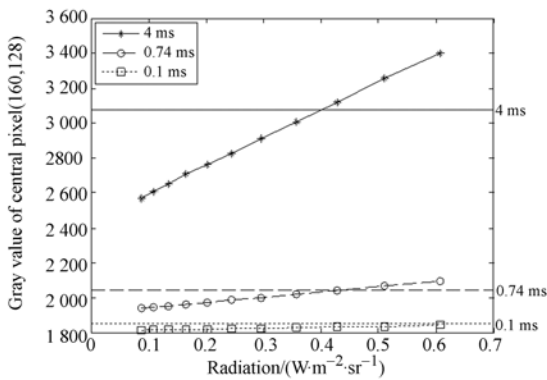


图 5 中性衰减片透过率为 20% 时的外定标结果
Fig. 5 Outer calibration results at 20% transmissivity

4.2 内定标

图 6 为中性衰减片透过率为 100% 时,不同积分时间下的内定标结果。从图中可以看出,在

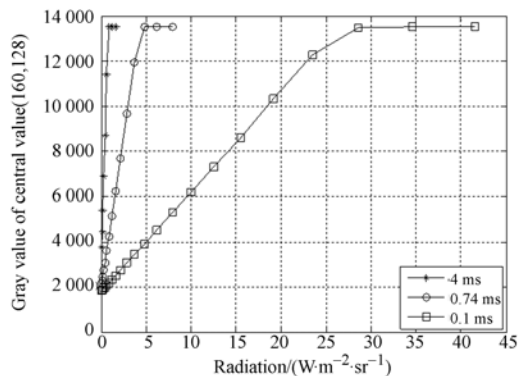


图 6 中性衰减片透过率为 100% 时的内定标结果
Fig. 6 Inner calibration results at 100% transmissivity

4, 0.74 和 0.1 ms 的积分时间下,红外探测器分别在 160, 220 和 300 °C 附近达到饱和(饱和灰度值约为 13 500)。

在与外定标相同的条件下(相同的中性衰减片档位、积分时间和黑体温度)计算内定标的数学模型,结果如表 2 所示。

表 2 内定标模型参数的计算结果

Tab. 2 Results for calculation of inner calibration parameters

衰减片透过率 /%	积分时间 /ms	温度 /°C	探测器灰度值	α_n $/(W^{-1} \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot ms^{-1})$	$W_{stray,n}$ $/ms^{-1}$	$DN_{det,n}$
	2	150	6 601			
100	4	140	8 721	3 724.92	136	1 808
	4	150	11 394			

从表 1 和表 2 可以看出:表征红外测量系统杂散辐射的 W_{stray} 由于内、外定标系统不同而有一定差别。但表征红外探测器噪声的 DN_{det} 基本不变,符合探测器的特性并验证了式(10)的假设。根据 $W_{stray,n}$ 和 $DN_{det,n}$ 计算出内定标时各积分时间下的最低灰度要求,剔除响应灰度值较低的点以及饱和点,并通过回归分析去掉残差较大的定标点^[13],得到的内定标曲线方程如表 3 所示。

表 3 内定标曲线方程

Tab. 3 Inner calibration equations

衰减片透过率 /%	积分时间 /ms	温度范围 /°C	内标定方程
	0.1	100:10:290	$y=437.833 1x+1 828.629 4$
100%	0.74	100:10:210	$y=2 696.996x+1 948.923 8$
	4	100:10:150	$y=1 4673.474 3x+2 481.548 6$
	0.1	130:10:370	$y=104.142 6x+1 856.458$
20%	0.74	120:10:270	$y=644.521 6x+1 951.744 3$
	4	120:10:190	$y=3 509.723 3x+2 534.754 9$
	0.1	170:10:490	$y=23.182 6x+1 877.977 2$
5%	0.74	160:10:350	$y=154.078 8x+1 956.750 5$
	4	150:10:260	$y=819.658 3x+2 628.462 9$

4.3 获取全口径、宽动态范围的辐射定标数据

将表 1 和表 2 中的内、外定标模型的各项参数带入式(9)和式(11),计算得到前系统的增益和偏置如下:

$$\tau_{ps} = 0.427 6, \quad (15)$$

$$B_{ps}=0.0059. \quad (16)$$

使用前系统的增益和偏置修正表 3 中的数据,获取全系统的辐射定标方程如表 4 所示。

根据表 4 绘出在中性衰减片的透过率为 5% 时全系统的辐射定标结果,如图 7 所示。由于内定标饱和灰度值的限制,全系统辐射定标曲线的灰度最大值低于 7 200(低于像元饱和值);此时,如果目标能量继续增加,红外探测器的响应仍然没有饱和,但此时没有辐射定标数据作为辐射反演的基准,无法精确地获取目标的辐射特性。

表 4 全系统的辐射定标结果

Tab. 4 Radiation calibration results of whole system

衰减片 透过率 /%	积分 时间 /ms	温度范围 /°C	全系统定标方程
100%	0.1	100:10:290	$y=187.2174x+1831.2126$
	0.74	100:10:210	$y=1153.2355x+1964.8361$
	4	100:10:150	$y=6274.3776x+2568.1221$
20%	0.1	130:10:370	$y=44.5314x+1857.0724$
	0.74	120:10:270	$y=275.5974x+1955.5470$
	4	120:10:190	$y=1500.7577x+2555.4623$
5%	0.1	170:10:490	$y=9.9129x+1878.1140$
	0.74	160:10:350	$y=65.8841x+1957.6596$
	4	150:10:260	$y=350.4859x+2633.2989$

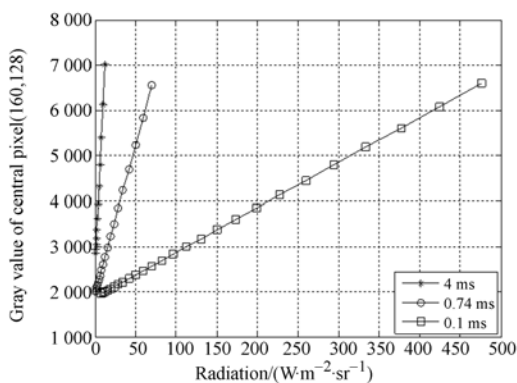


图 7 中性衰减片的透过率为 5% 时,全系统的辐射定标曲线

Fig. 7 Calibration curves of whole system at 5% transmissivity

4.4 定标精度计算

根据全系统的辐射定标结果反演黑体的辐射亮度,并与实际辐射亮度比较以验证该方法的定标精度。采用美国 OPTIKOS 公司的 EC-600 型

离轴式红外平行光管,口径为 600 mm,焦距为 1 200 mm。黑体采用 CI 公司的 SR80HT 高温黑体,辐射面积为 12"×12",温度为 50~550 °C,温度精度为 0.5 °C,发射率为 0.97。表 5 为黑体的辐射反演结果。

由表 5 可知,利用该定标方法反演得到的黑体辐射亮度的最大误差为 1.67%,黑体温度的最大误差为 1.02 °C。最大误差是在最低中性衰减片档位和最小积分时间下获得的,该误差是由于响应灰度值较低引起的。而在其它中性衰减片档位和积分时间下,辐射亮度的最大反演误差为 0.96%,温度反演的最大误差为 0.52 °C,说明基于内、外定标修正的辐射定标方法可以准确、有效地对大口径短波红外测量系统进行辐射定标。

表 5 黑体的辐射反演结果

Tab. 5 Inversion precision of blackbody

衰 减 片 透 过 率 /%	积 分 时 间 /ms	温 度 /°C	辐 射 亮 度 理 论 值 /(W· m ⁻² ·sr ⁻¹)	辐 射 亮 度 测 量 值 /(W· m ⁻² ·sr ⁻¹)	辐 射 亮 度 测 量 误 差 /%	温 度 测 量 值 /°C	温 度 测 量 误 差 /°C
100	0.1	250	9.9721	10.0569	0.85	250.37	0.37
	0.74	200	2.8294	2.8503	0.74	200.27	0.27
	4	150	0.6069	0.6101	0.53	150.16	0.16
20	0.1	350	69.7868	70.3870	0.86	350.52	0.52
	0.74	250	9.9721	9.9382	-0.34	249.85	-0.15
	4	150	0.6069	0.6011	-0.96	149.72	-0.28
5	0.1	350	69.7868	68.6214	-1.67	348.98	-1.02
	0.74	300	28.5559	28.8272	0.95	300.49	0.49
	4	250	9.9721	10.0369	0.65	250.28	0.28

5 结 论

本文提出了一种基于内、外定标修正的红外测量系统辐射定标方法,并在 400 mm 口径的某短波红外测量系统上进行了辐射定标和定标精度验证实验。实验结果表明:利用该定标方法反演得到的黑体辐射亮度的最大误差为 1.67%,黑体温度反演的最大误差为 1.02 °C,反演精度较高。

该方法不需要大口径平行光管,具有精度高、成本低以及机动性强等特点,在靶场红外辐射特性测量设备的研制中具有重要意义。由于本方法需要采用覆盖红外测量系统入瞳的大面源黑体进

行外定标以获取外定标的数学模型,其成本和机动性仍有待改进。下一步的工作重点是采用覆盖

红外测量系统一部分视场的小面源黑体代替大面源黑体进行外定标。

参考文献:

- [1] HUDSON R D. *Infrared System Engineering* [M]. John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- [2] RICE J P, BENDER S C, ATKINS W H, *et al.*. Deployment test of the NIST EOS thermal infrared transfer radiometer [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(2):367-388.
- [3] THEOCHAROUS E, FOX N P, SAPRITSKY V I, *et al.*. Absolute measurements of black body emitted radiance [J]. *Metrologia*, 1998, 35(4):549-554.
- [4] THOMAS S, INGMAR R. A study of the radiometric calibration of spectral bands in the mid wave infrared (MWIR) spectral range, 1.5-5.5 μm [J]. *SPIE*, 2009, 7300:73000Z.
- [5] WOLFE W L. *Introduction to Radiometry* [M]. SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [6] 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 on spot [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(2):175-178. (in Chinese)
- [7] 翟文超,李健军,郑小兵,等. 太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4):0412004.
- ZHAI W CH, LI J J, ZHENG X B, *et al.*. Research on method of calibration sun channels of sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4):0412004. (in Chinese)
- [8] 唐嘉,高昕. 靶场红外辐射特性测量系统标定方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(10):266-270.
- TANG J, GAO X. Calibration method for radiation characteristics measuring system of test range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(10):266-270. (in Chinese)
- [9] 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.
- LUO M J, ZHOU J M, FU J N, *et al.*. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1):36-40. (in Chinese)
- [10] 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[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]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1626-1635. (in Chinese)
- [11] 张晓龙,刘英,孙强,等. 高精度非致冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. *中国光学*, 2012, 5(3):235-241.
- ZHANG X L, LIU Y, SUN Q, *et al.*. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):235-241. (in Chinese)
- [12] 张晓龙,刘英,王健,等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1):150-155.
- ZHANG X L, LIU Y, WANG J, *et al.*. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1):150-155. (in Chinese)
- [13] 李宁,杨词银,曹立华,等. 3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10):2319-2325.
- LI N, YANG C Y, CAO L H, *et al.*. Radiance calibration for 3-5 μm infrared focal plane array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2319-2325. (in Chinese)

作者简介:



孙志远(1982-),男,辽宁沈阳人,博士,副研究员,2003年于东北大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事红外辐射定标,红外辐射特性测量等方面的研究。E-mail: 15843047922@163.com



常松涛(1988-),男,安徽阜阳人,博士研究生,主要从事目标辐射特性测量方面的研究。Email: stchang2010@sina.com.