

大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法

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 现有的大口径、宽动态范围红外测量系统的辐射定标需要制备大口径红外平行光管,该方法机动性差且成本较高。为了解决这一问题,提出了一种基于内、外定标修正的辐射定标新方法。该方法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;使用面源黑体对全系统中、低温段的外定标;提取公共温度范围的内、外定标数据并处理以获取内、外定标之间的修正系数;对中、高温段的内定标数据进行修正可以获取全系统中、高温段的辐射定标数据,结合外定标结果就得到了全系统、宽动态范围的辐射定标数据。使用该定标方法对某 $\Phi 400$ mm 口径的红外测量系统进行辐射定标,并根据定标结果反演黑体的辐射亮度和温度,辐射亮度反演的最大误差为 1.35%,温度反演的最大误差为 0.76 °C,实验结果证明了该定标方法的有效性。

关键词 遥感;辐射定标;宽动态范围;内定标;外定标;辐射反演

中图分类号 TP732.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0712006

Radiation Calibration Method for Infrared System with Large Aperture and Broad Dynamic Range

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

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

Abstract The existing radiation calibration for infrared system with large aperture and broad dynamic range needs huge infrared collimator, but this method has poor motility and cost much. In order to settle this question, a new calibration method basing on the amendment of inner and outer calibration is put forward. This method set a middle-high temperature cavity blackbody in infrared system, with the help of switching reflector, the cavity blackbody radiation is imported into optics system for the inner calibration on parts of system at middle-high temperature range, and an extended source blackbody is needed for the outer calibration on the whole system at middle-low temperature range. The inner and outer calibration data at common temperature range are picked up to calculate the amendatory coefficient. In the end, the whole system's radiation calibration data at the middle-high temperature range are caught by amending the inner calibration data. Combining the outer calibration data at the middle-low temperature range, the whole system's radiation calibration data at broad dynamic range are gained. Carrying through this method on an $\Phi 400$ mm infrared system and calculating the luminance error and temperature error, the maximal luminance error is 1.35% and the maximal temperature error is 0.76 °C, the results indicate that the proposed method is effective.

Key words remote sensing; radiation calibration; broad dynamic range; inner calibration; outer calibration; radiation inversion

OCIS codes 120.0280; 120.2440; 120.5630; 040.3060

收稿日期: 2014-03-12; 收到修改稿日期: 2014-03-17

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121502)

作者简介: 孙志远(1982—),男,博士,副研究员,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

1 引 言

目标的红外辐射特性测量是获取目标信息、对目标进行探测识别的基础技术之一。在导弹防御系统中,红外探测是导弹预警和识别的主要手段之一,伴随着超高速导弹的研制成功,导弹的红外辐射特性测量成为靶场测控中的一个研究热点。超高速导弹具有体积小、辐射亮度大的特点,这就要求红外测量系统具有更大的口径以及更宽动态范围。

红外测量系统要完成目标的探测与红外辐射特性测量,在研制过程及外场使用前需要对其进行精确的辐射定标^[1-7]。现阶段,大口径、宽动态范围红外辐射特性测量系统的辐射定标采用面源黑体法和平行光管扩束法结合的方法^[8-9];面源黑体法是使用覆盖红外测量系统入瞳的面源黑体对全系统进行辐射定标,由于面源黑体可设定的最高温度较小,所以面源黑体法只能用于中、低温段的辐射定标;平行光管扩束法是使用红外平行光管对中、高温腔型黑体的红外辐射扩束后,投射到红外测量系统的入瞳上进行辐射定标,实现了大口径红外测量系统中、高温段的辐射定标,但是大口径红外平行光管的制备存在周期长、成本高等缺点,同时该方法只能在室内进行,不适用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新方法,介绍了该定标方法的理论模型及具体操作流程,使用该方法在某 $\Phi 400$ mm 口径的红外测量系统上进行了辐射定标实验,并获得了全系统、宽动态范围的辐射定标数据,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。

2 面源黑体辐射定标方法

使用面源黑体对红外测量系统进行辐射定标时,需要提供覆盖红外系统入瞳的高精度面源黑体,为了减小大气衰减和程辐射的影响,通常将黑体直接放置于红外系统镜头前,如图 1 所示。

设面源黑体的温度为 T_b , 发射率为 ϵ_b , 则黑体的辐射亮度可以表示为

$$L_b(T_b) = \frac{\epsilon_b}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda, T_b) d\lambda, \quad (1)$$

式中 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为红外探测器的工作波段范围, $L_b(T_b)$ 是温度为 T_b 的黑体的辐射亮度, $P(\lambda, T_b)$ 为黑体辐射的普朗克公式。

在红外探测器的线性响应区间,探测器像元的

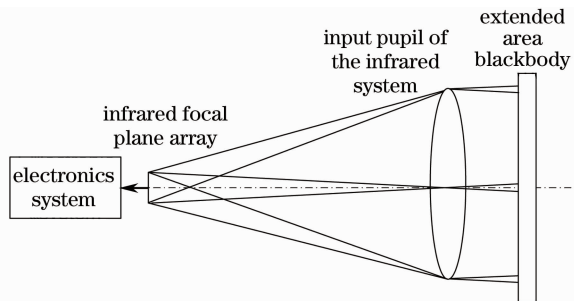


图 1 面源黑体辐射定标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radiation calibration using extended area blackbody

灰度值(DN, V_{DN})可以表示为^[10-12]

$$V_{DN} = t \cdot [\alpha \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b(T_b) + V_{DN\text{stray}}] + V_{DN\text{det}}, \quad (2)$$

式中 t 为红外探测器的积分时间, α 为该红外测量系统对入射辐射亮度的响应率, τ_{filter} 为中性衰减片在红外系统光谱响应波段范围内的平均透射率,可以通过标定方法获取, $V_{DN\text{stray}}$ 为红外系统内部杂散辐射引起的探测器像元灰度输出, $V_{DN\text{det}}$ 为探测器暗电流引起的像元灰度输出。只要在两个积分时间条件下采集两个黑体温度下的共 3 幅图像就可以计算(2)式中的 3 个未知参数 α 、 $V_{DN\text{stray}}$ 和 $V_{DN\text{det}}$ 。

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,通过切换反射镜的平移将中、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

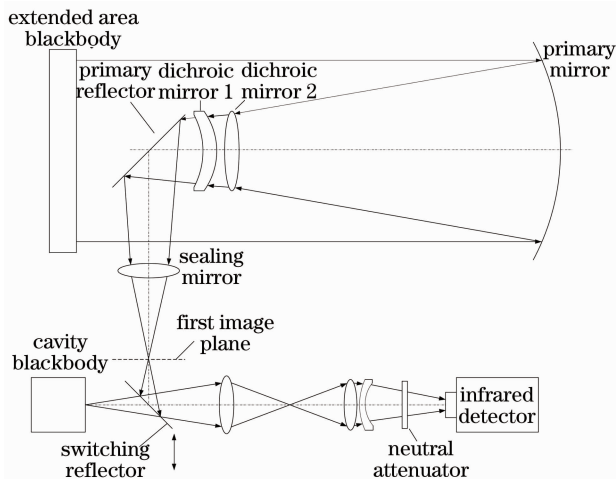


图 2 内、外定标修正原理图

Fig. 2 Schematic of amending between inner and outer calibration

使用高精度面源黑体,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光学系统后覆盖红外探测器的靶面,对红外系统部分光路进行内定标,图2为内、外定标修正原理示意图。

外定标的数学模型可以表示为

$$V_{DN} = t \cdot (\alpha_w \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b + V_{\text{DNstray},w}) + V_{\text{DNdet},w}, \quad (3)$$

式中 V_{DN} 为探测器输出灰度值, t 为红外探测器的积分时间, α_w 为外定标辐射亮度响应度, L_b 为黑体的辐射亮度, $V_{\text{DNstray},w}$ 为外定标时由系统自身热辐射、散射背景辐射等引起的灰度响应, $V_{\text{DNdet},w}$ 为红外探测器暗电流引起的灰度响应。

内定标的数学模型可以表示为

$$V_{DN} = t \cdot (\alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot L_b + V_{\text{DNstray},n}) + V_{\text{DNdet},n}, \quad (4)$$

式中 V_{DN} 为探测器输出灰度值, t 为红外探测器的积分时间, α_n 为内定标辐射亮度响应度, L_b 为黑体的辐射亮度, $V_{\text{DNstray},n}$ 为内定标时由系统自身热辐射、散射背景辐射等引起的灰度响应, $V_{\text{DNdet},n}$ 为红外探测器暗电流引起的灰度响应。

根据图2,内、外定标相差共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,将这6个镜头当做一个整体,称为“前系统”,根据内定标数学模型(4)式,外定标还可以表示为

$$V_{DN} = t \cdot [\alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot (\tau_{\text{ps}} \cdot L_b + B_{\text{ps}}) + V_{\text{DNstray},n}] + V_{\text{DNdet},n} = t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \tau_{\text{ps}} \cdot L_b + (t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot B_{\text{ps}} + t \cdot V_{\text{DNstray},n} + V_{\text{DNdet},n}), \quad (5)$$

式中 τ_{ps} 为前系统的增益, B_{ps} 为前系统的偏置。

(5)式与(3)式联立,可得到

$$t \cdot \alpha_w \cdot \tau_{\text{filter}} = t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \tau_{\text{ps}}, \quad (6)$$

$$t \cdot V_{\text{DNstray},w} + V_{\text{DNdet},w} = t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot B_{\text{ps}} + t \cdot V_{\text{DNstray},n} + V_{\text{DNdet},n}, \quad (7)$$

整理可得

$$\tau_{\text{ps}} = \frac{\alpha_w}{\alpha_n}, \quad (8)$$

$$B_{\text{ps}} = \frac{t \cdot (V_{\text{DNstray},w} - V_{\text{DNstray},n}) + (V_{\text{DNdet},w} - V_{\text{DNdet},n})}{t \cdot \alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}}}. \quad (9)$$

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(9)式可以简化为

$$B_{\text{ps}} = \frac{V_{\text{DNstray},w} - V_{\text{DNstray},n}}{\alpha_n \cdot \tau_{\text{filter}}}. \quad (10)$$

在公共温度范围分别进行内定标与外定标,经过处理得到 $V_{\text{DNstray},n}$ 、 $V_{\text{DNstray},w}$ 、 α_n 和 α_w ,然后利用(8)、(10)式就可以计算得到前系统的增益 τ_{ps} 及偏置 B_{ps} 。

根据(5)式,使用 τ_{ps} 和 B_{ps} 对中、高温段的内定标数据修正,得到

$$V_{DN} = t \cdot \alpha_n^{m-h} \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \tau_{\text{ps}} \cdot L_b + (t \cdot \alpha_n^{m-h} \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot B_{\text{ps}} + t \cdot V_{\text{DNstray},n}^{m-h} + V_{\text{DNdet},n}^{m-h}) = \alpha_Q^{m-h} \cdot L_b + V_{\text{DNQ}}^{m-h}, \quad (11)$$

式中 α_Q^{m-h} 和 V_{DNQ}^{m-h} 为全系统在中、高温段的辐射亮度响应度和偏置,可以表示为

$$\alpha_Q^{m-h} = t \cdot \alpha_n^{m-h} \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \tau_{\text{ps}}, \quad (12)$$

$$V_{\text{DNQ}}^{m-h} = t \cdot \alpha_n^{m-h} \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot B_{\text{ps}} + t \cdot V_{\text{DNstray},n}^{m-h} + V_{\text{DNdet},n}^{m-h}, \quad (13)$$

式中 α_n^{m-h} 、 $V_{\text{DNstray},n}^{m-h}$ 、 $V_{\text{DNdet},n}^{m-h}$ 通过中、高温段内定标数据计算得到,代入(12)式和(13)式就可以获取全系统在中、高温段的定标数据,结合外定标获取的全系统在中、低温段的辐射定标结果就可以得到全系统、宽动态范围的辐射定标结果,该定标方法的操作流程如图3所示。

4 实 验

使用基于内、外定标修正的辐射定标方法对某红外测量系统进行辐射定标。红外测量系统的口径为 $\Phi 400$ mm,焦距800 mm。红外探测器的工作波段3.7~4.8 μm ,像元大小30 $\mu\text{m} \times 30$ μm ,输出位数为14位, F 数为2,可设置的积分时间为0.8、2.5、3、

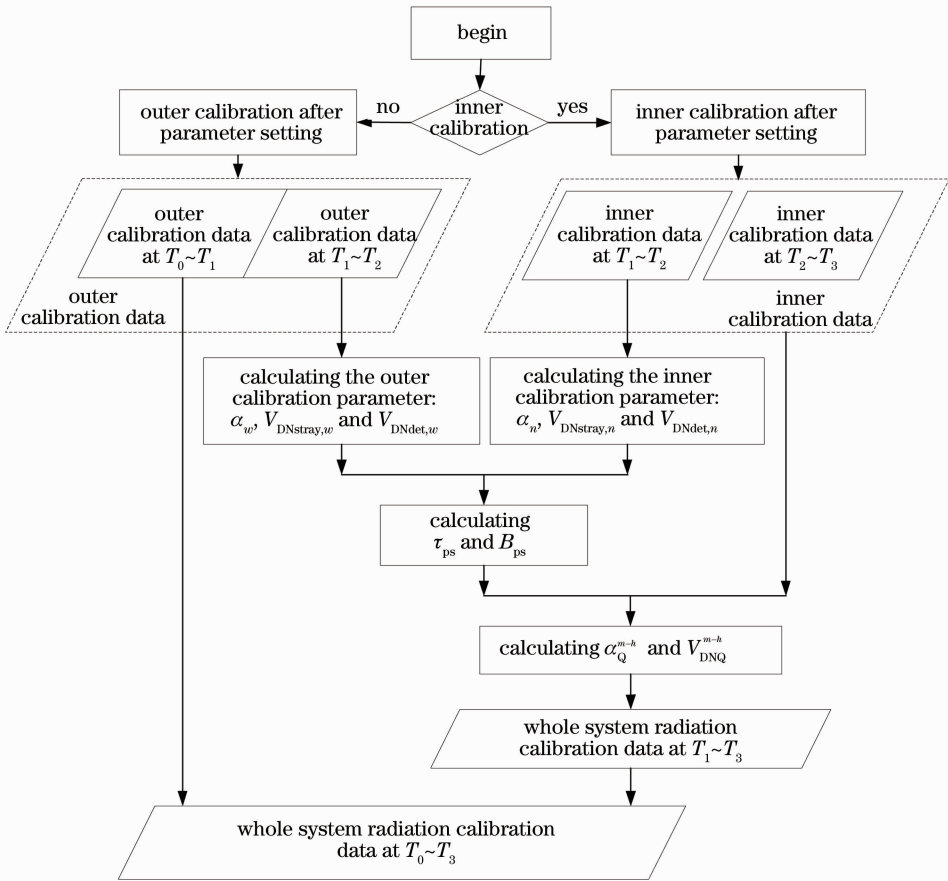


图 3 辐射定标流程

Fig. 3 Flow chart of radiation calibration

3.5、4、4.5、5、5.5 ms 共 8 档。为了提高红外系统的动态范围,在红外测量系统内部设置了透射率分别为 100%、30% 和 5% 的红外中性衰减片。

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系统进行外定标,黑体的辐射面积为 20" (约 508 mm),发射率为 0.97,温度范围 5 °C ~ 150 °C,温度精度 0.01 °C。外定标的温度范围设定为 5 °C ~ 150 °C,温度间隔为 5 °C。

图 4 为固定红外探测器的积分时间(5.5 ms),改变中性衰减片透射率的外定标结果。从图中可以看出,固定红外探测器的积分时间,中性衰减片的透射率越大,定标曲线的斜率就越高,探测器在较低的辐射亮度处即达到饱和(饱和灰度值约为 14100);而中性衰减片的透射率越小,定标曲线斜率越低,即可探测更大的辐射亮度。

图 5 为固定中性衰减片档位(5%),改变红外探测器积分时间的外定标结果。从图中可以看出,固定中性衰减片的透射率,红外探测器的积分时间越小,定标曲线的斜率也越小,即降低红外探测器的积

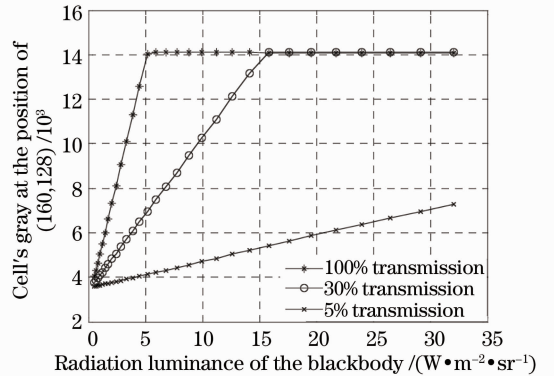


图 4 积分时间 5.5 ms、不同中性衰减片透射率的外定标结果

Fig. 4 Outer calibration results of different transmission at 5.5 ms

分时间同样可以提高可探测器的最大辐射亮度。图 5 中,外定标黑体设置在最高温度(150 °C)时,红外探测器在 5.5、3、0.8 ms 积分时间下的灰度输出分别为 7264、4348 和 1793,远远没有达到探测的响应上限,可以通过内定标扩展红外测量系统的动态范围。以图 5 所示的 5% 中性衰减片档位为例,进

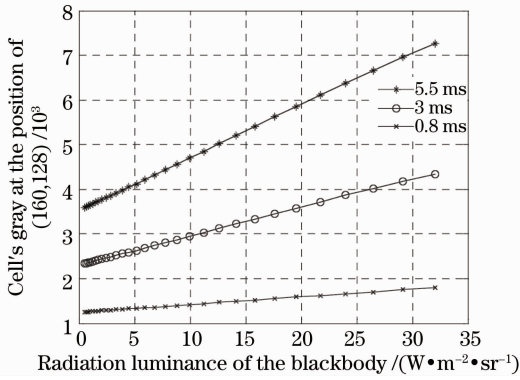


图5 衰减片透射率5%、不同积分时间的
外定标结果

Fig. 5 Outer calibration results of different integral time at 5% transmission

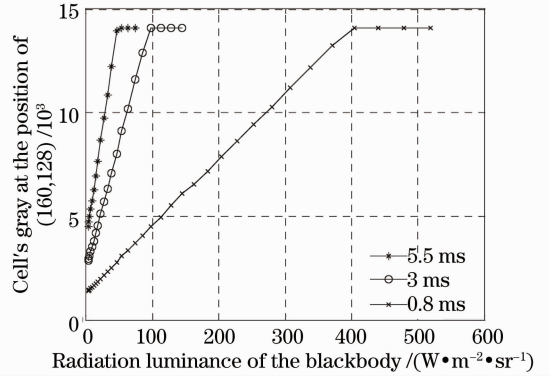


图6 衰减片透射率5%、不同积分时间的内定标结果

Fig. 6 Inner calibration results of different integral time at 5% transmission

行内定标并验证基于内、外定标修正辐射定标方法的可行性。

4.2 内定标

将以色列CI公司的SR200腔型黑体放置在红外系统内部进行内定标,黑体辐射面积为 Φ_1'' ($\Phi 25.4\text{ mm}$),发射率0.99,温度范围 $50\text{ }^\circ\text{C}\sim 1200\text{ }^\circ\text{C}$,温度精度0.3%。内定标的起始温度为 $50\text{ }^\circ\text{C}$,温度间隔 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 。图6为中性衰减片透射率为5%时,5.5、3、0.8 ms积分时间下的内定标结果。

从图6可以看出,在5.5、3、0.8 ms积分时间下,红外探测器分别在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $220\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 附近

达到饱和。

4.3 获取全口径、宽动态范围的辐射定标数据

在进行内、外定标修正时,需要提取公共温度范围的内、外定标数据。当中性衰减片的透射率和红外探测器的积分时间均较低时,探测器的响应灰度值较小,定标曲线的线性度不好,不能准确地获取外定标模型的参数。所以在进行较低透射率衰减片下的内、外定标修正时,尽量选择较高积分时间下的定标数据。这里,选择5.5 ms和5 ms积分时间下的内、外定标数据,拟合得到的线性响应曲线如表1所示,内、外定标模型的各项参数及前系统的增益和偏置计算结果如表2所示。

表1 $50\text{ }^\circ\text{C}\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ 范围的内、外定标结果

Table 1 Inner and outer calibration result at $50\text{ }^\circ\text{C}\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$

Transmission	Integral time /ms	Outer calibration temperature range / $^\circ\text{C}$	Equation of outer calibration	Inner calibration temperature range / $^\circ\text{C}$	Equation of inner calibration
5%	5.5	50:5:150	$V_{\text{DN}}=118.2732L_b+3521.49$	50:10:150	$V_{\text{DN}}=219.8848L_b+3846.62$
	5	50:5:150	$V_{\text{DN}}=107.4873L_b+3277.91$	50:10:150	$V_{\text{DN}}=200.1000L_b+3573.73$

表2 前系统的增益和偏置计算

Table 2 Plus and offset of former system

Transmission	Outer calibration parameter			Inner calibration parameter			τ_{ps}	B_{ps}
	α_w	$V_{\text{DNstray},w}$	$V_{\text{DNdet},w}$	α_n	$V_{\text{DNstray},n}$	$V_{\text{DNdet},n}$		
5%	429.9492	487.16	842.11	800.4000	545.78	844.8300	0.5372	-1.4648

从表2可以看出,表征红外系统杂散辐射的 V_{DNstray} 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 V_{DNdet} 近似不变,符合探测器的特性并验证了(9)式的假设。

使用前系统的增益和偏置对中、高温段的内定

标数据进行修正,获取全系统在中、高温段的辐射定标结果如表3所示。

综合表3结果与通过外定标获取的中、低温段辐射定标结果,就获得了全系统、宽动态范围的辐射定标数据,如图7所示。

表 3 中、高温段的辐射定标结果

Table 3 Whole system calibration at middle-high temperature range

Transmission	Integral time /ms	Inner calibration temperature range /°C	Equation of inner calibration at middle-high range	Whole system calibration equation at middle-high range
5%	5.5	50:10:170	$V_{DN} = 220.4374L_b + 3839.22$	$V_{DN} = 118.2360L_b + 3516.81$
5%	3	50:10:210	$V_{DN} = 123.0541L_b + 2439.33$	$V_{DN} = 64.4924L_b + 2263.47$
5%	0.8	50:10:340	$V_{DN} = 32.2338L_b + 1307.93$	$V_{DN} = 17.1980L_b + 1261.03$

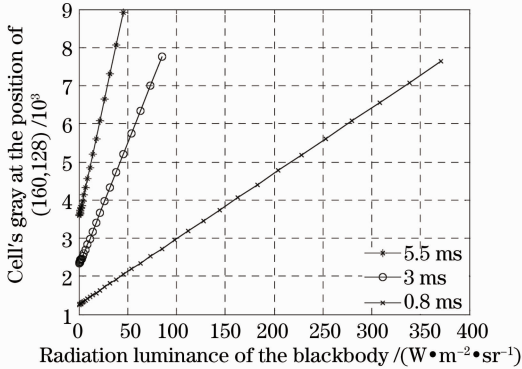


图 7 全系统、宽动态范围的辐射定标结果

Fig. 7 Whole system calibration result at broad dynamic range

如图 7 所示,由于内定标饱和灰度值的限制,积分时间为 0.8 ms 时,340 °C 对应的辐射亮度 [370.5156 W/(m²·sr)]在探测器上响应灰度值为

7633,此时,如果目标的能量继续增加,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。可以通过设置透射率更低的中性衰减片或在更低的积分时间条件下进行定标,以提高可精确测量的最大辐射能。

4.4 定标精度计算

将面源黑体通过平行光管扩束后覆盖红外系统的入瞳,根据前述得到的全系统、宽动态范围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^[13]。采用美国 OPTIKOS 公司的 EC-600 型离轴式红外平行光管,口径 600 mm,焦距 1200 mm。黑体采用 CI 公司的 SR80HT 高温黑体,辐射面积为 12''(约 304.8 mm),温度范围为 50 °C~550 °C,温度精度为 0.5 °C,发射率为 0.97。表 4 为黑体的辐射反演结果。

表 4 黑体的辐射反演结果

Table 4 Inversion precision of blackbody

Integral time /ms	Temperature /°C	Radiance / (W·m ⁻² ·sr ⁻¹)	Measurement value of radiance / (W·m ⁻² ·sr ⁻¹)	Error of radiance /%	Measurement value of temperature /°C	Error of temperature /°C
5.5	160	38.39	38.70	0.80	160.45	0.45
	170	45.65	46.00	0.76	170.45	0.45
3	160	38.39	38.91	1.35	160.76	0.76
	200	73.52	74.32	1.08	200.72	0.72
0.8	160	38.39	37.88	-1.34	159.24	-0.76
	300	252.65	251.99	-0.26	299.74	-0.26

由表 4 中测量结果看见,利用该定标方法反演得到黑体辐射亮度的最大误差为 1.35%,反演得到黑体温度的最大误差为 0.76 °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、宽动态范围的红外测量系统进行辐射定标。

表明该方法可以对大口径、宽动态范围的红外测量系统进行准确、有效的辐射定标。该方法的优点是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研制方面具有重要意义。

5 结 论

提出了一种基于内、外定标修正进行红外测量系统辐射定标的新方法,并在某红外测量系统上进行了辐射定标实验和定标精度验证实验,实验结果

参 考 文 献

- 1 J P Rice, S C Bender, W H Atkins, *et al.*. Deployment test of the NIST thermal infrared transfer radiometer [J]. Int J Remote Sen, 2003, 24(2): 367-388.
- 2 E Thecharous, N P Fox, V I Sapritsky, *et al.*. Absolute measurements of black body emitted radiance [J]. Metrologia,

- 1998, 35(4): 549-554.
- 3 T Svensson, I Renhorn, P Broberg. 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.
 - 4 William L Wolfe. Introduction to Radiometry [M]. Washington: SPIE Press, 1998.
 - 5 Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguo, *et al.*. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared optoelectric on spot [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2006, 17(2): 175-178.
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.
 - 6 Zhai Wenchao, Li Jianjun, Zheng Xiaobing, *et al.*. Research on method of calibration sun channels of sun radiometers [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412004.
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.
 - 7 Chen Lingzhi, Mu Da, Li Quanyong, *et al.*. Dual-color co-aperture infrared optical system design for irradiance measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(4): 042202.
陈灵芝, 牟达, 李全勇, 等. 双色红外共光路辐照度测量系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 042202.
 - 8 Tang Jia, Gao Xin. Calibration method for radiation characteristics measuring system of test range [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(10): 266-270.
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.
 - 9 Li Ning, Yang Ciyin, Cao Lihua, *et al.*. Radiance calibration for 3~5 μm infrared focal plane array [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2319-2325.
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.
 - 10 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.
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.
 - 11 Zhang Yanna, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, *et al.*. Research on system level calibration method of multi-band filter radiometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0812004.
张艳娜, 郑小兵, 李健军, 等. 多波段滤光片辐亮度计的系统级定标方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812004.
 - 12 Fu Xiuhua, Wang Gang, Liu Dongmei, *et al.*. Research and preparation of the visible and infrared control and guide system filters [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0107001.
付秀华, 王刚, 刘冬梅, 等. 可见与红外制导系统高通滤光片的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0107001.
 - 13 Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Linhua. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. J Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(3): 284-288.
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.

栏目编辑: 何卓铭