

doi: 10.3788/gzxb20174604.0412003

采用低温面源黑体实现红外系统宽动态范围定标

田棋杰^{1,2}, 常松涛¹, 乔彦峰¹, 何锋贇¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:针对大口径地基红外辐射测量系统在辐射定标时存在定标时间长、成本高和设备机动性差等缺点,提出一种仅采用低温面源黑体实现红外系统宽动态范围定标的方法。首先对红外系统中的衰减片进行标校,测量其实际透过率并计算其辐射量;然后采用低温面源黑体在两个积分时间下分别进行辐射定标,根据定标结果解算系统响应率、杂散辐射和探测器自身偏置;结合标校获得的衰减片特性对低温定标结果进行外推,即可获得宽动态范围定标结果。为验证该定标方法有效性,分别采用该方法和通用的高温黑体加大口径平行光管定标法,对 $\Phi 600$ mm 红外系统进行宽动态范围辐射定标实验。实验结果表明:本文方法的宽动态范围定标误差小于 10.25%,能够满足该系统的辐射定标精度要求。该方法只需要一个低温黑体即可实现红外系统的外场宽动态范围辐射定标,操作简单、实时性强,具有一定的应用价值。

关键词:辐射定标;红外系统;宽动态范围;低温面源黑体;平行光管;衰减片

中图分类号:TN216

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)04-0412003-8

Radiometric Calibration Based on Low-temperature Area Blackbody for Infrared Systems with High Dynamic Range

TIAN Qi-jie^{1,2}, CHANG Song-tao¹, QIAO Yan-feng¹, HE Feng-yun¹

(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)

Abstract: To overcome the restrictions of long calibration time, high cost and poor maneuverability for radiometric calibration of the ground-based infrared radiometric measurement systems with large aperture, a radiometric calibration method, which is based on low-temperature area blackbody, for infrared systems with high dynamic range was proposed. First of all, the neutral-density filter in the system was measured to obtain its actual transmissivity and calculate its radiance. Secondly, the radiometric calibration was performed using low-temperature blackbody at two integration times. The response and stray radiation of the system as well as the bias of the detector were obtained on the basis of the calibration results. Then, the calibration results at high dynamic range could be acquired by extrapolating the low-temperature calibration results, combined with the measured characteristics of the neutral-density filter. To verify the effectiveness of the proposed method, a $\Phi 600$ mm infrared system was calibrated at high dynamic range, using the proposed method and the typical method of high-temperature blackbody and large aperture collimator. The experimental results indicate that the error of the proposed method is less than 10.25%, which means the proposed method can be used to perform calibration for the system. The radiometric calibration for infrared systems with high dynamic range can be achieved only with a low-temperature blackbody in the outfield. The proposed method, with the advantages of simple

基金项目:国家自然科学基金(No. 51275504)资助

第一作者:田棋杰(1990-),男,博士研究生,主要研究方向为红外杂散辐射抑制和辐射测量。Email: tian7jie@163.com

导师(通讯作者):乔彦峰(1962-),男,研究员,博导,主要研究方向为光电测控技术及相关领域。Email: qiaoyf@ciomp.ac.cn

收稿日期:2016-11-17;录用日期:2017-02-15

<http://www.photon.ac.cn>

operation and strong real-time, has a value for application.

Key words: Radiometric calibration; Infrared systems; High dynamic range; Low-temperature area blackbody; Collimator; Neutral-density filter

OCIS Codes: 120.5630; 040.2480; 040.3060

0 引言

目标红外辐射特性测量是获取目标辐射强度、辐射亮度及温度等信息的重要手段^[1]. 对红外辐射特性测量系统进行辐射定标是为了建立输入辐射量与红外探测器输出灰度(Digital Level, DL)之间的定量关系^[2-3]. 辐射定标是辐射特性测量的前提, 定标精度会对测量精度产生较大影响^[4]. 高速飞行器等外场测控目标具有体积小、速度快、温度变化剧烈等特点, 这就要求地基红外辐射特性测量系统具有大口径和宽动态范围. 动态范围是指红外系统可以探测的目标辐射亮度或者温度的变化范围, 宽动态范围意味着红外系统必须实现对目标由高温到低温范围的有效探测.

针对大口径、宽动态范围地基红外辐射特性测量系统(红外光电经纬仪), 主要的定标方法有近距离扩展源法和平行光管法^[5]. 近距离扩展源法是最常用的定标方法, 定标时将高精度的黑体辐射源放置于定标系统入瞳前对测量系统进行直接定标, 该方法能有效减小大气衰减和大气程辐射的影响, 定标精度高^[6]. 由于大面源黑体的温度范围有限, 该方法主要用于在低温范围对系统进行定标. 平行光管法采用面积较小的中、高温腔型黑体辐射源, 通过平行光管扩束后对测量系统进行定标, 该方法可以对测量系统进行宽动态范围定标. 但是大口径平行光管存在机动性差、研制周期长等缺点, 因此平行光管法主要用于实验室定标, 外场定标时难以采用. 基于上述方法, 孙志远等提出采用内外定标修正的方法实现红外测量系统宽动态范围辐射定标^[7]; 杨词银等对大口径红外光电系统的光谱定标和辐射定标进行研究并分析定标误差^[3]; 罗茂捷等提出采用最小二乘法拟合像元响应灰度值对辐射量和积分时间响应函数定标的方法^[4]. 然而现有大口径宽动态范围辐射测量系统必须使用大口径平行光管和不同温度等级黑体在多个积分时间下进行定标. 如果最低积分时间仍无法满足动态范围要求, 系统必须加入衰减片对入射能量进行固定倍率衰减, 该过程耗时长、机动性差、效率低、成本高, 难以满足现代靶场宽动态范围定标和测量的要求.

针对上述问题, 在多积分时间和多档衰减片(Neutral-Density filter, ND filter)定标模型的基础上, 本文提出一种采用低温面源黑体实现宽动态范围定标的方法. 通过提前标定衰减片实际透过率, 作为固有参量, 在外场定标时仅需要面源黑体在两个积分时间下进行低温范围定标即可得到系统从低温到高温范围的定标结果. 采用该方法在 $\Phi 600\text{mm}$ 红外辐射测量系统上进行辐射定标实验, 依据定标模型计算目标辐射亮度值, 计算比较该方法与平行光管法之间的定标误差并进行分析.

1 地基宽动态范围红外系统辐射定标方法

1.1 常用定标方法

对于外场红外辐射特性测量系统, 一般采用近距离扩展源法进行辐射定标, 如图 1^[8-9].

设定标黑体辐射源的温度为 T_B , 发射率为 ϵ_B ,

则黑体辐射源的辐射亮度为

$$L_{BB}(T_B) = \frac{\epsilon_B}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_B) d\lambda \quad (1)$$

式中, $L_{BB}(T_B)$ 表示定标黑体的辐射亮度, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 表示红外探测器的工作波段范围, $M(\lambda, T_B)$ 表示温度为 T_B 的绝对黑体的光谱辐出射度, 可由普朗克公式计算得到.

在红外探测器线性响应范围内, 焦平面上像元输出灰度值与定标黑体亮度间的关系可表示为^[10-11]

$$D = K \cdot L_{BB}(T_B) + B \quad (2)$$

式中, D 表示探测器像元的输出灰度值, K 表示某一固定积分时间下的像元响应率, B 表示像元的偏置.

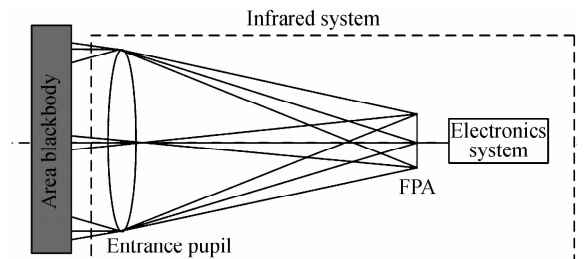


图 1 近距离扩展源法定标示意图

Fig. 1 Schematic of near-extended-source method

对于大口径宽动态范围辐射测量系统,高温范围定标必须采用大口径平行光管对高温腔型黑体扩束进行定标.平行光管法与近距离扩展源法的定标过程相似,在红外探测器某一积分时间和线性响应范围内,焦平面上像元的输出灰度值与定标黑体亮度之间呈线性关系,如式(2).

1.2 宽动态范围辐射定标基本方法

对于宽动态范围辐射特性测量系统,探测器接收到的目标能量过低会导致探测器输出灰度低、信噪比差,影响目标识别和辐射测量精度,而目标能量过高会导致探测器饱和使得测量结果无效.因此通常对不同能量的目标采用合适的积分时间和衰减片,以保证辐射特性测量精度^[12-13].该类系统辐射定标时,通常需要对多档积分时间和衰减片逐一进行.

1.2.1 多积分时间法

对于高精度制冷型红外探测器,在线性响应范围内,系统探测器输出灰度与积分时间和定标黑体辐射亮度均呈线性关系.考虑积分时间的定标模型可表示为^[14]

$$D_{\text{int}} = t \cdot [G \cdot L(T_B) + h_s] + h_{\text{det}} \quad (3)$$

式中, D_{int} 表示探测器像元的输出灰度值, t 表示探测器的积分时间, G 表示像元单位积分时间下的响应率, h_s 表示单位积分时间下系统杂散辐射引起的像元输出灰度变化, h_{det} 表示探测器暗电流等因素引起的像元输出灰度变化.

由式(3)可见,缩短积分时间可以扩展定标动态范围,但是积分时间过短会使系统信噪比降低,定标曲线的线性度变弱,无法准确获取定标模型参数^[7].此外,由于探测器工作机理限制,通常为测量系统预设几个特定的积分时间档位,限制了积分时间法在扩展红外系统动态范围中的应用.因此,通过缩短积分时间的方法拓展动态范围会受到很大限制.

1.2.2 多档衰减片法

拓展红外系统动态范围最直接的方式是对入射目标能量进行衰减,多档衰减片定标方法正是基于这一思想.根据系统所需动态范围,在光学系统中加入一片或者多片不同透过率的红外衰减片,通过切换不同衰减片,实现红外系统宽动态范围定标^[15].设衰减片的透过率为 τ_{nd} ,则辐射定标模型可表示为

$$D_{\text{nd}} = \tau_{\text{nd}} \cdot G \cdot L(T_B) + \tau_{\text{nd}} \cdot h_s + h_{\text{nd}} + h_{\text{det}} \quad (4)$$

式中 D_{nd} 表示探测器像元的输出灰度值, τ_{nd} 表示红外衰减片在探测器工作波段内的平均透过率, h_{nd} 表示单位积分时间下红外衰减片自身辐射引起的像元输出灰度变化,其余变量含义与式(3)相同.

由式(4)可见,采用低透过率衰减片可以拓展定标动态范围,但是在低温范围定标时,衰减片透过率过低会导致系统信噪比减弱,定标曲线的线性度变差,无法获取准确的定标参数,在实际使用中应尽量避免在低透过率和低温范围定标^[5].在高温范围定标时,必须采用腔型黑体和大口径平行光管,存在机动性差、成本高等缺点.此外衰减片切入切出光路比较耗时,影响测量过程.因此,通过加入衰减片拓展动态范围的方法也会受到一定限制.

2 采用低温面源黑体实现宽动态范围定标

现有宽动态范围定标方法通过调整积分时间和衰减片透过率实现,需要对所有档位逐一定标,过程繁琐、时间长,并且需要大口径平行光管和多个不同温度等级黑体,机动性差、成本高,难以满足外场机动定标要求.针对上述问题,本文在多积分时间和多档衰减片定标模型的基础上,提出一种采用低温面源黑体实现宽动态范围定标的方法.通过对衰减片参数进行标校,结合获得的衰减片特性对低温定标结果进行外推,实现宽动态范围辐射定标.

结合式(3)和(4),当探测器积分时间为 t ,衰减片透过率为 τ_{nd} 时,系统的定标方程可表示为

$$D_{\text{hdr}} = t[\tau_{\text{nd}} \cdot G \cdot L(T_B) + \tau_{\text{nd}} \cdot h_s + h_{\text{nd}}] + h_{\text{det}} = t \cdot \tau_{\text{nd}} \cdot G \cdot L(T_B) + t \cdot \tau_{\text{nd}} \cdot h_s + t \cdot h_{\text{nd}} + h_{\text{det}} \quad (5)$$

式中有5个未知量,分别为单位积分时间下像元响应率 G ,系统杂散辐射引起的像元灰度变化 h_s ,探测器暗电流等因素引起的像元偏置 h_{det} ,衰减片自身辐射引起的像元灰度变化 h_{nd} 以及衰减片的实际透过率 τ_{nd} .因此,只要能确定这5个未知量的值,即可获得系统任意积分时间下的定标模型.

5个未知量的获取步骤为:1)标定衰减片的实际透过率 τ_{nd} ,作为系统固有参数,计算其辐射量,进而得到辐射测量时衰减片自身辐射 h_{nd} ;2)外场定标时采用面源黑体在两个积分时间下定标,根据定标结果解算

像元响应率 G , 系统杂散辐射 h_s 以及探测器偏置 h_{det} . 最后, 将这 5 个量代入定标方程式(5), 即得到宽动态范围定标模型, 其定标流程如图 2.

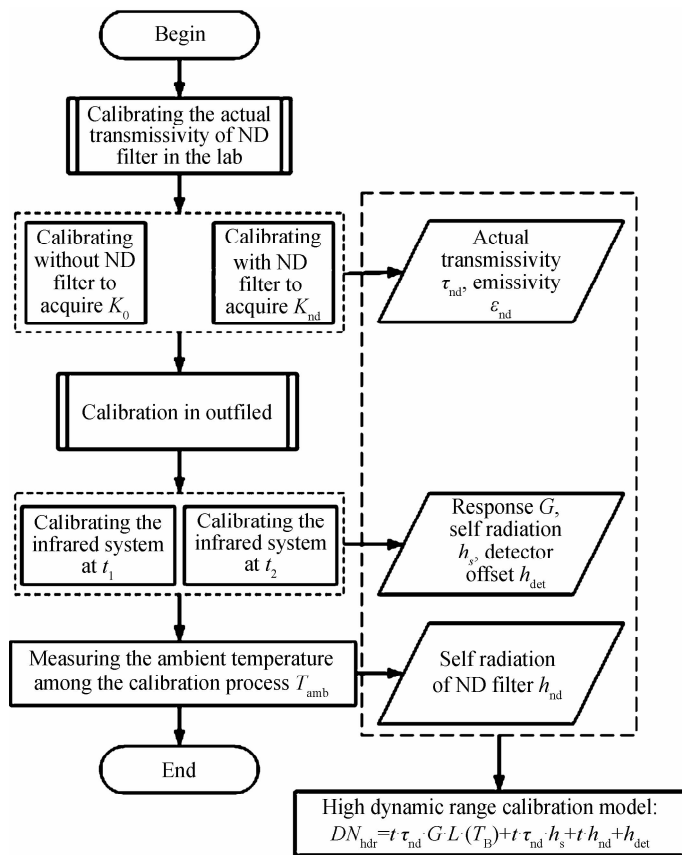


图 2 定标流程

Fig. 2 Flow char of radiometric calibration

2.1 标校衰减片透过率和自身辐射

红外衰减片的标称透过率是指某一波段内的平均透过率, 由于表面污染、温度剧烈变化等因素其透过率会与标称数值有所偏差, 因此需要对衰减片的实际透过率数值进行标定, 作为其固有参数. 在实验室内采用红外系统, 定标获得加入衰减片前后的响应率, 二者相除即可得到衰减片在探测器响应波段内的实际透过率, 具体过程为:

1) 固定探测器在某一积分时间下, 不加衰减片时采用黑体对红外系统进行定标, 此时定标方程记为

$$D_0 = K_0 \cdot L(T_B) + B_0 \quad (6)$$

2) 在探测器前加入某一透过率衰减片, 再次进行定标, 如图 3, 此时系统的定标方程记为

$$D_{nd} = K_{nd} \cdot L(T_B) + B_{nd} \quad (7)$$

3) 联立式(6)和(7), 得到衰减片实际透过率为

$$\tau_{nd} = \frac{K_{nd}}{K_0} \quad (8)$$

由于衰减片加入系统, 其自身辐射会对定标和测量结果产生影响, 必须进行计算消除. 设衰减片温度与环境温度近似相等, 透过率为 τ_{nd} , 辐射定标时环境温度为 T_{amb} , 则衰减片自身发射率为 $\epsilon_{nd} = 1 - \tau_{nd}$, 因此衰减片的辐射亮度 $L_{nd}(T_{amb})$ 为

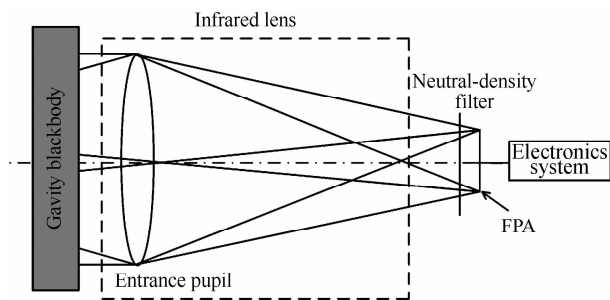


图 3 腔型黑体加衰减片定标

Fig. 3 Calibration of cavity blackbody with neutral filter

$$L_{nd}(T_{amb}) = \frac{\epsilon_{nd}}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_{amb}) d\lambda \quad (9)$$

针对探测器在某一积分时间下的定标模型,由式(3)可得,衰减片自身辐射引起的探测器像元灰度变化为

$$h_{nd} = t \cdot G \cdot L_{nd}(T_{amb}) = t \cdot G \cdot \epsilon_{nd} \cdot L_{BB}(T_{amb}) \quad (10)$$

由于光学系统处于密闭状态,其温度变化范围较小,外场定标过程中,可在衰减片附近放置温度传感器,实时监测并获取其附近环境温度,修正定标模型。

2.2 低温黑体定标获得系统响应、杂散辐射及探测器偏置

低温面源黑体定标采用近距离扩展源法,在多个积分时间档位下,对未加入衰减片的红外系统进行辐射定标.高精度的地基红外辐射特性测量系统通常采用高性能的制冷型红外探测器,定标时红外探测器的输出灰度与积分时间和黑体辐射亮度均成线性关系.将辐射定标结果代入考虑积分时间的定标模型式(3),可以得到系统的响应率、杂散辐射及探测器偏置.进行外场定标时低温面源黑体覆盖红外系统入瞳,对未加入衰减片的系统进行多积分时间档位定标,定标装置如图4.

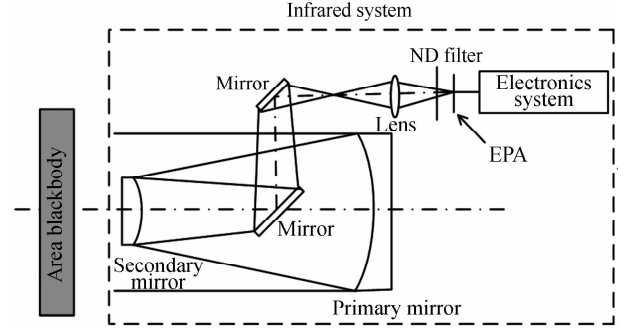


图4 低温黑体标定大口径红外系统
Fig. 4 Calibration of infrared system with large aperture using low-temperature area blackbody

由式(3)可知,只要分别在两个积分时间对系统进行定标即可获得系统响应率、杂散辐射及探测器偏置,具体过程为:1)设定探测器积分时间为 t_1 ,对红外测量系统进行辐射定标;2)改变探测器积分时间为 t_2 ,再次对红外测量系统进行辐射定标。

完成两积分时间定标后,系统在 t_1 和 t_2 积分时间下的定标方程分别为

$$D_{t_1} = t_1 [G_{t_1} \cdot L(T_B) + h_s] + h_{det} = K_{t_1} \cdot L(T_B) + B_{t_1} \quad (11)$$

$$D_{t_2} = t_2 [G_{t_2} \cdot L(T_B) + h_s] + h_{det} = K_{t_2} \cdot L(T_B) + B_{t_2} \quad (12)$$

其中,

$$B_{t_1} = t_1 \cdot h_s + h_{det} \quad (13)$$

$$B_{t_2} = t_2 \cdot h_s + h_{det} \quad (14)$$

则系统杂散辐射 h_s 和探测器偏置 h_{det} 分别为

$$h_s = \frac{B_{t_2} - B_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (15)$$

$$h_{det} = \frac{B_{t_1} \cdot t_2 - B_{t_2} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (16)$$

为降低定标误差,将两个定标方程响应率归一化到单位积分时间后取均值,则系统单位积分时间定标响应率可表示为

$$G = \frac{\left(\frac{K_{t_1}}{t_1} + \frac{K_{t_2}}{t_2} \right)}{2} \quad (17)$$

至此,定标模型中的5个未知参数均已获取,将式(8)、(10)、(15)、(16)和(17)分别代入宽动态范围定标模型式(5),得到积分时间 t 下的系统定标模型为

$$D_{hdr} = K_{hdr} \cdot L(T_B) + B_{hdr} \quad (18)$$

其中,

$$K_{hdr} = \frac{K_{nd} \cdot (t_2 \cdot K_{t_1} + K_{t_2} \cdot t_1)}{2 \cdot t_1 \cdot t_2 \cdot K_0} \cdot t \quad (19)$$

$$B_{\text{hdr}} = \frac{K_{\text{nd}} \cdot (B_{t_2} - B_{t_1})}{K_0 \cdot (t_2 - t_1)} \cdot t + \frac{(K_{t_1} \cdot t_2 - K_{t_2} \cdot t_1) \cdot (K_0 - K_{\text{nd}}) \cdot (t_2 - t_1) \cdot L_{\text{BB}}(T_{\text{amb}})}{2 \cdot t_1 \cdot t_2 \cdot K_0 \cdot (t_2 - t_1)} \cdot t + \frac{B_{t_1} \cdot t_2 - B_{t_2} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (20)$$

在已知探测器输出灰度 D_{hdr} 和积分时间 t 的情况下可由式(18)得到目标的辐射亮度值 L . 该方法只需事先在实验室内标定一次衰减片透过率, 定标速度较快, 实验室内温度相对稳定, 标校结果可信用度高, 外场定标过程不需要再次进行衰减片标校. 在外场定标时仅采用面源黑体在两个积分时间下定标, 代入衰减片参数对定标结果外推即可得到宽动态范围的辐射定标结果. 该方法不需要大口径平行光管和多个温度等级黑体, 机动性强, 有效缩短了定标时间, 节约了定标成本.

3 实验

为验证本文方法的定标精度, 对 $\Phi 600$ mm 红外辐射测量系统进行验证实验, 系统焦距为 1 200 mm, F 数为 2. 采用 FLIR 中波制冷型红外探测器, 工作波段为 3.7~4.8 μm , 像元数为 640×512, 像元大小 15 μm ×15 μm , 输出位为 14 bit, F 数为 2. 定标黑体采用以色列 CI 公司 SR80HT 高温腔型黑体, 温度范围 50~1 200 $^{\circ}\text{C}$, 温度精度为 0.5 $^{\circ}\text{C}$, 发射率为 0.97, 红外衰减片标示 3.7~4.8 μm 波段内平均透过率为 2%.

外场定标前在实验室内标定衰减片的实际透过率, 分别在系统不带衰减片和加入衰减片的情况下进行定标, 积分时间选取 0.5 ms, 标定得到衰减片的实际透过率为 2.96%, 则衰减片的发射率为 $\epsilon_{\text{nd}} = 1 - \tau_{\text{nd}} = 0.9704$. 另外, 定标时间较短, 环境温度相对稳定, 衰减片温度不会发生较大变化, 外场定标过程中环境温度稳定在 25 $^{\circ}\text{C}$, 由式(9)可到衰减片的辐射亮度为 $L_{\text{nd}} = 1.148 0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

外场定标时对系统采用近距离扩展源法进行定标. 大面源黑体温度范围为 -20~100 $^{\circ}\text{C}$, 精度为 0.1 $^{\circ}\text{C}$, 口径为 700 mm, 发射率为 0.96. 为保证系统动态范围和定标曲线线性度, 选取积分时间分别为 1 ms 和 2 ms, 定标温度范围选取 30~90 $^{\circ}\text{C}$, 温度间隔为 10 $^{\circ}\text{C}$, 定标结果如图 5.

由图 5 中定标方程结合式(15)和(16)可解算系统杂散辐射和探测器偏置分别为 $h_s = 2585\text{DL}$, $h_{\text{det}} = 163\text{DL}$, 由式(17)可得到系统响应率为 $G = 644.1$, 由式(10)得到衰减片自身辐射为 $h_{\text{DN}} = 735\text{DL}$. 至此, 宽动态范围定标中的未知参量均已得到, 将各参量分别代入定标模型式(19)可得

$$D_{\text{hdr}} = t \cdot \tau_{\text{nd}} \cdot G \cdot L + t \cdot \tau_{\text{nd}} \cdot h_s + t \cdot h_{\text{nd}} + h_{\text{det}} = 0.0296 \times 644.1 \times t \cdot L + 0.0296 \times 2585 \cdot t + 735 \times t + 163 \quad (21)$$

依据式(21)在已知探测器积分时间 t 和输出灰度 D_{hdr} 的情况下, 即可求得目标的辐射亮度值 L .

为验证本文方法的定标精度, 采用宽动态范围定标模型式(21)反演目标辐射亮度值, 记为计算值; 采用平行光管法反演目标辐射亮度值, 记为标准值. 采用美国 OPTIKOS 公司的 EC-600 型离轴红外平行光管, 口径为 600 mm, 焦距为 1 200 mm, 平行光管法定标模型和本文方法定标模型见表 1.

为保证定标曲线线性度, 探测器输出灰度不能过低, 同时为防止探测器饱和, 输出灰度也不能过高. 选取探测器输出灰度范围为 6 000~13 000DL, 计算值与标准值之间的偏差即为定标误差. 平行光管法与本文方法反演得到的目标辐射亮度值见表 2.

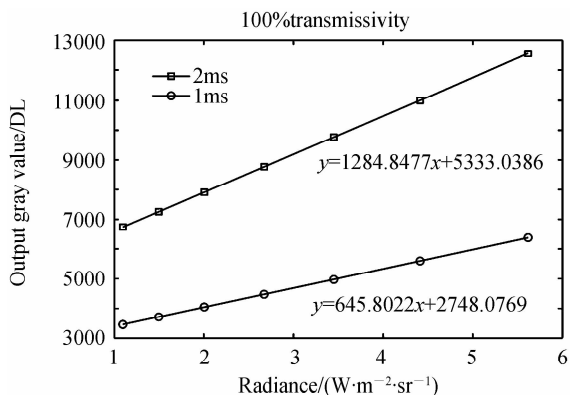


图 5 无衰减片近距离扩展源法定标结果
Fig. 5 Calibration results using near-extended-source method without neutral-density filter

表 1 平行光管法和本文方法定标模型
Table 1 Calibration model of collimator method and the proposed method

Method	Integral time/ms	Calibration formula
Collimator method	0.5	$y = 8.40 \cdot x + 963.82$
	1	$y = 16.01 \cdot x + 2171.03$
Proposed method	0.5	$y = 9.53 \cdot x + 568.76$
	1	$y = 19.07 \cdot x + 974.52$

由表 2 可见,本文方法与平行光管法最大定标误差为 10.25%,且误差数值不具有增大或减小趋势,表明本文方法的稳定性.由表 2 反演得到的最大辐射亮度为 $1\,304.00\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$,由图 5 反演得到的最大辐射亮度为 $15.88\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$,可见本文方法相比于传统距离扩展源法极大地拓展了系统的动态范围.

本文方法定标最大偏差出现在灰度值为 6 000DL 时,该偏差主要是由于该方法假设衰减片处于环境温度下,外场环境不稳定,因此衰减片的温度会发生变化,定标模型会随之发生变化.对此,定标过程中可以随时测量周围环境温度,修正定标模型,减小定标误差.如果具备实验条件,后续定标过程中可以实时测量衰减片的温度,进一步降低定标误差.此外,当环境温度变化后,系统自身辐射也会随之变化,进而影响定标和测量精度.对此,必须研究环境温度对系统自身辐射和输出的影响,采取相应的控温或者补偿措施,确保定标精度满足要求.本文方法与传统采用大口径平行光管定标法相比,测量精度

满足外场要求,同时外场定标过程不需要携带大口径平行光管和多个黑体定标源,仅需面源黑体在两个积分时间下定标即可完成,有效缩短了定标时间,增强了外场定标的机动性,节约了外场定标时间和成本.

4 结论

针对大口径地基红外辐射测量系统外场定标过程中存在的机动性差、时间长、成本高等问题,本文提出一种采用低温面源黑体实现宽动态范围定标的方法.该方法只需要提前标定衰减片的实际透过率及发射率,外场定标时仅需要低温面源黑体辐射定标即可获得定标模型的所有参量.采用 $\Phi 600\text{ mm}$ 红外辐射测量系统进行宽动态范围辐射定标精度验证实验.实验结果表明:该方法与平行光管法最大辐射定标误差为 10.25%,满足外场机动定标精度要求.目标反演最大辐射亮度值由 $15.88\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 拓展到 $1\,304.00\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$,相比于低温面源黑体定标结果,该方法有效提升了辐射特性测量动态范围.该方法外场定标时不需要采用大口径平行光管和多个定标黑体,定标过程简单易行,耗时短,具有机动性强、成本低、易于实现等特点,适用于大多数红外辐射特性测量系统,可以较为简便地实现宽动态范围定标,具有一定的实用价值.后续工作将会研究环境温度对辐射定标影响及补偿措施,提高宽动态范围辐射定标方法的定标精度和环境适应性.

参考文献

- [1] CAO Li-hua, LI Ning, YANG Ci-yin, *et al.* Radiation calibration for $3\sim 5\mu\text{m}$ infrared detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4):858-864.
曹立华,李宁,杨词银,等. $3\sim 5\mu\text{m}$ 红外探测器的辐射定标[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(4):858-864.
- [2] WANG Jian-jun, HUANG Chen, GAO Xing, *et al.* Inner and outer calibration technology of infrared radiation measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(6):1767-1771.
王建军,黄晨,高昕,等. 红外辐射测量系统内外标定技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(6):1767-1771.
- [3] YANG Ci-yin, CAO Li-hua. Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared opto-electric system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(9):1624-1628.
杨词银,曹立华. 大口径红外光电系统辐射定标及误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(9):1624-1628.
- [4] LUO Mao-jie, ZHOU Jin-mei, FU Jing-neng, *et al.* Integration time as variable radiometric calibration for 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.
- [5] SUN Zhi-yuan, CHANG Song-tao, ZHU Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(7): 0712006.
孙志远,常松涛,朱玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2014, **34**(7):0712006.

表 2 目标辐射亮度值反演结果

Gray value /DL	Integral time /ms	Standard values/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	Calculated values/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	Calibration errors /%
13000	0.5	1432.20	1304.00	8.95
	1	676.19	630.78	6.72
12 000	0.5	1313.20	1199.10	8.69
	1	613.74	578.33	5.77
11 000	0.5	1050.60	1094.20	-4.15
	1	551.30	525.88	4.61
10 000	0.5	1075.20	989.35	7.98
	1	488.86	473.40	3.61
9 000	0.5	956.24	884.45	7.51
	1	426.42	420.95	1.28
8 000	0.5	837.24	779.55	6.89
	1	363.98	368.50	-1.24
7 000	0.5	718.25	674.65	6.07
	1	301.53	316.05	-4.81
6 000	0.5	599.26	569.74	4.93
	1	239.09	263.60	-10.25

- [6] NUGENT P W, SHAW J A, PUST N J. Radiometric calibration of infrared imagers using an internal shutter as an equivalent external blackbody[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(12): 123106.
- [7] SUN Zhi-yuan, CHANG Song-tao, ZHU Wei. Radiometric calibration method for large aperture infrared system with broad dynamic range[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(15): 4659-4666.
- [8] SUN Zhi-yuan, WANG Min, CHANG Song-tao. Effect and correction of environmental temperature on infrared radiation measurement precision[J]. *Laser & Infrared*, 2014, **44**(5): 522-527.
孙志远,王旻,常松涛. 环境温度对红外辐射测量精度的影响及修正[J]. 激光与红外, 2014, **44**(5): 522-527.
- [9] SUN Zhi-yuan, CHANG Song-tao, ZHU Wei. Simplifying method of radiance calibration for MWIR detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(7): 2132-2137.
孙志远,常松涛,朱玮. 中波红外探测器辐射定标的简化方法[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(7): 2132-2137.
- [10] TÉ Y, JESECK P, PÉPIN I, *et al.* A method to retrieve blackbody temperature errors in the two points radiometric calibration[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, **52**(5): 187-192.
- [11] LEE H, OH C, HAHN J W. Calibration of a mid-IR optical emission spectrometer with a 256-array PbSe detector and an absolute spectral analysis of IR signatures[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **57**: 50-55.
- [12] OCHS M, SCHULZ A, BAUER H J. High dynamic range infrared thermography by pixelwise radiometric self calibration[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, **3**(2): 112-119.
- [13] SVENSSON T, RENHORN I, BROBERG P. Evaluation of a method to radiometric calibrate hot target image data by using simple reference sources close to ambient temperatures[C], SPIE, 2010: 76620X.
- [14] TIAN Qi-jie, CHANG song-tao, LI zhou, *et al.* A method to measure internal stray radiation of cryogenic infrared imaging systems under various ambient temperatures[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **81**: 1-6.
- [15] CHANG Song-tao. Research on infrared theodolite design and key technologies to improve the radiometry precision[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
常松涛. 红外经纬仪结构设计及提高其辐射测量精度的关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.