

文章编号 1004-924X(2017)10-2541-10

地基大口径红外光电系统的联合辐射定标

刘俊池*, 李洪文, 王建立, 殷丽梅, 李宏壮, 赵金宇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 考虑标准红外星定标方法无法测定地基大口径红外光电系统像元级的辐射响应度, 进而导致对系统存在的非均匀性现象适应能力差的问题, 提出了基于标准红外星与小口径黑体的联合辐射定标方法。该方法以标准红外星为外定标参考源, 测定全光路系统的辐射响应度; 以小口径黑体为内定标参考源, 测定半光路系统像元级的辐射响应度; 最后, 结合内、外定标结果推算前端光学系统透过率, 进而实现系统的全光路像元级辐射响应度定标。开展了自然星红外辐射特性测量实验, 并与标准红外星定标方法进行了对比。结果显示: 提出方法获得的目标最大反演误差为 15.89%, 而标准红外星定标方法在最理想情况下获得的最大反演误差为 15.92%, 表明提出方法的定标精度高于标准红外星定标方法。另外, 提出方法能够测定全光路系统像元级的辐射响应度, 克服了系统响应非均匀性的影响, 进而提高了红外探测器的焦平面利用率, 弥补了标准红外星定标方法的应用缺陷。

关键词: 红外光电系统; 联合辐射定标; 标准红外星; 小口径黑体; 红外辐射特性

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2541

Combined radiometric calibration of ground-based large-aperture infrared photoelectric systems

LIU Jun-chi*, LI Hong-wen, WANG Jian-li, YIN Li-mei, LI Hong-zhuang, ZHAO Jin-yu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: liujunchi703@163.com

Abstract: When infrared standard stars are used in radiation calibration for a ground-based large-aperture infrared photoelectric system, it can not determine the radiance responsivity of each pixel and shows a poor adaptability for non-uniformity of the system. To solve this problems, a combined radiometric calibration method based on infrared standard stars and the small-aperture blackbody was proposed. The infrared standard stars were taken as an outer reference source to calibrate the radiance responsivity of the total optics, and the blackbody was taken as the inner reference source to calibrate the radiance responsivity of the partial optics. Finally, the transmittance of the front optics was calculated based on the inner and outer calibration results, and the radiance responsivity of the total optics was calibrated in pixel levels. Several experiments were performed to inverse the illuminance of the infrared stars. The results show that the maximum relative inversion error of the proposed method is

收稿日期: 2017-05-27; 修订日期: 2017-06-28.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2015AAXX1009)

15.89% and that from infrared standard star calibration is 15.92%, which means that the proposed method keeps more accurate than that of the infrared standard star method. Moreover, the radiance responsivity of the total optics corresponding to each pixel is calibrated, and the results indicate that the proposed method overcomes the interference of system non-uniformity, improves the utilization ratio of the focal plane array and makes up the application defect of standard infrared stars.

Key words: infrared photoelectric system; combined radiometric calibration; infrared standard stars; small-aperture blackbody; infrared radiation feature

1 引言

在空间目标的地基探测中,红外辐射特性测量是获取目标在轨信息、对目标进行有效识别的重要手段之一。根据成像模型,目标可以分为扩展源目标与点源目标两大类。这两种目标的测量指标分别为表面温度和总体辐射强度。在对点源目标的辐射特性测量中,红外光电系统的高精度辐射定标是测量的前提。

随着光学元件制造工艺的发展,地基红外光电系统的口径越来越大,其对目标的探测能力也越来越强。然而,口径增大致使红外光电设备辐射定标的实现难度也不断增加。按照定标参考源,地基红外光电设备的辐射定标主要分为黑体定标方法与标准红外星定标方法。

黑体定标方法分为直接定标法和间接定标法。直接定标法将黑体辐射面置于光学系统入瞳处,通过合理设置定标温度来完成辐射定标。美国毛依岛空间监视系统(MSSS)装备的先进光电系统(AEOS),其口径达到了 3.67 m,配属的长波红外成像仪应用了先进的红外冷光学技术,以内置的低温面源黑体为定标参考源,对光学系统进行内定标,结合估算的前端光学系统透过率,实现了系统的全光路辐射响应度定标^[1-2]。长春光机所的孙志远与常松涛提出了一种基于内、外定标修正的辐射定标方法,使用面源黑体对全系统进行中、低温段的外定标,使用腔型黑体对部分光路进行高温段的内定标,然后结合公共温度范围内的内、外定标结果推算出内、外定标之间的修正系数,进而实现全系统、宽动态范围的辐射定标^[3-6]。间接定标法以腔型黑体或小面源黑体为定标参考源,利用平行光管生成带有一定发散角度的平行光束,从而实现覆盖光学系统入瞳和红外探测器焦平面的目的。北京跟踪与通信技术研究所的唐

嘉与高昕提出了 3 种红外光电设备的间接定标方法,即直接扩展源法、间接扩展源法和点源法,并对比了它们的优缺点^[7]。长春光机所的李宁、杨词银与张云峰等以腔型黑体和平行光管组合作为定标参考源,设计了 1 m 口径红外测量系统的辐射定标装置^[8-9]。李宪圣等研制了大口径红外光电系统现场辐射定标装置,应用平行光管配合小面源黑体沿光学系统口径的径向和圆周向运动,实现了系统的全口径辐射定标^[10]。

标准红外星定标方法以大气层外已知辐射照度的自然星为定标参考源,根据天文测光原理,在单次定标实验中同时测定红外光电设备的辐射响应度和整层大气透过率。加州大学伯克利分校的 Martin Cohen 等以地基、空基望远镜的天文测光结果为基准,测定了自然星在大气层外的光谱辐射照度,建立了标准红外星库^[11-13]。长春光机所的刘俊池与殷丽梅等研究了标准红外星定标方法,并验证了该方法应用于地基大口径红外光电设备辐射定标的可行性^[14-16]。安徽光机所的朱明与詹杰等利用多目标星定标方法测定了设备的仪器星等和整层大气透过率,并对比 Langley-Plot 定标方法验证了该方法的合理性^[17]。北京跟踪与通信技术研究所的黄晨与王建军等针对 IRAS、2MASS、WISE、AKARI 等 4 个全空域巡天计划对应的红外星表进行筛选,为地基红外光电设备的辐射定标及红外星表的应用提供了理论依据^[18]。

针对空间目标红外辐射特性地基大口径红外光电测量的应用背景,前述方法存在以下问题:(1)受加工工艺限制,黑体直接定标法中的黑体尺寸难以覆盖大口径红外光学系统的入瞳,且随着黑体尺寸增大,其温度均匀性下降明显,影响定标精度;而应用小口径黑体的内定标方法,需要准确估计前端光学系统透过率,定标精度难以保证。(2)黑体间接定标法的实验系统复杂,对光机装调

精度要求高,且机动性差,难以适应外场工作环境;(3)标准红外星定标方法不能测定系统像元级的辐射响应度,难以克服系统的非均匀性影响,导致探测器焦平面利用率低。针对现有方法存在的问题,本文研究了基于标准红外星与小口径黑体的联合辐射定标方法(后文简称:联合辐射定标方法)。该方法以标准红外星为外定标参考源,测定全光路光学系统的辐射响应度;以小口径黑体为内定标参考源,测定半光路光学系统的辐射响应度;然后结合内、外定标结果推算出前端光学系统透过率,进而计算获得全光路系统像元级辐射响应度。

2 原理与数学模型

2.1 系统与方法介绍

红外成像系统作为某 1.2 m 地基大口径光电望远镜的分系统,由前端光电设备和红外成像终端组成。前端光电设备主要由地平式双轴跟踪架、主光学系统、粗跟踪系统、精跟踪系统、伺服控制系统以及操作控制系统组成。红外成像终端由中波红外探测器及成像透镜组组成,搭接在光电望远镜的卡塞格林焦点平台上。主光学系统和红外成像终端构成了全光路光学系统,具体参数见表 1。

表 1 全光路光学系统参数

Tab. 1 Parameters of total optical system

Frame frequency	Integral time	Wave band	Size of pixel
25 Hz	6 ms	3.7~4.8 μm	30 μm
Resolution	Aperture	F#	Focus
320×256	1.2 m	4	Infinity

在主光学系统卡塞格林焦点附近构造一条定标光路,利用可直线移动的平面反射镜实现成像光路和定标光路的切换。定标光路中,利用一组透镜组在定标光路的光轴上构造出主光学系统的

“等效入瞳”,采用小口径面源黑体作为内定标参考源,将黑体辐射面置于定标光路的“等效入瞳”处。光学系统示意图如图 1 所示。

如果忽略光学系统透过率存在的差异,以黑

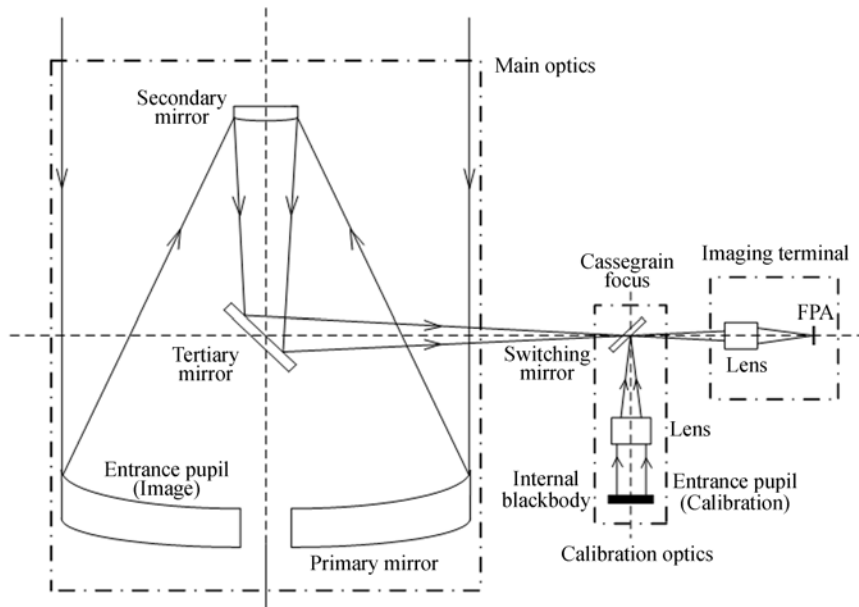


图 1 地基大口径红外光学系统辐射定标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radiometric calibration of ground-based large-aperture infrared optical system

体为定标参考源的内、外定标方法的原理与数学模型是基本一致的;因此,在相同的实验环境下,两种方法获得的辐射响应度应该是一样的。然而在实际情况下,两种方法在光学系统透过率方面存在明显的差异,不可以进行等效近似。以本实验系统为例,成像光路与定标光路在非共光路部分的透过率存在较大差异。定标光路中,用于构造“等效入瞳”的透镜组的透过率较高,可以达到 85% 以上;而主光学系统(由望远镜的主镜、次镜及三镜组成)的透过率较低,在镜体表面清洁的情况下,透过率仅为 50% 左右,特别在镜体表面受污染的情况下,透过率将会更低。由此可见,内定标结果不能直接近似为全光路光学系统的辐射响应度。因此,准确获得非共光路光学系统的透过率是内定标方法的前提。这里以标准红外星为定标参考源,对系统进行外定标,同时,对定标光路中透镜组的透过率进行经验估计。由于透镜组中各透镜的口径较小,镜体表面易于清洁和保养,透过率不会随使用时间发生明显变化,因此,采用出厂时测定的透过率数值作为经验估计值。对前述的测定结果进行处理,从而推算出主光学系统(前端光学系统)的透过率。

2.2 标准红外星定标数学模型

标准红外星定标方法以已知大气层外辐射照度的自然星为定标参考源,基于天文测光原理拟合测量数据,从而获得系统辐射响应度和大气光学厚度。

作为定标参考源,标准红外星的相关参数来自标准红外星库。该星库由 Martin Cohen 博士和 Mike Egan 博士依据地基、空基望远镜的天文测光结果建立,包含 620 颗自然星,光谱曲线覆盖 $1.2 \sim 35 \mu\text{m}$ 。在系统工作波段对自然星的光谱数据进行数值积分,得到自然星在大气层外的辐射照度。

标准红外星作为定标参考源的必要非充分条件为:

- (1) 自然星的光谱流量密度不随时间发生变化,即不能为变星;
- (2) 所选自然星的光谱类型相同;
- (3) 自然星的探测信噪比大于 20。

在本实验系统中,自然星以点源目标形式成像,即成像时星体不能充满红外探测器单个像元的瞬时视场。如果不考虑成像弥散现象,自然星辐射的能量将全部被一个像元接收。成像原理如图 2 所示。

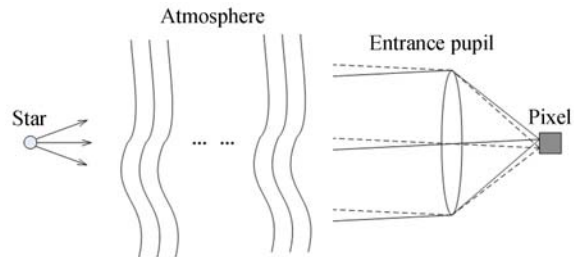


图 2 自然星成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stellar imaging

根据红外辐射响应原理,红外光电系统对标准红外星的成像模型为^[19]:

$$DN = a \tau_{\text{atm}} \cdot \tau_{\text{opt-m}} \cdot \tau_{\text{opt-t}} \cdot A_0 \cdot E_{\text{star}} + DN_0, \quad (1)$$

其中: DN 为标准红外星成像灰度值; DN_0 为红外探测器输出灰度偏置值,包括探测器的固定灰度偏置值、天光背景与光学系统辐射响应灰度值等; a 为辐射响应度; τ_{atm} 为大气透过率; $\tau_{\text{opt-m}}$ 为主光学系统透过率; $\tau_{\text{opt-t}}$ 为红外成像终端透镜组的透过率; A_0 为光学系统的入瞳面积; E_{star} 为标准红外星的大气层外辐射照度。定义:

$$\alpha_s = a \cdot \tau_{\text{opt-m}} \cdot \tau_{\text{opt-t}}, \quad (2)$$

经整理,得:

$$DN = \alpha_s \tau_{\text{atm}} \tau_{\text{opt-m}} \cdot \tau_{\text{opt-t}} \cdot A_0 \cdot E_{\text{star}} + DN_0, \quad (3)$$

式中: α_s 为标准红外星成像灰度值关于光学系统入瞳处入射能量的响应关系,此处定义 α_s 为系统辐射响应度; DN_0 为背景灰度值。

根据 Langley plot 方法可知,在无大气吸收的波段,整层大气透过率随天顶角遵守以下关系:

$$\tau_{\text{atm}} = \exp(-\beta \cdot \sec \theta), \quad (4)$$

其中: β 为大气光学厚度, θ 为天顶角。将式(4)代入式(3),得到:

$$\ln \left(\frac{DN - DN_0}{A_0 \cdot E_{\text{star}}} \right) = \ln \left(\frac{\Delta DN}{A_0 \cdot E_{\text{star}}} \right) = -\beta \cdot \sec \theta + \ln \alpha_s, \quad (5)$$

式中 α_s 和 β 为待定标的未知参数。在有大气吸

收的波段下,整层大气透过率表示为:

$$\tau_{atm} = \exp[-\beta \cdot \sec \theta - a(u \cdot \sec \theta)^b], \quad (6)$$

其中参数 β, a, b, u 与实时大气情况直接相关。将式(6)带入式(3)中,得到:

$$\ln \left(\frac{\Delta DN}{A_o \cdot E_{star}} \right) = -\beta \cdot \sec \theta - a(u \cdot \sec \theta)^b + \ln \alpha_s, \quad (7)$$

式中 α_s, β, a, b, u 为待定标的未知参数。由于等式中有 5 个未知参数,且式(7)为非线性方程,因此难以获得前述参数的最优解。

本文中红外成像系统的波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,包含了有、无大气吸收的波段,理论上需要分波段按照式(5)与式(7)所示数学模型进行计算。鉴于式(7)计算复杂,难以完全按照理论模型完成计算。为此,对计算过程进行简化,采用式(5)所示的无吸收波段的数学模型。虽然理论上做了简化,但通过后续实验发现,该方法的定标精度相对较高,能够满足实际工程需要。

从式(5)所示的数学模型不难发现,定标参数 α_s 是恒星成像所在像元的辐射响应度。换言之,对应红外焦平面所有像元,仅存在一个辐射响应度 α_s ,则该 α_s 无法表征像元间的响应度差异,亦即该定标过程不是像元级的辐射定标。

2.3 联合辐射定标数学模型

应用黑体作为定标参考源的直接定标法,需要将黑体辐射面置于待定标光学系统的入瞳处。另外,黑体辐射面的口径必须不小于光学系统的入瞳口径。地基大口径红外光电系统调焦为无穷远,因此相同入射角度的平行光在像面位置汇聚为一点。对于某个特定的瞬时视场,发散角在瞬时视场范围内的平行光会被对应像元接收。直接定标法的原理示意图如图 3 所示。

忽略黑体辐射面与红外探测器之间的大气影响,探测器辐射响应关系为^[20]:

$$DN = a \cdot \tau_{opt-c} \cdot \tau_{opt-t} \cdot \Omega_s \cdot A_o \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda + b, \quad (8)$$

其中: DN 为红外探测器单个像元的输出灰度值; a 为辐射响应度; b 为输出灰度固定偏置值; τ_{opt-c} 为定标光路中非共光路透镜组的透过率; τ_{opt-t} 为红外成像终端透镜组的透过率; Ω_s 为光学系统像

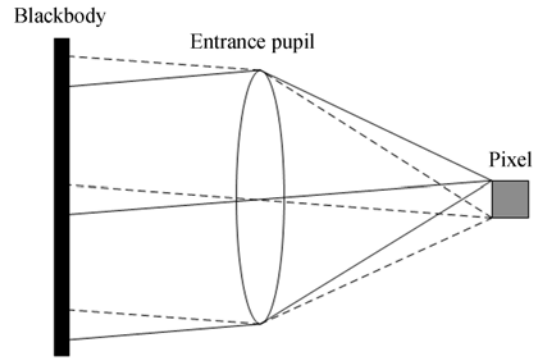


图 3 直接定标法原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of direct calibration

方立体角; A_o 为光学系统的入瞳面积; λ_1, λ_2 分别为探测波段的下限和上限; $L(\lambda)$ 为黑体光谱辐射亮度。若定义:

$$\alpha_b = a \cdot \tau_{opt-c} \cdot \tau_{opt-t}. \quad (9)$$

则式(8)经整理得到:

$$DN = \alpha_b \cdot \Omega_s \cdot A_o \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda + b, \quad (10)$$

式中: α_b 为探测器单个像元输出灰度值关于对应的瞬时视场内、“等效入瞳”处入射能量的响应关系; α_b 和 b 为待定标的未知参数。由于黑体辐射必然覆盖整个视场,因此红外探测器每个像元都对应一个式(10)类型的等式关系。换言之,以黑体为定标参考源的直接定标法可以获知红外探测器各像元对应的辐射响应度。然而,如 1.1 节所述,成像光路与定标光路在非共光路部分的透过率存在较大差异,因此 α_b 不能等效近似为全光路光学系统的辐射响应度。由图 1 不难发现以下关系:

$$\alpha_{t-t} = \frac{\alpha_b}{\tau_{opt-c}} \cdot \tau_{opt-m} = \alpha'_b \cdot \tau_{opt-m}, \quad (11)$$

式中: α_{t-t} 为全光路光学系统的辐射响应度;采用定标透镜组出厂时测定的透过率数值作为 τ_{opt-c} 的经验估计值; τ_{opt-m} 为主光学系统透过率,精确获得 τ_{opt-m} 是全光路光学系统辐射定标的关键。

应用标准红外星定标方法获得的定标结果 α_s 表征全光路光学系统的辐射响应度。若 N 以颗标准红外星为定标参考源,对 N 组测量值 $(\sec \theta_i, \ln[\Delta DN_i / (A_o \cdot E_{star,i})])$ 进行最小二乘线性拟合,则可以获得定标结果 α_s 与 β 。实际上,可以将 α_s 理解为 N 颗标准红外星成像所在像元辐

射响应度的加权平均值:

$$\alpha_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i \alpha_{b-t,i}, \quad (12)$$

式中 μ_i 是加权平均数的权值。因此,定义:

$$\tau_{opt-m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i \cdot \frac{\alpha_s}{\alpha'_{b,i}} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\alpha}{\alpha'_{b,i}}, \quad (13)$$

式中:将各标准红外星成像所在像元对应的 $\alpha_{b,i}$ 记为 $\alpha'_{b,i}$; γ_i 为加权平均数的权值。由于标准红外星定标方法中,拟合数据的离散分布情况不仅取决于自然星成像所在像元对应的辐射响应度 $\alpha_{b,i}$,还与测量时刻大气瞬时湍流扰动、定标参考源固有误差、天顶角测量误差以及自然星成像光斑灰度提取误差等有关,加权平均数 μ_i 与 γ_i 是难以获得的。为方便计算,假设权值 γ_i 为 1,即采用 $\alpha_s/\alpha'_{b,i}$ 的算术平均值来表征主光学系统透过率 τ_{opt-m} 。

3 辐射特性测量与结果分析

为验证联合辐射定标方法的精度,开展了目标红外辐射特性测量实验,实验时间为 2014 年 3 月某晚的晴朗夜空。基于第 1 节所述的原理与数学模型,分别采用标准红外星定标方法和联合辐射定标方法对地基大口径红外光电设备的辐射响应度进行了定标,并在此基础上,对自然星目标进行了红外辐射特性反演。为了能够获得两种方法的极限精度,实验中的目标星与定标星均成像于高度集中的小区域内,从而保证对应像元的辐射响应度差异尽可能小。

3.1 标准红外星定标

依据第 1.2 节所述的选择条件,确定 6 颗标准红外星为定标参考源,具体参数见表 2。

表 2 标准红外星的相关参数

Tab. 2 Parameters of standard infrared stars

Infrared star	Elevation	Irradiance / (W · m ⁻²)	Estimated SNR	Measured SNR
HD81797	33°14'	1.243e-014	108.43	120.92
HD29139	41°21'	5.714e-014	398.70	411.13
HD98262	46°44'	3.098e-015	22.18	25.33
HD89484	47°31'	7.408e-015	49.67	63.68
HD89758	59°03'	8.722e-015	80.92	96.12
HD44478	65°02'	2.398e-014	201.57	214.20

如式 (7) 所示,对 6 组测量值 ($\sec \theta_i, \ln[\Delta DN_i/(A_0 \cdot E_{star,i})]$) 进行最小二乘线性拟合,获得定标结果 α_s 与 β 。经计算,辐射响应度 $\alpha_s = 9.882 \times 10^{12}$; 大气消光系数 $\beta = 0.4010$, 无量纲。定标曲线的拟合结果如图 4 所示。

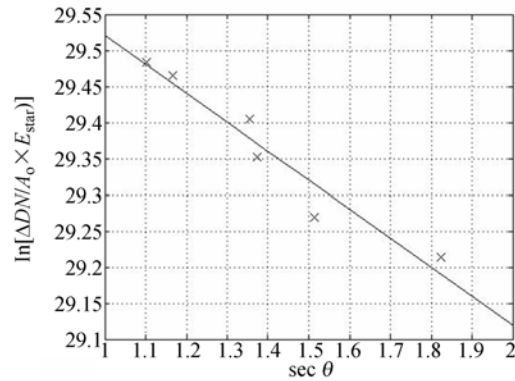


图 4 标准红外星定标曲线拟合结果

Fig. 4 Fitted curve of calibration data based on standard infrared stars

结合已定标的光学系统辐射响应度和整层大气透过率,对自然星目标进行红外辐射特性反演。表 3 中所列出的 5 颗目标星与表 2 中所列出的 6 颗定标星为同一夜晚采集获得,实验数据与结果如表 3 所示。

表 3 标准红外星定标的实验数据与结果

Tab. 3 Calibrated results and data based on standard infrared stars

Infrared star	Elevation	Gray value /DN	Atmospheric transmittance (Calibrated)	Irradiance / (W · m ⁻²) (Theoretical)	Irradiance / (W · m ⁻²) (Measured)	Relative error/%
HD131873	37°34'	873	0.518 2	1.311e-014	1.508e-014	15.05
β Umi	38°21'	705	0.524 2	1.282e-014	1.204e-014	6.11
HD95689	55°22'	454	0.614 3	7.556e-015	6.619e-015	12.40
μ Uma	63°31'	573	0.638 9	8.325e-015	8.022e-015	3.64
β Gem	74°06'	700	0.659 0	1.130e-014	9.504e-015	15.92

3.2 联合辐射定标

以小口径黑体作为内定标参考源,合理设置定标温度,对半光路光学系统进行辐射定标。黑体设定温度及相关参数见表 4。

表 4 黑体设定温度

Tab. 4 Setting of blackbody temperature

Temperature/°C	Radiation/W	Gray value/DN
-5.5	1.343e-011	2171
-4	1.437e-011	2224
-2	1.572e-011	2295
0	1.718e-011	2375
2	1.875e-011	2469
5	2.132e-011	2607
8	2.418e-011	2773
11	2.736e-011	2935
14	3.087e-011	3133
17	3.476e-011	3350
20	3.903e-011	3574
24	4.541e-011	3894
28	5.261e-011	4315
32	6.704e-011	4730
36	6.986e-011	5230
40	8.007e-011	5710

红外探测器的像元对应(160,128)的辐射定标曲线如图 5 所示,红外探测器各像元对应的辐射响应度如图 6 所示。

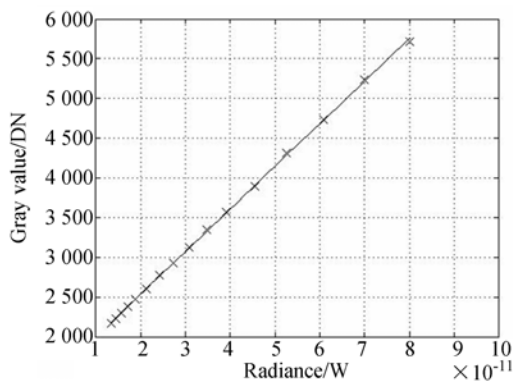


图 5 联合辐射定标曲线拟合结果

Fig. 5 Fitted curve of combined calibration data

由图 6 发现,红外探测器各像元对应的辐射响应度存在明显的非均匀性分布现象。造成该现象的原因有很多,如光学系统渐晕、光学系统设计缺陷造成的遮挡、以及焦平面像元间固有的辐射响应度差异等。经计算,辐射响应度的归一化 PV 值(最大值、最小值差异)为 0.128 2。考虑非

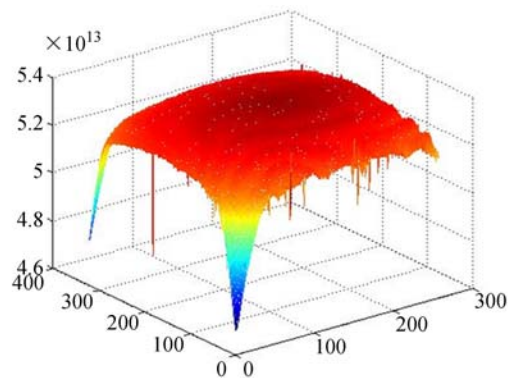


图 6 各像元对应的辐射响应度

Fig. 6 Radiance responsivity of each pixel

均匀性现象的影响,标准红外星定标方法的使用前提如下:

(1) 作为定标参考源的红外星必须成像于像元辐射响应度差异极小的焦平面范围内,否则会引入由像元间的辐射响应度差异导致的系统误差;

(2) 对目标进行红外辐射特性测量时,必须将目标成像于定标红外星成像的焦平面范围内,否则会引入由像元的辐射响应度差异导致的系统误差。

由此不难发现,标准红外星定标法严重限制了红外焦平面的使用范围,这对系统应用造成了极大的不便。例如,当系统对多目标进行红外跟踪与测量时,要保证多个目标同时成像于极小的焦平面范围内是不符合实际情况的,此时利用标准红外星定标结果进行反演测量的误差必然很大,此时联合辐射定标方法的优势就凸显出来。

依据式(13)计算主光学系统透过率为:

$$\tau_{opt-m} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_s}{\alpha_{b,i}} = 18.4\% \quad (14)$$

依据式(11)计算红外探测器各像元对应的全光路辐射响应度,计算结果如图 7 所示。

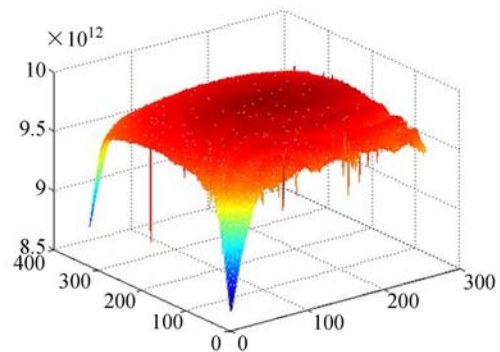


图 7 各像元对应的辐射响应度

Fig. 7 Radiance responsivity of each pixel

基于测定的全光路辐射响应度结果对空间目标(自然星)进行红外辐射特性反演。针对整层大气透过率,应用 2.1 节中标准红外星定标方法的

测量结果得到的实验数据如表 5 所示,应用 MODTRAN 软件的计算结果得到的实验数据如表 6 所示。

表 5 基于标准红外星定标的实验数据

Tab. 5 Experimental data of calibration based on standard infrared stars

Infrared star	Elevation	Gray value /DN	Atmospheric Transmittance (Calibrated)	Irradiance /($W \cdot m^{-2}$) (Theoretical)	Irradiance /($W \cdot m^{-2}$) (Measured)	Relative Error/%
HD131873	37°34'	873	0.518 2	1.311e-014	1.506e-014	14.88
β Umi	38°21'	705	0.524 2	1.282e-014	1.202e-014	6.24
HD95689	55°22'	454	0.614 3	7.556e-015	6.617e-015	12.43
μ Uma	63°31'	573	0.638 9	8.325e-015	8.010e-015	3.79
β Gem	74°06'	700	0.659 0	1.130e-014	9.508e-015	15.89

表 6 基于 MODTRAN 软件的实验数据

Tab. 6 Experimental data of calibration based on MODTRAN software

Infrared star	Elevation	Gray value /DN	Atmospheric transmittance (Calculated)	Irradiance /($W \cdot m^{-2}$) (Theoretical)	Irradiance /($W \cdot m^{-2}$) (Measured)	Relative error/%
HD131873	37°34'	873	0.577 3	1.311e-014	1.351e-014	3.09
β Umi	38°21'	705	0.582 8	1.282e-014	1.081e-014	15.70
HD95689	55°22'	454	0.665 5	7.556e-015	6.107e-015	19.18
μ Uma	63°31'	573	0.687 8	8.325e-015	7.440e-015	10.63
β Gem	74°06'	700	0.705 9	1.130e-014	8.877e-015	21.47

4 误差分析

依据误差分析原理,标准红外星定标方法中的辐射响应度 α 的不确定度为:

$$u(\alpha)^2 = \sum_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta DN_i} \right)^2 u(DN)^2 \right] + \sum_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial E_{star_i}} \right)^2 u(E_{star})^2 \right] + \sum_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \right)^2 u(\theta)^2 \right], \quad (15)$$

其中: $u(\alpha)$, $u(DN)$, $u(E_{star})$ 和 $u(\theta)$ 分别为辐射响应度 α 、灰度 DN、自然星大气层外理论照度 E_{star} 以及观测天顶角 θ 的不确定度。灰度 DN 的不确定度为:

$$u(DN) = \sqrt{\alpha_{NUC}^2 + \alpha_{TUC}^2} \cdot D\hat{N}, \quad (16)$$

其中: α_{NUC} , α_{TUC} 分别为红外探测器的区域非均匀性和时域不确定度; $D\hat{N}$ 为 DN 的估计值,以测量实验的最大灰度值为 DN 的估计值, $D\hat{N}=2\ 254$ 。

对定标星成像集中区的天光背景图像进行计算,得到红外探测器的区域非均匀性 $\alpha_{NUC}=0.04\%$ 。为获得红外探测器的时域不确定度,进行了 1 min 灰度抽样测量实验。探测器帧频为 25 Hz,样本容量(帧频 \times 测试时间)为 1 500 帧。由于样本容量较大,判定 $X \sim N(\mu, \sigma)$ 。经计算, $\mu=3114$, $\sigma=1.416$; 则时域不确定度 $\alpha_{TUC} = u_X \sqrt{X}$, $3\sigma/\mu=0.14\%$, 灰度值 DN 的不确定度为 $u(DN) = \sqrt{\alpha_{NUC}^2 + \alpha_{TUC}^2}$, $D\hat{N}=3.28$ 。

标准红外星库给出了 E_{star} 的典型不确定度 $u(E_{star})=1.927 \times 10^{-18}$ 。望远镜俯仰轴伺服控制系统的“稳态误差”为观测天顶角 θ 的不确定度,则 $u(\theta)=10''=4.846 \times 10^5$ rad。经计算得辐射响应度 α 的不确定度为:

$$u(\alpha) = 6.128 \times 10^{15} \text{ DN}/(W \cdot \text{cm}^{-2}), \quad (17)$$

$$\sigma(\alpha) = u(\alpha)/\alpha = 6.201\%. \quad (18)$$

值得注意的是,在 $\sigma(\alpha)$ 的计算过程中,红外探测器的区域非均匀性 α_{NUC} 是以定标星成像集中

区的天光背景为计算对象的;然而,若成像系统存在较明显的固有非均匀性,则定标星成像集中区计算获得的辐射响应度显然不能代表焦平面各处的辐射响应度。则前述计算获得的 $\sigma(\alpha)$ 仅能代表标准红外星定标方法的理想不确定度,而真实情况下的不确定度为:

$$\sigma(\alpha)' = \sqrt{\sigma_{\text{NUC}}^2 + \sigma(\alpha)^2}. \quad (19)$$

其中 σ_{NUC} 是红外焦平面所有像元的非均匀性。可见,在真实情况下,标准红外星定标方法的不确定度 $\sigma(\alpha)'$ 明显大于 $\sigma(\alpha)$ 。而联合辐射定标方法通过对系统进行像元级的内定标有效消除了非均匀性的影响,能够代表联合辐射定标方法在真实情况下的不确定度,则联合辐射定标方法的不确定度小于标准红外星定标方法的不确定度。

5 结 论

本文提出了一种地基大口径红外光电系统的联合辐射定标方法。该方法以小口径黑体为内定

标参考源,测定半光路光学系统的辐射响应度;以标准红外星为外定标参考源,测定全光路光学系统的辐射响应度;结合内、外定标结果,推算主光学系统(前端光学系统)的透过率,从而获得红外探测器各像元对应的全光路光学系统的辐射响应度。最后,通过实验证明了该方法应用的可行性,实验结果表明:区别于标准红外星定标方法,联合辐射定标方法可以获知全光路系统像元级的辐射响应度,克服了系统响应非均匀性的影响,提高了红外探测器的焦平面利用率;联合辐射定标方法的定标不确定度小于标准红外星定标方法的定标不确定度;基于前端光学系统透过率测定值,短期内仅通过黑体内定标即可计算获得全光路系统像元级的辐射响应度,丰富了系统辐射定标的技术手段;联合辐射定标方法精度高、系统简单,满足实际工程需求。综上所述,联合辐射定标方法可以弥补标准红外星定标方法的应用缺陷,是地基大口径红外光电系统辐射定标的有效技术手段。

参考文献:

- [1] VIGIL M L, WITTE D J, LEVAN P D, *et al.*. Sensor suite for the advanced electro-optical system (AEOS) 3.6-m telescope[J]. *SPIE*, 1996, 2819: 151-169.
- [2] PRITCHETT D G, HENDRICK R W, MOORE D K, *et al.*. AEOS radiometer system: a multichannel imaging radiometer[J]. *SPIE*, 1999, 3701: 206-213.
- [3] SUN Z Y, CHANG S T, ZHU W. Radiometric calibration method for large aperture infrared system with broad dynamic range[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4659-4666.
- [4] 孙志远,常松涛,朱玮,等.应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标[J].*光学精密工程*, 2015, 23(2): 356-362.
SUN ZH Y, CHANG S T, ZHU W, *et al.*. Radiation calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibrations [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 356-362. (in Chinese)
- [5] 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*, 2015, 34(7): 0712006.
SUN Z Y, CHANG S T, ZHU W. Radiation cali-
- bration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 34(7): 0712006. (in Chinese)
- [6] CHANG S T, ZHANG Y Y, SUN Z Y, *et al.*. Method to remove the effect of ambient temperature on radiometric calibration [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): 6274-6279.
- [7] 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(S1): 266-270.
TANG J, GAO X. Calibration method for infrared radiation characteristics measuring system of test range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S1): 266-270. (in Chinese)
- [8] 李宁,张云峰,刘春香,等.1m口径红外测量系统的辐射定标[J].*光学精密工程*, 2014, 22(8): 2054-2060.
LI N, ZHANG Y F, LIU CH X, *et al.*. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2054-2060. (in Chinese)
- [9] 杨词银,曹立华,张建萍.基于大气实时修正的飞机辐射特性测量[J].*光学精密工程*, 2014, 22(7): 1751-1759.
YANG C Y, CAO L H, ZHANG J P. Measurement of infrared radiation for target airplane based

- on real-time atmospheric correction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1751-1759. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] COHEN M, WALKER R G, BARLOW M J, *et al.*. Spectral irradiance calibration in the infrared. I. Ground-based and IRAS broadband calibrations[J]. *The Astronomical Journal*, 1998, 104(4): 1650-1657.
- [12] COHEN M, WALKER R G, CARTER B, *et al.*. Spectral irradiance calibration in the infrared. X. A self-consistent radiometric all-sky network of absolutely calibrated stellar spectra[J]. *The Astronomical Journal*, 1999, 117(4): 1864-1889.
- [13] COHEN M, WHEATON W A, MEGEATH S T. Spectral irradiance calibration in the infrared. XIV. The absolute calibration of 2MASS[J]. *The Astronomical Journal*, 2003, 126(2): 1090-1096.
- [14] 刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 地基大口径红外光电设备快速辐射定标[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0301003.
- LIU J CH, LI H W, WANG J L, *et al.*. Fast radiance calibration for ground-based large-aperture infrared opto-electric equipment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0301003. (in Chinese)
- [15] 殷丽梅, 刘俊池, 王建立, 等. 基于红外标准星的红外辐射标校方法[J]. *光子学报*, 2014, 43(12): 1204004.
- YIN L M, LIU J CH, WANG J L, *et al.*. Infrared radiation calibration based on infrared calibration stars[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(12): 1204004. (in Chinese)
- [16] 刘莹奇, 刘祥意. 空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512003.
- LIU Y Q, LIU X Y. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512003. (in Chinese)
- [17] 朱明, 詹杰. 利用恒星辐射测量整层大气透过的多目标星定标[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(12): 2843-2847.
- ZHU M, ZHAN J. Multi-objective star calibration study of total atmospheric transmittance measurement with stellar irradiance[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 2843-2847. (in Chinese)
- [18] 黄晨, 王建军, 高昕, 等. 红外星表在地基红外辐射测量系统中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 2901-2906.
- HUANG CH, WANG J J, GAO X, *et al.*. Application of infrared star catalog in ground-based infrared radiation measurement system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2901-2906. (in Chinese)
- [19] 常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 基于点扩散函数的小目标辐射测量[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 2879-2887.
- CHANG S T, SUN ZH Y, ZHANG Y Y, *et al.*. Radiation measurement of small targets based on PSF[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2879-2887. (in Chinese)
- [20] 常松涛, 张尧禹, 孙志远, 等. 红外小目标辐射测量方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0504001.
- CHANG S T, ZHANG Y Y, SUN Z Y, *et al.*. Radiation measurement method for infrared small targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0504001. (in Chinese)

作者简介:



刘俊池(1988—),男,吉林省吉林市人,博士,助理研究员,2011年于吉林大学获得学士学位,2016年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事红外辐射特性测量与图像处理等方面的研究。
E-mail: liujunchi703@163.com