

地基大口径红外光电设备快速辐射定标

刘俊池^{1,2} 李洪文¹ 王建立¹ 殷丽梅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 在地基大口径红外光电设备的多目标分时观测中,为了消除环境因素对系统绝对辐射响应度的影响,在观测间歇快速地完成红外光电设备的辐射定标,研究了快速辐射定标方法。建立了定标实验的数学模型,确定了实验流程;以标准红外自然星为辐射定标源对红外光电设备的绝对辐射响应度进行了定标,并测量了大气透射率;对已知辐射照度的自然星进行观测,并通过定标实验得到的参数进行反演计算。数据表明,基于快速辐射定标方法的目标辐射照度反演最大相对误差为18.93%,定标实验占用时间约为4 min。作为对比,基于面源黑体定标光学系统并应用Modtran软件计算大气透射率的传统方法,反演最大相对误差为28.74%,定标实验占用时间约为17 min。结果表明,与传统方法相比,快速辐射定标方法的实验占用时间显著缩短,目标反演误差明显降低;系统不需要匹配面源黑体,大幅降低了成本。

关键词 测量;红外辐射特性;快速辐射定标;标准红外自然星;大气透射率测量

中图分类号 TP751.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0301003

Fast Radiance Calibration for Ground-Based Large-Aperture Infrared Opto-Electric Equipment

Liu Junchi^{1,2} Li Hongwen¹ Wang Jianli¹ Yin Limei¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the multi-target observations using the ground-based large-aperture infrared telescope, in order to eliminate the influence of changing the system radiance responsivity caused by environment, and calibrate the radiance responsivity in short time during two observations, a fast radiance calibration method is discussed. A mathematical model and experimental procedures are set up. The radiance responsivity is calibrated, and the atmospheric transmittance is measured, based on the standard infrared stars. The illuminance of stars is inversed, which is known in advance, using the calibrated data. Data shows that the maximum relative error of inversion is 18.93% and it takes about 4 min to complete the experiment. As a comparison, the maximum relative error is 28.74%, and it takes about 17 min to complete the experiment, using the traditional method, that the radiance responsivity is calibrated based on the black body, and the atmospheric transmittance is calculated by Modtran. Results show that, compared with the traditional method, it takes less time to complete the experiment, and the relative error of illuminance inversion is smaller. The black body is not necessary, and it takes less cost.

Key words measurement; infrared radiation characteristics; fast radiance calibration; standard infrared star; atmospheric transmittance measurement

OCIS codes 010.1320; 010.5630; 040.3060

收稿日期: 2014-11-24; 收到修改稿日期: 2014-12-10

基金项目: 国家863计划(2013AAXX1009)

作者简介: 刘俊池(1988—),男,博士研究生,主要从事空间目标红外辐射特性测量方面的研究。

E-mail: liujunchi703@163.com

导师简介: 王建立(1971—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。E-mail:wangjianli@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

空间目标红外辐射特性测量是空间目标探测领域中的一个分支,而依托地面红外观测设备的地基测量,是测量方式中的重要组成部分。空间目标红外辐射特性包括目标的温度、辐射亮度及辐射强度等信息。在辐射特性测量前,需要对观测设备的绝对辐射响应度进行定标,并获取实时的大气透射率参数。

地面红外观测设备辐射定标的传统方法,分为直接定标法和间接定标法。直接定标法是将面源黑体作为辐射定标源,置于光学系统入瞳处,进而完成辐射定标。杨词银等^[1]开展了基于 800 mm 口径高精度面源黑体的地基大口径红外光电设备辐射定标实验,并分析了实验误差;曹立华等^[2]针对一般线性最小二乘法对局外点敏感的缺点,提出了 Robust 优化算法,优化了定标精度。间接定标法是以腔型黑体或小面源黑体作为辐射定标源,配合平行光管等光学设备,实现辐射定标。唐嘉等^[3]提出了 3 种红外光电系统响应度的定标方法,即直接扩展源法、间接扩展源法和点源法,并比较了 3 种方法的优缺点;李宪圣等^[4]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,实现了全口径辐射定标。然而,前述方法存在以下问题:1)直接定标法,受加工工艺限制,黑体尺寸难以覆盖大口径红外光学系统的入瞳,且随着黑体尺寸的增大,其温度均匀性难以保证;2)间接定标法,实验系统比较复杂,对光机装调精度要求高,且难以降低杂散辐射给定标精度带来的影响;3)受黑体的升降温时间限制,定标流程占用时间较长,而单次开机的多目标分时观测中,需要系统在观测间歇进行快速的辐射定标,以消除环境对系统辐射响应度的影响;4)应用黑体作为辐射定标源的传统方法,无法在单次定标流程中测定大气透射率,而使用 Modtran 软件计算获得的大气透射率与其真实值的偏差较大,影响了空间目标红外辐射特性的测量精度^[5-8]。

鉴于前述问题并结合实际工程需求,研究了快速辐射定标方法。以两颗已知大气层外辐射照度的自然星为辐射定标源,在单次定标实验中,同时完成红外光电设备的辐射定标和大气透射率的测量。快速辐射定标方法的理论基础是天文测光原理。朱明等^[9]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射率,并通过实验验证了该方法对比 Langley-Plot 定标方法的合理性。然而,传统的天文测光方法以测量全天区自然星的星等为目的,为了实现较高的测量精度,实验系统的积分(曝光)时间较长。对于以测量过境的空间目标(人造卫星、空间站等)为实验目的的红外光电设备,为避免观测图像出现模糊、拖尾等情况,实验系统的积分时间普遍较短^[10]。为克服自然星图像曝光不足对定标精度的影响,论述了准实时单点校正、信噪比特性曲线等方法 and 概念,通过合理的数据处理方法,将天文测光方法成功地应用于短积分时间的地基大口径红外光电设备的辐射定标中。

2 原理与数学模型

根据红外辐射响应原理,标准红外自然星的成像灰度表达式为

$$D_N = \alpha \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot E_{\text{star}} + D_{N_0}, \quad (1)$$

式中 α 为系统绝对辐射响应度, D_{N_0} 为背景灰度值, τ_{atm} 为整层大气透射率, E_{star} 为自然星在大气层外的总辐射照度。根据 Beer 定律及 Langley-Plot 定标原理可知,整层大气透射率随观测天顶角遵守以下关系^[11-12]:

$$\tau_{\text{atm}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \exp(-\beta(\lambda) \cdot \sec \theta) d\lambda, \quad (2)$$

式中 λ_1 、 λ_2 为探测波段上、下限, β 为大气消光系数, θ 为天顶角。本实验方法不进行光谱测量,则(2)式简化表示为

$$\tau_{\text{atm}} = \exp(-\beta \cdot \sec \theta). \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式中,得出以下关系:

$$D_N = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot \sec \theta) \cdot E_{\text{star}} + D_{N_0}. \quad (4)$$

对光谱类型相同、且观测仰角跨度大的两颗标准红外自然星进行成像观测,经整理,得到定标实验的基本数学模型:

$$\beta = \ln \left[\frac{E_{\text{star2}} \cdot (D_{N1} - D_{N01})}{E_{\text{star1}} \cdot (D_{N2} - D_{N02})} \right] / (\sec \theta_2 - \sec \theta_1), \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{(D_{N1} - D_{N01})}{E_{\text{star1}}} \cdot \left[\frac{(D_{N1} - D_{N01}) \cdot E_{\text{star2}}}{(D_{N2} - D_{N02}) \cdot E_{\text{star1}}} \right]^{\frac{\sec \theta_1}{\sec \theta_2 - \sec \theta_1}}. \quad (6)$$

3 定标流程

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,光学系统示意图见图 1。

表 1 全光路光学系统参数

Table 1 Parameters of the total optical system

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

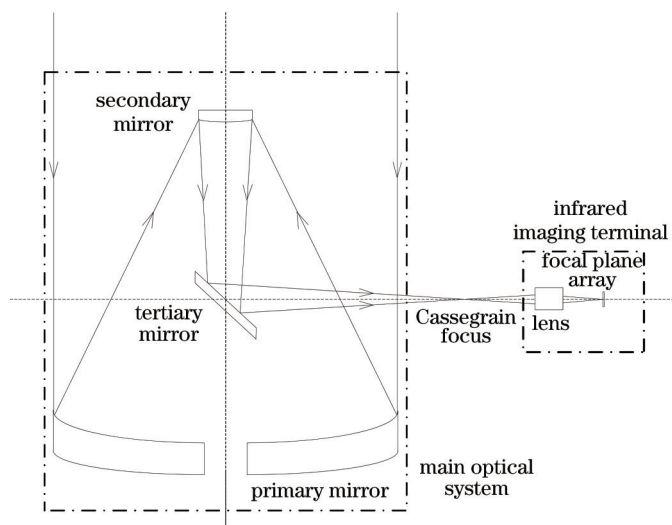


图 1 全光路光学系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the total optical system

3.1 探测器开机上升漂移监视

中波红外探测器存在开机上升漂移现象,直观表现为,在开机后的一段时间内,探测器成像灰度均值随

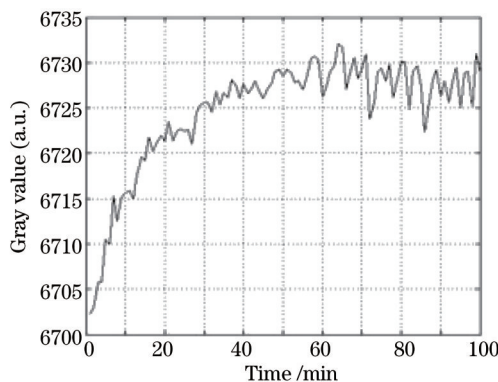


图 2 开机上升漂移现象

Fig.2 Phenomenon of rising-drifting after starting up

时间振荡上升。上升漂移时间受实验环境温度的影响,无法给出可靠的估计值。在此阶段对红外光电系统进行辐射定标,精度必然受到影响^[13-15]。因此,在探测器开机后,使用监测软件实时查看系统对恒温均匀背景(如固定仰角的天光背景)的成像灰度均值;当成像灰度均值振荡稳定后,进入下一个环节。开机上升漂移现象如图2所示。

3.2 采集标准红外自然星图像

标准红外自然星信息由标准红外星库获得,作为辐射定标源,其大气层外辐射照度已知。应用光子数法对测量实验系统的探测能力进行预分析。考虑季节因素,并结合探测信噪比的估算结果,全天区的可视标准红外自然星数量大约在20颗左右。基于多次测量实验得到的经验信息,确定了作为辐射定标源的标准红外自然星的选择条件:

- 1) 两颗星的光谱类型相同;
- 2) 两颗星的仰角跨度大于15°;
- 3) 单颗星的探测信噪比(SNR)大于50。

以上条件是必要非充分条件。选择光谱类型为K型的标准红外自然星“β Umi”和“HD95689”作为辐射定标源,具体参数见表2。

表2 标准红外自然星数据
Table 2 Data of the standard infrared star

Infrared star	Elevation	Illumination $/(W \cdot m^{-2})$	Estimated SNR	Measured SNR
β Umi	38°21'	1.282×10^{-14}	83.10	91.93
HD95689	55°22'	7.556×10^{-15}	50.68	64.70

3.3 采集临近空域天光背景图像

该环节的作用是为标准红外自然星图像的准实时单点校正提供校正模板。基于定标方式的非均匀性校正方法主要有单点校正和两点校正。由非均匀性校正原理可得出以下两点准则:

- 1) 对于单点校正方法,待校正图像与校正模板的灰度差值必须控制在一定范围内;
- 2) 对于两点校正方法,待校正图像的灰度区间必须包含于校正模板的灰度区间。

夜间观测时,天光背景的等效辐射照度和成像灰度均值较小。以3月份某日的夜间天光背景为例,经计算,若使用面源黑体图像作为校正模板,为满足前述两点准则,黑体需降温至-20℃以下。然而,普通面源黑体不具备降温功能,而低温黑体在工作时,需配合高纯度、干燥洁净氮气不断冲刷黑体辐射面,以避免辐射面结霜或结露。显然,使用面源黑体图像作为校正模板的方法,系统成本高,实现难度大。因此,拟采用天光背景图像作为校正模板。又经分析,随观测仰角的增加,天光背景在光学系统入瞳处的等效辐射照度和成像灰度均值单调递减,且灰度变化区间较大,变化趋势如图3所示。

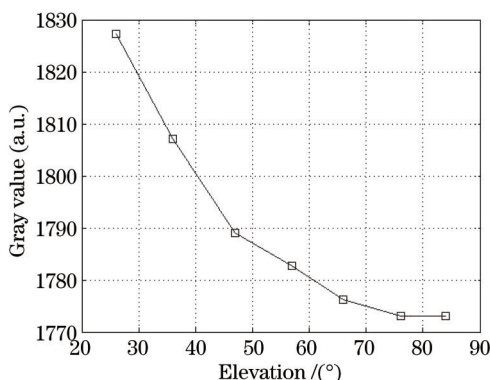


图3 天光背景成像灰度均值随观测仰角分布

Fig.3 Distribution of gray value of background to elevation

以观测仰角为26°的天光背景图像作为校正模板,对各不同仰角的天光背景图像进行单点校正;以观测仰角为26°、84°的天光背景图像作为校正模板,对各不同仰角的天光背景图像进行两点校正,校正残差随观测仰角分布如图4所示。

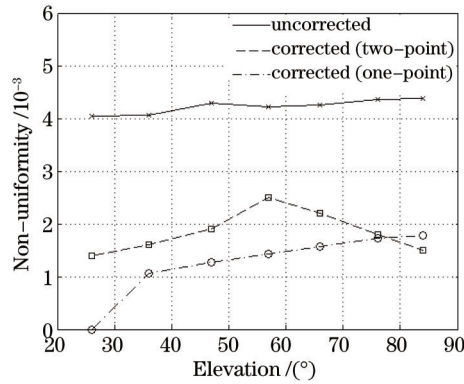


图4 校正残差随观测仰角分布

Fig.4 Distribution of non-uniformity to elevation

由数据结果可知,采用固定校正模板的单点及两点校正,虽然可以实现实时校正功能,但若针对两颗仰角跨度较大的标准红外自然星图像进行校正,效果不佳,无法满足定标实验的精度要求。因此,采用了准实时单点校正方法,即分别采集两颗标准红外自然星临近空域的天光背景图像作为校正模板,对两幅图像分别进行单点校正。对于空间运动目标(如人造卫星、空间站等)的辐射特性测量,在观测结束后,对目标过境天区进行事后回扫,以提取非均匀性校正模板。由于此过程属于离线的事后处理,观测过程中不能实时存储校正图像,因此称其为准实时单点校正。

典型的单点校正数学表达为

$$O_{ij} = D_{Nij} - \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1, j=1}^{M, N} D_{Nij}, \quad (7)$$

$$D_{Nij}^* = D_{Nij}' + O_{ij}, \quad (8)$$

式中 D_{Nij} 为校正模板的各像素灰度值, D_{Nij}' 为待校正图像的各像素灰度值, D_{Nij}^* 为校正后图像的各像素灰度值, O_{ij} 为加性校正参数。由数学模型不难发现,如果选取整帧校正模板对图像进行校正,那么受校正模板

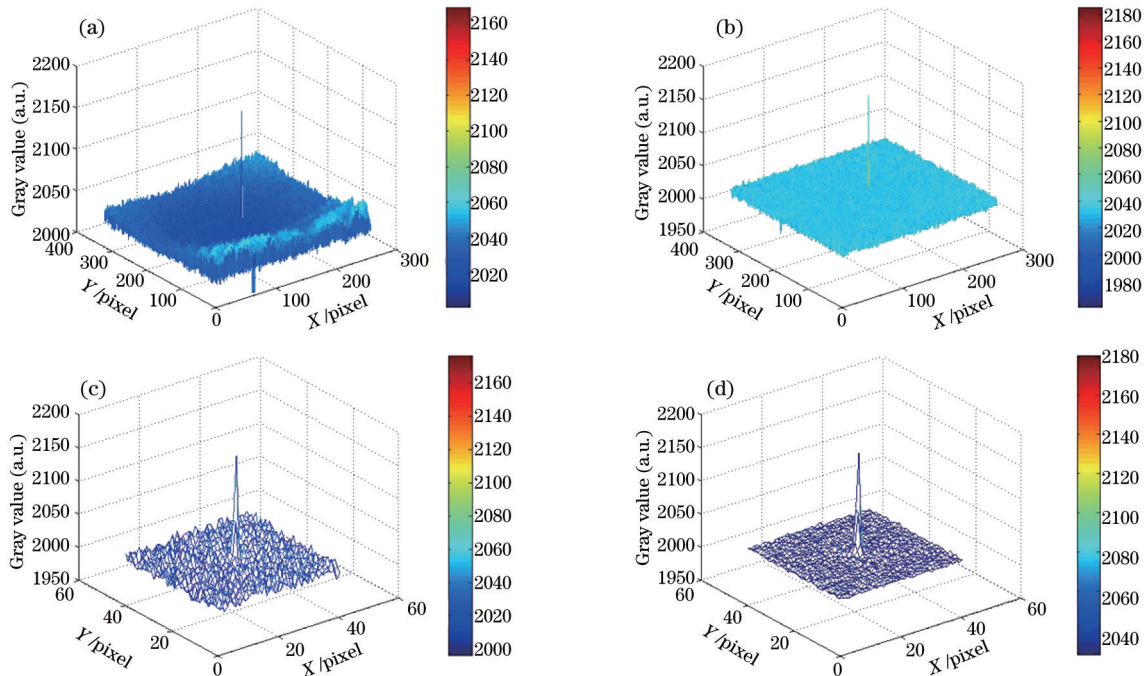


图5 (a)整帧未校正图像;(b)整帧校正图像;(c)局部未校正图像;(d)局部校正图像

Fig.5 (a) Total frame of uncorrected image; (b) total frame of corrected image; (c) part frame of uncorrected image; (d) part frame of corrected image

中灰度对比度较大的固定条纹噪声的影响, $\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1, j=1}^{M, N} D_{Nij}$ 的平滑作用较小, 校正效果直观表现为消除了较明显的固定条纹噪声, 但并没有平滑局部的灰度起伏; 校正残差仍有待减小。然而, 若以自然星弥散光斑的质心为中心, 选择与之对应的校正模板区域作为局部校正模板, 由于局部校正模板中基本不会出现较明显的固定条纹噪声, 因此 $\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1, j=1}^{M, N} DN_{ij}$ 的平滑作用就凸显出来, 校正残差明显降低。基于整帧校正模板和局部校正模板的校正效果对比如图 5 所示。

4 定标数据处理

标准红外自然星成像灰度值的提取直接影响着辐射定标的精度。实验系统的自然星成像区域的理论设计值为一个像元。然而, 受多方面因素影响, 成像存在弥散现象, 弥散光斑大于一个像元的尺寸^[16-21]。因此需要确定弥散光斑的质心和灰度提取范围。

以标准红外自然星成像灰度最大值对应的像素为迭代初始位置, 通过几何质心法进行迭代计算, 当迭代达到收敛条件时, 求解出弥散光斑的质心。上述方法数学表达为

$$C_{x, i+1} = \frac{\sum_{x=C_{x,i}-d}^{C_{x,i}+d} x \cdot D_{Nx,y}}{\sum_{x=C_{x,i}-d}^{C_{x,i}+d} x}, \quad (9)$$

$$C_{y, i+1} = \frac{\sum_{y=C_{y,i}-d}^{C_{y,i}+d} y \cdot D_{Nx,y}}{\sum_{y=C_{y,i}-d}^{C_{y,i}+d} y}. \quad (10)$$

迭代初始条件表达为

$$C_{x,0} = x \Big|_{D_{Nx,y} = D_{N \max}}, \quad (11)$$

$$C_{y,0} = y \Big|_{D_{Nx,y} = D_{N \max}}. \quad (12)$$

当坐标 x 和 y 的迭代残差同时小于 0.5 pixel 时, 迭代收敛, 质心确定。迭代收敛条件表达为

$$\delta_x = |C_{x, i+1} - C_{x, i}| < 0.5, \quad (13)$$

$$\delta_y = |C_{y, i+1} - C_{y, i}| < 0.5. \quad (14)$$

上述表达式中, x 、 y 为对应像素的横、纵坐标, $D_{Nx,y}$ 为对应像素的灰度值; $C_{x,i}$ 、 $C_{y,i}$ 为前次迭代计算得到的质心横、纵坐标, $C_{x, i+1}$ 、 $C_{y, i+1}$ 为本次迭代计算得到的质心横、纵坐标, d 为质心计算区域半幅宽, i 为迭代次数。

确定弥散光斑的质心位置后, 利用信噪比特性曲线确定灰度提取范围, 即提取掩模的大小。提取掩模是以弥散光斑的质心位置为中心的正方形区域。以半幅宽(扣除质心所在像素)为 1 的正方形区域为初始掩模, 逐步扩大掩模的半幅宽, 并计算掩模区域目标的信噪比。以提取掩模的半幅宽大小为横坐标轴、目标信噪比为纵坐标轴绘制信噪比特性曲线。目标的信噪比计算公式表达为

$$R_{SN} = \frac{\sum_{x=c_x-d, y=c_y-d}^{c_x+d, c_y+d} D_{Nx,y} - \overline{D_{Nbg}} \cdot (2d+1)^2}{\sigma_{bg}}, \quad (15)$$

式中 C_x 、 C_y 为弥散光斑质心的横、纵坐标, d 为提取掩模的半幅宽, σ_{bg} 为背景灰度标准差。标准红外自然星“HD95689”和“ β Umi”的信噪比特性曲线如图 6 所示。

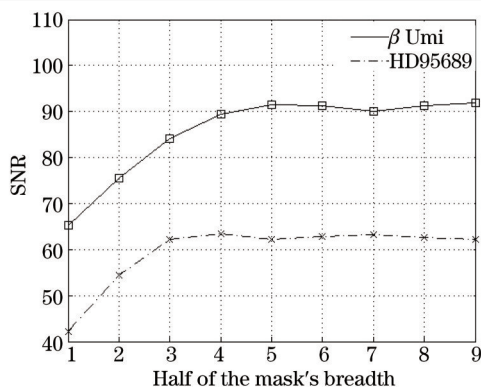


图 6 信噪比特性曲线

Fig.6 SNR characteristic curve

由图可知,标准红外自然星“HD95689”和“ β Umi”的提取掩模半幅宽分别达到 4 和 6 时,信噪比特性曲线开始振荡稳定。则“HD95689”和“ β Umi”的提取掩模分别为以弥散光斑质心为中心、尺寸为 9 pixel \times 9 pixel 和 13 pixel \times 13 pixel 的正方形区域,具体情况见图 7。

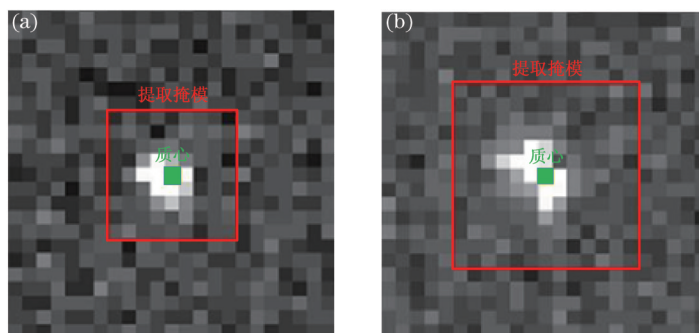


图 7 弥散光斑的质心和提取掩模。(a) HD95689; (b) β Umi

Fig.6 Centroid and mask of the diffraction spot. (a) HD95689; (b) β Umi

5 辐射特性测量与结果分析

为检验快速辐射定标方法的精度,开展了空间目标红外辐射特性测量实验。2014年3月某晚,晴朗夜空下,对 9 颗标准红外自然星进行观测。通过已标定的绝对辐射响应度和大气透射率参数,反演计算了目标的大气层外辐射照度。其中,绝对辐射响应度的定标数值为 $7.906 \times 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$,其他实验数据与结果见表 3。

表 3 实验数据与结果

Table 3 Results and data of the experiment

Infrared star	Elevation	Estimated SNR	Measured SNR	Atmospheric transmittance (calibrated)	Illumination / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) (theoretical)	Illumination / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) (measured)	Relative error /%
HD81797	33°14'	108.43	120.92	0.5800	1.243×10^{-14}	1.304×10^{-14}	4.97
HD131873	37°34'	146.52	155.30	0.6129	1.311×10^{-14}	1.559×10^{-14}	18.93
HD29139	41°21'	398.70	411.13	0.6365	5.714×10^{-14}	5.913×10^{-14}	3.51
HD98262	46°44'	22.18	25.33	0.6637	3.098×10^{-15}	3.377×10^{-15}	8.99
HD89484	47°31'	49.67	63.68	0.6672	7.408×10^{-15}	8.477×10^{-15}	14.43
HD89758	59°03'	80.92	96.12	0.7061	8.722×10^{-15}	1.015×10^{-15}	16.33
μ Uma	63°31'	39.44	42.28	0.7164	8.325×10^{-15}	9.316×10^{-15}	11.91
HD44478	65°02'	201.57	214.20	0.7194	2.398×10^{-14}	2.804×10^{-14}	16.94
β Gem	74°06'	68.39	74.06	0.7332	1.130×10^{-14}	1.074×10^{-14}	5.03

作为对比实验,使用面源黑体对红外光电设备进行辐射定标,并应用 Modtran 软件计算大气透射率。由于光学系统口径为 1.2 m,若采用直接定标法,面源黑体无法覆盖入瞳。因此,在光学系统卡塞格林焦点附近设计了定标光路。定标光路由定标透镜组和一个平面反射镜组成,由此构造了全光路光学系统的等效入瞳。将面源黑体置于等效入瞳处,合理设定温度采集点,对采集数据进行最小二乘线性拟合。红外探测器某像元的定标数据拟合曲线如图 8 所示。

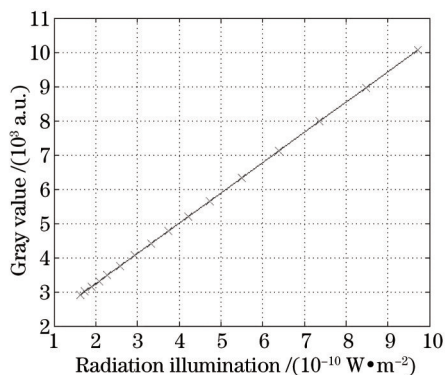


图 8 定标数据拟合曲线

Fig.8 Fitted curve of calibration data

全光路与定标光路光学系统绝对辐射响应度的换算关系如下:

$$\alpha_{opt} = \frac{\alpha_{cal} \cdot \tau_{mir1} \cdot \tau_{mir2} \cdot \tau_{mir3}}{\prod_i \tau_{cal,i}}, \quad (16)$$

式中 α_{opt} 为全光路光学系统绝对辐射响应度, α_{cal} 为定标光路光学系统绝对辐射响应度, τ_{mir1} 、 τ_{mir2} 和 τ_{mir3} 分别为全光路光学系统中主镜、次镜和三镜的反射率, $\tau_{cal,i}$ 为定标光路中透镜组的透射率和反射镜的反射率。经计算,全光路光学系统绝对辐射响应度的定标数值为 $8.823 \times 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$,其他实验数据与结果见表 4。

表 4 对比实验数据与结果

Table 4 Results and data of the contrastive experiment

Infrared star	Elevation	Estimated SNR	Measured SNR	Atmospheric transmittance (calibrated)	Illumination / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) (theoretical)	Illumination / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) (measured)	Relative error /%
HD81797	30°27'	108.43	113.32	0.5164	1.243×10^{-14}	1.407×10^{-14}	13.18
HD131873	35°28'	146.52	148.72	0.5614	1.311×10^{-14}	1.688×10^{-14}	28.74
HD29139	46°58'	398.70	397.28	0.6323	5.714×10^{-14}	6.295×10^{-14}	10.17
HD98262	39°56'	22.18	26.23	0.5934	3.098×10^{-15}	3.877×10^{-15}	25.16
HD89484	40°55'	49.67	59.03	0.5996	7.408×10^{-15}	8.639×10^{-15}	16.61
HD89758	52°22'	80.92	90.82	0.6550	8.722×10^{-15}	1.009×10^{-15}	15.66
μ Uma	59°26'	39.44	40.51	0.6776	8.325×10^{-15}	9.183×10^{-15}	10.31
HD44478	68°09'	201.57	216.80	0.6969	2.398×10^{-15}	2.846×10^{-15}	18.69
β Gem	73°03'	68.39	72.37	0.7044	1.130×10^{-15}	1.027×10^{-15}	9.15

6 误差分析

依据误差分析原理, β 和 α 的不确定度表达为

$$u(\beta)^2 = \sum_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial \beta}{\partial \Delta D_{Ni}} \right)^2 u(D_N)^2 \right] + \sum_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial \beta}{\partial E_{stari}} \right)^2 u(E_{star})^2 \right] + \sum_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \right)^2 u(\theta)^2 \right], \quad (17)$$

$$u(\alpha)^2 = \sum_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta D_{Ni}} \right)^2 u(D_N)^2 \right] + \sum_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial E_{stari}} \right)^2 u(E_{star})^2 \right] + \sum_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \right)^2 u(\theta)^2 \right], \quad (18)$$

式中 $u(\beta)$ 、 $u(\alpha)$ 、 $u(D_N)$ 、 $u(E_{\text{star}})$ 和 $u(\theta)$ 分别为大气消光系数 β 、绝对辐射响应度 α 、灰度 D_N 、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 D_N 的不确定度表达为

$$u(D_N) = \sqrt{\alpha_{\text{NUC}}^2 + \alpha_{\text{TUC}}^2} \cdot \hat{D}_N, \quad (19)$$

式中 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, \hat{D}_N 为 D_N 的估计值, 以测量实验的最大灰度值为 D_N 的估计值, $\hat{D}_N = 2254$ 。对校正后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 $\alpha_{\text{NUC}} = 0.04\%$ 。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 1500 frame。样本的时域分布如图 9 所示, 其中, 横坐标轴为图像的帧序号, 纵坐标轴为灰度值。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

$$\alpha_{\text{TUC}} = \frac{u_x}{\bar{X}} = \frac{3\sigma}{\mu} = \frac{3 \times 1.416}{3114} = 0.14\%, \text{ 灰度值 } D_N \text{ 的不确定度为}$$

$$u(D_N) = \sqrt{\alpha_{\text{NUC}}^2 + \alpha_{\text{TUC}}^2} \cdot \hat{D}_N = \sqrt{(0.04\%)^2 + (0.14\%)^2} \times 2254 = 3.28。$$

标准红外星库给出了 E_{star} 的典型不确定度 $u(E_{\text{star}}) = 1.927 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 。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 $u(\theta) = 10'' = 4.846 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 。经计算得到以下结果: 大气消光系数 β 的不确定度 $u(\beta) = 0.0372$, 绝对辐射响应度 α 的不确定度 $u(\alpha) = 6.1283 \times 10^{15} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm}^2$; 则相对不确定度为

$$\sigma(\beta) = \frac{u(\beta)}{\beta} = 16.50\%, \sigma(\alpha) = \frac{u(\alpha)}{\alpha} = 7.75\%。$$

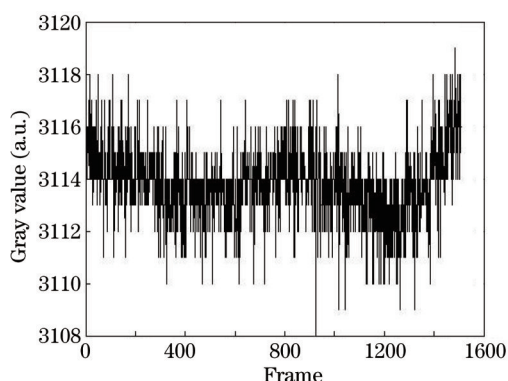


图 9 样本时域分布

Fig.9 Distribution of samples to time

7 结 论

给出了地基大口径红外光电设备的快速辐射定标方法。该方法在单次定标实验中, 同时完成了红外光电设备的辐射定标和大气透射率的测量。针对天光背景图像在传统非均匀性校正下, 校正残差较大的问题, 提出了准实时单点校正方法, 有效降低了校正残差, 提高了定标精度; 采用几何质心法确定了自然星弥散光斑的质心, 应用信噪比特性曲线确定了灰度提取范围。实验结果表明, 快速辐射定标方法对比传统定标方法, 精度明显提高, 实验流程占用时间显著缩短。然而, 快速辐射定标方法, 要求在全天区范围内, 至少有两颗光谱类型相同、且探测信噪比高的标准红外自然星作为辐射定标源。在长波红外波段, 经探测能力分析, 现有设备无法满足该条件。因此, 在今后的研究工作中, 将重点解决长波红外波段辐射定标的技术难题。

参 考 文 献

- 1 Yang Ciyin, Cao Lihua. 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.
- 2 Cao Lihua, Li Ning, Yang Ciyin, et al.. Radiance calibration for 3~5 μm infrared detector [J]. Infrared and Laser engineering, 2012,

- 41(4): 858-864.
曹立华, 李 宁, 杨词银, 等. 3~5 μm 红外探测器的辐射定标[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 858-864.
- 3 Tang Jia, Cao 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.
- 4 Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguu, *et al.*. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared optoelectric system 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.
- 5 Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Ground-based spatial object infrared radiation feature measurement technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 304-310.
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.
- 6 Sun Zhiyuan, Li Qingan, Qiao Yanfeng, *et al.*. Study on raising the precision of infrared temperature measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 67-69.
孙志远, 李清安, 乔彦峰, 等. 提高红外测温系统测温精度的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 67-69.
- 7 Yang Ciyin, Cao Lihua, Zhang Jianping, *et al.*. Measurement of infrared radiation for target airplane based on real-time atmospheric correction [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7): 1751-1759.
杨词银, 曹立华, 张建萍, 等. 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.
- 8 Li Ning, Zhang Yunfeng, Liu Chunxiang, *et al.*. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2054-2060.
李 宁, 张云峰, 刘春香, 等. 1 m 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.
- 9 Zhu Ming, Zhan Jie. 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.
朱 明, 詹 杰. 利用恒星辐射测量整层大气透射率的多目标星定标[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2843-2847.
- 10 Liu Yingqi, Liu Xiangyi. Research on technology ground-based infrared radiation feature measurement for space target [J]. Acta Optica Sincia, 2014, 34(5): 0512003.
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.
- 11 L Linhua. Backward Monte Carlo method based on radiation distribution factor [J]. AIAA J Thermophysics Heat Transfer, 2004, 18(1): 151-153.
- 12 Peixin Hu, Qimin Lu, Rong Shu, *et al.*. An airborne pushbroom hyperspectral imager with wide field of view [J]. Chin Opt Lett, 2005, 3(12): 689-691.
- 13 C Donlon, I S Robinson, M Reynolds, *et al.*. An infrared sea surface temperature autonomous radiometer (ISAR) for deployment aboard volunteer observing ships (VOS) [J]. J Atm & Oceanic Technol, 2008, 25(1): 93-113.
- 14 L M Vigil, J D Witte, D P Le Van, *et al.*. Sensor suite for the advanced electro-optical system (AEOS) 3.6-m telescope [C]. SPIE, 1996, 2819: 151-169.
- 15 D Smith, C Mutlow, J Delderfield, *et al.*. ATSR infrared radiometric calibration and in-orbit performance [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 116(15): 4-16.
- 16 Wang Guoqiang, Wu Yuanhao, Cao Jingtai. Waveband optimization method for enhancing precision of measuring space object's temperature [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 738-742.
王国强, 吴元昊, 曹景太. 提高空间目标温度测量精度的波段优选方法[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 738-742.
- 17 Liu Yingqi. Inversion of space target infrared multi-band temperature distribution [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 556-561.
刘莹奇. 空间目标红外多波段温度分布反演[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 556-561.
- 18 Wang Shitao, Zhang Wei, Wang Qiang. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 484-491.
王世涛, 张 伟, 王 强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(3): 484-491.
- 19 Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range [J]. Acta Optica Sincia, 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.

20 Chang Songtao, Zhang Yaoyu, Sun Zhiyuan, *et al.*. Radiation measurement method for infrared small targets [J]. Acta Optica Sincia, 2014, 34(5): 0504001.

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.

21 Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.*. Influence on afterburning on infrared radiation of solid rocket exhaust plume [J]. Acta Optica Sincia, 2013, 33(6): 0604001.

刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 复燃对固体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0604001.

栏目编辑: 张雁