

空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究

刘莹奇¹ 刘祥意^{1,2}

(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 提出了一种基于望远镜内部定标黑体与大气层外已知光谱特性的红外自然星体作为参照基准的地基大口径望远镜联合定标方法,在此基础上建立了相应的辐射度测量数学模型,实现对空间目标的高精度红外辐射特性测量。内部定标黑体用于得到大口径望远镜后半光路系统对应探测器的各个像元响应度,外部标准红外自然星体用于估算大气层外目标附近大气与望远镜前半光路系统的等效透射率。在地基 1.2 m 口径望远镜上对大量特性已知的红外自然星体辐射强度测量实验表明,当目标附近具有较强能量红外参考星情况下,如红外参考星在 3~5 μm 波段大气层外辐照度高于 $1 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 量级,目标红外辐射强度测量不确定度能够优于 15%。该方法能够克服大气程辐射、消光及高质量大口径辐射定标源对大气层外目标红外辐射强度测量不确定度的影响,适合于地基大口径望远镜红外光电测量系统的辐射定标与大气层外空间目标红外辐射特性高精度测量。

关键词 测量;红外辐射;辐射定标;红外星;大气修正

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0512003

Research on Technology of Ground-Based Infrared Radiation Feature Measurement for Space Target

Liu Yingqi¹ Liu Xiangyi^{1,2}

(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 In order to precisely measure infrared radiation characteristics of space target, a radiometric calibration method is presented based on the internal calibration blackbody and external natural star with known infrared spectral characteristics, and on the basis of the proposed method corresponding radiation measuring mathematical model is established. Internal calibration blackbody is used to measure the responsivity of each detector pixel involving the back half light path of the telescope, and the external natural star is used to estimate equivalent transmittance of the atmosphere near target region with the first half light path of the telescope. A large number of infrared radiation intensity measurement experiment show that the accuracy can be better than 15% within 3~5 microns band on the 1.2-m ground based telescope when the target has strong infrared energy reference star and the exoatmosphere irradiance is higher than $1 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ order of magnitude. The method can overcome the effects of the atmospheric path radiation, extinction and large diameter radiation calibration source on the measurement precision about infrared radiation intensity of exoatmosphere space target, and it is suitable for calibrating of the ground based infrared radiation measurement system with large diameter and measuring of the infrared radiation characteristics of exoatmosphere space target with high precision.

Key words measurement; infrared radiation; radiometric calibration; infrared stars; atmosphere correction

OCIS codes 120.1880; 120.3930; 040.3060

1 引言

空间目标天基红外辐射特性测量系统,可消除

大气对目标辐射测量的影响,然而天基测量系统具有研制成本高、技术难度大、系统规模受限等诸多难

收稿日期: 2013-10-31; 收到修改稿日期: 2013-12-16

基金项目: 国家 863 计划(2012AAXX1009)

作者简介: 刘莹奇(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事空间目标红外探测等方面的研究。

E-mail: a1032510210@126.com

题;空间目标的地基红外辐射特性测量是目前获取空间目标特征、对其编目与识别的重要手段,并可为空间目标识别提供目标辐射亮度、辐射温度及辐射强度等重要特征信息^[1-2]。地基红外光电系统要完成对空间目标的探测与红外辐射特性测量,在研制过程中和外场使用前都必须对其进行精确的红外辐射定标。望远镜红外系统的辐射定标通常需要满足全口径全视场的定标要求,即红外辐射定标源需充满被定标系统的口径与视场^[3-4]。地基望远镜口径越大,红外系统作用距离越远,探测灵敏度越高。然而口径1 m以上的大型地基光电探测望远镜系统,与之相对应的高质量大口径黑体辐射定标源难以建立。大口径面源黑体辐射不确定度对辐射定标不确定度的贡献最大^[5],并且大气透射率估算成为限制地基空间目标辐射特性测量不确定度的最重要因素^[6]。

国内,杨词银等^[7]近些年开展了空间目标红外辐射测量的地面试验研究,据相关文章介绍红外辐射特性测量不确定度超过20%。国外,在空间目标红外辐射特性测量研究上已经有几十年的历史,如美国毛依岛地基先进光学观测站,拥有世界上最高精度的空间目标红外辐射特性测量技术手段与能力。该站的3.67 m望远镜长波红外成像与辐射计系统,设置有与低温光学系统集成的高性能内定标黑体^[8-10],系统定标还借助美国人Cohen等^[11-12]建立的由619颗红外星组成的全天区定标星网络。此外,国际红外天文网站已公布了几个权威红外星数据库,如IRASD-LRS、WISE等^[13-15],这些星库中红外星体的特性是应用不受大气消光影响的天基红外载荷常年测量与反复修正得到的。目前,国外在空间目标红外辐射特性测量及定标手段

是多样的^[16-17],但尚没有具体介绍相关的测量方法和与之相对应的辐射度测量数学模型。本文从空间目标的地基红外辐射特性基本原理出发,分析制约空间目标红外辐射辐射特性测量不确定度的主要因素,主要介绍了基于内部定标黑体与大气层外目标附近红外自然星作为参照基准的地基大口径望远镜联合定标方法、相应的测量过程及辐射度测量数学模型,并对系统的测量误差进行了预测分析,最后在地基1.2 m口径望远镜上证明了该方法具有提高大气透射率估算精度与目标红外辐射特性测量不确定度的能力。

2 空间目标的地基红外特性测量基本原理

如图1所示,在大气环境下,红外成像测量系统对目标进行辐射测量时,目标辐射在到达红外测量系统探测器的传输过程中受到大气的衰减,同时大气辐射也叠加到目标辐射上一同到达探测器。因而,大气环境下的目标辐射测量数学模型为

$$D_{N_t} = \alpha \cdot (\tau_a L_t + L_a) + D_{N_0}, \quad (1)$$

式中 D_{N_t} 为红外成像测量系统的输出值(无量纲,一般以灰度级表示), α 为红外成像测量系统的辐亮度响应度[量纲为 $1/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$], L_t 为目标辐亮度(量纲为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$), τ_a 、 L_a 分别为目标与红外测量系统之间的大气透射率和程辐射。 D_{N_0} 是由散射的环境背景辐射、红外成像测量系统自身热辐射以及红外探测器暗电流等引起的偏置(无量纲,以灰度级表示)。

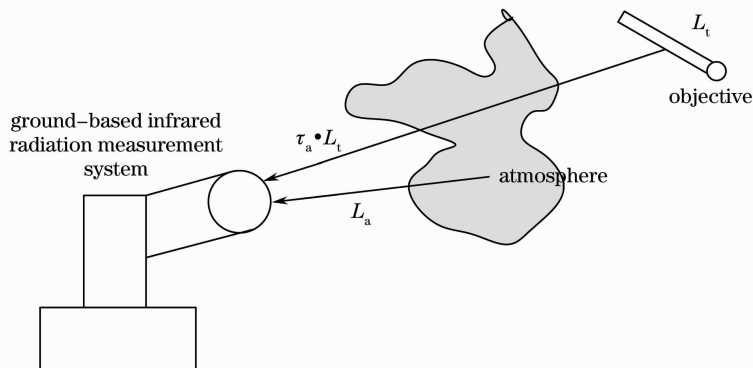


图1 地基红外辐射测量系统对大气层外目标测量原理

Fig. 1 Principle diagram of external-atmosphere target measurement for ground based infrared radiation measurement system

由(1)式可反演得到目标辐亮度

$$L_t = \left(\frac{D_{Nt} - D_{N0}}{\alpha} - L_a \right) / \tau_a. \quad (2)$$

由(2)式可知,要获得目标辐射特性,首先需要对红外测量系统进行辐射定标,确定测量系统的辐射响应度和偏置。另外,在目标测量期间还需要获得目标和测量系统之间的大气透射率和程辐射数据,以便对目标辐射进行大气修正。最后,根据红外测量系统辐射响应度和大气透射率等参数,从目标测量数据反演得到目标辐亮度、辐射强度等特性。

3 空间目标的地基红外辐射测量过程

地基大口径望远镜红外测量系统的现场标校采用外部标准红外自然星体与内部定标黑体联合定标的方法。将望远镜光学系统划分为两部分,分别是大口徑前光路系统与后光路系统,内部黑体标定源位于后光路系统之前,定标系统组成原理示意图及光路布局,如图2所示。

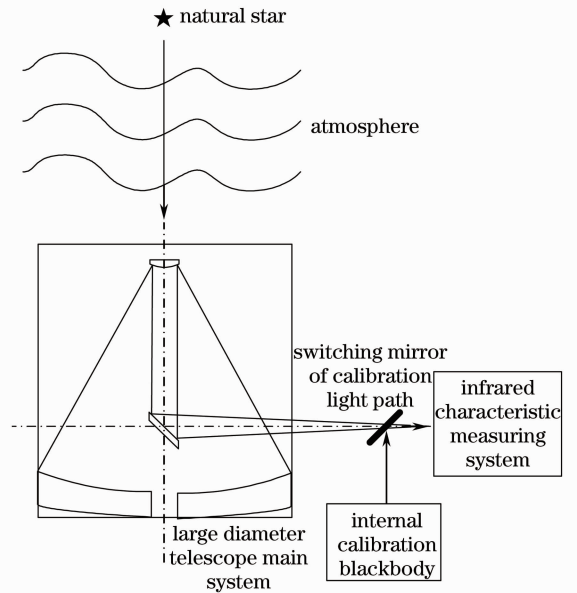


图2 地基大口径望远镜定标系统组成简图
Fig. 2 Structure diagram of calibration system for ground based and large diameter telescope

该方法的测量流程如图3所示,下面分别予以介绍。

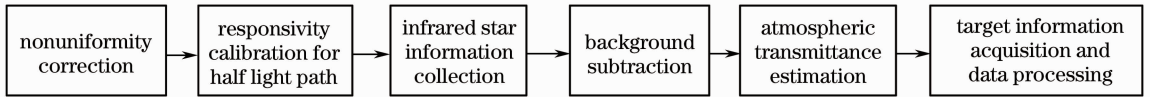


图3 红外辐射特性测量流程

Fig. 3 Process of infrared radiation characteristics measurement

3.1 非均匀性校正

望远镜后光路红外测量系统采集内部定标黑体高低温辐射数据进行两点非均匀性校正。

3.2 半光路响应度定标

内定标时,不包括主次镜等在内的后光路系统辐射响应输出模型为

$$D_{Nt,n} = \alpha_n \cdot L_{bb} + D_{N0,n}, \quad (3)$$

式中 $D_{Nt,n}$ 为红外成像测量系统在第 n 个像元的输出值(无量纲,一般以灰度级表示), α_n 为红外成像测量系统在第 n 个像元的辐亮度响应度[量纲为 $1/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$], L_{bb} 为内定标黑体的辐射亮度(量纲为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$), $D_{N0,n}$ 是由散射的环境背景辐射、红外成像测量系统自身热辐射以及红外探测器暗电流等在第 n 个像元引起的偏置。

3.3 自然星信息数据采集

具体选取原则为:1)参考自然星位于待测目标附近;2)最低观测仰角大于 15° ;3)红外辐射特性稳定;4)辐射能量满足望远镜红外成像系统信噪比要求;5)自然星光谱数据能够覆盖望远镜红外系统响

应波段。

3.4 背景扣除

在自然星周围应用矩形环对背景进行提取,自然星位于矩形环的中心,背景量值由位于矩形环的像素数码值求平均来得。

3.5 大气透射率估算

红外成像系统对自然星和周围天空背景的辐射测量模型分别为

$$D_{Nstar,n} = \alpha_{star,n} \cdot [\tau_m \cdot (\tau_a \cdot L_{star,n} + L_{sky}) + L_m] + D_{N0,n}, \quad (4)$$

$$D_{Nsky} = \alpha_{star,n} \cdot (\tau_m \cdot L_{sky} + L_m) + D_{N0,n}, \quad (5)$$

式中 $D_{Nstar,n}$ 为系统对自然星在第 n 个像元的测量值, D_{Nsky} 为系统对周围天空背景的测量平均值, $\alpha_{star,n}$ 为自然星所处的第 n 个像元的响应度, τ_m 为前光路的透射率, $L_{star,n}$ 为自然星在第 n 个像元的辐亮度, τ_a 、 L_{sky} 分别为目标和系统之间的大气透射率与程辐射, L_m 为望远镜前半光路的总辐射。

(4)、(5)式相减可得

$$D_{Nstar,n} - D_{Nsky} = \alpha_{star,n} \cdot \tau_m \cdot \tau_a \cdot L_{star}, \quad (6)$$

此时可消去天空背景辐射亮度 L_{sky} , 前光路总辐射 L_m 和偏置 $D_{N0,n}$, 并消除它们带来的反演误差, 进一步得出

$$L_{star,n} = \frac{D_{Nstar,n} - D_{Nsky}}{\alpha_{star,n} \cdot \tau_m \cdot \tau_a} \quad (7)$$

已知自然星体在大气层外的总辐射照度为

$$E_{star} = \sum_n L_{star,n} \times I_{FOV}, \quad (8)$$

式中 $L_{star,n}$ 为自然星体在第 n 个像元的辐亮度, I_{FOV} 为单个像元的立体视场角。由(7)、(8)式可以估算出大气与望远镜前半光路的等效透射率

$$\tau_m \cdot \tau_a = \sum_n \frac{D_{Nstar,n} - D_{Nsky}}{\alpha_{star,n}} \times I_{FOV} / E_{star} \quad (9)$$

3.6 目标信息采集及数据处理

目标信息背景扣除提取与参考星信息提取方法类似, 可直接得出

$$L_{t,n} = \frac{D_{Nt,n} - D_{Nsky}}{\alpha_{t,n} \cdot \tau_m \cdot \tau_a}, \quad (10)$$

式中 $D_{Nt,n}$ 为系统对目标在第 n 个像元的测量值, $L_{t,n}$ 为目标在第 n 个像元的辐亮度, $\alpha_{star,n}$ 为目标所处第 n 个像元的响应度。

已知目标的总辐射照度为

$$E_t = \sum_n L_{t,n} \times I_{FOV}. \quad (11)$$

由(9)~(11)式可得

$$E_t = \sum_n \frac{D_{Nt,n} - D_{Nsky}}{\alpha_{t,n} \sum_n \frac{D_{Nstar,n} - D_{Nsky}}{\alpha_{star,n}}} \times E_{star}. \quad (12)$$

如果假设各个像元的响应度是线性的, 并且彼此间具有较好的一致性, 那么目标的总辐射照度(12)式可以简化为

$$E_t = \frac{\sum_n D_{Nt,n} - D_{Nsky}}{\sum_n D_{Nstar,n} - D_{Nsky}} \times E_{star}. \quad (13)$$

最后还可根据目标类型(面目标、点目标)、目标距离、红外测量系统的瞬时视场, 分析计算目标辐亮度、辐射强度、辐射温度等特性。

4 测量误差分析

由目标的辐照度测量(12)式知, 此式由三个不确定参量组成, 则测量误差可以写为^[18]

$$\left(\frac{\Delta E_t}{E_t}\right)^2 = \left[\frac{\Delta \sum_n \frac{D_{Nt,n} - D_{Nsky}}{\alpha_{t,n}}}{\sum_n \frac{D_{Nt,n} - D_{Nsky}}{\alpha_{t,n}}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta \sum_n \frac{D_{Nstar,n} - D_{Nsky}}{\alpha_{star,n}}}{\sum_n \frac{D_{Nstar,n} - D_{Nsky}}{\alpha_{star,n}}}\right]^2 + \left(\frac{\Delta E_{star}}{E_{star}}\right)^2. \quad (14)$$

(14)式前两项可以归类为目标与自然星提取过程中的背景扣除误差。目标提取通常是在目标周围应用矩形环对背景进行提取, 目标位于矩形环的中心, 背景量值由位于矩形环的像素数码值求平均求得。目标与矩形环的远近、矩形环面积的大小都影响着目标信息提取的真实度。此外, 目标信息的有效提取受辐射定标源精度所影响, 如黑体的表面发射率、表面温度控制精度和表面温度不均匀性所决定。这一部分总的测量误差通过实验分析得出在 10% 左右。

(14)式最后一项为自然星体光谱辐照度误差。自然星体表面也存在大气层, 并且具有若干分子与离子吸收峰, 温度越低自然星分子吸收峰越强, 需要对自然星数据库的光谱数据进行修正。这一部分误差根据国外相关文献的介绍自然星体光谱辐照度误差在 5% 左右^[19-20]。

综上所述, 由(14)式可得望远镜红外系统辐射测量误差约为

$$\sqrt{0.1^2 + 0.1^2 + 0.05^2} \times 100\% = 15\%. \quad (15)$$

5 红外辐射强度测量实验与结果分析

实验在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 1.2 m 口径实验望远镜水平轴位置上开展, 定标光路如图 2 所示, 测量望远镜及其实验系统组成如图 4 所示。内部定标黑体位于望远镜的半光路位置, 即大口徑望远镜主光学系统主焦点附近。内定标时, 定标光路切换反射镜切入光路, 将内部定标黑体引入定标光路。外定标时, 定标光路切换反射镜切出定标光路。

应用上述实验系统对大量大气层外红外星进行了实验, 图 5 所示为 2013 年 6 月某晚在望远镜观测天区内的星座分布。从 Martin Cohn 的红外标准星数据库, 选取牧夫座、天鹅座、小熊座和天龙座内的几颗较强能量红外星作为实验星。每个星座选取的几颗红外星尽可能靠近, 以近似认为每个星座的红外星大气消光系数一致。

1) 牧夫座实验结果

望远镜外部标准参考自然星选取编号为 HD: 124897(赤经: 14 h 15 m 40.35 s, 赤纬: 19°11'14.

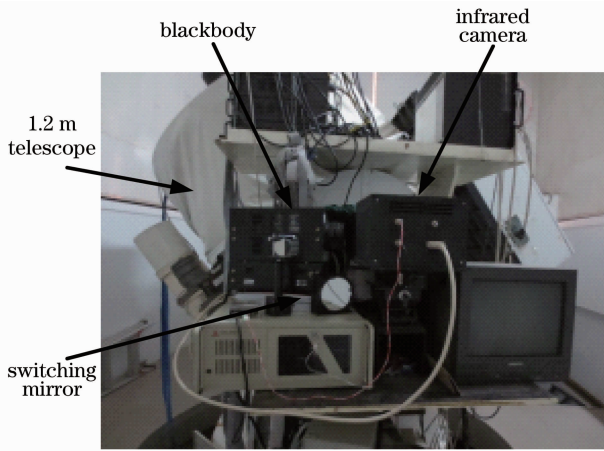


图 4 红外辐射强度测量实验系统

Fig. 4 Experimental system of infrared radiation intensity measurement

2", 星等: -0.05) 的红外星, 如图 6 所示, 其实测去背景后数码值和为 6251。图 7 为该星在 3.7 ~ 4.8 μm 波段范围内的红外光谱分布。

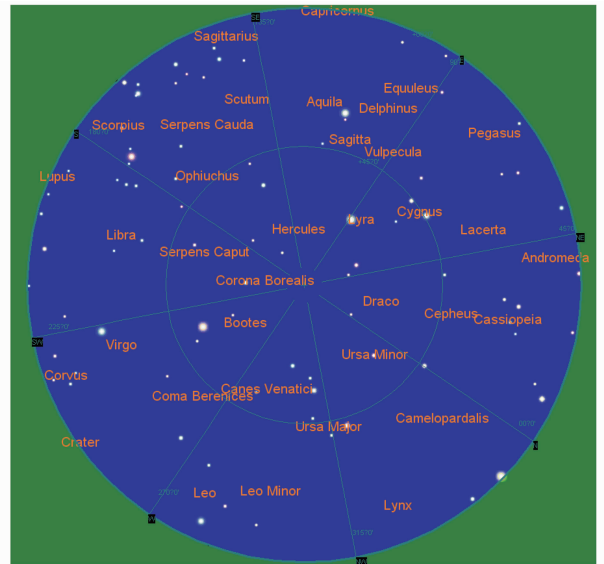


图 5 观测实验天区星座分布

Fig. 5 Distribution of constellation at observation experimental region

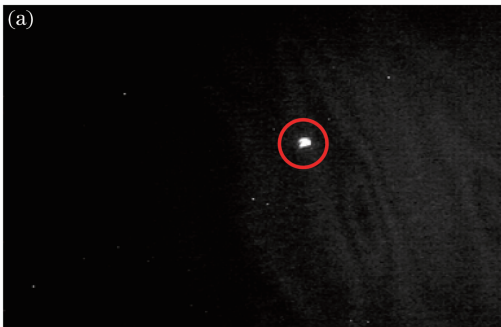
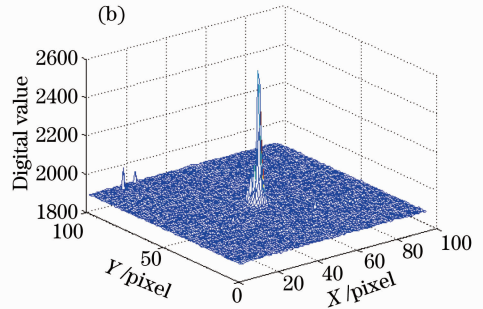


图 6 牧夫座参考星 HD:124897

Fig. 6 Bootes reference star HD: 124897



值为 212。图 9 为该星在 3.7 ~ 4.8 μm 波段范围内的红外光谱分布, 成像波段内理论辐射照度: $2.2842 \times 10^{-15} \text{ W/cm}^2$ 。

由第 3 节介绍的测量方法可以得到编号 HD: 127665 的自然星(图 34、35)在大气层外的辐射照度为: $2.2080 \times 10^{-15} \text{ W/cm}^2$; 则相对误差为 $(2.2842 - 2.2080) \% / 2.2842 = 3.3\%$ 。

2) 天鹅座实验结果

望远镜外部标准参考自然星选取编号为 HD: 197989 的红外星, 实测星 HD: 197912 成像波段内理论辐射照度: $7.9075 \times 10^{-16} \text{ W/cm}^2$, 由第 3 节介绍的测量方法可以得到编号 HD: 197912 的自然星在大气层外的辐射照度为 $8.4020 \times 10^{-16} \text{ W/cm}^2$; 则相对误差为 $(8.4020 - 7.9075) \times 100 \% / 7.9075 = 6.2\%$ 。

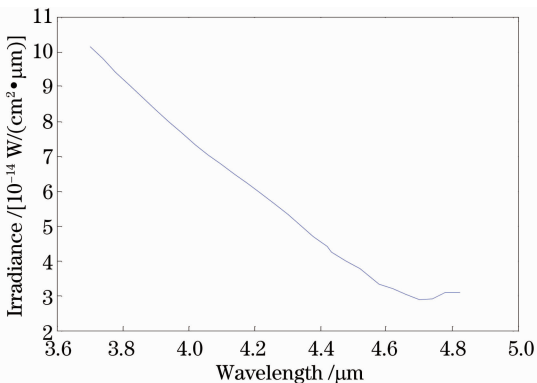


图 7 牧夫座参考星 HD:124897 的红外光谱分布

Fig. 7 Infrared spectral distribution of Bootes reference star HD:124897

望远镜外部实测星选取编号为 HD: 127665 (赤经: 14 h 31 m 49.86 s, 赤纬: $30^\circ 22' 16.1''$, 星等: 3.57) 的红外星, 如图 8 所示, 其实测去背景后数码

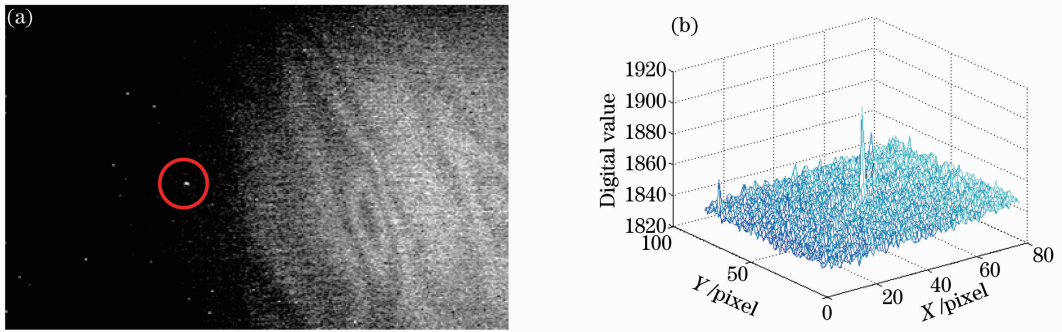


图 8 牧夫座实测星 HD:127665

Fig. 8 Bootes measured star HD:127665

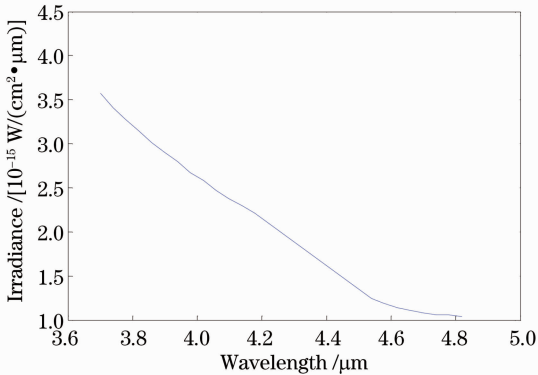


图 9 牧夫座实测星 HD:127665 的红外光谱分布

Fig. 9 Infrared spectral distribution of Bootes measured star HD:127665

3) 小熊座实验结果

望远镜外部标准参考自然星选取编号为 HD:131873 的红外星, 实测星 HD:124547 成像波段内理论辐射照度: $1.0189 \times 10^{-15} \text{ W/cm}^2$, 由第 3 节介绍的测量方法可以得到编号 HD:124547 的自然星在大气层外的辐射照度为 $1.1516 \times 10^{-15} \text{ W/cm}^2$; 则相对误差: $(1.1516 - 1.0189)100\% / 1.0189 = 13.0\%$ 。

4) 天龙座实验结果

望远镜外部标准参考自然星选取编号为 HD:137759 的红外星, 实测星 HD:121130 成像波段内理论辐射照度: $4.8427 \times 10^{-15} \text{ W/cm}^2$, 由第 3 节介绍的测量方法可以得到编号 HD:121130 的自然星在大气层外的辐射照度为: $4.3015 \times 10^{-15} \text{ W/cm}^2$; 则相对误差: $(4.8427 - 4.3015) \times 100\% / 4.8427 = 11.2\%$ 。

6 结 论

本文采用内部定标与外部自然星体的联合定标与测量方法, 显著地提高了望远镜大气层外目标的红外辐射特性测量不确定度, 定标周期短、实时性强。能够克服高质量大口径红外辐射定标源对大口径红外特性测量系统辐射定标的制约, 克服大气程

辐射及消光对大气层外目标红外辐射强度测量不确定度的影响。多次在外场大口径望远镜实验上验证了该方法具有小于 15% 的测量不确定度, 证明该方法适合于地基大口径望远镜红外光电测量系统的辐射定标及大气层外目标红外辐射强度测量, 并且具有广泛的实际应用价值。该方法同样适用于天基与空基红外光学载荷的定标, 对今后开展红外辐射定标研究具有重要的意义。

从测量误差分析与实验中发现, 测量不确定度受目标提取过程中的背景扣除误差影响比较大。为提高空间目标红外辐射测量不确定度, 以后可以在以下方面开展相关研究工作:

1) 目标与背景区域的自动图像判读, 或者在地基红外辐射特性测量望远镜在设计上具有快速斩波功能, 具体如次镜的“CHOPPING”与三镜的“NODDING”功能, 能够准实时地扣除背景;

2) 地基红外辐射特性测量望远镜在设计上采用冷光学, 提高系统测量的灵敏度, 针对低温空间目标, 采用低温内定标黑体, 提高红外探测器对低温点响应度的定标精度;

3) 当目标附近不具有较强能量参考星情况, 通过对其周围天区所具有的几颗较强能量参考星插值拟合得到目标附近的假设参考星大气层外流量。

参 考 文 献

- 1 Michael Griggs, William A Myers, H Vernon Baker. Multispectral sensing of natural resources with the MSTI-3 satellite [C]. SPIE, 1995, 2314: 192-199.
- 2 Zhang Yuyan, Wang Wei, Wang Zhenchun, *et al.*. Temperature measurement on high speed sliding electrical contact based on principle of infrared radiation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1112004.
张玉燕, 王 微, 王振春, 等. 基于红外辐射原理的高速滑动电接触温度测量[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1112004.
- 3 Yang Zhenling, Fang Wei, Wang Kai, *et al.*. Field of view measurement and correction term calculation for small-field radiometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4):

- 870—875.
- 杨振岭, 方伟, 王凯, 等. 小视场绝对辐射计视场测量及修正项计算[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 870—875.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 Wei Heli, Chen Xiuhong, Zhan Jie, *et al.*. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance [J]. J Atmosphere and Environmental Optics, 2007, 2(6): 472—478.
- 魏合理, 陈秀红, 詹杰, 等. 红外辐射测量的大气修正[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 472—478.
- 7 Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Ground-based spatial object infrared radiation feature measurement technique [J]. Chinese J 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.
- 8 Li Hongguang, Yang Hongru, Xue Zhanli, *et al.*. Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrowband spectral filter method [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1410—1416.
- 李宏光, 杨鸿儒, 薛战理, 等. 窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1410—1416.
- 9 L M Vigil, J D Witte, D P LeVan, *et al.*. Sensor suite for the advanced electro-optical system (AEOS) 3.6-m telescope [C]. SPIE, 1996, 2819: 151—169.
- 10 G D Pritchett, W R Hendrick, K D Moore. AEOS radiometer system: a multi-channel imaging radiometer [C]. SPIE, 1999, 3701: 206—213.
- 11 M Cohen, R G Walker, M J Barlow, *et al.*. Spectral irradiance calibration in the infrared. I. ground based and IRAS broadband calibration [J]. Astron, 104(4): 1650—1657.
- 12 M Cohen, P L Hammersley, M P Egan. Radiometric validation of the midcourse space experiment's (MSX) point source catalog and the properties of normal stars [J]. Astron, 2000, 120(6): 3362—3370.
- 13 F M Olmon, E Raimond. IRAS catalogs and atlases atlas of low resolution spectra [J]. Astron Astrophys Suppl Ser, 1986, 65(4): 607—1065.
- 14 K E Kraemer, G C Sloan, S D Price, *et al.*. Classification of 2.4—45.2 micron spectra from the infrared space observatory short wavelength spectrometer [J]. Astrophys J Suppl, 2002, 140(2): 389—406.
- 15 B J Smith, S D Price, R I Baker. The COBE-DIRBE point source catalog [J]. Astrophys J Suppl, 2004, 154(2): 673—704.
- 16 E C Kintner, R B Sohn. Emissive reference spheres as absolute calibration sources for an orbiting LWIR sensor [C]. SPIE, 1993, 1938: 153—162.
- 17 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.
- 18 M Y Engel, L S Balfour. Quantative evaluation of errors in remote measurements using of thermal imager [C]. SPIE, 1990, 1442: 298—307.
- 19 M Cohen, F C Witteborn, D F Carbon, *et al.*. Spectral irradiance calibration in the infrared. III. the influence of CO and SiO [J]. Astron, 104(5): 2045—2062.
- 20 D E Blackwell, A E Lynas-Gray, A D Petford. Effect of improved H(—) opacity on the infrared flux method temperature scale and derived angular diameters-use of a self-consistent calibration [J]. Astron Astrophys, 245(2): 567—574.

栏目编辑：何卓铭