

doi: 10.3788/gzxb20144312.1204004

基于红外标准星的红外辐射标校方法

殷丽梅¹, 刘俊池^{1,2}, 王建立¹, 张振铎¹, 李宏壮¹, 杨轻云¹, 周超¹, 王昊京¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 为了提高空间目标的红外辐射测量准确度, 提出了基于精确校准的红外标准星的红外辐射标校方法. 测量不同大气质量处多颗具有较高光谱分辨率的红外标准星, 采用天文孔径测光法对望远镜拍星数据进行处理, 依据大气消光模型进行最小二乘线性拟合, 获得了测量系统的红外辐射响应率和大气消光. 1.2 m 望远镜上中波红外成像终端验证性实验结果表明, 该方法的恒星辐照度反演误差最大为 16.28%. 且该方法无需增加额外设备, 操作简单, 易于实现, 可随时对测量设备进行实时标校. 对地基大口径望远镜的红外辐射测量具有一定的应用价值.

关键词: 实时标校; 红外辐射; 红外标准星; 辐射反演; 大气消光

中图分类号: O432.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1204004-5

Infrared Radiation Calibration Based on Infrared Calibration Stars

YIN Li-mei¹, LIU Jun-chi^{1,2}, WANG Jian-li, ZHANG Zhen-duo¹, LI Hong-zhuang¹,
YANG Qing-yun¹, ZHOU Chao¹, WANG Hao-jing¹

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A method of calibration based on accurate Infrared standard stars was proposed for increasing infrared radiation measurement precision. By measuring a series of Infrared calibration stars at different air masses, the infrared radiation responsivity of measurement system and atmospheric extinction can be obtained simultaneously. The data were reduced with astronomical aperture photometry and least-squares fitting according to more thorough atmospheric extinction models. Validation experiments on the 1.2 m telescope's infrared imaging terminal for the proposed method indicated that the maximum error of stellar irradiance inversion was 16.28%. Without additional calibration device, the proposed calibration method is simple and easy to implement. Real-time calibration of the telescope could be realized at any time. The proposed calibration method has important application value for infrared radiometry of large aperture ground-based telescopes.

Key words: Real-time calibration; Infrared radiation; Infrared calibration stars; Radiation inversion; Atmospheric extinction

OCIS Codes: 260.3060; 150.1488; 010.1285; 290.2200; 350.5610

0 引言

空间目标的红外辐射测量实验中, 利用经过标定的光电系统对目标红外辐射特性进行测量和反演是获取空间目标真实辐射特性的直接手段. 为了得到空间目标的红外辐射, 需要进行红外光电测量系统的绝对

辐射定标、整层大气透过率的测量和目标辐射反演^[1]. 目标辐射的测量准确度在很大程度上取决于辐射定标准确度和大气透过率测量准确度. 随着地基大口径望远镜技术的发展, 当望远镜口径大于 1m 时, 传统的直接扩展源定标法已不再适用^[2-3]. 同时, 受大气透过率测量或计算准确度的限制, 空间目标的红外辐射测量

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2013AAXX1009)资助

第一作者: 殷丽梅(1986-), 女, 研究实习员, 硕士, 主要研究方向为空间目标红外辐射特性测量. Email: yinlimei302@163.com

收稿日期: 2014-04-03; 录用日期: 2014-07-16

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

准确度仅在 10%~30% 左右^[4].

空间目标和红外标准星都位于大气层外,可利用红外标准星标校红外辐射测量系统.如 AMOS 早已利用 Cohen 等建立的高准确度红外标准星目录,采用标准天文测光法评估大气状况^[5].随后这一红外标准星目录及其扩展目录又被用于 2MASS^[6]、MSX^[7]、Spitzer^[8]等地基和空基望远镜的绝对辐射标定.此外,传感器的响应率最终仍需诉诸于绝对校准的标准星流量^[9],这是因为用标准恒星标定空基、地基观测设备,恒星亮度在传感器使用寿命内不会发生变化.国内詹杰^[10-11]和刘兴润^[12]等曾分别提出利用恒星测量整层大气透过率并对地基设备进行实时标校.本文提出一种适用于地基大口径望远镜红外辐射标校的方法,实现了仅由一系列具有较高光谱分辨率的红外标准星,同时标定测量系统响应率和不同天顶距方向的大气消光.该方法无需增加额外设备,且可在任务前、任务后对设备进行实时标校.

1 辐射测量原理

大气环境下,测量系统对目标进行红外辐射测量时,目标辐射在到达探测器的传输过程中受到大气的衰减.同时,大气自身辐射也叠加到目标辐射上一同到达探测器.当探测器响应为线性时,测量系统对空间目标和周围天空背景的辐射测量模型^[1]分别为

$$DN_t = \alpha(\tau_\theta E_t + E_a) + DN_0 \quad (1)$$

$$DN_s = \alpha E_a + DN_0 \quad (2)$$

式中 E_t 、 E_a 分别代表待测目标和天空背景在望远镜入瞳处的辐照度, α 为光学系统的辐照度响应率, τ_θ 为天顶距 θ 处的大气透过率.获得空间目标图像后,首先执行天空背景去除,将式(1)和式(2)相减并整理,得到

$$\Delta DN = DN_t - DN_s = \alpha \tau_\theta E_t \quad (3)$$

根据文献^[13]中的天文测光理论,适用于所有点源、扩展源的仪器星等和标定星等之间的转换关系为

$$M_{\text{cal}} = M_{\text{inst}} + c_1 + c_2(X - 1.0) \quad (4)$$

式中 c_1 为测光零点偏置,反映大气的透光能力,值越大透过率越高. c_2 为消光系数,随月份或季节变化, X 为大气质量.由此,得到大气透过率的计算公式为

$$\tau_\theta = t \cdot \exp(-\kappa \cdot m(\theta)) \quad (5)$$

式中, t 为大气透过率因子, $\exp(-\kappa \cdot m(\theta))$ 代表了大气消光,即大气透过率随观测仰角增大而减小的趋势. κ 为总的垂直方向大气消光光学厚度, $m(\theta)$ 为大气质量,当天顶距 $\theta < 75^\circ$ 时,大气层可近似看作平面平行层,大气质量的计算公式为 $m(\theta) \approx \sec(\theta)$.

将式(3)和式(5)合并后,两边取对数并整理得到

$$\ln\left(\frac{\Delta DN}{E_t}\right) = -\kappa \cdot \sec \theta + \ln(\alpha \cdot t) \quad (6)$$

基于红外标准星的红外辐射标校方法是在测量任

务前,于不同天顶距处,快速拍摄多颗红外标准星.根据式(6)得到以 $\sec(\theta)$ 为横坐标, $\ln(\Delta DN/E_t)$ 为纵坐标的一系列数据点.对测量数据点进行最小二乘线性拟合,拟合直线的斜率即为 $-\kappa$,截距为测量系统的红外辐射响应率 $\ln(\alpha \cdot t)$.得到 κ 后,任意天顶距方向的大气消光即可得到.

得到测量系统的红外辐射响应率和大气消光后,可由探测器输出数码值按式(6)直接得到等效大气层外待测目标的辐照度.设 R 为目标到光学系统的距离,则空间目标的辐射强度为 $I = E_t \cdot R^2$.由此,通过红外辐射测量传感器输出图像反演得到空间目标辐射强度.

2 红外标准星库

对于指定的光学系统,定标用红外标准星的选择依据是

- 1) 恒星光谱流量密度不随时间发生周期性或非周期性的变化,即恒星不能是变星;
- 2) 恒星亮度和观测仰角在望远镜探测能力范围内;
- 3) 恒星光谱波段涵盖系统工作波段.

目前,拥有的红外标准星光谱数据库中有 620 颗亮星,覆盖全天空网络,由 Martin Cohen 博士和 Mike Egan 博士依据地基、空基望远镜测光结果和红外光谱仪的测量结果建立^[5,14].光谱曲线覆盖 1.2~35 μm ,其中 422 颗星的波长分辨率为 0.05 μm ,光谱准确度优于 2%,其余标准星的光谱分辨率约为 100,光谱不确定度优于 5%.星库中包括了 5 颗最常用的红外标准星,其名称及光谱类型见表 1^[15].

表 1 红外标准星

Table 1 Infrared calibration stars		
Star	Historical name	Spectral type
α Lyr	Vega	A0 V
α Tau	Aldebaran	K5 III
β Gem	Pollux	K0 III
α CMa	Sirius	A1 V
α Boo	Arcturus	K1 III

在红外波段,织女星或天狼星被定义为星等零点^[16-17].图 1 为两颗标准星的光谱曲线,横轴代表波长(单位 μm),纵轴代表光谱流量密度(单位 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$).为便于查看,图中只截取了部分光谱曲线.

将星库中红外标准星的光谱数据插值后,在系统工作波段范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内进行数值积分,得到大气层外红外标准星的辐照度

$$E_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad (7)$$

式中 $E(\lambda)$ 代表红外标准星的光谱流量密度, $R(\lambda)$ 代表红外测量系统的相对光谱响应率.

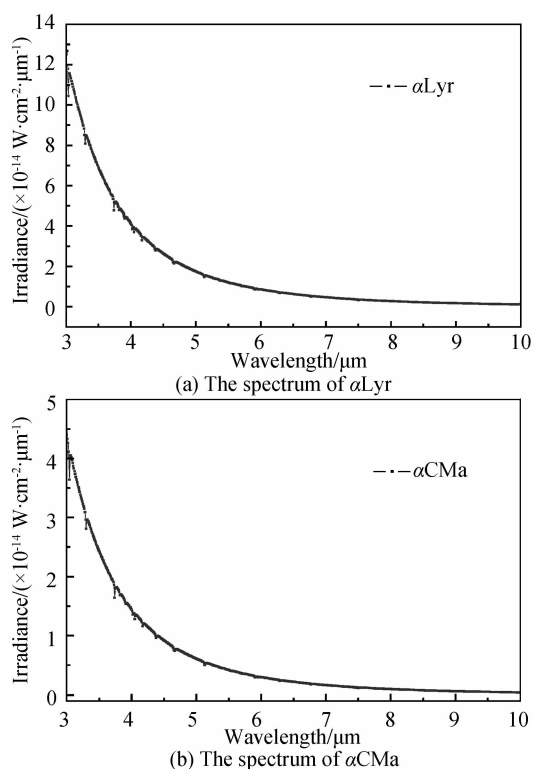


图1 红外标准星 α Lyr 和 α CMa 的光谱曲线
Fig.1 The spectrum of star α Lyr and α CMa

3 辐射测量实验

3.1 定标实验

2014年3月13日,利用1.23 m口径望远镜开展拍星实验.需要注意的是,红外相机存在漂移现象,若不加以注意,将会严重降低辐射测量准确度.图2为所用中波相机开机一小时内输出数码值的变化趋势.图

中的六幅图分别代表相机靶面均值、中心像元和四个象限中心像元在开机后一小时内输出数码值的变化情况.由图可见,各像元的漂移量基本一致,即输出数码值存在整体漂移.数码值变化趋势表现为先是快速增大,30 min处增速减缓,40 min后趋于相对稳定状态.由此可知,系统定标及空间目标的辐射测量至少在开机半小时,相机输出稳定后开始.

当日参与定标的红外标准星共有19颗,根据星点像峰值信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)值,剔除暗弱目标后有效数据见表2.表中大气层外辐照度单位为 $W \cdot cm^{-2}$.系统工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu m$,天顶距 θ 为观测仰角的余角.

数据处理时发现,红外探测器固定图案噪声和由各路放大器参数不一致引起的条纹噪声严重影响数据提取结果.因此实验过程中,于每次拍星后在邻近视场拍摄非均匀性校正用天空背景图像,采用单点校正算法校正图像非均匀性.图3为标准星 μ Uma 单点校正前后的效果对比,可明显看出,校正后图像无固定图案噪声和条纹噪声.

恒星观测数据提取采用孔径测光法,于星点像周围足够远处的环形面积内,采集天空背景均值.对整个靶面执行背景扣除后,得到星点像在探测器靶面上总的输出数码值.图4为表2中11颗亮星按式(6)进行最小二乘线性拟合的结果,拟合曲线的 R^2 为0.4211, RMSE为0.0766.定标得到大气消光光学厚度 κ 为0.2399, $\ln(\alpha \cdot t)$ 为38.97,由此计算得到的表2中各红外标准星处的大气消光如图5.

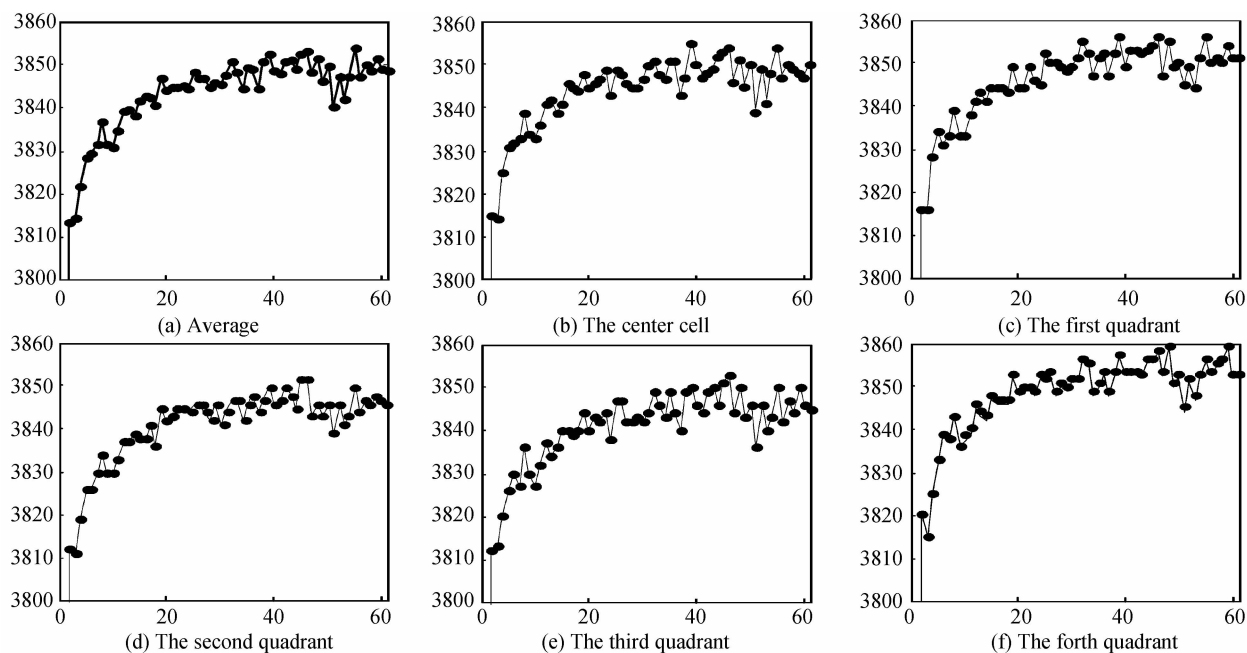


图2 相机的时域漂移
Fig.2 The temporal drift of the camera

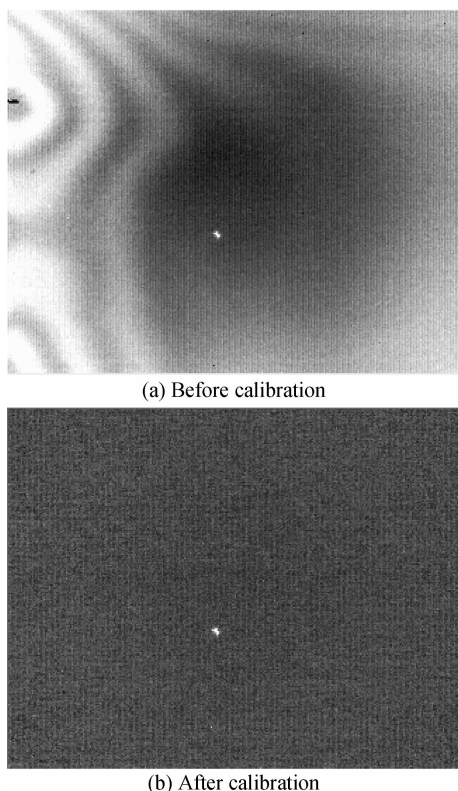


图3 μ Uma 单点校正前后效果对比
Fig. 3 The effect of single-point calibration for μ Uma

表2 红外标准星数据

Table 2 The data of Infrared calibration stars

Stars	Elevation	Irradiance	SNR
α Hya	33°14'	1.243e-014	120.92
HD131873	37°34'	1.311e-014	155.30
β Umi	38°21'	1.282e-014	63.70
α Tau	41°21'	5.714e-014	411.13
HD98262	46°44'	3.098e-015	25.33
HD89484	47°31'	7.408e-015	63.68
HD95689	55°22'	7.556e-015	97.92
HD89758	59°03'	8.722e-015	96.12
μ Uma	63°31'	8.325e-015	42.28
HD44478	65°02'	2.398e-014	214.20
β Gem	74°06'	1.130e-014	74.06

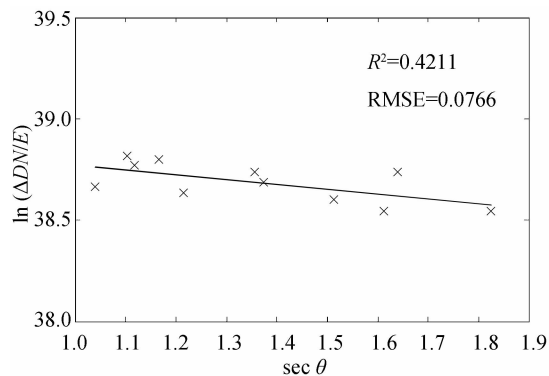


图4 标准星定标曲线拟合结果
Fig. 4 The fitting results of calibration curve

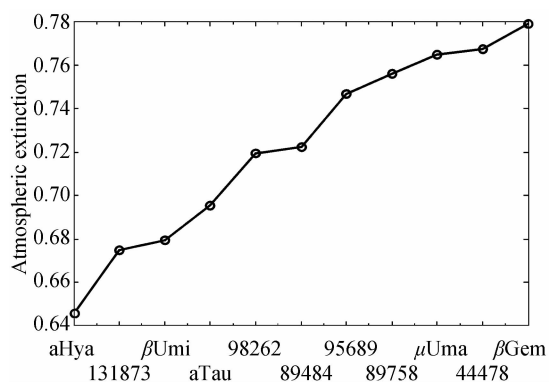


图5 表2中各红外标准星处大气消光
Fig. 5 The atmospheric extinction of stars in Table 2

3.2 反演误差

为了验证红外标准星法的反演准确度,分别将十一颗星中的一颗作为待测目标星,其余十颗星作为定标星,按式(6)拟合得到多组 κ_i 和 $(\ln(\alpha \cdot t))_i$, 得到测量系统响应率和不同天顶距处的大气消光后,再将待测目标星的 ΔDN 值、天顶距 θ 值带入到式(6)中,反演得到待测目标星的大气外辐照度。恒星辐照度反演误差为计算的目标星大气外反演辐照度和真值之差与真值的比值,结果如图6。反演误差均较小,最大值为恒星 HD89484 的 16.28%。

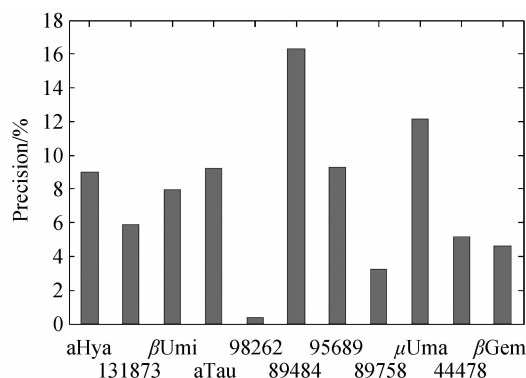


图6 恒星辐照度反演误差
Fig. 6 The precision of inversion

4 结论

本文介绍了一种适用于地基大口径望远镜的红外辐射标校方法,即红外标准星标校法。标校系统仅由红外标准星库和标校软件组成,在每次辐射测量任务开始前/后的极短时间(约 10 min)内,快速拍摄一系列光谱稳定的红外亮星,对测量数据进行最小二乘线性拟合,可同时得到测量系统的辐射响应率和大气消光。经实验验证,恒星辐照度反演误差最大为 16.28%。

原则上,在三条红外标准星选择依据均满足的情况下,红外标准星标校法适用于空基、地基望远镜的所有红外波段。但是,根据普朗克定律,在红外波段,标准星的能量随波长增加而减弱,同时,红外测量设备随工

作波长的增加,探测能力降低。所以,长波波段的红外标准星标校法仅适用于更大口径或灵敏度更高的测量系统。此外,目前的曲线拟合准确度偏低,下一步工作计划是完善数据处理算法,降低反演误差。

参考文献

- [1] YANG Ci-yin, ZHANG Jian-ping, CHAO Li-hua. 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.
- [2] YANG Ci-yin, CHAO 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.
- [3] LI Xian-sheng, REN Jian-wei, ZHANG Li-guo, 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.
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]. *光子·激光*, 2006, **17**(2):175-178.
- [4] YANG Ci-yin, ZHANG Jian-ping, CHAO Li-hua. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. *Journal of 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.
- [5] Air Force Research Lab. AMOS Users' s Manual [EB/OL]. [2014-07-15]. <http://ulua.mhpc.af.mil/amos.html>.
- [6] COHEN M, WHEATON A W, MEGEATH T S. Spectral irradiance calibration in the infrared. XIV. The absolute calibration of 2MASS [J]. *The Astronomical Journal*, 2003, **126**(2):1090-1096.
- [7] PRICE D S, PAXSON C, ENGELKE C, et al. Spectral irradiance calibration in the infrared. XV. Absolute calibration of standard stars by experiments on the midcourse space experiment [J]. *The Astronomical Journal*, 2004, **128**: 889-910.
- [8] REACH T W, MEGEATH T S, COHEN M. Absolute calibration of the infrared array camera on the spitzer space telescope [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2005, **117**(835):978 - 990.
- [9] PRICE D S. Infrared irradiance calibration [J]. *Space Science Reviews*, 2004, **113**(3):409-456.
- [10] ZHAN Jie, GUO Rui-peng, HUANG Hong-hua, et al. Measurement of total atmospheric transmittance with stellar irradiance [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11):1761-1765.
詹杰,郭瑞鹏,黄宏华,等.利用恒星测量整层大气透过率[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(11):1761-1765.
- [11] 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过率的多目标星定标[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(12):2843-2847.
- [12] LI Xia, LIU Xing-run, TONG Hui-yuan, et al. Application research on infrared star for calibration system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, **10**(6):66-68.
李霞,刘兴润,佟惠原,等.红外恒星辐射在标校中的应用研究[J]. *光学与光电技术*, 2012, **10**(6):66-68.
- [13] CUTRI R M, SKRUTSKIE M F, VAN DYK S. Explanatory supplement to the 2MASS all sky data release and extended mission products [EB/OL]. (2008-09-07) [2014-07-15]. <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/doc/>.
- [14] COHEN M, WALKER G R, 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**: 1864-1889.
- [15] COHEN M, WITTEBORN C F, WALKER G R, et al. Spectral irradiance calibration in the infrared. IV. 1. 2-35 μ m spectra of six standard stars [J]. *The Astronomical Journal*, 1995, **100**(1):275-289.
- [16] COHEN M, WALKER G R, BARHOW J M. Spectral irradiance calibration in the infrared. I. Ground-based and IRAS broadband calibrations[J]. *Astronomical*, 1992, **104**(4): 1650-1657.
- [17] TURAN E. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8):1468-1488.