

利用多星表交叉外推恒星能量的方法

王誉都^{1,2,3}, 孙小进^{1,2}, 张恒^{1,2}, 陈凡胜^{1,2*}

(1. 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083; 2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了获取满足特定探测器工作谱段的恒星能量, 提出了一种基于多星表数据的恒星能量外推方法, 利用 IRAS、WISE 和 2MASS 星表数据交叉校验, 将已有的高精度恒星谱段能量转化为相机的任意工作谱段. 该模型简化了外推过程, 提高了外推效率, 实现对 70% 的恒星外推精度 3% 以内, 与 Cohen 等人对 Vega 和 Sirius 长期观测得到的结果相同. 同时, 给出一个可用于辐射定标的星表. 在恒星定标时可以根据模型外推结果选择更适合探测器的多恒星数据.

关键词: 恒星定标; 能量外推; 星表; 普朗克定律
中图分类号: TP301.6; O439 **文献标识码:** A

A new approach for extrapolating star flux using cross-matching multiple catalogues

WANG Yu-Du^{1,2,3}, SUN Xiao-Jin^{1,2}, ZHANG Heng^{1,2}, CHEN Fan-Sheng^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper presents a model for extrapolating star flux from cross-matching multiple catalogues combining the data of IRAS, WISE and 2MASS, which used the Planck's law to extrapolate flux to every band. The model simplifies the extrapolation process, and improves the extrapolation efficiency with a high precision of 3% for 70% of the stars. Our findings are consistent with the independent long-term observation of the Vega and Sirius star reported by Cohen *et al.* According to the extrapolation results, more suitable multiple data of stars could be selected for specific detectors' star calibration.

Key words: star calibration, flux extrapolation, star catalogues, Planck's law
PACS: 97.10.Ex, 97.10.Ri, 95.85.Hp, 95.85.Jq

引言

遥感图像获取过程中, 由于仪器自身误差以及自然环境(如大气、地形)等各种因素影响, 搭载其上的遥感器获取的测量值与实际目标物的光谱反射率或辐射亮度等物理量之间会产生一定的偏差, 需要通过高精度标定来进行校正^[1-2]. 红外成像遥感器星上定标一般采用黑体作为标准辐射源, 国外扫描成像的红外相机, 在相机内部都有控温黑体参考源

用于星上辐射定标. 但相关定标设备的精度和效率会随着时间的推移而降低. 针对大口径光学系统, 现有的星上定标方法无法满足物方的全口径定标, 因此找到一种适合大口径红外外面阵探测系统的星上定标方法是十分必要的.

空间目标和红外标准星都位于大气层外, 可利用红外标准星对探测器进行辐射定标. 如 AMOS 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^[3]. 随后这一红外标

收稿日期: 2018-10-14, 修回日期: 2019-05-24

基金项目: 广目地球科学卫星红外热像仪(CASE010102)

Foundation items: Infrared Thermal Imager In Guangmu Geographic Scientific Satellite(CASE010102)

作者简介(Biography): 王誉都(1991-), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要从事空间遥感与光电系统设计等方面的研究. E-mail: wangyudu@gmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2018-10-14, revised date: 2019-05-24

准星目录及其扩展目录又被用于 2MASS、MSX、Spitzer 等地基和空基望远镜的绝对辐射标定^[4]. 日本发射的红外天文观测卫星 ASTRO-F, 工作谱段在 2 ~ 200 μm , 选择 3 ~ 8 星等的恒星作为在轨辐射定标源实现对探测器长期响应变化趋势的监测^[5]. 日本的 AKARI 卫星通过观测恒星和星系, 使用标准恒星光谱能量分布, 将点光源的校准精度提高到了 15%, 但是需要持续 2 ~ 3 个月的连续观测^[6]. Spitzer 望远镜通过外推 2MASS、IRAS 的测量数据, 将标准零等星外推精度提高到 3.5%^[7]. 欧洲航天局在红外线太空天文台 (ISO) 太空望远镜中, 通过凝视模式和简单光栅模式对 ISOPHOT 进行辐射定标, 精度在 10% ~ 20% 之间^[8].

目前主流的恒星定标方案大都采用固定的几颗光谱测定较为充分的恒星, 如 Vega 和 Sirius 是采用最多的红外标准星. 詹姆斯韦伯空间望远镜和哈勃望远镜的绝对通量定标可溯源至三颗主要的白矮星, 相对定标采用光度法进行^[9], 绝对定标校准程序采用太阳模拟的方法, 校准精度在 10 μm 和 20 μm 处分别为 3% 和 8%^[10]. 常用的红外标准星名称及光谱类型见表 1^[11], 其是由 Cohen 等依据空基望远镜、地基望远镜测光结果和红外光谱仪测量结果建立的, 光谱覆盖范围为 1.2 ~ 35 μm , 波长分辨率为 0.05 μm , 光谱不确定度优于 5%^[12]. 针对恒星能量外推, 更多的使用 Kurucz 在 1993 年提出的恒星光谱模型^[13], 其使用温度、表面重力场和金属丰度等参数拟合恒星光谱分布, 拟合误差分布在 3% ~ 5%. Karczmarek 等针对 77 RR Lyrae 星系进行了单独观测, 并对 Gaia 任务中的零点进行大气模型拟合定标, 精度达到 3%^[14]. Stewart 等针对 65 颗定标星对比, 得到了相似的校准精度^[15]. 在对星表数据的分析处理中, Klein 等使用 WISE 星表中的 129 颗恒星的观测结果建立校准星表^[16], Lian 等使用渐近巨星对 WISE 星表的 W1 和 W2 饱和的恒星进行校验^[17]. Wang 等使用 WISE 星表数据对某型号采用了简单插值方法, 实验测得辐射定标精度达到 20%^[18]. Liu 等使用星表数据和观测恒星数据, 对相机多通道进行了图像配准, 配准精度达到 0.2 个像元^[19].

虽然这些恒星已经经过了充分的研究, 但是在不同波段处的光谱精度并不完全一致, 光谱也没有完全满足其他探测器工作波段的要求, 同时这些恒星使用的大气模型已经将近 20 年没有进行拓展, 目前的天文卫星的观测精度已经大范围提高, 对恒星能量的外推精度也有了新的要求.

表 1 目前可用的模型和复合光谱

Table 1 Model and composite spectra currently available

恒星	光谱类型	数据更新时间
α Lyr	A0 V	July 23, 1991
α CMa	A1 V	July 29, 1991
α Tau	K5 III	March 5, 1992
β Peg	M2.5 II-III	March 10, 1992
α Boo	K1 III	April 28, 1993
β And	M0 III	October 15, 1993
β Gem	K0 III	September 12, 1994
α Hya	K3 II-III	December 12, 1993

因此, 对于不同探测器, 需要针对特定波段选择最适合的恒星进行定标, 而不能仅限于固定的几颗经验恒星. 目前仅有 Vega、Sirius 等少数恒星的光谱被较为详细的分析过, 星表中其他百万颗恒星都仅仅是观测后做了简单的记录. 在恒星定标中如何使这些恒星的数据被充分利用是非常重要的. 本文提出了一种利用恒星星表数据外推到特定波段能量的外推模型, 该模型具有以下显著优点:

1. 使用 WISE、2MASS、IRAS 等星表的数据交叉处理, 外推到任意给定波段的恒星能量, 外推误差在 3% 以内. 通过与现有 Vega、Sirius 的数据对比, 发现外推数据真实可靠.

2. 可以根据星表的海量观测数据, 有针对性的选择大量恒星数据进行辐射定标等相关数据处理.

1 红外星表和定标星

当今的天文数据量已经呈现爆炸式增长, 各国天文组织分别选择优越的地理位置建立起一批批先进的观察仪器. 这些数据在地理位置上遍布全球各个角落, 数据量巨大. 红外探测是目标观测的重要手段之一^[20], 当前红外天文观测得到的星表大都集中在天文研究感兴趣的波段, 由于不同天文望远镜的性能参数并不一致, 不同星表的数据一般需要综合分析才能完成多波段多时序的深入分析. 因此星表和定标星的选择至关重要.

星表的选择必须要满足以下几个条件:

1. 在星表给出的波段处恒星能量精度高. 由于模型是根据星表给出的恒星信息外推特定波段的能量, 因此星表的精度一定要满足定标精度的要求.

2. 星表的波段要较为全面, 有利于提高外推精度.

根据相机的探测波段与在轨运行环境, 本文选择了目前使用最为广泛的 IRAS、WISE 和 2MASS 星表作为外推数据源. IRAS 星表覆盖了 8.5 ~ 15 μm 、19 ~ 30 μm 、40 ~ 80 μm 、83 ~ 120 μm 四个波段, 不

确定度优于 2%^[21], WISE 星表覆盖了 2.8 ~ 3.8 μm 、4.1 ~ 5.2 μm 、7.5 ~ 16.5 μm 、20 ~ 28 μm 四个波段, 不确定度优于 1%^[22], 2MASS 星表工作波段为 1.25 μm 、1.65 μm 、2.17 μm 三个波段, 不确定度优于 1.8%^[23].

根据特定的光学系统, 定标所使用的红外恒星需要满足以下要求:

1. 恒星不能是变星, 即恒星的光谱流量密度应是稳定的, 不随时间发生周期性或非周期性变化.
2. 恒星光谱波段在光学系统的工作波段之内.
3. 恒星亮度和观测仰角在光学系统探测能力范围之内.

2 星等与点源辐照度的计算

对恒星能量的计算, 必须对恒星的成像模式进行适当的假设. 除太阳外的其它恒星距离地球的距离都非常遥远, 因此在进行恒星观测时, 可以将恒星视为点目标.

当目标为点源时, 目标对接收面元所张立体角小于接收立体角, 此时以发射面元在探测方向上的辐射强度计算辐照度.

记到达接收面元的辐射为 dA_2 , 则点源向立体角内 $d\Omega_1$ 发射的辐射, 其辐射通量为:

$$\Phi = I_\theta \cdot d\Omega_1 = I_\theta \cdot \frac{dA_2 \cos\theta_2}{l^2} \quad (1)$$

接收面元的辐照度记为 E , 单位 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$:

$$E = \frac{\Phi}{dA_2} = I_\theta \cdot \frac{\cos\theta_2}{l^2} \quad (2)$$

式中 I_θ 为发射面元在面元连线方向上的辐射强度, 单位 $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$; θ_2 为接收面元法线与视线的夹角.

恒星的红外辐射强度常用单位为 Jansky, 简称 Jy, 一般用 F_ν 表示,

$$Jy = 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \quad (3)$$

某波段的辐射强度一般用 F_λ 表示, 单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,

$$F_\lambda = F_\nu \cdot 10^{-26} \cdot c/\lambda^2 \quad (4)$$

其中 c 为光速, λ 为波长.

天文学中, 习惯用等效视星等来表示天体的亮度. 星等亮度是以人眼对天体亮度进行标定的, 星等越高, 亮度越低. 通常将星体亮度转化为星等来表示. 根据普森公式, 两个天体星等分别为 m_2 和 m_1 , 辐照度分别为 E_2 和 E_1 , 则有如下关系:

$$m_2 - m_1 = -2.5 \lg(E_2/E_1) \quad (5)$$

假设红外恒星的星等为 m , 可得红外星等与辐

射强度之间关系为:

$$F_\lambda = F_0 \cdot 10^{-m/2.5} \quad (6)$$

根据已公布全空域搜索的红外星表及 0 星等的辐射强度 F_0 , 可计算得到对应红外恒星的辐射强度 F_λ .

不同星表中给出的恒星信息略有不同, 可以通过上述公式分别计算出一颗恒星在 IRAS、WISE 和 2MASS 星表中对应波段的辐射强度.

3 外推方法分析

上文中已经得到某颗恒星在几个特定波段的辐射强度, 要外推到工作波段, 必须计算出符合普朗克定律的恒星表面温度.

假定某颗恒星表面温度为 T (单位: K), 由普朗克定律可得

$$M_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1} \quad (7)$$

其中 M_λ 为恒星光谱辐射出射度 (单位 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), C_1 为第一辐射常数 ($C_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \mu\text{m}^4$), C_2 为第二辐射常数 ($C_2 = \frac{ch}{k} = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$).

将恒星看作是朗伯体, 则恒星的光谱辐亮度 L_λ 为

$$L_\lambda = \frac{M_\lambda}{\pi} \quad (8)$$

在使用同一探测器观察这颗恒星时, 目标对接收面元所张立体角是常数, 代入式 2 合并常数项, 得到光谱辐照度 (单位 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)

$$E_\lambda = \frac{A}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1} \quad (9)$$

每个星表都有多个波段, 2MASS 星表有 3 个波段, IRAS 和 WISE 星表分别有 4 个波段, 将星表数据单位统一换算后, 可以选择最接近探测器工作波段的星表数据进行计算. 假设使用 n 个波段的数据进行计算, 波段 m 进行验证. 恒星在红外波段的辐射可认为与一个符合普朗克定律, 且具有亮温度函数的黑体辐射完全一致, 本文对 10 个波段的光谱辐照度进行积分来计算恒星在探测器上的辐照度. 由上述的理论分析, 在不同的波段下有

$$E_i = \int_{\lambda_{is}}^{\lambda_{ie}} \frac{A}{\lambda_i^5} \frac{1}{\exp(\frac{C_2}{\lambda_i T}) - 1} d\lambda \quad (10)$$

为了更清晰地解释本文的计算方法, 下面我们

用乘积替代积分,即将式 10 改变成式 11. 不过实际计算中仍采用了积分而不是简单的乘积来计算 E_i .

$$E_i = \frac{A}{\lambda_i^5} \frac{1}{\exp(\frac{C_2}{\lambda_i T}) - 1} \Delta\lambda_i, \quad i = 1, 2 \dots n, \quad (11)$$

其中 E_i 为星表中第 i 个波段对应的辐照度, λ_{is} 和 λ_{ie} 为该波段对应的波长范围. λ_i 为该波段对应的中心波长, $\Delta\lambda_i$ 为对应的波段带宽. A 和 T 为所求解参数.

由式 11 可得

$$\frac{\exp(C_2/\lambda_j T) - 1}{\exp(C_2/\lambda_k T) - 1} = \frac{E_j \lambda_j^5 \Delta\lambda_k}{E_k \lambda_k^5 \Delta\lambda_j} = \alpha_{j,k} \quad (12)$$

$$j = 1, 2 \dots n, \quad k = 1, 2 \dots n, \quad j \neq k$$

共有 C_n^2 个等式. 等式右侧可由星表数据计算得到, 因此将上述方程转换为指数方程的求解, 本文采用式 13 的指数函数 N 阶泰勒级数展开多项式逼近来求解得到参数 T .

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}, \quad (13)$$

通过对阶数 N 的不同取值发现, 当展开阶数 $N = 30$ 时, 可以达到较好的求解精度. 将求得的参数 T 代入式 14 可解得参数 A

$$A = \frac{E_i \times \lambda_i^5 \times (\exp(C_2/\lambda_i T) - 1)}{\Delta\lambda_i}, \quad (14)$$

将参数 A 和 T , 代入式 10 得到外推的验证波段 m 的

辐照度 E_{mq} , 并与星表中给出的波段 m 的辐照度数据进行对比, 得到外推精度

$$q = \frac{E_{mq} - E_m}{E_m} \quad (15)$$

针对求得的参数 T , 取一定步长继续迭代式 12、式 14、式 15, 直到外推精度收敛, 即可作为该恒星对应波段的外推辐照度和外推精度.

本文在三个星表中选择了共同的 3 000 颗恒星进行外推实验, 这些恒星均分布在计划进行在轨辐射定标实验的探测器的可观测天区中, 外推结果如表 2 所示, 外推精度小于 3% 的恒星所占比例达到 70%, 在进行定标实验时, 可以在精度好于 1% 的恒星中选择恒星作为定标星.

本文选择已被广泛研究的两颗恒星 Vega 和 Sirius 来验证外推数据的可靠性. Vega 和 Sirius 已在许多天文望远镜中被多次观测, 表 3 所示数据整理自 Cohen 定义零等星的项目^[24]. 为了在单幅图中清楚地表示长波和短波的区别, 如图 1 所示, 以 $\log\lambda$ 作为横坐标, 纵坐标为 $\lambda^4 F_\lambda$. 绿色五角星为 Cohen 等人通过多次实验测得到 Vega 和 Sirius 恒星通量, 红色菱形为根据 WISE、2MASS、IRAS 星表数据通过本文描述的外推方法计算的结果. 可以很明显的看出本文的外推方法在相同波段可以得到一致的辐照度的计算结果. 通过外推模型, 可以很方便的将星表

表 2 外推精度分析

Table 2 Extrapolation accuracy analysis

实验次数	$q < 3\%$ 的恒星 所占比例	$3\% \leq q \leq 10\%$ 的恒星 所占比例	$q > 10\%$ 的恒星 所占比例	运行时间/s	平均误差值	方差
1 ~ 1000	69.57%	27.14%	3.29%	72	0.0542	0.0190
1001 ~ 2000	70.02%	26.39%	3.59%	72	0.0595	0.0188
2001 ~ 3000	70.33%	26.29%	3.38%	71	0.0509	0.0186

表 3 Vega 和 Sirius 通量数据

Table 3 The flux of Vega and Sirius

通道名称	Vega		Sirius	
	$\lambda_{iso}/\mu\text{m}$	$F_\lambda / (\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1})$	$\lambda_{iso}/\mu\text{m}$	$F_\lambda / (\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1})$
Jn	1.243	3.059E-13	1.243	1.105E-12
Kn	2.208	3.940E-14	2.208	1.392E-13
Ln	3.781	5.162E-15	3.781	1.806E-14
J	1.215	3.314E-13	1.215	1.198E-12
H	1.654	1.151E-13	1.653	4.099E-13
K	2.179	4.139E-14	2.179	1.463E-13
L	3.547	6.590E-15	3.550	2.304E-14
L'	3.761	5.263E-15	3.759	1.843E-14
M	4.769	2.107E-15	4.770	7.350E-15
8.7	8.756	1.955E-16	8.758	6.776E-16
N	10.472	9.631E-17	10.472	3.332E-16
11.7	11.653	6.308E-17	11.655	2.178E-16
20	20.130	7.182E-18	20.132	2.466E-17

中观测到的百万颗恒星的能量数据外推到特定波段,并且精度达到 Vega 等标准恒星的精度等级。

Rieke 等^[7]通过 Vega 在 2.22 μm 、10.6 μm 和 24 μm 的数据,采用线性差值的方法,通过外推到相同波段的方式进行验证,作者仅保证了三个特定波长处的外推,并对外推精度赋予了 2.3% 的误差。相比较下,本文采用了多星表的数据,数据获取方式更加便捷,外推模型更加完整,同时验证了模型在多个恒星和多个特定波长处具有较高的外推误差,模型应用范围更加广泛。

按照目前对部分恒星的分析,部分恒星在某些波段的外推误差可能高达 20%,这部分较大的误差来源是由于在相近波段不同时间观测数据之间的一致性。这种不一致性可能来源于不同仪器之间的不同标定精度,也可能来源于某些恒星的亮度波动,或者恒星模型只适合部分波段的能量外推等,需要进行更深入的研究。定标恒星选择、恒星光谱分布拟合是一项细致而长久的工作,后续计划分析更多的恒星,对同一颗恒星采用不同天文观测的数据进行分析和外推,以提高外推精度。本文最后选择了红外星等在 5~6 等星之间,外推误差在 1% 以内的 100 多颗恒星,计算各个恒星在不同波段的能量分布,得到了适合作长期定标的恒星。现将其中的部分恒星

信息归纳如下表所示,每颗定标星的数据包括恒星的赤经赤纬和对应工作波段的外推能量。这些恒星的外推精度均小于 1%,并分布在探测器的可观测天区内,将作为在轨恒星定标的主要定标星。

利用 N 颗恒星组合作为定标源,理论上辐射精度可以提高 \sqrt{N} 倍^[25],利用定标相机将恒星辐射进行传递时,误差一般不超过 1%,这个误差也取决于相机的研制能力。探测器响应精度目前已好于 5%,因此利用外推星表进行辐射定标的理论精度可以达到 10% 以内。

4 结论

本文研究了利用多星表数据交叉外推特定波段能量的模型,通过基于 WISE、IRAS、2MASS 恒星星表的观测数据交叉校验,将已有的高精度恒星谱段能量转化为相机的任意工作谱段。结果表明 70% 的恒星能量外推精度好于 3%,并使用 Vega 和 Sirius 恒星数据验证了外推模型的准确性和可靠性。最后本文选择了一系列外推精度好于 1% 的恒星,计算其在不同波段的能量,制成定标星表,使得使用恒星定标的理论精度好于 10%。红外高光谱成像技术发展很快^[26-27],未来还可以应用于定标星的光谱辐亮

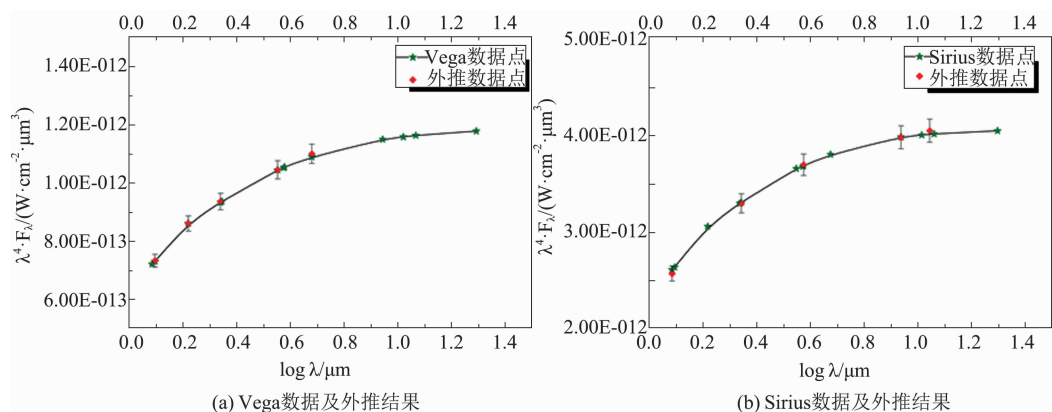


图 1 通量数据及外推结果对比
Fig. 1 Comparison of flux and extrapolation result

表 4 部分定标星表 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Table 4 Catalog of calibration stars ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)

波段		2.8~3.8 μm	4.1~5.2 μm	7.5~16.5 μm	2.1~2.35 μm	3.5~4.15 μm
赤经	赤纬					
254.4167	9.3747	3.8612e-15	5.5003e-16	2.6486e-16	4.5904e-15	1.6115e-15
95.89927	-9.87783	2.1105e-15	3.5263e-16	1.6109e-16	1.0198e-15	2.1926e-16
326.0418	9.872232	1.1420e-15	1.2996e-15	1.4410e-16	1.2426e-16	7.6847e-16
269.7569	9.7753	3.7841e-15	7.5532e-16	1.9753e-16	5.1249e-15	1.5376e-15
295.5103	-9.19547	3.3162e-16	1.8027e-16	4.1427e-17	1.3840e-16	1.6990e-16
306.4309	10.05278	7.1031e-16	3.5457e-16	6.5513e-17	6.5256e-16	3.1970e-16

度标定. 恒星能量数据对使用恒星进行辐射定标十分重要, 通过外推模型可以准确获取恒星在不同波段的能量, 极大地扩展了定标星的数量, 在科学研究和遥感应用领域都有十分重要的意义.

References

- [1] WANG Yue-Ming, CHEN Jian-Xin, LIU Yin-Nian, *et al.* Study on two-point multi-section IRFPA nonuniformity correction algorithm [J]. *Journal of Infrared millimeter Waves* (王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究, *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(6): 415–8.
- [2] WANG Yue-Ming, ZHU Qian, WANG Jian-Yu, *et al.* Characterization of background radiation in SWIR hyperspectral imager [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves* (王跃明, 祝倩, 王建宇, 等. 短波红外高光谱成像仪背景辐射特征研究), 2011, **30**(3): 279–83.
- [3] Cohen M, Wheaton W A, Megeath S T. Spectral irradiance calibration in the infrared. XIV. The absolute calibration of 2MASS [J]. *Astron. J.*, 2003, **126**(2): 1090–6.
- [4] Lu N, Smith P S, Engelbracht C W, *et al.* Absolute calibration and characterization of the multiband imaging photometer for Spitzer. IV. The spectral energy distribution mode [J]. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 2008, **120**(865): 328–38.
- [5] Shirahata M, Matsuura S, Hasegawa S, *et al.* Calibration and performance of the AKARI far-infrared surveyor (FIS)-slow-scan observation mode for point-sources [J]. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 2009, **61**(4): 737–50.
- [6] Takita S, Ikeda N, Kitamura Y, *et al.* Slow-scan observations with the infrared camera (IRC) aboard AKARI [J]. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 2012, **64**(6): 1–8.
- [7] Rieke G H, Blaylock M, Decin L, *et al.* Absolute physical calibration in the infrared [J]. *Annals of Internal Medicine*, 2012, **135**(6): 2245.
- [8] Schulz B, Huth S, Laureijs R J, *et al.* ISOPHOT - Photometric calibration of point sources [J]. *Astron Astrophys*, 2002, **381**(3): 1110–30.
- [9] Bohlin R C, Gordon K D, Rieke G H, *et al.* Absolute flux calibration of the irac instrument on the spitzer space telescope using hubble space telescope flux standards [J]. *Astron J.*, 2011, **141**(5): 1–12.
- [10] Diaz-Meller R I. Photometric and astrometric calibration of the JWST instrument complement [J]. *Astr. Soc. P.*, 2007, **364**: (81-90).
- [11] Cohen M, Witteborn F C, Walker R G, *et al.* Spectral irradiance calibration in the infrared. IV. 1.2-35 μm spectra of six standard stars [J]. *Astron. J.*, 1995, **110**(1): 275–89.
- [12] Kim M G, Lee H M, Arai T, *et al.* Low-resolution near-infrared stellar spectra observed by the cosmic infrared background experiment (CIBER) [J]. *Astron. J.*, 2017, **153**(2): 1–19.
- [13] Lorenzo-Oliveira D, De Mello G F P, Dutra-Ferreira L, *et al.* Fine structure of the age-chromospheric activity relation in solar-type stars I. The Ca II infrared triplet: Absolute flux calibration [J]. *Astron. Astrophys.*, 2016, **595**: 10.1051/0004-6361/201628825.
- [14] Karczmarek P, Pietrzynski G, Gorski M, *et al.* The araucaria project: The distance to the fornax dwarf galaxy from near-infrared photometry of rr lyrae stars [J]. *Astron. J.*, 2017, **154**(6): 263-1-8.
- [15] Stewart P N, Tuthill P G, Nicholson P D, *et al.* An atlas of bright star spectra in the near-infrared from cassini-vims [J]. *Astrophys J. Suppl. S.*, 2015, **221**(2):
- [16] Klein C R, Richards J W, Butler N R, *et al.* Mid-infrared period-luminosity relations of RR Lyrae stars derived from the AllWISE data release [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, **440**(1): L96–L100.
- [17] Lian J H, Zhu Q F, Kong X, *et al.* Characterizing AGB stars in Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) bands [J]. *Astron. Astrophys*, 2014, 564.
- [18] Wang Y D, Su X F, Zhang W T, *et al.* Research on camera on orbit radial calibration based on black body and infrared calibration stars [M]. //Pham K D, Chen G. Sensors and Systems for Space Applications Xi. 2018.
- [19] Liu Y, Yang L, Chen F-S. Multispectral registration method based on stellar trajectory fitting [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, **50**(4): 189.
- [20] Wen M, Wei L, Zhuang X, *et al.* High-sensitivity short-wave infrared technology for thermal imaging [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2018, **95**(9): 3–9.
- [21] Neugebauer G, Habing H J, Van Duinen R, *et al.* The infrared astronomical satellite (IRAS) mission [J]. *Astrophys J*, 1984, **278**(1984): L1–L6.
- [22] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, *et al.* The wide-field infrared survey explorer (WISE): Mission description and initial on-orbit performance [J]. *Astron. J.*, 2010, **140**(6): 1868.
- [23] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, *et al.* The two micron all sky survey (2MASS) [J]. *Astron. J.*, 2007, **131**(2): 1163–83.
- [24] Cohen M, Walker R G, Barlow M J, *et al.* Spectral irradiance calibration in the infrared. 1. Ground-based and iras broad-band calibrations [J]. *Astron. J.*, 1992, **104**(4): 1650–7.
- [25] Xu C. A flux calibration method for remote sensing satellites using star flux [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, **36**(5): 581–8.
- [26] Wei L, Xiao X, Wang Y, *et al.* Research on the short-wave infrared hyperspectral imaging technology based on Integrated Stepwise filter [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2017, **86**: 90–7.
- [27] Wen M, Wang Y, Yao Y, *et al.* Design and performance of curved prism-based mid-wave infrared hyperspectral imager [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2018, **95**: 5–11.