

红外星表在地基红外辐射测量系统中的应用

黄 晨, 王建军, 高 昕, 李舰艇

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 国内已知的红外星库数量有限, 辐射照度、覆盖波段范围小, 分布密集度低, 无法满足现有地基红外辐射测量系统天文标定的需要。根据系统的探测波段考察并选取 IRAS、2MASS、WISE、AKARI 4 个全空域巡天计划及其生成的红外星表。综合考虑大气弥散、大气衰减的影响, 分析计算系统在短波红外 1~3 μm 、中波红外 3~5 μm 、长波红外 8~10 μm 的极限探测能力及在对应点源星表中的最低可探测的星等。搜索选取可供系统观测的恒星, 结果显示在短波选取 4 599 个恒星目标, 中波选取 125 个恒星目标, 长波选取 1 个恒星目标, 为我国现有地基红外辐射测量系统天文标定及红外星表进一步应用提供理论依据。

关键词: 地基红外辐射测量系统; 红外星表; 天文标定; 红外星等

中图分类号: TN215 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)11-2901-06

Application of infrared star catalog in ground-based infrared radiation measurement system

Huang Chen, Wang Jianjun, Gao Xin, Li Jianting

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The known infrared catalog has limited available quantity, limited coverage of waveband and irradiance, low intensity distribution. This can not meet the need for astronomy calibration of existing ground-based infrared radiation measurement system. According to the system detection waveband, IRAS, WISE, 2MASS, AKARI four all sky surveys and their infrared star catalogs were selected. Considering the impact of atmospheric dispersion and attenuation, the limiting detection capability of system in 1-3 μm , 3-5 μm , 8-10 μm and the limiting magnitude in corresponding point source catalog was calculated. Searching in catalogs and selected stars which can be observed by system, results show that 4 599 stars in 1-3 μm , 125 stars in 3-5 μm , 1 stars in 8-10 μm were found. This work also provides a theoretical basis for astronomical calibration and infrared star catalog application for domestic ground-based infrared radiation measurement system.

Key words: ground-based infrared radiation measurement system; infrared star catalog; astronomical calibration; infrared magnitude

收稿日期: 2013-03-05; 修订日期: 2013-04-03

作者简介: 黄晨(1987-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事数字图像处理、光学辐射特性测量方面的研究工作。

Email: raulhuang2010@gmail.com

0 引言

由于观测和研究的需要,在不同波段测到的天体在红外波长上的星等大小、流量以及位置、光谱型等汇集在一起,形成各种红外源表^[1]。恒星的亮度及坐标位置较为稳定,可作为标准源,广泛应用于天文观测、红外系统标定、星空背景红外建模研究等方面^[2]。地基红外辐射测量系统主要应用于天文观测、航天测控、飞行器及空间目标的红外辐射特性测量等,为确保辐射测量精度,需要利用标准辐射源对测量系统进行标定。天文标定是指利用恒星辐照度数据对红外测量系统进行现场标校,较现有黑体标定方法操作简便、成本低、标定效率高等优点。美国空军毛伊岛光学观测站的 3.6m 望远镜(Advanced Electro-optical System, AEOS)配备的长波红外成像探测器、NASA 的斯皮策太空红外望远镜(Spitzer Space Telescope)上携带的红外阵列相机(IRAC)^[3],其红外系统标定采用恒星标定的方式。国外经过多年探索发展,已实施多个地基、空基以及天基的红外巡天观测计划并生成覆盖红外各波段的红外星表建立较为完备的红外星库。国内已知的红外标准星库数量有限,辐射照度、覆盖波段范围小,分布密集度低,制约了红外星表的应用和发展。国家天文台调研了目前国内外的多个红外巡天项目,基于美国国家航空航天局(NASA)2 μm 全天巡天(2MASS)的 2MASS 点源星表(Point Source Catalog, PSC)和欧洲航天局(ESA)的 Hipparcos 星表,开发出 IR 星表。但 IR 星表限于短波红外波段(1~3 μm),对于我国地基红外探测系统红外探测波段集中的中波红外(3~5 μm),长波红外(8~10 μm),相关的恒星辐射数据、可用的星表仍为空白。我国现有地基红外辐射探测系统的探测波段以短波红外 1~3 μm 、中波红外 3~5 μm 、长波红外 8~10 μm 为主。据此,文中考察目前已公开的全空域巡天计划,分析选取 IRAS、WISE、2MASS、AKARI 4 个全空域巡天计划及其生成的点源星表,计算得到在对应波段 0 星等不同单位的辐射强度。综合考虑大气弥散、大气衰减的影响,计算系统的极限探测星等。搜索选取可供现有系统观测的恒星目标,包括目标的位置和测光信息。

1 红外全空域巡天任务

在红外波段,由于大气对红外辐射的吸收,导致

地基观测被限制在几个有限的波段,使得红外天基探测尤为重要。其中,红外全空域巡天探测所生成的红外星表,具有覆盖面大,观测空域不受限制的优势。文中根据现有系统的探测波段考察并选取目前已公开的全空域红外巡天计划:美国国家航空航天局(NASA)的 IRAS、WISE、2MASS 及日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)的 AKARI。在全空域巡天的红外星表中:在短波红外(1~3 μm)选取 2MASS 在 1.22 μm 、1.65 μm 、2.18 μm 生成的点源星表(PSC);在中波红外(3~5 μm)选取 WISE 在 3.4 μm 、4.6 μm 生成的全空域星表(All Sky Source Catalog);在长波红外(8~10 μm)选取 AKARI 在 9 μm 生成的点源星表(PSC)进行分析。

1.1 红外天文望远镜及红外星表

红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite, IRAS),红外天文卫星 IRAS^[4]是第一代天基红外望远镜,于 1983 年 1 月发射升空,在 12 μm 、25 μm 、60 μm 、100 μm 完成对 96%空域的搜索。IRAS 任务主要生成包括一个红外点源星表(PSC),一个小尺度结构星表(SSS),天空红外图像。其中红外点源星表(PSC)包含了 245 889 颗目标的位置和测光信息,小尺度结构星表包含了 16 740 颗目标的位置和测光信息。

大视场红外搜寻探测器(Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)^[5]于 2009-12-14 发射升空,在 3.4 μm 、4.6 μm 、12 μm 、22 μm 4 个波段完成了对 99%空域的搜索。WISE 全天搜索数据覆盖了大于 99%的空域,包含全天图像集包含 18 240 幅全波段 FITS 格式图像集,563、921、584 颗目标的位置和测光信息。

2 μm 巡天 2MASS(Two Micron All Sky Survey), 2MASS^[6]利用两台高度自动化望远镜,一台位于美国西南部亚利桑那州 Hopkins 山,一台位于智利 Tololo 山,在 J(1.25 μm)、H(1.65 μm)、Ks(2.17 μm)波段同时观测,覆盖了 99.998%的天空。2MASS 释放的全天释放数据包包含:一个包含 470、992、970 颗点源目标的位置和测光信息的点源星表,点源星表覆盖了 99.997%的天空;一个包含 1、647、599 颗展源目标的位置、测光和基本轮廓的展源星表(Extended Source Catalog, XSC);一个包含超过 4、121、439 幅 J, H 和 Ks 的 FITS 格式图像集。

红外天文卫星(AKARI)^[7]于 2006 年 2 月发

射, 在 9 μm 及 18 μm 波段对 96-97%的空域进行了两次以上的搜索。AKARI/IRC 点源星表 1.0 版本, 包括 870 973 个目标的位置和测光信息, 其中 844 649 个 9 μm 波段目标和 194551 个 18 μm 波段目标, 168227 个在两个波段都进行了探测的目标。

1.2 红外星等

恒星的红外辐射强度常用单位是 Jansky, 简称 Jy, 其中 1 Jy=10⁻²⁶ W·m⁻²·Hz⁻¹=F_v。F_λ 为某一波段的辐射强度:

$$F_v \cdot 10^{-26} \cdot c / \lambda^2 = F_\lambda \quad (1)$$

天文学中, 习惯用等效视星等来表示天体的亮度。视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, 两个天体星等和亮度, 有如下关系:

$$m_2 - m_1 = -2.5 \lg(E_2/E_1) \quad (2)$$

根据普森公式可得红外星等与辐射强度之间关系为:

$$F_v = F_0 \cdot 10^{-(m/2.5)} \quad (3)$$

根据已公布全空域搜索的红外星表及 0 星等的辐射强度 F₀, 计算得到对应的辐射强度 F_λ。根据公式(1)可将单位转换为常用红外辐射强度单位, 如表 1~3 所示。

表 1 IRAS 星表各波段 0 星等辐射强度

Tab.1 Zero-magnitude radiant intensity of IRAS catalog

Band/μm	Noncolor-corrected		Color-corrected	
	F _v /Jy	F _λ /W·cm ⁻² ·m ⁻¹	F _v /Jy	F _λ /W·cm ⁻² ·μm ⁻¹
12	40.141	8.363E-17	29.966	5.616E-17
25	8.886	4.265E-18	6.288	3.018E-18
60	1.447	1.206E-19	1.085	9.051E-20
100	0.421	1.264E-20	0.386	1.159E-20

表 2 WISE 星表各波段 0 星等辐射强度

Tab.2 Zero-magnitude radiant intensity of WISE catalog

Band/μm	F _v /Jy	F _λ /W·cm ⁻² ·μm ⁻¹
3.4	306.68	7.959E-15
4.6	170.66	2.410E-15
12	29.045	6.051E-17
22	8.28	5.132E-18

表 3 IRAS 和 AKARI 星表各波段 0 星等辐射强度
Tab.3 Zero-magnitude radiant intensity of 2MASS and AKARI catalog

	Band/μm	F _v /Jy	F _λ /W·cm ⁻² ·μm ⁻¹
2MASS	1.22	1 631	3.287E-13
	1.65	1 049.7	1.157E-13
	2.18	655	4.135E-14
AKARI	9	56.262	2.084E-16
	18	12.001	1.111E-17

2 红外辐射测量系统探测能力分析

2.1 探测器相关参数分析

空间目标在探测器靶面上成像为一弥散斑, 即爱里斑^[8]。像元尺寸对探测能力的影响主要体现在对点目标像点弥散斑大小的影响。爱里斑的线直径 δl 计算公式为:

$$\delta l = f' \cdot \Delta \theta = 2.44 \frac{\lambda f'}{D} = 2.44 \lambda F \quad (4)$$

式中: f' 为光学系统焦距; Δθ 为爱里斑的角直径; D 为光学系统口径。对于 F 数为 2 的光学系统, 短波、中波及长波红外的弥散斑直径分别不小于 15 μm、24 μm 和 49 μm。综合考虑大气扰动造成像点弥散, 探测器空间分辨率限制、衍射分辨极限和积分时间内像移造成的角弥散, 对于 F 数为 2 的光学系统对目标成像的弥散斑的直径短波不小于 39 μm、中波不小于 35 μm、长波不小于 58 μm。则对于短波、中波及长波红外的像元尺寸分别为 30 μm、15 μm 和 24 μm 的探测器, 满足目标最低所占像元数 2*2 要求, 即可以满足探测需要。

2.2 大气透过率分析

红外辐射在大气传输过程中受大气影响衰减, 影响红外辐射的精确测量。为了更精确获得红外透过率, 采用中国科学院安徽光学精密机械研究所提供的某地区不同季节红外短波、中波及长波波段大气透过率。如表 4~6 所示。

表 4 1~3 μm 波段不同仰角大气透过率

Tab.4 Atmospheric transmittance at different elevations at 1-3 μm

Observation elevation	Summer	Winter
	Transmittance	Transmittance
30°	0.50	0.59
45°	0.54	0.64
60°	0.56	0.66

表 5 3~5 μm 波段不同仰角大气透过率
Tab.5 Atmospheric transmittance at different elevations at 3-5 μm

Observation elevation	Summer	Winter
	Transmittance	Transmittance
30°	0.35	0.50
45°	0.41	0.55
60°	0.44	0.58

表 6 8~10 μm 波段不同仰角大气透过率
Tab.6 Atmospheric transmittance at different elevations at 8-10 μm

Observation elevation	Summer	Winter
	Transmittance	Transmittance
30°	0.46	0.62
45°	0.54	0.69
60°	0.58	0.72

2.3 不同波段的探测能力分析

红外辐射测量系统探测能力与单像元最低可探测辐射通量密切相关。单像元最低可探测辐射通量

$$\Phi_{\min} = \frac{\text{SNR}_{\min}}{D^*} (A_d \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中： SNR_{\min} 为最低信噪比； D^* 为探测率； A_d 为单元探测器面积； Δf 为探测器带宽（对于短、中波为 250 Hz，长波为 2 500 Hz）。

恒星通过光学系统到达探测器单元的辐射通量可由下式得到：

$$\Phi = \frac{\pi}{4n} E \tau_a \tau_m \tau_g D^2 (1 - Q^2) \quad (6)$$

式中： E 为恒星在大气层外的辐照度； τ_a 为大气透过率； τ_m 为光学系统透过率； τ_g 为衰减片透过率； Q 为遮拦比； D 为光学系统孔径； n 为恒星目标在探测器靶面的分散系数。则红外辐射测量系统的探测能力为：

$$E_{\min} = \frac{4n \text{SNR}_{\min} \sqrt{A_d \Delta f}}{\pi \tau_a \tau_m \tau_g D^* D^2 (1 - Q^2)} \quad (7)$$

对于短波红外像元尺寸为 30 μm ，光学系统透过率为 0.32，衰减片透过率为 1，光学系统口径为 1m，焦距为 2m，遮拦比为 1:3，探测器探测率为 $10^9 \text{mHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ ，目标所占像元数为 4，最低信噪比为 5。可计算出系统短波探测能力如表 7 所示。

表 7 1~3 μm 波段红外辐射测量系统最低探测能力
Tab.7 Minimum value of infrared radiation detection system at 1-3 μm

Observation elevation	Summer	Winter
	$E_{\min}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$E_{\min}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
30°	8.48×10^{-11}	7.19×10^{-11}
45°	7.85×10^{-11}	6.63×10^{-11}
60°	7.57×10^{-11}	6.43×10^{-11}

对于中波红外像元尺寸为 15 μm ，光学系统透过率 0.56，其他参数同上，可计算出系统中波探测能力见表 8。

表 8 3~5 μm 波段红外辐射测量系统最低探测能力
Tab.8 Minimum value of infrared radiation detection system at 3-5 μm

Observation elevation	Summer	Winter
	$E_{\min}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$E_{\min}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
30°	2.46×10^{-11}	2.43×10^{-11}
45°	2.96×10^{-11}	2.21×10^{-11}
60°	2.76×10^{-11}	2.09×10^{-11}

假设长波红外像元尺寸为 24 μm ，光学系统透过率 0.64，其他参数同上，可计算出系统长波探测能力为如表 9 所示。

表 9 8~10 μm 波段红外辐射测量系统最低探测能力
Tab.9 Minimum value of infrared radiation detection system at 8-10 μm

Observation elevation	Summer	Winter
	$E_{\min}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$E_{\min}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
30°	11.68×10^{-11}	8.66×10^{-11}
45°	9.95×10^{-11}	7.78×10^{-11}
60°	9.26×10^{-11}	7.46×10^{-11}

3 恒星的选取

根据已得到的地基红外辐射测量系统的极限探测能力及星表各波段 0 星等辐射强度，利用公式 (2) 计算得到在各自探测范围内星表的极限探测星等，如表 10~12 所示。

表 10 系统在 2MASS 的最低可探测星等

Tab.10 Magnitude of system minimum detective at 2MASS

Observation elevation	Summer			Winter		
	1.22 μm	1.65 μm	2.18 μm	1.22 μm	1.65 μm	2.18 μm
30°	4.72	3.59	2.47	4.90	3.77	2.65
45°	4.81	3.67	2.56	4.99	3.86	2.74
60°	4.85	3.71	2.60	5.02	3.89	2.77

表 11 系统在 WISE 的最低可探测星等

Tab.11 Magnitude of system minimum detective at WISE

Observation elevation	Summer		Winter	
	3.4 μm	4.6 μm	3.4 μm	4.6 μm
30°	2.03	0.73	2.04	0.744
45°	1.83	0.529	2.14	0.847
60°	1.90	0.605	2.20	0.907

表 12 系统在 AKARI 最低可探测星等

Tab.12 Magnitude of system minimum detective at AKARI

Observation elevation	Summer	Winter
	9 μm	9 μm
30°	-3.62	-3.29
45°	-3.44	-3.18
60°	-3.37	-3.13

根据上述计算的地基红外辐射测量系统在各星表波段最低可探测星等, 利用 NASA 红外数据处理分析中心(IPAC)公开的星表资料选取亮于系统最低探测星等的恒星目标。通过搜索, 在 2MASS 共选取 4 599 个恒星目标, 在 WISE 共选取 125 个恒星目标, 在 AKARI 共选取 1 个恒星目标。选取结果见表 13, 恒星的分布如图 1~3 所示。

表 13 搜索选取结果

Tab.13 Result of star catalog selected

Star catalog	Band / μm	Low limit/m	Result	Star catalog	Band / μm	Low limit/m	Result
2MASS	1.22	<4.72	4 599	WISE	3.4	<1.83	125
	1.65	<3.59			4.6	<0.529	
	2.18	<2.47			AKARI 9	<-3.62	

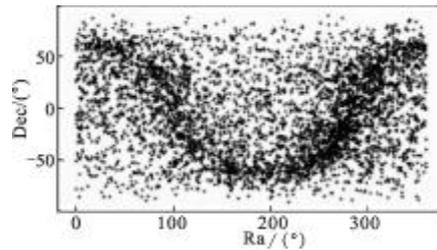


图 1 2MASS 选取的恒星的分布图

Fig.1 Maps of selected stars in 2MASS

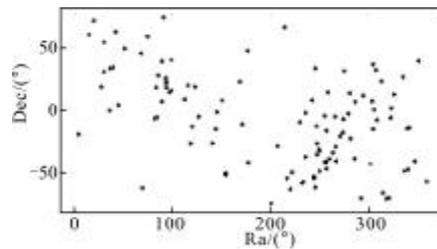


图 2 WISE 选取的恒星的分布图

Fig.2 Maps of selected stars in WISE

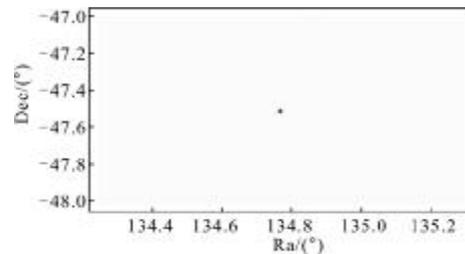


图 3 AKARI 选取的恒星的分布图

Fig.3 Maps of selected stars in AKARI

4 结 论

分析选取适合我国现有地基红外辐射测量系统的红外星表, 通过计算使得所选星表波段与现有系统波段相匹配, 从中选取可供系统观测研究恒星目标。结果表明现有系统在短波红外可观测到的恒星较多, 中波红外次之, 可满足观测和研究的需要。在长波红外, 可观测的恒星目标较少, 应进一步对相关红外巡天计划生成的红外星表在长波波段(8~10 μm)的恒星目标进行分析研究。

参考文献:

[1] Hao Yunxiang, Chen Zengsheng, Zhou keping. Introduction to Infrared Astronomy[M]. Beijing: Peking University Press, 1993. (in Chinese)

- 郝允详, 陈增生, 周克平. 红外天文学导论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1993.
- [2] Guo Ming, Wang Xuwei. IR modeling and simulation of space target/star and space environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 400-404. (in Chinese)
郭明, 王学伟. 空间目标/星空背景红外建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 400-404.
- [3] Werner M W, Roellig T L, Low F J, et al. The Spitzer space telescope mission [J]. *The Astrophysical Journal, Supplement Series*, 2004, 154: 1-9.
- [4] Neugebauer G, Habing H J, Van Duinen R, et al. The infrared astronomical satellite (IRAS) mission [J]. *The Astrophysical Journal*, 1984, 278: 1-6.
- [5] Wright Edward L, Peter R M Eisenhardt. The wide-field infrared survey explorer (WISE): mission description and initial on-orbit performance [J]. *The Astronomical Journal*, 2010, 140: 1868-1881.
- [6] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. The two micron all sky survey (2MASS) [J]. *The Astronomical Journal*, 2006, 131: 1163-1183.
- [7] Kataza H, Alfageme C, Cassatella A, et al. AKARI/IRC all-sky survey point source catalogue version 1.0 (Release Note (Rev.1))[EB/OL]. [Http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Observation](http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Observation), 2010.
- [8] Mu Da, Li Jinyong, Dong Jianing. Analysis on ground-based infrared detection system detecting the infrared magnitude of space targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1610-1613. (in Chinese)
牟达, 李金勇, 董家宁. 地基红外系统探测空间目标红外星等的分析 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1610-1613.