0254-6124/2023/43(5)-0916-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

GOU Wanxiang, JIA Jingyu, CHEN Shaojie, LI Chonghui, ZHENG Yong. Calculation Method for Response Band Magnitude of Aerospace Sensors (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(5): 916–926. DOI:10.11728/cjss2023.05.2023–0046

航天传感器响应波段星等计算方法*

勾万祥 贾靖玉 陈少杰 李崇辉 郑 勇

(信息工程大学地理空间信息学院 郑州 450001)

摘 要 精确的恒星星等信息是开展导航星表建立、航天器定姿、红外相机定标等工作的基础，现有公开星表涵盖测光波段不全且带宽普遍较窄，难以找到与任务传感器响应波段相匹配的星等信息。为此提出了一种基于恒星辐射光谱的传感器响应波段星等计算方法。该方法利用公开星表数据信息，建立星表测光波段与传感器响应波段星等差值模型，对星表星等与传感器响应波段星等差值进行估算；将色指数计算的恒星近似表面温度作为先验信息，在传感器响应波段区间进行普朗克方程求解，进而推算恒星在传感器响应波段的星等。星表数据计算验证表明，该方法具有较好的稳健性和适应性，对传感器响应波段星等推导精度为 0.066 等 （1δ），93.3% 恒星推算误差优于 0.2 等，可满足导航星表建立、航天器定姿、红外相机定标等应用需求。

关键词 星等，色指数，传感器，响应波段，黑体辐射，辐流量

中图分类号 V19

Calculation Method for Response Band Magnitude of Aerospace Sensors

GOU Wanxiang JIA Jingyu CHEN Shaojie

LI Chonghui ZHENG Yong

(*School of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou* 450001)

Abstract Accurate stellar magnitude information is the foundation for conducting navigation star catalog establishment, spacecraft attitude determination, infrared camera calibration, and other work. The existing public star catalogs do not cover all the photometry bands and the bandwidth is generally narrow, making it difficult to find magnitude information that matches the response bands of the mission sensors. A method for calculating the magnitude of sensor response bands based on stellar radiation spectra is proposed. This method utilizes publicly available catalog data information to establish a model for the magnitude difference between the photometry band of the catalog and the sensor response band, and estimates the magnitude difference between the catalog magnitude and the sensor response

* 河南省自然科学基金项目资助（212300410421）

2023-04-20 收到原稿，2023-05-25 收到修定稿

E-mail：mengwa201611@163.com. 通信作者 李崇辉，E-mail：13525504183@126.com

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

band. Using the approximate surface temperature of the star calculated by the color index as prior information, the Planck equation is solved in the sensor response band range to calculate the magnitude of the star in the sensor response band. The verification of star catalog data calculation shows that the method has good robustness and adaptability, and the star magnitude derivation accuracy of sensor response band is 0.066 magnitude (1δ), 93.3% of the star estimation error is better than 0.2 magnitude, which can meet the needs of navigation star catalog establishment, spacecraft attitude determination, infrared camera calibration, and other applications.

Key words Magnitude, Color index, Sensors, Response band, Black-body radiation, Radiation flux

0 引言

恒星星等是表征恒星明暗程度的重要指标,广泛应用于卫星定标星遴选、天文导航算法优化、星敏感器导航星表建立等工作中[1–3]。受恒星温度、大小、距地距离等因素综合影响,恒星星等在不同波段存在明显的差异[4]。若采用与传感器响应波段不匹配的测光波段星等,易引起恒星的错选漏选,进而导致星图识别失败、识别错误。然而传感器响应波段多由探测目标的特征确定,响应波段复杂多元,很难从现有星表中找到与之匹配的测光波段星等信息。例如全天时星敏感器响应波段多为 0.9～1.7 μm[5],红外预警卫星传感器响应波段多为 3～5 μm[6],现有星表仅给出 J 波段(1.25 μm)、H 波段(1.65 μm)及 3.35 μm 波段、4.60 μm 波段等特定测光波段的星等信息,无论采用哪个波段星等值都可能存在较大误差。因此,精确确定恒星在传感器响应波段星等信息是航天探测的重要基础工作之一[7,8]。

为精确计算传感器响应波段的星等信息,有关基于恒星固有属性的研究不断深入。Van Der Bliek 等[9] 在欧空局红外空间天文台 (ISO)项目中,提出红外流量法(IRFM)推求恒星温度,进而计算恒星在指定波段的星等。该方法对 4000～10000 K 温度的恒星有较好效果,对其他温度恒星精度不佳[10]。Kurucz 在研究恒星大气模型时,进一步提出利用恒星温度、表面重力场和金属丰度等参数拟合恒星光谱模型,模型推算星等误差普遍小于 5%[4]。该方法虽然有很高的精度,但需要恒星温度、金属丰度、表面重力场等大量基础数据作为支撑,无法开展批量推算。Strunz 和 Kruzhilov 等[8,11,12] 分别基于大量恒星星等数据构建了恒星色指数与星敏感器传感器响应波段星等拟合方程,但拟合方程精度与恒星色指数强相关,仅对指定色指数区间的恒星有较好效果。Zhang 等[13] 在气象卫星传感器辐射定标中,利用星表测光星等对应的辐流量信息,提出基于黑体辐射的恒星星等外推计算方法,但该方法需求解关于普朗克公式的超越方程组,方程解算困难,存在多解与无解现象。Wang 等[14] 利用恒星在多个测光波段星等辐流量信息,组成恒星黑体辐射超定方程组进而求解恒星在指定波段的星等,但该方法采用单一色温度拟合恒星辐射曲线,忽略了恒星在不同波段对应色温明显不同的问题,可能导致解算精度下降甚至解算失败,且该方法并没有从根本上解决超越方程难解问题。

本文针对目前传感器响应波段星等推算方法存在的需求信息多、使用范围窄、推算精度低等问题,通过分析恒星辐射光谱特点,建立了已有星表测光波段与传感器响应波段星等差值模型,并对现有公开星表测光波段进行梳理汇总;针对恒星在不同波段色温度变化特点,提出择优选取两个测光波段星等能量数据,以恒星色指数计算的恒星近似表面温度作为恒星色温初值,有效解决了超越方程解算困难问题;利用公开星表数据对本文所提方法进行了计算验证。

1 恒星星等与波段关系

星等作为表征恒星明暗程度的物理量,具有严格的定义标准。最初天文学家 Pogson 在建立普森公式时,提出将织女星(Vega)对应波段光谱辐流量大小定义为该波段的 0 星等标准,即 Vega magnitude[15]。但是随着天文测光精度的提高,发现 Vega 可能是一颗造父变星,不能满足 0 星等绝对定标精度的要求[16]。因此,不同天文星表通常基于项目观测仪器、滤光片带宽、观测位置等因素建立符合项目实际的绝对 0 星等标准[17,18],例如 Johnson 的 11 色测光系统、SDSS

项目的 Ugriz 测光系统、2 MASS 项目的 JHK 测光系统等。其大都是 Vega magnitude 的延续，0 星等定标辐射流量与 Vega 相应波段辐射流量相差不大[19–22]。表 1 列出常用的 Johnson 测光系统部分参数[23,24]，表 1 中 U～K 为测光波段名称，对应波段 0 星等流量近似为半波带宽乘以有效波长辐射流量[25]，相关名词概念、定义及其关系可参见文献 [25, 26]。

传感器依据接收到的恒星辐流量计算恒星的星等，若恒星辐流量为F_1，对应波段 0 等星辐流量为F_0，则依据普森公式可计算恒星星等为[27]

$$m = -2.5 \lg \frac{F_1}{F_0}. \tag{1}$$

由式(1)可知，恒星的星等m与 0 星等定义辐射流量F_0及传感器实际接收辐流量F_1有关。

由于恒星温度不同，恒星的辐射光谱曲线也不同[28]，综合恒星大小、距地距离等因素，不同恒星在不同波段的星等可能相差较大。表 2 给出了 Hipparcos 星表中部分恒星在不同测光波段的星等。

由于同一颗恒星在不同波段星等差主要与恒星温度有关，因此天文学上通常使用恒星在两个测光波段的星等差即色指数来表征恒星的温度[29]。常用的色指数 C定义为恒星照相星等$m_{\rm p}$和目视星等$m_{\rm v}$之差，即$C = m_{\rm p} - m_{\rm v}$。研究表明，恒星表面温度$T'$与色指数 C的近似关系为

$$T' = \frac{7200}{C + 0.64}. \tag{2}$$

式(2)为经验公式，除 O，B 型恒星外的绝大多数恒星表面温度均符合该公式[26]。文献 [8] 和 [12] 利用大量恒星色指数数据对经验公式进行进一步拟合、精化，构建传感器响应波段星等与恒星色指数的函数关系。由于恒星表面温度与色指数关系复杂，不同温度、结构、化学成分的恒星表面温度很难依靠单一拟合公式达到理想的推算精度[26]，例如文献 [8] 针对 BV 色指数构建的传感器响应波段星等多项式函数，对部分色指数小于 1.2 个星等的恒星有较好推算效果，但当恒星色指数超过 1.2 个星等时精度会严重下降。

2 恒星辐射光谱特点

将恒星辐射光谱近似视为黑体辐射光谱是天文学上典型的做法，也是进行恒星星等外推计算的理论基础[30]。色温为 T的恒星在对应波段发射的光谱辐流量可利用普朗克黑体辐射公式进行计算[31]，具体如下：

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (\mathrm{e}^{hc/(\lambda kT)} - 1)}. \tag{3}$$

式中，h为普朗克常量，其值为$6.62606876 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$；$k$为玻尔兹曼常量，值为$1.380658 \times 10^{-23}\ \mathrm{J \cdot K^{-1}}$。

恒星是理想的朗伯体，可通过光谱辐流量求得恒

表 1 Johnson 测光系统部分参数

Table 1 Partial parameters of Johnson photometry system

测光波段	U	B	V	R	I	J	H	K
有效波长/μm	0.366	0.438	0.545	0.641	0.798	1.22	1.63	2.19
半波带宽/μm	0.066	0.094	0.088	0.138	0.149	0.213	0.307	0.390
0星等辐流量/(10^{-14} W·cm^{-2}·μm^{-1})	417.5	632	363.1	217.7	112.6	31.47	11.38	3.961

表 2 同一恒星不同波段星等差异

Table 2 Different band magnitudes of the same star

恒星HIP编号	测光波段					
	B	V	R	I	J	H
21479	7.32	5.87	5.06	4.39	–2.62	–3.73
32349	–1.46	–1.46	–1.46	–1.43	–1.36	–1.33
34444	2.69	1.91	1.43	1.05	0.77	0.54
78265	2.66	2.83	2.91	3.08	3.47	3.5
91262	0.03	0.03	0.07	0.10	–0.18	–0.03

星的辐射光谱通量密度为[26]

$$F(\lambda,T)=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5(\mathrm{e}^{hc/(\lambda kT)}-1)}=\frac{C_1}{\lambda^5(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda T)}-1)}. \tag{4}$$

式中，$C_1=2\pi c^2=3.7427\times10^8\ \mathrm{W}\cdot\mu\mathrm{m}^4\cdot\mathrm{m}^{-2}$为第一辐射常数，$C_2=hc/k=14388\ \mu\mathrm{m}\cdot\mathrm{K}$。

由式(4)可知，恒星辐射光谱曲线主要受恒星色温度影响，不同色温度的恒星在不同波段辐流量有明显差距，如图 1 所示。

设恒星半径为R_s，距地球距离为L，可推得地球大气层外接收恒星光谱辐流量为[30]

$$\begin{aligned}F_{\mathrm{earth}}&=\frac{F(\lambda,T)\cdot4\pi R_s^2}{4\pi L^2}=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5(\mathrm{e}^{hc/(\lambda kT)}-1)}\frac{R_s^2}{L^2}=\\&\frac{A}{\lambda^5}\frac{1}{(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda T)}-1)},\\A&=\frac{2\pi hc^2R_s^2}{L^2}.\end{aligned} \tag{5}$$

由式(5)可知，虽然恒星在各波段辐流量受到恒星温度、半径、距地距离的综合影响，但对于同一颗恒星，光谱辐流量表达式中仅存在未知数 T 和 A，理论上利用恒星在不同波段的能量值F_{earth}，即可联立方程求出恒星温度 T 及参数 A。但式(5)为超越方程，其解算十分复杂，常出现多值解、无解等情况。文献 [13] 通过给定不同初始温度 T 进行测试，将普朗克公式在初始温度为 7000 K 处泰勒展开至 30 项进行逼近求解，对 WISE 星表中遴选的 1000 颗恒星取得了较好的推算结果。但是这种遴选恒星的测试方法取得的解算精度具有很大偶然性，结果也缺乏说服力。

由于恒星实际辐射光谱十分复杂，不仅受恒星温度影响，还与恒星结构、大小、金属丰度、表层大气等因素有关，加之巴尔末跳变等现象，恒星实际辐射并不完全符合黑体辐射[32,33]。图 2[34] 为典型的低温、高温恒星与黑体辐射曲线的拟合示意。由图 2 可知，虽然从整体上看恒星辐射可近似视为黑体辐射，但在不同波段处恒星对应的色温存在明显不同。文献 [14] 采取联立恒星多个波段星等能量数据，使用单一色温的黑体辐射曲线拟合整个恒星的辐射光谱，必然造成精度下降甚至拟合失败。

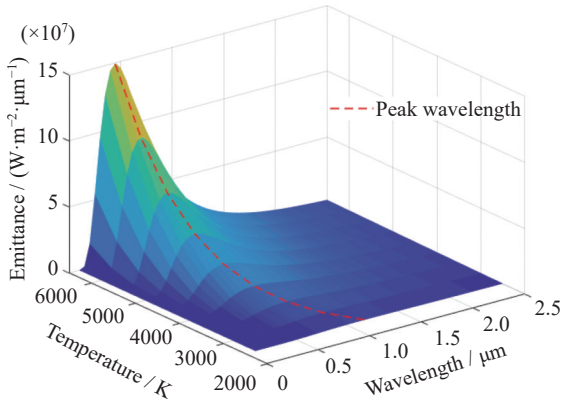


图 1 黑体辐射光谱流量

Fig. 1 Blackbody radiation spectral flow diagram

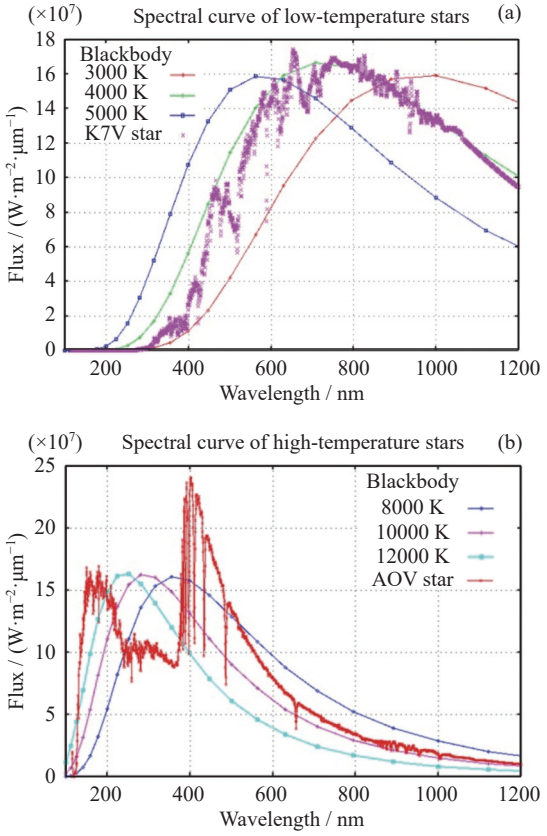


图 2 恒星辐射光谱

Fig. 2 Schematic diagram of stellar spectral radiation

3 基于恒星辐射光谱的星等计算方法

3.1 计算原理

星表星等数据是在测光波段对恒星直接进行观测获取的星等信息，具有很高的精度，由于恒星不能视为绝对黑体，依据已知恒星测光星等数据，单纯采用色指数拟合、黑体辐射方程求解等传统方法进行星等推算很难获得较高精度。因此求解传感器响应波

段星等信息的思路可归纳为: 首先在星表中寻找与传感器响应波段相关的测光波段, 计算恒星在对应波段的星等差值; 如果星表中没有匹配的测光波段星等信息, 再综合恒星色指数信息在传感器响应波段区间进行普朗克方程求解。该方法既充分利用星表已有的高精度测光星等数据, 又克服了小区间普朗克方程解算困难、多波段解算精度下降等问题。

虽然恒星在不同波段对应不同的色温度, 但其总在恒星实际温度相接近的范围内缓慢变化, 在一定波段区间内恒星的色温度可视为不变。若恒星温度为T, 星表测光波段为$[\lambda_1,\lambda_2]$, 则恒星星等由下式确定:

$$m=-2.5\lg\frac{F_{\rm star}}{F_{\rm zero}}=-2.5\lg\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}F(\lambda,T)S(\lambda){\rm d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}F_0(\lambda,T)S(\lambda){\rm d}\lambda}. \tag{6}$$

式中, $F_{\rm star}$为星表测光传感器接收到的恒星辐流量, $F_{\rm zero}$表示以标准星确定的 0 星等接收辐流量, $S(\lambda)$为传感器光谱响应函数。对传感器接收的恒星辐射流量在有效波长$\lambda_{\rm eff}$处进行泰勒展开, 有

$$\begin{aligned}F_{\rm star}=&\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}(F(\lambda_{\rm eff},T)+F'(\lambda_{\rm eff},T)(\lambda-\lambda_{\rm eff})+\\&F''(\lambda_{\rm eff},T)(\lambda-\lambda_{\rm eff})^2+\ldots)S(\lambda){\rm d}\lambda=\\&F(\lambda_{\rm eff},T)\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda){\rm d}\lambda+F'(\lambda_{\rm eff},T)\cdot\\&\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}(\lambda-\lambda_{\rm eff})S(\lambda){\rm d}\lambda+\\&F''(\lambda_{\rm eff},T)\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}(\lambda-\lambda_{\rm eff})^2S(\lambda){\rm d}\lambda+\ldots\end{aligned} \tag{7}$$

有效波长定义为

$$\lambda_{\rm eff}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\lambda S(\lambda){\rm d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda){\rm d}\lambda}. \tag{8}$$

则式(7)可进一步整理得

$$\begin{aligned}F_{\rm star}=&F(\lambda_{\rm eff},T)\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda){\rm d}\lambda+\\&F''(\lambda_{\rm eff},T)\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}(\lambda-\lambda_{\rm eff})^2S(\lambda){\rm d}\lambda+\ldots=\\&F(\lambda_{\rm eff},T)\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda){\rm d}\lambda+\varepsilon_2.\end{aligned} \tag{9}$$

式中ε_2表示二次及以上展开项, 数值较小, 近似计算时可以忽略。恒星在传感器响应波段 $[\lambda_1',\lambda_2']$ 的星等与恒星在星表测光波段 $[\lambda_1,\lambda_2]$ 处的星等差值为

$$\begin{aligned}\Delta_{\rm mag}=&2.5\lg\frac{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'}F(\lambda,T)S'(\lambda){\rm d}\lambda}{F'_{\rm zero}}-\\&2.5\lg\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}F(\lambda,T)S(\lambda){\rm d}\lambda}{F_{\rm zero}}=-\\&2.5\lg\frac{F(\lambda_{\rm eff},T)}{F(\lambda'_{\rm eff},T)}-\\&2.5\lg\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda){\rm d}\lambda}{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'}S'(\lambda){\rm d}\lambda}-2.5\lg\frac{F'_{\rm zero}}{F_{\rm zero}}.\end{aligned} \tag{10}$$

式中, F_0'为目标波段 0 星等辐流量, $\lambda'_{\rm eff}$为目标波段有效波长 。由于航天工程应用的传感器一般为宽带滤光, 设计的光学响应波段具有高量子效率, 因此传感光谱响应函数$S'(\lambda)$可视为常值S'。式(10)可进一步简化为

$$\begin{aligned}\Delta_{\rm mag}=&2.5\lg\frac{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'}F(\lambda,T)S'(\lambda){\rm d}\lambda}{F'_{\rm zero}}-\\&2.5\lg\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}F(\lambda,T)S(\lambda){\rm d}\lambda}{F_{\rm zero}}=-\\&2.5\lg\left(\frac{F(\lambda_{\rm eff},T)\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda){\rm d}\lambda}{S'\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'}F(\lambda,T){\rm d}\lambda}\right)-\\&2.5\lg\frac{F'_{\rm zero}}{F_{\rm zero}}.\end{aligned} \tag{11}$$

由于准确测量传感器响应波段有效波长较为困难, 实际可用波段中心波长替代[25]。令$\lambda_{\rm n}$为目标波段$[\lambda_1',\lambda_2']$ 中心波长$(\lambda_1'+\lambda_2')/2$, 则有

$$\begin{aligned}\Delta_{\rm mag}=&-2.5\lg\left[\frac{F(\lambda_{\rm eff},T)}{F(\lambda_{\rm n},T)}\frac{F(\lambda_n,T)(\lambda_2'-\lambda_1')}{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'}F(\lambda,T){\rm d}\lambda}\right.\\&\left.\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda){\rm d}\lambda}{S'(\lambda_2'-\lambda_1')}\frac{F_{\rm zero}}{F'_{\rm zero}}\right]=-\\&2.5\lg\frac{F(\lambda_{\rm n},T)(\lambda_2'-\lambda_1')}{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'}F(\lambda,T){\rm d}\lambda}-\\&2.5\lg\frac{F(\lambda_{\rm eff},T)}{F(\lambda_{\rm n},T)}-2.5\lg\frac{F_{\rm zero}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda){\rm d}\lambda}{F'_{\rm zero}S'(\lambda_2'-\lambda_1')}=\\&\Delta_{\rm mag1}+\Delta_{\rm mag2}+\Delta_{\rm mag3};\\&\Delta_{\rm mag1}=-2.5\lg\frac{F(\lambda_{\rm n},T)(\lambda_2'-\lambda_1')}{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'}F(\lambda,T){\rm d}\lambda},\end{aligned}$$

$$\Delta_{\mathrm{mag2}} = -2.5\lg\frac{F(\lambda_{\mathrm{eff}},T)}{F(\lambda_{\mathrm{n}},T)},$$

$$\Delta_{\mathrm{mag3}} = -2.5\lg\frac{F_{\mathrm{zero}}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{F'_{\mathrm{zero}}S'(\lambda'_2-\lambda'_1)}. \tag{12}$$

式(12)即为恒星在星表测光波段与传感器响应波段星等差值模型, 当不考虑传感器光谱响应度影响时, $S'(\lambda)$可直接取 1。式中Δ_{mag3}为 0 等星标准、光谱响应效率差异等引起的固定差值量, 数值较小且并不影响恒星相对星等计算, 因此以星表测光波段星等作为传感器响应波段, 星等存在的误差可分解为黑体辐射线性近似误差Δ_{mag1}和中心波长与测光有效波长偏置误差Δ_{mag2}两项。

为定量分析以星表测光波段星等作为传感器响应波段星等存在的误差, 设恒星在目标波段对应色温 T 为 10000℃, 按照中心波长λ_{n}=500～10000 nm, 带宽$\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1$=100～1000 nm, 计算中心波长$\lambda_{\mathrm{n}}$处的辐流量, 作为恒星在$[\lambda_1,\lambda_2]$整个波段辐流量均值产生的星等误差$\Delta_{\mathrm{mag1}}$, 如图 3(a)所示; 取中心波长$\lambda_{\mathrm{n}}$=600～10000 nm, 传感器响应波段中心波长与星表测光波段有效波长差值$\lambda_{\mathrm{n}}-\lambda_{\mathrm{eff}}$=−100～100 nm, 传感器响应波段中心波长与测光有效波长偏置产生的星等误差Δ_{mag2}如图 3(b)所示。

由图 3 可知, 在仿真波段区间内, 大多数情况星等差值Δ_{mag1}和Δ_{mag2}均在 0.1 个星等以内, 传感器响应波段中心波长λ_{n}越长, 带宽$\Delta\lambda$越窄, 中心波长λ_{n}与星表测光波段有效波长λ_{eff}越接近, 采用星表测光星等作为传感器响应波段星等产生的误差越小。由图 3(a)可以看出, 当带宽为 500 nm, 中心波长为 1000 nm, 黑体辐射线性近似产生的星等误差Δ_{mag1}为 0.1 个星等; 当中心波长超过 4000 nm, 带宽小于 1000 nm 时, 黑体辐射线性近似产生的星等误差Δ_{mag1}小于 0.05 个星等; 由图 3(b)可知, 当中心波长为 1000 nm, λ_{n}与λ_{eff}偏置误差为 50 nm 时, 由中心波长偏置引起的星等误差为 0.1 个星等; 当中心波长大于 5000 nm, 偏置误差小于 100 nm 时, 中心波长偏置引起的星等误差小于 0.05 个星等。目前各星表提供的恒星测光星等误差一般都在 0.1 等以内[20,35–38], 而对于定标星遴选、星等排序、导航星表建立等工作, 恒星星等精度达到 0.3 等即可满足要求[39,40]。通过对公开星表信息调研统计可知, 在短波区间恒星测光数据较为密集, 在长波区间较为稀疏。表 3[26,35,37,41] 列出了常用公开星表测光波段数据。

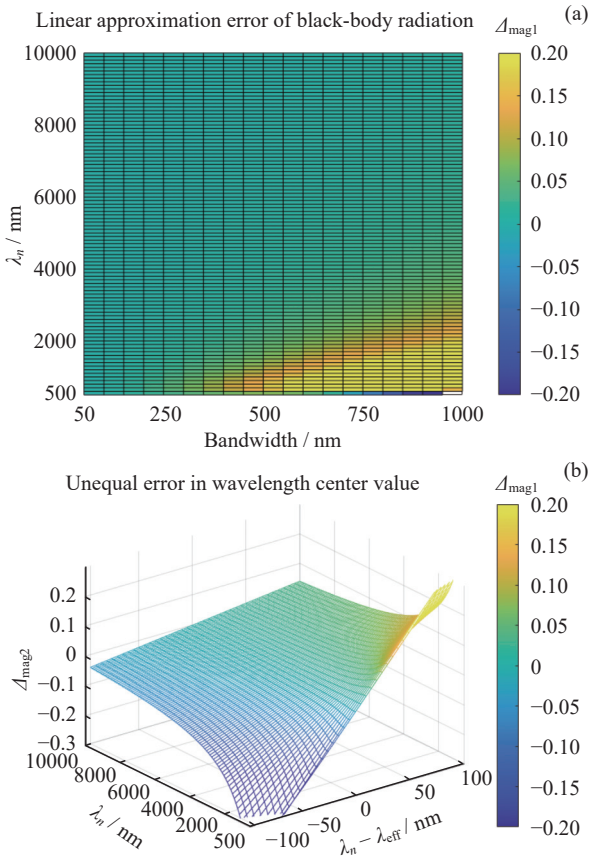


图 3 星表测光波段与传感器响应波段星等差值

Fig. 3 Difference in magnitude between the photometry band of the star catalog and the sensor response band

若在现有星表中无法找到满足星等误差小于 0.2 的测光波段, 则需利用恒星黑体辐射性质计算恒星在传感器响应波段的星等。由于基于黑体辐射的超越方程组存在多值解或者无解等问题, 可先使用恒星的色指数计算恒星表面近似温度T', 在T'处对式(5)进行泰勒展开并选择与T'值最接近的解作为恒星在该波段对应色温 T, 进而推求恒星指定波段星等。具体恒星传感器响应波段的星等推算流程如图 4 所示。

3.2 具体步骤

步骤 1 取λ_{n}为传感器响应波段 $[\lambda_1,\lambda_2]$ 的中心波长值, 根据普朗克公式分别计算恒星在中心波长λ_{n}处光谱辐流量$F_{\mathrm{star}}(\lambda_{\mathrm{n}},T)$和 $[\lambda_1,\lambda_2]$ 波段区间辐流量$F_{\mathrm{star}}(T)$, 其分别为

表 3 部分星表测光波段数据

Table 3 Partial photometric band data of open star catalog

星表	滤光片	有效波长/μm	半波带宽/μm
Hipparcos	Hp	0.550	0.225
Tycho	B_T	0.420	0.075
	V_T	0.510	0.100
SDSS	u	0.352	0.063
	g	0.480	0.141
	r	0.625	0.139
	i	0.769	0.154
	z	0.911	0.141
PAN-STARRS	Ps1 g	0.484	0.105
	Ps1 r	0.620	0.125
	Ps1 w	0.629	0.256
	Ps1 open	0.694	0.398
	Ps1 i	0.753	0.121
	Ps1 z	0.868	0.099
	Ps1 y	0.963	0.064
2 MASS	J	1.236	0.162
	H	1.662	0.251
	K	2.159	0.262
GAIA	Gbp	0.504	0.233
	G	0.585	0.420
	Grp	0.769	0.284
WISE	W1	3.353	0.663
	W2	4.603	1.042
	W3	11.561	5.506
	W4	22.088	4.102
IRAS	IRAS 12 μm	10.164	6.067
	IRAS 25 μm	21.735	10.018
	IRAS 60 μm	52.137	30.516
	IRAS 100 μm	95.484	33.265

$$F_{\rm star}(\lambda_{\rm n},T)=\frac{C_1}{\lambda n^5(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda_{\rm n}T)}-1)},$$
$$F_{\rm star}(T)=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}F(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda=\overline{F}_{\rm star}(\lambda,T)(\lambda_2-\lambda_1). \tag{13}$$

式中$\overline{F}_{\rm star}(\lambda,T)$表示恒星在 $[\lambda_1,\lambda_2]$ 波段光谱辐流量积分均值。

步骤 2 根据式(12)计算以$\lambda_{\rm n}$处光谱流量值$F_{\rm star}(\lambda_{\rm n},T)$作为恒星在 $[\lambda_1,\lambda_2]$ 区间光谱辐流量均值产生的星等误差, 即

$$\Delta_{\rm mag1}=-2.5\lg\frac{F_{\rm star}(\lambda_{\rm n},T)(\lambda_2-\lambda_1)}{\overline{F_{\rm star}(\lambda,T)}(\lambda_2-\lambda_1)}=$$
$$-2.5\lg\frac{\dfrac{C_1\Delta\lambda}{\lambda_{\rm n}^5(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda_{\rm n}T)}-1)}}{\displaystyle\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{C_1}{\lambda^5(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda T)}-1)}\mathrm{d}\lambda}. \tag{14}$$

式中$\Delta\lambda$为传感器响应波段 $[\lambda_1,\lambda_2]$ 的带宽。

步骤 3 若$\Delta_{\rm mag1}$小于设定阈值 0.2, 则在星表测光波段中寻找最接近$\lambda_{\rm n}$值的测光波段, 计算恒星在该测光波段有效波长$\lambda_{\rm eff}$处与中心波长$\lambda_{\rm n}$处对应的星等差值:

$$\Delta_{\rm mag2}=-2.5\lg\frac{\dfrac{C_1}{\lambda_{\rm eff}^5(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda_{\rm eff}T)}-1)}}{\dfrac{C_1}{\lambda_{\rm n}^5(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda_{\rm n}T)}-1)}}=$$
$$-2.5\lg\frac{\lambda_{\rm n}^5(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda_{\rm n}T)}-1)}{\lambda_{\rm eff}^5(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda_{\rm eff}T)}-1)}. \tag{15}$$

步骤 4 计算以星表测光波段星等作为传感器响应波段$[\lambda_1,\lambda_2]$星等产生的星等误差为$\Delta_{\rm mag1}+\Delta_{\rm mag2}$。不同温度恒星对应的$\Delta_{\rm mag1}+\Delta_{\rm mag2}$值会有微小差别, 由于恒星温度普遍在 2000～20000 K 内[42], 计算时恒星温度 T可取 10000 K。

步骤 5 若步骤 4 计算$\Delta_{\rm mag1}+\Delta_{\rm mag2}$小于 0.2, 则恒星在传感器响应波段 $[\lambda_1,\lambda_2]$ 的星等为

$$m_{\rm s}=m-\Delta_{\rm mag3}=m+2.5\lg\frac{F_{\rm zero}\displaystyle\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{F'_{\rm zero}S'(\lambda'_2-\lambda'_1)}. \tag{16}$$

其中m为星表测光波段星等。若$\Delta_{\rm mag1}+\Delta_{\rm mag2}$大于 0.2, 则进入第 6 步。

步骤 6 根据星表中恒星色指数, 按照经验式(4)计算恒星近似表面温度T', 并将普朗克公式中$\mathrm{e}^{C_2/\lambda T}$在$T'$值处泰勒展开为 30 项。

步骤 7 在星表中寻找有效波长在 $[\lambda_1,\lambda_2]$ 附近的所有测光波段, 分别选择有效波长与λ_1, λ_2最接近的两个测光波段λ_i, λ_j, 计算测光波段星等对应的能量值F_i, F_j。依据式(5)构建方程组, 有

$$F_i=\frac{A}{{\lambda_i}^5}\frac{1}{(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda_iT)}-1)},$$
$$F_j=\frac{A}{{\lambda_j}^5}\frac{1}{(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda_jT)}-1)}. \tag{17}$$

对超越方程组式(17)进行求解, 取与恒星近似表面温度T'最接近的色温度 T为恒星温度, 可以推算恒星在

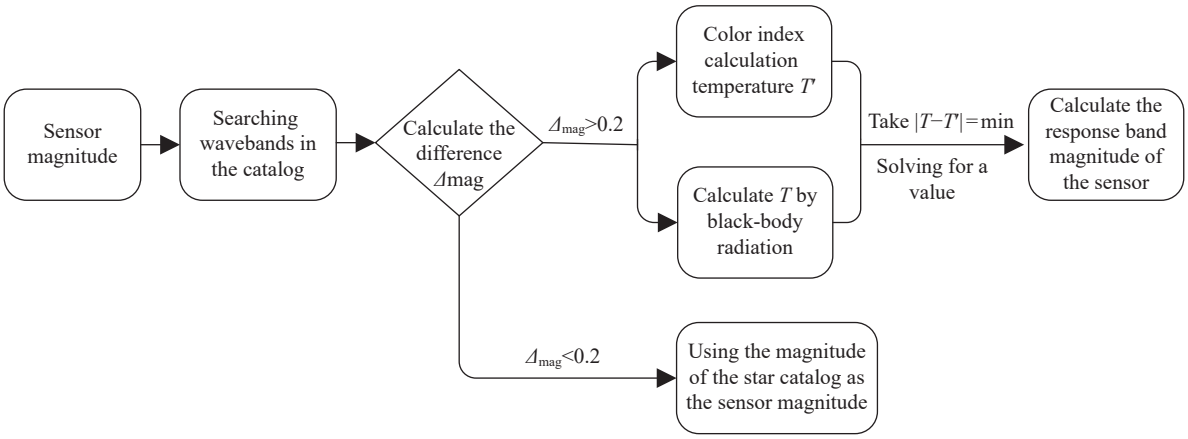


图 4　恒星传感器响应波段星等计算流程

Fig. 4　Flow chart of star sensor response band magnitude calculation

$[\lambda_1, \lambda_2]$波段到达地球的辐流量。

步骤 8　计算 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 波段 Vega 辐射流量, 作为该波段 0 等星辐流量基准, 按照

$$m = -2.5\lg \frac{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} \frac{A}{\lambda^5} \frac{S'(\lambda)}{(\mathrm{e}^{C_2/(\lambda T)} - 1)} \mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} F_{\mathrm{vega}} S'(\lambda) \mathrm{d}\lambda} \tag{18}$$

可以计算待测恒星传感器响应波段星等。

4　实际星表验证

4.1　星表测光波段与仪器响应波段星等误差模型验证

Hipparcos 星表 H_p 波段为宽带宽测光波段, (H_p 小于 9 等, 星等精度优于 0.0015[43]), 半波带宽为 225 nm, 有效波长为 550 nm, 因此该波段星等可近似视为恒星 438～663 nm 波段星等[25]; Tycho 星表 V_T 波段为中带宽测光 (V_T 小于 9 等, 星等精度优于 0.0013[44]), 半波带宽为 100 nm, 有效波长为 510 nm[26]。代入式(12)计算可知, 以 Tycho 星表 V_T 波段星等作为恒星在 411～645 nm 波段的星等, 误差为 0.19 个星等。GAIA 星表中 G 波段为宽带宽测光波段(G 小于 13 等, 星等精度优于 0.02[45]), 半波带宽为 420 nm, 有效波长为 585 nm, 可近似视为恒星 375～795 nm 波段的星等, USNO 星表中 R 波段为窄波段测光波段(星等精度优于 0.03[46]), 半波带宽为 125 nm, 有效波长为 625 nm[47], 代入式(12)计算可知, 以 USNO 星表 R 波段星等作为恒星在 375～795 nm 波段的星等, 误差为 0.30 等。

随机选取 Hipparcos 星表中 30000 颗恒星, 统计恒星在 Hipparcos 星表中 H_p 波段星等与 Tycho 星表中 V_T 波段星等差值, 如图 5(a)所示; 随机选取 GAIA 星表中 30000 颗恒星, 统计恒星在 GAIA 星表中 G 波段星等与 USNO 星表中 R 波段星等差值, 如图 5(b)所示。

对于图 5(a), 取恒星在有效波长为 510 nm 的测光波段星等为恒星 438～663 nm 波段星等, 星等误差小于预估值 0.19 的占 96.9%, 小于 0.5 个星等的占 99.7%, 平均误差为 0.05 个星等, 方差为 0.08 个星等。对于图 5(b), 取恒星在有效波长为 624 nm 的测光波段星等为恒星 375～795 nm 波段的星等, 星等误差小于预估值 0.30 的占 93.4%, 小于 0.5 个星等的占 98.3%, 平均误差为 0.16 个星等, 方差为 0.15 个星等。具体见表 4。

由表 4 可知, 将传感器响应波段星等与星表测光波段星等差值分解为黑体辐射线性化误差、中心波长与有效波长偏置误差的计算模型, 可以很好地评估采用星表测光波段星等作为传感器响应波段星等的误差。实际星等误差大部分小于模型预测值, 分析其原因, 一是实际恒星温度多在 6000 K 以下, 采用 10000 K 的温度值计算模型误差变大; 二是星表测光星等为恒星在带宽区间积分能量对应星等; 三是部分特殊恒星辐射光谱与黑体辐射光谱差距较大。

如图 5 所示, 星表星等差值 Δ_{mag} 存在明显的系统性, 这是不同测光波段 0 等星标准、光谱响应函数不同误差 Δ_{mag3} 和测光波段有效波长不同误差 Δ_{mag2} 系统性引起的。通过对比图 5(a)与(b)可以发现, 随着

表 4 星表对应波段星等差值统计

Table 4 Magnitude differences of star catalogue for corresponding bands

星等差值$\lvert\Delta_{\mathrm{mag}}\rvert$	0.05	0.05～0.1	0.1～0.2	0.2～0.3	<0.5	均值	方差
H_p与V_T	62.7%	30.2%	4.3%	1.2%	99.7%	0.05	0.08
G与R	21.8%	16.6%	18.1%	36.9%	98.3%	0.16	0.15

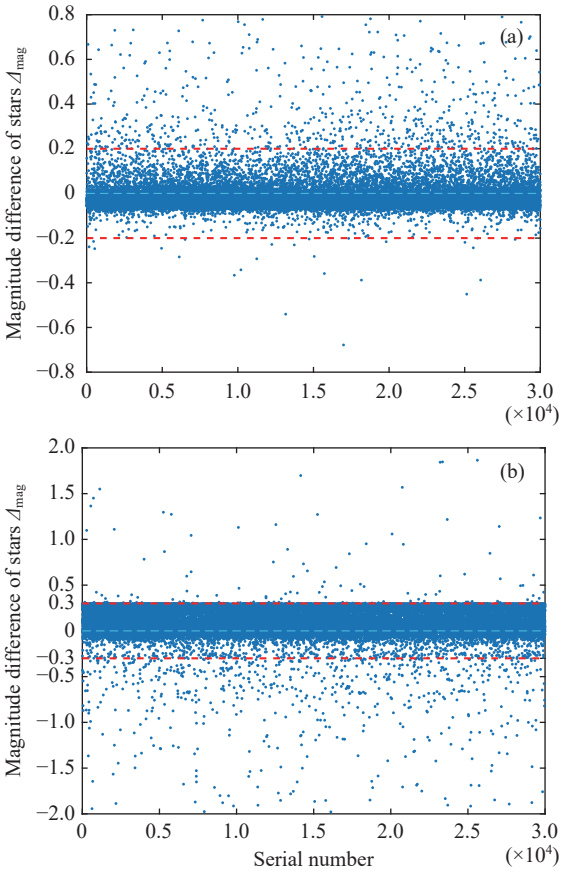


图 5 星表星等差值统计

Fig. 5 Statistical chart of star magnitude difference in different star catalogue

待求波段带宽增加，待求波段中心波长与测光波段有效波长差值增大，使用星表的测光星等作为传感器响应波段星等的误差急剧增大，误差的不确定性也迅速提高。一方面是因为带宽增大，恒星温度不同因素影响迅速增大；另一方面恒星在不同波段区间产生的色温变化越大，按照黑体辐射进行星等误差估计出现的偏差就会越大，但总体还在可控范围内。

4.2 黑体辐射推算传感器响应波段星等验证

随机选取 2 MASS 星表（K 波段亮于 13 等恒星，星等精度优于 0.03 等[48]）15000 颗恒星，根据恒星

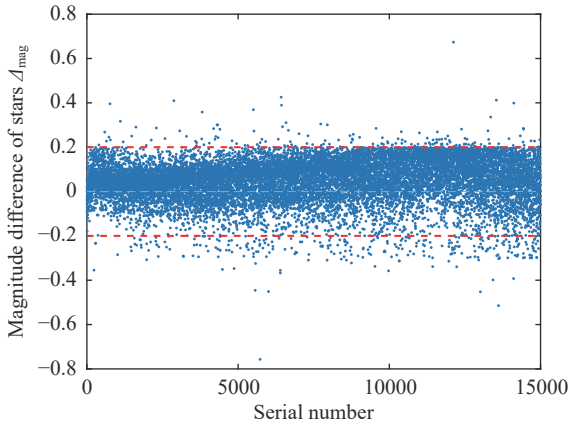


图 6 黑体辐射推算星等误差统计

Fig. 6 Statistical diagram of magnitude error in blackbody radiation estimation

$m_p - m_v$色指数按照式（4）计算恒星近似表面温度。利用恒星在 J 与 K 波段星等数据，结合恒星近似表面温度，解算恒星色温度最优值 T，根据恒星色温度 T 计算恒星在 H 波段星等。统计恒星推算星等与恒星在 2 MASS 星表中 H 波段星等差值，如图 6 所示。

由图 6 可知，采用本文方法，选用传感器响应波段贴合度较好的波段星等信息，解算恒星色温度，进而推算恒星在指定波段区间星等的方法整体具有较高精度。在不考虑星表恒星星等精度的前提下，其中 33.1% 可达 0.05 等，62.2% 可达 0.1 等，93.3% 恒星星等计算精度可以达到 0.2 等以上，99.9% 恒星推算精度在 0.5 等以内，平均星等误差为 0.087 等，方差为 0.066 等。同时利用恒星色指数反映的恒星近似表面温度作为先验信息，可以准确求解黑体辐射组成的超越方程，方程全部解算成功，推算的恒星色温度也具有很高精度，说明赋予恒星温度先验信息的解算方法具有很强的适应性与稳健性。

5 结语

精确的恒星星等信息在星敏感器、天文测量、卫

星定标等空间应用中具有重要意义。本文基于恒星辐射光谱特点,利用已有星表测光信息,提出一种传感器响应波段星等计算方法。该方法构建了传感器响应波段与星表测光波段星等之间的差值模型,有效解决了恒星色温变化、普朗克超越方程解算困难等问题,同时该方法不需要过多的恒星基础数据信息和假设、限定条件,相比现有方法具有明显的稳健性和可行性。通过实际星表验算可知,本文所提方法对传感器响应波段星等推导精度为 0.066 等(1δ),93.3% 恒星推算误差优于 0.2 等,可满足导航星表建立、航天器定姿、红外相机定标等应用的需求。

致谢 中国科学院紫金山天文台陈志维研究员在课题研究与论文写作中提供了指导帮助。

参考文献

[1] LU R, WU Y P. Estimation of stellar instrument magnitudes using synthetic photometry[C]//2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2019: 1-7

[2] MU Da, LI Quanyong, DONG Jianing. Analysis on ground-based infrared detection system detecting the infrared magnitude of space targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(9): 1609-1613 (牟达, 李全勇, 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): 1609-1613)

[3] WANG W J, WEI X G, LI J, *et al*. Guide star catalog generation for short-wave infrared (SWIR) All-Time star sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, **89**(7): 075003

[4] 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]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, **595**: A11

[5] ZHANG Hui, ZHOU Xiangdong, WANG Xinmei, *et al*. Survey of technology status and development of all-time star sensors in near-earth space[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, **41**(8): 623719 (张辉, 周向东, 汪新梅, 等. 近地空间全天时星敏感器技术现状及发展综述[J]. 航空学报, 2020, **41**(8): 623719)

[6] HUANG Chen, WANG Jianjun, GAO Xin, *et al*. Application of infrared star catalog in ground-based infrared radiation measurement system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(11): 2901-2906 (黄晨, 王建军, 高昕, 等. 红外星表在地基红外辐射测量系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(11): 2901-2906)

[7] MA Y, JIANG J, ZHANG G J. Stellar instrument magnitude estimation in infinite-dimensional space[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, **20**(3): 1422-1432

[8] STRUNZ H C, BAKER T, ETHRIDGE D. Estimation of stellar instrument magnitudes[C]//Proceedings of the SPIE 1949, Space Guidance, Control, and Tracking. Orlando: SPIE, 1993: 228-235

[9] VAN DER BLIEK N S, BOUCHET P, HABING H J, *et al*. Standard stars for the Infrared Space Observatory, ISO[J]. Messenger, European Southern Observatory, Garching, Germany, 1992: 28-30

[10] BLACKWELL D E, LYNAS-GRAY A E. Determination of the temperatures of selected ISO flux calibration stars using the Infrared Flux Method[J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1998, **129**(3): 505-515

[11] KRUZHILOV I S. Evaluation of instrument stellar magnitudes without recourse to data as to star spectral classes[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, **6**(1): 063537

[12] KRUZHILOV I, KARELIN A, KNIAZEV V, *et al*. Calculating stellar magnitude to enhance guide star catalogs[J]. *SPIE Newsroom*, 2012

[13] ZHANG Wanying, WANG Tao, CHEN Fansheng. Research on determining methods of observed stellar in onboard radiometric calibration[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2017, **37**(3): 71-76 (张婉莹, 王涛, 陈凡胜. 星上定标的观测恒星确定方法研究[J]. 中国空间科学技术, 2017, **37**(3): 71-76)

[14] WANG Yudu, SUN Xiaojin, ZHANG Heng, *et al*. A new approach for extrapolating star flux using cross-matching multiple catalogues[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, **38**(4): 473-478 (王誉都, 孙小进, 张恒, 等. 利用多星表交叉外推恒星能量的方法[J]. 红外与毫米波学报, 2019, **38**(4): 473-478)

[15] SCHULMAN E, COX C V. Misconceptions about astronomical magnitudes[J]. *American Journal of Physics*, 1997, **65**(10): 1003-1007

[16] COCHRAN A L. Spectrophotometry with a self-scanned silicon photodiode array. II. Secondary standard stars[J]. *Astrophysical Journal*, 1981, **45**: 83-96

[17] BESSELL M S. Photometric systems[J]. *International Astronomical Union Colloquium*, 1993, **136**: 22-39

[18] CASAGRANDE L, VANDENBERG D A. Synthetic stellar photometry – II. Testing the bolometric flux scale and tables of bolometric corrections for the Hipparcos/Tycho, Pan-STARRS1, SkyMapper, and *JWST* systems[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **475**(4): 5023-5040

[19] MANN A W, VON BRAUN K. Revised filter profiles and zero points for broadband photometry[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, **127**(948): 102-125

[20] BESSELL M S. The *Hipparcos* and *Tycho* photometric system passbands[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2000, **112**(773): 961-965

[21] BILIR S, AK S, KARAALI S, *et al*. Transformations

between 2 MASS, SDSS and *BVRI* photometric systems: bridging the near-infrared and optical[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008, **384**(3): 1178-1188

[22] APELLÁNIZ J M. A uniform set of optical/NIR photometric zero points to be used with CHORIZOS[OL]. arXiv preprint arXiv: astro-ph/0609430, 2007

[23] ZOMBECK M V. Handbook of Space Astronomy and Astrophysics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006

[24] BESSELL M S, CASTELLI F, PLEZ B. Model atmospheres broad-band colors, bolometric corrections and temperature calibrations for O-M stars[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1998, **333**: 231-250

[25] BESSELL M, MURPHY S. Spectrophotometric libraries, revised photonic passbands, and zero points for *UBVRI*, *Hipparcos*, and Tycho photometry[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2012, **124**(912): 140

[26] BINNEY J, MERRIFIELD M, KING I R. Galactic astronomy[J]. *Physics Today*, 1999, **52**(8): 64-65

[27] HUGHES D W. The introduction of absolute magnitude (1902-1922)[J]. *Journal of Astronomical History and Heritage*, 2006, **9**(2): 173-179

[28] JOHNSON H L. Astronomical measurements in the infrared[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1966, **4**: 193-206

[29] BATTAT J. Working "with magnitudes and color indices," [J]. Hardvard Technical Note https://www.cfa..edu/~dfabricant/huchra/ay145/magnitudes.pdf (May 2005)

[30] HANSLMEIER A. State Variables of Stars[M]//HANSLMEIER A. Introduction to Astronomy and Astrophysics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2023: 303-335

[31] PLANCK M. The Theory of Heat Radiation[M]. Philadelphia: Blakiston, 1914

[32] SICHEVSKIJ S G, MIRONOV A V, MALKOV O Y. Accuracy of stellar parameters determined from multicolor photometry[J]. *Astrophysical Bulletin*, 2014, **69**(2): 160-168

[33] MALKOV O, KOVALEVA D, SICHEVSKY S, *et al*. Statistical relations between stellar spectral and luminosity classes and stellar effective temperature and surface gravity[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, **20**(9): 139

[34] MICHAEL RICHMOND. Astronomical spectra, filters, and magnitudes[EB/OL].http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/filters/filters.html.

[35] 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]. *The Astronomical Journal*, 2010, **140**(6): 1868-1881

[36] KLEBE D, SEBAG J, BLATHERWICK R D, *et al*. All-sky mid-infrared imagery to characterize sky conditions and improve astronomical observational performance[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2012, **124**(922): 1309-1317

[37] DAVENPORT J R A, IVEZIĆ Ž, BECKER A C, *et al*. The SDSS-2 MASS-*WISE* 10-dimensional stellar colour locus[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, **440**(4): 3430-3438

[38] XU Chun. A flux calibration method for remote sensing satellites using star flux[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, **36**(5): 581-588 (许春. 一种利用恒星进行遥感卫星辐射定标的方法[J]. 红外与毫米波学报, 2017, **36**(5): 581-588)

[39] RAN Xiaoqiang, WEN Desheng, QIU Yuehong, *et al*. A novel multi-triangle star pattern recognition algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1867-1871 (冉晓强, 汶德胜, 邱跃洪, 等. 一种新的多三角形星图识别算法[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1867-1871)

[40] 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]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2009, **61**(4): 737-750

[41] ROSHANIAN J, YAZDANI S, BEHESHT S B, *et al*. 2 MASS infrared star catalog data mining for use onboard a daytime star tracker[C]//2015 7 th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Istanbul: IEEE, 2015: 75-79

[42] WANG W J, WEI X G, LI J, *et al*. Optical parameters optimization for all-time star sensor[J]. *Sensors*, 2019, **19**(13): 2960

[43] PERRYMAN M, LINDEGREN L, KOVALEVSKY J, *et al*. The hipparcos catalogue[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1997, **323**: L49-L52

[44] Hipparcos/Copenhagen/USNO Tycho-2 Catalog[EB/OL]. [2023-05-25]. http://tdc-www.harvard.edu/software/catalogs/tycho2.html

[45] COLLABORATION G. VizieR online data catalog: Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2018)[J]. VizieR Online Data Catalog, 2018: I/345

[46] TUCKER D L, KENT S, RICHMOND M W, *et al*. The Sloan Digital Sky Survey monitor telescope pipeline[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2006, **327**(9): 821-843

[47] KAPLAN G H, BANGERT J, PUATUA W, *et al*. User's Guide to NOVAS Version C3.0[M]. US Naval Observatory, 2009.

[48] SKRUTSKIE M F, CUTRI R M, STIENING R, *et al*. The two micron all sky survey (2 MASS)[J]. *The Astronomical Journal*, 2006, **131**(2): 1163-1183