

文章编号 1004-924X(2023)08-1107-08

Gaia 星表的合成光度仪器星等估计方法

安悦晗, 武延鹏*, 孟小迪
(北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要:为满足星敏器灵敏度的测量、导航星表的建立、空间目标的捕获等任务需求,需要精确的仪器星等作为数据支持。本文对仪器星等计算的方法及测光系统方面展开研究。首先,结合仪器星等计算原理介绍了以 GaiaDR2 星表为数据源的基于合成光度法的 Gaia 仪器星等计算方法,即基于 G, G_{BP}, G_{RP} 星等系统的合成光度计算及色指数模型。其次,利用星表数据进行实例计算,并对仪器星等计算精度及色指数模型进行比较分析。最后,对星敏器在轨图像进行孔径测光,得到实际仪器星等结果与计算结果进行对比验证,并结合实际星等比较本文提出的方法与 UBV 色指数拟合法的结果。结果表明, Gaia 星表的合成光度仪器星等估计方法与 UBV 色指数拟合法计算仪器星等与实际仪器星等差 ($M_c - M_r$) 标准差分别为 0.066 和 0.075。本文提出的方法达到了较高的仪器星等计算精度且能够满足实际应用需求。

关键词: 仪器星等; Gaia 星表; 色指数; 合成光度学

中图分类号: V448.22 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233108.1107

Synthetic photometry instrument magnitude estimation method of Gaia catalogue

AN Yuehan, WU Yanpeng*, MENG Xiaodi

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: wuyanpeng@gmial.com

Abstract: To meet the requirements of measuring the sensitivity of star trackers, establishing guide star catalogs, and capturing space targets, accurate instrument magnitudes are required as data support. In this study, the method of instrument magnitude calculation and photometric system are investigated. First, combined with the principle of instrument magnitude calculation, synthetic photometric method and color index fitting method are introduced. Then, the instrument magnitude calculation method of Gaia catalog based on synthetic photometry using GaiaDR2 catalog, that is, synthetic photometric calculation and color index model based on the G, G_{BP}, G_{RP} star system, is introduced as the data source. Subsequently, color index model accuracy of other instrument magnitude calculation methods is calculated. Finally, aperture photometry is performed on the in-flight image of the star tracker, and the actual instrument magnitude results are compared and verified with the calculated results. The calculation results of the GaiaDR2 catalog and Hipparcos catalog are compared with the actual magnitude. The results show that the standard deviations of the color index fittings using the calculated value and true value of GaiaDR2 are 0.003 5 and 0.037 6, respectively. The standard deviation of the calculated instrument magnitude difference ($M_c -$

收稿日期: 2022-07-10; 修订日期: 2022-11-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51905034)

M_r) is 0.106 0, and the spectral coverage is relatively larger. Thus, it achieves high precision and can meet the needs of practical applications.

Key words: stellar instrument magnitude; Gaia catalogue; color index; synthetic photometry

1 引言

仪器星等是指根据接收器件或设备的光学灵敏度换算得到的星等^[1]。由于敏感器感光器件的光谱响应不同,仪器星等与视星等存在一定差异。在轨观测过程中,精确的仪器星等对星敏感器灵敏度的测量、导航星表的建立、空间目标的捕获都具有重要意义,能够有效提升星敏感器指向测量精度^[2]。

早期的仪器星等的计算依据色指数的一般式。用与仪器波长近似的测光系统波段星等代替仪器星等,由主星序恒星的光谱型和色温计算色指数,再通过色指数和视星等计算星等。计算得到的色指数与星表中的色指数相差 0.1 星等左右^[1]。之后的仪器星等计算大多基于 Johnson/Mitchell 提供的光谱辐照度数据。Strunz H C 等人提出了一种利用 Johnson 光谱辐照度信息计算仪器星等 I_{mag} ,再用 SKYMAP 星表中的 $(B-V)$ 星等与 $(I_{\text{mag}}-V)$ 进行四阶拟合,进而计算根据星表中的 UBVR 星等计算其他恒星仪器星等的方法。拟合得到的 $(I_{\text{mag}}-V)$ 与实际值的标准差为 0.074 星等^[3]。对于有效温度较低的恒星而言,上述拟合过程存在较大误差,因此周建涛等人利用 UBVR 五色测光系统,改用 $(R-I)$ 与 $(I_{\text{mag}}-V)$ 拟合,成功将拟合结果与实际值的标准差降至 0.06 星等^[4]。由于上述色指数拟合方法不适用于所有光谱类型的恒星,且拟合过程中会放弃高阶项,因此仪器星等计算结果并不能达到很高的精度。针对此问题,R. Lu 等人提出了合成光度的仪器星等计算方法,以 Johnson/Mitchell 数据集和 INGS 数据库为数据支持,通过将大气通量或观测到的分光光度通量与标准带通卷积得到探测器的光电子数,即仪器星等。该方法是目前精度最高的仪器星等计算方法,计算星等与实际星等的标准差为 0.058 3 星等^[5]。

通过上述方法可以看出,仪器星等计算主要

基于两类方法:利用恒星色指数的计算方法和利用恒星光谱信息的计算方法。对于同一颗恒星,敏感器观测到的不同波段色指数存在一定关系,因此可以根据天文观测数据拟合外推得到仪器星等。但这种方法受谱段波长范围限制较大,目前色指数计算大多基于 UBVR 五色测光系统,均为窄带光谱,不适用于谱段较宽的敏感器色指数拟合。合成光度光谱的计算方法需要恒星的光谱信息作为数据支撑,对于部分光谱信息不全的星不适用。现有的仪器星等计算方法中用到的 Hipparcos 星表星等完备至 9 等^[6],主要适用于亮度 9 等以下的恒星目标,不适用于暗弱恒星目标的仪器星等计算。

因此,为满足宽谱段敏感器仪器星等计算,扩大恒星星等覆盖范围,提高仪器星等计算精度,本文以 Gaia 星表的 $G, G_{\text{BP}}, G_{\text{RP}}$ 星等为基础,提出了合成光度与色指数拟合相结合的仪器星等计算方法。以 Gaia 星表为数据源计算仪器星等,星等完备至 20.5 等,能够计算暗弱目标的仪器星等。 $G, G_{\text{BP}}, G_{\text{RP}}$ 为宽光谱,色指数模型能够覆盖 330~1 050 nm 谱段仪器星等估计。结合实际在轨图像与其他方法比较分析本文提出方法的仪器星等精度。

2 仪器星等计算方法

2.1 仪器星等定义

恒星仪器星等与恒星光谱特性和敏感器光谱响应有关。仪器星等 I_{mag} 可由式(1)计算得到, C_I 为基准星即 A0 型恒星织女星的星等大小。

$$I_{\text{mag}} = -2.5 \lg \int_0^{\infty} I(\lambda) T_0(\lambda) QE(\lambda) \lambda d\lambda - C_I, \quad (1)$$

$$C_I = -2.5 \lg \int_0^{\infty} I_{\text{ref}}(\lambda) T_0(\lambda) QE(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (2)$$

其中: λ 是波长,单位 μm ; $I(\lambda)$ 为目标恒星的光谱

辐照度,单位 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$; $T_0(\lambda)$ 为敏感器的光学透过率; $QE(\lambda)$ 为探测器的量子效率; $I_{\text{ref}}(\lambda)$ 为基准星的光谱辐照度,单位 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1[3]}$ 。

上述拟合光谱曲线积分的方法计算 Johnson 仪器星等精度为 0.06 mag,本文中采用的合成光度学计算仪器星等的方法精度为 0.03 mag。合成光度法是通过恒星光谱信息计算恒星仪器星等的方法,具有很高精度且能够广泛应用于不同光谱类型恒星的仪器星等计算。合成光度数据可以通过式(3)计算得到,以探测器接收到的光电子数表示星等,其中 $f(\lambda)$ 是单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 恒星光谱能量即光通量, $R_X(\lambda)$ 是 X 谱段上的带通响应函数。因此可以通过修改不同的带通响应得到对应谱段的恒星亮度。

$$N_{\text{photons}} = \int \frac{f(\lambda)}{h\nu} R_X(\lambda) d\lambda = \int \frac{\lambda f(\lambda)}{hc} R_X(\lambda) d\lambda = \frac{1}{hc} \int f(\lambda) [\lambda R_X(\lambda)] d\lambda. \quad (3)$$

仪器的光谱响应 $R_X(\lambda)$ 可以由式(4)得到,将 $R_X(\lambda)$ 代入式(3)中可以得到相应的仪器星等:

$$R_X(\lambda) = T(\lambda)QE(\lambda)\lambda. \quad (4)$$

色指数拟合计算仪器星等的方法是利用色指数间的固定对应关系估算仪器星等。目前已有的色指数模型是基于 UBVRI 测光系统的,均为窄带光谱。经过对 Gaia 星表的 $G, G_{\text{BP}}, G_{\text{RP}}$ 星等光谱带宽与色指数拟合精度进行分析, $(I_{\text{mag}} - G), (I_{\text{mag}} - G_{\text{BP}})$ 和 $(I_{\text{mag}} - G_{\text{RP}})$ 与 $(G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}})$ 的色指数模型精度随着光谱带宽变窄越来越差,星等截取的范围见表 1,分布情况如图 1 所示。因此仪器星等计算时选择带宽更宽的光度型星等精度会更高。

表 1 $G, G_{\text{BP}}, G_{\text{RP}}$ 星等谱段范围

Tab. 1 $G, G_{\text{BP}}, G_{\text{RP}}$ magnitude spectral range (nm)

色指数拟合方法	方法 1	方法 2
600~800	/	/
550~850	550~680	630~850
500~900	500~680	630~900
400~1 000	400~680	630~1 000
330~1 050	330~680	630~1 050

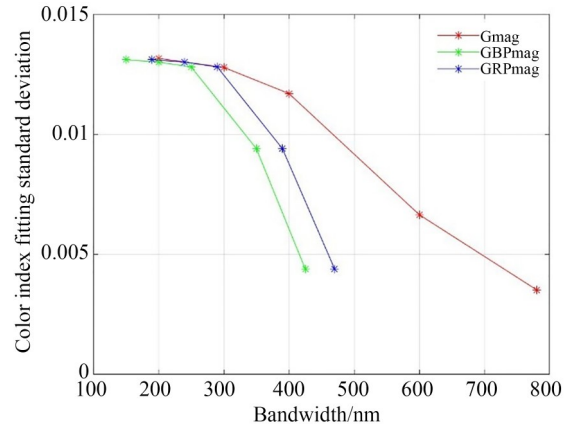


图 1 色指数模型精度与带宽关系图

Fig. 1 Color index model accuracy and bandwidth relationship

2.2 合成光度仪器星等估计法

根据以上仪器星等计算原理,本文提出了基于合成光度和色指数拟合的 Gaia 仪器星等计算方法。首先用合成光度法根据已知的恒星光通量信息计算得到精确度较高的仪器星等,再利用恒星色指数的线性关系拟合仪器星等与其他星等色指数间的关系计算更多谱段范围的仪器星等。方法流程如图 2 所示。

2.2.1 数据源筛选

本文提出的仪器星等计算方法以 Gaia 星表为数据源,建立在 $G, G_{\text{BP}}, G_{\text{RP}}$ 星等系统的基础上^[7]。 G 星等波长范围为 330~1 050 nm,覆盖全谱段; G_{BP} 星等波长范围为 330~680 nm,覆盖蓝光谱段; G_{RP} 星等波长范围为 630~1 050 nm,覆盖红光谱段, GaiaDR2 光谱带通如图 3 所示^[8]。Gaia 星表最暗可以观测至 23 等星。GaiaDR2 星表在 13 等星以下, G 星等的不确定度为 0.3 mmag; $G_{\text{BP}}, G_{\text{RP}}$ 星等的不确定度为 2 mmag^[9]。GaiaEDR3 星表在 13 等星以下, G 星等的精度误差为 0.3 mmag; G_{BP} 星等的不确定度为 0.9 mmag; G_{RP} 星等的不确定度为 0.6 mmag^[10]。相较于其他星表, Gaia 星表的星等范围更大,观测到的暗星数量更多,且星等精度更高。Gaia 覆盖全谱段的 G 星等及色指数 $(G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}})$ 能够满足宽波段敏感器的仪器星等计算。

Johnson 星表中包含 1 380 颗亮星的 13 个颜色波段的窄带测光信息,覆盖 337~1 108 nm 的波长范围, Johnson 星表的光谱信息详见参考文献

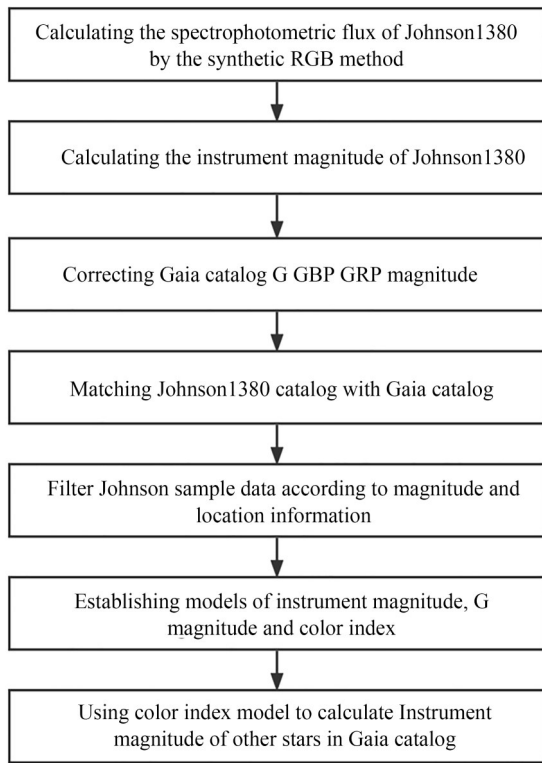
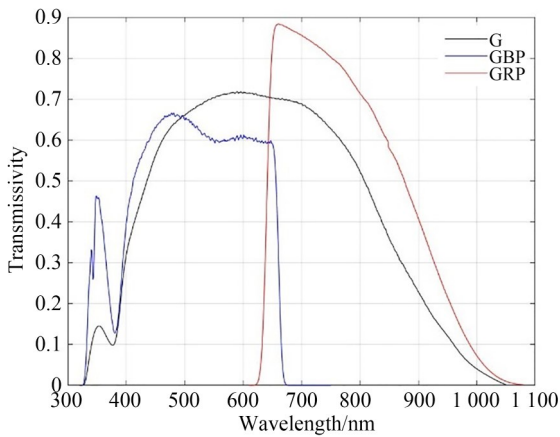


图2 基于合成光度的Gaia仪器星等计算流程

Fig. 2 Magnitude calculation process of Gaia instrument based on synthetic photometry

图3 GaiaDR2光谱带通
Fig. 3 GaiaDR2 passband

献[12]。通过Johnson星表中13个谱段的光谱信息可以计算1380颗星的光通量 $f(\lambda)$ 及仪器星等 $I_{\text{mag}}^{[13]}$ 。

2.2.2 数据交叉认证

Gaia星表的亮星分布范围内恒星星等存在饱和现象影响星等精度。通过式(5)~式(7)对

星表中 $G, G_{\text{BP}}, G_{\text{RP}}$ 星等的亮星部分进行星等误差修正,替换星表中原有星等数据^[11]。

$$G^{\text{corr}} = -0.047344 + 1.16405G - 0.046799G^2 + 0.0035015G^3 \quad (5)$$

$$G_{\text{BP}}^{\text{corr}} = -2.0384 + 1.95282G - 0.11018G^2 \quad (6)$$

$$G_{\text{RP}}^{\text{corr}} = -13.946 + 14.239G_{\text{RP}} - 4.23G_{\text{RP}}^2 + 0.4532G_{\text{RP}}^3 \quad (7)$$

筛选Gaia星表数据时,对变星及双星系统进行剔除。通过星号及交叉文件将Gaia星表与Johnson星表及产品星表进行交叉认证,得到匹配的恒星信息。

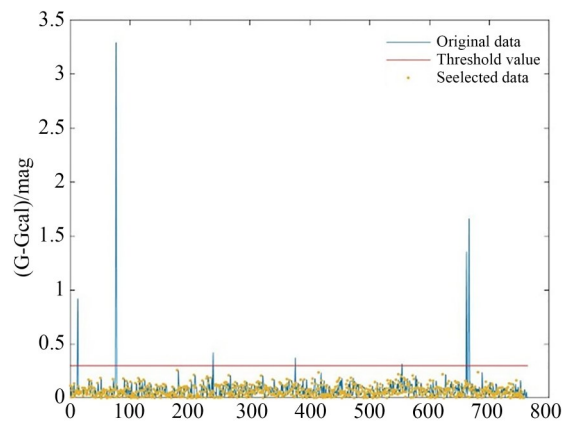
2.2.3 积分计算

筛选匹配后的Johnson星表利用13个窄带谱段的光谱信息计算恒星的光通量 $f(\lambda)$ 。根据分光通量和各光谱带通,用pysynphot数据库^[14]计算Johnson仪器星等 I_{mag}, G 星等 $G_{\text{cal}}, G_{\text{BP}}$ 星等 $G_{\text{BPcal}}, G_{\text{RP}}$ 星等 G_{RPcal} 。

2.2.4 色指数修正

交叉匹配后得到764组数据,比较Johnson星表与Gaia星表,筛选坐标位置差小于1角秒的样本共761组;比较计算星等 $G_{\text{cal}}, G_{\text{BPcal}}, G_{\text{RPcal}}$ 与星表中实际星等 $G, G_{\text{BP}}, G_{\text{RP}}$,筛选满足星等差小于0.3 mag的样本,得到738组样本数据。 G 星等的筛选结果如图4所示,黄色部分为筛选后保留的样本数据。

利用筛选后的样本数据建立仪器星等与 G

图4 G 星等Johnson样本筛选Fig. 4 G magnitude Johnson sample selection

星等之差($I_{\text{mag}} - G$)和色指数($G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}$)的对应关系,得到计算仪器星等 I_{mag} 的色指数模型。色指数模型能够计算 Gaia 星表中所有恒星的仪器星等。

3 计算实例

3.1 仪器光谱特性

星敏感器的光谱响应情况主要取决于探测器的量子效率 $QE(\lambda)$ 及光学透过率 $T(\lambda)$,本文中用于验证仪器星等计算结果的星敏感器量子效率及光学透过率曲线如图 5 所示。

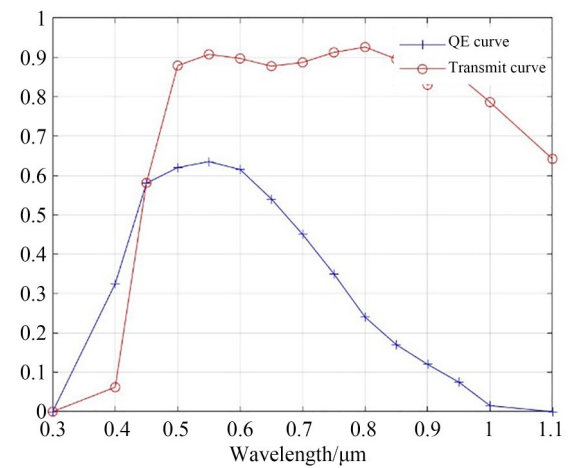


图 5 星敏感器量子效率及光学透过率
Fig. 5 Quantum efficiency and transmissivity of star sensor

3.2 数据分析

根据上一章提出的计算方法对 Johnson 星表样本进行色指数拟合。将不同色指数拟合模型进行比较,最终($I_{\text{mag}} - G$)与($G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}$)拟合模型精度优于其他几种方法。

表 2 计算值色指数拟合精度		
Tab. 2 Fitting precision of calculated color index		
Color index fitting	Standard deviation	
$(MI_{\text{mag}} - MG) \& (MG_{\text{BP}} - MG_{\text{RP}})$	0.003 5	
$(MI_{\text{mag}} - MG_{\text{BP}}) \& (MG_{\text{BP}} - MG_{\text{RP}})$	0.004 4	
$(MI_{\text{mag}} - MG_{\text{RP}}) \& (MG_{\text{BP}} - MG_{\text{RP}})$	0.004 4	
$(MI_{\text{mag}} - MV) \& (MB - MV)$	0.012 8	

4 实验验证

4.1 验证方法

利用星敏感器在轨实拍图像对仪器星等计算结果进行验证。采用孔径测光的方法测量图像中的星点能量,根据式(8)将能量 E 转化为星等 M ,其中 E_0 为织女星能量。

$$M = -2.5 \lg E + 2.5 \lg E_0.$$

(8)

具体验证方法及流程如下:

(1)对图像进行暗场、平场、暗背景校正。利用 photutils 数据库^[15]对恒星星点孔径测光得到图像中 90 975 个实测星点的能量值,并通过式(8)计算测光星等 M_r ;

(2)将计算得到的星点通过产品自身的星表与 Hipparcos 星表进行匹配,再与 GaiaDR2 星表进行交叉,得到匹配的星表信息;

(3)计算实测仪器星等 M_r 与计算仪器星等 M_c 的差值 ($M_r - M_c$),并修正星等差 ($M_r - M_c$) 随色指数 ($G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}$) 及星点在图像中列坐标位置变化的趋势项。最终得到修正后的实测星等及星等差。

经过上述处理后,计算仪器星等 M_c 与实测仪器星等 M_r 的分布情况如图 6 所示,最小二乘法拟合 M_c 和 M_r 的关系如式(9),满足正比例分布且比例系数接近 1,斜距为 0.117。由于实测星等中的织女星星等是由光谱数据计算得到,与实际测光星等存在差异,因此对拟合结果产生误差^[16]。

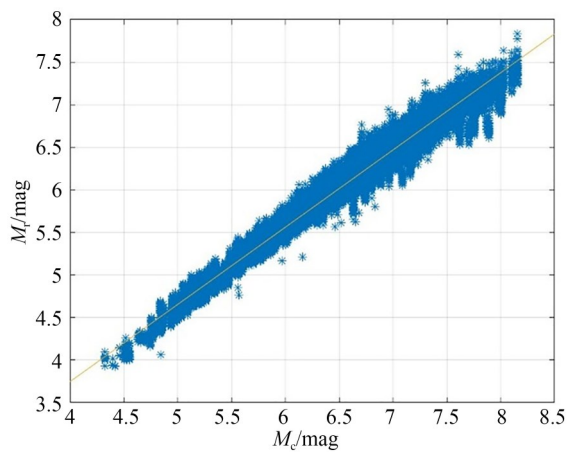


图 6 计算仪器星等 M_c 与实测仪器星等 M_r 关系图
Fig. 6 Calculate instrument magnitude M_c and measured instrument magnitude M_r diagram

$$M_r = 0.9074M_c + 0.117. \tag{9}$$

计算星等与实测星等差 ($M_c - M_r$) 随实测星等 M_r 的分布如图 7 所示。可以看出, 恒星亮度越亮仪器星等计算精度越高。星等为 4 时, 实际星等与计算星等误差为 0.019 6 星等; 星等为 7 时, 实际星等与计算星等误差为 0.129 8 星等。

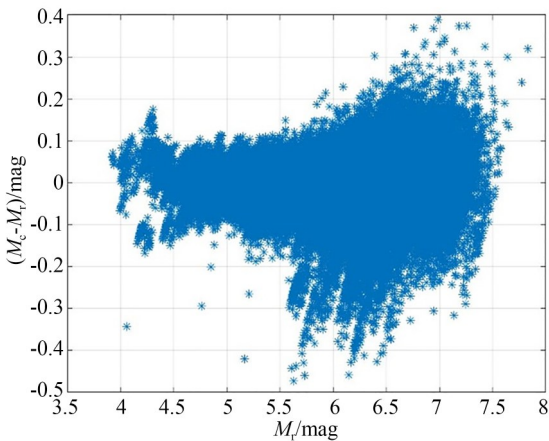


图 7 计算与实测星等差 ($M_c - M_r$) 与实测星等 M_r 关系图

Fig. 7 The calculated and measured star magnitude difference ($M_c - M_r$) and the measured star magnitude M_r diagram

4.2 实验分析

本节结合在轨图像对本文提出的进行了精度评价并比较了文献[4]中提到的仪器星等计算方法。以实际图像数据结果为标准, 将计算星等与实测星等差值的标准差作为精度指标, 列于表 3 中, 方法 1 为本文提出的方法, 方法 2 为参考文献[4]中的方法。

表 3 仪器星等计算方法精度对比

Tab. 3 Accuracy comparison of instrument magnitude calculation methods

Method	Standard deviation
1	0.066
2	0.075

精度随仪器星等变化趋势如图 8 所示, 随着星等变暗精度逐渐变差, 方法 1 精度明显优于方法 2。精度随色指数变化趋势如图 9 所示, 色指

数较大时方法 2 精度明显下降, 方法 1 精度稳定不变。

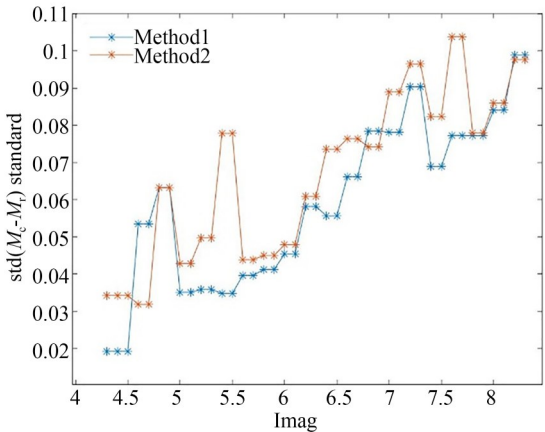


图 8 计算与实测星等标准差与仪器星等 I_{mag} 关系图
Fig. 8 Standard deviation of calculated and measured magnitude and instrument magnitude I_{mag} diagram

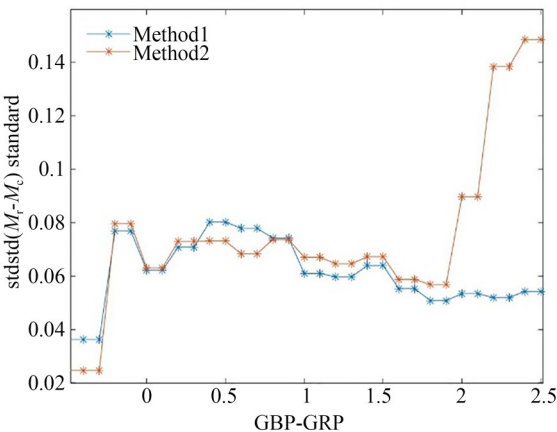


图 9 计算与实测星等标准差与色指数关系图
Fig. 9 Relation between calculated and measured magnitude standard deviation and color index

以上结果表明, 本文提出的方法较已有方法精度有所提升, 且色指数较大时仍能保持较高精度, 适用于宽谱段仪器星等的计算。

5 结 论

本文在 Gaia 星表的 G, G_{BP}, G_{RP} 星等系统的基础上提出了基于合成光度学的 Gaia 仪器星等计算方法, 并介绍了仪器星等计算的原理, 详细描述了该方法计算仪器星等的过程。GaiaDR2

星表的合成光度法仿真数色指数拟合标准差为0.003 5,明显优于其他色指数拟合形式。结合敏感器实拍的在轨图像对仪器星等计算结果进行验证,计算仪器星等 M_c 与实测仪器星等 M_r 满足正比例分布,且星等差($M_c - M_r$)的标准差为0.066。并结合实际在轨图像将该方法与其他计

算方法进行了对比,该方法实际可行且能达到较高的精度,且能够解决目前仪器星等计算存在的星等范围覆盖小、覆盖带通波长范围窄等问题。最新的GaiaDR3星表中提供了更多恒星的详细光谱信息,在后续研究中可以用GaiaDR3的恒星光谱信息进行数据支持^[17]。

参考文献:

- [1] 鞠雁志. 星敏感器用CCD星等的近似计算方法[J]. 控制工程, 1986(2): 29-34.
JU Y ZH. Approximate calculation method of CCD magnitude for star sensor[J]. *Control Engineering of China*, 1986(2): 29-34. (in Chinese)
- [2] 李林, 袁利, 王立, 等. 从哈勃太空望远镜剖析微振动对高性能航天器指向测量与控制系统的的影响[J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2478-2487.
LI L, YUAN L, WANG L, *et al.* Influence of micro vibration on measurement and pointing control system of high-performance spacecraft from Hubble Space Telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(11): 2478-2487. (in Chinese)
- [3] STRUNZ H C, BAKER T, ETHRIDGE D. Estimation of stellar instrument magnitudes[J]. *SPIE*, 1993, 1949: 228-235.
- [4] 周建涛, 蔡伟, 武延鹏. 星敏感器用仪器星等的确定[J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35(2): 46-50.
ZHOU J T, CAI W, WU Y P. Estimation of stellar instrument magnitudes for star tracker[J]. *Aerospace Control and Application*, 2009, 35(2): 46-50. (in Chinese)
- [5] LU R, WU Y P. Estimation of Stellar Instrument Magnitudes Using Synthetic Photometry[C]. *2019 IEEE Aerospace Conference. March 2-9, 2019, Big Sky, MT, USA. IEEE*, 2019: 1-7.
- [6] 陈少杰, 高玉平, 尹东山. Gaia DR2星表及其与Hipparcos星表的比较[J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(5): 441-446, 453.
CHEN SH J, GAO Y P, YIN D SH. Comparison between star catalogue Gaia-DR2 and hipparcos[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2020, 37(5): 441-446, 453. (in Chinese)
- [7] EVERALL A, BOUBERT D, KOPOSOV S E, *et al.* Completeness of the Gaia-verse - IV. The astrometry spread function of Gaia DR2[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 502(2): 1908-1924.
- [8] MONTEGRIFFO P, DE ANGELI F, CACCIARI C. *GAIA DR2 PASSBAND* [EB/OL]. (2018-3-16) [2022-6-30]. https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20180316.
- [9] European Space Agency (ESA) and Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC). Gaia Data Release2 Documentation release 1.2 [EB/OL]. (2019-6-5) [2022-6-30]. <https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/index.html>.
- [10] European Space Agency (ESA) and Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC). Gaia Early Data Release3 Documentation release 1.1 [EB/OL]. (2021-3-3) [2022-6-30]. <https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GEDR3/index.html>.
- [11] EVANS D W, RIELLO M, DE ANGELI F, *et al.* *Gaia Data Release 2: Photometric content and validation* [EB/OL]. 2018: arXiv: 1804.09368. <https://arxiv.org/abs/1804.09368>
- [12] MITCHELL R I, JOHNSON H L. Thirteen-color narrow-band photometry of one thousand bright stars[J]. *Communications of the Lunar & Planetary Laboratory*, 1969, 8(132): 1-49.
- [13] CARDIEL N, ZAMORANO J, BARÁ S, *et al.* Synthetic RGB photometry of bright stars: definition of the standard photometric system and UCM library of spectrophotometric spectra[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 504(3): 3730-3748.
- [14] LIM P L, DIAZ R I, LAIDLER V. PySynphot User's Guide (Baltimore, MD: STScI) [EB/OL]. 2015, <https://pysynphot.readthedocs.io/en/latest/>.
- [15] LARRY B, BRIGITTA S, THOMAS R, *et al.* astropy/photutils: 1.4.0 [EB/OL]. March, 2022, Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.596036>.
- [16] 满意, 杨轻云, 陈涛. 空间目标光度测量的消光

修正拟合[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1511-1517.

MAN Y, YANG Q Y, CHEN T. Extinction correction fitting for photometric measurement of space targets[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(7): 1511-1517. (in Chinese)

[17] European Space Agency (ESA) and Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC). *Gaia Data Release3 Documentation release 1.1* [EB/OL]. (2022-6-13) [2022-6-30]. <https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/index.html>.

作者简介:



安悦晗(1998—),女,河北保定人,硕士研究生,2020年于东华大学获得学士学位,主要从事光学成像敏感器图像处理算法的研究。



武延鹏(1977—),男,河北邢台人,研究员,2004年于清华大学获得博士学位,主要从事空间导航敏感器总体技术的研究。