光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022022105

基于畸变梯度重构畸变的在轨标定方法

孙永恒[1,2,3]，方　亮[1,2,3*]，张　辉[1,2,3]

（1. 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室，成都 610209；2. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；
3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 提出一种基于畸变梯度重构畸变的在轨标定方法，该方法充分利用微角秒测量精度的星间距测量技术，不受恒星赤经、赤纬精度的限制，能使望远镜光学畸变的标定精度达到微角秒量级。介绍了基于畸变梯度重构畸变的原理，并对由光学设计软件导出的光学系统进行了畸变标定仿真实验，结果表明：当光学系统波像差控制在 0.073 3λ 内且星角间距测量误差为 0.3 微角秒时，畸变标定精度可达 0.28 微角秒，满足近邻宜居行星探测的畸变标定要求。

关键词： 畸变标定；微角秒；系外行星探测；天体测量；空间望远镜

中图分类号： P123.2　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0802－08

On-orbit Calibration Method Based on Distortion Gradient Reconstruction Distortion

SUN Yongheng[1,2,3], FANG Liang[1,2,3], ZHANG Hui[1,2,3]

(1. Key Lab. of Science and Technol. on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: In this paper, an on-orbit calibration method based on distortion gradient reconstruction distortion is proposed. It makes full use of the star spacing measurement technology with the measurement accuracy of micro arc seconds, thus it does not need to use star catalogue, and is not limited by the accuracy of stellar right longitude and declination. The calibration accuracy of optical distortion of the telescope can reach the order of micro arc seconds. The principles of distortion reconstruction based on distortion gradient are introduced, and the distortion calibration simulation experiment is carried out on the optical system derived from the optical design software. The results show that when the wave aberration of the optical system is controlled within 0.073 3λ and the measurement error of star angle spacing is 0.3 micro arc seconds, the distortion calibration accuracy can reach 0.28 micro arc seconds, which meets the distortion calibration requirements of nearest neighbor habitable planet exploration.

Key words: distortion calibration; micro arc seconds; exoplanet exploration; astrometry measurement; space telescope

0　引言

系外行星探测一直是人类社会和科学界最关心的重要问题，目前国际上最常用的系外行星探测方法主要有凌星法[1]和视向速度法[2]。凌星法探测概率较低，而视向速度法探测精度有限，因此，采用这两种方法探测到的行星大多是体积和质量较大的行星，一般为“类木星行星”或者“超级地球”，难以针对类太阳恒星的宜居带类地行星开展有效探测。高精度天体测量法[3-5]通过测量恒星空间位置相对星空背景的微小改变来推知行星信息，其基本原理是精

收稿日期：2022－02－21.
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项项目（A 类，XDA15020803）.
* **通信作者：**方　亮　**E-mail：** fangl@ioe.ac.cn

确地测量目标星与多颗标准参考星之间的角度差，从而通过这些差值的变化来计算目标星受行星引力扰动所发生的位移，由测量目标恒星的中心位置相对于参考星的变化和动力学扰动，来反推计算周围不同质量、周期的行星。当其测量精度达到微角秒量级时，有可能探测到邻近恒星周围的长周期行星，实现宜居带类地行星的搜寻，可以很好地弥补凌星法和视向速度法的探测缺陷。

微像素星间距测量技术[6-8]使微角秒量级精度的天体测量成为可能。微像素星间距测量的原理是：用望远镜的点源扩展函数（Point Spread Function，PSF）来拟合得到星象的质心位置，由于实际测量的图像还受到 sCMOS 响应的影响，因此，要达到微像素级恒星间距的测量精度，必须精确测量 sCMOS 响应函数，只有满足 sCMOS 像素间距小于 Nyquist 采样间隔，并且有足够长的采样数据，才能以很高的精度求解出 PSF 的真实形状，进而精确测量同一个 PSF 对应的两幅观测图像之间的质心间距，实现微像素级的间距测量[8-10]。微像素星间距测量技术必须结合大口径高像质望远镜才能实现对恒星位移的高精度测量，然而，望远镜在轨观测过程中，由于受卫星调姿或环境的变化导致光学镜面面形或位置发生微小变化，进而导致畸变分布的微小变化，可能使光学系统产生不规则的畸变的微小变化，对测量精度产生不利影响。因此需要对望远镜系统进行光学畸变在轨标定，修正望远镜畸变的微小变化误差，标定精度要求达到微角秒量级。

对于空间望远镜存在的光学畸变问题，国内外许多学者进行了大量的研究。最典型的就是对哈勃空间望远镜（Hubble Space Telescope，HST）的畸变标定，2003 年 Anderson 等[11]通过引入有效点扩散函数的技术（Effective Point-Spread Function，EPSF）来提高星像定位精度，去除相机边缘效应，进一步扩充观测次数和密度，以及对观测方向进行旋转观测，从而导出几何扭曲的线性斜交项等办法，提高标定观测精度，经过处理 HST 的行星相机精度达到 0.02 pixel，广角相机精度达到 0.01 pixel。2010 年北京航空航天大学的申娟等，提出了基于卡尔曼滤波的在轨标定方法[12]，校准后 x，y 方向上的平均误差分别为 0.044 和 0.049 pixel。2017 年国防科学技术大学的刘宇等，提出了基于姿态关联帧的标定方法[13]，该方法在 x 方向的精度为 0.19 pixel，y 方向精度为 0.51 pixel。综上所述，传统的在轨标定技术利用望远镜系统对现有恒星目标进行成像，通过对比目标在现有星表中的位置和实测位置得出望远镜全视场的畸变。然而，目前星表中恒星的定位精度仅在毫角秒量级，无法满足微角秒级的标定精度。2011 年亚利桑那大学的 Bendek 等[14-16]，利用衍射瞳孔进行畸变标定，通过在主镜上加工直径为 5 μm、周期为 50 μm 的小孔阵列，使星光在焦面上产生多色衍射尖峰，对衍射尖峰编码进行标定，理论上可以实现微角秒量级的标定精度。然而，该方法需要在主镜上加工大量的小孔阵列，加工难度太高，且要求位于视场中心的目标星亮度是周围参考星的 10^4 倍，实际应用中十分受限。

为了解决现有在轨畸变标定技术难以满足微角秒级的标定精度的问题，本文提出一种基于畸变梯度重构畸变的在轨标定方法，该方法不依赖现有星表中参考星的定位数据，而是根据望远镜光学系统中心视场的畸变近似为零这一前提，利用卫星指向的调整和微像素精度的星间距测量技术，通过对比由于望远镜指向的调整引起的中心视场和边缘视场星象点的移动量，得到边缘视场星象点处的畸变梯度，然后根据一定的算法重构整个像面的畸变梯度分布；再次利用望远镜光学系统中心视场的畸变近似为零这一条件，通过畸变梯度重构出畸变分布，从而实现望远镜光学系统畸变量的高精度标定。

1　标定方法

如图 1 所示，本文提出的基于畸变梯度重构畸变的在轨标定方法主要分为四步：首先，调整望远镜指向，使望远镜视场内能观测到多颗恒星，且中心视场处至少有一颗星；然后微调望远镜在偏航和俯仰方向的指向，使多颗星像点在探测器上均产生一定大小的位移，如图 1(a)所示，其中，蓝色和红色星点分别代表望远镜指向发生微小变化前后的星点位置；然后，利用微像素精度的星间距测量技术测量各星像点在探测器上的位移，如图 1(b)所示；接下来，利用中心视场畸变近似为 0 的条件，计算边缘视场星像点的位移与中心视场星像点的位移之差，求出

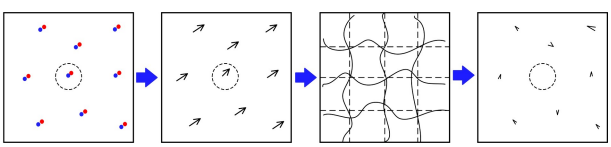
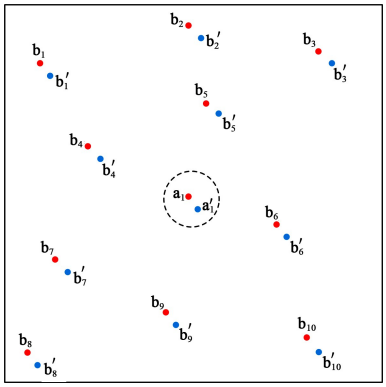


图 1　基于畸变梯度反演畸变分布的在轨标定方法示意图

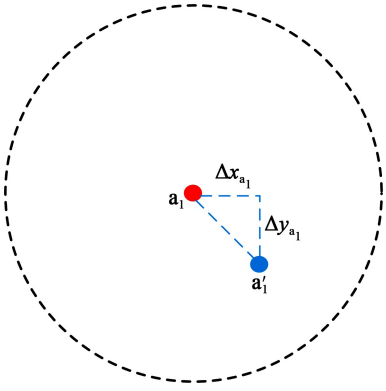
各个边缘视场的光学畸变梯度分布，如图 1(c)所示；最后，由光学畸变梯度进行反演拟合得到全视场的光学畸变分布，如图 1(d)所示，实现对望远镜光学畸变的标定。

1.1 求解多星位置

首先，通过光学设计使空间望远镜中心视场 60″内(如图 2(a)中虚线圆圈内的区域)的光学畸变量小于 0.1 μas，定义该区域为近零畸变区。假设某时刻中心视场的恒星如图 2(b)中的红色 a_1 点所示，除中心视场以外的其他视场的星象如图 2(a)中圆圈外的红色点，分别为 $b_1, b_2, \cdots, b_n$。



(a) 星像位置示意图



(b) 中心视场星像位置示意图

图 2 空间望远镜指向发生变化前后星像和中心视场星像位置示意图

微调空间望远镜在偏航和俯仰方向的指向，使其变化范围在 60 角秒以内，保证中心视场的星点在近零畸变区内发生微小的移动，同时其他视场的星点也会发生相应的微小移动。图 2(a)中圆圈内蓝色点为空间望远镜的指向发生变化后中心视场恒星的位置，圆圈外红色点 $b'_1, b'_2, \cdots, b'_n$ 为空间望远镜指向发生微小变化后其他视场各星像的位置。图 2(b)为中心视场星像点的放大图。

1.2 计算位移矢量

图 2 中虚线圆形内为近零畸变区，其中星像 a_1 的微位移表示为

x 方向的位移：

$$\Delta x_{a_1} = x'_{a_1} - x_{a_1} \tag{1}$$

y 方向的位移：

$$\Delta y_{a_1} = y'_{a_1} - y_{a_1} \tag{2}$$

其中，x_{a_1}, y_{a_1} 为星像 a_1 在探测器上的位置坐标，x'_{a_1}, y'_{a_1} 为空间望远镜指向变化后星像 a'_1 的位置坐标。

其他视场的星像 b_1 的微位移表示为

x 方向的位移：

$$\Delta x_{b_1} = (x'_{b_1} + Dx'_{b_1}) - (x_{b_1} + Dx_{b_1}) \tag{3}$$

y 方向的位移：

$$\Delta y_{b_1} = (y'_{b_1} + Dy'_{b_1}) - (y_{b_1} + Dy_{b_1}) \tag{4}$$

其中，x_{b_1}, y_{b_1} 为星像 b_1 不考虑畸变的真实位置坐标，Dx_{b_1}、Dy_{b_1} 为星像 b_1 所在位置处的畸变，$(x_{b_1}+Dx_{b_1}, y_{b_1}+Dy_{b_1})$为星像 b_1 考虑畸变时的实际位置坐标。(x'_{b_1}, y'_{b_1})为空间望远镜指向发生变化后星像 b'_1 的真实位置坐标，Dx'_{b_1}、Dy'_{b_1} 为星像 b'_1 所在位置处的畸变，$(x'_{b_1} + Dx'_{b_1}, y'_{b_1} + Dy'_{b_1})$为星像 b'_1 的实际位置坐标。

将星像 a_1 和星象 b_1 在 x 和 y 方向的位移相减，即

$$\Delta x_{a_1} - \Delta x_{b_1} = x'_{a_1} - x_{a_1} - [(x'_{b_1} + Dx'_{b_1}) - (x_{b_1} + Dx_{b_1})] = (x'_{a_1} - x_{a_1}) - (x'_{b_1} - x_{b_1}) + (Dx_{b_1} - Dx'_{b_1}) \tag{5}$$

$$\Delta y_{a_1} - \Delta y_{b_1} = y'_{a_1} - y_{a_1} - [(y'_{b_1} + Dy'_{b_1}) - (y_{b_1} + Dy_{b_1})] = (y'_{a_1} - y_{a_1}) - (y'_{b_1} - y_{b_1}) + (Dy_{b_1} - Dy'_{b_1}) \tag{6}$$

由于 $(x'_{a_1} - x_{a_1})$ 和 $(x'_{b_1} - x_{b_1})$ 均为星像 a_1 和星象 b_1 不考虑望远镜光学畸变时在 x 方向上的位移量，因此有 $x'_{a_1} - x_{a_1} = x'_{b_1} - x_{b_1}$。同理，星像 a_1 和星象 b_1 不考虑望远镜光学畸变时在 y 方向上的位移有 $y'_{a_1} - y_{a_1} = y'_{b_1} - y_{b_1}$。所以，式(5)和(6)可写为

$$\Delta x_{a_1} - \Delta x_{b_1} = Dx_{b_1} - Dx'_{b_1} = \Delta Dx_{b_1} \tag{7}$$

$$\Delta y_{a_1} - \Delta y_{b_1} = Dy_{b_1} - Dy'_{b_1} = \Delta Dy_{b_1} \tag{8}$$

1.3 求畸变梯度

显然，以上两式反映了望远镜指向发生变化前后星象 b_1 所在位置处的畸变之差。由式(7)和(8)我们可以得到星象 b_1 所在位置的畸变梯度：

$$\nabla \cdot D_{b_1}=\frac{\partial Dx_{b_1}}{\partial x_{b_1}}+\frac{\partial Dy_{b_1}}{\partial y_{b_1}}=\frac{\Delta Dx_{b_1}}{\Delta x_{b_1}}+\frac{\Delta Dy_{b_1}}{\Delta y_{b_1}} \tag{9}$$

同理，可以得到其他视场 b_2，b_3，…，b_n 星象点所在位置处的畸变梯度。

1.4　反演畸变分布

考虑到望远镜的畸变误差主要来自于初级畸变和二级畸变，它是象高 3 次方和 5 次方的函数[17-18]，故可采用多项式将望远镜全视场的畸变表示为

$$D=\sum_{i=0}^{5}\sum_{j=0}^{5-i}k_{ij}x^i y^j \tag{10}$$

则该畸变沿 x 方向的梯度为

$$\frac{\partial D}{\partial x}=\sum_{i=0}^{4}\sum_{j=0}^{4-i}(i+1)k_{ij}x^i y^j \tag{11}$$

沿 y 方向的梯度为

$$\frac{\partial D}{\partial y}=\sum_{j=0}^{4}\sum_{i=0}^{4-j}(j+1)k_{ij}x^i y^j \tag{12}$$

利用式(11)和(12)对各视场测得的畸变梯度进行拟合，可以得到畸变梯度函数表达式中各项的系数。同时，由于望远镜中心视场($x=0$，$y=0$)的畸变为 0，可得系数 k_{ij}。将以上系数均代入式(10)，可得到望远镜全视场畸变分布表达式，从而实现望远镜光学畸变的标定。

2　仿真实验

为验证基于畸变梯度重构畸变的在轨标定方法的可行性，对由光学设计软件 ZEMAX 导出的光学系统畸变进行了畸变标定仿真实验。

2.1　仿真实验设计

利用 ZEMAX 软件设计了一个天体测量光学望远镜，其光路如图 3 所示。望远镜的口径为 φ1.2 m，焦距为 36 m，能够实现近衍射极限成像，在不考虑加工误差和装调误差的情况下，其光学性能参数如表 1 所示。

在光学设计软件 ZEMAX 中，对望远镜系统的镜面设置不同的泽尼克系数模拟面形误差，产生不同的波像差，如表 2 所示。其中，每组数据由主镜、次镜、三镜和三个平面镜的面形误差组成，各镜面取泽尼克系数的前 15 项得到系统的波像差。第 1 组为不考虑镜面面形误差的波像差作为对照组，第 2 组和第 3 组为考虑不同镜面面形误差的波像差，每组不同波像差情况下的畸变数据均按以下步骤导出：

(1)将望远镜光学系统的视场划分为 100×100 的网格；

(2)将每个格点处的畸变信息导出，得到望远镜焦面上的光学畸变分布。

根据 ZEMAX 导出的望远镜光学畸变分布数据，模拟望远镜指向变化前后采样星点的位置变化，并利用提出的光学畸变在轨标定方法，仿真模拟了望远镜光学畸变的在轨标定过程。

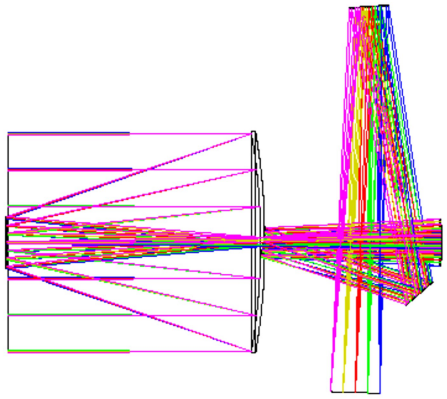


图 3　光学系统设计光路图

表 1　望远镜系统参数

系统参数	技术指标
口径/m	φ1.2
焦距/m	36
视场/(°×°)	0.44×0.44
工作波长/nm	500～900
波像差	0.005 4λ
最大相对畸变/%	5×10^{-6}

表 2　考虑不同镜面面形误差时的望远镜系统波像差

面形误差	组序号		
	1	2	3
主镜/λ	0	0.011 8	0.039 2
次镜/λ	0	0.009 8	0.030 9
三镜/λ	0	0.009 8	0.030 9
平面镜/λ	0	0.004 9	0.009 8
系统波像差/λ	0.005 4	0.028 4	0.073 3

2.2　仿真实验过程

仿真实验过程分为两部分：

(1)不考虑星间距测量精度，只考虑望远镜波像差对畸变标定精度的影响，对从 ZEMAX 软件导出的 3 组不同波像差的畸变进行仿真数据处理，利用提出的在轨标定方法分别对 3 组不同的畸变分布进行标定仿真实验；

(2)同时考虑星间距测量精度和望远镜波像差

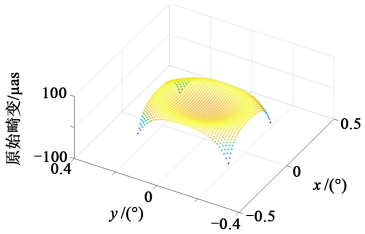
对标定精度的影响，假设星角间距测量精度分别为0.1，0.3，0.5，0.8和1 μas时，利用提出的在轨标定方法分别对3组不同的畸变分布进行标定仿真实验。

2.3 仿真实验结果

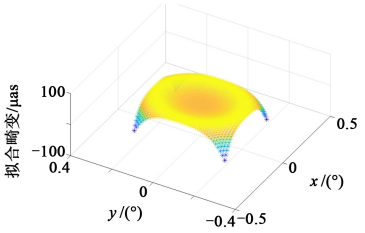
2.3.1 只考虑望远镜波像差时的畸变标定结果

图4(a)为不考虑望远镜面形误差时光学系统的原始畸变，其畸变最大值为14.01 μas。利用本文提出的在轨标定方法，仿真模拟星像点在偏航和俯仰方向各平移20角秒，得到各边缘视场处的畸变梯度，进而重构系统的畸变分布，如图4(b)所示。将原始畸变分布与重构的畸变分布进行差值，可得到标定后系统的畸变残差，如图4(c)所示。从图中可以看出，标定后的光学系统的畸变残差为0.010 6 μas。

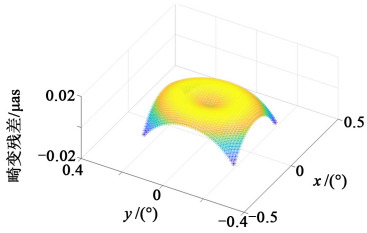
如表2中所示，考虑望远镜波像差分别为0.028 4λ和0.073 3λ时，对应的光学畸变原始分布情况如图5所示，其最大畸变量分别为3.35和7.35 mas。利用本文提出的在轨标定方法，仿真模拟星像点在偏航和俯仰方向各平移20角秒，得到各边缘视场处的畸变梯度，进而重构系统的畸变分布。将原始畸变分布与重构的畸变分布进行差值可得到标定后系统的畸变残差，如图4(f)和图4(i)所示，在同一个位置(−0.11°，−0.11°)的星点标定后的光学系统的畸变残差分别为0.015 8和0.010 8 μas。从图中可以看出，当不考虑测量误差时标定精度与波像差关系不大，均满足系外行星探测所要求的微角秒量级的畸变标定精度。



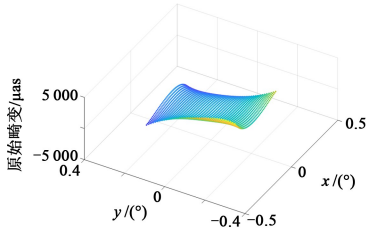
(a) RMS=0.005 4λ，原始畸变14.01 μas



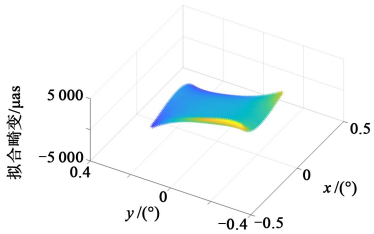
(b) RMS=0.005 4λ，拟合畸变



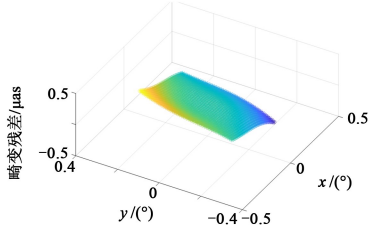
(c) RMS=0.005 4λ，畸变残差0.010 6 μas



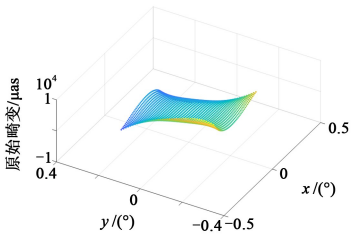
(d) RMS=0.028 4λ，原始畸变3.35 mas



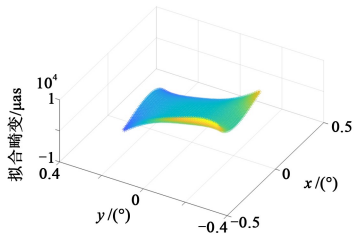
(e) RMS=0.028 4λ，拟合畸变



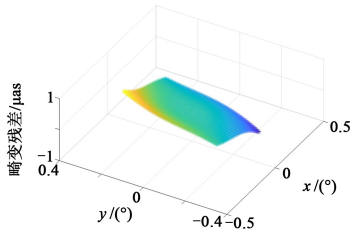
(f) RMS=0.028 4λ，畸变残差0.015 8 μas



(g) RMS=0.073 3λ，原始畸变7.35 mas



(h) RMS=0.073 3λ，拟合畸变



(i) RMS=0.073 3λ，畸变残差0.010 8 μas

图4 不考虑面形误差和测量误差时的畸变标定结果

2.3.2 同时考虑星间距测量精度和望远镜波像差时的畸变标定结果

以上分析未考虑星间距测量精度对标定结果的影响，实际上，在测量星点移动的位移时，会由于星间距的测量误差而引起畸变标定的误差。

在测量星点位移过程中，若考虑微角秒量级的星角间距测量精度，并对望远镜光学系统的畸变进行多次标定并取均值，则可以得到星角间距测量误差对畸变在轨标定精度的影响。在仿真中，以100次标定后的畸变残差平均值为一组测量结果。表3给出了星间距测量误差分别为0.1，0.3，0.5，0.8和1 μas时，对望远镜波像差为0.073 3λ时的畸变标定后的10组畸变残差值及其标准差。可见，随着星间距测量精度的降低，畸变标定精度也随之降低，但

畸变标定精度与星间距测量精度总体相当。也就是说，若星间距测量精度能够达到微角秒量级，则畸变标定精度能达到微角秒量级，满足高精度天体测量望远镜光学畸变的标定要求。

表 3　考虑不同星间距测量精度时的畸变标定结果

组序号	测量精度				
	0.1/μas	0.3/μas	0.5/μas	0.8/μas	1/μas
1	−0.062 9	0.083 0	1.380 1	0.283 4	1.318 4
2	0.292 6	0.280 6	0.650 8	−0.092 3	0.788 6
3	0.110 6	0.443 4	0.403 9	0.108 8	−1.941 8
4	0.001 2	0.222 0	0.397 8	−0.658 5	−0.795 9
5	0.013 7	0.404 0	−1.064 5	0.679 2	−0.705 9
6	0.104 9	−0.432 0	−0.743 9	1.238 9	−2.184 3
7	0.030 7	0.304 3	0.015 1	−1.936 7	2.426 4
8	0.232 5	−0.009 7	−0.395 5	0.853 9	−0.963 0
9	0.215 6	0.477 4	−0.102 0	0.413 5	−0.319 8
10	0.067 1	−0.169 8	−0.262 3	−0.075 3	−0.074 2
标准差	0.108 5	0.278 2	0.675 6	0.843 8	1.354 8

进一步仿真计算了望远镜光学系统波像差分别为 0.005 4λ 和 0.028 4λ 时，不同星角间距测量精度对畸变标定精度的影响。图 5 给出了望远镜光学系统波像差分别为 0.005 4λ，0.028 4λ 和 0.073 3λ 时，标定后畸变残差随星间距测量精度的变化曲线。从图中可见，标定后畸变残差受波像差影响较小，随测量精度的降低而呈逐渐增大的趋势。但畸变标定精度仍与星间距测量精度总体相当。若星间距测量精度能够达到微角秒量级，则采用本文所述的畸变标定方法可以满足高精度天体测量望远镜光学畸变的标定要求。

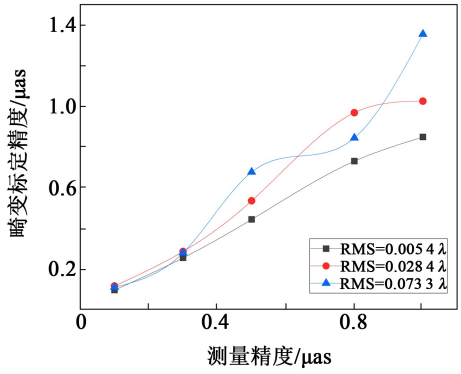


图 5　在不同望远镜波像差条件下畸变标定精度随星间距测量精度的变化曲线图

3　结论

针对现有在轨畸变标定技术难以实现微角秒量级的标定精度问题，提出了一种基于畸变梯度重构畸变的在轨标定方法。介绍了畸变标定方法的基本原理和实现过程，通过 ZEMAX 软件导出光学系统的光学畸变分布，利用 MATLAB 程序模拟实际星点在发生位移前后的位置，并根据本文提出的标定方法开展了畸变标定仿真实验，分析了望远镜波像差及星间距测量精度对畸变标定精度的影响。结果表明，本文提出的畸变标定精度受波像差影响较小，随星间距测量精度的降低而呈逐渐增大的趋势。但畸变标定精度与星间距测量精度总体相当。若星间距测量精度能够达到微角秒量级，则采用本文所述的畸变标定方法可以满足高精度天体测量望远镜光学畸变的标定要求。

本文所提出的方法不受星表中恒星赤经、赤纬精度的限制，充分利用微像素星间距测量技术的高精度特征，使望远镜光学畸变标定精度达到微角秒量级，可为实现高精度天体测量提供重要的技术保障，有助于推动基于高精度天体测量的系外宜居带类地行星探测的发展。

参考文献：

[1] 许伟维，廖新浩，周永宏，等. 天体测量法探测系外行星[J]. 天文学报，2016，57(4)：15.
Xu Weixiong，Liao Xinhao，Zhou Yonghong，et al. Exoplanet detection by astrometry[J]. Acta Astronomica Sinica，2016，57(4)：15.

[2] Struve O. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work[J]. Observatory，1952，72：199-200.

[3] 黄平辉，季江徽. 基于天体测量法探测系外行星的仿真模拟与轨道求解算法[J]. 天文学报，2016，57(5)：17.
Huang Pinghui，Ji Jianghui. Simulation and orbit solution algorithm of exoplanet detection based on astrometry[J]. Acta Astronomica Sinica，2016，57(5)：17.

[4] 王家骥. 寻找太阳系外的宜居行星[J]. 自然杂志，2014(2)：105-115.
Wang Jiaji. Looking for habitable planets outside our solar system[J]. Chinese J. of Nature，2014(2)：105-115.

[5] 余周毅. 利用高精度天体测量法探测可居住带类地行星[C]// 中国天文学会 2016 年学术年会，2016.
Yu Zhouyi. Detection of earth-like planets in the habitable zone by high-precision astrometry [C]// 2016 Academic Annual Meeting of Chinese Astronomical Society，2016.

[6] Zhai C，Shao M，Nemati G B. Micro-pixel accuracy centroid displacement estimation and detector calibration [J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences，2011，467(2136)：3550-3569.

[7] 郝云彩，贾瑞明，马晓蕾. 基于 PSF 相关的星点定位算法[J]. 空间控制技术与应用，2015，41(6)：1-7.
Hao Yuncai，Jia Ruiming，Ma Xiaolei. Star location algorithm based on PSF correlation [J]. Aerospace Control and Application，2015，41(6)：1-7.

[8] 李　登，张　泽，肖　思，等. 基于 CCD 标定的微像素精度图

像定位技术[J]. 半导体光电，2018，39(5)：722-726，732.
Li Deng，Zhang Ze，Xiao Si，et al. Micro-pixel precision image location technology based on CCD calibration [J]. Semiconductor Optoelectronics，2018，39(5)：722-726，732.

[9] 王 敏，赵金宇，陈 涛. 基于各向异性高斯曲面拟合的星点质心提取算法[J]. 光学学报，2017，37(5)：10.
Wang Min，Zhao Jinyu，Chen Tao. Star centroid extraction algorithm based on anisotropic Gaussian surface fitting[J]. Acta Optica Sinica，2017，37(5)：10.

[10] 曹 阳. 微像素质心定位技术研究[D]. 北京：中国科学院大学，2019.
Cao Yang. Research on micro-pixel centroid positioning technology[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2019.

[11] Anderson J，King I R. An improved distortion solution for the Hubble space telescope's WFPC2[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific，2002，115(803)：113.

[12] 申 娟，张广军，魏新国. 基于卡尔曼滤波的星敏感器在轨校准方法[J]. 航空学报，2010，31(6)：1220-1224.
Shen Juan，Zhang Guangjun，Wei Xinguo. On-orbit calibration of star sensor based on Kalman filter[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica，2010，31(6)：1220-1224.

[13] 刘 宇，戴东凯，马丽衡，等. 一种基于姿态关联帧的星敏感器标定方法[J]. 光学学报，2017，37(11)：1-8.
Liu Yu，Dai Dongkai，Ma Liheng，et al. A star sensor calibration method based on attitude correlated frame[J]. Acta Optica Sinica，2017，37(11)：1-8.

[14] Bendek E A，Guyon O，Belikov R，et al. Exoplanet detection and characterization using combined coronagraphy and sub-UAS astrometry from space[J]. Inter. Society for Optics and Photonics，2013，8864：886405.

[15] Dennison K，Ammons S M，Garrel V，et al. An engineered design of a diffractive mask for high precision astrometry [C]// Proc. SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation，2016.

[16] Shaklan S，Bendek E A，Ammons S M，et al. Dynamic distortion calibration using a diffracting pupil：high precision astrometry laboratory demonstration for exoplanet detection [J]. Proc. SPIE，2011，8151：1-12.

[17] 陈 杨，王跃明. 大像场离轴三反望远镜畸变特性分析与设计[J]. 光学学报，2013，33(2)：0222003.
Chen Yang，Wang Yueming. Analysis and design of distortion characteristics of off-axis three-mirror telescope with large image field[J]. Acta Optica Sinica，2013，33(2)：0222003.

[18] 常 军，翁志成，姜会林，等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. 光学学报，2003，23(2)：216-219.
Chang Jun，Weng Zhicheng，Jiang Huilin，et al. Design on three-reflective-mirror system used in space[J]. Acta Optica Sinica，2003，23(2)：216-219.

作者简介：

孙永恒(1997－)，男，硕士生，主要从事空间光电精密测量研究；

方 亮(1980－)，男，副研究员，主要从事空间光学精密测量研究；

张 辉(1974－)，女，新疆人，正高级工程师，主要从事航空航天飞行器自主导航技术研究。