

doi:10.3788/gzxb20184711.1128002

四棱锥传感器在空间光干涉望远镜共相中的应用

颜召军, 郑立新, 王超燕, 蔡建清, 陈欣扬, 周丹

(中国科学院上海天文台 光学天文技术研究室, 上海 200030)

摘 要: 针对空间光干涉望远镜提出了一种基于四棱锥波前传感器的相位平移误差检测与闭环校正方法, 该方法依次在三种不同波长条件下, 用四棱锥传感器检测两子镜间的平移误差, 并依据实时测量结果控制子镜产生相应的校正平移量, 直到将平移误差校正到所用半波长的整数倍, 而后根据已知的波长数据和子镜平移量数据计算得到真实的平移误差, 进而对平移误差进行闭环校正. 以两个子镜构成的空间望远镜为研究对象, 对该检测与闭环校正方法进行了仿真验证. 仿真结果表明, 该方法可在 $500\ \mu\text{m}$ 范围内对相位平移误差进行准确闭环校正, 具有纳米级的精度与良好的重复性.

关键词: 天文光学; 望远镜; 共相; 空间望远镜; 干涉; 四棱锥

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1128002-7

Application of Pyramid Sensor for Co-phasing Space Optical Interferometric Telescope

YAN Zhao-jun, ZHENG Li-xin, WANG Chao-yan, CAI Jian-qing, CHEN Xin-yang, ZHOU Dan
(The Astronomical Optical Instrument Group, Shanghai Astronomical Observatory,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: An innovative piston error detecting and close loop correction method based on pyramid wavefront sensor was proposed for space optical interferometric telescope. Three different wavelengths are used in turn in the method, in which the pyramid sensor is used to measure the piston errors between sub-mirrors, and then the sub-mirrors are controlled to compensate the corresponding piston errors based on the real-time measurement results until the piston errors reach an integral multiple of half of the used wavelength. After that, the real values of piston error are calculated based the known data of wavelengths and quantities of piston compensation of sub-mirrors, and finally the piston errors can be controlled by closed loop correction. The proposed method was analyzed theoretically and researched by simulations in which a telescope with two sub-apertures was taken as research object. The results proved that the piston error between two sub-apertures can be soundly detected and corrected while the piston error is not more than $500\ \mu\text{m}$. In addition, the novel method meets the precision of nanometer and has good repeatability.

Key words: Astronomical optics; Space telescope; Co-phasing; Interferometry; Pyramid

OCIS Codes: 280.4788; 350.1260; 120.5050

0 引言

望远镜的空间分辨率与其口径成正比, 较大的口径可以获得较高的分辨率. 目前人类可建造的最大单镜面望远镜的口径为 $8\ \text{m}$ 左右, 建造更大口径的单镜面望远镜受到制造工艺、成本等因素的制约^[1]. 光干涉技术是一种提高望远镜空间分辨率的有效途径^[2]. 地基光干涉望远镜有良好应用前景, 但其成像质量会受到地球大气湍流扰动的影响. 而空间望远镜因无大气扰动影响, 可以在很宽的光学波段进行观测, 对光干涉望远

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 11403079, 11873078) 资助

第一作者: 颜召军(1983-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为天文光干涉技术. Email: zhaojunyan@shao.ac.cn

收稿日期: 2018-06-14; 录用日期: 2018-08-24

<http://www.photon.ac.cn>

镜技术发展十分有利,ESA、NASA 都积极开展空间光干涉望远镜的研究与研制^[3-4]。

光干涉望远镜获得接近衍射极限分辨率图像的关键是在整个视场中保证来自于孔径的光束在焦面上相干叠加,且共相误差必须稳定控制在十分之一波长范围内^[5]。光干涉望远镜中的平移误差探测与控制技术已成为该领域研究的热点。平移误差探测技术主要包括:

1)干涉仪法。该方法测量精度高,但干涉仪体积大、结构复杂,不适宜用于空间望远镜^[6]。

2)相位差法。LÖFDAHL M G 等将相位差法用于 Keck II 共相误差检测,该方法测量精度优于 15 nm,但测量范围为一个波长,使用双波长测量范围可扩大约几倍^[7]。

3)宽带哈特曼法和窄带哈特曼法。CHANAN G 最早将该方法用于 Keck 望远镜中的相位平移误差检测问题^[8]。宽带哈特曼方法测量范围约为 30 μm ,测量精度仅为 60 nm;窄带哈特曼法检测精度高达 12 nm,但测量范围很小,仅为半个波长。宽带哈特曼法和窄带哈特曼法需要配合使用,检测效率低^[9]。

4)色散条纹哈特曼传感器共相检测方法。加州理工大学科研人员最早提出了色散条纹哈特曼传感器平移误差检测方法。该方法测量范围可达 100 μm ,测量精度优于 0.1 μm ,但当绝对平移误差小于半个波长时,该方法需借助于其他平移误差检测方法^[10-11]。北京理工大学王姗姗等在此基础上提出一种改进的共相误差检测方法—色散瑞利干涉法。该方法需要事先对共相误差为零时的干涉条纹极大值位置进行精确标定,然后才能从干涉条纹中提取出平移误差信息^[12]。基于色散条纹的共相检测方法测量范围大、精度高,但是实现该方法需要特定的共相检测传感器,实现复杂,光路中的分光及色散元件的使用使得光能利用率低,此外该方法还受到子镜数目以及子镜间距的限制。

5)基于四棱锥波前传感器的共相检测方法。欧洲南方天文台对四棱锥波前传感器在共相检测中的应用进行了研究。其研究表明该方法测量精度高,对平移误差的测量精度达到了 5.7 nm,但该方法的测量与校正范围仅为一个波长,即使采用双波长方法,其测量与校正范围仍然只有几微米^[13-14]。

其他的共相误差检测方法还有双波长切换法^[15]、焦面图像分析算法^[16]、RSC 算法(Redundant Spacing Calibration)^[17]等。目前大多数的共相检测方法或能在几十乃至百微米范围内实现粗共相检测,或只能在一个或者若干个波长范围内对相位平移误差进行高精度检测,或实现复杂,或受到子镜数目以及子镜间距的限制,不适于空间光干涉望远镜。为解决空间光干涉望远镜中的相位平移误差检测,校正现有方法存在的不足,提出了一种基于四棱锥传感器的相位平移误差检测与闭环校正方法。对关键算法进行了理论分析与推导,并通过仿真实验进行验证。

1 四棱锥传感器对相位平移误差的响应

图 1 为基于四棱锥波前传感器的双孔径共相检测光路示意图。四棱锥位于透镜 L_1 (焦距为 f_1)的焦点位置,每个孔径的入射波前经过透镜 L_1 后聚焦在四棱锥尖顶,被其分成了 4 束,之后经过透镜 L_2 (焦距为 f_2)后在其焦平面位置处的 CCD 上形成光瞳像,每一个孔径对应 4 个光瞳像。计算某一个孔径在 CCD 上对应的 4 个光瞳像在 x 方向和 y 方向的光强差,就可以得到该孔径的波前在 x 方向、 y 方向上的波前斜率。假定某

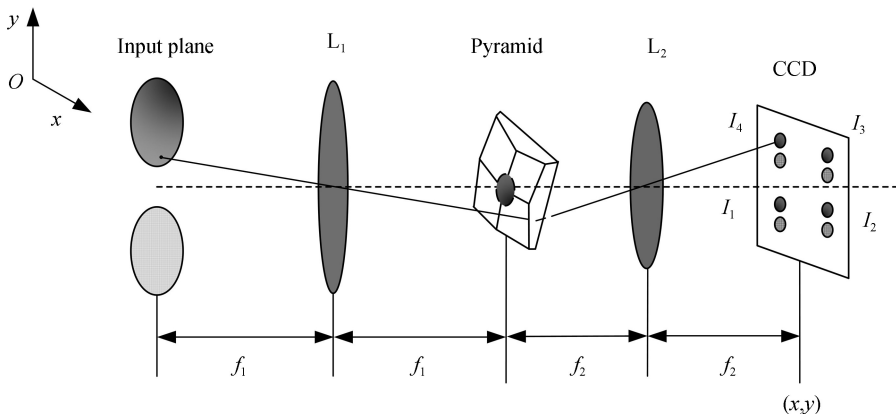


图 1 四棱锥波前传感器共相检测光路示意图

Fig.1 Scheme of an optical setup of a pyramid wavefront sensor for co-phasing detecting

一个孔径对应的 4 个光瞳像的光强分别为 I_1, I_2, I_3, I_4 , 则该孔径的波前在 x 方向和 y 方向的斜率分别为

$$S_x(x, y) = \frac{[I_1(x, y) + I_4(x, y)] - [I_2(x, y) + I_3(x, y)]}{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y)} \quad (1)$$

$$S_y(x, y) = \frac{[I_3(x, y) + I_4(x, y)] - [I_1(x, y) + I_2(x, y)]}{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y)} \quad (2)$$

对于单个望远镜, 四棱锥波前传感器可以对除平移像差之外的其它各阶像差进行探测, 对于多个子镜构成的光干涉望远镜, 四棱锥传感器除了可以探测各子镜传输路径上的像差之外, 还可以探测两子镜间的相位平移误差. 图 2 给出了两子镜间的相位平移误差分别为 $\pi/2, 0$ 时, 四棱锥传感器探测到的双孔的光瞳像. 显然, 四棱锥传感器对子镜间的相位平移误差有响应.

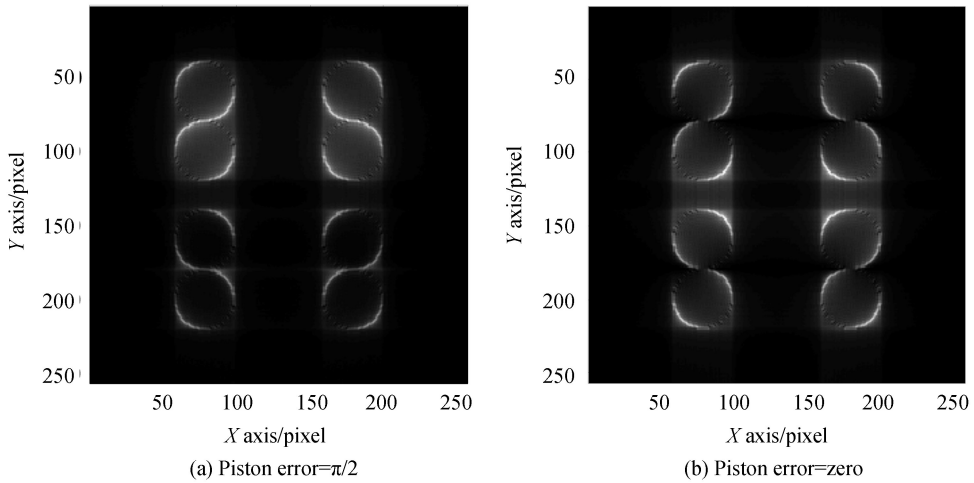


图 2 相位平移误差分别为 $\pi/2, 0$ 时的光瞳像

Fig.2 The pupil intensity distribution images for piston error = $\pi/2$ and piston error = zero

进一步对四棱锥传感器探测到的光瞳像信息与平移误差之间的关系进行了仿真. 仿真中首先利用响应矩阵非实测法获取复原矩阵^[18], 而后计算得到图 3 所示的四棱锥传感器对平移误差的响应曲线. 图 3 横轴为输入的平移误差真实值, 纵轴为平移误差复原值(仿真中施加了 0.25λ 的平移误差以获取复原矩阵). 图 3 表明四棱锥传感器对平移误差的“响应”具有周期性, 且是非线性响应, 只在很小的范围内近似线性. 采用单波长时, 四棱锥传感器只能粗略测量一个波长范围内的平移误差. 采用双波长技术可以将平移误差探测与校正的范围增大到几个微米. 对于地基光干涉望远镜, 大气湍流引入的相位平移误差抖动可达几十微米, 这显然超过了当前四棱锥传感器能够闭环探测与校正的范围. 空间望远镜不受大气湍流扰动影响, 对共相检测与共相校正实时性要求低, 因此尝试将四棱锥传感器用于空间光干涉望远镜中的平移误差检测与校正, 充分发挥该传感器光能利用率高、灵敏度高、测量效率高的优势(可以对几十、几百个子镜同时测量).

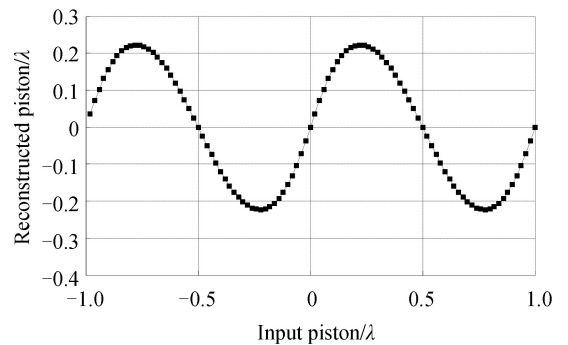


图 3 四棱锥传感器对平移误差探测的响应曲线

Fig.3 The response curve of pyramid sensor for detecting piston error

2 基于四棱锥传感器的相位平移误差测量原理

由图 3 四棱锥传感器平移误差探测响应曲线可知, 当相位平移误差在 $-\lambda/2 < \delta < \lambda/2$ 范围内时, 四棱锥传感器探测到的斜率信号经过复原计算后可得到相位平移误差粗略值, 且该测量值与其真实值存在误差, 但

可以正确反应相位平移误差是否是半波长的整数倍.基于相位平移误差 δ 的复原值,可以对其进行闭环校正,最终将相位平移误差 δ 校正到 $\lambda_1/2$ 的整数倍,即

$$\delta + 2P(\lambda_1) = n_1 \lambda_1 / 2, n_1 \in Z \quad (3)$$

式中, $P(\lambda_1)$ 表示某一子镜的平移校正量(平移误差为平移量的两倍).然后依次在波长 λ_2 和 λ_3 条件下,先后执行闭环探测与校正过程,可以得到

$$\delta + 2P(\lambda_1) + 2P(\lambda_2) = n_2 \lambda_2 / 2, n_2 \in Z \quad (4)$$

$$\delta + 2P(\lambda_1) + 2P(\lambda_2) + 2P(\lambda_3) = n_3 \lambda_3 / 2, n_3 \in Z \quad (5)$$

考虑到实际系统中子镜平移产生的平移量控制误差以及四棱锥传感器中存在的噪声等因素对闭环探测与校正的影响,对式(3)~(5)进行修正,即

$$\begin{cases} \delta + 2P(\lambda_1) = (n_1 + \sigma_1) \lambda_1 / 2 \\ \delta + 2P(\lambda_1) + 2P(\lambda_2) = (n_2 + \sigma_2) \lambda_2 / 2 \\ \delta + 2P(\lambda_1) + 2P(\lambda_2) + 2P(\lambda_3) = (n_3 + \sigma_3) \lambda_3 / 2 \\ |\sigma_i| < \epsilon, i = 1, 2, 3 \\ n_i \in Z, i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (6)$$

式中, ϵ 为误差控制参数,表示系统中子镜平移产生的平移控制误差以及四棱锥传感器中存在的噪声等误差对闭环探测与校正的影响.在式(6)中, λ_i, ϵ (ϵ 一般设为 0.01,即误差控制在百分之一波长范围内)、 $P(\lambda_i)$ 为已知量,因此可以用遍历法求得 n_i ,最终得到相位平移误差 δ 的真实值. $P(\lambda_i)$ 的范围与精度取决于子镜平移使用的驱动器的行程与控制精度,当前可制造出毫米级行程、亚纳米级精度的驱动器.

3 仿真实验

3.1 仿真参数

考虑两子镜组成的稀疏孔径望远镜系统.四棱锥塔尖处等效的 F 数约为 44. CCD 靶面大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 像元大小为 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$, 像元深度为 14 位, 仿真中控制每帧图像最大灰度值约为 13 000, 光瞳像中添加均值为 500、方差为 100 的白噪声.探测时采用三种波长,分别为 610 nm、670 nm 和 730 nm.设定两子镜的相位平移误差变化范围为 $-500 \sim 500 \mu\text{m}$.

3.2 响应矩阵测量

利用衍射理论计算得到平移误差响应矩阵 C .首先,设定任意一个子镜 M 的相位平移误差为四分之一波长(也可以为其他数值),另一个子镜 O 的相位平移误差为 0,然后模拟产生系统的远场光瞳像,计算子镜 M 的波前斜率信息 $S_M = [S_{Mx}; S_{My}]$ (S_{Mx} 、 S_{My} 分别为 x 方向和 y 方向的波前斜率),提取子镜 O 的波前斜率信息 $S_O = [S_{Ox}; S_{Oy}]$,则四棱锥传感器的响应矩阵 $C = 4 \begin{bmatrix} S_O \\ S_M \end{bmatrix}$,复原矩阵为 C^+ .

3.3 单波长时的闭环探测与校正过程

在单波长 $\lambda_1 = 610 \text{ nm}$ 条件下的闭环探测与校正过程为:

步骤 1: 从四棱锥传感器采集的光瞳像中分别提取子镜 O 和子镜 M 的波前斜率向量 S_O 和 S_M .

步骤 2: 复原计算得到子镜 M 和子镜 O 之间的相位平移误差 $z = C^+ \begin{bmatrix} S_O \\ S_M \end{bmatrix}$.

步骤 3: 计算子镜 M 的平移量 $Q = -z/2$.

步骤 4: 驱动子镜 M 产生平移量 $T(i) = \alpha Q$, α 为比例控制系数(取 0.8), i 为子镜 M 平移的次数(当第一次执行步骤 4 时, $i = 1$, 当执行步骤 5 时, 会重复执行步骤 4, 此时 i 相应变化).

步骤 5: 重复执行步骤 1~4, 直到步骤 2 中计算得到的相位平移误差小于预设误差(此时两子镜间的相位平移误差近似为半波长的整数倍).

在上述步骤中, 步骤 4 共执行的次数为 N , 则子镜 M 的平移量 $p(\lambda_1) = \sum_{i=1}^N T(i)$.

由步骤 2 可知, 相位平移误差复原结果取决于两子镜的光瞳像数据, 而光瞳像数据与子镜的间距无关, 即相位平移误差的探测不受子镜间距的影响.

3.4 多波长时的闭环探测与校正过程

在单波长 λ_1 条件下执行了闭环探测与校正过程后,绝对相位平移误差近似为半波长的整数倍,子镜 M 的平移量为 $p(\lambda_1)$.为了消除相位平移误差中的 2π 模糊,依次在 $\lambda_2 = 670 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 730 \text{ nm}$ 条件下分别执行 3.3 节中的步骤 1~5,得到 $p(\lambda_2)$ 和 $p(\lambda_3)$.

此时在式(6)中,已知量为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, p(\lambda_1), p(\lambda_2), p(\lambda_3)$,设定容许的误差 $\epsilon = 0.01$,依次设定 $n_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$,然后从式(6)中的第一个等式中求解得到绝对的相位平移误差 δ ,分别代入式(6)中的第二个和第三个等式,求解得到 σ_2 和 σ_3 .若 σ_2 和 σ_3 满足 $|\sigma_i| < 0.01, i = 2, 3$,则设定的 n_1 正确,即此时求解得到的绝对的相位平移误差 δ 正确,否则,重新设定 n_1 ,直至其正确.得到两子镜的相位平移误差后,即可对其进行补偿校正,最终将相位平移误差控制在设定的误差范围.

3.5 仿真结果

图 4 给出了依次采用波长 $\lambda_1 = 610 \text{ nm}, \lambda_2 = 670 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 730 \text{ nm}$ 时,相位平移误差(包含 2π 模糊)随校正次数变化情况.图 4 中横轴为校正迭代次数,每个波长条件下校正次数均为 20;纵轴为包含 2π 模糊时的相位平移误差值.在每个波长条件下,利用四棱锥传感器对包含 2π 模糊的相位平移误差进行测量,进而进行闭环校正,经过 20 次的测量与闭环校正后将相位平移误差校正到所用半波长的整数倍(对应图 4 中纵轴的值为 0 或 1).图 5 给出了依次采用波长 $\lambda_1 = 610 \text{ nm}, \lambda_2 = 670 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 730 \text{ nm}$ 时,绝对相位平移误差随校正次数变化情况.进一步说明了在每个波长条件下,利用四棱锥传感器对包含 2π 模糊的相位平移误差进行测量与闭环校正后,相位平移误差被校正到所用半波长的整数倍.

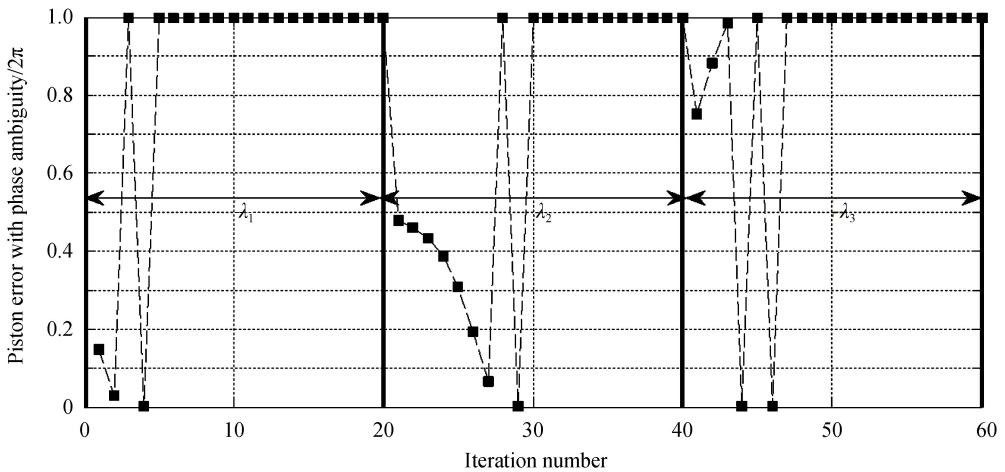


图 4 相位平移误差(包含 2π 模糊)随校正次数变化情况

Fig.4 The piston error (with 2π ambiguity) changes with correction iterations

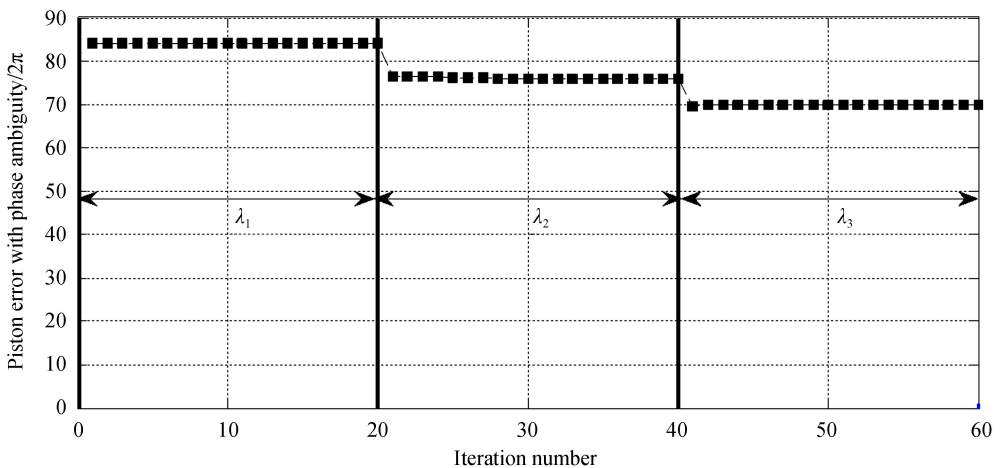


图 5 绝对相位平移误差随校正次数变化情况

Fig.5 The absolute value of piston error changes with correction iterations

图4中,子镜M的平移量 $p(\lambda_1) = -44.5 \text{ nm}$ 、 $p(\lambda_2) = -160 \text{ nm}$ 、 $p(\lambda_3) = 90 \text{ nm}$,在式(6)中求解得到绝对相位平移误差为 $51.329 \mu\text{m}$,最终的测量误差小于 1 nm 。

为了进一步检测所提方法的准确性与重复性,在不同大小平移误差条件下进行了仿真测试.随机产生 $-500 \sim 500 \mu\text{m}$ 范围内的相位平移误差,用该方法对平移误差进行检测与闭环校正.相位平移误差的真实值及其测量误差值分别如图6(a)、(b)所示.图6的结果说明了当相位平移误差绝对值小于 $500 \mu\text{m}$ 时,其测量误差均小于 1 nm ,验证了该方法的准确性,同时也说明该方法具有很高的精度以及很好的重复性。

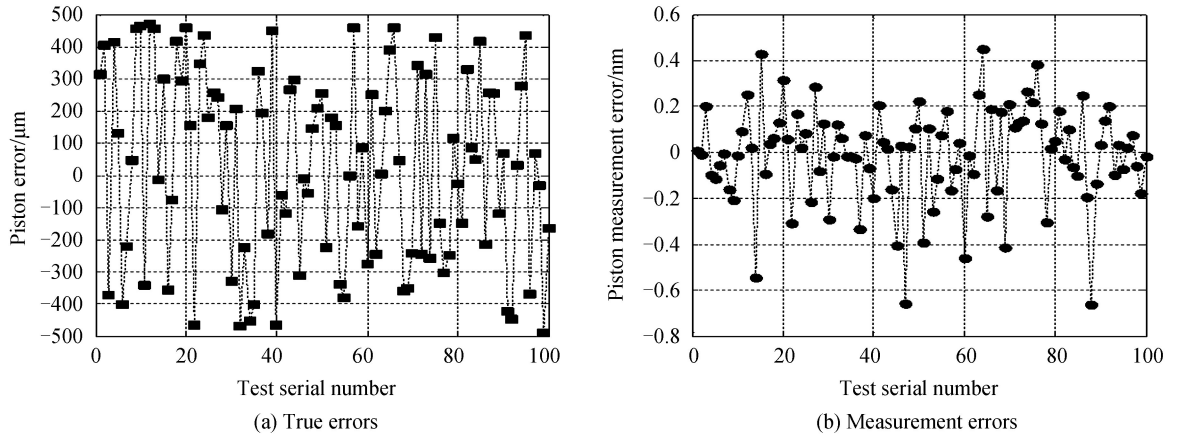


图6 100次随机测试得到的相位平移误差
Fig.6 Values of piston error in 100 trials of random test

得到两子镜的相位平移误差后,即可对其进行补偿校正,但通常一次校正不能将其校正到零位.若补偿校正后的相位平移误差仍不满足设定要求,可以多次执行探测与闭环校正过程,最终可将相位平移误差控制在纳米级。

对于多子镜构成的光干涉望远镜,可以设定视场中心的子镜为参考镜,采用共相检测与控制方法,同时并行地对其他子镜与参考子镜间的相位平移误差进行探测与闭环校正。

4 结论

提出了一种基于四棱锥传感器的空间光干涉望远镜共相检测与闭环控制方法,并在有探测噪声的条件下对该方法进行了仿真验证.仿真结果表明该方法可以在 $-500 \sim 500 \mu\text{m}$ 范围内对相位平移误差进行准确检测,具有纳米级的检测精度与良好的重复性.该方法工作稳定、适应性强,且实现简单,非常适用于空间光干涉望远镜.对于有许多个子镜组成的光干涉望远镜,该方法使用一个四棱锥传感器即可对所有子镜间的相位平移误差进行检测与闭环校正,且该检测与闭环校正过程可以并行处理,降低了共相检测硬件复杂度,提高了共相检测与校正的效率.未来将开展该方法的实验验证与实用化研究工作。

致谢 感谢意大利国家天体物理研究所博洛尼亚天文台 Carmelo Arcidiacono、Enrico Pinna 对本工作提出的建议和帮助。

参考文献

- [1] List of largest optical reflecting telescopes[EB/OL]. [2018-03-08]. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_optical_reflecting_telescopes.
- [2] MEINEL A B, MEINEL M P. Large sparse aperture space optical systems[J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(8): 1983-1994.
- [3] ESA. About science & technology-missions[EB/OL]. [2018-03-08]. <http://sci.esa.int/home/51459-missions/>.
- [4] NASA. Featured missions & projects-astrophysics science division (660) [EB/OL]. [2018-0308]. https://science.gsfc.nasa.gov/sed/index.cfm?fuseAction=projects.featured&navOrgCode=660&navTab=nav_about_us.
- [5] CHEETHAM A C, TUTHILL P G, SIVARAMAKRISHNAN A, *et al.* Fizeau interferometric cophasing of segmented mirrors[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(28): 29457-29471.
- [6] SONG He-lun, LI Hua-qiang, XIAN Hao, *et al.* Application of low-coherence-source interferometric system to phase error detection of segmented primary mirrors for large-aperture telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1523-1526.

- 宋贺伦,李华强,鲜浩,等. 低相干光源干涉系统在大口径拼接子镜间相位误差检测上的应用[J]. 光学学报, 2008, **28**(8):1523-1526.
- [7] LOFDAHL M G, KENDRICK R L, MITCHELL K E, *et al.* Phase diversity experiment to measure piston misalignment on the segmented primary mirror of the Keck II Telescope[C]. SPIE,1998, **3356**: 1190-1201.
- [8] CHANAN G, TROY M, DEKENSF, *et al.* Phasing the mirror segments of the Keck telescopes: the broadband phasing algorithm[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(1): 140-55.
- [9] LI Bin, WU Jian, LIU Yan-de, *et al.* Co-phasing experiment of active optics for segmented mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(2): 0212003.
李斌, 吴建, 刘燕德, 等. 拼接镜主动共相实验研究[J]. 光子学报, 2018, **47**(2): 0212003.
- [10] SHI F, REDDING D, BOWERS C, *et al.* DCATT dispersed fringe sensor: modeling and experimenting with the transmissive phase plates[C]. SPIE, 2000, **4013**: 757-762.
- [11] SHI F, CHANAN G, OHARA C, *et al.* Experimental verification of dispersed fringe sensing as a segment phasing technique using the Keck telescope[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(23): 4474-4481.
- [12] WANG Shan-shan, ZHU Qiudong, CAO Gen-rui. Cophasing methods of segmented space telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2435-2440.
王姗姗,朱秋东,曹根瑞. 空间拼接主镜望远镜共相位检测方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2435-2440.
- [13] VERINAUD C, ESPOSITO S. Real-time phasing and co-phasing of a ground-based interferometer with a pyramid wavefront sensor[C]. European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings, 2002, **58**: 153-160.
- [14] ESPOSITO S, PINNA E, PUGLISI A, *et al.* Pyramid sensor for segmented mirror alignment[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(19): 2572-2574.
- [15] LI Bin, YU Wen-hao, TANG Jin-long, *et al.* Theory and experiment of phasing detection by use of two wavelengths [J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(1): 1-7.
- [16] JIANG Jun-lun, ZHAO Wei-rui. Phasing piston error in segmented telescopes[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(17): 19123-19137.
- [17] EASTWOOD R J, JOHNSON A M, GREENAWAY A H. Calculation and correction of piston phase aberration in synthesis imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America A-optics Image Science and Vision*, 2009, **26**(1): 195-205.
- [18] YAN Zhao-jun, YANG Peng-qian, CHEN Xin-yang. Pupil calibration method of mon-modulation pyramid wavefront sensor[J].*Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(6): 0601002.
颜召军,杨朋千,陈欣扬. 无调制四棱锥波前传感器的光瞳像标定方法[J]. 光学学报, 2016, **36**(6): 0601002.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 11403079,11873078)

引用格式: YAN Zhao-jun, ZHENG Li-xin, WANG Chao-yan, *et al.* Application of Pyramid Sensor for Co-phasing Space Optical Interferometric Telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1128002

颜召军,郑立新,王超燕,等.四棱锥传感器在空间光干涉望远镜共相中的应用[J].光子学报,2018,**47**(11):1128002