

文章编号 1004-924X(2018)11-2647-07

拼接镜新型粗共相检测方法

李 斌*, 刘燕德, 谢锋云

(华东交通大学 机电学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为了实现拼接镜平移误差的大量程、快速检测,提出了一种利用白光(400~700 nm)远场光斑相干性来检测拼接镜 piston 误差的方法。该方法以两半圆孔间的非相干衍射图案为模板,利用互相关算法求解实际衍射图案与模板图案间的互相关系数,通过设定 0.85 阈值,实现拼接镜 piston 误差的粗共相检测。搭建了一套室内拼接镜的主动共相检测实验光路系统,其中拼接镜是由 4 块对边长为 100 mm,曲率半径为 2 000 mm 的正六边形球面反射镜组成,利用白光(400~700 nm)远场光斑相干性测量拼接主镜各子镜间平移误差的方法进行了理论与仿真分析。利用波前探测器和主动光学技术实现了拼接镜精共焦误差的检测与调节,通过远场光斑相干性和主动光学技术实现了粗共相的检测和调节。实验表明:该方法耗时短、能量利用率高,可实现无限量程、±250 nm 精度的检测和调节,适合拼接镜的粗共相检测和调节。

关键词:天文光学;望远镜;主动光学;共相检测

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182611.2647

Coarse co-phasing detection of segmented mirrors

LI Bin*, LIU Yan-de, XIE Feng-yun

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering,
East China Jiao-tong University, Nanchang 330013, China)

* Corresponding author, E-mail: libingioe@126.com

Abstract: To realize a time-efficient and wider range of measurements of piston errors of segmented mirror, a method based on the coherence of the Fraunhofer diffraction pattern of two half circles in visible light was proposed to detect the piston errors of the segmented mirror. In this method, the noncoherent diffraction pattern of the two half circulars was used as a template, and the cross-correlation algorithm was used to calculate the cross-correlation coefficient between the template pattern and the actual diffraction pattern. To achieve coarse co-phasing detection of piston errors of the segmented mirror, the threshold value of the cross correlation coefficient was set as 0.85. The proposed method has advantages such as time-efficiency, better energy usage ratio, infinite detection range, and a better measurement accuracy. The method was validated by theoretical, analytical, and numerical simulations. An active optics and co-phasing experimental system of the segmented mirror was built to measure and adjust the piston errors of the segmented mirror. The segmented mirror consists of four hexagonal segments whose edge to edge length is 100 mm and the curvature radius is 2 000 mm. Initially, to fine co-focus the segmented mirror, a shack-Hartmann sensor and active optics

收稿日期:2018-04-23;修订日期:2018-07-03.

基金项目:江西省教育厅科技基金资助项目(No. 170402);国家自然科学基金资助项目(No. 51565015)

technology were used. Then, the coherence of the Fraunhofer diffraction pattern of the two half circulars in visible light was used to detect the piston errors of the segmented mirror, which can be adjusted using active optics technology. The experimental results show that the detection range is infinite and the measurement accuracy is better than ± 250 nm. Theoretical, analytical, and experimental results demonstrated that the proposed method is suitable for segmented mirror coarse co-phasing measurement and adjustment.

Key words: astronomical optics; telescope; active or adaptive optics; co-phasing detection

1 引言

自 20 世纪 70 年代以来,主动光学技术、计算机技术、传感器技术和先进光学加工技术不断发展,使望远镜口径突破传统望远镜口径成为了可能。目前,大口径望远镜制作主要有轻质镜、蜂窝镜、特殊镜面和拼接镜 4 种。但由于制造技术、运输难度、加工中风险因素等方面的限制,单块镜的光学望远镜并不能无限增大。单块光学望远镜主镜口径的极限约为 8.4 m,若要制造更大口径的光学望远镜,就需采用拼接镜技术。现阶段,拼接镜技术的关键难点之一为各子镜间平移(piston)误差的检测与调节。只有当拼接镜达到精共焦和精共相时,其角分辨率才能达到与其口径相当的单块整镜的角分辨率。一般相邻两子镜的 piston 误差在 $100 \mu\text{m}$ 量级,而为了使拼接式望远镜得到良好的像质,系统的 piston 误差需要控制在 100 nm 以内^[1-2]。因此,拼接镜共相测量需要满足量程大和精度高的要求。

目前,拼接镜 piston 误差检测主要有干涉法^[3]、四棱锥法^[4]、相位差法^[5-6]、曲率传感技术^[7-8]、宽窄带夏克哈特曼法^[9-10]、色散条纹法^[11]、双波长检测法^[12-14]等方法。但这些方法都存在各式的问题,如干涉法不能实时检测拼接镜的 piston 误差,相位差法存在检测时间过长、检测量程小的缺点,四棱锥存在顶点对准难、加工难度大等问题,色散条纹不适用拼接镜个数多的情况,双波长存在能量利用率低等缺点。而拼接镜 piston 误差检测范围需从 $100 \mu\text{m}$ 量级到 100 nm 量级,而单种共相检测方法难以实现大量程、高精度的检测。目前,两个正在运行的拼接式望远镜都采用宽带和窄带相结合的方法达到 $100 \mu\text{m}$ 量程和 100 nm 量级的检测。由于宽带夏克哈特曼法调节共相所需耗时长、效率低,多种共相检测相结合

的方法虽能达到大量程、高精度的检测,但不能达到大量程、高精度、高效率的共相检测。

本文利用可见光($400 \sim 700 \text{ nm}$)远场光斑相干性的方法来检测拼接镜 piston 误差,即以两半圆孔的非相干衍射图案为模板,利用互相关算法求解互相关系数,通过设定互相关系数的阈值,实现 $100 \mu\text{m}$ 以上量程、 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 以上精度的粗共相检测。该方法具有检测时间短、能量利率高的优点,非常适合拼接镜 piston 误差的粗共相检测。

2 基本原理

图 1 为基于圆孔检测 piston 误差原理示意图。图中圆孔半径为 R ,圆孔被 X 轴等分成两半圆孔,每一半圆孔对应一拼接子镜。当 $Y > 0$ 时,这部分对应拼接子镜的 piston 误差值为 δ ;当 $Y < 0$ 时,这部分对应拼接子镜的 piston 误差为 $-\delta$ 。由此可知,两半圆孔间的物理距离为 2δ ,而光程差为 4δ 。

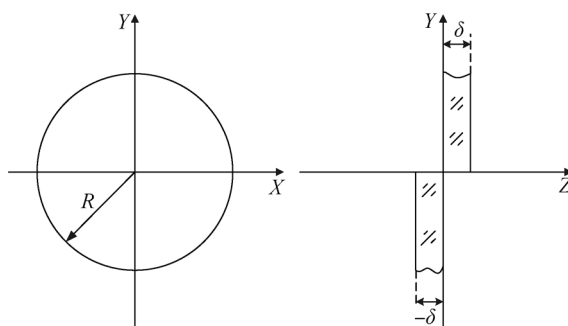


图 1 圆孔衍射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of circular diffraction

假设光源为波长为 λ 的理想单色光,其孔径面的坐标为 (x, y) ,孔径面的极坐标 ρ 为 (ρ, θ) ,孔径的像面坐标为 (ξ, η) ,孔径的像面极坐标 w 为 (w, ϕ) , k 为 $2\pi/\lambda$ 。 $f(\rho, 2k\delta)$ 为孔径平面的复振

幅函数, $f(\mathbf{w}, 2k\delta)$ 为像平面的复振幅函数, 则有:

$$f(\boldsymbol{\rho}, k\delta) = \begin{cases} \exp(i2k\delta), \eta \geq 0; |\boldsymbol{\rho}| \leq R \\ \exp(-i2k\delta), \eta \leq 0; |\boldsymbol{\rho}| \leq R. \\ 0, \boldsymbol{\rho} > R \end{cases} \quad (1)$$

$$I(\mathbf{w}, 2k\delta) = f^2(\mathbf{w}, 2k\delta) = [f(\mathbf{w}, 0) \cos(2k\delta) + f(\mathbf{w}, \pi/2) \sin(2k\delta)]^2. \quad (2)$$

当光源不是理想单色光时, 假设 λ_0 为光源中心波长, $d\lambda$ 为光源波长带宽值, 其宽带光的相干长度 $l = \lambda_0^2 / (2 \times d\lambda)$ 。当 $d\lambda / \lambda_0^2$ 的值相对于 δ 不能忽略时, $\Delta k = -\frac{2\pi d\lambda}{\lambda_0^2}$ 不能近似为零。因此, 带宽 $d\lambda$ 对式(2)中两三角函数值的影响就不能忽略不计。

现假设 k 服从 (k_0, σ_k) 高斯分布, 则:

$$f(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left[-\frac{(k-k_0)^2}{2\sigma_k^2}\right]. \quad (3)$$

把式(3)带入式(2)得:

$$I(\mathbf{w}, k\delta) = \alpha_1 f^2(\mathbf{w}, 0) + \alpha_2 f(\mathbf{w}, 0) f\left[\mathbf{w}, \frac{\pi}{2}\right] + \alpha_3 f^2\left[\mathbf{w}, \frac{\pi}{2}\right], \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2} [1 + \exp(-8\sigma_k^2\delta^2) \cos 4k_0\delta], \\ \alpha_2 &= \exp(-8\sigma_k^2\delta^2) \sin 4k_0\delta, \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2} [1 - \exp(-8\sigma_k^2\delta^2) \cos 4k_0\delta]. \end{aligned}$$

根据以上理论分析可知: 基于宽带光源检测 piston 误差是从式(4)中的系数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 提取相关信息。当 δ 远大于 σ_k 时:

$$I(\mathbf{w}, \infty) = \frac{1}{2} [I(\mathbf{w}, 0) + I\left[\mathbf{w}, \frac{\pi}{2}\right]]. \quad (5)$$

此时, 两半圆孔间的圆孔衍射图案呈现不相干性。因此, 当 2δ 在宽带光源相干长度以内时, 圆孔衍射图案呈现相干性; 当 2δ 在相干长度以外时, 圆孔衍射图案呈现非相干性。

在可见光(400~700 nm)波段, 相干长度 $l = 0.55^2 / (2 \times 0.3) = 0.504 \mu\text{m}$ 。从图 2 中可得: 当两半圆孔之间的 piston 误差在 $(-l/2, l/2)$ 以内时, 即在 $(-0.252 \mu\text{m}, 0.252 \mu\text{m})$ 以内时, 圆孔衍射图案呈现相干性; 当两半圆孔之间的 piston 误差大于 $l/2$ 或小于 $-l/2$ 时, 即大于 $0.252 \mu\text{m}$ 或者小于 $-0.252 \mu\text{m}$ 时, 圆孔衍射图案呈现非相干性。

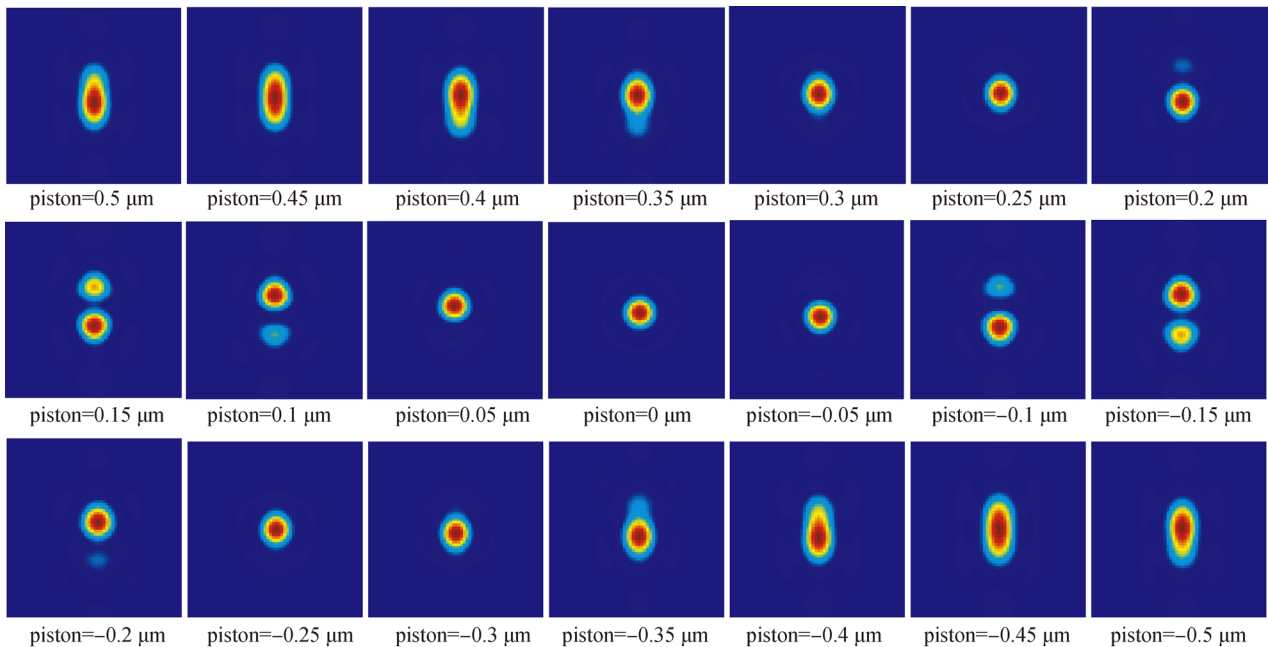


Fig. 2 可见光波段下 piston 误差在 0.5~ -0.5 μm 变化时的理论圆孔衍射图

Fig. 2 Theoretical diffraction patterns for a split circular of radius r with a physical step δ ranging from 0.5 μm to -0.5 μm in 400~700 nm

3 仿真分析

3.1 互相关算法

通过理论和仿真可知:在宽带波段光源下,当两拼接子镜间 piston 误差在 $l/2$ 以外时,两半圆孔间衍射图案非相干;当两拼接子镜间 piston 误差在 $l/2$ 以内时,两半圆孔间衍射图案相干。因此,可利用两半圆孔衍射图案的相干性来计算 piston 误差。

由于在拼接镜共相检测中需实时检测子镜间的 piston 误差,因此,选用互相关算法来计算实际衍射图案与模板图案的相关性,通过两图案的互相关系数来判别两图案的相似程度,其公式如下:

$$\text{corr2} = \frac{\sum_{i \in N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i \in N} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i \in N} (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (6)$$

其中: corr2 为互相关系数, N 为图案像素点总数, x_i 为实时图案 i 点的灰度值, \bar{x} 为实时图案的灰度平均值, y_i 为模板图案 i 点的灰度值, \bar{y} 为模板图案的灰度平均值。

3.2 基于白光远场光斑相干性算法的仿真分析

在实际拼接镜 piston 误差检测中,所选用的光源为白光,此时白光的相干长度为 $0.50 \mu\text{m}$ 。当两拼接子镜间的 piston 误差大于 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 时,两半圆孔间衍射图案不呈现相干性;而当两拼接子镜间的 piston 误差在 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 以内,圆孔衍射图案呈现相干性。现选用非相干两半圆间衍射图案为模板,利用互相关算法计算实际相邻拼接子镜对应的两半圆孔的衍射图与模板图案之间的互相关系数。当 piston 误差大于 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 时,互相关系数接近 1;而当 piston 误差在 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 以内时,互相关系数会大幅下降。因此,可通过设定互相关系数的阈值来计算 piston 误差。当所得到的互相关系数小于所设定阈值时,表明两半圆孔的衍射图已相干,即 piston 误差在相干长度以内,达到粗共相。

图 3 为白光下两拼接子镜间 piston 误差以 $2 \mu\text{m}$ 为起点、步长为 20 nm 扫描到 $-2 \mu\text{m}$ 时,所得圆孔衍射图案与模板图案互相关系数的仿真曲线。其中,图 3(a) 为模板图案为非相干圆孔图案。从图 3 可知:当 piston 误差在 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 以

外时,互相关系数都大于 0.95,而当 piston 误差在 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 以内时,互相关系数大幅下降,且都小于 0.95,因此可设定 0.85 为互相关系数阈值来判别 piston 误差是否在 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 以内。

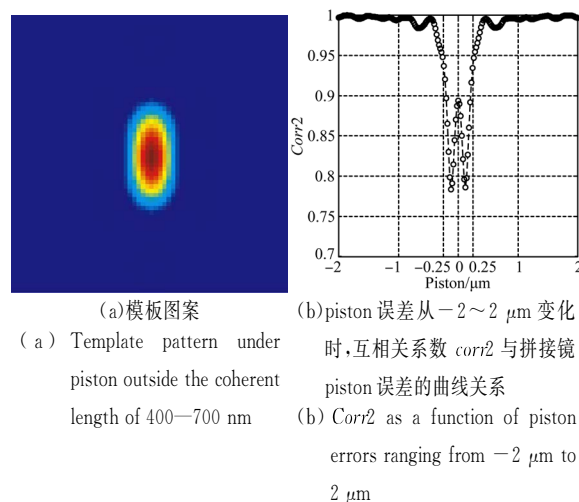


图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

4 实验系统与结果分析

4.1 实验系统组成

本实验系统中的拼接镜由 4 块曲率半径为 $2\,000 \text{ mm}$,对边长 100 mm ,曲率半径为 $2\,000 \text{ mm}$ 的正六边形球面反射镜组成。所有子镜都在其背面安装有一套拼接镜粗精调节结构,以实现拼接镜的精共焦和粗共相的调节。如图 4 所示,通过 3 个精密调节螺杆来实现量程毫米、分辨率微米级的倾斜和平移误差的调节;通过压电陶瓷促动器来实现量程 $100 \mu\text{m}$ 、分辨率纳米级的倾斜和平移误差的调节。

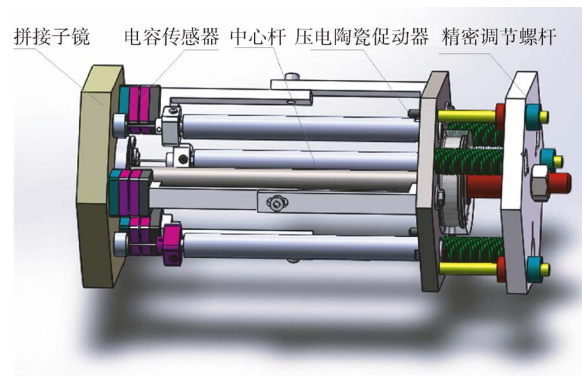


图 4 拼接子镜支撑系统示意图

Fig. 4 Support mechanism of segmented mirror

图 5 为拼接镜光学系统的光路图,图 6 为实验系统照片。图 5 中 S_1 为卤素灯,用以得到白光, S_2 为 650 nm、带宽为 2 nm 的光纤激光光源,用以较大离焦和倾斜误差的调节。 P_1 为 20 μm 小孔,用以产生白光点光源。 L_1, L_2 为 400 mm 双胶合透镜,用以得到平行光; L_3, L_5 为 100 mm (焦距)双胶合透镜, L_4 为 400 mm(焦距)双胶合透镜; R_1 和 R_2 为平面反射镜,BP1、BP2 和 BP3 为分光镜,BS1 和 BS2 为分光棱镜。S-H 为夏克哈特曼波前探测器,用以检测拼接镜共焦误差,其微透镜排布成 17×17 且对边长为 1 mm 的正六边形,焦距为 100 mm,CCD 的分辨率为 $3\,296 \times 2\,472$,像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$ 。另一微透镜排布也为 17×17 且对边长为 1 mm 的正六边形,且微透镜焦距为 100 mm。CCD1 的分辨率为 $1\,296 \times 966$,像素尺寸为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$,用以监测拼接镜远场。CCD2 和 CCD3 的分辨率均为 582×776 ,像素尺寸为 $8.3 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$,分别用以得到干涉条纹信息和两拼接子镜间的远场信息。

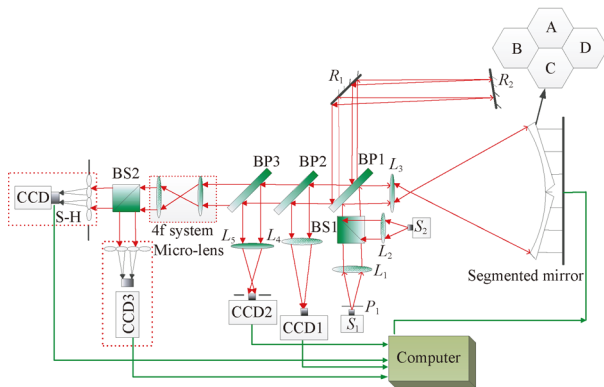


图 5 拼接镜实验系统光路图

Fig. 5 Light path of experimental segmented mirror system

在共相检测前,基于干涉条纹密度和对比度进行手动调节大的离焦量和倾斜误差,利用 S-H 检测每块子镜较小的倾斜量与离焦误差,利用主动光学调节子镜后面的促动器,使拼接镜实现精共焦^[14]。在粗共相检测中,以子镜 C 为参考镜(见图 5),实验中 4 块子镜间的曲率偏差为 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 。首先选取波长为 650 nm,带宽为 2 nm 的激光光纤光源(相干长度 $l = \frac{\lambda_0^2}{2\Delta\lambda} = \frac{0.65^2}{2 \times 0.002} = 100 \mu\text{m}$),手动

调节 A、B、D 后精密调节螺杆,直到它们相对于子镜 C 的圆孔图案为相干远场图案。此时 A、B、D 相对于子镜 C 的 piston 误差小于 100 μm 。然后把光源转换为卤素灯光源,此时相干长度为 0.504 μm ,以非相干图案为模板,以 0.85 为互相关系数阈值,通过控制子镜的后促动器并以 0.05 μm 为步长调节子镜 A、B、D,直到 A、B、D 相对于子镜 C 的 $\text{Corr}2$ 小于互相关系数阈值为止。

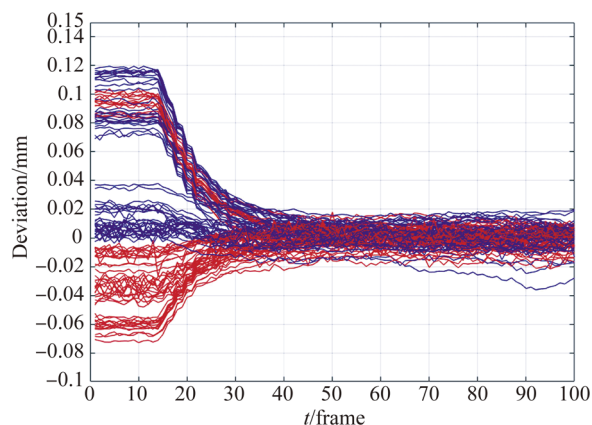


图 6 拼接镜实验系统照片

Fig. 6 Photo of experimental segmented mirror system

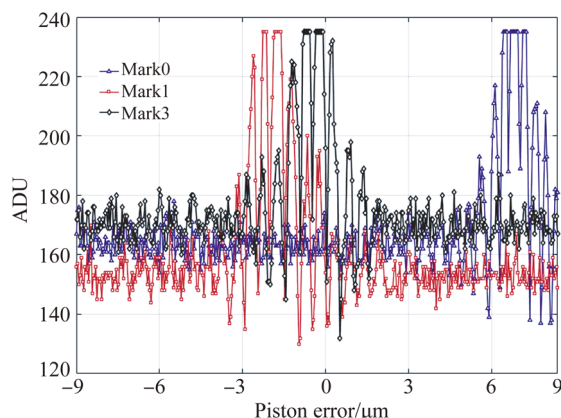
4.2 实验结果与分析

基于 S-H 检测波前误差原理可知:当拼接镜精共焦时,共焦后的 S-H 子远场光斑趋于标定中心;当拼接子镜间远场光斑干涉时,远场光斑能量值(ADU)增大。从图 7(a)可知:当经过 40 帧的相机采样后,拼接镜共焦后,A、B、D 对应的 S-H 中的子光斑相对于标定中心的偏移距离趋于 0,这表明拼接子镜已共焦。图 7(b)中的两拼接子镜的共相远场分别在 $-1, 1, 8 \mu\text{m}$ 处出现能量值增大,说明此处光斑出现相干。图 7(c)中的各拼接子镜的互相关系数小于 0.85 时,间隔距离为 $13 \times 37.5, 14 \times 37.5, 14 \times 37.5$,即为 0.45, 0.525 和 0.525 μm ,而拼接镜的相干长度为 0.5 μm ,精度为 37.5 nm;耗时为相机采样 4 800 帧所用时间,而相机接收 400~700 nm 波段所用能量,能量利用率高,相机不需长曝光;实验室中由于相机自身的限制,采样频率只能达到每秒 9 帧,整个调节时间大概在 8.8 min。该结果表明:所设定的互相关系数的阈值合理可行,耗时较少。



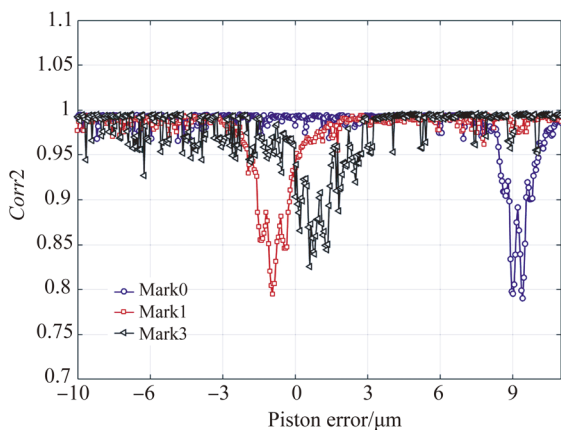
(a) 拼接镜共焦调节时, S-H 偏心距与相机帧数的关系

(a) Deviation of spot centroid as a function of camera frame for co-focus of segmented mirror



(b) 以 37.5 nm 为精度扫描时, 拼接子镜间远场光斑 ADU 随 piston 误差的变化

(b) ADU of far field spot of segmented mirror as a function of piston error with scanning accuracy of 37.5 nm



(c) 以 37.5 nm 为精度扫描时, 各拼接子镜的互相关系数随 piston 误差的变化

(c) *Corr2* as a function of piston error with scanning accuracy of 37.5 nm

图 7 实验结果

Fig. 7 Experimental results

5 结 论

本文提出一种新型的粗共相检测方法, 并搭建了一套拼接镜室内实验系统, 利用条纹对比度和密度检测拼接镜较大的倾斜和离焦误差, 利用精密调节螺杆进行手动调节; 利用 S-H 检测较小

的倾斜和离焦误差, 利用主动光学技术进行调节。在子镜已实现精共焦的情况下, 利用新型共相的方法把子镜间的相位误差从几十微米减小到 ± 250 nm 的误差范围, 利用主动光学技术完成误差调节。实验结果表明: 该方法可实现拼接镜间粗共相的快速调节, 具有无限量程, 快速检测 piston 误差且能量利用率高的优点。

参考文献:

[1] GARY C, TROY M. Rtrehl ratio and modulation transfer function for segmented mirror telescopes as functions of segment phase error [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6642-6647.

[2] 李斌, 唐金龙, 于文豪, 等. 拼接误差对拼接镜成像质量影响的研究 [J]. *激光与光电子进展*, 2017, 54(7): 179-188.

LI B, TANG J L, YU W H, *et al.*. Effect of segmented errors on image quality of segmented telescope [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2017,

- 54(7):179-188. (in Chinese)
- [3] TUTHILL P G, MONNIER J D, DANCHI W C, *et al.*. Michelson interferometry with the Keck telescope [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2000, 112(770):555-565.
- [4] RICHARD A. FRAZIN E. Nonlinear phase estimation with the nonmodulated pyramid wavefront sensor [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(4): 594-607.
- [5] LUO Q, HUANG L H, GU N T, *et al.*. A modified phase diversity wavefront sensor with a diffraction grating [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(9): 1277-1287.
- [6] LI C W, ZHAN S J. Co-phasing of the segmented mirror based on the generalized phase diversity wavefront sensor [J]. *SPIE*, 2010, 8450 (8450): 84500B-1-84500B-6.
- [7] ORLOV V G, CUEVAS S, GARFIAS F, *et al.*. Co-phasing of segmented mirror telescopes with curvature sensing [J]. *SPIE*, 2000, 4004 (4004): 540-550.
- [8] MANUEL A M, PHILLION D W, OLIVIER S S, *et al.*. Curvature wavefront sensing performance evaluation for active correction of the Large Synoptic Survey Telescope [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (2): 1528-1533.
- [9] 林旭东, 王建立, 刘欣悦, 等. 拼接镜主动光学共相实验 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(7):1520-1527.
- LIN X D, WANG J L, LIU X Y, *et al.*. Co-phasing experiment of segmented-mirror active optics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (7): 1520-1527. (in Chinese)
- [10] 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): 0212003-1-0212003-11.
- LI B, WU J, LIU Y D, *et al.*. Co-phasing experiment of active optics for segmented mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 0212003-1-0212003-11. (in Chinese)
- [11] LI Y, WANG SH Q, RAO CH H. Dispersed-fringe-accumulation-based left-subtract-right method for fine co-phasing of a dispersed fringe sensor [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(15): 4267-4273.
- [12] LI B, YU W H, CHEN M, *et al.*. Co-phasing experiment of segmented mirror using a combined broadband and two-wavelength algorithm [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(32): 8871-8879.
- [13] LI B, YU W H, TANG J L, *et al.*. Theory and experiment of phasing detection by use of two wavelengths [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(1): 1-7.
- [14] LI B, YU W H, CHEN M, *et al.*. Co-focus experiment of segmented mirror [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 18(6): 124-130.

作者简介:



李 斌(1989—),男,江西鹰潭人,博士,讲师,2012年于武汉大学获得学士学位,2017年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位,主要从事拼接镜共相检测和太赫兹光谱应用的研究。E-mail: libingioe@126.com



刘燕德(1967—),女,江西泰和人,博士,教授,1990年、2001年于江西农业大学分别获得学士、硕士学位,2006年于浙江大学获得博士学位,主要从事光机电一体化技术与装备、现代无损检测新技术及其应用的研究。E-mail: liuyande@ecjtu.jx.cn