

激光与光电子学进展

合成孔径系统平移误差的四棱锥传感器检测方法

马舒凡^{1,2,3}, 鲜浩^{1,2*}, 王胜千^{1,2**}¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了使若干拼接子孔径能够按设计目标组合为等效大口径望远镜, 各子孔径必须达到光学的同相位。提出了一种基于四棱锥传感器的共相方法, 通过实验标定拟合传感器信号和平移误差的正弦关系, 反求平移误差。实验结果表明: 平移误差的测量值和真实值基本符合线性关系, 拟合后均方根误差约为 19.2 nm, 平移误差的测量值能够客观准确地反映实际误差。在此基础上, 对 7 孔径拼接镜进行了近共相校正, 校正后分辨率提高了近 6 倍, 与传统方法相比, 所提方法具有结构简单、响应速度快、光能利用率高等优点。

关键词 成像系统; 拼接镜; 平移误差; 四棱锥传感器

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221693

Detection of Piston Error of Synthetic Aperture System Using Pyramid Sensor

Ma Shufan^{1,2,3}, Xian Hao^{1,2*}, Wang Shengqian^{1,2**}¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;³University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract In order to combine several segmented sub apertures into an equivalent large-aperture telescope according to the design goal, each sub aperture must be in optical co-phasing. In this paper, a co-phasing method based on a pyramid sensor is proposed. The sinusoidal relationship between the sensor signal and piston error is fitted through experimental calibration, and the piston error is inversely calculated. The experimental results show that the measured piston errors essentially conform to the linear relationship of the real values, the root mean square error is approximately 19.2 nm after fitting, and the measured value can objectively and accurately reflect the actual piston error. Based on this, the near co-phasing correction of a seven-aperture splicing mirror is conducted, and the resolution is improved by nearly six times after correction. Compared to traditional methods, the proposed method has the advantages of a simple structure, fast response speed, and high light energy utilization.

Key words imaging system; segmented mirror; piston error; pyramid sensor

1 引言

望远镜的分辨能力在航空航天、天文观测、军事国防^[1]等领域的要求越来越高。根据波动光学理论, 传统光学成像系统的角分辨能力与波长和孔径有关^[2]。在工作波长一定的情况下, 增大系统孔径成为了提高望远镜分辨能力最直接的方法。然而在实际应用中,

由于面型精度、制造工艺、运输成本等因素的限制, 单镜面口径不可能无限制地增大, 口径为 8 m 的单镜面已是目前镜面加工的尺寸极限。同时, 由于近地面存在重力引起面型形变, 大气介质的吸收、散射及湍流等因素影响成像质量, 科学家们逐步致力于天基式望远镜系统的研究^[3], 由于运载条件的限制, 单镜面尺寸也无法制造得很大。针对以上问题, 研究人员提出了采

收稿日期: 2022-05-25; 修回日期: 2022-06-23; 录用日期: 2022-07-08; 网络首发日期: 2022-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(11873008)、中国科学院“西部之光”西部青年学者(E21S011C21)

通信作者: *xianhao@ioe.ac.cn; **sqwang@ioe.ac.cn

用多个小口径组合成为大口径等效镜面的合成孔径干涉成像技术,为大型望远镜的设计和建造提供了解决思路。目前,合成孔径成像技术已经成为研究和发展的重点,世界上著名的 Keck^[4]、JSWT^[5]、GMT^[6] 等大型望远镜系统都采用了这种设计思路,国内合成孔径方面的研究起步较晚,1998 年苏定强等^[7]研制的大天区面积多目标光纤光谱望远镜最早使用了拼接镜面主动光学技术。

合成孔径的像是各个子孔径像相干叠加形成的,这种合成孔径的工作模式带来了新的难题:各子孔径间必须经过严格的主动相位对齐,才能获得和预期设计相当的等效口径分辨率,此过程称为共相。各子镜间沿光线传播方向(z 轴)的平移误差和绕着 x 、 y 轴的倾斜误差对共相影响较大,共相也正是主要围绕这 3 个量的校正展开。目前,国内外已有许多较为成熟的共相方法,如:干涉仪法^[8]、曲率传感法^[9]、宽窄带哈特曼法^[10-11]、色散条纹法^[12]等。本文采用基于四棱锥传感器的共相方法,设计实验并搭建光路,拟合得出传感器信号与共相误差曲线,该方法具有测量精度高、光能利用率高、响应速度快等优点,在合成孔径近共相时的检测和校正中具有良好的应用前景。

2 四棱锥方法原理

四棱锥镜是一个底面为正方形的金字塔形折射棱镜^[13],棱镜顶点位于之前的光学系统的理想像点上,棱镜后依次放置中继透镜 L_2 和 CCD 探测靶面,探测靶面会被折射棱镜的 4 条棱分割为 4 个象限,如图 1 所示。当由聚光透镜 L_1 形成的理想球面波前到达四棱锥的顶端时,被分割成 4 个相同部分,然后被 L_2 重新成像为 4 个相同的像。四棱锥传感器入瞳像和出瞳像的每一点都一一对应。若入射波前存在任何像差,则会聚光束会由于光线方向发生变化,不能对称地击中棱锥体的顶端,这将导致 $I_1 \sim I_4$ 区域上同一点共轭的 4 个出瞳像点的像素强度出现差异,从而反映出该入瞳上的波前误差。

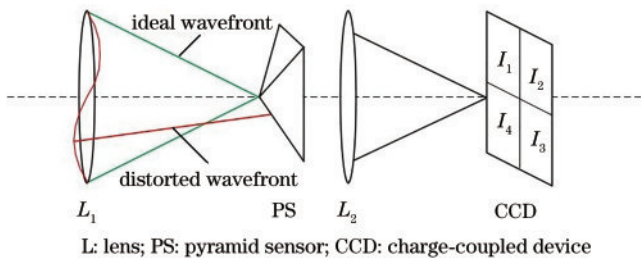


图 1 四棱锥传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pyramid sensor

不同区域上的明暗变化记载了入射波前的畸变,这种强度差异可以用波前局部斜率表示。从这 4 个区域的强度图像中,可以计算出四棱锥传感器 x 方向和 y

方向的灰度值信号 S_x 和 S_y :

$$S_x(x, y) = \frac{[I_1(x, y) + I_4(x, y)] - [I_2(x, y) + I_3(x, y)]}{I_0}, \quad (1)$$

$$S_y(x, y) = \frac{[I_1(x, y) + I_2(x, y)] - [I_3(x, y) + I_4(x, y)]}{I_0}, \quad (2)$$

式中: I_1, I_2, I_3, I_4 为波前一点经棱镜 4 个面在 CCD 的 4 块区域上所成共轭像的强度; I_0 为 $I_1 \sim I_4$ 的像素强度和。对于微小像差,这些信号可以与波前的局部导数相联系:

$$S_x \propto \frac{\partial w(x, y)}{\partial x}, \quad (3)$$

$$S_y \propto \frac{\partial w(x, y)}{\partial y}. \quad (4)$$

根据 Esposito 等^[14]仿真工作,假设合成孔径的系统出瞳是圆形,在忽略了高阶像差的情况下,子孔径的倾斜幅度一般较小,根据衍射成像理论可以得到波前相位像差 φ 与四棱锥传感器的检测信号关系:

$$S_x(x, y) \propto \int_{-B(y)}^{B(y)} \frac{\sin[\varphi(x, y_1) - \varphi(x_1, y_1)]}{2\pi(x - x_1)}, \quad (5)$$

$$S_y(x, y) \propto \int_{-B(x)}^{B(x)} \frac{\sin[\varphi(x_1, y) - \varphi(x_1, y_1)]}{2\pi(y - y_1)}, \quad (6)$$

$P(x_1, y_1)$ 为像面上选取的一个参考点,积分路径 $B(y)$ 和 $B(x)$ 分别为经过参考点 P 的两条正交弦。根据相位差与光程差的转换关系可以得到 S 信号与平移误差存在正弦函数关系特性:

$$S \propto \sin(2\pi\delta/\lambda), \quad (7)$$

式中: δ 为 2 个合成孔径单元的平移误差; λ 为入射光波长。从而建立了传感器信号与波前误差的联系,只需通过实验将正弦关系拟合标定,就能以 S 信号反推近共相阶段的平移误差,将斜率信息处理后转换为共轭的驱动器补偿信号,实现共相的修正。

3 实验

3.1 实验器材和光路

实验采用 7 单元分块反射镜,如图 2(a)所示,每个子镜直径都为 16 mm,排布方式为 6 个子镜围绕中心子镜紧密排列,没有间隙。中央单元子镜能够提高系统对中低频段的响应。每个子镜后都配备有 3 个驱动电极,呈等边三角形对称分布。这些驱动电极由压电陶瓷堆叠制成,在其两端加载电压可以实现驱动电极的伸长或缩短,带动子镜作微小移动。驱动电极促动范围为 $\pm 2 \mu\text{m}$,响应频率达到 1 kHz 以上,在预定行程范围内与其两端负载的电压强度有良好的正比关系,微调精度最低可达到 $0.01 \mu\text{m}$ 。控制终端选用阿尔泰

公司的 PCI8304 采集卡作为信号发生源,该采集卡可实现最多 32 路信号的同步输出,现选用其中 21 个有效的引脚分别对应上述 7 个单元子镜的各 3 个自由度的信号输出。由采集卡同步发生的信号经过电压放大器增益 100 倍后加载在分块反射镜背后的每个驱动电极上,实现对电极的精密控制,最终根据传感器反馈的共相误差校正信号带动子镜完成共相过程。

需注意的是,由于分块反射镜是一个反射系统,光程变化量是压电陶瓷变化量的两倍,且当压电陶瓷伸长,光程减小,压电陶瓷缩短,光程增大,二者是反向变动关系。利用自制的掩模如图 2(b)所示,取其中 2 个分块镜作为研究对象,固定中心分块镜作为参考镜,控制单步多次移动另一个分块镜,探究传感器响应信号

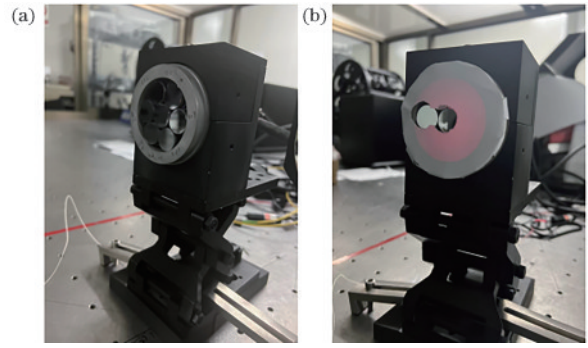


图 2 7 单元分块反射镜实物图。(a)反射镜;(b)自制掩模
Fig. 2 Picture of 7-unit segmented mirrors. (a) Mirrors; (b) self-made mask

与平移误差的对应关系,实验光路如图 3 所示。

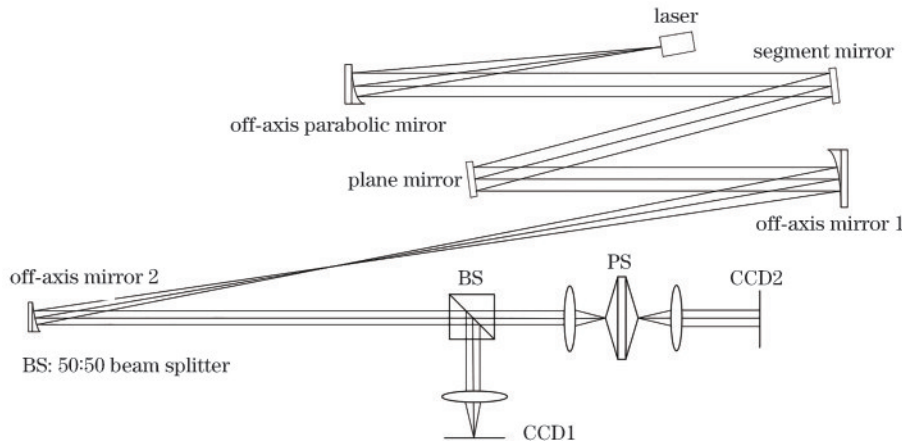


图 3 四棱锥传感器曲线拟合实验示意图
Fig. 3 Schematic diagram of curve fitting experiment of pyramid sensor

将波长为 650 nm 的单色光放置于离轴抛物镜的焦点上,得到一束照射在分块反射镜上的平行光。由于分块反射镜设计时本身不具备调节整个系统倾斜、俯仰的模块,因此在其后配备了平面反射镜用来补偿分块反射镜整体在光路中的微小倾斜和俯仰。分块反射镜反射的平行光经过一大一小两块离轴反射镜的两次反射收束后,入射光瞳尺寸小于分光棱镜截面,可以完整地入射到分光棱镜上,且提高了能量集中度。进入分光棱镜的收束平行光一路反射,经过成像透镜会聚后被 CCD 采集,作为远场光斑成像光路,另一路透射时,经过成像透镜和四棱锥传感器后,在 CCD 平面获得 4 个共轭的光斑图像,将四棱锥传感器获得的信号和输入电压进行比较,通过拟合就能得到信号与平移误差之间的曲线关系。

3.2 实验结果

实验选用波长 λ 为 650 nm 的激光器作为光源,保持中央分块镜姿态不变,控制边缘分块镜后的压电陶瓷每次运行的步长为 40 nm (约 0.06λ),待图像稳定后读取 CCD 靶面上的信息(灰度值),单步多次共获得了 18 组数据。选取每个共轭像中 2 个圆形光斑的切点为

式(5)、式(6)中的参考点 P 。现假定拟合的正弦函数为

$$S = A \cdot (\sin B \delta + C), \quad (8)$$

式中: δ 为压电陶瓷累积行程; A 、 B 、 C 分别为拟合函数的振幅、周期和初相位参数。经 Matlab 拟合后,正弦函数曲线如图 4 所示。得到 $A=0.7146$, $B=11.94$, $C=-1.158$,通过观察可知,除少部分接近正弦函数极大值和极小值处的点,其余大部分点基本满足拟合的正弦曲线,所以可以通过四棱锥传感器的信号利用

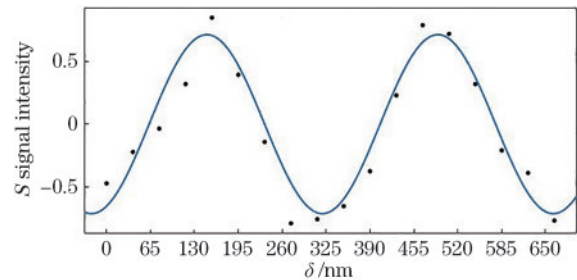


图 4 四棱锥传感器信号和 平移误差关系及正弦拟合曲线
Fig. 4 Relationship between the signal of pyramid sensor and piston error (in wavelength) and sinusoidal fitting curve

反三角函数求得平移误差的测量值。由于 2π 的模糊性和反三角函数的周期性,同一个信号 S 值可能对应着不同的平移误差,在反求平移误差的测量值时,需留意各个数据测量点在正弦函数中对应的相位。

平移误差的测量值和真实值对比如图 5 所示,平移误差的测量值和真实值基本符合线性关系,使用均方根误差(RMSE)评价拟合精度。拟合后 RMSE 约为 19.2 nm,小于 $\lambda/10$ 的共相精度要求,且在近共相时保持较好。多次重复实验得到的 A 、 B 、 C 值和相应拟合的 RMSE 如表 1 所示,振幅 A 大约为 0.71、 B 大约为 11.9、 C 大约为 -1.15 ,拟合后的 RMSE 稳定在共相精度内。

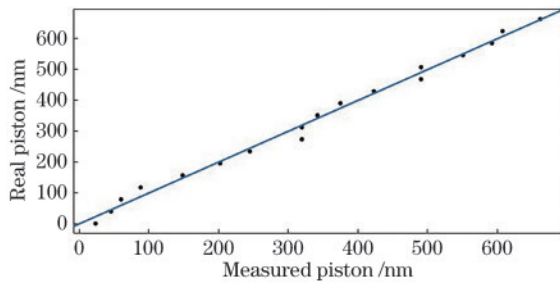


图 5 平移误差测量值和真实值对比

Fig. 5 Comparison between measured value and real value of piston errors

在获得了四棱锥信号和 7 孔孔径合成系统共相前后的具体关系后,接着可以在分块反射镜系统上开展相位检测和校

表 1 多次实验得到的 A 、 B 、 C 值和对应的 RMSE
Table 1 Values of A , B and C obtained from multiple experiments and the corresponding RMSE

A value	B value	C value	RMSE /nm
0.7146	11.94	-1.158	19.2
0.7083	11.81	-1.146	18.3
0.7103	11.89	-1.151	20.9
0.7100	11.85	-1.156	18.8
0.7076	11.79	-1.137	22.4
0.7098	11.95	-1.143	21.7

正实验。手动调整倾斜和 7 孔孔径合成系统至近共相状态,根据拟合曲线,可以得到各个子孔径的倾斜和 7 孔孔径合成系统的补偿信息,加电压进行共相校正前后的远场光斑和 xOz 、 yOz 截面内的强度分布如图 6 所示。共相后远场光斑边界更加清晰,光斑尺寸在 x 方向和 y 方向都有了一定收束。在 xOz 平面内,次极大共相前接近 250 灰度值,共相后约为 200 灰度值,拉大了主峰与次峰间的差异,斯特列尔比和条纹对比度得到显著提高。与单孔径成像时的远场光斑覆盖约 40 个像素相比,共相后主极大覆盖大约 6 个像素,分辨率提高了近 6 倍,且在误差范围内与预期相符合。进行多次实验,共相后子孔径合成系统的 RMSE 和峰谷(PV)值如图 7 所示,结果表明:在 1λ 的共相误差内,四棱锥传感器的共相方法能够实现子孔径合成系统误差校正,精度能够稳定达到 $\lambda/10$ 。

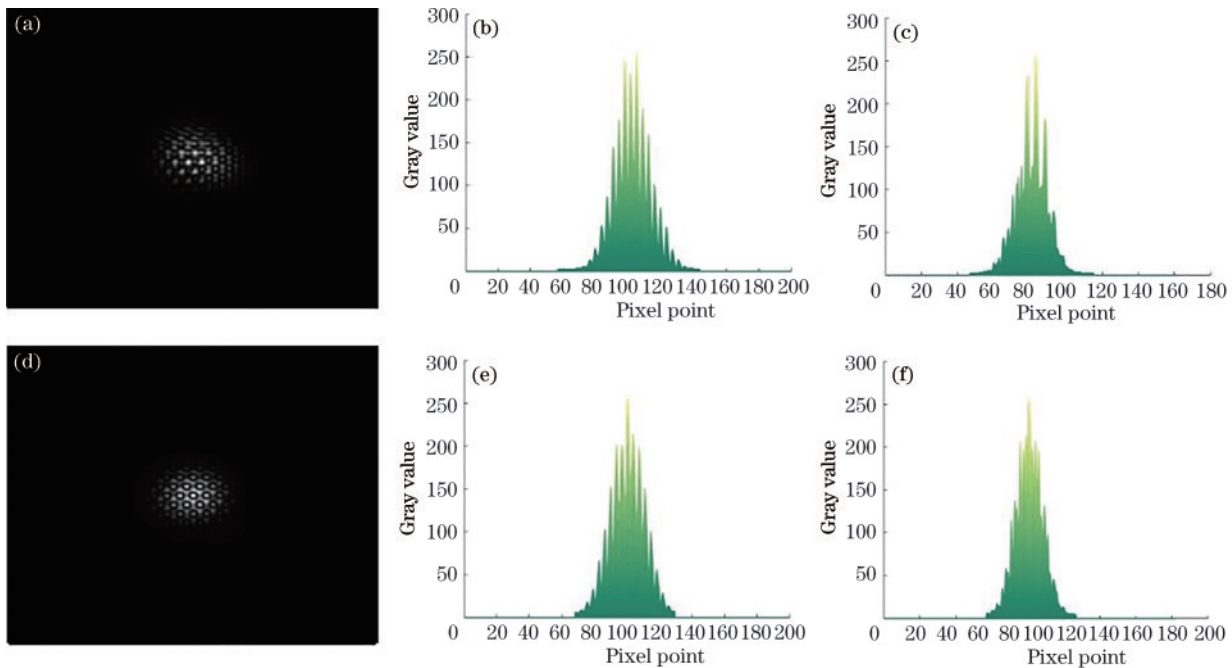


图 6 7 孔径合成系统共相前后对比。(a)共相前远场光斑;(b)共相前 xOz 截面强度分布;(c)共相前 yOz 截面强度分布;(d)共相后远场光斑;(e)共相后 xOz 截面强度分布;(f)共相后 yOz 截面强度分布

Fig. 6 Comparison of 7-aperture synthetic imaging systems before and after co-phasing. (a) Far-field spot before co-phasing; (b) strength distribution in xOz section before co-phasing; (c) strength distribution in yOz section before co-phasing; (d) far-field spot after co-phasing; (e) strength distribution in xOz section after co-phasing; (f) strength distribution in yOz section after co-phasing

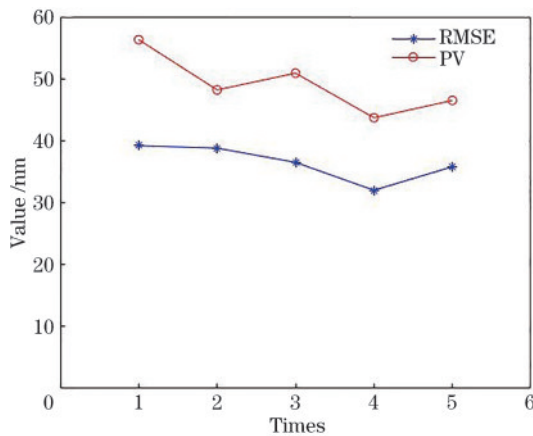


图7 多次实验的RMSE和PV

Fig. 7 RMSE and PV values for multiple experiments

4 误差分析

由图6可知,反三角函数反推的平移误差测量值和真实值在近共相时保持较好,在平移误差较大(超过一个波长)时,测量值与真实值不再拥有强线性关系,且测量值在线性正比参考曲线的上下均匀分布。这是由于本实验采用加电压的方式模拟分段镜间的平移误差,在较大行程、较高电压时,压电陶瓷积累热效应、蠕变效应明显。且计算平移误差测量值时,反三角函数的定义域仅为 $[-1, 1]$,实际超出定义区间的S值只能近似取1或-1进行处理。因此,本方法只能适用于接近共相时的精共相调节。

在施加稳定电压状态下,蠕变效应会导致压电陶瓷继续朝着延伸或缩短方向形变一小段距离,从而对共相控制的精度产生影响。同时,由于合成孔径系统的促动调节均在 $\lambda/10$ 的纳米级精度内进行,对外界环境稳定性要求极高,气流、震动、温度、蠕变效应都会对共焦和共相造成极大影响。

在使用自制的光阑进行双孔径合成成像系统共相实验时,加装光阑后单个子孔径的远场光斑成像质量也有所改善,光阑能够排除子镜与子镜间填充以及分块反射镜系统边框等反射进入成像系统的无效杂散光,在一定程度上改善了单个子孔径的成像效果。

5 结论

受限于单个镜子加工的尺寸极限,合成孔径望远镜已成了发展的必然趋势。光学合成孔径成像系统利用多个子孔径干涉成像,以达到等效大口径分辨率的观测效果,调整各子孔径误差在 $\lambda/10$ 是子孔径光束能够在像平面相干叠加的关键条件。基于此要求,针对基于四棱锥传感器的共相方法开展了研究,提出信号-误差存在简便的正弦关系,设计实验选取分段反射镜的2个子镜,在压电陶瓷驱动器两端施加电压,单步多次控制其中一个子镜,获得平移误差的真实值和四棱

锥传感器后探测靶面的图像,拟合出正弦关系曲线后,通过反三角函数求出平移误差。实验结果表明:平移误差的测量值和真实值基本符合线性关系,二者的RMSE约为19.2 nm,在近共相时误差较小。多次测量考察正弦函数拟合精度, RMSE稳定在0.16~0.19之间,拟合的正弦关系可信度较高。平移误差测量值能够客观准确地反映实际平移误差,在此基础上对压电陶瓷驱动器两端输入电压能够实现7孔径子镜间平移误差的校正。

四棱锥传感器和Shack-Hartman传感器有着类似的工作方式,都是提供波前的局部导数,但是,四棱锥传感器在闭环控制中具有更高的灵敏度和子孔径动态范围,结构简单、响应速度快,在波前检测和校正领域具有广阔的发展前景。四棱锥传感器的缺陷主要在于工作范围短,相位误差超过 $\lambda/2$ 的极限后具有周期模糊性,使用前需先实验拟合正弦模型以及压电陶瓷的蠕变效应等,这些方面需在今后进一步研究和优化。

参 考 文 献

- [1] 乔彦峰,刘坤,段相永. 光学合成孔径成像技术及发展现状[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(3): 175-183.
Qiao Y F, Liu K, Duan X Y. Optical synthetic aperture imaging techniques and development[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(3): 175-183.
- [2] 马科斯·玻恩,埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 22.
Born M, Wolf E. Optical principle[M]. Beijing: Science Press, 1981: 22.
- [3] Spitzer J L, Jr. Report to project rand: astronomical advantages of an extra-terrestrial observatory[J]. Astronomy Quarterly, 1990, 7(3): 131-142.
- [4] McLean I S, Adkins S M. Instrumentation development at the W.M. Keck observatory[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6269: 626903.
- [5] Greenhouse M. The James Webb Space Telescope: mission overview and status[C]//2019 IEEE Aerospace Conference, March 2-9, 2019, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [6] McCarthy P J, Fanson J, Bernstein R, et al. Overview and status of the Giant Magellan Telescope project[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 990612.
- [7] 苏定强,崔向群. 主动光学—新一代大望远镜的关键技术[J]. 天文学进展, 1999, 17(1): 1-14.
Su D Q, Cui X Q. Active optics-key technology of the new generation telescopes[J]. Progress in Astronomy, 1999, 17(1): 1-14.
- [8] 季文,袁群,高志山,等. 基于多波长干涉技术的拼接镜共相检测[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1612003.
Ji W, Yuan Q, Gao Z S, et al. Co-phasing detecting for segmented mirror based on multiple wavelength interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1612003.
- [9] Arsenaute R, Alonso J, Bonnet H, et al. MACAO-VLTI: an adaptive optics system for the ESO Interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4839:

- 174-185.
- [10] Chanan G, Troy M, Dekens F, et al. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes: the broadband phasing algorithm[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(1): 140-155.
- [11] Chanan G, Ohara C, Troy M. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes II: the narrow-band phasing algorithm[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(25): 4706-4714.
- [12] 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.
- [13] 陈欣扬, 朱能鸿. 基于四棱锥传感器的波前检测仿真设计[J]. *天文学进展*, 2006, 24(4): 362-372.
- Chen X Y, Zhu N H. The design of software simulation based on pyramid wavefront sensor[J]. *Progress in Astronomy*, 2006, 24(4): 362-372.
- [14] Esposito S, Pinna E, Tozzi A, et al. Cophasing of segmented mirrors using the pyramid sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5169: 72-78.