

文章编号 1004-924X(2024)06-0785-07

## 多镜面大视场主动光学望远镜调控方法

安其昌<sup>1,2,3\*</sup>, 吴小霞<sup>1,2,3</sup>, 唐 境<sup>1,2,3</sup>, 李洪文<sup>1,2,3</sup>

- 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
- 中国科学院大学, 北京 100039;
- 吉林省智能波前传感与控制重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为了更好地实现多镜面大视场主动光学望远镜波前像差抑制、提升望远镜探测能力极限,本文基于望远镜视场边缘内置的错位型曲率传感器进行波前感知,并利用功率谱对波前感知结果进行分析,进而基于波前像差的空间频率特征进行调控。首先,基于复光场理论分析了非瞳面对系统波前调控的影响机理。其次,分析了本方法在多镜面大视场主动光学望远镜调控过程中的精度特性。再次,利用桌面实验对多镜面大视场主动光学望远镜调控的可行性进行了验证。最终,波前重建结果与理论波前相关性高于 0.85。利用功率谱对各个视场的空间频率特性进行了分析,与单纯使用均方根对多镜面影响敏感度进行分析的方法相比,灵敏度提升了 20%。

**关键词:**曲率传感;波前像差;大视场主动光学;大口径望远镜

中图分类号:TH751 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20243206.0785

## Control method of active optical telescope with multiple mirrors and large field of view

AN Qichang<sup>1,2,3\*</sup>, WU Xiaoxia<sup>1,2,3</sup>, TANG Jing<sup>1,2,3</sup>, LI Hongwen<sup>1,2,3</sup>

- Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
- Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
- Jilin Provincial Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: anji@mail.ustc.edu.cn

**Abstract:** In order to achieve better wavefront aberration suppression and higher detection ability for active telescopes with multiple mirrors and large fields of view, this paper investigated wavefront sensing based on the single-shot curvature sensor at the edge of the telescope's field of view, and realize system control based on analysis of spatial characteristics using power spectrum. Firstly, based on the theory of complex light field, the basic principle and characteristic law of multi surface wavefront control were expressed. Secondly, the accuracy characteristics of this method in the control process of multi mirror large field of view active optical telescopes were analyzed. Thirdly, the feasibility of controlling was verified using desktop experiments. Finally, the correlation between the wavefront reconstruction results and the the-

收稿日期:2023-03-28;修订日期:2023-05-19.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 12133009, No. 12373090)中国科学院青年创新促进会(No. 2020221)

oretical wavefront is higher than 0.85. Using power spectrum, the spatial frequency characteristics sensitivity of each field of view are improved by 20%, compared to root mean square.

**Key words:** curvature sensing; wavefront aberration; active optics with large field of view; large aperture telescope

## 1 引言

大口径望远镜可提供更加灵敏与更高分辨的宇宙观测结果,可为进一步探索“一黑两暗三起源”等科学问题提供助力<sup>[1-3]</sup>。随着大口径望远镜波前像差复杂程度的提升,光学系统需要引入更多的镜面进行校正。对于小视场望远镜(高分辨成像精测)而言,多镜面校正过程为线性叠加且为开环校正,不涉及对边界条件变化与随机交变载荷的适应。而大视场望远镜(大天区高效率巡天)为兼顾全视场的波前像差,不同形式的巡天望远镜(主焦点、卡塞格林、梅森-施密特等)对光学元件的失调均十分敏感<sup>[4-6]</sup>;同时,随着口径的加大,望远镜机械结构对光学元件支撑能力迅速下降,光学元件的面形与位置会随外部工况而发生明显变化。因此,需要对大口径、大视场巡天望远镜系统进行实时的波前传感与多自由度控制,以保证系统发挥其设计极限探测能力。

下一代大口径望远镜均具有多镜面主动光学功能<sup>[7-9]</sup>。如由亚利桑那大学主导的大麦哲伦望远镜<sup>[10]</sup>,该望远镜次镜由七块凹面反射镜组成,需要利用波前传感系统对其自身面形与相对位置进行闭环控制。基于四个边缘视场( $\pm 10^\circ$ 处)的波前传感装置(哈特曼子孔径分布兼顾了次镜子镜边缘与镜面)的联合求解,最终获得子镜相对位置与镜面面形。不仅如此,利用次镜子镜间的边缘传感器(空间分辨率低、采集时间不受曝光影响),还可以在光学测量方法(空间分辨率高、时间分辨率受曝光过程影响)的基础上拓展感知的时间维度。

多镜面大视场主动光学望远镜存在另一种形式,即将所有的调控能力均集中于主镜之上(典型形式为拼接望远镜),其原理相当于利用参量维度更高的自由曲面降低大视场系统像差<sup>[11]</sup>。下一代拼接式望远镜均具有 300~800 块子镜<sup>[12-14]</sup>(三十米望远,极大口径望远镜等),需要基于波前传感系统实现上百块子镜的位姿与面形

检测、控制。

不仅如此,宽场自适应光学为主动元件与波前传感一一对应,数量多、系统复杂,同时,仅针对的视场有限(角分级)无法推广至大视场巡天系统。而“自适应次镜”系统中各元件所校正的空间扰动特征差异大,不形成互相耦合<sup>[7-8]</sup>。

大口径多镜面反射镜波前传感主要采用哈特曼传感器或曲率传感器。其中哈特曼波前传感器为瞳面传感器,需要额外设置光路、系统复杂度较高;而曲率传感可与系统焦面进行集成,具有易维护、数据处理简单等优势。不仅如此,非充分曝光下,多视场波前传感信噪比低,可用星点少、多镜面面形与最终波前关联约束复杂同时,偏振、色散等像差也度最终的成像效果产生影响,因此,对感知与调控维度的维度要求也相应提升。

在此,针对具有多个镜面的大口径大视场主动光学望远镜,基于望远镜视场边缘内置的错位型曲率传感器进行波前感知。通过理论分析,获得了非光瞳面波前影响的解析式表达,并从空间功率谱的角度,对大视场、多镜面主动光学系统的校正过程进行分析。最终,基于多视场曲率传感建立了一套可兼顾多视场与多镜面的大口径主动光学望远镜调控方法。

## 2 曲率传感基本原理

在此,基于标准球面波结合傅里叶光学的相关理论,建立系统多镜面校正过程的解析模型。设在标量电磁场条件下,旁轴近似光源发出的球面波所产生的复振幅可以由式(1)表示<sup>[5-6]</sup>:

$$u = A(x, y)e^{jk_0(x, y)}, \quad (1)$$

其中: $\varphi_0(x, y)$ 为初始位相, $A$ 表示旁轴近似下该平面均匀的振幅分布, $x, y$ 为光瞳坐标。根据菲涅尔衍射定律,经过两个镜面调控后的复光场如式(2)所示:

$$u_{M1M2} = A(x, y)e^{jk\vartheta_0(x, y)} \times (x, y)e^{jk\vartheta_1(x, y)} \left[ -j \frac{k}{2d_{M1M2}\pi} e^{-j \frac{k}{2d_{M1M2}}(x^2 + y^2)} \right] A_{12}(x, y)e^{jk\vartheta_2(x, y)}, \quad (2)$$

其中: $d_{M1M2}$ 为两个镜面之间的距离, $A_{12}$ 为两个镜面之间的强度传递系数。 $\vartheta_1(x, y)$ 与 $\vartheta_2(x, y)$ 为两块镜面所引入的相位, $x, y$ 为光瞳坐标。可见,多镜面系统最终的复光场主要受到传输增益以及空间频率(相位)两个因素的调制。最终探测器上的光强可以由复光场自身及其共轭的乘积获得,如式(3)所示:

$$I = u(x, y)u^*(x, y), \quad (3)$$

其中, $x, y$ 为光瞳坐标,根据曲率传感基本原理,波前相位的曲率与光强沿光轴方向的差分成正比,如式(4)所示:

$$\frac{I_+ - I_-}{(I_+ + I_-)\Delta z} \approx -\nabla^2\vartheta_0(x, y), \quad (4)$$

其中: $I_-, I_+$ 为焦前焦后的能量分布, $\Delta z$ 为离焦量,式(4)为黎曼方程,通过两次数值积分可获得所需要的相位信息。

大视场下多镜面渐晕影响示意图如图 1 所示,各镜面渐晕近似正比于镜面与主镜(入瞳)的距离,该过程由两个因素协同控制,一个为视场角引起的像高所引起的影响,另一个是光线的收束作用引起的“Footprint”效应(相同距离在不同的光学元件上对应不同的空间频率),如式(5)所示:

$$\frac{v_1}{v_2} \sim \frac{L_1}{L_2}, \quad (5)$$

其中: $v_1$ 以及 $v_2$ 为镜面 1,2 处的渐晕, $L_1$ 以及 $L_2$ 为镜面 1,2 与主镜的距离。结合图 1 与式(5)可

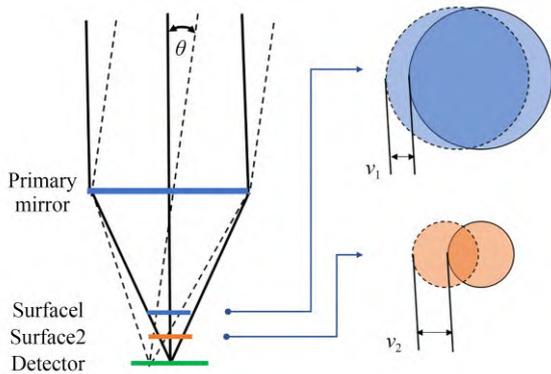


图 1 大视场下多镜面渐晕影响示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the effect of multi-mirror vignetting under large field of view

得,多镜面大口径光学系统存在着随着视场而线性增加的渐晕,因此,在设计最终波前传感架构时,应保证渐晕影响在一个像素之内。以保证不同视场所获得波前像差感知的相同置信概率,最终获得更高精度的波前感知与调控能力。

### 3 多镜面主动光学检测精度分析

本节将对多镜面主动光学过程进行仿真验证。分别对不同像差主导下的功率谱以及多个像差共同作用下的功率谱进行分析。具体来说,在相机终端中内置错位型曲率传感器(利用两块分别位于焦面前后的探测器同时采集离焦图,采用与主探测器相同的探测器构成与像元分辨率,像元尺寸 10 μm),设光源照明强度无饱和,首先调节系统粗对准,在此基础上,利用多视场波前传感,进行波前解算,优先校正主镜,之后以此校正,并反复验证迭代,以保证调节量满足协调方程。针对大口径拼接镜,由于所有的像差均由主镜修正,因此,仅需要在步骤 1~3(Step1~Step3)内进行迭代。

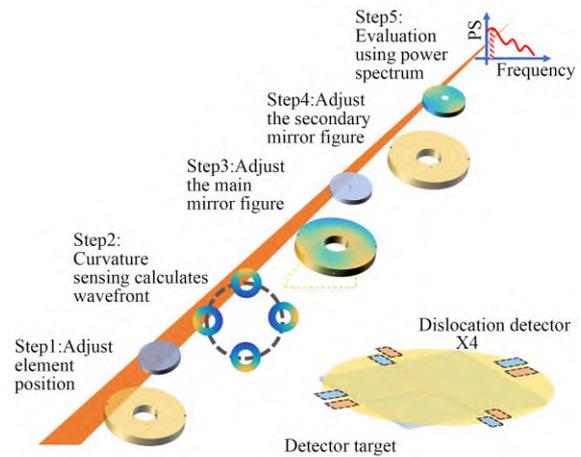


图 2 多镜面主动光学校正过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of active optical correction process of multiple mirrors

根据功率谱的概念,随机过程 $[x_1, x_2, \dots, x_N]$ 的功率谱 $S$ 如式(6)所示:

$$S = \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{i=1}^N x_i e^{-j\omega} \right|^2, \quad (6)$$

其中： $\omega$  的单位是 rad/s,  $i$  为整数,  $N$  为总采样数量。

利用功率谱可对不同视场的像差进行分析, 以主焦点形式的大口径大视场望远镜为例, 在其主镜与第一块透镜表面分别加入低阶像差, 并基于不同视场波前的功率谱分离多个镜面的主动改正量。利用功率谱对各个视场进行空间频域分析结果如图 3 所示。与利用均方根进行分析相比, 具有更好的像差表征能力。其中, 图 3(a) 表示四个视场的波前数据, 图 3(b) 中, 左图表示采样视场。右图中, Data1 表示四个视场的平均功率谱, Data2~Data5 表示各个视场波前对应功率谱。

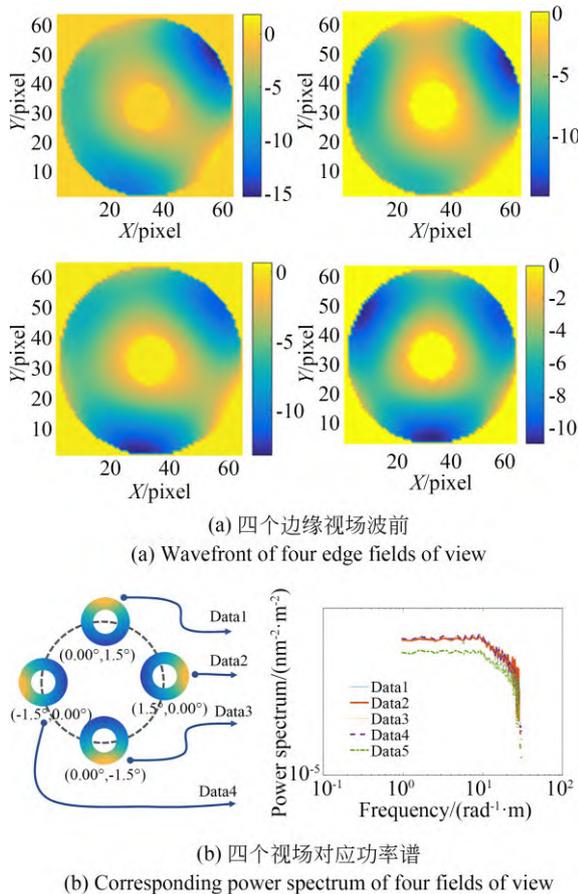


图 3 不同视场波前以及对应功率谱

Fig. 3 Wavefront of different fields of view and corresponding power spectrum

基于功率谱对轴外视场下不同波前像差进行分析, 分别针对主镜引入的像差(像散、彗差、三叶草、球差)进行分析, 可得不同的波前分量对

应的特征功率谱曲线, 取对数坐标后, 可获得特征的空间频率如图 4 所示。通过图 4 分析可得, 传输增益变化大于空间频率(相位)的偏移。

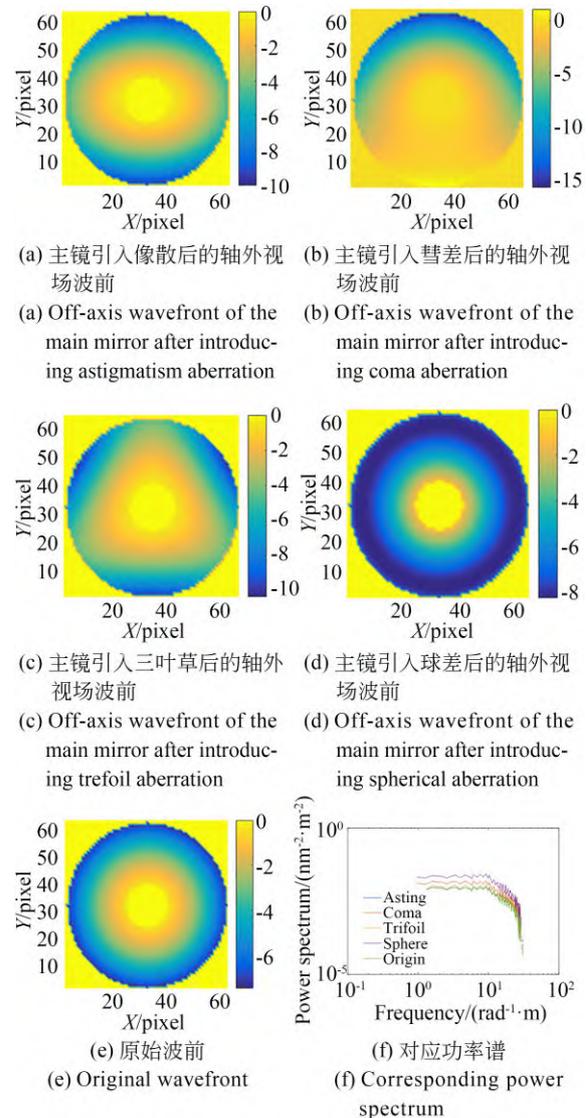


图 4 边缘视场下不同波前像差

Fig. 4 Different wavefront aberrations in the edge field of view

大口径大视场望远镜为视宁极限系统, 即极限分辨率取决于最终的对大气湍流的平滑程度。对于大气湍流, 可基于卡尔莫洛夫假设, 采用功率谱对其特性进行预估。并对最终波前进行线性叠加。结合各以上分析可得, 像差的大小可通过功率谱的高低(围成面积)获得。不同位置镜面对最终波前的调控能力也不同, 同时, 不同空间频率的传递增益也不一样。像散与球差相比, 其传递增益相差 20% 以上。同时, 由于二者输入

均方根相同,利用均方根进行分析二者的增益相同,与单纯使用均方根分析多镜面影响敏感度的方法相比灵敏度提升了20%。

相同大小的波前误差( $0.5\lambda, \lambda=633\text{ nm}$ ),在主镜与第一块透镜上所产生的耦合,整体空间波前差别在 $0.1\lambda(\lambda=633\text{ nm})$ 以内,但中高频段的斜率与特征峰值存在分离。

基于在焦星点像对系统的调节结果进行判读,保证能量集中度满足设计要求的同时,需考虑到系统失调与主镜的面形的耦合。在检测过程中,可对对称视场的像差求解结果做差,并利用绕光轴旋转,判断校正镜组是否存在偏心(像散差值大小与倾斜值成正比)。

#### 4 可行性验证实验

利用功率谱可建立映射调节模型。在此,对于边缘视场进行曲率波前传感。利用离焦星点像进行波前传感过程验证如图5所示。

对计算所得的波前与理想波前进行插值,保证二者具有相同的分辨率,并以理想波前为模板,与计算所得波前进行相关系数计算。通过计算可得,整镜波前解算结果与理想波前相关系数高于0.92。从图3中的离焦星点像长轴方向可以看出,焦前焦后由于对应的子午与弧矢曲率半径不同,会产生相互垂直的长轴方向。可选定焦前或焦后的离焦星点像长轴方向,定义像散方向。通过像散最小点是否位于视场中心的判断校正镜中心点是否在系统主光轴上。并通过判断像散方向是否相对视场中心对称,可判断校正镜光轴是否与系统主光轴重合。

实际上的离焦星点像同时还受到大气的调制,可通过凝视模式,通过对同一导星在不同视场成像的平均,降低大气影响,避免长时间曝光所可能导致的探测器饱和。

利用离焦星点像进行多镜面波前传感过程验证如图6所示,通过计算可得,拼接镜波前解算结果与理想波前相关系数高于0.85。由图6可得,利用曲率传感可实现较高空间频率的感知。

通过对比图5~图6可得,通过曲率传感,可获得对应采用频率的波前数据,根据全视场波前像差的分布规律,获得系统失调状态。而对于拼

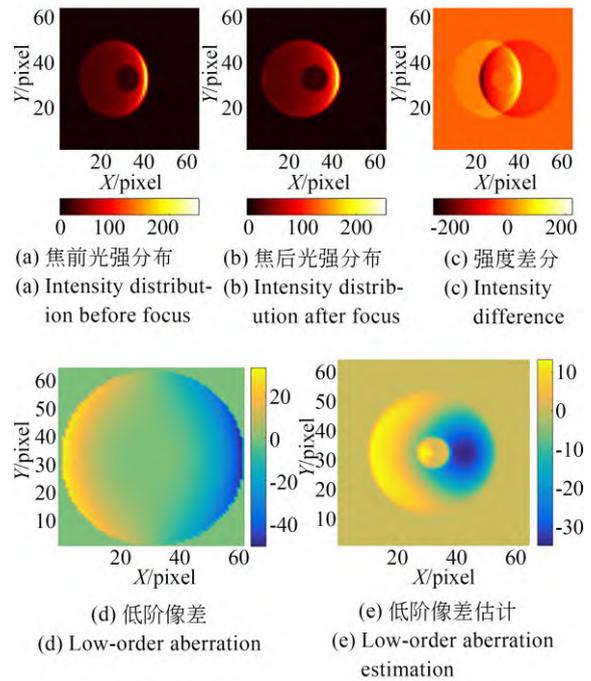


图5 利用离焦星点像进行波前传感过程验证

Fig. 5 Verification of wavefront sensing process using defocused star image

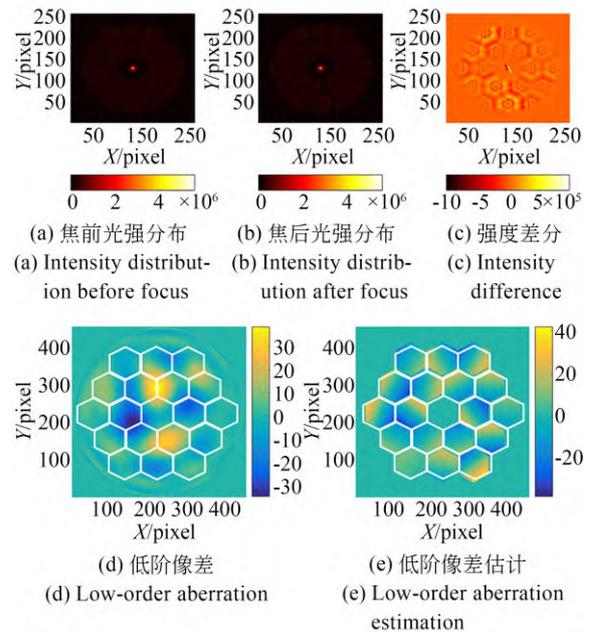


图6 利用离焦星点像进行多镜面波前传感过程验证

Fig. 6 Verification of multi-mirror wavefront sensing process using defocused star image

接镜,除低阶像差外,各镜面的离焦(曲率半径一致性),以及相对倾斜,也可以依靠曲率传感实现感知。并基于曲率传感结果实现闭环修正。

在实际的大口径光学巡天望远镜系统中,波前传感方式为离焦锁距(错位型探测器)模式。为获得更高的空间频率感知能力,需要更大的离焦量,同时及考虑到望远镜视场的利用率(多对错位探测器焦平面占用大)与低阶波前探测效率(大离焦量需要更长曝光保证信噪比),采用了基于调焦机构前后移动的方式,即基于分时复用产生多级的离焦锁距星点像,并通过合理的组合实现更高阶的解算。

利用变形镜进行原理验证如图 7 所示,采用激光光源( $\lambda=633\text{ nm}$ )经过扩束形成平行光,并透射到变形镜之上,并经过后续的透镜组进行成像。最终的探测结果可得,输入波前特征空间频率为像散与三叶差。对于最终的波前像差,包括了变形镜(主镜)与透镜组(校正镜)的耦合作用结果。该过程模拟了主焦点式大口径大视场望远镜,主镜的主动光学系统需要满足力协调方程,无法校正任意像差(如校正透射系统所产生高阶像差),因此,大口径大视场多镜面主动光学调控,需要根据各个元件的特征像差与改正能力的空间频段进行分配。通过调控架构设计,针对巡天系统基础像差大、无法将全部视场校正完美的特点,充分发挥各个主动镜面调控能力,实现整体波前像差的有效抑制。

## 5 结 论

针对多镜面主动光学系统中各镜面空间频率高度重合,像差校正能力受多种因素共同约束的问题,采用多视场、高阶次曲率传感的方法,通

### 参考文献:

- [1] ZHANG C, ZHANG G Y, LI J Z, *et al.* WISE green objects (WGOs): the massive star candidates in the whole galactic plane ( $|b| < 2^\circ$ ) [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2023, 264 (1): 24.
- [2] GÄNSICKE B T, SCHREIBER M R, TOLOZA O, *et al.* Accretion of a giant planet onto a white dwarf star [J]. *Nature*, 2019, 576: 61-64.
- [3] YAN T S, SHI J R, WANG L, *et al.* Discovery of nine super Li-rich unevolved stars from the LA-

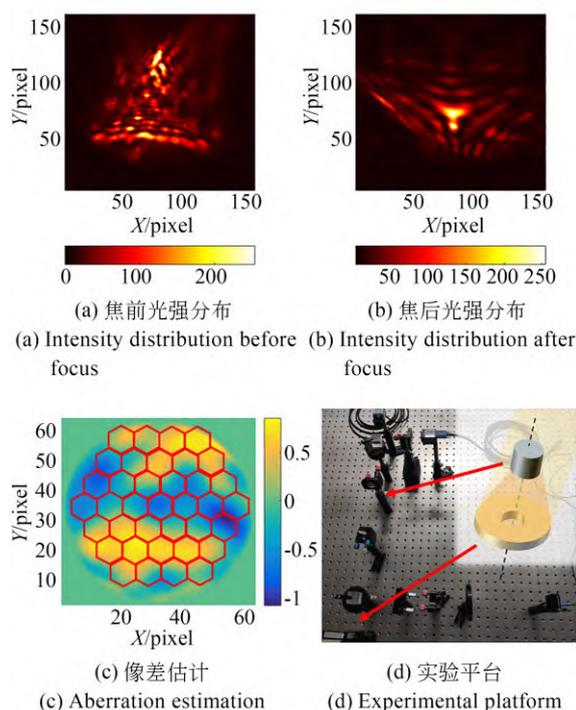


图 7 利用变形镜进行原理验证

Fig. 7 Closed loop correction process

过研究各镜面误差在各视场中的空间频域传递规律,最终实现多镜面面形的层析式感知与协同校正。

以主焦点大口径大视场望远镜(入瞳位于主镜之上)为例,利用功率谱分析了多镜面校正过程,比较了不同空间频率对最终成像效果的影响规律。可为我国未来大口径望远镜的建设打下坚实的理论与技术基础,助力我国天文学在时域天文、近地小行星探测、太阳系普查、星系演化和近场宇宙等研究方向上取得重大突破。

MOST survey [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, 929(1): L14.

- [4] SOARES-SANTOS M, KESSLER R, BERGER E, *et al.* A dark energy camera search for an optical counterpart to the first advanced LIGO gravitational wave event GW150914 [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, 823(2): L33.
- [5] 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 (LSST) [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1528-1552.

- [6] AN Q C, WU X X, LIN X D, *et al.* Alignment of DECam-like large survey telescope for real-time active optics and error analysis[J]. *Optics Communications*, 2021, 484: 126685.
- [7] NESTOR D B, TURNSHEK D A, RAO S M. MMT survey for intervening Mg II absorption[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 643(1): 75-80.
- [8] CLOSE L M, WILDI F, LLOYD-HART M, *et al.* High-resolution images of orbital motion in the trapezium cluster: first scientific results from the multiple mirror telescope deformable secondary mirror adaptive optics System1[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, 599(1): 537-547.
- [9] YANG P Q, HIPPLER S, DEEN C P, *et al.* Characterization of the transmitted near-infrared wavefront error for the GRAVITY/VLTI Coudé Infrared Adaptive Optics System[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 9069-9080.
- [10] MCLEOD B A, BOUCHEZ A H, CATROPA D, *et al.* The wide field phasing testbed for the giant magellan telescope [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 12182, Ground-Based and Airborne Telescopes IX, Montréal, Québec, Canada.* 2022, 12182: 71-86.
- [11] YAN H L, LI H N, WANG S, *et al.* Overview of the LAMOST survey in the first decade[J]. *Innovation (Cambridge (Mass))*, 2022, 3(2): 100224.
- [12] 安其昌, 吴小霞, 张景旭, 等. 大口径巡天望远镜分区域曲率传感方法研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 358-365.
- AN Q C, WU X X, ZHANG J X, *et al.* Sub region curvature sensing method for survey telescope with larger aperture[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 358-365. (in Chinese)
- [13] BONNET H, ESSELBORN M, MÜLLER M, *et al.* E-ELT active optics system modeling and performance evaluation [C]. *Integrated Modeling of Complex Optomechanical Systems*, SPIE, 2011, 8336: 250-259.
- [14] DIMMLER M, MARRERO J, LEVEQUE S, *et al.* Improved E-ELT subsystem and component specifications, thanks to M1 test facility [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes V. Montréal, Québec, 2014 Jul 22, Canada.* SPIE, 2014, 9145: 575-589.

#### 作者简介:



安其昌(1988—),男,山西太原人,博士,副研究员,九三学社社员,中国科学院青年创新促进会会员。于2011在中国科学技术大学获得工学学士学位。于2018年在中国科学院大学获得博士学位,研究方向为大口径光机系统集成检测。E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn