

文章编号 2097-1842(2023)02-0358-08

大口径巡天望远镜分区域曲率传感方法研究

安其昌^{1,3*}, 吴小霞^{1,3}, 张景旭^{1,3}, 李洪文^{1,3}, 朱嘉康^{1,2}, 蔡雨岐⁴
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 吉林省智能波前传感与控制重点实验室, 吉林 长春 130033;
4. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:大口径巡天望远镜需要基于波前传感系统的反馈, 进行主动光学闭环校正, 以更好地发挥其极限探测能力。本文面向大口径巡天望远镜波前传感过程中, 离焦星点像重合所导致的导星数量下降的问题, 首先针对分区域曲率传感的基本理论表达进行了推导, 之后, 通过建立联合仿真模型, 利用光学设计软件与数值计算软件之间的通讯交互, 对分区域曲率传感的过程进行了仿真分析。最后, 通过搭建桌面实验, 分别就单目标与多目标的曲率传感进行了交叉比对, 验证了算法的正确性。针对标准波前, 本文所提出的方法与单导星曲率传感相比, 误差为 0.02 个工作波长(RMS), 误差在 10% 以内, 可在传统主动光学技术的基础上, 通过扩展可用导星, 提升探测信噪比与采样速度, 有效提升主动光学系统校正能力。

关键词:大口径巡天望远镜; 主动光学; 曲率传感; 自然导星

中图分类号: TH751 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0117

Sub region curvature sensing method for survey telescope with larger aperture

AN Qi-chang^{1,3*}, WU Xiao-xia^{1,3}, ZHANG Jing-xu^{1,3}, LI Hong-wen^{1,3}, ZHU Jia-kang^{1,2}, CAI Yu-qi⁴

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,*
Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Jilin Provincial Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control, Changchun 130033, China;*

4. *Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)*

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

Abstract: The large aperture sky survey telescope needs closed-loop error correction based on the feedback

收稿日期: 2022-06-10; 修订日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62005279, No. 12133009); 中国科学院青年创新促进会 (No. 2020221); 中国科学院装备研制项目 (No. YJKYYQ20200057); 吉林省科技发展计划 (No. 20220402032GH)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62005279, No. 12133009); the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (No. 2020221); the Equipment Development Project of the Chinese Academy of Sciences (No. YJKYYQ20200057); Jilin Science and Technology Development Program (No. 20220402032GH)

of its wavefront sensing system, so as to give it a better conform to its limit detection ability. In this paper, firstly, the basic theoretical expression of sub region curvature sensing is derived. Then, a joint simulation model is established. The process of sub region curvature sensing is simulated and analyzed by using a combination of optical design software and numerical calculation software. Finally, by setting up a desktop experiment, the cross-comparison of single- and multi-target curvature sensors is carried out to verify the correctness of the algorithm. Compared to the traditional active optical technology, the method proposed in this paper can improve the detection signal-to-noise ratio and sampling speed by expanding the available guide stars. For the standard wavefront, compared with the single guide star curvature sensor, the error is 0.02 operating wavelengths (RMS), and the error is less than 10%, which can effectively improve the correction ability of the active optical system.

Key words: large aperture survey telescope; active optics; curvature sensing; natural guide star

1 引言

高效率、高灵敏度的巡天通过对重要天体进行大样本、规律性研究,可从更高的信息维度上对黑洞、暗物质暗能量、类地行星以及极端宇宙(超高密度、超高磁场、超强引力)等天文学重要课题进行研究,开启天文大数据时代。提升大视场探测光学系统口径,从而有效地提高望远镜的极限探测能力。目前,已经投入使用的地基大口径望远镜有 VST, Decam, DESI, LAMOST, SUBARU-superprime^[1-6]。SUBARU Hyper Suprime-Cam 是 Subaru 新一代主焦点科学终端,其视场为 1.34° 。GMT(巨型麦哲伦望远镜)由 7 块直径为 8.4 m 的反射镜拼接而成,其宽视场终端通过校正镜和大气色散补偿器可获得 $20'$ 的巡天视场。最大口径的天基系统为 JWST 的近红外巡天相机。下一代大口径巡天望远镜将拥有更高搜索效率与极限灵敏度。目前最为先进的大口径巡天设备为 LSST,拥有 3 块主动校正镜面,以及高灵敏度相机,其主镜和三镜共用一个直径为 8.4 m 的蜂窝结构的镜坯,视场为 3.5° ,可对南半球星空进行优于 24 等星的数量巡天。

目前世界上最大规模的光谱巡天(LAMOST)已经进入中分辨率巡天($R=7500$)阶段,通过海量获取星体物理参数、化学丰度等信息,并与现有数字巡天项目构建多维度信息,进一步推动时域天文与天文大数据的发展。针对大口径大视场系统,轴外像差会随着望远镜光学元件的失调而迅速增加,加上与大口径系统自身刚度不足的缺点,

最终导致无法进行观测。因此,需要针对光学元件与终端的主动姿态进行控制。而波前传感系统,作为主动光学系统的反馈感知途径,是实现精细天文观测的基础。

目前,大口径大视场望远镜均采用曲率传感的方式,利用错位配置的探测器,进行单次曝光的锁距测量。曲率传感过程的离焦量越大,对高阶像差以及色散(轴向色散表现为离焦星点像轴向变化、而纵向色散表现为离焦星点像周向变化)的感知能力越强。但是,该配置要求各离焦星点像之间没有重叠区域,增加离焦量会导致可用亮星因为光强重叠而无法用于波前传感,降低波前传感的视场采样空间频率与信噪比(暗星长时间积分会引入暗电流与散粒噪声)。据此,本文提出分区域曲率传感方法,解决精细时域天文观测所需要高灵敏大离焦曲率传感架构与离焦星点像光强重叠所造成的可用导星损失之间的矛盾。

2 理论推导

曲率传感可利用波前差分对波前曲率进行估计,并通过求解黎曼边界下的泊松方程,即可获得相位信息。但是,由于边界信息的串扰,会降低相位探测的信噪比^[7-10]。

曲率传感器由 Roddier 在 1988 年所提出,其基本原理为通过焦前与焦后像的光强分布估计波前曲率变化,并解算波前信息。因具有结构简单、解算稳定、孔径遮拦影响小等优点,基于波前曲率的波前传感技术已经成为自适应光学重要的前端基础。因此,可基于曲率传感求解大视场巡

天望远镜系统的波前相位。曲率传感作为焦面波前传感策略,其另一个优势在于可对拓展目标进行检测,以增强系统的成像特性。但是,为获得更大的动态范围以及误差的灵敏度,现有的曲率传感多选择离焦量较大的形式,在此情况下会导致一些距离较近的星体的离焦星点像发生重叠^[11-15]。该现象将导致可用于波前传感的导星数量迅速下降,进而影响闭环曲率传感的校正能力。下面将介绍曲率传感基本原理。

假设系统波前如式(1)所示:

$$W(u, 0) = \exp \left[j \frac{2\pi A}{\lambda} \sin(2\pi u f) \right], \quad (1)$$

其中, u 为空间频率, f 为波前的特征频率, λ 为波长, A 为相位变化幅值, 其焦前光强分布为:

$$I_+ = |W_+|^2 = \exp \left[\left(e^{j\pi|f|^2 z \lambda} - e^{-j\pi|f|^2 z \lambda} \right) j k (A \sin(2\pi u f + \varphi)) \right] = \exp \left[-2 \sin(\pi|f|^2 z \lambda) j k (A \sin(2\pi u f + \varphi)) \right], \quad (2)$$

焦后光强分布为:

$$I_- = |W_-|^2 = \exp \left[-2 \sin(\pi|f|^2 z \lambda) j k \cdot (A \sin(2\pi u f + \varphi) + A \sin(2\pi u f)) \right], \quad (3)$$

则曲率信号为:

$$C = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} = \frac{-A k \pi |f|^2 (\lambda z) (\sin(2\pi u f))}{1 - \lambda \pi k |f|^2 (A \sin(2\pi u f))} = \frac{-A k \pi |f|^2 (\lambda z) (\sin(\pi u f))}{1 - \lambda \pi k |f|^2 (A \sin(2\pi u f))}, \quad (4)$$

其中, z 为离焦量, k 为波数。当两颗导星接近, 其波前为两个接近波前的组合:

$$W(u, \varphi) = \exp \left[e^{j\pi|f|^2 z \lambda} j k (A \sin(2\pi u f + \varphi) + A \sin(2\pi u f)) \right], \quad (5)$$

则曲率信号为:

$$C(\varphi) \approx \frac{-A k \pi |f|^2 (\lambda z) (\sin(\pi u f + \varphi/2))}{1 - \lambda \pi k |f|^2 (A \sin(2\pi u f))}. \quad (6)$$

可见, 交互部分受到本身的波前误差以及视场误差的耦合作用。其调制因子 Q 为:

$$Q = \frac{\sin(\pi u f + \varphi/2)}{\sin(\pi u f)}. \quad (7)$$

在此, 针对重合部分提出如下解算方法, 对大口径主焦点组件进行粗对准后, 通过分别位于焦面两侧的两块错位的传感器成像, 当得到的双自然导星对应的两个离焦星点像发生重叠时, 将两个离焦星点像转换为一个完整离焦星点像, 获得望远镜的波前信息。

由式(7)可以看出, 两颗导星交叠所带来的空间频率混叠, 受到视场像差线性度与待感知空间频率共同调制。导星重叠与离焦量之间存在着密切关系, 由于系统离焦一般均处于线性曲率, 因此, 可利用线性模型对离焦星点像的大小进行估计, 即当离焦量提高一倍, 其离焦星点像半径将扩大一倍。假设 δz 的离焦量下, 其口径边缘刚好相切, 当离焦量提高为 δz_1 ,

$$l_1 = 2 \tan(\theta) \delta z_1, \quad (8)$$

其中, $\cot(2\theta) = F\#$, 即系统 F 数, 对两个离焦星点像的非重叠区域的光强分布进行统计学分析。通过预测法获取两个离焦星点像重叠区域的光强分布信息, 并通过迭代实现波前估计, 分区域传感过程如图 1 所示。导星重叠与离焦量之间的关系如图 2 所示。

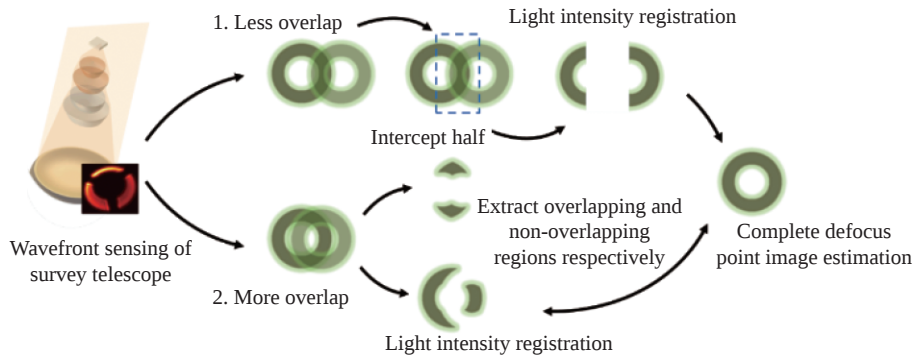


图 1 分区域传感过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sub regional sensing process

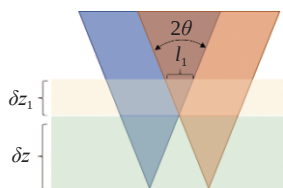


图2 导星重叠与离焦量之间的关系

Fig. 2 Relationship between guide star overlap and defocus amount

3 数值仿真

利用 Matlab 与 Zemax 之间的动态链接库, 实现二者之间的数据传递, 在 Zemax 中模拟面形以及光学元件之间的失调, 在系统宽带出射波前中引入像差, 以此输入至 Matlab 中进行解算, 并与输入量进行比对, 以验证算法的正确性。

首先, 对特定相位进行整体与单独波前解算, 与理想的波前分别进行对比, 针对不同的低阶像差进行焦面光强分区域拼接。对 Zernike 波前组合进行测试, 通过对完整像与拼接光强的对比, 以及对焦斑突变区域边缘的感知, 针对重合部分像差较小(10%)的情况, 分区域拼接与直接测量相关性高于 80%。针对重合部分像差较大(30%)的情况, 由于拼接边界所带来的频率泄漏, 分区域拼接与直接测量相观性高于 70%。相互交叠的离焦星点像如图 3 所示, 小像差下的离焦星点像拼接过程如图 4~6(彩图见期刊电子版)所示, 大像差下的离焦星点像拼接复原结果如图 7~9(彩图

见期刊电子版)所示。与直接用单一目标离焦星点像获得的波前相比, 相差 0.02 个工作波长(10% 以内)。

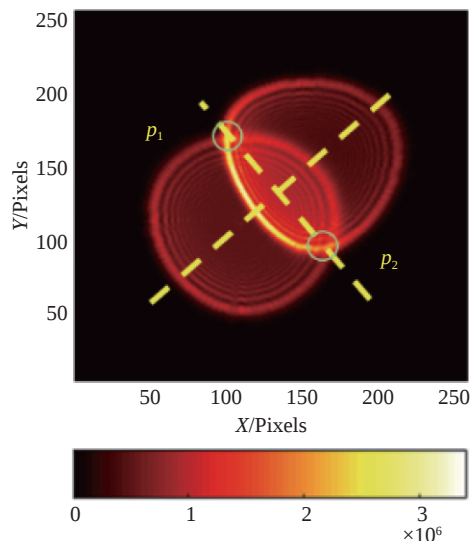


图3 相互交叠的离焦星点像

Fig. 3 Overlapping defocused star images

不仅如此, 利用双星等扩展目标进行巡天望远镜波前传感, 也是对可用自然导星进行扩容的必要手段。本文测试了天文台址湍流对像差提取的影响, 图 10 为 5 cm 相干长度下, 10 ms 与 100 ms 曝光时间所得波前与离焦星点像。从离焦星点像可以看出, 通过离焦星点项以及对应的湍流平滑情况可得, 通过长时间积分可有效抑制台址湍流(尤其是中高频分量), 而亮星由于光通量大, 可有效降低曝光时间, 提升校正带宽。

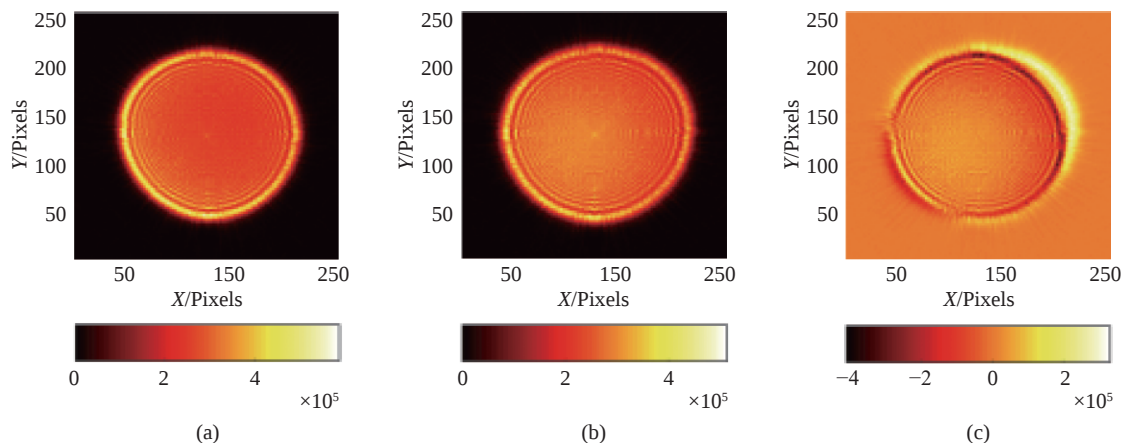


图4 分割拼接的离焦星点像(小像差)。(a)焦前能量分布;(b)焦后能量分布;(c)光强分布差分

Fig. 4 Segmented and spliced defocused star point image (small aberration). (a) Pre-focal energy distribution; (b) post-focal energy distribution; (c) light intensity distribution difference

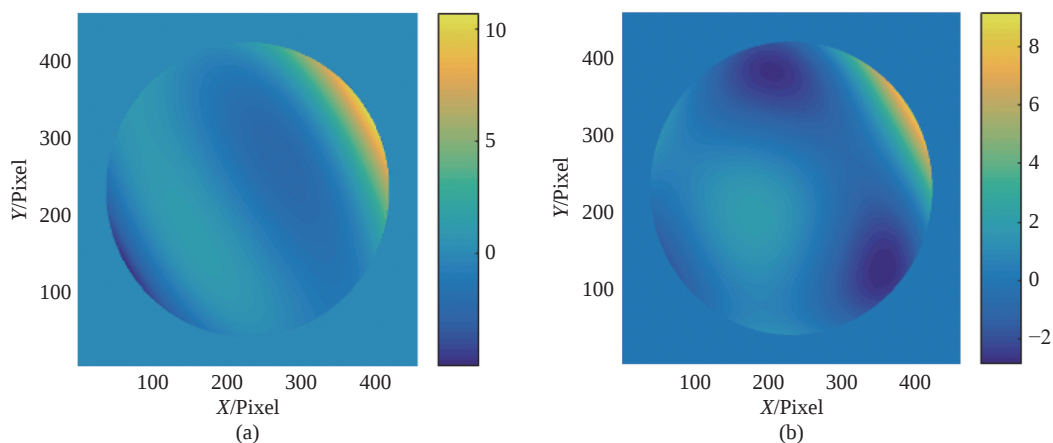


图 5 小像差下的离焦星点像(a)重建波前与(b)原始波前

Fig. 5 (a) Reconstructed wavefront and (b) original wavefront of stitching defocused star point image under small aberration

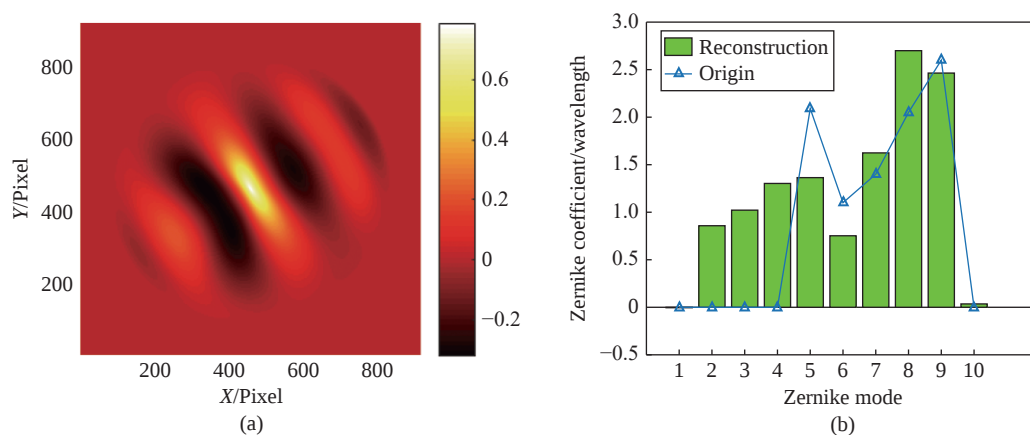


图 6 小像差下的离焦星点像拼接复原效果。(a)重建波前与原始波前相关函数; (b)泽尼克系数对比

Fig. 6 Restoration effect of defocused star image stitching under small aberration. (a) Comparison of correlation function between reconstructed wavefront and original wavefront; (b) Zernike coefficient

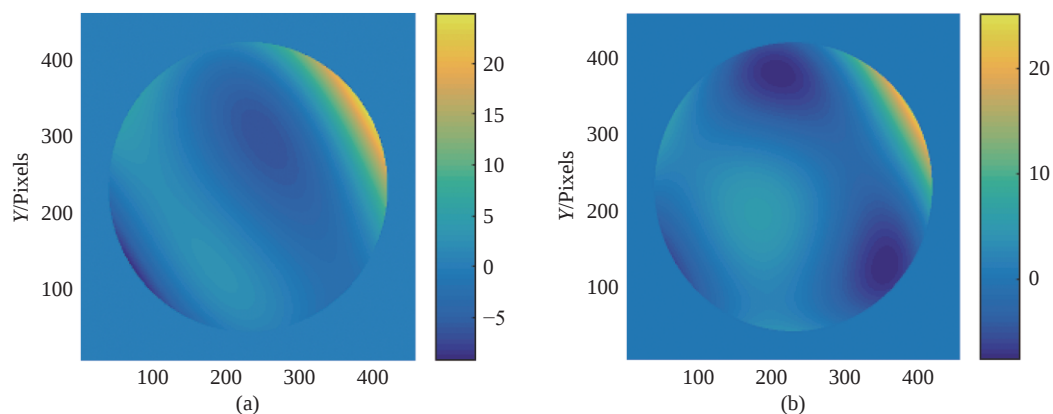


图 7 大像差下的离焦星点像拼接结果。(a)重建波前与(b)原始波前

Fig. 7 (a) Reconstructed wavefront and (b) original wavefront of stitching defocused star point image under large aberration

所搭建的多导星实验系统的具体布局如图 11 所示,即通过平移台进行光源的分时复用,实现多可导星的模拟,并通过透镜实现成像。

对离焦星点像进行分割,并进行光强归一化,所形成的波前解算结果如图所示,最终与直接进行波前解算相比,误差低于 10%。

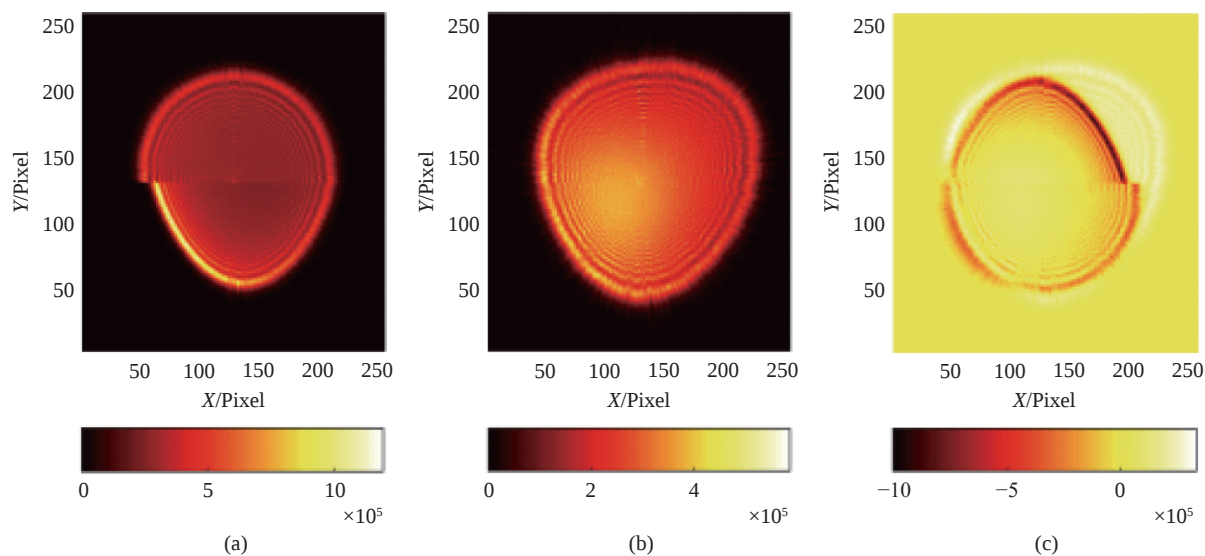


图 8 分割拼接的离焦星点像(大像差)。(a)焦前能量分布;(b)焦后能量分布;(c)光强分布差分

Fig. 8 Segmented and spliced defocused star point image (large aberration). (a) Pre-focal energy distribution; (b) post-focal energy distribution; (c) light intensity distribution difference

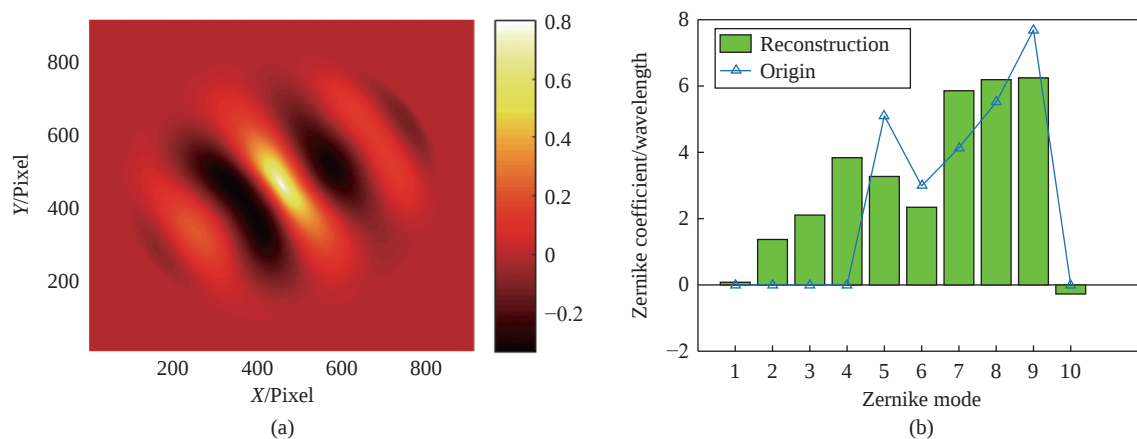
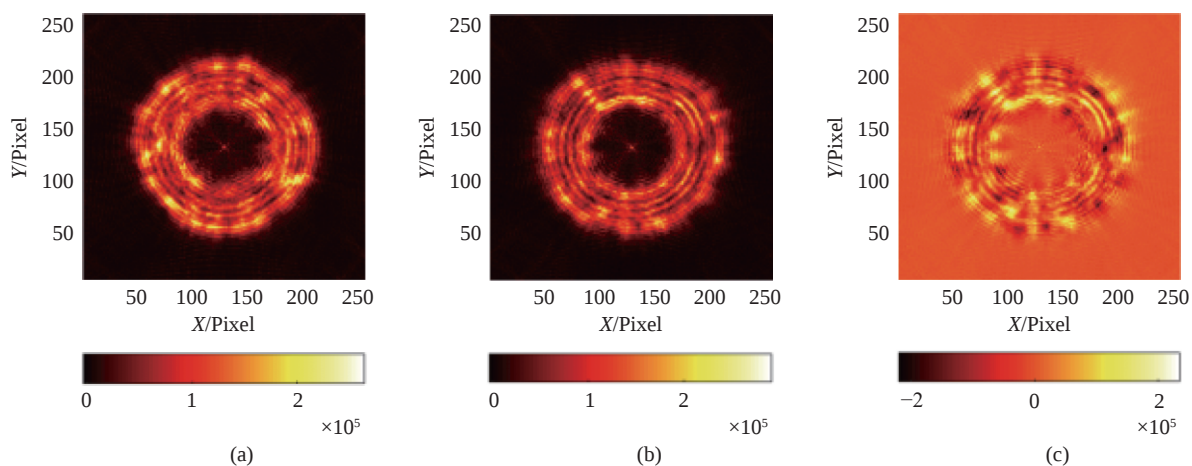


图 9 大像差下的离焦星点像拼接复原效果。(a)重建波前与原始波前相关函数与(b)泽尼克系数对比

Fig. 9 Restoration effect of defocused star image stitching under large aberration. (a) Correlation function and (b) Zernike coefficient comparison between reconstructed wavefront and original wavefront



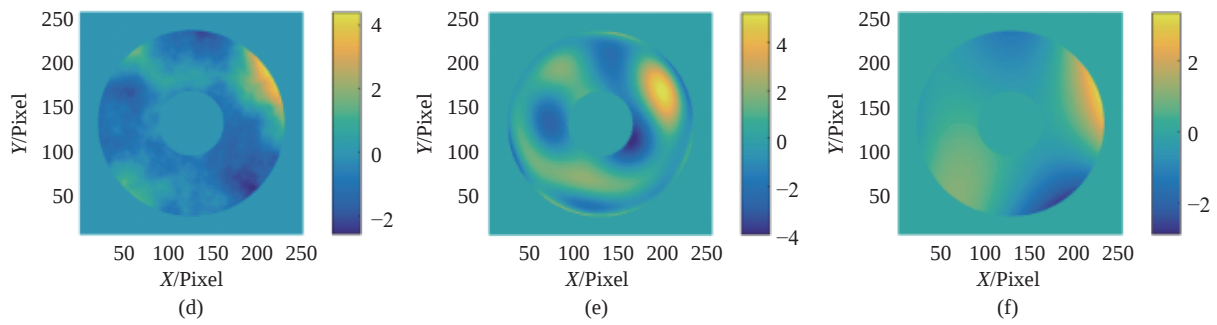


图 10 5 cm 相干长度下湍流对像差提取的影响。(a) 焦前能量分布; (b) 焦后能量分布; (c) 光强分布差分; (d) 短曝光重建波前(10 ms); (e) 长曝光重建波前(100 ms); (f) 原始波前

Fig. 10 Influence of turbulence on aberration extraction at 5 cm coherence length. (a) Pre-focal energy distribution; (b) post-focal energy distribution; (c) light intensity distribution difference; (d) short exposure reconstruction wavefront (10 ms); (e) long exposure reconstruction wavefront (100 ms); (f) original wavefront

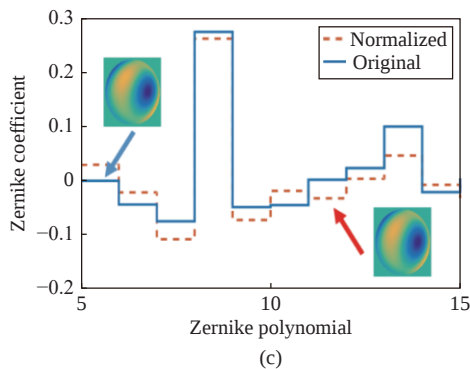
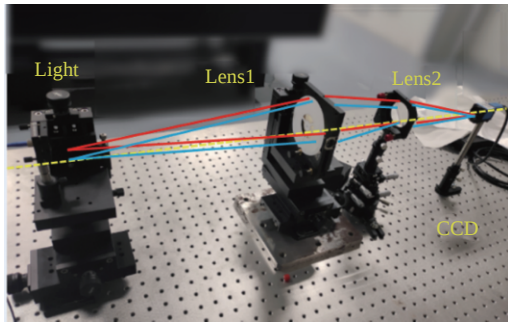
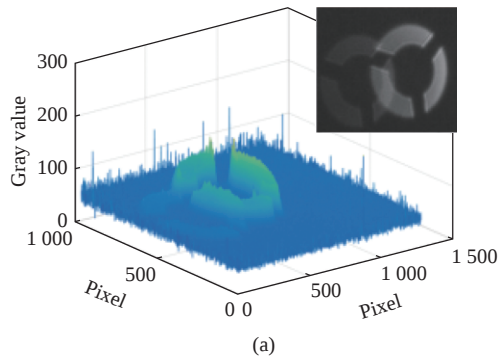


图 11 (a) 模拟双星检测强度分布; (b) 实验现场; (c) 两种形式的波前传感结果对比

Fig. 11 (a) Simulated binary detection intensity distribution; (b) experimental site; (c) comparison of two wavefront sensing results

4 结 论

大口径大视场望远镜在近 20 年来获得了飞速发展,为了获得更高的巡天效率与集光能力,其口径与视场都在不断扩大。主动光学作为大口径大视场望远镜的使能技术,已经获得了广泛的应用。国外已经研制并成功运行多台大口径大视场望远镜,8 米级的 LSST 已经投入建设。空间方面,6.5 米的詹姆斯韦布望远镜也具备巡天观测终端。而国内即将开展两米级大视场望远镜建设(中国空间望远镜,中科大 2.5 米望远镜)。

与传统的大口径大视场望远镜相比,未来的引力透镜巡天计划(暗物质与暗能量探测)需要对星系形态(星点椭率)进行长周期的精细观察,同时,还需要考虑偏振像差。因此,对波前传感的时间-空间感知能力均提出了更高要求。为获得更高精度的波前传感,以实现更加精细的天文观测,需要加大离焦量,将信息分布在更多探测器单元上,因此,会造成更多的亮星重合,限制系统探测速度(积分时间无法降低)与信噪比。本文所提出的方法可在传统主动光学技术的基础上,通过扩展可用导星,提升探测信噪比与采样速度,针对标准波前,与单导星曲率传感相比,误差为 0.02 个工作波长(RMS),误差控制在 10% 以内,可有效提升主动光学系统校正能力。本文方法对于推动天文大数据以及比较行星学等学科的发展具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] GANSICKE B T, SCHREIBER M R, TOLOZA O, *et al.*. Accretion of a giant planet onto a white dwarf star[J]. *Nature*, 2019, 576(7785): 61-64.
- [2] EGDALL I M. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system[J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(2): 242285.
- [3] SEBRING T A, DUNHAM E W, MILLIS R L, *et al.*. The discovery channel telescope: a wide-field telescope in northern Arizona[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5489: 658-666.
- [4] ROODMAN A, REIL K, DAVIS C. Wavefront sensing and the active optics system of the dark energy camera[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9145: 914516.
- [5] HOLZLÖHNER R, TAUBENBERGER S, RAKICH A P, *et al.*. Focal-plane wavefront sensing for active optics in the VST based on an analytical optical aberration model[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9906: 99066E.
- [6] GUNN J E, SIEGMUND W A, MANNERY E J, *et al.*. The 2.5 m telescope of the Sloan digital sky survey[J]. *The Astronomical Journal*, 2006, 131(4): 2332-2359.
- [7] WOODS D F, SHAH R Y, JOHNSON J A, *et al.*. Space Surveillance Telescope: focus and alignment of a three mirror telescope[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(5): 053604.
- [8] HARBECK D R, BOROSON T, LESSER M, *et al.*. The WIYN one degree imager 2014: performance of the partially populated focal plane and instrument upgrade path[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9147: 91470P.
- [9] PINIARD M, SORRENTE B, HUG G, *et al.*. Melt pool monitoring in laser beam melting with two-wavelength holographic imaging[J]. *Light:Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 11.
- [10] 张天宇, 王钢, 张熙, 等. 基于焦面复制方法的自适应光学系统静态像差校正技术[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 545-551.
- ZHANG T Y, WANG G, ZHANG X, *et al.*. Static aberration correction technique for adaptive optics system based on focal-plane copy approach[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 545-551. (in Chinese)
- [11] GENG Z CH, TONG ZH, JIANG X Q. Review of geometric error measurement and compensation techniques of ultra-precision machine tools[J]. *Light:Advanced Manufacturing*, 2021, 2(2): 14.
- [12] SU R, LEACH R. Physics-based virtual coherence scanning interferometer for surface measurement[J]. *Light:Advanced Manufacturing*, 2021, 2(2): 9.
- [13] 王丰璞, 李新南, 徐晨, 等. 大型光学红外望远镜拼接非球面子镜反衍补偿检测光路设计[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1184-1193.
- WANG F P, LI X N, XU CH, *et al.*. Optical testing path design for LOT aspheric segmented mirrors with reflective-diffractive compensation[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1184-1193. (in Chinese)
- [14] 张磊, 吴金灵, 刘仁虎, 等. 光学自由曲面自适应干涉检测研究新进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 227-244.
- ZHANG L, WU J L, LIU R H, *et al.*. Research advances in adaptive interferometry for optical freeform surfaces[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 227-244. (in Chinese)
- [15] 陈波, 杨靖, 李新阳, 等. 波前曲率传感自适应光学的模式型控制技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0201002.
- CHEN B, YANG J, LI X Y, *et al.*. Modal control technique of adaptive optics with wavefront curvature sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0201002. (in Chinese)

作者简介:



安其昌(1988—), 男, 山西太原人, 博士, 副研究员, 中国科学院青年创新促进会成员。2011 于中国科学技术大学获得工学学士学位, 2018 年于中国科学院大学获得博士学位, 现就职于中国科学院长春光机所, 研究方向为大口径光机系统检测装调。E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn