

基于二次图像补偿的相位差波前传感器

孔庆峰^{1,2,3,4}, 王帅^{1,3*}, 杨平^{1,3**}, 林海奇^{1,3,4}, 刘永², 许冰^{1,3}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610054;

³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 电荷耦合器件(CCD)的测量精度是影响波前复原精度的主要因素。受相机制造工艺的限制以及环境的影响,不可避免地会采集到噪声数据,从而影响低信噪比、高空间频率图像信息的采集。为了降低噪声对波前复原的影响,提出了一种基于图像补偿的改进相位差波前传感器。先在 CCD 相机的正常曝光时间和饱和曝光时间下分别采集两幅图像;然后融合成一幅包含准确高空间频率和低空间频率光强信息的图像。在相同信噪比下,对改进的相位差波前传感器和传统的相位差波前传感器进行了仿真。结果表明,改进的相位差波前传感器的波前反演精度有显著提高。最后通过实验进一步验证了该方法的有效性。

关键词 相位差波前传感器; 像差; 信噪比; 曝光时间; 动态范围

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.121103

Phase Diversity Wavefront Sensor Based on Secondary Image Compensation

Kong Qingfeng^{1,2,3,4}, Wang Shuai^{1,3*}, Yang Ping^{1,3**}, Lin Haiqi^{1,3,4}, Liu Yong², Xu Bing^{1,3}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The measurement precision of charge coupled device (CCD) is the main factor affecting the accuracy of wavefront reconstruction. Due to the limitations of camera manufacturing technology and environmental impact, it is inevitable that noise data will be collected, which will affect the image information collection with low signal-to-noise-ratio and high spatial frequency. An improved phase diversity wavefront sensor based on image compensation is proposed to reduce the influence of noise on wavefront reconstruction. First, two images are collected under the normal exposure time and saturated exposure time of CCD respectively. And then they are sewed into an image containing accurate high spatial frequency and low spatial frequency light intensity information. At the same signal-to-noise ratio, the improved phase diversity wavefront sensor and the traditional phase diversity wavefront sensor are simulated. The results show that the wavefront inversion accuracy of the improved phase difference wavefront sensor is significantly improved. Finally, the effectiveness of the method is further verified through experiments.

Key words phase diversity wavefront sensor; aberration; signal-to-noise ratio; exposure time; dynamic range

OCIS codes 010.7350; 120.5050

收稿日期: 2019-10-15; 修回日期: 2019-10-31; 录用日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(61805251)、中国科学院青年创新促进会(2017429)

* E-mail: wangshuai@ioe.ac.cn; ** E-mail: pingyang2516@163.com

1 引言

波前传感器(WFS)主要包括夏克-哈特曼传感器^[1]、四棱锥传感器^[2]、曲率传感器^[3]、剪切干涉仪^[4-5]和相位差波前传感器(PDWFS)^[6]等,在自适应光学系统中起重要作用^[7]。相比 WFS,PDWFS 只需要采集焦面和离焦面的图像信息,具有结构简单、易于实现的优点。且检测精度高、对环境要求低。随着计算机速度的发展,PDWFS 在自适应光学系统中具有更大的应用潜力^[8-9]。

1979 年, Gonsalves 和 Chidlaw^[10] 提出了相位差(PD)算法, Dolne 等^[11] 对 PD 算法进行了优化。Löfdahl 等^[12] 成功使用 PD 算法重建了太阳表面图像。哈勃太空望远镜也采用了 PD 算法进行图像观测^[13]。

PDWFS 是电荷耦合器件(CCD),探测的光强信息中,会夹杂一些噪声数据^[14-15],如背景噪声、信号光子噪声和 CCD 的读取噪声。其中读取噪声是一种高斯分布噪声,对图像的退化影响较大^[16-18]。根据傅里叶变换,可将透镜的焦面图像看作是近场图像的频谱。由于焦面图像光强主要集中在图像中部的低空间频率区域,而周边的高频信息能量较弱,因此噪声对探测图像高频信息的影响较大。可以通过增加图像高频区域的信噪比(SNR),提高 PDWFS 的测量精度。Luo 等^[19] 提出了在透镜前增加一个衍射光栅以提高图像信噪比的方法,根据 CCD 在接收面处不同衍射阶次的能量关系,计算得到焦距和离焦面上的光强分布,提高了 PDWFS 的探测精度。但其结构复杂、能量比例关系固定、光栅制作难度大以及对超大靶面 CCD 的要求限制了该方法在 PDWFS 中的实际应用。

当 CCD 相机接收的光强较弱时,采集到的光强分布受噪声影响严重。因此使用 CCD 相机时,要尽量增大曝光时间,以提高探测的信噪比。但曝光时间过大会造成 CCD 相机拍摄的图像饱和,导致无法探测。本文提出了一种基于图像补偿的相位差波前传感器,其光学结构比较简单。通过改变 CCD 相机的曝光时间,在焦面、离焦面上各采集两副图像,其中光强较大的图像,中间部分虽有饱和,但相比常规探测周围的高频信息信噪比较高,可准确探测。且该饱和区域可通过图像补偿算法由光强较小、未饱和的图像计算出来。将两幅图像融合成一幅高低频信息都非常准确的图像,可大大提高 CCD 相机的动态范围,有效抑制随机噪声。

2 基本原理

2.1 传统的相位反演算法

传统的 PDWFS 系统如图 1 所示。待测光束经过透镜后被分光片(BS)分成两束,分别成像于相机焦面和相机离焦面靶面,其中 d 为离焦距离。

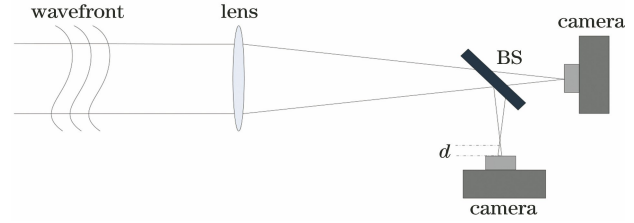


图 1 光学系统模型

Fig. 1 Model of optical system

在忽略系数的情况下,可将焦面光场表示为^[9]

$$E_f(x, y) = \mathcal{F}\{ |E_{\text{near}}(x, y)| \cdot \exp[i\varphi_{\text{near}}(x, y)] \}, \quad (1)$$

式中, (x, y) 为对应位置坐标, f 为对应焦距, \mathcal{F} 为傅里叶变换, E_{near} 为输入光场, $\varphi_{\text{near}}(x, y)$ 为近场波前相位。近场光强分布可以通过焦面光场表示为

$$E_{\text{near}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{ |E_f(x, y)| \cdot \exp[i\varphi_f(x, y)] \}, \quad (2)$$

式中, \mathcal{F}^{-1} 为逆傅里叶变换, $\varphi_f(x, y)$ 为焦面相位。

可将离焦面的光场分布等效为在光瞳面引入一个附加相位差 $\Delta\varphi_d(x, y)$

$$E_d(x, y) = \mathcal{F}\{ |E_{\text{near}}(x, y)| \cdot \exp[i\varphi_{\text{near}}(x, y) + i\Delta\varphi_d(x, y)] \}. \quad (3)$$

近场波前相位可以表示为

$$E_{\text{near}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{ |E_d(x, y)| \cdot \exp[i\varphi_d(x, y)] \} / \exp[i\Delta\varphi_d(x, y)]. \quad (4)$$

相位差波前复原算法流程如图 2 所示。设初始 $\varphi_{\text{near}}(x, y)$ 为零, 计算得到的 $|E_{\text{near}}(x, y)|$ 、 $|E_f(x, y)|$ 和 $|E_d(x, y)|$ 分别用实际近场强度分布的平方根 $\sqrt{I_{\text{near}}(x, y)}$ 、焦面强度分布的平方根 $\sqrt{I_f(x, y)}$ 和离焦面强度分布的平方根 $\sqrt{I_d(x, y)}$ 代替。通常假定 $\sqrt{I_{\text{near}}(x, y)}$ 在瞳孔内为 1, 其他区域为零。

当 $|E_d(x, y)|$ 满足(5)式时, 上述循环停止。

$$X_{\text{SSE}} = \sqrt{\frac{\iint [|E_d(x, y)| - \sqrt{I_d(x, y)}]^2}{\iint I_d(x, y)}} < \sigma, \quad (5)$$

式中, X_{SSE} 为评价指标, σ 为评价因子, 通常设置为一个足够小的数值, 实验中设为 10^{-7} , 当达到判定条件, 输出 $\varphi_{\text{near}}(x, y)$ 。

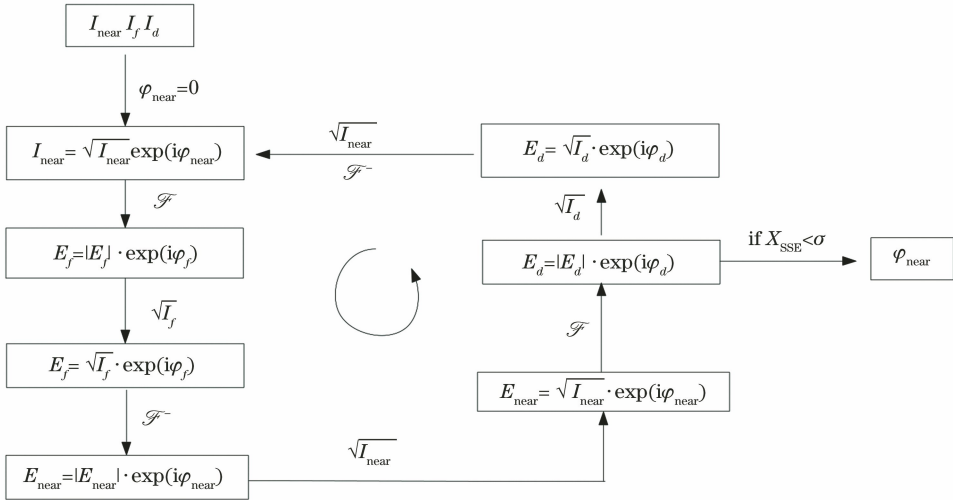


图 2 PD 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of PD algorithm

受制作工艺、测试环境的影响,不可避免地会产生噪声。实际的焦面光强分布和离焦面光强分布可以表示为

$$I_f(x, y) = I'_f(x, y) + n_f(x, y), \quad (6)$$

$$I_d(x, y) = I'_d(x, y) + n_d(x, y), \quad (7)$$

式中, $I'_f(x, y)$ 和 $I'_d(x, y)$ 分别为理想的焦面和离焦面光强分布, $n_f(x, y)$ 和 $n_d(x, y)$ 为附加噪声。

2.2 基于图像补偿的相位差波前传感技术

通过基于图像补偿的相位差波前传感器(AET-PDWFS), 在正常曝光时间下, 即图像峰值光强接近

相机饱和和光强时, 拍摄一幅图像; 在饱和曝光时间下, 即图像中间峰值部分饱和时, 使图像对应点光强是原光强的数倍(一般取 3~20 之间), 拍摄一幅图像, 将两幅图像融合成一幅图像。

先模拟接近相机饱和情况下的正常焦面光强分布 $I_{f0}(x, y)$ 和离焦面光强分布图像 $I_{d0}(x, y)$, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 然后增加曝光时间至饱和, 得到焦面饱和光强分布 $I_{fs}(x, y)$ 和离焦面饱和光强分布图像 $I_{ds}(x, y)$, 如图 3(c) 和图 3(d) 所示。可以发现, 增加曝光时间后, 图像中间部分是饱和的, 但其周围的高频光强信息却能被很好地探测到。

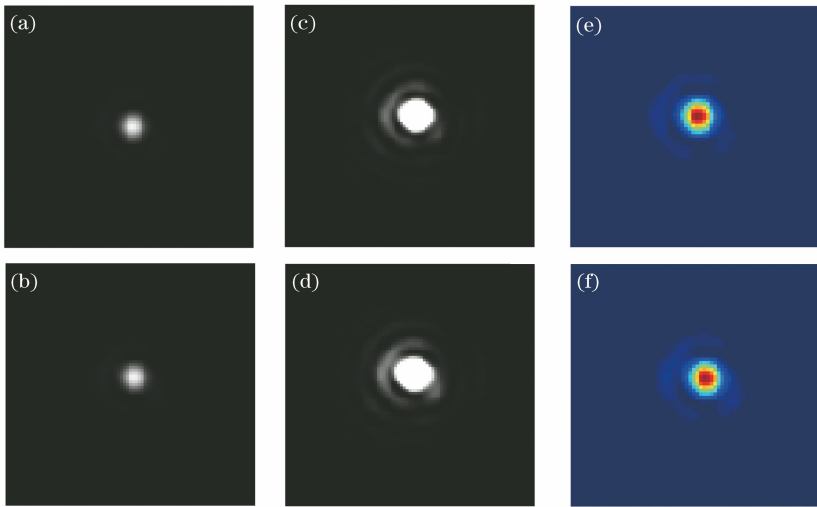


图 3 带像差的远场图像。(a)焦面图像;(b)离焦面图像;(c)焦面饱和图像;(d)离焦面饱和图像;
(e)焦面融合图像;(f)离焦面融合图像

Fig. 3 Far-field images with aberration. (a) Image of the focal plane; (b) image of the defocused plane; (c) image of the saturated focal plane; (d) image of the saturated defocused plane; (e) fusion image of the focal plane; (f) fusion image of defocused plane

在焦面光强 $I_{f_0}(x, y)$ 和焦面饱和光强 $I_{f_s}(x, y)$ 中取对应的 N 个有效像素,可以得到饱和图像相对焦面图像的强度倍率

$$r_f = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{I_{f_s}(x_i, y_i)/I_{f_0}(x_i, y_i)}{N}}{N}, \quad (8)$$

式中, N 为两幅图像中未饱和区域均匀采集的对应点,一般取 10, $i \in [1, N]$ 为序号。

$I_{d_s}(x, y)$ 和 $I_{d_0}(x, y)$ 之间的比例系数可表示为

$$r_d = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{I_{d_s}(x_j, y_j)/I_{d_0}(x_j, y_j)}{N}}{N}. \quad (9)$$

r_f 和 r_d 取值范围为 3~20。用 $I_{f_0}(x, y)$ 相应的像素光强乘 r_f 代替 $I_{f_s}(x, y)$ 中饱和像素的光强得到 $I_{f_a}(x, y)$, 用 $I_{d_0}(x, y)$ 相应的像素光强乘以 r_d 代替 $I_{d_s}(x, y)$ 中饱和像素的光强得到 $I_{d_a}(x, y)$ 。新的光强分布 $I_{f_a}(x, y)$ 和 $I_{d_a}(x, y)$ 分别如图 3(e) 和图 3(f) 所示,既包含了图 3(a) 和图 3(b) 中光强峰值附近的光强信息,又融合了图 3(c) 和图 3(d) 中光强外围的高频光强信息。

使用计算得到的融合光强信息,可显著提高相位差法波前测量的精度。具体流程如图 4 所示。

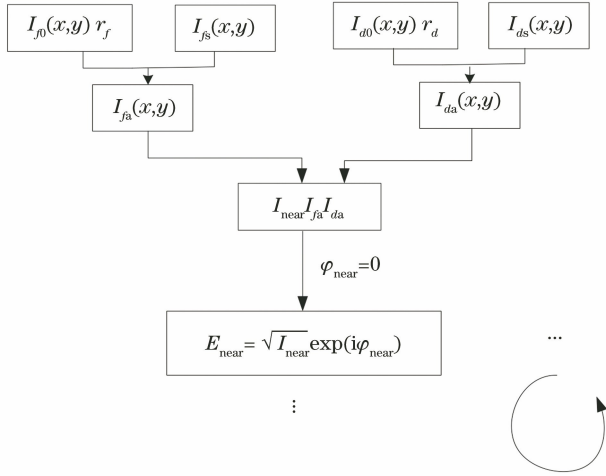


图 4 AET-PDWFS 流程图

Fig. 4 Flow chart of AET-PDWFS

3 仿真分析

为验证 AET-PDWFS 的有效性和测量精度,进行了大量的数值模拟实验,并与传统 PDWFS 进行了对比。模拟参数,利用前 65 阶 Zernike 多项式生成了峰谷(PV)为 0.5734λ 和均方根(RMS)为 0.0847λ 的随机波前像差,如图 5 所示。焦距为 500 mm,离焦面在距离透镜 505 mm 处,通光孔径为 4 mm,相机信噪比为 26 dB,两种方法分别迭代 50 次。

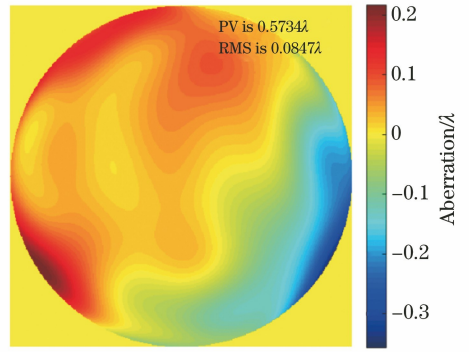


图 5 入射波前像差分布

Fig. 5 Aberration distribution of incident wavefront

图 6 为传统方法和改进方法的焦面采集图像,为方便观察,对光强值取对数。相比传统 PDWFS 的焦面和离焦面强度图像(图 6(a) 和图 6(b)),基于 AET-PDWFS 的焦面和离焦面强度图像光强提高了 10 倍,通过图像融合得到新的焦面和离焦面强度图像,分别如图 6(c) 和图 6(d) 所示。可以发现,改进的 AET-PDWFS 光强高频细节比传统的 PDWFS 更丰富。

采用 PDWFS 和 AET-PDWFS 重建图 5 所示的随机入射波前,复原结果如图 7 所示。可以发现,传统 PDWFS 重构波前(PV 为 0.3258λ , RMS 为 0.0686λ)的细节与待测波前(PV 为 0.5734λ , RMS 为 0.0847λ)明显不同。对比图 7(a),可以发现,图 7(b) 中 AET-PDWFS 的复原波前与待测波前非常接近。定义残余波前为复原波前与待测波前之差。图 7(c) 所示的传统 PDWFS 的恢复波前残余误差(PV 为 0.3134λ , RMS 为 0.0199λ)远大于图 7(d) 中 AET-PDWFS 的残余误差(PV 为 0.0609λ , RMS 为 0.003λ)。当复原波前用前 65 阶 Zernike 多项式表示时,可以发现,传统 PDWFS 的 Zernike 复原系数部分阶次的复原值与实际值差异较大,如图 7(e) 所示,黑色条柱为实际值,白色条柱为复原值。而图 7(f) 中 AET-PDWFS 的复原系数与实际值非常接近。特别是对于高阶 Zernike 多项式, AET-PDWFS 的测量精度要比传统的 PDWFS 高很多,这表明在一定的噪声条件下,改进算法的波前复原精度有明显提高。

对随机波前在不同的信噪比下进行复原仿真,结果如图 8 所示。可以发现传统 PDWFS 在低信噪比下的波前复原精度与改进传感器差距明显,随着信噪比的提高,两者的差距缩小,但精度仍略低于改进方法。这表明改进的 AET-PDWFS 能有效解决低信噪比下的波前复原精度问题。

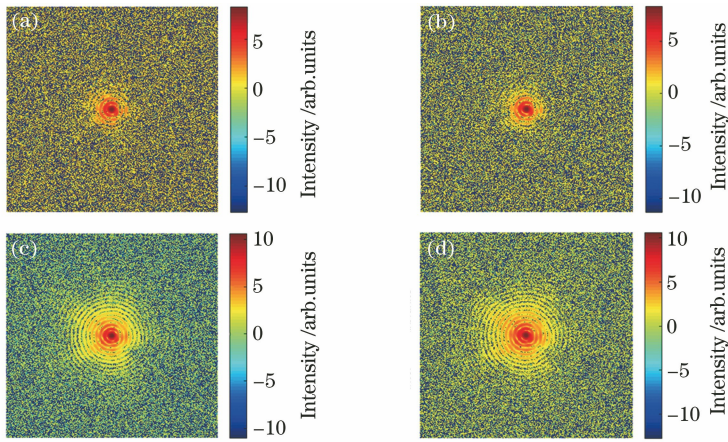


图 6 光强分布。(a) PDWFS 的焦面图像;(b) PDWFS 的离焦面图像;(c) AET-PDWFS 的焦面图像;(d) AET-PDWFS 的离焦面图像

Fig. 6 Distribution of light intensity. (a) Focal plane image of PDWFS; (b) defocused plane image of PDWFS; (c) focal plane image of AET-PDWFS; (d) defocused plane image of AET-PDWFS

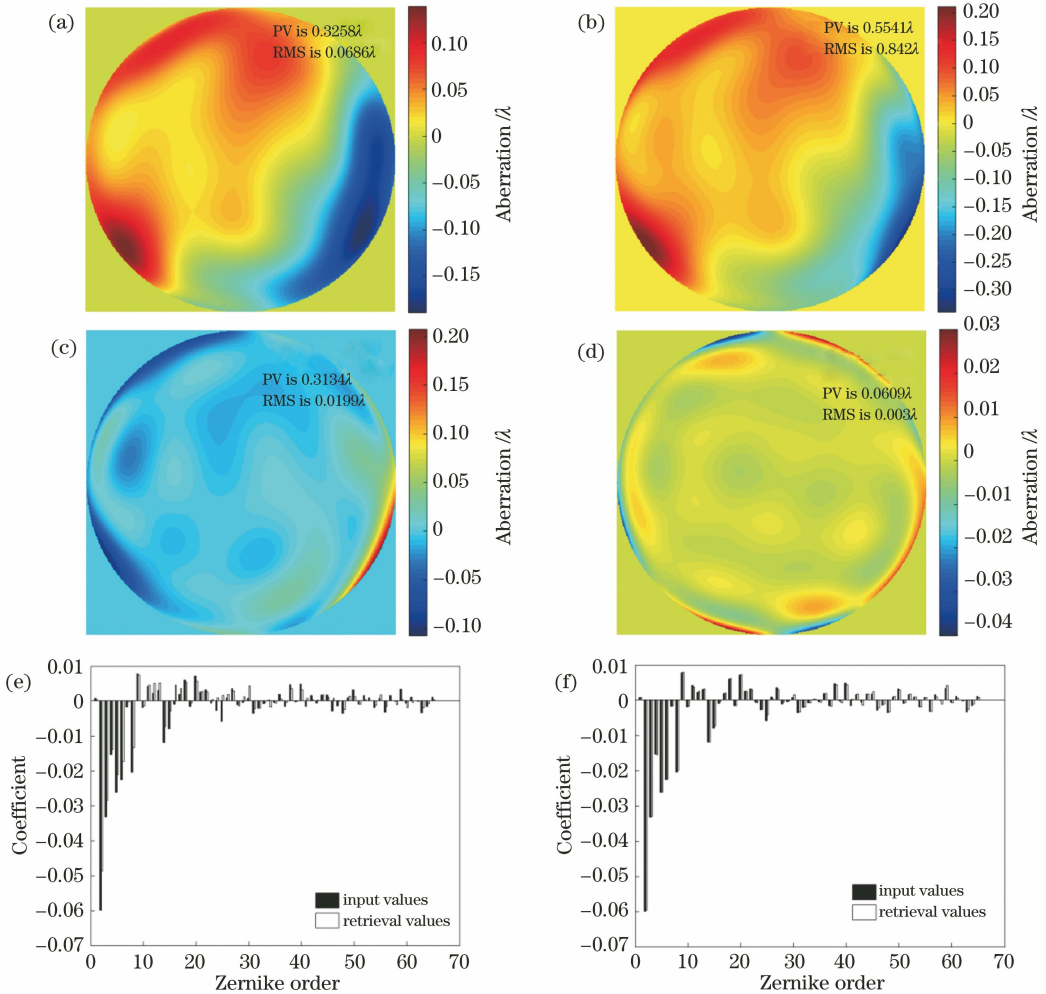


图 7 波前复原结果。(a) PDWFS 复原的波前;(b) AET-PDWFS 复原的波前;(c) PDWFS 复原的波前残差;(d) AET-PDWFS 复原的波前残差;(e) PDWFS 重构的 Zernike 系数;(f) AET-PDWFS 重构的 Zernike 系数

Fig. 7 Results of wavefront restoration. (a) Wavefront of PDWFS restored; (b) wavefront of AET-PDWFS restored; (c) wavefront residual of PDWFS restored; (d) wavefront residual of AET-PDWFS restored; (e) Zernike coefficient reconstructed by PDWFS; (f) Zernike coefficient reconstructed by AET-PDWFS

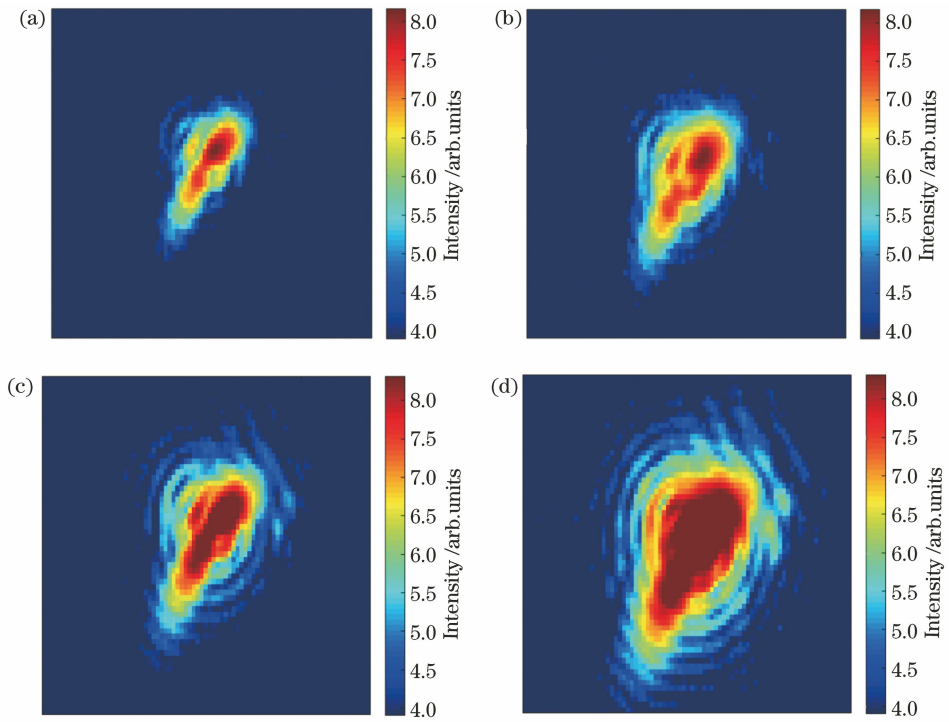


图 10 实验采集的图像。(a) 焦面常规图像；(b) 离焦面常规图像；(c) 焦面饱和图像；(d) 离焦面饱和图像

Fig. 10 Images collected from experiment. (a) Regular image of the focal plane; (b) regular image of the defocused plane; (c) saturated image of the focal plane; (d) saturated image of the defocused plane

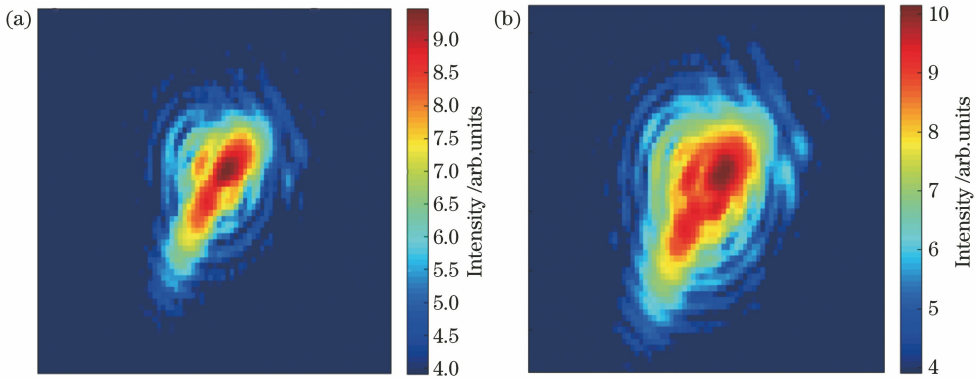


图 11 AET-PDWFS 融合的图像。(a) 焦面图像；(b) 离焦面图像

Fig. 11 Images of the AET-PDWFS fusion. (a) Image of the focal plane; (b) image of the defocused plane

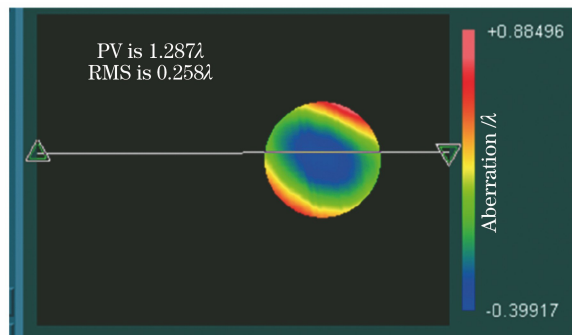


图 12 MARK IV 干涉仪测得的像差板面形

Fig. 12 Aberration plate shape measured by MARK IV interferometer

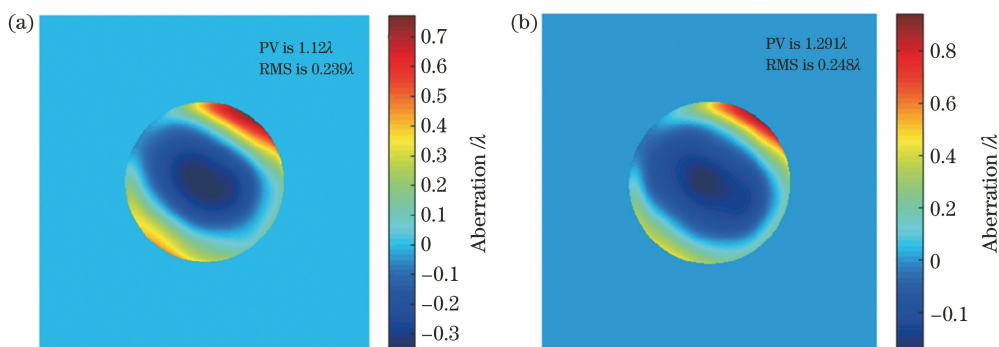


图 13 波前复原结果。(a) PDWFS;(b) AET-PDWFS

Fig. 13 Results of wavefront reconstruction. (a) PDWFS; (b) AET-PDWFS

5 结 论

阐述了 AET-PDWFS 的基本原理,通过数值仿真,证明了该传感器相比传统 PDWFS 在波前复原精度上有一定提高,特别在低信噪比的条件下,优势更加明显。设计搭建了实验系统,结果表明,该传感器操作简单,且无需改变光路、添加器件,只需要改变曝光时间即可实现较高波前的复原精度,具有较高的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Lane R G, Tallon M. Wave-front reconstruction using a Shack-Hartmann sensor[J]. Applied Optics, 1992, 31(32): 6902-6908.
- [2] Chamot S R, Dainty C, Esposito S. Adaptive optics for ophthalmic applications using a pyramid wavefront sensor[J]. Optics Express, 2006, 14(2): 518-526.
- [3] Roddier F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics[J]. Applied Optics, 1988, 27(7): 1223-1225.
- [4] Wyant J C. Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems[J]. Applied Optics, 1975, 14(11): 2622-2626.
- [5] Zong B M, Luan J Y, Jiang Z L, et al. Method to measure transmitting wave-front of imaging lens based on extended ptychographical iterative engine [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0804001.
纵榜铭, 栾嘉蕴, 蒋志龙, 等. 基于叠层扫描成像技术的成像透镜透射波前测量方法[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0804001.
- [6] Gonsalves R A. Phase retrieval and diversity in adaptive optics [J]. Optical Engineering, 1982, 21(5): 829-832.
- [7] Hardy J W. Adaptive optics: a progress review [J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1542: 2-17.
- [8] Zhang D, Zhang X B, Xu S Y, et al. Simplified phase diversity algorithm based on a first-order Taylor expansion [J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7872-7877.
- [9] Jefferies S M, Lloyd-Hart M, Hege E K, et al. Sensing wave-front amplitude and phase with phase diversity [J]. Applied Optics, 2002, 41(11): 2095-2102.
- [10] Gonsalves R A, Chidlaw R. Wavefront sensing by phase retrieval [J]. Proceedings of SPIE, 1979, 0207: 32-39.
- [11] Dolne J J, Tansey R J, Black K A, et al. Practical issues in wave-front sensing by use of phase diversity [J]. Applied Optics, 2003, 42(26): 5284-5289.
- [12] Löfdahl M G, Kendrick R L, Harwit A, et al. Phase diversity experiment to measure piston misalignment on the segmented primary mirror of the Keck II Telescope [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3356: 1190-1201.
- [13] Fienup J R, Marron J C, Schulz T J, et al. Hubble space telescope characterized by using phase-retrieval algorithms [J]. Applied Optics, 1993, 32(10): 1747-1767.
- [14] Li W L, Li K, Peng D, et al. Analysis and removal of stripe noise in AGRI remote-sensing images [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1228004.
李文力, 李凯, 彭迪, 等. AGRI 遥感图像中条带噪声的分析与去除 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1228004.
- [15] Zheng C L, He D D, Fei Q G. Improved digital image correlation method based on gray gradient denoised by regularization method [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0812002.

- 郑成林, 何顶顶, 费庆国. 基于灰度梯度正则化去噪的改进数字图像相关法 [J]. 光学学报, 2018, 38 (8): 0812002.
- [16] Lalignat O, Truchetet F, Fauvet E. Noise estimation from digital step-model signal[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 5158-5167.
- [17] He Y X, Li X Y. Error analysis of laser beam quality measured with CCD sensor and choice of the optimal threshold [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 671-677.
- [18] Snyder D L, Helstrom C W, Lanterman A D, et al. Compensation for readout noise in CCD images [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(2): 272-283.
- [19] 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): 094201.