

文章编号:1007-2780(2017)03-0234-06

基于液晶空间光调制器的相位差波前探测 技术定量研究

李小平¹, 胡五生¹, 于洪丽^{2,3}, 徐梓浩^{2,3}, 张佩光², 杨程亮^{2*}, 宣 丽²

(1. 济源职业技术学院, 河南 济源 459000;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林, 长春 130033;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:为了定量研究相位差波前探测技术(phase diversity technique, PD)对波前探测和图像重建的精度,本文分别进行了数值模拟以及相关实验。数值模拟中采用了均方根(root-mean-square, RMS)分别为 $0.1\lambda \sim 0.5\lambda$ 的五组随机畸变波前,获得其退化的焦面图像和相应的离焦图像信息,利用 PD 技术对其进行波前探测和图像重建,波前探测的残余误差 RMS 值均达到了 $10^{-5}\lambda$ 水平,重建图像在分辨率和对比度上有明显提升。搭建了基于液晶空间光调制器的实验系统,利用液晶空间光调制器来定量施加随机的波前像差,可以有效解决湍流屏数据难以量化的问题。同样将 PD 技术应用于本实验所采集到的退化焦面图像和相应离焦图像,对于 RMS 值为 0.306λ 的随机波前像差,探测波前的残余误差为 0.091λ ,图像重建结果与模拟结果高度一致,本文列举并分析了可能造成实验误差的多种因素,同时为该技术应用与液晶系统积累了技术基础。

关 键 词:相位差探测技术;波前探测;图像重建

中图分类号:O439 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173203.0234

Quantitative analysis on phase diversity technique based on liquid crystal spatial light modulator

LI Xiao-ping¹, HU Wu-sheng¹, YU Hong-li^{2,3}, XU Zi-hao^{2,3},
ZHANG Pei-guang², YANG Cheng-liang^{2*}, XUAN Li²

(1. Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan, 459000, China;

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

3. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study phase diversity (PD) technique quantitatively, numerical simulations and experiments has been performed. In numerical simulations, $0.1\lambda \sim 0.5\lambda$ root-mean-square (RMS) random phase aberrations are used to investigate the PD technique from images degraded by these random

收稿日期:2016-11-16;修订日期:2016-11-21.

基金项目:国家自然科学基金(No.61405194)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61405194)

* 通信联系人, E-mail: yclldahai@gmail.com

phase aberrations. Root-mean-square errors (RMSE) of phase aberrations detected by PD is less than $10^{-5}\lambda$, and the reconstructed images become much better than the degraded focus-plane images. An experimental system based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator (LC-SLM) is established, and the problem of lacking quantitative data for atmospheric turbulence phase screen can be solved effectively. RMSE of the phase aberrations of the experimental data is 0.091λ for which the RMS of original phase aberrations is 0.306λ . The estimated wave-front is very similar to original phase aberrations. The experimental and simulation results agree well. Several reasons are also analyzed which could result in experimental error, and this work also gets technical experiences for the application of PD technique in liquid crystal adaptive system in future.

Key words: phase diversity technique; wave-front sensing; image reconstruction

1 引言

相位差波前探测技术由 Gonsalves 在 1979 年首次提出^[1],其基本原理是利用同时采集到的模糊焦面图像和离焦面图像探测系统中的波前像差,进而重建出清晰的目标图像^[2]。与传统的波前探测器相比,PD 技术具有诸多显著优势:对光学硬件没有特殊的要求;光路简单,易于实现;不仅可以实现对点目标系统的探测,扩展目标同样适用^[3-4]。PD 技术在自适应光学以及主动光学等发面发挥了重要作用。1994 年, Seldin 和 Paxman 等人将 PD 技术应用于恢复高分辨率太阳米粒组织的图像,有效的克服了大气湍流的干扰^[5-6]。1998 年, Keck II 望远镜各分块子镜间的活塞像差利用 PD 技术进行了准确的测量^[7]。2005 年, Dolne 等人分析了组合相位差异函数对波前探测精度的影响^[8]。为了定量研究 PD 技术对波面的探测精度,本文将液晶空间光调制器(LC-SLM)引入到光路中,有效的解决了使用湍流屏数据难以进行量化的问题。液晶空间光调制器具有空间分辨率高、调制量大、体积小重量轻以及成本低等优势,已经成功应用于光互连、光计算、激光光束整形、视网膜成像和自适应波前校正等领域^[9-10]。

本文在数值模拟和实验两方面研究了 PD 技术对波前像差的探测精度。生成了 5 组随机像差,像差均方根分别为 $0.1\lambda \sim 0.5\lambda$ 不等,残余误差均方根(root-mean-square error, RMSE)均达到了 $10^{-5}\lambda$ 水平。在实验方面,将 LC-SLM 引入到光路中,用于定量施加不同大小的随机像差。

对于 RMS 值为 0.306λ 的波面,实验恢复结果 RMSE 为 0.091λ ,波前探测较为准确。在模拟和实验两方面,PD 技术所恢复的图像与模糊焦面图相比较分辨率和对比度均有了明显提升,模拟和实验结果符合较好。

2 PD 技术基本原理

相位差波前探测技术能够根据实验中同时采集到的多幅图像来探测波前,并恢复出清晰图像。其中一幅图像通常是由于波前畸变而退化的模糊焦面图像,其余图像在模糊焦面图像基础上引入已知的像差^[11]。由于离焦像差的引入相对容易,通常附加像差为一定大小的离焦。对于线性空不变非相干系统,经过系统所成的像可以用目标图像与点扩散函数的卷积形式来获得,即:

$$g_k(x) = f * s_k(x), \quad (1)$$

其中: x 是二维坐标, $*$ 表示卷积运算, k 表示不同通道, $g_k(x)$ 为第 k 个差异图像(diversity image),点扩散函数(point spread function, PSF)

$$s_k(x) = |F^{-1}\{p e^{i(\varphi_t + \theta_k)}\}|^2, \quad (2)$$

式中: F^{-1} 表示傅里叶逆变换, p 表示光瞳函数, φ_t 为带求某一时刻的畸变相位, θ_k 表示引入的已知大小的位相差异^[12-13]。

当我们考虑探测器噪声是均值为 0,方差为 σ_n^2 的高斯噪声时,被探测到的差异图像为:

$$d_k(x) = g_k(x) + n_k(x), \quad (3)$$

这里 n_k 为加性噪声(additive noise)。根据极大似然估计理论确定目标函数 L :

$$L = \sum_k \sum_x |d_k(x) - \hat{f} * \hat{s}_k(x)|^2, \quad (4)$$

其中: $\hat{f}$ 表示目标光强的估计值, $\hat{s}_k(x)$ 表示第 k 个光学通道 PSF 的估计值。根据 Parseval 定理和卷积定理, 式(4)可表示为:

$$L = \sum_k \sum_u |D_k(u) - F(u)S_k(u)|^2, \quad (5)$$

其中: D_k , F , S_k 分别是 d_k , f 和 s_k 的离散傅里叶变换。对目标函数进行降维处理, 得到目标评价函数 L 和物函数 $F(u)$:

$$L = \sum_u \frac{|D_1(u)S_1(u) - D_2(u)S_2(u)|^2}{|S_1(u)|^2 + |S_2(u)|^2}, \quad (6)$$

$$F(u) = \frac{D_1(u)S_1^*(u) + D_2(u)S_2^*(u)}{|S_1(u)|^2 + |S_2(u)|^2}, \quad (7)$$

式中: $*$ 表示共轭^[14]。确定评价函数后, 图像恢复过程可描述为数学最优化问题, 本文采用了粒子群优化算法进行求解。

3 数值模拟

本文模拟了 RMS 值分别为 0.1λ 、 0.2λ 、 0.3λ 、 0.4λ 、 0.5λ 的五组随机畸变波前, 利用被畸变波前退化的焦面图像以及相应的离焦面图像两组信息来进行波前探测和图像恢复。依据前人的工作^[15-16], 本文中离焦的峰谷值 (peak-to-valley, PV) 等于 1λ 。本文使用 RMSE 来表征波前探测的精度, RMSE 计算公式如下:

$$\text{RMSE}(\hat{\varphi}) = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\text{pupil}}} [\varphi(j) - \hat{\varphi}(j)]^2 / N_{\text{pupil}}}, \quad (8)$$

式中: $\varphi(j)$ 是已知的真实波面在坐标点 j 处的值, $\hat{\varphi}(j)$ 用来表示波前畸变的估计值, N_{pupil} 表征光瞳处的离散点数。

波前探测精度如图 1 所示, 对于 5 组 RMS 大小不同的随机波前像差, 波前探测的残余误差 RMS 均小于 $10^{-5}\lambda$, 波前探测精度极高。图像恢复结果如图 2 所示, 图 2(a) 从左到右表示被 RMS 为 $0.1\lambda \sim 0.5\lambda$ 畸变波前所退化的焦面图像, 图 2(b) 从左到右表示使用 PD 技术所恢复出来的相应的目标图像。PD 技术在不同大小的波

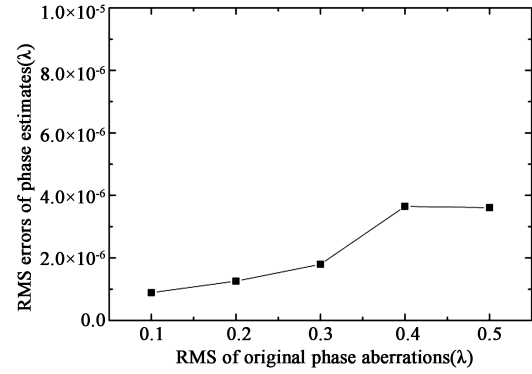
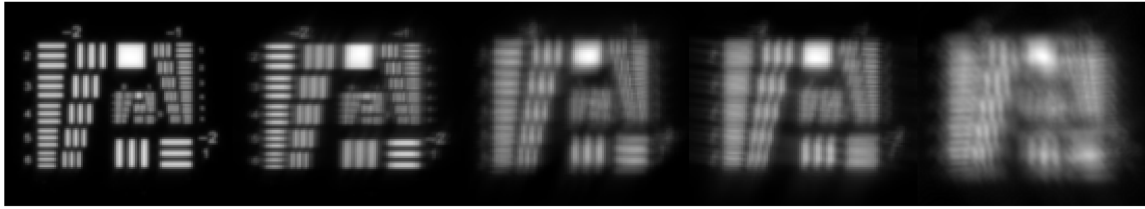
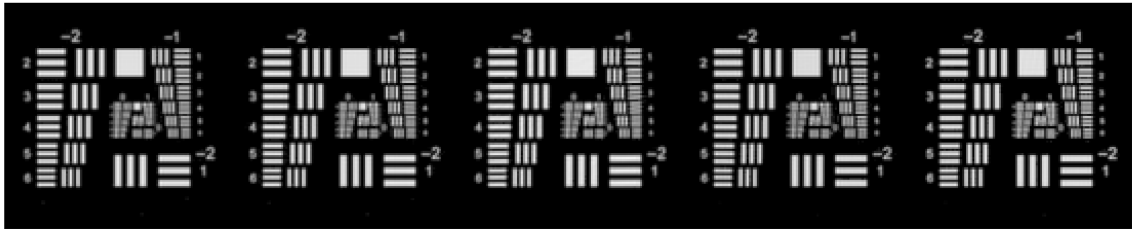


图 1 5 组不同 RMS 随机像差的波前探测残余均方根
Fig. 1 Phase estimates RMS errors for $0.1\lambda \sim 0.5\lambda$ RMS random phase aberrations



(a) 退化焦面图

(a) Degraded focus-plane images



(b) 重建图像

(b) Corresponding reconstructed images

图 2 不同大小波前畸变下的退化焦面图和相应的重建图像

Fig. 2 Focused images degraded by different phase aberrations and reconstructed images correspondingly

前像差下均恢复出了良好的图像,图像对比度和分辨率较焦面图像均有极大提升。

4 实验与结果

为定量研究 PD 技术的探测精度,搭建了如图 3 所示光路,利用 LC-SLM 来定量施加一定大小的随机像差。透镜 L1($f=105\text{ mm}$, $\Phi=25.4\text{ mm}$)将光纤芯中出射的光束进行准直,准直光通过单色片(透过波长为 532 nm)和分束器后照射在 LC-SLM 上,被 LC-SLM 所施加的随机像差调制后,再经过成像透镜 L2($f=300\text{ mm}$, $\Phi=50.8\text{ mm}$),在 CCD 上接收到退化的焦面图像和离焦图像。本文通过移动 CCD 的方式来获得相应的离焦图像。

波面探测结果如图 4 所示,PD 技术所恢复结果(图 b)与 LC-SLM 所施加畸变的面形(图 a)基本一致,其中 LC-SLM 所施加随机波前的 RMS 为 0.306λ ,残余误差(图 c)的 RMS 为 0.091λ ,残差波面整体趋于零,边缘部分略有起伏。造成实验误差的因素有多种:实验光路自身存在一定的系统像差、实验周围环境扰动、LC-SLM 自身面形不平整以及 LC-SLM 波前重构误差等因素可对整体面形探测产生一定偏差;光瞳对准产生的偏差可对探测波前的边缘产生较大影响。如图(c)可见,造成残差波前的边缘略有起伏的原因可能是光瞳对准略有偏差。适当忽略探测波前边缘部分由于光瞳对准偏差造成的误差,得到探测波前内部的探测误差的 RMS 为 0.056λ 。实验共采集五组被不同大小的随机像差所退化的模糊焦面图,如图 5

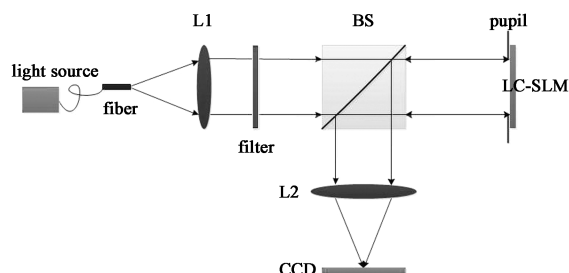
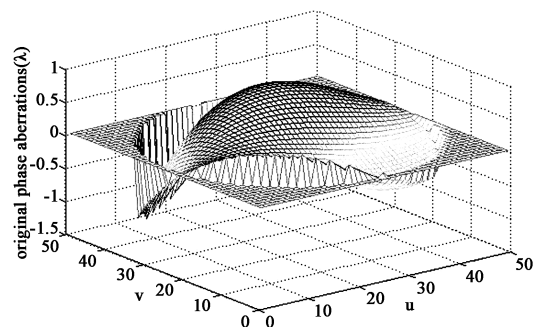


图3 实验光路示意图

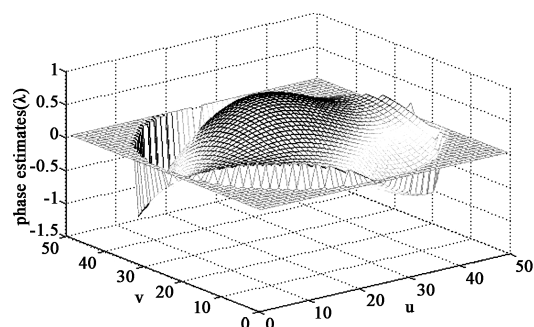
Fig.3 Optical layout of proposed experiments

(a)所示,其对应的复原图像如图(b)所示。从恢复结果可以看出,光纤芯边缘锐利,光纤芯缝隙清晰可见,在分辨率与对比度上较焦面图有较大提升。



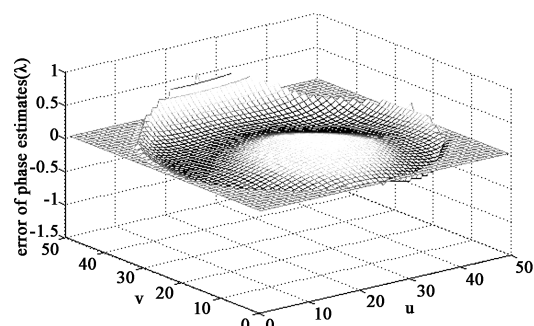
(a) LC-SLM 所施加的波前像差

(a) Phase aberration generated by LC-SLM



(b) PD 技术探测结果

(b) Phase estimates results

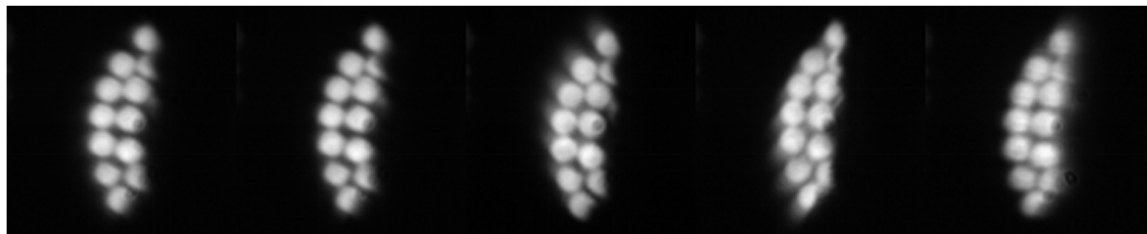


(c) 波前探测误差

(c) Phase estimates error

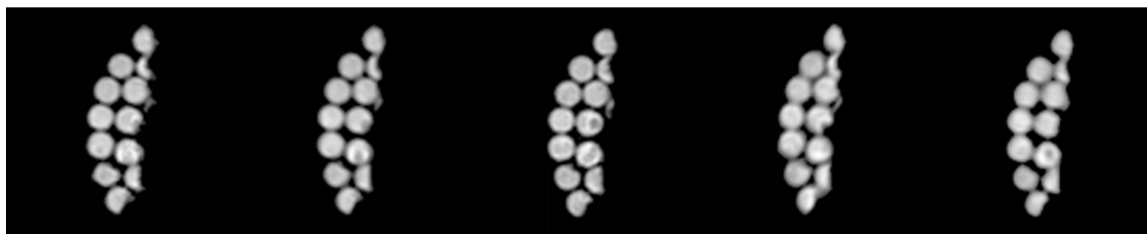
图4 LC-SLM施加的原始波前,PD技术的波前探测结果以及波前探测的残余误差

Fig.4 Original phase aberration generated by LC-SLM, phase estimates results and phase estimates error



(a)退化焦面图

(a) Degraded focus-plane images



(b)相应的重建图像

(b) Corresponding reconstructed images

图 5 实验采集的退化焦面图和其相应重建图像

Fig.5 Focus-plane images recorded by CCD and corresponding reconstructed images

5 结 论

本文通过数值模拟和实验探究了 PD 技术对随机波前的探测精度以及图像复原效果,搭建了基于液晶空间光调制器的实验系统,利用 LC-SLM 定量施加随机像差,获得了良好的实验结

果。PD 技术波前探测精度在数值模拟上达到 $10^{-5}\lambda$ 水平,在实验结果中波前残余误差为 0.09λ 。本文对实验中可能造成波前探测误差的诸多因素进行了分析,数值模拟和实验结果较为一致。阐明了 PD 技术对探测波前畸变和恢复图像的准确性,同时为该技术应用与液晶系统积累了技术基础。

参 考 文 献:

- [1] GONSALVES R A, CHIDLAW R. Wavefront sensing by phase retrieval [C]// *Proceedings of SPIE 0207, Applications of Digital Image Processing III*, San Diego: SPIE, 1979: 32-39.
- [2] GONSALVES R A. Phase retrieval and diversity in adaptive optics [J]. *Opt. Eng.*, 1982, 21(5): 215829.
- [3] KENDRICK R L, ACTON D S, DUNCAN A L. Phase-diversity wave-front sensor for imaging systems [J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(27): 6533-6546.
- [4] ELLERBROEK B L, THELEN B J, LEE D J, *et al.* Comparison of Shack-Hartmann wavefront sensing and phase-diverse phase retrieval [C]// *Proceedings of SPIE 3126, Adaptive Optics and Applications*, San Diego, CA, United States: SPIE, 1997: 307-322.
- [5] SELDIN J H, PAXMAN R G. Phase-diverse speckle reconstruction of solar data [C]// *Proceedings of SPIE 2302, Image Reconstruction and Restoration*, San Diego, CA: SPIE, 1994: 268-280.
- [6] LÖFDAHL M G, SCHARMER G B. Application of phase-diversity to solar images [C]// *Proceedings of SPIE 2302, Image Reconstruction and Restoration*, San Diego, CA: SPIE, 1994: 254-267.

- [7] 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 [C]//*Proceedings of SPIE 3356, Space Telescopes and Instruments V*. Kona, HI: SPIE, 1998: 1190-1201.
- [8] DOLNE J J. Evaluation of the phase diversity algorithm for noise statistics error and diversity function combination [C]//*Proceedings of SPIE 6307, Unconventional Imaging II*. San Diego, California, USA: SPIE, 2006: 8-16.
- [9] 胡立发.用平行向列液晶空间光调制器制作相息图的研究[J].液晶与显示,2005,20(2):93-98.
HU L F. Kinoform using parallel-aligned nematic liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(2): 93-98. (in Chinese)
- [10] 宣丽,李大禹,刘永刚.液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望[J].液晶与显示,2015,30(1):1-9.
XUAN L, LI D Y, LIU Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 1-9. (in Chinese)
- [11] DOLNE J J, SCHALL H B. Cramer-Rao bound and phase-diversity blind deconvolution performance versus polynomials [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(29): 6220-6227.
- [12] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [13] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, 66(3): 207-211.
- [14] PAXMAN R G, SCHULZ T J, FIENUP J R. Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, 9(7): 1072-1085.
- [15] LEE D J, ROGGEMANN M C, WELSH B M. Cramér-Rao analysis of phase-diverse wave-front sensing [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, 16(5): 1005-1015.
- [16] DOLNE J J, TANSEY R J, BLACK K A, *et al.* Practical issues in wave-front sensing by use of phase diversity [J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(26): 5284-5289.

作者简介:李小平(1975—),女,河南济源人,副教授,主要研究液晶自适应光学和光学设计。E-mail: humengjia@126.com