

利用相位差异技术校准非共光路静态像差

汪宗洋 王 斌 吴元昊 孟浩然 刘欣悦 林旭东

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 提出了一种用相位差异(PD)技术对自适应光学(AO)系统的非共光路静态像差进行校准的方法。相位差异技术通过采集焦面和离焦面的单帧或多帧短曝光图像来估算波前相位畸变,同时对目标图像进行恢复。在闭环工作条件下,自适应光学系统利用相位差异算法在线检测成像光路的静态像差,并将得到的像差系数转化为变形镜的初始化面形,从而补偿非共光路的静态像差。实验结果表明,校准后的成像质量显著提高,目标半峰全宽降低了约14%,系统残差降低了约72%。成像光路在线检测得到的系统残差与闭环回路实测残差的水平趋于一致,证实了相位差异技术应用于光学检测的能力。该方法具有在无需改变原有自适应光路以及高信噪比条件下便可精确解算系统像差的优点,是大口径光电成像系统较为理想的光学检测技术之一。

关键词 自适应光学;几何光学;波前探测;相位差异;静态像差

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0701007

Calibration of Non-Common Path Static Aberrations by Using Phase Diversity Technology

Wang Zongyang Wang Bin Wu Yuanhao Meng Haoran Liu Xinyue Lin Xudong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract A method of calibrating static aberrations in non-common optical path of adaptive optics (AO) system by using phase diversity (PD) techniques is proposed. PD techniques are used to estimate the distorted wavefront phase and recover the object imaging by exploiting the collection of two or more short-exposure optical images, one of which is formed by focusing and others by defocusing. In order to compensate the non-common path error, PD algorithm is used to detect the static aberrations of the imaging optical path online when the AO system is working in close-loop state. Then the result is transformed to the deformable mirror's initial surface. Experimental results indicate that the image quality is improved obviously after calibration. The value of full-width at half-maximum within the object is reduced by about 14% and the remainder error of the system is reduced by about 72%. The remainder error detected in the imaging optical path is consistent with that of the AO close-loop path, and the ability of the PD techniques is verified in optical detection. The proposed method does not need to change the AO optical path and can accurately figure out the system static aberrations in high signal-to-noise ratio (SNR) conditions, so it can be used as a good mean to detect optical path error in the large aperture telescope.

Key words adaptive optics; geometric optics; wavefront sensing; phase diversity; static aberration

OCIS codes 110.1080; 010.7350; 120.5050; 220.1000

1 引言

自适应光学(AO)系统能够实时测量光波受大气湍流扰动引起的波前畸变,并将其转换成相应的控制信号后加到波前校正器上,使波前畸变得到实

时补偿,进而使地基大口径光学望远镜能够实现接近衍射极限的目标成像^[1]。但是由于AO系统波前探测器和成像探测器非共光路部分所用光学器件存在差异,在装调误差以及温度和重力变化等因素的

收稿日期: 2011-12-09; **收到修改稿日期**: 2012-03-21

基金项目: 国家863计划(2009AA8080603)资助课题。

作者简介: 汪宗洋(1986—),男,研究实习员,主要从事大口径成像系统图像恢复和波前检测等方面的研究。

E-mail: wzy1986@mail.ustc.edu.cn

影响下,系统静态像差不可避免。AO 系统在实际工作过程中无法测量和补偿成像光路的静态像差,且波前探测器和波前校正器的闭环控制回路在校正该光路波前畸变时,会将自身光路的静态像差附加到成像光路,导致像差的不确定性,必须予以校准^[2,3]。

相位差异(PD)法是一种有效的克服波前相位畸变的图像复原方法,其核心思想是在传统成像焦面的基础上增加离焦通道,并在已知离焦量等先验信息的前提下,利用同时采集到的一帧或多帧双通道短曝光图像解算出波前畸变相位和目标清晰像。Paxman 等^[4,5]将 PD 理论进一步完善,给出了高斯噪声和泊松噪声情况下的多通道多帧 PD 数学模型,提高了 PD 在噪声情况下的估计精度。Blanc 等^[6~8]提出了 PD 边缘估计理论,并将 PD 技术成功应用于法国 NAOS-CONICA 天文望远镜图像恢复和 AO 系统静态像差标定,通过仿真和机上试验总结出了一套有效的 PD 标定 AO 系统静态像差的方法。PD 光学系统结构简单,同时适用于点源目标和随机扩展目标,能够精确解算大气动态像差和系统静态像差,其应用已经从图像复原领域扩展到了光学检测领域。

本文提出一种用 PD 技术对米级口径 AO 望远镜非共光路像差进行在线校准的方法。通过在光路第一像面标定靶标处安置光纤光源作为观测目标,在哈特曼波前探测器与变形镜闭环回路工作条件下,实时检测和补偿第一像面到波前探测器光路的静态像差。

2 PD 基本原理

图 1 所示为 PD 技术原理图。离焦通道在原有光路基础上加入分光片并引入已知离焦量,对于静态像差测量问题,可以通过调焦机构前后平移相机,非同时采集多通道图像^[9,10]。PD 技术可以看作是已知受扰动图像求解目标和波前相位的反演问

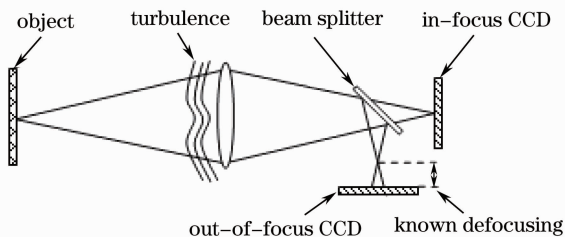


图 1 PD 原理示意图

Fig. 1 Schematic principle of PD

题^[11~13]。多通道的使用改善了反演问题的病态性^[14],多帧短曝光图像的使用提高了恢复目标的信噪比^[15,16]。

2.1 成像系统

大气和望远镜近似组成线性空间不变系统。在非相干照明下,高斯噪声模型的成像公式为^[1]

$$d(x) = o(x) * s(x) + n(x), \quad (1)$$

式中 $d(x)$ 为 CCD 上采集到的实际目标图像, $o(x)$ 为目标的理想图像, $s(x)$ 为点扩展函数, $n(x)$ 为高斯噪声, x 为像面坐标。

近场条件下,点扩展函数表示为^[1]

$$s(x) = |\mathcal{F}^{-1}\{P(v)\exp[i\phi(v)]\}|^2, \quad (2)$$

式中 \mathcal{F}^{-1} 为傅里叶逆变换, v 为光瞳面坐标, $P(v)$ 为光瞳函数。 ϕ 为波前相位。 ϕ 可以分解成一组泽尼克多项式的和,即

$$\phi(v) = \theta(v) + \sum_{m=4}^M \alpha_m Z_m(v), \quad (3)$$

式中 α_m 为第 m 项多项式系数, Z_m 为第 m 项泽尼克多项式基底, θ 为已知的固定离焦相位。

2.2 评价函数

在贝叶斯概率模型条件下,PD 评价函数式可以表示成联合最大后验估计(JMAP)^[17],即

$$(\hat{o}, \hat{\alpha})_{\text{JMAP}} = \underset{o, \alpha}{\operatorname{argmax}} \prod_{c=1}^C P(d_c | o, \alpha; \theta) P(o; \theta) P(\alpha), \quad (4)$$

式中 $C = 2$ 为通道数量; θ 为正则化调整参数,其作用是抑制噪声的放大并提高算法收敛效率。由于非共光路静态像差为低阶像差,关于 α 的先验概率密度函数 $P(\alpha)$ 可以不予考虑。假设噪声是方差为 δ^2 的静态高斯白噪声。JMAP 估计式在频域下表示为^[18~21]

$$J(o, \alpha) = \frac{1}{N^2} \sum_u \sum_{c=1}^C \left[\frac{|D_c(u) - O \cdot S_c(u)|^2}{\sigma^2} + \frac{|O(u)|^2}{S_o(u)} \right], \quad (5)$$

式中 S_o 为目标的功率谱密度, D_c, S_c, O 分别是(1)式中 d, o, s 函数的傅里叶变换, N^2 为像素总数, u 为像面频域坐标,由于实验过程中焦面和离焦图像信噪比较高,目标点光源接近狄拉克函数,因此该值可以简化为定值^[5,6],即 $\sigma^2/S_o(u) = \gamma$, 此处取值为 10^{-5} ^[6]。

将目标估计作为独立中间过程与相位估计分离,可得到与目标无关的评价函数^[4,5]。其中目标估计式是推导评价函数的中间过程,具有维纳滤波形式,可以有效地降低噪声影响^[20,21]。评价函数及目标估计式可表示为

$$J(\alpha) = \frac{1}{N^2} \sum_u \left[\sum_{c=1}^C |D_c(u)|^2 - \frac{\left| \sum_{c=1}^C D_c S_c^*(u) \right|^2}{\gamma + \sum_{c=1}^C |S_c(u)|^2} \right], \quad (6)$$

$$O = \frac{\sum_{c=1}^C D_c S_c^*}{\gamma + \sum_{c=1}^C |S_c|^2}. \quad (7)$$

评价函数确定后,PD算法就可以描述为非线性优化求极值的过程。本文采用适合大规模变量寻优的简单约束有限内存拟牛顿法(L-BFGS-B)^[22,23],编写了基于GPU服务器平台的优化软件,经过长期测试验证,该算法具有较高的收敛效率。

3 非共光路像差校准

在非共光路像差校准过程中,望远镜处于非观测状态。AO实验系统结构如图2所示,在第一像面靶标处安置直径为1 mm的光纤光源作为观测目标。哈特曼波前探测器实时检测第一像面到波前探测器光路的波前信息,通过波前处理器解算波前信息并转换为变形镜的控制信号,实时补偿该光路的静态像差。哈特曼波前探测器和变形镜的闭环控制回路在校正该光路波前畸变时,会将自身光路的静态像差附加到成像光路,为成像光路静态像差引入不确定性。

第一像面到成像相机光路原有的静态像差和校

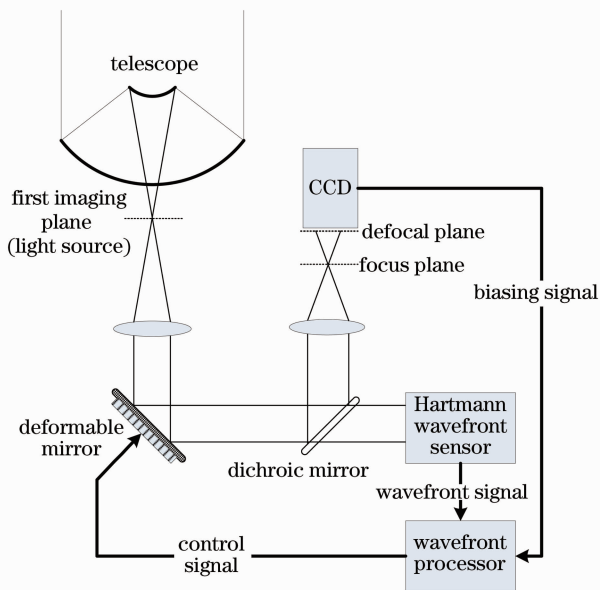


图2 AO系统结构简图

Fig. 2 Structure of AO system

正回路附加的静态像差,可通过PD算法在线精确检测,避免成像质量下降。由于主要检测系统静态像差,利用PD理论时,焦面和离焦面的图像采集可以放宽为异步采集。离焦图像通过将电控调焦平台移动指定距离后得到,离焦量可以事先设定,移动的误差为微米级,可以忽略不计。在自适应系统闭环工作的同时,成像相机光路可以异步采集焦面和离焦图像,再通过PD算法在线解算出像差泽尼克系数。

为进一步验证PD算法检测静态像差的能力,将得到的像差系数转化为变形镜的初始化面形,补偿非共光路的静态像差;并再次采集系统焦面和离焦图像,利用PD算法解算校准后成像相机光路的系统静态像差,分析和对比校准前后的系统残差。

4 实验结果与分析

哈特曼波前探测器与变形镜闭环工作时,测得的第一像面到波前探测器的波前相位如图3(b)所示。其中波前相位的均方根(RMS)值为0.017λ,峰谷值(PV)为0.122λ,λ为波长。自适应闭环光路静态像差校正效果显著。但是对于成像相机焦面图像[如图4(a)所示],光纤光源点像有明显虚边,半峰全宽(FWHM)值约为8.897 pixel。校准后的成像相机焦面图像如图4(b)所示。

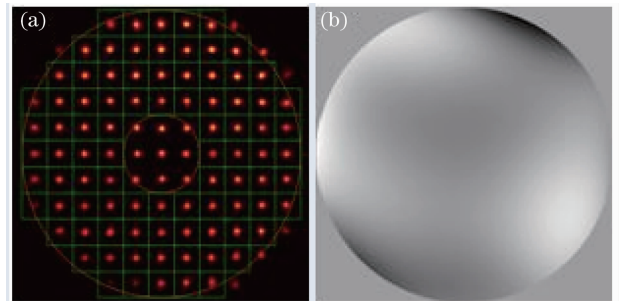


图3 哈特曼传感器采集的数据。(a)点列图;
(b)波前相位

Fig. 3 Data collected by Hartmann sensor. (a) Array image; (b) wavefront phase

成像相机光路采集焦面和离焦图像,选取的离焦量为13 mm,固定离焦相位PV值约为1.5λ。PD解算出的波前相位如图5(a)所示,RMS值为0.268λ,PV值为1.640λ,相比自适应闭环光路系统残差增加了一个数量级;图5(b)为校准后PD解算出的波前相位图。表1列出了泽尼克多项式第5~18项的系数值,校准前的第一组数据中,第6项像散、第8项彗差以及第11项球差数值较大。这些系

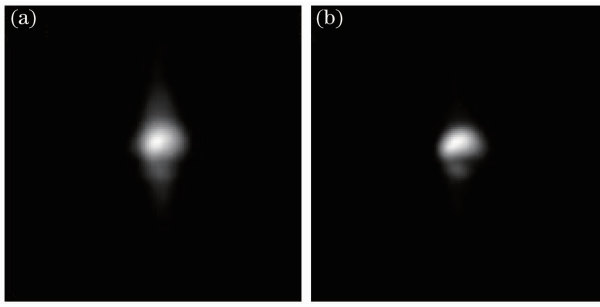


图 4 成像相机焦面图像。(a)校准前;(b)校准后
Fig. 4 Images collected by in-focus CCD. (a) Before calibration; (b) after calibration

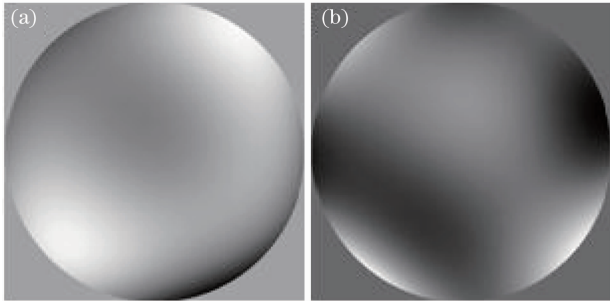


图 5 PD 解算出的波前相位。(a)校准前;(b)校准后
Fig. 5 Wavefront phase obtained by PD. (a) Before calibration; (b) after calibration

数值制约着 AO 系统的成像质量。

为了补偿成像相机光路的静态像差,将表 1 第一组数据中数值较大的三项作为偏置系数反馈给波前处理器,并转换成变形镜的初始化面形。校准后的 FWHM 值降为 7.644 pixel,成像质量得到明显改善,光纤光源点像轮廓鲜明,与以往实验中观测到的同一光纤光源点像形状一致。

表 1 PD 解算出的像差泽尼克系数

Table 1 Zernike coefficients obtained by PD

Zernike coefficient	Before calibration	After calibration
Z_5	0.020	-0.010
Z_6	0.225	-0.030
Z_7	-0.019	-0.012
Z_8	0.089	-0.035
Z_9	0.006	0.006
Z_{10}	-0.042	-0.018
Z_{11}	-0.091	0.017
Z_{12}	0.001	0.001
Z_{13}	0.002	0.008
Z_{14}	-0.033	-0.039
Z_{15}	-0.035	-0.018
Z_{16}	-0.007	0.003
Z_{17}	0.001	0.004
Z_{18}	0.001	0.007

进一步采集校准后成像相机的焦面和离焦图像,并利用 PD 解算校准后的成像光路系统残差,RMS 值减小为 0.075λ ,PV 值减小到 0.473λ ,与自适应闭环光路测得的系统残差水平趋于一致。表 1 中校准后的第二组数据显示,加偏置系数校准后原先系数值较大的三项都得到了很好的抑制,且其他各项系数值并未显著改变,非共光路静态像差得到了很好的校准。

5 结 论

利用 PD 技术在线校准 AO 系统非共光路像差,显著地提高了 AO 系统的成像质量。在自适应系统闭环工作条件下,利用成像光路采集到的焦面和离焦图像在线解算出成像光路原有像差和附加的非共光路像差,并将 PD 解算得到的波前相位作为变形镜的初始化面形,获得校准后的清晰目标图像。实验结果表明,非共光路静态像差校准后目标 FWHM 值降低了约 14%,系统残差降低了约 72%,并且自适应闭环光路与成像光路系统残差水平趋于一致。实验结果证实了 PD 算法精确解算波前相位的能力和应用于光学检测领域的可行性。该方法无需改动原有 AO 光路,离焦图像通过相机调焦机构就能获得,在每次观测任务前都可以在线校准非共光路静态像差,可作为大口径 AO 望远镜的一项非共光路像差校准技术。

参 考 文 献

- 1 M. C. Roggemann, B. M. Welsh. *Imaging Through Turbulence* [M]. Washington: CRC Press, 1996. 169~235
- 2 Jiang Pengzhi, Ma Haotong, Zou Yongchao *et al.*. Study of aberration correction in light path of adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1214002
蒋鹏志, 马浩统, 邹永超 等. 自适应光学系统内光路的像差校正研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1214002
- 3 Shao Jing, Ma Dongmei, Nie Zhenwei. Accurate test of optical wavefront for optical imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, **19**(11): 2583~2588
邵 晶, 马冬梅, 聂真威. 光学成像系统光学波前的高精度测试[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(11): 2583~2588
- 4 R. G. Paxman, T. J. Schulz, J. R. Fienup. Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(7): 1072~1085
- 5 R. G. Paxman, J. H. Seledin, M. G. Lfödahl *et al.*. Evaluation of phase-diversity techniques for solar-image restoration [J]. *Astrophysical Journal*, 1996, **466**(2): 1087~1099
- 6 A. Blanc, L. M. Mugnier, J. Idier. Marginal estimation of aberrations and image restoration by use of phase diversity[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(6): 1035~1046
- 7 A. Blanc, T. Fusco, M. Hartung *et al.*. Calibration of NAOS and CONICA static aberrations. Application of the phase diversity technique [J]. *Astron. Astrophys.*, 2003, **399**(1): 373~383

- 8 M. Hartung, A. Blanc, T. Fucso *et al.*. Calibration of CONICA static aberrations by phase diversity technique[C]. *SPIE*, 2003, **4841**: 295~306
- 9 Wu Yuanhao, Wang Bin, Zhao Jinyu *et al.*. Restoration of broadband white light image using phase diversity technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, **18**(8): 1849~1854
吴元昊, 王 斌, 赵金宇 等. 利用相位差异技术恢复宽带白光图像[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(8): 1849~1854
- 10 Wang Zongyang, Wang Jianli, Wang Bin *et al.*. Image restoration based on phase diversity [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(12): 25~29
汪宗洋, 王建立, 王 斌 等. 基于相位差异的图像复原方法[J]. 光电工程, 2010, **37**(12): 25~29
- 11 Li Fei, Rao Changhui. Study on phase diversity wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0804001
李 斐, 饶长辉. 高精度相位差波前探测器的数值仿真和实验研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0804001
- 12 Yang Huizhen, Gong Chenglong. Phase retrieval for a kind of wavefront sensor based on pupil phase diversity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112002
杨慧珍, 龚成龙. 一种基于瞳面相位差的波前传感器相位恢复[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1112002
- 13 Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1015~1019
梁士通, 杨建峰, 薛 彬. 基于遗传算法的改进相位差法波前误差传感技术研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1015~1019
- 14 Zhao Jinyu, Chen Zhanfang, Wang Bin *et al.*. Parallelity improvement of object function for phase diversity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, **20**(2): 432~438
赵金宇, 陈占芳, 王 斌 等. 相位差异法目标函数的并行化改造[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(2): 432~438
- 15 Wang Bin, Wang Zongyang, Wang Jianli *et al.*. Phase-diverse speckle imaging with two cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, **19**(6): 1384~1390
王 斌, 汪宗洋, 王建立 等. 双相机相位差异散斑成像技术[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(6): 1384~1390
- 16 Wang Jianli, Wang Zongyang, Wang Bin *et al.*. Image restoration by phase-diverse speckle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, **19**(5): 1165~1170
王建立, 汪宗洋, 王 斌 等. 相位差异散斑法图像复原技术[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(5): 1165~1170
- 17 B. J. Thelen, R. G. Paxman, D. A. Carrara *et al.*. Maximum *a posteriori* estimation of fixed aberrations, dynamic aberrations, and the object from phase-diverse speckle data [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(5): 1759~1768
- 18 C. R. Vogel. Computational Methods for Inverse Problems[M]. Philadelphia: SIAM Press, 2002
- 19 C. R. Vogel, T. Chan, R. Plemmons. Fast algorithms for phase diversity-based blind deconvolution [C]. *SPIE*, 1998, **3353**: 994~1005
- 20 M. G. Lfödahl, T. E. Berger, R. S. Shine *et al.*. Preparation of a dual wavelength sequence of high-resolution solar photospheric images using phase diversity [J]. *Astrophysical Journal*, 1998, **495**(2): 965~972
- 21 M. G. Lfödahl, G. B. Scharmer. Wavefront sensing and image restoration from focused and defocused solar images [J]. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1994, **107**: 243~264
- 22 R. H. Byrd, P. Lu, J. Nocedal *et al.*. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization [R]. Illinois: EECS Department, 1994
- 23 C. Zhu, R. H. Byrd, P. Lu *et al.*. LBFGS-B: Fortran Subroutines for Large-Scale Bound Constrained Optimization [R]. Illinois: EECS Department, 1994

栏目编辑: 王晓球