

文章编号 1004-924X(2013)07-1683-10

利用多通道相位差异波前探测法检测自适应光学系统非共光路像差

王 斌^{1,2*}, 汪宗洋¹, 吴元昊¹, 马鑫雪^{1,3}, 卫沛锋¹, 王建立¹, 吕 杰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. 东北师范大学 数学与统计学院, 吉林 长春 130000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 吉林市松花江中学, 吉林 吉林 132000)

摘要:针对自适应光学系统非共光路像差检测中遇到的若干实际问题,设计了基于多通道相位差异法的波前探测器,用于在不对光路进行任何改变的前提下定量测量自适应光学系统的第一像面到成像相机之间的像差。与前人的双通道相位差异波前探测器相比,该方法对波前具有更强的约束力,从而能够对目标光源的形状容忍力更强,理论上对波前求解的精度更高。将该方法应用于 1.23 m 口径自适应光学系统的非共光路的静态像差测量,取得了良好的效果,为光路装调带来了极大的方便。将测得的像差直接用于变形镜的初始偏置,大大提高了成像质量。

关键词:相位差异;波前探测;自适应光学系统;非共光路检测

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1683

Calibration of no-common path aberration in AO system using multi-channel phase-diversity wave-front sensing

WANG Bin^{1,2*}, WANG Zong-yang¹, WU Yuan-hao¹, MA Xin-xue^{1,3}, WEI Pei-feng¹,
WANG Jian-li¹, LÜ Jie⁴

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

2. *School of Mathematics and Statistics, Northeast Normal University, Changchun 130000, China;*

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

4. *Song Huajian Middle School of Jilin, Jinlin 132000, China)*

* *Corresponding author, E-mail:175969722@qq.com*

Abstract: A multi-channel Phase Diversity(PD) processing method is designed aiming at some practical problems of the no-common path static aberration calibration in an Adaptive Optics (AO) system. The method could be used to measure the aberration between the first image plane and the imaging CCD focused plane without changing the optical path. Compared with a traditional double-channel PD detector, the multi-channel PD method has stronger restriction to the calculation of wave front. So it

收稿日期:2011-12-11;修订日期:2012-02-16.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA8080603)

has more endurance for the form of object source, much accuracy for wavefront calculation and more measuring ranges. The method has been used to measure the no-common path aberration of AO system in a 1.23 m telescope, and a good measuring result is obtained. The obtained result is taken as the offset of a Deformable Mirror(DM) to redress the static aberration, and the image resolution becomes much better.

Key words: phase-diversity(PD); wave-front aberration detection; adaptive optical system; calibration of no-common path aberration

1 引言

自适应光学(Adaptive Optics, AO)系统的光路在变形镜之后有一块分光镜,它把光分为两路,一路进入成像光路最终到达成像相机,一路进入哈特曼波前探测器。分光镜到成像相机这部分的光学系统静态像差叫做非共光路像差,它并不能由身处另一路的哈特曼探测器所探测。如果非共光路像差已知,那么把它加入到变形镜上作为初始面形就会消除非共光路像差,提高光学系统整体的成像质量,所以如何在不改变光路前提下比较精确地测量出非共光路像差是 AO 系统装调的重要问题。

1979 年, Gonsalves 第一次提出相位差异(Phase-Diversity, PD)技术,其方法是在成像系统的焦面和离焦面上同时采集两幅图像,在已知离焦量的前提下解算出波前相位分布并恢复出目标^[1]。该技术不但简化了波前探测器光路的复杂度,也使系统能够对扩展目标进行波前探测,摆脱了多数波前探测器对点目标的依赖^[2]。Paxman 等将 PD 理论进一步完善^[3-5],给出了多帧 PD 的高斯噪声和泊松噪声的数学模型,大大提高了 PD 在有噪声时的估计精度。Vogel 等利用反演问题相关理论,提出了快速数值解法^[6-7]。Löfdahl 等已经将 PD 理论成功地应用于太阳观测领域,获得了高分辨率的太阳表面组织图像^[8-9]。在光学检测领域,PD 能够检测光学系统的像差,装调误差,镜面平整度等参数,在没有合适的平行光管条件下进行光学检测^[2]。信息光学领域著名专家 Fienup 的学生 Bolcar 把 PD 理论引入到合成孔径及拼接镜的检测中^[10]。Löfdahl 等人把在 PD 基础上发展起来的 PDPR 用于 Keck 望远镜 AO 系统的非共光路像差标定^[11]。Mugnier 和 Blanc 等提出了 PD 边缘估计理论,将 PD 技术成功应用

于法国 NAOS-CONICA 天文望远镜的图像恢复和 AO 系统静态像差标定^[12-13],并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。

近几年来,国内针对 PD 也开展了大量的研究。北京理工大学光电学院和中科院西安光机所使用 PD 检测空间相机的光学系统^[14-15],进行了大量仿真实验并提出了一种结合多种检测方式来提高检测量程的综合矫正法。北京理工大学韩杏子等使用巴特沃思低通滤波器对采集图像进行预处理,提高了 PD 算法在高斯噪声情况下的收敛精度^[16]。中科院成都光电所在基于 PD 的波前检测方面和基于 PD 的图像恢复上都做了大量的工作,针对点目标的波前探测问题进行了室内光路实验,该实验验证了 PD 对各项低阶像差和随机像差的校正能力^[17],并且利用云南 1.2 米望远镜对单星进行了基于 PD 的图像恢复,取得了良好的效果;同时,他们对 PD 系统本身的误差源进行了分析并给出了初步的解决方法^[18-19]。中科院云南天文台也分析了离焦量误差对 PD 解算的影响,并提出了一种利用晶振性质分光的 PD 装置^[20]。

本文针对 1.23 米口径望远镜的自适应光学系统装调过程中定量标定非共光路像差时所遇到的若干实际问题,提出了一种多通道相位差异波前探测器。与前人的双通道相位差异波前探测器相比,该探测器对波前的约束更强,因此对目标光源形状的容忍力更强,理论上对波前求解的精度更高。最后,把测得的非共光路像差作为变形镜的初始面形,大大改善了望远镜的成像质量。

2 基本原理

图像恢复过程是一个病态过程,而波前解算也是一个病态过程,这是因为在一个有限的精度

下,一个点扩散函数可以映射到多个波前。如图 1 所示,在搜索算法给定的有限精度下,反演出的波前是联合解集中的某一个点,这个点与真实的波前会有差异。

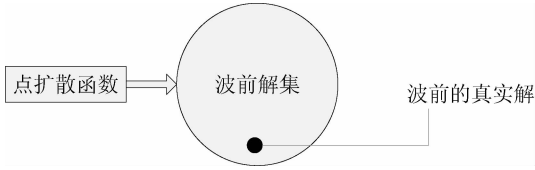


图 1 由点扩散函数求解波前的病态性问题

Fig. 1 Solution of ill-problem in wave front by point spread function

与单通道以波前为未知量进行求解的盲解卷积相比,PD 用两个通道采集的图像所对应的点扩散函数来共同约束一个已知离焦量的波前,如图 2 所示。因此,PD 降低了波前解算的病态性。

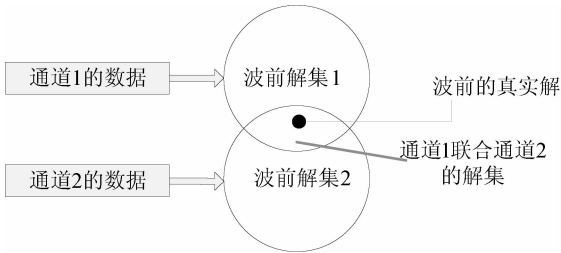


图 2 标准 PD 双通道约束波前求解

Fig. 2 Solution of wave front by double-channel constraint in traditional PD

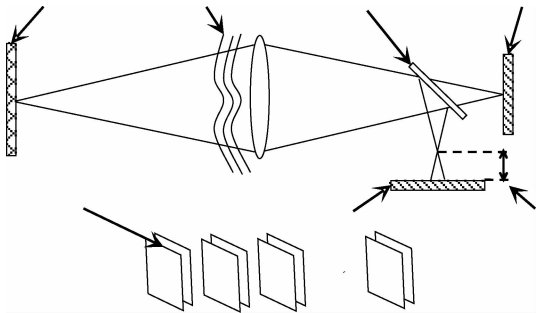


图 3 相位差异法图像采集示意图

Fig. 3 Scheme of data-collection for PD imaging

如图 3 所示,PD 系统具有焦面和离焦面两个采集通道,根据实际情况可以增加采集通道的数量。PD 图像恢复问题可以看作已知受扰信号的模值求原信号相位的反演问题,也可以看作一个自适应滤波器。多通道的使用改善了反演问题的

病态性^[21],本文的方法便是利用了这个性质。

2.1 成像系统模型

大气和望远镜近似组成线性空间不变系统。在非相干光照明下,高斯噪声模型的成像公式为^[22]:

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

式中: d 表示 CCD 上采集到的实际目标图像, f 表示目标的理想图像, s 表示点扩散函数, n 表示高斯噪声, x 表示像面坐标, $*$ 表示卷积。

近场条件下,点扩散函数表示为^[22]:

$$s(x) = |F^{-1}\{P(v)e^{i\varphi(v)}\}|^2, \quad (2)$$

其中: F^{-1} 表示傅里叶逆变换, v 表示光瞳面坐标, P 表示光瞳函数。 φ 表示波前相位,可以分解成一组泽尼克多项式的和:

$$\varphi(v) = \theta(v) + \sum_{m=1}^M \alpha_m Z_m(v), \quad (3)$$

其中: α_m 表示第 m 项多项式系数, Z_m 表示第 m 项泽尼克多项式基底, θ 表示已知的固定离焦相位。

2.2 评价函数

PD 的数学模型可以看成是一个自适应滤波器。在高斯噪声模型下,目标与多通道图像的均方差可以用作似然函数^{[3-5][23]},本文提出的多通道相位差异法的评价函数在频域表示为:

$$L(f, \alpha) = \frac{1}{2N} \sum_u \left(\sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |D_c(u) - FS_c(u)|^2 + \gamma |F(u)|^2 \right), \quad (4)$$

其中: u 表示频域坐标, C 表示使用的通道数; N 表示单幅图像的像素总数; α 表示需要求解的波前的泽尼克系数; F 为傅里叶变换, $D_c = F(d_c)$, $F = F(f)$, $S_c = F(s_c)$; $\gamma |F(u)|^2$ 为 Tikhonov 正则项^[6-7],它可以提高算法的稳定性和收敛速度, γ 表示非负的正则项系数, σ_c^{-2} 为通道 c 的噪声读出方差的倒数。

对公式(4)求关于 F 的导数,并令导数为 0 求得公式(4)关于 F 的稳定点,如公式(5)所示。将式(5)带入式(4)得到式(6),这样便可以将目标估计作为独立中间过程与相位估计分离,得到与目标无关的评价函数^[4]。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的影响。

$$F = \frac{\sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} D_c S_c^*}{\gamma + \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |S_c|^2}, \quad (5)$$

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

公式(6)是多通道之间读出噪声不一致时的评价函数。本文所述的多通道实际上是成像相机在调焦电机的带动下,在若干时刻,若干已知离焦量的离焦面上采集的图像。由此可知,各个通道的 σ_c^{-2} 是相等的,且为一常数。 σ_c^{-2} 可以通过关掉相机的快门,采集相机的本底噪声来统计得到。

评价函数确定后,波前探测及图像恢复过程就可以描述为数学最优化问题。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)^[24-25],编写了基于 C++ 的优化软件平台。经过长期测试验证,该算法具有较好的收敛效率。

3 实验设计

3.1 系统组成

此次试验基于 1.23 米口径光电望远镜的自适应光学系统,试验系统的原理如图 4 所示。从望远镜过来的光束在第一像面上汇聚,再经过准直透镜,光束变为平行光入射到 97 单元变形镜上;光束经过变形镜的整形后反射到分色镜上;光束被分色镜分为两路,一路通过成像汇聚透镜最

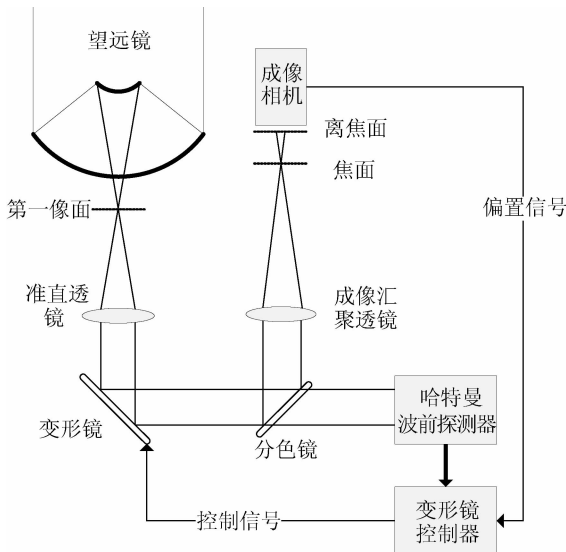


图 4 实验系统结构图

Fig. 4 Structure of experimental system

终在科学级 CCD 上成像,称为成像光路;另一路进入微透镜阵列为 11×11 的哈特曼波前传感器,称为 AO 光路;分色镜之前的光路叫做公共光路,波前传感器探测到的波前是公共光路和 AO 光路上的波前,而非最终影响成像相机图像质量的公共光路和成像光路上的波前。这个差别引起的静态像差就叫做非共路像差。实验目的就是在不改变光路的前提下定量测量出从第一像面到成像光路的焦面之间的静态像差,从而得到非共光路的像差;最后用 AO 系统对此静态像差进行预先补偿,以起到提高整体成像性能的作用。

3.2 实验步骤

(1)在如图 2 所示的第一像面放置放置一个光纤白光光源;

(2)标定变形镜,然后根据哈特曼波前探测器测得的波前来闭环控制变形镜,尽量补偿从第一像面到哈特曼波前探测器之间的像差;

(3)控制调焦电机,使成像相机移动到焦面位置,然后设置相机的曝光时间,保证光纤光源所成像的灰度值没有饱和,然后采集若干幅图像;

(4)控制调焦电机,使成像相机停留在已知的离焦面上,然后采集若干幅图像;假设用 C 个离焦通道采集的数据进行波前解算,那么要反复执行这个过程 C 次,直到数据采集完毕;

(5)关闭光纤光源,采集相机的本底,用于统计相机的读出噪声,以便于公式(5)和公式(6)的计算;

(6)把采集的图像和它们所对应的离焦量输入到所编写的 PD 计算程序中,计算得到波前及进行图像复原后的光纤光源的像;

(7)AO 系统对 PD 计算得到的静态像差进行预先补偿,也就是把 PD 得到的像差加为变形镜的偏置,这时光纤光源像的质量将会得到提高。

3.3 主要问题的分析及解决

在不改变 AO 系统光路的前提下,进行非共光路的像差检测将会遇到一系列的问题:

(1)为了提高大口径望远系统的焦距,二次成像过程是对第一像面的像进行放大的过程。假设准直透镜的焦距为 f_1 ,成像汇聚透镜的焦距为 f_2 ,系统的二次成像光路对第一像面的像的放大倍率 $K = f_2/f_1 = 4.4$ 。实验采用大恒光电的 GCI-06 直流调压光纤光源,光源的灯泡是 150 W 石英卤素灯,光纤头有两个,光纤头 A 是直径为

1 mm 的光纤束^[29], 光纤头 B 是直径为 $25\ \mu\text{m}$ 的光纤。成像相机的像元大小为 $13\ \mu\text{m}$, 如果把光纤头 A 放在第一像面, 它在成像相机上的理想像的直径为 338.5 pixel; 如果把光纤头 B 放在第一像面, 它在成像相机上的理想像的直径为 8.5 pixel。由于光纤头 A 是一个光纤束, 细节较为丰富, 对波前的载波能力强, 因此很适合与 PD 对目标波前进行解算; 但是它有一个致命的缺点: 在不改变光路的前提下, 光纤束 A 的面积过于大, 从而导致哈特曼各个子孔径的成像会粘连, 无法对波前进行准确测量。即无法完成 3.2 节中实验步骤 (2), 非共光路的像差也就不能从整个光路的像差中分离出来, 所以不能选择光纤头 A 作为目标。这里选用光纤头 B 作目标是因为它只是一根光纤, 且直径只有 $25\ \mu\text{m}$; 用它作目标, 可以使哈特曼探测器正常工作, 从而实现闭环控制变形镜以补偿从第一像面到哈特曼波前探测器之间的像差。但是, 由于光纤头 B 所成的像的细节非常少, 载波能力弱, 这会加大 PD 波前求解的病态性, 导致 PD 的波前解算精度下降及 PD 检测波前的量程变短。同时, 光纤头 B 在成像相机上的理想像的直径会占 8.5 pixel, 并非理想的点光源, 所以用光纤头 B 作为目标时, 无法使用相位恢复 (Phase Retrieval, PR) 算法。因此, 使用光纤头 B 作为目标时必须想办法改善 PD 求解波前的病态性问题。

(2) 调焦电机的平移轴与光轴不平行问题, 需考虑它会对 PD 的波前解算造成怎样的影响, 如何克服。

(3) 因为用 PD 这种逆过程解算波前的特点是解算精度与被测波前的像差大小有关, 所以被测波前越平整, 解算的精度越精确; 反之亦然。而在光路装调的初始阶段, 像差比较大, 所以 PD 测量的精度会受影响。

针对以上 3 个问题, 文中给出了相应的解决方法:

(1) 解决这个问题最直接的方法就是增加通道数量, 即测得一组在焦图像数据, 多组不同离焦量的离焦图像数据作为 PD 的输入, 这样便可以改善 PD 波前解算的病态性。如图 5 所示, 在多通道数据的共同约束下和搜索算法给定的有限精度下, 反演出的波前将更接近于真实的波前。

值得注意的是, 多通道数据最好在同一时刻

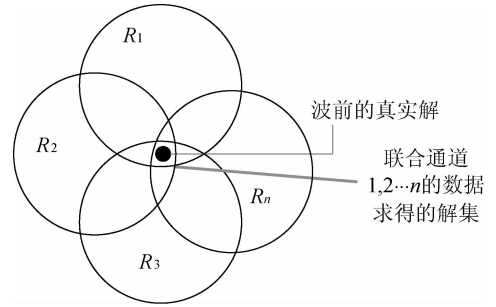


图 5 利用多通道数据对波前的解算进行约束
Fig. 5 Constraint of solution for wave front by multi-channel

采集。但由于系统只能够通过调焦电机分时采集, 这样就要求在采集过程中作为目标的光纤头的形状没有变化, 而且待测波前没有发生剧烈变化。由于待测波前是静态光学像差, 所以这个条件基本可以满足。

(2) 如图 6 所示, L_1 为调焦电机的平移轴, L_2 为光轴, L_1 与 L_2 的夹角为 α ; P_1 为 CCD 沿着调焦电机平移轴所能达到的焦平面, P_2 为距离 P_1 为 d 的离焦面; 光纤头在 P_1 上成的像的中心位置为 o_1 , 在 P_2 上成的像的中心位置为 o_2 , o_1 在 P_2 上的投影为 o'_1 ; P_3 为理想的焦平面, L_2 与 P_3 垂直, 垂足为 o_1 , P_3 与 P_1 的夹角同样为 α ; 光纤头在 P_3 上成像的宽度为 AB , 在 P_1 上的成像宽度为 CD 。

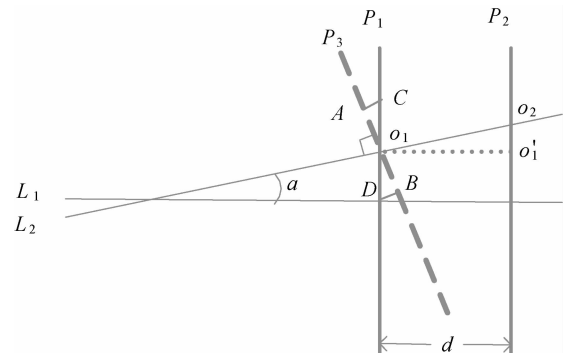


图 6 光轴与调焦电机平移轴关系图
Fig. 6 Relation between ray axis and transmission shaft of focusing motor

度为 CD 。由图 6 可知, 由于 L_1 与 L_2 不平行, 对 PD 数据采集造成的影响主要在离焦量误差和成像非等晕两个方面。

成像相机在 P_1 和 P_2 位置采集的图像的实

际离焦量为 $o_1 o_2$, 而调焦电机的移动量是 d 。如果把 d 当做离焦量输入 PD 算法, 就会有一个大小为 $o_1 o_2 - d$ 的误差。这个误差是可以克服的, 只要知道 a 的大小, 根据 $o_1 o_2 = d / \cos a$, 然后把 $o_1 o_2$ 作为离焦量输入到 PD 算法中即可。 a 的大小可以通过计算光纤头在 P_1 和 P_2 上成像的脱靶量 $o_2 o'_1$ 和调焦电机移动的距离 d 形成的三角关系获得, $a = \arctan(o_2 o'_1 / d)$ 。成像非等晕问题在本系统里可以忽略不计, 这是因为系统到达成像相机的 $F\#$ 大约为 40, 满足线性光学系统的特点, 所以在理想焦平面 P_3 上的点 A 与 B 在同一时刻的波前一致; 但是实际上 CCD 沿着调焦电机平移轴所能达到的焦平面是 P_1 , 那么光纤头的像的两端分别是点 C 和 D , 由于存在离焦像差, 在同一时刻 C 和 D 处的波前并不一致, 这个像差的大小为 $2\pi \cdot AB \cdot \tan a / (8 \cdot F\#^2 \cdot \lambda)$ 。由 $AB = 25 \times 10^{-6} \times 4.4 \text{ m}$, $F\# = 40$, $\lambda = 800 \times 10^{-9} \text{ m}$, 得到离焦像差为 $(0.0675 \cdot \tan a)\lambda$ 。假设 $a = 30'$, 离焦像差也只有 $5.89 \times 10^{-4} \lambda$, 所以由于光轴与调焦电机平移轴的不平行所造成的非等晕问题可以忽略。

(3) 假设非共光路已经调整到可以用变形镜来弥补残余残差的状态, 即非共光路像差的 RMS (Root-Mean-Square) 在 0.3λ 以内, 这个数值的选取要考虑变形镜的行程。为了让 PD 能够更精确地测得非共光路像差, 可以用如图 7 所示的方式进行操作。首先标定变形镜, 根据哈特曼波前探测器测得的波前来闭环控制变形镜, 尽量补偿从第一像面到哈特曼波前探测器之间的像差; 然后, 用多通道 PD 法检测第一相面到成像相机之间的像差, 因为这时候第一像面到哈特曼波前探测器之间的像差已经补偿完毕, 所以用 PD 测得的像

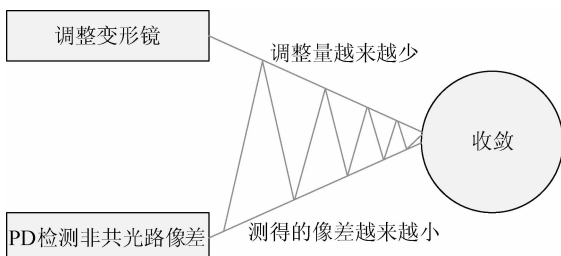


图 7 PD 检测与调整变形镜往复迭代最终收敛

Fig. 7 Iterative repetition convergence between detection by PD and adjustment by DM

差就是非共光路的像差; 接着把 PD 测得的像差作为自适应光学系统的偏置调整变形镜; 然后反复这个过程, 每一次执行之后, PD 检测到的非共光路像差会越来越小, 变形镜的调整量也会越来越小, 最终收敛。在实际应用过程中, 这个往复迭代的过程只需要 2 到 3 次调整即可。

4 实验结果与分析

实验系统到达成像相机的 $F\#$ 为 40, 准直透镜的 $F\#$ 为 9.1, 中心波长为 800 nm, 焦深约为 2.56 mm。离焦通道图像在 0~6 倍焦深中选择, 实验中选取离焦位置为 0, ± 8 , ± 13 , ± 15 mm 共 7 个通道, 所对应的离焦量分别为 0λ , $\pm 0.781\lambda$, $\pm 1.270\lambda$, $\pm 1.465\lambda$ 。相机像元尺寸为 $13 \mu\text{m}$, 曝光时间为 1 ms。光源是大恒光电的 GCI-06 直流调压光纤光源, 光源的灯泡是 150 W 石英卤素灯, 作为目标的光纤头直径为 $25 \mu\text{m}$ 。

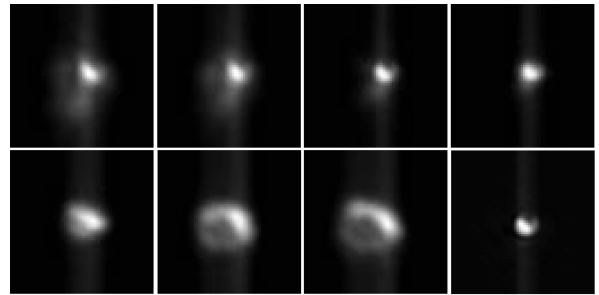


图 8 首次采集图像及恢复结果

Fig. 8 Original images and retrieval results for the first time

首先标定变形镜, 然后根据哈特曼波前探测器测得的波前来闭环控制变形镜, 尽量补偿从第一像面到哈特曼波前探测器之间的像差。这时采集的 7 个通道的图像如图 8 所示, 由左至右由上至下 7 幅图片采集时的离焦位置分别是 -15 , -13 , -8 , 0 , 8 , 13 , 15 mm; 最后一张是以前 7 幅图像作为输入恢复得到的图像。

本实验以泽尼克系数前 18 项为未知数进行搜索, 探测得到的波前如图 9 所示, $\text{RMS} = 0.153\lambda$, $\text{PV} = 0.845\lambda$ 。

然后把泽尼克各项系数加入到变形镜的控制上产生偏置, 并重复采集过程。采集来的 7 个通道的图像如图 10 所示, 图像的排列顺序同图 8。

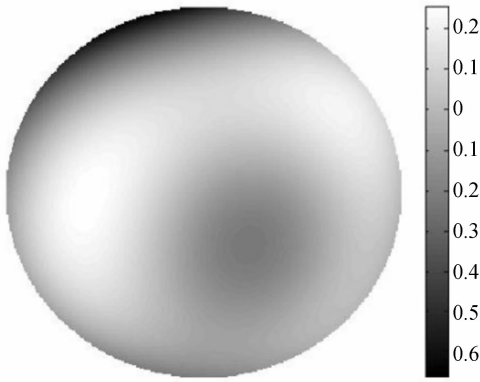


图 9 首次探测得的波前

Fig. 9 Wave front detected for the first time

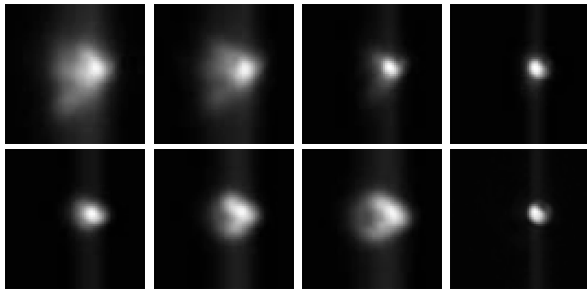


图 10 第二次采集图像及恢复结果

Fig. 10 Original images and retrieval results for the second time

探测得到的波前如图 11 所示, $RMS = 0.103\lambda, PV = 0.683\lambda$ 。

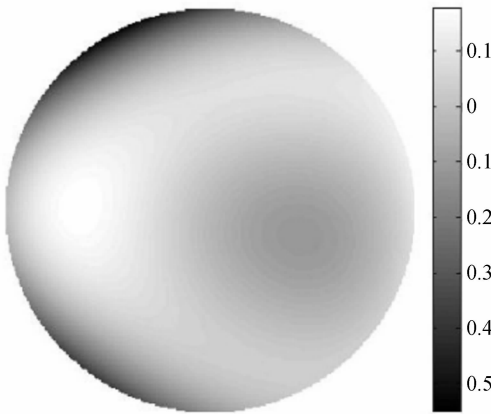


图 11 第 2 次测得的波前

Fig. 11 Wave front detected for the second time

最后再重复一次此过程,采集的焦面图像的成像质量已经达到了前两次恢复后的效果。图 12 是 3 次采集的焦面图像,可以看出经过两次变形镜的调整后焦面图像得到了很大的改善。

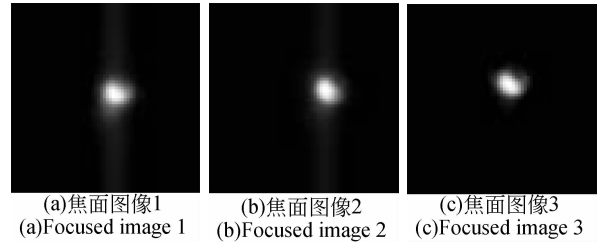


图 12 各次采集的焦面图像的对比

Fig. 12 Comparison of images captured in focus plane at each time

探测得到的波前如图 13 所示, $RMS = 0.083\lambda, PV = 0.373\lambda$ 。

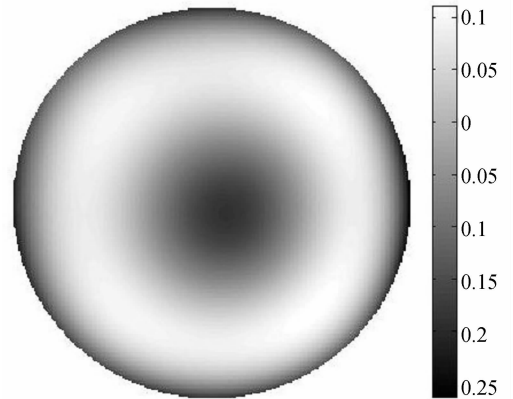


图 13 第 3 次测得的波前

Fig. 13 Wave front detected at third time

三次测量所得的结果如表 1 所示。表 1 列出了归一化后的泽尼克系数中的第 5 项到第 13 项的值。由于后面的项数值很小,所以在此不列出。由表可知,经过两次测量并把测量值加入到变形镜作为偏置,测得的非共光路像差的各项系数均有下降。

表 1 测量结果

Tab. 1 Measurement results

Zernike 项数	结果 1	结果 2	结果 3
α_5	-0.064 4	-0.019 55	0.000 618
α_6	0.070 321	0.030 564	-0.005 53
α_7	0.066 915	0.021 381	0.006 734
α_8	0.071 801	0.066 109	0.008 54
α_9	-0.009 29	-0.015 55	-0.002 54
α_{10}	-0.027 88	-0.047 81	-0.002 67
α_{11}	-0.056 09	-0.036 32	-0.080 39
α_{12}	-0.034 6	0.020 125	-0.003 53
α_{13}	0.010 978	0.003 13	0.001 387

为了说明多通道 PD 解算波前在本实验条件下优于双通道 PD,用图 8 所示第一次测量时采集的 7 个通道中离焦量分别为 0 和 15 mm 的两个通道的数据来对波前进行测量,并得到恢复的目标图像。测得的波前如图 14 所示, $RMS = 0.094\lambda$, $PV = 0.405\lambda$ 。与图 9 相比,虽然波前趋势是一致的,但是测得的波前像差值要小于图 9 所对应的波前。如表 2 所示,双通道测得的各项泽尼克系数要小于多通道,这是因为目标细节不够丰富,载波能力差,不利于 PD 的波前解算,所以造成了 PD 的量程变短和测量精度下降。

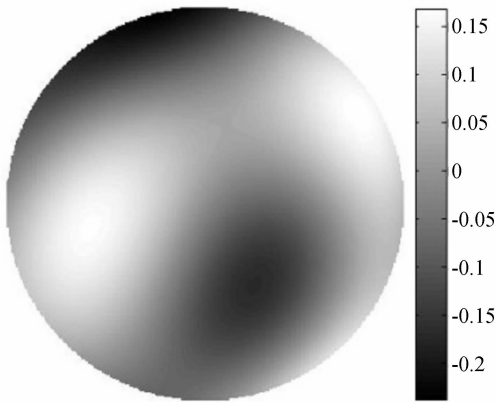


图 14 用多通道中的两个通道测量的波前

Fig. 14 Wave front detected by two channels among multi-channel

表 2 多通道与双通道测量结果对比

Tab. 2 Comparison of results between multi-channel PD and double-channel PD

Zernike 项数	多通道结果 1	双通道结果
α_5	-0.064 4	-0.043 21
α_6	0.070 321	0.051 89
α_7	0.066 915	0.034 482
α_8	0.071 801	0.044 571
α_9	-0.009 29	-0.001 2
α_{10}	-0.027 88	-0.017 74
α_{11}	-0.056 09	-0.005 8
α_{12}	-0.034 6	-0.014 9
α_{13}	0.010 978	0.017 273

参考文献:

[1] GONSALVES R A, CHILDLA W R. Wave-front sensing by phase retrieval [C]. *Application of*

通过恢复得到的图像来定性也能说明多通道 PD 解算波前在本实验条件下优于双通道 PD。如图 15 所示,左边是以图 14 为波前恢复的目标图像,右边是以图 9 为波前恢复的目标图像,可以看出多通道 PD 测得的波前恢复的图像质量明显优于双通道 PD。

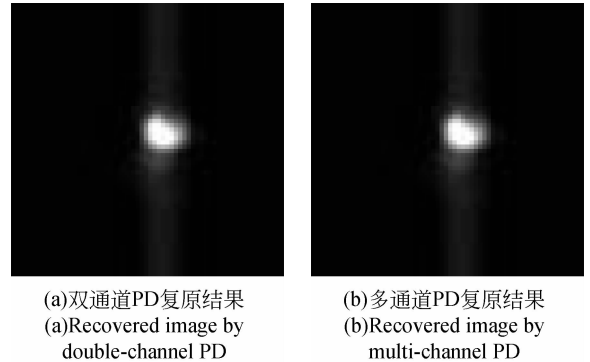


图 15 双通道 PD 与多通道 PD 的图像恢复结果

Fig. 15 Results of recovered images by double-channel PD and multi-channel PD

5 结 论

本文分析了利用 PD 进行望远镜 AO 系统非共光路像差检测及补偿所遇到的若干实际问题;提出了使用多通道数据共同约束波前求解的多通道 PD 检测法;并给出了在测量条件不理想的情况下非共光路像差的补偿方法,即像差检测与变形镜调整互相迭代最终收敛。最后,应用本文的方法进行了 1.23 m 口径望远镜 AO 系统非共光路像差的检测与补偿,取得了良好的效果。

本文实现了多通道 PD 的波前探测法,但由于多个通道是分时采集而来的,且光箱内的气流不稳定,从而造成了多个通道采集的图像所对应的波前并不完全一致,这会对波前解算的精度产生影响,下一步研究将围绕建立相关模型并对其进行分析展开。

Digital Image Processing III, 1979, 207:32-39.

[2] 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.

- WU Y H, WANG B, ZHAO J Y, *et al.*. Restoration of broadband white light image using phase diversity technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1849-1854. (in Chinese)
- [3] PAXMAN R G, SCHULZ T J, FIENUP J R. Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1992, A9: 1072-1085.
- [4] PAXMAN R G, SELDIN J H, LÖFDAHL M G, *et al.*. Evaluation of phase-diversity techniques for solar-image restoration[J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, 466: 1087-1099.
- [5] THELEN B J, PAXMAN R G, CARRARA D A, *et al.*. Maximum a posteriori estimation of fixed aberrations, dynamic aberrations, and the object from phase-diverse speckle data[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1999, A16: 1759-1768.
- [6] VOGEL C R. *Computational Methods for Inverse Problems*[M]. Philadelphia: SIAM Press, 2002.
- [7] VOGEL C R, CHAN T, PLEMMONS R. Fast algorithms for phase diversity-based blind deconvolution [J]. *SPIE*, 1998, 3353: 994-1005.
- [8] LÖFDAHL M G, BERGER T E, SHINE R S, *et al.*. Preparation of a dual wavelength sequence of high-resolution solar photospheric images using phase diversity [J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, 495: 965-972.
- [9] LÖFDAHL M G, SCHARMER G B. Wave-front sensing and image restoration from focused and defocused solar images[J]. *Astron. Astrophys*, 1994, 107: 243-264.
- [10] BOLCAR M R. *Phase Diversity for Segmented and Multi-Aperture Systems*[D]. Rochester, New York: University of Rochester, 2008.
- [11] MATS G, LOFDAHL, RICHARD L. KENDRICK, *et al.*. Duncan, a phase diversity experiment to measure piston misalignment on the segmented primary mirror of the keck II telescope[J]. *SPIE*, 1998, 3356: 1190-1201.
- [12] BLANC A, FUSCO T, HARTUNG M, *et al.*. Calibration of NAOS and CONICA static aberrations application of the phase diversity technique [J]. *Astron. Astrophys*, 2003, 399: 373-383.
- [13] BLANC A, MUGNIER L M, IDIER J. Marginal estimation of aberrations and image restoration by use of phase diversity [J]. *Opt. Soc. Am.*, 2003, 20(6):1035-1046.
- [14] 韩杏子,胡新奇,俞信. 高分辨率空间光学系统位置误差的无波前传感综合矫正[J]. *光学学报*, 2011,31(6):264-269.
- HAN X Z, HU X Q, YU X. Precisely integrated wavefront sensorless calibration of high-resolution space optical system with large position errors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011,31(6):264-269. (in Chinese)
- [15] 易红伟,李英才,马臻,等. 空间光学成像系统波像差的相位差异估计方法[J]. *光子学报*, 2009, 38(6):2676-2681.
- YI H W, LI Y C, MA ZH, *et al.*. Estimation method of wave-front error using phase diversity for space optical imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009,38(6):2676-2681. (in Chinese)
- [16] 王欣,赵达尊. 图像噪声对相位变更波前传感的影响研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(8):2142-2146.
- WANG X, ZHAO D Z. Influence of noise to phase diversity wavefront sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009,29(8):2142-2146. (in Chinese)
- [17] 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.
- LI F, RAO CH H. Study on phase diversity wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8):0804001. (in Chinese)
- [18] 李斐,饶长辉. 利用 Cramer-Rao 理论研究相位差法的最佳离焦量[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6):1492-1496.
- LI F, RAO CH H. Optimum defocus diversity in phase diversity wave-front sensing using Cramer-Rao theorem[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011,23(6):1492-1496. (in Chinese)
- [19] 李斐,饶长辉. 相位差法波前传感系统自身误差的分析及消除方法[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(3):599-605.
- LI F, RAO CH H. Analysis and elimination of errors in phase diversity wavefront sensing system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011,23(3):599-605. (in Chinese)
- [20] 于学刚,刘忠,金振宇,等. 波前相位差法探测器的设计[J]. *天文研究与技术*, 2010, 7(1):55-59.
- YU X G, LIU ZH, JIN ZH Y, *et al.*. Design of a phase diversity wavefront sensor[J]. *Astronomical Research Technology*, 2010,7(1):55-59. (in Chinese)
- [21] SELDIN J H, PAXMAN R G, Phase-diverse

speckle reconstruction of solar data[J]. *SPIE*, 1994, 2302:268-280.

[22] ROGGEMANN M C, WELSH B M. *Imaging Through Turbulence* [M]. Washington: CRC Press, 1996.

[23] 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.

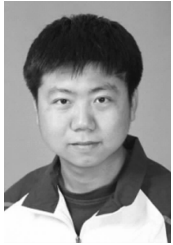
WANG B, WANG Z Y, WANG J L, *et al.*. Phase-diverse speckle imaging with two cameras

[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1384-1390. (in Chinese)

[24] BYRD R H, LU P, NOCEDAL J, *et al.*. A limited memory algorithm for bound constrained optimization[R]. *Report NAM-08, EECS Department, Northwestern University*, 1994.

[25] ZHU C, BYRD R H, LU P, *et al.*. LBFGS-B: fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization[R]. *Report NAM-11, EECS Department, Northwestern University*, 1994.

作者简介:



王斌(1980—),男,吉林省吉林市人,博士研究生,助理研究员,2003年于长春光机学院(现长春理工大学)获得学士学位,2006年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事信息光学、统计光学、光学检测、数值分析、数学最优化、图像恢复以及计算成像的工作。E-mail: eatingbeen@hotmail.com



卫沛锋(1984—),男,山西运城人,硕士,研究实习员,主要从事大气光学和自适应光学方面的研究。E-mail: weipeifeng@gmail.com



汪宗洋(1986—),男,安徽巢湖人,硕士研究生,2004年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事大口径光学系统图像恢复和数字图像处理等方面的研究。E-mail: wzy1986@mail.ustc.edu.cn



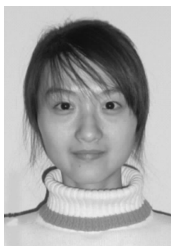
王建立(1977—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



吴元昊(1977—),男,吉林长春人,助理研究员,2000年于北京电子科技学院获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理所获得博士学位,主要从事数字图像处理、视频图像跟踪等方面的研究。E-mail: wuyuanhao@ciomp.ac.cn



吕杰(1965—),男,硕士,中国西部教育顾问,全国希望教育协会常务理事,市科普作家协会常务理事,现任吉林市松花江中学校长。E-mail: hu.xiaoming1965@163.com



马鑫雪(1987—),女,黑龙江伊春人,博士研究生,主要从事PR算法、最优化算法以及波前探测等方面的研究。E-mail: maxinxuezuibang@163.com