

文章编号 1004-924X(2014)12-3175-08

相位差异法检测不理想环境下的非共光路像差

马鑫雪*, 王 斌, 李正炜

(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: 设计了 1.23 m 地基望远镜自适应系统的非共光路标定系统。针对自适应光学系统非共光路像差检测中遇到的问题, 构造了离焦量不可测情况下的相位差异法的评价函数。利用多通道约束波前的解集和像差检测与变形镜调整互相迭代最终收敛的办法, 弥补了测量条件不理想对像差检测的影响。与双通道相位差异法相比, 多通道相位差异法对目标光源形状的容忍力更强, 理论上对波前求解精度更高。将该方法应用于 1.23 m 地基望远镜自适应系统的非共光路静态像差测量中, 取得了良好的效果, 使光路装调更加方便。通过改变变形镜的初始偏置对测得的像差进行校正, 提高了望远镜光学系统的成像质量。

关 键 词: 自适应光学; 波前探测; 非共光路检测; 多通道相位差异法

中图分类号: TH703; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3175

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

MA Xin-xue*, WANG Bin, LI Zheng-wei

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

* Corresponding author, E-mail: maxinxue@gmail.com

Abstract: A no-common path calibration system was designed for the Adaptive Optical (AO) system in a 1.23 m ground telescope. To solve some practical problems of no-common path static aberration calibration, the evaluation function for the multi-channel Phase Diversity (PD) processing method was presented for a condition of the defocusing amount difficult to be measured. Then, a method to use the detected aberration and the modulated deformable mirror to iterate each other for convergence was proposed to make up the effect of nonideal measurement conditions on aberration detection. As compared with two-channel PD processing, the multi-channel PD processing method has stronger tolerance to the forms of target sources and higher accuracy of wavefront solution in theory. The processing method was used to measure the no-common path aberration of the AO system in the 1.23 m telescope. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves the higher accuracy of wavefront solution and the aberration has been compensated by using the initial bias of a deformable mirror. Moreover, the whole imaging quality of the optical system is improved effectively.

收稿日期: 2013-03-05; 修订日期: 2013-04-10.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AA8082035)

Key words: adaptive optics; wave-front aberration detection; calibration of no-common path aberration; multi-channel phase-diversity wave-front sensing

1 引言

在自适应光学、主动光学等新型光学系统中,光路在后端被分成两束,一路进入波前传感设备用于探测系统的波前相位,以便于波面的校正;另一路则进入终端成像相机。为了使波面校正效果与相机成像效果完全对应,应尽量减少这两束光路之间的波面相位差别;但由于光路调整、元件加工等因素,两束光之间通常会存在非共光路像差,从而影响校正效果。如果能精确地测量非共光路像差,并将其加到变形镜上作为初始面形,即能显著提高校正效果,从而提高系统的成像质量。但非共光路像差的测量要在不改变系统光路的前提下进行,传统的检测设备无法应用。

1979 年, Gonsalves 首次提出相位差异 (Phase Diversity, PD) 技术,其核心思想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^[1-2]。Paxman 等进一步完善了 PD 理论^[3-5],在高斯噪声和泊松噪声情况下多帧 PD 的数学模型大大提高了 PD 的估计精度。Vogel 等利用反演问题提出了快速数值解法^[6-7]。Löfdahl 等将相位差异散斑 (Phase-Diversity Speckle, PDS) 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]。Bolcar 把 PD 理论引入到合成孔径及拼接镜的检测中^[10]。Löfdahl 等人将相位差异相位恢复技术 (Phase-Diversity Phase Retrieval, PDPR) 用于标定 Keck 望远镜自适应光学 (Adaptive Optics, AO) 系统的非共光路像差^[11-13]。

本文设计了 1.23 m 地基望远镜 97 单元自适应光学系统的非共光路标定系统。在不能准确测量离焦量的情况下,通过 PD 法评价函数的设计,用多通道约束波前解集、像差检测与变形镜调整互相迭代最终收敛的办法,弥补了由测量条件不理想以及放松离焦量差异对波前解集的约束而带来的 PD 求解的病态性问题,理论上提高了波前求解的精度。

2 基本原理

图 1 是 PD 系统的光路示意图,该系统具有焦面和离焦面两个采集通道。PD 图像恢复问题可以看作已知受扰动图像求原信号相位的反演问题。本文采用多通道采集数据,以改善反演问题的病态性。

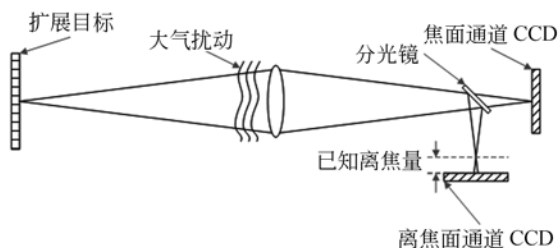


图 1 相位差异法图像采集示意图

Fig. 1 Scheme of data-collection for PD imaging

2.1 系统模型

大气和望远镜可近似看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^[1]:

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

式中: d 表示 CCD 上采集到的目标图像, 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。点扩散函数表示为^[1]:

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

其中: F^{-1} 表示傅里叶逆变换, P 表示光瞳函数, u 表示光瞳面坐标, ϕ 表示波前相位,可用 Zernike 多项式的和表示:

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

其中: α_m 表示第 m 项多项式系数, Z_m 表示第 m 项 Zernike 多项式基底, θ 为已知的固定离焦相位。

2.2 评价函数

在高斯噪声模型下,目标与多通道图像的均方差可看作似然函数^[16-18]。本文的多通道相位

差异法的评价函数可表示为:

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

式中: u 表示频域坐标, T 和 C 分别表示使用的帧数及通道数; N 为单幅图像的像素总数; $\{\alpha\}_t$ 为需要求解的 t 帧 Zernike 系数, 等式右边括号内第二项是 Tikhonov 正则项^[6-7], 可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。

对式(4)求关于 F 的导数, 并令导数为 0, 求得式(4)关于 F 的稳定点为:

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

将式(5)代入式(4)得到:

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

从而可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^[5]。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若干时刻及调焦电机的带动下, 在若干已知离焦量的离焦面上采集到的图像。由此可知各个通道的 σ_c^{-2} 是相等的, 为一常数。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)^[19-20] 进行了搜索。

3 实验设计

3.1 系统组成

基于 1.23 m 口径光电望远镜 97 单元自适应光学系统, 本文设计了一套非共光路像差测试系统, 系统构成如图 2 所示。望远镜出射的光束汇聚到第一像面上, 经准直透镜后光束变为平行光入射到变形镜上。光束经变形镜整形后反射到分色镜上被分为两路: 一路通过透镜最终在 CCD 上成像, 称作成像光路; 另一路进入哈特曼波前传感器, 称作 AO 光路。

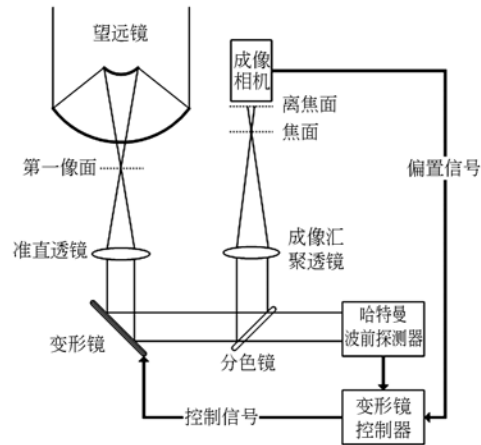


图 2 非共光路像差测试系统的结构图

Fig. 2 Schematic diagram of non-common path aberration testing system

3.2 实验步骤

第一步, 关闭主镜镜盖, 通过光箱内部的机械装置在第一像面处放置一个光纤白光光源;

第二步, 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;

第三步, 控制调焦电机, 移动成像相机到焦面位置。设置相机的曝光时间, 采集若干幅图像;

第四步, 控制调焦电机直至成像相机停留在已知的离焦面上, 采集若干幅图像;

第五步, 关闭光纤光源, 采集相机的本底; 将采集来的图像及其对应的离焦量输入到 PD 计算程序;

第六步, 用 AO 系统对 PD 计算得到的静态像差进行预先补偿。

3.3 问题的分析及解决

不改变 AO 系统光路所进行的非共光路像差检测会遇到以下问题:

(1) 成像相机所在的调焦平移台上面没有编码器或其它读数设备, 所以不能准确测量成像相机的离焦量, 只能根据调焦电机走的步数进行估算, 所以作为 PD 输入的各个离焦通道数据的确切离焦差异量不准确。

(2) 直径为 25 μm 的光纤头理想成像点的直径为 8.5 个像素, 并非理想的点光源。所以采用此光纤头作为目标必须想办法改善 PD 求解波前的病态性问题。

(3) 调焦电机的平移轴与光轴不平行, 这会影响 PD 的波前解算。

(4) 用 PD 逆过程解算波前的精度与被测波前

的像差有关。在光路装调的初始阶段,像差比较大及测量环境不理想会影响 PD 的测量精度。

这些问题不仅存在于 1.23 m 望远镜的自适应光学系统中,同样存在于其他非共光路像差测量的工程应用中。

在实际工程中,如何提高算法对这类实验条件的容忍能力将是 PD 在非共光路像差测量应用中的关键。针对以上问题,本文改进了算法。

调焦机构由调焦电机和螺纹杆构成。调焦电机为步进电机,假设调焦电机每走一步,移动量满足正态分布: $N(l, \sigma_l^2)$ 。对于某一通道 c , 移动离焦量为 Z_c , 那么实际的离焦量为 $z_c \sim N(Z_c, \frac{Z_c^2}{l} \sigma_l^2)$,

调焦误差为 $\Delta_c = z_c - Z_c \sim N(0, \frac{Z_c^2}{l} \sigma_l^2)$; 调焦量误差造成的波前相位误差为 $\theta_{\Delta_c}(r) = \frac{\pi \cdot \Delta_c \cdot r^2}{4\lambda(F\#)^2}$, 其中 $r \in [0, 1]$ 为波前单位圆的极轴。在各个离焦通道离焦量的调整存在误差时, 式(3)改为:

$$\phi_c(v) = \theta_c(v) + \theta_{\Delta_c}(v) + 2\pi \sum_{m=1}^M \alpha_m Z_m(v). \quad (7)$$

用联合最大似然估计法有:

$$(\{\hat{\alpha}\}, \{\hat{\Delta}\}, \hat{f})_{ML} = \underset{\{\alpha\}, \{\Delta\}, f}{\operatorname{argmax}} \Pr[\{d\}; \{\alpha\}, \{\Delta\}, f], \quad (8)$$

其中: $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_c$ 之间是相关的。为了简化公式, 取它们之间独立。

$$\begin{aligned} \Pr[\{d\}; \{\alpha\}, \{\Delta\}, f] &= \prod_{c=1}^C \prod_{x \in \chi} \Pr[d_c(x); \{\alpha\}, \Delta_c, f] = \\ &= \prod_{c=1}^C \prod_{x \in \chi} \Pr[d_c(x) | \{\alpha\}, \Delta_c, f] \Pr[\{\alpha\}, \Delta_c, f] = \\ &= \prod_{c=1}^C \prod_{x \in \chi} \Pr[d_c(x) | \{\alpha\}, \Delta_c, f] \Pr[\Delta_c | \{\alpha\}, f] \Pr[\{\alpha\}, f]. \end{aligned} \quad (9)$$

对于检测问题, 可令: $\Pr[\{\alpha\}, f] = 1$,

$$\Pr[\Delta_c | \{\alpha\}, f] = \Pr[\Delta_c].$$

则:

$$\Pr[\{d\}; \{\alpha\}, \{\Delta\}, f] = \prod_{c=1}^C \prod_{x \in \chi} \Pr[d_c(x) | \{\alpha\}, \Delta_c, f] \Pr[\Delta_c]. \quad (10)$$

其中:

$$\Pr[d_c(x) | \{\alpha\}, \Delta_c, f] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_c^2}} \exp\left\{-\frac{[d_c(x) - f * s_c(x)]^2}{2\sigma_c^2}\right\}, \quad (11)$$

$$\Pr[\Delta_c] = \frac{1}{\sqrt{\frac{2\pi Z_c^2 \sigma_l^2}{l}}} \exp\left\{-\frac{\Delta_c^2}{\frac{2 Z_c^2 \sigma_l^2}{l}}\right\}. \quad (12)$$

将式(11)、(12)代入式(10), 取对数运算且忽略常数项, 得到:

$$L(\{\alpha\}, \{\Delta\}, f) = \sum_{c=1}^C \frac{1}{2\sigma_c^2} \|d_c - f * s_c\|^2 + \frac{Nl}{2\sigma_l^2} \sum_{c=1}^C \frac{\Delta_c^2}{Z_c}. \quad (13)$$

由式(13)可知, 在实际调焦量不可知的情况下, PD 的目标函数应当加入 $\frac{Nl}{2\sigma_l^2} \sum_{c=1}^C \frac{\Delta_c^2}{Z_c}$ 项。而加入此项的目标函数关于 F 的稳定点不变, 所以省略中间推导过程, 得到改造后的目标函数为:

$$\begin{aligned} L(\{\alpha\}, \{\Delta\}) &= \frac{1}{2N} \sum_u \left[\sum_{c=1}^C \bar{\alpha}_c^2 |D_c|^2 - \frac{\left| \sum_{c=1}^C \bar{\alpha}_c D_c S_c^* \right|^2}{\gamma + \sum_{c=1}^C \bar{\alpha}_c^2 |S_c|^2} \right] + \\ &K \frac{Nl}{2\sigma_l^2} \sum_{c=1}^C \frac{\Delta_c^2}{Z_c}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中: K 为常数, 用于调整调焦误差在目标函数中的比重。需要注意的是, 所用的波前表达式为式(7)。

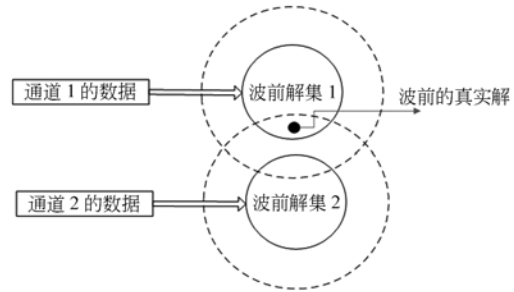


图 3 离焦差异不准确时 PD 对波前的约束求解

Fig. 3 Constraint solution set of wavefront by PD on inaccurate defocus

如图 3 所示, 实线圆表示以式(6)为目标函数时两个通道求得的波前解集, 由于通道 2 的实际调焦量与期望调焦量有偏差, 造成约束波前求解的相位离焦差异是错误的, 错误的约束造成错误的波前求解; 虚线圆表示以式(14)为目标函数两个通道求得的波前解集, 实际上式(14)作为 PD 的目标函数必然会放松离焦量差异对波前解集的约束, 使得每个通道所对应的解集适当加大, 从而波前的真实解会落在波前解集 1 和波前解集 2 的交集中。

问题(1)是以增加 PD 求解的病态性为代价而解决的,所以问题(1)的这个遗留问题将与问题(2)合并为削弱 PD 求解的病态性这个统一的问题。这个问题以及问题(3)和(4)的解决方法详见文献[21]。

4 实验结果与分析

实验系统的参数如下: $F\# = 40$,准直透镜 $F\# = 9.1$,中心波长为 800 nm,焦深约为 2.56 mm。实验中选取的离焦量分别为 0, ± 10 , ± 20 mm 共 5 个通道。相机的像元尺寸为 13 μm ,曝光时间为 1 ms。

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;采集得到的 5 个通道的图像^[22-23]如图 4 所示,从左到右前 5 幅图采集时的离焦量分别是 -20, -10, 0, 10, 20 mm,最后一幅是以前 5 幅图像作为输入恢复得到的图像。

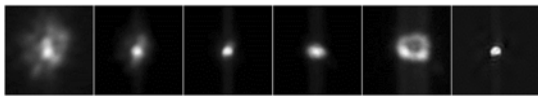


图 4 首次采集图像及恢复结果

Fig. 4 Original images and retrieval result at the first time

此实验以 Zernike 系数前 15 项为未知数进行搜索。探测得到的波前如图 5 所示, $\text{RMS} = 0.129\lambda$, $\text{PV} = 0.798\lambda$ 。从第一像面到 CCD 的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 如图 6 所示。

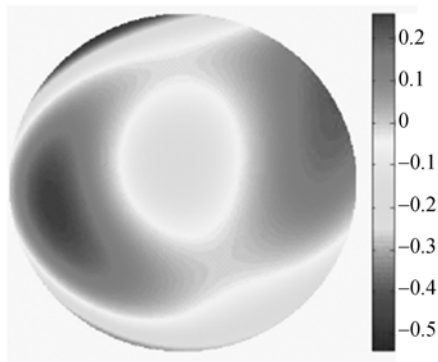


图 5 第一次测得的波前

Fig. 5 Detected wavefront at the first time

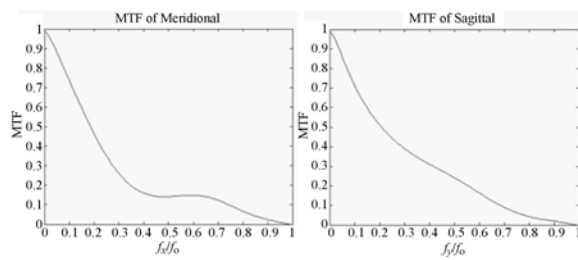


图 6 第一次测得的调制传递函数

Fig. 6 Detected MTFs at the first time

把 Zernike 各项系数加入到变形镜的控制上产生偏置,重复采集过程,得到的图像如图 7 所示。

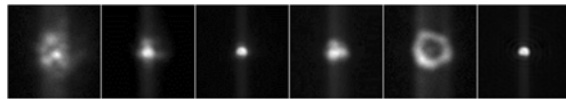


图 7 第二次采集图像及恢复结果

Fig. 7 Original images and retrieval result at the second time

图 8 所示为探测得到的波前, $\text{RMS} = 0.083\lambda$, $\text{PV} = 0.491\lambda$ 。从第一像面到 CCD 的 MTF 如图 9 所示。

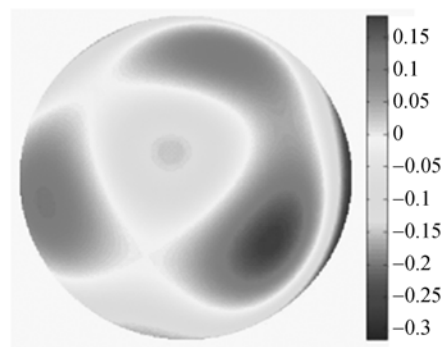


图 8 第二次测得的波前

Fig. 8 Detected wavefront at the second time

在第三次曝光时,再重复上述过程。采集的焦面图像如图 10 所示。

图 11 所示为探测得到的波前, $\text{RMS} = 0.083\ 36\lambda$, $\text{PV} = 0.170\ 6\lambda$ 。从第一像面到 CCD 的 MTF 如图 12 所示。

对比 3 次的焦面图像可以看出系统成像质量得到了极大的提高,图 13 所示是半高全宽 (FWHM)。3 次测量结果如表 1 所示。表 1 列出了归一化后的 Zernike 系数中的第 5 项到第 15

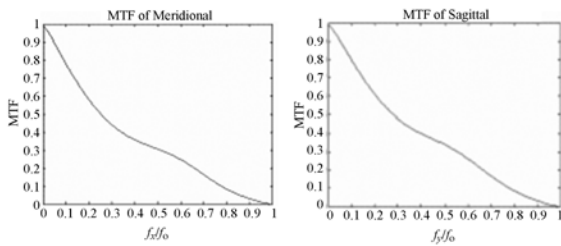


图 9 第二次测得的调制传递函数

Fig. 9 Detected MTFs at the second time

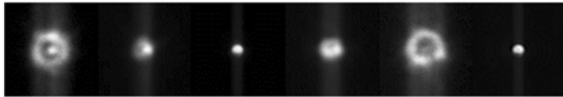


图 10 第三次采集图像及恢复结果

Fig. 10 Original images and retrieval result at the third time

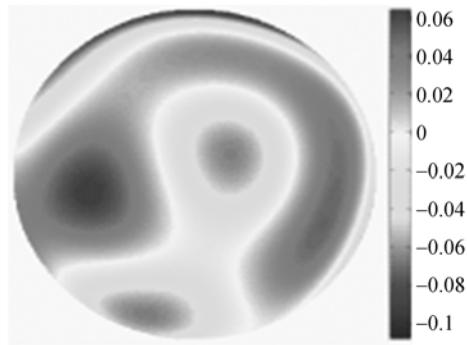


图 11 第三次测得的波前

Fig. 11 Detected wavefront at the third time

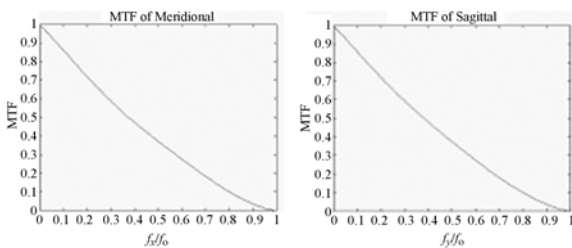
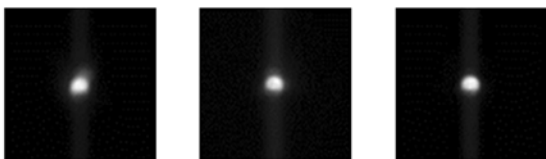
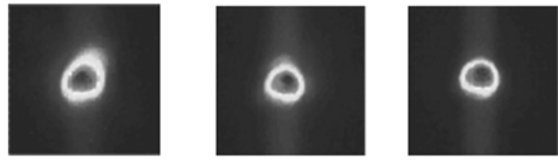


图 12 第三次测得的调制传递函数

Fig. 12 Detected MTFs at the third time



(a) Focused image1 (b) Focused image2 (c) Focused image3



(a) FWHM=13,036 (b) FWHM=12,635 (c) FWHM=12,312

图 13 焦面图像对比

Fig. 13 Comparison among focus images

项的值。由表中数据可知,经两次测量并将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	结果 1(λ)	结果 2(λ)	结果 3(λ)
Astigmatism(y)	-0.041 26	0.021 188	-1.17×10^{-6}
Astigmatism(x)	0.074 274	0.013 563	0.016 229
Coma(y)	0.033 199	-0.015 72	0.002 669 2
Coma(x)	-0.028 44	0.027 296	0.010 499 6
Trefoil(y)	0.007 373	-0.026 82	0.006 523 5
Trefoil(x)	0.009 169	-0.024 14	-0.008 130
Spherical	-0.074 51	0.007 282	-0.018 211
Secondary	-0.007 36	0.000 229	-0.003 762
Astigmatism(y)	-0.000 4	-0.018 28	-0.002 356
Secondary	-0.000 4	-0.018 28	-0.002 356
Astigmatism(x)	-0.000 4	-0.018 28	-0.002 356
Pintongs(y)	0.008 857	-0.001 41	0.000 448 3
Pintongs(x)	0.000 945	0.010 345	-0.006 693

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 4 所示第一次测量时采集来的 5 个通道中离焦量分别为 0 mm 和 20 mm

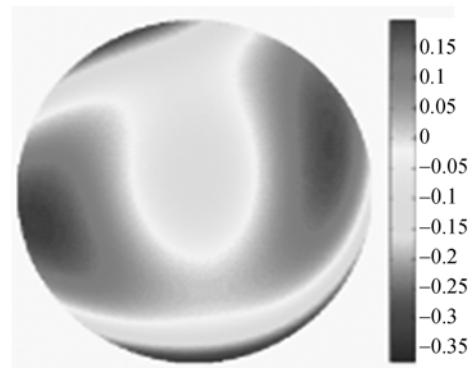


图 14 用多通道中的两个通道测量的波前

Fig. 14 Wavefront detected by two channels among multi-channels

的两个通道的数据来测量波前,得到恢复的目标图像。测得的波前如图 14 所示, $RMS=0.107\lambda$, $PV=0.562\lambda$ 。与图 5 相比,虽然波前的趋势是一致的,但测得的波前像差值要小于图 5。如表 2 所示,实际测得的各项 Zernike 系数要小于表 1 中的结果。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 量程变短和测量精度下降。

表 2 多通道与双通道测量结果对比

Tab. 2 Comparison of measurement results between double-channels and multi-channels

Zernike 项	多通道结果	双通道结果
Astigmatism(y)	-0.041 26	-0.046 795 4
Stigmatism(x)	0.074 274	0.072 890 8
Coma(y)	0.033 199	-0.025 542 2
Coma(x)	-0.02 844	-0.006 204 17
Trefoil(y)	0.007 373	-0.001 564 53
Trefoil(x)	0.009 169	-0.018 317 1
Spherical	-0.074 51	-0.051 478 2
Secondary	-0.007 36	-0.002 802 5
Astigmatism(y)	-0.000 4	-0.011 268 4
Secondary	-0.000 4	-0.011 268 4
Astigmatism(x)	-0.000 4	-0.011 268 4
Pintongs(y)	0.008 857	-0.001 314 46
Pintongs(x)	0.000 945	-0.003 787 87

参考文献:

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

[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*

图 15 所示是在曝光时间为 50 ms 时,对北极星标定非共光路像差前后所采集的图像。标定前所采集的图像如图 15(a)所示, $FWHM=13.083$, 标定后所采集的图像如图 15(b)所示, $FWHM=11.520$, 都是 100 帧取平均得到的,能量集中度略有提高。

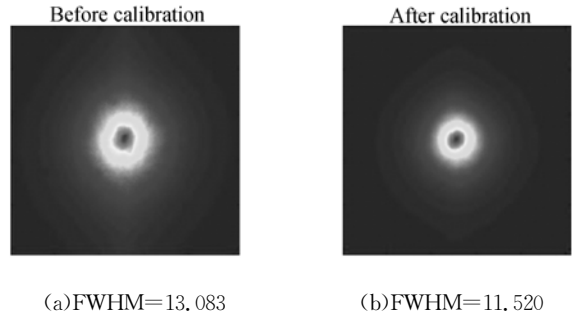


图 15 非共光路像差标定前后对北极星采集的图像

Fig. 15 Images of Polaris detected before and after calibrations

5 结 论

本文基于 1.23 m 地基望远镜 97 单元自适应系统,设计了一套非共光路像差 PD 检测标定系统。在不能准确测量离焦量、实验条件不够理想的情况下,通过改进算法提高了 PD 检测方法的适应力,并且理论上提高了波前求解精度。应用该系统测得了非共光路像差,并采用变形镜的初始偏置进行校正,明显改善了自适应光学系统的校正效果,显著提高了望远镜的成像质量。

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.

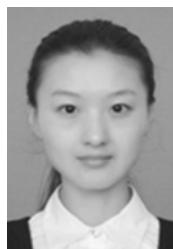
[6] VOGEL C R. *Computational Methods for Inverse Problems* [M]. Philadelphia: SIAM Press, 2002.

[7] VOGEL C R, CHAN T, PLEMMONS R. Fast algorithms for phase diversity-based blind deconvolution [J]. *Adaptive Optical System Technologies*, 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] MATTHEW R B. *Phase Diversity for Segmented and Multi-Aperture Systems* [D]. Rochester: University of Rochester, 2008.
- [11] 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] SELDIN J H, PAXMAN R G. Phase-diverse speckle reconstruction of solar data [J]. *SPIE*, 1994, 2302: 268-280.
- [15] 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.
- WANG J L, WANG Z Y, WANG B, *et al.*. Image restoration by phase-diversity speckle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1165-1170. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 赵金宇, 陈占芳, 王斌, 等. 相位差异法目标函数并行化改造 [J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(2): 431-438.
- ZHAO J Y, CHEN ZH F, WANG B, *et al.*. Improvement of phase diversity object function's parallelity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 431-438. (in Chinese)
- [18] CARRERAS R A, RESTAMO S R, *et al.*. Phase diversity experimental results: deconvolution of v Scorpii [J]. *Optics Communications*, 1996, 130: 13-19.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 王斌, 汪宗洋, 吴元昊, 等. 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 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(7): 1683-1692.
- WANG B, WANG Z Y, WU Y H, *et al.*. Calibration of no-common path aberration using multi-channel phase-diversity wave-front sensing in AO system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1683-1692. (in Chinese)
- [22] 赵志彬, 刘晶红. 基于图像处理的航空成像设备自动调焦设计 [J]. *液晶与显示*, 2010, 25(6): 863-868.
- ZHAO ZH B, LIU J H. Auto-focusing method for airborne image equipment based on image processing [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6): 863-868. (in Chinese)
- [23] 杨权, 刘晶红, 马晓飞. 基于图像处理的机载光电平台自动调焦方法 [J]. *液晶与显示*, 2011, 26(5): 677-682.
- YANG Q, LIU J H, MA X F. Auto-focusing method based on image processing for airborne electro-optical imaging platform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5): 677-682. (in Chinese)

作者简介:



马鑫雪(1987—),女,黑龙江伊春人,助理研究员,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: maxinxue@gmail.com