

利用相位差异技术检测离轴三反光学系统的波前误差

程 强^{1,2} 闫 锋¹ 薛栋林¹ 郑立功¹ 张学军¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 阐述了基于相位差异(PD)的波前传感技术的基本原理, 针对该技术的目标函数变量多、非线性程度高等特点, 提出了基于遗传算法的相位差异技术。开展了利用相位差异技术实现离轴三反光学系统在不同装调阶段的波前检测, 结合干涉检验方法设计了针对扩展目标的相位差异高分辨率成像和相位估计对比实验。通过定量移动高精度平台获得焦面和离焦图像, 并将解算的波前图与干涉仪的检测结果进行定量比对, 验证了相位差异技术提高成像质量和正确解算波前相位信息的能力。实验结果表明, 对于粗装调的光学系统, 估算的波前和干涉检验结果偏差的均方根(RMS)值仅为 0.0329λ ; 对于装调完成后的系统, 相位差异技术的检测偏差 RMS 值小于 0.013λ 。

关键词 成像系统; 相位差异; 波前传感; 图像恢复; 离轴三反光学系统

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.1008001

Wavefront Error Testing of Off-Axis Three-Mirror Anastigmatic System Using Phase Diversity Technology

Cheng Qiang^{1,2} Yan Feng¹ Xue Donglin¹ Zheng Ligong¹ Zhang Xuejun¹

(¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The basic principles of wavefront sensing based on phase diversity (PD) technology are expatiated, and the genetic algorithm (GA) is proposed to be applied in the data post-processing of PD testing aiming at dealing with the multi variables and the highly nonlinearity of merit function. The wavefront error of an off-axis three-mirror anastigmatic (TMA) system is tested with PD technology based on extended target, in which the defocused image is obtained by shifting the image plane. To verify the improvement of image quality and phase estimation of PD technology, a comparison experiment of extended object on high-resolution imaging and phase estimation is carried out based on the PD and interferometric testing. It can be observed that the deviation of root mean square (RMS) between the wavefront error obtained by PD testing and by interferometric testing is 0.0329λ (RMS) for the coarse-aligned off-axis TMA system, and the deviation decreases to 0.013λ (RMS) when the system is well aligned. The precision of PD technology can satisfy the requirement of engineering. The imaging experiments are also carried out and image quality can be well improved according to the wavefront estimated by PD.

Key words imaging systems; phase diversity; wavefront sensing; image restoration; off-axis three-mirror optical system

OCIS codes 100.5070; 010.7350; 100.3020; 110.6770

收稿日期: 2012-05-10; 收到修改稿日期: 2012-07-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61036015)和中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-11-M05)资助课题。

作者简介: 程 强(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统波前传感技术、光学系统集成分析与像质提升技术等方面的研究。E-mail: nk lance@gmail.com

导师简介: 张学军(1968—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。

E-mail: z x j@ciomp. ac. cn

1 引 言

卫星在发射过程中的振动和冲击过载以及空间环境中热辐射的影响,使得机械结构和光学表面产生一定程度的位移和形变,从而使光学系统的波前产生一定的相位畸变。相位差异(PD)技术正是针对光学系统波前畸变发展起来的波前误差检测技术,它利用光学系统焦面和离焦面上所采集的波前畸变图像,并利用数字图像处理的方法来解算波前相位畸变,从而得到较为清晰的恢复图像。与哈特曼波前传感器和干涉检验等波前检测技术相比,相位差异技术具有光路简单、所需硬件少、易于实现等优点,且同时适用于点目标和随机扩展目标。除了在图像复原方面性能优异外,PD技术还可以应用于拼接镜共相检测^[1],大口径地面望远镜装调^[2],太阳观测等方面^[3~7]。因此,PD技术是目前光学系统波前检测技术发展的重要方向。

对于PD技术,中国科学院西安光学精密机械研究所、北京理工大学等科研机构开展了相关工作^[8~11],但主要集中于算法优化和计算机仿真;美国亚利桑那大学和洛克希德-马丁公司等研究机构建立了实验平台,验证了PD技术与主动光学技术的结合^[12~14],但在应用该技术辅助空间光学系统精密装调领域未见相关报道。

本文将PD技术应用于检测一个离轴三反消像散(TMA)空间光学系统在不同装调阶段的波前误差。通过定量移动高精度平台获得焦面和离焦图像,利用两幅图像之间的相位差异,解算出系统的波前畸变,并与干涉检验的结果进行对比。PD技术在粗装调阶段(光学系统装调时的中间阶段)与干涉检验结果的偏差的均方根(RMS)值为 0.0329λ ,装调完成后与干涉检验结果的偏差RMS值小于 0.013λ 。根据检测结果恢复的图像细节明显增强,进一步采用均方根误差(RMSE)和拉普拉斯算子和法(LS)对图像的复原质量进行评价,复原图像的质量有了明显的提高。

2 PD技术的理论基础

PD技术最早由Gonsalves等^[15]提出,后被Paxman等^[16~18]将理论进一步完善,在解算波前相位信息的同时,将图像恢复到高分辨率的水平,并在此基础上,给出了高斯噪声和泊松噪声情况下的数学模型,极大地提高了PD技术在噪声情况下的估计精度。该技术的光路示意图如图1所示。PD技

术需要采集两幅或更多的图像,其中一幅图像一般是由于未知的像差而导致退化的焦面图像,而其他图像一般为离焦图像。

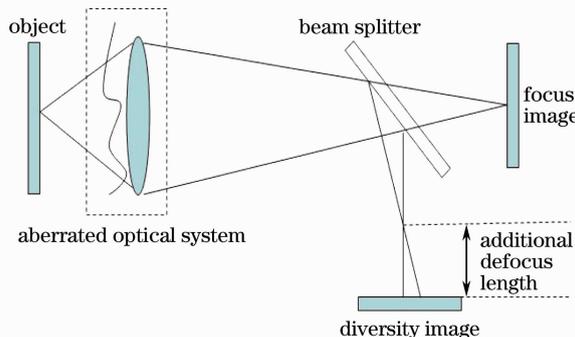


图1 PD技术的光路示意图

Fig.1 Optical layout of PD technology

2.1 成像系统模型

为了便于讨论,假设成像系统的目标由非相干准单色光照明,成像系统为线性移不变系统。考虑焦面系统和离焦系统均存在噪声的影响,假设噪声是加性的,满足高斯分布,并采用离散化的形式,则成像公式为

$$i_k(x, y) = o(x, y) * s_k(x, y) + n_k(x, y), \quad k = 1, 2 \quad (1)$$

式中 k 表示PD技术中通道的个数, $o(x, y)$ 为二维物体分布函数, $s_k(x, y)$ 为第 k 通道成像系统的点扩展函数, $i_k(x, y)$ 为第 k 通道探测器采集到的图像, $n_k(x, y)$ 为加性高斯噪声,*为卷积运算。

根据卷积理论和Parseval定理,(1)式可以在频域中表达为

$$I_k(u, v) = O(u, v)S_k(u, v) + N_k(u, v), \quad k = 1, 2 \quad (2)$$

式中 $O(u, v)$ 、 $S_k(u, v)$ 、 $I_k(u, v)$ 和 $N_k(u, v)$ 分别为 $o(x, y)$ 、 $s_k(x, y)$ 、 $i_k(x, y)$ 和 $n_k(x, y)$ 的二维傅里叶变换。

点扩展函数可以用光瞳函数的傅里叶变换的形式表示为

$$s_1 = |\mathcal{F}\{A(x, y)\exp[i\phi(x, y)]\}|^2, \quad (3)$$

$$s_2 = |\mathcal{F}\{A(x, y)\exp\{i[\phi(x, y) + \phi_d(x, y)]\}\}|^2, \quad (4)$$

并且相位函数可以用Zernike多项式线性组合的形式表示为

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^K a_i Z_i(\rho, \theta), \quad (5)$$

$$\phi_d(x, y) = a_4 Z_4(\rho, \theta), \quad (6)$$

式中 $A(x, y)$ 为光瞳函数的模, 当在光瞳内 ($\sqrt{x^2 + y^2} \leq R_0$), $A(x, y) = 1$, 而在光瞳外 ($\sqrt{x^2 + y^2} > R_0$), $A(x, y) = 0$, R_0 为光瞳的范围, $\phi(x, y)$ 为未知的系统相位函数, 而 $\phi_d(x, y)$ 为由离焦引起的离焦相位函数, $Z_i(\rho, \theta)$ 为 Zernike 多项式的第 i 项, a_i 为第 i 项 Zernike 多项式的系数。

2.2 评价函数

根据最大似然估计理论, 定义一个评价函数来作为最优化算法的目标函数, 在频域表示为

$$E(O, a) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \sum_{u \in X} [O(u)S_k(u) - I_k(u)]^2 + \frac{\gamma}{2} |O(u)|^2, \quad (7)$$

式中 u 表示频域坐标, 等式右边第二项为 Tikhonov 正则项, 可以提高算法稳定性和收敛速度, γ 表示非负的正则项系数。

经过一系列的数学计算和推导, 评价函数可最终表达为

$$E(a) = \frac{1}{2} \sum_{u \in X} \left[|I_1(u)|^2 + |I_2(u)|^2 - \frac{|I_1^*(u)S_2(u) - I_2^*(u)S_1(u)|^2}{\gamma + |S_1(u)|^2 + |S_2(u)|^2} \right]. \quad (8)$$

评价函数的表达式确定后, 波前检测及图像恢复的过程就可以描述为大规模非线性优化求极值的

过程。当评价函数取得最小值时, 认为此时搜索得到的 Zernike 系数就可以表征该波前的相位信息。本文采用适合大规模变量寻优的遗传算法, 经过长期测试验证了该算法具有较高的精度和较好的收敛效率。

3 利用 PD 技术检测 TMA 光学系统

利用 PD 技术检测一个在装调不同阶段的 TMA 光学系统, 实验系统的结构图如图 2 所示。用位于平行光管焦点处的靶标来模拟无穷远处的目标物体, 通过定量移动高精平台来获得焦面和离焦图像, 利用这两幅图像解算系统的波前误差, 同时对图像进行恢复。实验中应采用的离焦量可计算^[19]为

$$\Delta w = -\epsilon_z \frac{x^2 + y^2}{2R^2} = -\epsilon_z \frac{D_{EP}^2}{8R^2} = -\epsilon_z \frac{D_{EP}^2}{8f^2} = -\epsilon_z \frac{1}{8F^2}, \quad (9)$$

$$\epsilon_z = -8F^2 \Delta w, \quad (10)$$

式中 x, y 为物方坐标, ϵ_z 为 CCD 离焦量, R 为球面波的曲率半径, f 为系统的焦距, D_{EP} 为入瞳直径, Δw 为离焦相位的峰谷 (PV) 值, $F = f/D_{EP}$ 。对于本 TMA 光学系统, F 数为 9.83。实验中, 设定 Δw 为 1λ , λ 取滤光片的中心波长 645.32 nm, 则计算可得 CCD 离焦量 ϵ_z 为 -0.499 mm。

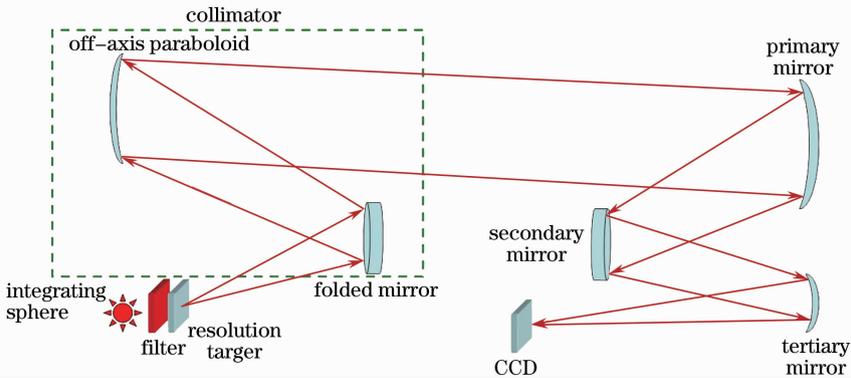


图 2 实验系统结构图

Fig. 2 Structure of experimental system

实验系统由目标模拟、成像系统和图像采集 3 个部分组成。实验首先对粗装调的 TMA 光学系统的中心视场进行波前检测, 之后对系统进行精装调, 当装调结果接近系统衍射极限时, 再利用 PD 技术分别检测多个视场下的系统波前。

目标模拟由积分球、滤光片、靶标和离轴平行光管组成。靶标为 WT-1005-62 标准分辨率套板中的

3 号板, 滤光片位于积分球和靶标之间, 中心波长为 645.32 nm, 半峰全宽为 8 nm, 离轴平行光管的焦距为 4 m, 波像差 RMS 值优于 $\lambda/25$, 满足系统检测精度需求。

成像系统部分采用 TMA 光学系统, 图像采集部分采用的是 Point Grey 公司的 FL2-20S4M-C 型面阵 CCD, 有效像素数为 1600 pixel \times 1200 pixel,

像素大小为 $4.4\ \mu\text{m} \times 4.4\ \mu\text{m}$ 。该面阵 CCD 被安装在六维(6D)调整架上,并与千分表相连接,像面可沿光入射方向平动,通过千分表读数可以实现像面精确调焦,如图 3 所示。

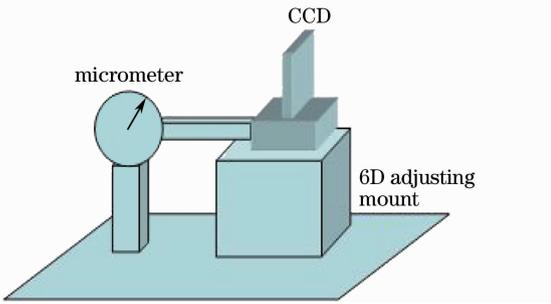


图 3 图像采集部分的示意图
Fig. 3 Sketch of image collection

4 实验结果与分析

采集了粗装调时的焦面图像和离焦图像,并分

别截取 $128\ \text{pixel} \times 128\ \text{pixel}$ 大小的区域,代入相关程序进行波前误差计算,得到 Zernike 多项式 5~11 项系数,并绘制系统的波前图。此外,为了验证 PD 技术的检测结果,由标准球面镜、平行光管、离轴三反光学系统和 Zygo 干涉仪构成波前检验系统,如图 4 所示。采用自准检验方法(平行光管提供自准平行光)检测系统波前误差(系统波前误差为平行光管和 TMA 光学系统的综合波前误差,与采用 PD 技术检测系统的综合波前误差一致),并与 PD 技术的检测结果进行对比,如表 1、图 5 和图 6 所示。由表 1 和图 5 可以看出,PD 技术的检测结果与干涉检验相比,偏差较小。由图 6 可以看出,PD 技术检测得到的波前 RMS 值为 0.31782λ ,而利用干涉仪检测得到的波前 RMS 值为 0.319λ ,由 Zernike 系数可以算出,二者的均方根值偏差仅为 0.0329λ ,表明 PD 技术的检测精度满足 TMA 光学系统波前检测的精度需求。

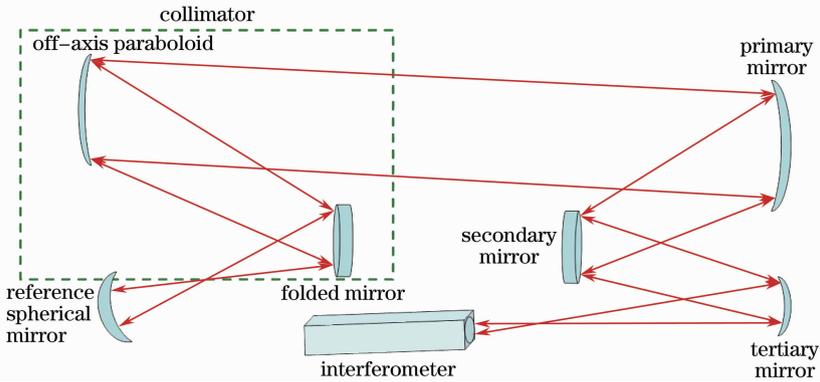


图 4 利用干涉仪检测系统波前原理图

Fig. 4 Structure of wavefront testing using interferometer

表 1 两种方法检测的 Zernike 系数结果对比(粗装调)

Table 1 Comparison of Zernike coefficients by two methods (coarse-aligned)

Zernike item	PD / λ	Interferometer / λ	Deviation / λ
5	-0.0102	-0.0098	-0.0004
6	0.0320	0.0100	0.0220
7	0.4181	0.4331	-0.0150
8	-0.3865	-0.4426	0.0561
9	-0.0221	-0.0313	0.0092
10	0.4824	0.4504	0.0320
11	0.4989	0.4455	0.0534

进一步精装调 TMA 光学系统,使其系统波像差接近衍射极限,再利用所采集的图像分别解算装调完成后系统的 +1、0、-1 视场的波前误差。实验采用的离焦量 ϵ_z 同样为 $-0.499\ \text{mm}$,截取 $128\ \text{pixel} \times 128\ \text{pixel}$ 大小的焦面和离焦图像,利用 PD 技术解

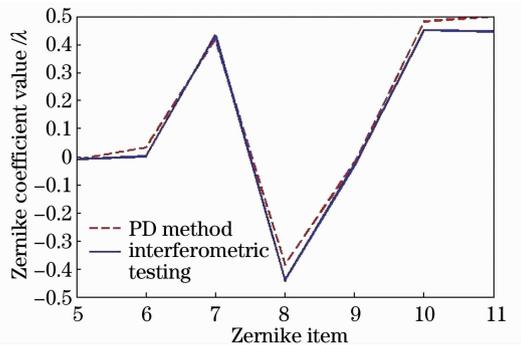


图 5 两种方法检测的 Zernike 系数结果对比(粗装调)

Fig. 5 Comparison of Zernike coefficients gained by two methods (coarse-aligned)

算波前;同样利用 Zygo 干涉仪直接检测装调完成后系统 +1、0、-1 视场的波前误差,并与 PD 技术的检测结果进行对比,如表 2~4、图 7~9 所示。

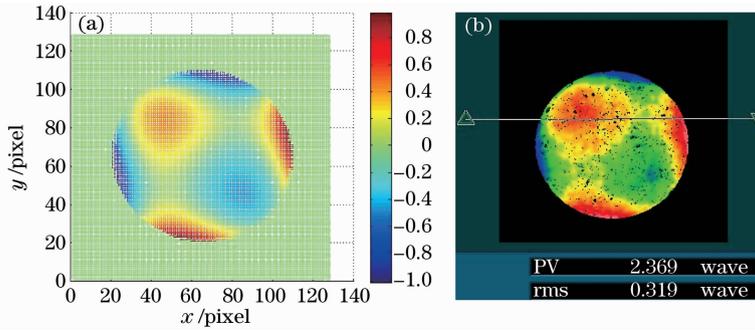


图 6 两种方法检测的波前图对比(粗装调)。(a) PD 技术;(b)干涉仪

Fig. 6 Comparison of wavefront map gained by two methods (coarse-aligned). (a) PD technology; (b) interferometer

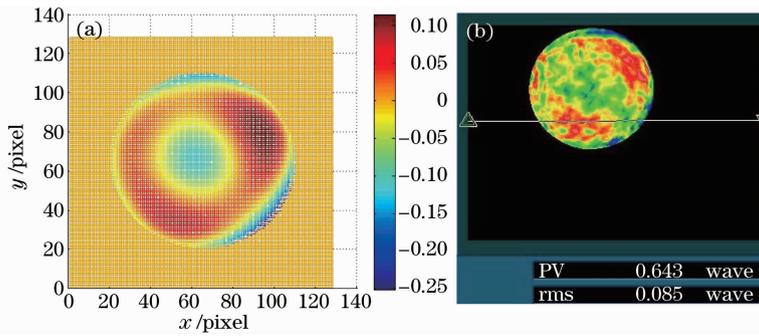


图 7 两种方法检测+1 视场的波前图对比(装调完成)。(a) PD 技术;(b)干涉仪

Fig. 7 Comparison of wavefront map of +1 field of view gained by two methods (well aligned).

(a) PD technology; (b) interferometer

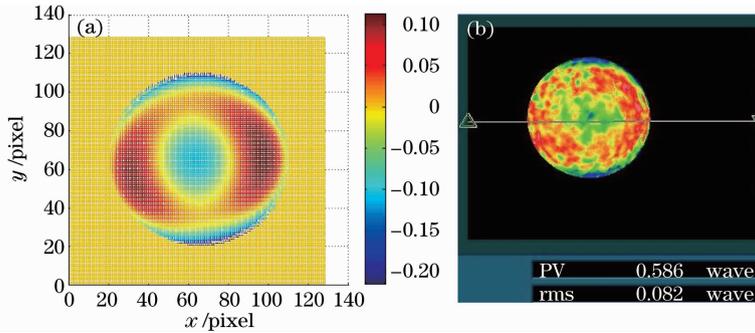


图 8 两种方法检测 0 视场的波前图对比(装调完成)。(a) PD 技术;(b)干涉仪

Fig. 8 Comparison of wavefront map of 0 field of view gained by two methods (well aligned).

(a) PD technology; (b) interferometer

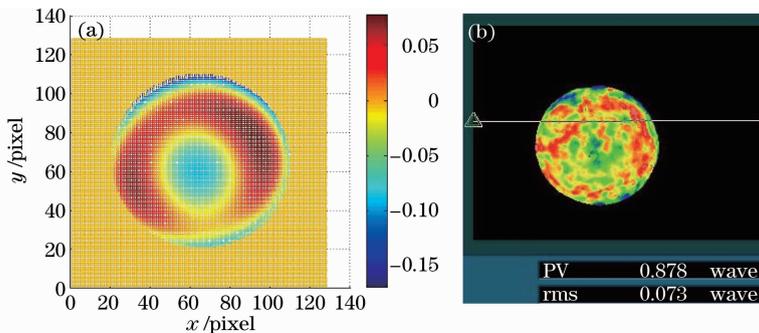


图 9 两种方法检测-1 视场的波前图对比(装调完成)。(a) PD 技术;(b)干涉仪

Fig. 9 Comparison of wavefront map of -1 field of view gained by two methods (well aligned).

(a) PD technology; (b) interferometer

表 2 两种方法检测的系统+1 视场 Zernike 系数
结果对比(装调完成)

Table 2 Comparison of Zernike coefficients of +1
field of view by two methods (well aligned)

Zernike item	PD /λ	Interferometer /λ	Deviation /λ
5	0.011	0.024	-0.011
6	0.040	0.059	-0.019
7	-0.055	-0.043	-0.012
8	0.015	0.008	0.007
9	-0.104	-0.103	-0.001
10	0.013	0.021	-0.008
11	0.068	0.057	0.011

表 3 两种方法检测的系统 0 视场 Zernike 系数
结果对比(装调完成)

Table 3 Comparison of Zernike coefficients of 0 field of
view by two methods (well aligned)

Zernike item	PD /λ	Interferometer /λ	Deviation /λ
5	0.094	0.085	0.009
6	0.037	0.026	0.011
7	-0.047	-0.033	-0.014
8	-0.008	-0.006	-0.002
9	-0.120	-0.108	-0.012
10	0.020	0.009	0.011
11	-0.025	-0.016	-0.009

表 4 两种方法检测的系统-1 视场 Zernike 系数
结果对比(装调完成)

Table 4 Comparison of Zernike coefficients of -1 field of
view by two methods (well aligned)

Zernike item	PD /λ	Interferometer /λ	Deviation /λ
5	0.031	0.042	-0.010
6	0.037	0.024	0.013
7	-0.024	-0.025	0.001
8	-0.075	-0.054	-0.021
9	-0.068	-0.083	0.015
10	-0.006	-0.001	-0.005
11	-0.021	-0.011	-0.010

实验中所计算的 Zernike 多项式 5~11 项属低频部分,中、高频部分影响较小,暂未考虑。由表 2~4 中的 Zernike 系数计算可得,PD 技术对各视场的波前检测 RMS 值分别为 0.083λ、0.080λ 和 0.075λ,和干涉检验的结果基本一致,偏差 RMS 值小于 0.013λ。综上,对于精密装调完成的 TMA 光学系统,PD 技术的检测精度满足工程实际精度需求。

应用 PD 技术的检测结果和 Lucy-Richardson 滤波算法对粗装调时采集的图像进行复原,对比度拉伸后与焦面图像和离焦图像进行对比,如图 10 所示。可以看出,与原始图像相比,复原图像条纹清晰,层次分明。进一步引入 RMSE 和 LS 方法来评价各图像的质量,表达式为

$$f_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [f(i,j) - f_{\text{mean}}]^2}, \quad (11)$$

$$f_{\text{LS}} = \frac{\sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} \left| 9f(i,j) - \sum_{i=i-1}^{i+1} \sum_{j=j-1}^{j+1} f(i,j) \right|}{(M-2)(N-2)}, \quad (12)$$

式中 M 和 N 为图像二维的长度, $f(i,j)$ 为第 i 行、第 j 列像素的灰度值, f_{mean} 为整个图像灰度值的平均。由表 5 的计算结果可以看出,与原始图像相比,复原图像的 RMSE 值 (f_{RMSE}) 和 LS 值 (f_{LS}) 均有了很大的提升。对于 TMA 光学系统装调完成后所采集的图像及复原图像(如图 11 所示),同样应用(11)式和(12)式进行评价,结果如表 6 所示。其中,图 11(a1)~(a3)、(b1)~(b3)、(c1)~(c3)分别为装调完成后的 TMA 光学系统+1、0、-1 视场所采集的焦面图像、离焦图像及复原图像。由表 6 可以看出,对于+1、0、-1 视场,与原始图像相比,复原图像的质量有了明显的提高。

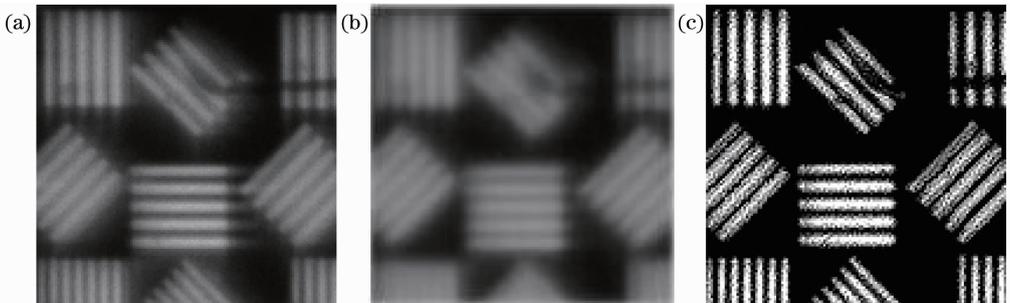


图 10 (a)焦面图像、(b)离焦图像和(c)复原图像的对比(粗装调)

Fig. 10 Comparison of (a) focus image, (b) defocus image and (c) restored image (coarse alignment)

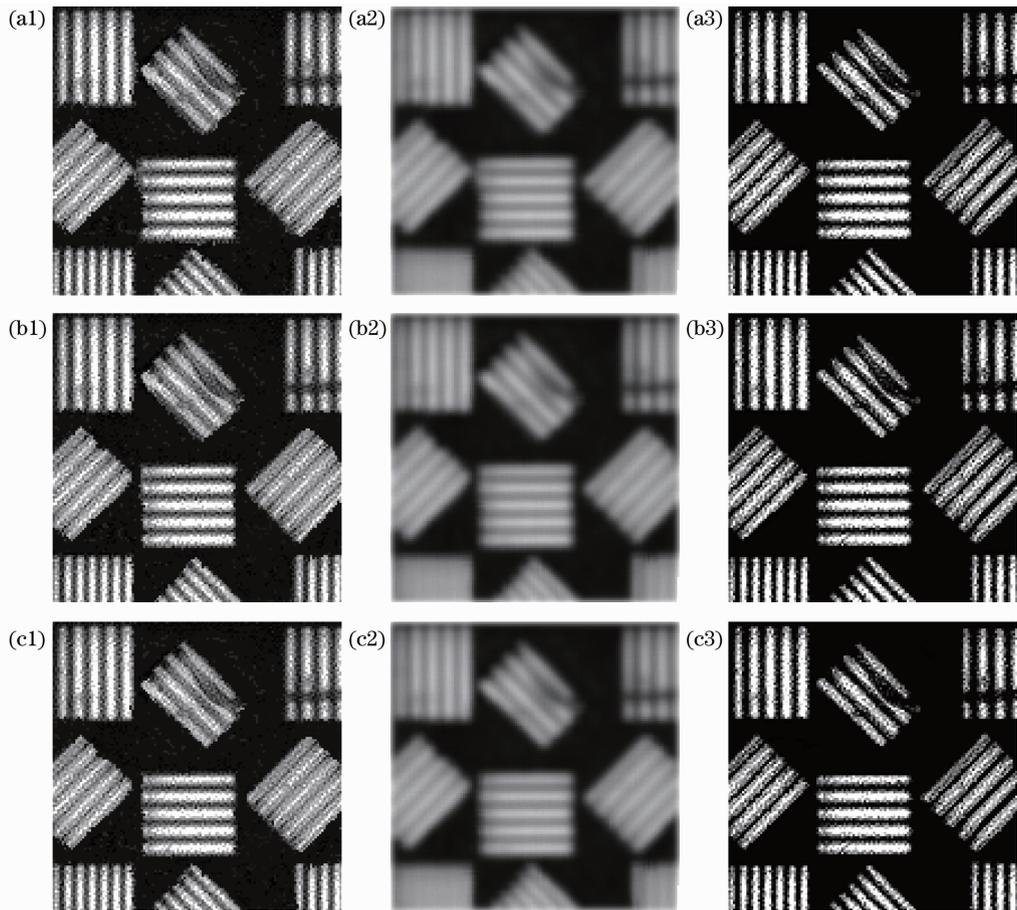


图 11 TMA 光学系统装调完成后所采集的图像及复原图像。(a1)~(a3) +1 视场的焦面图像、离焦图像和复原图像；(b1)~(b3) 0 视场的焦面图像、离焦图像和复原图像；(c1)~(c3) -1 视场的焦面图像、离焦图像和复原图像

Fig. 11 Collected images and restored images when the TMA optical system is well aligned. (a1)~(a3) Focus image, defocus image, restored image of +1 field of view; (b1)~(b3) focus image, defocus image, restored image of 0 field of view; (c1)~(c3) focus image, defocus image, restored image of -1 field of view

表 5 不同图像的 RMSE 值和 LS 值(粗装调)

Table 5 RMSE and LS values of different images (coarse aligned)

Evaluation function	Focus image	Defocused image	Restored image
RMSE	41.12	44.93	85.54
LS	27.97	31.13	212.89

表 6 装调完成后,不同图像的 RMSE 值和 LS 值

Table 6 RMSE and LS values of different images when system is well aligned

Field of view	Evaluation function	Focus image	Defocused image	Restored image
+1	RMSE	76.60	59.85	95.17
	LS	153.97	120.34	220.35
0	RMSE	77.14	60.27	95.89
	LS	157.61	123.59	229.47
-1	RMSE	77.13	60.28	95.34
	LS	154.07	122.07	223.18

5 结 论

本文将 PD 技术应用于检测粗装调阶段和装调完成后的 TMA 光学系统的波前误差,实现了基于相位差异技术的波前误差传感和图像恢复。粗装调阶段时,PD 技术的检测结果与干涉检验结果相比,偏差 RMS 值仅为 0.0329λ ;装调完成后,PD 技术的检测结果与干涉检验的结果基本一致。根据 PD 技术检测结果复原的图像细节明显增强,证明了 PD 技术可以较准确地恢复出光学系统的波前相位信息,可以将该技术作为光学系统精密装调时的检测手段。

利用 PD 技术实现了光学系统波前误差的检测和图像复原。下一步工作将改进算法,提高 PD 技术的检测效率;另外,本文研究的是准单色光照明条件下的 PD 技术,下一步将拓展 PD 技术的应用领域,研究宽光谱照明条件 PD 技术的理论基础、计算

机模拟仿真并进行实验验证。

参 考 文 献

- 1 R. G. Paxman, B. J. Thelen, R. J. Murphy *et al.*. Phase-diverse adaptive optics for future telescopes[C]. *SPIE*, 2007, **6711**: 671103
- 2 M. G. Löfdahl, R. L. Kendrick, A. Harwit *et al.*. A phase diversity experiment to measure piston misalignment on the segmented primary mirror of the Keck II telescope[C]. *SPIE*, 1998, **3356**: 1190~1201
- 3 M. G. Löfdahl, T. E. Berger, R. S. Shine *et al.*. Preparation of a dual wavelength sequence of high-resolution solar photospheric images using phase diversity[J]. *Astrophys. J.*, 1998, **495**(2): 965~972
- 4 Wang Jianli, Wang Zongyang, Wang Bin *et al.*. Image restoration by phase-diverse speckle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 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
- 5 Wang Bin, Wang Zongyang, Wang Jianli *et al.*. Phase-diverse speckle imaging with two cameras[J]. *Optics and Precision Engineering*, 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
- 6 Chen Xindong, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Design and analysis of a novel actuator topology of deformable mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s116007
陈新东, 郑立功, 张学军. 一种新型的变形镜促动器排布方式设计与分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s116007
- 7 Chen Xindong, Zheng Ligong, Luo Xiao *et al.*. A deformable mirror with 9 actuated points for low order aberration correction-design and experiments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322001
陈新东, 郑立功, 罗霄等. 校正低阶像差的9点促动变形镜-设计与实验[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322001
- 8 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
- 9 Wang Xin, Zhao Dazun. Influence of noise to phase diversity wavefront sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2142~2146
王欣, 赵达尊. 图像噪声对相位变更波前传感的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2142~2146
- 10 Li Fei, Rao Changhui. Study on phase diversity wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0804001
李斐, 饶长辉. 高精度相位差法波前探测器的数值仿真和实验研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0804001
- 11 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
- 12 R. L. Kendrick, D. S. Acton, A. L. Duncan. Experimental results from the Lockheed phase diversity test facility[C]. *SPIE*, 1994, **2302**: 312~322
- 13 J. A. Georges III, P. Dorrance, K. Gleichman *et al.*. High-speed closed-loop dual deformable-mirror phase-diversity testbed[C]. *SPIE*, 2007, **6711**: 671105
- 14 J. Andrews, S. Teare, S. Restaino *et al.*. Dynamic aberration control testbed for the characterization of multiple wavefront sensors[C]. *SPIE*, 2005, **6018**: 60180R
- 15 R. A. Gonsalves, R. Chidlaw. Wavefront sensing by phase retrieval[C]. *SPIE*, 1979, **207**: 32~39
- 16 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
- 17 R. G. Paxman, J. H. Seldin, M. G. Löfdahl *et al.*. Evaluation of phase-diversity techniques for solar-image restoration[J]. *Astrophys. J.*, 1996, **466**(2): 1087~1099
- 18 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): 1016~1025
- 19 J. C. Wyant, K. Creath. *Applied Optics and Optical Engineering*[M]. New York: Academic Press Inc., 1992. 9~11

栏目编辑:何卓铭