# 相位差异的三反光学系统波前传感技术

程 强[1,2],薛栋林[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. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘 要**:分析了基于相位差异(Phase Diversity,PD)的波前传感技术的基本原理,针对该技术的目标函数自变量多、非线性程度较高等特点,提出基于遗传算法(Genetic Algorithm,GA)的改进相位差异技术。在传统目标函数的基础上增加了 Tikhonov 正则项,提高了算法的稳定性和收敛效率;对光学系统利用 PD 技术波前检测的噪声适应性进行了仿真分析;模拟了不同波前离焦量对检测精度的影响,获得最优的波前离焦相位值并应用于检测实验;利用 PD 技术分别对离轴三反光学系统的中心视场和边缘视场进行波前检测,并将解算得到的 Zernike 系数和波前图分别与干涉检验的结果进行对比。实验结果表明:相位差异技术与干涉检验的偏差小于 0.013λ(RMS),其检测精度满足工程需求。

**关键词**:相位差异; 波前传感; 离轴三反光学系统

**中图分类号**:O439 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)06-1601-06

# Wavefront sensing of three-mirror reflecting optical system phase diversity

Cheng Qiang[1,2], Xue Donglin[1], Zhang Xuejun[1]

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

Abstract: The basic principles of wavefront sensing based on phase diversity (PD) were analyzed. An improved PD based on genetic algorithm (GA) was proposed for the multiple variables and nonlinear character of PD's objective function. A Tikhonov regularization function was added to the traditional objective function, and the stability and convergence efficiency were improved. The noise adaptability of wavefront testing by PD technology was simulated, and effect of various wavefront defocuses on the testing precision of PD technology was analyzed. The best wavefront defocus which can make PD reach the highest testing precision, and it was selected to apply in testing experiment. PD technology was applied to wavefront testing of central and marginal field of view in off-axis three-mirror reflecting optical systems. The Zernike coefficients solved and wavefront maps were compared with interferometric

**收稿日期**:2012-10-05; **修订日期**:2012-11-08

**基金项目**:国家自然科学基金(61036015);中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-11-M05)

**作者简介**:程强(1986-),男,博士生,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。Email:nklance@gmail.com

**导师简介**:张学军(1968-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事先进光学制造技术、空间相机总体技术等方面的研究。Email: zxj@ciomp.ac.cn

results respectively. Experimental results showed that the testing precision of PD technology was less than 0.013 λ(RMS), and the precision can satisfy the requirement of engineering.

Key words: phase diversity;　wavefront sensing;　off-axis three-mirror reflecting optical system

## 0 引　言

随着科学技术的发展和人们对高分辨率对地观测要求的日益提高，人们对空间遥感光学系统成像质量的要求也越来越高。然而,由于空间环境的复杂性,以及卫星在发射过程中的振动和冲击过载,使得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相位畸变,造成成像质量有所下降。相位差异(Phase Diversity,PD)正是针对光学系统波前畸变发展起来的波前检测技术，它利用光学系统焦面和离焦面上所采集的图像，通过大规模多变量非线性寻优的过程,解算系统的波前位相信息。与哈特曼传感器和干涉检验等波前传感方法相比,PD 技术具有光路简单,易于实现等优点,且同时适用于点目标和随机扩展目标。此外,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],太阳观测等领域[3-6]。因此,PD 技术是目前光学系统波前误差检测技术发展的一个重要方向。

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大量的算法优化和计算机仿真等方面的工作[7-8];美国洛克希德-马丁公司和亚利桑那大学等研究机构建立了实验平台,将 PD 技术结合主动光学技术得到了验证[9-11],但在应用该技术检测空间遥感光学系统方面未见相关报道。

文中改进了传统 PD 技术的目标函数，提高了算法的稳定性；模拟分析了光学系统利用 PD 技术进行波前检测的噪声适应性，分析了对于检测实验中的离轴三反光学系统，不同波前离焦相位对 PD 技术检测精度的影响，获得了最优的波前离焦相位值并将该结果应用于检测实验;结果表明:利用 PD 技术检测离轴三反光学系统的波前,与干涉检验的结果相比,PD 技术的检测偏差均小于0.013 λ(RMS),其检测精度满足工程需求。

## 1 PD 技术的理论基础

PD 技术最早由 Gonsalves[12]提出,用于校正由于大气抖动给单口径光学系统所带来的相位误差。后被 Paxman[13-14]和 Fienup[15-16]等学者用于提高稀疏孔径光学系统的成像质量、提取光学系统相位差信息,并应用于自适应光学调整等。该技术的基本原理如图 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,而其它图像一般为离焦图像。与哈特曼传感器等传统的波前传感技术相比,PD 技术不直接测量系统的波前。由于焦面图像和离焦图像包含了光学系统的波前信息,该波前可以用 Zernike 多项式来拟合，对该系统采用适当的优化算法便可提取出 Zernike 多项式的系数，然后对误差波前进行拟合,从而得到系统的波前信息。

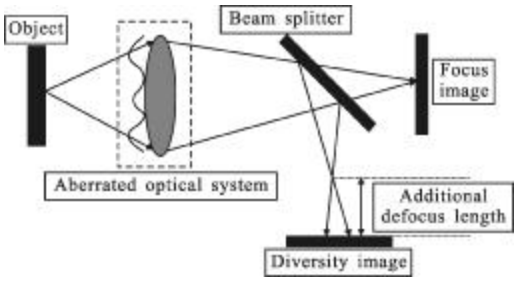



图 1 PD 技术的光路示意图

Fig.1 Optical layout of PD technology

### 1.1 成像系统模型

为便于讨论，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。考虑系统存在加性噪声的影响,且满足高斯分布,并采用离散化的形式,则:

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

式中:$k$ 表示 PD 技术中通道的个数;$o(x,y)$为目标物体分布函数;$PSF_k(x,y)$为第 $k$ 通道系统的点扩散函数;$i_k(x,y)$为第 $k$ 通道探测器采集到的图像;$n_k(x,y)$为加性的高斯噪声;·是卷积运算。

根据卷积理论和 Parseval 定理,公式(1)可以在频域中表达为:

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

式中:$O(u,v)$、$OTF_k(u,v)$、$I_k(u,v)$和 $N_k(u,v)$分别为

$\mathbf{o}(\mathbf{x},\mathbf{y})$、$\mathbf{PSF}_k(\mathbf{x},\mathbf{y})$、$\mathbf{i}_k(\mathbf{x},\mathbf{y})$和 $\mathbf{n}_k(\mathbf{x},\mathbf{y})$的二维傅里叶变换。

点扩散函数可以表示为光瞳函数傅里叶变换的形式，并且光瞳函数中的位相函数可以表示为 Zernike 多项式的线性组合，故有：

$$\mathbf{PSF}_1=|\mathbf{F}\{\mathbf{A}(\mathbf{x},\mathbf{y})\exp[\mathrm{i}\phi(\mathbf{x},\mathbf{y})]\}|^2 \tag{3}$$

$$\mathbf{PSF}_2=|\mathbf{F}\{\mathbf{A}(\mathbf{x},\mathbf{y})\exp\{\mathrm{i}[\phi(\mathbf{x},\mathbf{y})+\phi_d(\mathbf{x},\mathbf{y})]\}\}|^2 \tag{4}$$

$$\phi(\mathbf{x},\mathbf{y})=\sum_{i=1}^{K}\mathbf{a}_i\mathbf{Z}_i(\rho,\theta) \tag{5}$$

$$\phi_d(\mathbf{x},\mathbf{y})=\mathbf{a}_4\mathbf{Z}_4(\rho,\theta) \tag{6}$$

式中：$\mathbf{A}(\mathbf{x},\mathbf{y})$为理想光瞳。其模在光瞳内($\sqrt{\mathbf{x}^2+\mathbf{y}^2}\leqslant\mathbf{D}_0$)，$\mathbf{A}(\mathbf{x},\mathbf{y})=1$，而在光瞳外($\sqrt{\mathbf{x}^2+\mathbf{y}^2}>\mathbf{D}_0$)，$\mathbf{A}(\mathbf{x},\mathbf{y})=0$；$\phi_d(\mathbf{x},\mathbf{y})$为未知的系统相位函数；$\mathbf{z}$ 为由离焦引起的相位函数；$\mathbf{Z}_i(\rho,\theta)$为 Zernike 多项式的第 i 项；$\mathbf{a}_i$ 为第 i 项 Zernike 多项式的系数。

### 1.2 评价函数

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

$$\mathbf{E}(\mathbf{u},\mathbf{a})=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{2}\sum_{\mathbf{u}\in\mathbf{X}}[\mathbf{O}(\mathbf{u})\mathbf{OTF}_k(\mathbf{u},\mathbf{a})-\mathbf{I}_k(\mathbf{u})]^2+\frac{\gamma}{2}|\mathbf{O}(\mathbf{u})|^2 \tag{7}$$

式中：$\mathbf{u}$ 表示频域坐标。目标函数在传统优化目标函数的基础上，增加了右边第二项——Tikhonov 正则项。该项的引入可以有效地提高算法的稳定性和收敛效率，$\gamma$表示非负的正则项系数。通过对公式(7)求导，可以将目标物体函数 $\mathbf{O}(\mathbf{u})$分离出来，得到具有维纳滤波形式的目标物体函数表达式：

$$\mathbf{O}(\mathbf{u},\mathbf{a})=\frac{\mathbf{I}(\mathbf{u})\mathbf{OTF}^*(\mathbf{u},\mathbf{a})+\mathbf{I}_d(\mathbf{u})\mathbf{OTF}_d^*(\mathbf{u},\mathbf{a})}{\gamma+|\mathbf{OTF}(\mathbf{u},\mathbf{a})|^2+|\mathbf{OTF}_d(\mathbf{u},\mathbf{a})|^2} \tag{8}$$

Tikhonov 正则项系数可以有效地抑制噪声放大效应，改善位相反演问题的病态性。最后将公式(8)代入到公式 (7)，得到以 Zernike 系数为参数的评价函数，可表示为：

$$\mathbf{E}(\mathbf{u},\mathbf{a})=\frac{1}{2}\Big(\sum_{\mathbf{u}\in\mathbf{X}}\Big(|\mathbf{I}_1(\mathbf{u})|^2+|\mathbf{I}_2(\mathbf{u})|^2-\left|\frac{\mathbf{I}_1^*(\mathbf{u})\mathbf{OTF}_2(\mathbf{u},\mathbf{a})-\mathbf{I}_2^*(\mathbf{u})\mathbf{OTF}_1(\mathbf{u},\mathbf{a})}{\gamma+|\mathbf{OTF}_1(\mathbf{u},\mathbf{a})|^2+|\mathbf{OTF}_2(\mathbf{u},\mathbf{a})|^2}\right|^2\Big)\Big) \tag{9}$$

右上角星号表示共轭。目标函数确定后，PD 技术最终归结为大规模多变量非线性寻优的过程，其流程图如图 2 所示。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位相信息。文中采用适合大规模变量寻优的遗传算法，经过大量的计算机模拟仿真，该算法的精度和收敛效率满足工程实际需求。

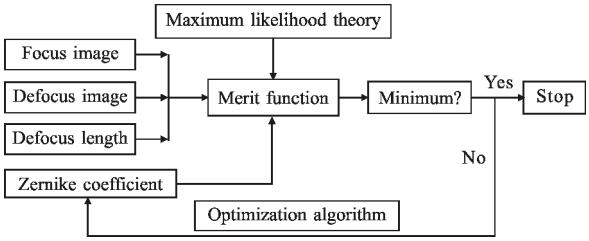



图 2 PD 技术的算法流程图

Fig.2 Flow chart of PD technology

## 2 利用 PD 技术检测三反光学系统

为了分析 PD 技术检测光学系统波前信息对噪声的适应性，构建成像光学系统，在焦面图像和离焦图像上分别加入相同量级的高斯白噪声进行模拟仿真，加入不同高斯噪声的方差值与 PD 技术检测精度的关系见表 1。

**表 1 加入高斯噪声的方差值与 PD 技术检测精度的关系**

Tab.1 Variance of Gaussian noise versus testing precision of PD technology

| Variance of Gaussian noise | Zernike coefficients | | | | | | Testing precision (λ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a4 | a5 | a6 | a7 | a8 | a9 | |
| 0 | 0.3 | -0.35 | 0.3 | -0.4 | 0.3 | 0.35 | 0.0011 |
| 0.000 1 | 0.301 4 | -0.3517 | 0.300 4 | -0.3969 | 0.299 7 | 0.350 2 | 0.001 5 |
| 0.000 3 | 0.305 3 | -0.3484 | 0.304 1 | -0.3937 | 0.297 8 | 0.353 1 | 0.004 5 |
| 0.000 5 | 0.310 2 | -0.3476 | 0.303 2 | -0.4017 | 0.301 5 | 0.354 1 | 0.006 4 |
| 0.001 | 0.301 3 | -0.3484 | 0.298 4 | -0.3857 | 0.292 7 | 0.353 2 | 0.006 7 |
| 0.005 | 0.279 0 | -0.3538 | 0.286 0 | -0.4125 | 0.317 0 | 0.353 0 | 0.015 7 |
| 0.006 | 0.329 4 | -0.3550 | 0.322 0 | -0.4465 | 0.297 9 | 0.361 5 | 0.025 9 |

离轴三反光学系统制造完成后，成像质量接近衍射极限，系统波像差约为 λ/14(RMS)，通常要求波前传感方法的检测精度优于 0.02 λ(RMS)，由表 1 可知，所允许加入高斯噪声的方差值最大为 0.005，对应图像的信噪比约为 23 dB，实验中 CCD 工作时的

信噪比高于 40 dB,实验条件满足要求。

利用 PD 技术检测离轴三反光学系统，还要选取合适的波前离焦相位 PV 值。在应用 PD 技术进行波前检测时,波前离焦相位是个很重要的因素。如果选取值过小,离焦图像距离焦面图像较近,两幅图像就会过于相似，无法提供足够的信息来提高 PD 技术的收敛性和检测精度；而如果波前离焦相位选取得过大，离焦图像就会变得严重模糊，失去参考价值。所以,首先分析波前离焦相位对 PD 技术检测精度的影响。

对于实验中的离轴三反光学系统，选取常见的波前离焦相位 PV 值的变化范围,从 0.5~1.5 λ。在这个范围内,每隔 0.1 λ,利用 PD 技术解算光学系统的波前位相信息。检测精度(λ)与波前离焦相位 PV 值(λ)的关系见表 2,其中检测精度 RMS 值为 50 次计算的平均结果。

**表 2 波前离焦相位 PV 值与 PD 技术检测精度(λ)的关系**

Tab.2 PV value of wavefront defocus versus testing precision of PD technology

| PV value of wavefront defocus/λ | Testing precision of PD/λ | PV value of wavefront defocus /λ | Testing precision of PD/λ |
|---|---|---|---|
| 0.5 | 0.028 57 | 1.1 | 0.021 71 |
| 0.6 | 0.017 88 | 1.2 | 0.020 62 |
| 0.7 | 0.025 36 | 1.3 | 0.021 22 |
| 0.8 | 0.020 38 | 1.4 | 0.023 08 |
| 0.9 | 0.015 58 | 1.5 | 0.024 54 |
| 1.0 | 0.010 61 | - | - |

根据上述计算结果，绘制波前离焦相位 PV 值与 PD 技术检测精度的误差棒图,如图 3 所示,其中误差棒的上下限表示 50 次计算结果的最大值和最小值。由表 2 和图 3 可知,在波前离焦相位 PV 值变化范围为 0.5~1.5 λ 时，除个别计算的偶然误差外,大体的趋势为：从 0.5 λ 逐渐增大到 1.0 λ 时,PD 技术的检测精度 RMS 值逐渐减小；从 1.0 λ 逐渐增大到 1.5 λ 时,PD 技术的检测精度 RMS 值逐渐增大。当波前离焦相位 PV 值为 1.0 λ 时,PD 技术的检测精度最高。在下面的离轴三反光学系统的波前检测实验中,选取波前离焦相位的 PV 值为 1.0 λ。

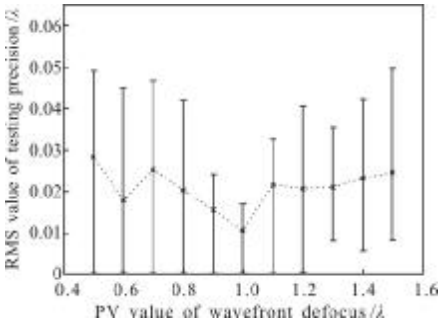



图 3 波前离焦相位 PV 值与 PD 技术检测精度关系的误差棒图

Fig.3 Error bar plot of the PV value of wavefront defocus versus testing precision of PD technology

将 PD 技术应用于离轴三反光学系统的波前检测,其实验系统的结构图如图 4 所示。实验系统由目标模拟、成像系统和图像采集三个部分组成。图 4(a)为实验系统原理图,图 4(b)为成像系统、图像采集布局图。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，通过高精密地移动像面所在的平台来获得波前检测所需的焦面和离焦图像，利用这两幅图像解算系统的波前误差。根据公式(10)、(11),可以计算出实验中 CCD 应采用的离焦量。

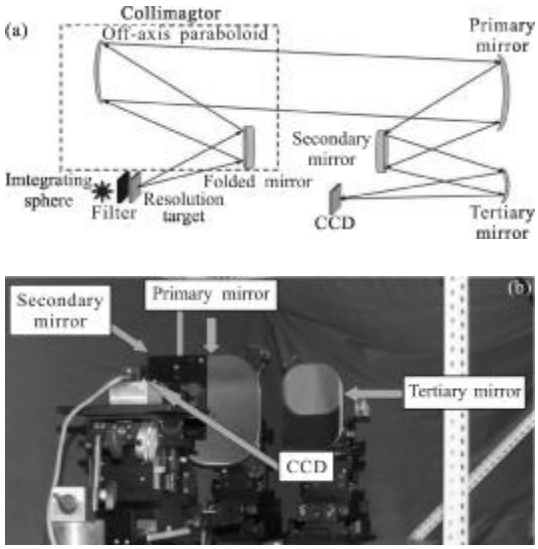



图 4 实验系统原理图与成像系统、图像采集实物图

Fig.4 Structure of experimental system and layout of imaging system and image collection

$$\Delta w=-\varepsilon_z\cdot\frac{x^2+y^2}{2R^2}=-\varepsilon_z\cdot\frac{D_{EP}^2}{8R^2}=-\varepsilon_z\cdot\frac{D_{EP}^2}{8f^2}=-\varepsilon_z\cdot\frac{1}{8(F^{\#})^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon_z=-8(F^{\#})^2\cdot\Delta w \quad (11)$$

式中：$x$，$y$ 为物方坐标；$\varepsilon_z$ 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，$\Delta w$ 为波前离焦相位的 PV 值，$F^{\#}$ 为 $f/D_{EP}$。由之前模拟分析的结果，对于离轴三反光学系统，设定 $\Delta w$ 为 1.0 λ，λ 取滤光片的中心波长 645.32 nm，已知 $F^{\#}$ 为 9.83，由公式(11)计算可得 CCD 离焦距离为 -0.499 mm。

目标模拟由积分球、滤光片、靶标和平行光管组成。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，半高宽为 8 nm，离轴平行光管的焦距为 4 m，波像差优于 λ/25(RMS)，满足精度需求。图像采集部分采用的是 Point Grey 公司的 FL2-20S4M-C 型面阵 CCD，有效像素为 1 600×1 200，像元大小为 4.4 μm×4.4 μm。该面阵 CCD 被安装在六维调整架上，并与千分表相连接，像面可沿入射光线方向平动，通过千分表的读数指导像面精确调焦。

## 3 实验结果与分析

利用 PD 技术分别检测离轴三反光学系统的中心视场和边缘视场的波前误差。分别采集焦面和离焦 -0.499 mm 的图像并应用图 2 中的算法流程解算波前信息，得到 Zernike 多项式 5-11 项系数，并进一步构建了系统的波前图。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 干涉仪构成波前检测系统（如图 5 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离轴三反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 3 和图 6 所示。

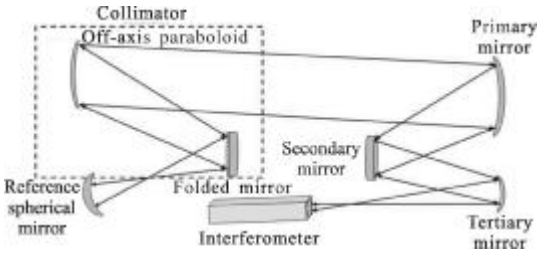


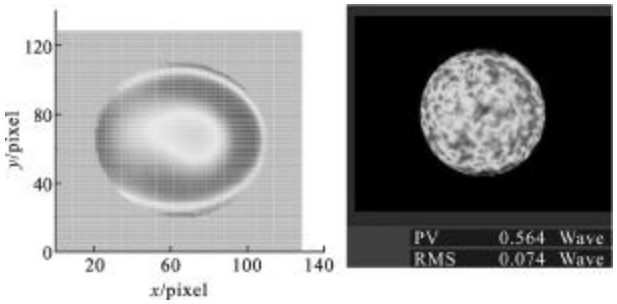

图 5 利用干涉仪检测系统波前原理图

Fig.5 Structure of wavefront testing using interferometer

表 3 两种方法检测离轴三反光学系统的中心视场和边缘视场 Zernike 系数结果对比

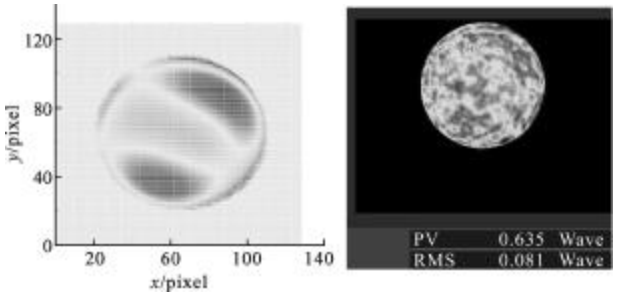
Tab.3 Comparison the Zernike coefficients of central and marginal field of view tested by two methods in off-axis three-mirror reflecting optical system

| Field of view | Testing method | Zernike coefficients | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Central | PD | 0.066 | 0.001 | -0.033 | 0.028 | -0.090 | 0.036 | -0.013 |
| | Interferometer | 0.052 | 0.007 | -0.031 | 0.015 | -0.093 | 0.012 | -0.007 |
| | Deviation | 0.014 | -0.006 | -0.002 | 0.013 | 0.003 | 0.024 | -0.006 |
| Marginal | PD | -0.010 | 0.063 | -0.064 | -0.004 | -0.093 | 0.038 | 0.047 |
| | Interferometer | -0.017 | 0.052 | -0.053 | 0.004 | -0.085 | 0.026 | 0.037 |
| | Deviation | 0.007 | 0.011 | -0.011 | -0.008 | -0.008 | 0.012 | 0.010 |




(a) 中心视场

(a) Central field of view




(b) 边缘视场

(b) Marginal field of view

图 6 两种方法检测离轴三反光学系统的波前图对比

Fig.6 Comparison of wavefront maps of off-axis three-mirror reflecting optical system gained by two methods

由于在上述应用 PD 技术进行波前检测时，所考虑的 Zernike 多项式 5-11 项属低频部分，中、高频

部分暂未考虑,所以在图 6 中,两种方法所得的波前图在中、高频部分表现出一定的差异。由表 3 中的 Zernike 系数计算可得,与干涉检验结果相比,PD 技术对离轴三反光学系统中心视场和边缘视场的检测偏差均小于 0.013λ(RMS)。对于 PD 技术检测同轴三反光学系统, 其模拟分析最优波前离焦相位和波前检测的过程与检测离轴三反系统方法类似, 这里不再赘述。

## 4 结 论

文中在传统 PD 技术目标函数的基础上增加了 Tikhonov 正则项,有效抑制噪声,提高算法的稳定性和收敛效率; 模拟分析了光学系统利用 PD 技术进行波前检测的噪声适应性, 并对不同波前离焦相位对 PD 技术检测精度的影响进行了仿真, 获得了最优的波前离焦相位值并将该结果应用于检测实验; 实验结果表明, 利用 PD 技术检测离轴三反光学系统的波前,与干涉检验的结果相比,PD 技术的检测偏差均小于 0.013λ(RMS),其检测精度满足工程需求。

文中利用 PD 技术实现了三反光学系统的波前误差检测。下一步工作将改进算法,提高 PD 技术的检测效率。

**参考文献:**


[1] Paxman R G, Thelen B J, Murphy R J. Phase-diverse adaptive optics for future telescopes [C]//SPIE, 2007, 6711: 671103.

[2] Mats G, Richard L K, Alex H, 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] L Fdahl 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.

[4] Wang Jianli, Wang Zongyang, Wang Bin, et al. Image restoration by phase-diverse speckle [J]. Opt Precision Eng, 2011, 19(5): 1165-1170. (in Chinese)
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] Zhang Liqin, Fei Jindong. Photoelectric correction methods applied to aero-optical effects [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(6): 580-583. (in Chinese)
张丽琴, 费锦东. 气动光学效应光电校正方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(6): 580-583.

[6] 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. (in Chinese)
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.

[7] Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm [J]. Acta Optics Sinica, 2010, 30(4): 1015-1019. (in Chinese)
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.

[8] Wang Xin, Zhao Dazun. Influence of noise to phase diversity wavefront sensing [J]. Acta Optics Sinica, 2009, 29(8): 2142-2146. (in Chinese)
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.

[9] Kendrick R L, Acton D S, Duncan A L, Experimental results from the lockheed phase diversity test facility [C]//SPIE, 1994, 2302: 312-322.

[10] Georges J A, Dorrance P, Gleichman K, et al. High-speed closed-loop dual deformable-mirror phase-diversity testbed[C]//SPIE, 2007, 6711: 671105.

[11] Jonathan A, Scott T, Sergio R, et al. Dynamic aberration control testbed for the characterization of multiple wavefront sensors[C]//SPIE, 2005, 6018: 60180R.

[12] Gonsalves R A, Chidlaw R, Tescher A J, et al. Wavefront sensing by phase retrieval, in application of digital image processing III[C]//SPIE, 1979, 207: 32-39.

[13] Paxman R G, Fienup J R. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity [J]. J Opt Soc Am A, 1988, 5(6): 914-923.

[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): 1072-7085.

[15] Fienup J R. Phase retrieval for undersampled broadband images [J]. J Opt Soc Am A, 1999, 16(7): 1831-1837.

[16] Baba N, Mutoh K. Measurement of telescope aberrations through atmospheric turbulence by use of phase diversity [J]. Appl Opt, 2001, 40(4): 544-552.