

文章编号 1004-924X(2012)02-0431-08

## 相位差异法目标函数的并行化改造

赵金宇<sup>1\*</sup>, 陈占芳<sup>2</sup>, 王 斌<sup>1</sup>, 汪宗洋<sup>1</sup>,  
张 楠<sup>1,3</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 吴元昊<sup>1</sup>, 张世学<sup>1</sup>

(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. 长春理工大学, 吉林 长春 130022; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 考虑自适应光学波前探测技术利用相位差异法来估算波前相位畸变和恢复图像时运算量较大, 难以用软件在 PC 平台上实现, 而使用数字信号处理(DSP)和现场可编程门阵列(FPGA)搭建计算平台虽然可使运算并行化从而缩短运算时间, 但其目标函数结构复杂, 因此, 本文利用泽尼克多项式的性质, 提出了一种相位差异目标函数的改造方法。给出了改造后的目标函数计算公式和梯度计算公式, 使相位差异法在每次计算目标函数时只进行多项式运算, 从而不仅方便了用 DSP 和 FPGA 的硬件实现, 也充分利用了硬件处理的并行性。设计了仿真实验和室内实际光路实验, 分别以分辨率板和光纤光束为例对模拟图像和实际采集图像进行了恢复。实验结果表明, 改造后的相位差异法仍具备较好的图像恢复能力, 光纤光束成像分辨率显著提高, 颗粒间轮廓清晰可见。

**关键词:** 波前探测; 相位差异; 图像恢复; 目标函数; 并行计算

**中图分类号:** TP391.4; O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122002.0431

## Parallelity improvement of object function for phase diversity

ZHAO Jin-yu<sup>1\*</sup>, CHEN Zhan-fang<sup>2</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, WANG Zong-Yang<sup>1</sup>,  
ZHANG Nan<sup>1,3</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, WU Yuan-hao<sup>1</sup>, ZHANG Shi-xue<sup>1</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*  
3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** The Phase Diversity (PD) method in adaptive optical waveform detection shows great computations when it is used to estimate the wave-front phase aberration and to restore the degraded images, and it is difficult to increase the speed of PD to achieve its real time application on a PC platform. The computational-hardware such as Digital Signal Processor(DSP) and Field Programming Gate Array(FPGA) is a proper way to improve its performance, however, the complex structure of the PD object function and plenty of Fourier transformations in each computation loop influence on its hardware implementation. According to the theory of Zernike polynomial, a method which utilizes polyno-

收稿日期: 2011-03-10; 修订日期: 2011-05-06.

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

mial operation instead of Fourier transformations is proposed to modify the PD object function. The modified computing formula and gradient formula are given, by which the computation of the PD object function only depends on the polynomials and the hardware implementation of DSP, FPGA and the parallelism of hardware processing are more easily. A test and an experimental platform are designed, and simulative images and grabbed images for a resolution plate and an optical fiber bundle are restored respectively. Experiment results indicate that the modified PD is still a good means to restore the degraded images, the optical fiber bundle has a higher resolution and its particle profile can be distinguished.

**Key words:** wavefront detection; phase-diversity; image restoration; object function; parallel processing

## 1 引言

大气湍流引起的波前相位畸变会随着地基望远镜的口径增大而愈加严重<sup>[1]</sup>,使其成像质量明显下降。1979年, Gonsalves 第一次提出的相位差异法(Phase-Diversity, PD)正是针对波前相位畸变的一种图像复原方法。该方法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。PD 光学系统结构简单清晰,成本低;不仅适用于点源目标,也适用于随机扩展目标。在图像复原方面有较好的性能,可以应用于光学检测领域,能够检测光学系统的像差、装调误差和镜面平整度等参数,是一种没有合适的平行光管条件下的光学检测方法<sup>[2]</sup>。因此,PD 技术是目前克服波前相位畸变发展的重要方向。

PD 的最大缺点是计算量大,一次完整的 PD 运算需要用数学最优化方法对目标函数进行多次迭代,而且目标函数中包含大量的矩阵运算和若干次傅里叶变换。为解决该问题,最直接的方法是用数字信号处理器(DSP)和现场可编程门阵列(FPGA)搭建硬件计算平台,但是相位差异法的目标函数结构复杂,每一次目标函数的评价运算都需要多次傅里叶变换,硬件实现也变得比较复杂。

本文利用泽尼克多项式的性质,提出了一种相位差异目标函数的改造方法,并给出了改造后的目标函数的计算式和它的梯度计算式。目标函数改造后,每一次的运算只包含矩阵的点乘和点加,不但易于硬件实现而且也能充分利用硬件并行运算的优势。对改造后的 PD 算法进行了仿真,并在本课题组原有实验平台基础之上<sup>[3]</sup>,对室内实际光路采集来的图像进行了实验。结果表明,改造后的 PD 算法对图像恢复有比较好的效果。

## 2 基本原理

PD 可以认为是相位差异散斑法(Phase-Diverse Speckle, PDS)的一个特例,也就是单帧双通道的 PDS。因此,为了将理论部分阐述得更具普遍性,这里讨论的都是 PDS 问题。图 1 是 PDS 系统的光路示意图,具有焦面和离焦面 2 个采集通道,根据实际情况可以增加采集通道的数量。PDS 图像恢复问题可以看作是已知受扰信号的模值,求原信号相位的反演,也可以看作是一个自适应滤波器。多通道的使用改善了反演问题的病态性,多帧短曝光图像的使用提高了恢复目标的信噪比<sup>[4]</sup>。

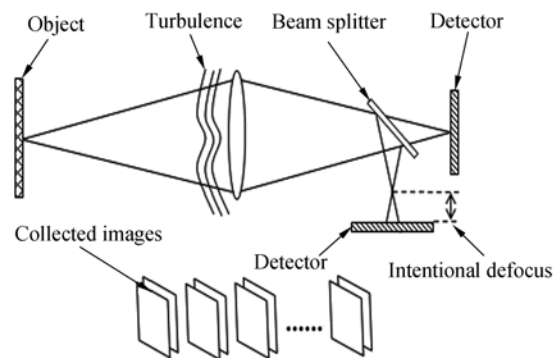


图 1 相位差异散斑法图像采集示意图

Fig. 1 Data-collection scheme for PDS imaging

### 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如下<sup>[1]</sup>:

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

其中,  $d$  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。

近场条件下,点扩散函数表示为<sup>[1]</sup>:

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

其中,  $\mathcal{F}^{-1}$  表示傅里叶逆变换,  $v$  表示光瞳面坐标,  $P$  表示光瞳函数。  $H = P(v)e^{i\phi(v)}$  称为广义光瞳函数。  $\phi$  表示波前相位, 可以分解成一组泽尼克多项式的和:

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

其中,  $\alpha_m$  为实数, 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,  $\theta$  表示已知的固定离焦相位。

## 2.2 评价函数

PD 的数学模型可以理解为一个自适应滤波器, 在 Gaussian 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<sup>[5-7]</sup>, 在频域表示为:

$$L(f, \{\alpha\}_t) = \frac{1}{2N} \sum_u \left( \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |D_{tc}(u) - FS_{tc}(u)|^2 + \gamma |F(u)|^2 \right), \quad (4)$$

其中,  $u$  表示频域坐标,  $T$  和  $C$  分别表示使用的帧数和通道数;  $N$  表示单幅图像的像素总数;  $\{\alpha\}_t$  表示需要求解的第  $t$  帧泽尼克系数;  $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换,  $D_{tc} = \mathcal{F}\{d_{tc}\}$ ,  $F = \mathcal{F}\{f\}$ ,  $S_{tc} = \mathcal{F}\{s_{tc}\}$ ; 等式右边括号内第二项为 Tikhonov 正则项<sup>[8-11]</sup>, 可以提高算法稳定性和收敛速度,  $\gamma$  表示非负的正则项系数。

利用最大似然估计理论, 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<sup>[6]</sup>。其中, 目标估计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。

$$L(\{\alpha\}_t) = \frac{1}{2N} \sum_u \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |D_{tc}|^2 - \frac{\left| \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C D_{tc} S_{tc}^* \right|^2}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |S_{tc}|^2} \right], \quad (5)$$

$$F = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C D_{tc} S_{tc}^*}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |S_{tc}|^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_m} = \frac{-2}{N} \sum_{x, y \in \chi} Z_m(x, y) \text{Imag} \left( \sum_{c=1}^C V_{tc} \right), \quad (7)$$

$$V_{tc} = H_{tc}^* \mathcal{F}(h_{tc} \text{Real}[\mathcal{F}^{-1}(F^* D_{tc} - |F|^2 S_{tc})]), \quad (8)$$

其中,  $H_{tc}^*$  表示第  $t$  帧第  $c$  通道的广义光瞳函数的共轭,  $h_{tc} = \mathcal{F}^{-1}(H_{tc})$ ;  $\text{Imag}()$  表示取指定复数的虚部;  $\text{Real}()$  表示取指定复数的实部。

当各个通道噪声不一致时, 目标函数改为<sup>[12]</sup>:

$$L(\{\alpha\}_t) =$$

$$\frac{1}{2N} \sum_u \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |D_{tc}|^2 - \frac{\left| \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} D_{tc} S_{tc}^* \right|^2}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |S_{tc}|^2} \right], \quad (9)$$

$$F = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} D_{tc} S_{tc}^*}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |S_{tc}|^2}, \quad (10)$$

$$V_{tc} = \sigma_c^{-2} H_{tc}^* \mathcal{F}(h_{tc} \text{Real}[\mathcal{F}^{-1}(F^* D_{tc} - |F|^2 S_{tc})]), \quad (11)$$

其中,  $\sigma_c^{-2}$  为第  $c$  通道的噪声读出方差的倒数。

公式(10)是多通道之间读出噪声不一致时的目标图像的频谱。目标函数对各个自变量的偏导数仍按公式(7)计算, 只是其中的  $V_{tc}$  用公式(11)来求得。

评价函数确定后, 图像恢复过程就可以描述为数学最优化问题,  $\{\alpha\}_t$  便是待优化变量。通常应用 LBFSGS 方法进行搜索<sup>[13-15]</sup>。

## 3 目标函数的改造

在 PDS 的迭代过程中, 每次计算目标函数和它的偏导数时, 都要先根据给定的  $\{\alpha\}_t$  计算  $S_{tc}$ , 而每一个  $S_{tc}$  的计算都需要 4 次双精度的傅里叶变换, 这就增加了 PDS 算法的硬件实现难度, 并且降低了 PDS 算法硬件实现之后的并行效率, 而且增加了 DSP 和 FPGA 之间的数据传递量。除此之外便都是简单的点运算, 便于用 FPGA 来实现。所以对 PDS 目标函数进行改造, 使其适应硬件处理结构, 关键在于对  $S_{tc}$  的求解函数的改造。

众所周知, 泽尼克多项式函数集是一个在单位圆上的完全集, 所以广义光瞳函数同样可以用泽尼克多项式函数进行拟合。应用这一性质得到:

$$H = \sum_{m=1}^M \beta_m Z_m(v), \quad (12)$$

公式(12)也是奈波尔-泽尼克和扩展泽尼克推导的基础。则由此得到的第  $t$  帧第  $c$  通道的新的广

义光瞳函数表示为:

$$H_{tc} = \sum_{m=1}^M \beta_m Z_m(v) e^{i\theta_c(v)}, \quad (13)$$

其中,  $\theta_c(v)$  是通道  $c$  与通道 1 之间的已知的固定的波前差异。下面求出光学传递函数:

$$S_{tc} = \mathcal{F}\{|\mathcal{F}^{-1}\{H_{tc}\}|^2\} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \beta_m \beta_n^* A_{mnc}, \quad (14)$$

其中:

$$A_{mnc} = \mathcal{F}\{\mathcal{F}^{-1}[Z_m(v) e^{i\theta_c(v)}] \mathcal{F}^{-1}[Z_n(v) e^{i\theta_c(v)}]^*\}. \quad (15)$$

$A_{mnc}$  在 PDS 的初始化过程就可以计算得到, 而对于固定的 PDS 光路,  $A_{mnc}$  是不变的, 可以事先生成、存储在 FPGA 中作为一个常数矩阵。那么在 PDS 的迭代过程中对目标函数的计算只是简单的使用公式(14)用多项式来求得  $S_{tc}$ , 而多项式运算非常适合用 FPGA 搭建并行运算电路。

目标函数对  $\{\beta\}_i$  的偏导数计算也只是简单地 对多项式求导, 下面给出改造后的目标函数对各个自变量的偏导数公式:

$$\frac{\partial L}{\partial(\text{Real}(\beta_m))} = -\frac{1}{N} \text{Real}\left(\sum_{x,y \in \chi} \sum_{c=1}^C R_{tcn} Q_{tc}\right), \quad (16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial(\text{Imag}(\beta_m))} = -\frac{1}{N} \text{Real}\left(\sum_{x,y \in \chi} \sum_{c=1}^C I_{tcn} Q_{tc}\right), \quad (17)$$

$$Q_{tc} = F^* D_{tc} - |F|^2 S_{tc}, \quad (18)$$

$$R_{tcn} = \sum_{m=1}^M (\beta_m^* A_{mnc} + \beta_m A_{mnc}), \quad (19)$$

$$I_{tcn} = \sum_{m=1}^M i(\beta_m^* A_{mnc} - \beta_m A_{mnc}). \quad (20)$$

本文这种目标函数的改造方法的优点主要有:

(1) 在 PDS 求解过程中的运算都为多项式运算, 方便 FPGA 硬件实现, 并且提高了目标函数求解的并行化程度;

(2) 此目标函数可以处理光瞳透光率不同的光学系统, 透光率实际就是  $\sum_{m=1}^M \beta_m Z_m(v)$  的幅值;

但是这种方法也存在以下缺点:

(1) 对于实际工程, 该方法只适用于 FPGA 硬件实现, 而不适合在 PC 机上运行, 因为此时该算法的运算复杂度为  $O(M \times M \times N)$ , 而改造前的算法的运算复杂度仅为  $O(N \log_2 N)$ , 其中,  $M$

是 PDS 在求解过程中取泽尼克项总数。

(2) 该方法得到的实际上是广义光瞳函数, 直接对得到的广义光瞳函数求相位角获得的波前将产生相位缠绕问题, 解它的相位缠绕有一定的难度, 因为它的残差不是高斯分布的。

(3) 相比改造前的目标函数, 改造后的目标函数的参数增加很多, 因为对于透光率在整个光

瞳上一致的情况下, 用  $P(v) e^{i \sum_{m=1}^{M_1} \alpha_m Z_m(v)}$  表示广义光瞳所用到的泽尼克项的总数  $M_1$  要比用

$\sum_{m=1}^{M_2} \beta_m Z_m(v)$  表示与前者相近的广义光瞳所用的泽尼克的总数  $M_2$  少很多; 并且  $\alpha$  为实数, 而  $\beta$  为复数。

在实际工程中, 推导得出  $M_2$  取多大能够满足需要很有难度, 并且根据不同波前的 rms 值和 高频分量的比重,  $M_2$  的大小也会有很大的波动, 这里只是给出了定性的分析: 用若干随机波前来

构造广义光瞳函数, 再用  $\sum_{m=1}^{M_2} \beta_m Z_m(v)$  拟合这个广义光瞳函数, 然后用拟合得到的广义光瞳函数的相位角与给定的波前做比较, 得到拟合的残差, 并以残差的标准差作为 Y 轴,  $M_2$  的数量作为 X 轴, 绘出曲线。这里给出 2 个分析曲线作为示例。对于给定的 rms = 0.243 6 $\lambda$  的波前, 所绘的分析曲线如图 2 所示。

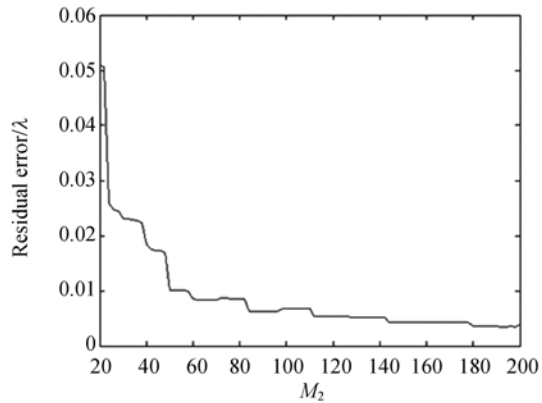


图 2 rms 为 0.243 6 $\lambda$  时的分析曲线

Fig. 2 Curve for rms in 0.243 6 $\lambda$

对于给定的 rms = 0.487 2 $\lambda$  的波前, 所绘的分析曲线如图 3 所示。大量的数据测试显示, 对于恢复图像来说,  $M_2$  取到 200 是可以满足工程需要的。当被测系统的 rms < 0.4  $\lambda$  时,  $M_2$  取到

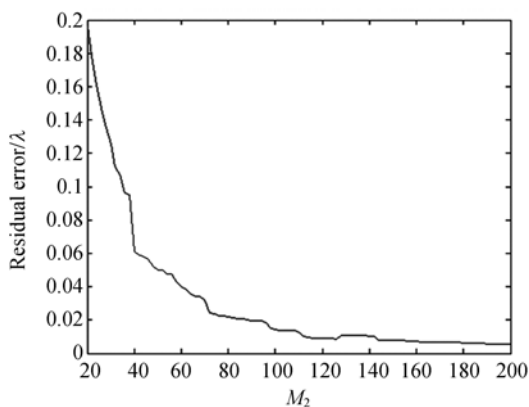


图 3 rms 为 0.487 2λ 时的分析曲线

Fig. 3 Curve for rms in 0.487 2λ

100 已经足够。但是这样的运算规模,以目前的 CPU 运算速度,在 PC 平台上是不可能达到实时的,必须用 FPGA 和 DSP 来搭建运算平台。

另一个需要说明的问题是用扩展泽尼克直接表示各个离焦面上的场分布,得到不同离焦面上的点扩散函数,然后进一步计算得到光学传递函数,同样可以使 PDS 在迭代过程中仅使用多项式运算,目标函数和其导数的求解过程和本文方法也基本一致,仅公式(15)中的  $A_{mmc}$  不同。本课题组之前已经有了一些相关的尝试。但是用扩展泽尼克方法,各个通道之间的波前差异只允许离焦差异,而实际情况下各个通道之间难免有其它波前误差,一些机械装调误差同样可以等效为通道间的波前误差。即使通道间的这些波前差异被测量得到,用扩展泽尼克也无法表示各个通道之间的这些已知误差,而用式(13)则可以表示通道之间的各种波前差异。另外,扩展泽尼克是用迪拜衍射推导得到的,它最大的优势是可以处理大数值孔径问题,然而既使用了光学传递函数,就已经把光学系统假设为一种线性系统,它也同时丧失了处理大数值口径的能力。

## 4 实验设计及结果分析

### 4.1 仿真实验

图 4(a)为理想的目标图像,图 4(b)和图 4(c)分别为模拟生成的焦面图像和离焦面图像。目前算法还处于 MATLAB 仿真阶段,如第 2 节与第 3 节所述,PC 平台上的效率较低,这里仅是验证经过目标函数改造后的 PDS 算法的图像恢复能

力,因此目前仅实现了单帧双通道的 PDS,并且  $M_2$  只取到 18 项。图 4(d)为恢复后的图像。恢复后,图像的清晰度明显得到提高,实验结果定性验证了改造后的 PDS 算法的图像恢复能力。

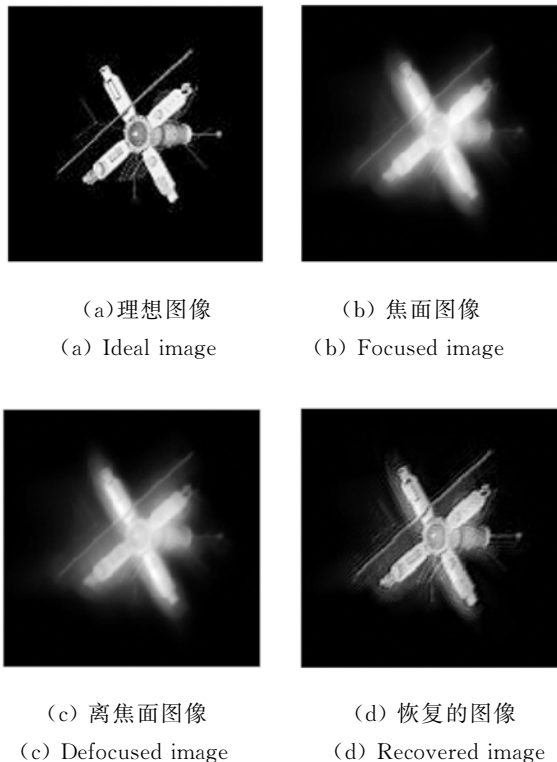


图 4 仿真图像及恢复结果

Fig. 4 Simulative images and result

### 4.2 室内实际光路实验

#### 4.2.1 室内光路实验设计

此实验仍然使用前次实验系统<sup>[3]</sup>,但是本次实验只是测试文中的改造方法对图像恢复是否有效,所以并没有加入热吹风。

如图 5 所示,实验系统主要由目标光源、扰动

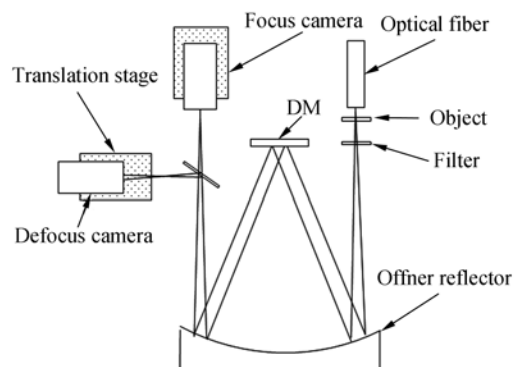


图 5 实验系统结构图

Fig. 5 Structure of experimental system

模拟和采集成像 3 个部分组成。实验平台布局如图 6 所示。

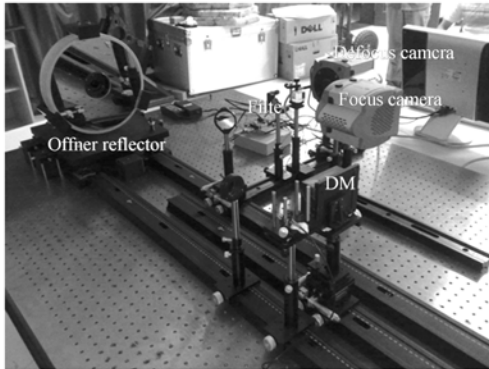


图 6 实验平台布局

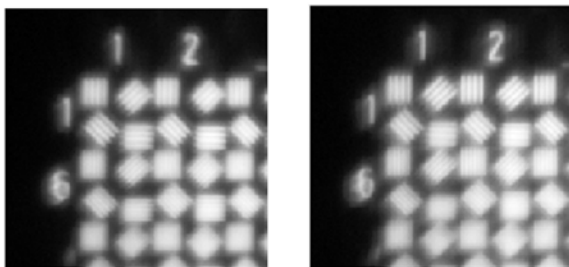
Fig. 6 Experimental layout

实验光源采用光纤光源;目标分别用二号分辨率板和光纤光束;扰动模拟是利用变形镜模拟系统像差;采集成像所用的是两台同 CCD 芯片不同型号的科学级 CCD 相机,利用外触发模式同步采集焦面和离焦面上的两幅图像。

#### 4.2.2 室内实验结果及分析

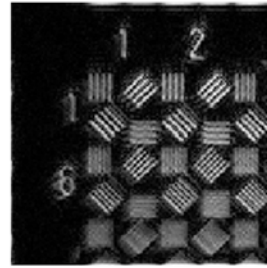
实验系统焦距为 0.895 m,中心波长为 635 nm,出瞳口径(即变形镜口径)为 0.05 m,焦深约为 0.407 mm。实验中选取离焦量为 1.6 mm,固定离焦相位 PV 值约为 1 个波长。光学系统截止频率约为 72 lp/mm,相机像元尺寸为 13  $\mu\text{m}$ ,截止频率为 38.5 lp/mm,用变形镜加入扰动。分别用二号分辨率板和光纤光束作为目标,在同一时刻将采集的焦面图像和离焦面图像分别取目标同一位置 128 pixel $\times$ 128 pixel 大小的区域,曝光时间为 20 ms,连续采集。

分别对两种目标图像的恢复结果进行分析。如图 7 所示,以二号分辨率板为目标,恢复后的图



(a) 焦面图像  
(a) Focused image

(b) 离焦面图像  
(b) Defocused image



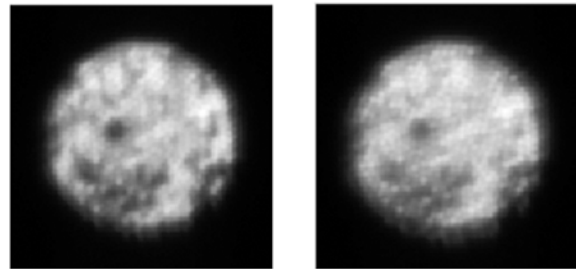
(c) 恢复的图像

(c) Recovered image

图 7 实验采集的图像及恢复结果

Fig. 7 Original images and result

像可以看清第 7 组,35.4 lp/mm,接近相机的截止频率。如图 8 所示,光纤光束成像分辨率得到显著的提高,颗粒间轮廓清晰可辨。

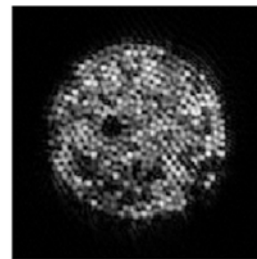


(a) 焦面图像

(a) Focused image

(b) 离焦面图像

(b) Defocused image



(c) 恢复的图像

(c) Recovered image

图 8 实验采集的图像及恢复结果

Fig. 8 Original images and result

## 5 结 论

本文利用泽尼克多项式的性质,提出了一种相位差异目标函数的改造方法,使相位差异在每次计算目标函数时只进行多项式运算,从而便于

用 DSP 和 FPGA 硬件实现,也充分利用了硬件处理的并行性。分析了此种方法的局限性和 PDS 过程中需要的搜索变量的维数,实际测试表明,改造后的相位差异法在仿真实验和室内实际光路实验都取得了较好的效果。由于目前只实现了 MATLAB 版本的程序,所以在 PDS 的运算过程中只用了单帧双通道,并且用于拟合广义光瞳函

数的参数只取前 18 项,还远不及在第 3 节分析的可以满足实际需要的 100 项,所以本文中的实验并不充分,仅验证了此种方法具备一定的图像恢复能力。下一步工作将引入 GPU 高速并行处理器,将算法移植到 GPU 平台,提高实验效率;同时,本文实验均是室内条件,下一步也将进行外场实验。

#### 参考文献:

- [1] ROGGEMANN 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] 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)
- [4] SELDIN J H, PAXMAN R G. Phase-diverse speckle reconstruction of solar data[C]. *Image Reconstruction and Restoration, Proc. SPIE*, 1994, 2302:268-280.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] VOGEL C R. *Computational Methods for Inverse Problems* [M]. Philadelphia: SIAM Press, 2002.
- [9] VOGEL C R, CHAN T, PLEMMONS R. Fast algorithms for Phase Diversity-Based Blind Deconvolution[C]. *Adaptive Optical System Technologies, Kona, Hawaii, USA, SPIE*, 1998, 3353:994-1005.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 王斌,汪宗洋,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, *et al.*. Phase-diverse Speckle with two cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(6):1384-1390. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] ZHU C, BYRD R H, LU P, *et al.*. LBFSG-B: Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization[R]. *Report NAM-11, EECS Department, Northwestern University*, 1994.
- [15] PARKER J A, KENYON R V, TROXEL D E. Compare of interpolation methods of image resampling[J]. *IEEE Trans. Med. Imaging*,1983,MI 22:31-39.

## 作者简介:



**赵金宇**(1976—),男,内蒙古通辽人,副研究员,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事地基空间目标探测设备的软件设计、图像处理、电控总体工作。E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn



**陈占芳**(1980—),男,河北邢台人,讲师,2003年、2006年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事无损检测、图像处理、数值分析等方面的研究。E-mail: chenzhanfang@cust.edu.cn



**王 斌**(1980—),男,吉林省吉林市人,助理研究员,2003年于长春光机学院获得学士学位,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、数值分析、数学最优化以及图像处理与恢复方面的研究。E-mail: eating-been@sohu.com



**汪宗洋**(1986—),男,安徽巢湖人,实习研究员,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,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



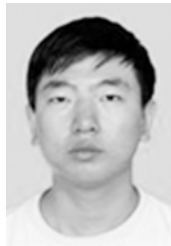
**张 楠**(1984—),女,辽宁锦州人,博士研究生,2007年于东北师范大学获得学士学位,主要从事并行图像处理方面的研究。E-mail: zhangn599@yahoo.com.cn



**王建立**(1971—),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: kennth07@163.com



**张世学**(1980—),男,吉林长春人,2003年于吉林大学获得学士学位,2009年于澳门大学获得博士学位,主要从事计算机科学图形学和数字图像处理等方面的研究。E-mail: zhangsx@mail.ustc.edu.cn