

文章编号 1004-924X(2011)05-1165-06

相位差异散斑法图像复原技术

王建立^{1*}, 汪宗洋^{1,2}, 王斌¹, 吴元昊¹, 赵金字¹, 李宏壮¹, 董磊¹, 张世学¹

(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. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了克服大气湍流和光学成像系统像差引起的波前相位畸变, 提出利用相位差异散斑法同时采集焦面和离焦面通道的单帧短曝光图像来估算波前相位畸变。结合夏克哈特曼波前探测器设计了针对扩展目标的相位差异散斑法高分辨率成像和相位估计对比实验, 通过定量移动高精密平移台获得焦面和离焦面图像, 并将解算的波前表面形与夏克哈特曼波前探测器实测的波前表面形进行对比, 验证了相位差异散斑法提高图像分辨率和正确解算波前相位的能力。实验结果表明, 估算的波前相位表面形和夏克哈特曼实测表面形趋势有较好的一致性, 恢复后图像分辨率提高了12%, 表明该方法是大口径光电成像系统较为理想的图像恢复技术之一。

关键词: 相位差异散斑; 波前畸变; 图像恢复; 相位估计

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.1165

Image restoration by phase-diverse speckle

WANG Jian-li^{1*}, WANG Zong-yang^{1,2}, WANG Bin¹, WU Yuan-hao¹,
ZHAO Jin-yu¹, LI Hong-zhuang¹, DONG Lei¹, ZHANG Shi-xue¹

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)*

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

Abstract: In order to overcome the wave-front distortion caused by atmosphere turbulence and optical system aberration, the Phase-Diverse Speckle (PDS) method was used to collect simultaneously two or more short-exposure optical images formed by focusing or defocusing to estimate both the object and the wave-front phases. To verify the improvement of image resolution and phase estimation of PDS method, a comparison experiment on high-resolution imaging and phase estimation comparison was carried out based the PDS method and a Shack-Hartmann sensor. By shifting the high accurate translation stage at a certain distance, the focusing and defocusing images were obtained, then the wavefront phase based on the image was compared with that from the Shack-Hartmann sensor. Experiment results indicate that the estimated wave-front phase is highly according with that detected by Shack-Hartmann and the resolution of the restored image can increase by 12% compared with the origin im-

收稿日期: 2010-10-12; 修订日期: 2010-10-29.

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

age formed by focus plane. In conclusion, the proposed method can be used to restore the degradative images in large aperture telescopes.

Key words: Phase-Diverse Speckle(PDS); wave-front aberration; image restoration; phase estimation

1 引言

大气湍流和成像系统误差引起的波前相位畸变严重制约着地基大口径望远镜的分辨率,使其无法获得接近衍射极限的理想图像^[1]。相位差异散斑法(Phase-Diverse Speckle, PDS)正是针对波前相位畸变发展起来的图像复原方法,它综合了相位差异(Phase Diversity, PD)和散斑成像两种事后图像处理方法的优点,既有前者校正畸变的能力,也有后者增加信息量的优势。PDS 光学系统结构简单清晰,成本低;不仅适用于点源目标,而且也适用于随机扩展目标。除了在图像复原方面有较好的性能,PDS 还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,镜面平整度等参数,为没有合适的平行光管条件下的光学检测提供了新的思路和方法^[2]。因此,PDS 技术是目前克服波前相位畸变发展的一个重要方向,有着许多不可替代的优点,随着硬件水平的不断提高,其计算量大的缺点也逐步得到了改善。

相位差异法最早由 Gonsalves 提出,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。Paxman 等将 PD 理论进一步完善^[3-5],结合散斑成像技术,提出在成像系统的焦面和离焦面上同时采集一对或者多对短曝光图像的相位差异散斑法,并给出了高斯噪声和泊松噪声情况下的数学模型,大大提高了 PDS 在噪声情况下的估计精度。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 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]。

本文在以上研究的基础上,利用高精度平移台移动一台高速致冷相机分别采集成像系统焦面和离焦面通道上的单帧短曝光图像,通过两幅图像之间的相位差异联合估计目标和波前相位。本文结合夏克哈特曼波前探测器设计了高分辨率成像和相位估计对比实验,估计的波前相位面形和夏克哈特曼实测面形趋势有较好的一致性。恢复

后的图像细节明显增强,图像分辨率提高了 12%。

2 基本原理

图 1 表示具有焦面和离焦面两个通道的 PDS 图像采集系统。离焦通道在原有光路基础上加入分光镜并引入已知离焦量。PDS 图像恢复问题可以看作是已知受扰动图像求解目标和波前相位的反演问题。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。

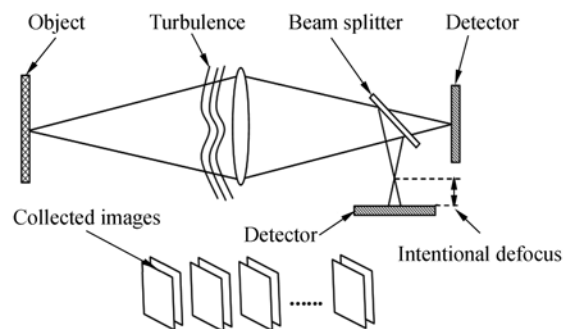


图 1 相位差异散斑法图像采集示意图

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^[1]:

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

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。

近场条件下,点扩散函数表示为^[1]:

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

\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。 ϕ 表示波前相位,可以分解成一组泽尼克多项式的和,

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

式中 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

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],在频域表示为:

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

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 t 帧泽尼克系数。等式右边括号内第二项为 Tikhonov 正则项^[6-7], 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。

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^[4]。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。

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

$$F = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C D_k S_k^*}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |S_k|^2}. \quad (6)$$

评价函数确定后,图像恢复过程就可以描述为非线性优化求极值的过程。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)^[10-11],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 实验系统组成

实验系统主要由目标光源、扰动模拟、采集成像和辅助检测 4 个部分组成,如图 2 所示。实验对扩展目标成像,利用变形镜模拟扰动像差,通过高精度平移台移动相机采集多通道图像,同时利用夏克哈特曼波前探测器校验算法恢复波前信息

的能力。实验平台布局如图 3 所示。

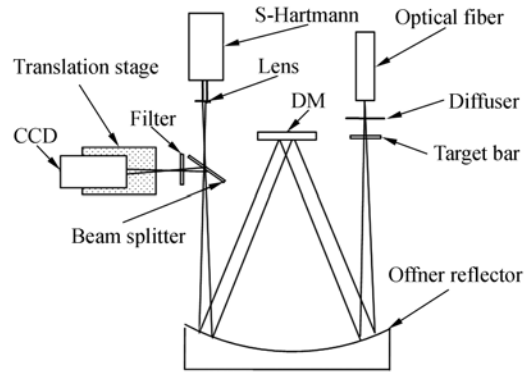


图 2 实验系统结构图

Fig. 2 Structure of experimental system

目标光源部分主要由光纤光源、漫反射体和目标板组成,目标板使用国产 WT1005-62 标准 2 号分辨率板。由于夏克哈特曼波前探测需要点光源目标,综合考虑微透镜阵列成像靶面尺寸和光纤光束口径大小,本实验可以将光纤光束近似作为点目标,光路中只需要移除目标光源部分的漫反射体和目标板即可,实验验证效果良好。扰动模拟部分通过给变形镜加固定电压产生像差,在一段时间内可以近似认为系统像差不变,因此,通过高精度平移台移动低噪致冷相机,可以实现多通道采集图像的目的。

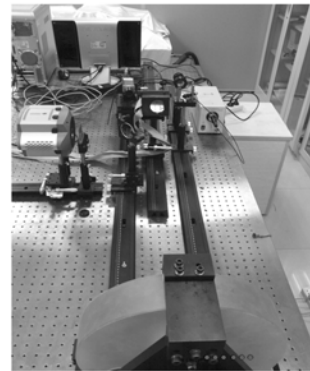


图 3 实验平台布局

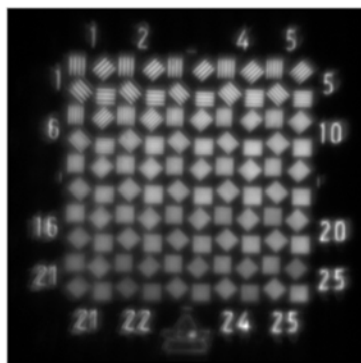
Fig. 3 Experimental layout

实验光路中使用 Offner 反射镜替代传统 PD 实验光路中的透镜消除色差影响。其作用是将目标光源发散球面波反射为平行光入射变形镜,平行光再经过反射变成会聚光波成像。设计光路让入射主光线和会聚主光线平行,实验平台使用滑轨定位,大大提高了装调精度。

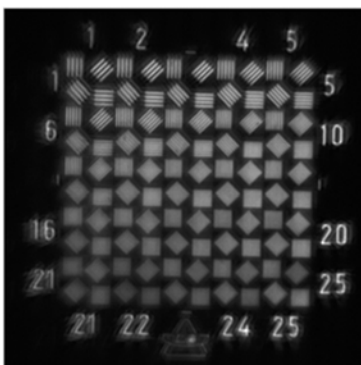
4 实验结果与分析

实验系统焦距为 0.895 m, 中心波长为 532 nm, 出瞳口径(即变形镜口径)为 0.05 m, 焦深约为 0.34 mm。离焦图像应该为 4 倍焦深左右, 实验中选取离焦量为 1.5 mm, 固定离焦相位 PV 值约为 1 个波长。相机像元尺寸为 13, 截止分辨可以达 38.5 lp/mm。先使用 2 号分辨率板作为目标。焦面通道图像和离焦面通道图像分别取像素大小区域的 16 位灰度图像。恢复前焦面图像如图 5(a) 所示, 肉眼只能观察到第 5 组, 31.5 lp/mm。恢复后图像如图 5(b) 所示, 经过辨认能清晰观察到第 7 组, 35.4 lp/mm。分辨率提高了 12%。

移除分辨率板, 将光纤光束作为近似点目标, 利用夏克哈特曼波前探测器实时采集波前相位信



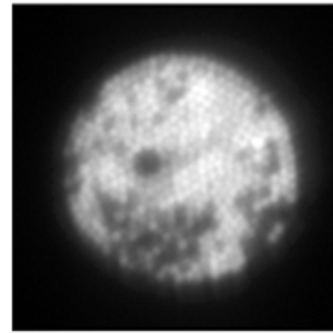
(a) 焦面图像
(b) Focused image



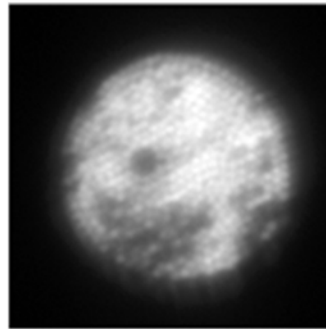
(b) 恢复图像
(b) Recovered image

图 4 焦面图像和恢复图像对比

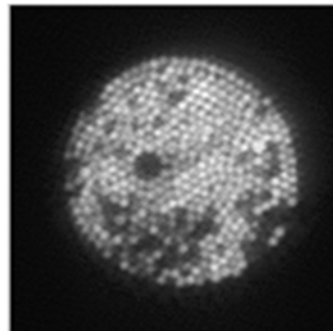
Fig. 4 Comparison between focused and recovered images



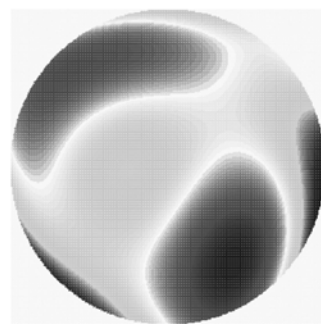
(a) 焦面图像
(a) Focused image



(b) 离焦面图像
(b) Defocused image



(c) 恢复图像
(c) Recovered image



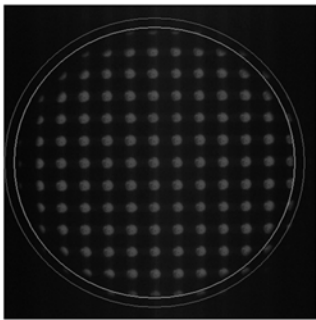
(d) 估计相位
(d) Estimated phase

图 5 实验采集的图像及恢复结果

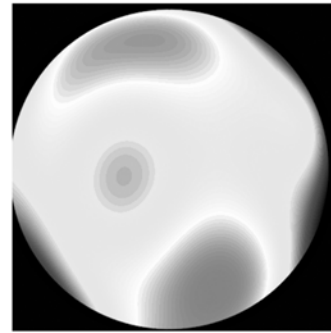
Fig. 5 Original images and recovered result

息,如图6所示,验证PDS算法恢复波前相位信息的能力。焦面通道图像和离焦面通道图像分别取像素大小的区域,解算得到恢复后的图像和估计相位,如图5所示。恢复后,光纤光束成像分辨率显著提高,其中坏点细节明显,颗粒间轮廓清晰可辨。

对比图6(d)和图7(b),PDS算法估计的波前面形和夏克哈特曼波实测波前面形趋势基本一致。这可以说明在使用优化算法寻找评价函数极小值过程中,搜索的泽尼克系数变量没有陷入局部最优,即算法解算出了接近最优的波前相位信息。PDS解算的面形PV值为1.471,RMS值为0.284;哈特曼解算的面形PV值为1.819,RMS值为0.298。两幅波前相位面形存在差异的原因有:噪声影响算法解算精度,但是对夏克哈特曼波前探测没有影响;采集成像光路和辅助检测光路通过分光镜分光,会引入未知像差;哈特曼相机镜头装调时存在 $1\sim 3^\circ$ 旋转等。



(a)阵列图
(a) Array image



(b)波前相位
(b) Wave-front phase

图6 夏克哈特曼采集波前相位

Fig.6 Wave-front phase by Shack-Hartmann

5 结 论

本文利用Offner反射镜消除色差影响并简化实验光路,实现了相位差异散斑技术的图像采集和图像恢复。恢复后的图像细节明显增多,图像分辨率提高了12%。结合夏克哈特曼波前探测器设计的相位估计对比实验,算法解算的波前相位面形和夏克哈特曼实测面形趋势有较好的一致性,证明了PDS算法有提高图像分辨率和正确解算波前相位的能力。因此,该方法是大口径光电成像系统较为理想的图像恢复技术。本文实现了图像恢复和相位估计,但并未对采集图像进行实时恢复,在今后的工作中,我们将引入高速并行处理器,希望大幅度提高算法运算能力。

参考文献:

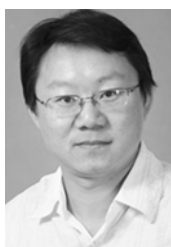
- [1] ROGGEMANN M C, WELSH B M. *Imaging Through Turbulence* [M]. Washington: CRC Press, 1996.
- [2] 吴元昊,王斌,赵金宇,等.利用相位差异技术恢复宽带白光图像[J]. *光学精密工程*,2010,18(8):1849-1854.
WU Y H, WANG B, ZHAO J Y, *et al.*. Restoration of broadband white light image using phase diversity technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1849-1854.
- [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[C]. *Adaptive Optical System Technologies*,

- Kona, Hawaii, USA. 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] 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.
- [11] 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



赵金宇(1976—),男,内蒙通辽人,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、电控总体等方面的研究。E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn



汪宗洋(1986—),男,安徽巢湖人,硕士研究生,2008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



董磊(1982—),男,山东济宁人,2004年、2007年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为激光物理与技术和傅里叶光学。E-mail: nodepression@126.com



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研究所获得博士学位,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



李宏壮(1980—),男,黑龙江巴彦人,助理研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2008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,主要从事主动光学、光学设计和光学测试的研究。E-mail: bayanjilin@yahoo.com.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,主要从事数值分析、数学最优化以及图像处理与恢复等方面的研究。E-mail: eatingbeen@sohu.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