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,吴元吴¹,赵金宇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,并将解算的波前面形与夏克哈特曼波 前探测器实测的波前面形进行对比,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,估算的波前相位面形和夏克哈特曼实测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

 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 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 simultaneouslly 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 camparied 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-

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

收稿日期:2010-10-12;修订日期:2010-10-29.

age formed by focus plane. In conclustion, 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 松噪声情况下的齿计精度。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,利用高精密平移 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]:

$$d(x) = f(x) * s(x) + n(x)$$
, (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]:

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

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。 ∮ 表示波前相位,可以分解成一组 泽尼克多项式的和,

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

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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:

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

$$(4)$$

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,目标估计式是推导评价函数 的中间过程,具有维纳滤波形式,可以有效地降低 噪声影响。

$$L(\{\alpha\}_{t}) = \frac{1}{2N} \sum_{u} \left[\sum_{t=1}^{T} \sum_{c=1}^{C} |D_{k}|^{2} - \frac{\left| \sum_{t=1}^{T} \sum_{c=1}^{C} D_{k} S_{k}^{*} \right|^{2}}{\gamma + \sum_{t=1}^{T} \sum_{c=1}^{C} |S_{k}|^{2}} \right]$$

$$F = \frac{\sum_{t=1}^{T} \sum_{c=1}^{C} D_{k} S_{k}^{*}}{\gamma + \sum_{t=1}^{T} \sum_{c=1}^{C} |S_{u}|^{2}} .$$
(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 高精密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。





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 1~3°旋转等。



(a)**阵列图** (a) Array image

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.
 WUYH, WANG B, ZHAO JY, et al.. Restora-

tion 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.



(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 测器设计了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。

- [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,

作者简介:



王建立(1977一),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



汪宗洋(1986一),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



吴元昊(1977一),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



王 斌(1980一),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 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.



赵金宇(1976一),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



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







张世学(1980一),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