

文章编号: 1003-501X(2010)12-0025-05

基于相位差异的图像复原方法

汪宗洋^{1,2}, 王建立¹, 王 斌¹, 吴元昊¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 相位差异法利用焦面和离焦通道图像存在的固定离焦相位差为先验信息, 联合估计波前相位和目标。本文设计了相位差异图像复原实验, 利用变形镜模拟大气湍流扰动, 通过 Offner 反射镜搭建反射式成像系统, 消除了色差影响和简化了实验光路。实验结果表明, 恢复后图像的分辨率提高了 12%, 验证了相位差异法提高图像分辨率和解算波前相位的能力。因此该方法是大大口径光电成像系统克服波前畸变较为理想的图像恢复技术。

关键词: 相位差异; 波前畸变; 图像复原; 相位估计

中图分类号: TH703; TP391

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.12.005

Image Restoration Based on Phase Diversity

WANG Zong-yang^{1,2}, WANG Jian-li¹, WANG Bin¹, WU Yuan-hao¹

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

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

Abstract: Phase Diversity (PD) method estimates both the wave-front phase and object by two focused and defocused images with known phase as the prior information. An image restoration experiment by using PD method was designed. The wave-front phase aberration caused by atmosphere turbulence was simulated by using the deformable-mirror. Due to simplifying the optical system and eliminating the effect of chromatic aberration, the Offner reflector was used to design the reflective imaging system. Experiment results indicate that, compared with the origin image, the resolution of the restored image can increase by 12% and the ability of improving image resolution and phase estimation is verified. So the proposed method can be used as a good means to restore the degradative images in the large aperture telescope.

Key words: phase diversity; wave-front aberration; image restoration; phase estimation

0 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]。相位差异法(Phase Diversity, PD)正是针对波前相位畸变发展起来的图像复原方法, 它通过分光获得增加的成像通道, 利用各通道之间已知的固定相位差异解算波前和恢复目标。PD 光学系统结构简单, 同时适用于点源目标和随机扩展目标。除了在图像复原方面有较好的性能, PD 还可以应用于拼接镜共相检测, 光学系统辅助装调等领域^[2], 为没有合适的平行光管和点源目标条件下的光学检测, 提供了新的思路和方法。因此 PD 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^[3], 计算量大的缺点将不再是制约 PD 发展的瓶颈。

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并恢复出目标。Paxman 等将 PD 理论进一步完善, 结合散斑成像技术,

收稿日期: 2010-07-23; 收到修改稿日期: 2010-08-21

基金项目: 中国科学院三期创新项目

作者简介: 汪宗洋(1986-), 男(汉族), 安徽巢湖人。硕士研究生, 主要研究工作是波前探测。E-mail: wzy1986@mail.ustc.edu.cn。

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 PD 在噪声情况下的估计精度^[4-6]。Vogel 等利用反演问题相关理论, 提出了快速数值解法^[7-8]。Löfdahl 等已经将相位差异理论成功地应用于太阳观测领域^[9-10], 获得了高分辨率的太阳表面组织图像。

本文在以上研究的基础上, 采用高精密平移台移动高速制冷 CCD 相机获得已知离焦量信息。利用同时采集到的焦面和离焦通道单帧短曝光图像对目标和波前相位进行联合估计。设计了相位差异图像复原实验, 恢复后的图像细节明显, 图像分辨率提高了 12%。

1 基本原理

图 1 表示具有焦面和离焦面两个通道的 PD 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。PD 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。

1.1 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:

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

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]

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

式中: 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^[1]:

$$\phi(v) = \theta(v) + \sum_m \alpha_m Z_m(v) \quad (3)$$

式中: α_m 表示第 m 项系数, 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。

1.2 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做似然函数^[4]。为了克服噪声影响, 评价函数中加入了 Tikhonov 正则项^[7], 它可以提高算法稳定性和收敛速度:

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

其中: u 表示频域坐标, $D_{tc}(u)$ 、 $S_{tc}(u)$ 分别表示第 t 帧 c 通道的实际采集图像的傅里叶变换式和光学传递函数, $F(u)$ 表示理想目标成像的傅里叶变换式。 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 帧波前相位的泽尼克系数。 γ 表示非负的正则项系数。

通过式(4)对目标求导, 可以将目标估计作为独立中间过程与相位估计分离, 得到具有维拉滤波形式的目标估计公式, Tikhonov 正则项系数可以有效地抑制噪声放大效应, 改善反演问题的病态性。

$$F(u) = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C D_{tc}(u) S_{tc}^*(u)}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |S_{tc}(u)|^2} \quad (5)$$

最后将目标估计式代入式(4)中得到以泽尼克系数为参数的评价函数, 如式(6)所示, 右上角标星号表示共轭。评价函数确定后, PD 算法最终归结为非线性优化求极值的问题, 求解变量为表示波前相位的一组

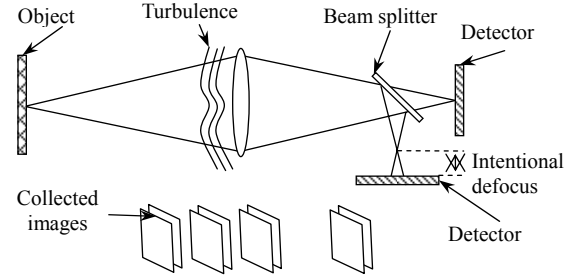


图 1 相位差异法图像采集示意图

Fig.1 Data-collection scheme for phase diversity imaging

或多组泽尼克系数 $\{\alpha\}$, 目标图像作为中间过程输出。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)^[11-12], 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。

$$L(\{\alpha\}_t) = \frac{1}{2N} \sum_u \left[\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |D_{tc}(u)|^2 - \frac{|\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C D_{tc}(u) S_{tc}^*(u)|^2}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |S_{tc}(u)|^2} \right] \quad (6)$$

2 基本原理

2.1 实验系统组成

实验系统主要由目标光源、扰动模拟和成像采集三个部分组成, 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。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。扰动模拟部分通过给变形镜加随机固定电压差生像差, 模拟大气扰动。成像采集部分通过移动高精度平移台获得固定的离焦量。实验平台布局如图 3 所示。

实验成像系统焦距为 0.895 m, 滤光片中心波长为 532 nm, 出瞳口径(即变形镜口径)为 0.05 m, 焦深约为 0.34 mm。系统理想分辨率大约为 86 线对/毫米。实验中选取离焦量为 1.5 mm, 离焦相位 PV 值在 1 个波长左右。相机像元尺寸为 13 μm , 截止分辨可以达 38.5 线对/毫米。

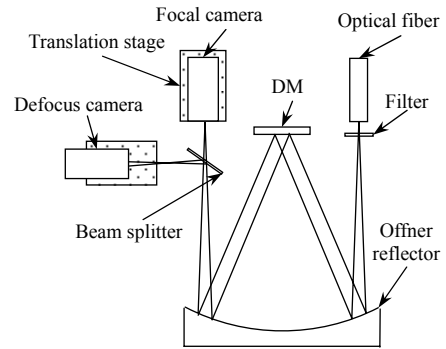


图 2 实验系统结构图

Fig.2 Structure of experimental system

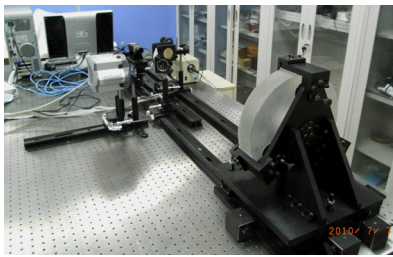


图 3 实验平台布局图

Fig.3 Experimental layout

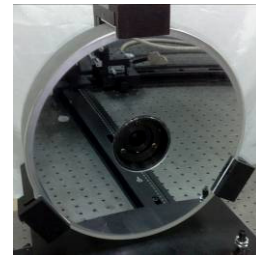


图 4 Offner 反射镜

Fig.4 Offner reflector

2.2 反射式 PD 成像系统

传统 PD 实验光路使用双透镜透射式成像。目标光源经过滤波片后近似为窄带光, 若光学系统数值孔径较大, 会引入色差^[1], 如图 5 所示。PD 理论要求单色光成像, 表示波前相位的泽尼克多项式无法对色差进行校正, 因此, 实验本身会引起 PD 算法模型误差, 加重反演问题的病态性。

本文使用 Offner 反射镜搭建反射式 PD 成像系统^[13], 避免了使用透镜引入的色差, 从而使得实验方法和理论模型更为互洽。Offner 反射镜将目标光源的发散球面波反射为平行光入射变形镜, 平行光再经过 Offner 反射镜反射变成会聚光波成像。实验光路设计成入射主光线和会聚主光线平行, 实验平台使用滑轨定位, 大大提高了装调效率, 简化了实验光路。

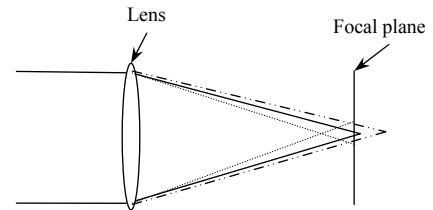


图 5 透镜引起的色差

Fig.5 Chromatic aberration caused by lens

3 实验结果及分析

3.1 光线光束成像实验

实验先将光纤光束直接作为目标成像。焦面通道图像和离焦通道图像分别取 128×128 像素大小区域的 16 位灰度图像, 如图 6(a)、(b)所示。利用 PD 算法解算得到恢复后图像, 如图 6(c)所示。恢复后, 光纤光束成像分辨率提高, 其中光纤光束坏点细节明显, 颗粒间轮廓清晰可辨。实验结果定性验证了 PD 算法克服波前相位畸变高分辨率成像的能力。

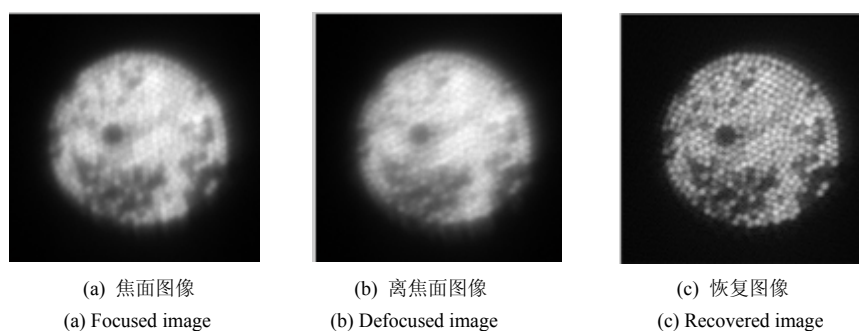


图 6 实验采集的图像及恢复结果

Fig.6 Original images and result

3.2 分辨率板成像实验

换用 2 号分辨率板作为目标。焦面通道图像和离焦通道图像分别取 256×256 像素大小区域的 16 位灰度图像。恢复前焦面图像如图 7(a)所示, 肉眼只能观察到第 5 组, 31.5 线对/毫米。恢复后图像如图 7(b)所示, 经过辨认能清晰观察到第 7 组, 35.4 线对/毫米。分辨率增加了 12%。实验结果定量地验证了 PD 算法的恢复能力, 不同大小目标的恢复结果也进一步验证了 PD 算法恢复随机扩展目标的普遍性。

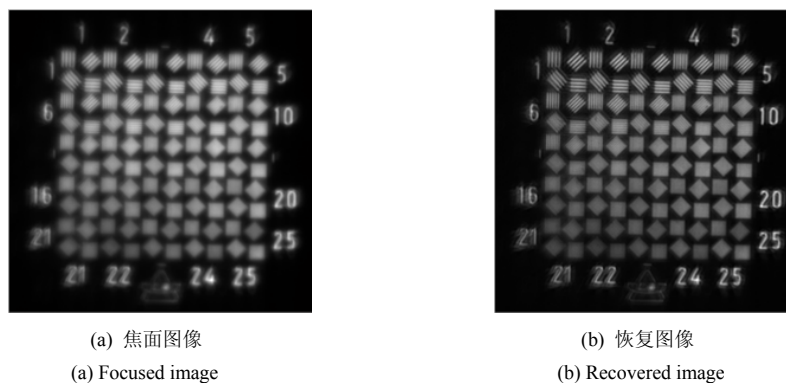


图 7 焦面图像和恢复图像对比

Fig.7 Comparison between focused and recovered images

4 结 论

本文利用 Offner 反射镜构建反射式 PD 成像系统, 消除了色差的影响, 在实验方法上更加符合 PD 算法理论。完成了 PD 技术的图像采集和图像恢复, 在实验室条件下利用变形镜模拟大气扰动产生波前相位畸变, 实现了不同目标条件下的 PD 复原实验。实验结果定性和定量地验证了 PD 算法提高图像分辨率和解算波前相位的能力, 恢复后图像分辨率提高了 12%, 对不同随机扩展目标的恢复结果也验证了 PD 算法的普遍性。因此, 该方法是大口径光电成像系统克服波前相位畸变较为理想的图像恢复技术。本文使用 PD 算法提高了图像分辨率, 但目前并未实现图像恢复的实时处理。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的运算效率。

参考文献:

- [1] ROGGMANN M C, WELSH B M. **Image Through Turbulence** [M]. Washington D C, USA: CRC Press, 1996.
- [2] PAXMAN R G, THELEN B J, MURPHY R J. Phase-diverse Adaptive Optics for Future Telescopes [J]. **Proc. of SPIE** (S0277-768X), 2007, **6711**: 671103.
- [3] DOLNE J J, MENICUCCI P, MICCOLIS D, *et al.* Advanced Image Processing and Wave-front Sensing with Real-time Phase Diversity [J]. **J. Opt. Soc. Am. A**(S0740-3232), 2009, **48**: 30-34.
- [4] 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**(S0740-3232), 1992, **9**: 1072-1085.
- [5] Paxman R G, Seldin J H, LÖFDAHL M G, *et al.* Evaluation of Phase-Diversity Techniques for Solar-image Restoration [J]. **The Astrophysical Journal**(S0004-637X), 1996, **466**: 1087-1099.
- [6] 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. A**(S0740-3232), 1999, **16**: 1759-1768.
- [7] VOGEL C R. **Computational Methods for Inverse Problems** [M]. Philadelphia: SIAM Press, 2002.
- [8] VOGEL C R, CHAN T, PLEMMONS R. Fast Algorithms for Phase Diversity-Based Blind Deconvolution [J]. **Proc. of SPIE** (S0277-768X), 1998, **3353**: 994-1005.
- [9] LÖFDAHL M G, SCHARMER G B. Wave-front Sensing and Image Restoration from Focused and Defocused Solar Images [J]. **Astron. Astrophys. Suppl.Ser**(S0365-0138), 1994, **107**: 243-264.
- [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**(S0004-637X), 1998, **495**: 965-972.
- [11] BYRD R H, LU P, Nocedal J, *et al.* A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization. Report NAM-08 [R]. EECS Department, Northwestern University, 1994.
- [12] ZHU C, BYRD R H, LU P, *et al.* LBFGS-B: Fortran Subroutines for Large-scale Bound Constrained Optimization. Report NAM-11 [R]. EECS Department, Northwestern University, 1994.
- [13] GEORES J A, DORRANCE P, GLEICHMAN K. High-speed closed-loop dual deformable-mirror phase-diversity testbed [J]. **Proc. of SPIE**(S0277-768X), 2007, **6711**: 671105.



开发的良朋 应用的益友
《电脑开发与应用》月刊
欢迎订阅 诚征广告

本刊集信息、知识、趣味、可读性于一体,以计算机实用技术见长,博采、精选国内外电脑研究、开发与应用的精华。具有军事、兵器控制色彩,军用计算机的开发,将用相当的篇幅刊登企业信息化、信息化建设、信息传输处理与管理方面的信息及文章,关注 IT 产业。尤其是刊登 Internet、Agent、嵌入式系统、片上系统、构件技术、网格技术、软硬件二次开发、中间件技术、电脑测控、CORBA、开放式与微内核技术、柔性与敏捷制造等方面的内容,跟踪报道世界最新技术。

本刊为大 16 开 (A4)、80 页、8 元/期、中央级之月刊。每月 5 日出版。

全国各地邮局均可订阅,邮发代号: 22-96 国外代号: M4257

省优部优 华北优秀

联系地址: 太原市 193 信箱 电脑开发与应用编辑部 邮编: 030006

电话: (0351) 8725025 传真: (0351) 8725207 E-mail: DNKF@chinajournal.net.cn