

相位差异散斑成像技术验证实验

王志臣¹, 王 斌^{1,2}, 梁 晶¹, 孙继明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. 东北师范大学 数学与统计学院, 吉林 长春 130000)

摘 要: 相位差异散斑成像综合了相位差异和散斑成像两种图像处理方法, 相位差异同时采集已知相位差的离焦和在焦图像, 联合恢复目标图像和解算波前相位, 相位差异散斑成像是基于相位差异的基础上, 利用多帧短曝光图像组来解算出它们所对应的波前畸变序列, 同时对图像进行恢复, 每帧图像组由在焦和已知离焦量的两幅图像组成。为了实践相位差异散斑成像技术, 分别在室内和室外做了相关实验, 在室内利用变形镜模拟光学系统像差, 利用精密位移台移动相机分时采集焦面和离焦面两幅图像, 恢复后的图像分辨率提高 12%; 室外利用某望远镜光学系统, 在其后放置分光棱镜将光束平均分给焦面和离焦面两台相机, 外触发同时采集短曝光图像, 对 20 km 外的目标成像, 经过单帧和多帧图像的恢复, 目标图像分辨率得到显著提高。实验结果证明: 相位差异散斑成像技术可广泛应用于靶场光学设备测量和地基大口径望远镜的探测成像。

关键词: 相位差异; 相位估计; 图像恢复; 大气湍流

中图分类号: TH745.1; TP391 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)12-3428-05

Phase-diverse speckle imaging validity experiments

Wang Zhichen¹, Wang Bin^{1,2}, Liang Jing¹, Sun Jiming¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Northeast Normal University, School of Mathematics and Statistics, Changchun 130000, China)

Abstract: Phase-Diverse Speckle (PDS) method integrates two image restoration methods of Phase Diversity (PD) and speckle imaging. PD method collects focused image and defocused image of known phase diverse at the same time, then target image is restored and wave-front phase is calculated. PDS technique extends PD by calculating the wave-front distortion of a series of short-expose frames to restore the images. Each frame is composed of two images with one in focus and the other defocus. To validate PDS method, experiments indoor and outdoor were carried out in the paper. The deformable mirror was used to simulate optics aberration in lab, and the single CCD collected focused image and defocused image at different time by shifting accurate translation stage. The resolution of restored image increased 12% compared with origin image. Outdoor experiment was also carried out. The cube beam splitter was

收稿日期: 2013-04-10; 修订日期: 2013-05-18

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2009AA8080603)

作者简介: 王志臣(1980-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事大口径望远镜结构设计相关方面的研究。Email: zcwang911@163.com

通讯作者: 王斌(1980-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事信息光学、数值分析及图像处理恢复方面的研究。

Email: eatingbeen@sohu.com

used to divide the beam into two ways, one for focused CCD and the other for defocused CCD, and cameras were externally triggered to collect short-exposure images at the same time. Images of target which was 20 kilometers away were collected, and image resolution was obviously improved by single-frame recovery and multi-frame recovery. Experiments confirm that PDS method can be widely used for optics equipments in shooting range and large aperture ground-based telescopes.

Key words: phase diverse; phase estimate; image restoration; atmosphere turbulence

0 引言

大气湍流和成像系统误差引起的波前误差严重影响地基大口径望远镜的分辨率,尤其是大气湍流引起的波前误差随着望远镜的口径增大而愈发严重^[1-3],使其成像质量明显下降。相位差异散斑法(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(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^[1-6],相位差异散斑成像是建立在相位差异的基础上,利用多帧短曝光图像组来解算出它们所对应的波前畸变序列,同时对图像进行恢复,其中每帧图像组由在焦和指定离焦量的两幅图像组成。与自适应光学系统相比,PD系统结构简单,易于实现,而且不需要波前传感器对波前进行探测,成本较低,并且对目标没有特定的要求,既适合于点目标,也适合于扩展目标^[3-6];与其他事后图像处理方法相比,PDS技术不需要参考目标、不依赖于大气统计特性,基于已知的物理光路约束和预定的相位差异,计算结果更为可靠,在恢复目标图像的同时能够解算出相位分布信息。PDS技术既可以作为独立波前探测器解算出波前相位,也可以凭借恢复目标图像的优势,作为自适应光学系统的补充,实现地基望远镜高分辨率成像的目的^[4-5]。

相位差异法最早由 Gonsalves 提出^[7],其基本原理是同时采集具有已知相位差异信息的一对短曝光图像,通过极大似然估计理论构建迭代优化模型,联合恢复目标图像和解算波前相位信息,进而恢复出理想图像^[8]。一般采用焦面和离焦面来产生已知的相位差异信息(离焦量产生的光程差可以转换为相位差),成像时曝光时间缩短是为了能有效克服大气的影

响,从而保留目标比较全面的相位信息,特别是高频信息,大气中的非均匀成分处于不断的变化中,结果使进入望远镜的波前也在不断变化,短曝光图像可以冻结大气湍流的瞬时变化,短曝光强度扩展函数分布符合大气的散斑特性。Löfdahl 等已经将 PDS 理论成功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]。

文中分别在室内和室外进行了 PDS 相关实验,室内采用单相机分时采集焦面和离焦面图像,室外采用双相机外触发同步采集焦面和离焦面图像,图像恢复结果表明相位差异散斑成像技术可有效校正光学系统像差和大气湍流引起的波前误差。

1 基本原理

图 1 为相位差异法图像采集示意图,其基本原理是短曝光采集一幅焦面图像,再采集一幅与焦面图像具有已知相位差异的另一幅图像,简单的实现方法是采集一幅已知离焦量的离焦图像,离焦产生的光程差可以转换为相位差,采用短曝光图像是为了冻结大气湍流的瞬时变化。

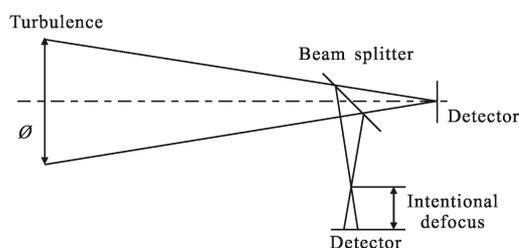


图 1 相位差异法图像采集示意图

Fig.1 Data-collection scheme for PD imaging

高斯噪声模型可表示为:

$$i(r)=(h*o)(r)+n(r) \quad (1)$$

式中: i 为实际采样图像; r 为像面向量; h 为点扩散函数; o 为目标理想图像; n 为噪声。在近场条件下,焦面图像的点扩散函数可表示为:

$$h_1(r)=|FT^{-1}\{P(u)\cdot\exp[j\phi(u)]\}|^2 \quad (2)$$

式中: FT^{-1} 为傅里叶逆变换; u 为光瞳向量; P 为光瞳函数; φ 为未知的波前相位。

离焦面上的点扩散函数可表示为:

$$h_2(r) = |FT^{-1}(P(u) \cdot \exp\{j[\phi(u) + \phi_d(u)]\})|^2 \quad (3)$$

式中: ϕ_d 为已知的相位差异, 公式(2)、(3)中的波前相位 φ 可展开为一组有限项的泽尼克多项式:

$$\phi(u) = \sum_{i=4}^k \alpha_i Z_i(u) \quad (4)$$

式中: α_i 为第 i 项泽尼克多项式系数; Z_i 为第 i 项泽尼克多项式基底, 注意系数 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ 不包括在内, 平移项 α_1 是加在相位上的常数, 对点扩散函数没有影响, 倾斜项 α_2 和 α_3 是在扩展目标的图像上引入了不会对像质造成影响的平移量。

PD 的数学模型可以理解为一个自适应滤波器, 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^[9-11], 在频域表示为:

$$L(f, \{\alpha\}_t) = \frac{1}{2N} \left(\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |D_{tc}(u) - FS_{tc}(u)|^2 + \gamma |F(u)|^2 \right) \quad (5)$$

式中: $\{\alpha\}_t$ 为需要求解的第 t 帧泽尼克系数; N 为单幅图像的像素总数; T 和 C 分别为使用的帧数和通道数; u 为频域向量; F 为傅里叶变换; $\gamma |F(u)|^2$ 为 Tikhonov 正则项^[12-13], 可以提高算法稳定性和收敛速度, 高斯噪声模型可以用维纳滤波形式估计目标。

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

利用最大似然估计理论, 将目标估计作为独立的中间过程, 且与相位估计分离, 得到与目标无关的评价函数^[8]:

$$L(\{\alpha\}_t) = \frac{1}{2N} \sum_u \left(\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |D_{tc}|^2 - \frac{\left| \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C D_{tc} S_{tc}^* \right|^2}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |S_{tc}|^2} \right) \quad (7)$$

至此, 图像恢复过程转化为数学最优化问题。

2 成像实验和结果

2.1 光学系统像差校正实验及结果

实验系统光路图和实验装置如图 2 所示, 目标选用国产 WT1005-62 标准 2 号分辨率板, CCD 放置在单轴精密位移台上, 位移台的分辨率为 0.01 mm,

变形镜口径(出瞳)为 50 mm, 给变形镜施加固定电压用来模拟光学系统像差, 实验系统中心波长 532 nm, 系统焦距 895 mm, 相机像元大小 13 μm , 图像大小选取 256 \times 256 像素, 首先采集焦面图像, 再通过移动精密位移台产生 1.5 mm 离焦量, 采集离焦图像, 实现双通道采集图像, 离焦相位 PV 值约为 1 个波长, 两次图像采集时间间隔不超过 1 min, 温度、气流等外在因素无明显变化, 可认为系统像差不产生变化。

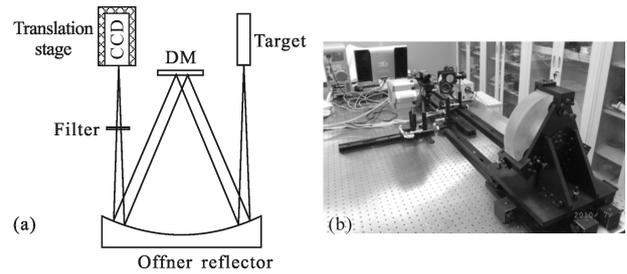
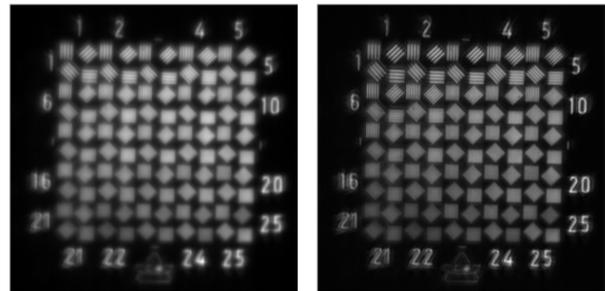


图 2 实验系统光学设计和装置

Fig.2 Optics design and equipments for experimental system

图 3 为采用 PDS 恢复前后的对比图像, 恢复前的图像只能分辨到第 5 组, 恢复后的图像可以分辨到第 7 组, 分辨率提高了 12%, 实验结果表明 PDS 技术可有效克服光学系统像差引起的成像扰动。



(a) 焦面图像

(b) 恢复图像

(a) Focused image

(b) Reconstruction image

图 3 焦面和恢复图像对比

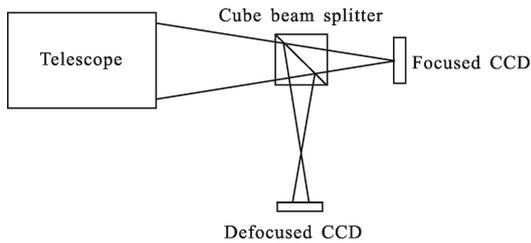
Fig.3 Comparison between focused and reconstruction images

2.2 大气湍流校正实验及结果

前面验证了 PDS 对光学系统像差的校正能力, 为了继续验证 PDS 技术对大气湍流的校正能力, 笔者利用某望远镜搭建了一套可用于室外观测的实验系统, 在望远镜光学系统后放置分光棱镜, 将汇聚光束平均分为两路, 一路用于焦面相机的成像, 一路用于离焦面相机的成像, 焦面相机和离焦相机采用同型号的 CCD, 通过外触发模式同步采集焦面和离焦

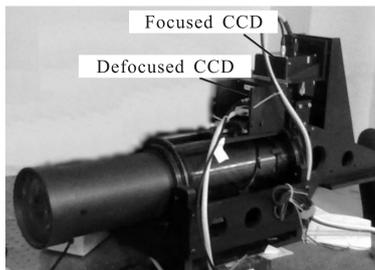
面上的两幅图像,实验系统中心波长 650 nm,系统 F 数为 18,相机像元大小为 $12\ \mu\text{m}$,图像大小选取 256×256 像素,离焦相机的离焦量为 1.6 mm,离焦相位 PV 值约为 1 个波长。

图 4 为实验系统的光路图及实验装置,实验中采用两个相机同时采集图像,对两个相机的相对位置要求较为严格,因为任何波前畸变也不会产生像旋,很难分析像旋对波前解算的影响,所以在装调时必须尽可能减小此项误差,保证两个相机的相对像旋量小于 0.5 个像元($3'$ 以内),另一方面是图像的平移,图像的平移在水平和竖直方向均小于 1 个像素即可,可在装调时机械调整,也可通过图像平移的方法实现,该实验采用图像平移法。



(a) 实验系统光路图

(a) Light path drawing for experiment



(b) 实验装置

(b) Instruments for experiment

图 4 实验系统光路图和实验装置

Fig.4 Light path drawing and instruments for experiment

为了保证两个相机的相对位置要求,在黑色硬纸板上钻 5 个小圆孔放置在平行光管焦面作为目标板,离焦相机可通过精密位移台实现从焦面位置到离焦面位置的直线移动,装调保证离焦相机在焦面位置和离焦面位置所成的像点质心坐标误差小于 0.5 个像元。两个相机同时在焦面位置,比对离焦相机的像点质心位置,通过角度旋转机构调整在焦相机绕光轴旋转,使两个相机的相对像旋量小于 0.5 个像元,图 5 为装调好的两个相机同时在焦面位置采

集的图像,将离焦相机按要求平移 1.6 mm 的离焦量,至此整个实验系统装调完成,可用于外场观测。

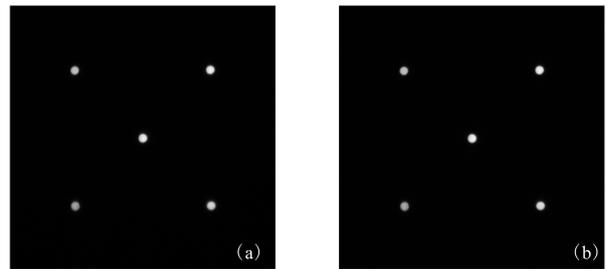
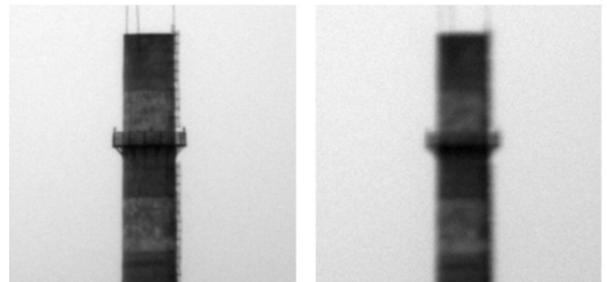


图 5 两个相机同时在焦面的图像

Fig.5 Focused images for two cameras

外场实验观测对象是 20 km 以外的烟囱目标,望远镜理想分辨率为 132 mm,双相机短曝光同步采集焦面和离焦面图像,如图 6 所示,图 6 (a) 为焦面图像,图 6 (b) 为离焦面图像,由于正午地表大气湍流严重,以及背景噪声影响,焦面图像中环形护栏间隙模糊,肉眼无法清晰分辨;图 6 (c) 为 PD 算法单帧图像

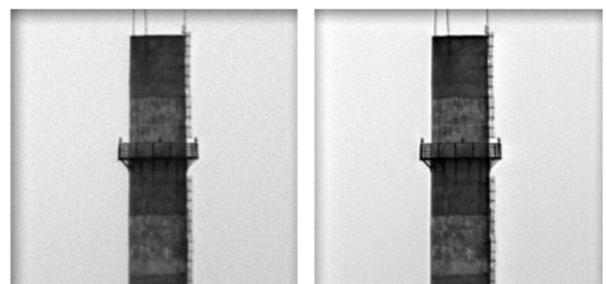


(a) 焦面图像

(b) 离焦面图像

(a) Focused image

(b) Defocused image



(c) 单帧恢复图像

(d) 五帧恢复图像

(c) Single frame recovered

(d) Multi-frame recovered

图 6 20 km 外烟囱图像

Fig.6 Images of chimney 20 km away

组恢复图像,烟囱的环形护栏分辨率明显提高,但仍不是很清晰;图 6(d) 采用了五帧图像组进行恢复,每帧图像组由同时采集的焦面图像和离焦面图

像组成,提高了恢复目标的信噪比,环形护栏间隙肉眼清晰可辨。当仅使用一对图像恢复时,可以利用的目标信息不足,图像恢复效果受到了限制,而利用多帧图像联合恢复目标,可以利用图像序列中的附加空域时域信息,多帧图像的使用还可以改善 PD 的病态性,进一步增强噪声抑制能力和提高恢复空间目标图像的信噪比,从而更好地恢复出高清晰的目标,恢复结果充分验证了 PDS 技术对大气湍流的校正能力。

3 结 论

文中分别验证了 PDS 技术对光学系统像差和大气湍流的校正能力,在实验室内利用变形镜模拟光学系统像差,以分辨率板为目标分时采集焦面和离焦面图像,对比恢复前后的图像,分辨率可提高 12%;室外利用分光棱镜将光束分为两路,两个相机外触发同时采集焦面和离焦面双通道图像,分别进行了单帧和多帧图像恢复,随着参与 PDS 运算帧数的增加,目标清晰度得到极大改善,分辨率明显提高,验证了 PDS 的图像恢复能力要强于单纯的 PD 技术。虽然 PDS 技术是一种非实时处理技术,但可有效克服光学系统像差和大气湍流对图像的扰动,提高图像分辨率,相位差异散斑成像技术具有广泛的应用前景,下一步将会把 PDS 技术应用于地基大口径望远镜的高分辨率成像。

参 考 文 献:

- [1] Roggemann M C, Welsh B M. Imaging Through Turbulence [M]. Washington: CRC Press, 1996.
- [2] Yang Zhongliang, Li Junsheng, Yang Weijun. High-resolution wide-area imaging of natural targets with lucky imaging technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1821–1825. (in Chinese)
杨忠良, 李均盛, 杨卫军. 应用幸运成像技术的宽视场自然目标高分辨率成像 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1821–1825.
- [3] Pierre Y Bely. The Design and Construction of Large Optical Telescope[M]. New York: Springer, 2003.
- [4] Wang Jianli, Wang Zongyang, Wang Bin, et al. Image restoration by phase-diverse speckle [J]. *Opt Precision Engineering*, 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] Wang Bin, Wang Zongyang, Wang Jianli, et al. Phase-diverse speckle imaging with two cameras [J]. *Opt. Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1384–1390. (in Chinese)
王斌, 汪宗洋, 王建立, 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.
- [6] Zhao Jinyu. Error analysis of image deconvolution from wave-front sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1806–1811. (in Chinese)
赵金宇. 采用波前测量图像恢复技术的误差分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1806–1811.
- [7] Gonsalves R A, Childlaw R. Wave-front sensing by phase retrieval [C]//Applications of Digital Image Processing III, 1979, 207: 32–39.
- [8] Warmuth M W, Parker S W, Wilson A J, et al. Operation of phase diverse adaptive-optics with extended scenes [C]//SPIE, 2008, 7093: 1–11.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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]. *Opt Soc Am*, 1999, A16: 1759–1768.
- [12] Vogel C R. Computational Methods for Inverse Problems [M]. Philadelphia: SIAM Press, 2002.
- [13] Vogel C R, Chan T, Plhmons R. Fast algorithms for phase diversity-based blind deconvolution [C]//SPIE, 1998, 3353: 994–1005.