

基于相位差混合处理方法的高分辨力成像技术

李斐^{1)2)3)†} 饶长辉¹⁾²⁾

1) (中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 成都 610209)

2) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

3) (国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011 年 3 月 21 日收到; 2011 年 4 月 3 日收到修改稿)

为了提高成像系统的分辨能力, 并尽量减小系统的复杂度, 本文将相位差波前探测技术和相位差图像恢复技术结合起来构成相位差混合处理方法, 给出了点目标和扩展目标情况下混合处理方法的数值仿真结果, 并针对点目标情况进行了实验验证. 实验表明, 在像差较大的情况下, 直接用事后处理方法无法得到满意的结果. 在三种湍流强度下, 经混合方法处理后得到光斑的半高宽分别由自适应光学系统校正后的 5.1, 5.1 和 5.0 个像素减小到 3.3, 3.2 和 3.0 个像素. 可以看出, 利用相位差混合处理方法得到的图像明显优于单独的事后图像处理方法和自适应光学校正, 相位差混合处理方法在高分辨力成像领域有着巨大的应用潜力.

关键词: 高分辨力成像, 相位差法, 混合处理方法

PACS: 95.75.Qr, 42.68.Wt, 42.30.-d, 02.30.Zz

1 引言

大气湍流和望远镜像差等因素会使入射光束的波前发生畸变, 从而大大降低地基天文望远镜的成像质量^[1]. 上世纪 50 年代, 人们提出了自适应光学 (adaptive optics, AO) 的概念^[2], AO 的出现大大减小了这些因素对成像系统的影响^[3,4], 有效地改善地基望远镜系统的成像质量. 但由于波前传感器的噪声、变形镜自由度以及控制回路的时间延时等因素影响, AO 系统不能对波前像差完全校正, 其校正后的目标依然受校正残差影响^[5]. 这时成像系统得到的图像质量还有很大改善的空间, 残存模糊还要靠事后处理消除. 混合处理方法就是将 AO 系统和事后图像处理方法相结合的高分辨力成像技术.

相位差 (phase diversity, PD) 法在估算出大气湍流和望远镜像差引入的波前畸变的同时, 还能作为一种事后处理方法恢复出退化的图像^[6,7]. 然而, PD 算法较为复杂, 一直以来只被应用于实时性要求不高的领域. 近些年来, 随着算法和硬件水平的不断提高, PD 方法计算量大的缺点已不再是制约其发展的瓶颈, PD 波前探测器已经成为波前探测器的一个重要发展方向. 本文将 PD 波前探测技术

和 PD 图像恢复技术结合起来构成相位差混合处理方法 (phase diversity hybrid method, PDHM), 该方法利用 PD 方法来实现波前探测, 为 AO 系统的闭环校正提供负反馈, 同时利用 PD 方法对 AO 系统校正后的图像进行事后处理, 得到更高分辨率的图像.

PDHM 充分结合了 AO 技术和事后图像处理方法的优点, 能够明显地改善成像的分辨力, 特别是事后图像处理方法存在着很大的困难时^[8] (例如在大口径望远镜系统中), 该方法具有很大的优势: 首先, PDHM 可以克服 AO 校正后剩余大气扰动的影响, 消除残存模糊, 进一步提高成像系统的分辨能力, 甚至可以恢复出衍射极限图像中所缺失的某些细节^[9]. 其次, PDHM 利用 AO 系统对大气扰动进行部分补偿, 能够提高信噪比, 改善事后图像处理算法的收敛性, 加快计算速度. 再次, PD 所需要的附加像差可以由 AO 系统中的波前校正器产生, 无需波前传感器, 光路简单, 易于实现, 消除了非共路误差. 最后, 作为事后处理技术, 与斑点成像技术相比, PD 方法采集图像少、不需要参考目标、不依赖于大气的统计特性; 与一般盲解卷积相比, PD 方法利用双通道信息, 增强了约束, 具有更好的收敛性和更快的速度. 因此, PDHM 在高分辨力成像

† E-mail: sdlifei2008@163.com

领域有着巨大的发展潜力.

鉴于 PDHM 的诸多优点, 本文将对这种混合处理方法进行详细地研究, 给出了其数值仿真结果, 并针对点目标搭建实验平台, 对不同湍流强度下 PDHM 的性能进行了实验验证.

2 相位差法的基本原理

PD 方法的基本思想是利用同一目标 $o(x, y)$ 经过不同的光学通道 $\{h_k(x, y)\}$ 所成的 $k(k \geq 2)$ 幅图像 $\{i_k(x, y)\}$ 来估计波前相位, 同时重建目标像, 其成像过程如图 1 所示.

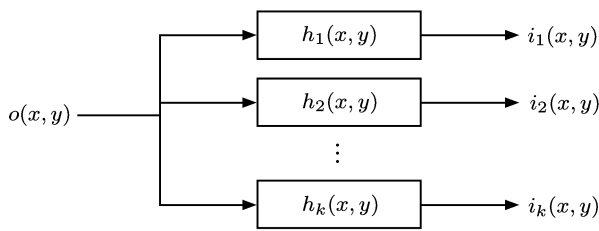


图 1 相位差法成像过程框图

假设光学成像是空间不变线性系统, 根据极大似然估计或最小二乘估计理论确定一个目标函数 $E^{[7]}$,

$$E = \sum_k \sum_{x,y} |i_k(x, y) - \hat{o}(x, y) * \hat{h}_k(x, y)|^2, \quad (1)$$

式中 $i_k(x, y)$ 为第 k 个探测器上的光强分布; $\hat{o}(x, y)$ 表示目标光强分布的估计量; $\hat{h}_k(x, y)$ 表示第 k 个光学通道的点扩散函数 (PSF) 的估计量; $*$ 表示卷积运算.

$$\hat{h}_k(x, y) = \left| \mathcal{F}^{-1} \left\{ A(u, v) \exp[i\hat{\phi}_k(u, v)] \right\} \right|^2, \quad (2)$$

式中 $\phi_k(x, y)$ 为第 k 个光学通道上的波前分布; $A(x, y)$ 为孔径函数; $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ 表示傅里叶逆变换. 根据 Parseval 定理和卷积定理, (1) 式可表示为

$$E = \sum_{k=\pm 1} \sum_{f_x, f_y} |I_k(f_x, f_y) - \hat{O}(f_x, f_y) \hat{H}_k(f_x, f_y)|^2, \quad (3)$$

式中 $I_k(f_x, f_y)$, $\hat{O}(f_x, f_y)$ 和 $\hat{H}_k(f_x, f_y)$ 分别是 $i_k(x, y)$, $\hat{o}(x, y)$ 和 $\hat{h}_k(x, y)$ 的离散傅里叶变换. 在本文的研究工作中, 我们拟用两幅图像来估算波前相位, 其中一幅图像是由波前畸变导致退化的焦面图像; 另外一幅是在焦面图像上引入一个已知离焦像差得到的图像. 当成像系统的通道数为 2 时,

令 $\partial E / \partial \hat{O} = 0$, 得

$$\hat{O} = \frac{I \hat{H}^* - I_d \hat{H}_d^*}{|\hat{H}|^2 + |\hat{H}_d|^2}, \quad (4)$$

代入 (3) 式得

$$E = \sum |I \hat{H}_d - I_d \hat{H}|^2 / (|\hat{H}|^2 + |\hat{H}_d|^2), \quad (5)$$

式中 I 和 I_d 分别为焦面图像和离焦图像的离散傅里叶变换; H 和 H_d 分别为两光学通道的光学传递函数, 也就是点扩展函数的傅里叶变换. 为了确保解的存在性、唯一性和连续性, 需要利用关于解的先验知识, 构造附加约束, 即正则化方法. 本文采用 Tikhonov 正则化方法来构造附加约束, 根据 Tikhonov 正则化原理, 目标函数可改写为 $^{[10]}$

$$E = \sum_{f \in F_1} \sum_{k=1}^K |D_k|^2 - \sum_{f \in F_1} \frac{|\sum_{j=1}^K D_j H_j^*|^2}{\gamma + \sum_{l=1}^K |H_l|^2} + \alpha \langle \Phi^{-1} \mathcal{F}\{\phi\}, \mathcal{F}\{\phi\} \rangle, \quad (6)$$

式中, $\gamma, \alpha > 0$, 称为正则化系数, Φ 是待测波前的先验信息, 一般为大气湍流的功率谱, $\langle, \rangle$ 表示内积. 采用最优化算法寻找使目标函数 E 最小化的解, 即可求得波前分布 $\phi(x, y)$, 可表示为

$$\phi(u, v) = \min_{\hat{\phi}}^{-1} \left[E(\hat{\phi}(u, v) | \{i_k(x, y)\}) \right], \quad (7)$$

式中 $\min_{\hat{\phi}}^{-1} [E(\hat{\phi}(u, v) | \{i_k(x, y)\})]$ 表示在已知参数 $\{i_k(x, y)\}$ 的条件下求使得 E 达到最小值的 $\hat{\phi}$. 同时, 可以利用 (4) 式重建目标像.

有限内存 broyden-fletcher-goldfarb-shanno (L-BFGS) 方法, 存储量少、计算效率高, 非常适合求解大规模无约束优化问题, 是求解相位差波前探测问题的最有效方法之一 $^{[11]}$, 因此本文利用 L-BFGS 方法寻找使目标函数最小化的解, 具体过程参看文献 [1].

3 数值仿真

当曝光时间小于大气相干时间时, 大气湍流近似为“冻结”的 $^{[12]}$. 因此, 在研究大气湍流对望远镜成像的影响时, 可以使用一个或多个放置于望远镜光瞳上的随机相位屏来模拟等晕区内的大气湍流效应. 由于大气湍流主要由低频成分构成, 高频成分所占比例很小 $^{[13,14]}$, 本文使用前 65 项 Zernike 多项式来模拟满足 Kolmogorov 谱的大气相位屏. 设大气的相干长度 r_0 为 10 cm, 望远镜口径 D 为 1.5 m, 去掉平移 (piston) 和倾斜 (tip-tilt) 像差后的大气相位屏如图 4 所示, 其的峰谷 (PV) 值为 3.54λ , 均方根 (RMS) 值为 0.37λ , 图 5 给出了模

拟的扩展目标图像, 采样点数为 256×256 . λ 为成像系统的工作波长, 文中 λ 为 $0.63 \mu\text{m}$, 附加离焦像差的 PV 值为 1λ , 我们采用 λ 作为波前的单位, 来衡量像差的大小.

点目标情况下, 仿真结果如图 4 所示. 图 4(a) 为无像差的光学系统, 即衍射受限系统 (Diffraction Limited System, DLM) 获得的目标像, 其半高宽为 2.2 个像素; 图 4(b) 给出了 CCD 上采集到的焦面图像, 即不经过任何处理, 成像系统得到的目标图像; 另外采集一幅离焦图像, 利用 PD 方法相

位差法进行图像恢复, 得到的结果显示于图 4(c); 利用 PD 波前探测技术对畸变波前进行探测, 然后利用 AO 进行闭环校正, 闭环 6 次后所得图像如图 4(d) 所示; 在 AO 闭环校正的基础上使用 PD 方法进一步进行事后处理, 所得图像显示于图 4(e). 可以看出, 由于像差较大, 直接采用 PD 方法进行事后处理难以得到正确的结果; AO 校正后成像质量有了明显的提高; 而在 AO 校正的基础上再利用相位差法进行事后处理, 成像质量有了进一步的改善, 所得光斑的半高宽由 2.4 个像素减小到 1.4 个像素.

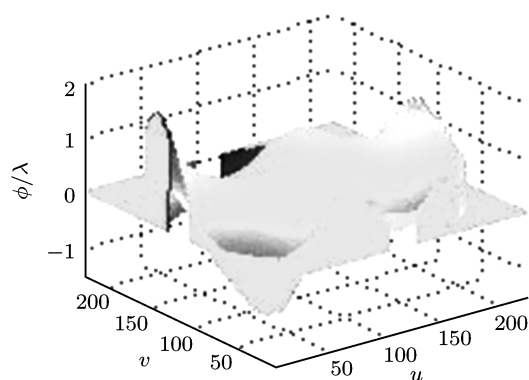


图 2 去掉平移和倾斜后的大气相位屏

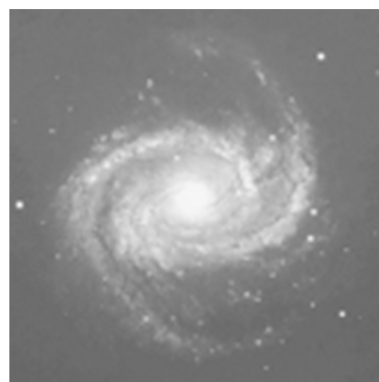


图 3 模拟的扩展目标

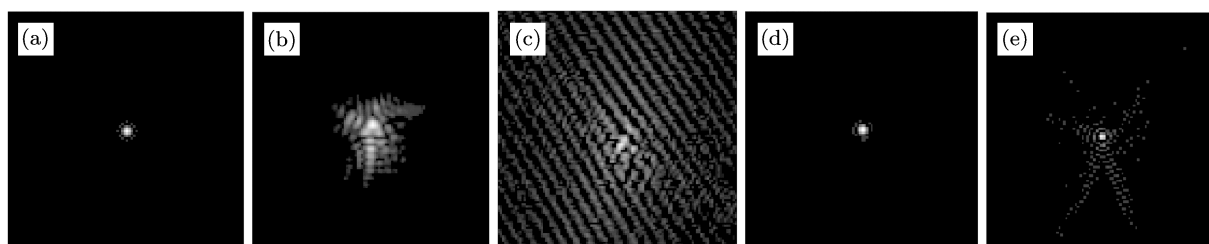


图 4 点目标情况下的仿真结果

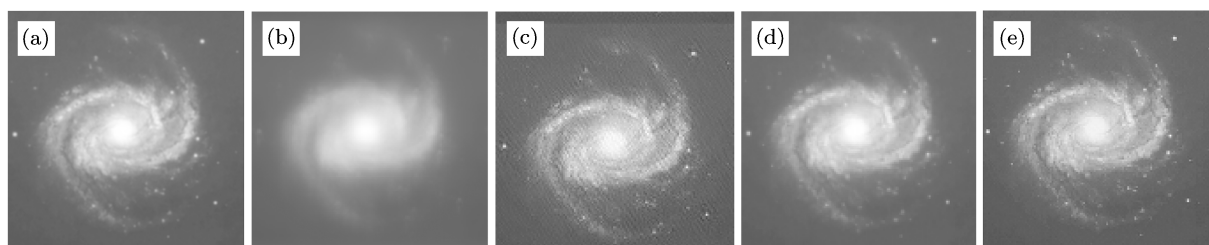


图 5 扩展目标情况下的处理结果

图 5 给出了扩展目标情况下的仿真结果, 图 5 中的 (a), (b), (c), (d), (e) 分别是 DLS 所得目标像、焦面图像、用 PD 进行事后处理所得图像、经 AO 校正所得图像和利用 PDHM 处理得到的图像. 与点

目标类似, 直接采用 PD 进行事后处理并不能得到理想的结果; 经 AO 校正后, 成像质量有了一定的提高; 校正后的图像再经 PD 处理成像质量有了明显改善. 我们利用所得图像与原始模拟目标图像相

关度来判定所得图像的质量, 图像的相关度定义为

$$R = \frac{\sum_m \sum_n A_{m,n} B_{m,n}}{(\sum_m \sum_n A_{m,n}^2)^{1/2} (\sum_m \sum_n B_{m,n}^2)^{1/2}}, \quad (8)$$

式中, $A_{m,n}$ 和 $B_{m,n}$ 分别是图像 A 和图像 B 中 (m, n) 点的灰度值. 图 5(a), (b), (c), (d), (e) 五幅图像与图 3 所示目标图像的相关度分别为 0.9918, 0.9665, 0.9814, 0.9888 和 0.9942, 可见, 利用 PDHM 得到的目标图像明显优于单独的事后图像处理方法和自适应光学校正, 并优于 DLS 所得的目标图像.

4 实验研究

为了验证仿真结果, 我们搭建实验系统, 其光

路图与实物照片分别如图 6 和图 7 所示. 实验系统由目标、波前相位调制部分和成像系统 3 个部分组成. 目标部分由 He-Ne 激光器、偏振片 P、显微物镜 L_1 、针孔 SF 和透镜 L_2 组成. 显微物镜的参数为 40/65, 针孔的直径为 $15 \mu\text{m}$, 透镜 L_2 的焦距为 200 mm. He-Ne 激光器输出的光束经过偏振片, 以便保证光束的偏振方向与 LC-SLM 的非寻常光轴方向平行. 针孔放置于透镜 L_2 的焦面上, 用来模拟无穷远处的目标. 波前相位调制部分采用反射式电寻址液晶空间光调制器 (LC-SLM) 来加载被测像差和附加离焦像差, 并对被测像差进行校正. 成像部分由双胶合凸透镜 L_3 和 CCD 相机组成, 透镜 L_3 的焦距为 200 mm, CCD 相机采用的是 Cascade:650, 像素尺寸为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$.

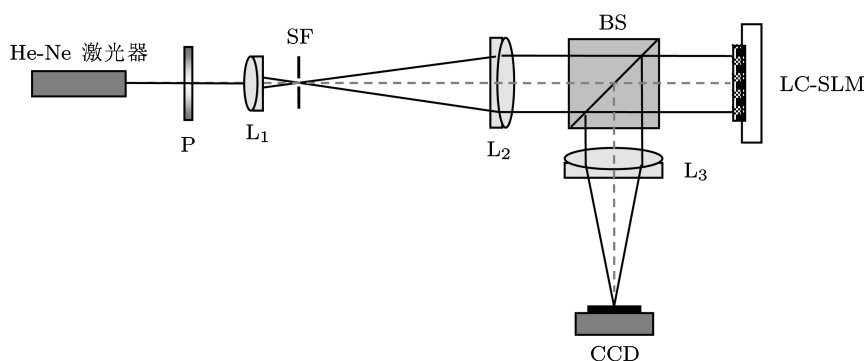


图 6 实验光路图

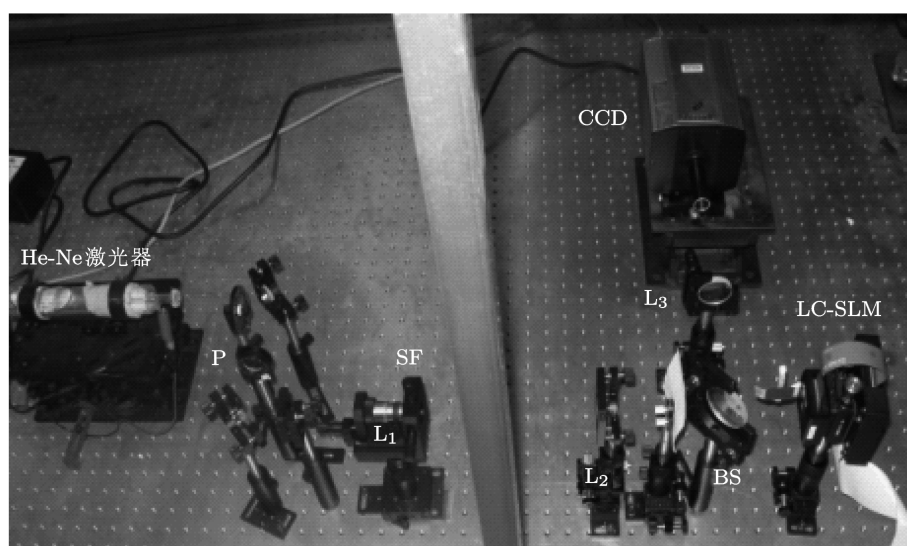


图 7 实物照片

使用前 65 项 Zernike 多项式来模拟 D/r_0 分别为 5, 10 和 15 的大气随机相位屏, 如图 8 所示. 它们的 PV 和 RMS 值如表 1 所示.

图 9 至图 11 分别给出了在不同湍流强度下的实验结果, 在每幅图中, 从左到右分别是 DLS 所得的图像、焦面图像、用 PD 进行事后处理所得图

像、经 AO 校正所得图像和利用 PDHM 处理得到的图像.

表 1 不同湍流强度下大气随机相位屏的 PV 和 RMS 值

D/r_0	5	10	15
PV/ λ	1.4640	2.4127	3.5444
RMS/ λ	0.2472	0.4280	0.376

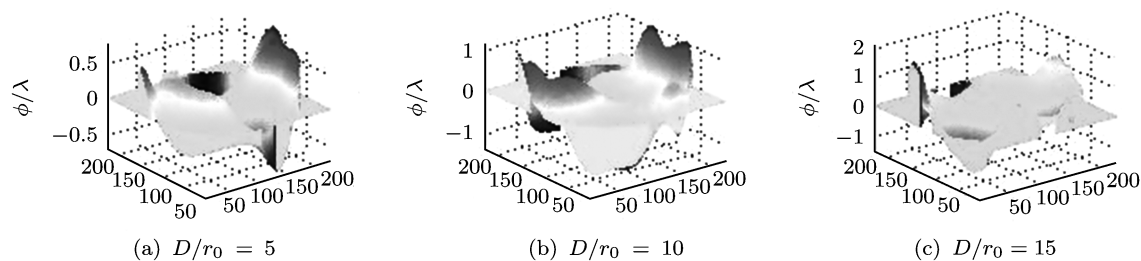


图 8 随机相位屏 (a) $D/r_0 = 5$; (b) $D/r_0 = 10$; (c) $D/r_0 = 15$

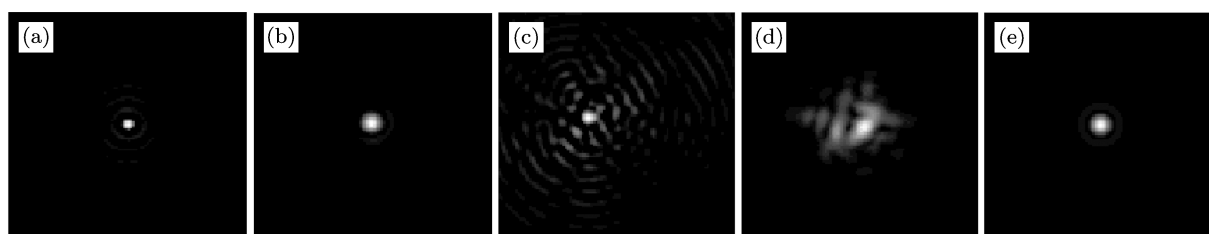


图 9 $D/r_0 = 5$ 时的实验结果

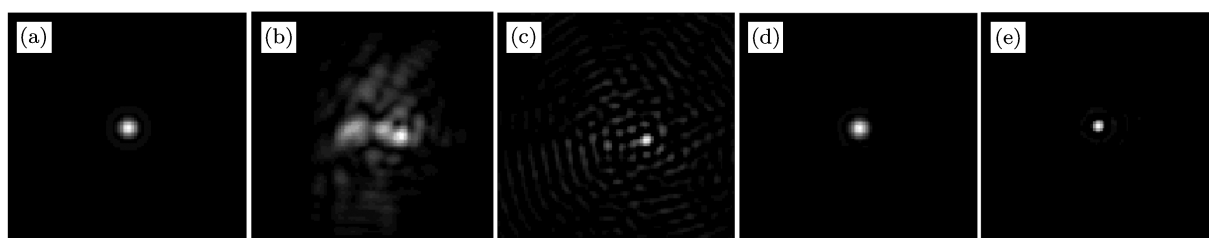


图 10 $D/r_0 = 10$ 时的实验结果

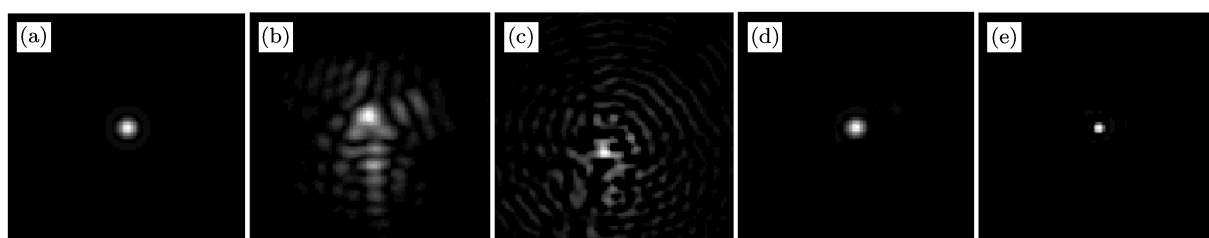


图 11 $D/r_0 = 15$ 时的实验结果

在经混合方法处理后得到目标数据中出现了负值, 这些数据是没有意义的, 因此在图像显示的时候, 我们将这些值为负数的数据赋为零. 为了便于比较, 我们对三种湍流强度下 DLS 所成的目标像、AO 校正后得到的目标像和利用 PDHM 得到目标的灰度值进行归一化, 并给出其截面图, 如图 12(a), (b), (c) 所示.

三种湍流强度下, DLS 获得的目标图像的半高宽均为 5.0 个像素. 利用 PD 波前探测技术对畸变

波前进行探测, 然后利用 AO 系统进行闭环校正, 闭环 6 次后, 三种湍流强度下所得图像的半高宽分别为 5.1, 5.1 和 5.0 个像素; 在 AO 校正的基础上再利用 PD 图像恢复技术进行事后处理, 所得光斑的半高宽分别减小到 3.3, 3.2 和 3.0 个像素, 成像质量有了进一步的改善. 由于 PD 图像恢复技术可以增强目标图像中空间频率低于成像系统截止频率部分的对比度^[15], 因此, PDHM 可以获得由于 DLS 的目标像.

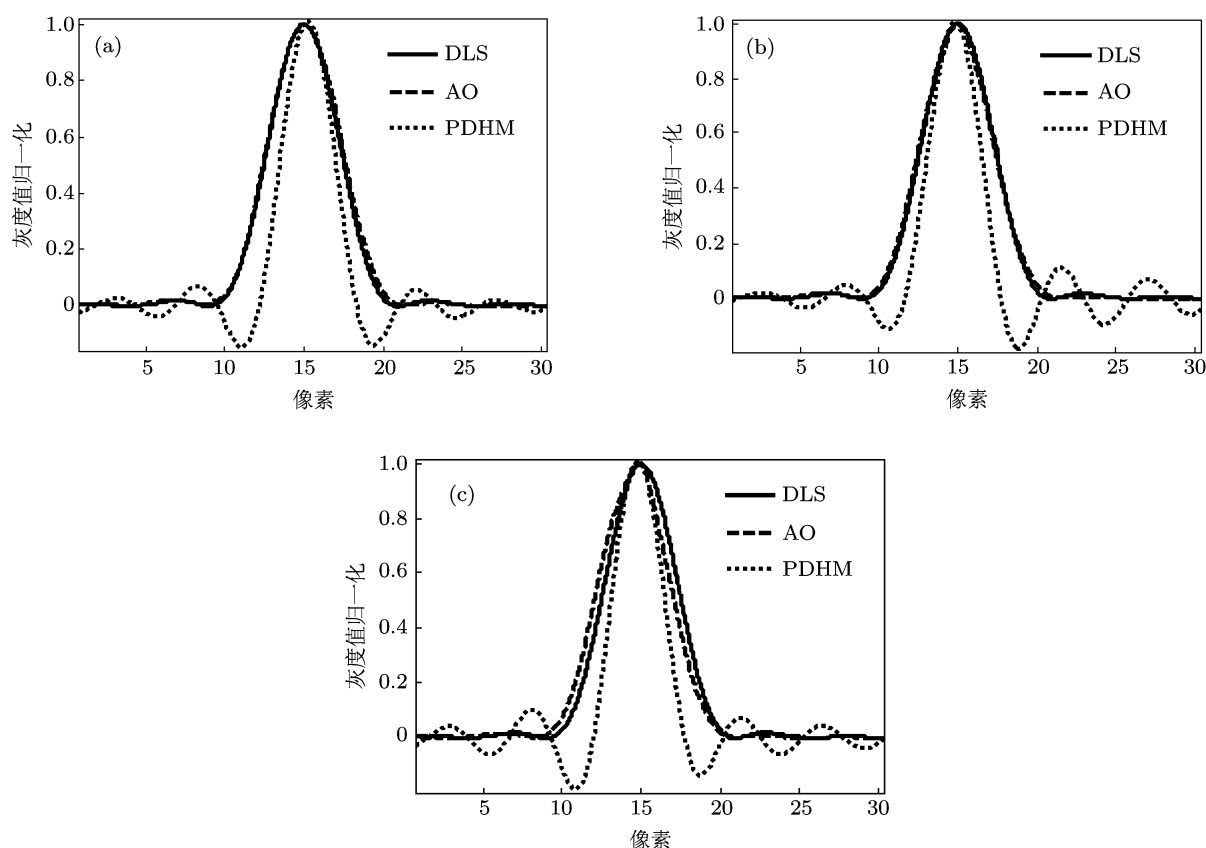


图 12 三种湍流强度 DLS 获得的目标像、AO 校正后得到的目标像和利用 PDHM 得到目标像的截面图

5 结论

本文简述了 PDHM 的基本原理, 分别对点目标和扩展目标情况下混合处理方法的性能进行了数值仿真. 针对点目标, 在不同湍流强度下对 PDHM 进行了实验验证. D/r_0 分别为 5, 10 和 15 时,

经 PDHM 处理后得到光斑的半高宽分别由 AO 系统校正后的 5.1, 5.1 和 5.0 个像素减小到 3.3, 3.2 和 3.0 个像素. 结果表明: PDHM 充分结合了自适应光学技术和事后图像处理方法的优点, 特别是事后图像处理存在着困难时, 混合处理方法具有很大的优势, PDHM 可以克服 AO 校正后剩余大气扰动的影响, 消除残存模糊, 进一步提高成像的分辨力.

- [1] Li F, Rao C H 2010 *Chinese J. Lasers* **37** 2813 (in Chinese) [李斐, 饶长辉 2010 中国激光 **37** 2813]
- [2] Babcock H W 1953 *Publ. Astron. Soc. Pac.* **65**
- [3] Ning Y, Yu H, Zhou H, Rao C H, Jiang W H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4717 (in Chinese) [宁禹, 余浩, 周虹, 饶长辉, 姜文汉 2009 物理学报 **58** 4717]
- [4] Bai F Z, Rao C H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4056 (in Chinese) [白福忠, 饶长辉 2010 物理学报 **59** 4056]
- [5] Christou J C, Hege E K, Jefferies S M, Cheselka M 1998 *Proc. SPIE* **3494** 177
- [6] Gonsalves R 1982 *Opt. Engng.* **21** 829
- [7] Paxman R G, Schulz T J, Fienup J R 1992 *J. Opt. Soc. Am. A* **9** 1072
- [8] Li Q 2007 *Ph. D. Dissertation* (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [李强 2007 博士学位论文 (中国科学院光电技术研究所)]
- [9] Bucci O M, Capozzoli A, D'Elia G 1999 *J. Opt. Soc. Am. A* **16** 1759
- [10] Gilles L, Vogel C R, Bardsley J 2002 *Inverse Problems* **18** 237
- [11] Nocedal J 1980 *Mathematics of Computation* **35** 773
- [12] Jin Z Y, Liu Z, Qiu Y H 2009 *Acta Optica Sinica* **29** 1205 (in Chinese) [金振宇, 刘忠, 邱耀辉 2009 光学学报 **29** 1205]
- [13] Noll R J 1976 *J. Opt. Soc. Am. A* **66** 207
- [14] Roddier N 1990 *Optical Engng* **29** 1174
- [15] Li F 2011 *Ph. D. Dissertation* (National University of Defense Technology) 84 (in Chinese) [李斐 2011 博士学位论文 (国防科学技术大学) 84]

High resolution imaging technique based on phase diversity hybrid method

Li Fei^{1)2)3)†} Rao Chang-Hui¹⁾²⁾

1) (The Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

2) (The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

3) (College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 21 March 2011; revised manuscript received 3 April 2011)

Abstract

In order to improve the resolution of an imaging system and make the system as simple as possible, the wavefront sensing and the image post-processing using phase diversity are combined to form a new method, i.e., phase diversity hybrid method, in this paper. The performance of this method is simulated for a point source and also for an extended source. An experimental platform is built based on a point source. The experimental results demonstrate that the acceptable results cannot be achieved by using single post-processing for large aberration. The full width half maximum of the light spot descends from 5.1 pixels, 5.1 pixels, and 5.0 pixels which are corrected by adaptive optics to 3.3 pixels, 3.2 pixels, and 3.0 pixels respectively. We can see that the quality of the image processed by phase diversity hybrid method is much better than that restored by post-processing method or corrected by adaptive optics only. It has a great potential application in the filed of high resolution imaging.

Keywords: high resolution imaging, phase diversity, hybrid method

PACS: 95.75.Qr, 42.68.Wt, 42.30.-d, 02.30.Zz

† E-mail: sdlifei2008@163.com