

文章编号: 0253-2239(2008)09-1633-05

# 基于线性相位反演技术的自适应光学闭环实验研究

陈 波<sup>1,2</sup> 李 敏<sup>1,2</sup> 李新阳<sup>1</sup> 姜文汉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 利用成像光学系统、变形镜、装有图像采集卡和 D/A 卡的 PC 机等建立了一套基于线性相位反演技术的自适应光学闭环实验系统。在 Windows 操作系统下用 VC 完成图像处理和控制算法。利用一台高测量精度的哈特曼传感器测量波前信息并评价自适应光学系统的校正效果。在不同像差大小状态下研究了这种基于线性相位反演技术的自适应光学系统的像差校正能力, 收敛速度, 稳定性等。实验结果表明, 基于线性相位反演技术的自适应光学系统对静态小像差有较好的校正效果。

**关键词** 自适应光学; 线性相位反演; 闭环; 哈特曼传感器

**中图分类号** TP273 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082809.1633

## Close-Loop Experiment of Adaptive Optics System Based on Linear Phase Retrieval Technique

Chen Bo<sup>1,2</sup> Li Min<sup>1,2</sup> Li Xinyang<sup>1</sup> Jiang Wenhan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)  
(<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The experimental research on an adaptive optics (AO) close-loop system based on the linear phase retrieval (LPR) technique is proposed. The experimental system is set up with a CCD camera imaging system, a deformable mirror, and a computer with image collection card and D/A card. In the Windows system, VC program is used in the algorithm of image processing and controlling. The wavefront information measured by a high precision Hartmann-Shack (HS) wavefront sensor is used to estimate the correction performance of the AO system. The correction ability, convergence rate and stability of the above system are discussed under different distorted wavefront. The experimental results show that the proposed system can correct the small distorted static wavefront aberration successfully.

**Key words** adaptive optics; linear phase retrieval; close-loop; Hartmann-Shack wavefront sensor

## 1 引 言

波前传感器是自适应光学 (Adaptive optics, AO) 系统的重要组成部分之一。通常的 AO 系统多采用哈特曼传感技术。这种技术通过测量各个子孔径斜率, 间接地测量整孔径上的波前畸变。哈特曼型波前传感器的波前复原计算过程是线性的, 速度快精度高, 所以在自适应光学系统中得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>。但哈特曼传感器光能利用率较低, 由于每一个分割子孔径上都需要的入射光子数, 在子孔径较多的场合, 整个哈特曼波前传感器需要的入射光子数巨大<sup>[3]</sup>, 严重限制了哈特曼等子孔径分割型波前传感器在微弱信标条件下的应用。基于成

像探测的相位反演技术是一种根据焦平面上的远场图像反演波前相位的波前传感技术<sup>[4]</sup>。

通常的相位反演 (Phase retrieval) 技术对比焦前、焦平面或焦后的两幅或多幅图像的差异, 通过迭代算法得到波前信息。这种技术计算量大、算法复杂, 不能用于实时探测的场合<sup>[5]</sup>。李新阳<sup>[6]</sup>等提出了一种线性相位反演 (Linear phase retrieval) 算法, 该算法只需记录一帧当前焦平面上的远场强度分布信息, 就可以用矩阵运算快速反演出波前相位, 便于在实时性要求高的自适应光学系统上应用。李敏等对该种新型波前测量方法的特性进行了数值仿真<sup>[7]</sup>和实验研究<sup>[8,9]</sup>, 验证了该种新型线性相位反演波

收稿日期: 2007-09-07; 收到修改稿日期: 2007-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(60408005)资助课题。

作者简介: 陈 波(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: chenbo182001@163.com

导师简介: 李新阳(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

前测量方法的可行性。在此基础上,本文将这种相位反演技术应用在自适应光学闭环实验系统中,对校正能力和性能等进行研究。

## 2 基于线性相位反演技术的自适应光学闭环原理

基于线性相位反演技术的自适应光学的闭环原理是实时测量一幅焦平面图像,根据焦平面上光强分布的变化量与变形镜的各个驱动器控制电压变化量之间的近似线性关系,计算出变形镜驱动器电压。

根据文献[6~8]分析,在小像差条件下,成像系统远场光强分布的变化量与入射波前变化量之间存在的如下矩阵形式的近似线性关系:

$$\Delta I = \mathbf{H} \times \Delta \Phi, \quad (1)$$

式中光强的变化量  $\Delta I$  为  $(N^2 \times 1)$  维的向量,是把  $(N \times N)$  的焦平面像素点展开为单列向量而成; $\Delta \Phi$  是表示相位分布变化量的向量, $\mathbf{H}$  是  $(N^2 \times M^2)$  的线性矩阵。

变形镜引起的相位变化量与各个驱动器控制电压变化量间存在如下线性关系:

$$\Delta \Phi = \sum_{i=1}^N \Delta v_i \times V_i, \quad (2)$$

式中  $\Delta \Phi$  表示变形镜引起的相位变化量, $N$  表示变形镜驱动器数目, $\Delta v_i$  为第  $i$  个驱动器电压变化量, $V_i$  为对应第  $i$  个驱动器单位电压的波前校正量,又称为驱动器的影响函数。上式写成如下矩阵形式:

$$\Delta \Phi = \mathbf{D} \times \Delta v, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{D}$  是表示线性关系的矩阵, $\Delta v$  为施加到变形镜驱动器上的电压的变化量。

根据(1)式和(3)式,得到成像系统远场光强分布的变化量  $\Delta I$  与施加到变形镜驱动器上的电压变化量  $\Delta v$  向量之间的近似线性关系:

$$\Delta I = \mathbf{HD} \times \Delta v = \mathbf{R} \times \Delta v, \quad (4)$$

式中矩阵  $\mathbf{R}$  称为电压传递矩阵,可以在实际系统中测量得到。

那么就可以利用如下关系式从远场光强的变化量  $\Delta I$  反演出变形镜驱动器上的电压变化量  $\Delta v$ :

$$\Delta v = \mathbf{R}^+ \times \Delta I, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{R}^+$  是利用奇异值分解法(SVD)得到的矩阵  $\mathbf{R}$  的广义逆矩阵。

实验系统采用经典的比例积分控制算法,如(6)式所示:

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}(t-1) + k\Delta \mathbf{v}(t), \quad (6)$$

式中  $\mathbf{v}(t)$  表示当前的校正电压向量, $\mathbf{v}(t-1)$  表示上

一次迭代的校正电压向量, $k$  为可调的控制器增益系数, $\Delta \mathbf{v}(t)$  表示根据当前畸变远场图像经过 LPR 算法得到的电压残差向量。

## 3 实验系统及实现方案

### 3.1 实验系统描述

闭环实验系统的示意图如图 1 所示。系统主要由半导体激光器及扩束系统、CCD 探测器、PC 机、高压放大器及变形镜(Deformable mirror, DM)、哈特曼传感器(Hartmann-Shack wavefront sensor)组成。PC 机内有图像采集卡和 D/A 卡,在 PC 机内实现 LPR 等算法。激光器的波长  $\lambda$  为 532 nm,变形镜的有效口径为 120 mm;驱动器直角排布,驱动器间距为 23 mm,如图 2 所示;CCD 探测器的帧频为每秒 25 帧,像素数为  $768 \times 576$ ,靶面大小为  $6.6 \text{ cm} \times 4.73 \text{ cm}$ ;哈特曼传感器的帧频为每秒 25 帧,在  $\phi 120 \text{ mm}$  口径上的空间横向分辨率为  $32 \times 32$  个子孔径,测量精度足够高。

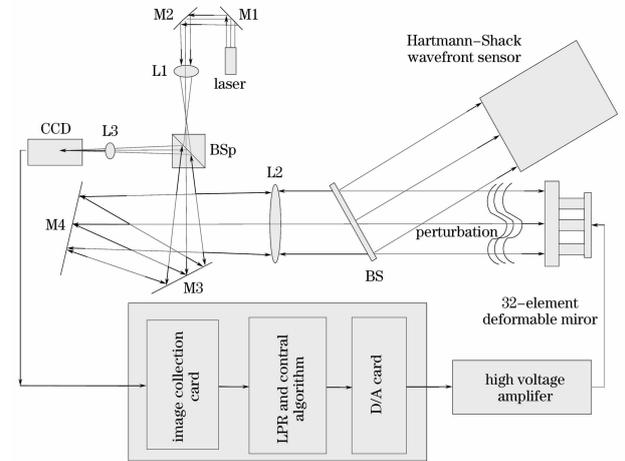


图 1 闭环实验系统示意图

Fig. 1 Close-loop experiment system

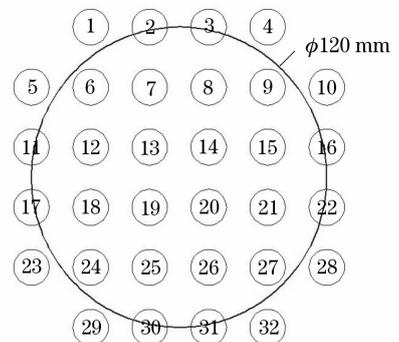


图 2 32 单元变形镜的驱动器位置排布

Fig. 2 Actuator arrangement of the 32-element deformable mirror

光源从激光器发出,经反射镜 M1、M2、透镜 L1、分光棱镜 BSp、反射镜 M3、M4、透镜 L2 扩束为  $\phi 120$  mm 平行光,通过分光镜 BS 后,再由变形镜反射,经 BS、L2、M4、M3、BSp、放大镜头 L3 至 CCD 成像,同时反射光束经分光镜 BS 反射进入哈特曼传感器,利用哈特曼传感器测量和记录整个校正过程中的波前信息。CCD 探测到的光强信号,经过图像采集卡采集到 PC 机内,根据 LPR 算法和控制算法计算出复原电压,电压信号由一个 32 通道的 PCI 总线 D/A 卡并行输出,经过高压放大驱动 32 单元变形镜校正像差。

### 3.2 实验方案

#### 3.2.1 算法实现

在 PC 上,编程环境为 VC++6.0,实现 LPR 算法和(6)式所示的控制算法。算法流程如图 3 所示。首先,初始化图像采集卡和 D/A 卡参数,采集一帧焦平面上的基准图像;然后读取或测量电压传递矩阵  $\mathbf{R}$ ;接着随机生成一组电压常量  $\mathbf{V}_{\text{rand}}$  施加到变形镜上,作为像差,使远场光强发生变化。在第  $k$  次迭代时,采集远场图像,利用(5)式和(6)式的控制算法求出相应的补偿电压  $\mathbf{v}(t)$ ,最后将  $\mathbf{V}_{\text{rand}} - \mathbf{v}(t)$  加到变形镜上进行校正像差,完成一次迭代。当  $\mathbf{v}(t)$  等于  $\mathbf{V}_{\text{rand}}$  时,输出到变形镜上的电压为 0,系统

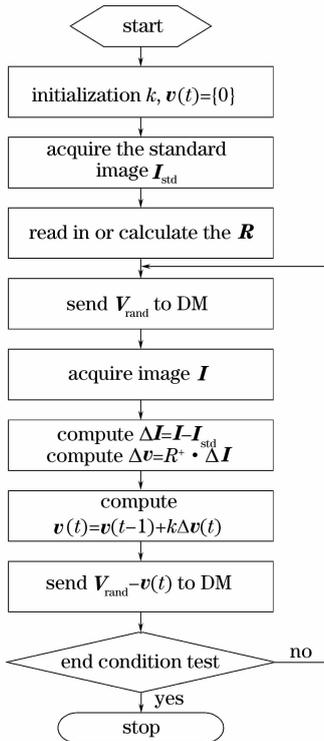


图 3 算法实现流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

远场图像等于基准图像,校正了由随机电压常量  $\mathbf{V}_{\text{rand}}$  引入的像差。

实验中利用双极法测量电压传递矩阵  $\mathbf{R}$ 。首先,记录下在变形镜的第  $i$  个驱动器上施加微小电压  $c_i$ ,即  $v_i = c_i$  时的远场光强,记为  $I_{i+}(x, y)$ ;其次,记录下电压  $v_i = -c_i$  时的远场光强,记为  $I_{i-}(x, y)$ 。那么第  $i$  个驱动器电压微小量对应的远场光强分布变化量为

$$\Delta I_i(x, y) = [I_{i+}(x, y) - I_{i-}(x, y)] / (2c_i).$$

将  $\Delta I_i(x, y)$  拉伸为列向量,就是电压传递矩阵  $\mathbf{R}$  的第  $i$  列值。如此重复,就可以得到变形镜所有驱动器的电压微小变化量与远场光强分布变化量之间的电压传递矩阵  $\mathbf{R}$ 。

本文所采用的线性相位反演算法和控制算法都是可以实时完成的,具有对动态像差实时闭环校正的能力。但由于本次实验中传感器的帧频很低,PC 计算机的速度有限,所以仅对静态像差进行闭环校正实验。

#### 3.2.2 性能评价

HS 传感器的测量精度很高,用于作为 AO 系统校正前后波面像差的测量设备。该 HS 传感器可以根据测量的波像差计算出波前误差的 RMS 值,并计算出远场光斑和 Strehl 比等值。以采集系统基准图像时的波面对 HS 传感器进行定标,作为基准波面。然后利用 HS 传感器测量并记录整个校正过程中波前误差的 RMS 值、Strehl 比等波面信息。通过校正前后波面信息以及波前误差的 RMS 曲线和 Strehl 比曲线分析校正系统的收敛速度和校正能力。

定义如(7)式所示的性能指标函数衡量校正过程中的远场图像与系统基准图像的相似程度。

$$J = \sqrt{\sum_{x=1}^{64} \sum_{y=1}^{64} [I(x, y) - I_{\text{std}}(x, y)]^2}, \quad (7)$$

式中  $I(x, y)$  表示校正过程中的远场图像的灰度值,  $I_{\text{std}}(x, y)$  表示系统基准图像的灰度值。

根据 LPR 和 AO 闭环工作原理,AO 系统理想校正后远场图像逼近基准图像,上述性能指标应该趋近于零。所以上述性能指标越小越好,表示校正后图像与基准图像越接近。

## 4 实验结果与分析

实验中,光束直径  $\phi 120$  mm,有 24 个有效驱动器,依次是编号为 2, 3, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 30, 31 的驱动器,如图 2 所

示。仅使用 CCD 像素的一部分,采集的远场图像为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ ,然后通过相邻  $4 \times 4$  个像素合并,复原计算的图像矩阵大小为  $64 \times 64$ ,所以电压传递矩阵  $R$  大小为  $4096 \times 24$ 。

图 4,图 5 和图 6 是增益系数  $k$  分别为 0.01, 0.03, 0.05 时的闭环校正过程。可以看出,增益系数  $k$  影响其收敛速度和系统的稳定性, $k$  越大,收敛速度越快,稳定性越差。当  $k=0.01$  时,收敛速度很慢,系统很稳定;当  $k=0.03$  时,迭代 150 次左右收敛,系统很稳定;当  $k=0.05$  时,经过 100 次左右迭代收敛,但是曲线抖动比较明显,稳定性变差。

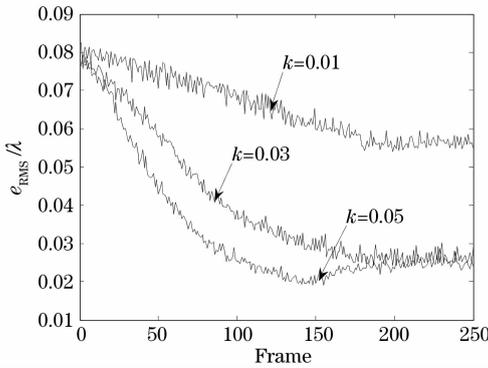


图 4  $k$  分别为 0.01,0.03,0.05 时的波前波前误差的 RMS 变化曲线

Fig. 4 Root-mean-square curve of wave front error when  $k$  is 0.01, 0.03, 0.05

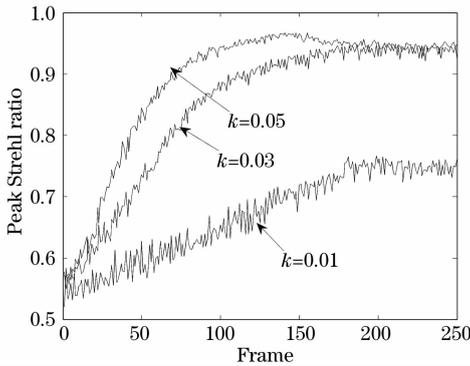


图 5  $k$  分别为 0.01,0.03,0.05 时的峰值 Strehl 比变化曲线

Fig. 5 Peak strehl ratio curve when  $k$  is 0.01, 0.03, 0.05

图 7,图 8 和图 9 为  $k=0.03$  时校正前后数据对比。图 7 中横坐标 1~24 依次对应图 3 中编号为 2,3,6,7,8,9,12,13,14,15,18,19,20,21,24,25,26,27,30,31 的 24 个驱动器,可以看出,24 个驱动器上的闭环后得到的补偿电压  $v(t)$  与校正前所加的随机电压  $V_{\text{rand}}$  整体上比较接近,但是有个别驱动

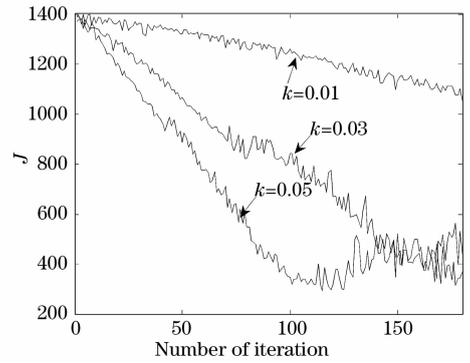


图 6  $k$  分别为 0.01,0.03,0.05 时的  $J$  变化曲线

Fig. 6  $J$  curve when  $k$  is 0.01, 0.03, 0.05

器上的复原不准确。从图 8 看出,基准波前的 RMS 和 Strehl 比分别为 0.007 和 1.00,校正前波前的 RMS 值和 Strehl 比为 0.076 和 0.58,校正后波前的 RMS 和 Strehl 比分别为 0.024 和 0.95。图 9 可以看出,校正后波前 Zernike 多项式系数有明显的变小,闭环校正效果很好。

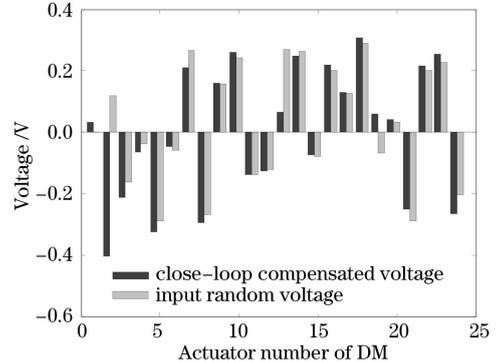


图 7  $k$  为 0.03 时得到的闭环补偿电压  $v(t)$  与校正前加的随机电压  $V_{\text{rand}}$

Fig. 7 Close-loop compensated voltage  $v(t)$  and input random voltage  $V_{\text{rand}}$  when  $k$  is 0.03

实验还对不同像差大小的情况进行了闭环研究。实验结果表明,像差越小或 Strehl 比越大闭环后效果越好,像差越大或 Strehl 比越大闭环后效果越差。当初始像差 Strehl 比大于 0.6,闭环后普遍可以达到 Strehl 比约等于 1。当像差增大到 Strehl 比小于 0.3,会出现闭环后变差的不稳定现象。基于线性相位反演算法的闭环系统在小像差条件下的校正精度很高,在大像差条件下闭环不稳定,动态范围较小。根据线性相位反演算法的理论仿真和实验研究<sup>[7~9]</sup>,线性相位反演算法在波前 RMS 小于 1 相位弧度的小像差条件下才有效果,对应的 Strehl 比大于 0.36。实验结果与理论和仿真的结果基本吻合。

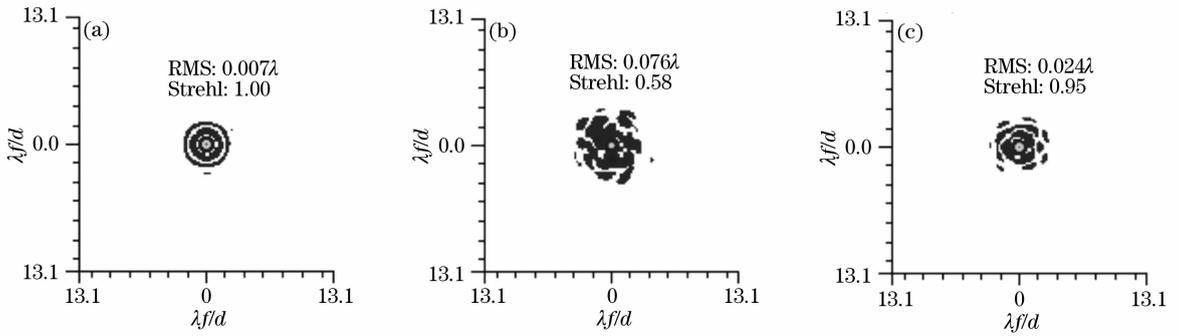


图 8 (a) HS 传感器标定的基准远场图像, (b) HS 传感器测得的闭环校正前的远场图像, (c)  $k$  为 0.03 时 HS 传感器测得的闭环校正后的远场图像

Fig. 8 (a) Calibrated far field image from HS sensor, (b) far field image before close-loop compensation from HS sensor, (c) far field image after close-loop compensation from HS sensor when  $k$  is 0.03

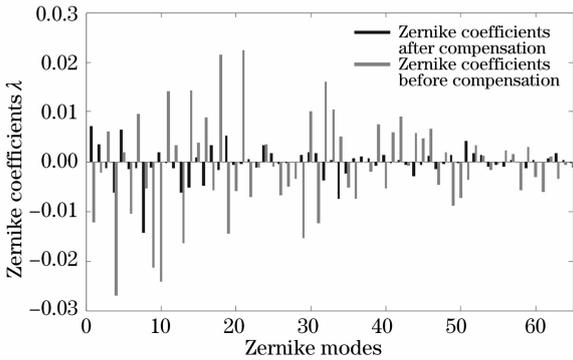


图 9  $k$  为 0.03 时 HS 传感器测得的校正前、后波面前 65 阶 Zernike 多项式系数

Fig. 9 First 65 order Zernike coefficients from HS sensor before and after close-loop compensation when  $k$  is 0.03

### 5 结 论

本文根据线性相位反演技术,建立了一套基于该技术的自适应光学闭环实验系统。实验数据说明当像差较小时,基于 LPR 算法的闭环系统的校正效果较好。在同一状态下,控制器增益系数  $k$  越大收敛越快,但是系统的稳定性越差。基于线性相位反演技术的自适应光学系统硬件结构简单,算法运算量很小,速度很快,在小像差条件下有很好的应用前景。

由于实验条件限制,本文仅对静态像差情况进行了实验研究。今后将根据实验中发现的问题认真分析电压传递矩阵  $R$  的测量误差和噪声对系统的稳定性和校正精度的影响,继续开展动态像差的闭环校正实验,对 LPR 算法做进一步的研究。

**致谢** 本项目研究中的 HS 传感器的光机部分、电控部分和软件部分分别由中科院光电所的饶学军副研究员、胡弈云高工和缪洪波助研提供,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Tyson R K. *Principles of Adaptive Optics* [M]. Academic Press, USA, 1991
- 2 Dam M A V, Lane R G. Effect of aperture subdivision on wavefront sensing[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4125**: 53~64
- 3 R. Parenti, R. J. Sasiela. Laser-guide-star systems for astronomical applications [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(1): 288~309
- 4 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(5): 2758~2769
- 5 M. C. Roggemann, B. Welsh. *Imaging Through Turbulence* [M]. CRC Press, USA, 1996. 182~183
- 6 Li Xinyang, Li Ming. Preliminary analysis on the principle and performance of a kind of linear phase retrieval wavefront measuring method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1211~1216
- 李新阳, 李 敏. 一种线性相位反演波前测量方法的原理和性能初步分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1211~1216
- 7 Li Ming, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Numerical simulation on a kind of linear phase retrieval wavefront measuring method [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2007, **19**(7): 1107~1111
- 李 敏, 李新阳, 姜文汉. 对一种线性相位反演波前测量方法的数值仿真[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(7): 1107~1111
- 8 Li Ming, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Experimental research on a new kind of linear phase retrieval wavefront measuring method [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2007, **19**(4): 611~615
- 李 敏, 李新阳, 姜文汉. 对一种线性相位反演波前测量方法的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(4): 611~615
- 9 Li Min, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Experimental comparison between linear phase retrieval sensor and Hartman wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 619~625
- 李 敏, 李新阳, 姜文汉. 线性相位反演传感器与哈特曼传感器的实验研究对比[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 619~625