

线性相位反演传感器与哈特曼传感器的实验研究对比

李 敏^{1,2} 李新阳¹ 姜文汉¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100864)

摘要 为了进一步分析线性相位反演波前传感器的性能, 搭建了基于线性相位反演测量方法的波前传感器的实验装置。针对各种波前随机像差, 同时用线性相位波前传感器和哈特曼波前传感器进行测量和复原, 将复原结果进行对比。分析了不同的探测分辨率和不同泽尼克复原阶数对线性相位反演传感器复原结果的影响。分析了靶面分辨率, 合理的靶面大小对复原精度是有利的, 肯定了线性相位反演波前传感器可以用较少的探测单元实现相似精度的测量, 采样靶面像素为 $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 时, 误差系数仍很小。利用对随机像差片进行不同阶数的复原, 线性相位反演波前传感器的复原残差的误差率基本都在 0.25 以下, 能对前 35 阶像差进行比较精确的复原。

关键词 自适应光学; 线性相位反演传感器; 哈特曼波前传感器; 波前复原

中图分类号 TH741; TP212.14 **文献标识码** A

Experimental Comparison between Linear Phase Retrieval Sensor and Hartman Wavefront Sensor

Li Min^{1,2} Li Xinyang¹ Jiang Wenhan¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

Abstract In order to analyze the performance of linear phase retrieval (LPR) sensor, an experimental setup based on the LPR method has been built. The measurement and wavefront retrieval of LPR sensor and Hartman wavefront sensor were compared on the same stochastic wavefront aberration. The influence of different detection resolution and Zernike retrieval order on retrieval results has been compared and analyzed. After analyzing the target resolution, it is considered that reasonable target size will benefit retrieval precision. At the same time, the LPR sensor can realize similar precision measurement with less detection cells. With a target resolution of $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ in experiment the error coefficient is small. The retrieval results of different orders, show the error ratio is less than 0.25 and it is comparatively accurate to retrieve pre-35 order aberrations.

Key words adaptive optics; linear phase retrieval sensor; Hartman wavefront sensor; wavefront reconstruction

1 引 言

波前传感器在光学检测和自适应光学中有广泛的用途^[1]。哈特曼波前传感器^[2]通常由微透镜和 CCD 光电传感器组成, 是一种以波前斜率测量为基础的波前测试仪器, 它能以高的时间和空间分辨力提供光束的动态像差分布。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^[3~6]。通常的相位反演技术需要同时记录一幅焦平面上的光束远场图像和一幅离焦的图像, 或连续

记录多帧图像, 利用多帧图像之间的差异, 采用迭代算法由强度计算出光束波前相位。这种相位反演技术迭代计算量大且耗时多, 不能用于实时探测的场合。线性相位反演波前传感器 (Linear phase retrieval, LPR) 是在李新阳等^[7,8]提出的一种线性相位反演算法原理基础上产生的一种波前测量传感器, 它不需要子孔径分割, 利用有像差远场图像与理想定标远场图像间的差异直接反演出波前相位。文献^[9]对这种算法的有效性进行了初步的实验研究。

收稿日期: 2007-08-28; **收到修改稿日期:** 2007-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(60408005)资助课题。

作者简介: 李 敏(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事相位反演等方面的研究。E-mail: limin_alanna@163.com

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

本文利用实验将哈特曼波前传感器与线性相位反演波前传感器进行对比,通过对同一波前随机像差的测量复原,进一步研究线性相位反演波前传感器的性能。同时分析不同的测量和计算条件对线性相位反演波前传感器复原结果的影响。

2 线性相位反演波前传感器基本原理

考虑一个典型的成像光学系统,入射光场经过聚焦镜头在远场焦平面上成像,如图 1 所示,其中 $\phi(x, y)$ 为入射孔径上的相位分布, $I(u, v)$ 为成像光学系统焦面上的光强分布, $S(x, y)$ 为成像系统的像差,通常是离焦、像散等类型。事先用一个理想无像差的参考光源对成像系统进行定标,得到仅存在

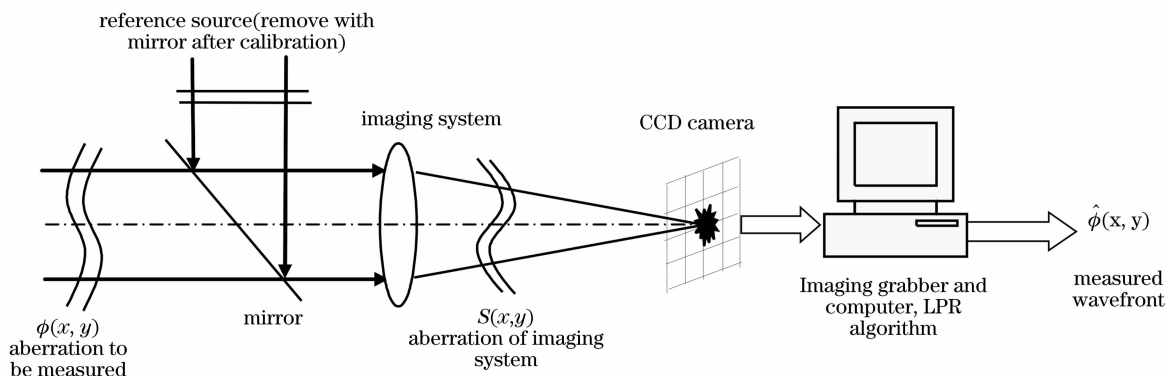


图 1 线性相位反演波前传感器的结构原理示意图

Fig. 1 Configuration of linear phase retrieval wavefront sensor

波前畸变可以用一系列波前模式的线性叠加表示:

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^P a_i M_i(x, y), \quad (2)$$

式中 a_i 为模式系数, $M_i(x, y)$ 为波前模式,如常用的泽尼克(Zernike)多项式等, P 为模式阶数。波前相位分布的变化量与入射像差的各阶波前模式系数 a_i 间存在线性关系。

(2) 式可以用矩阵形式表示为

$$\Phi = \mathbf{D} \mathbf{a}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{a} 为模式系数变化量 ($P \times 1$) 维的向量, \mathbf{D} 为 ($M^2 \times P$) 的长方矩阵。根据(1)式,易得各阶波前模式系数的变化量与焦平面上光强分布变化量间也存在线性关系:

$$\Delta \mathbf{I} = \mathbf{H} \mathbf{D} \mathbf{a} = \mathbf{Z} \mathbf{a}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{Z} = \mathbf{H} \mathbf{D}$ 为 ($N^2 \times P$) 的长方矩阵。那么从光强分布变化量反演计算波前模式系数变化量的过程为

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

$S(x, y)$ 时的远场强度分布 $I_0(u, v)$ 作为定标图像。然后用同样的光学系统测量存在像差 $\phi(x, y)$ 时的远场强度分布 $I_1(u, v)$ 。文献[9]证明,远场焦面上的光强变化量 $\Delta I(u, v) = I_1(u, v) - I_0(u, v)$ 与入射相位分布 $\phi(x, y)$ 间存在线性关系。这种线性关系可以用矩阵形式表示为^[7]

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

式中 \mathbf{H} 为 ($N^2 \times M^2$) 的线性矩阵。 $\Delta \mathbf{I}$ 为 $\Delta I(u, v)$ 展开后的向量, Φ 为 $\phi(x, y)$ 展开后的矩阵向量。当入射孔径和焦平面的对应关系确定后, \mathbf{H} 矩阵的元素可以根据成像系统的波长、焦距、CCD 的像素大小、视场大小等参量事先确定。

式中 $\mathbf{R} = \mathbf{Z}^+$ 为长方矩阵 \mathbf{Z} 的伪逆矩阵,本文中称为模式复原矩阵^[10, 11],通过奇异值分解的方法得到。

本实验测量结果以哈特曼波前传感器测量结果作为参考标准,分析线性相位反演波前传感器对波前像差的复原精度。虽然 Zygo 干涉仪能提供比哈特曼波前传感器更准确的测量数据,但不能提供同等实验条件下的测量数据,因为像差板的像差是和它自身在光路中的摆放位置相关的。我们认为只有同时对光路中的像差板进行测量的哈特曼波前传感器测量值,才能较真实的反应当时状态下的像差值。所以将 Zygo 干涉仪的数据作为理论值,哈特曼波前传感器的测量值作为对比基准。

3 对比实验装置

哈特曼波前传感器是目前自适应光学系统中应用最广泛,技术最成熟的波前传感器,他的原理示意图如图 2 所示。

哈特曼波前传感器用微透镜阵列等孔径分割元件把入射孔径分割为若干小子孔径,利用二维阵列

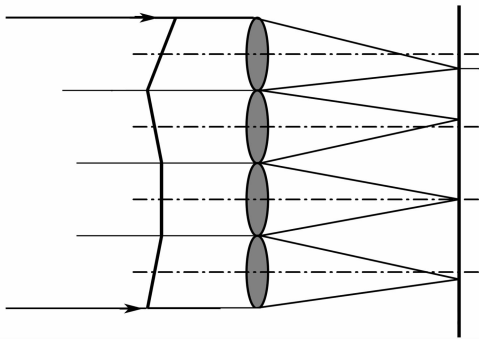


图 2 哈特曼波前传感器的原理示意图

Fig. 2 Principle of Hartman wavefront sensor

光电探测器(如面阵 CCD 相机)等测量各个子孔径上远场光斑的质心漂移量,得到波前斜率,然后用各种复原算法得到整孔径上的波前相位。它标定方便,实时性好。同时哈特曼波前传感器的复原精度是得到认可的,在本实验中,哈特曼波前传感器的子

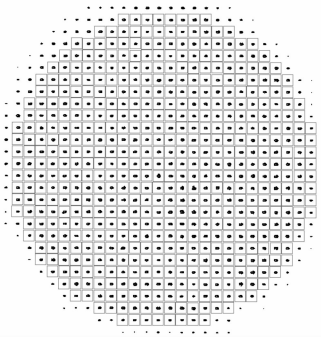


图 3 哈特曼波前传感器子孔径光点图

Fig. 3 Sub-aperture spot of Hartman wavefront sensor

孔径数为 26×26 , 如图 3 所示,可准确测量出前 65 阶泽尼克像差。

线性相位反演波前传感器与哈特曼波前传感器对比实验光路图如图 4 所示。其中口径为 3.7 mm 的入射平行光通过像差片 1 得到畸变波前,通过分光镜分为两束光,光路 1 利用哈特曼波前传感器进行波前复原,并将此结果作为波面标准,光路 2 利用线性相位反演波前传感器进行波前复原,最后将其复原结果与哈特曼的结果进行对比。其中分光镜和成像镜片的像质较好,不会给对比实验带来额外的误差。

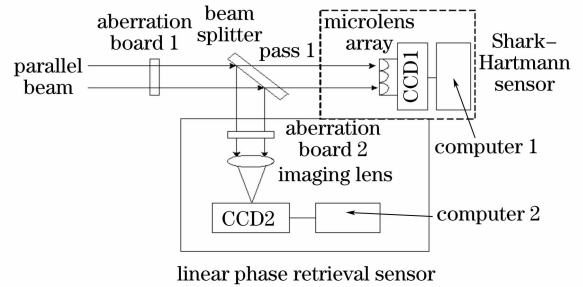


图 4 线性相位反演传感器与哈特曼传感器对比实验原理图

Fig. 4 Principle of comparing experiment between

LPR sensor and Hartman sensor

在实验室条件下进行了线性相位反演波前传感器与哈特曼波前传感器的对比实验。利用平行光源、成像光学系统、分光镜、微透镜阵列、调整架、CCD 相机、图像采集卡、计算机等搭建实验平台。具体实验装置参量如表 1 所示。

表 1 实验装置参量

Table 1 Parameters of experimental devices

Instrument	Parameters
Parallel source	Wavelength $0.532 \mu\text{m}$, pupil 3.7 mm
Imaging lens	Focal length 300 mm, pupil 3.7 mm
CCD camera	Panasonic BP330 common radio monochrome camera, speed is 25 frame/s, facular is $736 \text{ pixel} \times 575 \text{ pixel}$
Monochrome image collection card 1	OK-M10A, resolution is 8 bit
Monochrome image collection card 2	OK-M70A, resolution is 10 bit
Computer	Pentium 4 CPU, Win2000 operating system
Beam splitter	Ratio between transmission and reflection: 9:1
Microlens array	Pupil 3.7 mm, sub-aperture number 26×26 , sub-aperture size $0.14 \text{ mm} \times 0.14 \text{ mm}$

光路 2 中, CCD 放置于成像光学系统的焦面上, 在像差片 2 的位置放置验光镜片像差离焦片, 模拟成像光学系统的系统像差。先用平行光源对光路 2 的线性相位反演传感器光学成像系统自身的像差进行标定, 即记录下自身像差对应的远场图像; 同时, 在光路 1 中对哈特曼波前传感器进行标定。在不改变激光光源强度的条件下, 再将几组像差板插入平行光源

中像差片 1 的位置, 作为波前畸变像差, 在线性相位反演传感器中记录下此时的远场图像。利用线性相位反演算法, 反演出畸变波前的相位(用泽尼克系数值表示)。同时用哈特曼进行测量, 得到波前畸变像差的泽尼克系数值作为准确值。

实验的像差片是已知像差大小和类型(参照 Zygo 干涉仪测量的全口径数据)的医用眼科验光镜

片以及验光镜片与随机像差片的组合。验光镜片的有效口径有 20 mm 左右,仅使用其中的中心 3.7 mm 区域,具体数值以哈特曼测量结果为标准。主要使用球镜片离焦 S 和柱镜片散光 C 两种规格的眼科验光片。本文用 S 和 C 分别表示像差片的类型,括号内的数值表示检眼像差片的规格或像差的大小,如 S(+0.5)对应 50°的近视,C(+0.25)对应 25°的散光。注意人眼的散光是 50%的离焦与 50%的像散像差的组合。

为了比较哈特曼复原相位与反演相位的差异,定义误差波前为

$$E(x, y) = \phi_H(x, y) - \hat{\phi}(x, y), \quad (6)$$

式中 $\phi_H(x, y)$ 为哈特曼波前传感器复原的波前,在实验中认为是准确的,作为对比测量标准; $\hat{\phi}(x, y)$ 为线性相位反演波前传感器复原的波前。为了分析相位反演波前传感器的复原精度,以误差率 η ,即误差波前 $E(x, y)$ 与哈特曼复原波前 $\phi_H(x, y)$ 的均方根(RMS)值之比,作为线性相位反演波前传感器复原波面准确度的评价指标。如果误差率 η 值越小,说明相位反演算法越准确。

4 实验结果分析

利用数值仿真^[8],对成像探测器靶面分辨力对线性相位反演传感器的空间探测能力的影响进行了分析,认为随着靶面分辨力降低,线性相位反演传感器的空间分辨力会下降,有效复原像差阶数减少。但即使如此,当采样靶面像素为 16 pixel×16 pixel 时,有效复原像差阶数仍可达前 20 阶左右。而且在实际应用中,为了提高速度和光能利用率,在不显著降低性能的前提下,希望能用更少的探测单元实现探测和复原。但对比实验中使用的 CCD 相机的采样率较高,为了模拟各种低采样率条件下的复原情况,采用像素合并的方法,将多个像素点的值合并成一个像素点的值,从而实现低采样率条件下的波前复原。针对采样靶面像素的不同,分两种情况对波前复原结果进行分析:针对波前像差为柱镜片散光 C(+0.25),在相同的视场大小条件下,分别分析采样靶面像素为 128 pixel×128 pixel,64 pixel×64 pixel,32 pixel×32 pixel,16 pixel×16 pixel,8 pixel×8 pixel,6 pixel×6 pixel,5 pixel×5 pixel,4 pixel×4 pixel,在去除噪声影响后对前 10 阶泽尼克系数的复原情况;针对波前像差为柱镜片散光 C(+0.25)和随机像差板的组合,采样靶面像素为 64 pixel×64 pixel,分析在去除噪声影响后对前 10 阶,前 20

阶,前 35 阶泽尼克系数的复原情况。

由于(5)式中的 \mathbf{R}^+ 复原矩阵在线性相位反演算法中起很关键的作用,在进行实际波前复原之前,确定它的计算条件是必要的。根据对模式标定系数大小对复原矩阵影响的仿真^[8],本实验中确定 $c=0.05$ 。实验选取的系统像差为球镜片离焦 S(+0.5),分别计算了采样靶面像素为 256 pixel×256 pixel,128 pixel×128 pixel,64 pixel×64 pixel,32 pixel×32 pixel,16 pixel×16 pixel,8 pixel×8 pixel,6 pixel×6 pixel,5 pixel×5 pixel,4 pixel×4 pixel,泽尼克复原阶数为 10,20,35 等不同条件下的复原矩阵。

4.1 噪声的测量

由于实验中哈特曼波前测量和线性相位反演波前测量不是共路的,在以哈特曼复原结果为标准的前提下,必须考虑测量噪声的影响。因此,分别测量了 CCD 噪声对哈特曼波前传感器和线性相位反演波前传感器的影响。其测量方法为不加入任何波前像差片,对哈特曼波前传感器定标后直接测量;而对线性相位反演波前传感器,在系统中加入系统像差片[球镜片离焦 S(+0.5)],连续测量 20 帧,先将前 10 帧的平均值作为系统像差,再将后 10 帧的平均值作为噪声和系统像差的混合像差,利用线性相位反演算法测量噪声。哈特曼波前传感器的噪声测量结果峰值为 0.029,均方根值为 0.0042;线性相位反演波前传感器的噪声测量结果峰值为 0.025,均方根值为 0.0041。可见噪声的影响很小,不影响实验进行。

4.2 不同靶面分辨力的测量结果

对线性相位反演波前传感器,系统像差使用球镜片离焦 S(+0.5),待测像差使用柱镜片散光 C(+0.25),视场为 128 pixel×128 pixel,分别分析不同靶面分辨力的复原情况,复原结果用泽尼克系数表示波前相位,并且以峰值和均方根值作为衡量指标,将哈特曼波前传感器测量结果与线性相位反演波前传感器复原结果进行对比。其中峰值和均方根值的计算是以平面波为标准,由线性相位反演波前传感器方法和哈特曼传感器方法分别得到的复原波面与平面波的误差;而误差峰值和误差均方根值的计算是以哈特曼测量结果为标准,线性相位反演波前传感器方法测量结果与哈特曼方法测量结果的残差。具体对比实验结果见表 2,前 10 阶泽尼克系数对比见图 5 所示,对靶面 8 pixel×8 pixel 的情况,给出了具体的三维波面图,如图 6 所示。

表 2 不同靶面分辨力条件下对柱镜片散光 C(+0.25)复原的对比实验结果

Table 2 Retrieval results to cylinder eyeglass C(+0.25)aberration under different target resolving power

	Hartmann sensor	LPR sensor (different target resolving power)							
		128×128	64×64	32×32	16×16	8×8	6×6	5×5	4×4
PV /λ	0.6157	0.6057	0.6145	0.6019	0.5551	0.5758	0.4437	0.5041	0.7956
RMS /λ	0.1201	0.1207	0.1227	0.1206	0.1173	0.1207	0.0922	0.1035	0.1380
Error PV /λ		0.0494	0.0458	0.0456	0.1020	0.0961	0.2179	0.2365	0.2571
Error RMS /λ		0.0088	0.0091	0.0086	0.0196	0.0204	0.0356	0.0381	0.0486
η		0.0733	0.0758	0.0716	0.1632	0.1699	0.1481	0.3172	0.4047

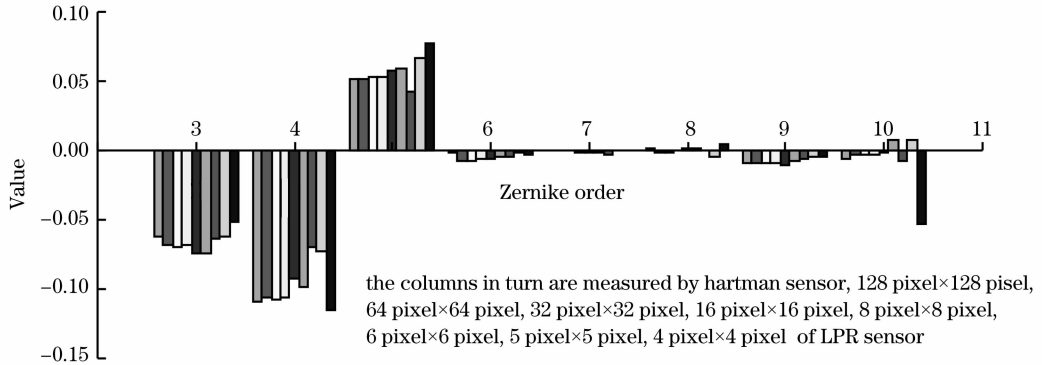


图 5 对柱镜片散光 C(+0.25)的复原结果对比

Fig. 5 Retrieval results to cylinder eyeglass C(+0.25) aberration

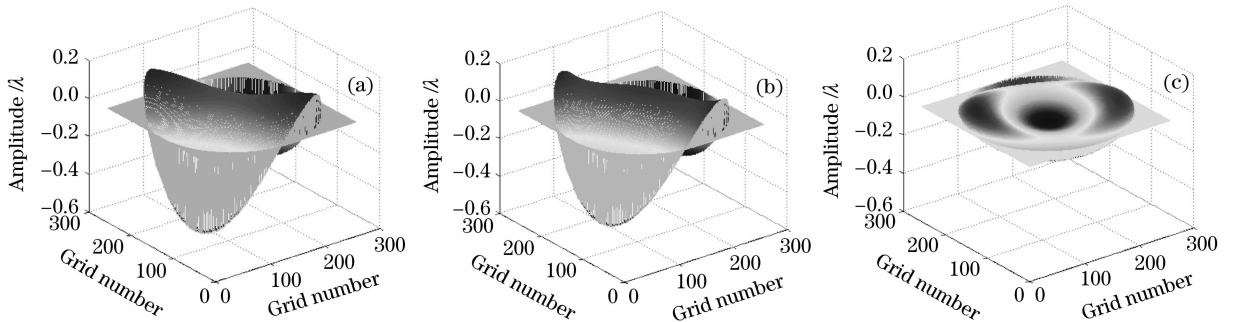


图 6 靶面分辨力为 8 pixel×8 pixel 时,柱镜片散光 C(+0.25)的哈特曼传感器复原波面(a),线性相位反演传感器复原波面(b)及残差(c)

Fig. 6 Retrieval wavefront of Hartmann sensor (a), linear phase retrieval sensor (b) and residual error (c) to cylinder eyeglass C(+0.25) aberration under the condition of target resolving power 8 pixel×8 pixel

从实验分析数据可知,靶面分辨力对复原结果是有影响的。当采用较多的像素数,噪声的影响较大;当采用的像素数与像差阶数和靶面相匹配时,如实验中的 32 pixel×32 pixel 靶面,可以抑制噪声,达到更好的复原效果,但是当靶面的像素数更小时,就会丢掉一些有用信息,使复原精度变差。如 8 pixel×8 pixel,6 pixel×6 pixel 像元靶面的相对均方根值是 128 pixel×128 pixel 靶面的大约 2 倍,5 pixel×5 pixel 靶面是 128 pixel×128 pixel 靶面的 3 倍,4 pixel×4 pixel 靶面是 128 pixel×128 pixel 靶面的 5 倍,它的整体趋势随着靶面分辨力的下降,误差增大。

在本实验中,虽然当采样靶面像素为 4 pixel×4 pixel 时,其误差率(复原精度)较前面几个靶面的误差率(复原精度)较大,但其实际值还是比较小的。当采样靶面像素为 8 pixel×8 pixel 时,误差系数仍很小,这在一定程度上肯定了线性相位反演波前传感器可以用较少的探测单元实现一定精度的测量,这对于在微光条件下应用很有帮助。

4.3 不同复原阶数时的测量结果

在不改变系统像差的条件下,针对随机像差板,实验中使用柱镜片散光 C(+0.25)和随机像差板的组合,分别复原其前 10 阶,前 20 阶和前 35 阶的像差值,并与哈特曼波前传感器的测量结果进行对比。

随机像差板是由手工随意磨制的玻璃片,它的主要像差还是以低阶的离焦和像散为主,有少量的高阶像差。本次测量的靶面为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,通过合并到 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$,复原结果用泽尼克系

数表示波前相位,并且以峰值和均方根值作为衡量指标,具体对比实验结果见表 3,给出了具体的泽尼克系数对比曲线图和复原的三维波面图,分别见图 7和图 8 所示。

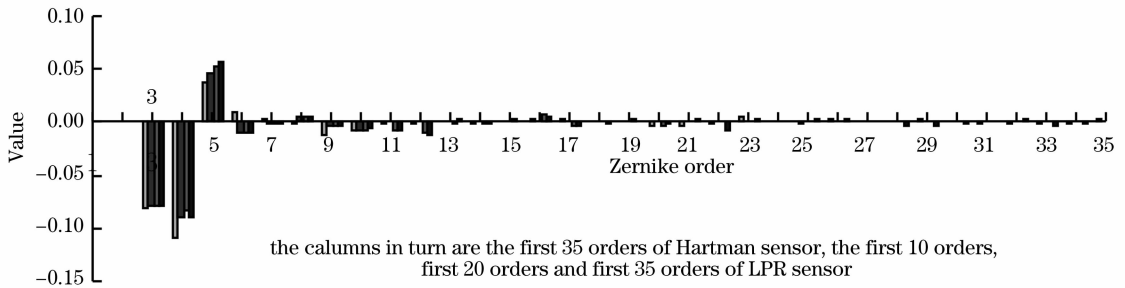


图 7 对随机像差的对比复原结果

Fig. 7 Retrieval results to random aberration

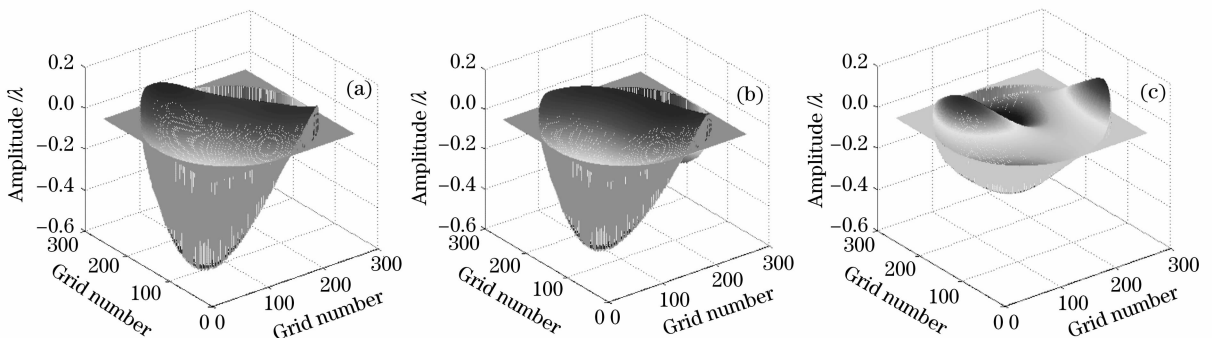


图 8 对随机像差的哈特曼传感器复原波面(a),线性相位反演传感器复原波面(b)和残差(c)

Fig. 8 Retrieval wavefront of Hatman sensor (a), linear phase retrieval sensor (b) and residual error (c) to random aberration

表 3 对随机像差的对比实验结果

Table 3 Results of control experiment to random aberration

	Hartman sensor	LPR sensor, $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ target resolving power		
		First 10 orders	First 20 orders	First 35 orders
PV / λ	0.6559	0.5572	0.5755	0.6557
RMS / λ	0.1249	0.1134	0.1123	0.1208
Error PV / λ		0.2024	0.1681	0.3020
Error RMS / λ		0.0273	0.0343	0.0459
η		0.2188	0.2750	0.3679

在靶面分辨力分析的基础上,认为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 靶面的复原精度是不错的。通过对随机像差板的复原,同时与哈特曼测量结果的对比,线性相位反演波前传感器的复原残差的误差率 η 基本都在 0.25 以下,从探测精度上看,能对前 35 阶像差进行比较精确的复原。

同时从泽尼克系数值的对比结果可以看到,虽然在个别阶数上的值还有一定的差异,但是对主要像差的类型和数值的复原还是比较准确的,而且存在差异的阶数值都相对很小,对整体波面的影响较小。实验中还发现,对较低阶像差,复原不需要更多的阶数,这样反而会加入噪声的影响,使复原精度下降。

在哈特曼波前传感器的测量中,由于泽尼克偏导函数的不完全正交性以及有限的斜率采样点,当模式阶数增大时,都将使复原矩阵的秩不完备,导致模式像差间的耦合。为了分析线性相位反演波前传感器的复原特性,对其复原的前 10 阶,前 20 阶和前 35 阶的值作了比较细致的比较,发现彼此之间低阶像差的复原结果吻合得较好,对多余的高阶像差,随着复原阶数的增加,对高阶像差的复原结果没有出现不一致的情况。

5 结 论

通过多组像差片的实时复原对比,线性相位反

演波前传感器的复原精度比较高。分析了靶面分辨力,合理的靶面大小对复原精度是有利的,肯定了线性相位反演波前传感器可以用较少的探测单元实现相似精度的测量,因为按照实验条件,哈特曼波前传感器的子孔径数为 26×26 ,每个子孔径成像需要 n 个像素,则哈特曼波前传感器成像需要 $26 \times 26 \times n$ 个像素;而线性相位反演传感器在实现相同精度测量的前提下,只需要 n 个像素成像,可以大幅减少可探测单元数。利用对随机像差片进行不同阶数的复原,认为线性相位反演波前传感器的探测和复原比较准确。实验证实了系统像差中允许存在小部分的非对称性和其他对称性像差。在实际测量时,尽管在主体像差为离焦的条件下,还存在小部分其他的非对称像差,同样可以对畸变波前进行比较准确的复原。

参 考 文 献

- 1 R. K. Tyson. *Principles of Adaptive Optics* [M]. New York: Academic Press, 1991
- 2 Zhou Renzhong. *Adaptive Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, China, 1996
周仁忠. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 3 Marcos A. van Dam, R. G. Lane. Effect of aperture subdivision on wavefront sensing[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4125**: 53~64
- 4 R. G. Lane, R. Irwan. Phase retrieval as a means of wavefront sensing[J]. *IEEE*, 1997, **2**: 242~245
- 5 R. A. Gonsalves. Phase retrieval[C]. *Proc. SPIE*, 1985, **528**: 202~215
- 6 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(5): 2758~2769
- 7 Li Xinyang, Li Min. Preliminary analysis on the principle and performance of a kind of linear phase retrieval wave-front 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
- 8 Li Min, 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
- 9 Li Min, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Experimental research on a new method of linear phase retrieval wavefront measurement[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
- 10 Li Jun, Chen Haiqing, Ren Wenxin *et al.*. Improvement of the robustness of Hartmann wavefront sensor by using Zernike moment[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1033~1037
李 俊,陈海清,任温馨等. Zernike 矩提高哈特曼波前传感器的鲁棒性[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1033~1037
- 11 Xie Wenke, Jiang Zongfu. Real-time wavefront construction approach based on proper orthogonal decomposition basis function [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 327~330
谢文科,姜宗福. 基于本征正交分解基的实时波前重构方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 327~330