

文章编号: 0253-2239(2007)07-1211-6

一种线性相位反演波前测量方法的原理和性能初步分析^{*}

李新阳¹ 李 敏^{1,2}

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 对一种基于线性相位反演的新型波前测量方法的基本原理和性能进行了研究。事先对成像光学系统的自身像差进行定标并记录下定标图像。传感器工作时只需测量出有像差时的一幅远场图像与定标图像的差, 就可以用线性矩阵相乘方法得到待测像差对应的泽尼克多项式系数。讨论了这种线性相位反演波前测量方法中确定泽尼克模式复原矩阵的方法。以大气湍流畸变波前像差的测量为例, 对这种线性相位反演波前测量方法进行了数值仿真研究。结果表明, 这种线性相位反演算法具有空间分辨率高、对小像差测量精度高的特点, 但测量动态范围有限。这种线性相位反演波前传感器将适用于自适应光学闭环系统。

关键词: 光学测量; 线性相位反演; 大气湍流; 泽尼克模式

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Preliminary Analysis on Principle and Performance of a Linear Phase-Retrieval Wave Front Measuring Method

Li Xinyang¹ Li Min^{1,2}

(¹ Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdou 610209)
(² Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The basic principle and characteristics of a new kind of linear phase-retrieval (LPR) wave front measuring method were analyzed. A far-field image of the LPR sensor system itself should be measured and stored as the image of calibration in advance. The difference between an image of aberration and the image of calibration was measured using the LPR sensor, then the Zernike coefficients of aberration was gotten by calculation method of linear matrix multiplication. The process and method to get Zernike reconstruction matrix were discussed. The performances of the LPR method was tested by numerical simulation on measuring atmosphere disturbed wave front using the LPR method. The results showed that the LPR obtain high spatial resolution, and high precision for small aberrations, but the measuring range is limited. Therefore the LPR is suitable for close-loop adaptive optics systems.

Key words: optical measurement; linear phase retrieval; atmosphere turbulence; Zernike polynominal

1 引言

波前传感器在光学检测、光束诊断、自适应光学等领域中有广泛的用途。通常哈特曼-夏克型波前传感器通过测量各个分割子孔径上子光斑的漂移量或子孔径斜率, 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, 在实时性要求高的自适应光学系统中得到广泛应用^[1,2]。但哈特曼传感器存在一个致命弱点, 即光能利用率较低。由于每一个分割

子孔径上都需要一定的入射光子数, 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^[3], 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。

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, 通过迭代算法得到对应的波前相位信息^[4,5]。相位反演技术的光能利用率高, 可工作在微弱信标条件下, 但计算量大、算法复杂, 仅适合图像的事后处理等实时性

* 国家自然科学基金(60408005)资助课题。

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

收稿日期: 2006-10-24; 收到修改稿日期: 2007-01-26

要求不高的场合^[2]。在自适应光学等实时性要求高的情况下,最好能够从全孔径的远场光斑利用线性运算快速得到对应的入射波前相位。W. J. Wilde^[6]对基于成像探测的线性相位反演(Linear phase retrieval,LPR)技术进行了研究,但提出的线性相位反演算法比较复杂,且仅在小像差条件下有效,严重限制了其在大气湍流畸变波前探测、自适应光学等场景下的应用前景。为此本文提出一种基于线性相位反演的波前测量方法,讨论了这种基于线性相位反演的波前测量方法的基本原理,并利用数

值仿真方法对这种线性相位反演波前测量技术的性能进行初步分析。

2 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。令 $\mathbf{x}=(x, y)$ 代表入射孔径上正交网格点, (ξ, η) 代表焦平面上的正交网格点。根据衍射积分理论, 焦平面上的复振幅分布 $w(\xi, \eta)$ 与入射孔径上复振幅间的关系为

$$w(\xi, \eta) = \frac{\exp[i\pi(\xi^2 + \eta^2)/(\lambda f)]}{i\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \exp\left[-\frac{i2\pi(x\xi + y\eta)}{\lambda f}\right] dx dy, \quad (1)$$

其中 λ 为波长, f 为成像焦距, $A(x, y) \exp[i\phi(x, y)]$ 为入射孔径上的复振幅, 其中 $A(x, y)$ 为振幅分布, $\phi(x, y)$ 为相位分布。在通常情况下, 入射孔径上的光强分布比较均匀, 即振幅分布 $A(x, y)$ 是常量, 其对成像的影响可以忽略。如果定义 $\mathbf{u} = (u, v) = (\xi, \eta)/(\lambda f)$, 并且忽略(1)式中积分前的项, 入射孔径和成像焦平面上的复振幅分布可以用二维傅里叶变换关系表示:

$$w(u, v) = F\{A \exp[i\phi(x, y)]\}, \quad (2)$$

其中傅里叶变换关系

$$F\{f(x, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-i2\pi(xu + yv)] dx dy.$$

假设在焦平面上有一个成像探测器记录光斑强度分布 $I(\mathbf{u}) = |w(\mathbf{u})|^2$ 。通常相位反演就是从焦平面上的光斑强度分布得到入射孔径上光束相位分布的信息。R. A. Gonsalves^[7] 证明如果同时利用一幅焦平面图像和一幅离焦图像, 就可以得到唯一的解。本文利用一幅带像差远场图像与事先定标理想图像间的变化量, 可以用线性运算方法测量出波前畸变。

根据(2)式, 如果在入射孔径的相位分布 $\phi(\mathbf{x})$ 上添加一个小的变化量 $\Delta\phi(\mathbf{x})$, 利用指数函数的近似关系, 得到成像面上的复振幅分布为

$$w(\mathbf{u}) = FA\{\exp[i\phi(\mathbf{x}) + i\Delta\phi(\mathbf{x})]\} \approx F\{A \exp[i\phi(\mathbf{x})][1 + i\Delta\phi(\mathbf{x})]\}, \quad (3)$$

那么焦平面上复振幅分布的变化量 $\Delta w(\mathbf{u})$ 与相位分布变化量 $\Delta\phi(\mathbf{x})$ 间存在近似线性关系:

$$\Delta w(\mathbf{u}) = w(\mathbf{u}) - w(\mathbf{u}) = F\{i\Delta\phi(\mathbf{x}) A \exp[i\phi(\mathbf{x})]\}, \quad (4)$$

施加相位变化量后焦平面上的光强分布存在变化量为

$$I(\mathbf{u}) + \Delta I(\mathbf{u}) = [w(\mathbf{u}) + \Delta w(\mathbf{u})]^* [w(\mathbf{u}) + \Delta w(\mathbf{u})], \quad (5)$$

$$\Delta I(\mathbf{u}) = w(\mathbf{u})^* \Delta w(\mathbf{u}) + w(\mathbf{u}) \Delta w(\mathbf{u})^* + \Delta w(\mathbf{u})^* \Delta w(\mathbf{u}) \approx 2\text{Re}[w(\mathbf{u})^* \Delta w(\mathbf{u})], \quad (6)$$

其中 * 为复数的共轭符号, Re 为取复数的实部。(6)式中忽略了二阶小量 $|\Delta w(\mathbf{u})|^2 \approx 0$ 。因此得到

$$\Delta I(\mathbf{u}) \approx 2\text{Re}\{F\{A \exp[i\phi(\mathbf{x})]\}^* F\{i\Delta\phi(\mathbf{x}) \cdot A \exp[i\phi(\mathbf{x})]\}\}, \quad (7)$$

(7)式说明焦平面上光强分布的变化量与入射孔径上相位分布的变化量间存在近似线性关系。这种线性关系可以用矩阵形式表示为

$$\Delta \mathbf{I} = \mathbf{H} \cdot \Delta \Phi, \quad (8)$$

其中光强分布变化量 $\Delta \mathbf{I}$ 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; 相位分布变化量 $\Delta \Phi$ 为 $M^2 \times 1$ 维的向量, 是把入射孔径

上 $M \times M$ 的二维相位点阵列展开为单列向量而成; \mathbf{H} 为 $N^2 \times M^2$ 的线性矩阵。当入射孔径和焦平面的对应关系确定后, \mathbf{H} 矩阵的元素可以事先计算或测量确定。根据线性方程和最小二乘法原理, 已知光强分布变化量求解相位分布变化量的过程为

$$\Delta \Phi = \mathbf{H}^+ \cdot \Delta \mathbf{I}, \quad (9)$$

其中 \mathbf{H}^+ 是 \mathbf{H} 的伪逆矩阵, 一般通过奇异值分解

(SVD) 方法得到, 当 $N = M$, $\mathbf{H}^+ = \mathbf{H}^{-1}$ 。在求解过程中, 有两个重要的约束条件。其一是相位变化量的总和为零:

$$\sum_{n=1}^{N^2} \Delta\Phi(n) = 0, \quad (10)$$

这个约束条件也可以理解为孔径上的相位平均值为零, 避免求解过程中的波前平移问题。另一个约束条件是光强分布变化量的总和为零, 因为焦平面上光斑的总能量守恒:

$$\sum_{n=1}^{N^2} \Delta\mathbf{I}(n) = 0, \quad (11)$$

根据(9)式~(11)式就可以从焦平面上的光强分布进行波前反演, 但这种算法很不现实。首先, 计算量和存储量巨大。如果要从 100×100 的光强分布复原出 100×100 的相位分布, 就需要对 $10^4 \times 10^4$ 的巨大矩阵进行存储和计算。其次没有必要直接计算每一个点的相位值。根据模式波前复原的原理, 只需要计算出一系列固定波前模式的系数, 即可复原出波前。波前畸变可以用一系列波前模式的线性叠加表示:

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^P a_i M_i(x, y), \quad (12)$$

其中 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各阶波前模式系数的变化量 Δa_i 存在线性关系:

$$\Delta\phi(x, y) = \sum_{i=1}^P \Delta a_i M_i(x, y), \quad (13)$$

(13)式可以用矩阵形式表示为

$$\Delta\Phi = \mathbf{D} \cdot \Delta\mathbf{a}, \quad (14)$$

其中模式系数变化量、 $D\mathbf{a}$ 为 $P \times 1$ 维的向量, \mathbf{D} 为 $M^2 \times P$ 的长方矩阵。根据(8)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:

$$\Delta\mathbf{I} = \mathbf{H}\mathbf{D} \cdot \Delta\mathbf{a} = \mathbf{Z} \cdot \Delta\mathbf{a}, \quad (15)$$

其中 \mathbf{Z} 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

$$\Delta\mathbf{a} = \mathbf{R}^+ \cdot \Delta\mathbf{I}, \quad (16)$$

其中 $\mathbf{R} = \mathbf{Z}^+$ 是长方矩阵 \mathbf{Z} 的伪逆矩阵, 称为模式复原矩阵, 通过奇异值分解的方法得到。如果传感器事先用一个各阶模式系数为零的理想无像差光源定标, 得到理想远场图像。用有像差远场图像于理想远场图像相减得到图像变化量 $\Delta\mathbf{I}$, 那么利用(16)式得到的模式系数变化量 $\Delta\mathbf{a}$ 就是待测像差包含的模式系数。

3 基于线性相位反演的波前测量方法

运用波前像差测量领域通常采用的泽尼克多项式表征经大气扰动的入瞳处的光学波前畸变, 待测像差的各阶泽尼克系数按照事先约定顺序(一般按照空间频率从低到高的顺序)排列为一个向量。波前测量的目的就是得到待测像差对应的系数向量的值。

线性相位反演波前传感器的结构如图 1 所示, 其中待测波前畸变经过一个衍射成像系统后在焦平面上成像。焦平面上放置一个 CCD 数字相机阵列, 直接利用读出的图像数据进行线性波前反演。 $S(x, y)$ 为这个成像系统自身的像差, $\hat{\phi}(x, y)$ 为反演出的波前畸变。事先对一个理想平面光源进行测量, 记录下理想平面光源对应的成像光学系统的远场图像的二维光强分布, 按照事先的约定展开为列向量, 并记为 \mathbf{I}_0 ; 利用同样的成像光学系统、成像器件、图像采集卡等记录下待测量畸变波前对应的远场图像的二维光强分布, 同样按照事先的约定展开为列向量, 并记为 \mathbf{I} ; 求出存在像差前后远场图像光强分布的相对变化, 记为列向量 $\Delta\mathbf{I} = \mathbf{I} - \mathbf{I}_0$ (或者 $\Delta\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}$ 也可, 根据事先约定); 根据光源波长、传感器的焦距、成像器件的像素大小等已知参量, 事先定标得到的传感器的远场光强相对变化值 $\Delta\mathbf{I}$ 与入射波前中各项泽尼克系数相对变化值 $\Delta\mathbf{a}$ 间对应关系的响应矩阵, 对响应矩阵求逆得到复原矩阵 \mathbf{R} ; 根据关系 $\Delta\mathbf{a} = \mathbf{R}\Delta\mathbf{I}$, 利用向量矩阵乘法的线性运算得到 $\Delta\mathbf{a}$ 。因为理想平面波对应的泽尼克系数 $a_0 = 0$, 所以待测波前畸变中包含的各项泽尼克系数 $\mathbf{a} = \Delta\mathbf{a}$ 。得到泽尼克系数后根据各阶泽尼克多项式的定义, 可以很方便地得到待测量波前畸变的具体值。

因为这是一种根据光学系统像面上光强分布信息得到入射波前相位信息的方法, 属于“相位反演”技术范畴。同时因相位反演过程由一个向量矩阵间的乘法完成, 是一种典型的线性运算过程, 所以将这种相位反演算法称为“线性相位反演算法”。

传感器使用前需要用一个理想的参考平面波光源进行标定, 并测量模式响应矩阵 \mathbf{R} 。测量过程为: 首先记录下某阶波前模式系数 $a_i = c_i$ (c_i 为计处复原矩阵时第 i 阶泽尼克模式所取的系数值) 时成像结果, 记为 $\mathbf{I}_{i+}(u, v)$, 然后记录下波前模式系数 $a_i = -c_i$ 时的成像结果, 记为 $\mathbf{I}_{i-}(u, v)$ 。那么单位模式系数变化量对应的光强变化量为 $\Delta\mathbf{I}_i(u, v) = [\mathbf{I}_{i+}(u, v) - \mathbf{I}_{i-}(u, v)]/(2/c_i)$ 。将 $\Delta\mathbf{I}_i(u, v)$ 拉伸展开为列向量, 就是模式响应矩阵 \mathbf{Z} 的第 i 列值。如此重复, 就可以得到需要的任意阶波前模式系数。

与光强分布的模式响应矩阵。

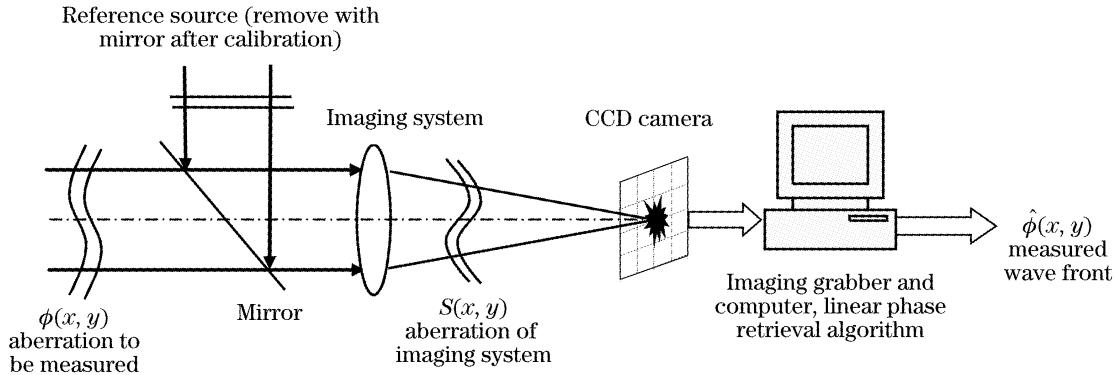


图 1 基于线性相位反演波前测量方法原理示意图

Fig. 1 Principle of the linear phase-retrieval wave front sensor

在测量模式响应矩阵过程中,成像系统自身的像差非常重要。实际工作中,任何一个波前传感器的光学成像系统都不是理想的,存在一个固有像差,需要事先标定。例如哈特曼传感器就需要事先测量自身像差造成的子孔径光斑偏移量,并以此为将来测量的零点。线性相位反演波前传感器的自身像差可以自由设置,可以通过自由调整成像面的位置或透镜的位置改变离焦像差的大小。参考平面波的成像分布 $I_0(u,v)$ 中包括了传感器自身像差 $S(x,y)$ 的影响。传感器自身像差 $S(x,y)$ 的大小和形式对模式响应矩阵和波前反演传感器性能有影响,当传感器自身像差改变后,需要重新测量模式响应矩阵。

为了比较待测相位与反演相位的差异,以误差率 η ,即误差波前 $E(x,y)$ 与待测波前 $\phi(x,y)$ 的均方根值(RMS)之比,作为传感器相位反演准确度的评价指标:

$$\eta = \frac{R[\phi(x,y) - \hat{\phi}(x,y)]}{R[\phi(x,y)]}, \quad (17)$$

式中 $R[\cdot]$ 为取均方根。如果误差率 η 值小于 1,说明相位反演算法有效。误差率越小,说明相位反演算法越准确。

4 数值仿真

对传感器自身像差为离焦的一种情况仿真计算了前 65 阶泽尼克模式的响应矩阵。泽尼克多项式按照 Noll 的建议排布^[8]。传感器自身像差 $S(x,y)$ 的峰-谷(Peak-valley, PV)值为 6.92 rad, 均方根值为 2 rad。远场光斑通过快速傅里叶变换(FFT)算法得到,在快速傅里叶变换计算过程中焦面上每像素对应的视场角(FOV)为 $0.2\lambda/D$, 其中 λ 为成像波长, D 为成像系统直径。本文计算采用的像面大小

为 $50 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}$, 即全视场角为 $10 \times 10\lambda/D$ 。

用波前传感器对各种已知大小的波前像差进行测量,通过分析测量误差可以反映该波前传感器的探测能力。本文利用 N. Roddier^[9]的方法,用随机数经过泽尼克系数协方差矩阵滤波产生若干帧符合科尔莫戈罗夫(Kolmogorov)大气湍流特征的已知湍流畸变波前作为待测量。湍流畸变波前中去除了波前整体倾斜。湍流畸变波前的计算网格是 128×128 ,足以保证计算结果的精确性。由于激光通过大气湍流传输后的光束含有各种空间频率的随机像差,随机像差的大小和泽尼克模式阶数可以任意设置,用于综合检验波前传感器对各种高低空间频率像差的探测能力和测量精度非常方便。

本文分别对从弱到强四组的大气湍流畸变波前进行了线性相位反演波前测量仿真计算。仿真产生连续 100 帧的 4 组随机畸变波前的均方根平均值如表 1 所示。用同样的线性相位反演算法对这几组随机畸变波前序列进行波前测量,并分别计算了几种情况下复原残余波前均方根值和误差率平均值,结果如表 1 所示。对第 2 组畸变波前中的某一帧,利用线性相位反演算法得到的泽尼克系数复原结果与待测像差的对比如图 2 所示,畸变波前及其线性相位反演波前的三维图对比如图 3 所示。

对结果分析可知,对于像差较小的情况,线性相位反演算法的波前测量精度较高。例如对第 1 组数据的复原残差很小,误差率不到 20%。随着待测像差增加,线性相位反演算法的复原精度逐渐下降。例如对第 4 组的湍流畸变波前的测量复原误差较大,误差率只有约 80%。对更加强的湍流畸变波前,线性相位反演算法的测量误差将继续增大。在一定参量下,线性相位反演波前传感器的动态范围

是有限的。从图 2 可见, 线性相位反演波前传感器的空间分辨能力很高, 可以有效测量的泽尼克阶数比较高, 在本文中可以对一直到 65 阶泽尼克模式得到较准确复原结果。

表 1 线性相位反演对不同波前畸变大小下的复原误差

Table 1 Reconstruction error of linear phase retrieval on different wave front aberrations

Data groups	Aberration wave front root-mean-square / rad	Residual reconstructed wave front root-mean-square / rad	Error ratio
1#	0.205	0.0367	0.179
2#	0.366	0.1146	0.313
3#	0.652	0.3429	0.526
4#	1.162	0.9133	0.786

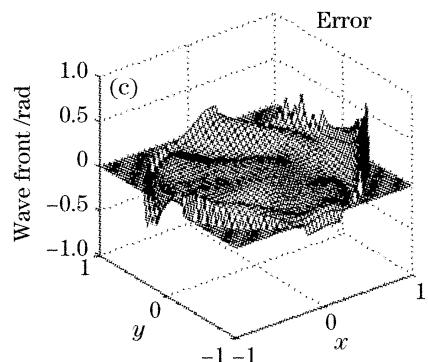
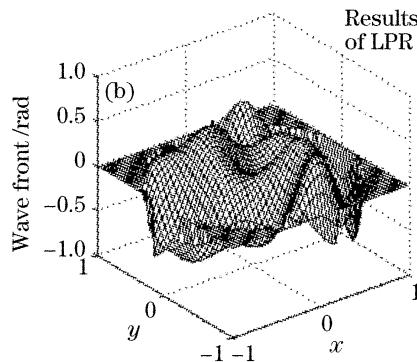
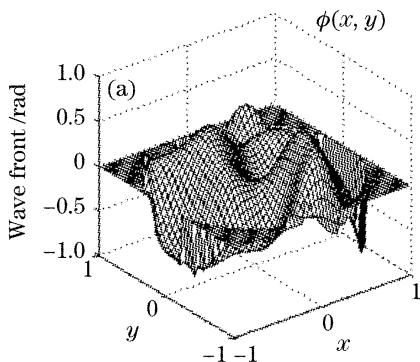


图 3 大气湍流畸变波前(a)与线性相位反演算法得到的波前(b)及基测量误差的三维图对比

Fig. 3 Comparison of the three-dimensional plots shapes of atmosphere disturbed wave front (a), wave front (b) and its measurement error by using linear phase retrieval method (c)

从分析可以看出线性相位反演波前测量方法的显著特点。首先这种线性相位反演波前测量方法的空间分辨能力较高。因为高空间频率的像差变化在成像远场的反映很明显, 容易被反演出来。而传统子孔径分割型波前传感器的空间分辨力依赖于子孔径分割的密度。例如 8×8 子孔径排布的哈特曼传感器只能有效探测到约 35 阶泽尼克模式, 按照每子孔径至少 8 pixel \times 8 pixel 计算, 需要 64×64 或更大靶面的 CCD 成像探测器^[10,11]。而本文的线性相位反演传感器用 50 pixel \times 50 pixel 成像靶面就可以测量出前 65 阶泽尼克模式。根据线性相位反演的原理, 线性相位反演算法的空间分辨力与成像靶面的大小、像素大小、像素的光强响应动态范围, 以及读出和计算的精度等特性有关。这种线性相位反演波前测量方法的另一个特点是对于小像差的复原精度较高, 对大像差的复原精度受动态范围限制。如果像差的远场强度分布超出传感器的靶面范围, 会带来较大的测量误差。线性相位反演算法的复原精度

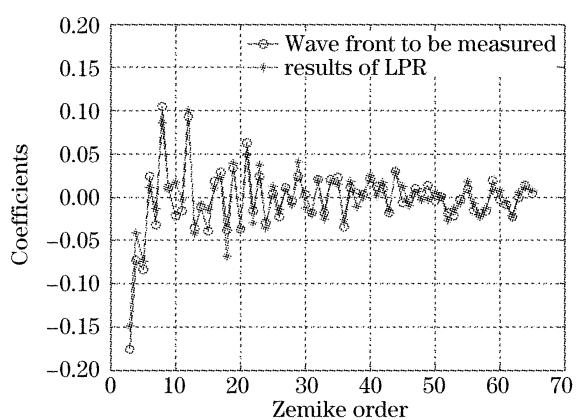


图 2 待测大气湍流畸变波前与线性相位反演算法得到的泽尼克模式系数对比

Fig. 2 Comparison of the Zernike coefficients on atmosphere disturbed wave front and those from linear phase-retrieval method

和测量动态范围与待测像差大小、成像靶面大小、传感器自身像差大小等因素有关。另外, 待测光束的振幅起伏和测量噪声也会对线性相位反演结果有一定影响。

5 结论

分析了一种基于线性相位反演的波前测量方法的基本原理。以大气湍流畸变波前像差的测量为例, 对这种线性相位反演波前测量方法的有效性和局限性进行了数值仿真。结果表明, 这种线性相位反演算法具有空间分辨力高、对小像差测量精度高的特点。因为在小像差条件下, 线性相位反演的近似条件才成立。这种特点将有利于线性相位反演波前传感器在自适应光学闭环系统中的应用。因为自适应光学闭环校正后的残余波前像差恰恰是高空间频率的小像差。为了对这种线性相位反演算法的特点进行全面了解, 下一步将对影响线性相位反演算法的空间分辨力、测量动态范围和测量精度的诸多

影响因素进行研究。

致谢 感谢姜文汉院士、鲜浩研究员、饶长辉研究员、沈锋副研究员对本项目给予了关注,提出一些具体问题。

参 考 文 献

- 1 R. K. Tyson. *Principles of Adaptive Optics* [M]. New York: Academic Press, 1991
- 2 M. C. Roggemann, B. Welsh. *Imaging Through Turbulence* [M]. New York: CRC Press, 1996. 182~183
- 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 R. A. Gonsalves, R. Chidlaw. Wavefront sensing by phase retrieval[C]. *Proc. SPIE*, 1979, 207: 32~39
- 5 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(5): 2758~2769
- 6 W. J. Wilde. Linear phase retrieval for wavefront sensing[J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(8): 573~575
- 7 R. A. Gonsalves. Small-phase solution to the phase-retrieval program[J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26STBZ(10): 684~685
- 8 R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1977, 67(8): 1065~1072
- 9 N. Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Opt. Engng.*, 1990, 29(10): 1174~1180
- 10 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann sensor on measuring the atmosphere disturbed wavefront [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2): 243~249 (in Chinese)
- 李新阳, 姜文汉. 哈特曼传感器对湍流畸变波前的泽尼克模式复原误差[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 243~249
- 11 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(10): 1236~1240 (in Chinese)
- 李新阳, 姜文汉. 哈特曼传感器的泽尼克模式波前复原误差[J]. 光学学报, 2002, 22(10): 1236~1240

~~~~~

## 欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自2004年5月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从2006年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

### 一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年12册,在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10条,每篇不过2000字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的80%优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文300篇次。

### 二、会员义务:

- 1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
- 2) 每年交纳会员费2800元,会员资格从交费之日起计算,一年有效。
- 3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
- 4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
- 5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

### 三、成为企业会员的步骤:

- 1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- 2) 来信[mail@opticsjournal.net](mailto:mail@opticsjournal.net)告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- 3) 银行汇款2800元至下列帐户:  
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户名:中国科学院上海光学精密机械研究所  
帐号:1001700809026400195
- 4) 联系人:郑继承;电话:021-69918253;Email:[expert@mail.siom.ac.cn](mailto:expert@mail.siom.ac.cn)