

无调制两面锥波前传感器的衍射 理论分析和数值仿真*

王建新^{1)2)3)†} 白福忠¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 宁禹¹⁾²⁾⁵⁾ 黄林海¹⁾²⁾ 姜文汉¹⁾²⁾

1)(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2)(中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

3)(中国科学院研究生院, 北京 100049)

4)(内蒙古工业大学机械学院, 呼和浩特 010051)

5)(国防科学技术大学光电工程学院, 长沙 410073)

(2010年7月2日收到; 2010年8月9日收到修改稿)

两面锥波前传感器(two-sided pyramid wavefront Sensor, TSPWFS)是一种高空间采样率和高光能利用率的波前传感器. 为了深入研究它的波前复原原理, 采用波动光学理论详细推导了无调制 TSPWFS 的衍射理论, 给出了无调制 TSPWFS 波前复原时线性重构矩阵的解析解, 并且通过数值仿真确定出最佳的光瞳像中心间距, 并对静态像差的波前复原及闭环校正进行数值仿真. 分析结果表明, 无调制 TSPWFS 具有波前复原时不需要现场测量响应矩阵, 可以校正系统像差, 闭环校正结果稳定等优点, 可以在实际自适应光学系统中进行波前探测.

关键词: 自适应光学, 两面锥波前传感器, 波前复原

PACS: 95.75.Qr, 42.68.Wt, 42.30.Kq

1. 引言

自 1996 年 Ragazzoni^[1] 提出四棱锥波前传感器 (PWFS) 以来, 人们对它的研究一直在不断地进行^[2-8]. 与自适应光学系统中其他的波前传感器如哈特曼-夏克波前传感器^[9-11] 相比, PWFS 具有空间采样率高的优点; 与自参考干涉波前传感器^[12] 相比较, PWFS 具有光能利用率高的优点^[13]. PWFS 按照工作方式可以分为调制^[1,14,15] 和无调制^[16] 两种方式, 无调制 PWFS 具有光路简单、能够观测更弱星等的优点^[17]. 通过分析无调制 PWFS 的衍射理论发现: 两面锥可以代替四棱锥对入射光波进行分光, 由此所建立的两面锥波前传感器 (TSPWFS) 具有更好的波前探测效果.

目前, 人们对 TSPWFS 的研究仍处于初级阶段. Pillion 和 Baker^[18] 于 2006 年提出直接相位复原算法, 其原理类似于白光干涉仪, 但仅对小像差进行了数值仿真分析. Korkiakoski^[19] 在其论文中简单地

提及了 TSPWFS, 也未对 TSPWFS 的波前复原原理、相关参数以及传感器特性进行具体分析.

本文首先详细推导了无调制 TSPWFS 的衍射理论, 结果表明这与傅科刀口衍射理论^[20] 完全一致, 具有小像差测量精确、大像差需要闭环的特点; 进一步分析了无调制 TSPWFS 的线性区域, 可以利用线性重构算法复原波前; 另外分析了相邻光瞳像中心间距对测量精度的影响; 给出了线性重构矩阵的解析解, 并利用该重构矩阵进行波前复原; 最后通过数值仿真对参数选择、波前复原及闭环校正进行分析. 这些理论分析以及仿真结果为两面锥器件的参数设计以及 TSPWFS 光路设计和波前复原提供了依据.

2. 无调制 TSPWFS 理论

无调制 TSPWFS 的原理如图 1 所示. 分束镜首先将入射光分成两路, 每路光均经过两个傅里叶透镜组成的 $4f$ 缩束系统以及一个两面锥(屋脊棱锥),

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号:61008038)资助的课题.

† E-mail: wjx_711@yahoo.com.cn

其中,透镜1(或透镜3)的焦距为 f_1 ,透镜2(或透镜4)的焦距为 f_2 ;两个两面锥的对称棱边相互正交(其中一个沿水平方向,另一个沿垂直方向),且棱边放置于 $4f$ 系统的焦平面.两面锥将透镜1(或透镜3)聚焦后的光束沿垂直于对称棱边的方向分成两束,每一束只携带一半的频谱信息,然后经过另

一个透镜2(或透镜4)后成像在 CCD 图像探测器. I_{x+}, I_{x-} 分别表示 x 方向上的两个光瞳像光强分布, I_{y+}, I_{y-} 分别表示 y 方向上的两个光瞳像光强分布.进一步分析同一方向的光瞳像的光强差异,可以计算 x 和 y 方向的测量信号 S_x 和 S_y .

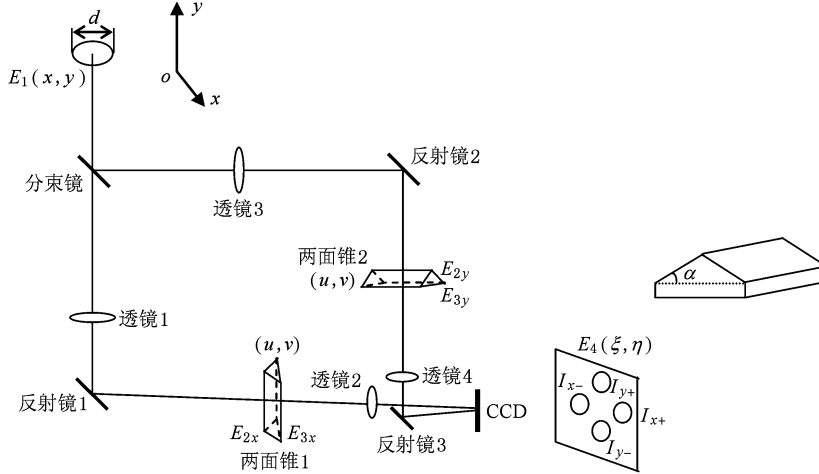


图1 无调制 TSPWFS 原理示意图

设入射光瞳处的光场为

$$E_1(x, y) = u_0 \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \varphi(x, y)\right] P, \quad (1)$$

其中, u_0 和 $\varphi(x, y)$ 分别表示入射光场的强度和相位, P 为光瞳函数, λ 为波长.光场 $E_1(x, y)$ 被分束镜分成两路,分束镜的透射率与反射率之比等于 a/b ,传播至透镜焦平面处的光场可用它的傅里叶变换 $E_{2x}(u, v)$ 和 $E_{2y}(u, v)$ 来表示如下:

$$E_{2x}(u, v) = \frac{\sqrt{a}}{\lambda f_1} \text{FT}(E_1(x, y))_{\left(\frac{u}{\lambda f_1}, \frac{v}{\lambda f_1}\right)}, \quad (2)$$

$$E_{2y}(u, v) = \frac{\sqrt{b}}{\lambda f_1} \text{FT}(E_1(x, y))_{\left(\frac{u}{\lambda f_1}, \frac{v}{\lambda f_1}\right)}. \quad (3)$$

棱边分别与 x 和 y 轴相垂直时,焦平面处两面锥的相位延迟函数分别表示为

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \exp[-i2\pi\alpha_0(|u|)] \\ &= \frac{1}{2} [1 + (-1)^m \text{sgn}(u)] \\ &\quad \times \exp[i(-1)^{m+1}2\pi\alpha_0 u], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Phi_y &= \exp[-i2\pi\alpha_0(|v|)] \\ &= \frac{1}{2} [1 + (-1)^m \text{sgn}(v)] \\ &\quad \times \exp[i(-1)^{m+1}2\pi\alpha_0 v], \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $m = 0$ 表示光线落在坐标轴正方向的锥面,

$m = 1$ 表示光线落在坐标轴负方向的锥面, $\text{sgn}(u) = \begin{cases} 1 & (u > 0) \\ -1 & (u < 0) \end{cases}$, $\alpha_0 = \frac{(n-1)\alpha}{\lambda}$, n 为折射率, α 表示锥侧面与底面之间的夹角.两面锥后的光场复振幅为:

$$\begin{aligned} E_{3x}(u, v) &= E_{2x}(u, v) \Phi_x \\ &= \frac{\sqrt{a}}{\lambda f_1} \text{FT}(E_1(x, y))_{\left(\frac{u}{\lambda f_1}, \frac{v}{\lambda f_1}\right)} \Phi_x, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E_{3y}(u, v) &= E_{2y}(u, v) \Phi_y \\ &= \frac{\sqrt{b}}{\lambda f_1} \text{FT}(E_1(x, y))_{\left(\frac{u}{\lambda f_1}, \frac{v}{\lambda f_1}\right)} \Phi_y. \end{aligned} \quad (7)$$

接着该光场经过中继透镜2(或透镜4)成像在 CCD 图像传感器,此处沿 x 和 y 方向分束的光场复振幅分别表示为

$$\begin{aligned} E_{4x}(\xi, \eta) &= \frac{1}{\lambda f_2} \text{FT}(E_{3x})_{\left(\frac{\xi}{\lambda f_2}, \frac{\eta}{\lambda f_2}\right)} \\ &= \frac{\sqrt{af_1}}{2f_2} \left\{ E_1\left(-\frac{f_1}{f_2}\xi, -\frac{f_1}{f_2}\eta\right) \right. \\ &\quad \otimes \left[\delta(\xi, \eta) + (-1)^m \frac{\delta(\eta)}{i\pi\xi} \right] \\ &\quad \left. \otimes \delta(\xi + (-1)^m \lambda f_2 \alpha_0, \eta) \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$E_{4y}(\xi, \eta) = \frac{1}{\lambda f_2} \text{FT}(E_{3y})_{\left(\frac{\xi}{\lambda f_2}, \frac{\eta}{\lambda f_2}\right)}$$

$$= \frac{\sqrt{b}f_1}{2f_2} \left\{ E_1 \left(-\frac{f_1}{f_2}\xi, -\frac{f_1}{f_2}\eta \right) \otimes \left[\delta(\xi, \eta) + (-1)^m \frac{\delta(\xi)}{i\pi\eta} \right] \otimes \delta(\xi, \eta + (-1)^m \lambda f_2 \alpha_0) \right\}, \quad (9)$$

式中,“ \otimes ”表示卷积。(8)和(9)式中的最后一项卷积部分等效于一个位置平移作用,在分析光瞳像面上光场强度时不需要考虑这一项的影响,此后,光瞳像的复振幅简化为

$$E'_{4x} = \frac{\sqrt{a}f_1}{2f_2} \left\{ E_1 \left(-\frac{f_1}{f_2}\xi, -\frac{f_1}{f_2}\eta \right) \otimes \left[\delta(\xi, \eta) + (-1)^m \frac{\delta(\eta)}{i\pi\xi} \right] \right\}, \quad (10)$$

$$E'_{4y} = \frac{\sqrt{b}f_1}{2f_2} \left\{ E_1 \left(-\frac{f_1}{f_2}\xi, -\frac{f_1}{f_2}\eta \right) \otimes \left[\delta(\xi, \eta) + (-1)^m \frac{\delta(\xi)}{i\pi\eta} \right] \right\}. \quad (11)$$

令 $-\frac{f_1}{f_2}\xi = x, -\frac{f_1}{f_2}\eta = y$, 则(10)和(11)式进一步简化为

$$E'_{4x} = \frac{\sqrt{a}f_1}{2f_2} \left\{ E_1(x, y) \otimes \left[\delta(x, y) - (-1)^m \frac{\delta(y)}{i\pi x} \right] \right\} = \frac{\sqrt{a}f_1 u_0}{2f_2} [B + (-1)^m iC], \quad (12)$$

$$E'_{4y} = \frac{\sqrt{b}f_1}{2f_2} \left\{ E_1(x, y) \otimes \left[\delta(x, y) - (-1)^m \frac{\delta(x)}{i\pi y} \right] \right\} = \frac{\sqrt{b}f_1 u_0}{2f_2} [B + (-1)^m iD]. \quad (13)$$

其中, $B = \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\varphi(x, y)\right]P; C = B \otimes \left[\frac{\delta(y)}{\pi x}\right]; D = B \otimes \left[\frac{\delta(x)}{\pi y}\right]$; 四个光瞳像强度表示为

$$I_{x-} = |E'_{4x}|^2 (m = 0) = a \left(\frac{f_1 u_0}{2f_2}\right)^2 [|B|^2 + |C|^2 + 2\text{Re}(iB^* C)],$$

$$I_{x+} = |E'_{4x}|^2 (m = 1) = a \left(\frac{f_1 u_0}{2f_2}\right)^2 [|B|^2 + |C|^2 - 2\text{Re}(iB^* C)],$$

$$I_{y-} = |E'_{4y}|^2 (m = 0) = b \left(\frac{f_1 u_0}{2f_2}\right)^2 [|B|^2 + |D|^2 + 2\text{Re}(iB^* D)],$$

$$I_{y+} = |E'_{4y}|^2 (m = 1)$$

$$= b \left(\frac{f_1 u_0}{2f_2}\right)^2 [|B|^2 + |D|^2 - 2\text{Re}(iB^* D)], \quad (14)$$

式中 $\text{Re}()$ 表示取复振幅实部,“ $*$ ”为共轭符号. 通过比较同一方向两个光瞳像之间的光强差异可以得到测量信号 S_x 和 S_y

$$S_x = \frac{I_{x-} - I_{x+}}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 |u_0|^2 a}, \quad (15)$$

$$S_y = \frac{I_{y-} - I_{y+}}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 |u_0|^2 b}. \quad (16)$$

将(14)式代入(15)和(16)式,整理后得到测量信号与待测波前之间的关系式

$$S_x = \text{Re}\{iB^* C\} = \text{Re}\{iP \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\varphi(x, y)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} P \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\varphi(x, y)\right] \times \frac{\delta(y')}{\pi(x-x')} dx' dy'\} = \int_{-P(y)}^{P(y)} \frac{\sin\left\{\frac{2\pi}{\lambda}[\varphi(x, y) - \varphi(x', y)]\right\}}{\pi(x-x')} dx', \quad (17)$$

$$S_y = \text{Re}\{iB^* D\} = \text{Re}\{iP \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\varphi(x, y)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} P \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\varphi(x, y)\right] \times \frac{\delta(x')}{\pi(y-y')} dx' dy'\} = \int_{-P(x)}^{P(x)} \frac{\sin\left\{\frac{2\pi}{\lambda}[\varphi(x, y) - \varphi(x, y')]\right\}}{\pi(y-y')} dy'. \quad (18)$$

上面两式中积分限 $P(x)$ 和 $P(y)$ 表示过 (x, y) 垂直于坐标轴的直线与光瞳函数边界交点.

使用 Zernike 模式表示待测波前, $\varphi(x, y) = \sum_{k=1}^N a_k Z_k(x, y)$, N 表示所用 Zernike 模式阶数, a_k 和 $Z_k(x, y)$ 分别表示第 k 阶 Zernike 系数和多项式. 当 φ 较小时, (17) 和 (18) 式中的正弦函数可用其泰勒展开式中的第一项来近似表示, 于是这两式又可以写成

$$S_x = \sum_{k=1}^N a_k \int_{-P(y)}^{P(y)} \frac{2}{\lambda} \frac{Z_k(x, y) - Z_k(x', y)}{(x-x')} dx', \quad (19)$$

$$S_y = \sum_{k=1}^N a_k \int_{-P(x)}^{P(x)} \frac{2}{\lambda} \frac{Z_k(x, y) - Z_k(x, y')}{(y - y')} dy'. \quad (20)$$

上面两式中的积分项分别表示为

$$G_{xk} = \int_{-P(y)}^{P(y)} \frac{2}{\lambda} \frac{Z_k(x, y) - Z_k(x', y)}{(x - x')} dx', \quad (21)$$

$$G_{yk} = \int_{-P(x)}^{P(x)} \frac{2}{\lambda} \frac{Z_k(x, y) - Z_k(x, y')}{(y - y')} dy'. \quad (22)$$

从(19)和(20)式可以看出,当被测波前为小像差时,无调制 TSPWFS 的测量信号是该探测点与其他各点畸变波前之差的加权平均,而相邻点对该点的影响权值最大.即使对于小像差测量,将测量信号等效成波前偏导信息仅保留了信号中的主要信息.由 CCD 探测器记录的光强信息得到的测量信号 S_x 和 S_y 是前 N 阶 Zernike 项在系数较小时各阶信号 G_{xk} 与 G_{yk} 的线性叠加.

(19)和(20)式的矩阵形式表示为

$$S = GA, \quad (23)$$

其中, $S = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix}$, A 为 Zernike 系数矩阵,线性响应矩阵 G 通过预先求解 G_{xk} 与 G_{yk} 的解析解,然后按照实际光学系统的空间采样率进行数值离散后得到.于是待测波前的各阶 Zernike 系数通过下式计算:

$$A = G^+ S, \quad (24)$$

式中的波前复原矩阵 G^+ 表示响应矩阵 G 的广义逆,通过采用奇异值分解法(SVD)计算得到.

当待测波像差较大时,(17)和(18)式中正弦函数使用泰勒低阶展开代替时的误差较大,此时测量信号不再具有线性结构,因此使得无调制 TSPWFS 不能再准确地进行波前测量.然而由于测量信号的斜率测量趋势是正确的,于是就可以使用变形镜对入射光场进行负反馈闭环校正.

3. 数值仿真

3.1. 光瞳像中心间距的确定

光瞳像的复振幅是入射光瞳的复振幅与两面锥相位延迟函数的逆傅里叶变换的卷积,这会造成 CCD 图像探测器上光瞳像周围存在衍射效应,当两个光瞳像相隔很近的时候,衍射造成的外溢能量就会落到相邻光瞳像内部,从而影响测量的精度.为减小这一现象对波前测量和闭环校正的影响,光瞳像之间要有一定间隔,光瞳像的能量外溢宽度越宽,取得最佳复原精度所需的光瞳像中心间隔就越大.光瞳像中心间隔与光瞳像的比值用参数 M 来表示, $M = 2\alpha(n - 1)f_1/d$. 通过数值仿真确定出最佳的 M 值,进而为光学系统中一些主要参数(两面锥底角 α , 光学系统 F 数 f_1/d) 的设计提供依据.

仿真中假设 $4f$ 系统放大率等于 1, 在 511×511 像素的图像中心选择一个 63×63 像素的圆形区域作为入射光瞳的有效区域.通过对入射波前进行傅里叶变换得到焦平面处的复振幅,引入描述两面锥分光作用的相位延迟函数 Φ_x 和 Φ_y , 后再对振幅滤波结果进行傅里叶变换得到光瞳像强度分布.图 2 显示了平面波经过 TSPWFS 后在水平方向的两组光瞳像,可以看出,由几何光学所决定的光瞳像的周围会有衍射现象存在,当光瞳中心间隔较近时,两个光瞳像之间光强分布相对较强,并且光瞳像内部(有效区域)的光强分布也受到两光瞳像之间干涉作用的影响.为了减小这种干涉作用对测量精度和闭环稳定性的影响,同时又能最大限度地利用 CCD 图像探测器的靶面,我们需要选择合适的光瞳像中心间距,为此进行了数值仿真.

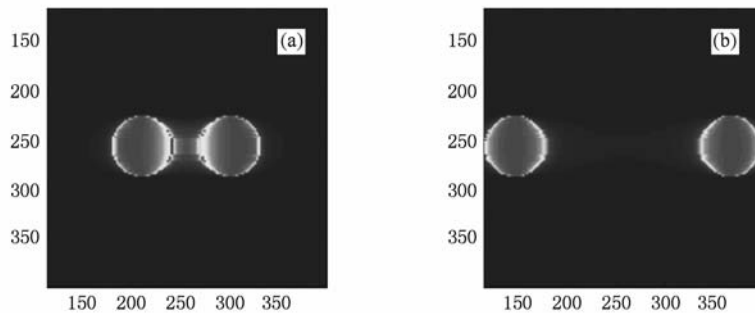


图2 平面波经过 TSPWFS 后在水平方向的两组光瞳像 (a) $M=1.2$, (b) $M=3.5$

波前复原精度 β 定义为残余波前的均方根误差 (RMS) 与原始波前的 RMS 之比. 首先对一个 $d/r_0 = 2$ 波前误差较小的 Kolmogorov 大气湍流相位屏进行波前复原(3 至 65 阶 Zernike 像差组成, d 表示入瞳直径, r_0 表示 Fried 常数, 波面 RMS 值等于 0.08λ , 峰谷值等于 0.5λ), 其复原精度随 M 的变化关系如图 3 (a) 所示. 对于两组不同的空间采样率, 复原精度随着光瞳像中心间距的增加呈现出变化规律一致, 随着光瞳中心间隔变大先提高后趋于平稳的趋势, 在 $M > 3$ 后复原精度几乎不随着 M 的变大而有所提高, 而且采样率高时复原精度高. 图 3(b) 是对一个 $d/r_0 = 20$ 波前误差较大的大气湍流相位屏 (RMS 值等于

0.93λ , 峰谷值等于 4.53λ) 进行闭环校正, 在经过 17 次闭环迭代以后复原精度随 M 的变化关系. 同样可以得到上面的结论, 即 $M > 3$ 闭环校正精度较高且基本不变化, 而 $M < 1.4$ 时即使增加闭环迭代次数, 校正精度也不再提高. 图 3 表明光瞳像中心间距对波前复原精度的影响很大, 同时又影响一定像素数的 CCD 的靶面利用率, 从而影响波前探测的采样密度, M 应选择为 2—3. 实际使用时应根据采样密度、测量精度和闭环速度进行折中选择. 当用于波前测量时, M 值应大一些, 而用于闭环时则可以小一些, 既可以保证 CCD 靶面的利用率和采样密度, 同时又能兼顾波前测量和闭环校正的精度.

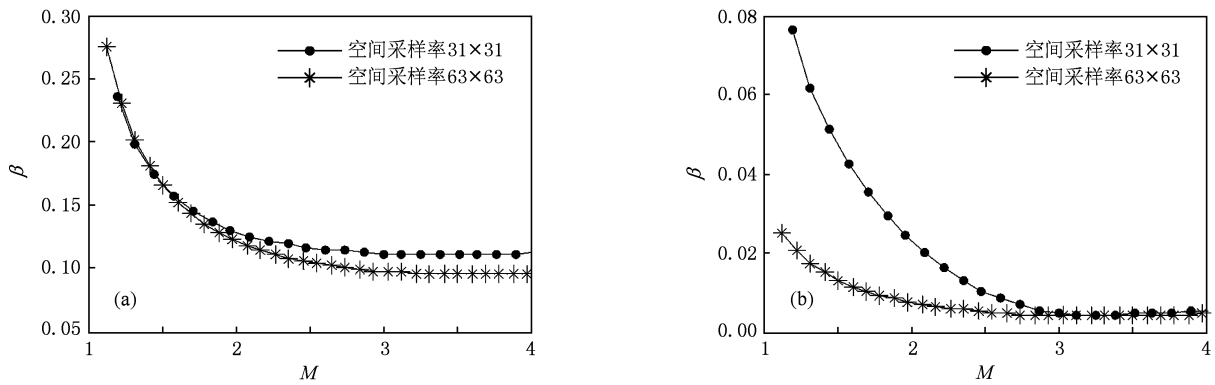


图 3 β 随 M 的变化关系 (a) 对 $d/r_0 = 2$ 的湍流相位屏静态像差复原结果, (b) 对 $d/r_0 = 20$ 的湍流相位屏闭环校正结果

3.2. 静态像差波前复原及闭环校正

下面的仿真中选择 $M = 3$, 空间采样率为 63×63 . 首先对 RMS 值分别等于 0.02λ 和 0.1λ 的单阶 Zernike 像差进行波前复原, 对应的复原精度如图 4 所示. 单阶 Zernike 像差的数值仿真结果表明: 1)

高阶 Zernike 像差的复原精度普遍低于低阶像差; 2) 原始波前 RMS 值越大, 复原精度越低. 因此, 对于较大像差, TSPWFS 的复原结果已经不能满足测量精度要求, 需要采用闭环校正.

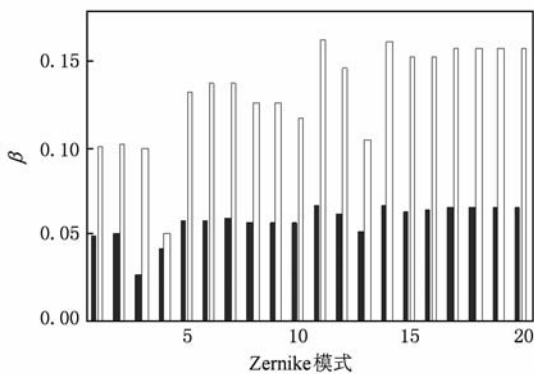


图 4 单阶 Zernike 像差波前复原精度 “■” 和 “□” 分别表示原始波前 RMS 值等于 0.02λ 和 0.1λ

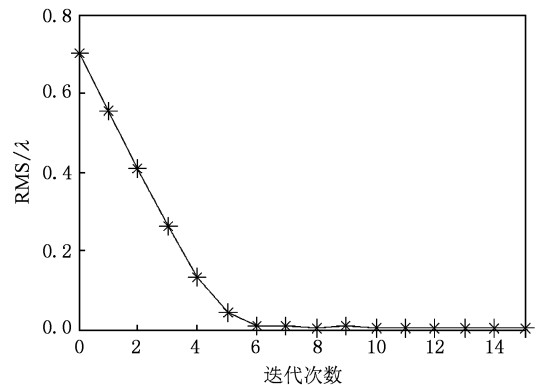


图 5 $d/r_0 = 20$ 大气湍流相位屏闭环校正过程中波前 RMS 值的变化曲线

接下来对一个 $d/r_0 = 20$ 的大气湍流相位屏

(RMS 值等于 0.70λ , 峰谷值等于 3.66λ) 进行闭环校正, 图 5 显示在 15 次迭代过程中残余波前 RMS 值的变化曲线. 结果显示, 随着迭代次数的增加, 残余波前 RMS 值迅速降低, 当迭代次数大于 6 次后残余波前 RMS 值接近于零且趋于稳定. 仿真数据表明 TSPWFS 闭环校正结果稳定, 可以用于在实际自适应系统中进行波前测量.

4. 结 论

本文根据波动光学理论, 推导了无调制 TSPWFS 的衍射理论, 给出了测量信号与待测波前之间的关系式. 理论分析显示, 无调制 TSPWFS 的衍

射理论与傅科刀口衍射理论完全一致, 具有小像差测量准确, 大像差需要闭环的特点. 针对这种特点, 提出采用符合无调制 TSPWFS 衍射理论的 Zernike 模式解析解, 按照实际系统的空间采样率对该解析解进行数值离散, 然后将离散结果作为线性重构矩阵进行波前复原.

通过数值仿真确定光瞳中心距的最佳数值, 对其物理机理进行分析, 数值仿真与理论分析结果对实验系统中透镜 F 数以及两面锥底角的设计提供依据. Zernike 像差波前复原仿真结果以及一个 $d/r_0 = 20$ 大气湍流相位屏的闭环校正结果显示, 无调制 TSPWFS 具有不需要现场测量响应矩阵, 可以校正系统像差和闭环校正结果稳定等优点.

- [1] Ragazzoni R 1996 *J. Modern Opt.* **43** 289
- [2] Ragazzoni R, Baruffolo A, Farinato J, Ghedina A, Marchetti E, Esposito S, Finid L, Ranfagni P, Bortoletto F, D'Allessandro M 2000 *Proc. SPIE* **4007** 57
- [3] Ghedina A, Cecconi M, Ragazzoni R, Farinato J, Baruffolo A, Crimi G, Diolaiti E, Esposito S, Fini L, Ghigo M, Marchetti E, Niero T, Puglisi A 2003 *Proc. SPIE* **4839** 869
- [4] Hill J M, Salinari P 2003 *Proc. SPIE* **4837** 140
- [5] Clare R M, Louarn M L, Oberti S, Rissman A G 2008 *Proc. SPIE* **7015** 701572-1
- [6] Chamot St R, Dainty Ch 2006 *Opt. Express* **14** 518
- [7] Esposito S, Pinna E, Puglisi A, Tozzi A, Stefanini P 2005 *Opt. Lett.* **30** 2572
- [8] Ragazzoni R, Farinato J 1999 *A&A* **350** L23
- [9] 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]
- [10] Li C H, Xian H, Jiang W H, Rao C H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4289 (in Chinese) [李超宏、鲜浩、姜文汉、饶长辉 2007 物理学报 **56** 4289]
- [11] Zhang Y Y, Rao C H, Li M, Ma X Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5904 (in Chinese) [张艳艳、饶长辉、李梅、马晓燮 2010 物理学报 **59** 5904]
- [12] 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]
- [13] Chew T Y, Clare R M, Lane R G 2006 *Opt. Commun.* **268** 189
- [14] Ragazzoni R, Diolaiti E, Vernet E 2002 *Opt. Commun.* **208** 51
- [15] LeDue J, Jolissaint L, Véraan Jean-P, Bradley C 2009 *Opt. Express* **17** 7186
- [16] Costa B J 2005 *Appl. Opt.* **44** 60
- [17] Véranaud C 2004 *Opt. Commun.* **233** 27
- [18] Phillion D W, Baker K 2006 *Proc. SPIE* **6272** 627228-1
- [19] Korkiakoski V 2008 *Ph. D. Dissertation* (Finland: Helsinki University of Technology Control Engineering)
- [20] Wilson R G 1975 *Appl. Opt.* **14** 2286

Diffraction theory analysis and numerical simulation of non-modulation two-sided pyramid wavefront sensor*

Wang Jian-Xin^{1)2)3)†} Bai Fu-Zhong¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Ning Yu¹⁾²⁾⁵⁾ Huang Lin-Hai¹⁾²⁾ Jiang Wen-Han¹⁾²⁾

1) (*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

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

3) (*Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China*)

5) (*College of Photon-Electron Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 2 July 2010; revised manuscript received 9 August 2010)

Abstract

Two-sided pyramid wavefront sensor (TSPWFS) is a kind of wavefront sensor with high spatial resolution and light energy utilization. To deeply study the principle of wavefront reconstruction of this wavefront sensor using wave optics theory, this paper deduces the diffraction theory of non-modulation TSPWFS and gives the analytic solution of linear reconstruction matrix for wavefront reconstruction. With numerical simulation the optimal distance between adjacent pupil image centers was determined. Also, wavefront reconstruction and closed-loop correction of static aberrations by using non-modulation TSPWFS as a wavefront sensor were simulated. The results show that non-modulation TSPWFS has three main advantages. i. e. , it does not require measuring the response matrix in real optical setup, and can correct the optical systemic aberration, and can achieve stable closed-loop correction result. Additionally, non-modulation TSPWFS can be applied to a real adaptive optics system to detect wavefront.

Keywords: adaptive optics, two-sided pyramid wavefront sensor, wavefront reconstruction

PACS: 95.75. Qr, 42.68. Wt, 42.30. Kq

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61008038).

† E-mail: wjx_711@yahoo.com.cn