

文章编号: 0253-2239(2010)11-3069-07

全息模式波前传感器的像差探测

刘长海 姜宗福 黄盛炆 马浩统

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 利用标量衍射理论对全息模式波前传感器进行了深入分析,给出了传感器输出面的衍射场光强表达式,从而与模式偏置波前传感器理论统一起来。为了便于对全息模式波前传感器进行模拟,利用两共轭倾斜平面波代替倾斜聚焦球面波作为全息记录时的参考波,并在紧贴全息元件后放置聚焦透镜,从而建立全息模式波前传感器的等效模型。然后利用数值模拟方法对全息模式波前传感器的工作原理进行验证,结果表明全息模式波前传感器的灵敏度高、速度快。

关键词 自适应光学;全息模式波前传感器;标量衍射理论;等效模型

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3069

Aberrations Detection Using Holographic Modal Wavefront Sensor

Liu Changhai Jiang Zongfu Huang Shengyang Ma Haotong

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Detailed analysis is carried out upon the holographic modal wavefront sensor (HMWFS) based on the scalar diffraction theory. An analytical expression of intensity distribution of the diffraction field on the detector plane of the HMWFS is presented, which results in the unification with the theory of mode-biased wavefront sensor. For the sake of simplicity in numerical simulation of the HMWFS, an equivalent model of the HMWFS is proposed, in which two tilt conjugate plane waves are chosen to replace the tilt convergent spherical waves as the reference waves in recording holograms, and place a convergent lens in close proximity to the rear surface of holographic element. Then the operation principle of the HMWFS is validated by numerical simulations employing the equivalent model. The results demonstrates the high sensitivity and fast sensing speed of the HMWFS.

Key words adaptive optics; holographic modal wavefront sensor; scalar diffraction theory; equivalent model

1 引言

在典型的自适应光学闭环系统中,关键组件之一是波前传感器,它起着系统伺服回路波前误差传感的作用,为波前校正器提供相应的驱动信号^[1]。波前控制器中波前复原算法的具体实现方式及其复杂度,与波前传感器探测输出结果类型紧密相关。在现有的波前传感器中,以哈特曼传感器^[2,3]和曲率波前传感器^[4~9]为例,前者输出的探测结果是待测畸变波前的局部斜率信号,后者输出的探测结果是待测畸变波前的曲率信号。这两种信号在波前复

原算法中都需要繁重的计算才能转化为待测波前像差信息或变形镜的驱动信号,这无疑增加了自适应系统的时间延迟,限制了系统带宽,对硬件的性能要求会更苛刻。

模式传感器是一种从整个光瞳面评估像差类型的传感技术。其基本思想是:首先选定一组描述波前相位畸变分布的正交基函数,然后直接探测畸变波前相位在每个基函数上的分量大小,通过相应分量大小基函数的线性组合就可以方便快速地得到待测波前,全息模式波前传感器正是基于这一思想提

收稿日期: 2009-12-14; 收到修改稿日期: 2010-03-29

作者简介: 刘长海(1981—),男,博士研究生,主要从事自适应光学、计算全息方面的研究。

E-mail: lch2000719@163.com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术、气动光学及自适应光学方面的研究。

出的。与其它典型的传感器相比,这种类型传感器在波前复原时少了中间环节的矩阵运算,从而节省了运算时间。2000年Neil等^[10~12]提出一种模式偏置波前传感器概念,利用正负单阶像差板分别调制两个光路,通过比较调制后傅里叶面的光强分布得到待测像差模式大小。由于单阶像差板本质上是一种全息元件,因此这是一种简单形式的全息技术波前传感器。基于Neil等的模式偏置波前传感器的工作,最近Anderson等^[13~18]提出了全息模式波前传感器概念,利用全息元件的多重存储能力,在同一块介质内同时记录多个泽尼克(Zernike)相位模式,通过探测衍射光强得出每种模式的大小,从而实现快速波前传感的目的。鉴于全息模式的快速优势,已经有研究者将其用于哈特曼(Hartmann)传感器的微透镜阵列的设计制作^[19]。基于二元计算全息编码技术,对模式传感器进行了简单的数值模拟验证^[20,21]。

Ghebremichael等^[22]已利用标量衍射理论对全息模式波前传感器的衍射光强分布进行解析,近似得到了待测波在探测面上卷积形式的复振幅分布,但卷积函数过于复杂,很难得出待测像差系数。本文进一步推导了全息模式波前传感器衍射场分布规律,给出了待测像差系数与衍射光强的关系式。同时进行建模和数值模拟,产生多个全息图叠加的全息模拟元件,得到波前的模拟结果与预设的模式符合。

2 全息模式波前传感器衍射理论

全息模式波前传感器的制作关键是预先生成多重全息元件。利用参考波与物波的干涉效应实现对物波信息的全息记录。

选取参考波 $U_R(\mathbf{r}_R)$ 为聚焦球面波,物波 $U_S(\mathbf{r}_S)$ 为畸变波前,其数学表达式可以写为

$$U_{R,m}(\mathbf{r}_{R,m}) = \frac{U_{R,m,0}}{|\mathbf{r}_{R,m} - \mathbf{r}|} \exp\{-ik_{R,m}[(x-x_{R,m})^2 + (y-y_{R,m})^2 + (z-z_{R,m})^2]^{1/2}\}, \quad (1)$$

$$U_{S,m}(\mathbf{r}_{S,m}) = U_{S,m,0} \exp[iW(\mathbf{r}_{S,m})], \quad (2)$$

式中 m 为多重全息记录时物波与参考波序号; $\mathbf{r}_{R,m}=(x_{R,m}, y_{R,m}, z_{R,m})$ 为参考球面波聚焦点; $U_{S,m,0}$ 与 $U_{R,m,0}$ 分别为物波和参考波振幅; $W(\mathbf{r}_{S,m})$ 为物波前像差函数,波前像差可以用一系列正交多项式的线性组合表示,而通常把每个多项式称为一阶模式,在圆域内通常用Zernike正交多项式来描述波前像

差。 $W(\mathbf{r}_{S,m})$ 可以包含若干阶Zernike多项式,根据Noll的Zernike多项式编号法^[23], $W(\mathbf{r}_{S,m})$ 可表示为

$$W(\mathbf{r}_{S,m}) = \sum_j \beta_{m,j} Z_j, \quad (3)$$

式中 $\beta_{m,j}$ 为第 m 个物光波像差模式系数。利用像差的模式内串扰效应^[22],对于每一种类型像差模式,只需干涉记录两次(两次像差模式类型相同,系数不同)就可以完成一种类型像差的编码记录,将干涉结果叠加得到多重全息模式波前传感器。

如果待测波前入射到多重全息模式波前传感器上,将引起光波的衍射,衍射场的分布可以表示为

$$U_d(\mathbf{r}_d) \approx \int \tau(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R, \mathbf{r}) U(\mathbf{r}_P, \mathbf{r}) G(\mathbf{r}_d, \mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (4)$$

式中积分区域为 $\tau \neq 0$ 的所有区域,其中 $\tau(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R, \mathbf{r})$ 为记录介质折射率或透过率调制函数, $U_P(\mathbf{r}_P, \mathbf{r})$ 为待测波前复振幅, $G(\mathbf{r}_d, \mathbf{r})$ 为光波自由空间传输函数。为简单起见,暂不考虑全息记录的多重性,由菲涅耳近似^[22]可将衍射场分布表示为

$$U_d(x_d, y_d, z_d) \approx \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \exp\left[-i\pi \frac{(x_R - x)^2 + (y_R - y)^2}{\lambda z_R}\right] \times \exp\left[i\pi \frac{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2}{\lambda z_R}\right] \times \exp[-iW(x, y)] \Pi(x - a, y - b) U_P(x_P, y_P) \times \text{sinc}\left\{\frac{2L}{\lambda z_R} [\delta x(x_d - x) + \delta y(y_d - y)]\right\}, \quad (5)$$

式中 (x_d, y_d, z_d) 为衍射场在探测面的坐标, (x_R, y_R, z_R) 为会聚参考波在探测面聚焦点的坐标, $\Pi(x - a, y - b)$ 为矩形函数,表示全息元件光瞳面区域范围, $\text{sinc}x = \sin x/x$, $\delta x = x_R - x_d$, $\delta y = y_R - y_d$ 。由于被测波前的重构像点与预先记录的聚焦参考点非常接近,近似条件为

$$\begin{aligned} x_R + x_d &\approx 2x_d, \\ y_R + y_d &\approx 2y_d. \end{aligned} \quad (6)$$

将近似条件(6)式代入(5)式右边前两个指数函数的相位项,得到卷积形式的衍射场表达形式

$$U_d(x_d, y_d, z_d) \approx \iint g(x, y) h(x_d - x, y_d - y) \times dx dy = g(x, y) * h(x, y), \quad (7)$$

式中 $*$ 为卷积, $g(x, y), h(x, y)$ 分别为

$$g(x, y) = \exp[-iW(x, y)] \Pi(x - a, y - b) U_P(x_P, y_P), \quad (8)$$

$$h(x, y) = \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda z_R} (x\delta x + y\delta y)\right] \times \text{sinc}\left[\frac{2L}{\lambda z_R} (x\delta x + y\delta y)\right]. \quad (9)$$

这一结果比文献[22]的结果简化。对(7)式做卷积运算,得到探测面衍射场的光强分布

$$I = |U_d(\mathbf{r}_d)|^2 = |g(x, y) * h(x, y)|^2 = |F^{-1}[G(f_x, f_y)H(f_x, f_y)]|^2, \quad (10)$$

式中 $G(f_x, f_y), H(f_x, f_y)$ 分别为 $g(x, y), h(x, y)$ 的傅里叶变换

$$G(f_x, f_y) = F[g(x, y)] = F\{\Pi(x-a, y-b) \times \exp[-iW(x, y)]U_P(\mathbf{r}_P)\}, \quad (11)$$

$$H(f_x, f_y) = F[h(x, y)] = \delta\left(f_x + \frac{\delta x}{\lambda z_R}, f_y + \frac{\delta y}{\lambda z_R}\right) * F\left\{\text{sinc}\left[\frac{2L}{\lambda z_R}(x\delta x + y\delta y)\right]\right\} = F\left\{\text{sinc}\left[\frac{2L}{\lambda z_R}(x\delta x + y\delta y)\right]\right\} \Big|_{\substack{f_x \rightarrow f_x + \frac{\delta x}{\lambda z_R} \\ f_y \rightarrow f_y + \frac{\delta y}{\lambda z_R}}}. \quad (12)$$

使参考波聚焦光斑位置与探测面光阑放置位置一致,则可令 $\delta x = 0, \delta y = 0$, 于是 $H(f_x, f_y) = \delta(f_x, f_y)$ 。这样探测面光强分布为

$$I = |F^{-1}\{F\{\Pi(x-a, y-b) \times \exp[-iW(x, y)]U_P(\mathbf{r}_P)\}\delta(f_x, f_y)\}|^2 = \iint_A \exp[-iW(x, y)]U_P(\mathbf{r}_P) dx dy \cdot \delta(x_d, y_d), \quad (13)$$

式中 $A = ab$ 表示全息记录的面积。对于单阶像差, $U_P(\mathbf{r}_P) = \exp(i\alpha Z_l), W(x, y) = \pm \beta Z_k$, 则(13)式化为

$$I_{\pm} = \iint_A \exp[-i(\alpha Z_l \pm \beta Z_k)] dx dy \cdot \delta(x_d, y_d). \quad (14)$$

该结果与文献[10]中的(3)式和(12)式相似,(14)式中脉冲函数的作用等效于取光阑处光斑的峰值光强大小。类似地,定义灵敏度因子 S_k 为探测面两再现光斑归一化光强差关于待测像差系数 α 的梯度在 $\alpha = 0$ 处的值

$$S_k = \frac{\partial}{\partial \alpha} (I_{R\Delta}) \Big|_{\alpha=0} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} \right) \Big|_{\alpha=0}. \quad (15)$$

由(15)式可推导^[10]出

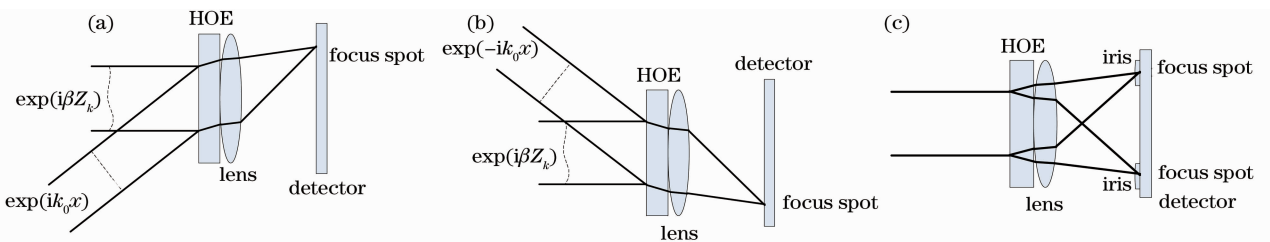


图1 全息模式波前传感器等效模型。(a)第一次记录,(b)第二次记录,(c)待测波前的探测

Fig. 1 Equivalent model of holographic modal wavefront sensor. (a) the first recording, (b) the second recording, (c) detection of the wavefront to be tested

$$S_k = -4\beta A \pi \delta_{lk}, \quad (16)$$

式中 δ_{lk} 为 Kronecker 函数。(16)式物理意义为:当待测像差模式与记录像差模式类型一致($l=k$)时,灵敏度不为零;当待测像差模式与记录像差模式类型不同($l \neq k$)时,灵敏度为零;即该传感器只对和预先记录像差模式类型相同的待测像差有响应。由此,待测波前像差系数 α_{out} 与衍射场光斑强度 I_{\pm} 的关系可以表示为

$$\alpha_{out} = S_k^{-1} \left(\frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} \right). \quad (17)$$

通过理论或实验确定出传感器的灵敏度 S_k 值后^[24],就可以得到待测波前的像差系数 α_{out} ,从而复原出待测波前相位。

3 等效模型和多重全息元件设计

根据上一部分的理论分析可知,多重全息元件记录时,参考波选取为聚焦球面波,当选取与物波含有相同类型、不同大小像差的光波再现时,将能够重构出相应聚焦光斑,再由光斑强度比例关系就能得到待测像差的大小。这种快速求得像差模式系数的传感器输出信号,为提高后续的波前复原算法速度或者闭环系统带宽提供了一种可能性。

为了进一步验证全息模式波前传感器的可行性,根据理论结果建立模型,对传感器的运行原理进行模拟。利用像差的模式内串扰效应,一种类型像差只需要记录两次即可,产生的全息图个数为预先记录像差类型个数的两倍。在模型建立过程中,为了更精确地调整参考光波的方向,每一种类型像差指定一对互相共轭平面波作为参考波,利用聚焦透镜和全息元件密接来达到对衍射光波的聚焦,从而等效地在探测面上相应位置处得到聚焦光斑。与直接取聚焦球面波相比,这样在模拟时更方便调整参考波的倾斜方向,不受探测面坐标的限制。以记录一种类型像差 Z_k 为例,如图1(a)所示为具有像差

βZ_k 的畸变物波与倾斜平面参考波 $\exp(ik_0x)$ 相干涉记录第一次,再用具有像差 $-\beta Z_k$ 的畸变物波与倾斜平面波 $\exp(-ik_0x)$ 相干涉记录第二次,如图 1(b)所示,两次干涉结果叠加起来组成多重全息元件。利用该多重全息元件对待测畸变波 $\exp(iaZ_l)$ 进行探测,在探测面所重构出的两个光斑如图 1(c)所示,其强度 I_{\pm} 将依据(16)式反映出待测像差大小 α 。图 1 中 HOE 表示全息光学元件。

根据等效模型,分别设计了几种记录不同类型 Zernike 模式像差的多重全息元件。图 2(a)所示为记录散焦模式 $\pm\beta Z_4$ 分别与倾斜平面参考波 $\exp(ik_0x\sin\theta_x)$ 相干涉的结果($\theta_x = \pm 2$ mrad),这是与 Blanchard 等^[25,26]所提出的扭曲衍射光栅相类似

的散焦光栅形式。图 2(b)所示为记录散焦模式 $\pm\beta Z_4$ 、像散模式 $\pm\beta Z_5$ 分别与倾斜平面参考波 $\exp[ik_0(x\sin\theta_x + y\sin\theta_y)]$ 相干涉的结果($\theta_x = \pm 2$ mrad, $\theta_y = \pm 1$ mrad)。图 2(c)所示为记录散焦模式 $\pm\beta Z_4$ 、像散模式 $\pm\beta Z_5$ 、彗差模式 $\pm\beta Z_7$ 分别与倾斜平面参考波 $\exp[ik_0(x\sin\theta_x + y\sin\theta_y)]$ 相干涉的结果($\theta_x = \pm 2$ mrad, $\theta_y = 0, \pm 1$ mrad)。图 2(d)所示为记录散焦模式 $\pm\beta Z_4$ 、像散模式 $\pm\beta Z_5$ 、彗差模式 $\pm\beta Z_7$ 、球差模式 $\pm\beta Z_{11}$ 分别与倾斜平面参考波 $\exp[ik_0(x\sin\theta_x + y\sin\theta_y)]$ 相干涉的结果($\theta_x = \pm 2$ mrad, $\theta_y = \pm 0.5$ mrad, ± 1.5 mrad)。以上所有预记录像差的系数 β 均设定为 $\beta = 1$ rad。

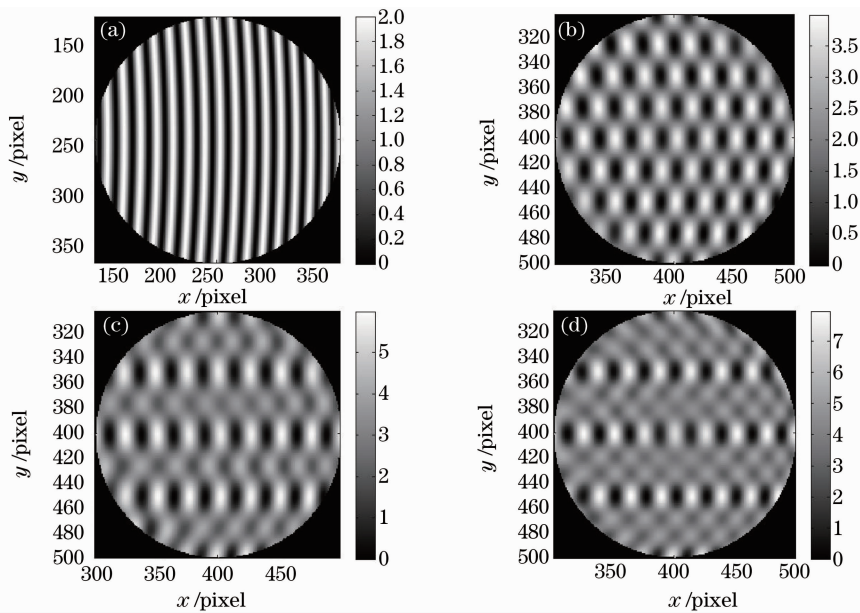


图 2 几种记录不同类型 Zernike 模式像差的多重全息元件。(a)记录散焦模式像差 Z_4 , (b)记录散焦 Z_4 和像散模式像差 Z_5 , (c)记录散焦 Z_4 、像散 Z_5 和彗差模式像差 Z_7 , (d)记录散焦 Z_4 、像散 Z_5 、彗差 Z_7 和球差模式像差 Z_{11}

Fig. 2 Several multiple holographic optical elements recording the different types of Zernike mode aberrations. (a) recording defocus mode Z_4 , (b) recording defocus Z_4 and astigmatism modes Z_5 , (c) recording defocus Z_4 , astigmatism Z_5 and coma modes Z_7 , (d) recording defocus Z_4 , astigmatism Z_5 , coma Z_7 and spherical-aberration modes Z_{11}

4 数值模拟

利用全息模式波前传感器对待测波前进行测量的过程,本质上就是以待测波作为物波对参考波进行重构再现的过程,待测波中所包含的像差成分与预先记录的像差模式的相关性,体现在焦面上相应位置处光斑对的光强变化。为简单起见,以图 2(a)中的多重全息元件为例,该多重全息元件记录有散焦像差 Z_4 。利用等效模型对这一过程进行数值模拟,通过分别测量包含有 Z_4 (散焦)、 Z_5 (像散)、 Z_7 (慧差)、 Z_{11} (球差)等单阶模式像差的待测波前,以

得到探测面上再现光斑的变化规律。由于构造图 2(a)所示多重全息元件时,两次所记录的 Z_4 散焦像差系数分别为 ± 1 rad,因此利用模式内串扰效应,在 ± 1 rad 范围内可以插值测得待测波前中包含的该阶像差系数大小 α 。

如图 3 所示为多重全息元件探测散焦模式像差 Z_4 时,随着待测散焦像差系数 α 从 -1 rad 逐渐增大到 1 rad 时,探测面上再现的一级衍射光斑强度 I_{\pm} 的变化曲线。由曲线可知,探测面上不但出现了一级衍射光斑,同时还出现了零级和高级衍射光斑,

其中零级衍射光斑已被滤掉。不同大小的待测像差引起两个光斑峰值强度不同比例的失衡，待测像差

系数 α 偏离零值越大，二者的失衡越严重，在待测像差系数 α 趋于零时，两光斑峰值接近相等。

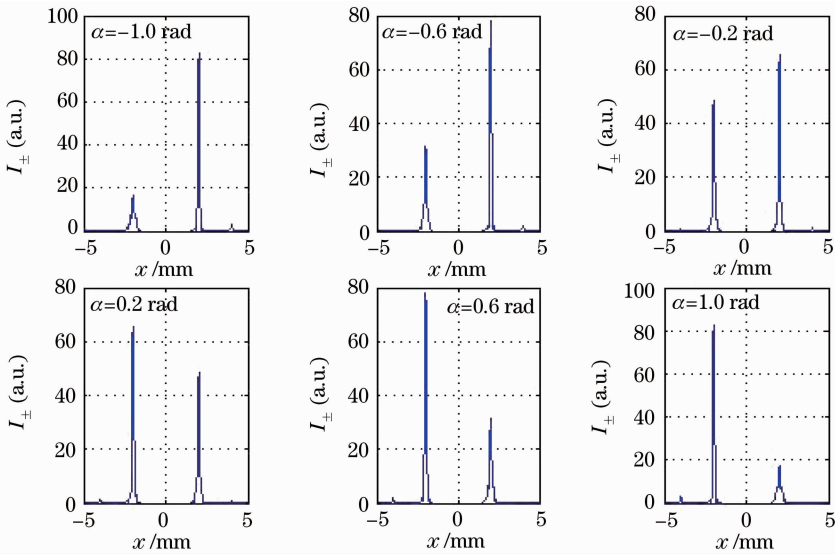


图 3 探测散焦像差 Z_4 时,探测面光斑强度 I_{\pm} 随待测像差系数 α 变化的剖面图

Fig. 3 Variation profile of beam spots intensity I_{\pm} in the detector plane versus α when the defocus mode Z_4 is detected

如图 4 所示为该多重全息元件探测像散模式像差 Z_5 时,随着待测像散模式系数 α 从 -1 rad 递增到 1 rad 时,探测面上再现的衍射光斑强度 I_{\pm} 的变化曲线。和探测散焦模式像差 Z_4 时类似,在探测面同样出现了零级和高级衍射光斑,其中零级衍射光斑已被滤掉。由曲线图可以直观地看出,记录散焦模式像差 Z_4 的多重全息元件探测像散模式像差 Z_5 时,虽然探测面聚焦光斑强度 I_{\pm} 分布有所变化,但两光斑的峰值强度始终很接近。这意味着记录散焦模式像差 Z_4 的多重全息元件只对散焦模式像差 Z_4

灵敏,对像散模式像差 Z_5 不灵敏。

如图 5 所示为记录有散焦模式 Z_4 的多重全息元件分别对散焦 Z_4 、像散 Z_5 、彗差 Z_7 和球差模式像差 Z_{11} 进行探测时,探测面一级衍射光斑峰值相对强度差 $I_{R\Delta}$ 随待测像差系数 α 的变化而变化的曲线图,该曲线斜率绝对值表征了(15)式所定义的灵敏度 S_{lk} 大小。由四组曲线对比可知,该多重全息元件只对散焦像差 Z_4 灵敏度不为零,产生衍射光强差,对其它模式的衍射光强差几乎为零,与(16)式所表达的探测器特性符合。

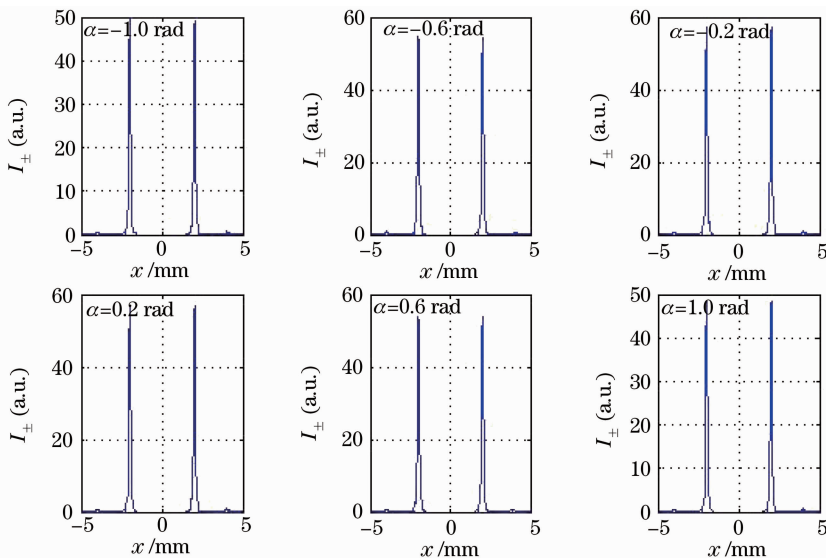


图 4 探测像散时,探测面光斑变化的剖面图

Fig. 4 Variation profile of beam spots intensity I_{\pm} in the detector plane versus α when the astigmatism Z_5 is detected

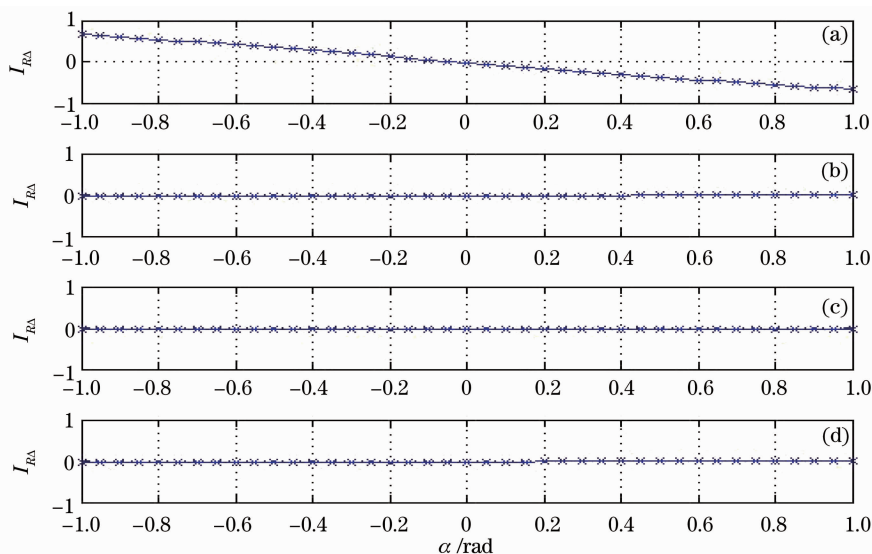


图5 探测(a)散焦 Z_4 , (b)像散 Z_5 , (c)彗差 Z_7 和(d)球差 Z_{11} 时探测面归一化光强差 I_{RA} 随待测像差系数 α 的变化趋势

Fig. 5 Variation of normalized intensity difference I_{RA} in detector plane versus α when (a) defocus Z_4 ,

(b) astigmatism Z_5 , (c) coma Z_7 and (d) spherical aberration Z_{11} are detected

由以上分析可知,全息元件只对预先记录的像差模式灵敏,对没有记录的其它像差模式灵敏度几乎为零。如果将记录有单阶像差模式的多个全息模拟元件相加,组成复合全息模拟元件,或者将单阶像差全息模拟元件排列成适当的全息元件阵列,利用适当的探测器阵列对相应位置处衍射光斑强度进行探测,根据两对应衍射光斑的强度差,可以测量出待测波前中包含的像差类型及其系数大小,从而实现快速波前传感的目的。

5 结 论

本文基于标量衍射理论对全息模式波前传感器的原理进行了进一步描述,给出了更为明晰的表达关系。从多重全息元件构造的方便性角度考虑,选取了倾斜平面波代替倾斜聚焦球面波作为参考波,利用聚焦透镜与全息元件密接在探测面达到同样的聚焦效果,从而建立了全息模式波前传感器的等效模型。根据等效模型,对若干阶 Zernike 像差模式进行干涉记录,叠加得到多重全息元件。由全息模式波前传感器的运行原理,利用生成的多重全息元件对待测波前进行测量。数值模拟结果显示,探测面两光斑归一化强度差 I_{RA} 的变化率(即全息模式波前传感器灵敏度值 S_{lk})大小,反映待测波前中所包含的像差模式与多重全息元件内预先记录的像差模式类型的匹配程度,这一结果与理论分析结果相符合。根据归一化光强差的变化趋势就可以很容易判断出待测像差模式系数 α 的大小,从而达到波前

探测的目的,具有速度快的优势。

参 考 文 献

- Zhou Renzhong. Adaptive Optics[M]. 1996, Beijing: National Defence Industry Press, 1996
- 周仁忠. 自适应光学[M]. 1996, 北京: 国防工业出版社, 1996
- J. Primot. Theoretical description of Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **222**(1~6): 81~92
- Wu Yi, Wang Yingjian. Simulation and error analysis for Hartmann wavefront sensing and deformable mirror wavefront recovery[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 473~479
- 吴毅, 王英俭. 哈特曼波前探测及波前校正的仿真与误差分析[J]. *光学学报*, 1995, **15**(4): 473~479
- S. Rios, E. Acosta, S. Bará. Modal phase estimation from wavefront curvature sensing [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **123**(4~6): 453~456
- F. Roddier. Curvature sensing and compensation; a new concept in adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(2): 1223~1225
- F. Roddier. Wavefront curvature sensing and compensation methods in adaptive optics[C]. *SPIE*, 1991, **1487**
- N. Roddier. Curvature sensing and compensation; a computer simulation[C]. *SPIE*, 1989, **1114**: 92~96
- Xi Fengjie, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun. Influence of nonuniform intensity on wavefront curvature sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1293~1296
- 习锋杰, 姜宗福, 许晓军. 光强非均匀分布对波前曲率传感器的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1293~1296
- Xi Fengjie, Xu Xiaojun, Wang Tiezhi *et al.*. Wavefront curvature sensor with phase defocus grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 377~378
- 习锋杰, 许晓军, 王铁志 等. 相位光栅型波前曲率传感器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 377~378
- M. A. A. Neil, M. J. Booth, T. Wilson. New modal wavefront sensor: a theoretical analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(6): 1098~1107
- M. J. Booth. Direct measurement of Zernike aberration modes with a modal wavefront sensor[C]. *SPIE*, 2003, **5162**: 79~90
- A. D. Corbett, T. D. Wilkinson, J. J. Zhong *et al.*, Designing a holographic modal wavefront sensor for the detection of static

- ocular aberrations[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(5): 1266~1275
- 13 G. Andersen, R. Reibel. Holographic wavefront sensor[J]. *SPIE*, 2005, **5894**: 589400
- 14 G. P. Anderson. Fast holographic wavefront sensor: sensing without computing[C]. *SPIE*, 2006, **6272**: 6272E
- 15 G. Andersen, F. Ghebremichael, K. Gurley. Holographic wavefront sensor-fast sensing, No computing[C]. *SPIE*, 2007, **6488**: 648801
- 16 G. Andersen, F. Ghebremichael, K. S. Gurley. Fast computing-free wavefront sensing[C]. Analysis and Methods/Computational Optical Sensing and Information Information Photonics/Signal Recovery and Synthesis Topic Meeting on CD-ROM, OSA, 2007, AWC4
- 17 G. P. Anderson, R. Reibel. Holographic Wavefront Sensor[P]. US Patent 7268937, 2007
- 18 G. P. Anderson, L. Dussan, F. Ghebremichael *et al.*. Holographic wavefront sensor[J]. *Opt. Engng.*, 2009, **48**(8): 085801
- 19 J. Y. Son, D. V. Podanchuk, V. P. Dan'ko *et al.*. Shack-Hartmann wavefront sensor with holographic memory[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(11): 3389~3398
- 20 C. Liu, Z. Jiang, F. Xi *et al.*. Simulation of the computer-generated holographic modal wave front sensor[C]. *SPIE*, 2009, **7508**: 750809
- 21 Liu Changhai, Jiang Zongfu. Holographic modal wavefront sensor: theoretical analysis and simulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 147~152
刘长海, 姜宗福. 全息模式波前传感器理论分析及数值模拟[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 147~152
- 22 F. Ghebremichael, G. P. Andersen, K. S. Gurley. Holography-based wavefront sensing [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(4): A62~A70
- 23 R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 207~211
- 24 M. A. A. Neil, M. J. Booth, T. Wilson. Closed-loop aberration correction by use of a modal Zernike wave-front sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1083~1085
- 25 P. M. Blanchard, A. H. Greenaway. Simultaneous multiplane imaging with a distorted diffraction grating [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(32): 6692~6699
- 26 P. M. Blanchard, D. J. Fisher, S. C. Woods *et al.*. Phase-diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6649~6655