

波前曲率传感自适应光学的模式型控制技术

陈 波¹ 杨 靖² 李新阳³ 李小阳¹ 杨 旭¹

¹华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063009

²华北理工大学图书馆, 河北 唐山 063009

³中国科学院光电技术研究所自适应光学实验室, 四川 成都 610209

摘要 针对波前曲率传感自适应光学,介绍了基于拉普拉斯算子本征模式的波前闭环校正原理,理论分析了波前校正误差。建立了61单元自适应光学数值仿真模型,进行了大气湍流波前畸变闭环校正数值仿真。仿真结果与误差理论分析一致,当模式数量较少时闭环校正精度较低,而数量过多时产生的模式耦合误差也会导致校正误差增大。通过分析模式数量与复原矩阵的条件数之间的关系,给出了一种简便的最佳模式数量选择方法。

关键词 自适应光学;波前曲率传感;波前控制;拉普拉斯算子本征模式

中图分类号 TP273.2 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0201002

Modal Control Technique of Adaptive Optics with Wavefront Curvature Sensing

Chen Bo¹ Yang Jing² Li Xinyang³ Li Xiaoyang¹ Yang Xu¹

¹College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, China

²Library, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, China

³Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract For adaptive optics with curvature sensor, a close-loop wavefront correction technique based on eigenfunctions of laplacian is introduced, and the wavefront correction error is analyzed theoretically. A numerical simulation model of 61 element adaptive optics is setup. The simulations of atmospheric turbulence wavefront aberration correction are carried out. The numerical simulation results are in agreement with the theoretical analysis results, which show that the close-loop correction accuracy is lower when the amount of eigenfunctions modes is less or more because of the mode coupling increment. Finally, by analyzing the relationship between the mode amount and the condition number of retrieval matrix, a simple and practical method is proposed to choose the proper mode amount.

Key words adaptive optics; curvature sensing; wavefront control; eigenfunctions of laplacian

OCIS codes 010.1080; 010.1285; 010.7350

1 引 言

基于波前曲率传感器的自适应光学在天文成像等领域中得到广泛应用^[1-5]。对于这一类系统,目前普遍采用双压电片式等曲率型变形镜作为波前校正器,闭环控制时,波前曲率传感器采用和变形镜驱动器排布相匹配的微透镜阵列对光强信号进行分区探测,在此基础上通过矩阵运算将各区域上的波前曲率信号转化为变形镜的控制信号。这种分区探测的“硬件解耦”控制方法存在一定的不足:一是要求光电探测器分区和波前校正器驱动器准确对准;二是这种控制方法只适合于曲率型波前校正器。针对第一个问题,2011年国

收稿日期: 2015-08-31; 收到修改稿日期: 2015-10-15

基金项目: 河北省自然科学基金(F2013209149)、河北省高等学校科学技术研究基金(QN2014042)

作者简介: 陈 波(1984—),男,博士,讲师,主要从事自适应光学控制技术、激光主动成像方面的研究。

E-mail: chenbo182001@163.com

内研究人员提出了整体探测波前控制技术^[6],并进行了低阶Zernike像差校正数值仿真,取得了与传统分区波前控制基本相当的校正效果。这种方法的基本思想是利用曲率型变形镜影响函数的曲率信号,去拟合畸变波前的整体曲率信号从而得到控制信号。严格来说,这种波前控制方法只适合于电极数量较少的曲率型波前校正器。当通光口径不变、驱动器个数增加时,电极间的相互耦合势必增大,进而影响闭环精度。

为此,结合拉普拉斯算子的本征模式^[7],本文研究了一种无需分区探测且与波前校正器类型无关的模式型波前控制技术,通过分析校正误差的来源,重点研究了模式数量对波前校正性能的影响,并给出了一种简单的模式数量选择方法。

2 基于拉普拉斯算子本征模式的波前控制方法

基于拉普拉斯算子本征模式的波前控制主要包括两步:根据传感器的输出信号复原出波前畸变相位;利用实测的变形镜影响函数去拟合畸变相位得到残余控制信号,并进行闭环迭代。

2.1 畸变波前复原

根据波前曲率传感器的基本原理,前后离焦面上归一化的光强差和波前曲率以及波前沿光瞳边界法向微分之间的关系是Neumann边界条件下的泊松方程^[8]:

$$\frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = S(\mathbf{r}) = C \left[\nabla^2 \varphi(\mathbf{r}) - \frac{\partial \varphi(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{n}} \cdot \boldsymbol{\sigma}_c \right], \quad (1)$$

式中 I_1 和 I_2 为离焦面上的光强信号, $S(\mathbf{r})$ 为光强之差的归一化信号, \mathbf{r} 表示入射光瞳区域上的矢变量, C 为与传感器参数有关的常数, ∇^2 为拉普拉斯算子, $\varphi(\mathbf{r})$ 表示光瞳面上的入射光相位, \mathbf{n} 为光瞳边缘处的法向斜率单位矢量, $\boldsymbol{\sigma}_c$ 为光瞳区域的边界。

测量出两个离焦面上的光强信号后,通过求解(1)式,便可得到入瞳面上的光波相位 $\varphi(\mathbf{r})$ 。基于拉普拉斯算子本征函数的求解方法如下所述。

方程^[9]

$$\begin{cases} \nabla^2 W(\mathbf{r}) = -\gamma^2 W(\mathbf{r}) \\ \partial W(\mathbf{r}) / \partial \mathbf{n} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

满足(2)式的函数 $W(\mathbf{r})$ 记作拉普拉斯算子本征函数。本征函数 $W_1(\mathbf{r}), W_2(\mathbf{r}), \dots, W_k(\mathbf{r}), \dots$ 构成的函数组是一组正交完备基,因此任意波前相位 $\varphi(\mathbf{r})$ 可以描述为

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k W_k(\mathbf{r}), \quad (3)$$

式中 α_k 表示 $\varphi(\mathbf{r})$ 中所含模式 $W_k(\mathbf{r})$ 的大小。

将(2)式和(3)式代入(1)式,忽略其中的常数 C ,可得

$$S(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{\infty} [-\alpha_k \gamma_k^2 W_k(\mathbf{r})], \quad (4)$$

式中 $-\gamma_1^2, \gamma_2^2, \dots, \gamma_k^2, \dots$ 为本征函数 $W_1(\mathbf{r}), W_2(\mathbf{r}), \dots, W_k(\mathbf{r}), \dots$ 对应的本征值。

(4)式可以用矩阵形式表示为

$$\mathbf{s} = \mathbf{W} \mathbf{a}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{s} 为描述 $S(\mathbf{r})$ 的列向量,矩阵 \mathbf{W} 由描述本征函数 $-\gamma_k^2 W_k(\mathbf{r})$ 的列向量构成,列向量 \mathbf{a} 为波前畸变对应的本征模式系数。

因此,根据传感器数据 I_1 和 I_2 计算出 \mathbf{s} 后,通过求解(6)式即可得到

$$\mathbf{a} = \mathbf{W}^+ \mathbf{s}, \quad (6)$$

式中 \mathbf{W}^+ 为 \mathbf{W} 的广义逆矩阵。

在此基础上,将 \mathbf{a} 代入(3)式即可复原出波前畸变

$$\varphi = \bar{\mathbf{W}} \mathbf{a} = \bar{\mathbf{W}} (\mathbf{W}^+ \mathbf{s}), \quad (7)$$

式中 φ 为 $\varphi(\mathbf{r})$ 的向量形式, $\bar{\mathbf{W}}$ 由描述本征函数 $W_k(\mathbf{r})$ 的列向量构成。

在实际波前复原中,只能利用一定数量的本征函数去进行波前复原,因此必然存在复原误差,即实际复原出的畸变相位 φ_1 为

$$\varphi_1 = \bar{W}_N(W_N^+s) = \varphi - e_1 = \bar{W}(W^+s) - e_1, \quad (8)$$

式中 N 为采用的模式数量, \bar{W}_N 和 W_N 为 \bar{W} 和 W 的前 N 列, e_1 为波前复原误差。

2.2 残余控制信号及闭环迭代

针对复原出的相位畸变 φ_1 , 利用校正器的影响函数进行拟合,即可得到相应的残余控制信号。在此,可在线测量得到校正器的影响函数,原理和测量过程如下所述。

与(7)式类似,变形镜第 j 个驱动器的真实影响函数 F_j 可以表示为

$$F_j = \bar{W}a = \bar{W}(W^+s_j), \quad (9)$$

式中 s_j 为入射波前相位为 F_j 时由传感器信号测量到的曲率信号。由此可知,单元数为 m 的变形镜的影响函数矩阵 F 可表示为

$$F = \bar{W}a = \bar{W}(W^+s_m), \quad (10)$$

式中 $s_m = [s_1 \ \cdots \ s_j \ \cdots \ s_m]$ 。

采用双边测量法测量 s_m 的第 j 列 s_j 时^[10], 首先只给变形镜的第 j 个驱动器施加信号 1, 记录曲率传感器的光强信号 I_1 和 I_2 , 并计算出相应的曲率信号 s_{j+} , 然后只给第 j 个驱动器施加信号 -1, 记录曲率传感器的光强信号 I_1 和 I_2 , 并计算出相应的 s_{j-} ; 最后令 $s_j = (s_{j+} - s_{j-})/2$ 。

测得 s_m 后, 根据(10)式即可计算出影响函数。但是实际中只能利用一定数量的本征函数, 因此与真实的影响函数 F 相比, 实际计算出的影响函数 F' 存在误差 e_2 , 即

$$F' = \bar{W}_N(W_N^+s_m) = F + e_2 = \bar{W}(W^+s_m) + e_2. \quad (11)$$

测得影响函数 F' 后, 利用 F' 拟合复原出的波前畸变 φ_1 , 即可得到相应的残余控制信号 δu 为

$$\delta u = F'^+ \varphi_1 = \left[\bar{W}_N(W_N^+s_m) \right]^+ \left[\bar{W}_N(W_N^+s) \right] = s_m^+ W_N W_N^+ s, \quad (12)$$

式中 F'^+ 为 F' 的伪逆矩阵。

最后按照闭环方式驱动波前校正器, 即

$$u(i+1) = u(i) - \delta u, \quad (13)$$

式中 $u(i+1)$ 表示第 $i+1$ 次闭环迭代得到的控制信号。

2.3 波前校正误差分析

控制信号 $-\delta u$ 施加到变形镜上, 得到的补偿相位 φ_c 为

$$\varphi_c = F(-\delta u) = (F' - e_2)\delta u = -\varphi_1 + e_2\delta u, \quad (14)$$

因此最终的校正误差由波前复原误差 e_1 和控制算法计算误差 $e_2\delta u$ 组成, 如下式所示:

$$\varphi + \varphi_c = \varphi - \varphi_1 + e_2\delta u = e_1 + e_2\delta u. \quad (15)$$

对于波前复原误差 e_1 , 不考虑探测噪声时, 主要包括模式截断误差和模式耦合误差。从理论上来看, 模式数量 N 越大 e_1 越小。但在实际中, 由于波前传感器的空间分辨率有限, 当选取的模式过多时, 就会产生模式耦合误差。因此本征模式法复原存在一个最优的模式数量。这与文献[11]中哈特曼波前传感器模式法复原误差是类似的。

对于控制算法计算误差 $e_2\delta u$, 主要是由实测影响函数 F' 与真实影响函数 F 之间的误差 e_2 引起。与 e_1 类似, e_2 也取决于由传感器有限分辨率引起的模式耦合误差。理论上模式数量越多 e_2 越小, 但是实际中模式过多会产生模式耦合误差, 进而使得 e_2 增大。所以必然存在一个最佳的模式数量 N , 使得 e_2 最小。此外, e_2 受到的 δu 调制, 当其中某个驱动器上出现较大误差时, 可能会影响整个波前校正精度, 甚至形成误差的放大。

根据以上分析可以得出, 波前校正误差主要来源于模式耦合, 而模式耦合的大小主要取决于波前传感

器的分辨率和模式数量 N 。因此,当传感器分辨率一定时,为了使得闭环校正性能最优,必须寻找最佳模式数量,使得波前复原误差 e_1 、实测影响函数与实际影响函数间的误差 e_2 最小。

3 数值仿真

3.1 仿真模型

基于波前曲率探测的自适应光学模型如图 1 所示,主要由波前校正器、相位光栅型波前曲率传感器、波前控制器组成。波前传感器测量得到 I_1 、 I_2 ,波前控制器根据(12)、(13)式得到控制信号 $u(i)$,并输出给波前校正器进行波前校正。

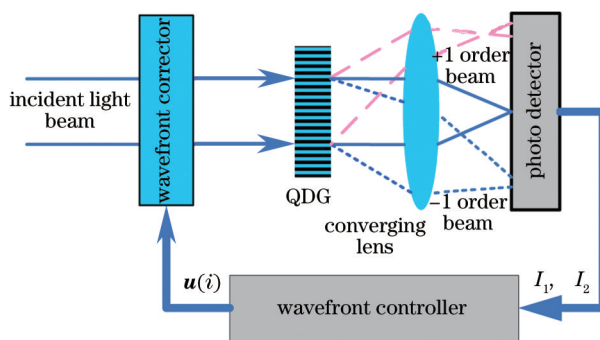


图 1 基于相位光栅型波前曲率传感器的自适应光学示意图

Fig.1 Diagram of adaptive optics based on phase grating wavefront curvature sensor

入射波前畸变为利用 Harding 等的方法产生的大气湍流相位屏 $\varphi(r)$ ^[12],采样点数为 256×256 ,湍流外尺度为 100 m ,内尺度为 0.01 m 。当 D/r_0 分别等于 5 、 10 、 15 、 20 时,各随机生成 50 帧相位屏,去除其中的波前整体倾斜,然后进行闭环校正数值仿真。

相位光栅型波前曲率传感器由二次扭曲光栅(QDG,其实质为二元相位离轴菲涅耳波带片)、短焦透镜和光电探测器组成^[13-15]。光波长为 635 nm ,通光直径为 0.01 m ;QDG 的等效焦距为 3 m ,离轴量(光栅主光轴与光瞳中心的距离)为 0.008 m ,其相位调制如图 2(a)所示。透镜焦距为 0.1 m ,与 QDG 的距离为 0.1 m 。当入射光束为振幅均匀为 1 的平面波时,数值模拟得到光电探测器上的光强信号($256\text{ pixel} \times 256\text{ pixel}$)如图 2(b)所示,其中 I_1 、 I_2 的大小约为 $63\text{ pixel} \times 63\text{ pixel}$ 。根据二元光学原件的衍射效率计算公式可知,0 级衍射光的衍射效率为 0 ,而 ± 1 级的衍射效率可达 40.5% 。仿真过程中,为了减少运算量,通过合并相邻 9 个像素将 I_1 、 I_2 转化为 21×21 的矩阵。

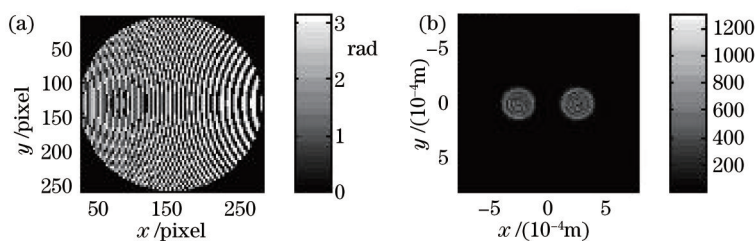


图 2 (a) QDG 相位调制; (b) 光电探测器上的信号

Fig.2 (a) Phase modulation of QDG; (b) light intensity in photo detector

为了验证这种控制技术与波前校正器类型无关,本文采用了文献[16]中的斜率型 61 单元连续表面压电变形镜(DM),如图 3 所示,第 j 个驱动器上的影响函数 $F_j(x,y)$ 为

$$F_j(x,y) = \exp \left[\ln(w) \left(\frac{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{d} \right)^a \right], \quad (16)$$

式中 (x_j, y_j) 表示第 j 个驱动器的位置, w 为驱动器间的耦合系数, a 为高斯指数, d 为驱动器中心间距。归一化口径下 $d=0.286$ 、 $w=0.08$ 、 $a=2$ 。

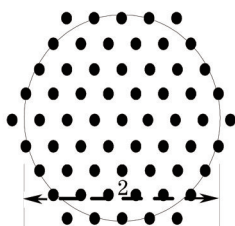


图3 61单元变形镜的驱动器排布

Fig.3 Actuators distribution of 61-element deformable mirror

波前控制器完成(12)、(13)式所示的控制运算。 W_N 采用文献^[17]中的拉普拉斯算子本征函数实现,即

$$W_n^m(r, \theta) = \begin{cases} \sqrt{2} J_u(\gamma_{um} r) \cos(u\theta), & m > 0 \\ J_0(\gamma_{0m} r), & m = 0 \\ \sqrt{2} J_u(\gamma_{um} r) \sin(u\theta), & m < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中 $|r| \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi, n = 1, 2, 3, \dots, m$ 为整数, $u = |m|, J_u(\gamma_{um} r)$ 为第一类 u 阶贝塞尔函数, γ_{um} 为 $dJ_u(r)/dr = 0$ 的第 n 个正根。仿真中采用了 56 阶本征模式, 模式阶数 k 和 (21) 式中 m, n 的对应关系如表 1 所示。

表 1 前 56 阶拉普拉斯算子本征模式的阶数 k 与 m, n 的对应关系

Table 1 Relationship between the order number k and m, n of the first 56 order eigenfunctions

k	1	2~17	18	19~30	31	32~39	40	41~46	47	48~51	52	53~56
n	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6
m	0	$\pm(1\sim 8)$	0	$\pm(1\sim 6)$	0	$\pm(1\sim 4)$	0	$\pm(1\sim 3)$	0	$\pm(1\sim 2)$	0	$\pm(1\sim 2)$

3.2 仿真结果

相对误差定义为

$$E = \text{rms}(\varphi + \varphi_c) / \text{rms}(\varphi), \quad (18)$$

式中 $\text{rms}(\varphi + \varphi_c)$ 和 $\text{rms}(\varphi)$ 分别表示校正后残余波前和校正前波前畸变的均方根值。当 $E < 1$ 时, 说明闭环校正有效的, 且 E 越小表示校正精度越高。

当模式数量 N 分别等于 15、20、25、30、35、40、45、50 时, 即分别利用前 N 阶本征模式, 对 $D/r_0 = 5、10、15、20$ 时生成的大气湍流相位屏进行闭环校正, 相对误差均值 $\langle E \rangle$ 的迭代过程如图 4 所示, 200 次迭代后 E 的均值 $\langle E(200) \rangle$ 如图 5 所示。

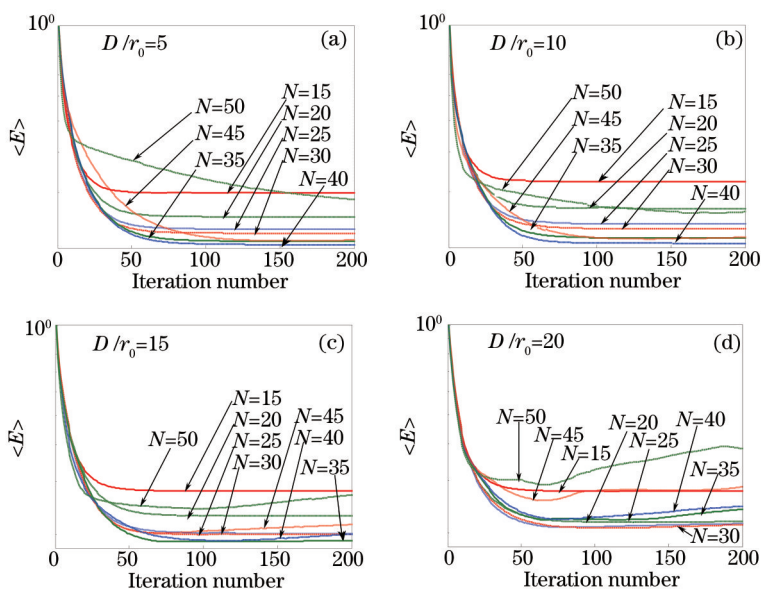


图 4 N 分别等于 15、20、25、30、35、40、45、50 时 $\langle E \rangle$ 的迭代过程

Fig.4 Evolution curve of $\langle E \rangle$ when $N=15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50$, respectively

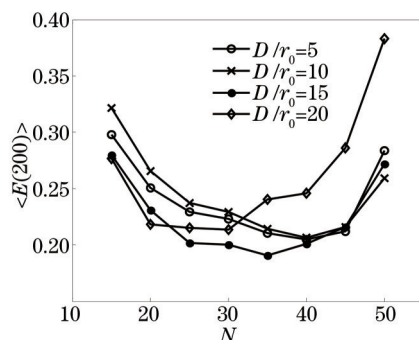


图5 200次迭代后 E 的均值 $\langle E(200) \rangle$

Fig.5 Averaging results $\langle E(200) \rangle$ of E after 200 iterations

从图4可以看出:1) 不论 D/r_0 的大小系统均能够有效校正波前畸变,说明算法能够用于斜率型波前校正器;2) 模式数量 N 对校正误差有显著影响。从图5可以看出:1) 存在一个最佳模式数量使得校正误差最小, D/r_0 等于5和10时最佳模式数量为40左右, D/r_0 等于15和20时最佳模式数量分别为35和30;2) 随着 D/r_0 的增大,最佳模式数量略有减少。

当 D/r_0 较小时,波前畸变中的高阶像差较小, e_1 较小,因此决定校正误差的主要是 e_2 , 这时最佳模式数量主要由 e_2 确定。模式数量 N 与 e_2 的均方根值 $\langle \text{rms}(e_2) \rangle$ 之间的关系如图6(a)所示,可以看出当 $N=44$ 时 $\langle \text{rms}(e_2) \rangle$ 最小。随着 D/r_0 的增大,波前畸变中的高阶像差增加,导致模式耦合误差增大,所以最佳模式数量有所减少。因此,在传感器分辨率一定的情况下,最佳模式数量的上限可以通过分析实测影响函数 F' 与真实影响函数 F 之间的误差 e_2 给出。

事实上,由(11)式可知,模式耦合与 $W_N^+ s_M$ 中列向量之间的相关性密切相关。 $W_N^+ s_M$ 中列向量之间的相关性越大, $W_N^+ s_M$ 的条件数(记作 C)越大,则意味着模式之间的耦合误差越大。本文中 C 与模式数量 N 之间的关系如图6(b)所示,可以看出,模式数量在20~44之间时,随着 N 的增大, C 的变化较小;当 N 大于44时,随着 N 的增大, C 的显著增大,这与图6(a)的结果基本一致。因此在实际中,可以通过分析 C 与模式数量 N 之间的关系来估计最佳模式 N 的上限。

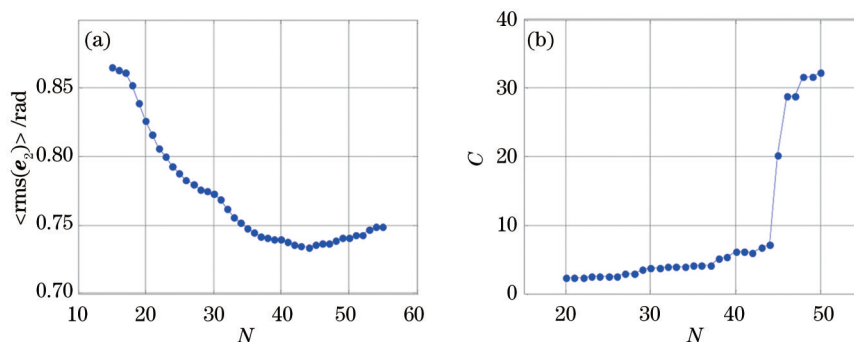


图6 (a) 校正器对本征模式的拟合误差; (b) 矩阵 $W_N^+ s_M$ 的条件数

Fig.6 (a) Errors of fitting eigenfunctions with corrector; (b) conditioning number of $W_N^+ s_M$

4 结 论

对于波前曲率传感自适应光学,利用拉普拉斯算子本征模式对传感器信号进行软解耦,复原出波前畸变,避免了波前传感器的分区探测,在此基础上利用实测的校正器影响函数拟合的波前畸变,计算出校正器的控制信号。合理选择模式数量 N 是关键。当 N 为无穷多时,算法就转化为传统的直接曲率法,这时只能采用曲率型校正器,否则这种线性关系不成立。因此,优化 N 的意义在于使得传感器可以与任意类型的波前校正器组合,实现传感器分辨率与变形镜校正能力的匹配,从而实现波前校正最优。为此可通过分析模式数量与复原矩阵 $W_N^+ s_M$ 的条件数之间的关系,来估计 N 的取值。

- 1 Graves J E, Roddier F J, Northcott M J, *et al.*. Adaptive optics at the university of Hawaii IV: A photon-counting curvature wavefront sensor [C]. SPIE, 1994, 2201: 502-507.
- 2 Qiang Yang, Christ Ftacilas, Mark Chun. Wavefront correction with high-order curvature adaptive optics systems[J]. J Opt Soc Am A, 2006, 23(6): 1375-1381.
- 3 Roddier F, Northcott M, Graves J E. A simple low-order adaptive optics system for near-infrared applications[J]. Pub Astr Soc Pac, 1991, 103(659): 131-149.
- 4 Northcott M J, Roddier C A. Adaptive optics at the university of Hawaii III: The adaptive optical PSF[C]. SPIE, 1994, 2201: 129-136.
- 5 S Oberti, H Bonnet, E Fedrigo, *et al.*. Calibration of a curvature sensor / bimorph mirror AO system: Interaction matrix measurement on MACAO systems[C]. SPIE, 2004, 5490: 139-150.
- 6 Huang Shengyang, Xi Fengjie, Ning Yu, *et al.*. Reconstruction algorithm for wavefront curvature sensor with phase grating[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(10): 2573-2577.
黄盛扬, 习锋杰, 宁禹, 等. 相位光栅型曲率传感器的波前校正算法[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(10): 2573-2577.
- 7 Huang Shengyang, Xi Fengjie, Liu Changhai, *et al.*. Phase retrieval using eigenfunctions to solve transport-of-intensity equation[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1001002.
黄盛扬, 习锋杰, 刘长海, 等. 本征函数法求解光强传输方程的相位反演方法[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1001002.
- 8 Roddier F. Wavefront sensing and the irradiance transport equation[J]. Appl Opt, 1990, 29(10): 1402-1403.
- 9 Morse P M, Feshbach H. Methods of Theoretical Physics[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1953.
- 10 Chen Bo, Li Min, Li Xinyang, *et al.*. Close-loop experiment of adaptive optics system based on linear phase retrieval technique[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1633-1637.
陈波, 李敏, 李新阳, 等. 基于线性相位反演技术的自适应光学闭环实验研究[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1633-1637.
- 11 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.
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.
- 12 Cresside M Harding, Rachel A Johnston, Richard G Lane. Fast simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. Appl Opt, 1999, 38(11): 2161-2170.
- 13 Blanchard P M, Fisher D J, Woods S C, *et al.*. Phase-diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating[J]. Appl Opt, 2000, 39(35): 6649-6655.
- 14 Jiang Zongfu, Xi Fengjie, Xu Xiaojun, *et al.*. Theory and applications of defocus grating wavefront curvature sensing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 205-210.
姜宗福, 习锋杰, 许晓军, 等. 光栅型波前曲率传感器原理和应用[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 205-210.
- 15 Chen Bo, Yang Jing, Li Xinyang, *et al.*. Phase grating wavefront curvature sensor based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 082301.
陈波, 杨靖, 李新阳, 等. 基于液晶空间光调制器的光栅型波前曲率传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 082301.
- 16 Wenhan Jiang, Ning Ling, Xuejun Rao, *et al.*. Fitting capability of deformable mirror[C]. SPIE, 1991, 1542: 130-137.
- 17 Milton N M, Lloyd-Hart M. Disk harmonic functions for adaptive optics simulations[C]. Adaptive Optics: Analysis and Methods, Optical Society of America, 2005: AWA3.

栏目编辑: 史敏