

直接斜率法畸变波前校正的研究

许泽帅^{1,2} 羊毅² 兰卫华² 穆海平² 刘玉²

¹光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009

²洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009

摘要 直接斜率法直接将波前传感器的测量量与变形镜的响应特性建立起对应关系,通过算法直接计算出控制电压信号。用64个子孔径的哈特曼波前传感器对畸变波前进行仿真探测,按照变形镜面形为影响函数加权叠加的假设,可以求解出加在各个驱动器上的电压值,进而可以对仿真的32单元变形镜进行控制,校正波前。仿真的结果显示,直接斜率法可以有效校正畸变波前。

关键词 自适应光学;直接斜率法;变形镜变形函数;控制电压;波前斜率

中图分类号 TP273+.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.040101

Correction of Distorted Wavefront Based on Direct Wavefront Gradient Algorithm

Xu Zeshuai^{1,2} Yang Yi² Lan Weihua² Mu Haiping² Liu Yu²

¹Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang, Henan 471009, China

²Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, Luoyang, Henan 471009, China

Abstract Direct wavefront gradient algorithm directly establishes correspondence between measurands of the wavefront sensor and response characteristics of the deformable mirror. The voltage can be directly calculated by the algorithm. We use Hartmann wavefront sensor with 64 sub-apertures to detect the distorted wavefront. Based on the hypothesis that of deformable mirror is the weighted addition of the influence function, each of the voltage values applied on the drive is solved by the algorithm. The simulated 32 units of deformable mirror can be controlled and then distorted wavefront can be restored. The simulation result shows that direct wavefront gradient algorithm can effectively adjust the distorted wavefronts.

Key words adaptive optics; direct wavefront gradient algorithm; influence function of deformable mirror; control voltage; wavefront slope

OCIS codes 010.1080; 010.3310; 010.7350

1 引言

激光通过湍流大气之后就会产生光强起伏、光束漂移、光束扩展和到达角起伏等现象,使光束质量严重退化^[1],影响激光的作用效果。因此需要通过镜面形变来改变入射波前的相位,从而改善光束质量^[2]。控制变形镜(DM)来校正畸变波前的算法很多,从传统的带波前传感器的校正算法到无波前传感器畸变校正方法,国内外许多学者对此做了大量研究。近些年主要对无波前传感器成像自适应光学系统的畸变校正方法进行研究,从早期利用爬山法、多元高频振动法进行控制参数优化,到现在常用的随机并行梯度下降算法^[3]、模拟退火和遗传算法^[4]等并行优化算法对波前进行校正,但是这些算法受限于较低的CCD采样频率,仅能校正静态或缓慢变化的畸变。

直接斜率法^[5]直接将波前传感器的测量量与变形镜的响应特性建立起对应关系,通过一定的拟合算法直接计算出控制电压信号,即把测量量作为控制对象,而不需要计算出要校正的畸变波前相位信息。这种方法计算环节少、计算量小、实现简单、硬件成本较低、误差传递环节少,成为很多实际系统中常用的方法并

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-11-07; 网络出版日期: 2014-03-11

基金项目: 航空“十二五”预研项目(61901040102)

作者简介: 许泽帅(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: xuzeshuai2007@126.com

导师简介: 羊毅(1965—),女,博士,研究员,主要从事机载光电探测系统方面的研究。E-mail: eoei@vip.sina.com

取得了很好的效果,通常可以用于时间性能要求较高的场合。

本文首先用 21 阶 Zernike 多项式描述的一个畸变波前^[6],对畸变波前进行仿真探测,得到波前斜率,通过变形镜变形函数^[7],采用直接斜率法,可以求解出加在各个驱动器上的电压值,对变形镜进行控制,从而达到校正畸变波前的目的^[8]。

2 模式法求解波前斜率

波前 $\phi(x,y)$ 可以被分解为在圆域内正交的 Zernike 多项式的形式:

$$\phi(x,y) = \sum_{k=1}^l a_k Z_k(x,y), \quad (1)$$

式中 l 为模式数, a_k 为各模式系数, $Z_k(x,y)$ 为第 k 阶 Zernike 系数。

通过模式法^[9-10]求解波前斜率。设波前传感器测量的第 j 个子孔径内的入射光束波前平均斜率为 G_{jx} 和 G_{jy} :

$$\begin{cases} G_{jx} = \sum_{k=1}^l \left(\frac{a_k}{s_j} \right) \iint_{s_j} \left[\frac{\partial Z_k(x,y)}{\partial x} \right] dx dy = \sum_{k=1}^l a_k Z_{jkx} \\ G_{jy} = \sum_{k=1}^l \left(\frac{a_k}{s_j} \right) \iint_{s_j} \left[\frac{\partial Z_k(x,y)}{\partial y} \right] dx dy = \sum_{k=1}^l a_k Z_{jky} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 s_j 为第 j 个子孔径的面积。

哈特曼传感器共有 M 个子孔径,并取模式函数系列前 l 项进行波前重构,则模式重构的矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} G_{1x} \\ G_{1y} \\ \dots \\ G_{Mx} \\ G_{My} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11x} & Z_{12x} & \dots & Z_{1lx} \\ Z_{11y} & Z_{12y} & \dots & Z_{1ly} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{M1x} & Z_{M2x} & \dots & Z_{Mlx} \\ Z_{M1y} & Z_{M2y} & \dots & Z_{Mly} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_l \end{bmatrix}, \quad (3)$$

简化表示为

$$G = Z \cdot A. \quad (4)$$

3 直接斜率法

由于不同类型的波前传感器测量的物理量不同,因此获得波前相位以及变形镜控制信号的方法也就不尽相同^[11]。按照波前传感器的类型和工作过程,各种类型的方法可以归纳如图 1 所示。

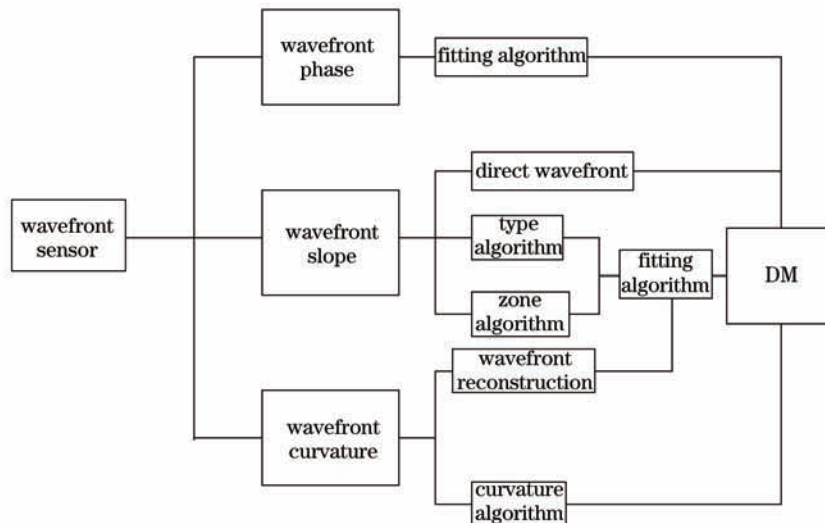


图 1 变形镜电压的常见控制途径

Fig.1 Common control method for the voltage of deformable mirror

波前斜率直接反映波前相位,如果所加控制使斜率达到最小,即校正后斜率接近标准光斜率,则此时相位误差也应该最小。当变形反射镜校正了入射光束波前在哈特曼传感器所有子孔径内的波前相位斜率误差时,也就可以近似达到校正

波前相位畸变的目的,因此就可以以子孔径内斜率作为校正对象进行控制。

设待校正畸变波前为 φ , 变形镜共有 N 个驱动器, 第 n 个驱动器的影响函数为 $I_n(x, y)$, 假设变形镜应当产生的最佳面形为 $\phi(x, y)$, 相应的各个驱动器控制电压信号序列为 V_n , 设哈特曼传感器共有 M 个子孔径, 第 m 个子孔径的区域为 S_m 。按照变形镜面形为影响函数加权叠加的假设, 可得

$$\phi(x, y) = \sum_{n=1}^N V_n \cdot I_n(x, y), \quad (5)$$

其中 $I_n(x, y)$ 可以由(6)式描述:

$$I_n(x, y) = \exp \left[(\ln \omega) \left(\frac{\sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}}{b} \right)^\alpha \right], \quad (6)$$

式中 α 为高斯指数, ω 为交连值, b 为驱动器间隔。交连值 ω 定义为一个驱动器工作时, 相邻驱动器中心的变形量与工作驱动器中心最大变形量的比值, 具有比较明显的物理意义。

对(5)式分别求 x 和 y 方向的偏导数, 并在哈特曼传感器相应子孔径区域内积分求平均, 这样就可以得到哈特曼传感器输出的各子孔径的斜率信号。第 j 个子孔径内的平均斜率为

$$\begin{cases} G_{jx} = \sum_{n=1}^N \left(\frac{V_n}{S_j} \right) \iint_{S_j} \frac{\partial I_n(x, y)}{\partial x} dx dy = \sum_{n=1}^N V_n \cdot I_{jnx} \\ G_{jy} = \sum_{n=1}^N \left(\frac{V_n}{S_j} \right) \iint_{S_j} \frac{\partial I_n(x, y)}{\partial y} dx dy = \sum_{n=1}^N V_n \cdot I_{jny} \end{cases}, \quad (7)$$

其中 I_{jnx} 和 I_{jny} 是影响函数在哈特曼上的斜率响应:

$$\begin{cases} I_{jnx} = \frac{1}{S_j} \iint_{S_j} \frac{\partial I_n(x, y)}{\partial x} dx dy \\ I_{jny} = \frac{1}{S_j} \iint_{S_j} \frac{\partial I_n(x, y)}{\partial y} dx dy \end{cases}. \quad (8)$$

I_{jnx} 和 I_{jny} 可以事前测量, 共有 $2 \times M \times N$ 个量, 对于待校正畸变波前可以测量得到 $2 \times M$ 个斜率量, 这样按照(7)、(8)式就可以建立起有 $2 \times M$ 个方程的线性方程组, 用矩阵形式可以表示为

$$\mathbf{G} = \mathbf{I}' \cdot \mathbf{V}, \quad (9)$$

式中 \mathbf{I}' 为影响函数的斜率响应矩阵, \mathbf{G} 为测量的波前斜率, 这样利用最小二乘法就可以由斜率数据直接计算得到最佳拟合时的控制电压序列 \mathbf{V} , 即

$$\mathbf{V} \approx \mathbf{P} \cdot \mathbf{G}, \quad (10)$$

式中 \mathbf{P} 表示影响函数的斜率响应矩阵 \mathbf{I}' 的广义逆矩阵。由这种方式获得控制电压的算法就是直接斜率法。只要准确测量 \mathbf{I}' 就可以近似地计算出直接拟合的最佳控制电压, 其中 \mathbf{G} 可以通过模式法进行求解仿真。

4 直接斜率法波前校正仿真

通过 K-L 法 (Karhunen-Loeve 法)^[12-13] 来模拟产生一个大气畸变波前; 采用模式法对畸变波前的波前斜率进行求解, 即由(4)式可以求出波前斜率; 通过变形镜的变形函数和电压建立起变形镜面形的影响函数, 采用直接斜率法对控制变形镜电压进行仿真求解, 即由(10)式可以反求出控制电压, 进而通过(5)式得到变形镜的补偿面型, 可以与原始畸变比较得到残余波前。采用 32 单元变形镜, 8×8 子孔径的哈特曼传感器进行仿真, 其中 32 单元变形镜仿真排布如图 2 所示。

由(6)式, 仿真时取高斯指数 $\alpha = 2$, 交连值 $\omega = 0.05$, 驱动器间隔 $b = 0.4$, 通过 K-L 法产生 21 阶 Zernike

多项式的畸变波前。21项 Zernike 系数如图 3 所示。通过直接斜率法仿真得到的预加电压如表 1 所示。仿真的波前和校正后残余波前如图 4 所示。

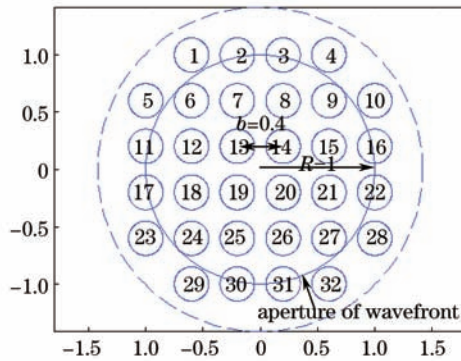


图 2 32 单元变形镜仿真模型示意图

Fig.2 Model of 32-element deformable mirror for simulation

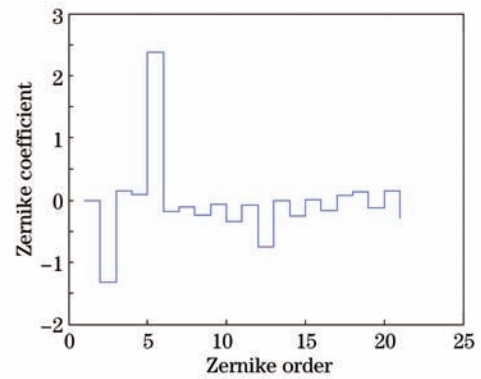


图 3 畸变波前 Zernike 系数图

Fig.3 Zernike coefficients of the distorted wavefront

表 1 波前校正电压

Table 1 Voltages of distorted wavefront correction

Actuator	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltage/V	150	-193	125	0	42	-290	348	-243
Actuator	9	10	11	12	13	14	15	16
Voltage/V	71	-61	0	66	44	-209	269	-57
Actuator	17	18	19	20	21	22	23	24
Voltage/V	-128	371	-645	792	-632	173	162	-531
Actuator	25	26	27	28	29	30	31	32
Voltage/V	847	-952	689	-184	173	-315	357	-215

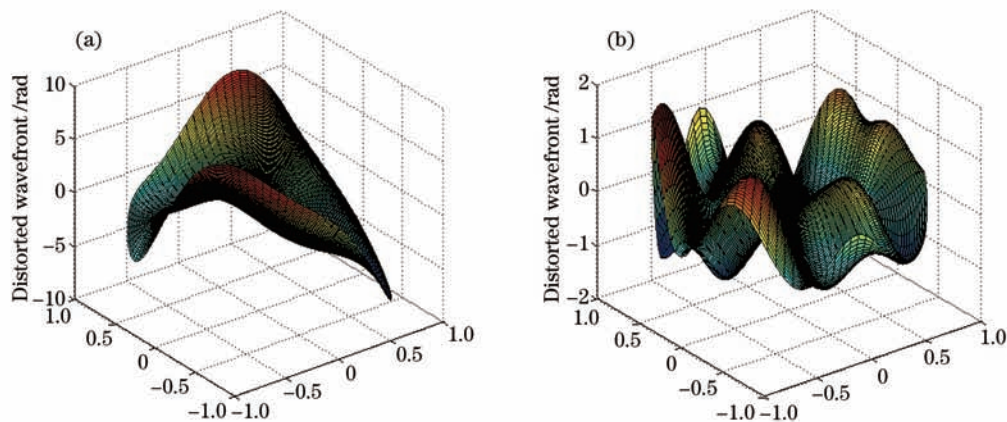


图 4 (a)畸变波前和(b)残余波前

Fig.4 (a) Distorted wavefront and (b) residual wavefront

由仿真得到,产生的畸变波前峰-谷(PV)值为 18.17 rad,均方根(RMS)值为 2.3 rad,校正后残余波前 PV 值为 3.58 rad,RMS 值为 0.53 rad,通过直接斜率法校正畸变波前的效果是非常明显的。

5 结 论

用 21 阶 Zernike 多项式描述一个畸变波前,用 8×8 的哈特曼传感器对波前的测量量和变形镜的响应特性建立起对应关系,对畸变波前进行仿真探测,得到波前斜率,通过变形镜变形函数,按照变形镜面形为影响函数加权叠加的假设,可以求解出加在各个驱动器上的电压值,进而可以对仿真的 32 单元变形镜进行控制,校正波前。仿真的结果显示,直接斜率法可以有效校正畸变波前。

参考文献

- 1 Zhang Pengfei, Fan Chengyu, Qiao Chunhong, *et al.*. Analysis of scaling laws for phase compensation of focused beam under thermal blooming conditions [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0213002.
张鹏飞, 范承玉, 乔春红, 等. 聚焦光束热晕效应相位补偿定标规律研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0213002.
- 2 Enrique J F, Laurent V, Boris H, *et al.*. Adaptive optics with a magnetic deformable mirror applications in the human eye [J]. *Opt Express*, 2006, 14(20): 8900–8917.
- 3 Qi Bo, Chen Hongbin, Ren Ge, *et al.*. Wavefront correction of telescope based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 082201.
亓波, 陈洪斌, 任戈, 等. 基于随机并行梯度下降算法的望远镜静态像差校正[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 082201.
- 4 Shi Xiaoyu, Feng Yong, Chen Ying, *et al.*. A novel predictive controller in the adaptive optics control system based on parallelization method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0801005.
史晓雨, 冯勇, 陈颖, 等. 一种基于并行化方法的自适应光学闭环预测控制器[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0801005.
- 5 Yang Huafeng. Study of Wavefront Correction Technique Based on Combinational–Deformable–Mirror for Improving Spatial Compensation Capability of the Adaptive Optics System [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 100–101.
杨华峰. 用于提高自适应光学系统空间校正能力的组合变形镜波前校正技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. 100–101.
- 6 Seifert L, Liesener J, Tiziani H J. The adaptive Shark–Hartmann sensor [J]. *Opt Commun*, 2003, 216(4): 313–319.
- 7 Ding Xinzhi, Guan Chunlin. The finite element method simulation of the deformable mirror's influence function [J]. *Optical Instruments*, 2008, 30(1): 40–41.
丁心志, 官春林. 变形镜面形影响函数的有限元仿真[J]. *光学仪器*, 2008, 30(1): 40–41.
- 8 Shao Junfeng, Zhang Qiang. Adaptive optics in tactical high–energy laser weapons [J]. *OME Information*, 2010, 27(12): 33–34.
邵俊峰, 张强. 战术激光武器中的自适应光学技术[J]. *光机电信息*, 2010, 27(12): 33–34.
- 9 Li Jun. Study of the Adaptive Optic System in Transmission Type, High–Resolution Reconnaissance Camera [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. 67–68.
李俊. 传输型详查相机微小自适应光学系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. 67–68.
- 10 Winsor R, Sivaramakrishnan A, Makidon R B, *et al.*. Finite element analysis of low cost membrane deformable mirrors for high order adaptive optics [C]. *SPIE*, 1999, 3785. 160–167.
- 11 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. 209–210.
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 209–210.
- 12 Roddier N. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials [J]. *Opt Eng*, 1990, 29(10): 1174–1180.
- 13 Hu Zhaohui, Jiang Wenhan. Simulation of optical wavefront distorted by atmospheric turbulence [J]. *Opto–Electronic Engineering*, 1995, 22(2): 51–53.
胡朝晖, 姜文汉. 受大气湍流影响的光学波前模拟[J]. *光电工程*, 1995, 22(2): 51–53.