

文章编号: 1001-4322(2002)01-0053-04

自适应光学系统的实时模式复原算法^{*}

李新阳, 王春鸿, 鲜 浩, 姜文汉

(中国科学院 光电技术研究所 自适应光学研究室, 四川 成都 610209)

摘 要: 分析了自适应光学系统中实时模式复原算法的基本原理, 建立了一种新型的传感器本征模复原算法。与常用的直接斜率法相比, 这种模式复原算法可以有效减小探测噪声对复原计算过程的影响, 提高系统的闭环稳定性和校正效果。在 61 单元自适应光学系统上实现了这种模式复原算法, 并在实际大气湍流中对传感器本征模复原算法和直接斜率法进行了实验对比研究。

关键词: 自适应光学; 模式复原算法; 直接斜率法; 传感器本征模

中图分类号: TN 24 **文献标识码:** A

在自适应光学(AO)系统中, 根据波前探测器的子孔径斜率信号计算倾斜镜和变形镜等波前校正器的驱动电压信号的过程称为波前复原^[1]。常用的波前复原算法有区域法、直接斜率法^[2-4]和模式法等。其中模式法的目的是通过选择不同的模式基底函数, 实现灵活方便的波前校正, 并提高系统在各种复杂工作环境下的校正效果^[5-11]。但从国内外文献报道中发现, 在实际应用中采用模式复原算法的AO系统较少^[9-11]。这主要有以下两个原因: 一是模式复原算法结构复杂、运算量大、调整因素多, 对实际系统的依赖性较强, 具体实现起来不如区域法或直接斜率法等便捷; 二是当系统单元数足够多时, 在大多数情况下用简单复原算法就可以取得满意效果, 对模式复原算法的需要不强烈。即便如此, 对模式复原算法的研究仍然是很有必要的。首先, 这种研究可以加深对自适应光学原理的认识; 其次, 在某些特殊应用场合必须采用模式复原算法; 最后, 也是最重要的一点, 采用模式复原算法有可能提高系统的整体性能。

本文针对 61 单元自适应光学系统^[2], 建立一种合适的波前复原模式基底函数, 分析模式滤波选择的依据和方法, 研究模式复原算法的具体实现问题, 并对各种复原算法的校正效果进行实验比较研究。

1 自适应光学系统与直接斜率法^[2-4]

在采用哈特曼传感器的一类自适应光学系统中, 变形镜驱动器控制电压与哈特曼传感器子孔径斜率间存在一种线性响应关系, 用矩阵形式表示为

$$g = D \cdot V \quad (1)$$

式中: $g = [g^1, g^2, \dots, g^{2m}]^T$ 是子孔径斜率向量, m 是子孔径个数; $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T$ 是变形镜驱动器控制电压向量, n 是驱动器个数; D 是驱动器电压与子孔径斜率间的响应矩阵, 反映AO系统的布局等基本响应关系。直接斜率复原算法就是利用这个响应关系直接从子孔径斜率计算出驱动器控制电压

$$V = D^+ g \quad (2)$$

式中: D^+ 是 D 的伪逆矩阵, 满足关系 $D^+ D = I$ 。直接斜率法只包括一个常数矩阵运算过程, 利用现代高速数字处理技术, 算法可以在极短的时间内完成, 满足AO系统的实时性要求。直接斜率法简单便捷, 对系统依赖性小, 但对工作环境如湍流和噪声强度的变化没有自适应性。

2 实时模式复原算法

2.1 实时模式复原算法的基本原理

大多数的波前像差扰动信号, 如大气湍流引起的动态波前畸变, 主要能量集中在低时间频率和低空

^{*} 收稿日期: 2001-07-02; 修订日期: 2001-10-20

基金项目: 国家 863 激光领域资助课题(863-410-6)

作者简介: 李新阳(1971-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事自适应光学、大气光学等方面的研究工作; E-mail: adopse2@ioe.ac.cn; 成都双流 350 信箱。

间频率部分。而AO系统由于采样时间延迟和有限的探测和校正单元数目,其空间补偿能力和时间抑制能力也都有限。模式复原算法可以使AO系统的时空校正能力与扰动信号的时空特性匹配,得到最优的校正效果。具体地说,就是首先寻找一组合适的模式分解基底函数,对传感器的测量数据进行模式复原;然后按照一定的性能指标,对复原出的模式系列进行优化选择,滤除不需要的模式;最后根据选择结果产生需要的控制电压。在闭环工作状态,系统将只对优选的模式起作用而对其他模式“视而不见”,达到时空校正能力可控的目的。常用的模式基底函数有Zernike模式^[1,7,8,10],K-L模式^[11]和变形镜本征模式^[5,6,9,11]等。下面介绍一种新型的传感器本征模式以及在它基础上构造的传感器本征模复原算法。

2.2 传感器本征模复原算法

在AO系统中,波前传感器的测量噪声对实时波前复原过程影响很大。波前传感器中子孔径斜率的实际测量结果是真实值 g 与测量白噪声 g_n 的迭加

$$g' = g + g_n \quad (3)$$

$$g_n g_n^T = I \sigma_{g_n}^2 \quad (4)$$

上式假设各个子孔径测量噪声的方差相同,其中 $\bar{\quad}$ 表示信号的系综平均。对于(2)式的直接斜率复原算法,无噪声的理想情况下复原出控制电压间的关系为

$$C_V = V V^T = D^+ g g^T D^{+T} \quad (5)$$

有噪声的情况下,复原出的控制电压 $V' = D^+ g'$ 间满足关系

$$C_V' = V' V'^T = C_V + C_{VN} \sigma_{g_n}^2 \quad (6)$$

而 $C_{VN} = D^+ D^{+T}$ 是单位测量噪声引起的复原电压相关矩阵。上式表明,测量噪声会使复原结果中对象彼此相关。比如仅仅需要中心驱动器有响应,但噪声的影响却使所有驱动器都有响应。把噪声引起的复原电压相关矩阵进行正交化处理

$$U_N S_N U_N^T = C_{VN} \quad (7)$$

式中: S_N 是对角矩阵,对角线元素是矩阵 C_{VN} 的特征值按降序排列;特征向量矩阵 U_N 满足条件 $U_N^T = U_N^{-1}$,以及关系 $U_N^T C_{VN} U_N = S_N$ 。利用互相正交的噪声相关矩阵特征向量,把各个驱动器控制电压的线性组合定义为一个新模式序列,称为“传感器本征模式”^[9]。传感器本征模的总阶数与控制电压个数相同,它们之间的关系为

$$h = U_N^T V, \quad \text{或} \quad V = U_N h \quad (8)$$

式中: $h = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$ 为传感器本征模式系数向量。无噪声的理想情况下 $h = U_N^T D^+ g$,且模式间的相关矩阵为 $C_H = h h^T = U_N^T C_V U_N$ 。存在测量噪声的情况下复原出的传感器本征模式系数为 $h' = U_N^T D^+ (g + g_n)$,这时传感器本征模间的相关矩阵为

$$C_H' = h' h'^T = C_H + S_N \quad (9)$$

从上式可见探测噪声对各阶传感器本征模的影响是正交的,并且模式阶数越低,噪声的影响越大。根据以上这两个特点,如果在模式复原算法中剔除那些受噪声影响严重的低阶传感器本征模,可以有效减小测量噪声对模式复原计算的影响,从而提高系统闭环控制的稳定性,改善校正效果。

根据以上的分析,传感器本征模复原算法的一般步骤为:首先从波前传感器子孔径斜率复原出传感器本征模式系数,然后对复原出的模式系数进行模式优化选择,去除 q 个低阶模式。模式选择通过一个对角的权矩阵 W 完成

$$h' = W h, \quad W = \text{diag}(\underbrace{0, 0, \dots, 0}_q, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{n-q}) \quad (10)$$

去除的低阶模式阶数 q 根据实际情况选择。最后再根据模式系数得到控制电压 $V = U_N h'$ 。整个模式复原算法表示为

$$V = D_{HE} g, \quad D_{HE} = U_N W U_N^T D^+ \quad (11)$$

容易证明当 $q=0$ 时,传感器本征模复原算法退化为直接斜率法。

3 实验对比研究

利用 61 单元 AO 系统与一套激光发射、接受望远镜系统配合, 在约 3km 距离上进行实际大气湍流畸变波前校正实验, 对比不同复原算法的校正效果。实验过程为: 在系统开环时改变波前复原算法和控制算法, 然后进行闭环校正。在开环和闭环时分别同时采集哈特曼传感器子孔径斜率数据和信标激光远场图象数据, 采集时间 2~ 4s。其中哈特曼传感器数据用于标定大气相干长度 r_0 , 信标远场长曝光数据用于计算 Strehl 比等指标。复原矩阵和控制参数切换用的时间很短, 一组实验的持续时间 5~ 10min, 在这么短的时间内可以认为大气湍流没有发生明显变化。为了保证对比实验的准确性, 在白天、晚上、不同时间和各种大气条件下重复进行了几次实验。

根据 61 单元自适应光学系统中实测的变形镜驱动器电压与哈特曼子孔径斜率响应特性, 得到各阶传感器本征模式对应的奇异值分布如图 1 所示, 模式总阶数为 60。根据图 1 中奇异值的分布特点, 分别删除 1 个、3 个、6 个低阶模式, 即模式控制阶数 q 取为 1, 3 和 6, 得到几个模式复原矩阵。几种复原矩阵都可以在 61 单元自适应光学系统上稳定闭环。在 99/10/16 和 99/10/19 重复进行了两次实验, 各种复原算法下信标远场长曝光图像的 Strehl 比和峰值等指标的分析结果如表 1 所示。

99/10/16 实验中信标远场长曝光图像的三维显示如图 2 所示。两次实验结果都说明, 删除部分低阶传感器本征模式后, 传感器本征模复原算法的校正效果超过直接斜率法。99/10/16 和 99/10/19 实验中的最优模式控制阶数分别为 54 阶和 57 阶, 最优情况下 Strehl 比指标比直接斜率法分别提高约 25% 和 3%, 光斑的峰值也比直接斜率法有所提高。99/10/16 实验的大气湍流比较强, 哈特曼测量噪声比较严重, 而 99/10/19 实验的大气湍流比较弱。在强弱两种实验场景下, 模式复原算法的闭环校正效果都很好, 这说明算法的适应性较强。

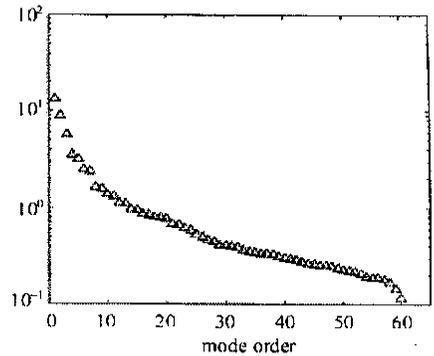


Fig 1 Singular values of the sensor-eigen modes in 61-element AO system

图 1 单元自适应光学系统中各阶传感器本征模对应的奇异值分布

表 1 信标远场长曝光成像的实验结果

Table 1 Experiment results comparing

experiment condition	group 1		group 2	
	Strehl ratio	P_{max} (ADU)	Strehl ratio	P_{max} (ADU)
open-loop	0.0201	4	0.093	43
direct-gradients close-loop	0.0707	18	0.296	193
sensor-eigen $q=1$	0.0865	23	0.297	199
modal algorithms $q=3$	0.0845	23	0.306	192
close-loop $q=6$	0.0885	23	0.291	195
experiment time	99/10/16, 10:50~10:54		99/10/19, 15:42~15:49	
r_0 at 0.82 μ m	4.07		13.74	

4 结论

本文建立了一种新型的传感器本征模复原算法, 用于自适应光学系统的实时波前复原。这种实时模式复原算法可以很容易地在 61 单元自适应光学系统或类似系统上实现。在实际大气湍流中, 把传感器本征模复原算法与常用的直接斜率法进行了实验对比研究。理论分析和实验结果表明, 这种传感器本征模复原算法具有两个主要优点: (1) 算法具有模式选择功能, 可以使自适应光学系统仅仅校正关心的模式, 而对其他模式不加影响。作为对比, 直接斜率法的校正效果是相对固定的, 算法没有模式选择能力; (2) 通过在模式复原算法去除那些可能对系统造成不利影响的低阶模式, 可以使系统的闭环工作更加稳定, 得到比直接斜率法更好的校正效果。本文仅仅介绍了这种新型模式复原算法的具体实现方法和部分实验结果, 要详细了解这种算法的特性和机理, 还需要进一步的深入理论研究, 以及在各种系统上、各种

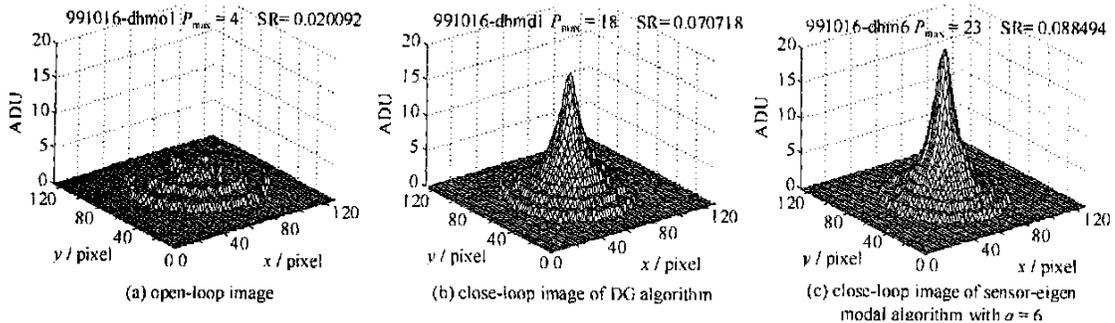


Fig. 2 Comparison of the 3-D graphs of long-time exposal images with different modal reconstruction algorithm in experiment group 99/10/16

图 2 99/10/16 组实验中, 不同复原算法下信标远场长曝光图像的实验结果对比

湍流条件下进行大量的实验研究。

致 谢 感谢中科院安徽光机所的龚知本研究员、王英俭研究员、吴毅研究员、汪超高等老师对实验给予的帮助。

参考文献:

- [1] Tyson R K. Principles of adaptive optics[M]. U S A: Academic Press, 1991.
- [2] 姜文汉, 王春红, 凌 宁, 等. 61 单元自适应光学系统[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 193—199 (Jiang W H, Wang C H, Ling N, et al. 61 elements adaptive optical system. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2): 193—199)
- [3] 李新阳, 王春红, 鲜 浩, 等. 直接斜率波前复原算法的控制效果分析[J]. 光电工程, 1998, 25(12): 9—14 (Li X Y, Wang C H, Xian H, et al. Control effect analysis for a direct-gradient wavefront reconstruction algorithm. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25(12): 9—14)
- [4] 严海星, 张德良, 李树山, 等. 自适应光学系统的数值模拟: 直接斜率控制法[J]. 光学学报, 1997, 17(6): 758—764. (Yan H X, Zhang D L, Li S S, et al. Numerical simulation of an adaptive optics system: direct wavefront gradient control method. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(6): 758—764)
- [5] Gendron E. Modal control optimization in an adaptive optics system. ICO-16 satellite conference on active and adaptive optics 1993 186—191.
- [6] Gaffard J P, Gosselin P, Ledanois G. Adaptive optics: choices and optimizations[A]. Proc SPIE[C]. 1993, 1920: 29—41.
- [7] 李新阳, 姜文汉. 模式波前控制算法研究[A]. 第五届全国激光技术青年学术交流会论文集[C]. 西安, 1999. (Li X Y, Jiang W H. A analysis of wavefront modal reconstruction algorithms. Proceedings of the 5th national colloquium on laser technologies for young researchers. Xi'an, 1999)
- [8] 严海星, 陈 涉, 张德良, 等. 自适应光学系统的模式法数值模拟[J]. 光学学报, 1998, 18(1): 103—108 (Yan H X, Chen S, Zhang D L, et al. Numerical simulation of an adaptive optics system by means of modal wavefront reconstruction. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(1): 103—108)
- [9] 李新阳. 自适应光学系统模式复原算法和控制算法的优化研究[D]. 成都: 中科院光电所, 2000. (Li X Y. Optimization of modal reconstruction algorithms and control algorithms in adaptive optics system. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, CAS, Doctor dissertation, 2000)
- [10] Wirth J, Navetta D, Looze S, et al. Real-time modal control implementation for adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(21): 4586—4597.
- [11] Gendron E, Lena P. Astronomical adaptive optics II. Experimental results of an optimized modal control[J]. *Astronomical Astrophysics Supplement*, 1995, 111: 153—167.

Real-time modal reconstruction algorithm for adaptive optics systems

LIX in-yang, WANG Chun-hong, XIAN Hao, JIANG Wen-han

(Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics,
the Chinese Academy of Sciences. P. O. Box 350, Shuangliu 610209, China)

Abstract The principle of real-time modal reconstruction algorithms used for adaptive optics (AO) systems was introduced. A novel sensor-eigen modal reconstruction algorithm was proposed and analyzed. The sensor-eigen functions were deduced by orthogonalizing the correlation matrix between Hartmann-Shack wave-front sensor and deformable mirror. Compared to the normal direct-gradient reconstruction algorithm, the effect of measurement noise to AO system decreases more easily, the real-time system is more stable and the performances of the whole AO system improves through the modal algorithms. This novel algorithm was applied to a 61-element AO system and the theoretical results were verified by the experimental ones.

Key words: adaptive optics; modal reconstruction algorithm; direct-gradient reconstruction algorithm; the sensor-eigen modes