

# 自适应光学闭环系统实时多路自适应控制算法

颜召军<sup>1,2,3</sup> 李新阳<sup>1,2</sup> 饶长辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 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  
<sup>2</sup> 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209  
<sup>3</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 分析和介绍了自适应光学闭环系统中一种实用的实时多路自适应控制算法。该多路自适应控制算法综合考虑了大气湍流扰动以及自适应光学系统时间延迟对系统控制效果的影响,其各个控制回路的控制参数能根据外界扰动的变化进行实时的迭代调整,从而使系统始终工作在最优控制状态。利用 61 单元自适应光学系统上模拟的大气湍流扰动信号,实现了对变形镜各路控制电压进行闭环优化控制的多路自适应控制算法,并对该算法的收敛性、控制效果、控制带宽进行了仿真研究和分析。仿真结果表明,同经典比例积分控制算法相比,多路自适应控制算法具有更强的自适应性,可以更有效地减少外界扰动对自适应光学系统校正效果的影响,提高自适应光学系统的闭环控制带宽,改善控制特性。

**关键词** 自适应光学;多路自适应控制算法;比例积分控制算法;变形镜控制电压

**中图分类号** O437; TP273.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0301002

## Multi-Channel Adaptive Control Algorithm for Closed-Loop Adaptive Optics System

Yan Zhaojun<sup>1,2,3</sup> Li Xinyang<sup>1,2</sup> Rao Changhui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Laboratory of Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*  
<sup>2</sup> *Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*  
<sup>3</sup> *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** A multi-channel adaptive control algorithm (MACA) that can be put into practice in the closed-loop adaptive optics (AO) system is proposed. MACA, unlike the traditional control algorithm, considers the effect of atmospheric turbulence and the system time delay together with the dynamic characteristics of AO system. The control parameters in each control loop can be modified timely during iterative calculation, which can make the system work at the best control state. Taking a 61-element AO system as an example, based on numerical simulation, MACA is studied to control the voltages of deformable mirror in advance. Analyses are made on convergence, control performance and control bandwidth of this algorithm. Compared with the classical proportional integral (PI) control algorithm, simulation results show that the residual error caused by turbulence in the system is reduced more effectively by using MACA which has good adaptability and improves the closed-loop control bandwidth and control properties of AO system.

**Key words** adaptive optics; multi-channel adaptive control algorithm; proportional integral control algorithm; control voltage of deformable mirror

**OCIS codes** 010.1080; 010.1330; 120.4820; 070.2025

## 1 引言

自适应光学(AO)系统是一种闭环反馈控制系

统<sup>[1~4]</sup>。通过实时地探测和补偿动态波前畸变,自适应光学系统具有适应外界环境变化的能力。自适

收稿日期: 2012-09-07; 收到修改稿日期: 2012-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(60978050)和四川省青年基金(09ZQ026-014)资助课题。

作者简介: 颜召军(1983—),男,博士研究生,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: yzhaojun55@126.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

应光学系统中控制算法的优劣对系统校正效果影响很大,对于一个给定的自适应光学系统来说,系统的性能能否最大限度地发挥,取决于其采用的控制算法。目前的自适应光学系统中通常采用比例积分(PI)等经典控制算法,控制器参数的调整目标是尽量提高系统的校正效果和稳定性,最大限度地发挥系统的校正性能,但是控制器参数的设计与调整需要实际的工作经验和较长的时间。外界环境的不断变化要求对控制器参数进行实时调整从而达到最佳控制效果,但是PI等经典控制算法的控制参数是固定不变的,并没有将系统的校正性能完全发挥,因此经典控制算法的控制效果很不理想。很多学者都对自适应最优控制算法进行了研究<sup>[5~8]</sup>,但是这些方法并不能在实际的大型AO系统中应用。Li等<sup>[9]</sup>提出了一种可在实际系统中应用的实时自适应控制算法。

自适应光学系统是多路控制结构,而目前自适应光学系统中采用的控制算法都是基于各路相同控制参数的算法<sup>[7~9]</sup>,控制效果有限,校正带宽也有限<sup>[10,11]</sup>。虽然采用预测控制算法可以提高校正效果,但是仍然没有从根本上提高系统的校正带宽<sup>[12~21]</sup>,因为限制系统校正带宽的还是系统控制算法的优劣,所以各路相同控制参数的控制算法无法从根本上解决自适应光学系统校正带宽低的问题。本文提出了一种实用的多路自适应控制算法

(MACA),该算法的各路控制参数不同,且可以根据外界扰动进行实时的迭代调整,自适应能力强,从而可以提高自适应光学系统闭环校正带宽,更好地发挥系统的校正性能。

## 2 自适应光学系统多路自适应控制算法

### 2.1 自适应控制系统模型

现代自适应光学系统中,通常采用的哈特曼型或剪切干涉仪型波前传感器,都是通过子孔径斜率的变化反映波前畸变。在系统设计时,通常将变形镜等波前校正器的校正能力与波前探测器的探测能力相匹配。在自适应光学系统能够探测和校正的范围内,可以认为传感器的波前斜率信号和畸变信号是一一对应的。同时又因为两者存在线性关系,所以自适应光学波前校正系统可以简化为波前斜率校正模型<sup>[22]</sup>。本文采用的控制系统的数学模型如图1所示,其中 $g_r$ 为大气湍流扰动波前斜率, $g_e$ 为补偿波前斜率, $g_c$ 为波前斜率残差, $g_n$ 为探测噪声, $g_m$ 为带有探测噪声的波前斜率残差, $V_e$ 是经过波前复原计算的复原电压, $V$ 为复原电压通过控制(CC)运算后的变形镜控制电压, $z_A^{-1}$ 和 $z_B^{-1}$ 分别为系统的探测延时和控制延时(本文中系统总延迟为2个采样周期)。 $R$ 为变形镜到哈特曼传感器的斜率响应矩阵, $R^+$ 是其伪逆矩阵,满足 $R^+R=I$ 。

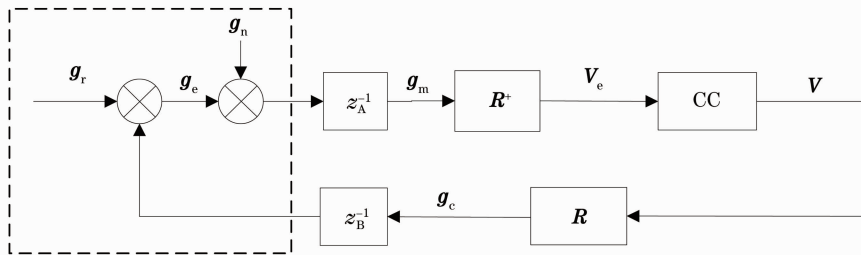


图1 自适应光学系统的多路自适应控制系统模型

Fig. 1 Model of multi-channel adaptive control system in adaptive optics system

以测量波前斜率为基础的波前传感器只能直接测量出各子孔径的波前斜率数据,为了将波前传感器所测量的斜率转化为复原电压,需要采用一定的波前复原算法,这里采用的是直接斜率波前复原算法<sup>[3,8]</sup>:

$$V_e = R^+ g, \quad (1)$$

式中 $g$ 是需要校正的波前像差的斜率测量值。

在实际的自适应光学系统闭环实时运行时,外界输入扰动信号 $g_r$ 是不可知的。为了使仿真更接近实际的AO系统,仿真模型图中左边虚线矩形框

中的信息是未知的。已知的信号是当前时刻以及历史的 $g_m$ 、 $V_e$ 和历史的 $V$ 、 $g_c$ 。

### 2.2 多路自适应控制算法理论推导

PI控制算法是一种在自适应光学系统中广泛应用的经典控制算法,它的设计思想明确,控制器设计简单,只是调整起来比较困难。PI控制算法的表达式为

$$V(k) = a_0 V(k-1) + b_0 V_e(k), \quad (2)$$

式中 $V(k)$ 是 $k$ 时刻的变形镜控制电压, $V_e(k)$ 是 $k$

时刻的复原电压,  $a_0, b_0$  为控制参数, 一般取  $a_0 = 0.99, 0 \leq b_0 < 1$ 。

在文献[7~9]的基础上, 探索一种多路自适应控制算法, 能够用于实时闭环的 AO 系统中, 其核心数学表达式为

$$\mathbf{V}(k) = \sum_{i=1}^q \mathbf{A}_i \mathbf{V}(k-i) + \sum_{j=0}^p \mathbf{B}_j \mathbf{V}_c(k-j), \quad (3)$$

其中  $p, q$  为采用多路自适应控制算法时控制系统的阶数;  $\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_j$  为多维控制系数矩阵, 其维数均为  $60 \times 60$ ;  $\mathbf{V}(k), \mathbf{V}_c(k)$  的含义同其在(2)式中的定义。

由(3)式可知, 当  $q=1, p=0, \mathbf{A}_1 = \alpha \mathbf{I}, \mathbf{B}_0 = \beta \mathbf{I}$  ( $0 < \alpha, \beta < 1$ ) 时, (3)式表达的控制即为经典 PI 控制(有效驱动器个数为 60, 此时的  $\mathbf{I}$  为  $60 \times 60$  的单位矩阵)。

当  $q \geq 1, p \geq 0, \mathbf{A}_1 \neq \alpha \mathbf{I}, \mathbf{B}_0 \neq \beta \mathbf{I}$  时, 上述控制则为需要研究的多路自适应控制。因此本文研究的多路自适应控制算法, 其核心是寻找一种合适的实时迭代算法求解多维控制系数矩阵  $\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_j$ 。

将(3)式右边部分展开后得到

$$\mathbf{V}(k) = (\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_q) \begin{bmatrix} \mathbf{V}(k-1) \\ \mathbf{V}(k-2) \\ \dots \\ \mathbf{V}(k-q) \end{bmatrix} + (\mathbf{B}_0, \mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_p) \begin{bmatrix} \mathbf{V}_c(k) \\ \mathbf{V}_c(k-1) \\ \dots \\ \mathbf{V}_c(k-p) \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{V}_h(k) + \mathbf{B} \mathbf{V}_{ch}(k) = (\mathbf{A}, \mathbf{B}) \begin{bmatrix} \mathbf{V}_h(k) \\ \mathbf{V}_{ch}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{W} \boldsymbol{\phi}(k), \quad (4)$$

则:

$$\mathbf{V}(k) = \mathbf{W} \boldsymbol{\phi}(k), \quad (5)$$

观测数据向量  $\boldsymbol{\phi}$  和未知控制系数矩阵  $\mathbf{W}$  分别为

$$\boldsymbol{\phi}^T(k) = [\mathbf{V}^T(k-1), \dots, \mathbf{V}^T(k-q), \mathbf{V}_c^T(k), \dots, \mathbf{V}_c^T(k-p)], \quad (6)$$

$$\mathbf{W} = [\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_q, \mathbf{B}_0, \mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_p] = \begin{bmatrix} a_{11}^1 & \dots & a_{1n}^1 & a_{11}^2 & \dots & a_{1n}^2 & b_{11}^0 & \dots & b_{1n}^0 & b_{11}^1 & \dots & b_{1n}^1 \\ a_{21}^1 & \dots & a_{2n}^1 & a_{21}^2 & \dots & a_{2n}^2 & b_{21}^0 & \dots & b_{2n}^0 & b_{21}^1 & \dots & b_{2n}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1}^1 & \dots & a_{n1}^m & a_{n1}^2 & \dots & a_{n1}^m & b_{n1}^0 & \dots & b_{n1}^0 & b_{n1}^1 & \dots & b_{n1}^m \end{bmatrix} = [\boldsymbol{\theta}_1 \quad \boldsymbol{\theta}_2 \quad \dots \quad \boldsymbol{\theta}_n]^T. \quad (7)$$

这样, (5)式的各个分量可表示为

$$\mathbf{V}_i(k) = \boldsymbol{\phi}^T(k) \boldsymbol{\theta}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

本文的驱动器个数  $n=60$ 。

设定目标函数:

$$J = \langle \mathbf{g}_m^2(k) \rangle = \langle [\mathbf{g}_r(k-1) - \mathbf{g}_c(k-2)]^2 \rangle + \langle \mathbf{g}_n^2 \rangle, \quad (9)$$

由(9)式可知, 当  $\mathbf{g}_r(k-1) \approx \mathbf{g}_c(k-2)$  时,  $J$  取得极小值。

因此, 需满足:

$$\mathbf{g}_r(k-1) = \mathbf{g}_c(k-2) = \mathbf{R} \mathbf{W} \boldsymbol{\phi}^T(k-2), \quad (10)$$

即

$$\mathbf{g}_n(k-1) = \mathbf{R} \boldsymbol{\phi}^T(k-2) \boldsymbol{\theta}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

也即

$$\mathbf{R}^+ \mathbf{g}_r(k-1) = \boldsymbol{\phi}^T(k-2) \boldsymbol{\theta}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

由于在实际的自适应光学系统闭环实时运行

时, 信号  $\mathbf{g}_r$  是不可知的, 但是  $\mathbf{g}_m(k)$  可实时探测得到, 故可用估计值  $\hat{\mathbf{g}}_r(k-1)$  来代替  $\mathbf{g}_r(k-1)$ :

$$\hat{\mathbf{g}}_r(k-1) = \mathbf{g}_m(k) + \mathbf{g}_c(k-2). \quad (13)$$

(12)式具有典型的最小二乘结构, 因此可以用递推最小二乘算法求解, 最小二乘算法的详细推导过程可参考文献[23]。多路自适应控制算法的迭代过程如下:

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\phi}(k-2)}{\lambda + \boldsymbol{\phi}^T(k-2) \mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\phi}(k-2)}, \quad (14)$$

$$\mathbf{P}(k) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}(k-1) - \mathbf{K}(k) \boldsymbol{\phi}^T(k-2) \mathbf{P}(k-1)], \quad (15)$$

$$\mathbf{W}(k) = \mathbf{W}(k-1) + [\mathbf{R}^+ \hat{\mathbf{g}}_r(k) - \mathbf{W}(k-1) \boldsymbol{\phi}(k-2)] \mathbf{K}^T(k), \quad (16)$$

式中  $\mathbf{K}$  和  $\mathbf{P}$  是迭代算法需要引入的中间量,  $\mathbf{P}(0) = \gamma \mathbf{I}$ ,  $\gamma$  为一个很大的正实数,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。遗忘因子  $\lambda$  一般取 0.99,  $\mathbf{W}(0) = 0$ 。

$$\mathbf{V}(k) = \mathbf{W}(k)\boldsymbol{\phi}(k), \quad (17)$$

$$\mathbf{g}_c(k) = \mathbf{R}\mathbf{V}(k). \quad (18)$$

在求解出矩阵  $\mathbf{W}$  后,可由(17),(18)式得到当前时刻的预测电压  $\mathbf{V}(k)$  以及补偿斜率  $\mathbf{g}_c(k)$ 。[迭代过程中,  $\mathbf{V}_c(k) = \mathbf{R}^+ \mathbf{g}_m(k)$ ]。

### 3 多路自适应控制算法仿真

#### 3.1 仿真模型及控制效果评价指标

采用的负反馈型控制系统的模型如图 1 所示。采用不同控制算法时的闭环控制效果用电压系数来评价:

$$\eta_V = \frac{\langle \sum_{i=1}^{60} \mathbf{V}_{ei}^2 \rangle}{\langle \sum_{j=1}^{60} \mathbf{V}_{ej}^2 \rangle}, \quad (19)$$

式中  $\mathbf{V}_{ei}$  为闭环时第  $i$  个变形镜的控制电压,  $\mathbf{V}_{ej}$  为开环时第  $j$  个变形镜的控制电压。 $\langle \rangle$  表示系统平均。根据定义,  $\eta_V$  在 0~1 之间,理想状态下,  $\eta_V$  应越小越好。

同时,利用开闭环的复原电压残差数据,计算出控制电压残差的功率谱密度(PSD)来评价不同算法的控制带宽和时域校正效果。

#### 3.2 仿真条件

波长为 0.6328  $\mu\text{m}$ ,湍流强度分别为  $C_n^2 = 2 \times$

$10^{-16}$ 、 $5 \times 10^{-16}$ 、 $8 \times 10^{-16}$  及  $1 \times 10^{-15}$ ,光束口径为 0.6 m,每 1000 m 均匀设置 1 个相屏,共 3 个相屏,总的传输距离为 3000 m。采样频率为 1000 Hz,在 0.6 m 口径内的计算网格数为  $128 \times 128$ ,每个子孔径的网格密度约为  $14 \times 13$ 。采用的动态大气湍流像差数据是根据冻结湍流理论,用一种经典的拖动像屏法产生的。X 方向的横向风在每帧 1~9 网格(1~9 grid/frame)之间变化,Y 方向的横向风在 1~6 grid/frame 之间变化。仿真数据总长  $N$  为 2000 frame。系统时间延迟为 2 frame。

### 4 仿真结果分析

#### 4.1 多路自适应控制算法的收敛过程分析

图 2 是在湍流强度  $C_n^2 = 8 \times 10^{-16}$ ,X 方向风速为 6 grid/frame,Y 方向无横向风,信噪比(SNR)为 100 的条件下进行的仿真。图 2(a)~(d)分别是控制系数矩阵  $\mathbf{W}$  中随机选取的 4 个元素的值在进行迭代时随迭代次数的变化情况,横坐标是迭代次数,纵坐标是控制系数值。从图 2 中可以看出,当迭代到 1000 次时,控制系数已基本收敛了。在其他湍流强度、风速和不同信噪比的条件下也对本文的多路自适应控制算法进行了仿真,仿真结果表明该算法都能够很好地收敛。

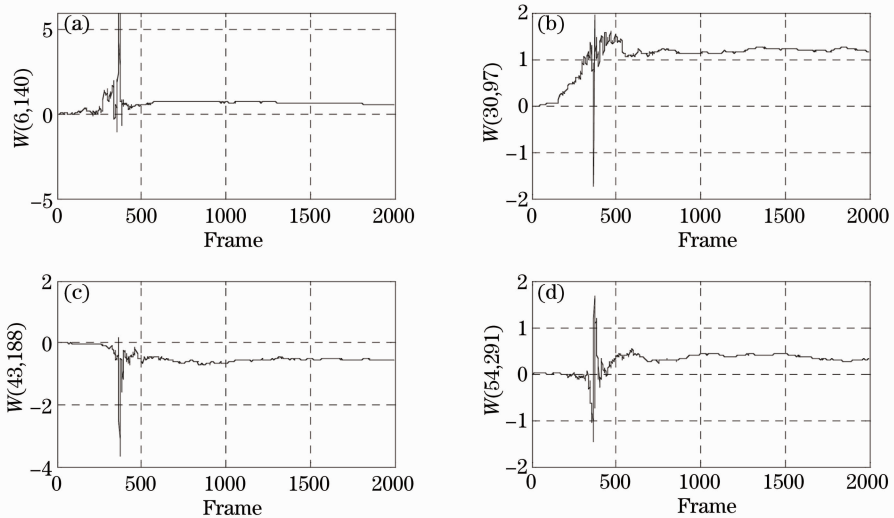


图 2 采用多路自适应控制算法时控制参数迭代变化情况

Fig. 2 Control coefficients vary with iterations using MACA

仿真取  $p=2, q=3$ ,当  $p, q$  继续增大时,控制效果并不能得到较大提高,却会导致计算量的增大,从而影响其收敛速度。

#### 4.2 噪声对多路自适应控制算法校正效果的影响

为了验证多路自适应控制算法在系统有噪声时

是否还有效,在湍流强度  $C_n^2 = 8 \times 10^{-16}$  条件下,仿真过程中加入不同信噪比的白噪声,表 1 是当  $C_n^2 = 8 \times 10^{-16}$ ,X 方向风速为 1~9 grid/frame,Y 方向无横向风时采用多路自适应控制算法时的电压系数  $\eta_V$  值随信噪比变化情况。可以看出,风速一定时,

随着 SNR 的增大,多路自适应控制算法的校正效果逐渐变好。当 SNR 大于等于 100 时,电压系数小于

0.1,说明多路自适应控制算法受噪声干扰的影响较小。

表 1 电压系数随信噪比变化情况

Table 1 Voltage coefficient varies with SNR

Wind velocity /(grid/frame)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	0.0961	0.1189	0.1225	0.1284	0.1248	0.1284	0.1282	0.1179	0.1340
100	0.0509	0.0695	0.0755	0.0756	0.0734	0.0733	0.0740	0.0563	0.0745
400	0.0336	0.0492	0.0570	0.0547	0.0505	0.0530	0.0510	0.0321	0.0541
1000	0.0277	0.0430	0.0509	0.0503	0.0456	0.0473	0.0456	0.0233	0.0461

### 4.3 三种算法的仿真结果对比分析

图 3 是在湍流强度  $C_n^2$  分别为  $2 \times 10^{-16}$ 、 $5 \times 10^{-16}$ 、 $8 \times 10^{-16}$ 、 $1 \times 10^{-15}$ , X 方向风速分别为 1~9 grid/frame, Y 方向无横风向, SNR 为  $10^5$ , 采用 PI 控制算法、预测控制算法<sup>[21]</sup>和多路自适应控制算法时的电压系数值变化情况。可以看到,随着风速的加大,PI 控制算法和预测算法的校正效果逐渐变差。当风速较小,为 1 grid/frame 时,多路自适应控制算法的校正效果与 PI 控制算法的校正效果大致相同。但是随着风速的加大,多路自适应控制算法的校正效果要比其他两种算法的校正效果好。当风速大于 1 grid/frame 时,采用多路自适应控制算法

的校正效果要比采用 PI 控制算法的校正效果提高 70%~90%,比预测控制算法时的校正效果提高 60%~80%。即使在风速达到 8,9 grid/frame 时,多路自适应控制算法仍然有非常好的校正效果。文献[21]中的预测控制算法是在 PI 控制环节之后加入了一个预测器,预测器可以减小时间延迟的影响,因而同经典 PI 控制算法相比可以更好地发挥系统的性能,取得比 PI 控制更好的校正效果。然而,由于预测控制算法中仍然有 PI 环节,而 PI 环节是各路相同固定控制参数的控制,其校正效果会受到 PI 环节校正效果的限制,所以最终的校正效果要比多路自适应控制算法的校正效果差。

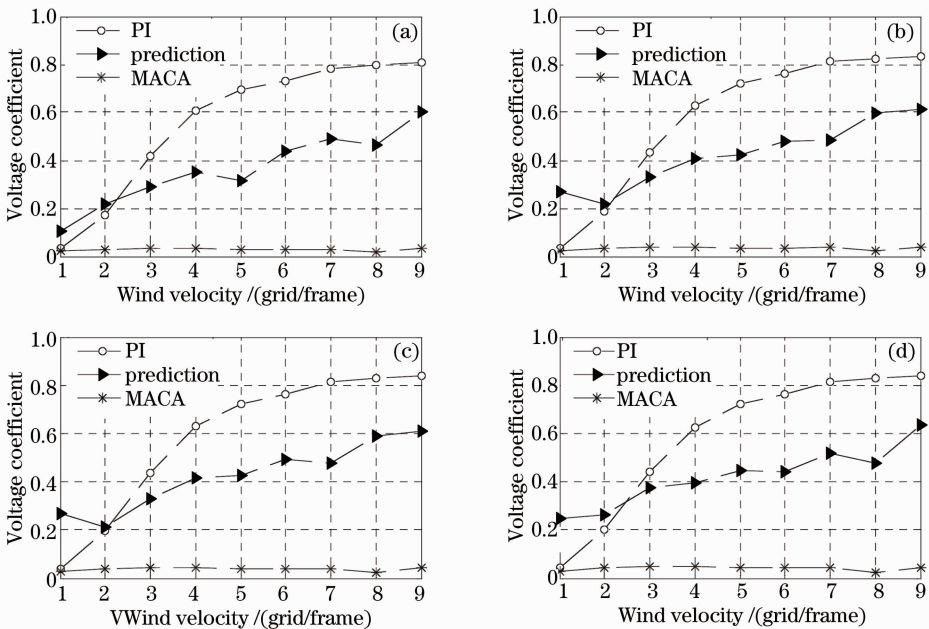


图 3 三种算法的仿真结果对比。(a)  $C_n^2=2 \times 10^{-16}$ ; (b)  $C_n^2=5 \times 10^{-16}$ ; (c)  $C_n^2=8 \times 10^{-16}$ ; (d)  $C_n^2=1 \times 10^{-15}$

Fig. 3 Comparison of simulation results among MACA, PI control and prediction control. (a)  $C_n^2=2 \times 10^{-16}$ ; (b)  $C_n^2=5 \times 10^{-16}$ ; (c)  $C_n^2=8 \times 10^{-16}$ ; (d)  $C_n^2=1 \times 10^{-15}$

以上的仿真是针对单一风速风向和单一湍流强度的大气湍流相位屏而进行的,目的是为了分析和讨论风速大小和湍流强度大小对控制算法校正效果

的影响。本文也对风速风向和湍流强度变化的大气湍流相位屏进行了仿真,表 2 给出了分别采用 PI 控制算法、预测控制算法和多路自适应控制算法闭环

校正后的电压系数仿真结果。从表 2 可以看到,在大气湍流相位屏中风速风向和湍流强度变化的情况

下,采用多路自适应控制算法依然有很好的校正效果,而且比其他两种算法校正效果好。

表 2 一般条件下的  $\eta_V$  值变化情况

Table 2  $\eta_V$  in general conditions

Wind velocity / (grid/frame)	X	2	5	6	3	2	1	5	3	4
$C_n^2$	$1 \times 10^{-15}$	$5 \times 10^{-16}$	$2 \times 10^{-16}$	$2 \times 10^{-16}$	$8 \times 10^{-16}$	$1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-15}$	$8 \times 10^{-16}$	$2 \times 10^{-16}$	
PI			0.7511			0.7954			0.8844	
Prediction			0.5612			0.5297			0.5514	
MACA			0.1234			0.1011			0.1143	

图 4~6 是当湍流强度  $C_n^2 = 8 \times 10^{-16}$ , X 方向风速为 6 grid/frame, Y 方向无横向风时分别采用三种控制算法时复原电压残差开闭环的 PSD 和误差传递函数功率谱。从图 4~6 中可以看到采用多路自适

应控制算法时,系统的误差校正带宽约为 180 Hz; 采用经典 PI 控制算法时,系统的误差校正带宽约为 45 Hz; 采用预测控制算法时,系统的误差校正带宽约为 80 Hz。

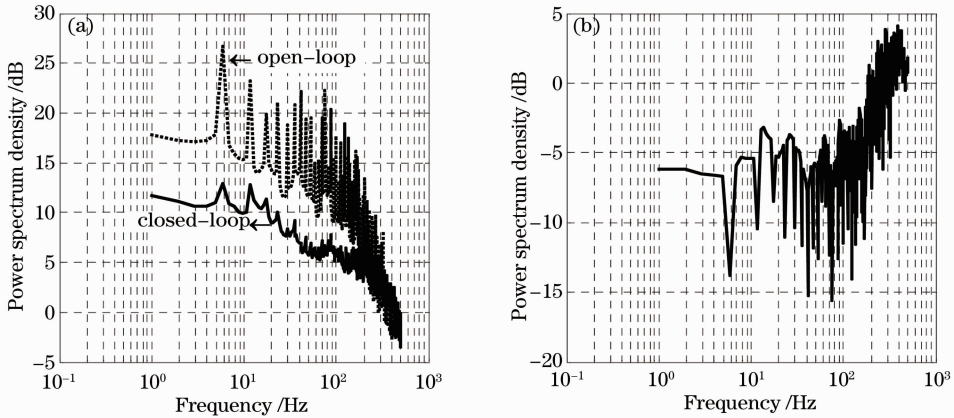


图 4 采用多路自适应控制算法时(a)电压残差开闭环的功率谱密度和(b)误差传递函数功率谱  
Fig. 4 (a) PSD of the voltage residual error and (b) error transfer function using MACA

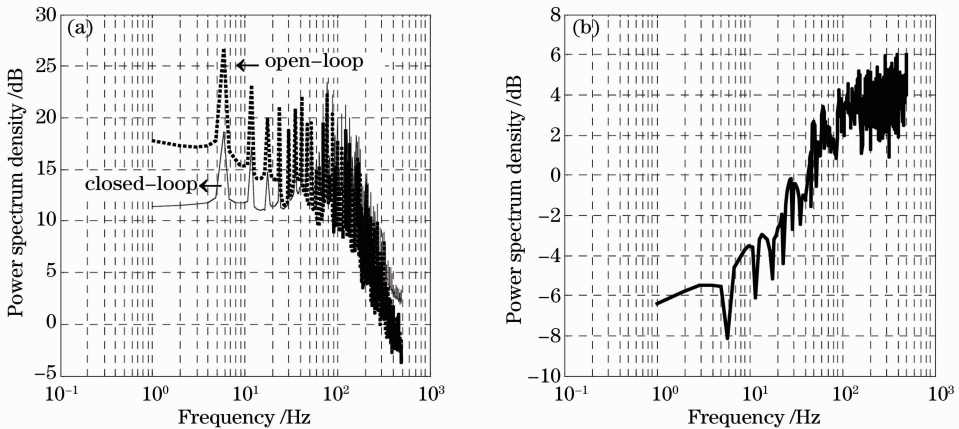


图 5 采用 PI 控制算法时(a)电压残差开闭环的功率谱密度和(b)误差传递函数功率谱  
Fig. 5 (a) PSD of the voltage residual error and (b) error transfer function using PI control algorithm

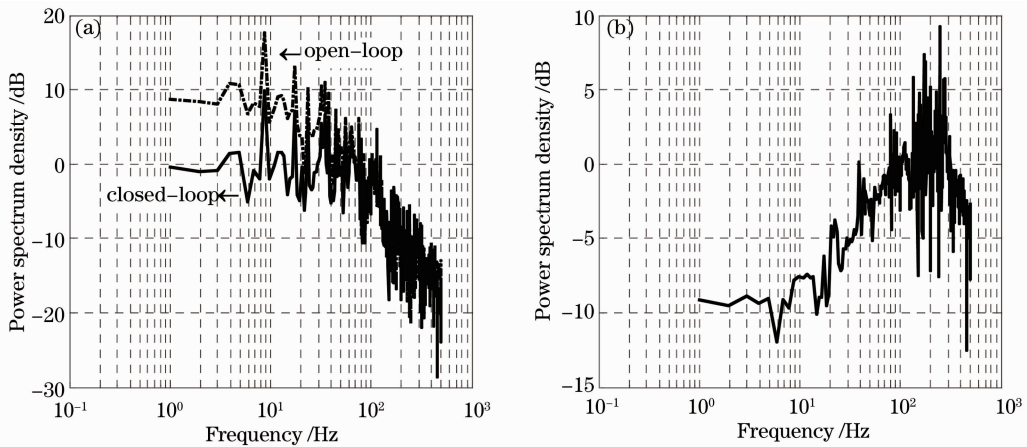


图 6 采用预测控制算法时(a)电压残差开环的功率谱密度和(b)误差传递函数功率谱

Fig. 6 (a) PSD of the voltage residual error and (b) error transfer function using prediction control algorithm

从图 4~6 给出的例子中可以看出,同经典 PI 控制算法和预测控制算法相比较,采用多路自适应控制算法提高了 AO 系统的闭环控制带宽。采用多路自适应控制算法要比 PI 控制算法更显著地降低闭环残差,也就等效于提高了 AO 系统的控制带宽。在多路自适应控制条件下,关于自适应光学系统的控制带宽问题,目前还没有合适的理论解析分析方法和结果。但上述结果已经证明,多路自适应控制算法可以大幅度提高自适应光学系统的控制带宽。

## 5 结 论

本文提出了自适应光学系统中一种实用的闭环多路自适应控制算法,并对自适应光学系统中多路自适应控制算法和经典 PI 控制算法、预测控制算法进行了数值仿真研究。仿真结果表明:当风速较小时,三种控制算法的校正效果差不多。随着风速的加大,经典 PI 控制算法和预测控制算法的校正效果逐渐变差,但是多路自适应控制算法的校正效果受横向风的影响很小,可以更有效地减少自适应光学系统伺服延迟的影响,提高 AO 系统的闭环控制带宽,改善控制特性。多路自适应控制算法适用范围比经典 PI 控制算法的适用范围更广,在风速很大时,经典 PI 控制算法已基本失效,但多路自适应控制算法却依然有好的校正效果。并且该方法受噪声的影响较小。

多路自适应控制算法较经典 PI 控制算法和预测控制算法更能有效地发挥自适应光学系统的性能,获得更好的校正效果。大气湍流实验一般需要在室外进行,由于自适应光学系统的复杂性,实验研究难度大,且需要较长的时间。下一步将针对实际

大气传输中的场景,在更一般的条件下进行多路自适应控制算法有效性的实验验证。如何把这种方法应用到实际的自适应光学系统上,有待进一步探索和研究。

## 参 考 文 献

- 1 R. K. Tyson. Adaptive Optics Engineering Handbook [M]. New York: Marcel Dekker, 2000
- 2 Xinyang Li, Wenhan Jiang. Control bandwidth analysis of an adaptive optical system [C]. SPIE, 1997, **3126**: 447~454
- 3 Wenhan Jiang, Huagui Li. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm [C]. SPIE, 1990, **1271**: 82~93
- 4 M. Demerle, P. Y. Madec, G. Russet. Servo-Loop Analysis for Adaptive Optics, in D. M. Alloin, J. M. Mariotti eds., Adaptive Optics for Astronomy [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994. 73~88
- 5 J. S. Gibson, C. C. Chang, B. L. Ellerbroek. Adaptive optics: wave-front correction by use of adaptive filtering and control [J]. Appl. Opt., 2000, **39**(16): 2525~2538
- 6 B. L. Ellerbroek, T. A. Rhoadarmer. Real-time adaptive optimization of wave-front reconstruction algorithms for closed-loop adaptive-optical systems [C]. SPIE, 1998, **3353**: 1174~1183
- 7 Li Xinyang, Jiang Wenhan, Wang Chunhong et al.. Analysis of an adaptive control algorithm used in an adaptive optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2001, **21**(3): 283~289
- 李新阳, 姜文汉, 王春红等. 自适应光学系统中的自适应控制算法研究[J]. 光学学报, 2001, **21**(3): 283~289
- 8 Meng Lei, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation research on real-time adaptive control of an adaptive optical system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, **28**(6): 1~6
- 孟磊, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统中实时自适应控制的仿真研究[J]. 光电工程, 2001, **28**(6): 1~6
- 9 Xinyang Li, Lei Meng, Wenhan Jiang. Application of real-time adaptive control algorithm in adaptive optics system [C]. SPIE, 2004, **5639**: 115~123
- 10 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system [J]. Acta Optica Sinica, 1997, **17**(12): 1697~1702
- 李新阳, 姜文汉. 自适应光学控制系统的有效带宽分析[J]. 光学学报, 1997, **17**(12): 1697~1702
- 11 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Analysis of the residual servo variance for an adaptive optics system [J]. Acta Optica Sinica,

- 2000, **20**(10): 1328~1334  
李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统的控制残余方差分析[J]. 光学学报, 2000, **20**(10): 1328~1334
- 12 George J. M. Aitken, Deiphine Rossille, Donald R. McGaughey. Predictability of fractional-Brownian-motion wavefront distortions and some implications for closed-loop adaptive optics control [C]. *SPIE*, 1998, **3353**: 1060~1069
- 13 D. Montera, B. Welsh, M. Roggemann *et al.*. Prediction of wave-front sensor measurements with artificial neural network [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3): 675~681
- 14 M. Lloyd-Hart, P. McGuire. Spatio-temporal prediction for adaptive optics wavefront reconstructors [C]. Proceedings of Topical Meeting on Adaptive Optics, 1995. 54~95
- 15 D. Bonaccini, D. Gallieni, R. Giampieretti. Prediction of star wander path for adaptive optics [C]. Proceedings of Topical Meeting on Adaptive Optics, 1995. 54~103
- 16 C. Schwartz, G. Baum, E. Ribak. Turbulence-degraded wave fronts as fractal surfaces [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(1): 444~454
- 17 C. Dessenne, P. Y. Madec, G. Rousset. Modal prediction for closed-loop adaptive optics [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20): 1535~1537
- 18 Yan Zhaojun, Li Xinyang. Neural network prediction algorithm for control voltage of deformable mirror in adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 911~916  
颜召军, 李新阳. 基于神经网络的自适应光学系统变形镜控制电压预测方法 [J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 911~916
- 19 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
- 20 Zhang Xiujuan, Li Xinyang, Zhang Huimin. Prediction algorithm for atmosphere turbulence with control voltage of deformable mirror [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5): 757~760  
张秀娟, 李新阳, 张慧敏. 利用复原电压预测大气湍流畸变波前方法[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(5): 757~760
- 21 Yan Zhaojun, Li Xinyang, Rao Changhui. Numerical simulation of a prediction control algorithm for closed-loop adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0101003  
颜召军, 李新阳, 饶长辉. 一种自适应光学闭环系统预测控制算法的仿真研究 [J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0101003
- 22 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Optimization of slope reconstruction algorithm in adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 756~760  
李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统的最优斜率复原算法 [J]. 光学学报, 2003, **23**(6): 756~760
- 23 Li Qingquan. Theory, Design and Applications of Adaptive Control System [M]. Beijing: Science Press, 1990. 79~99  
李清泉. 自适应控制系统理论、设计与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1990. 79~99

栏目编辑: 王晓琰