

# 嵌套双自适应光学系统的控制特性分析

罗 奇<sup>1,2,3</sup> 李新阳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所, 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** 望远镜等光学系统常常受到大气湍流以及内部像差扰动的影响,常规自适应光学系统被证明是消除外部大气湍流引起的像差的有效手段,然而当存在大幅度的内部像差扰动时,问题变得复杂。提出了一种嵌套双自适应光学系统结构,用内部独立嵌套自适应光学系统校正内部像差扰动,用常规自适应光学系统主要校正外部大气湍流扰动。进一步分析对比了它与常规自适应光学系统的校正能力,数值仿真了当同时存在上述两种像差时二者的校正效果。结果表明,合理设计嵌套双自适应光学系统的工作条件可使得在大多数情形下其校正效果优于常规单自适应光学系统,尤其在内部像差扰动相对较大时更加显著。

**关键词** 大气光学; 自适应光学; 嵌套双自适应光学系统; 性能分析; 大气湍流

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0501002

## Control Performance Analysis of a Double Overlap Adaptive Optics System

Luo Qi<sup>1,2,3</sup> Li Xinyang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

<sup>2</sup>*The 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** Optical systems like telescopes are constantly affected by atmospheric turbulence and internal aberration disturbance. Conventional adaptive optics systems (AOS) are proved to be an effective way to eliminate external aberrations caused by atmospheric turbulence, however, when internal aberrations with high amplitude emerge, the problem becomes complicated. The double overlap AOS structure presented exploits an independent inner channel AOS to correct internal aberration disturbance, and an outer channel AOS mainly external to atmospheric turbulence. Furthermore, the correction abilities of this structure and conventional AOS are analyzed and compared. In addition, their correction performances under the situation where two aforementioned type aberrations simultaneously exist are numerically simulated. Results show that reasonably designed operating conditions of double overlap AOS make the performance better than conventional AOS, especially when internal aberrations become relatively stronger.

**Key words** atmospheric optics; adaptive optics; double overlap adaptive optics; performance analysis; atmospheric turbulence

**OCIS codes** 010.1285; 010.1080; 010.1330

## 1 引 言

自适应光学(AO)最早被成功运用在天文观测领域,是一门用于实时探测和校正由大气湍流引起的波前

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2014-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(61205069)

作者简介: 罗奇(1989—),男,博士研究生,主要从事自适应光学控制技术方面的研究。E-mail: luo7@live.cn

导师简介: 李新阳(1971—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn(通信联系人)

像差的卓越技术<sup>[1]</sup>。除大气湍流外,系统常受到由内部气流运动以及地基震动等因素引起的动态像差(内扰动)的影响。与前者相比,后者通常具有扰动频率低、幅度大等特性<sup>[2]</sup>。

常规 AO 系统采用单个变形镜补偿校正大气湍流以及内扰动引起的波前像差,对这类系统的建模与分析<sup>[3-6]</sup>以及控制算法的设计<sup>[7-11]</sup>等已存在大量的研究。新型 AO 系统常采用多个变形镜以期提高校正能力。其中最具代表性的是多层共轭 AO(MCAO)系统,它利用位于不同海拔高度的波前探测器探测对应高度层的大气湍流,并用多个与各层共轭的变形镜进行补偿校正<sup>[12]</sup>,Petit 等<sup>[13-14]</sup>对这类系统进行了系统建模以及优化控制器的设计工作。另一种多变形镜系统采用 Woofer-Tweeter (W-T)结构,它用一个波前传感器(WFS)进行波前探测,然后采用空间解耦算法<sup>[15-16]</sup>分离低阶和高阶像差,并利用时域分离控制器控制一个高行程变形镜(Woofer)和一个高分辨率变形镜(Tweeter)分别进行校正<sup>[17-18]</sup>。总的来说,较之与常规 AO 系统,多变形镜结构系统复杂性的增加主要是为了用具有不同校正能力的变形镜去对付大气湍流引起的具有不同特性的波前像差,但对内扰动的影响缺乏针对性的设计与分析。付承毓等<sup>[19-21]</sup>对光电经纬仪的研究结果表明,多回路复合轴控制能提高系统对内扰动的抑制能力。然而,在他们的方法中,用于克服内扰动的粗跟踪回路并没有采用 AO 系统。事实上,对采用多套 AO 系统协同工作以消除内扰动和大气湍流影响的情形没有文献分析。本文提出一种不同于 MCAO 以及 W-T 结构的嵌套双 AO 系统,用内部独立嵌套 AO 系统校正内部像差扰动,用常规 AO 系统主要校正外部大气湍流扰动,并研究了其控制特性和校正效果。

## 2 嵌套双 AO 系统与常规 AO 系统的对比

### 2.1 常规 AO 系统控制原理

以广泛运用于天文观测中的 AO 系统为例,常规 AO 系统的各主要部件以及组成结构如图 1 所示。受外部大气湍流  $r_{\text{atm}}$  影响的自然导星的光波进入望远镜系统后,通过反射镜 M1 进入内部 AO 系统,中途又受到内扰动  $r_{\text{in}}$  影响,经过变形镜(DM)校正后,一部分能量透过分光镜(BS)进入 WFS,另一部分能量经 BS 反射后到达科研相机(SciCam)成像。控制器利用 WFS 的测量数据进行波前复原并采用一定的控制算法实时计算变形镜的控制信号,以调整 DM 面形,形成闭环反馈控制,从而实时地消除由内扰动和大气湍流引起的波前像差,得到目标导星清晰的像。图 2(a)、(b)分别给出了系统详细和简化的控制结构框图。其中,  $r$  为扰动  $r_{\text{atm}}$  和  $r_{\text{in}}$  之和,表示系统总的像差扰动,  $n$  为 WFS 的测量噪声,  $y$  为系统的补偿量,  $e$  为校正后的残余信号。延时模块表示伺服延迟,传递函数为  $L(s)$ ,  $s$  为拉普拉斯算子。数字控制器的传递函数为  $C(z)$ ,  $z$  为 Z 变换算子。零阶保持器(ZOH)和 WFS 的传递函数分别为  $D(s)$  和  $W(s)$ , ZOH 模拟 DM 的形变动作并将离散信号转换为连续信号。

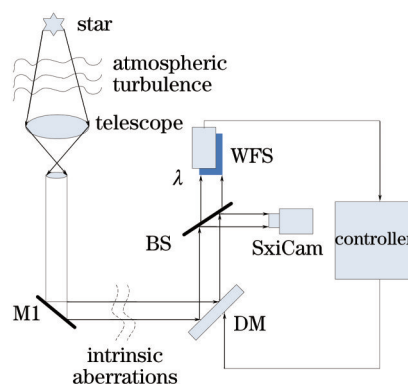


图 1 常规 AO 系统的原理图

Fig.1 Principle diagram of a conventional AO system

图 2 所示的常规 AO 系统中各组件的传递函数分别为

$$W(s) = \frac{1 - \exp(-Ts)}{Ts}, \quad (1)$$

$$L(s) = \exp(-\tau s), \quad (2)$$

$$C(z) = \frac{g}{1 - z^{-1}} |_{z = \exp(Ts)}, \quad (3)$$

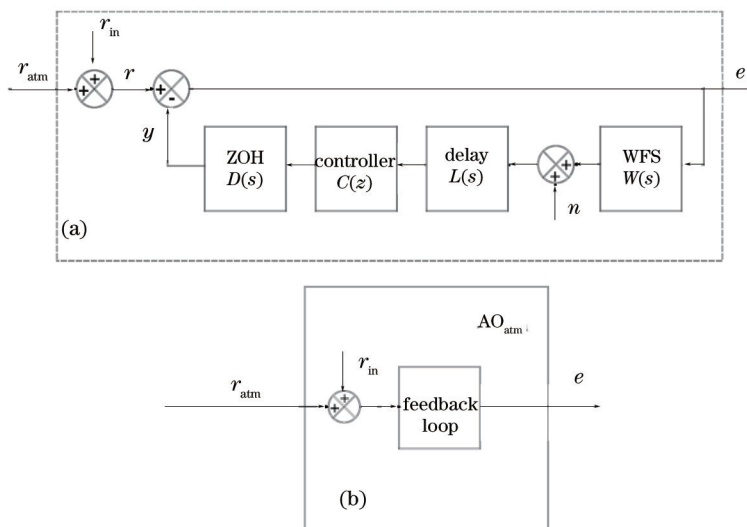


图2 常规 AO 系统的控制结构框图。(a)详细框图;(b)简化框图

Fig.2 Control structure block diagram of a conventional AO system. (a) Detailed diagram; (b) simplified diagram

$$D(s) = \frac{1 - \exp(-Ts)}{Ts}, \quad (4)$$

式中  $T$ 、 $\tau$  分别为采样时间和时间延迟,  $g$  为控制器的增益系数。系统开环传递函数为

$$G(s) = W(s)L(s)C(z)D(s). \quad (5)$$

由(1)~(5)式, 并利用  $\frac{1 - \exp(-Ts)}{Ts} \approx \exp(-\frac{T}{2}s)$  的关系, 容易得到相位裕量  $\gamma$  与  $g$  的关系为

$$g = \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)T}{\frac{T}{2} + \tau}. \quad (6)$$

由图 2(a)容易得出, 残余信号  $e$  的表达式为

$$e = \frac{1}{1+G}r - \frac{LCD}{1+G}n. \quad (7)$$

一般地, 功率谱抑制函数为

$$S_{\text{atm}}(f) = \frac{1}{1+G}, \quad (8)$$

噪声传递函数为

$$N_{\text{atm}}(f) = \frac{LCD}{1+G}, \quad (9)$$

则  $e$  的方差可表示为

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \{ |S_{\text{atm}}(f)|^2 [\gamma_{\text{in}}(f) + \gamma_{\text{atm}}(f)] + |N_{\text{atm}}(f)|^2 \gamma_n(f) \} df, \quad (10)$$

式中  $f$  为频率,  $\gamma_{\text{in}}$  和  $\gamma_{\text{atm}}$  分别为  $r_{\text{in}}$  和  $r_{\text{atm}}$  的功率谱密度函数。

## 2.2 嵌套双 AO 系统的结构与控制原理

本文提出的嵌套双 AO 系统由一套主要校正内扰动的内通道 AO 以及另一套主要用于校正大气湍流的外通道 AO 组成, 两个通道的工作波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 且  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ , 两者相互独立工作, 其原理如图 3 所示。内通道 AO 主要包括激光信标、DM1、WFS1 和控制器 1, 外通道 AO 主要包括导星、DM2、WFS2 和控制器 2。激光信标位于望远镜与 AO 系统之间, 其光束透过分光镜 BS1 进入内部 AO 系统, 同时也会受到内部像差扰动的影响, 经 DM1 校正后透过分色片 BS2 达到 WFS1, 由于 BS2 不反射激光信标, 则内扰动信息只被 WFS1 探测到, 从而只有 DM1 对  $r_{\text{in}}$  进行校正。若没有内通道 AO,  $r_{\text{in}}$  将由外通道 AO 一并校正; 当两个通道同时工作时, 内通道 AO 校正后的残余信号同  $r_{\text{atm}}$  一起进入外通道 AO 进行二次校正, 形成嵌套结构。

根据上述原理, 建立嵌套双 AO 系统的控制结构框图如图 4 所示。由于两个 AO 通道具有相似性, 将外



给出两通道信噪比间的差异,设外通道噪声  $n$ ,内通道噪声  $n_1$ ,定义信噪比为信号与噪声的标准差之比,内通道和外通道信噪比分别为  $I_{\text{SNR}} = \frac{\sigma_{r_{\text{in}}}}{\sigma_{n_1}}$ ,  $O_{\text{SNR}} = \frac{\sigma_{r_{\text{atm}}}}{\sigma_n}$ ,其中  $\sigma_{r_{\text{in}}}$  和  $\sigma_{r_{\text{atm}}}$  分别为  $r_{\text{in}}$  和  $r_{\text{atm}}$  的标准差,  $\sigma_{n_1}$  和  $\sigma_n$  分别为  $n_1$  和  $n$  的标准差。一般地,因为信标光的亮度很强,则内通道的信噪比很高 ( $I_{\text{SNR}} \geq 50$ );而观测目标的亮度一般会很低,造成外通道的信噪比较低 ( $O_{\text{SNR}} \leq 10$ ),且会随着采样频率的提高而降低。

### 2.3 各传递函数的 Bode 图分析

系统总的残差与各传递函数的特性密切相关。假设系统时间延迟  $\tau = 2T$ ,采用不同的控制参数,由(8)、(9)、(13)、(14)式得到各传递函数的 Bode 图如图 5 所示。对比图 5(a)、(b)发现,在同样控制增益下,嵌套双 AO 系统对  $r_{\text{in}}$  抑制作用约为常规 AO 系统的两倍,以  $g = 0.35$  为例,前者为每 10 倍频 30 dB,后者约为每 10 倍频 15 dB,并且前者对低频部分抑制能力明显较强。从图 5(c)看出,采用嵌套结构后,  $n_1$  的噪声传递函数相当于带通形式,而不再是图 5(d)所示的低通形式,很明显,系统对内通道 AO 引入的额外噪声  $n_1$  的抑制作用也比常规 AO 系统强。综上所述可以推知,若系统同时存在扰动  $r_{\text{in}}$  和  $r_{\text{atm}}$  时,嵌套双 AO 系统的校正效果应该优于常规 AO 系统。

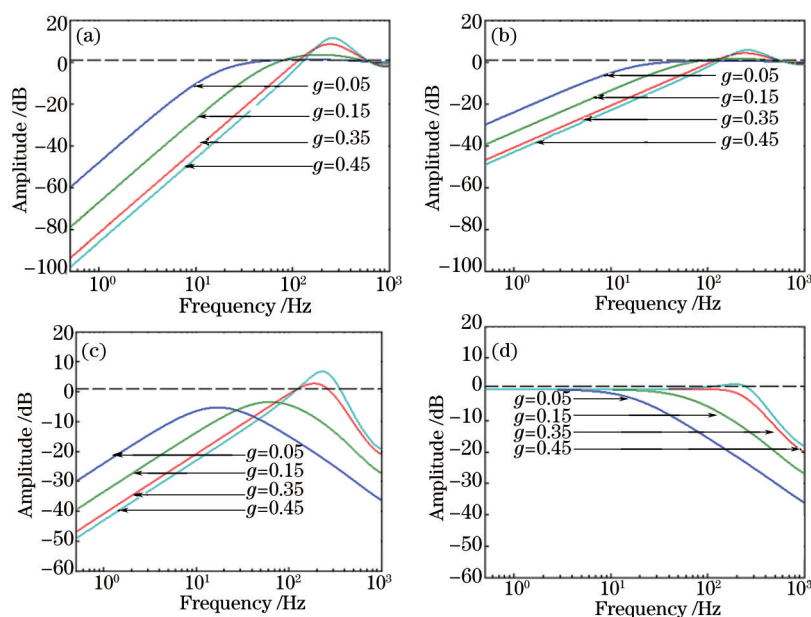


图 5 传递函数  $\delta_{\text{in}}(f)$ 、 $\delta_{\text{atm}}(f)$ 、 $N_{\text{in}}(f)$  和  $N_{\text{atm}}(f)$  在不同控制参数下的 Bode 图。(a)  $\delta_{\text{in}}(f)$ ; (b)  $\delta_{\text{atm}}(f)$ ; (c)  $N_{\text{in}}(f)$ ; (d)  $N_{\text{atm}}(f)$

Fig.5 Bode plots of transfer functions:  $\delta_{\text{in}}(f)$ 、 $\delta_{\text{atm}}(f)$ 、 $N_{\text{in}}(f)$  and  $N_{\text{atm}}(f)$  with various control parameters.

(a)  $\delta_{\text{in}}(f)$ ; (b)  $\delta_{\text{atm}}(f)$ ; (c)  $N_{\text{in}}(f)$ ; (d)  $N_{\text{atm}}(f)$

## 3 仿真与结果讨论

### 3.1 大气湍流以及内部像差扰动的仿真

在 Kolmogorov 湍流条件下,根据 Greenwood<sup>[22]</sup>的分析结果,去除整体倾斜后大气湍流相位扰动的时间功率谱  $\gamma_{\text{atm}}(f)$  在低频段服从 4/3 次方规律,高频段则随频率的 -8/3 次方下降:

$$\gamma_{\text{atm}}(f) = \begin{cases} 0.132 \sec(\xi) k_0^2 D^4 \mu_0^{\frac{12}{5}} v_{5/3}^{-\frac{7}{5}} f^{\frac{4}{3}}, & f \leq 0.705 D^{-1} \mu_0^{-\frac{3}{5}} v_{5/3}^{\frac{3}{5}}, \\ 0.0326 \sec(\xi) k_0^2 v_{5/3} f^{-\frac{8}{3}}, & f \geq 0.705 D^{-1} \mu_0^{-\frac{3}{5}} v_{5/3}^{\frac{3}{5}}, \end{cases} \quad (16)$$

式中功率谱的单位是  $\text{rad}^2/\text{Hz}$ ,  $\xi$  为天顶角,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长,  $C_n^2(h)$  表示折射率结构常数随海拔高度  $h$  的变化,  $\mu_n = \int dh C_n^2(h) h^n$ ,  $v_n = \int dh C_n^2(h) v^n(h)$ ,  $v(h)$  表示风速随  $h$  的变化关系,  $f$  是时间频率,  $D$  为观测孔径。由功率谱可计算大气湍流的特性参数,包括 Fried 常数  $r_0$ , Greenwood 频率  $f_c$ ,且可反演出对应的时域信号<sup>[23]</sup>。

通常情况下,内扰动  $r_{\text{in}}$  具有幅度大、频率低的特点,能量主要集中在 10 Hz 以下。定义  $\beta = \sigma_{\text{in}}^2 / \sigma_{\text{atm}}^2$  为内扰动和外扰动的方差之比,表示内扰动与大气湍流相对强度大小。考虑用一个均值为零,方差为 1 的高斯白

噪声  $\omega$  通过一个通带截止频率为  $f_0$ , 阻带起始频率 20 Hz, 阻带衰减大于 80 dB 的巴特沃斯低通滤波器产生随机一个信号, 在将其放大  $\sqrt{\beta}$  倍得到符合相对强度大小的  $r_{in}$ 。假设  $r_{in}$  和  $r_{atm}$  不相关。图 6 给出了  $\beta = 10$ 、 $f_0 = 5$  Hz、 $D/r_0 \approx 8.6$  且  $f_c = 165.8$  Hz 时, 二者的功率谱, 以及对应的时域信号波形。

### 3.2 控制效果仿真与结果讨论

嵌套双 AO 系统在不同工作方式下, 内、外通道的采样频率  $F_{s1}$ 、 $F_{s2}$  可以不同。假设系统时间延迟  $\tau = 2T$ 。控制器增益系数均设置为  $g = 0.3421$ , 由(6)式可知此时系统相位裕量等于  $60^\circ$ , 可保证系统的充分稳定。为探索它在不同扰动条件下的校正效果, 并与常规 AO 系统进行比较, 将后者的噪声功率设为前者两个通道噪声功率之和, 且其采样频率  $F_s$  与  $F_{s2}$  相等。大气湍流 Fried 常数  $r_0 = 5.2$  cm, Greenwood 频率  $F_c = 165.8$  Hz。探测噪声假设为均值为零的高斯白噪声。 $I_{SNR} = 200$ , 当  $F_{s2} = 1000$  Hz 时,  $O_{SNR} = 3$ ; 当  $F_{s2} = 500$  Hz 时,  $O_{SNR} = 6$ 。

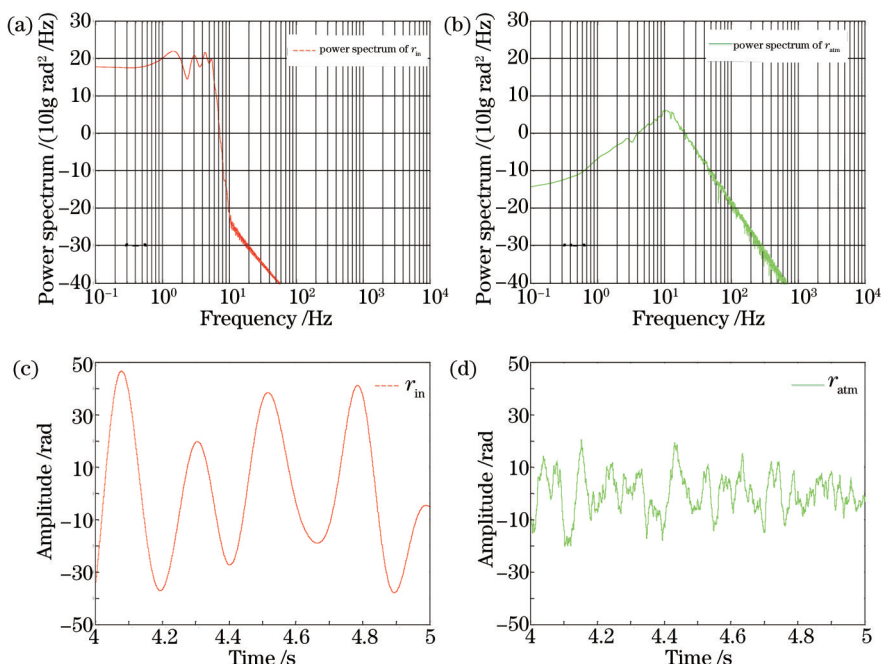


图 6  $r_{in}$  和  $r_{atm}$  的功率谱及时域波形。(a)  $r_{in}$  的功率谱; (b)  $r_{atm}$  的功率谱; (c)  $r_{in}$  的时域波形; (d) 对应的时域波形

Fig.6 Power spectrum and time domain wave shape of  $r_{in}$  and  $r_{atm}$ . (a)  $r_{in}$ 's power spectrum; (b)  $r_{atm}$ 's power spectrum; (c)  $r_{in}$ 's wave shape; (d)  $r_{atm}$ 's wave shape

对每种工作方式仿真 20 次, 每次仿真采用预设的大气湍流以及内扰动功率谱的不同的时间序列  $r_{in}$ 、 $r_{atm}$ , 仿真时间 10 s, 计算每次仿真常规 AO 系统以及嵌套双 AO 系统控制残余信号的方差, 并用  $r_{in}$  和  $r_{atm}$  的方差之和进行归一化, 再求出 20 次仿真得出归一化方差的平均值  $\sigma_{s1}^2$  和  $\sigma_{dl}^2$ 。定义  $\eta = \frac{\sigma_{dl}^2 - \sigma_{s1}^2}{\sigma_{s1}^2}$ ,  $\eta$  为负值表示嵌套双 AO 系统相对常规 AO 系统能获得收益, 反之, 无收益。表 1~5 给出了不同工作方式下, 两种不同结构的系统在不同扰动条件下校正效果的对比。

表 1  $F_{s1} = 200$  Hz,  $F_{s2} = 500$  Hz,  $F_s = 500$  Hz, 常规 AO 与嵌套双 AO 校正效果比较

Table 1  $F_{s1} = 200$  Hz,  $F_{s2} = 500$  Hz,  $F_s = 500$  Hz, correction performance comparison between a conventional AO system and a double overlap AO system

$\beta$	$f_0$ /Hz	$\sigma_{s1}^2$ /rad <sup>2</sup>	$\sigma_{dl}^2$ /rad <sup>2</sup>	$\eta$ /%
0.1	1	0.4459	0.4442	-0.38
	2	0.4440	0.4428	-0.27
	5	0.4442	0.4427	-0.34
	10	0.4491	0.4463	-0.62

$\beta$	$f_0/\text{Hz}$	$\sigma_{\text{in}}^2/\text{rad}^2$	$\sigma_{\text{out}}^2/\text{rad}^2$	$\eta/\%$
1	1	0.2444	0.2442	-0.08
	2	0.2470	0.2446	-0.97
	5	0.25510	0.2478	-2.86
	10	0.2729	0.2637	-3.37
10	1	0.0468	0.0449	-4.06
	2	0.0496	0.0449	-9.48
	5	0.0620	0.0490	-20.97
	10	0.0931	0.0754	-19.01

表 2  $F_{s1}=500\text{ Hz}$ ,  $F_{s2}=500\text{ Hz}$ ,  $F_s=500\text{ Hz}$ , 常规 AO 与嵌套双 AO 校正效果比较

Table 2  $F_{s1}=500\text{ Hz}$ ,  $F_{s2}=500\text{ Hz}$ ,  $F_s=500\text{ Hz}$ , correction performance comparison between a conventional AO system and a double overlap AO system

$\beta$	$f_0/\text{Hz}$	$\sigma_{\text{in}}^2/\text{rad}^2$	$\sigma_{\text{out}}^2/\text{rad}^2$	$\eta/\%$
0.1	1	0.4476	0.4464	-0.27
	2	0.4445	0.4452	0.16
	5	0.4475	0.4448	-0.60
	10	0.4496	0.4451	-1.00
1	1	0.2450	0.2436	-0.57
	2	0.2495	0.2473	-0.88
	5	0.2559	0.2469	-3.52
	10	0.2719	0.2478	-8.86
10	1	0.0468	0.0446	-4.70
	2	0.0495	0.0446	-9.90
	5	0.0626	0.0454	-27.48
	10	0.0937	0.0496	-47.07

表 3  $F_{s1}=1000\text{ Hz}$ ,  $F_{s2}=500\text{ Hz}$ ,  $F_s=500\text{ Hz}$ , 常规 AO 与嵌套双 AO 校正效果比较

Table 3  $F_{s1}=1000\text{ Hz}$ ,  $F_{s2}=500\text{ Hz}$ ,  $F_s=500\text{ Hz}$ , correction performance comparison between a conventional AO system and a double overlap AO system

$\beta$	$f_0/\text{Hz}$	$\sigma_{\text{in}}^2/\text{rad}^2$	$\sigma_{\text{out}}^2/\text{rad}^2$	$\eta/\%$
0.1	1	0.4464	0.4453	-0.25
	2	0.4441	0.4440	-0.02
	5	0.4472	0.4473	0.02
	10	0.4504	0.4464	-0.89
1	1	0.2463	0.2455	-0.32
	2	0.2483	0.2459	-0.97
	5	0.2531	0.2429	-4.03
	10	0.2709	0.2445	-9.75
10	1	0.0470	0.0445	-5.32
	2	0.0497	0.0443	-10.87
	5	0.0627	0.0446	-28.87
	10	0.0928	0.0452	-51.29

表 4  $F_{s1}=2000$  Hz,  $F_{s2}=500$  Hz,  $F_s=500$  Hz, 常规 AO 与嵌套双 AO 校正效果比较

Table 4  $F_{s1}=2000$  Hz,  $F_{s2}=500$  Hz,  $F_s=500$  Hz, correction performance comparison between a conventional AO system and a double overlap AO system

$\beta$	$f_0$ /Hz	$\sigma_{s1}^2$ / rad <sup>2</sup>	$\sigma_{d1}^2$ / rad <sup>2</sup>	$\eta$ /%
0.1	1	0.4437	0.4430	-0.16
	2	0.4442	0.4441	-0.02
	5	0.4460	0.4449	-0.25
	10	0.4471	0.4424	-1.05
1	1	0.2452	0.2438	-0.57
	2	0.2488	0.2459	-1.17
	5	0.2539	0.2444	-3.74
	10	0.2691	0.2412	-10.37
10	1	0.0466	0.0444	-4.72
	2	0.0495	0.0445	-10.10
	5	0.0621	0.0443	-28.66
	10	0.0929	0.0447	-51.88

表 5  $F_{s1}=500$  Hz,  $F_{s2}=1000$  Hz,  $F_s=1000$  Hz, 常规 AO 与嵌套双 AO 校正效果比较

Table 5  $F_{s1}=500$  Hz,  $F_{s2}=1000$  Hz,  $F_s=1000$  Hz, correction performance comparison between a conventional AO system and a double overlap AO system

$\beta$	$f_0$ /Hz	$\sigma_{s1}^2$ / rad <sup>2</sup>	$\sigma_{d1}^2$ / rad <sup>2</sup>	$\eta$ /%
0.1	1	0.2017	0.2013	-0.20
	2	0.2018	0.2008	-0.50
	5	0.2008	0.2016	0.40
	10	0.2029	0.2023	-0.30
1	1	0.1106	0.1106	0.00
	2	0.1108	0.1095	-1.17
	5	0.1125	0.1107	-1.60
	10	0.1170	0.1105	-5.56
10	1	0.0207	0.0201	-2.90
	2	0.0214	0.0202	-5.61
	5	0.0247	0.0205	-17.00
	10	0.0326	0.0215	-34.05

总体上看,在大多数扰动条件下,不同工作方式下的嵌套双 AO 系统归一化校正残差比常规 AO 系统的要小。然而,嵌套双 AO 系统收益大小,与  $\beta$  值、 $f_0$  以及系统工作方式密切相关。具体来讲,当内扰动  $r_{in}$  的强度较弱( $\beta=0.1$ ),或强度中等但频率较低( $\beta=1, f_0 < 10$  Hz)时,嵌套双 AO 系统几乎无收益。若  $r_{in}$  强度中等,且频率较高( $f_0=10$  Hz)时,收益约 10%。当内扰动较强( $\beta=10$ )时,嵌套双 AO 系统收益较明显,图 7 给出了当  $\beta=10$ ,  $F_{s2}=500$  Hz 时,收益大小与  $F_{s1}$  和  $F_0$  的关系。从图 7 可看出,此种情形下,  $r_{in}$  变化越剧烈,即  $f_0$  越高,收益越大,最高能达到 50%左右,但当  $F_{s1} > 500$  Hz 时,继续提高  $F_{s1}$  对进一步降低校正残差和提高收益无明显作用。

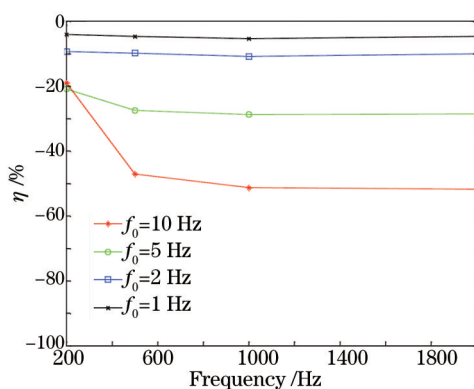


图 7 当  $\beta=10$ ,  $F_{s2}=500$  Hz 时,收益大小与  $F_{s1}$  和  $f_0$  的关系

Fig.7 Profits versus  $F_{s1}$  and  $f_0$  under  $\beta=10$ ,  $F_{s2}=500$  Hz



对比表1~4与表5的数据可以发现,当 $F_{s1}=500\text{ Hz}$ , $F_{s2}=1000\text{ Hz}$ 时,嵌套双AO系统在不同扰动条件下的归一化校正残差比表1~4所述工作方式在相应情形下的要小,这说明,在内通道信噪比很高的条件下,提高外通道采样频率对降低校正残差作用明显。

以 $\beta=10$ , $f_0=10$ 为例,图8给出了两种结构校正残余信号的时域波形。直观上看,嵌套双AO系统比常规AO系统残差小。这与上述讨论结果相符合。下面以该情形为例,结合功率谱以及2.3节的讨论作简要分析。图9给出了嵌套双AO系统以及常规AO系统校正后残余信号功率谱以及开环功率谱。由2.3节的结果可知,嵌套双AO系统对内扰动的校正能力为常规AO系统的两倍,所以在图9(a)~(c)的低频段,前者校正残余信号功率谱在后者的以下。用残余信号功率谱与开环功率谱交点表示系统的校正带宽,图9(a)、(b)中带宽均约为25 Hz,且两者中嵌套双AO系统校正残余信号功率谱无明显差异,而图9(c)中的带宽约为35 Hz。这说明图9(c)所述的工作方式对扰动的抑制能力更强,所以残差更小。

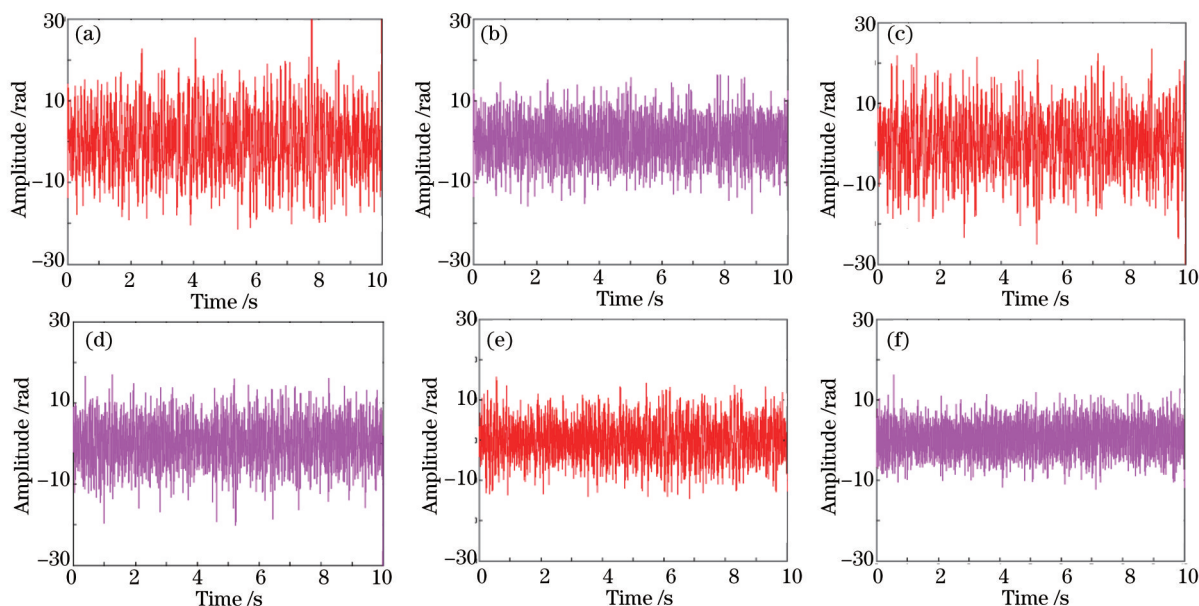


图8 嵌套双AO系统与常规AO系统的残余信号。(a)  $F_s = 500\text{ Hz}$ ; (b)  $F_{s1} = 2000\text{ Hz}$ ,  $F_{s2} = 500\text{ Hz}$ ; (c)  $F_s = 500\text{ Hz}$ ; (d)  $F_{s1} = F_{s2} = 500\text{ Hz}$ ; (e)  $F_s = 1000\text{ Hz}$ ; (f)  $F_{s1} = 500\text{ Hz}$ ,  $F_{s2} = 1000\text{ Hz}$

Fig.8 Residual signals of an double overlap AO (system) and a conventional AO (system). (a)  $F_{s2} = 500\text{ Hz}$ ; (b)  $F_{s1} = 2000\text{ Hz}$ ,  $F_{s2} = 500\text{ Hz}$ ; (c)  $F_s = 500\text{ Hz}$ ; (d)  $F_{s1} = F_{s2} = 500\text{ Hz}$ ; (e)  $F_s = 1000\text{ Hz}$ ; (f)  $F_{s1} = 500\text{ Hz}$ ,  $F_{s2} = 1000\text{ Hz}$

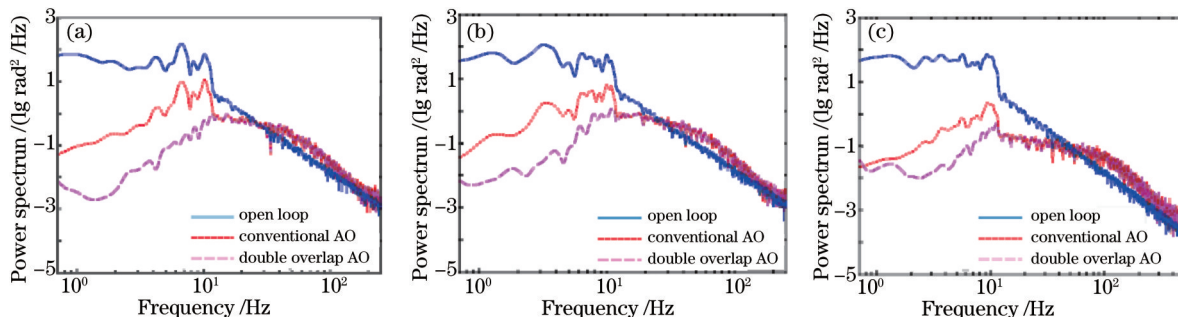


图9 开环功率谱以及嵌套双AO系统与常规AO系统校正残差的功率谱。

(a)  $F_{s1} = 2000\text{ Hz}$ ,  $F_{s2} = F_s = 500\text{ Hz}$ ; (b)  $F_{s1} = F_{s2} = F_s = 500\text{ Hz}$ ; (c)  $F_{s1} = 500\text{ Hz}$ ,  $F_{s2} = F_s = 1000\text{ Hz}$

Fig.9 Power spectrum of open loop and the residual errors of an overlap AO and a conventional AO.

(a)  $F_{s1} = 2000\text{ Hz}$ ,  $F_{s2} = F_s = 500\text{ Hz}$ ; (b)  $F_{s1} = F_{s2} = F_s = 500\text{ Hz}$ ; (c)  $F_{s1} = 500\text{ Hz}$ ,  $F_{s2} = F_s = 1000\text{ Hz}$

## 4 结 论

提出了一种新的嵌套双AO系统结构,阐述了其工作原理,并建立了控制模型,在此基础上利用传递函数频域分析方法分析了其控制特性,并与常规AO系统进行了对比,分析指出,嵌套双AO系统对内部像差扰

动的抑制能力约为常规 AO 系统的两倍。仿真结果表明,在内通道信噪比很高,外通道信噪比很低的工作条件下,当内扰动较弱时,嵌套双 AO 系统与常规 AO 系统的校正能力相当。当内扰动强度较大,嵌套双 AO 系统的校正残差比常规 AO 系统的要小 10%~50%。当内通道采样频率高于 500 Hz 时,继续提高内通道采样频率对降低残差贡献不大,但若能提高外通道采样频率将有利于显著降低校正残差。对实际嵌套双 AO 系统的设计和应用具有指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 John W Hardy. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes[M]. Oxford: Oxford University Press, 1998: 3-24.
- 2 Robert K Tyson. Principles of Adaptive Optics 2nd Edition[M]. San Diego: Academic Press, 1997: 45-50.
- 3 C Boyer, J P Gaffard. Adaptive optics, transfer loops modeling[C]. SPIE, 1991,1542: 46-61.
- 4 Huang J, Looze D, Denis N, *et al.*. Dynamic modeling and identification of an adaptive optics system[C]. Proceedings of the 4th IEEE Conference on, 1995: 456-463.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 E Gendron, P Léna. Astronomical adaptive optics I. modal control optimization[J]. Astron Astrophys, 1994, 291(1): 337-347.
- 8 C Dessenne, P Y Madec, G Rousset. Optimization of a predictive controller for the closed loop adaptive optics[J]. Appl Opt, 1998, 37(21): 4623-4633.
- 9 Yan Zhaojun, Li Xinyang, Rao Changhui. Multi-channel adaptive control algorithm for closed-loop adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301002.  
颜召军, 李新阳, 饶长辉. 自适应光学闭环系统实时多路自适应控制算法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301002.
- 10 C Kulcsár, H F Raynaud, C Petit, *et al.*. Optimal control, observers and integrators in adaptive optics[J]. Opt Express, 2006, 14(17), 7464-7476.
- 11 L Poyneer, J P Véran. Predictive wavefront control for adaptive optics with arbitrary control loop delays[J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(7): 1486-1496.
- 12 D C Johnston, B M Welsh. Analysis of multiconjugate adaptive optics[J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(1): 394-408.
- 13 C Petit, J M Conan, C Kulcsár, *et al.*. Optimal control for multi-conjugate adaptive optics[J]. C R Acad Sci Ser. IV Phys Astrophys, 2005, 6(10): 1059-1069.
- 14 B Le Roux, J M Conan, C Kulcsar, *et al.*. Optimal control law for classical and multiconjugate adaptive optics[J]. J Opt Soc Am A, 2004, 21(7): 1261-1276.
- 15 W Zou, X Qi, S Burns. Wavefront-aberration sorting and correction for a dual-deformable-mirror adaptive-optics system[J]. Opt Lett, 2008, 33(22): 2602-2604.
- 16 W Liu, L Dong, P Yang, *et al.*. A Zernike mode decomposition decoupling control algorithm for dual deformable mirrors adaptive optics system[J]. Opt Express, 2013, 21(20): 23885-23895.
- 17 Carlos Correria, Jean-Pierre Véran. Woofer - tweeter temporal correctors split in atmospheric adaptive optics[J]. Opt Lett, 2012, 37(15): 3132-3134.
- 18 Véran J P, Herriot G. Woofer-tweeter tip-tilt control for NFIRAOS on TMT[C]. SPIE, 2006, 6272: 62721R.
- 19 Fu Chengyu, Ma Jianguang, Ye Buxia, *et al.*. The application research of the composite axis control system[J]. Opto-Electronic Engineering, 1998, 25(4): 1-12.  
傅承毓, 马佳光, 叶步霞, 等. 复合轴控制系统应用研究[J]. 光电工程, 1998, 25(4): 1-12.
- 20 Huang Yongmei, Ma Jianguang, Fu Chengyu. Application of forecast of moving target velocity in electro-optical tracking control system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(5): 477-481.  
黄永梅, 马佳光, 傅承毓. 目标速度预测在光电跟踪控制系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 477-481.
- 21 Huang Yongmei, Zhang Tong, Ma Jianguang, *et al.*. Study on the control of a current loop in a high-accuracy tracking and control system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(1): 16-19, 35.  
黄永梅, 张桐, 马佳光, 等. 高精度跟踪控制系统中电流环控制技术研究[J]. 光电工程, 2005, 32(1): 16-19, 35.
- 22 D P Greenwood. Bandwidth specification for adaptive optics systems[J]. Opt Soc Am, 1977, 67(03): 390-93.
- 23 Guo Youming, Ma Xiaoyu, Rao Changhui. Modified effective bandwidths of adaptive optical control systems for compensation in Kolmogorov turbulence[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13): 134207.  
郭友明, 马晓燠, 饶长辉. 自适应光学控制系统对 Kolmogorov 湍流补偿的修正有效带宽[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 134207.

栏目编辑: 史 敏