

文章编号: 0253-2239(2001)03-0283-07

# 自适应光学系统中的自适应控制算法研究\*

李新阳 姜文汉 王春红 鲜浩

(中国科学院光电技术研究所国家 863 计划大气光学重点实验室, 成都 610209)

**摘要:** 介绍和分析了一种在自适应光学系统中实用的自适应控制算法。与经典控制算法相比, 自适应控制算法调整方便, 综合考虑了大气湍流扰动和探测噪声等对系统控制效果的影响, 控制参数能适应工作环境的变化, 使系统达到最优控制状态。以 61 单元自适应光学系统上实现的自适应控制算法为例, 用经典控制理论的波德(Bode)图、控制带宽等概念分析了这种算法的特点, 并针对算法在实际系统应用中遇到的问题提出了解决的办法。

**关键词:** 自适应光学; 自适应控制算法; 大气湍流; 探测噪声; 功率谱

中图分类号: TP301.6; TP273\*.2 文献标识码: A

## 1 引 言

大气湍流造成的传输光束动态波前畸变是个困扰了光学界几百年的难题。自适应光学(AO)技术通过实时地探测和补偿这种动态波前畸变, 使传统光学系统具有了适应外界环境变化的能力<sup>[1-3]</sup>。自适应光学系统中控制算法的优劣对系统性能的影响很大。目前自适应光学系统中通常采用比例-积分-微分(PID)等经典控制算法<sup>[3-6]</sup>, 控制器参数的调整目标是尽量提高系统的控制带宽和稳定性。Greenwood 等的分析表明控制带宽与大气湍流扰动时间特性有关<sup>[7]</sup>, Parenti<sup>[8]</sup>和李新阳等<sup>[9]</sup>分析了大气湍流校正残余方差与控制带宽等的关系, 结果表明系统控制带宽并不是越大越好, 而是必须根据大气湍流的时间特性和探测器噪声大小等实际工作情况来合理调整, 才能使系统的校正残余方差最小, 控制达到最优。这个最优控制问题用经典控制算法很难解决。Dessenne 等<sup>[10,11]</sup>探索了一种用自适应控制算法解决自适应光学系统最优控制问题的途径。

自适应控制是在一定约束条件下的最优控制, 具有主动适应外界环境变化的能力<sup>[12,13]</sup>。本文分析了自适应光学系统中自适应控制算法的特点; 根据在 61 单元自适应光学系统上采用自适应控制算法的实验结果, 利用经典控制理论的波德(Bode)图、零极点分布图等图形手段, 用控制带宽、相位裕量、闭环超调量等各种指标评判自适应控制算法的控制效果和稳定性; 并针对自适应控制算法在实际系统应

用中遇到的问题提出了解决的办法。

## 2 自适应光学系统的离散控制模型

一个典型的自适应光学系统的结构如图 1 所示。波前探测器(WFS)测量波前畸变, 在高速数字计算机中进行波前复原计算(WFC)和控制计算(CC), 得到的控制电压信号经过数模转换(DAC)和高压放大器(HVA), 使变形镜(DM)和倾斜镜(TM)产生出与畸变波前共轭的补偿波前。

整个自适应光学系统是一个数字-模拟混合控制系统, 用离散  $Z$  变换形式表示的离散控制结构如图 2 所示。

根据李新阳等的分析, 自适应光学系统自身的离散传递函数为<sup>[14-6]</sup>

$$G_0(z) = z^{-d}, \quad (1)$$

其中  $z = \exp(sT)$  为  $Z$  变换算子,  $s = j\omega$  为拉普拉斯(Laplace)算子,  $\omega$  为时间频率,  $T$  为哈特曼波前探测器中 CCD 的采样周期。系统的时间延迟周期数  $d$  一般为 2~3, 其中包含了 CCD 的曝光和读出时间延迟以及波前处理计算机中的时间延迟。

图 2 中  $C(z)$  为数字控制器的离散传递函数。自适应光学控制系统的开环传递函数  $H(z)$ 、闭环传递函数  $M(z)$  和误差传递函数  $E(z)$  都用离散  $Z$  变换的形式分别表示为

$$H(z) = G_0(z)C(z) = C(z)z^{-d}, \quad (2)$$

$$M(z) = H(z)[1 + H(z)]^{-1}, \quad (3)$$

$$E(z) = [1 + H(z)]^{-1}. \quad (4)$$

除特别指出以外, 以下涉及到的传递函数均为

\* 国家科委 863 高科技计划资助项目。

收稿日期: 1999-07-30; 收到修改稿日期: 1999-11-04

离散  $Z$  变换形式, 涉及到的时间信号均用信号的离散  $Z$  变换形式表示. 为方便起见对传递函数和信号都用简单符号表示, 如分别用  $H$ 、 $M$  和  $E$  表示上面三个离散传递函数, 用  $r$ 、 $y$  和  $e$  分别表示图 2 中的扰动

信号、补偿信号和校正残余时间序列信号, 它们间的关系为:

$$e = r - y, \tag{5}$$

$$y = H e_m. \tag{6}$$

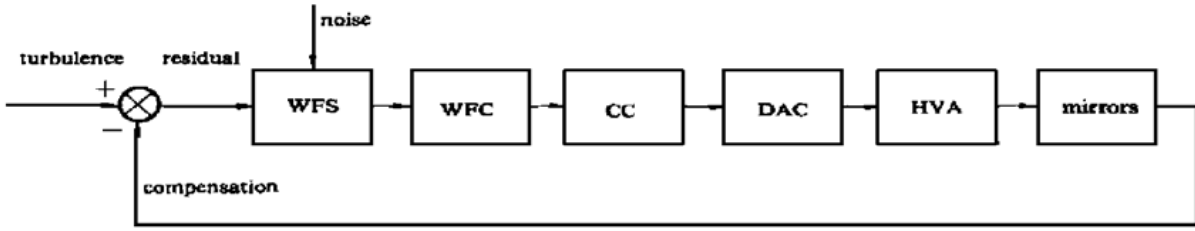


Fig. 1 The block diagram of a typical adaptive optical control system

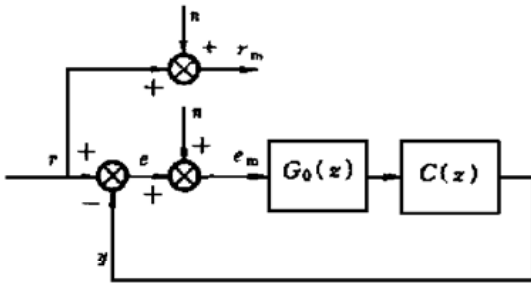


Fig. 2 Discrete block diagram of an AO system

图 2 中的  $r_m$ 、 $e_m$  分别为系统开环和闭环时波前探测器测量到的大气湍流扰动信号和校正残余信号, 它们都受到了探测噪声  $n$  的干扰:

$$r_m = r + n, \quad e_m = e + n = r_m - y. \tag{7}$$

综合考虑以上三式, 得到校正残余信号与扰动信号、探测噪声间的两个重要关系:

$$e = \frac{r}{1+H} - \frac{Hn}{1+H}, \tag{8}$$

$$e_m = \frac{r}{1+H} - \frac{Hn}{1+H} + n, \tag{9a}$$

或

$$e_m = \frac{r+n}{1+H} = \frac{r_m}{1+H}. \tag{9b}$$

### 3 自适应光学系统中的自适应控制算法研究

#### 3.1 自适应控制算法的性能指标分析

目前自适应光学系统上通常采用的经典控制算法有纯积分控制算法、比例-积分-微分控制算法和史密斯(Smith)纯滞后补偿控制算法等. 控制器设计的主要任务是设计和调整控制器参数<sup>[5,6]</sup>, 这是一项复杂工作, 即使是经验丰富的控制器设计者也需要几小时到几日才能得到一组控制带宽和稳定性都较满意的控制参数. 所以控制参数一旦设计好, 在一个相当长的时间内(几日或几个月以上)都不会改

变. 但 Parenti 和李新阳等分析表明, 设计控制器时要兼顾大气湍流强度、探测器噪声大小等工作环境的改变, 才能使系统达到最优控制状态<sup>[8,9]</sup>. 这在经典控制算法中很难做到, 但自适应控制算法能够实现. 自适应控制器的参数能够随着工作环境改变而自动改变, 始终满足性能指标约束条件, 即系统的校正残余方差达到最小<sup>[12,13]</sup>.

从时间频率域分析, 扰动信号和噪声信号的功率谱分别表示为

$$\left. \begin{aligned} F_r(\omega) &= rr^*, \\ F_n(\omega) &= nn^*, \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

其中\* 表示复数共轭. 探测噪声一般是白噪声, 不同时刻的噪声信号间互不相关, 大气扰动与探测噪声间也互不相关. 利用噪声特性和(8)、(9)两式得到校正残余信号的功率谱为

$$F_e(\omega) = ee^* = |E|^2 F_r(\omega) + |M|^2 F_n(\omega), \tag{11}$$

$$F_{e_m}(\omega) = e_m e_m^* = |E|^2 F_r(\omega) + |M|^2 F_n(\omega) + F_n(\omega), \tag{12a}$$

$$\text{或} \quad F_{e_m}(\omega) = e_m e_m^* = |E|^2 F_{r_m}(\omega), \tag{12b}$$

其中 $|\cdot|$ 表示复数的模. 信号的方差就是信号功率谱在频率域上的积分:

$$\langle e^2 \rangle = \int_0^\infty F_e(\omega) d\omega = \int_0^\infty |E|^2 F_r(\omega) d\omega + \int_0^\infty |M|^2 F_n(\omega) d\omega, \tag{13}$$

$$\langle e_m^2 \rangle = \int_0^\infty F_{e_m}(\omega) d\omega = \int_0^\infty |E|^2 F_r(\omega) d\omega + \int_0^\infty |M|^2 F_n(\omega) d\omega + \int_0^\infty F_n(\omega) d\omega, \tag{14a}$$

$$\text{或} \quad \langle e_m^2 \rangle = \int_0^\infty |E|^2 F_m(\omega) d\omega, \quad (14b)$$

其中  $\langle \cdot \rangle$  表示信号的数学期望。最优控制状态就是系统的校正残余方差  $\langle e^2 \rangle$  最小, 即性能指标  $J = \min \langle e^2 \rangle$ 。从(14)式看, 系统的校正残余方差  $\langle e^2 \rangle$  由两部分组成: 一部分与系统误差传递函数  $E$  和大气扰动有关, 另一部分与系统闭环传递函数  $M$  和探测噪声有关。而  $E$ 、 $M$  都与系统控制算法  $C$  有关, 所以系统的控制算法  $C$  必须满足约束条件  $\partial J / \partial C = 0$ 。但在实际应用系统中得不到扰动信号  $r$  和探测噪声  $n$ , 能够实时得到的只有受探测噪声影响的信号  $r_m$  和  $e_m$ 。对比(13)、(14a)式并注意到

$$\langle e_m^2 \rangle = \langle e^2 \rangle + \langle n^2 \rangle. \quad (15)$$

如果取性能指标  $J' = \min \langle e_m^2 \rangle$ , 因为噪声项  $\langle n^2 \rangle$  与控制算法  $C$  无关, 则这两种性能指标对控制算法的约束条件是一致的, 即  $\partial J' / \partial C = \partial J / \partial C = 0$ 。从(14b)式可见性能指标  $J'$  只与系统误差传递函数和大气扰动测量值有关, 这样就可以得到一种实用的自适应控制算法。

### 3.2 自适应光学系统中的自适应控制算法

自适应控制算法中控制器的传递函数可表示为<sup>[5,6]</sup>

$$C(z) = \frac{\sum_{i=0, q-1} b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1, p-1} a_i z^{-i}}, \quad (16)$$

其中  $a_i$  和  $b_i$  为待确定的控制器参数,  $p$ 、 $q$  分别为分母和分子项的阶数。把(2)式代入(6)式, 并利用上式展开, 得到控制器输出信号  $y$  与传感器测量信号  $e_m$ 、 $r_m$  间的递推关系:

$$\left[ 1 + \sum_{i=1, p-1} a_i z^{-i} \right] y = z^{-d} \sum_{i=0, q-1} b_i z^{-i} e_m, \quad (17)$$

即

$$y = - \sum_{i=1, p-1} a_i z^{-i} y - z^{-d} \sum_{i=0, q-1} b_i z^{-i} (y - r_m), \quad (18)$$

上式中  $a_i$ 、 $b_i$  为希望确定的控制参数, 时间序列信号  $y$ 、 $r_m$  是系统中可以得到的。假定在  $k$  时刻待确定的控制参数向量  $\theta(k)$  和一个已知信号序列向量  $\Phi(k)$  分别定义为

$$\theta(k) = [a_1(k), \dots, a_{p-1}(k), b_1(k), \dots, b_{q-1}(k)], \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Phi(k) = & [y(k-1), \dots, y(k-p+1), \\ & (y-r_m)(k-d), \dots, \\ & (y-r_m)(k-q+1-d)], \end{aligned} \quad (20)$$

则

$$y(k) = - \theta(k) \Phi(k)^T. \quad (21)$$

上式把自适应光学系统离散化为一个自回归移动平均(ARMA)模型<sup>[12,13]</sup>, 这时性能指标为

$$J' = \langle e_m^2 \rangle = \langle (r_m - y)^2 \rangle = \langle (r_m + \theta \Phi^T)^2 \rangle, \quad (22)$$

它为极小化性能指标, 令  $\partial J' / \partial \theta = 0$ , 得到满足最优控制条件的控制器参数为

$$\theta_{\text{optimal}} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T r_m. \quad (23)$$

这就是假设扰动量  $r_m$  和控制量  $y$  完全已知情况下一般最小二乘法(LS)的结果。但这种方法在实际系统中无法实现。在实际应用中, 通常采用递归最小二乘法(RLS)替代最小二乘法算法。自适应控制理论证明<sup>[12,13]</sup>, 对于自回归移动平均模型, 递归最小二乘法迭代算法的收敛结果与初始条件无关, 如实际应用中常把算法的初始条件设为  $\theta(0) = 0$ ,  $\Phi(0) = 0$ , 但最后控制参数的收敛结果与最小二乘法算法一致, 即  $\theta(k \rightarrow \infty) = \theta_{\text{optimal}}$ , 并且都满足最小残余方差的约束条件。

## 4 自适应控制算法的实验结果分析

### 4.1 61 单元自适应光学系统上自适应控制算法的实现

61 单元自适应光学系统包括一个有 48 个子孔径的哈特曼波前探测器(其中 CCD 相机的采样率是每秒 2900 帧)、一个有 61 个驱动器的变形镜和一个有两个驱动器的倾斜镜以及一台专用的高速数字波前处理机进行波前复原及控制运算, 系统的总时间延迟约为 3 倍 CCD 采样周期, 即  $d = 3$ 。系统采用直接斜率波前复原算法从波前斜率直接计算出各个驱动器控制电压<sup>[3,4]</sup>。李新阳等证明<sup>[4,5]</sup>, 直接斜率法中各驱动器控制回路间是互相解耦的, 对一个驱动器回路设计的控制算法可以应用在所有驱动器回路上, 这样做方便了系统控制器的设计。61 单元自适应光学系统中的倾斜镜控制回路采用了抑制机械谐振的特殊控制算法。因为变形镜的控制特性对整个自适应光学系统校正效果的影响也比较大, 所以我们只对系统中的变形镜控制回路进行自适应控制算法的实验研究。需要说明的是, Dessenne 等仅对一个采用模式波前复原法的自适应光学系统的倾斜镜控制回路进行了自适应控制算法(文献[10]中被称为“预测控制算法”, 但实质上相同)的实验研究, 并对全系统的

自适应控制算法进行了理论研究,但还没有关于实验结果的报道。

理论上自适应控制算法应当在专用波前处理机中在线迭代实现,但这要对现有系统的软硬件作较大改动,不大现实,所以我们采用了一种离线方法:在另一台通用微机中编制好自适应控制算法的程序,输入现有系统的波前复原矩阵、采样频率、时间延迟等参数,然后利用波前处理机采集当前大气湍流扰动波前斜率数据,通过计算机局域网络迅速传给微机,在微机中实现自适应控制算法的迭代过程。当算法收敛后再把得到的控制参数传给波前处理机,使自适应光学系统闭环工作。

我们所用的计算机(中央处理器为奔腾 166 MHz)大约每 1 min~ 3 min 就可以给出一组控制参数。而实验经验表明,大气湍流和探测噪声等特性通常在一个比较长的时间段(约半小时)里都是稳定不变的,这组控制参数可以保证自适应光学系统在这个时间段里都工作在最优控制状态。当工作环境改变后只需重新运行自适应控制算法程序,就可以

得到新的最优控制参数。按照以上方法,在对现有有 61 单元自适应光学系统几乎不作改动的条件下实现了自适应控制算法。在一套 0.6 m 口径的望远镜系统<sup>[3]</sup>上,用 61 单元自适应光学系统进行了近地面水平传输大气湍流校正实验,验证了这种自适应控制算法的可行性与有效性。

#### 4.2 自适应控制算法的收敛性和控制稳定性分析

因为这是一种迭代算法,首先需要验证算法的收敛性。以编号# 602ao9 的数据为例,这是晚上大气湍流较弱、探测噪声较小的实验数据。实验条件为:传输距离 3 km,大气相干长度  $r_0 = 19.5$  cm(信标波长 0.69  $\mu\text{m}$ ,下同),横向风速小于 1 m/s。自适应控制算法的初始条件为:

$$p = 4, \quad q = 3, \quad \theta(0) = 0, \quad \Phi(0) = 0,$$

数据长度是 8200 帧。从图 3 的迭代过程可见,校正残余信号在算法启动不久就收敛了,控制参数在迭代 4000 次时也已收敛到稳定值。其他实验结果也证实,当算法迭代 3000 到 5000 次后就可以得到一个稳定的控制参数结果。

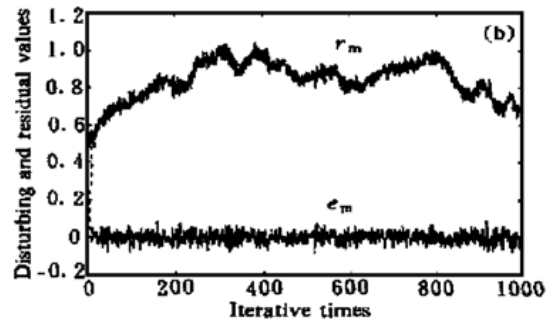
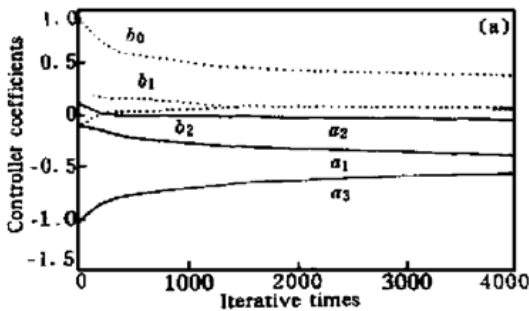


Fig. 3 The iterative process examples of the adaptive control algorithm. (a) Controller coefficients; (b) Time series of disturbed and compensated signal

自适应控制算法得到的控制参数是否能保证控制系统的稳定性?为此用经典控制理论里的零极点分布图和波德图进行稳定性分析。

从图 4 中看出,所有的零极点都在单位圆内。根据控制理论,这样的控制器是稳定的。还可以看

到,有一个极点在  $z = 1$  附近,这说明控制器中含有一个积分控制器。这是自适应控制算法在约束条件下产生的自然结果。根据控制理论,积分控制器能消除系统对阶跃扰动的稳态误差,是随动控制器中不可缺少的部分。

自适应光学系统在用自适应控制算法得到的控制参数下稳定闭环工作。用 TD4020 型频率响应分析仪测量出系统的开环、闭环和误差传递函数,即波德图。用已知的控制参数也可以计算出控制系统的波德图。利用波德图可以分析控制系统的稳定性、控制带宽等重要特性。以上这组控制算法的波德图如图 5 所示,测量结果与计算结果符合很好,开环传递函数的过零频率是 100 Hz 左右,相位裕量(过零频率处的相位加  $180^\circ$ )是  $60^\circ$  左右,保证了控制系统的稳定性。事实上从图 3 中看,校正残余信号保持

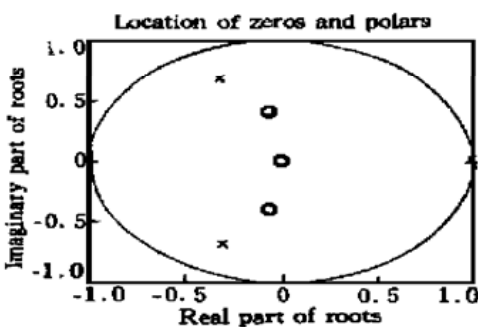


Fig. 4 The location of zeros and polar for the adaptive controller. °: zeros, ×: poles

一个稳定的小量, 没有振荡或发散, 这也说明控制系

统是收敛的和稳定的。

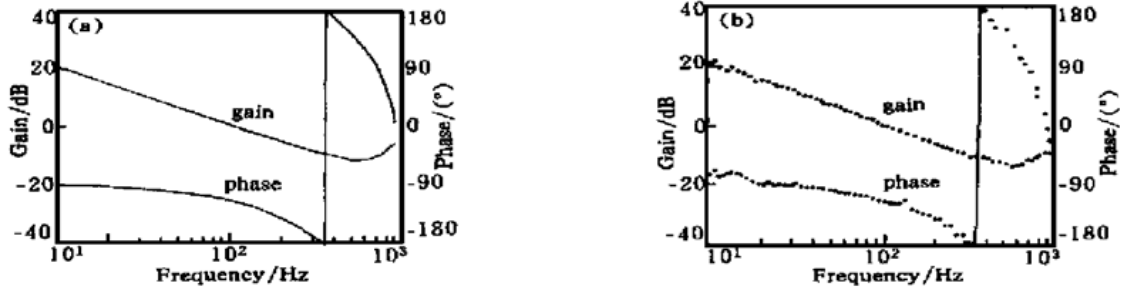


Fig. 5 The Bode plot of calculated and measured result of the adaptive controller on 61 element adaptive optical system. (a) Calculated result. (b) Measured result

### 4.3 自适应控制算法对环境的自适应性分析

图6是# 602ao9数据自适应控制算法的实验结果。图6(a)是控制器波德图, 其中HG MG .EG 分别是开环、闭环和误差传递函数。控制器的闭环带宽(闭环增益-3 dB点)为20Hz, 误差有效带宽(误差增益0 dB点)为110 Hz。从系统校正前湍流扰动信号  $r_m$  的功率谱、校正后残差信号  $e_m$  的功率谱以及它们的比, 即功率谱抑制函数中, 可见系统有效带宽以下的低频扰动信号都得到了较好的抑制。这是夜晚湍流较弱时的实验结果。同一天中午编号为#

602ao5的数据湍流较强, 大气相干长度为  $r_0 = 3.77$  cm, 并且由于信标光的强度闪烁起伏使哈特曼波前斜率探测的噪声增大, 与图6中的# 602ao9相比, 噪声平台从  $10^{-7}$  增大到  $10^{-6}$ 。对这组数据用自适应控制算法迭代6000次后得到控制参数。这组控制参数计算出的结果如图7所示。控制器的闭环带宽为576 Hz, 误差有效带宽为180 Hz, 控制带宽比# 602ao09数据明显增大。这说明自适应控制算法能够使控制带宽随着大气湍流的强弱变化而自动改变。

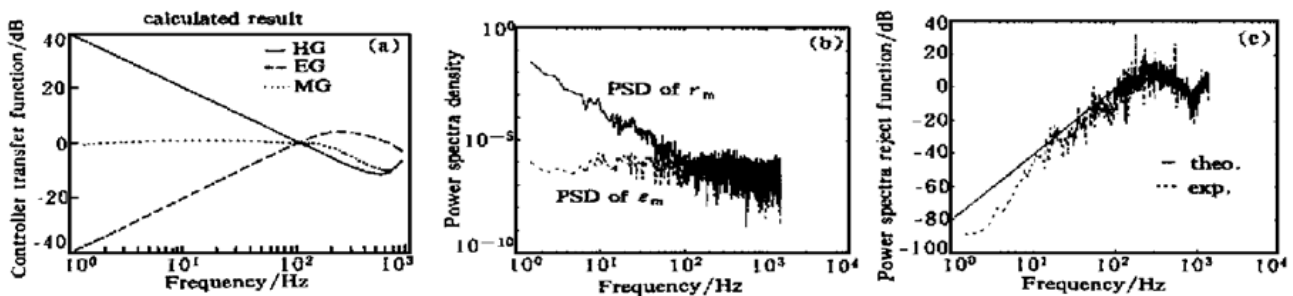


Fig. 6 The adaptive control result for data # 602ao09. Example of weak turbulence and weak noise. (a) The Bode plot; (b) The PSDs; (c) The power spectra reject function

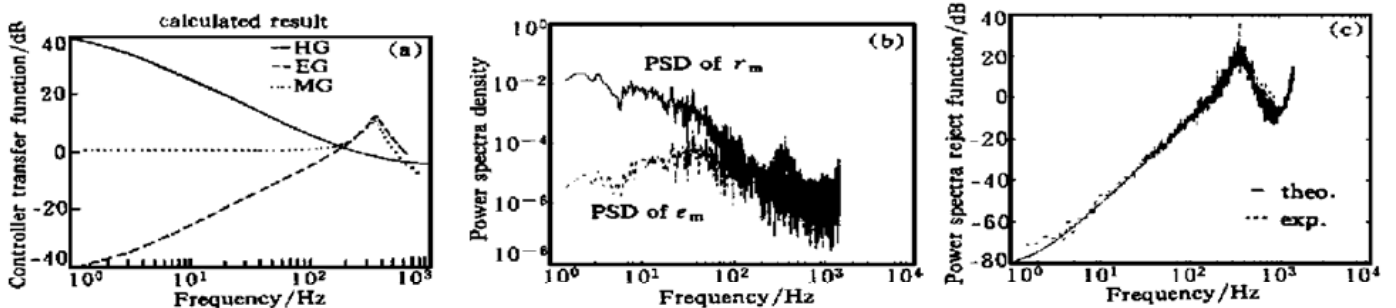


Fig. 7 The adaptive control result for data # 602ao05. Example of strong turbulence and strong noise. (a) The Bode plot; (b) The PSDs; (c) The power spectra reject function

控制带宽增大后噪声对校正效果的影响也会加大。为了检验在大气湍流强度特性不变情况下, 自适应控制算法是否能够适应噪声的变化, 我们在# 602ao5数据中人为地添加零均值高斯白噪声, 使噪声平台从  $10^{-6}$  增大到  $10^{-5}$  左右, 这相当于强度闪

烁起伏剧烈的情形。

自适应控制算法的结果如图8所示。控制器的闭环带宽为301 Hz, 误差有效带宽为114 Hz。在大气湍流强度不变的情况下, 仅仅增加探测噪声, 控制算法就使系统控制带宽下降, 这与我们的期望是一

致的。这个检验过程说明自适应控制算法对噪声变化的适应性较好。

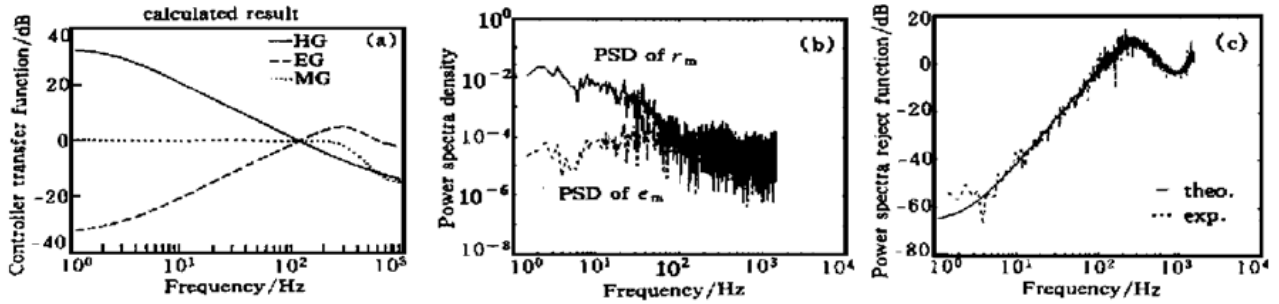


Fig. 8 The adaptive control result for data # 602ao05 with additional white noise. Example of strong turbulence with the stronger noise. (a) The Bode plot; (b) The PSDs; (c) The power spectra reject function

以上这些结果与李新阳在文献[9]中的结论是一致的。即当大气湍流增强时,系统的控制带宽应该增加以提高校正效果;但当噪声水平增高时,系统的控制带宽应该适当减小以降低噪声对校正效果的影响。系统的最优控制带宽应该在这两者间综合考虑。在经典控制算法中最优控制带宽大小很难确定并不好调整,所以目前还停留在理论分析上,无法实现。而自适应控制算法很容易就能在实际系统中实现这种最优控制。单从控制带宽大小看,自适应控制算法的结果与经典控制算法基本相当。但一方面用经典控制算法设计不出这么复杂的控制参数来;另一方面,经典控制算法没有自适应控制算法那种随工作环境自动改变控制带宽的能力。所以在实际自适应光学系统中,自适应控制算法将比经典控制算法优越得多。

#### 4.4 自适应控制算法中存在的问题和改进办法

自适应控制算法在实际系统上应用时也发现了一些问题。从图6、图8可见,在湍流和噪声都较弱或湍流和噪声都较强的环境下,自适应控制算法用在实际系统上是稳定的。但从图7可见在湍流较强而测量噪声较弱的环境下,自适应控制器的闭环传递函数和误差传递函数的振荡峰值增大为12 dB和10 dB,这在实际系统中是不允许的。仔细分析发现这时控制器的相位裕量只有40°,因此引起控制器的较大振荡。原因是自适应控制算法仅仅约束了残余方差达到最小,而没有对稳定性进行约束。但实际系统对稳定性的要求也很高。通过减小控制器增益可提高相位裕量、降低闭环振荡。为此我们在算法中加入自动增益控制(AGC)算法,约束控制器的相位裕量在55°以上,闭环振荡峰值小于2 dB,误差振荡峰值小于7 dB。当发现系统出现振荡就调低控制器增益。加入稳定性约束条件和自动增益控制算法后,对# 602ao5数据得出的控制器闭环振荡峰值和误差振荡峰值分别下降为1.6 dB和6.6 dB,相位裕

量也提高到近60°,如图9所示。虽然这时控制器的闭环带宽降为480 Hz,误差有效带宽降为144 Hz,但这时能够保证系统闭环稳定工作,控制效果也仍然比较好。

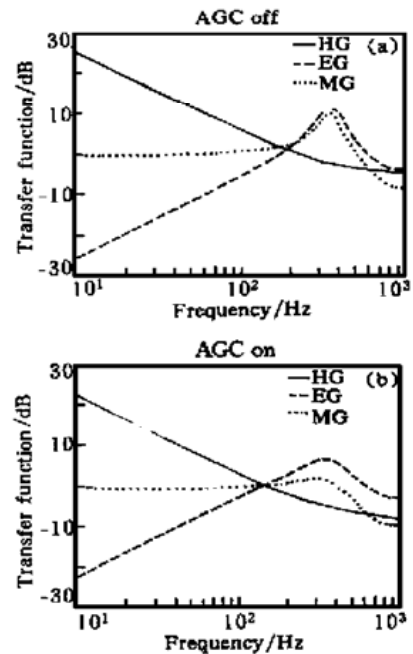


Fig. 9 The Bode plot of adaptive controller on data # 602ao05 with and without AGC

在实际应用中还发现,控制器的阶数选取对算法有影响。根据实验经验,取 $p = q + 1$ 比较合适,如选取 $p = 4, q = 3$ 就可以对多数实验情况得到较好效果。当湍流增强或减弱后,可以相应地增加或减少控制器阶数。另外迭代次数的选取也很有讲究,如果迭代过程短,没有完全反映出大气湍流的特性,算法就失去了有效性,但迭代过程太长也没有必要。根据实验经验,迭代过程要包括几秒的扰动变化过程,迭代次数可以随着湍流的变化而增加或减少。

**结论** 本文介绍和分析了一种可以在实际自适应光学系统中应用的自适应控制算法。通过自适应控制算法在61单元自适应光学系统上的实验结果,分析

和验证了这种算法的收敛性、控制稳定性和对外界环境变化的自适应性。在自适应光学系统的控制问题上, 自适应控制算法在很多方面都比经典控制算法优越。自适应控制器的参数不需要事先凭经验调整, 而是在算法中自动确定的。自适应控制算法中为了保证约束条件, 控制器参数会随着大气湍流扰动和探测噪声等工作环境的变化而变化, 使整个系统始终处在最优控制状态。对于自适应控制算法中存在的稳定性等实际应用问题, 可以采取适当的方法解决。

感谢中科院光电所八室的吴旭斌、饶长辉和中科院安徽光机所二室的龚知本、吴毅、王英俭、汪超等对本文实验工作的支持和帮助。

### 参 考 文 献

- [1] Tyson R K. *Principles of Adaptive Optics*. San Diego: Academic Press, 1991. 213~ 255
- [2] 周仁忠, 闫吉祥, 俞 信等编著. 自适应光学. 北京: 国防工业出版社, 1996. 270~ 290
- [3] 姜文汉, 王春红, 鲜 浩等. 61 单元自适应光学系统. 量子电子学报, 1998, **15**(2): 193~ 199
- [4] 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. 光电工程, 1998, **25**(6): 9~ 14
- [5] 李新阳, 姜文汉. 自适应光学控制系统的有效带宽分析. 光学学报, 1997, **17**(12): 1697~ 1702
- [6] Demerle M, Madec P Y, Russet G. Servo-loop analysis for adaptive optics, In: Allion D M, Mariotti J M eds. *Adaptive Optics for Astronomy*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994. 73~ 88
- [7] Greenwood D P. Bandwidth specification for adaptive optics systems. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1977, **67**(3): 390~ 393
- [8] Parenti R R, Sasiela R J. Laser guide-star systems for astronomical applications. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1994, **11**(1): 288~ 309
- [9] 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统的控制残余方差分析. 光学学报, 2000, **20**(10): 1328~ 1334
- [10] Dessenne C, Madec P Y, Rousset G. Modal prediction for closed-loop adaptive optics. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20): 1535 ~ 1537
- [11] Dessenne C, Madec P Y, Rousset G. Optimization of a predictive controller for closed-loop adaptive optics. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4623~ 4633
- [12] Astrom K J, Wittenmark B. *Adaptive Control*. Sweden: Addison-Wesley Publishing Company, 1989. 120~ 169
- [13] 陈宗基编著. 自适应技术的理论及应用. 北京: 航空航天大学出版社, 1991. 84~ 169

## Analysis of an Adaptive Control Algorithm Used in an Adaptive Optical System

Li Xinyang Jiang Wenhan Wang Chunhong Xian Hao

(The Key Laboratory of the Atmospheric Optics of National High Technology,  
Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica, Chengdu 610209)

(Received 30 July 1999; revised 4 November 1999)

**Abstract** An adaptive control algorithm used in a practical adaptive optical (AO) system was analyzed. The adaptive control algorithm, differs like the traditional control algorithm, it considered the effect of atmospheric turbulence and the measurement noise together. The coefficients of the controller can change to adapt the working environment of an AO system to make the compensation optimizing. The experimental results on the 61-element AO system were analyzed, and the methods to solve some practical problems with the algorithm were discussed.

**Key words:** adaptive optics; adaptive control algorithm; atmospheric turbulence; measurement noise; power spectra density