

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1059-06

两个自适应光学系统串联校正的控制性能分析*

李新阳 姜文汉

(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: 提出了一种用两个自适应光学系统串联校正的方法。这两个自适应光学系统分别采用前馈控制和反馈控制布局, 利用一组共用的波前校正器串联起来。分析了这种串联校正方法的控制性能和噪声传递特性, 在技术复杂性增加不多的条件下, 这种串联结构的整体控制效果比单一系统改善了很多。用实际 61 单元自适应光学系统上的实验数据进行了仿真, 验证了这种方法的有效性。

关键词: 自适应光学; 大气湍流; 系统串联; 控制带宽; 噪声

中图分类号: TP202+7 文献标识码: A

1 引 言

大气湍流等引起的动态波前扰动严重影响了天文观测、激光大气传输等光学系统的性能。自适应光学技术通过实时探测和校正这种动态波前畸变, 可以提高光学系统克服大气湍流等动态扰动的能力^[1]。自适应光学系统一般采用实时闭环的控制方式, 系统的控制带宽越高校正效果越好。格林伍德 (Greenwood) 等人^[2~5]分析了自适应光学系统的控制带宽与大气湍流动态特性、校正效果等的关系。在某些应用场合, 为了达到需要的控制效果, 对自适应光学系统的控制带宽提出了很高的要求。对控制算法进行优化可以在一定程度上提高控制带宽, 但控制带宽的调整范围从根本上受到系统采样频率、计算机速度等技术条件的限制^[4,5]。所以需要研究在现有技术条件下改善自适应光学系统控制效果的方法。

由于自适应光学技术复杂, 系统成本高, 通常都是单系统工作。有时多个系统联合使用但各有不同的用途, 如一个用于激光器的光束净化, 一个用于大气湍流补偿等。有学者提出把多个系统联合于同一个用途, 可以克服单系统工作方式的某些缺点。如 Roggemann 等^[6]提出联合使用两个变形镜方式来校正激光大气传输中的闪烁效应, Sivokon 等^[7]提出联合使用一个低空间分辨率系统与一个高空间分辨率的系统, 以提高整个系统的空间校正能力。本文则提出了一种用两个自适应光学系统串联校正以提高

整个系统的控制效果的方法, 并分析了这种串联校正方法的控制性能和噪声传递特性。

2 自适应光学系统的动态特性

2.1 大气湍流的动态特性

一般采用时间功率谱密度 (PSD) 的方法分析大气湍流这种随机扰动信号的动态特性。对于符合科尔莫戈罗夫 (Kolmogorov) 统计规律的大气湍流, 根据格林伍德等人的分析结果表明, 与自适应光学系统动态控制密切相关的湍流功率谱中高频段部分是频率的 $-8/3$ 次方关系^[2,3]:

$$F_c(f) = (f_c^{5/3}/\pi) f^{-8/3}, \quad (1)$$

$$f_c = \left[0.102 k^2 \int_0^L C_n^2(z) v^{5/3}(z) dz \right]^{3/5}, \quad (2)$$

其中功率谱的单位是 rad^2/Hz , f 是时间频率, $k = 2\pi/\lambda$ 是波数, λ 是信标波长, C_n^2 是传输路径上的大气折射率结构常数, $v(z)$ 是传输路径上的横向风速, L 是传输路径长度。 f_c 为格林伍德频率, 是反映大气湍流动态强度的一个重要参数。波前探测器的输出信号还受到探测噪声的影响。通常可以把探测噪声看作是功率谱值为常数的随机白噪声序列^[3]

$$F_n(f) = c_n. \quad (3)$$

噪声功率谱的单位也是 rad^2/Hz 。自适应光学系统的波前探测器上得到的信号功率谱是大气湍流的功率谱 $F_c(f)$ 与探测噪声功率谱 $F_n(f)$ 叠加的结果。

2.2 自适应光学系统的两种控制方式

自适应光学系统中的实时波前探测器 (如哈特曼型波前探测器等) 实时波前校正器 (如高速倾斜

* 国家科委 863 高技术计划 410 主题资助课题。

收稿日期: 2000-01-17; 收到修改稿日期: 2000-07-24

镜及变形镜等)通过波前控制计算机构成闭环控制回路。自适应光学系统的反馈和前馈两种实时闭环控制方式的信号流程如图 1 所示。其中湍流畸变波前信号 r 的功率谱为 $F_r(f)$, 测量噪声信号 n 的功率谱为 $F_n(f)$, y 是系统补偿控制信号, e 是补偿后的残余波前信号, G_B 和 G_F 分别是反馈和前馈两种控制系统的开环传递函数。以上符号都是信号的拉普拉斯变换形式, 是频率 f 的函数。在本文中为了表述方便作了简化。

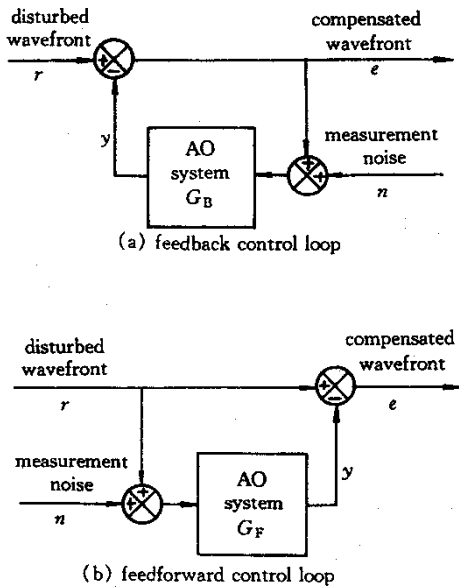


Fig. 1 The diagrams of two control types of adaptive optics system. (a) Feedback control loop; (b) Feedforward control loop

在反馈工作方式[图 1(a)]中, 系统测量的是经波前校正器补偿后的残余波前。根据控制理论, 控制回路的闭环传递函数 H_B 和误差传递函数 E_B 分别为

$$\left. \begin{aligned} H_B &= y/r = G_B(1 + G_B), \\ E_B &= e/r = 1/(1 + G_B) = 1 - H_B. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据图 1(a), 校正残余波前信号 e 与湍流畸变波前信号 r 、测量噪声信号 n 的关系为

$$e = E_B r - H_B n. \quad (5)$$

自适应光学控制系统的目的是抑制湍流畸变波前扰动而减小校正残余波前方差 σ_e^2 。根据信号理论, 信号的方差等于信号功率谱在频率域上的积分。从上式容易得到

$$\sigma_e^2 = \int_0^{\infty} |E_B(f)|^2 F_r(f) df + \int_0^{\infty} |H_B(f)|^2 F_n(f) df = \sigma_r^2 + \sigma_n^2. \quad (6)$$

上式说明自适应光学系统的波前校正残余方差 σ_e^2 是系统对湍流扰动的校正残余方差 σ_r^2 与波前传感器噪声引入的残余方差 σ_n^2 之和^[3,4]。在图 1(b)所示的前馈工作方式中, 系统测量的是未经补偿的原始畸变波前。与上面方法类似, 可得信号间的关系为

$$H_F = y/r = G_F, \quad E_F = e/r = 1 - G_F, \quad (7)$$

$$e = E_F r - H_F n, \quad (8)$$

其中 H_F 和 E_F 分别为前馈控制回路的闭环传递函数和误差传递函数。自适应光学系统的这两种工作方式各有优缺点, 并且优缺点互补。例如反馈控制中测量的是残余误差, 控制器中必须有积分环节, 在系统时间延迟大的情况下控制带宽受限严重, 而前馈控制中没有积分环节, 可以得到较高的控制带宽和较好的噪声抑制效果。反馈控制具有探测器动态范围大、能有效抑制波前校正器的非线性效应、控制稳定等优点, 而前馈控制不具备这些在实际工作中非常重要的优点。所以在实际系统中, 通常采用稳定可靠的反馈工作方式, 但在对自适应光学系统进行理论分析和仿真研究时, 常采用以上两种工作方式^[1,8]。

前馈和反馈两种工作方式的控制特点是不同的, 但他们之间又有某种联系。在实际工作中, 反馈方式的闭环传递函数 H_B 通常是低通滤波形式的。而前馈工作方式中, 也需要把开环传递函数 G_F 设计成低通滤波器形式以抑制噪声。所以在分析中可以令 $G_F = H_B$ 。分别对比(4)式、(5)式与(7)式、(8)式, 可以发现这时有 $H_F = H_B$, $E_F = E_B$, 即这两种工作方式的控制特性完全一样。这时前馈控制的校正残余方差也同样可以用(6)式分析。

2.3 自适应光学系统对湍流扰动的校正残余误差

大气湍流畸变波前经过自适应光学系统的闭环校正后被部分抑制。自适应光学系统的空间校正能力由校正器和探测器的空间分辨能力决定, 而系统的时间校正能力由大气湍流和整个系统的动态特性决定。本文假设系统的空间校正能力足够高, 对此不作分析, 着重分析自适应光学系统的时间控制效果。不考虑时间延迟的理想情况下, 采用一阶积分控制器, 反馈控制系统的闭环传递函数 H_B 和误差传递函数 E_B 分别为^[14]

$$\left. \begin{aligned} H_B(f) &= (1 + jf/f_{3dB})^{-1}, \\ E_B(f) &= (jf/f_{3dB}) / (1 + jf/f_{3dB})^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 f_{3dB} 是闭环传递函数增益 -3 dB 时的频率值, 又称为控制系统的闭环带宽。如果前馈控制器采用

低通滤波器,使 $G_F = H_B$,那么前馈控制与反馈控制是等效的。从频率域上看,两种控制结构的闭环传递函数为低通滤波器形式,而误差传递函数为高通滤波器形式。这样自适应光学系统既可以有效抑制湍流扰动又不会引入过多的测量噪声。格林伍德等得到了这种理想情况下自适应光学系统的湍流校正残余方差为^[1,2]

$$\sigma_i^2 = (f_c/f_{3dB})^{5/3}. \quad (10)$$

系统的控制带宽越宽,控制残余方差越小,一般要求 $f_{3dB} \geq 4f_c$ ^[3]。某些场合的湍流较强,要求自适应光学系统的控制带宽达到上千赫兹。但系统的控制带宽从根本上受系统采样频率等技术条件的限制,达不到要求^[4,5]。分析发现,大气湍流功率谱是频率的 $-8/3$ 次方关系,经过通常的一阶积分校正后,残余信号的功率谱是频率的 $-2/3$ 次方关系,这意味着仍有相当多的低频扰动没有被抑制干净。

3 两个自适应光学系统串联校正的控制性能分析

3.1 两个自适应光学系统串联校正的结构

充分抑制低频扰动的一种方法是采用二阶或高阶积分控制器。虽然从理论上讲高阶积分控制器可以提高控制效果,但高阶积分控制器也会使系统的控制稳定性变差,在实际系统上很难实现稳定的闭环控制。事实上,由于数字控制计算机的累计误差效应,实际工作中连理想的一阶积分控制器都很难

稳定闭环,常用时间常数大的惯性滤波器代替积分控制器^[8]。

另一种改进方法是两个或多个自适应光学系统串联校正。前一个系统的湍流畸变校正残差作为下一个系统的输入信号。这种串联结构中每个单一系统的实现方法与现有技术完全相同,在实际光路中很容易实现。两个反馈控制的自适应光学系统串联结构如图 2 所示。

图 2 中原始的湍流扰动信号为 r_1 ,最终的校正残余信号为 e_2 ,并且有 $e_1 = r_2$ 。根据(4)式、(5)式的分析,容易得到最终校正残余信号为

$$e_2 = E_{B2} e_1 - H_{B2} n_2 =$$

$$E_{B1} E_{B2} r_1 - H_{B1} E_{B2} n_1 - H_{B2} n_2. \quad (11)$$

同样,也可以把一个前馈控制系统与一个反馈控制系统串联起来。在这种串联结构中,还可以进一步把两个系统的波前校正器合二为一。如图 3 所示,前馈系统的控制信号与反馈系统的控制信号相加,即 $y = y_1 + y_2$,然后再送到一组共用的波前校正器。这种串联结构中的控制信号加法器很容易实现。根据图 3 和(7)式、(8)式、(11)式的分析容易得到最终的校正残余信号 e_2 与原始的湍流扰动信号 r_1 、两个系统的测量噪声信号 n_1 、 n_2 的关系为

$$e_2 = E_{F1} E_{B2} r_1 - H_{F1} E_{B2} n_1 - H_{B2} n_2. \quad (12)$$

因为很容易实现 $H_F = H_B$, $E_F = E_B$,所以上面两式实际上是可以等效的,也就是说图 2 和图 3 的结构是完全等效的。

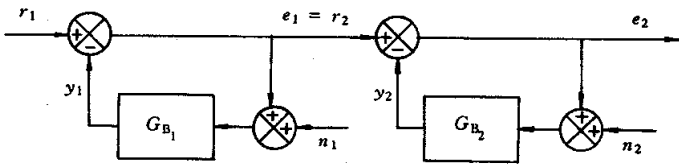


Fig. 2 The tandem construction of two feedback controlled AO systems

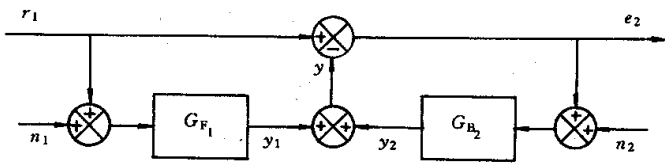


Fig. 3 The modified tandem construction of a feedforward controlled AO system with a feedback controlled AO system

但我们认为图 3 的结构更加合理。因为串联结构中的前馈环节对时间延迟对象控制方便,而前馈环节后面的反馈环节又能有效抑制波前校正器的非线性效应,使整个系统工作稳定可靠。整个串联结

构充分发挥了前馈控制和反馈控制的优点,又克服了它们的缺点。图 3 的串联结构与图 2 相比仅仅增加了一个电信号加法器,但省略了一组自适应光学的核心器件波前校正器,这意味着大幅度降低了光

路的复杂程度和成本。

3.2 两个自适应光学系统串联校正的控制效果

在 $E_F = E_B$ 的条件下上面两种串联结构是等效的,下面不加区分。在不考虑测量噪声的理想情况下,整个串联系统的湍流校正残余方差为

$$\sigma_1^2 = \int_0^{\infty} |E_{B1}(f)|^2 |E_{B2}(f)|^2 F(f) df. \quad (13)$$

假设两个系统的控制特性完全一致, $E_{B1} = E_{B2}$, 则整个串联结构对大气湍流扰动的等效功率谱抑制函数为 $|E_{B1}(f)|^4$ 。把(1)式和(9)式代入上式并利用积分公式

$$\int_0^{\infty} \frac{x^{m-1}}{(1+bx^a)^{m+n}} dx = a^{-1} b^{-m/a} \mathfrak{B}(m/a, m+n-m/a), \quad (14)$$

可得到一个非常有意义的结果:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{f_G}{f_{3dB}} \right)^{5/3} = \left(\frac{f_G}{2.93 f_{3dB}} \right)^{5/3}, \quad (15)$$

(14)式中, $\mathfrak{B}(x_1, x_2)$ 为 beta 函数。即两个相同系统串联后的湍流校正残余方差为单系统的 1/6。串联校正的原理是在控制带宽水平不变的条件下使系统控制器的低频增益大幅度提高。因为湍流扰动的频谱主要分布在中低频段,控制器低频增益提高后校正残余方差会减小。从上式可见双系统的校正效果等效于一个 2.93 倍控制带宽的单系统。与目前的单系统工作方式相比,双系统串联的效果相当于提高了系统的控制器带宽。同理,利用利用 beta 函数的性质,可以得到 3 个、4 个以及 N 个系统串联后的湍流校正残余方差:

$$\sigma_1^2 = \frac{1 \times 7 \times \dots \times [(\alpha(N-2)+1)]}{6^{N-1}(N-1)!} \left(\frac{f_G}{f_{3dB}} \right)^{5/3} \quad (16)$$

$N = 2, 3, \dots$

系统串联个数 N 与湍流校正残余方差 σ_1^2 的关系如图 4 所示。双系统的校正效果增加最明显,而更多系统串联后校正效果增加不大。因为经过二阶系统校正后,控制器的低频增益与湍流扰动信号的功率谱比较匹配,湍流低频扰动已经被抑制得比较干净,再用串联技术提高低频增益没有太大意义。

(15)式、(16)式的结果是根据理想系统的传递函数(9)式得出的。实际自适应光学系统中一般都存在时间延迟 Δt 。对于反馈控制情形,采用时间延迟补偿控制器后,系统的闭环传递函数为^[3~5]

$$H_B(f) = e^{-j2\pi\Delta t f} (1 + jf/f_{3dB})^{-1}. \quad (17)$$

时间延迟对自适应光学系统的控制稳定性和控

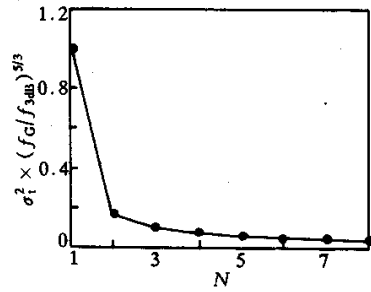


Fig. 4 The residual control error versus the number of adaptive optics system in series

制带宽影响很大。无时间延迟理想系统的闭环控制带宽没有限制,但实际系统的闭环传递函数是有限的^[4]。根据我们的分析,这种情况下系统的湍流校正残余方差与理想情况下的表达式[(10)式]类似^[5]:

$$\sigma_1^2 = (f_G/f_0)^{5/3}, \quad (18)$$

其中等效控制带宽 f_0 是系统实际闭环控制带宽 f_{3dB} 和时间延迟 Δt 的函数。当 Δt 较大时, f_0 仅为 f_{3dB} 的几分之一^[5]。两个由延迟系统串联后的控制器的低频增益会提高,总的湍流校正残余方差也会大幅度下降,但由于控制带宽受限之故,下降幅度将不如(15)式的理想情况那么好。

3.3 串联校正的噪声传递特性

实际系统中不可避免地会存在测量噪声。除了前面分析的时间延迟因素,噪声也会对串联方法的实际校正效果产生影响。根据(11)和(12)两式,在 $E_F = E_B$ 的条件下,两种串联结构中探测噪声带来的校正残余方差同为

$$\sigma_n^2 = \int_0^{\infty} |H_{B1}(f)|^2 |E_{B2}(f)|^2 F_n(f) df + \int_0^{\infty} |H_{B1}(f)|^2 F_n(f) df. \quad (19)$$

前一个系统的输出信号,即被闭环传递函数 H_{B1} 低通滤波后的测量噪声 n_1 与被误差传递函数 E_{B1} 高通滤波后的湍流扰动一起,作为下一个系统的扰动信号被 E_{B2} 再次高通滤波。 H_{B1} 和 E_{B2} 的共同作用相当于带通滤波。带通滤波比低通滤波对测量噪声 n_1 的抑制作用更大,

$$\int_0^{\infty} |H_{B1}(f)|^2 |E_{B2}(f)|^2 F_n(f) df < \int_0^{\infty} |H_{B1}(f)|^2 F_n(f) df. \quad (20)$$

即串联结构中各系统的测量噪声不是简单叠加,后面系统对前面系统的测量噪声有一定抑制作用。这是一个重要的结论。假设前后两个系统采用同样的波前传感器,并且测量噪声功率谱的特性相同,即 $F_{n1} = F_{n2} = F_n$,那么整个串联结构对测量噪声的等效功率谱抑制函数为

$$|H_{B1}(f)|^2 |E_{B2}(f)|^2 + |H_{B2}(f)|^2,$$

整个系统的噪声水平主要由后一个系统决定。

4 仿真结果

利用现有的 61 单元自适应光学系统^[8,9]研究了双系统串联结构的控制效果。系统中有一个高速倾斜镜和一个有 61 个驱动器的变形镜。哈特曼波前探测器有 48 个子孔径。系统采用直接斜率波前复原算法和反馈控制方式工作。61 单元自适应光学系统与一个主口径 0.6 m 的望远镜系统配合,利用一个半导体激光器信标,进行近地面 1 km 水平大气湍流传输与补偿实验。自适应光学系统开环时,利用哈特曼传感器可以探测和记录大气湍流畸变波前信号。CCD 相机的最高采样频率为 2900 Hz,系统最多可以连续采集 10000 帧波前斜率数据。

由于波前控制器中 CCD 相机的采样曝光时间、图像读出时间、处理机复原和控制计算时间等延迟,整个系统的时间延迟约为 CCD 相机采样时间的 3 倍。这个时间延迟严重限制了系统的控制带宽。采用时间延迟补偿控制器后,61 个单元自适应光学系统的有效控制带宽也只有 150 Hz 左右,仅为系统采样频率的 1/20。要想进一步提高控制带宽,必须提高 CCD 相机的采样频率和控制计算机速度两个瓶颈,这是十分困难的。根据前面的分析,如果把两套自适应光学系统串联工作,就相当于拥有了一套高控制带宽的系统,在现有技术条件下这种设想是完全可能实现的。

利用实际测量的大气湍流实验数据,以及 61 单元自适应光学系统上实验测量的复原矩阵数据,可以对图 3 的双系统串联工作方式进行计算机仿真研究。假设两个控制特性相同的单系统串联工作,单系统和双系统对湍流扰动和测量噪声的功率谱抑制函数的理论分析结果分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示。可见,单系统湍流功率谱抑制函数低频段为每 10 倍频程 -40 dB,而双系统达到每 10 倍频程 -80 dB,这意味着对低频湍流扰动的抑制能力更高。从图 5(b) 可见,串联结构中前馈控制部分的测量噪声被带

通滤波,而反馈控制部分的测量噪声被低通滤波,串联结构对两个噪声源的总效果相当于部分频段被有限放大的低通滤波器。

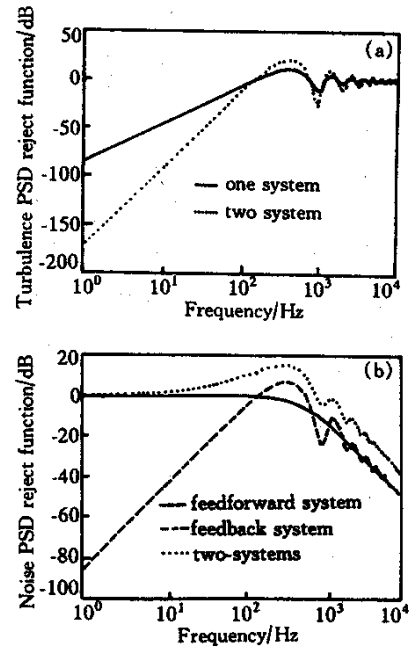


Fig. 5 Comparison of the PSD reject functions for one AO system and two AO systems in series. (a) Turbulence; (b) Noise

仿真计算的结果如图 6 所示。湍流功率谱的高频段接近满足 $-8/3$ 次方的理论关系,高频段的平台反映了测量噪声的影响。在合作信标条件下系统的测量噪声水平很低。经过一个系统校正后,在控制带宽以内的功率谱值下降,意味着湍流扰动信号被部分抑制。经过双系统校正后,湍流扰动信号被进一步抑制。注意到功率谱值的抑制幅度没有如图 5(a) 所示的预计得那么好,这是由于自适应光学系统的实际空间补偿能力不够所致^[9]

以上讨论的是两个相同自适应光学系统串联校正的情况。需要指出的是,在实际应用中两个系统

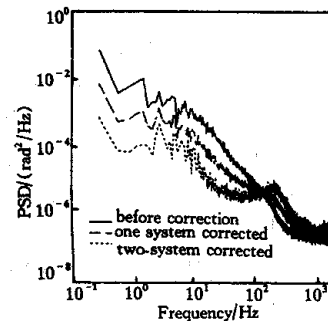


Fig. 6 The PSD results of the simulation on the 61-element AO system

应该有所差别。因为经过第一级系统校正后,残余湍流信号的幅度已经减弱,频谱分布中的低频部分也被部分抑制掉,所以,第二级系统应该比前一级系统的速度更快、控制带宽更宽。同时第二级系统的测量噪声要更小,保证第二级系统也有足够的信噪比。另外从空间域分析,前一级系统应该有较大的探测动态范围,而第二级系统的空间分辨率应更高,例如有更多的变形镜驱动器或探测器子孔径数。具体情况和实际需要不同,组合办法也会有所不同,但都必须把各级间的动态范围、控制带宽、噪声水平等匹配好,两个系统搭配起来才能更充分地发挥作用。总之,自适应光学不必再局限于单一系统使用的情况,本文的分析为自适应光学系统的设计和使用打开了新的思路。

结论 提出了一种用两个自适应光学系统串联校正的方法,分析了这种方法的控制性能和噪声传递特性。这两个自适应光学系统分别采用前馈和反馈布局,利用一组共用的波前校正器串联起来。整个串联结构充分发挥了前馈控制和反馈控制的优点,又克服了他们的缺点。理论分析结果和仿真结果表明,串联结构可以大幅度提高自适应光学系统对大气湍流波前扰动的控制效用。

感谢中国科学院光电研究所的吴旭斌、王春红、鲜浩、李梅和中国科学院安徽光学精密机械研究所的龚知本、王英俭、吴毅等对本工作的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] Tyson R K. *Principles of Adaptive Optics*. San Diego: Academic press, 1991
- [2] Greenwood D P. Bandwidth specification for adaptive optics systems. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(3):390~393
- [3] Parenti R R, Sasiela R J. Laser-guide-star systems for astronomical applications. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1994, **11**(1):288~309
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Roggemann M C, Lee D J. A two deformable mirror concept for correcting scintillation effects in laser beam projection. *Proc. SPIE*, 1998, **3381**:66~75
- [7] Sivokon V P, Vorontsov M A. High-resolution adaptive phase distortion suppression based solely on intensity information. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1998, **15**(1):234~247
- [8] 姜文汉, 王春红, 凌 宁等. 61 单元自适应光学系统. *量子电子学报*, 1998, **15**(2):193~198
- [9] 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

Control Performance Analysis of the Construction of Two Adaptive Optics Systems in Series

Li Xinyang Jiang Wenhan

(The Key Laboratory of the Atmospheric Optics of National High Technology, Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 17 January 2000; revised 24 July 2000)

Abstract: The arrection method of two adaptive optics(AO) systems in series was put forward. An AO system with feed forward control loop was connected to an AO system with feed back control loop by a community wave front corrector. The control performances and the transfer characteristics of noise by this method were analyzed. The method of two AO system in series isn't much more complex technically than normal method of single AO system, but the control performance of the two systems in series is improved greatly in comparison with single AO system. The simulation results with practical experimental data on the 61-element AO system verify the availability of the method.

Key words: adaptive optics; atmosphere turbulence; system in series; control bandwidth; measurement noise