

# 信标及波前探测模式对自适应光学系统 控制性能的影响

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** 自适应光学系统需要信标光来探测波前信息,不同的信标及波前探测模式对系统的带宽和稳定性等性能指标有较大影响。研究系统的性能对合理设计与评价自适应光学系统具有重要意义。根据系统工作时序以及信标光波特性和波前传感器的曝光读出方式,通过机理分析方法建立了自适应光学系统的传递函数模型。推导了系统有效带宽以及相位裕量的计算公式。研究了系统采样频率与控制器参数对系统性能的影响。结果表明,信标与波前探测模式的不同造成系统时间延迟的不同,从而使得系统带宽和稳定性存在差异。

**关键词** 大气光学; 自适应光学; 系统带宽; 波前探测; 系统建模

中图分类号 O436; TP237.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0801003

## Effects of Beacons and Wave-Front Detecting Modes on Control Performance of Adaptive Optics Systems

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** Adaptive optics systems need beacons to detect wave-front information. Different modes of beacons and wave-front detecting have a great influence on the performance criterion such as the system bandwidth and stability. Researching the performance of the system is full of critical meaning to properly design and evaluate a system. Based on the system work flow, the light wave characteristics of beacons, the methods of exposure, read-out of wave-front sensors, and the transfer function models of adaptive systems are built using mechanism analysis methods. The calculation equations of system bandwidth and phase margin are derived. The effects of sample frequency and controller parameter on system performance are studied. Results show that different modes of beacons and wave-front detecting can cause different system time delays, which alter the system bandwidth and stability.

**Key words** atmosphere optics; adaptive optics; system bandwidth; wave-front detecting; system modeling

**OCIS codes** 010.1285; 010.1080; 010.1330

## 1 引 言

自适应光学(AO)系统采用波前传感器(WFS)来探测像差,波前控制器根据探测信息实时计算出波前校正器的控制信号以调整其面形,从而消除像差。WFS的探测过程需要合适的参考信标,参考信标主要有自然

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-10

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)

导星和激光导星两种方式<sup>[1]</sup>。前者为连续信标,后者多为脉冲激光信标。由于实际应用场合和工作环境的变化,系统须合理选用两者之一或两者同时采用作为信标。另一方面,由于WFS内置相机的曝光及读出也存在多种工作方式,比如帧转移型和行转移型波前探测模式,使得实际AO系统时域动态特性较为复杂。

Gaffard<sup>[2]</sup>针对在连续信标条件下工作的Come-On系统,建立了采用帧转移和行转移波前探测模式的离散域传递函数,并简要讨论了时间延迟和高压放大器时间常数对控制带宽的影响。李新阳等<sup>[3-4]</sup>针对连续信标,帧转移型波前探测模式下的系统,利用连续域传递函数模型,建立了有效带宽的理论计算公式,并研究了其控制残余方差特性。随着激光导星技术的逐渐成熟,以及其应用范围的不断扩大,采用脉冲激光信标的情形越来越常见。文献[5-6]从空间域上分析了这类系统根本的性能限制因素。从时间域上讲,AO系统需要足够高的控制带宽来减少或消除由于时间延迟引起的误差<sup>[7]</sup>,近年来,多种先进控制算法相继被提出以解决这一问题<sup>[8-10]</sup>。然而,对不同信标及波前探测模式下工作的AO系统的时域特性缺乏针对性分析。本文介绍了AO系统常见的几种信标及波前探测模式,采用机理分析方法建立了不同模式下的控制模型,分析了系统的带宽和稳定性,并研究了采样频率与控制器参数对系统性能的影响。

## 2 AO系统在不同信标和波前探测模式下的建模

典型的AO控制系统框图可用图1表示,其中 $r$ 是受大气扰动的波前信号, $n$ 表示WFS测量噪声, $c$ 为变形镜(DM)校正补偿量, $\varepsilon$ 为校正残余信号。WFS的输出信号经过波前复原计算模块[传递函数为 $H_{lag}(s)$ ]和控制器[传递函数为 $H_{cc}(s)$ ]模块得到DM的控制信号。一般认为高压放大器(HVA)和DM的带宽足够高,可以忽略其动态特性,即它们的传递函数 $H_{HVA}(s)=H_{DM}(s)=1$ 。零阶保持器(ZOH)的作用是将数字控制信号转换为连续信号,其传递函数为 $H_{ZOH}(s)$ 。系统各部件的传递函数可表示为

$$H_{ZOH}(s) = \frac{1 - \exp(-Ts)}{Ts}, \tag{1}$$

$$H_{lag}(s) = \exp(-\tau_0 s), \tag{2}$$

$$H_{cc}(s) = \frac{K_c}{1 - z^{-1}} \Big|_{z = \exp(-Ts)} = \frac{K_c}{1 - \exp(-Ts)}, \tag{3}$$

$$H_{HVA}(s) = H_{DM}(s) = 1. \tag{4}$$

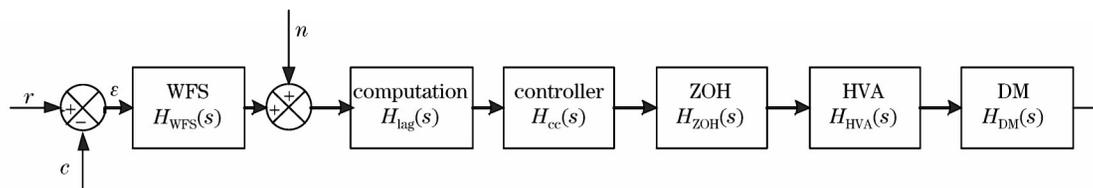


图1 典型自适应光学系统的方框图

Fig.1 Block diagram of a typical AO system

WFS的一帧数据输出时间间隔为 $T$ ,则系统的帧频 $f_{AO} = 1/T$ 。为控制器的增益系数, $\tau_0$ 为系统的计算延迟(包括波前复原计算、控制电压计算等),包括从WFS读出结束到开始写入控制信号的时间。

AO系统常见的信标探测模式如表1所示。为了保证系统的实时性,波前处理机采用流水处理和并行处理技术相结合的方法<sup>[11]</sup>。根据WFS内置相机的曝光及读出方式、波前处理机的时序控制以及导星光波特性等方面进行机理分析认为,AO系统在不同信标探测模式下工作时,WFS的传递函数模型和系统时间延迟是不同的。下面将分别对表1所示的四种情形进行详细分析。

表1 几种常见的AO系统信标探测模式

Table 1 Some popular detecting modes of AO systems

| Camera read-out methods | Reference sources  | Operating modes                      |
|-------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Frame transfer          | Natural guide star | Continuous light, frame transfer(M1) |
|                         | Laser beacon       | Laser pulse, frame transfer(M2)      |
| Line transfer           | Natural guide star | Continuous light, line transfer(M3)  |
|                         | Laser beacon       | Laser pulse, line transfer(M4)       |

2.1 模式一:连续信标,帧转移型波前探测

WFS内置相机在帧转移型波前探测模式下,全部像素同时曝光,曝光和帧转移过程在一个帧周期T时间内完成。帧转移过程表示将数据从曝光区域转移到读出存储区,其时间可以忽略。在连续光信标条件下,曝光时光子积累过程可表示为  $\frac{1 - \exp(-sT)}{T_s}$ , 读出过程中数据没有发生变化,可看作是纯时间延迟过程,表示为  $\exp(-sT)$ 。系统时序图可用图2表示。 $\tau_0$ 为波前复原和控制计算的时间延迟, $\tau$ 为系统总的平均延迟。WFS的传递函数为

$$H_{WFS} = \frac{1 - \exp(-sT)}{T_s} \exp(-sT). \quad (5)$$

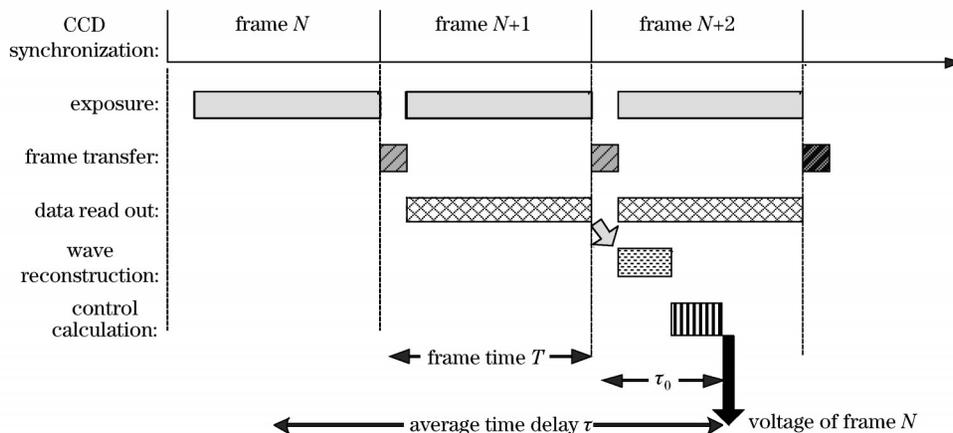


图2 连续光,帧转移工作模式(M1)时序图

Fig.2 Time sequence diagram of continuous light, frame transfer operating mode (M1)

对采用该模式工作的AO系统已有较成熟的研究,包括波前处理机的研制<sup>[11]</sup>,控制特性的分析<sup>[3-4]</sup>以及优化控制参数的设计<sup>[12]</sup>等。

2.2 模式二:脉冲信标,帧转移型波前探测

该情形下,曝光时刻是固定的,激光脉冲的持续时间远小于帧周期,则可以忽略曝光时长。若激光脉冲频率高于相机帧频,则可认为相机曝光时积累了多个激光脉冲,但帧频保持不变,这与2.1节中的情形类似。激光脉冲有可能出现在一个帧周期的任意时刻。在图3中,激光脉冲恰好被同步到进行帧转移之前,并且激光脉冲频率与相机帧频相等。显然地,将激光脉冲到达时刻恰好同步到帧转移之前,可至多减少一个帧周期的时间延迟。WFS的传递函数为

$$H_{WFS} = \exp(-\tau_2 s), \tau_2 = T - 2T_s. \quad (6)$$

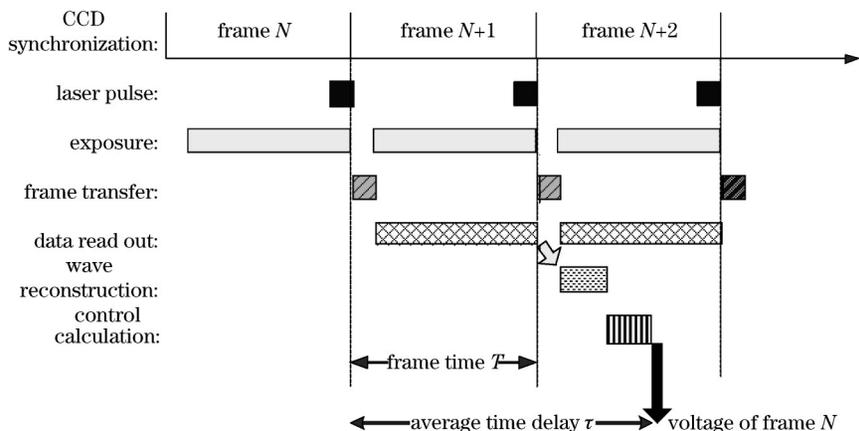


图3 脉冲光,帧转移工作模式(M2)时序图

Fig.3 Time sequence diagram of laser pulse, frame transfer operating mode (M2)

2.3 模式三:连续信标,行转移型波前探测

在行转移型波前探测模式下,各个像素行逐次曝光,曝光完成后开始读出该行的数据,各行曝光时间相等。

不妨设总的像素行为1,一帧读出时间为 $T$ ,则一个像素行读出时间为 $T/L$ ,那么在逻辑顺序之后的像素行相对于相邻的前一像素行来说,曝光时刻偏移了 $T/L$ 。为简化分析且不失实际意义,设总的子孔径行数为 $L$ ,假设单子孔径行对应的像素行同时曝光同时读出,则单个子孔径行的读出时间为 $T/L$ ,类似地,后曝光的子孔径行相对于相邻的前一子孔径行曝光时刻偏移了 $T/L$ 。该情形下的系统时序如图5所示。曝光过程表示为 $\frac{1 - \exp(-sT)}{Ts}$ ,各子孔径行从读出开始到AO计算间存在不同的延时,对于第 $i$ 个子孔径行,其延时为 $\exp\left\{-s\left[T - \frac{(i-1)T}{L}\right]\right\}$ ,WFS的传递函数为

$$H_{\text{WFS}} = \frac{1 - \exp(-sT)}{Ts} \exp\left\{-s\left[T - \frac{(i-1)T}{L}\right]\right\}. \quad (7)$$

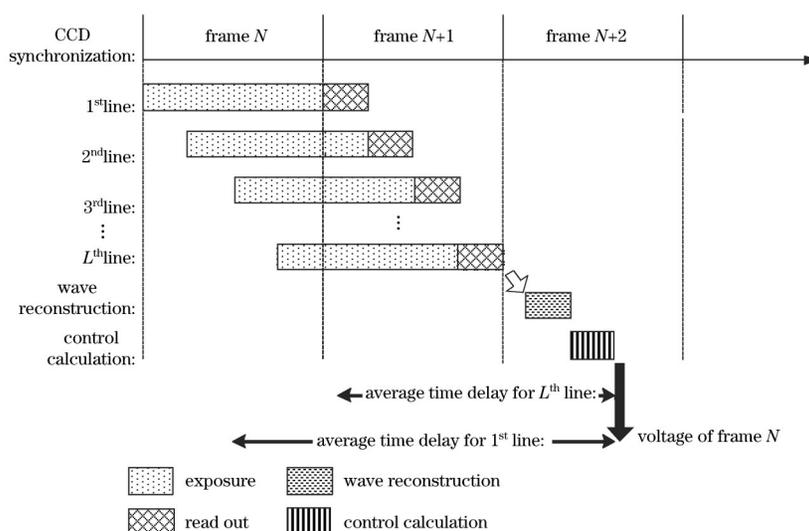


图4 连续光,行转移工作模式(M3)时序图

Fig.4 Time sequence diagram of continuous light, line transfer operating mode (M3)

#### 2.4 模式四:脉冲信标,行转移型波前探测

图5给出了在脉冲激光信标,行转移型波前探测模式下,激光脉冲恰好同步到第一个子孔径行开始读出时的情形,结合2.2、2.3节的讨论,对第 $i$ 个子孔径行,其曝光时刻相对于前一子孔径行往后偏移了 $T/L$ 。同样地,激光脉冲有可能出现在一个帧周期的任意时刻,对图5所示的情形,第 $i$ 个子孔径行从曝光时刻开始到一帧

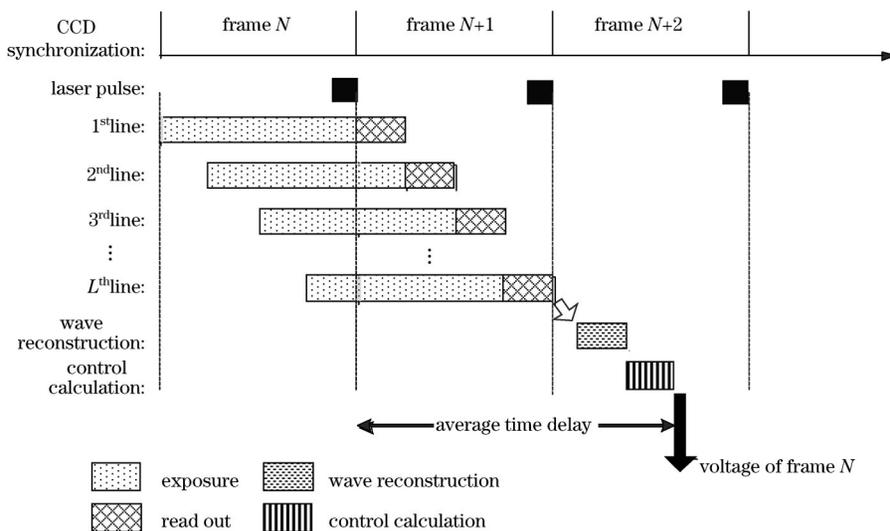


图5 脉冲光,行转移工作模式(M4)时序图

Fig.5 Time sequence diagram of laser pulse, line transfer operating mode (M4)

读出结束,其延时近似可描述为  $\exp\left\{-s\left[T - \frac{(i-1)T}{L}\right]\right\}$ 。若激光脉冲在第一个子孔径行开始曝光是到达,容易得出,其延时可近似描述为  $\exp\left\{-s\left[2T - \frac{(i-1)T}{L}\right]\right\}$ 。综上所述,WFS的递函数为

$$H_{\text{WFS}} = \exp\left\{-s\left[\tau_4 - \frac{(i-1)T}{L}\right]\right\}, \tau_4 = T \sim 2T. \quad (8)$$

### 3 系统带宽及稳定性分析

第2节分析了典型AO控制系统的工作时序,并建立了不同信标及波前探测模式下WFS的不同传递函数模型,结合图1给出的控制结构,不难得出系统开环传递函数  $H_{\text{ol}}$  和闭环传递函数  $H_{\text{cl}}$  分别为

$$H_{\text{ol}} = H_{\text{WFS}} H_{\text{lag}} H_{\text{cc}} H_{\text{ZOH}} H_{\text{HVA}} H_{\text{DM}}, \quad (9)$$

$$H_{\text{cl}} = \frac{H_{\text{ol}}}{1 + H_{\text{ol}}}, \quad (10)$$

定义

$$H_{\text{sys}} = \frac{H_{\text{ol}}}{H_{\text{WFS}}} = H_{\text{lag}} H_{\text{cc}} H_{\text{ZOH}} H_{\text{HVA}} H_{\text{DM}}. \quad (11)$$

残余信号的均方值为

$$\sigma_\varepsilon^2 = \langle \varepsilon^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} |H_r(f)|^2 \gamma_{\text{tur}}(f) df + \int_{-\infty}^{\infty} |H_n(f)|^2 \gamma_{\text{Noise}}(f) df, \quad (12)$$

式中

$$H_r(f) = \frac{1}{1 + H_{\text{ol}}}, \quad (13)$$

$$H_n(f) = \frac{H_{\text{sys}}}{1 + H_{\text{ol}}}, \quad (14)$$

式中  $H_r(f)$ 、 $H_n(f)$  分别为功率谱抑制函数和噪声传递函数。 $\gamma_{\text{tur}}(f)$  和  $\gamma_{\text{Noise}}(f)$  分别为输入扰动  $a$  和测量噪声  $n$  的功率谱。根据(12)式可计算使得  $\sigma_\varepsilon^2$  最小的最优控制参数<sup>[12]</sup>,由此可见,第2节精确分析了AO系统在不同工作模式下的传递函数对计算最优控制参数是十分有利的。下面将分析系统的稳定性和带宽。定义功率谱抑制函数的剪切频率为误差带宽  $f_c$ ,闭环传递函数过-3 dB点的频率为闭环带宽  $f_{3\text{dB}}$ 。从残余信号  $\varepsilon$  均方值的角度讲, $f_c$  表征系统对  $a$  的抑制能力, $f_{3\text{dB}}$  表征系统的噪声的抑制能力<sup>[4]</sup>。通常,采用开环传递函数的剪切频率  $f_g$  来评价系统的响应速度,相位裕量  $\gamma$  评价系统的稳定性。根据上述定义,有

$$|H_r(f_c)|^2 = 1, \quad (15)$$

$$|H_{\text{cl}}(f_{3\text{dB}})|^2 = \frac{1}{2}, \quad (16)$$

$$|H_{\text{ol}}(f_g)|^2 = 1, \quad (17)$$

$$\gamma = \pi + \phi[H_{\text{ol}}(f_g)], \quad (18)$$

式中  $\phi(\cdot)$  表示取辐角运算。根据以上各式,并利用  $\exp(-s\tau) \approx 1 - s\tau$  和  $\frac{1 - \exp(-sT)}{Ts} \approx \exp\left(-\frac{T}{2}s\right)$  得到

$$f_g = \frac{K_c}{2\pi T}, \quad (19)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \frac{K_c}{T} \tau, \quad (20)$$

$$f_c = \frac{K_c/T}{2\pi \sqrt{1 - (1 - \frac{K_c}{T} \tau)^2}}, \quad (21)$$

$$f_{3\text{dB}} = \frac{K_c/T}{2\pi(1 - \frac{K_c}{T} \tau)}. \quad (22)$$

虽然对于不同的控制对象模型,根据(19)~(22)式,得到的有效带宽以及相位裕量的计算公式具有相同的形式,但其中回路总的等效延时 $\tau$ 是不一样的,表2给出了不同信标及波前探测模式下, $\tau$ 的不同取值。

表2 不同模式下 AO 系统的时间延迟

Table 2 Time delay of AO systems under various modes

| Mode   | M1                      | M2                | M3                                         | M4                                   |
|--------|-------------------------|-------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|
| $\tau$ | $\frac{3T}{2} + \tau_0$ | $\tau_2 + \tau_0$ | $\frac{3T}{2} + \tau_0 - \frac{(i-1)T}{L}$ | $\tau_4 + \tau_0 - \frac{(i-1)T}{L}$ |

为了保证系统闭环稳定控制,一般要求相位裕量满足下列条件

$$\gamma \geq \frac{\pi}{3}. \quad (23)$$

由(19)~(23)式,得到了与文献[3]相同的结论,即系统带宽 $f_c$ 和 $f_{3dB}$ 均受到时间延迟 $\tau$ 的限制。如下式所示:

$$f_c \leq \frac{1}{10.6\tau}, f_{3dB} \leq \frac{1}{5.7\tau}. \quad (24)$$

由表2可知,对行转移型波前探测模式,各子孔径行时间延迟不同;对脉冲激光信标模式,激光脉冲到达时刻的随机性也会产生时间延迟的不同。所以,针对各种模式的不同特性,具体分析其稳定控制条件下的带宽特性是很有必要的。

假定计算延迟 $\tau_0 = \frac{T}{2}$ ,WFS总的子孔径行数 $L=10$ 。定义M2模式中, $\tau_2$ 取最小值 $T$ 和最大值 $2T$ 的情形分别表示为M2-fast和M2-slow。同理,对M4模式有M4-fast和M4-slow。下面采用数值仿真方法,根据(20)~(22)式的计算公式以及表2的结果,可得到当 $\gamma = \frac{\pi}{3}$ 时,各模式获得的误差带宽 $f_c$ 和闭环带宽 $f_{3dB}$ 与采样频率的关系分别如图6和图7所示。其中 $i$ 值表示第 $i$ 个子孔径行。

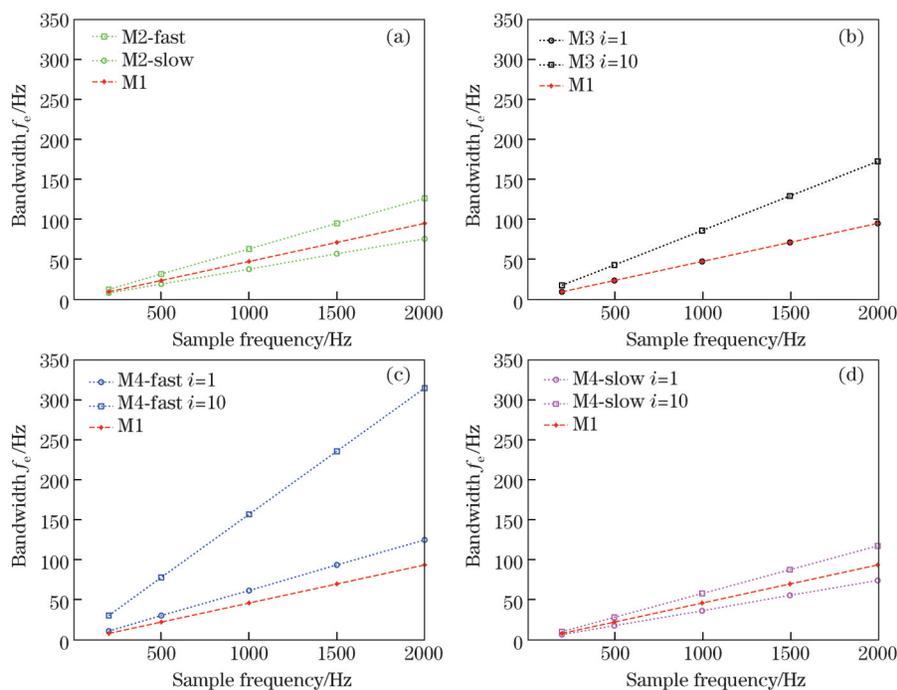


图6 带宽 $f_c$ 与采样频率 $f_s$ 的关系。(a) M1与M2;(b) M1与M3;(c) M1与M4-fast;(d) M1与M4-slow  
Fig.6 Relationships between the sample frequency  $f_s$  and band widths  $f_c$ . (a) M1 and M2; (b) M1 and M3; (c) M1 and M4-fast; (d) M1 and M4-slow

从图6和图7的结果可知,相同采样频率条件下,不同信标与探测模式获得的带宽 $f_c$ 和 $f_{3dB}$ 是不一样的。对比图6(a)和图7(a)中M2-fast与M2-slow的带宽,容易发现,采用脉冲激光信标,帧转移型波前探测模式时,将激光脉冲到达时刻恰好同步到刚开始数据读出时即M2-fast有利于提高系统带宽。另外,对比两图中M2-fast与M1的带宽,可以看出,M2-fast模式获得的带宽较高。如在图6(a)中,当 $f_s=1000$  Hz时,M2-fast模式下误差带宽约为63 Hz,而M2-slow模式下约为38 Hz,前者约比后者高65%,M1模式下约为47 Hz。类似地,

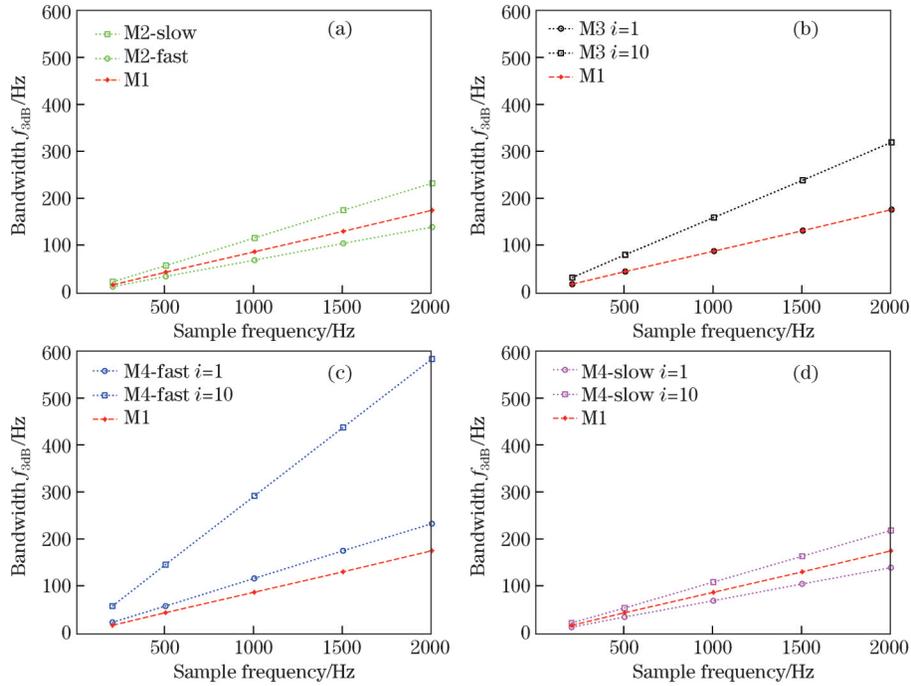


图 7 带宽  $f_{3dB}$  与采样频率  $f_s$  的关系。(a) M1 与 M2;(b) M1 与 M3;(c) M1 与 M4-fast;(d) M1 与 M4-slow  
 Fig.7 Relationships between the sample frequencies  $f_s$  and band width  $f_{3dB}$ . (a) M1 and M2; (b) M1 and M3;  
 (c) M1 and M4-fast; (d) M1 and M4-slow

对比图 6(c)和(d)或者图 7(c)和(d)可知,脉冲激光信标,行转移型波前探测模式下,同样有必要将激光脉冲同步到刚开始数据读出时刻以减小时间延迟,从而提高系统带宽。

图 6(b)和图 7(b)的结果表明,连续信标行转移波前探测模式下,满足稳定控制条件时各子孔径行间有效带宽存在差异,先读出的子孔径行比后读出的子孔径行带宽低。如图 6(b)中,当  $F_s=1000$  Hz 时,第一个子孔径行误差带宽 47Hz,第  $L$  行带宽为 86Hz。直观上看,可针对不同子孔径行设计不同的控制参数以保证系统充分稳定时尽可能地提高带宽。然而,由于不同子孔径行控制特性不同,实际工作时有差异,加上噪声等因素的影响,可能会对稳定工作造成不利影响。

下面讨论在同样控制器增益,以及相同采样频率  $F_s=1000$  Hz 条件下,各模式间系统带宽及稳定性的差异。取 M1 模式下使得  $\gamma = \frac{\pi}{3}$  时的控制参数,即  $K_c=0.26$ 。表 3 给出了四种模式下系统的有效带宽及相位裕量。结果表明,对行转移型波前探测模式,如 M4-slow ( $\tau_4 = 2T$ ),对一些先读出的子孔径行,如  $i=1$ ,其相位裕量可能达不到稳定控制条件,这说明,采用行转移型波前探测时,若对所有子孔径行采用相同的控制参数,必须采用使得延时最大者充分稳定工作时的控制参数。此外,M2-fast ( $\tau_2 = T$ ) 的带宽与稳定性比 M1 的要好。

表 3 不同工作模式下 AO 系统的带宽,  $K_c=0.26, F_s=1000$  Hz

Table 3 Bandwidth of AO systems under various operating modes,  $K_c=0.26, F_s=1000$  Hz

| Parameter              | M1   | M2           |               | M3    |       | M4           |       |               |       |
|------------------------|------|--------------|---------------|-------|-------|--------------|-------|---------------|-------|
|                        |      | $\tau_2 = T$ | $\tau_2 = 2T$ | $i=1$ | $i=L$ | $\tau_4 = T$ |       | $\tau_4 = 2T$ |       |
|                        |      |              |               |       |       | $i=1$        | $i=L$ | $i=1$         | $i=L$ |
| $f_c$ /Hz              | 47.4 | 52.4         | 44.4          | 47.4  | 59.3  | 52.4         | 77.4  | 44.4          | 51.2  |
| $f_{3dB}$ /Hz          | 87.5 | 68.6         | 120.6         | 87.5  | 58.5  | 68.6         | 49.4  | 120.6         | 71.7  |
| $\gamma$ /( $^\circ$ ) | 60.0 | 67.5         | 52.5          | 60.0  | 73.5  | 67.5         | 81.0  | 52.5          | 66.0  |

## 4 结 论

在建立了不同信标和波前探测模式下 AO 系统的控制模型的基础上,分析了系统的带宽和稳定性。结果表明,对脉冲激光信标,将激光脉冲到达时刻与波前传感器开始数据读出时刻同步至多可提高系统带宽

约 65%; 对行转移型波前探测方式, 由于各子孔径行间存在延时不同, 可对各子孔径行采用不同的控制参数, 使得各自在充分稳定条件下尽可能提高系统带宽。若对不同子孔径行采用相同的控制参数, 则需针对延时较大的子孔径行设计控制参数。此时, 采用连续信标获得的带宽与帧转移型波前探测模式相同。采用脉冲激光信标时, 若将激光脉冲到达时刻与波前传感器开始数据读出时刻同步, 获得的带宽比帧转移型波前探测模式的要高。反之, 则得到相反结论: 采用脉冲激光信标比采用连续信标可能获得更高的带宽。

虽然实际工作中, WFS 内置相机的曝光及读出方式更为复杂, 然而, 可以参考本文的模型建立方法和计算方法分析实际 AO 系统的控制特性。本文的分析对设计 AO 系统以及分析实际 AO 系统性能具有指导意义。

### 参 考 文 献

- 1 John W Hardy. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes[M]. Oxford: Oxford University Press, 1998: 309-311.
- 2 J P Gaffard. Adaptive optics: effects of sampling rate and time lags on the closed loop bandwidth[C]. SPIE, 1990, 1271: 33-50.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 David L. Fried John F. Belsher. Analysis of fundamental limits to artificial-guide-star adaptive-optics-system performance for astronomical imaging[J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(1): 277-287.
- 6 D T Gavel, J R Morris. Systematic design and analysis of laser-guide-staradaptive-optics systems for large telescopes[J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(2): 914-924.
- 7 Darryl P. Greenwood. Bandwidth specification for adaptive optics systems[J]. J Opt Soc Am A, 1977, 67(3): 390-393.
- 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 R N Paschall, D J Anderson. Linear quadratic Gaussian control of a deformable mirror adaptive optics system with time-delayed measurements[J]. Appl Opt, 1993, 32(31): 6347-6358.
- 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 Wang Chunhong, Li Mei, Li Anna. 2900Hz high speed real time wavefront processor[J]. Opto-Electronic Engineering, 1998, 25(A12): 25-28.  
王春红, 李 梅, 李安娜. 帧频 2900Hz 的高速实时波前处理机[J]. 光电工程, 1998, 25(A12): 25-28.
- 12 E Gendron, P Le'na. Astronomical adaptive optics I. Modal control optimization[J]. Astron Astrophys, 1994, 29(1): 337-347.

栏目编辑: 何卓铭