

文章编号: 0253-2239(2006)04-0487-4

应用闭环残余倾斜数据分析自适应光学系统 精跟踪回路性能

吴碧琳^{1,2} 饶长辉¹ 张雨东¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 在自适应光学系统中,目标跟踪误差主要由未完全补偿的大气湍流扰动和望远镜抖动引起的跟踪误差以及系统的倾斜噪声误差两部分组成。提出一种用闭环残余倾斜数据计算倾斜噪声误差、大气湍流扰动和望远镜抖动引起的跟踪误差以及系统跟踪残余误差的新方法,并用此方法分析 61 单元自适应光学系统中精跟踪回路的性能。

关键词: 自适应光学; 系统跟踪残余误差; 噪声误差; 闭环残余倾斜数据

中图分类号: O432 文献标识码: A

Performance Analysis for Fine Tracking Loop for Adaptive Optics System with Closed-Loop Residual Tilt Data

Wu Bilin^{1,2} Rao Changhui¹ Zhang Yudong¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: In an adaptive optical system, the object tracking error primarily consists of the tracking error induced by the incompletely compensated atmospheric turbulence and the telescope vibration and the tilt noise error. A new method with the use of closed-loop residual tilt data is proposed to evaluate the tilt noise error, the tracking error due to the atmospheric turbulence and the vibration of the telescope, and the residual tracking error. This method is used to analyze the fine tracking loop performance of the 61-element adaptive optical system.

Key words: adaptive optics; residual error of system tracking; noise error; closed-loop residual tilt data

1 引 言

自适应光学技术能够实时测量并校正受到大气湍流扰动的光学相位波前,从而在天文学观测、激光传输等领域得到广泛应用^[1~3]。实际应用的自适应光学系统由跟踪回路和高阶误差校正回路两部分组成。跟踪回路由精跟踪回路和高精跟踪回路组成。精跟踪回路用来校正大气湍流扰动和望远镜抖动引起的跟踪误差,高精跟踪回路用来校正精跟踪回路的残余误差,高阶误差校正回路用来校正大气湍流扰动和望远镜抖动引起的波前扰动的高阶分量。

通常情况下,用精跟踪回路开环时采集的倾斜

数据计算大气湍流扰动和望远镜抖动引起的跟踪误差;用精跟踪回路闭环时采集的残余倾斜数据计算系统跟踪残余误差。这种方法所得的开环误差和闭环误差不是同一时刻的误差。此外,系统开环时采集的倾斜数据和闭环时采集的残余倾斜数据均含有探测器的测量噪声。因此,直接根据开环倾斜数据计算得到的并不完全是大气湍流扰动和望远镜扰动引起的跟踪误差。同样,直接根据闭环残余倾斜数据计算得到的也并不完全是系统的跟踪残余误差。为了解决上述问题,本文提出了用闭环残余倾斜数据分析系统误差的方法,其主要思想是用闭环残余

作者简介: 吴碧琳(1981~),女,安徽含山人,中国科学院光电技术研究所博士研究生,主要从事自适应光学和图像处理研究。E-mail: fivetozero@sina.com

收稿日期: 2005-03-09; 收到修改稿日期: 2005-06-16

倾斜数据重构开环倾斜数据,再用闭环残余倾斜数据和重构的开环倾斜数据计算大气湍流扰动和望远镜抖动引起的跟踪误差、系统跟踪残余误差及倾斜噪声误差。由此所得的大气湍流扰动和望远镜抖动引起的跟踪误差和系统跟踪残余误差是同一时刻的误差,并剔除了倾斜噪声的影响。在此基础上将此种方法应用于实际自适应光学系统中的精跟踪回路误差分析。

2 自适应光学系统精跟踪回路结构及其控制模型

2.1 精跟踪回路的结构及控制模型

如图 1 所示,精跟踪回路由精跟踪探测器(FTS)、跟踪处理机(TP)和高速倾斜镜(TM)等组成。其中跟踪处理机完成斜率计算、控制算法,并为高压放大器(HVA)输出控制电压。

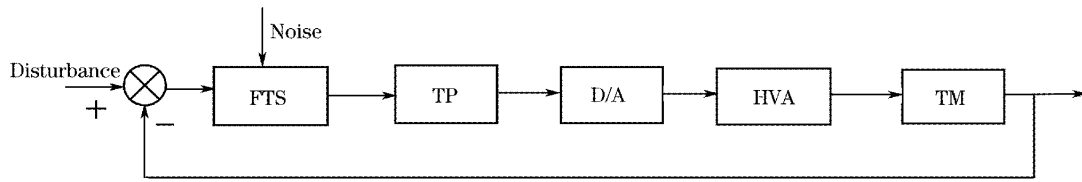


图 1 精跟踪回路结构图

Fig. 1 Block diagram of the fine tracking loop

精跟踪回路控制模型如图 2 所示,其中 $r(t)$ 为受扰动的总体倾斜信号, $n(t)$ 为系统噪声在精跟踪探测器上的综合响应信号, $e(t)$ 为补偿后残余信号, $c(t)$ 为波前补偿信号,为精跟踪探测器测得的补偿

后残余信号。精跟踪探测器的传递函数为 $W(s)$, $P(s)$ 为跟踪处理机的传递函数, $D(s)$ 为的数-模转换器(D/A)、高压放大器(HVA)和高速倾斜镜(TM)的传递函数之积。

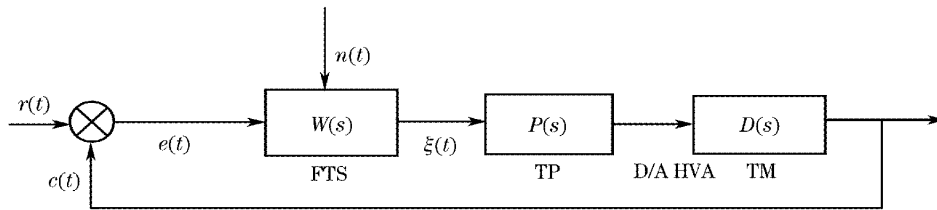


图 2 精跟踪回路控制模型

Fig. 2 Block diagram of the control system

2.2 从闭环倾斜数据重构开环倾斜数据

根据图 2,各个模块传递函数间的关系为

$$C(s) = \frac{H(s)}{1 + H(s)} [R(s) + N(s)], \quad (1)$$

$$\xi(s) = \frac{W(s)}{1 + H(s)} [R(s) + N(s)], \quad (2)$$

式中 $H(s) = W(s)P(s)D(s)$ 为系统开环传递函数, $C(s)$ 、 $R(s)$ 、 $N(s)$ 、 $\xi(s)$ 分别为 $c(t)$ 、 $r(t)$ 、 $n(t)$ 、 $\xi(t)$ 所对应的传递函数。

(1) 式与(2) 式之和为

$$C(s) + \xi(s)/W(s) = R(s) + N(s). \quad (3)$$

对于采用 CCD 作为光电探测器件的精跟踪探测系统,在重构由大气湍流扰动、望远镜抖动及倾斜噪声引起的开环倾斜时,需考虑跟踪探测器的延时,即一帧的曝光延时和一帧的读出图像延时。由此(3)式可写为

$$c(t) + \xi(t+2) = r(t) + n(t), \quad (4)$$

令

$$\text{rec}(t) = r(t) + n(t), \quad (5)$$

得到

$$\text{rec}(t) = \xi(t+2) + c(t). \quad (6)$$

以倾斜为参考,由(6)式可知大气湍流扰动、望远镜抖动以及倾斜噪声引起的倾斜可由闭环时测得的残余倾斜和闭环时的电压数据重构的校正量而得:

$$s_{\text{rec}}(t) = s_{\text{closed}}(t+2) + s_{\text{correct}}(t), \quad (7)$$

式中 $s_{\text{closed}}(t)$ 为系统闭环时的残余倾斜信号时间序列, $s_{\text{correct}}(t)$ 为根据倾斜镜上所加电压折算得到的倾斜校正信号时间序列, $s_{\text{rec}}(t)$ 为重构的开环倾斜信号时间序列,即由大气湍流扰动、望远镜抖动及引起的倾斜信号时间序列。

3 大气湍流和望远镜抖动引起的误差和倾斜噪声误差估计

3.1 倾斜噪声误差(σ_{noise}^2)估计

易得

$$\sigma_{\text{rec}}^2 = \sigma_{\text{turb_open}}^2 + \sigma_{\text{noise}}^2, \quad (8)$$

式中 $\sigma_{\text{turb_open}}^2$ 为开环时大气湍流扰动和望远镜抖动引起的倾斜的方差, σ_{rec}^2 为重构的开环倾斜数据的方差。

σ_{noise}^2 的值是通过计算 $C_{\text{rec}}(\tau)$ 而得, 其中 $C_{\text{rec}}(\tau)$ 定义为

$$C_{\text{rec}}(\tau) = \langle s_{\text{rec}}(t)s_{\text{rec}}(t+\tau) \rangle, \quad (9)$$

假设在时间域上, σ_{noise}^2 不是自相关的, 则^[4]

$$C_{\text{rec}}(\tau) = C_{\text{turb_open}}(\tau) + \sigma_{\text{noise}}^2 \delta(\tau). \quad (10)$$

根据(9)式得出 $C_{\text{rec}}(\tau)$ 后, 对前五个点(除去第一个点)进行拟合, 再由 $\delta(\tau)$ 函数的性质外推可得 $C_{\text{turb_open}}(0)$ 。

将 $C_{\text{turb_openloop}}(0)$ 代入(10)式得

$$\sigma_{\text{noise}}^2 = C_{\text{rec}}(0) - C_{\text{turb_open}}(0), \quad (11)$$

图3中虚线为重构的开环倾斜数据的自相关值, 实线为自相关值的拟合曲线, 计算所得的自相关值和拟合的自相关值在零点的差值即为倾斜噪声方差。

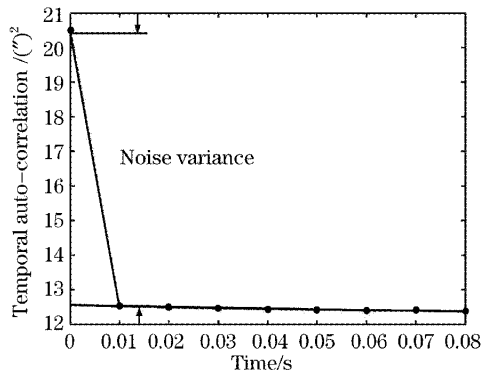


图3 拟合曲线 $C_{\text{turb}}(\tau)$

Fig. 3 Polynomial fit of $C_{\text{turb}}(\tau)$

3.2 大气湍流扰动和望远镜抖动引起的跟踪误差($\sigma_{\text{turb_openloop}}^2$)估计

由 $s_{\text{rec}}(t)$ 可得开环倾斜数据方差 σ_{rec}^2 , 将 σ_{rec}^2 代入(8)式可计算出大气湍流扰动和望远镜抖动引起的跟踪误差

$$\sigma_{\text{turb_open}}^2 = \sigma_{\text{rec}}^2 - \sigma_{\text{noise}}^2. \quad (12)$$

3.3 系统跟踪残余误差($\sigma_{\text{turb_closed}}^2$)估计

精跟踪回路闭环误差主要由系统跟踪残余误差和精跟踪探测器引入的噪声误差构成, 由此可得

$$\sigma_{\text{turb_closed}}^2 = \sigma_{\text{close}}^2 - \sigma_{\text{noise}}^2, \quad (13)$$

式中 σ_{close}^2 为闭环时所采集残余倾斜数据的方差。

4 实验结果

我们在云南天文台建立了一套自适应光学系统^[2,3], 望远镜的口径为 1.06 m, 其精跟踪回路主要包括一块大行程高速倾斜镜、ICCD 跟踪探测器和跟踪控制器等。采集星号为 20、星等为 3.27 的恒星闭环残余倾斜数据, 根据上文提出的方法对该系统的精跟踪回路性能进行了分析。

图4为闭环时测得的残余倾斜数据以及由闭环残余倾斜数据重构的开环倾斜数据, 并分别计算了开、闭环时倾斜数据的均方根值(rms)和峰谷值(pv), 同时也给出了根据本文所提出的方法计算得到的噪声均方根值。

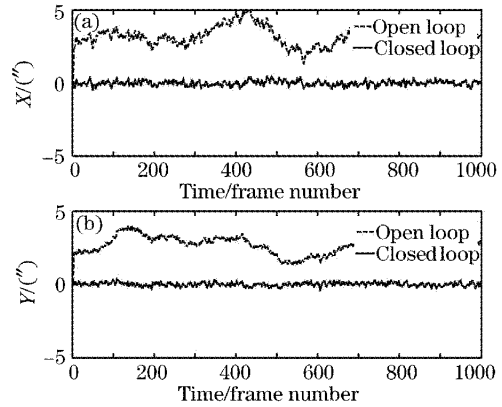


图4 斜率数据时间序列(a) X方向, (b) Y方向

Fig. 4 Time series of tilt data (a) axis X, (b) axis Y

如图4所示, 开环 X 方向倾斜的均方根值为 1.7307 arcsec, 峰谷值为 5.486"; Y 方向均方根值为 1.5043", 峰谷值为 4.3125"。闭环 X 方向倾斜的均方根值为 0.12089", 峰谷值为 1"; Y 方向均方根值为 0.094316", 峰谷值为 0.875"。X 方向噪声均方根值为 0.067468", Y 方向噪声均方根值为 0.046085"。

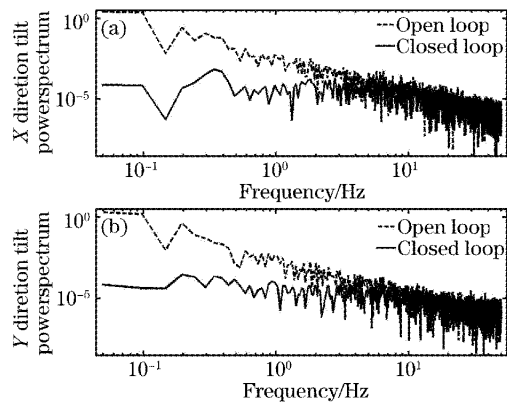


图5 开环以及闭环倾斜数据功率谱(a) X方向, (b) Y方向

Fig. 5 Power spectrum of tilt data for open loop and closed-loop (a) axis X, (b) axis Y

图 5 为开环和闭环时 X 方向以及 Y 方向功率谱曲线。

闭环功率谱由闭环时测得的残余倾斜数据计算而得,开环功率谱由重构的开环倾斜数据计算而得,无论是开环功率谱还是闭环功率谱都由大气湍流扰动、望远镜抖动及系统噪声组成。

5 结 论

本文提出用闭环残余倾斜数据重构开环倾斜数据,再用重构的开环倾斜数据计算噪声误差、闭环残余误差、大气湍流扰动和望远镜抖动引起的误差的新方法,此种方法解决了开环误差和闭环误差不能同时测得的问题,并且剔除了噪声的影响。实验结

果表明该方法是正确有效的。

参 考 文 献

- 1 Wenhan Jiang, Guomao Tang, Mingquan Li *et al.*. 21-element infrared adaptive optics system at 2.16-m telescope[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3762**: 142~149
- 2 Changhui Rao, Wenhan Jiang, Yudong Zhang *et al.*. Upgrade on 61-element adaptive optical system for 1.2-m telescope of Yunnan observatory[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5490**: 943~953
- 3 Changhui Rao, Wenhan Jiang, Yudong Zhang *et al.*. Performance on the 61-element upgraded adaptive optical system for 1.2-m telescope of the Yunnan observatory[J]. *Proc. SPIE*, 2004, **5639**: 11~20
- 4 T. Fusco, G. Rousset, D. Raband *et al.*. NAOS on-line characterization of turbulence parameters and adaptive optics performance[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2004, (6): 585~596
- 5 Jiang Wenhan, Li Huagui. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[C]. *Proc. SPIE*, **1271**: 82~93