

文章编号 1004-924X(2018)01-0048-07

机动式车载自适应光学波前处理器的设计

贾建禄*, 赵金宇, 王建立, 王 帅, 王 亮, 吴庆林
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为满足机动式车载自适应光学系统的需求,设计了专用的波前处理器。该波前处理器采用波前处理主板、波前处理子板和 DA 转化板相结合的硬件架构,由光纤作为通信载体。在满足功能需求的同时提高了系统的可靠性;波前处理器是自适应光学系统闭环控制的运算中心,其运算延时直接影响系统的控制带宽。本文提出一种基于 FPGA 的多线流水自适应光学实时波前处理方法,实现了波前斜率计算、复原运算和控制运算。结果表明:对于两级精密跟踪,97 个子孔径以及 97 单元变形镜的自适应光学系统,系统处理延时为 506.25 μ s,满足系统 1 500 Hz 的实时波前处理需求。

关键词:自适应光学;波前传感器;波前处理;现场可编程门阵列(FPGA)

中图分类号: O439; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182601.0048

Design of mobile vehicle-based adaptive optical wave-front processor

JIA Jian-lu*, ZHAO Jin-yu, WANG Jian-li, WANG Shuai, WANG Liang, WU Qing-lin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

*Corresponding author, E-mail: jianluciomp@163.com

Abstract: In order to meet the demands of a mobile vehicle-based adaptive optical system, the traditional wave-front processor hardware architecture was redesigned. In this study, we combined a wave-front processing board, wave-front processing daughter board and DA conversion board, using optical fiber for board communication. In this way, the reliability of the system was improved while the functional requirements were satisfied. Meanwhile, the wave-front processor is the computing center of the closed-loop control of the adaptive optical system, and its operation delay directly affects the control bandwidth of the system. This paper presents a multi-pipeline adaptive real-time wave-front processing method based on FPGA to complete the slope calculation, restoration calculation, and control calculation. For the adaptive optical system, which can provide two-stage precision tracking and consists of 97 sub-apertures and 97 deformation mirrors, the processing delay is 506.25 μ s, meeting the requirement of 1 500 Hz real-time wave-front processing.

Key words: adaptive optics; wavefront sensor; wave-front processing; Field Programmable Gate Array(FPGA)

收稿日期:2017-02-14;修订日期:2017-04-12.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA8080603)

1 引言

自适应光学系统可以实时探测和校正大气湍流造成的动态波前误差,使目标成像稳定、清晰。典型的自适应光学系统主要由波前传感器、波前处理器以及波前校正器三大部分组成。波前传感器获取波前像差信息;波前校正器(变形镜和倾斜镜)执行波前像差实时补偿^[1-2];波前处理器完成波前信息处理和波前校正器控制量的计算。从自适应光学理论诞生到现在,波前处理器历经了模拟电路处理器、数字电路处理器和专用波前处理器等阶段^[3-4]。

随着电子技术的快速发展,波前处理延时越来越小。目前,自适应光学实时波前处理系统硬件上大多采用基于数字信号处理芯片(DSP)、大规模可编程逻辑门阵列和数字信号处理芯片结合(FPGA+DSP)和图形处理器(GPU)三种处理架构。软件上多数采用块处理策略,将输入的波前图像按子孔径分割成块。将不同的子孔径块分配给不同的处理单元进行并行处理,以提高系统的处理速度。但随着地基高分辨率成像望远镜口径的不断增大,自适应光学系统规模(波前子孔径数和波前校正器单元数)也在不断的扩大,波前处理的数据量也随之增加。

传统的块处理策略会导致波前处理系统并行模块的增加。如 1997 年公布的 MMT6.5 望远镜,其波前处理系统采用块处理模式,对于微透镜阵列列为 14×14 ,变形镜促动器数量为 60 的自适应光学系统,需要 12 块 TI 的 TMS320C40 DSP,计算延时为 0.86 ms^[5-6]。2003 年,美国星火靶场发布的 SOR 3.5 m 自适应望远镜的波前处理系统采用大规模 FPGA 作为主处理芯片,全系统由 9 块处理板卡组成,算法上采用块处理模式。对于微透镜阵列列为 30×30 ,变形镜促动器数量为 941 的自适应光学系统规模,计算延时为 0.297 ms^[7-8]。2006 年,Xinetics 公司为在帕洛马山上 5 m 望远镜的自适应光学系统配置了基于 GPU 的波前处理系统,全系统采用 16 块高性能 GPU 并行处理,系统预计延时为 0.22 ms^[9]。

国内自适应光学研究起步较晚,中国科学院成都光电所为云南天文台 61 单元自适应光学系统研制了专用实时数字波前处理器,这也是国内

首台自适应光学波前处理器,它由 12 片 TMS320C50 和 5 片 TMS320C31 组成,峰值运算速度达 8.5 亿次/秒^[10]。

上述波前处理器均为专用处理器,详细的处理过程均未阐述。同时,上述处理器只能控制变形镜校正高阶像差。本文提出的多线流水波前处理算法可实现对快速反射镜和变形镜的同步控制,从而实现低阶和高阶像差的同步校正;采用单 FPGA 作为核心处理芯片,简化了外围电路设计,提高了系统的可靠性,从而降低了系统成本和功耗。

传统的自适应光学系统均基于 Coude 光路,目标通过扰动的大气进入望远镜系统,依次通过七面光学反射镜进入 Coude 光学平台上的自适应光学系统^[11-12]。而机动式车载自适应光学系统还没有公开文献报道。

近年来,随着 1 m 级望远镜车载技术的成熟,人们对 1 m 级车载自适应光学系统提出了应用需求,而传统的自适应光学系统波前处理器无法满足这一需求。本文设计的波前处理器由波前处理主板、波前处理子板和 DA 转化板组成,利用光纤作为板间通信载体,可同时满足固定站和移动站的应用需求,具有很好的通用性和扩展性。

2 机动式车载自适应光学波前处理器的硬件构成

图 1 为典型的自适应光学系统,图 2 为机动式车载自适应光学望远镜组成框图。为了提高系统的跟踪精度,倾斜跟踪控制回路由两级倾斜校正回路串联组成,用于校正望远镜的跟踪误差和大气湍流引起的倾斜跟踪误差^[12]。

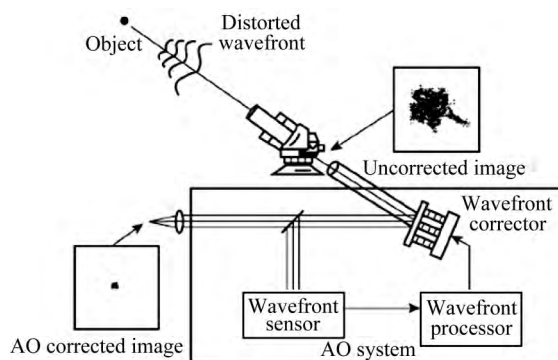


图 1 典型的自适应光学系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical AO system

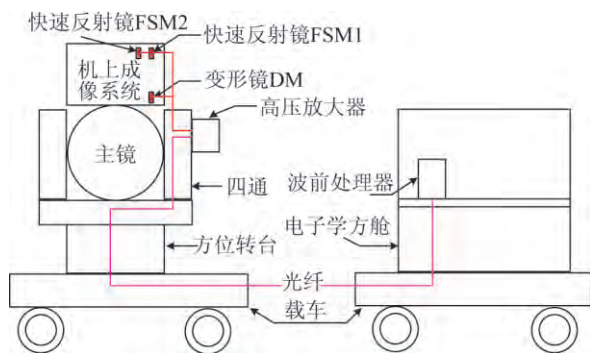


图 2 机动式车载自适应光学望远镜系统框图

Fig. 2 Schematic diagram of mobile vehicle-based AO telescope

图 3 为系统光路示意图,一级精密跟踪由精密跟踪相机(FSC)和快速反射镜 1(FSM1)组成闭环回路;哈特曼波前传感器(HS)与快速反射镜 2(FSM2)组成二级精密跟踪闭环回路;HS 和变形镜(DM)组成高阶像差校正的闭环回路。

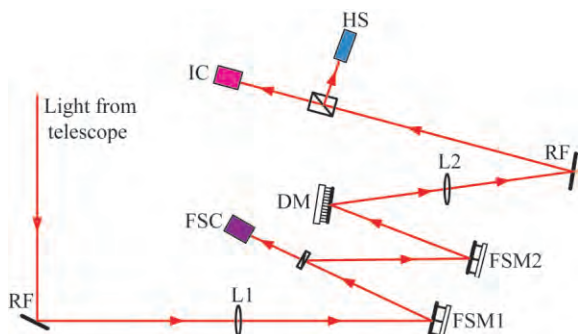


图 3 系统光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical system

如图 2 所示,DM、FSM1 和 FSM2 位于望远镜的机上成像系统中。高压放大器悬挂在立柱旁,而波前处理器位于电子学方舱中,并通过光纤与高压放大器相连。由此实现了波前校正器与波前处理器的分离,方便了自适应光学系统的调试,提高了全系统的可靠性。

机动式车载自适应光学波前处理器由波前处理主板、波前处理子板以及数模(Data to Analogue, DA)转换板组成。图 4 给出了系统的硬件组成框图。

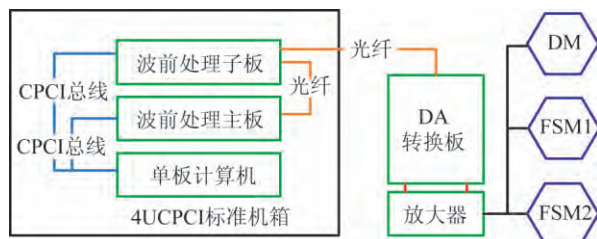


图 4 机动式车载自适应光学波前处理器硬件组成框图

Fig. 4 Hardware schematic of mobile vehicle-based AO wave-front processor

波前处理主板完成波前图像的采集、波前图像预处理、波前斜率计算以及波前 X 和 Y 两方向的整体倾斜计算,并将斜率数据打包发送给波前处理子板。波前处理子板主要完成复原运算、精密跟踪控制运算以及光纤发送的功能。DA 转换板实现 DM、FSM1 以及 FSM2 的促动器所需促动量的数模转换。计算机通过 CPCI 总线分别与波前处理主板和波前处理子板进行通信;波前处理主板、波前处理子板以及 DA 转换板之间通过光纤进行通信。

整个系统集成在一个 4U CPCI 工业控制机箱中,从而提高了系统的集成度和可靠性。图 5 为设计完成的系统硬件实物图。FPGA 型号为 XILINX 公司的 Virtex-5 系列的 XC5VSX95T。其硬件资源如表 1 所示,系统中用到的最高时钟频率为 240 MHz。

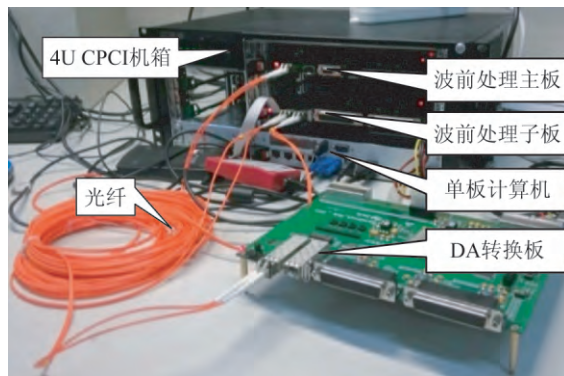


图 5 机动式车载自适应光学波前处理器硬件实物图

Fig. 5 Photo of hardware of mobile vehicle-based AO wave-front processor

表 1 FPGA XC5VSX95 硬件资源表

Tab. 1 Hardware resource of FPGA XC5VSX95

名称	Slice	RAM(Kb)	DSP	GTP	I/O
数量	14 720	8 784	640	16	640

3 实时波前处理算法

实时波前处理算法由波前斜率计算、波前复原计算以及波前控制计算三部分组成。实时波前处理数据流程如图 6 所示。波前图像(经过大气扰动)通过波前斜率计算得到波前斜率数据,波前斜率数据经过波前复原计算得到误差向量,误差向量经过波前控制计算得到波前校正器的电压控制量,电压控制量通过高压放大器放大得到波前校正器的校正量。本文实时波前处理器算法由硬件描述语言(Verilog HDL)实现。

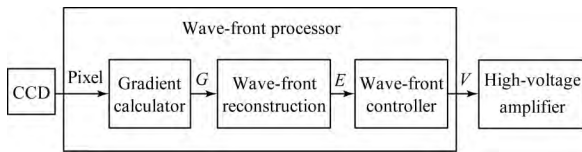


图 6 实时波前处理器数据流程

Fig. 6 Data flow of real time wave-front processor

3.1 波前斜率计算^[13]

基于 HS 的波前斜率计算中,第 k 个子孔径波前斜率的主要计算公式如下:

$$\Delta x_{\text{spot}k} = \frac{\sum_i x_i I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} - x_{\text{ref}k}, \quad (1)$$

$$\Delta y_{\text{spot}k} = \frac{\sum_i y_i I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} - y_{\text{ref}k}, \quad (2)$$

式中: $I_{i,j}$ 是子孔径内坐标 (x_i, y_i) 处的像素灰度值, (x_i, y_i) 分别是像素在子孔径的 x 和 y 方向上的坐标, $(x_{\text{ref}k}, y_{\text{ref}k})$ 为该子孔径的参考点坐标。

波前整体倾斜计算如下:

$$\Delta x_{\text{glob}} = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta x_{\text{spot}k}}{n}, \quad (3)$$

$$\Delta y_{\text{glob}} = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta y_{\text{spot}k}}{n}, \quad (4)$$

其中 n 为子孔径数。

扣除整体倾斜后, X 和 Y 两方向的斜率向量如下:

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_{\text{spot}1} - \Delta x_{\text{glob}} \\ \Delta x_{\text{spot}2} - \Delta x_{\text{glob}} \\ \vdots \\ \Delta x_{\text{spot}n} - \Delta x_{\text{glob}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\Delta Y = \begin{bmatrix} \Delta y_{\text{spot}1} - \Delta y_{\text{glob}} \\ \Delta y_{\text{spot}2} - \Delta y_{\text{glob}} \\ \vdots \\ \Delta y_{\text{spot}n} - \Delta y_{\text{glob}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

扣除整体倾斜后的波前斜率向量 G 如下:

$$G = \begin{bmatrix} \Delta x_{\text{spot}1} - \Delta x_{\text{glob}} \\ \Delta y_{\text{spot}1} - \Delta y_{\text{glob}} \\ \Delta x_{\text{spot}2} - \Delta x_{\text{glob}} \\ \Delta y_{\text{spot}2} - \Delta y_{\text{glob}} \\ \vdots \\ \Delta x_{\text{spot}n} - \Delta x_{\text{glob}} \\ \Delta y_{\text{spot}n} - \Delta y_{\text{glob}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

具体算法包括离线标定和实时计算两大部分。其中,离线标定主要是计算出没有波前畸变状态下的参考点坐标 $(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}})$, 并将这些数据传送给 WFP。

波前处理主板基于 FPGA 的多线流水波前斜率算法如下:

第 1 步: HS 像素数据在像素时钟的同步下首先同时进入两个乘法器, 分别算出 $x_i I_{i,j}$ 和 $y_i I_{i,j}$;

第 2 步: 算出的 $x_i I_{i,j}$ 和 $y_i I_{i,j}$ 与当前像素灰度值 $I_{i,j}$ 同时进入三通道累加器, 计算出 $\sum_i x_i I_{i,j}$, $\sum_j y_i I_{i,j}$ 和 $\sum_{i,j} I_{i,j}$, 存储在当前子孔径的 RAM 中;

第 3 步: 随着像素数据的读出, 重复上述第 1、2 步骤。分别计算出同一数据行上不同子孔径的 $\sum_i x_i I_{i,j}$, $\sum_j y_i I_{i,j}$ 和 $\sum_{i,j} I_{i,j}$, 存储在相应的子孔径 RAM 中;

第 4 步: 随着子孔径行最后一列像素数据的输入, 采用像素时钟的 8 倍频时钟信号先后将 $\sum_i x_i I_{i,j}$ 和 $\sum_{i,j} I_{i,j}$, $\sum_j y_i I_{i,j}$ 和 $\sum_{i,j} I_{i,j}$ 输入除法器, 计算得到当前子孔径 k 的质心数据 $(x_{\text{spot}k}, y_{\text{spot}k})$;

第 5 步:得到的质心数据(x_{spotk}, y_{spotk})与离线标定得到的参考点数据(x_{refk}, y_{refk})相减得到子孔径斜率数据($\Delta x_{spotk}, \Delta y_{spotk}$);

第 6 步:将第 k 个子孔径斜率数据($\Delta x_{spotk}, \Delta y_{spotk}$)存储到子孔径斜率数据 RAM 中。随着像素时钟脉冲,重复步骤 1~5 计算后续子孔径斜率数据,并将结果累加在一起,在最后子孔径斜率数据计算完毕后得出整体斜率数据($\Delta x_{glob}, \Delta y_{glob}$);

第 7 步:当计算完整体斜率数据,将各子孔径斜率数据($\Delta x_{spotk}, \Delta y_{spotk}$)与整体斜率($\Delta x_{glob}, \Delta y_{glob}$)相减,就可得到后续处理所需的斜率向量 G 和整体倾斜数据($\Delta x_{glob}, \Delta y_{glob}$);

第 8 步:将斜率向量 G 和整体倾斜数据($\Delta x_{glob}, \Delta y_{glob}$)通过光纤发送至波前处理子板,进行后续波前处理。

3.2 波前复原计算^[14-15]

在采用直接斜率复原算法的自适应光学系统中,波前斜率和复原电压具有如下关系:

$$V = R_{xy}^+ G, \quad (8)$$

其中: R_{xy}^+ 为 DM 到 HS 的斜率相应矩阵 R_{xy} 的广义逆矩阵, R_{xy}^+ 为一个 $m \times 2n$ 的矩阵, m 为 DM 促动器数, n 为 HS 子孔径数, G 是扣除整体倾斜后的波前斜率向量。 R_{xy}^+ 可通过离线进行标定,将标定结果发送至波前处理子板的配置寄存器中。

波前处理子板基于 FPGA 直接斜率法的波前复原算法步骤如下:

第 1 步:将计算所得的斜率向量 G 的元素 $\Delta x_1, \Delta y_1, \dots, \Delta x_n, \Delta y_n$ 依次输入 FIFO 中;

第 2 步:采用像素时钟的 16 倍频时钟从 FIFO 中读出第一个元素数据 Δx_1 ,同时与复原矩阵 R_{xy}^+ 的第一列向量 $[d_{11} \ d_{21} \ d_{22} \ \dots \ d_{m1}]$ 中的每一个元素相乘,相乘后的结果分别存储在 m 个存储器中;

第 3 步:从 FIFO 中读出第二个元素数据 Δy_1 ,同时与复原矩阵 R_{xy}^+ 的第 2 列向量 $[d_{12} \ d_{22} \ d_{32} \ \dots \ d_{m2}]$ 中的每一个元素相乘,将对应的计算结果与 m 个存储器中的数据做累加运算;

第 4 步:依次进行下去,直到斜率向量 G 的最后一个元素 Δy_n 与复原矩阵 R_{xy}^+ 的最后一列向量 $[d_{1,2n} \ d_{2,2n} \ d_{3,2n} \ \dots \ d_{m,2n}]$ 相乘,并将结果累加到 m 个存储器中,即得到 m 个促动器的电压控制值。

3.3 FSM2 精密跟踪控制算法

为了充分利用光能,减少分光,第二级跟踪回路的控制信号来自于 HS 波前传感器测量得到的整体倾斜信号。第二级精密跟踪采用 PI 控制算法,算法如下:

$$U_x(n) = K_p \left(1 + \frac{T_s}{T_i}\right) \Delta x_{glob}(n) - K_p \Delta x_{glob}(n-1) + U_x(n-1), \quad (9)$$

$$U_y(n) = K_p \left(1 + \frac{T_s}{T_i}\right) \Delta y_{glob}(n) - K_p \Delta y_{glob}(n-1) + U_y(n-1), \quad (10)$$

其中: $U_x(n), U_y(n)$ 分别为 x 方向和 y 方向的电压值, $\Delta x_{glob}(n), \Delta y_{glob}(n)$ 分别为 x 方向和 y 方向的整体倾斜量, $U_x(n-1), U_y(n-1)$ 分别为上一帧 x 方向和 y 方向的电压值, $\Delta x_{glob}(n-1), \Delta y_{glob}(n-1)$ 分别为上一帧 x 方向和 y 方向的整体倾斜量, K_p 为比例系数, T_s 为采样周期, T_i 为积分时间常数。将式(9)和式(10)变换如下:

$$U_x(n) = K_{ps} \Delta x_{glob}(n) - K_p \Delta x_{glob}(n-1) + U_x(n-1), \quad (11)$$

$$U_y(n) = K_{ps} \Delta y_{glob}(n) - K_p \Delta y_{glob}(n-1) + U_y(n-1), \quad (12)$$

式中 K_{ps} 和 K_p 可通过系统标定来确定。系统搭建过程中,FSM2 的光轴同 HS 的光轴之间很难完全重合,标定两者之间的光轴偏差矩阵 D ,则 FSM2 的全局倾斜矢量 U_{fsm} 与 HS 的整体倾斜矢量 U_{glob} 之间的关系如下:

$$U_{fsm} = D U_{glob}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{fsm}(n) \\ \Delta y_{fsm}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{glob}(n) \\ \Delta y_{glob}(n) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

波前处理子板基于 FPGA 二级精密跟踪控制算法如下:

第 1 步:将计算所得的全局倾斜数据 $\Delta x_{glob}, \Delta y_{glob}$ 分别输入 FIFO 中;

第 2 步:采用像素时钟 16 倍频将 $\Delta x_{glob}, \Delta y_{glob}$ 分别与标定矩阵 D 的 $[d_{11} \ d_{21}]$ 和 $[d_{12} \ d_{22}]$ 相乘后做加法得到 Δx_{fsm} 和 Δy_{fsm} ;

第 3 步:将 $\Delta x_{fsm}, \Delta y_{fsm}$ 分别与 K_{ps}, K_p 做乘法后代入式(11)和式(12)进行迭代运算,得到 FSM 当前促动器的电压值。

4 实验与结果分析

在实验室环境下,搭建如图 7 所示的自适应光学系统实验验证光路。

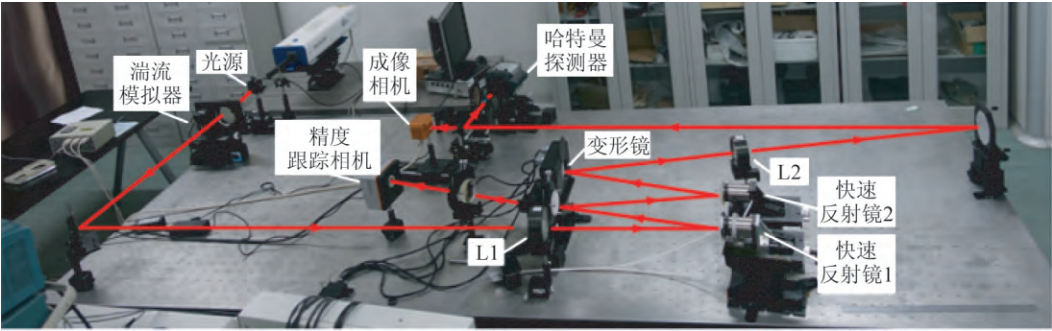


图 7 自适应光学系统实验验证光路图

Fig. 7 Experimental light path of AO system

光源(LS)发出的光束依次经过湍流模拟器(TB)、FSM1、FSC、FSM2、DM、成像相机(Imaging Camera, IC)和 HS。其中 TB 实现对大气格林伍德(Greenwood)频率和大气相干长度 r_0 的模拟。FSC 与 FSM1 构成一级精密跟踪闭环回路;HS 与 FSM2 构成二级精密跟踪闭环回路;HS 与 DM 构成高阶像差闭环校正回路。校正后的结果在 IC 上成像。

在 HS 波前传感器探测信噪比(SNR)为 8 的情况下进行闭环测试。表 2 给出了不同 Greenwood 频率下二级精密跟踪闭环实测 X 方向和 Y 方向误差的 PV 值以及 RMS 值。

表 2 第二级精跟踪系统闭环跟踪误差

Tab. 2 Close-loop errors for FSM2 (pixel)

Greenwood 频率/Hz	PV		RMS	
	X 误差	Y 误差	X 误差	Y 误差
50	0.140	0.145	0.020	0.022
100	0.194	0.220	0.028	0.031
160	0.248	0.247	0.039	0.042

通过表 2 可以看出,二级精密跟踪对系统在 X 和 Y 两个方向上的倾斜有很好的抑制效果。图 8 给出了系统在 Greenwood 频率为 100 Hz 时,X 轴方向上的二级精密跟踪开闭环误差曲线。

图 9 和图 10 分别给出了 Greenwood 频率为 100 Hz、大气相干长度 r_0 为 15 cm(采用湍流模拟器模拟所得)、HS 探测器 SNR 为 8 的条件下

校正前后的序列图像。

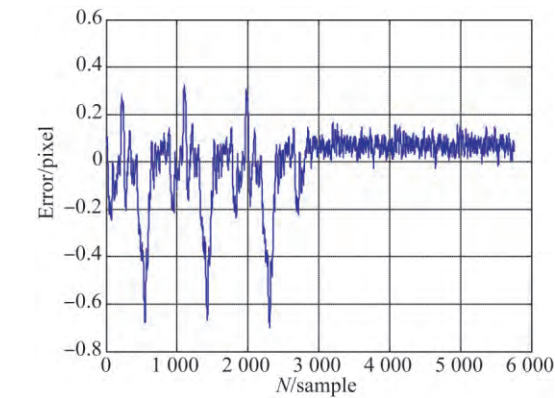


图 8 二级跟踪 X 轴方向上的开闭环误差曲线

Fig. 8 Errors for FSM2 in X-axis

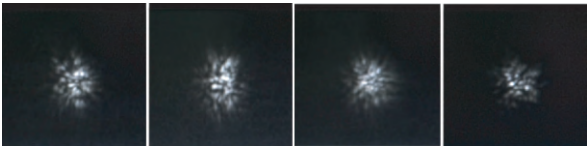


图 9 $f_w=100\text{ Hz}, r_0=15\text{ cm}, \text{SNR}=8$ 校正前光源序列图像
Fig. 9 Image sequence of light source before correction with $f_w=100\text{ Hz}, r_0=15\text{ cm}, \text{SNR}=8$



图 10 $f_w=100\text{ Hz}, r_0=15\text{ cm}, \text{SNR}=8$ 校正后光源序列图像
Fig. 10 Image sequence of light source after correction with $f_w=100\text{ Hz}, r_0=15\text{ cm}, \text{SNR}=8$

5 结 论

本文设计完成的波前处理器采用 XILINX 公司 Virtex-5 系列的 XC5VSX95T FPGA,实现了自

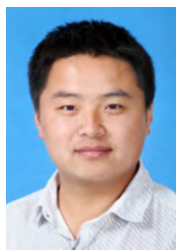
适应光学的全部波前处理运算。实验结果表明:对于两级精密跟踪,97 个子孔径以及 97 单元变形镜

的自适应光学系统,系统处理延时为 $506.25 \mu\text{s}$,满足系统 1 500 Hz 的实时波前处理需求。

参考文献:

- [1] 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
ZHOU R ZH, YAN J X. *Adaptive Optics Principle* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [2] RODDIER F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(7): 1223-1225.
- [3] ACTON D S, WIZINOWICH P L, DIVITTORIO M, *et al.*. Lessons learned in the design, construction, and implementation of the W. M. Keck Observatory AO system [J]. *SPIE*, 2000, 4007: 14-19.
- [4] 王建立, 陈涛, 张景旭, 等. 地基高分辨率光电成像望远镜总体需求及关键技术分析 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5): 2-16.
WANG J L, CHEN T, ZHANG J X, *et al.*. General requirements and key technologies for the ground-based high resolution EO imaging telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 2-16. (in Chinese)
- [5] GOODSSELL S J, FEDRIGO E, DIPPER N A, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project [J]. *SPIE*, 2005, 5903: 59030G.
- [6] SANDLER D G, LLOYD-HART M, MARTINEZ T, *et al.*. 6.5 m MMT infrared adaptive optics system: detailed design and progress report [J]. *SPIE*, 1995, 2534: 374-377.
- [7] BENDEK E A, HART M, POWELL K B, *et al.*. Status of the 6.5 m MMT telescope laser adaptive optics system [J]. *SPIE*, 2010, 7736: 77360O.
- [8] DUNCAN T S, VOAS J K, EAGER R J, *et al.*. Low-latency adaptive optics system processing electronics [J]. *SPIE*, 2003, 4839: 923-934.
- [9] WANG C X, LI M, WANG CH H, *et al.*. Real-time implementing wavefront reconstruction for adaptive optics [J]. *SPIE*, 2004, 5639: 199-204.
- [10] GULLAPALLI S N, ABREU R, RAPPOPORT W M, *et al.*. Modeling of the SAAO Adaptive Optics System [J]. *SPIE*, 2000, 3931: 272-284.
- [11] PENG X F, LI M, RAO CH H. A kind of FPGA-based correlating shack-Hartmann wave-front processor [J]. *SPIE*, 2008, 7130: 71303Z.
- [12] RAO CH H, JIANG W H, ZHANG Y D, *et al.*. 61-element adaptive optical system for 1.2 m telescope of yunnan observatory [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(3): 295-302.
- [13] 贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理机 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1716-1722.
JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, *et al.*. Adaptive optical wave-front processor based on FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1716-1722. (in Chinese)
- [14] 郑文佳, 王春鸿, 姜文汉, 等. 自适应光学波前控制算法的脉动阵列结构 [J]. *数据采集与处理*, 2008, 23(4): 444-448.
ZHENG W J, WANG CH H, JIANG W H, *et al.*. Implementation of wavefront control calculation used for adaptive optics system on systolic array [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2008, 23(4): 444-448. (in Chinese)
- [15] 史晓雨, 冯勇, 陈颖, 等. 自适应光学系统变形镜控制电压预测 [J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1281-1286.
SHI X Y, FENG Y, CHEN Y, *et al.*. Predicting control voltages of deformable mirror in adaptive optical system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1281-1286. (in Chinese)

作者简介:



贾建禄(1982—),男,内蒙赤峰人,博士,副研究员,2006 年于天津大学获得学士学位,2012 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事自适应光学系统波前处理的研究。E-mail: jianluciomp@163.com



赵金宇(1976—),男,内蒙通辽人,研究员,主要从事光电望远镜测量精度分析、软件设计和数据通信等研究。E-mail: zhaoyj@ciomp.ac.cn