

自适应光学波前处理器的故障诊断系统设计

赵雨菲^{1,2}, 王建立¹, 贾建禄¹, 张超^{1,2}, 乔兵¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了及时发现及定位基于FPGA(Field Programmable Gate Arrays)的自适应波前处理器执行过程中发生的问题,提出一种针对该波前处理器的故障诊断系统以解决这一问题。根据调试及操作的需求,该系统能够向上位机实时反馈当前波前处理各部分的执行结果及运行状态,定位故障并分析数据误差。该系统在137单元波前处理器实验平台上进行了实验,实验结果表明:在处理器实时校正过程中,监控系统反馈的数据及相关信息与相应理论值能够很好地匹配,能及时发现故障并定位。该系统应用于大型地基高分辨率成像望远镜的自适应光学系统,直观反映自适应光学波前处理器的运行过程及相应结果,如发生故障,可以及时发现并定位故障来源,较大地提高了硬件及软件的调试效率。同时,通过各阶段运行结果的分析,有利于进一步提高各部分运算速度及精度。

关键词: 信息光学; 自适应光学; 波前处理; FPGA; 故障诊断系统

中图分类号: V271.4; TP394.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)04-0069-04

Fault Diagnostic System for Adaptive Optical Wave-Front Processor

ZHAO Yu-fei^{1,2}, WANG Jian-li¹, JIA Jian-lu¹, ZHANG Chao^{1,2}, QIAO Bing¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: For the purpose of detecting and locating faults in time during the running of adaptive optical wave-front processor based on Field Programmable Gate Arrays (FPGAs), a fault diagnostic system (FDS) is proposed for this wave-front processor. According to the requirements of debugging and operating, the system can provide real-time feedback of the results and states from each part of the wave-front processor to upper PC, locate faults, and analyze data error. The fault diagnostic system was tested on 137-unit adaptive optical wave-front processor platform. Experimental results indicate that the feedback data from the monitor system and the relevant information are pretty matched with the corresponding theoretical values, and FDS can also detect and locate the faults in time, during the real-time correction of the processor. The system is applied in the large foundation of high resolution imaging telescope adaptive optical system, which is able to reflect the process and relevant results of the adaptive optical wave-front processor intuitively, detect and locate the source of faults in time if faults occur, and greatly improve the testing efficiency in both hardware and software. Meanwhile, analyzing the results from each stage contributes to improve the calculation speed and precision.

Key words: information optics; adaptive optics system; wave-front process; FPGA; fault diagnosis system

0 引言

自适应光学系统能够较好校正大气湍流的影响,

一个典型的自适应光学系统包括波前探测器、波前处理器和波前校正器^[1]。其中,波前处理器主要用于将波前传感器测到的波前信息转换为波前校正器的控制量,以实现自适应光学系统的闭环控制^[2]。波前处理器通常需要完成以下3个方面的计算:波前斜率计算、波前复原计算和波前控制计算^[3-4]。本文提出的自适应光学实时波前处理系统硬件上采用多FPGA级联处

收稿日期:2013-05-23

修回日期:2013-06-16

基金项目:国家高技术研究发展(“八六三”)计划课题(2009AA8080603)

作者简介:赵雨菲(1988—),女,辽宁鞍山人,硕士生,研究方向为基于FPGA的自适应波前处理器的软件开发与设计。

理模式,软件上采用分块处理策略,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^[5]。由于FPGA处理过程中不能直接获得中间运算结果,出现故障难以进行定位与诊断,并且难以对所需结果进行分析,因此本文提出一种基于该波前处理器的故障诊断系统,该系统能够根据需求对波前处理过程中各个变量及运行结果进行实时反馈,从而实现实时的故障检测、定位和诊断,同时对各阶段数据进行深入分析。

1 自适应光学波前处理器结构及工作原理

图1为基于PXI总线的自适应光学波前处理器的系统概略图^[5],由主控计算机、波前处理主板和波前处理子板3部分组成。主控计算机与波前处理主板通过PXI总线进行通信,波前处理主板与波前处理子板通过自定义的板间总线进行通信。

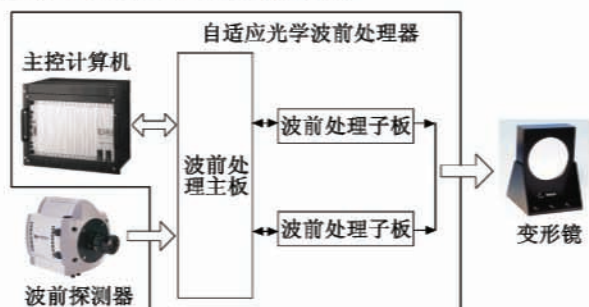


图1 自适应光学波前处理器系统概略图

Fig.1 Block diagram of adaptive optics wave-front processor

主控计算机完成系统监控、故障诊断、系统标定、数据分析存储等功能;波前处理主板进行波前图像预处理、波前斜率计算并将斜率数据打包发送给各波前处理子板。同时,其通过PXI总线将各种实时波前计算数据上传至主控计算机以及结合波前处理子板完成波前标定的功能;波前处理子板主要完成波前拟合、波前控制和D/A转换的功能。

2 自适应波前处理器的故障诊断系统的工作原理

系统故障诊断是对系统运行状态和异常情况做出判断,并根据诊断为系统故障恢复提供依据^[6]。要对系统进行故障诊断,首先必须对其进行检测,在发生系统故障时,对故障类型、故障部位及原因进行诊断,最终给出解决方案,实现故障恢复。就本系统而言,为保证本文自适应波前处理器的稳定性,专门设计了相应的故障诊断方案,其系统结构如图2所示。黑色实线为控制流;红色虚线为诊断数据流。

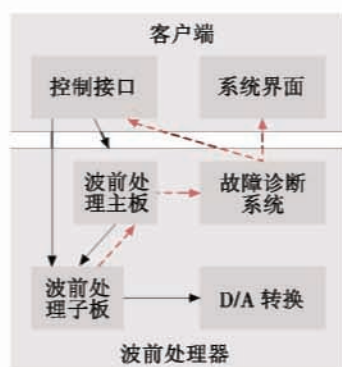


图2 自适应光学波前处理器诊断系统结构框图

Fig.2 Block diagram of fault diagnosis system for adaptive optics wave-front processor

根据自适应波前处理器的原理及系统结构可知,波前处理主板扩展了2块波前处理子板。除了数据传输和控制信号传输等基本通信,该波前处理器的主板和各子板另外设计了用于故障诊断的串行通信端口,并能够通过板间总线进行传输。因此,该串行通信端口作为诊断系统的数据传输端口。

基于波前处理器的故障诊断系统工作原理如图3所示。

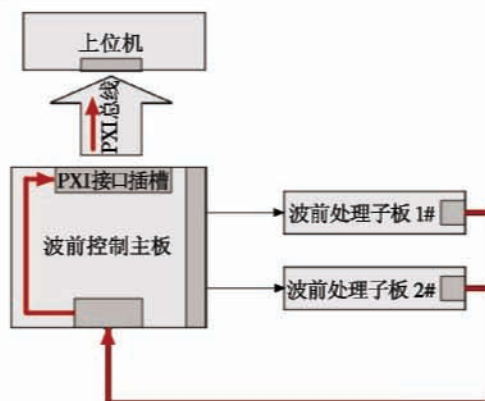


图3 故障诊断系统工作原理图

Fig.3 Principle diagram of the fault diagnosis system

波前处理子板负责波前处理过程的主要运算,它通过板间总线接收波前处理主板发送的波前斜率,计算得到质心数据,并且通过串口接收上位机标定的波前复原矩阵,依次进行波前复原计算^[7],波前控制计算,并配置D/A,输出变形镜促动器所需的控制电压值^[8-9]。根据硬件和软件调试,以及实验过程中的需求,波前处理子板将运算各阶段故障诊断数据通过故障诊断串行通信端口输出,通过板间总线发送到波前处理主板的诊断接收串行通信端口。接收到的诊断数据通过PXI总线上传至主控计算机,从而显示并分析数据,对发生的故障进行判断。

其中,PXI总线是在PCI总线的通信模式基础上发展起来的,兼容了PCI的总线通信特点。如32 b和64 b

的数据传输能力,以及 132 Mbps (32 b) 和 264 Mbps (64 b) 的数据传输速度。同时,PXI 继承了 PCI 总线的电气特性和通信协议,PXI 通信接口的设计即为 PCI 通信接口的设计。本文中的波前处理器采用专用接口芯片来完成 PCI 接口设计,支持 32 位 33 MHz 时钟 PCI 总线,其支持主模式、从模式以及 DMA 传输方式,可以用于适配卡和嵌入式系统。

3 故障诊断系统的设计

故障诊断的主要任务有:故障检测、故障类型判断、故障定位及故障恢复等。对于本文的系统,故障检测是在系统建立连接后,周期性地向自适应波前处理器发送检测信号,通过接收的响应数据帧来判断系统是否产生故障;故障类型判断是系统在检测出故障之后,通过分析原因,判断出系统故障的类型,如硬件故障,软件故障等;故障定位是在以上环节的基础上,细化故障种类,诊断出系统具体故障部位和故障原因,为故障恢复做准备;故障恢复是故障诊断过程中最后一个环节,需要根据故障原因,采取相应的措施,对系统故障进行恢复。

图 4 为故障诊断系统数据采集流程图。其中,将 CCD 采集到的图像、波前斜率计算得到的质心偏差、波前复原计算得到的误差向量,以及波前控制计算得到的控制电压值作为诊断系统初步的诊断数据进行实时反馈^[10]。

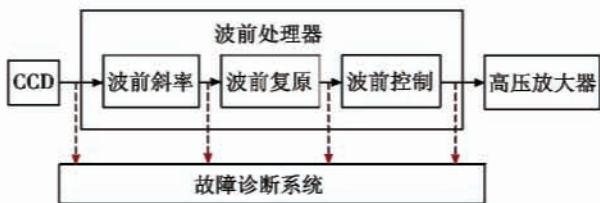


图 4 故障诊断系统数据采集流程图

Fig. 4 Data collection flow of the fault diagnosis system

对于诊断系统接收得到的诊断数据,需要进行进一步的分析 and 显示。本诊断系统初步实现以下几方面的分析以及诊断:首先,通过波前斜率计算得到的质心偏差数据绘制波前,比较波前处理主板和波前处理子板的波前,并与波前探测器直接获取的波面进行比较;其次,计算波前的前 35 项泽尼克系数以及波前的 P-V 值与 RMS 值,与理论数据进行分析比较;最后,对于波前复原误差向量以及控制电压值实时显示,将其与限定数值的范围进行分析比较,判断是否在限定范围内,是否超出额定边界。

该波前处理器的帧频率为 1000 Hz,由于诊断通信串口传输频率的限制,需要对诊断数据进行适当频率的采样。

4 实验验证

对本文的故障诊断系统采用 137 单元,有效子孔径为 88 的自适应光学系统(图 5)进行实验验证,并应用于 1.2 m 大型地基高分辨率成像望远镜的自适应光学系统。

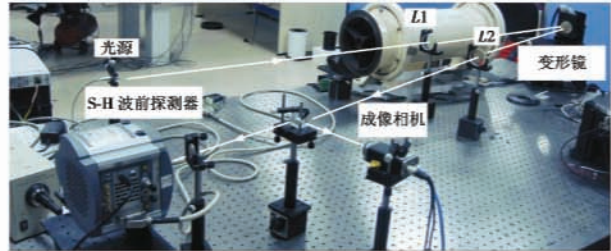


图 5 自适应光路图

Fig. 5 The route of AO system

表 1 和表 2 分别为诊断系统通过质心偏差计算所得前 15 项泽尼克系数与理论计算得到的泽尼克系数。

表 1 泽尼克系数(诊断系统)

Table 1 Zernike coefficient (diagnosis system)

Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
0.012	-0.022	-0.007	0.001	0.020	0.006	-0.010
Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	
-0.007	-0.005	-0.012	-0.005	0.000	0.001	

表 2 泽尼克系数理论值

Table 2 Zernike coefficient

Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
0.013	-0.020	-0.008	0.001	0.023	0.006	-0.008
Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	
-0.008	-0.005	-0.012	-0.002	0.001	-0.001	

图 6 为诊断系统局部界面图,其中包括以下信息和数据:探测图像信息及其二值化图像信息,波前处理主板波前相位图,波前处理子板波前相位图,及其相应的 P-V 值,RMS 值和最终输出到 D/A 的控制电压值。其中,主板及子板 1、子板 2 的波前相位图在正常状态下应该一致,P-V 值与 RMS 值应基本相近。通过主板与子板的波前比较能够判断:板间总线传输过程是否正确;斜率计算所得质心偏差等数据是否正确。为测试该故障诊断系统对于故障能够及时检测,实验从波前处理主板发送错误的波前斜率向量至各波前处理子板。各板收到的信息绘制的波前相位图如图 7 所示,诊断系统检测到信息传输有误后,蜂鸣器响起进行提示。从波前相位图的显示可以得知子板 1、子板 2 收到的波前斜率向量错误,实际中若出现此种问题,则是板间总线发生信息传输故障(实验中人为发送错误数据不在故障考虑范围内)。通过控制电值可以判断此电压值是否超过额定电压(未校正时,输出到 D/A 数据为 0x3555;校正时,数据应在该值附近浮动),并与理论值进行比较,以避免发生错误造

成实验失败甚至损坏仪器。若控制电压输出数据有任何值大于 0x6aaa 或小于 0x0000, 诊断系统将发出警报。

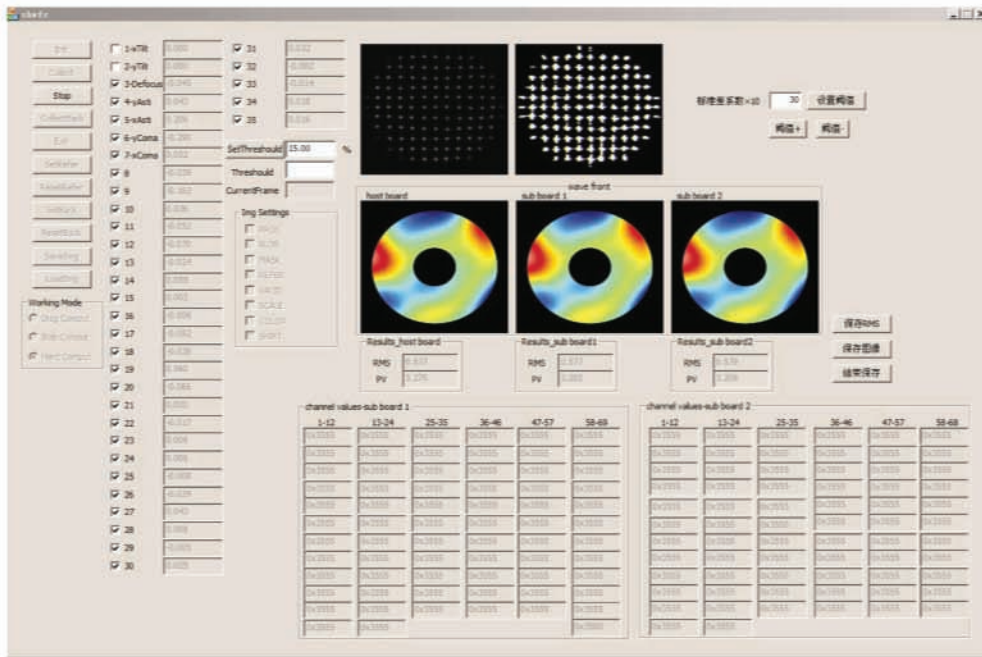


图 6 故障诊断系统局部界面图

Fig. 6 Partial interface of fault diagnostic system

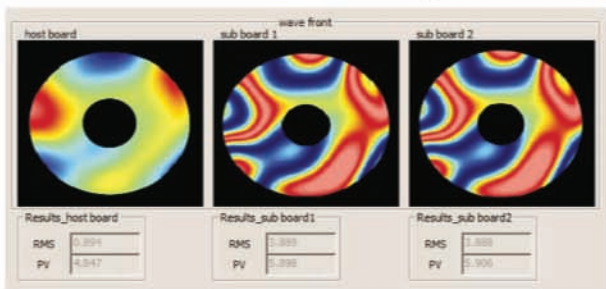


图 7 故障诊断系统局部界面图

Fig. 7 Partial interface of fault diagnostic system

表 3 和表 4 分别表示校正前后诊断系统分析所得 RMS 值、P-V 值与理论值的比较。

表 3 校正前 RMS 值与 P-V 值

Table 3 RMS and P-V value before correcting

RMS	RMS(FDS)	P-V	P-V(FDS)
0.215	0.212	1.225	1.224

表 4 校正后 RMS 值与 P-V 值

Table 4 RMS and P-V value after correcting

RMS	RMS(FDS)	P-V	P-V(FDS)
0.089	0.086	0.463	0.467

如图 6、图 7 与表 3、表 4 所示,校正前后的波前图及各项指标均显示正常,表明该自适应光学波前处理器各部分运行正常。

评价一个故障诊断系统的性能有诸多指标,如故障检测的及时性、检测的灵敏度、故障分析辨识能力和自适应能力等。以上性能指标在实际应用中,需要根据实际条件和系统要求来分析判断主要性能和次要性

能,然后经过适当的取舍后得出最终的合适的诊断方案。本文提出的故障诊断系统也需要根据相应性能指标和系统需求进行更进一步的调整和优化。

5 结论

本文设计了一种基于自适应波前处理器的故障诊断系统,该系统可以根据用户调试及操作的需求,向主控计算机实时反馈相应的执行结果及运行状态,诊断系统故障,验证计算结果并对数据进行分析。实验表明,在处理器实时校正过程中,诊断系统计算所得各类数据与相应理论值能很好地匹配,发生故障时也能够及时发出警报及定位故障。该系统能够有效直观地提高自适应波前处理系统的软硬件调试效率,同时对于实时故障诊断及数值分析也有很好的效果,具有很好的应用前景。

参考文献

[1] GOODSSELL S J, FEDRIGO E, DIPPERETAL N A. FPGA developments for the SPARTA project[J]. SPIE, 59030G1-12, 2005, doi:10.1117/12.617837.

[2] BENDEK E A, HART M, POWELL K B, et al. Status of the 6.5 m MMT telescope laser adaptive optics system[J]. Proceedings of SPIE, Adaptive Optics Systems II, 773600_1-12, 2010, doi:10.1117/12.857663.

(下转第 90 页)

参考。

参 考 文 献

- [1] ADAMY D L. EW102: 电子战进阶[M]. 朱松, 王燕, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009.
ADAMY D L. EW102: A second course in electronic warfare [M]. Translated by ZHU S, WANG Y. Beijing: Electronics Industry Press, 2009.
- [2] 汪连栋, 张德锋, 聂孝亮, 等. 电子战视景仿真技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
WANG L D, ZHANG D F, NIE X L, et al. Electronic warfare scene simulation technology and application[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2007.
- [3] 崔晓峰, 孙艳春, 梅宏. 以决策为中心的软件体系结构设计方法[J]. 软件学报, 2010, 21(6): 1196-1207.
CUI X F, SUN Y C, MEI H. Decision-centric software architecture design method[J]. Journal of Software, 2010, 21(6): 1196-1207.
- [4] 黄双喜, 范玉顺, 赵彧. 一类通用的适应性软件体系结构风格研究[J]. 软件学报, 2006, 17(6): 1338-1348.
HUANG S X, FAN Y S, ZHAO Y. Research on generic adaptive software architecture style[J]. Journal of Software, 2006, 17(6): 1338-1348.
- [5] KRUCHTEN P, OBBINK H, STAFFORD J. The past, present, and future for software architecture[J]. IEEE Software, 2006, 23(2): 22-30.
- [6] 温昱. 一线架构师实践指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
WEN Y. Practice guidelines for front-line architect [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2009.
- [7] JACOBSON I, BOOCH G, RUMBAUGH J. 统一软件开发过程[M]. 周伯生, 冯学民, 樊东平, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
JACOBSON I, BOOCH G, RUMBAUGH J. The unified process development process[M]. Translated by ZHOU B S, FENG X M, FAN D P. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [8] 付赞, 李敏强, 陈富赞. 面向不确定需求的适应性软件体系结构设计[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 99-105.
FU Y, LI M Q, CHEN F Z. Adaptive software architecture design oriented to requirements uncertainty[J]. Computer Science, 2010, 37(12): 99-105.
- [9] DOBRICA L, NIEMELA E. A survey on software architecture analysis methods[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2002, 28(7): 638-653.
- (上接第 72 页)
- [3] GOODSELL S J, GENG D, FEDRIGO E, et al. FPGA developments for the SPARTA project; Part 2[J]. proceedings of SPIE, 6272, Advances in Adaptive Optics II, 6272411-12, 2006, doi:10.1117/12.671646.
- [4] GOODSELL S J, GENG D, YOUNGER E J, et al. FPGA developments for the SPARTA project; Part 3[J]. Proceedings of SPIE, Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications III, 6691031-12, 2007, doi:10.1117/12.735585.
- [5] 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. Technology for adaptive optical wave-front processor based on FPGA[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1716-1722.
- [6] BASDEN A, GENG D L, MYERS R, et al. Durham adaptive optics real-time controller [J]. Applied Optics, 2010, 49(32): 6354-6363.
- [7] WANG C X, LI M, ZHOU L C, et al. Real-time implementing wavefront reconstruction for adaptive optics[J]. Proceeding SPIE, Adaptive Optical System Technology III, 5639199-204, 2004, doi:10.1117/12.580438.
- [8] ABREU R, CHADWICK D, AMICO ET AL R D. Modeling of the SAAO adaptive optics system [J]. Proceeding of SPIE, 3931272-284, 2000, doi:10.1117/12.384291.
- [9] PENG X F, LI M, RAO C H. A kind of FPGA-based correlating shack-hartmann wave-front processor [J]. Proceeding of SPIE, 7130, Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 2008, doi: 10.1117/12.819702.
- [10] DUNCAN T S, VOAS J K, EAGER R J, et al. Low-latency adaptive optical system processing electronics [J]. Proceedings of SPIE, 4839, Adaptive Optical System Technology II, 2003, doi:10.1117/12.458955.