

文章编号 1004-924X(2018)05-1007-07

349 单元自适应光学波前处理器

王建立^{1*}, 董玉磊^{1,2}, 姚凯男¹, 林旭东¹, 杨乐强^{1,2}, 刘欣悦¹, 王亮¹, 陈璐¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了满足大型地基高分辨率成像望远镜对自适应光学系统校正频率和成像质量的要求, 本文设计了一套 349 单元自适应光学波前处理系统, 该系统在 349 单元变形镜自适应光学系统上实现了 1 500 Hz 的波前校正频率。设计了以控制计算机、FPGA 波前斜率处理器、GPU 矩阵乘法处理器以及模块化数模转换机箱等作为主要部件的实时波前处理器, 报道了 349 单元变形镜自适应光学系统对动态像差的闭环校正结果, 实验中对模拟大气相干长度 r_0 为 6 cm, 格林伍德频率为 160 Hz 的大气湍流实现有效校正, 自适应光学系统闭环后, 波前像差的 1 000 帧平均均方根值由 1.07λ (中心波长 600 nm, 后同) 下降至 0.11λ 。本文设计的 349 单元变形镜自适应光学系统能够在 1 500 Hz 的波前校正频率下有较高的成像质量, 波前处理延时优于 235 μs 。功率谱分析结果表明自适应光学系统对 100 Hz 以下的波前畸变具有明显的校正效果。

关键词: 自适应光学; 波前处理器; 地基大口径望远镜; 变形镜

中图分类号: O439; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182605.1007

Three hundred and forty-nine unit adaptive optical wavefront processor

WANG Jian-li^{1*}, DONG Yu-lei^{1,2}, YAO Kai-nan¹, LIN Xu-dong¹,
YANG Le-qiang^{1,2}, LIU Xin-yue¹, WANG Liang¹, CHEN Lu¹

(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*)

* *Corresponding author, E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to meet the correction frequency and imaging quality requirements of adaptive optics systems for large ground-based high-resolution imaging telescopes, a 349-unit wavefront processor was designed, which realized a wavefront correction frequency of 1 500 Hz. The design of a real-time wavefront processor was proposed whose main components were a control computer, a FPGA wavefront slope processor, a GPU matrix multiplication handler and a modularization D/A converter. A closed-loop calibration result of the dynamic aberration produced by the 349-unit adaptive optics system was reported. In this experiment, the system realized an effective correction of the simulated atmospheric turbulence whose atmospheric coherent length r_0 is 6 cm and the Greenwood frequency is

收稿日期: 2017-10-31; 修订日期: 2017-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61605199, No. 61601195)

160 Hz. After the closed loop evaluation of the adaptive optics system, the average square root value of 1 000 frames of the wavefront aberration drops from 1.07λ to 0.11λ (the central wavelength is 600 nm). The proposed 349-unit adaptive optics system can achieve a higher imaging quality under the wavefront correction frequency of 1 500 Hz. Moreover, the wavefront processing delay is better than $235 \mu\text{s}$. The analysis of the power spectrum reveals that this adaptive optics system can correct wavefront distortion which was less than 100 Hz.

Key words: adaptive optics; wavefront processor; ground-based high-aperture telescope; deformable mirror

1 引言

自适应光学是 20 世纪 70 年代发展起来的一门光学新技术,它通过实时测量波前误差同时加以实时补偿的方法来解决天文成像过程中由大气湍流或者其他因素导致的波前畸变问题。由于自适应光学技术在高分辨率观测和高集中度激光能量传输等方面发挥着重要作用,国内外学者争相投身到自适应光学技术的研究中,该技术取得了突飞猛进的进步,并在工业、医疗和生物等领域得到了广泛的应用^[1]。

在天文观测以及高分辨率成像领域,自适应光学系统的规模(波前探测器子孔径数量和波前校正器执行单元数量)主要由大气相干长度 r_0 ^[2] 以及望远镜的有效口径确定,当波前探测器的子孔径大小和波前校正器单元大小与 r_0 相当时,才能较好地补偿大气扰动引起的波前相位畸变^[3-4]。为了实现接近衍射极限的分辨率成像,可以估算系统规模大致为 $N=(D/r_0)^2$,式中 D 为望远镜口径。如对于 2 m 口径望远镜,当 r_0 为 15 cm 时,其系统规模约为 180;当 r_0 为 10 cm 时,系统规模约为 400;因此初步计算 2 m 级口径望远镜自适应光学系统的规模需要达到 300 单元以上^[5]。同时,由于成像探测对自适应光学的闭环控制带宽高于天文观测,大型望远镜的采样频率只有达到 1 000 Hz 以上,才能保证波前校正控制带宽为 100~200 Hz,倾斜校正控制带宽为 50~100 Hz^[6-8],故对系统的波前处理延时提出了很高的要求。

目前,国外千单元级自适应光学实时波前处理系统大多采用并行处理架构。三十米口径望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)^[9-10] 的实时控制器的每个运行模块都采用不同的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)+数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)

组合结构,能在 800 Hz 的采样频率下保证计算延时为 $1\ 010 \mu\text{s}$ 。Keck 望远镜的下一代自适应光学(KNGAO)^[11] 实时处理器阵列群由 FPGA, GPU 和多核 CPU 组成,它的采样频率为 2 000 Hz,计算延时为 $600 \mu\text{s}$ 。自适应光学实时应用 ESO 标准平台(SPARTA)^[12] 的实时处理器由 FPGA+DSP+CPU 组成,它的采样频率为 1 000 Hz,计算延时为 $300 \mu\text{s}$ 。

通过分析国外相关自适应光学系统的发展现状可以看出,随着技术的发展,FPGA 与 GPU 已经成为自适应光学波前处理器的主要核心器件,并且相比于其他处理器有着明显优势。其中 FPGA 可编程性好,应用灵活,特别适合于订制应用,对于可固化的非标接口与计算优势显著^[13]; GPU 在处理矩阵运算上得天独厚,并行计算处理能力强大,程序修改调试容易,方便算法升级。本文提出了一种基于 FPGA+CPU+GPU 的波前处理系统方案。该方案兼容 FPGA 与 GPU 两者所长,通过 FPGA 在相机输出数据的同时完成波前传感器的波前倾斜测量,GPU 完成矩阵乘法运算加速,CPU 开展其他运算量相对较小的工作。该方案能够满足两米级望远镜对于自适应光学系统的需求。本文将该方案应用于 349 单元变形镜自适应光学系统,实现了 1 500 Hz 的波前校正频率,并介绍了该自适应光学系统的动态像差闭环校正结果。本课题组在 2012 年公开报道了 961 单元可变形反射镜的研制^[14],此后中科院光电所成功研制了 595 和 913 单元变形镜,并报道了 595 单元变形镜对静态像差板的校正结果^[15]。本文报道的 200 单元以上规模变形镜对动态像差的高频率校正结果在国内尚属首次。

2 自适应光学系统构成

自适应光学系统一般是由波前传感器、波前处理器和波前校正器三个部分构成的闭环控制系统,

如图 1 所示。本文采用夏克-哈特曼(S-H)波前传感器和课题组自主研发的变形镜作为波前校正器。

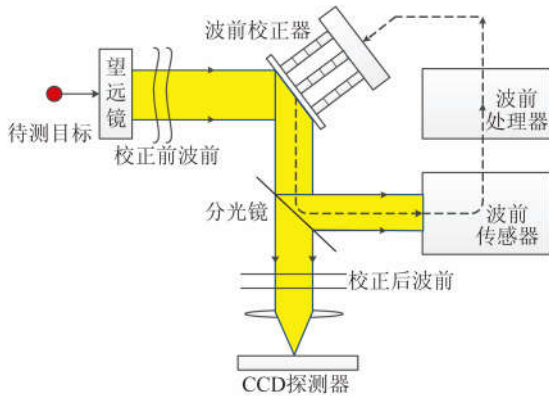


图 1 自适应光学系统构成

Fig. 1 Composition of adaptive optics system

畸变波前通过分光镜后,一部分光束送到 CCD 探测器上计算成像质量,另一部分则进入由波前传感器、波前处理器和波前校正器构成的闭环控制系统进行闭环校正。光束首先到达波前传感器,波前传感器探测波前畸变信息,并将信息传输至波前处理器;波前处理器是自适应光学系统的运算核心,其主要功能是把波前传感器所检测到的波前畸变信息转化为波前校正器的控制信号;波前校正器的主要目的是将波前处理器计算出来的校正电压转换为作用在变形镜驱动单元上的波前校正量。波前传感器、波前处理器和波前

校正器共同构成一个闭环的自适应光学控制系统,最后使成像质量趋于稳定。

3 基于 FPGA+GPU+CPU 的波前处理器

波前处理器包括控制计算机、FPGA 波前斜率处理器,GPU 矩阵乘法处理器以及模块化数模转换机箱等。Cameralink 标准规范了数字摄像机和图像采集卡之间的接口,采用统一的物理接插件和线缆定义。只要是符合 Cameralink 标准的摄像机和图像卡就可以物理上互联。240 相机通过 Cameralink1 分 2,将一路图像信息转换成完全相同的两路分别发送至控制计算机和 FPGA 波前斜率处理器。控制计算机负责软件界面与操作接口的建立,完成所有参数、控制指令以及响应矩阵的发送,同时实现系统状态监视功能;FPGA 波前斜率处理器负责在哈特曼相机读出过程中实现大规模的波前斜率计算,进而将运算结果发送给 GPU 处理器;GPU 处理器在系统中负责大规模的矩阵乘法并行计算,并完成控制计算,最后将计算得到的输出电压发送给多路数模转换器机箱。各个模块化的数模转换机箱在收到千兆网络电压值之后,在最短时间内转化为模拟电压量,送至高压放大器用于控制变形镜的压电促动器。整套系统以千兆网络交换机为核心,采用标准千兆以太网实现数据交互,系统组成结构如图 2 所示。

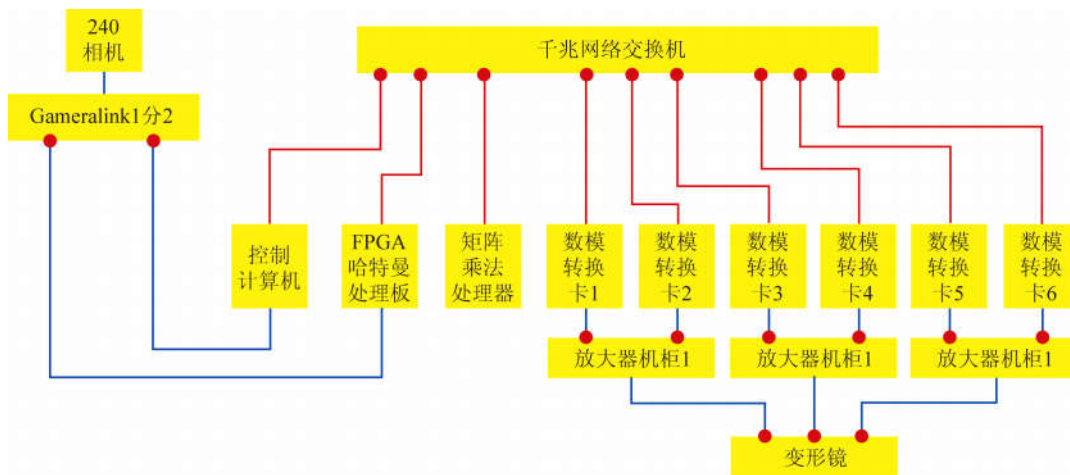


图 2 波前处理器的系统组成

Fig. 2 Composition of wavefront processor

3.1 硬件构成

自适应光学系统选用 First Light 公司的 Ocam2K 哈特曼相机,如图 3 所示。该相机是一款专为波前传感应用所设计的高帧频高灵敏度相机,它采用 8 通道读出技术,最大分辨率为 240×240 ,该分辨率下能够输出的最大帧频为 2 067 frame/s,其读出模式如图 3 所示。微透镜设计为单个子孔径对应 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$,故全靶面分成 24×24 个子孔径。在 FPGA 波前斜率处理器的计算过程中,相机的 8 个读出通道分开处理,并且每个通道均在处理完成半靶面后,打包为 16 个 UDP 包发送计算结果,待全靶面输出完成后,再将数据打包为 16 个 UDP 包,发送下半靶面计算结果。

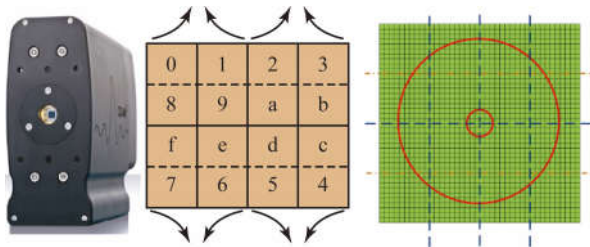


图 3 First Light 公司 Ocam2K 相机的实物照片以及读出模式示意图

Fig. 3 Physical photos and readout mode schematic of First Light's Ocam2K camera

波前处理器中使用华为 S5700-28P-LI-AC 型 24 口千兆交换机,该交换机支持 24 个千兆网络端口以及 4 个万兆光端口,包转发率为 96 Mp/s,交换容量为 256 Gb/s,能够满足本系统的实时数据传输需求。FPGA 采用的是 Xilinx 公司的 Virtex-5 系列,总逻辑单元数多达 330 000 个,最高工作时钟可以达到 550 MHz,提供了高达 11.6 Mb 的灵活嵌入式 Block RAM,能有效地存储和缓冲运算数据。GPU 采用 NVIDIA 的 Tesla K80,双精度性能接近 3TeraFLOPS,两颗 Kepler GPU 以 240 GB/s 的速度与 12 GB 的 GDDR5 内存相连,从而令板卡级带宽和内存容量分别达到了 480 GB/s 和 24 GB,同时 K80 能够智能设置最佳时钟频率,且不出热功率 300 W 的极限,因而能够提供更快的计算速度。控制计算机采用 ADlink 工业控制计算机。多路高速数模转换器为课题组自主研发,采用千兆以太网通信接口,单个 1U 机箱有两个数模转换

卡,能够实现 480 路模拟电压转换。高压放大器采用自主研发的基于功率三极管元件的模拟放大电路。全靶面有 576 个子孔径,输入输出共有 1 152 路电压,因此需要 3 个 1U 机箱和 6 个数模转换卡。数模转换器与高压放大器的具体技术指标如表 1 所示。

表 1 数模转换器和高压放大器的技术指标

Tab. 1 Technical indicators of digital to analog converter and high-voltage amplifier

高压放大器		数模转换器	
技术指标	值	技术指标	值
信号电压/V	0~5	量化位数/bit	16
输出电压/V	0~120	转换时间/ μs	<50
峰值输出电流/A	3	通讯接口与协议	千兆以太网/udp 协议
上升时间/ μs	<50		
3 dB 带宽/kHz	7		
噪声和纹波(RMS)/mV	<5		
工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	-40~+85		

波前处理器以及高压放大器电子学系统的实物照片如图 4 所示。



图 4 波前处理器以及高压放大器电子学系统的实物照片
Fig. 4 Physical photos of wavefront processor and high voltage amplifier electronics system

3.2 算法流程

在基于 S-H 的波前传感器中,波前斜率的计算主要如下:

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

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

式中: $I_{i,j}$ 是子孔径内坐标为 (x_i, y_i) 处的像素灰度值, $(x_{\text{spot}}, y_{\text{spot}})$ 是像素在入射波前是畸变波时的质心坐标, $(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}})$ 是像素在入射波前是平面波时的原始位置的质心坐标。该部分计算在 FPGA 中完成, 质心偏移数据打包成 32 个 udp 包通过千兆以太网发出。斜率计算流程如图 5 所示。

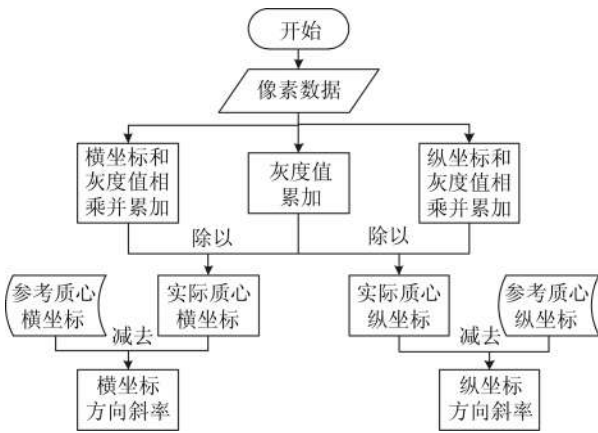


图 5 斜率计算流程图

Fig. 5 Flow chart of gradient calculator

本文采用直接斜率法进行波前复原运算:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & \cdots & d_{1,2n} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & \cdots & d_{2,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ d_{m,1} & d_{m,2} & \cdots & \cdots & d_{m,2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix}. \quad (3)$$

将式(3)简化为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{G}, \quad (4)$$

其中: \mathbf{D} 是波前复原矩阵, 可通过确定波前传感器子孔径、变形反射镜驱动器布局 and 变形反射镜驱动器影响函数计算得到; \mathbf{G} 是斜率向量, 由上一步斜率计算所得; \mathbf{E} 是误差向量; n 为自适应光学系统的有效子孔径数; m 为变形镜的驱动单元数。该部分计算在 GPU 中进行, 采用 Cublusion 库函数进行并行计算加速。

4 实验结果与分析

在实验室内搭建了一套实验光路, 光路示意图如图 6 所示, 完成了基于 349 单元变形镜的自适应光学系统的闭环像差校正实验, S-H 波前传感器的有效子孔径数为 349, 采样频率为 1 500 Hz。变形镜有 349 个驱动单元, 口径为 147 mm, 促动器间距 7 mm, 促动器按正方形排布, 行程为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。S-H 传感器子孔径采用矩形排布方式, 变形镜与 S-H 传感器均位于光瞳位置, 相互共轭。实验系统采用白光光纤光源作为参考光源, 实验中的准直光管焦距为 3 000 mm, 配合准直透镜, 实现变形镜到 S-H 传感器的光瞳转换匹配。

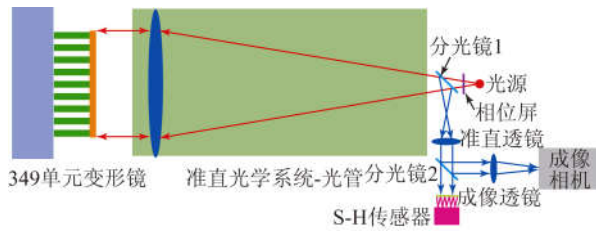


图 6 自适应光学系统闭环像差校正实验光路

Fig. 6 Optical path of adaptive optics closed loop aberration correction experiment

首先进行了变形镜对自身面形的闭环展平实验。图 7 左右图分别为变形镜展平前后 S-H 波前传感器的测量波前像差图。闭环展平前像差 PV 值为 4.251λ (中心波长为 600 nm), RMS 值为 0.761λ ; 展平后 PV 值为 0.475λ , RMS 值为 0.081λ 。

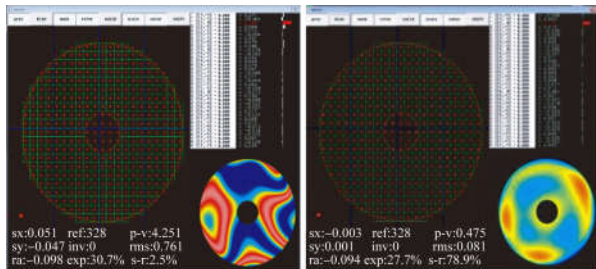


图 7 校正前(左)后(右)S-H 波前传感器的测量波前图
Fig. 7 Measurement wavefront images of S-H wavefront sensor before(left) and after(right) aberration correction

采用湍流屏模拟大气相干长度为 6 cm, 格林伍德频率为 160 Hz 的大气湍流条件, 自适应光学系统闭环前后系统的点扩散函数如图 8 所示。S-H 传感器测量波前像差的 1 000 帧均方根值由 1.07λ 下降至 0.11λ 。

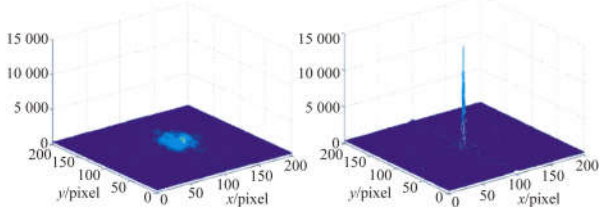
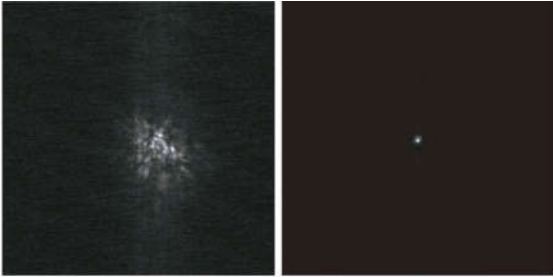


图 8 校正前(左)校正后(右)的光源成像效果对比
Fig. 8 Contrast of light source imaging effect before(left) and after(right) aberration correction

Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1.0.00000000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
2.0.00001000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
3.0.00002000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
4.0.00003000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
5.0.00004000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
6.0.00005000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
7.0.00006000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
8.0.00007000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
9.0.00008000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
10.0.00009000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
11.0.00010000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
12.0.00011000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
13.0.00012000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
14.0.00013000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
15.0.00014000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
16.0.00015000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
17.0.00016000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
18.0.00017000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
19.0.00018000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
20.0.00019000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
21.0.00020000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
22.0.00021000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
23.0.00022000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
24.0.00023000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
25.0.00024000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
26.0.00025000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
27.0.00026000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
28.0.00027000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
29.0.00028000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
30.0.00029000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
31.0.00030000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
32.0.00031000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290
33.0.00032000	302.85.68.51	302.85.68.54	UDP	336.1	= 57345 Len=290

特征时间点
0 s 0 ms 406 μs
0 s 0 ms 617 μs

1至32号为FPGA
处理过程数据包
32号数据包(FPGA处理结束发送至GPU)
33号数据包(GPU处理结束发送至DA卡)

图 9 349 单元自适应光学系统的波前处理延迟
Fig. 9 Wavefront processing delay of 349-unit adaptive optics system

由于 CCD 相机具有逐行逐像素串行输出的特点, FPGA 具有逐像素输入逐像素输出的特点, 因此斜率计算随着 CCD 图像同步输出没有延时, 计算延时主要体现在复原计算和控制计算两部

分。复原计算的矩阵向量乘法充分利用 GPU 的并行计算能力, 复原矩阵的每一行乘以斜率向量在一个核内运行, 多核同步并行运算, 大大降低了复原运算时间。采用 wireshark 网络抓包软件分析计算延时, 实测抓包结果如图 9 所示, 前 32 个包为 FPGA 数据包, FPGA 处理结束后发送至 GPU; 第 33 个包为 GPU 数据处理结束标志包, 第 32 包的发送与第 33 包的发送之间的延时即为 GPU 数据处理延时, 可以看出, 该帧数据处理延时为 $211 \mu\text{s}$ 。采用 20 000 帧统计方式, 分析处理延迟的最大值为 $235 \mu\text{s}$, 平均值为 $198 \mu\text{s}$ 。

实测自适应光学系统闭环前后的功率谱如图 10 所示, 可以看出该 349 单元自适应光学波前处理器能够有效校正 100 Hz 以下的大气湍流频率成分。

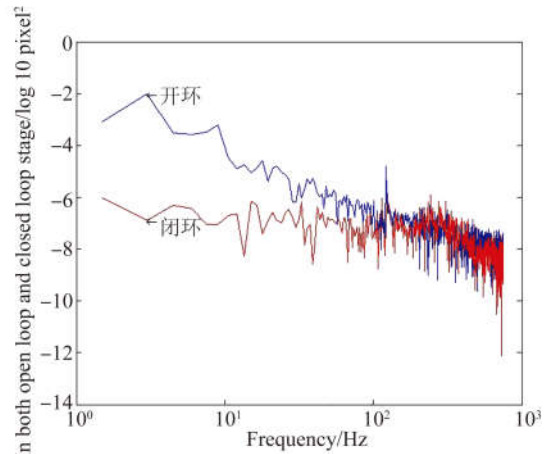


图 10 开环与闭环校正子孔径平均斜率功率谱
Fig. 10 Average slope power spectra of subaperture in open loop and closed loop stages

5 结 论

本文给出了一套 349 单元变形镜自适应光学系统对动态像差的闭环校正结果, 并着重分析了波前处理器的硬件组成和算法流程。在实验室内建立了桌面实验系统, 自适应光学系统闭环校正后, S-H 传感器测量波前像差的 1 000 帧均方根值由 1.07λ 下降至 0.11λ , 光学系统的成像质量得到了明显的改善, 波前处理系统校正带宽满足工程应用需求。

参考文献:

- [1] 张浩田. 基于多核 DSP 的实时波前复原研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2013.
ZHANG H T. *Research of Real-time Wavefront Reconstruction Based on Multi-core DSP* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronic Technology), 2013. (in Chinese)
- [2] 卫沛锋, 林旭东, 王亮, 等. 大气相干长度的瞬时测量 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1840-1845
WEI P F, LIN X D, WANG L, *et al.*. Simultaneous measurement of atmospheric coherence length [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 1840-1845. (in Chinese)
- [3] 林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状 [J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337-351.
LIN X D, XUE CH, LIU X Y, *et al.*. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 337-351. (in Chinese)
- [4] 曹召良, 李小平, 宣丽, 等. 液晶自适应光学研究进展 [J]. 中国光学, 2012, 5(1): 12-19.
CAO ZH L, LI X P, XUAN L, *et al.*. Recent progress in liquid crystal adaptive optical techniques [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 12-19. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] GOODSELL S J, FEDRIGO E, DIPPER N A, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project [J]. *SPIE*, 2005, 5903: 59030G.
- [7] GOODSELL S J, GENG D, FEDRIGO E, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project: part 2 [J]. *SPIE*, 2006, 6272: 627241.
- [8] GOODSELL S J, GENG D, YOUNGER E J, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project: part 3 [J]. *SPIE*, 2007, 6691: 669103.
- [9] BOYER C, ELLERBROEK B, HERRIOT G, *et al.*. TMT adaptive optics systems control architecture [J]. *SPIE*, 2006, 6272: 627211.
- [10] BOYER C, GILLES L, ELLERBROEK B, *et al.*. Update on the TMT adaptive optics real time controller [J]. *SPIE*, 2008, 7015: 701531.
- [11] REINIG M, GAVEL D, ARDESTANI E, *et al.*. Real-time control for keck observatory next-generation adaptive optics [J]. *SPIE*, 2010, 7736: 77363J.
- [12] FEDRIGO E, BOURTEMBOURG R, DONALDSON R, *et al.*. SPARTA for the VLT: status and plans [J]. *SPIE*, 2010, 7736: 77362L.
- [13] 贾建禄, 赵金宇, 王建立, 等. 基于 FPGA 的自适应光学波前处理算法 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2580-2583.
JIA J L, ZHAO J Y, WANG J L, *et al.*. Adaptive optical wave-front processing algorithm based on FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2580-2583. (in Chinese)
- [14] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 961 单元变形镜研制及性能测试 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 601001.
LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al.*. Development and performance test of the 961-element deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 601001.
- [15] GUAN CH L, FAN X L, ZHANG X J, *et al.*. Piezoelectric deformable mirror technologies for astronomy at IOE, CAS [J]. *SPIE*, 2016, 9148: 91480H.

作者简介:



王建立(1971—),男,山东曲阜人,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术、地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。
E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



董玉磊(1993—),女,河北邢台人,硕士研究生,2015年于电子科技大学获得学士学位,主要从事自适应光学波前处理方面的研究。
E-mail: dongyulei_1993@163.com