

文章编号 1004-924X(2013)06-1387-07

961 单元自适应光学系统波前处理器

贾建禄^{1*}, 王建立¹, 赵金宇¹, 刘欣悦¹, 李洪文¹, 王亮¹, 林旭东¹, 赵雨菲^{1,2}

(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 100049)

摘要:针对大型地基高分辨率成像望远镜对自适应光学系统波前处理器在输出规模、处理速度和控制带宽方面的要求, 研制了千单元级自适应光学系统。设计了一种由主控计算机、波前处理主板和可扩展的波前处理子板相结合, 输出规模最大可达 1 200 单元的自适应光学系统波前处理器。采用大规模逻辑器件作核心处理芯片, 用多线并行流水算法缩短波前处理延时, 提高系统控制带宽。对设计完成的波前处理器进行了基于 961 单元变形镜的开环展平实验以及基于 137 单元变形镜的闭环校正实验。实验结果显示: 系统最高采样帧频为 2 000 frame/s 时, 波前运算延时为 20.96 μs , 表明文中提出的硬件扩展和多路并行流水算法对于大规模自适应光学系统波前处理可行且有效。

关键词:自适应光学; 波前处理器; 现场可编程门阵列

中图分类号: O439; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1387

961-element adaptive optical wave-front processor

JIA Jian-lu^{1*}, WANG Jian-li¹, ZHAO Jin-yu¹, LIU Xin-yue¹,
LI Hong-wen¹, WANG Liang¹, LIN Xu-dong¹, ZHAO Yu-fei^{1,2}

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

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

Abstract: In consideration of the requirements of a large ground-based high resolution imaging telescope for the Wave-front Processor (WFP) of an adaptive optical system in output scales, processing speeds and control bandwidths, an adaptive optical system with thousand elements was explored. The adaptive optical WFP was composed of a master control computer, a wave-front processing host board and expandable wave-front processing sub boards and its output scale could reach the maximum of 1 200 elements. Large-scale logic devices were adopted as main processing chips, and a multithreading parallel pipeline algorithm was used to shorten the wave-front processing delay and promote the controlling bandwidth of the system. Then, an open loop experiment based on 961-element deformable mirror and a closed corrected experiment based on 137-element deformable mirror were performed. The result shows that the wave-front processing delay is 20.96 μs when the maximum sampling rate is

收稿日期: 2012-10-17; 修订日期: 2012-12-25.

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

2000 frame/s, which demonstrates that the hardware expending circuit and multithreading parallel pipeline algorithm are feasible and effective for the wave-front processing of the adaptive optical systems.

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

1 引言

自适应光学系统规模(波前探测器子孔径数量和波前校正器单元数量)主要根据大气相干长度 r_0 确定,当波前探测器的子孔径大小和波前校正器的单元大小与 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^[1-2]。如 4 m 望远镜的设计,当 r_0 为 15 cm 时,系统规模约为 710 单元;当 r_0 为 10 cm 时,系统规模约为 1 600^[3]。同时,由于空间目标成像探测对自适应光学系统闭环控制带宽的要求高于天文观测,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^[4-6],故对系统的波前处理延时提出了很高的要求。

目前,千单元级自适应光学实时波前处理系统大多采用处理板卡级联的并行处理架构。如 2003 年美国星火靶场发布的 SOR 3.5 m 自适应望远镜,其波前处理系统采用大规模的现场可编程门阵列(FPGA)作为主处理芯片,全系统采用 9 块处理板卡,对于微透镜阵列为 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^[7-10]。2006 年 Xinetics 公司在帕洛马山上 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^[11-12]。本文研制了一种由主控计算机、波前处理主板和可扩展的波前处理子板相结合的波前处理器,其最大输出规模可达 1 200 单元。采用大规模逻辑器件作为核心处理芯片,算法上采用多线并行流水算法,缩短了波前处理延时,提高了系统带宽。

2 961 单元波前处理器系统构成

图 1 为基于 PXI 总线的千单元自适应光学波前处理器的系统结构框图。它由主控计算机、

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^[13]。

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,它通过 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。

图 2 为设计完成的 961 单元波前处理器实物图,整个系统集成在一个 6U PXI 工业控制机箱中,从而提高了系统的集成度和稳定性。

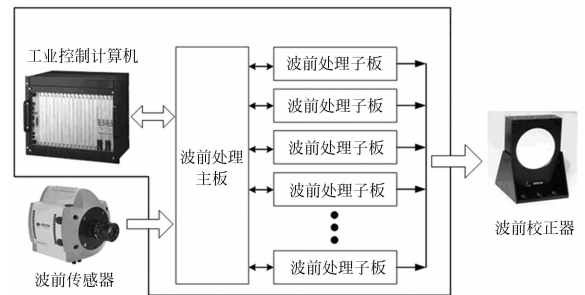


图 1 自适应光学系统处理器框图

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



图 2 961 单元波前处理器实物图

Fig. 2 961-element wave-front processor

3 多线并行流水波前处理算法

实时波前处理算法主要包括波前斜率计算、波前复原计算和波前控制计算 3 大部分, 如图 3 所示。波前处理器的运算数据流程如下: 实时采集波前探测器输出的图像信号, 经过波前斜率、波前复原和控制运算后, 输出控制信号驱动波前校正器进行波前校正。波前处理运算中, 计算量主要集中在波前斜率和波前复原两部分。

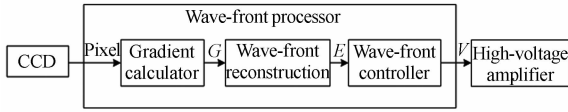


图 3 波前处理运算数据流程图

Fig. 3 Data flow of wave front processing

3.1 波前斜率计算

在基于哈特曼的波前探测器中, 子孔径波前斜率的计算主要如下:

$$x_{\text{spot}} = \frac{\sum_i x_i I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}, y_{\text{spot}} = \frac{\sum_j y_i I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}, \quad (1)$$

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。

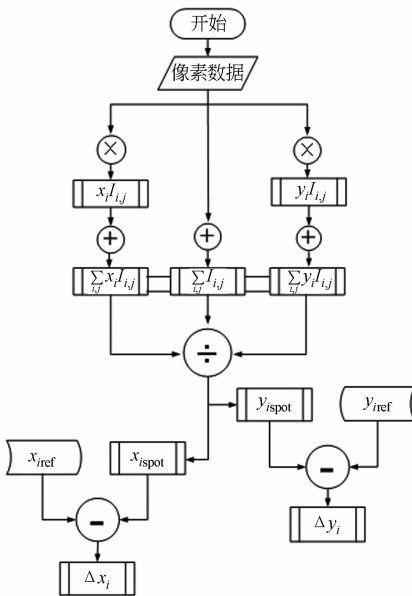


图 4 波前斜率实时计算流程图

Fig. 4 Flow chart of wave-front gradient calculator

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位置, 然后将这些数据传送给实时波前处理器。

实时计算过程如图 4 所示, 具体步骤为:

(1) 首先 CCD 像素数据在像素时钟的同步下同时进入两个乘法器, 分别算出 $x_i I_{i,j}$ 和 $y_i I_{i,j}$;

(2) 算出的 $x_i I_{i,j}$ 和 $y_i I_{i,j}$ 和当前像素灰度值 $I_{i,j}$ 同时进入 3 通道的累加器, 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;

(3) 随着像素数据的读出, 重复 (1)、(2) 两个步骤。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;

(4) 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的质心数据 $(x_{\text{ispot}}, y_{\text{ispot}})$;

(5) 得到的质心数据 $(x_{\text{ispot}}, y_{\text{ispot}})$ 与离线标定得到的参考点数据 $(x_{\text{iref}}, y_{\text{iref}})$ 相减得到质心偏差数据 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 。

该算法的优点在于:

(1) 整个算法只需要两个乘法器和一个除法器, 所需的乘法器和除法器不会随自适应光学系统规模的增加而增加。

(2) 三通道累加器的数量只取决于通光孔径直径方向上的子孔径数。

3.2 波前复原计算

单个子板中进行的基于直接斜率法的波前复原运算为:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & \cdots & d_{1,2n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & \cdots & d_{2,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & \cdots & d_{m,2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

简化为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{G}, \quad (3)$$

其中: \mathbf{D} 是波前复原矩阵, 可通过事先标定所得; \mathbf{G} 是斜率向量, 有 $2n$ 个分量; \mathbf{E} 是误差向量; n 为

自适应光学系统有效子孔径数, m 为驱动器数, 一般有 $2n > m$ 。

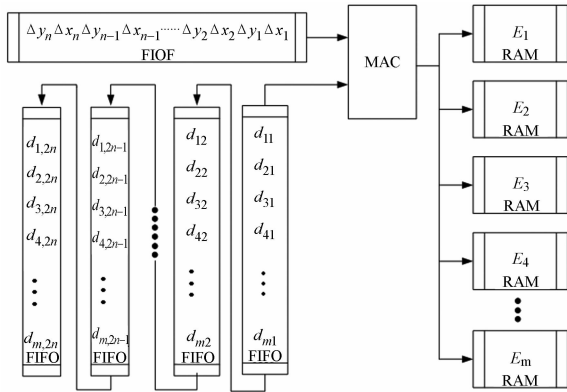


图 5 波前复原计算流程图

Fig. 5 Flow chart of wave-front reconstruction

算法流程如图 5 所示, 具体步骤为:

(1) 将计算所得的斜率向量 \mathbf{G} 的元素 $\Delta x_1, \Delta y_1, \dots, \Delta x_n, \Delta y_n$ 依次进入 FIFO 中。

(2) 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 \mathbf{D} 的第一列向量 $[d_{11}, d_{21}, \dots, d_{m1}]$ 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。

(3) 从 FIFO 中读出第二个元素数据的同时与复原矩阵 \mathbf{D} 的第 2 列向量 $[d_{12}, d_{22}, \dots, d_{m2}]$ 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。

(4) 按照步骤 (3) 的方法依次进行下去, 直到斜率向量 \mathbf{G} 的最后一个元素 Δy_n 与复原矩阵 \mathbf{D} 的最后一列向量 $[d_{1,2n}, d_{2,2n}, \dots, d_{m,2n}]$ 相乘, 并将结果累加到 m 个存储器中, 即得到 m 个误差值。

该算法的优点在于:

(1) 在得到第一个子孔径质心偏差数据后即可进行波前复原计算, 充分利用了子孔径斜率计算过程中空余行和非子孔径行的读出时间, 实现了波前斜率计算和复原计算的并行化。

(2) 波前复原运算实现了并行化。

4 实验与结果分析

4.1 961 单元变形镜开环展平实验

用设计完成的波前处理器对 961 单元变形镜进行了开环展平实验, 961 单元变形镜的镜片直

径为 243 mm, 促动器采用 PZT 压电陶瓷, 961 个促动器采用 35×35 方形排列, 相邻促动器距离为 7 mm。采用 Zygo 激光干涉仪对变形镜进行了开环展平实验, 展平后的面形优于 $\lambda/70$ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)。图 6 和图 7 分别为 961 单元变形镜开环展平后的面形图和干涉图。

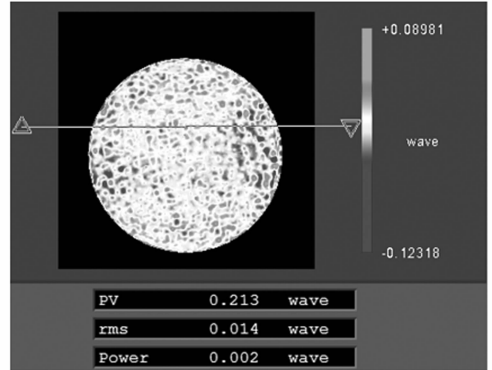


图 6 展平之后的面形

Fig. 6 Surface of deformable mirror (DM) after flattening

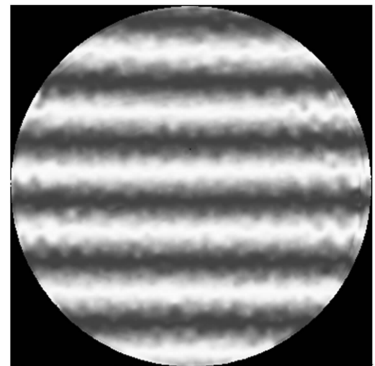
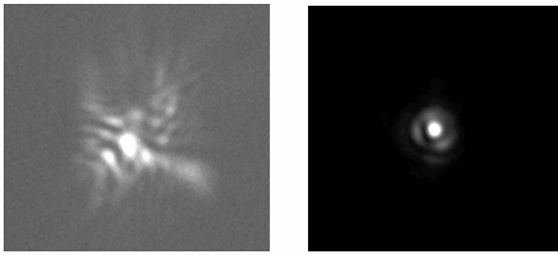


图 7 展平之后的面形干涉图

Fig. 7 Interference pattern of DM after flattening

4.2 137 单元变形镜闭环校正实验

系统在变形镜促动器数为 137 单元, 哈特曼波前探测器子孔径数为 137 的自适应光学系统上开展了室内闭环校正实验。采用湍流模拟器作为扰动源, 哈特曼的采样频率为 1 kHz, 闭环校正实验采用激光作为光源。图 8 为校正前后的成像对比效果图, 图 9 和图 10 分别为校正前后的三维能量集中度分布图。从中可以看出, 校正后能力集中度有了明显的提高, 且从校正后的图中可以看出衍射环。



(a)校正前 (b)校正后
(a) Before correction (b) After correction

图 8 激光光源校正效果对比图

Fig. 8 Corrected results of laser light source

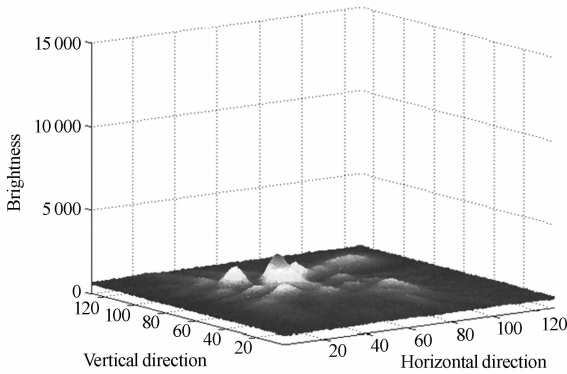


图 9 校正前能量分布图

Fig. 9 Distribution of energy before correction

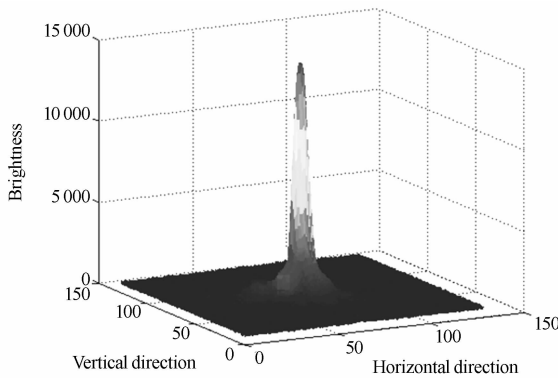


图 10 校正后能量分布图

Fig. 10 Distribution of energy after correction

4.3 961 单元波前处理延时分析

高帧频波前探测器大多采用帧转移模式工作, CCD 的图像曝光和数据输出之间的时序关系如图 11 所示。其中, N 代表 CCD 图像的某一帧。

第 N 帧图像的转移是从 CCD 第 N 帧图像曝光结束到第 $N+1$ 帧图像曝光开始之前完成的, 即 $t_2 \sim t_3$ 时间内完成图像数据的输出。CCD

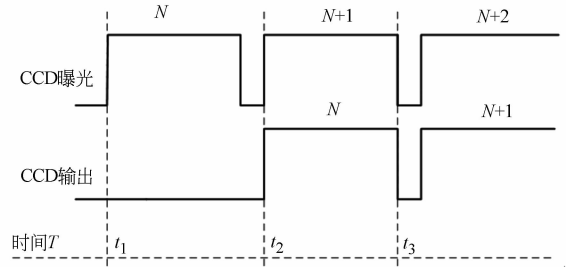


图 11 帧转移 CCD 图像曝光与数据输出的时序关系
Fig. 11 Time relation between exposal and output for frame transfer CCD

的图像输出时间占用了一个完整的采样周期 T , 对于 2 kHz 的波前探测器 T 为 $500 \mu\text{s}$ 。通常波前处理器对第 N 帧图像进行波前处理延时的计时零点为 t_3 时刻。

本文波前处理算法开始于 t_2 时刻, 在得到第一个子孔径质心偏差数据时开始进行波前复原计算。相对于 t_3 时刻, 波前复原的计算延时为最后一个子孔径质心偏差数据的 x 坐标和 y 坐标分别进行 120 次 (1 000 单元的变形镜, 9 块波前子板并行处理, 每块子板处理 120 单元) 乘累加, 在 FPGA 中一次乘累加需要 2 个时钟周期。波前控制运算在 DSP 中完成, 选用主频为 1 GHz 的 TMS320C6455 DSP, 实测它进行 120 路的波前控制运算需要的时间约为 $20 \mu\text{s}$ 。FPGA 运算中采用的系统时钟频率为 500 MHz, 则各部分的延时如图 12 所示。

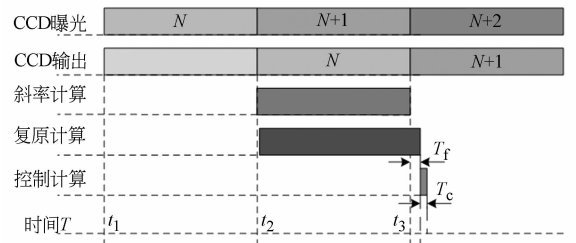


图 12 波前处理延时时间关系图

Fig. 12 Time relation of wave-front processing delay

由此可知, 波前复原计算延时 $T_f = 0.96 \mu\text{s}$; 波前控制计算延时 $T_c = 20 \mu\text{s}$; 波前处理相对于 t_3 时刻的总延时 $T_p = 20.96 \mu\text{s}$ 。

5 结 论

本文研制了基于 PXI 总线的自适应光学系

统波前处理器,它由主控计算机、波前处理主板和可扩展的波前处理子板组成,最大输出单元为 1 200 单元。系统分别在 961 单元和 137 单元变形

镜上进行了开环和闭环的实验。实验结果表明,本文提出的硬件扩展和多路并行流水算法对于大规模自适应光学系统波前处理是有效且可行的。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 曹召良,李小平,宣丽,等. 液晶自适应光学的研究进展[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)
- [3] 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)
- [4] GOODSSELL S J, FEDRIGO E, DIPPER N A, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project [J]. *SPIE*, 2005, 5903: 59030G1-12.
- [5] GOODSSELL S J, GENG D, FEDRIGO E, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project: Part 2[J]. *SPIE*, 2006, 6272: 6272411-12.
- [6] GOODSSELL S J, GENG D, YOUNGER E J, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project: Part 3 [J]. *SPIE*, 2007, 6691: 6691031-12.
- [7] SDUNCAN T S, VOAS J K, EAGER R J, *et al.*. Low-latency adaptive optical system processing electronics[J]. *SPIE*, 2003, 4839: 923-934.
- [8] WANG C X, LI M, WANG CH H, *et al.*. Real time implementing wave-front reconstruction for adaptive optics [J]. *SPIE*, 2004, 5639: 199-204.
- [9] ABREU R, CHADWICK D, AMICO R D, *et al.*. The SAAO adaptive optics system[J]. *SPIE*, 2000, 3931: 272-284.
- [10] PENG X F, LI M, RAO CH H, *et al.*. A kind of FPGA-based correlating Shack-Hartmann wave-front processor [J]. *SPIE*, 2008, 7130: 71303Z-1-6.
- [11] SANDLER D G, LLOYD-HART M, MARTINEZ T Y, *et al.*. The 6.5 m MMT infrared adaptive optics system: detailed design and progress report [J]. *SPIE*, 2010, 2534: 374-377.
- [12] 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-1-12.
- [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.*. Technology for adaptive optical wave-front processor based on FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1716-1722. (in Chinese)

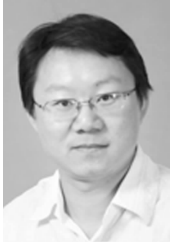
作者简介:



贾建禄(1982—),男,内蒙赤峰人,博士,助理研究员,2006年,2000年于天津大学分别获得学士、硕士学位,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: jianlucioimp@163.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事大口径高分辨率成像光电望远镜总体技术和空间目标探测技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



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,数据通信等研究。E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn



刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,1999年,2006年于中科院长春光学机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学成像及图像处理与分析等方面的研究。E-mail: sirliuxy@hotmail.com



李洪文(1970—),男,四川乐至人,博士,研究员,2007年于吉林大学获得博士学位,主要从事伺服系统及自动化方面的研究。E-mail: lihongwen1970@yahoo.com



王亮(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,研究实习员,2010年于上海交通大学获得硕士学位,主要从事波动光学仿真和数值优化等方面的研究。E-mail: wangliang1985.sjtu@gmail.com



林旭东(1982—),男,福建莆田人,博士,助理研究员,主要从事自适应光学技术的研究。E-mail: linxd@ciomp.ac.cn



赵雨菲(1988—),女,辽宁鞍山人,硕士研究生,2007年于上海交通大学获得学士学位,主要从事基于FPGA的软件开发与设计工作。E-mail: zhao.yufei827@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)