

文章编号 1004-924X(2013)04-1026-06

## 自适应光学系统波前处理算法的优化

贾建禄\*, 王建立, 赵金宇, 王国强

(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:**考虑自适应光学系统对波前处理计算量和实时性的要求,对原有基于块运算的波前处理算法进行了改进和优化,提出了一种自适应光学系统波前处理算法。该算法基于重复利用核心模块的方式完成波前斜率计算,利用矩阵与向量相乘的可分解性完成波前复原计算。在像素时钟的同步下,完成整个波前处理运算,给出促动器所需的促动量。采用一片 Virtex-4 LX80 现场可编程门阵列(FPGA)作为核心处理芯片进行了实验,结果表明该算法对于同样规模的自适应光学系统可降低约为 50% 的硬件资源,提高了系统的波前处理规模;与原算法帧同步结束后有 338  $\mu\text{s}$  的计算延时相比,本文提出的算法可在帧同步结束前完成整个波前处理的运算,提高了自适应光学系统的控制带宽。利用改进后的算法在原系统上进行了室内的光源校正实验,取得了很好的效果。

**关键词:**自适应光学;波前处理;波前复原;图像处理;现场可编程门阵列

**中图分类号:**TP391;TN209 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132104.1026

## Optimization of adaptive optical wave-front algorithm

JIA Jian-lu, WANG Jian-li, ZHAO Jin-yu, WANG Guo-qiang

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

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

**Abstract:** In consideration of the requirements of an adaptive optical wave front processor for heavy computation and real-time capability, this article proposed an adaptive optical wave front algorithm based on block processing for improving and optimizing the original ones. The algorithm calculated the wave front slope by a reusing core module manner and complemented the wave front reconstruction with the decomposition of matrix-vector multiplication. In the pixel clock synchronization, the entire wave front processing calculation was implemented, then the actuator was given to promote the necessary momentum. A Virtex-4 LX80 Field Programmable Gate Array(FPGA) was as the core processing chip to perform an experiment and the results show that the algorithm for the same size of adaptive optic system can reduce the hardware resources about 50%, by which the system's wave front processing scale is reduced. As compared to the original algorithm of 338  $\mu\text{s}$  time delay after the frame synchronization end, this proposed algorithm can complete the whole processing before the end of the frame synchronization, so that the system improves control bandwidths. The improved algorithm has been used in the original system to conduct a room light calibration experiment, and good results are achieved.

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)

**Key words:** adaptive optics; wave-front processing; wave-front reconstruction; image processing; Field Programmable Gate Array(FPGA)

## 1 引言

自适应光学系统能够较好地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。其中波前处理器是整个系统的“大脑”,主要完成波前探测器探测的波前畸变到波前校正器输出的转换,以实现自适应光学系统的闭环控制。为提高自适应光学系统的控制带宽,改善自适应光学系统的采样频率和处理速度十分重要,在系统采样频率一定的情况下,波前处理器的计算延时会直接影响系统的控制带宽<sup>[1]</sup>。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相结合(FPGA+DSP)和图形处理器(GPU)3种处理架构来提高系统处理速度;软件上则多采用块处理策略,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来提高系统的处理速度。

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,从而使得波前处理的数据量也随之增加。这种情况下使用传统的块处理策略会导致波前处理系统并行模块不断增加。如1997年公布的多镜面(MMT)6.5 m望远镜波前处理系统采用块处理模式,对于微透镜阵列为 $14 \times 14$ ,变形镜促动器数量为60的自适应光学系统规模,需要12块TI的TMS320C40 DSP,计算延时为 $0.86 \text{ ms}$ <sup>[2-3]</sup>。2003年美国发布的星火光学靶场(SOR)3.5 m自适应望远镜的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,同时算法上采用块处理模式,对于微透镜阵列为 $30 \times 30$ ,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 $0.297 \text{ ms}$ <sup>[5,7]</sup>。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 $0.22 \text{ ms}$ <sup>[4]</sup>。

为解决现有波前处理器存在的问题,本文在设计完成的波前处理器上<sup>[10-11]</sup>对文献[9]中提到的基于块运算的波前处理算法进行改进和优化,该算法对同样的自适应光学系统规模可降低约为50%的硬件资源,提高了系统的波前处理规模;与文献[9]中 $338 \mu\text{s}$ 的计算延时相比,改进后的算法可在帧同步结束前完成整个波前处理运算,提高了自适应光学系统的控制带宽。

## 2 波前处理算法的优化

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个部分,如图1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,主要的计算量集中在波前斜率和波前复原两部分<sup>[6,8]</sup>。

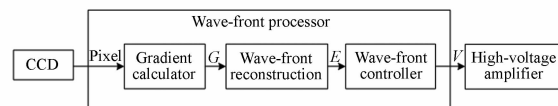


图1 波前处理运算数据流程图

Fig. 1 Data flow of wave-front processing

### 2.1 波前斜率计算

在基于哈特曼的波前探测器中,子孔径波前斜率的主要计算如下:

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

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。

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,并将这些数据传送给FPGA。

实时计算过程如图2所示:

(1) CCD像素数据在像素时钟的同步下首先同时进入2个乘法器,分别算出 $x_i I_{i,j}$ 和 $y_j I_{i,j}$ ;

(2)算出的 $x_i I_{i,j}$ 和 $y_j I_{i,j}$ 和当前像素灰度值

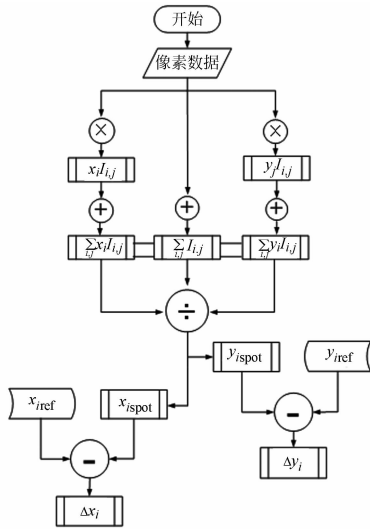


图 2 波前斜率实时计算流程图

Fig. 2 Flow diagram of real-time calculation for wave-front gradient

$I_{i,j}$ 同时进入三通道的累加器,计算出  $\sum_i x_i I_{i,j}$ ,  $\sum_j y_j I_{i,j}$  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,重复上述 2 个步骤。分别计算出同一数据行上的不同子孔径的  $\sum_i x_i I_{i,j}$ ,  $\sum_j y_j I_{i,j}$  和  $\sum_{i,j} I_{i,j}$ , 存储在相应的子孔径 RAM 中;

(4) 随着子孔径行的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  $\sum_{i,j} I_{i,j}$ ,  $\sum_j y_j I_{i,j}$  和  $\sum_{i,j} I_{i,j}$  输入除法器,先后计算得到当前子孔径的质心数据 ( $x_{spot}$ ,  $y_{spot}$ )。

(5) 得到的质心数据 ( $x_{ispot}$ ,  $y_{ispot}$  与离线标定得到的参考点数据 ( $x_{iref}$ ,  $y_{iref}$ ) 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 2 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。

文献[9]中的波前斜率算法采用块处理模式,每个子孔径由一个独立的处理模块进行处理,造成硬件资源的浪费。

### 2.2 波前复原计算

基于直接斜率法的波前复原运算:

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

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  $2n > m$ 。

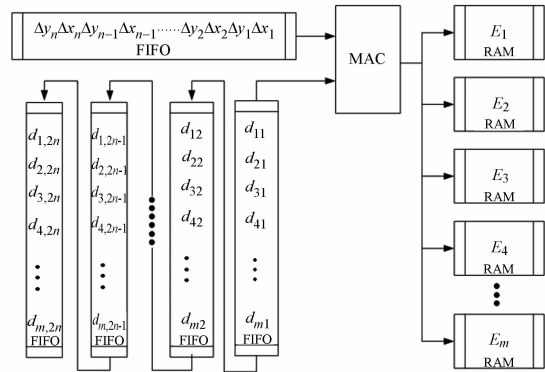


图 3 波前复原计算流程图

Fig. 3 Flow diagram of wave-front reconstruction

采用的算法如下:

(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  $\Delta x_1$ , 将其分别与复原矩阵  $\mathbf{D}$  的第一列向量  $[d_{11} \ d_{21} \ \cdots \ d_{m1}]$  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  $\Delta y_1$ , 将其分别与复原矩阵  $\mathbf{D}$  的第 2 列向量  $[d_{12} \ d_{22} \ \cdots \ \cdots \ d_{m2}]$  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) 依次进行下去,直到斜率向量  $\mathbf{G}$  的最后一个元素  $\Delta y_n$  与复原矩阵  $\mathbf{D}$  的最后一列向量  $[d_{1,2n} \ d_{2,2n} \ \cdots \ \cdots \ d_{m,2n}]$  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:在得到第一个子孔径质

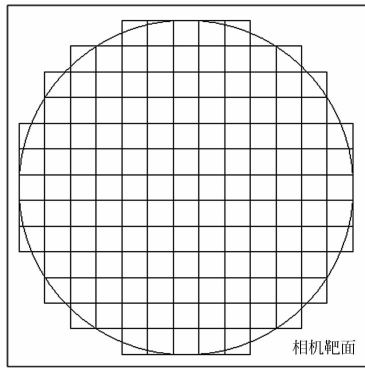


图 4 Shack-Hartmann 波前传感器子孔径布局图  
Fig. 4 Diagram of subaperture for Shack-Hartmann sensor

心偏差数据 ( $\Delta x_1, \Delta y_1$ ) 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,如图 4 所示。缩短了波前处理延时。而文献[9]中采用串行模式进行波前复原计算,造成处理延时的增加。

### 3 实验与结果分析

为验证算法的可行性,在室内搭建了如图 5 所示的自适应光路,其中波前探测器的有效子孔径数为 177,变形镜的促动器数为 97,实验采用激光光源。

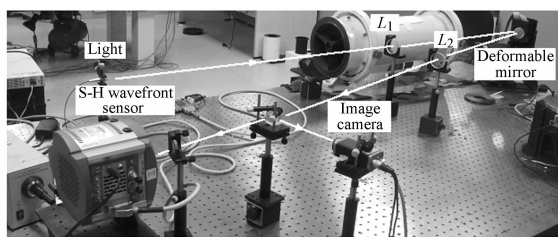
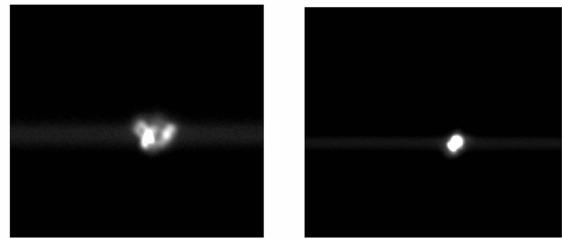


图 5 自适应光路图  
Fig. 5 Diagram of adaptive optical path

图 6 给出了激光光源校正前后的效果对比图。从图 7 和图 8 中可以看出校正后的能量集中度有了明显的提高。

图 9 为处理过程中采用逻辑分析仪实测的波前处理时序图,图中 Frame 信号为图像帧有效信号,高电平有效。DA\_Done 为 D/A 输出完毕信号。从图中可以看出本算法充分利用了非子孔



(a) 未校正 (a) Uncorrect  
(b) 校正后 (b) Corrected

图 6 光源校正效果对比图

Fig. 6 Comparison chart of light source correction effect

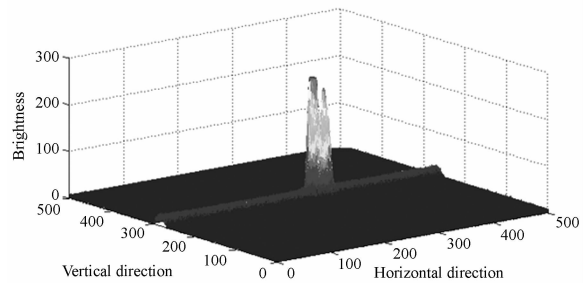


图 7 校正前能量分布图

Fig. 7 Energy distribution before correct

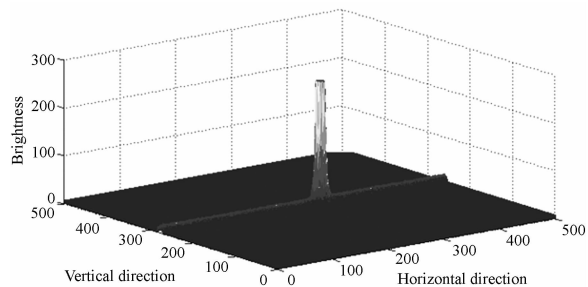


图 8 校正后能量分布图

Fig. 8 Energy distribution after correct

径行的读出时间实现了在当前帧读出结束前完成波前计算。

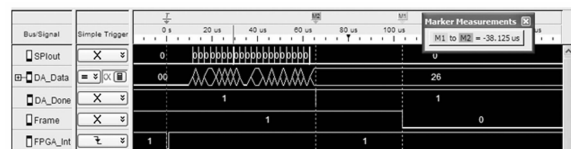


图 9 波前处理延时图

Fig. 9 Time-delay of wave-front process

表 1 给出了原算法和改进后算法在硬件资源消耗方面的对比。

表 1 硬件资源消耗对比表

Tab.1 Comparison of resource consumption of hardware

	Slice(35840)	LUT(71680)	DSP48(80)
文献[9]算法	12 455	17 547	40
本文算法	5 355	9 407	13

从表中可以看出改进后的算法在硬件资源消耗上降低了约 50%，FPGA 内部的 DSP48 核使用量也由原来的 40 个降低为 13 个。提高了系统的处理规模。

#### 参考文献:

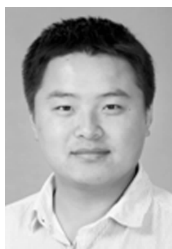
- [1] 王建立,陈涛,张景旭,等. 地基高分辨率光电成像望远镜总体需求及关键技术分析[J]. 光学精密工程,2008,5(16): 2-16.  
WANG J L, CHEN T, ZHANG J X. General requirements and key technologies for the ground-based high resolution EO imaging telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 5(16): 2-16. (in Chinese)
- [2] SANDLER D G, MICHAEL L H, TY M, *et al.*. The 6.5 m MMT infrared adaptive optics system: detailed design and progress report [J]. *SPIE*, 2534:374-377.
- [3] BENDEK E A, HART M, POWELL K B, *et al.*. Status of the 6.5m MMT telescope laser adaptive optics system[J]. *SPIE*, 2010, 7736: 77360O\_1-12.
- [4] TRUONG T N, BOUCHEZ A H, DEKANY R G. Dekany, *et al.*. Real-time wave-front control for the PALM-3000 high order adaptive optics system [J]. *SPIE*, 2008, 7015: 701531\_1-8.
- [5] DUNCAN T S, VOAS J K, EAGER R J, *et al.*. Low-latency adaptive optical system processing electronics[J]. *SPIE*, 2003, 4839: 923-934.
- [6] 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.

## 4 结 论

本文对原有基于块运算的自适应波前处理算法进行了升级和优化。采用核心模块重复利用的波前斜率算法,利用矩阵和向量相乘的可分解性进行波前复原运算。该算法可以充分利用空余子孔径行像素数据读出时间,对于同样的自适应光学系统规模、同样的硬件平台,新算法无论是在硬件资源消耗还是速度上都具有明显的优势。

- [7] ABREU R, CHADWICK D, AMICO R D, *et al.*. The SAAO adaptive optics system [J]. *SPIE*, 2000, 3931: 272-284.
- [8] 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.
- [9] 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)
- [10] 贾建禄,王建立,郭爽,等. 基于 Camera Link 的高速图像采集处理器 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(6): 914-918.  
JIA J L, WANG J L, GUO SH, *et al.*. High speed image grabber and processor based on camera link [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6): 914-918. (in Chinese)
- [11] 贾建禄,王建立,赵金宇,等. 可扩展式自适应光学系统波前处理器的硬件设计 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(3): 370-373.  
JIA J L, WANG J L, ZHAO JY, *et al.*. Hardware design for extendible adaptive optics system wave-front processor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 370-373. (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、2008年于天津大学分别获得学士、硕士学位,2012年于中科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技术的研究与设计及光电望远镜数据通信研究。E-mail: jianluciomp@163.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要研究领域为地基空间目标光电探测技术、大口径望远镜总体技术、大型军用光电系统总体集成技术等。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



王国强(1975—),男,吉林榆树人,副研究员,主要从事空间目标辐射特性分析技术研究。E-mail: wanggq19751110@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)