

文章编号 1004-924X(2017)10-2580-04

基于 FPGA 的自适应光学波前处理算法

贾建禄, 赵金字, 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:针对自适应光学系统对波前处理计算量和实时性要求的提高,提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的自适应光学系统波前处理算法。该算法利用核心处理模块重复利用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,给出促动器所需的促动量。以一片 Virtex-4 LX80 FPGA 作为主核心处理芯片进行了实验验证,结果表明:该算法可降低 50% 的硬件资源,提高了系统波前处理能力;另外,算法可实现在当前帧结束前完成整个波前处理运算,提高了系统的波前处理速度和整个自适应光学系统的控制带宽。在室内的 Shack-Hartmann 波前传感器的的自适应光学系统上进行了激光光源的校正实验,结果显示光源能力集中度有了明显的提高。

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

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172510.2580

Adaptive optical wave-front processing algorithm based on FPGA

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: wangjianli@ciomp.ac.cn

Abstract: A wave-front processing algorithm was proposed based on Field Programming Gate Array (FPGA) for improving computational complexity and real-time ability of adaptive optical systems. The reuse of core processing module was used to calculate a wave-front slope, and the decomposition of matrix and vector was used to calculate the wave-front restoration. Under the synchronization of pixel clock, the whole wave front was processed and the momentum required by an actuator was given. A piece of Virtex-4 LX80 FPGA was taken as a main chip to perform experimental verification, and the experiment results show that the algorithm reduces the hardware resources by 50%, and improves wave-front processing ability of the system. Furthermore, all of the wave-front processing operations can be implemented in the current frame before the processing end, which improves processing speeds and control bandwidths of the adaptive optic system. The new algorithm has carried on the correction experiment of the laser light source for a Shack-Hartmann in the room, and it shows a higher concentration ratio of light source.

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

收稿日期:2017-05-03;修订日期:2017-05-24.

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

波前处理器是自适应光学系统 (Adaptive Optics, AO) 的运算核心,用于把哈特曼波前传感器所测到的波前畸变信息转化成校正器的控制信号,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,必须提高自适应光学系统的采样频率和运算速度。在系统采样频率一定的情况下,波前处理机的计算延时会直接影响系统的控制带宽。在当前图像帧结束的情况下,越早给出波前校正量越能更好地补偿波前像差,实现波前校正,如中科院光电所的 61 单元 AO 和长春光机所的基于 GPU 的液晶自适应光学系统。在这些系统中,主要运用块处理策略,将输入数据分割成块,将不同的块分配给不同的处理单元进行处理。但随着自适应系统规模的不断增大和实时性要求的不断提高,数据量和计算量剧增,由此导致所需的资源和传输时间也在不断的增加。如中科院光电所研制的 2 900 Hz、61 单元的波前处理机共用 17 片 DSP,计算延时为 340 μ s。中科院长春光机所基于 GPU 的液晶自适应光学系统的波前处理延时为 200 μ s。本文在原有系统上对算法进行了升级,提出一种基于现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 的波前处理算法,在有效降低硬件资源的前提下,可在当前帧结束前完成所有的波前处理运算,提高了系统的波前处理速度。

2 波前斜率计算

在哈特曼传感器中,子孔径波前斜率的主要计算如下:

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

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。采用核心模块重复利用的波前斜率计算方法,在如图 1 所示的哈特曼波前传感器子孔径布局下,设计选用 2 个乘法器、13 个 3 通道累加器和 1 个除法器。首先,CCD 像素数据在像素时钟的同步下首先同时进入乘法器 2,分别算出

$x_i I_{i,j}$ 和 $y_j I_{i,j}$ 。然后, $x_i I_{i,j}$ 和 $y_j I_{i,j}$ 和当前像素灰度值 $I_{i,j}$ 同时进入 13 个 3 通道累加器,计算出 $\sum_i x_i I_{i,j}$, $\sum_j y_j I_{i,j}$ 和 $\sum_{i,j} I_{i,j}$ 。随着子孔径最后一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,计算得到当前子孔径的质心数据 $(x_{\text{spot}}, y_{\text{spot}})$ 。最后,将得到的质心数据 $(x_{\text{ispot}}, y_{\text{ispot}})$ 与参考点数据 $(x_{\text{iref}}, y_{\text{iref}})$ 相减得到质心偏差数据 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 。

波前斜率算法的优点在于:(1)整个算法只需要两个乘法器和一个除法器;(2)3 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。

如图 1 所示,137 个子孔径的最后一个像素结束后,当前帧并没有结束,这为后续的处理留有充分的时间。

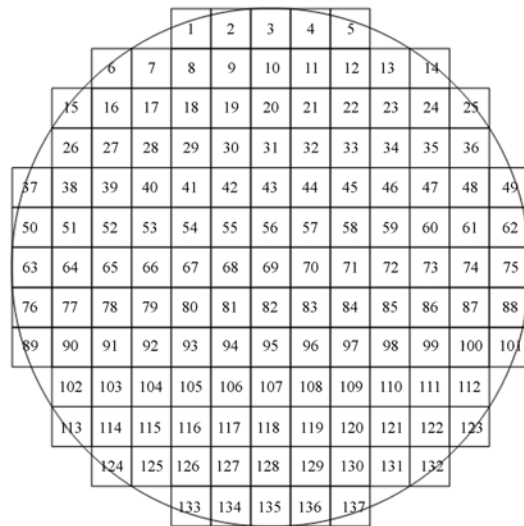


图 1 Shack-Hartmann 波前传感器的子孔径布局

Fig. 1 Sub-aperture layout of Shack-Hartmann sensor

3 波前复原计算

基于直接斜率法的波前复原运算公式如下:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & \cdots & d_{1,2n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & \cdots & d_{2,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & \cdots & d_{m,2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$U = DG, \quad (3)$$

其中： D 是波前复原矩阵， G 是斜率向量，有 $2n$ 个分量； V 是复原电压向量； n 为自适应光学系统的有效子孔径数； m 为驱动器数，一般有 $2n > m$ 。采用的算法如下：(1)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 ，并分别与复原矩阵 D 的第一列向量 $[d_{11} \ d_{21} \ \dots \ \dots \ d_{m1}]$ 中的每一个元素相乘。(3)从 FIFO 中读出第二个元素数据 Δy_1 ，并分别与复原矩阵 D 的第 2 列向量 $[d_{12} \ d_{22} \ \dots \ \dots \ d_{m2}]$ 中的每一个元素相乘，将结果与第一次乘结果做累加运算。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 D 的最后一列向量 $[d_{1,2n} \ d_{2,2n} \ \dots \ \dots \ d_{m,2n}]$ 相乘，并将结果累加到输出结果上，即可得到复原向量 V 。该算法的优点在于：(1)在得到当前子孔径质心偏差数据 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 后即可进行波前复原计算。(2)充分利用了子孔径斜率计算过程中空余行的等待时间，大大缩短了处理延时，为波前处理零延时提供了可行性。

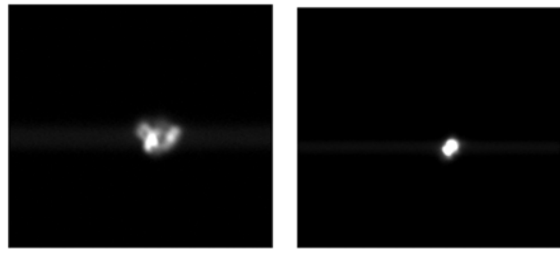
4 实验与结果分析

基于 FPGA 的波前处理算法在 97 单元变形镜，有效子孔径为 137 单元的 Shack-Hartmann 波前传感器的自适应光学系统上进行了实验验证。实验采用的 Shack-Hartmann 波前传感器为 Nuvu 公司的 Nuvu128，靶面尺寸为 128×128 ，相机帧频为 976 frame/s。相机的转移时钟频率为 20 MHz。

图 2 给出了光源校正前后的效果对比图。从图中可以看出，校正后能量集中度有了明显的提高。

图 3 为校正过程中所测的时序图，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，在当前帧结束前已经完成波前计算并给出促动器所需的促动量，提高了系统的控制带宽。

实验中采用湍流模拟屏来模拟大气扰动。图 4 和图 5 分别给出了 Greenwood 频率为 100 Hz，大气相干长度 r_0 为 15 cm，波前探测器的 SNR 为 8，S-H 采样频率 f 为 1 000 Hz 的条件下校正前后的序列图像。



(a)校正前 (b)校正后
(a) Before correction (b) After correction
图 2 光源校正效果对比图

Fig. 2 Effect of light source correction

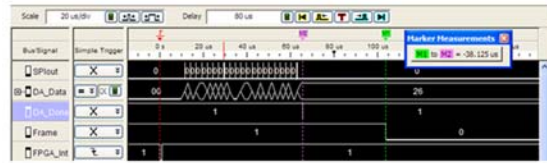


图 3 波前处理延时图

Fig. 3 Time delay waveform of wave front process

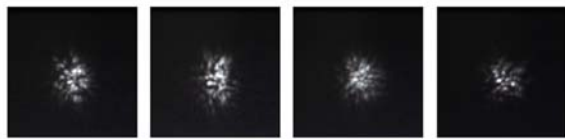


图 4 当 $f_w = 100$ Hz, $r_0 = 15$ cm, SNR = 8, $f = 1\ 000$ Hz 时校正前的光源序列图像

Fig. 4 Image sequence of light source before correction with $f_w = 100$ Hz, $r_0 = 15$ cm, SNR = 8 and $f = 1\ 000$ Hz

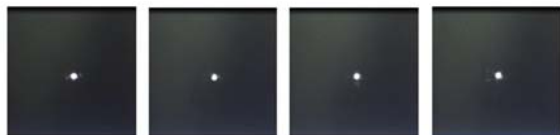


图 5 当 $f_w = 100$ Hz, $r_0 = 15$ cm, SNR = 8, $f = 1\ 000$ Hz 时校正后的光源序列图像

Fig. 5 Image sequence of light source after correction with $f_w = 100$ Hz, $r_0 = 15$ cm, SNR = 8 and $f = 1\ 000$ Hz

表 1 给出了本文算法和原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 hardware source consumption between proposed and original methods

	Slice(35840)	LUT(71680)	DSP(80)
原算法	12 455	17 547	40
新算法	5 355	9 407	13

Slice、LUT 和 DSP 资源是衡量一款 FPGA 芯片的主要指标。其中 Slice 和 LUT 是 FPGA 进行逻辑控制的主要单元,DSP 单元是 FPGA 进行乘法运算的主要单元。

从表 1 中可以看出,本文算法在硬件资源消耗上降低了 50%,DSP 由原来的 40 降低为 13,系统的处理能力得到了提升。同时,所使用的硬件资源占总资源的比例相对较小,这为软件算法升级提供了可能性。

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,2008,16(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)
- [2] GOODSELL S J, FEDRIGO E, DIPPER N A, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project [J]. *SPIE*, 2005, 5903: 59030G.
- [3] GOODSELL S J, GENG D, FEDRIGO E, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project: Part 2[J]. *SPIE*, 2006, 6272: 627241.
- [4] GOODSELL S J, GENG D, YOUNGER E J, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project: Part 3[J]. *SPIE*, 2007, 6691: 669103.

作者简介:



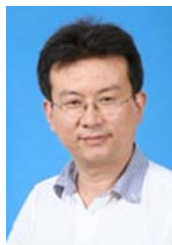
贾建禄(1982—),男,内蒙赤峰人,博士,副研究员,2006年、2008年于天津大学分别获得学士、硕士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事自适应光学系统波前处理的研究。E-mail: jianluciomp@163.com

5 结 论

本文提出了一种基于 FPGA 的波前处理算法。该算法采用高性能的 FPGA 作为核心器件,可在当前帧结束前完成所有的波前处理运算,实现系统闭环,提高了整个系统的控制带宽。最后,在室内的 97 单元变形镜的自适应光学系统上进行了激光光源的校正实验。实验结果表明,光源的能量集中度有了明显的提高,硬件资源降低了 50%,取得了良好的效果。

- [5] 郑文佳,王春鸿,姜文汉,等.基于脉动阵列的自适应光学实时波前处理机设计[J].光电工程,2008,35(5):44-49.
ZHENG W J, WANG CH H, JIANG W H, *et al.*. Design and analysis of real-time adaptive optics wavefront processor based on systolic array [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(5): 44-49. (in Chinese)
- [6] 蒋志凌.哈特曼波前传感器特性和应用研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉物理与数学研究所),2005.
JIANG ZH L. *Study on Characteristics and Applications of Hartmann Wavefront Sensor*[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [7] GAFFARD J P, BOYER C. Adaptive optics; effect of sampling rate and time lags on the closed loop bandwidth[J]. *SPIE*, 1990, 1271: 33-50.

通信作者:



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