

通用自适应光学波前实时处理机的设计

陈善球^{1,2,3} 刘超¹ 许冰¹ 叶玉堂²

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

²电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 611731

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为满足天文观测及激光通信等领域的1000单元级以下的自适应光学(AO)系统的高速实时处理的要求,提出一种单板上实现高速实时计算的通用化技术方案。采用多核CPU实时计算波前,结合高速图像采集卡,以满足系统高帧频的需求;计算机系统采用Xenomai实时操作系统及Linux操作系统,以满足AO系统低延迟的需求;实现了在单台计算机上集成实时处理与监控的紧凑型处理系统。采用向量指令优化及多核并行运算,在6核的计算平台上获取了峰值每秒510亿次浮点运算的计算能力,102 GB/s的通信带宽。仿真结果表明可以对1145个驱动器,949个子孔径的系统进行2000 Hz的处理,处理延迟低于240 μ s;通过修改参数后,应用于光通信的137单元AO系统中,校正后斯特列尔比为0.61。结果表明该处理方案能满足1145单元以下AO系统2000 Hz实时处理的需要,并具有通用性。

关键词 自适应光学; 实时处理; 多核CPU; 流水线处理

中图分类号 O439; TH743 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1212001

Design of Generic Adaptive Optics Wave-Front Real-Time Processor

Chen Shanqiu^{1,2,3} Liu Chao¹ Xu Bing¹ Ye Yutang²

¹*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

²*School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China*

³*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract In order to satisfy the requirement of high speed and real-time processing for 1000-unit class adaptive optics (AO) system in telescope and free space laser communication system, a generic high speed and real-time processing platform on one board is proposed. Multi-core center processing unit (CPU) is arranged for wave-front real-time computing, combined with high speed frame-grabber, to achieve the purpose of high frame-frequency. Xenomai real-time operation system combined with Linux operation system is used to satisfy the requirement of low latency. A compact real-time controller is assembled in one computer. Computing power of 51 giga floating-point operations per second (GFLOPS) and communication band-width of 102 GB/s are achieved in a computer with 6-core, via vector instruction optimization and processing in parallel with multi-core CPU. The emulation result shows that processing frequency can be up to 2000 Hz for 1145-unit AO system with 949 sub-apertures, and the delay is below 240 μ s. This processor is introduced to AO system for laser communication via adjusting the parameters, and Strehl ratio of 0.61 is achieved after correction. This indicates the scheme can satisfy the requirement of high speed and low latency for AO system with actuators below 1145 unit, with the merit of general purpose.

Key words adaptive optics; real-time process; multi-core CPU; pipeline processing

OCIS codes 010.1080; 100.2000; 060.2605

收稿日期: 2015-05-25; 收到修改稿日期: 2015-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61308082)

作者简介: 陈善球(1981—),男,博士研究生,副研究员,主要从事自适应光学实时处理方面的研究。

E-mail: greencsq@126.com

导师简介: 许冰(1960—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光净化自适应光学等方面的研究。E-mail: bingxu@ioe.ac.cn

1 引言

观测暗弱的天文目标或激光进行大气传输时,由于受大气湍流的影响,造成接收的光斑弥散^[1-4]。为了克服大气湍流的影响,需要配备自适应光学(AO)系统对大气湍流引入的光学畸变进行实时校正^[1-4]。为实现对大气湍流造成的时域中低频动态像差的有效校正,通常要求系统工作在2000 Hz级高帧频,且具备低于1 frame时间延迟的处理能力^[5-14]。通常采用现场可编程门阵列(FPGA)和数字信号处理器(DSP)等专用器件的实时处理方案来满足AO系统高帧频低延迟的需求^[5-10]。2003年,Duncan等^[8]为3.5 m的星火光范围(SOR)望远镜系统配备1024块DSP实现了931单元AO系统的处理;2011年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所贾建禄等^[9]采用10块FPGA板卡实现了千单元级的处理。采用FPGA等专用芯片的方案,可以实现时钟级别的延迟及易于实现流水线处理,因此该架构的系统满足2000 Hz高帧频的同时可以获取几十微秒级的处理延迟^[5-10]。但是,由于FPGA片内高带宽存储资源容量的限制,单芯片的处理能力一般在200单元以下,对于4 m级口径所需要的1000单元级的系统需要采用多板互联的方式^[7-10];同时这种采用专用芯片的模式对于构建时间长达数年的大型望远镜系统而言,将带来极大的维护风险。

近年来,随着中央处理器(CPU)、通用图像处理器(GPU)等通用计算器件的飞速发展,利用CPU与GPU等通用器件来实现AO系统的实时处理被广泛应用到大型地基望远镜AO系统中或极大型地基望远镜系统中的AO系统的方案讨论中^[11-14]。2012年,Wang等^[11]探索了应用GPU解决30 m望远镜(TMT)实时处理问题,利用7个GPU对TMT的AO系统进行复原运算,其处理时间为1.7 ms。同年,Basden等^[12]介绍了利用CPU与GPU实现大型望远镜项目(VLT)中的AO处理系统的改造以及应对未来的42 m极大型望远镜(E-ELT)AO系统的适应性,探索实现通用化的AO实时处理,期望统一各种小型AO处理系统的架构;其中对欧洲南方天文台VLT的行星探索者(SPHERE)项目的1377个驱动器的AO系统,采用双CPU的计算平台,处理时间为323 μ s。利用通用的计算器件,能实现处理系统的快速升级换代;同时由于CPU与GPU具有大容量的高带宽存储资源,能在单板上集成更大单元数的处理系统。但是由于受限于通用的操作系统的动态调度算法,在同时运行监控与实时处理任务时,无法确保实时任务的调度,导致系统实时处理任务延迟的不确定。为解决延迟的不确定性问题,上述的方案采用至少2台计算机,其中实时处理计算机上尽量减少不相关的任务,以保证系统的低延迟的要求^[11-14]。

本文提出一种基于Xenomai实时操作系统^[15]与Linux操作系统的多核CPU的处理方案。该方案利用多核CPU实现AO系统的实时数据处理,由于CPU的高性能,可以在单板上实现1000单元级的实时数据处理,克服了采用FPGA方案单芯片内处理单元数有限的局限。通过采用Xenomai实时操作系统,在单台计算机上集成了实时处理及监控任务,突破了传统的CPU与GPU的方案无法在一台计算机上同时集成监控及实时处理任务的局限^[11-14],有效地简化了系统结构,并且采用流水线及并行处理的方式缩短了延迟时间,提升了系统校正能力。其高性能的计算能力及结构紧凑带来的高可靠性,使系统不仅能满足天文望远镜AO系统的需求,同时也适用于高可靠性及动态配置要求的激光净化AO系统^[16]及多通道的AO系统^[17]。

2 自适应光学实时处理算法及实时处理架构

2.1 自适应光学实时处理算法介绍

自适应光学实时计算算法包含3个部分:斜率提取、复原运算及控制运算。对于采用Shack-Hartmann波前传感器的自适应光学系统,采用质心运算的斜率提取算法,即

$$P_{i,j} = \begin{cases} I_{i,j} - T_{i,j}, & I_{i,j} - T_{i,j} > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (1)$$

$$S_{x,k} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=0,j=0}^{M,N} P_{i,j} \times j}{\sum_{i=0,j=0}^{M,N} P_{i,j}} - C_{x,k}, & \sum_{i=0,j=0}^{M,N} P_{i,j} > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (2)$$

$$S_{y,k} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=0,j=0}^{M,N} P_{ij} \times i}{\sum_{i=0,j=0}^{M,N} P_{ij}} - C_{y,k}, & \sum_{i=0,j=0}^{M,N} P_{ij} > 0, \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中 P_{ij} 与 I_{ij} 分别为处于坐标 (i,j) 处的像素暗场处理后的量化值及处理前的量化值, T_{ij} 为暗场数据, 包含阈值与相机噪声两个部分的数据, M 与 N 是子孔径 y 方向与 x 方向的像素数量个数, $C_{x,k}$ 与 $C_{y,k}$ 为利用平行光标定的传感器的第 k 个子孔径的 x 与 y 方向的中心位置, $S_{x,k}$ 与 $S_{y,k}$ 为第 k 个子孔径提取的 x 方向与 y 方向的斜率值。

直接斜率法^[18]具有结构简单、利于并行运算等优点, 被广泛应用于自适应光学复原运算中, (4)式表示了误差电压的获取过程, 其中 S 为(3)式获取的斜率组成的向量, 而 R 为复原矩阵, 是影响矩阵的伪逆, 影响矩阵可通过对实际光路测试获取^[18], E 为误差电压, 表示为

$$E = R \times S. \quad (4)$$

对于自适应光学闭环控制系统, 利用比例积分控制算法可从误差电压中获取到每个驱动器的施加电压, 离散化的控制算法为

$$\{V_k^i\} = a \times \{V_{k-1}^i\} + b \times \{e_{k-1}^i\}, \quad (5)$$

式中 a 与 b 为控制参数, V_k^i 与 e_k^i 为第 i 个驱动器 k 时刻的电压值及误差电压值。

2.2 基于多核 CPU 的自适应光学系统实时处理系统架构及处理策略

文献[1]指出, 自适应光学系统的延迟及频率影响着系统的时域校正效果, 而单元数决定系统的空间校正频率, 两者最终影响系统校正后的残差, 因此自适应光学实时处理的目标是在实现一定单元数下的高帧频处理, 同时实现低延迟。

为保证数据处理的高帧频特性, 系统需要压缩处理时间, 处理时间包含传输时间、计算时间及任务调度等导致的延迟。为降低传输时间, 采用高速的 PCI-express x4 接口的光纤采集卡, 具有约 800 MB/s 的传输速度^[19], 其外部接口采用高速串行的 Aurora 协议, 可以实现双向传输, 从而实现电压与图像信息的传输; 在计算上, 采用向量指令优化及多核心并行运算对 AO 系统的复原运算进行优化处理, 以降低计算时间; 在实时操作系统中将实时处理任务设定为最高优先级的任务, 采用固定优先级调度算法, 可以保证任务的实时性, 实现数据处理的低延迟; 在硬件上, 采用中断触发的模式, 保证硬件到软件响应的及时性, 实现任务的及时处理, 实现任务调度的低延迟处理。

2.2.1 实时处理系统结构及延迟分析

图 1 为 AO 实时处理系统的原理框图。其处理系统包含 camera-link 接口转 fiber 接口卡(2), 图像采集卡(3), 处理计算机(4)及数字模拟信号转换(DAC)通信卡(5)。转接卡(2)一方面发送转换的图像数据, 另一方面接收处理计算机发送的电压数据, 并通过自定义的接口发送到 DAC 通信卡(5)。其处理的数据流程相机(1)的图像数据经过 camera-link 转光纤板卡(2), 流向光纤数据采集板卡(3)上的存储器中, 当 1 frame 图像输出完成时, 采集卡接收到帧结束信号, 在给定时间延迟(由板卡时钟计数, 计数器由软件设置, 用于流水线操作)后, 发送中断给计算机(4), 计算机在收到中断后, 发起直接内存访问(DMA)传输, 图像数据通过高速的 PCI-express 接口卡后传输到计算机内存; DMA 传输完成时, 计算机收到 DMA 中断, 唤醒实时线程, 对图像数据进行计算, 在电压计算完成后, 电压数据通过光纤数据采集卡(3)将数据传送给 camera-link 转光纤板卡(2), 最终通过附加的 DAC 通信卡(5)将电压输出到高压放大器(HVA)(6)。在验证大单元数的系统性能时, 仿真板卡(7)代替真实的图像传感器实现仿真图像数据输入功能。

在顺序处理方式下, 系统延迟等于系统的处理时间。系统的处理时间包含 3 个部分: 图像传输时间 T_0 、计算时间 T_1 及操作系统调度时间 T_2 。在图像传输方面, 利用板卡缓存实现数据的流水线传输, 从而保证数据从相机输出到图像采集卡存储器上可以实现亚微秒级延迟, 远小于图像从板卡到计算机内存之间的传输时间; 因此 T_0 可近似等效为图像数据从板卡到计算机内存的传输时间, 其时间等于传输的数据量与图像采集卡的传输速度之比。计算时间 T_1 等于计算量与计算性能的比值, 计算量随驱动器个数增加而增加, 在驱

动器与子孔径个数相近的情况下,依据(4)式,复原运算的运算量与驱动器的个数的平方成线性关系,在千单元级系统中,是计算量最大的部分;本文主要针对复原运算进行优化处理。对于多任务系统的调度,一方面由于板卡发起中断到计算机响应中断存在一段时间,定义为中断响应时间,且伴随着抖动,与计算机的软硬件环境相关,是与计算无关的无效时间,决定了计算机系统能处理的最高帧频;另一方面,传统多任务操作系统的动态优先级调度算法会导致处理任务被其他任务打断,导致处理任务的结束时间与开始时间之间的间隔时间不确定。

为解决调度任务引起的不确定性,满足AO系统的低延迟特性,系统软件采用Xenomai 3.3+Linux 3.8.6操作系统构成实时开发环境,在实时操作系统内,以固定优先级的调度算法保证任务的实时处理。该系统在满足系统的实时性的同时, Linux操作系统为用户提供用户操作环境,从而在单台计算机上集成实时处理及监控功能。

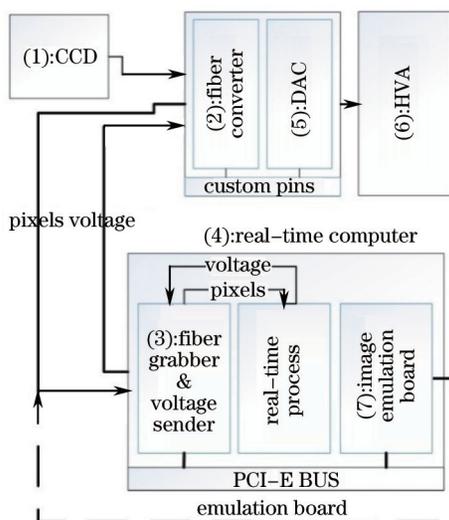


图1 AO实时处理系统原理框图

Fig.1 Block diagram of AO real-time processor system

在硬件方面,实验系统采用6核CPU(core i7 5930 K@3.5 GHz)的计算机,图像采集卡方面采用PCI-express 1.0 x4标准的光纤数据采集卡^[19]。

2.2.2 中断响应时间及处理的最高帧频

对系统调度引入的延迟时间进行研究,记录从板卡发出中断到实时程序开始处理之间的时间,以确定该架构处理的最高帧频。在图像采集卡上设计计数器,当帧信号变低时清零。记录开始中断到中断响应之间的时间间隔,由于两者之间存在图像传输,因此同时记录图像传输的时间,两个时间的差值包含2次中断,差值的结果如图2所示。在连续记录的100000次数据中,仅有6次时间大于10 μs,其最大值及抖动范围小于60 μs。结果表明,对于帧频为20000 Hz的实时处理任务,系统有可能会出现问题;但是对于10000 Hz的处理任务,即使在最差的情况下,计算机也有40%的有效时间用于处理实时任务。一般AO系统的帧频在5000 Hz以下,表明利用该架构在传输及计算时间满足要求的情况下,可以实现AO系统的实时数据处理。

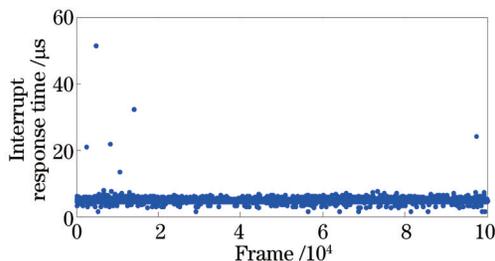


图2 中断响应时间

Fig.2 Interrupt response time

2.2.3 流水线处理下图像传输时间与延迟的关系

图3为AO实时处理示意图。如图3(a)所示,在顺序处理模式下,忽略场消隐时间,处理延迟包含图像传输时间、计算时间与电压传输时间3个部分。考虑到图像传输采用相对芯片内传输较慢的接口,传输时间占总延迟的比例较大,采用流水线方式以降低传输延迟进行处理,相对于图3(a)的在整帧图像传输完成后才开始传输,流水线的方式如图3(b)所示,在1 frame图像输出尚未完成时,提前发起中断,启动图像数据的传输,由于采集卡图像传输速度远快于相机图像的输出速度,通过合理的提前量,使在相机图像输出完成时,计算机同时完成图像的传输。在硬件设计上,采集卡将每帧图像缓存到高速大容量的动态随机存储器(DDR2)首地址为0的区域,而计算机在收到中断后,从首地址为0的区域读取该图像。由于DDR2的带宽高于相机输出与图像采集卡的带宽之和,因此能够实现图像数据的不间断传输。

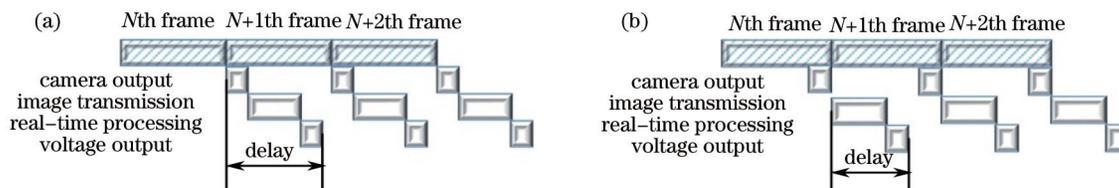


图3 AO实时处理示意图。(a)顺序处理;(b)流水线处理

Fig.3 Block diagram of AO real-time process mode. (a) Process in sequence; (b) process in pipeline

假定相机输出的周期固定为 T ,图像传输时间为 t_1 ,设置寄存器的数值,在收到图像结束传输的信号后延后 $T-t_1$ 发送中断,等效于提前 t_1 时间发送中断信号,使图像传输与相机数据输出接近于同时完成,隐藏了图像传输的延迟。采用图3(b)所示的流水线处理的策略,图像采集卡的传输速度仅仅决定了系统能够处理的最高频率,而对系统的延迟影响较小。

2.3 实时计算及优化策略

2.3.1 流式单指令流多数据流扩展(SSE)向量指令优化

复原运算时间随驱动器的个数平方增长,是千单元级及以上系统中计算量及传输量要求最高的部分,为优化复原运算时间,采用向量计算指令对复原运算进行优化,以降低复原运算时间。

对复原运算采用SSE向量计算指令进行加速,针对CPU具有128位寄存器的特性,同时进行4个32位浮点数的运算。图4所示为利用SSE向量计算指令对复原运算进行计算的方法:为适应128位的寄存器,将复原矩阵按4行分块,分块后的复原矩阵按列依次取4个数,与相应的斜率向量的元素扩展后的4个浮点数进行向量计算,获取的结果累加到结果寄存器中,在最后一列完成后,可以获得4个驱动器的复原电压值;依次对所有分块进行计算,完成复原运算。由于物理上的复原矩阵存储在物理存储器中,可利用计算的空间相关性以提高缓存命中率,实际存储的复原矩阵重新排序,对于分块的矩阵,其数据如图4所示按列优先进行存储。理论上,相较于原来的每次单个浮点数运算,加速后采用4组数同时计算,计算时间可缩短为原来的1/4。

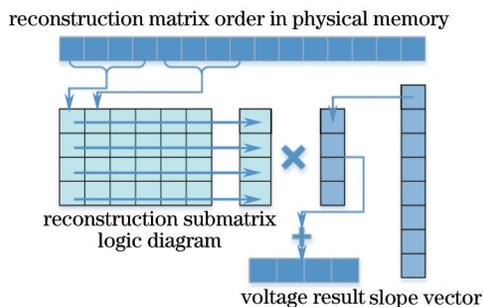


图4 SSE向量计算指令优化示意图

Fig.4 Optimized with SSE vector instruction sets

定义优化后与优化前的性能之比为加速比。对1024驱动器,1024个子孔径系统的复原运算的1/8块计算作对比研究,采用SSE指令优化的处理性能,C语言的100000 frame的平均处理时间为732 μ s;采用SSE指令的100000 frame的平均时间为72 μ s,优化后取得了近10倍的加速比,超过理论的加速比,这主要是由于C

语言的效率没有充分发挥 CPU 的计算性能导致的。

2.3.2 多核并行优化

采用多核心的 CPU,对复原运算采取分块运算策略,将(4)式的运算平均分割,则每个核心上的运算为

$$E_i = R_i \times S, \quad (6)$$

式中 E_i 与 R_i 为源矩阵的按行分块矩阵,由于 SSE 向量计算的指令要求,其分块的行数是 4 的倍数。对于不是 4 的倍数,最后用 0 补齐。将复原矩阵的每块分配到每个核心(线程)上,同时为便于对复原电压进行滤波处理,分块运算完成后,在主线程上进行同步,等待所有分块计算完成。因此处理时间包含计算时间及线程之间的同步时间。

在 6 核心的 CPU 上,分别采用单线程、2 线程、4 线程和 8 线程对 1024 驱动器、1024 子孔径的系统 100000 frame 的平均复原计算时间分别为 315、159、82、72 μs ,多线程的加速比分别为 1.98、3.84 和 4.37。结果表明,经过向量指令及多核并行优化后,获得了 43 倍的加速比,在复原计算能力上,6 核 CPU 是完全能满足 1024 单元系统 2000 Hz 需求的。

3 系统实验验证

为验证系统运算的正确性,并获取自适应光学系统采用第 2 节所述策略下的整体性能。利用图像生成器模拟输出符合传感器时序的 Shack-Hartmann 的图像数据,验证 1000 单元级系统的计算正确性,获取系统的处理延迟。最终在修改参数后,将系统应用到了光通信系统的 137 单元的自适应光学系统中,验证系统的闭环效果。

3.1 1200 单元仿真验证条件及实时处理结果

利用仿真平台生成 35×35 的驱动器(有效驱动器 1145 个), 35×35 的子孔径(有效 949 个子孔径)的配置的系统,其中图像靶面为 $210 \text{ pixel} \times 210 \text{ pixel}$ 。模拟对单个驱动器施加正弦波的电压,利用仿真软件生成 180 frame 动态的传感器图像数据,并获取复原矩阵等系统所需要的参数。仿真产生的动态图像循环输出,实时处理机对其进行处理,取(5)式中的控制参数 $a=0$ 、 $b=1$,记录输出的电压数据,并与已知输入的电压进行对比,验证系统的计算正确性;测试各阶段的时间,获取实时处理机的性能参数。

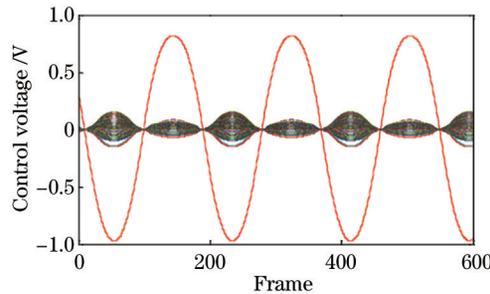


图 5 处理系统输出的 1145 路控制电压

Fig.5 1145-channel output control voltage of the actuators

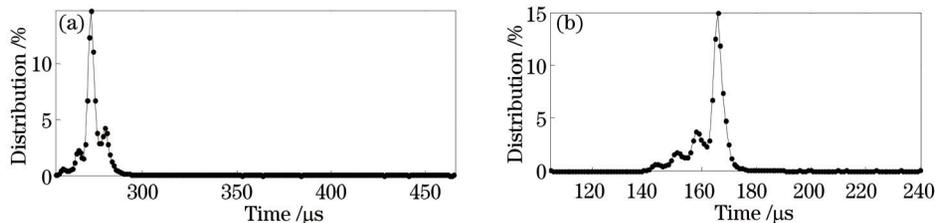


图 6 对 1145 个驱动器、949 个子孔径的系统进行实时处理的 100000 frame 的时间分布图。(a) 顺序处理;(b) 流水线处理

Fig.6 Distribution of latency for consecutive 100000 frames for system with 1145 actuators and 949 sub-apertures.

(a) Process in sequence; (b) process in pipeline

复原的 1145 路电压曲线如图 5 所示,复原的所有电压中只有一个与输入像差相同的驱动器的电压为正弦波,验证了系统的正确性;图中其他驱动器的波动,是由系统的交连特性引起的。实时处理系统在计算时

采用6核并行处理,最终的处理时间分布如图6所示。整个处理时间最大值小于 $450\ \mu\text{s}$,平均处理时间为 $275\ \mu\text{s}$,其中0.7%的时间大于 $310\ \mu\text{s}$,能满足2000 Hz高帧频系统的需求。为降低延迟,对图像传输进行2.2.3节描述的流水线处理,针对2000 Hz的处理系统,由于图像传输时间最小值为 $112\ \mu\text{s}$,因此取中断处理延迟 $388\ \mu\text{s}$,等效于提前 $112\ \mu\text{s}$,流水线处理后测试的延迟分布如图6(b)所示,重新测试后的100000 frame数据,平均延迟为 $163\ \mu\text{s}$,最大延迟低于 $240\ \mu\text{s}$,其中只有5 frame数据大于 $180\ \mu\text{s}$ 。复原运算经过优化后,平均处理时间为 $83\ \mu\text{s}$,此时峰值运算速度为51 GFLOPS,传输带宽为102 GB/s。结果表明,6核CPU的计算能力,具有在2000 Hz频率下处理1145单元的系统的处理能力。

3.2 137单元AO系统闭环处理结果

将AO系统的配置文件如子孔径配置文件、子孔径及驱动器个数、复原矩阵、定标数据等参数化后,修改不同的参数以适应不同配置的AO系统,实现AO实时处理的通用化处理。根据137单元的系统修改相应的参数文件,作为实时处理系统的输入参数,用于对自由空间光通信系统中的AO系统进行闭环工作,系统的相机靶面为 $120\ \text{pixel} \times 120\ \text{pixel}$,处理帧频为1700 Hz。由于相机的输出为4头并行输出,在完成图像传输后,增加对接收的图像进行数据重组的模块;最终,处理系统对137单元系统的实时处理的总的时间最大值为 $165\ \mu\text{s}$,平均处理延迟 $112\ \mu\text{s}$;经流水线处理后,平均延迟时间为 $65\ \mu\text{s}$ 。对大气相干长度 $r_0=4.7\ \text{cm}$ 的强湍流进行校正,图7显示了系统开闭环的远场图像,闭环工作后,平均斯特列尔比由0.16提升到0.61。结果表明,该处理系统可以通过修改参数能有效地实现不同配置的AO系统的实时处理。

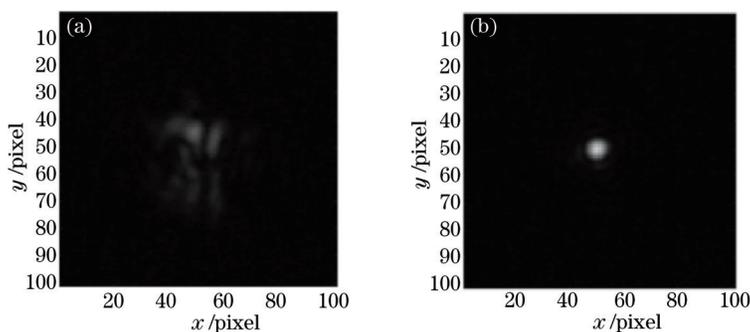


图7 137单元系统(a)AO不工作时与(b)AO工作时的远场光斑

Fig. 7 Image of far field when 137-unit AO system in (a) open mode and (b) close loop

4 结 论

针对自适应光学所要求的高帧频、低延迟的处理能力,提出了利用实时操作系统及多核CPU的自适应光学实时处理机的架构,研究了该架构下处理的最高帧频,通过指令优化及并行处理,获取了43倍的加速比,最终在单板上同时集成了千单元级自适应光学系统所需的实时处理功能及监控功能的处理架构,其结构相对于多板卡级联的方式更紧凑、故障分支少、可靠性高;千单元的处理平台上证明了该处理系统能在单板上满足1145单元的自适应光学2000 Hz的高帧频处理,且最大延迟低于 $240\ \mu\text{s}$,平均延迟为 $163\ \mu\text{s}$;在激光通信领域的137单元系统上对强湍流进行校正,斯特列尔比从0.16提升到0.61,能满足强湍流条件下相干激光通信对大气湍流的时域校正的要求。仿真与实验结果表明该处理架构具有1145单元以下系统的通用化处理能力。

参 考 文 献

- 1 Hardy J W. Adaptive Optics For Astronomical Telescopes[M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- 2 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, *et al.*. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900106.
姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900106.
- 3 Liu Chao, Chen Shanqiu, Liao Zhou, *et al.*. The performance of the adaptive optics in the waveband of free-space coherent laser communications[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2605-2610.

- 刘 超, 陈善球, 廖 周, 等. 自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2605-2610.
- 4 Chen Jingyuan, Chang Xiang, Zhou Yu, *et al.*. Statistical analysis of received photons for lunar laser ranging system with adaptive optics[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0313001.
- 陈京元, 常 翔, 周 钰, 等. 月球激光测距自适应光学系统回波统计分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0313001.
- 5 Reinig M, Gavel D, Ardestani E, *et al.*. Real-time control for Keck Observatory next-generation adaptive optics[C]. SPIE, 2010, 7736: 77363J.
- 6 Zhang Y Y, Chen S T, Li M. The implementation of adaptive optics wave-front spot extraction on FPGA[J]. Journal of Optical Technology, 2013, 80(1): 49-53.
- 7 Wang C X, Li M, Wang C H H, *et al.*. Real time implementing wave-front reconstruction for adaptive optics[C]. SPIE, 2004, 5639: 199-204.
- 8 Duncan T S, Voas J K, Eager R J, *et al.*. Low-latency adaptive optics system processing electronics[C]. SPIE, 2003, 4839: 924-934.
- 9 Jia Jianlu, Wang Jianli, Zhao Jinyu, *et al.*. Adaptive optical wave-front processor based on FPGA[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1716-1722.
- 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.
- 10 Basden A, Myers R, Butterley T. Considerations for EAGLE from Monte Carlo adaptive optics simulation[J]. Applied Optics, 2010, 49(31): G1-G8.
- 11 Wang L, Ellerbroek B. Computer simulations and real-time control of ELT AO systems using graphical processing units[C]. SPIE, 2012, 8447: 844723.
- 12 Basden A G, Myers R M. The Durham adaptive optics real-time controller: Capability and extremely large telescope suitability[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 424(2): 1483-1494.
- 13 Basden A, Geng D, Myers R, *et al.*. Durham adaptive optics real-time controller[J]. Applied Optics, 2010, 49(32): 6354-6363.
- 14 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[C]. SPIE, 2010, 2534: 374-377.
- 15 Barbalace A, Luchetta A, Manduchi G, *et al.*. Performance comparison of VxWorks, Linux, RTAI and Xenomai in a hard real-time application[C]. 15th IEEE-NPSS Real-Time Conference, 2007: 1-5.
- 16 Peng Jiaqi, Hu Xiaochuan, Chen Lixia, *et al.*. Effect of structural parameters of deformable mirrors on phase characteristics of high-power laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0514001.
- 彭家琪, 胡小川, 陈丽霞, 等. 变形镜结构参数对高功率激光相位特性的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0514001.
- 17 Luo Qi, Li Xinyang. Control performance analysis of a double overlap adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501002.
- 罗 奇, 李新阳. 嵌套双自适应光学系统的控制特性分析[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501002.
- 18 Jiang W H, Li H G. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[C]. SPIE, 1990, 1271: 82-93.
- 19 Chen S, Zhao E, Xu B, *et al.*. A compact multi-core CPU based adaptive optics real-time controller[C]. SPIE, 2014, 9280: 928012.

栏目编辑: 史 敏