

文章编号:1001-5078(2024)12-1906-07

· 光电技术与系统 ·

高对比度成像波前检测及校正算法研究

陈墨瑜^{1,2,3}, 张熙^{1,2}, 王钢^{1,2}

(1. 中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;
2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:空间超高对比度成像技术是开展类地行星直接成像探测的必要条件, 该技术的实现依赖于空间星冕仪系统对光学波前的精确控制, 因此需要发展专用的在轨波前检测及校正算法。此类算法已在地基自适应光学系统中广泛应用, 但在空间中, 受限于航天用 CPU 性能和选型限制, 无法基于纯 CPU 运算设计。本文基于 FPGA 和 CPU 混合架构实现波前校正, 在兼顾硬件资源和运算精度的条件下, 能够锁定系外行星探测所需的高对比度成像暗区。上述混合架构的算法在大规模自适应光学系统中也具有显著的速度优势, 针对 100×100 子孔径数的自适应光学系统, 波前处理延时缩短 $1281.826 \mu\text{s}$, 可满足为地基大口径望远镜配备的 ExAO、GLAO 和 MCAO 等自适应光学系统高速并行计算的需求。

关键词: 自适应光学; 高对比度成像; 波前检测及校正; FPGA

中图分类号: P111.33; TP391.8 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.015

Research on wavefront detection and correction algorithms for high-contrast imaging

CHEN Zhao-yu^{1,2,3}, ZHANG Xi^{1,2}, WANG Gang^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
2. CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ultra-high contrast imaging in space is essential for the direct imaging detection of Earth-like planets, the achievement of which depends on the precise control of the optical wavefront by the space coronagraph system, and therefore requires the development of specialized on-orbit algorithms dedicated to wavefront detection and correction. While such algorithms have been widely used in ground-based adaptive optics systems, but in space, they cannot be designed based on pure CPU computing due to the limitations of space CPU performance and selection. Based on the hybrid architecture of FPGA and CPU, the wavefront correction is realized, which is capable of locking the high-contrast imaging dark region required for exoplanet detection while taking into account the hardware resources and computing accuracy. The algorithm of the above hybrid architecture also has a significant speed advantage in large-scale adaptive optics systems, and the wavefront processing delay is shortened by $1281.826 \mu\text{s}$ for a 100×100 sub-aperture adaptive optics system, which can meet the demand for high-speed parallel computation of the adaptive optics systems, such as the ExAO, the GLAO, and the MCAO, which are equipped with the ground-based large-aperture telescopes.

Keywords: adaptive optics; high-contrast imaging; wavefront detection and correction; FPGA

基金项目: 国家自然科学基金天文联合重点支持项目 (No. U2031210); 国家重大科研仪器研制项目 (No. 11827804); 中国载人航天工程巡天空间望远镜专项项目 (No. CMS-CSST-2021-A11; No. CMS-CSST-2021-B04) 资助。

作者简介: 陈墨瑜 (1998 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为高对比度成像波前处理算法。E-mail: zyichen2021@niaot.ac.cn

通讯作者: 张熙 (1984 -), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事自适应光学和空间高对比度成像的研究。E-mail: xzhang@niaot.ac.cn

收稿日期: 2024-02-05

1 引言

太阳系外行星探测是当今天文学研究的重点之一,其中直接成像探测方法可以直接获取系外行星的光信号,使得进一步光谱分析成为可能^[1]。若能实现对位于宜居带系外行星的直接成像探测,将有助于确认是否存在系外生命的特征信号^[2-4]。目前的技术路径是利用星冕仪有效抑制来自主星的衍射光,在成像焦面 PSF 的艾里斑周围获得超高对比度成像区域,从而使行星信号能够被分辨,该技术成像对比度需要达到 10^{-10} ^[5]。

空间系外行星成像星冕仪对光学像差敏感,需要在波前实现 1/100 波长量级的精确相位调制。望远镜至星冕仪系统中的非理想光学元件,以及仪器在太空中相对于地面测试阶段的力、热等环境应力的变化均会引起波前畸变,限制星冕仪实际的成像对比度^[6]。因此星冕仪系统通常需要集成波前检测及校正装置,以有效补偿上述波前畸变的影响,如 Roman Space Telescope (RST) 搭载的星冕仪模块就配备了高低阶波前传感控制系统^[5]用于实现类地行星超高对比度成像。

地基望远镜针对系外行星直接探测所需的高对比度及高分辨成像主要受到大气湍流的影响^[7],需要凭借更高速率的波前检测及校正实现高对比度成像。传统地基自适应光学的波前检测子孔径和波前校正子孔径数量通常在 500 以内,采用纯 CPU 运算能够实现大于 1 kHz 的开环校正频率,满足对大气湍流扰动闭环校正带宽的需求。但考虑到未来 10 ~ 30 m 级甚至极大口径望远镜上自适应光学校正子孔径数量预计将达到 5000 ~ 10000,传统的纯 CPU 运算方案已无法满足这类系统的实时运算量需求。针对这一问题,Keck 望远镜的 NGAO 实时波前控制系统^[8]、VLT 望远镜的 SPARTA 自适应光学实时计算平台^[9]、Subaru 望远镜的实时控制系统 CACAO^[10]等国外地基望远镜均提出了采用多种硬件架构混合编程的解决方案。

2011 年,中国科学院南京天文光学技术研究所系外行星直接成像团队基于纯 CPU 架构研制了日夜两用的便携式自适应光学 (PSAO)^[11],并在此基础上研发了专用于地基高对比度成像观测的 PAO 系统^[12],实现了大于 1000 Hz 的校正频率,验证了近红

外 H 波段 10^{-5} 的实测成像对比度^[13]。但受限于航天用 CPU 计算性能限制,无法满足处理大量波前数据实现高精度计算的需求,因此该方案无法直接用于空间高对比度成像星冕仪^[14]的在轨波前检测和校正。

基于上述研究,本文提出一种基于混合编程架构的波前检测及校正算法。FPGA 专用处理器能够提供更强大的并行计算能力和处理速度,具有高可靠性、逻辑资源丰富、低延时和低功耗等优点,能满足星载电子系统的需求^[15]。基于 CPU 的操作系统易于软件编程,实现和外部设备的数据通信及指令收发,为 FPGA 节省更多硬件资源用于波前检测数据的并行计算。本文所提出的基于 CPU 和 FPGA 混合编程的波前检测及校正算法经过对不同子孔径数规模的自适应光学系统的仿真,并在星冕仪系统中进行了实际测试。该算法可以兼顾性能和精度,同时满足空间和地基高对比度成像观测的需求。

2 算法设计

2.1 算法实现原理

FPGA 中主要进行波前斜率的计算。星冕仪采用 Shack-Hartmann 波前传感器获取带有入射波前畸变信息的图像,波前处理器收到图像首先进行波前斜率计算,由实际质心位置与理想质心位置的偏差,可得到二维波前斜率信息。在 CPU 中基于波前斜率向量,采用直接斜率法进行波前复原计算,仅经过一次矩阵运算即得到复原电压,有效提高运算效率^[16]。

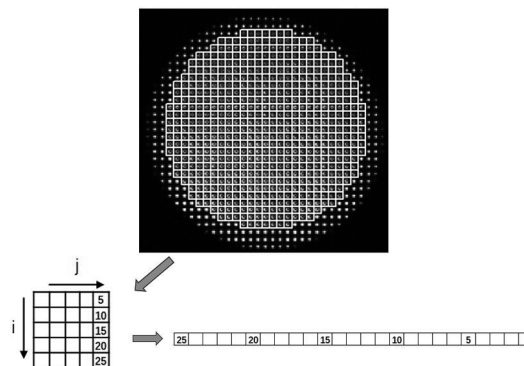


图1 子孔径划分传输方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sub-aperture division transmission scheme

如图 1 所示,以星冕仪在轨波前检测方案为例,由波前相机实时采集的图像按照定标程序划分的子孔径分布,被划分为 577 个有效子孔径,每个子孔径

图像为 5×5 像素大小, 图像数据以一维数组的形式通过 DMA FIFO 由 CPU 送入 FPGA。

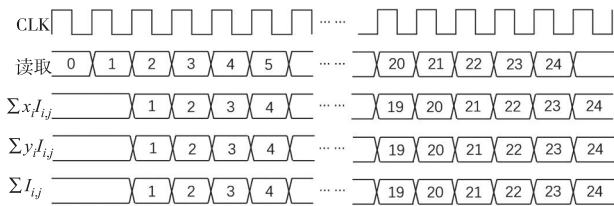


图 2 FPGA 计算仿真时序图

Fig. 2 FPGA computational simulation timing diagram

在 FPGA 内部, 数据计算的仿真时序图如图 2 所示, 时钟频率为 100 MHz, 采用逐像素数据读取的形式, 一个时钟周期读取一个像素数据, 随后同步进行 $\sum_i x_i I_{i,j}$ 、 $\sum_j y_j I_{i,j}$ 的计算和像素值 $I_{i,j}$ 的累加, 三个运算在一个周期内并行处理互不干扰。

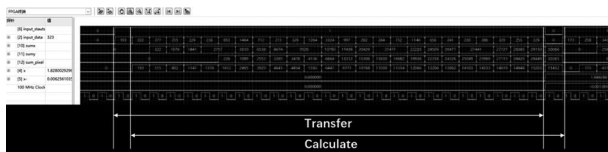


图 3 FPGA 数据传输计算仿真时序图

Fig. 3 Simulation timing diagram for FPGA data transfer calculation

如图 3 所示, 单个子孔径图像数据传输耗时 25 个时钟周期, 计算起始于数据读入的下一个周期, 可在当前子孔径数据传输结束的下一个时钟周期完成当前子孔径的质心偏差数据计算。这种并行计算的方法可以提高计算效率, 在较短的时间内完成所有的计算任务。

在 FPGA 中, 使用定点数进行波前斜率的计算, 如图 4 所示, 定点数由整数和小数两部分组成, 事先约定好小数点的位置, 整数部分和小数部分被转换为二进制并组合存储。定点数的最大值和最小值是由符号位, 字长和整数字长共同决定的。我们将定点数表示为 $\langle \pm, m, n \rangle$, 即该定点数带符号且字长为 m 整数字长为 n 。

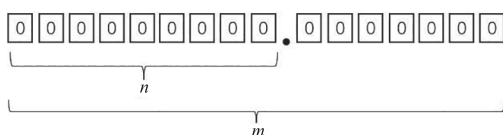


图 4 定点数表示法

Fig. 4 Fixed-point presentation

FPGA 中的波前斜率计算精度的传递以横坐标 x 为例, 如图 5 所示。FPGA 通过 DMA FIFO 通信接

收到 16 位的无符号整型子孔径图像数据, 和当前数据所处列数 i 相乘, 得到字长为 32 位的定点整数, 同时计算得到 16 位子孔径数据的累加和。考虑到子孔径的尺寸是 5×5 像素, 以子孔径左上角为坐标原点进行计算, 质心计算的结果范围不会超过 5。为了节约内存并减少计算资源的消耗, 将除法输出的定点数精度设置为字长 8, 其中整数部分占 3 位。下一步进行减法运算, 参考质心坐标以单精度浮点的形式从 FPGA 的存储器中读出, 当定点数和单精度浮点数做差时, 结果的精度受到浮点数尾数位数的限制, 并且因为舍入误差而进一步影响, 因此得到的波前斜率定点数精度为字长 21, 整数字长 0。此后的运算都在 CPU 中进行, 数值都使用双精度浮点数的形式来表示。

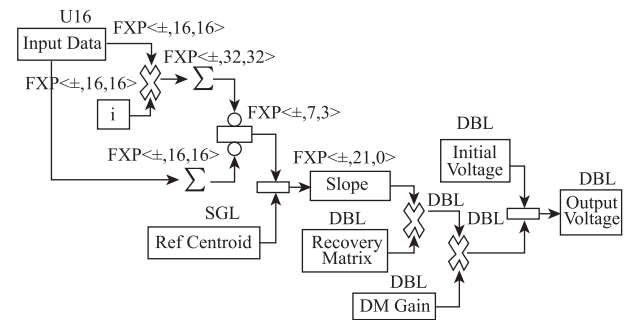


图 5 波前斜率及波前复原计算精度传递框图

Fig. 5 Block diagram for transferring the accuracy of wavefront slope and wavefront recovery calculations

2.2 计算单元数据流设计

基于 FPGA 和 CPU 混合编程技术的波前检测及校正算法计算单元数据流设计如图 6 所示, 主要由负责协同控制计算与数据传输的 CPU 和负责波前处理的 FPGA 构成。计算单元中涉及到的数据交换的详细类型及大小如表 1 所示。波前传感器在波前处理的过程中作为数据源, 将分辨率为 256×256 , 像素深度为 16bit 的图像发送到计算机单元中, 数据被存入上位机内存进行图像处理以及下一步数据传输。CPU 通过 PCI-E 总线和 FPGA 进行数据交换, 使用 DMA FIFO 进行通信传输划分后的波前图像数据, 以及下发算法控制指令控制 FPGA 运算。FPGA 接收到图像数据后读取初始化过程中就已存入到存储器当中的 577×2 个参考子孔径质心数据进行波前计算, 将波前斜率计算结果以同样的方式传回到 CPU 内存当中, 以及上传算法运算过程中数

据用于监测。CPU 完成波前复原运算后将驱动电压控制量打包并通过光纤连接可变形镜控制箱发送电压数据到可变形镜。

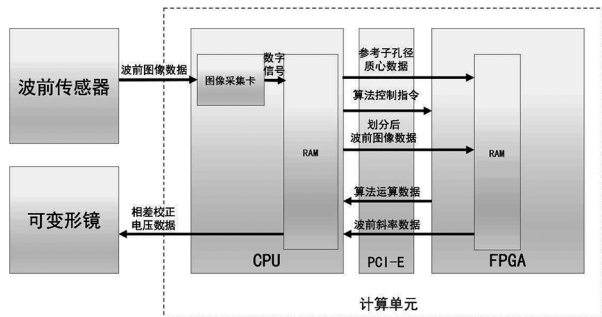


图6 计算单元数据流设计框图

Fig. 6 Block diagram of computing unit data flow design

表1 计算单元数据类型及大小

Tab. 1 Calculation unit data type and size

项目	数据类型	数据大小
波前图像数据	U16	256 × 256
划分后波前图像数据	U16	25 × 577
参考子孔径质心数据	SGL	577 × 2
波前斜率数据	FXP	1154
相差校正电压数据	DBL	2048

2.3 算法控制流程

图7表示的是基于FPGA和CPU混合编程的波前检测及校正算法实现流程,首先在CPU中,通过定标程序得到当前可变形镜控制电压下的参考子孔径及质心的坐标并计算得到复原矩阵,将参考质心通过初始化存入FPGA的存储器。CPU同时负责实时的图像采集,减去图像背景噪声并划分子孔径,将处理后的图像数据传入FPGA。

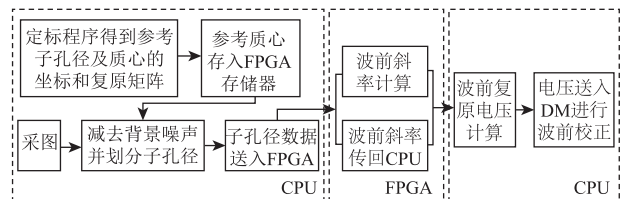


图7 基于FPGA和CPU混合编程的波前检测及校正算法控制框图

Fig. 7 Control block diagram of wavefront detection and correction

algorithm based on hybrid FPGA and CPU programming

在FPGA中,计算当前子孔径质心坐标并与参考质心坐标做差得到波前斜率,把波前斜率数据传回CPU进行波前复原处理。波前斜率数据与复原矩阵相乘得到波前复原电压,送入可变形镜控制箱驱动促动器校正波前像差,完成自适应光学系统校

正的一次迭代。上述混合编程技术可以充分利用FPGA的并行处理能力,加速波前检测计算,同时利用CPU易于编程和接口丰富的优势,主要负责内外部数据传输和部分高精度运算。

3 实验与结果分析

空间星冕仪成像对比度需要达到 10^{-8} 以上,上述目标的实现依赖于星冕仪系统的两项关键技术,包括传统的基于光瞳透过率调制技术的高对比度成像技术,对望远镜光瞳的透过率进行调制;配合高密度千单元可变形镜对系统内光学像差进行精确控制,实现对散斑噪声的精确校正,进而在系统焦面特定区域获得超高成像对比度。星冕仪光学系统的原理如图8所示。

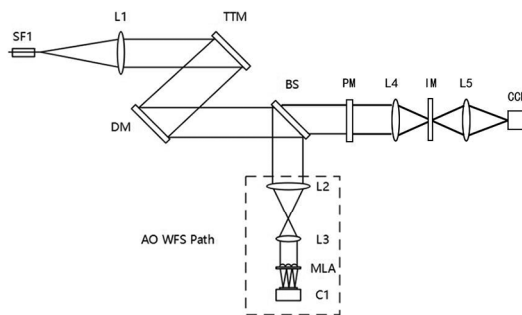


图8 光学原理示意图

Fig. 8 Optical principle schematic

由图8可见,单模光纤SF1@632.8nm发出的光经透镜L1准直后,经过TTM镜和DM镜反射后,由分束镜(BS)将望远镜的光分别透射到科学成像光路,反射到波前检测光路中。波前检测光路用于实时检测望远镜引入的波像差,并通过闭环控制DM对其进行校正,波前检测光路由透镜L2、L3和波前传感器组成。科学成像路径的光束经过光瞳透过率调制器PM调制后,透过焦面掩模板IM对恒星光进行遮挡,经由成像透镜L5后直接成像在科学成像相机(CCD)上成像。

图9显示了系外行星高对比度成像在实验室中的实际实验系统,基于FPGA和CPU混合编程的高对比度成像波前检测及校正算法在此系统上进行了实验验证。其中使用了千单元可变形镜,具有952个有效促动器,校正行程为 $1.5\mu\text{m}$ 。高速相机为高速EMCCD相机,读出速率为18MHz。混合编程架构基于NI公司的IC-3173工控机实现,内置的XilinxKintex-7型FPGA,能够满足本系统波前处理数据的需求。

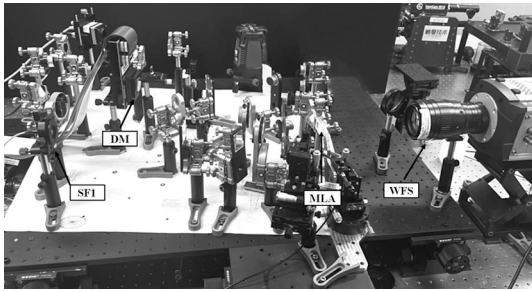


图9 实验光路系统图

Fig. 9 Experimental optical system photo

星冕仪利用散斑噪声抑制技术,通过可变形镜对高阶散斑噪声进行校正,从而在恒星附近形成一个高对比度的区域,该区域被称为暗区(Dark Hole)^[17]。为了验证本文所提出高对比度成像算法的精度是否满足星冕仪系统设计的要求,对不同质心计算精度下的暗区锁定效果进行了测试。测试结果如图 10 所示,图 10(a)为纯 CPU 架构即质心计算为双精度时的暗区锁定图像,图 10(b)、(d)分别为质心计算精度在定点数整数数字长为 3,字长为 5~7 即小数步长分别为 0.25、0.125、0.0625 时的暗区锁定图像。对于暗区锁定精度,我们的星冕仪高对比度成像系统要求相位误差在 $\lambda/100$ (其中激光光源波长为 632.8 nm)。根据所使用的可变形镜行程为 $1.5 \mu\text{m}$ 来计算对应的相位误差,在不同质心计算精度下计算了电压改变量的 RMS 值。结果如图 11 所示,横坐标表示不同的精度,纵坐标通过将电压改变量的 RMS 值乘以可变形镜行程来反映相位误差。横线表示满足系统精度标准的阈值。从图 11(纵坐标为不同计算精度对应的可变形镜行程变化量,Threshold 对应满足系统设计要求的可变形镜行程阈值)可以看出,定点数字长为 7 的精度下无法满足系统设计要求,小数步长小于该值的计算精度均可满足系统设计要求。

为了评估本文所提出的高对比度成像波前检测及校正算法在运算速度上的提升,进行了仿真实验,考虑到混合架构与纯 CPU 架构的区别在于波前检测部分,故只比较了 FPGA 和 CPU 上的波前检测延时,统计 1000 帧波前检测延时后得到波前检测延时均值。为了更好地进行比较,我们采用 7 种子孔径数量的 WFS 图像在两种架构下进行波前检测的运行速度作对比。实验基于 Xilinx Kin-

tex-7 XC7K160T 的 FPGA 配置,采用 100 MHz 时钟作为定时源,通过程序生成了不同数量的 5×5 像素大小子孔径的 WFS 图像。CPU 采用 Intel i7-12700H,14 核心 20 线程,主频为 2.30 GHz。

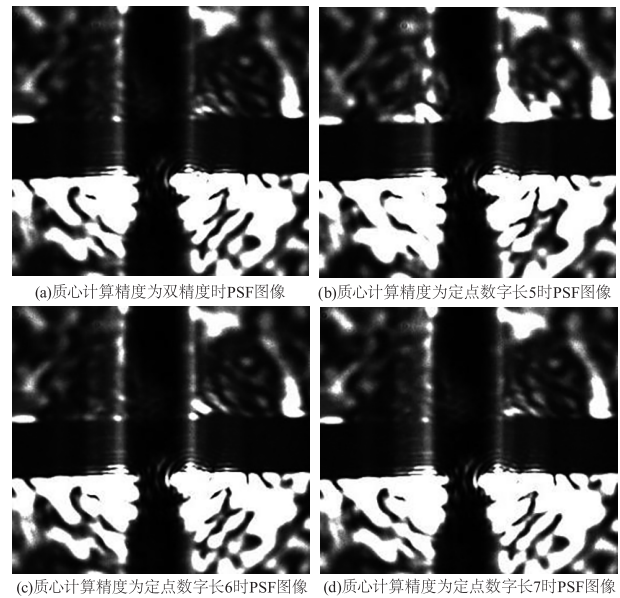


图 10 定标电压及不同计算精度下暗区图像

Fig. 10 Calibration voltage and dark region image under different calculation accuracy

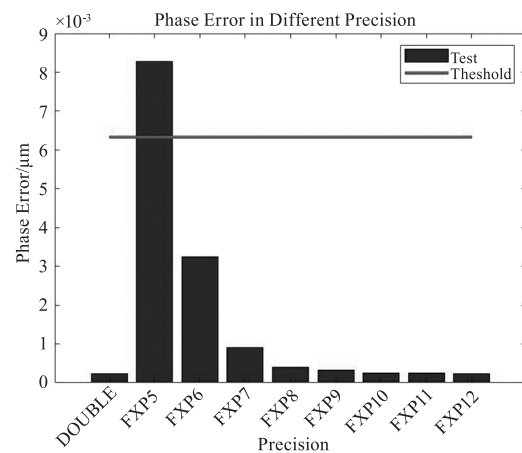


图 11 不同计算精度对应相位误差

Fig. 11 Phase error corresponding to different calculation accuracy

图 12 展示了这些混合编程架构和纯 CPU 架构在不同子孔径数量采样情况下的实验结果。横坐标表示不同数量的子孔径,纵坐标表示平均计算延时,折线表示 FPGA 相对 CPU 的波前检测延时差值。从图中可以明显观察到,在不同子孔径数量下,混合编程架构的运算速度均优于纯 CPU 架构,特别是随着子孔径数量的增多,混合编程架构的优势愈发显著。在星冕仪试验系统采用的 27×27 子孔径阵列

下,使用 FPGA 进行波前斜率计算在保证计算精度的同时能够提前 67.345 μs 完成整个波前检测及校正过程,较大提高了系统的计算速度。实验针对未来规模为 100×100 的波前子孔径阵列的自适应光学系统进行了仿真,使用 FPGA 和 CPU 混合编程架构可以使整个波前检测及校正的计算延时缩短了 1281.826 μs 。该实验结果表明,混合编程架构在进行波前运算时比纯 CPU 架构更高效,验证了本文提出的混合编程技术在波前运算性能方面的优势,这也证明了该技术在大规模地基自适应光学系统中具有巨大的潜力。

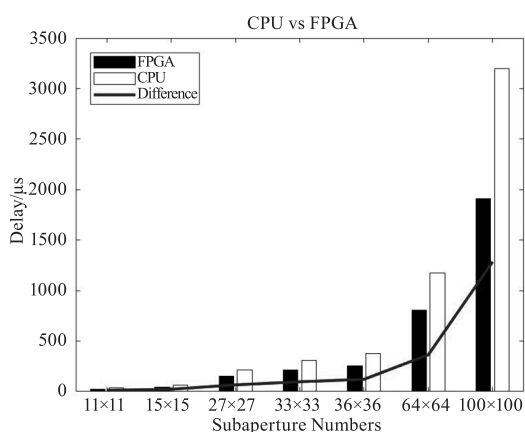


图 12 FPGA 与 CPU 计算延时对比

Fig. 12 Comparison of FPGA and CPU computation latency

4 结论

本文提出了一种基于 FPGA 和 CPU 混合编程的高对比度成像波前检测及校正算法。该算法克服了原有纯 CPU 架构在航天电子系统中无法有效发挥性能的限制性。在保证原有计算精度的同时,实现了高效准确的波前检测及校正,并具备更快的波前检测速度。

为了验证该算法的效果,我们在星冕仪高对比度成像系统中进行了测试。实验结果显示,该算法能够有效校正波前像差,维持暗区能量的稳定。在定点小数步长为 0.0625 的计算精度下电压改变量的 RMS 值为 0.00092 V,对应变形镜面形控制精度为 0.0055 nm,远小于高对比度成像暗区锁定所需的 4~7 nm ($1/100 \lambda$) 波前控制精度,满足星冕仪系统设计的要求。我们还实现了高速的波前检测及校正算法,对比原有纯 CPU 运算架构,该混合架构在 27×27 子孔径波前阵列实验中,提前了 67.345

μs 完成整个波前检测及校正的运算。在针对未来 100×100 子孔径数规模的自适应光学系统的仿真中,整体波前检测及校正的计算延时可以缩短 1281.826 μs ,使得这类超大规模自适应光学系统的校正频率达到 400 Hz 以上成为可能,能够适应更大范围的台址视宁度条件,在 ExAO、GLAO、MCAO 等新一代地基自适应光学系统中具有应用价值。

参考文献:

- [1] Zhang X, Ren D, Zhu Y, et al. Testing of a high-contrast imaging coronagraph based on an active liquid crystal array [C]//2011 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments. SPIE, 2011: 151 - 160.
- [2] Woolf N J, Smith P S, Traub W A, et al. The spectrum of earthshine: a pale blue dot observed from the ground [J]. The Astrophysical Journal, 2002, 574(1): 430.
- [3] Guyon O, Pluzhnik E A, Kuchner M J, et al. Theoretical limits on extrasolar terrestrial planet detection with coronagraphs [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2006, 167(1): 81 - 99.
- [4] Kasdin N J, Vanderbei R J, Spergel D N, et al. Extrasolar planet finding via optimal apodized-pupil and shaped-pupil coronagraphs [J]. The Astrophysical Journal, 2003, 582(2): 1147 - 1161.
- [5] Poberezhskiy I, Luchik T, Zhao F, et al. Roman space telescope coronagraph: engineering design and operating concept [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2020: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, SPIE, 2021: 314 - 335.
- [6] Kasdin N J, Bailey V P, Mennesson B, et al. The Nancy Grace Roman space telescope coronagraph instrument (CGI) technology demonstration [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2020: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, SPIE, 2020: 300 - 313.
- [7] Fried D L. Limiting resolution looking down through the atmosphere [J]. JOSA, 1966, 56(10): 1380 - 1384.
- [8] Reinig M, Gavel D, Ardestani E, et al. Real-time control for Keck Observatory next-generation adaptive optics [C]//Adaptive Optics Systems II. SPIE, 2010: 1264 - 1275.
- [9] Valles M S, Fedrigo E, Donaldson R H, et al. SPARTA for the VLT: status and plans [C]//Adaptive Optics Systems

- III. SPIE, 2012: 1009 – 1020.
- [10] Clergeon C, Minowa Y, Guyon O, et al. Subaru AO188 upgrade phase 1: integration of the new real-time system [C]//Adaptive Optics Systems VI, SPIE, 2018: 954 – 969.
- [11] Ren D, Penn M, Plymate C, et al. A portable solar adaptive optics system: software and laboratory developments [C]//Adaptive Optics Systems II, SPIE, 2010: 1319 – 1325.
- [12] Zhu Y T, Dou J P, Zhang X, et al. Portable adaptive optics for exoplanet imaging[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(4): 082.
- [13] Ren D, Jolissaint L, Zhang X, et al. Solar ground-layer adaptive optics[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2015, 127(951): 469.
- [14] Dou J P, Ren D Q, Zhu Y T. An iterative wavefront sensing algorithm for high-contrast imaging systems[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2011, 11(2): 198.
- [15] Wu Song, Sun Xiaodong, Gu Lin, et al. Design of anti-irradiation communication and control system based on FPGA [J]. Electronics Quality, 2022, (2): 31 – 36, 43. (in Chinese)
吴松, 孙晓冬, 顾林, 等. 基于FPGA的抗辐照通信与控制系统的设计[J]. 电子质量, 2022, (2): 31 – 36, 43.
- [16] Luo Lin, Tong Shoufeng, Zhang Lei, et al. Research on wavefront processing algorithm based on adaptive optical system [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(10): 1245 – 1251. (in Chinese)
罗琳, 佟首峰, 张雷, 等. 基于自适应光学系统的波前处理算法研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(10): 1245 – 1251.
- [17] Redmond S F, Pogorelyuk L, Pueyo L, et al. Implementation of a dark zone maintenance algorithm for speckle drift correction in a high contrast space coronagraph [J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2022, 8(3): 035001 – 035001.