

〈系统与amp;设计〉

基于FPGA的夏克-哈特曼探测器实时波前处理机

刘召庆¹, 李力^{1,2}, 董冰², 金伟其²

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 夏克-哈特曼波前传感器是目前自适应光学系统中应用最为广泛的实时波前探测器。本文针对具有高分辨、高帧速、大规模子孔径数的夏克-哈特曼传感器, 根据其波前处理计算量和实时性的要求, 提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA, field-programmable gate array)的实时波前处理机结构及波前斜率计算方法。该方法利用核心处理模块重复利用的方式完成子孔径内光斑质心的计算, 并通过USB3.0将处理后的质心数据实时传输给PC机。处理机以一片XILINX公司Kintex7-XC7K325T的FPGA作为处理芯片进行了设计, 结果表明: 该算法可对560帧/s的1020×1020图像(580 MB/s数据量), 56×56子孔径哈特曼传感器, 进行低延时实时光斑质心计算, 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速度。

关键词: 夏克-哈特曼探测器; 实时波前处理机; FPGA

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2021)08-0717-06

Shack-Hartman Detector Real-time Wavefront Processor Based on FPGA

LIU Zhaoqing¹, LI Li^{1,2}, DONG Bing², JIN Weiqi²

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The Shack-Hartman wavefront sensor is the most widely used real-time wavefront detector in adaptive optics systems. In this study, a Shack-Hartmann sensor with high resolution, high frame rate, and a large-scale sub-aperture number is proposed. Based on the requirements of wavefront processing calculations and real-time performance, a field-programmable gate array (FPGA) is also proposed. The real-time wavefront processor structure and wavefront slope calculation method are investigated. The system employed the core processing module to reuse the method to calculate the centroid of the spot in the sub-aperture and transmitted the processed centroid data to the PC in real time through USB 3.0. The processor was designed with a XILINX Kintex7-325T FPGA processing chip. The results demonstrate that the algorithm can perform low-latency, real-time operations on 1020×1020 images and 56×56 sub-aperture Hartmann sensors at 560 frames per second. The spot centroid calculation increased the wavefront processing speed of the system and the control speed of the entire adaptive optics system.

Key words: Shack-Hartmann sensor, real-time wavefront detector, FPGA

0 引言

自适应光学的基本思想是在光学系统中引入一个表面形状可变的光学元件(波前校正器)和一个波前误差传感器, 用波前传感器测量出不断变化的波前误差, 根据测量结果由控制系统控制波前校正

器对波前误差进行校正。如果这一过程足够快, 就可以用不断变化的波前校正量来校正不断变化的动态波前误差。

夏克-哈特曼波前传感器是目前自适应光学系统中应用最为广泛的实时波前探测器。自适应光学系统将夏克-哈特曼波前传感器所测到的波前畸变

收稿日期: 2019-12-12; 修订日期: 2021-04-26.

作者简介: 刘召庆(1979-), 男, 研究员, 主要研究方向为光电系统总体技术。E-mail: 12134171@qq.com.

通信作者: 李力(1982-), 男, 讲师, 主要研究方向为数字图像处理。E-mail: lili@bit.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金(11874087)。

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。用于补偿大气湍流引入像差的天文自适应光学系统的空间分辨力和时间分辨力应分别与大气相干长度和时间常数相匹配。优秀观测站址的大气相干长度 r_0 和时间常数分别约十几厘米和几毫秒,随着望远镜口径的增大,要求自适应光学系统有更多的子孔径数。以直径8m的望远镜为例,若 r_0 取15cm,则要求夏克-哈特曼传感器在直径方向上至少有53个子孔径。由此给波前处理系统带来的问题是计算量大、实时性要求高。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波前采样频率和波前校正速度。在系统采样频率一定的情况下,波前处理系统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,实现准实时的波前校正。

2002年中科院光电所研制的2900Hz、61单元的波前处理机^[1]共用17片DSP,计算延时为340 μ s;2011年中科院电子技术研究所研制的基于FPGA的22 \times 22子孔径波前斜率处理器^[2]完成一帧所有子孔径斜率计算的延迟时间为0.33 μ s;2015年中科院电子技术研究所研制的基于PC机的949个子孔径的系统^[3]进行2000Hz的处理,处理延迟低于240 μ s;2016年中科院长春光机所研制的基于GPU的液晶自适应光学系统的波前处理^[4]斜率延时为18 μ s,其相机像素为240 \times 240,帧率2000帧/s,40 \times 40个子孔径。以上夏克-哈特曼传感器所产生的图像数据大致在每秒100M像素数左右,现代的FPGA都可以在单周期内完成波前斜率计算,因此只要FPGA运行在100MHz的时钟频率下都可以进行实时处理。面对自适应光学对传感器分辨率、帧率要求的不断提高,夏克-哈特曼传感器所产生的图像数据大致在500M/s以上的像素数,传感器为达到传输带宽的要求,都采用多通道(8~10通道)同时传输的方式,FPGA难以运行在如此高的时钟频率。

本文针对具有高分辨率(1020 \times 1020),高帧速(560帧/s),大规模子孔径数(56 \times 56单元)的夏克-哈特曼传感器,提出一种基于现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)的实时波前处理机,在有效降低硬件资源的前提下,可在当前子孔径数据进入FPGA后延迟10行完成当前子孔径波前处理运算,提高了系统的波前处理速度。

1 夏克-哈特曼波前传感器原理

夏克-哈特曼波前传感器由微透镜阵列和探测器组成,每个微透镜对应探测器上的一个子探测区。

当以参考波前(近似平面波)入射到微透镜阵列时,在探测区域形成近似等间距排列的光斑阵列,此时记下光斑质心位置作为参考。当以畸变波前入射时,每个子透镜对应的光斑质心位置相对参考光斑可能产生 X 和 Y 两个方向的移动,移动量即对应于畸变波前在子孔径内的平均斜率。获得畸变波前在子孔径内的平均斜率后,通过波前重构算法(模式法或区域法)即可获得波前相位。

图1为夏克-哈特曼波前传感器的工作原理。光波场被阵列透镜分解成许多小孔径光斑,这些小孔径光斑汇聚到夏克-哈特曼探测器焦平面上。假定不同的子孔径的光成像在探测器靶面的不同位置上,任意两个子孔径所产生的邻近像点没有重叠,这样每个子孔径在像平面上都对应的一块专用的成像面积。进入阵列透镜的光束在探测器上形成一列列衍射光斑。

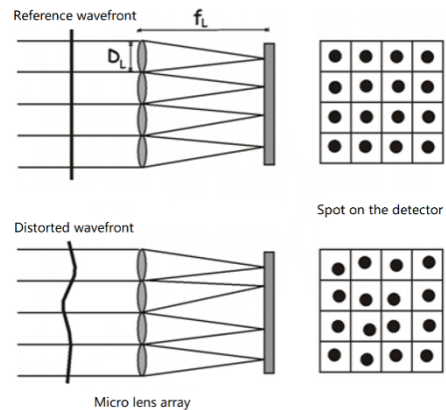


图1 夏克-哈特曼波前传感器结构

Fig.1 Structure of Shaker-Hartman sensor

根据光斑质心的定义可写出离散采样情况下光斑质心的计算公式为:

$$x_c = \frac{\sum_{i,j} x_i I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \quad (1)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i,j} y_i I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}$$

式中: x_i 和 y_i 分别为探测器各子孔径位置坐标; $I_{i,j}$ 为第 (i,j) 个探测器像元灰度值。

在每一个子孔径内进行光斑质心计算,可以得到参考波前质心(X_{c0} , Y_{c0})和畸变波前质心(X_c , Y_c)。波前斜率 g_x 和 g_y 定义为信标光波在 x 和 y 方向的偏导数在该子孔径上的平均,波前斜率和光斑质心变化量满足如下关系:

$$g_x = \frac{(x_c - x_0) \times p}{f}, \quad g_y = \frac{(y_c - y_0) \times p}{f} \quad (2)$$

式中: p 为探测器像元尺寸; f 为子透镜焦距。

综上所述,夏克-哈特曼波前传感器波前处理的核心为子孔径内光斑质心的计算。

2 基于 FPGA 的实时波前处理机结构

基于 Kintex7-XC7K325T 的 FPGA 实时波前处理机组成如图 2 所示,夏克-哈特曼传感器将实时采集的图像数据发送给以 FPGA 为核心的自适应光学波前处理机, FPGA 处理完后将数据发送给上位机,同时上位机可以发送控制指令对处理机的参数进行控制。

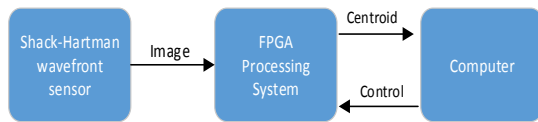


图 2 处理机系统组成

Fig.2 Composition of processor system

夏克-哈特曼传感器的 FPGA 处理硬件结构如图 3 所示。采用具有高帧速、大面阵 CMOS 探测器的 EoSens CL 型相机,在 Camera Link Extended-Full 传输模式下以 1020×1020 分辨率可实现 560 帧/s 的帧率。为了传输高达 4.4 Gbit/s 的数据,需要 3 对 Camera Link 数据链,因此处理机数据接收端采用 3 片 DS90CR288MTD 芯片将 Camera Link 数据转成 LVCMOS 信号传输给 FPGA。

本夏克-哈特曼传感器微透镜整列数为 56×56 ,每个子孔径在 x 和 y 方向上用 8 bit 表示整数坐标位置,16 bit 表示小数坐标位置,则每秒至少需要传输 $560 \times 56 \times 56 \times 2 \times 24 = 84295680$ bit 数据,大大超过了通信常用的异步串行通信 (RS232/422) 的传输极限。因此在传输波前质心数据时,本文采用 Cypress 公司 CYUSB2014-BZXI 与上位机间进行 USB3.0 数据传输 (USB3.0 的最大速率 5 Gbit),为了降低 USB 数据传输开发复杂性,本文将 USB3.0 传输设置为单向传输,上位机与波前处理质心计算系统的控制

由 RS422 完成。

3 基于 FPGA 的子孔径光斑质心计算

夏克-哈特曼传感器采用的 EoSens CL 相机工作在 1020×1020 分辨率,帧频为 560 帧/s,采用 Camera Link Extended-Full 模式传输,像素时钟为 75 MHz。每时钟同时输出 10 个像素,每个像素为 8 bit,共 80 bit,行有效周期为 102 个像素时钟。其行时序如图 4 所示(图中每一个方块代表一个像素,方块中的数字表示像素的行方向坐标, T_x 代表第 x 个时钟周期)。

如果实时将并行输入的 10 个像素转成串行的单个像素进行处理 FPGA 需要 750 MHz 的处理时钟,大大超过了 FPGA 能够达到的最高时钟,因此本文设计了一个行缓冲将高速多像素并行输入的图像数据变成低速像素为单位的串行的数据(如图 5 所示),FPGA 程序设计中将每一行数据按 10 个像素 (80 bit) 75 MHz 时钟频率写入两个 FIFO (64 bit 位宽和 16 bit 位宽两个 FIFO 组成一个 80 bit 位宽的 FIFO)中,再以 1 个像素 (8 bit) 频率 F_{FPGA} (75 MHz ~ 200 MHz, FPGA 一般时钟频率) 从 FIFO 中读出, FIFO 深度为 128。每行数据的处理时间为 1020 个 F_{FPGA} 时钟。

每一个质心计算核心模块如图 6 所示,由一个如图 6 的行缓冲 FIFO 和两个乘法累加器分别进行子孔径内 x 和 y 方向的乘法运算及累加运算组成,质心计算核心模块将 FIFO 读出点在对子孔径参数进行运算。该运算为两周期流水运算。质心计算核心模块将计算后该行对应于子孔径的 3 个乘积累计结果进行输出。图中 YPos 为当前质心计算核心模块处理行在整个图像中的行位置, XPos 为当前处

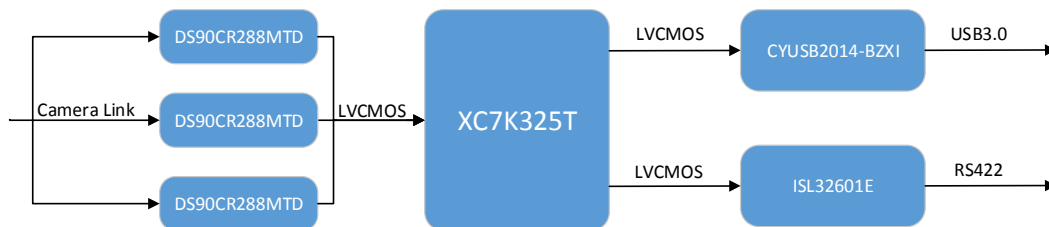


图 3 处理机硬件结构图

Fig.3 Structure of hardware

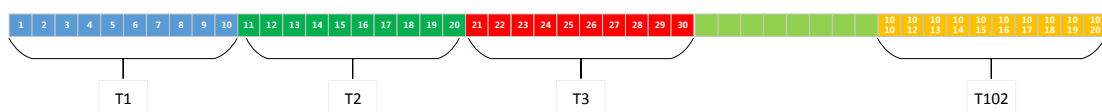


图 4 EoSens CMOS 探测器一行像素输出时序

Fig.4 Pixel output timing of EoSens CMOS detector

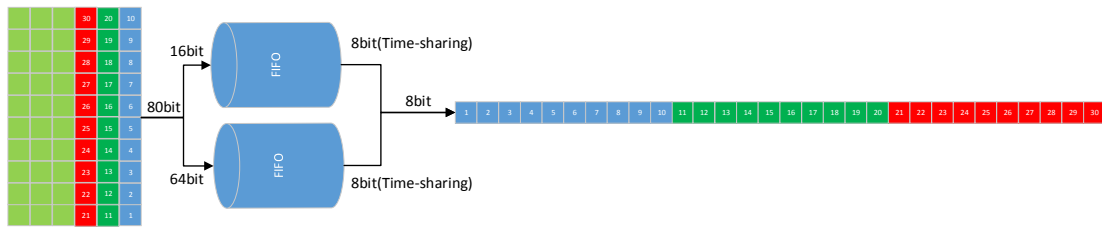


图5 行缓冲将10像素80bit输入转成串行1像素8bit

Fig.5 Line buffer converts 10-pixel 80-bit parallel input into serial 1-pixel 8-bit

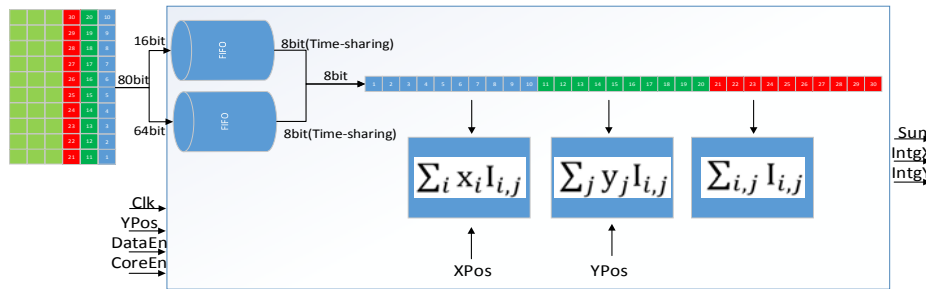


图6 质心计算核心模块

Fig.6 Module of centroid computing

理像素在整个图像中的列位置，Sum 输出为质心计算核心模块处理完当前行后输出的行像素值总和，IntgX 为每一个子块在行方向的乘法累加值，IntgY 为每一个子块在列方向的乘法累加值。

质心计算核心模块工作在相机的像素时钟频率下 (75 MHz)，相机行有效时间为 T_v 时，质心计算核心模块需要 $10T_v$ 的时间来处理一行的数据，因此一个质心计算核心模块是显然不够的，但是如果每一行都有一个质心计算核心模块会浪费大量的 FPGA 资源，甚至导致 FPGA 由于资源不够而无法完成布局布线。为了满足功能的需要又不造成 FPGA 资源的浪费，如图 7 所示，本文采用核心模块复用的质心计算方法，设计了共 10 个质心计算核心模块，通过核心模块选择器分时复用使用这 10 个质心计算核心模块，实现质心计算核心模块的复用，减少 FPGA 资源的使用。

最终 FPGA 资源使用情况如图 8 所示，FPGA 资源使用中最重要几个指标 LUT, FF, BRAM 的使用量都在 30% 以下。

使用 QuestaSim 对图 9 实际采集的夏克-哈特曼传感器成像图进行了仿真，仿真时序如图 10 所示，每一行子孔径质心位置结果可以在当前子孔径所有行均输入后延时 10 行时间输出，采用的 EoSens CL 型相机工作在 1020×1020 分辨率 560 帧时，行周期小于 $1/(560 \times 1020) = 1.75 \mu s$ ，因此本系统的计算输出延迟小于 $17.5 \mu s$ 。同时将 QuestaSim 仿真结果与 Matlab 计算的结果进行了对比，结果一致。

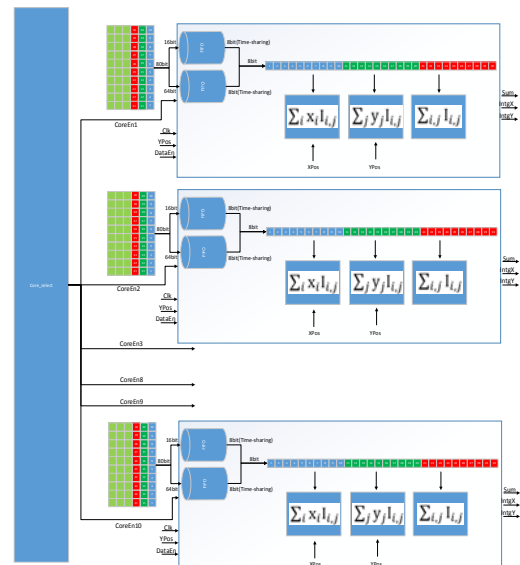
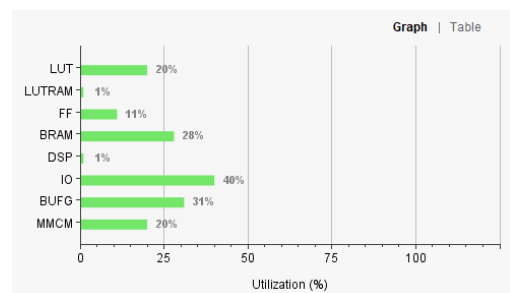


图7 质心计算核心模块复用

Fig.7 Centroid computing core module reuse



(a) FPGA 资源使用率柱状图

(a) FPGA resource utilization histogram

Resource	Utilization	Available	Utilization %
LUT	41036	203800	20.14
LUTRAM	873	64000	1.36
FF	45413	407600	11.14
BRAM	126.50	445	28.43
DSP	10	840	1.19
IO	199	500	39.80
BUFG	10	32	31.25
MMCM	2	10	20.00

(b) FPGA 资源使用率资源表

(b) FPGA resource usage resource table

图 8 FPGA 使用资源情况

Fig.8 Usage of FPGA resources

表 1 将本文所采用的系统和方法与所查到文献中其他处理系统与方法进行了比较, 比较主要包括子孔径的数量、传感器的数据量和处理延时, 本文

所采用的系统和方法在子孔径数量最多, 数据量最大的情况下, 也能够将延时控制得最小。

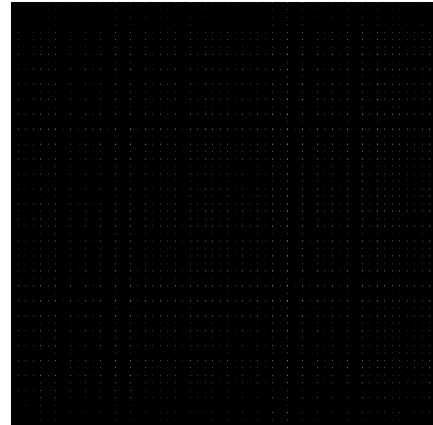


图 9 夏克-哈特曼传感器成像图

Fig.9 Shack-Hartman sensor imaging

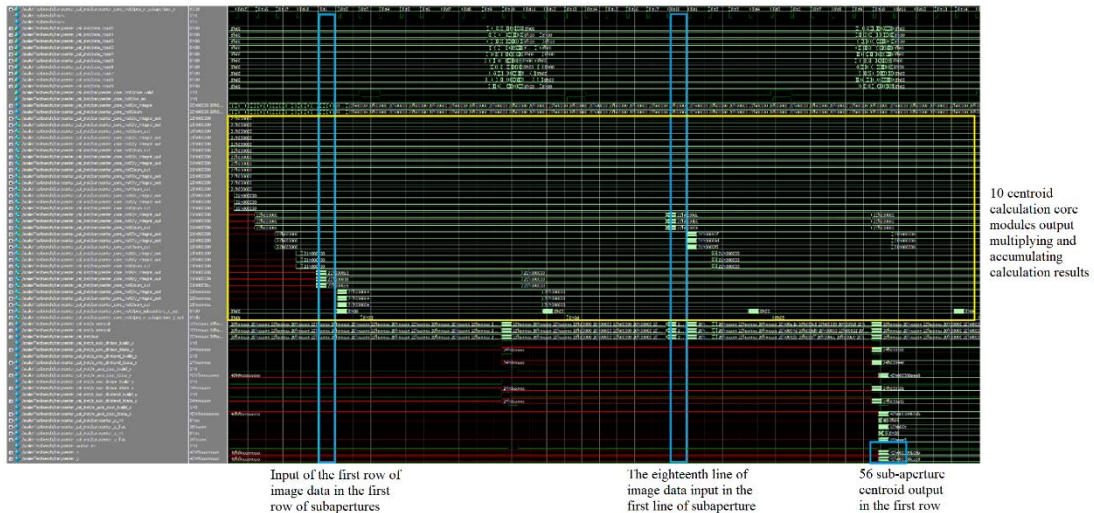


图 10 时序仿真结果

Fig.10 Timing simulation results

表 1 处理能力比较

Table 1 Comparison of processing power

	Processor	Number of sub-apertures	The data volume of the sensor	Processing delay
2002 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences ^[1]	17DSP	61	7.8MB/s	340 μs
2011 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences ^[5]	FPGA	177	No data	338 μs
2014 Technische Universität Ilmenau ^[6]	FPGA	120	43.3MB/s	1050 μs
2015 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences ^[2]	Computer	949	88.2MB/s	163 μs
2016 Changchun Institute of Optics and Mechanics ^[4]	GK104 GPU+CPU	1600	115.2MB/s	18 μs
2018 Changchun Institute of Optics and Mechanics ^[7]	FPGA	349	113.5MB/s	198 μs
2018 Indian Institute of Astrophysics ^[8]	FPGA	2500	No data	24-26 μs
System and method of this paper	FPGA	3136	580MB/s	17.5 μs

4 实验系统

实验系统光路如图 11 所示。光纤耦合输出激光光源（635 nm）经准直后通过分束镜 1 垂直入射到变形镜上。变形镜用于产生畸变波前。畸变波前在分束镜 2 处分为两路，一路用于夏克-哈特曼传感器进行波前探测，一路用于检测远场光斑的变化。由于变形镜的通光口径一般大于哈特曼传感器的探测区域尺寸，实验系统采用透镜组 L3 和 L4 将变形镜出射的光进行缩束，焦距之比等于变形镜口径与哈特曼探测区域直径之比。夏克-哈特曼传感器获得的光斑阵列图像经 Cameralink 接口发送给 FPGA 波前处理机进行实时质心计算，质心计算结果由上位机进行波前重构后得到畸变波前分布。

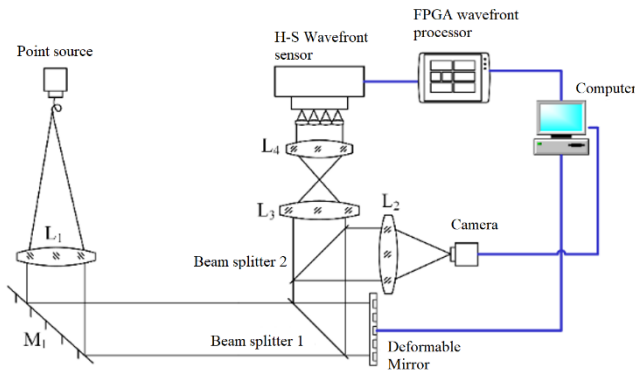


图 11 实验光路图

Fig.11 Experimental light path

5 结论

目前夏克-哈特曼传感器所用的高分辨率、高帧率探测器大多采用多通道并行传输的方式才能满足自适应光学所要求的高分辨率、高帧频的需求，本文提出的一种基于 FPGA 的夏克-哈特曼波前处理机，采用核心模块复用的质心计算方法，兼顾了处理效率和 FPGA 资源的平衡，可以实时处理 1020×1020 分辨率、560 帧/s 图像的成像器件和 56×56 子孔径数微透镜阵列组成的夏克-哈特曼传感器，数据输出延迟小于 $17.5 \mu\text{s}$ （10 个行周期），而且 FPGA 资源占用率不到 30%，由此推算用该 FPGA 至少可以处理图像分辨率或图像帧率增加 1 倍的哈特曼传感器。

参考文献:

- [1] 周璐春, 王春鸿, 李梅, 等. 基于 FPGA 技术的波前斜率处理方法[J]. 光电工程, 2002, 29(3): 28-31.
ZHOU Luchun, WANG Chunhong, LI Mei, et al. A wavefront slope processing method based on FPGA technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(3): 28-31
- [2] 樊志华, 王春鸿, 姜文汉. 基于累加器的哈特曼-夏克波前斜率处理器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 501-507.
FAN Zhihua, WANG Chunhong, JIANG Wenhan. Accumulator-based wavefront slope processor for Shack-Hartmann sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 501-507.
- [3] 陈善球, 刘超, 许冰, 等. 通用自适应光学波前实时处理机的设计[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1212001
CHEN Shanqiu, LIU Chao, XU Bing, et al. Design of generic adaptive optics wave-front real-time processor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1212001
- [4] 李大禹. 基于多 GPU 的液晶自适应光学波前处理器[J]. 液晶与显示, 2016, 31(5): 491-496.
LI Dayu. Liquid crystal adaptive optics wavefront processor based on multi-GPU[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(5): 491-496.
- [5] 贾建禄, 王建立, 赵金字. 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 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.
- [6] Mauch S, Reger J. Real-time spot detection and ordering for a Shack-Hartmann wavefront sensor with a low-cost FPGA[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(10): 2379-2386.
- [7] 王建立. 349 单元自适应光学波前处理器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1007-1013.
WANG Jianli. Three hundred and forty-nine unit adaptive optical wave front processor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1007-1013.
- [8] Avinash Surendran, Mahesh P Burse, Ramaprakash A N, et al. Scalable platform for adaptive optics real-time control (SPARC) part 2: field programmable gate array (FPGA) implementation and performance[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2018, 4(3): 039002.