

文章编号 1004-924X(2011)08-1716-07

基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理机

贾建禄^{1,2*}, 王建立¹, 赵金字¹, 王鸣浩¹, 曹景太¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对大型地基高分辨率成像望远镜对自适应光学系统波前处理规模的需求,设计了基于现场可编程门阵列(FPGA)的高速大单元自适应波前处理系统,给出了设计方案,实施过程和测试结果。提出的基于FPGA的自适应光学系统波前处理机,在软件上采用FPGA对整个系统进行数据配置和调控,实现多路D/A数据同时传输和转换。同时,采用FPGA作为波前处理运算中的图像预处理和波前子孔径斜率计算的核心器件,在满足波前处理精度的前提下,缩短了波前处理延时,提高了波前处理能力,波前处理可达2 000 frame/s。在硬件上,采用波前处理主板与可扩展的波前处理子板相结合的形式来提高系统的输出能力。每块波前处理子板的校正量输出为120路,波前处理主板的最大扩展能力为10块,整个系统可实现1 200路校正量的输出。

关键词:自适应光学系统;现场可编程门阵列(FPGA);波前处理机

中图分类号:TH743;TP273.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111908.1716

Adaptive optical wave-front processor based on FPGA

JIA Jian-lu^{1,2*}, WANG Jian-li¹, ZHAO Jin-yu¹, WANG Ming-hao¹, Cao jin-tai¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

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

Abstract: In accordance with the need of a larer ground-based high resolution imaging telescope for a-daptive optical wave-front processing, an Adaptive Optical(AO) wave-front processing system with larger calculation and thousands of units was designed based on the Field Programming Gate Array (FPGA) and its operation scheme,implement processing and tested results were given. At the soft-ware,the FGPA was used to configure and control data and to realize the conversion and transmission of multi-channel D/A data synchronously. Meanwhile,the FPGA was taken as a key element to pre-process the image and calculate the wave-front gradient of a sub-aperture. With satisfied wave-front processing precisions,it shortens wave-front processing delay and improves the ability of wave-front processing. Results demonstrate that the system can achieve the wave-front processing in 2 000 frame/s. At the hardware,this system combined the wave-front processing host board and wave-front

收稿日期:2010-11-22;修订日期:2011-01-25.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA8080603)

processing sub board to improve the output ability of the system. As each wave-front processing sub board can promote the output of 120 road and the maximum expansion capacity of the main board is 10, the system can reach the momentum of the output in 1 200 road.

Key words: adaptive optical system; Field Programming Gate Array(FPGA); wave-front processor

1 引言

自适应光学系统的规模(波前探测器子孔径数量和波前校正器单元数量)主要由大气相干长度 r_0 确定,当波前探测器的子孔径大小和波前校正器的单元大小与 r_0 相当时,才能较好地补偿大气扰动引起的波前相位畸变。为了以接近衍射极限的分辨率成像,可以估算系统规模大致为 $N=(D/r_0)^2$,式中 D 为望远镜口径。如对于4 m望远镜,当 r_0 为15 cm时,其系统规模为710;当 r_0 为10 cm时,系统规模约为1 600;若进行4 m级望远镜的设计,初步计算自适应光学系统的规模需要达到1000单元左右。同时由于空间目标成像探测对自适应光学系统闭环控制带宽的要求高于天文观测,大型望远镜的采样频率需要达到1 000 Hz以上。才能保证波前校正控制带宽为100~200 Hz,倾斜校正控制带宽为50~100 Hz^[1]。

国外最早开始基于FPGA的自适应光学系统波前处理研究的是英国达拉谟大学,当时只是研究了一套仿真系统^[2-4]。文献[5-7]介绍了在2005~2007年欧洲南方天文台与英国达拉谟大学联合设计的基于FPGA的自适应光学系统实时处理控制平台,该平台实现了波前处理的可扩展性,其采用光纤通讯进行子板之间的数据传输,由多个子板进行波前联合处理,加快处理速度,增强处理能力。国内的自适应光学研究起始于20世纪70年代,并在2001年研制出61单元自适应光学系统^[8]。该系统波前处理采用多DSP方案,全系统采用17块DSP,其中8块DSP负责子孔径斜率计算,4块DSP负责波前校正运算,5块DSP用于并行系统控制运算。为满足大型地基高分辨率成像望远镜对自适应光学系统波前处理的需求,本文提出了一种实时采样处理频率为2 000 frame/s,输出较正量为1 200路的可扩展自适应波前处理系统。

2 基于FPGA的自适应光学系统波前处理机的工作原理

2.1 基于FPGA自适应光学系统波前处理机的硬件构成

图1为基于FPGA自适应波前处理系统结构框图。它主要由主控计算机、波前处理主板和波前处理子板3部分组成。主控计算机与波前处理主板通过PXI总线进行通信,波前处理主板与可扩展的波前处理子板通过自定义的板间总线进行通信。主控计算机、波前处理主板和可扩展的波前处理子板通过PXI连接器插在PXI工控机箱的背板上。整个系统置于6U的PXI工控机箱中,提高了系统的集成度。

主控计算机主要完成过程监控、波前标定、配置和标定数据的下载等功能;波前处理主板主要完成波前图像的采集,通过PXI总线上传图像给主控计算机,接收主控计算机的配置和标定数据,配置和标定数据分发到各波前处理子板,波前图像的预处理,波前子孔径斜率计算和通过自定义板间总线将子孔径斜率数据同时打包发送到各波前处理子板等功能;波前处理子板主要完成波前拟合、控制运算、D/A转换和促动器所需促动量输等的功能。

图2和图3为设计完成的波前处理主板和波前处理子板。

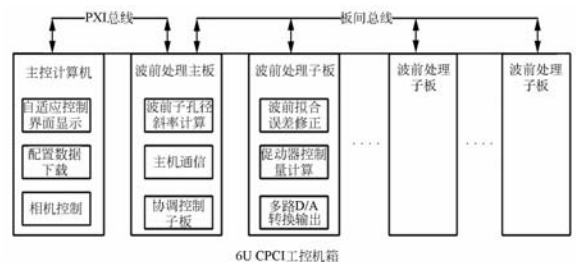


图1 自适应光学系统波前处理系统框图

Fig. 1 Block diagram of adaptive optical wave-front processor

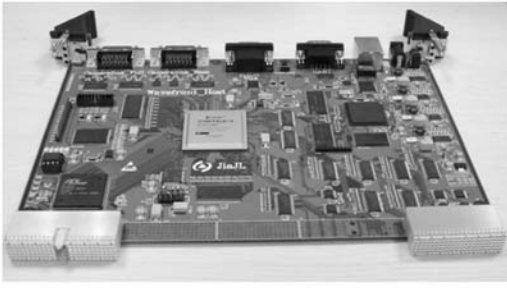


图 2 波前处理主板
Fig. 2 Wave-front host PCB

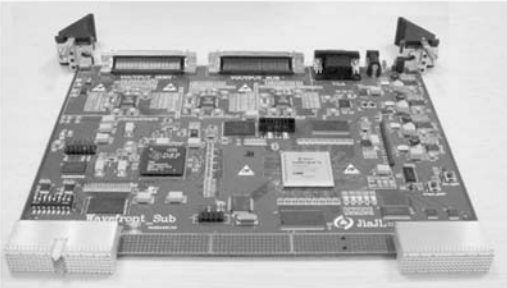


图 3 波前处理子板
Fig. 3 Wave-front sub PCB

2.2 基于 FPGA 自适应光学系统波前处理机的工作原理

在自适应光学系统波前处理机的工作流程包括图像处理、子孔径斜率计算、波前拟合、控制运算和 D/A 转换 5 大部分。其中图像处理主要包括减背景和阈值分割两部分；子孔径斜率计算主要完成各子孔径内质心计算，质心计算公式为：

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

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。计算得到的子孔径质心与参考值做差，得到子孔径斜率。

波前拟合即由波前斜率向量 \mathbf{K} 乘以波前校正矩阵 \mathbf{M} ，得到波面误差 \mathbf{E} ：

$$\mathbf{E} = \mathbf{M} \times \mathbf{K}, \quad (2)$$

式中波前校正矩阵 \mathbf{M} 为 $n \times 2m$ 矩阵， \mathbf{K} 为 $2m \times 1$ 斜率向量。其中 n 为所需有效促动器数， m 为有效子孔径数。

控制运算采用传统的 PI 控制运算。

通过以上的分析可以看出，波前拟合所需的

校正矩阵 \mathbf{M} 通过事先标定产生，可以将其划分成若干个子校正矩阵 $L_{n_1 \times 2m}, L_{n_2 \times 2m}, L_{n_3 \times 2m}, \dots, L_{n_m \times 2m}$ ，其中 $n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_m = n$ ，可以将这些子校正矩阵分发到不同的波前处理子板。波前处理主板通过板间总线将计算所得的斜率向量 \mathbf{K} 同时发给不同的波前处理子板。波前处理子板将事先收到子校正矩阵与斜率向量 \mathbf{K} 做矩阵乘，得到波面误差分量 E_n ，各个波前处理子板将计算所得的波面误差分量 E_n 通过控制运算得到促动器所需的促动量。

这样就可以通过硬件扩展而不影响波前处理延时的情况下满足对不同规模的自适应光学系统波前处理需求。

3 自适应光学系统波前处理机的 FPGA 软件实现

3.1 FPGA 对整个系统的配置及数据传输

图 4 给出了整个基于 FPGA 自适应光学系统波前处理数据流程图。对整个系统的配置及数据传输主要由波前处理主板的 FPGA 完成，其核心器件采用的是 Xilinx Virtex-4 LX80 FPGA^[9]，整个系统的配置和数据传输可以分为标定阶段和实时处理阶段。

标定阶段的配置和数据传输：标定数据通过 PXI 总线由主控计算机传送至波前处理主板的 FPGA 中，标定数据的数据种类有图像背景数据、阈值、参考点坐标以及控制矩阵等，每种种类的数据由不同的数据头构成。主板中的 FPGA 通过

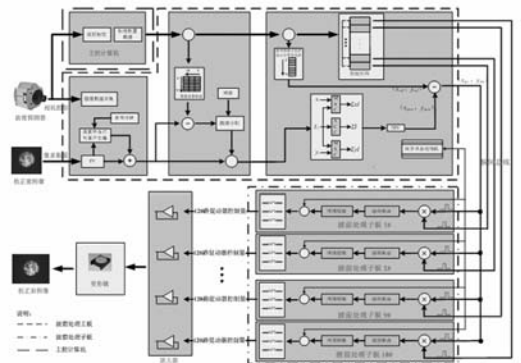


图 4 基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理流程图
Fig. 4 Flowchart of AO wave-front processor based on FPGA

数据头的判断,将接收到的数据分配至不同的存储空间中。在接收完所有数据后,FPGA 启动子板发送状态机,将波前处理子板需要的标定数据发送到各波前处理子板,完成对整个系统的配置。

实时处理阶段的配置和数据传输:实时处理阶段的配置和数据传输主要是对波前子孔径斜率数据的打包传输,主板上的 FPGA 通过帧同步信号作为数据传输的启动和停止控制信号,从而确保数据的准确传输。

3.2 基于 FPGA 的波前图像预处理和波前子孔径斜率计算

基于 FPGA 的波前图像预处理和波前子孔径斜率计算流程如图 5 所示,主要过程是:(1)图像数据在像素时钟的节拍下先流入图像预处理模块,并行地完成减背景和阈值分割运算,计算结果暂存到数据寄存器中;(2)经过图像预处理后的图像数据在下一个像素时钟的节拍下,流入质心计算模块,并行完成 3 个基本计算:即子光斑的像素灰度与子孔径水平方向坐标的加权和、子光斑像素灰度与子孔径垂直方向坐标的加权和、子光斑像素灰度和;(3)当子孔径的一个像素行结束时,将计算完成的上述(2)中的 3 个加权和累加到前几个像素行的累加和上,并将结果暂存到 3 个寄存器中;(4)当子孔径的最后一个像素行的最后一个像素计算结束时,输出上述三个加权累加结果到除法运算模块中,计算得到当前子孔径的 x 和 y 方向上的质心坐标;(5)计算得到的子孔径 x 和 y 方向上的质心坐标同参考图像对应子孔径的质心坐标做差,得到子孔径的质心偏差数据^[10]。

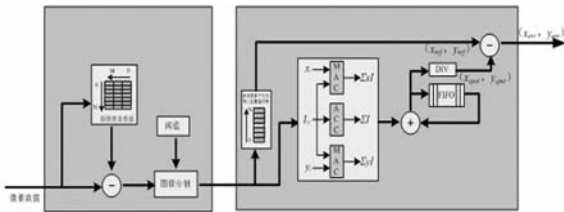


图 5 基于 FPGA 的图像预处理和子孔径斜率流程图
Fig. 5 Flowchart of AO image pretreatment and gradient calculation based on FPGA

基于 FPGA 的波前图像预处理和子孔径斜率计算有如下的特点,即基于像素时钟作为工作时钟,并利用图像数据逐行逐像素顺序输出。采用流水线工作方式,数据以像素为单位进行处理。

在像素读出的过程中完成处理,这是基于 PC 机所不能完成的,实现了取数和处理过程的高度并行。图 6 给出基于 FPGA 的波前图像预处理和波前子孔径斜率计算的仿真波形图,其中 Fval 信号为帧同步信号,高电平有效;Rdy 信号为有效子孔径质心计算完毕应答信号,高电平有效;从图中可以看出在 Fval 信号变为低电平之前有效子孔径斜率计算已经结束。

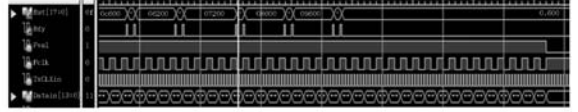


图 6 基于 FPGA 的子孔径质心计算仿真波形图
Fig. 6 Centric calculation simulation waveforms based on FPGA

3.3 基于 FPGA 的多路 D/A 转换输出控制

每块波前处理子板的促动量输出为 120 路,系统中选用了 3 片 AD 公司的 AD5370 作为 D/A 转换芯片,其每片为 40 通道 16 位分辨率,采用 SPI 总线模式。配置每个通道每次需要写入 24 bit 的数据,其中包括 16 bit 的 D/A 转换数据、6 bit 的通道信息和 2 bit 的模式信息,每片 40 通道的 D/A 数据通过 Load 信号控制同步输出。

系统中要求所有促动器促动量同时送给后端的运算放大器。系统采用 FPGA 对 D/A 转换芯片进行配置和控制,图 7 给出了基于 FPGA 的多路 D/A 配置输出控制流程图。

多路 D/A 数据同步输出配置控制流程:(1)计算所得的 D/A 数据分块顺序写到寄存器 1、寄存器 2 和寄存器 3 中;(2)当基于 FPGA 编写的 SPI 总线模块检测到寄存器中有数据时,启动配置传输,顺序将每个通道的 24 bit 数据串行写入 D/A 转换芯片的内部寄存器中;(3)当 D/A 数据全部写入上述 3 个寄存器中时,三路 D/A 数据将会进行并行配置;(4)每块波前处理子板在完成 D/A 数据配置后,通过板间总线发送一完成信号到波前处理主板的 FPGA;(5)主板上的 FPGA 收到所有子板的 D/A 配置数据完成标志后开启所有子板的 Load 信号,保证所有通道的 D/A 数据同步输出。

采用 FPGA 作为多路 D/A 数据配置输出控制,很好地实现了配置数据的并行配置,缩短了配置过程中的延时,使得整个系统 1200 路的 D/A

数据的配置变为 30 路并行配置,每路配置数为 40 路 D/A 数据。同时采用 FPGA 作为控制核心提供了一种 1200 路 D/A 数据同时输出的控制办法,充分发挥了 FPGA 的并行性优势,提高了系统集成度和处理能力。

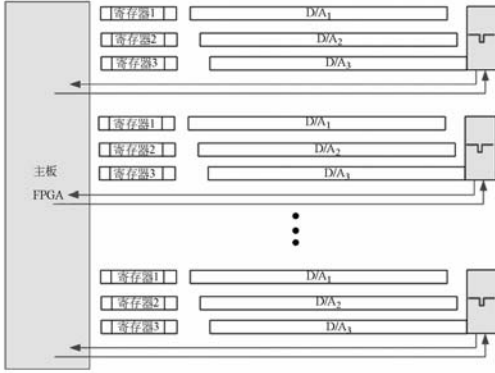


图 7 基于 FPGA 的多路 D/A 配置输出控制流程图
Fig. 7 Flowchart of multi D/A configuration and output based on FPGA

4 实验与结果分析

实验采用 97 单元,有效子孔径 177 的自适应光学系统进行了验证。图 8 和图 9 分别给出了采用定点计算的基于 FPGA 的波前子孔径斜率计算在 x 和 y 方向上的质心误差图。 x 方向的子孔径质心计算的均方差值 $\sigma = 0.002$; y 方向的子孔径质心计算的均方差值 $\sigma = 0.002$,所以计算的子孔径斜率能精确到约千分之一像素级。系统中采用 10 位二进制数作为小数部分。

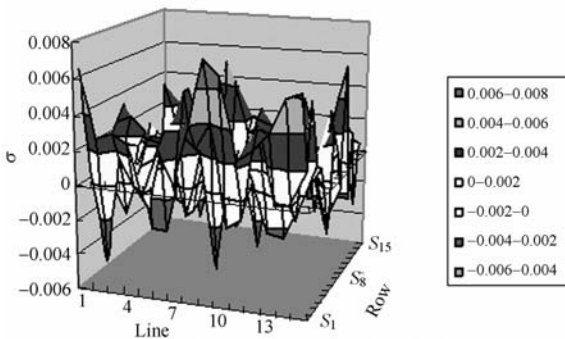


图 8 x 方向子孔径质心误差图
Fig. 8 Sub aperture centric error map on x

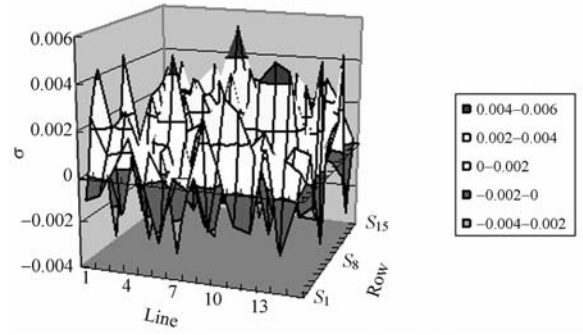


图 9 y 方向子孔径质心误差图
Fig. 9 Sub aperture centric error map on y

DA_2 和 DA_3 为 3 块基于 SPI 通信协议的 D/A 转换芯片的数据输出信号;信号 Frame 为波前探测器帧同步信号,高电平有效;Load 信号为促动器输出同步信号。从图中可以看出,整个波前处理与 DA 输出的延时为 $423 \mu s$,其中的 D/A 输出延时为 $85 \mu s$,波前处理延时为 $338 \mu s$,处理延时小于 $500 \mu s$ 。设计的系统能够达到 2 000 frame/s 的实时波前处理的需求。

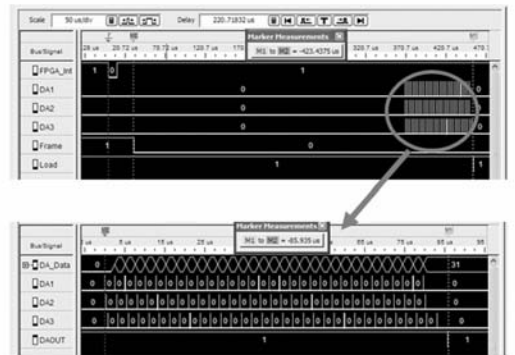
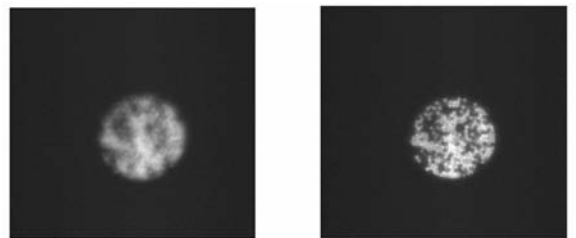


图 10 波前处理延时图
Fig. 10 Time delay of wave-front process



(a)校正前 (b)校正后
(a) Before correction (b) After correction

图 11 光纤校正效果图

图 10 为波前处理延时图,图中信号 FPGA_Int 为所有子孔径斜率计算完毕信号;信号 DA_1 ,

Fig. 11 Results of adjust fiber bundle

图11为实验过程中对光纤束实时校正效果图,从图中可以看出,经过校正后的光纤束可以清晰看到细节。

5 结 论

本文提出了基于FPGA的自适应光学系统

波前处理机,在软件上选用FPGA作为配置控制和部分算法的核心器件,有效地降低了处理延时。在硬件上采用波前处理主板和波前处理子板相结合的方式,使得波前处理系统可根据自适应光学系统的规模实现扩展。最终系统实现了 $338\ \mu\text{s}$ 的波前处理延时,2 000 frame/s的实时波前处理速度和1200路D/A数据输出的能力。

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. 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] KEPA K, COBUM D, DAINTY J C, *et al.*. High Speed Optical Wavefront Sensing with Low Cost FPGAs. [J]. *SPIE*,2008,8:87-93.
- [3] LUIS F R R, VIERA T, JOSE V. Gigante, *et al.*. FPGA adaptive optics system test bench. [J]. *SPIE*,2005,5903: 59030D1-9.
- [4] BASDEN A G, ASSEMAT F, BUTTERLEY T, *et al.*. Acceleration of adaptive optics simulations using programmable logic[J]. *SPIE*,2005,1-6.
- [5] GOODSELL S J, FEDRIGO E, DIPPER N A, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project. [J]. *SPIE*,2005,5903: 59030G1-12.
- [6] GOODSELL S J, GENG D, FEDRIGO E, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project: Part 2. [J]. *SPIE*,2006,6272: 6272411-12.
- [7] GOODSELL S J, GENG D, YOUNGER E J, *et al.*. FPGA developments for the SPARTA project: Part 3 [J]. *SPIE*,2007,6691: 6691031-12.
- [8] 饶长辉,姜文汉,张雨东,等. 云南天文台1.2 m望远镜61单元自适应光学系统[J]. 量子电子学报,2006,23(3):295-302.
RAO CH H, JIANG W H, ZHANG D Y. 61-element adaptive optical system for 1.2 m telescope of Yunnan Observatory[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*. 2006, 23(3):295-302(in Chinese)
- [9] <http://www.xilinx.com/products/v4qv/lx.htm>
- [10] 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.
ZHEN W J, WANG CH H, JIANG W H. Design and analysis of real-time adaptive optics wave-front processor based on systolic array. [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008,35(5):44-49. (in Chinese)

作者简介:

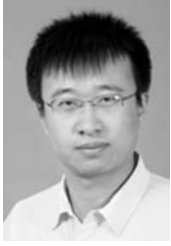


贾建禄(1982-),男,内蒙赤峰人,博士研究生,助理研究员,2008年于天津大学获得硕士学位,主要从事基于FPGA的硬件开发与设计方面的研究。E-mail: jianluciomp@163.com



赵金宇(1976-),男,内蒙通辽人,副研究员,主要从事光电望远镜测量精度分析、软件设计、数据通信等方面的研究。E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn

导师简介:



王明浩(1981—),男,吉林长春人,助理研究员,主要研究方向为地基大口径望远镜的图像恢复。E-mail: peter_wang@yahoo. cn.



王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp. ac. cn



曹景太(1985—),男,哈尔滨大庆人,研究实习员,主要从事基于 DSP 的系统设计与开发工作。E-mail: caojt@ciomp. ac. cn.

● 下期预告

空间合成孔径成像光学系统的光瞳对称性研究

王忠生^{1,2}, 张学军¹

(1. 中国科学院榜长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

从对称性的角度来分析比较几种常见光学系统结构对非相干成像的影响。首先,在复杂光瞳光学系统中采用了二维点扩散函数和二维空间调制传递函数进行分析评价,理论分析得出了复杂光瞳分布的对称性影响点扩散函数和调制传递函数对称性的结论。最后,利用二维评价手段,结合几种常见的合成孔径光学系统结构 golay3、golay4、JWST 和 Giant Magellan Telescope 的光瞳分布,通过光学设计软件 zemax 和 matlab 综合给出了实际的二维点扩散函数和二维调制传递函数,结合 MTF 的空间分布特性对光瞳分布的对称性进行了对比。对比结果表明,近期的 JWST 和 GMT 合成孔径光学系统具有 30 个和 9 个 MTF 对称轴,明显多于早期的 Golay3 系统的 3 个 MTF 对称轴,其 MTF 的分布也更加合理。因此,对于复杂光瞳非相干成像光学系统而言,好的光瞳分布对称性具有更好的空间成像特性。