

文章编号 1004-924X(2012)06-1350-07

基于实时波前信息的图像复原

赵金字^{1*}, 吴元昊¹, 贾建禄^{1,2}, 乔兵¹, 王斌¹, 汪宗洋¹, 马鑫雪^{1,2}

(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:提出了一种基于 PIX 总线的千单元可扩展波前探测图像恢复技术。采用波前探测与图像恢复相结合的方式克服大气扰动和系统像差对图像分辨率的影响, 满足大型地基望远镜高分辨率成像的需求。首先利用波前探测的方法得到波前相位畸变量, 再由此恢复退化图像。其核心部件一波前处理器则采用波前处理主板和可扩展的波前处理子板相结合的方式满足不同光学系统对波前处理规模的需求, 波前空间采样数可扩展至千单元数量级。系统在室内进行了激光光源图像恢复实验, 使激光光源的能量集中度提高 50% 左右; 在室外对恒星和 0.6" 的双星图像进行了恢复, 其半高全宽下降了约 80%。系统采用大规模现场可编程门阵列 (FPGA) 作为波前处理的核心器件, 实现了波前探测的实时处理和透过大气成像的退化图像的高分辨率图像恢复。

关键词:地基望远镜; 波前测量; 实时处理; 图像恢复

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1350

Image restoration based on real time wave-front information

ZHAO Jin-yu^{1*}, WU Yuan-hao¹, JIA Jian-lu^{1,2}, QIAO Bing¹,
WANG Bin¹, WANG Zong-yang¹, MA Xin-xue^{1,2}

(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: zhaojy@ciomp.ac.cn

Abstract: A thousand-unit scalable wave-front detector based image restoration technology was proposed. The wave-front detection and image restoration were combined to eliminate the effect of atmospheric disturbance and system aberration on the image resolution and to meet the requirements of large ground-based telescopes for high-resolution imaging. First, the wave-front detection was used to obtain the wave-front aberration and then degenerated images were restored based on obtained aberration amounts. The core component, a wave-front processor, used a wave-front host Printed Circuit Board (PCB) combined with a wave-front sub PCB to implement wave-front processing for optical systems with different sizes and it could reach thousand magnitude unit outputs. An image restoration experiment for a laser source was performed in an experimental laboratory, which shows the laser energy concentration has increased by 50%. And the binary source of 0.6 arc-second experiments was carried out in a telescope, and its Full Width at Half Maximum (FWHM) has decreased by 80%. By using a

收稿日期: 2011-11-10; 修订日期: 2011-11-30.

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

large-scale Field Programming Gate Array(FPGA) as the core processing device, the system achieves the high resolution image restoration for a degenerated image from the ground-based telescope.

Key words: ground-based telescope; wave-front measurement; real time processing; image restoration

1 引言

克服波前相位畸变对地基大口径望远镜成像质量的影响,是该领域最重要的问题之一。目前的技术,无论是散斑成像还是自适应光学,都无法完全克服大气扰动对光学成像系统的影响。散斑成像技术受探测器信噪比的影响,当信噪比达不到要求时,就会失效。自适应光学受到的限制包括:波前探测器对波前的有限空间数字采样;变形镜的有限数字化的自由度;波前探测器有限的量化等级;以及波前测量与波前校正的时间延迟造成的误差。随着望远镜的口径越来越大,系统对波前探测器和变形镜的可控单元数要求越来越大,制造成本与难度也成倍增加。另外,散斑成像与自适应光学都受到等晕区域影响,在非等晕情况下,该技术无法获得理想的效果。

以上原因促使人们考虑一种将自适应光学与图像事后处理相结合的方法,以使受到大气扰动影响的光学系统具有高分辨率成像的能力。该方法的基本思想是:在波前校正之前,用波前探测器检测波前相位畸变,在波前校正部分,用数字图像进行事后处理的方法。

基于波前探测的图像恢复技术(DWFS)最先由 Fontanella 于 1985 年提出,传统的处理过程包括使用波前探测器采集一系列的波前测量值和由此重建目标波前恢复图像的过程,这些理论由 Primot 等在实验室得到验证。随着科学技术的飞速发展,采用 DWFS 技术,取得了很多成果^[1]。该方法在 20 世纪 90 年代第一次得到了天文图像实验结果^[2],同时对其信噪比等特性也进行了充分分析,并由此得出,DWFS 优于散斑成像的两个原因:其一是不受高光通量区域散斑噪声的限制,其二是如果能够提供一个亮点作为参考点,该技术对面目标的效果更好^[3]。Primot 的测量结果并不是无偏估计,因为他们没有考虑到目标测量中波前重建的误差。因此以后又有人提出了一种可以利用参考星来校正目标的估计算法,即无偏估计方法,该方法的缺点是易受散斑噪声的影响^[4]。

在波前探测器的采样方面,其子孔径数量主要根据大气相干长度 r_0 确定,当波前探测器的子孔径大小与 r_0 相当时,才能较好地探测到大气扰动引起的波前相位畸变。对于 4 m 望远镜,为了接近衍射极限的分辨率成像,当 r_0 为 15 cm 时子孔径数为 710,当 r_0 为 10 cm 时子孔径数约为 1 600,若进行 4 m 级望远镜的设计,初步考虑子孔径数需要达到 1 000 单元左右。

随着近几年集成电路的迅猛发展,高性能、大容量的带有计算功能的现场可编程门阵列(FPGA)在并行性计算处理方面正逐步取代传统的数字信号处理芯片(DSP)^[5-6]。在基于哈特曼的自适应波前处理过程中使用 FPGA 作为核心处理控制芯片,可以充分发挥其并行性的特点^[7],国内外多家研究机构已经开展相关方向的研究^[8],并在处理性能和速度上都得到了一定的提高^[9]。本文提出了千单元可扩展自适应光学系统波前处理器,在满足上述功能的前提下,缩短了波前处理延时,提高了系统带宽。

2 理论模型

这里,成像系统在不考虑噪声的情况下表示为:

$$i(x) = o(x) * h(x), \quad (1)$$

其中, $x=(x, y)$ 。以上各项分别为图像辐照度分布、目标的辐照度分布和点扩散函数。频域表示为:

$$I(u) = O(u) H(u). \quad (2)$$

基于波前探测的解卷积技术是一种通过短曝光图像和波前探测相结合的测量方法。目标光在入瞳后由分光器分成两部分,一部分由相机成像,采集短曝光图像;另一部分给波前探测器,得到波前畸变量 $\psi(x)$ 的测量值 $\tilde{\psi}(x)$ 。由波前探测器得到的入瞳处的相位畸变量和光瞳函数 $W_p(x)$ 相结合,得到广义光瞳函数 $W_p(x) \exp\{j\tilde{\psi}(x)\}$,进而得到光学传递函数 $\tilde{H}(u)$,用于解卷积运算。我们同样考虑到多帧平均或多探测器平均的方法可以提高图像的信噪比,抑制读出噪声对图像的影响。理论框图由图 1 所示。

探测器的光学传递函数由光瞳函数的自相关得到,表示为:

$$\tilde{H}(u) = N_F^{-1} \int W_p(x) W_p(x - u\lambda d_i) \exp\{j[\tilde{\psi}(x) - \tilde{\psi}(x - u\lambda d_i)]\} dx, \quad (3)$$

其中, $N_F = \int |W_p(x)|^2 dx$ 是归一化因子。 λ 为成像平均波长, d_i 为出瞳与成像面的距离。

在不考虑成像噪声的情况下,探测器对目标成像的单帧频谱表示为:

$$\tilde{O}(u) = \frac{I(u) \tilde{H}^*(u)}{|\tilde{H}(u)|^2}. \quad (4)$$

该方法的优点是,估计中既有目标频谱的幅

度信息,又有相位信息,不用像散斑成像技术一样利用双谱或互相关来单独计算频谱的相位与幅度。缺点是波前探测器使系统的成本增加,另外多了对波前探测器数据的处理过程。

一个完整波前 $\psi(x)$ 的 Zernike 多项式描述为式(5):

$$\psi(x) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^n \alpha_k Z_k(x) + \epsilon, \quad (5)$$

其中 α_0 为平均位相波前, α_k 为第 k 项 Zernike 多项式系数, Z_k 为第 k 项 Zernike 多项式(可通过查表所得), ϵ 为波前相位测量误差。子孔径内的斜率数据与 Zernike 多项式系数的关系为式(6):

$$\begin{cases} G_X(i) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \frac{\iint_{S_i} \frac{\partial Z_k(x,y)}{\partial x} dx dy}{S_i} + \epsilon_x = \sum_{k=1}^n \alpha_k Z_{,k}(i) + \epsilon_x \\ G_Y(i) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \frac{\iint_{S_i} \frac{\partial Z_k(x,y)}{\partial y} dx dy}{S_i} + \epsilon_y = \sum_{k=1}^n \alpha_k Z_{,k}(i) + \epsilon_y \end{cases}, \quad (6)$$

其中 ϵ_x, ϵ_y 为波前相位测量误差, n 为模式阶数。 S_i 为子孔径的归一化面积。 m 个子孔径斜率 n 项 Zernike 系数的关系用矩阵表示为式(7):

$$\mathbf{G} = \mathbf{D}\mathbf{A} + \boldsymbol{\epsilon}, \quad (7)$$

其中 \mathbf{D} 为 Zernike 多项式矩阵, \mathbf{G} 为子孔径斜率向量, \mathbf{A} 为子孔径多项式系数向量, $\boldsymbol{\epsilon}$ 为波前测量误差向量。上述方程的最小二乘解可用广义逆 D^+ 表示为式(8):

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}^+ \mathbf{G}. \quad (8)$$

通过上式在计算出每帧波前子孔径斜率向量的基础上即可解算出当前波前,完成波前测量^[10-12]。

3 仿真实验及其结果分析

仿真实验在实验室内进行,在光学平台上搭建实验平台,如图 1 所示,由点光源和双胶合凸透镜模拟无穷远处的点目标,在平行光部分用变形镜模拟大气扰动;成像部分由同样的双胶合凸透镜构成,用分光镜分为两路,一路由普通相机成像,一路由波前探测器成像,采集波前相位畸变信息。其中光源采用 632.8 nm 的激光光源,其亮度可调,以保证达到哈特曼相机的探测能力,并且

使光斑范围不超过各个微透镜对应的成像区域。

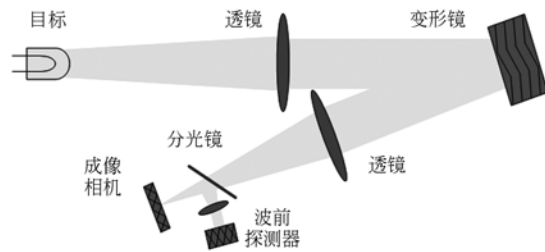


图 1 仿真实验结构图

Fig. 1 Simulated system layout

波前探测器部分,由微透镜阵列,成像相机和波前处理器组成。其中的核心部分是波前处理器,可根据波前空间采样的需要进行扩展。

本系统采用基于 PXI 总线的千单元可扩展波前处理器,图 2 为系统结构框图。其由主控计算机、波前处理主板和可扩展的波前处理子板 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,波前处理主板实时进行波前测量,计算波前子孔径斜率,并通过 PXI 总线将斜率数据上传至主控计算机,完成波前测量的显示以及数据的记录等工作,同时结合波前处理子板完成波前测量和波前标定的功能。每路子板可处理

120 单元数据,该系统可配备 10 块子板,具有扩展至千单元的能力。

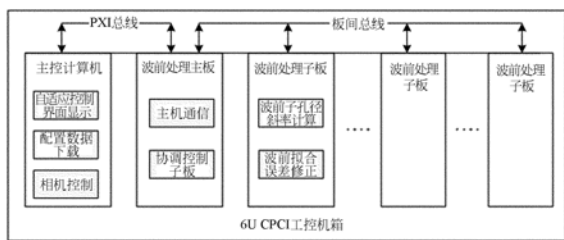


图 2 波前处理器系统框图

Fig. 2 Block diagram of wave-front processor

图 3 为波前处理器实物图,整个系统集成在一个 6U CPCI 工业机箱中,提高了系统的集成度和稳定性。

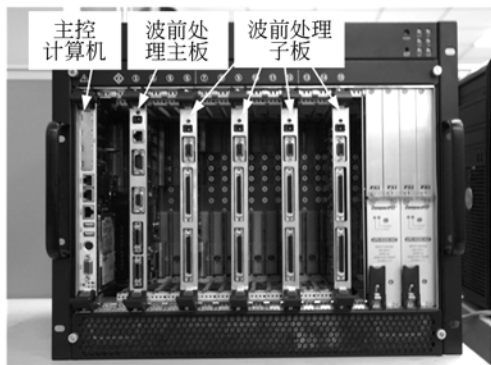
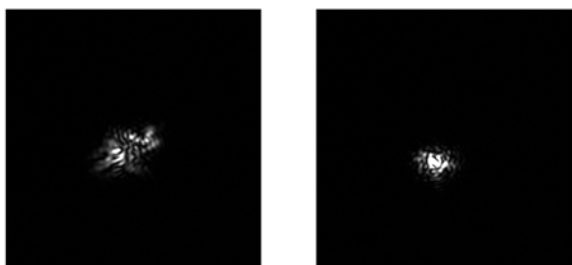


图 3 波前处理器

Fig. 3 Wave-front processor

实验中采用激光作为光源,图 4 表示了图像恢复前后的对比效果。图 5 和图 6 给出了其三维能量分布图,其结果表明,恢复后能量集中度有了明显的提高。



(a)恢复前 (b)恢复后
(a)Before restoration (b)After restoration

图 4 光源恢复效果对比图

Fig. 4 Comparison of image before and after restorations

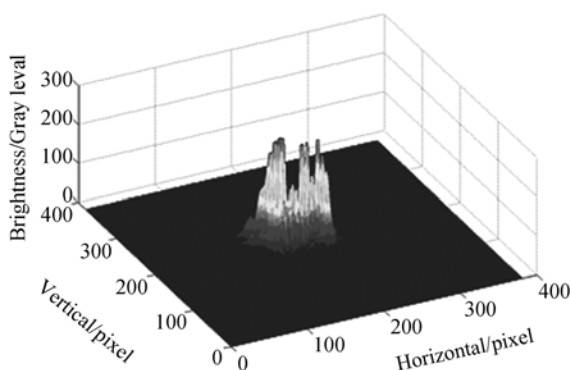


图 5 恢复前能量分布图

Fig. 5 Energy distribution before restoration

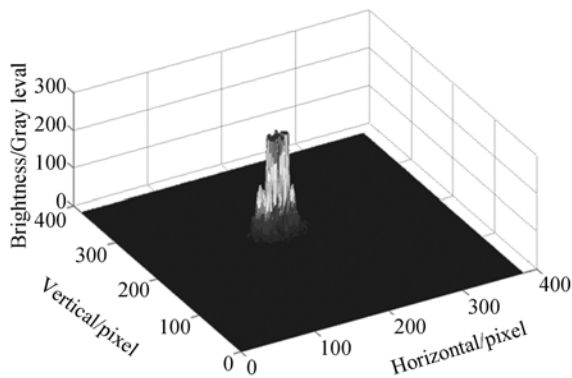


图 6 恢复后能量分布图

Fig. 6 Energy distribution after restoration

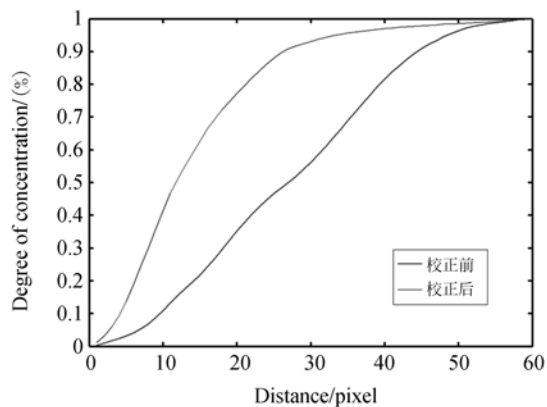


图 7 校正前后能量分布曲线

Fig. 7 Energy distribution curves before and after restorations

图 7 给出了恢复前后能量分布曲线,其结果表明,恢复后光源中心位置附近的能量集中度比恢复前提高了 50%。

图 8 为恢复过程中的所测的时序图,图中 Frame 信号为图像帧有效信号,高电平有效。

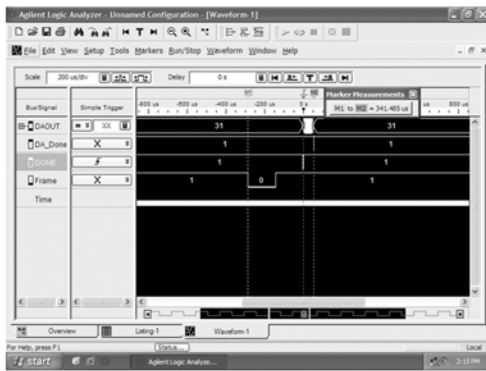


图 8 波前处理延时图

Fig. 8 Waveform of wave-front process time delay

Done 为输出结束信号。图像为 128 pixel×128 pixel 大小,波前处理延时为 341.485 μs。可以满足 2 000 frame/s 的实时波前处理任务。

4 现场实验与结果分析

将该方法应用在 1 m 级望远镜上进行实验,实验装置组成结构如图 9 所示,采用成像相机和波前探测器两路成像光路,分别采集目标图像信息和波前相位信息。由同步信号发生器产生外触发信号,控制两个光路的相机同时曝光。波前探测相机采集的图像通过千单元可扩展波前处理器计算,得到由 Zernike 系数表示的波前相位畸变信息。主控计算机整合成像相机采集的目标图像和波前畸变信息,恢复目标图像,得到高分辨率的目标图像。

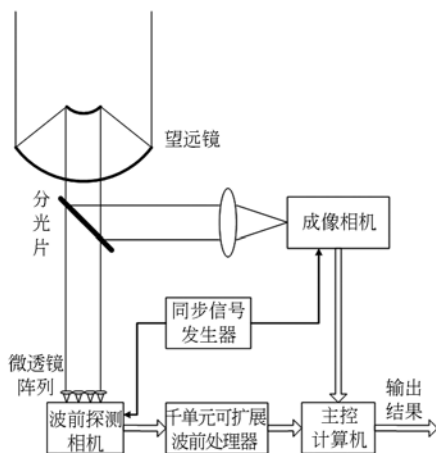


图 9 实验系统结构图

Fig. 9 System structure

在 1.2 m 望远镜平台上,对于恒星目标,实验选择了 38°仰角,4.28 星等的恒星,曝光时间为 10 ms,成像相机处于非饱和状态,原始图像序列如图 10 所示,图像大小为 128 pixel×128 pixel。

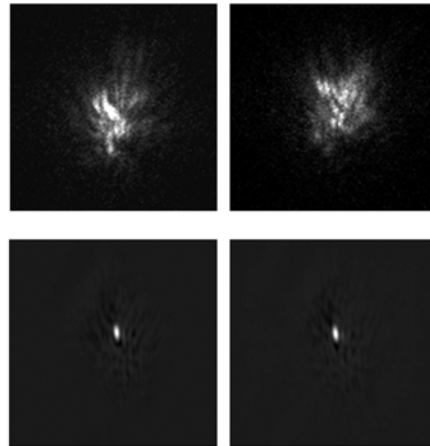


图 10 恒星原始图像及恢复结果

Fig. 10 Original image sequences of star and restoration results

对比原始图像和恢复后的图像,把恒星视为点目标,其半高全宽从 28~30 pixel,下降到 6 pixel 左右,下降了约 80%。

观测双星,以相距 0.6'' 的双星作为目标,仰角为 38.8°,双星的星等分别为 4.27 等和 6.29 等。图 10 为成像相机采集到的原始图像序列,曝光时间为 20 ms。原始图像中很难看出双星信息,其被散斑噪声完全淹没。

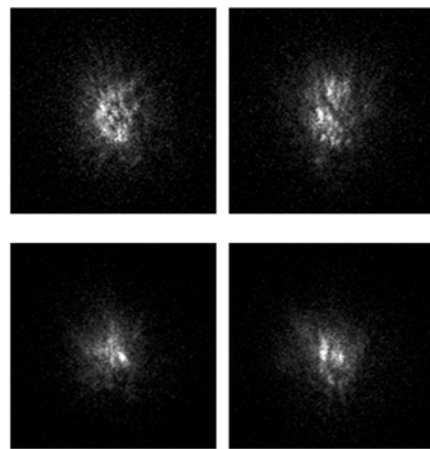


图 11 原始双星图像序列

Fig. 11 Original binary image sequences

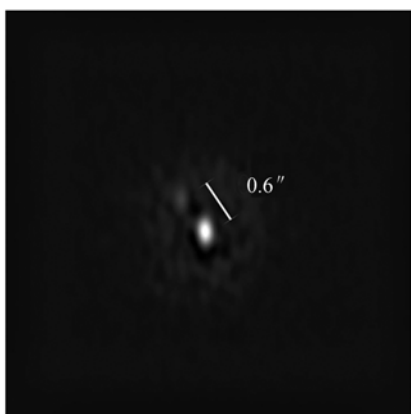


图12 恢复后的双星图像

Fig. 12 Binary image after restoration

经过实时测量和恢复后,得到的结果如图12所示,为了方便观察,图为放大显示,其中两个亮点即为双星的成像点,其间隔为 $0.6''$ 。实验结果

参考文献:

- [1] FORD S D, WELSH B M, ROGGEMANN M C. Constrained least squares estimation in deconvolution from wave-front sensing [J]. *Optics Communications*, 1998, 151(5): 93-100.
- [2] GONGLEWSKI J D, VOELZ D G, FENDER J S, et al.. First astronomical application of postdetection turbulence compensation: images of α Aurigae, ν Ursae Majoris, and α Geminorum using self-referenced speckle holography [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(31): 4527-4529.
- [3] ROGGEMANN M C, HYDE C A, WELSH B M. Comparison of Fourier phase spectrum estimation using deconvolution from wavefront sensing and bispectrum reconstruction [J]. *Optics Communications*, 1997, 133(1): 381-392.
- [4] ROGGEMANN M C, WELSH B M, DEVEY J. Biased estimators and object-spectrum estimation in the method of deconvolution from wave-front sensing [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(24): 5754-5763.
- [5] 王建立,陈涛,张景旭. 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)

证明,该方法对于透过大气扰动,波前相位产生畸变的退化图像,具有较强的恢复能力。

5 结 论

本文提出了以基于 PXI 的千单元可扩展波前处理器为核心的 DWFS 系统,该系统能够完成波前测量、波前标定以及图像恢复等功能。在处理控制方面采用大规模、高性能的 FPGA 作为核心器件,实现了波前处理过程的强实时性。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光学系统的规模实现扩展。在室内进行了激光光源的恢复实验,在室外进行了双星恢复实验,取得了良好的效果,能够恢复 $0.6''$ 的退化双星图像。

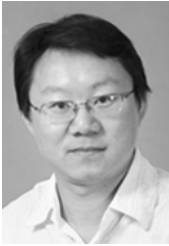
- [6] GOODSELL S J, FEDRIGO E, DIPPER N A. FPGA developments for the SPARTA project [J]. *SPIE*, 2005, 5903: 59030G1-12.
- [7] GOODSELL S J, GENG D, FEDRIGO E. FPGA developments for the SPARTA project: Part 2 [J]. *SPIE*, 2006, 6272: 6272411-12.
- [8] GOODSELL S J, GENG D, YOUNGER E J. FPGA developments for the SPARTA project: Part 3 [J]. *SPIE*, 2007, 6691: 6691031-12.
- [9] 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)
- [10] 蒋志凌. 哈特曼波前传感器特性和应用研究 [D]. 武汉:中国科学院武汉物理与数学研究所, 2006.
- JIANG ZH L. *Study on characteristics and application of hartmann wave front sensor* [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [11] 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.
- JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, et al.. Technology for Adaptive Optical Wave-front Processor Based on FPGA. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,

19(8):1716-1722. (in Chinese)

- [12] 王斌,汪宗洋,王建立,等. 双相机相位差异散斑成像技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1384-1390.

WANG B, WANG Z Y, WANG J L, *et al.*. Phase-diverse speckle imaging with two cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1384-1390.

作者简介:



赵金宇(1976—),男,内蒙通辽人,副研究员,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事地基空间目标探测设备的软件设计、图像处理、电控总体工作。E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn



王斌(1980—),男,吉林人,助理研究员,2003年于长春光机学院获得学士学位,2006年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事信息光学、数值分析、数学最优化以及图像处理与恢复方面的工作。E-mail: eatingbeen@sohu.com



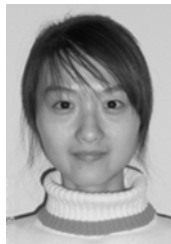
吴元昊(1977—),男,吉林长春人,副研究员,2000年于北京电子科技学院获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事数字图像处理、视频图像跟踪等方面的研究。E-mail: kennth07@163.com



汪宗洋(1986—),男,安徽巢湖人,研究实习员,2008年于中国科学技术大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事大口径光学系统图像恢复和数字图像处理等方面的研究。E-mail: wzy1986@mail.ustc.edu.cn



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。E-mail: jianlucio@163.com



马鑫雪(1987—),女,黑龙江伊春人,硕士研究生,主要从事PR算法、最优化算法以及波前探测等方面的研究。E-mail: maxinxuezuibang@163.com



乔兵(1964—),女,山东定陶人,本科,主要从事地基大口径望远镜相关方向的研究。E-mail: qiaobin@yahoo.com.cn