

## 利用 Offner 光学系统进行图像恢复和光学检测

明名\*, 吕天宇, 邵亮, 王斌

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**设计了一种 Offner 光学系统,用于基于相位差异技术的图像恢复和光学系统波像差的辅助检测。该 Offner 光学系统采用同轴抛物面反射镜作为 Offner 反射镜,以高速 CCD 相机和 Shack-Hartmann 波前探测器作为接收元件,能完好地消除复色光源在图像恢复过程中带来的色差;设计的 RMS 波像差小于  $\lambda/50$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ),结构简单,容易实现。利用该系统分别以分辨率板和光纤光源为目标进行了图像恢复实验,经过恢复后的图像分辨率提高了 19%。此外,利用该系统,采用相位差异算法解算了系统波像差,并与 Shack-Hartmann 波前探测器的测量结果进行了比较。比较显示两者的 RMS 波像差测量值相差 5%,证明该系统同样能够进行光学波前检测。

**关键词:**Offner 系统;光学设计;图像恢复;光学检测;地基望远镜

**中图分类号:**TP391; TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120506.0646

## Image restoration and optical test by using Offner optical system

MING Ming\*, LÜ Tian-yu, SHAO Liang, WANG Bin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: mingm1118@yahoo.com.cn

**Abstract:** Based on phase diversity technology, this paper designs an Offner optical system for image restoration and optical test of wavefront errors. The Offner optical system uses an on-axis parabolic mirror as Offner mirror, and a high speed CCD camera and a Shack-Hartmann wavefront sensor as the receivers to eliminate the chromatic aberration brought by the polychrome light source of the refractive system during image restoration. The system has a simple configuration with the wavefront error (RMS) less than  $\lambda/50$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ). By using the system to perform image restoration experiment for a resolution plate and a fiber source, the resolution of restored image is improved by 19%. In addition, wavefront error test are performed with the Offner optical system using the phase diversity algorithm, and the result demonstrates that the wavefront sensor difference between phase diversity and Shack-Hartmann is 5%, which proves that it is able to perform optical wavefront test

收稿日期:2012-09-12;修订日期:2012-11-15

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

with this Offner optical system.

**Key words:** Offner system; optical design; image restoration; optical test; ground-based telescope

## 1 引言

地基大口径望远镜的分辨率受波前相位畸变的影响,不会随望远镜口径的不断增大而提高,从而无法获得接近衍射极限的理想图像。随着天文学的不断发展,天文观测对望远镜的分辨率要求越来越高,发展具有抗波前相位畸变性能的地基大口径望远镜仍然是当前最重要的任务。

对此,国外的 Gonsalves 率先提出用相位差异技术来提高系统的分辨率<sup>[1]</sup>,以后 Paxman 又对其做了完善<sup>[2]</sup>。相位差异技术利用光学系统焦面和离焦像面上的两台相机同时采集波前畸变图像,通过数字图像处理方法解算波前相位畸变,从而得到较为清晰的恢复图像。除了图像恢复以外,该技术中对波前相位畸变的结算过程还能应用于光学系统的波前测量<sup>[3]</sup>。

国外的 löfdahl 等应用该技术在太阳观测领域进行图像恢复,获得了高分辨率的太阳表面组织图像。James A. Georges III 等人应用相位差异技术进行基于双变形镜的波前测量,在自适应光学系统中取得了很好的效果<sup>[4-5]</sup>。国内也有学者参与这方面的研究,中国科学院长春光机所的王斌、吴元昊、汪宗洋等人对该技术的应用已处于国内领先水平<sup>[6-7]</sup>。

对相位差异技术的研究表明,该技术使用的透镜系统对白光源存在较为严重色差,若不加以处理,就会与系统本身存在的像差混淆,从而影响图像恢复的分辨率。

为了解决透镜系统中存在的色差问题,本文设计了一种 Offner 光学系统<sup>[8]</sup>,利用该光学系统结合相位差异技术进行了图像恢复和光学系统波像差的检测实验。用一片 Offner 反射镜取代透镜系统,消除系统在使用白光光源时产生的色差。与国外 James A. Georges III 等人的棱镜实验系统有所改进的是,实验使用一台高速 CCD 相机在靶

面上的不同位置捕获系统在焦像面和离焦像面的图像,利用其相位差异解算当前时刻的瞬时波前畸变量,并获得恢复后的清晰图像,从而提高了系统能量利用率。另外,还利用该系统对镜面的面形误差进行了辅助测量,并与 Shack-Hartmann 探测器的测量结果进行了比较。文中首先根据要求进行了系统设计,随后对系统的关键元件面形误差进行了检测,并与机械结构进行了装调对准,最后通过图像恢复实验验证了提出的系统比传统透镜系统在消色差方面表现出色,设计结果满足使用要求。光学系统的设计波像差小于  $0.02\lambda$ ,在图像恢复实验中经过恢复的图像分辨率提高了 19%。

## 2 系统设计

### 2.1 光学系统

如图 1 所示,在该 Offner 光学系统中,点光源照亮物体,经过 Offner 反射镜后,变成平行光束,经过变形镜后再次被 Offner 反射镜反射,此时一部分经过分光镜反射后成像在 CCD 探测器上,另一部分透过分光镜后被 Shack-Hartmann 波前探测器接收并测量波前。

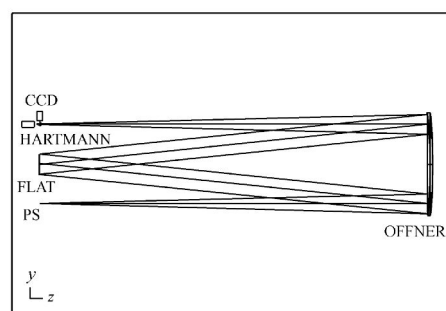


图 1 Offner 光学系统的结构形式

Fig. 1 Structural style of Offner optical system

该系统中除了分光镜以外,其余都是反射元件,这样保证了系统能量不丢失,同时对复色光源

也不会产生大的色差。

## 2.2 性能参数

Offner 反射镜光学系统由 Offner 反射镜、变形镜、分光镜和像面终端设备组成。相关参数分别如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 Offner 反射镜参数

Tab.1 Parameters of offner mirror

Offner reflector	Parameters
Figure	Paraboloid
Radius of curvature/mm	1 782.06
Aperture/mm	260
Figure error	<21 nm(RMS)

表 2 变形镜参数

Tab.2 Parameters of deformable mirror

Deformable mirror	Parameters
Figure	Deformable mirror
Element number	21
Aperture/mm	50
Figure error	0.282 $\lambda$ (RMS)

表 3 分光镜参数

Tab.3 Parameters of beamsplitter

Offner reflector	Parameters
Aperture/mm	30
Glass	K9
Figure error	<21 nm(RMS)

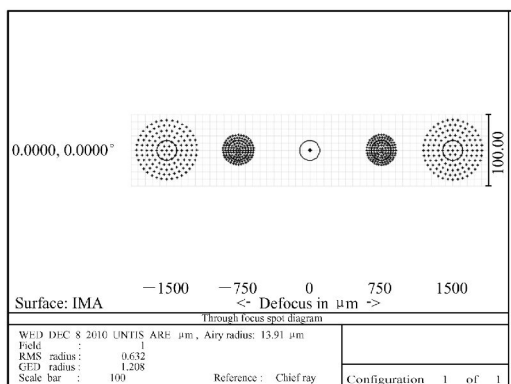


图 2 Offner 光学系统的设计点列图

Fig.2 Designed spot diagram of Offner optical system

成像终端采用分辨率为 512 pixel  $\times$  512 pixel, 像元尺寸为 13  $\mu\text{m}$  的高速相机。该 Offner 反射镜光学系统在焦面的成像质量良好, 作为图像恢复像面(反射像面)的 RMS 波像差优于  $0.02\lambda$  ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ), 像面大小达到衍射极限, 直径为 27.83  $\mu\text{m}$ , 对应于 3 pixel  $\times$  3 pixel。离焦量为 1.5 mm 时, 像面直径为 84.74  $\mu\text{m}$ , 对应于 7 pixel  $\times$  7 pixel。如图 2 所示。

## 3 光机结构与检测

由于该光学系统中反射镜径厚比小, 刚性好, 且通过有限元分析可知, 该反射镜采用  $\pm 45^\circ$  和  $\pm 60^\circ$  的 V 型结构支撑时, 面形误差的变化不大, 考虑到空间布局的要求, 决定采用  $\pm 60^\circ$  的 V 型结构支撑。芯轴采用柔性膨胀结构, 便于实现施加芯轴与撤销时的转换。支撑机构底部采用三点支撑方式, 3 个支撑点分别为球窝、V 型槽以及平面, 可以避免地脚螺栓升降过程中的卡死现象; 经核算, 当 3 个地脚螺栓高度差异 1 mm 时, 反射镜光轴沿水平方向发生的旋转量小于  $1''$ , 满足该系统要求。

图 3 是带有支撑结构的 Offner 反射镜的实验室检测过程图。该 Offner 反射镜采用零位补偿的原理进行检测, 检测范围为全口径内的面形误差。

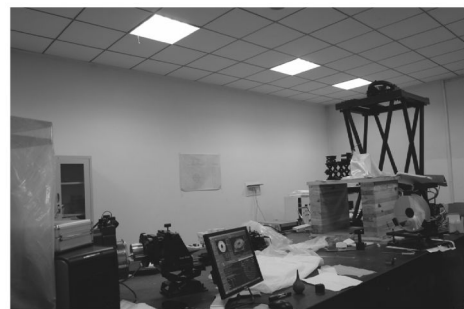
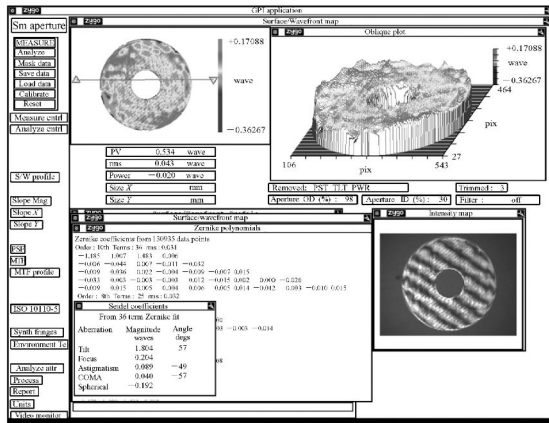


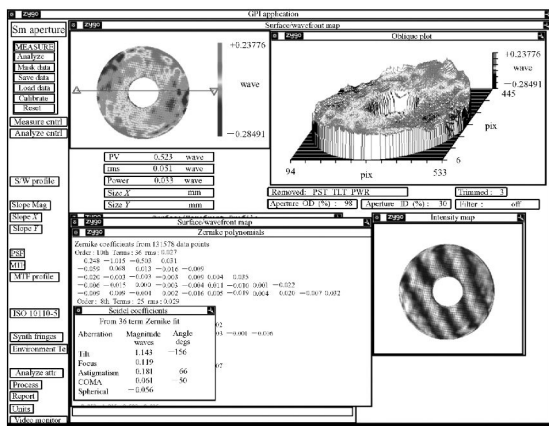
图 3 Offner 反射镜面形误差的检测

Fig.3 Test of figure error for Offner mirror

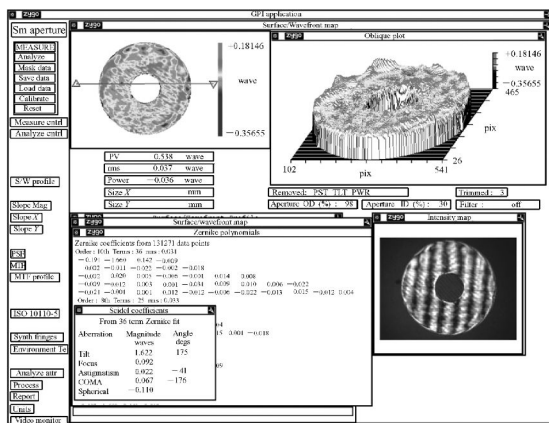
图 4(a)、(b)、(c) 分别为采用 V 型支撑、芯轴支撑以及二者结合时的反射镜镜面面形误差图。单独采用 V 型支撑时 RMS 达到  $\lambda/23$ , 可以满足最初设计需要。单独采用芯轴支撑时, RMS



(a) V 型支撑 Offner 反射镜镜面面形误差图  
 (a) Figure error of Offner mirror with V kind support



(b) 芯轴支撑反射镜镜面面形误差图  
 (b) Figure error of Offner mirror with central axis support



(c) V 型支撑 + 芯轴支撑反射镜镜面面形误差图  
 (c) Figure error of Offner mirror with V kind and central axis support

图 4 采用 V 型支持、芯轴支撑以及二者结合时的反射镜镜面面形误差

Fig.4 Figure error of Offner mirror with V kind, central axis support and their combination

接近于  $\lambda/20$ , 数值上略微大于前者, 同时可以发现采用芯轴支撑的干涉图中等高线变化趋势大体与前者相反。当采用二者结合的支撑方式时, 其 RMS 达到  $\lambda/32$ , 明显优于两种单独支撑方式, 满足了设计中提出的要求。

## 4 系统应用

### 4.1 图像恢复

图 5 是为进行图像恢复实验搭建的光学系统, 所有沿光轴方向的调整均在直线导轨上进行。

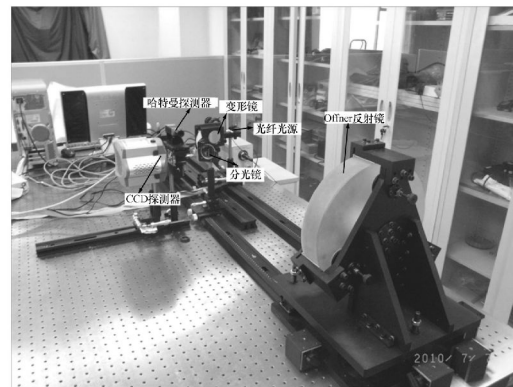
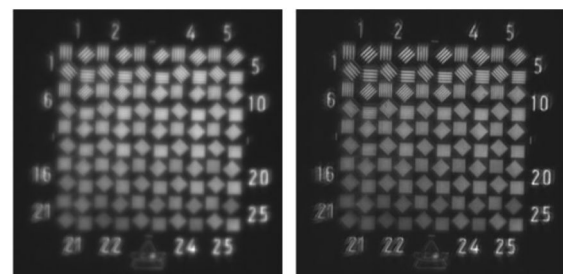


图 5 实验中的 Offner 光学系统

Fig.5 Offner optical system in experiment

首先以 2 号鉴别率板为物方目标, 离焦量按照设计值为 1.5 mm, 相机 CCD 尺寸为  $13 \mu\text{m}$ , Nyquist 采样频率为 38.4 lp/mm。

如图 6 所示, 左图是恢复前的图像, 右图是经过相位差异算法恢复之后的图像。可以看出, 恢



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

图 6 恢复前后的分辨率板图像对比

Fig.6 Comparison of images for resolution plate before and after restoration

复前的图像只能观察到2号分辨率板的第4组,对应分辨率为 $29.7 \text{ lp/mm}$ ;恢复后图像基本能观察到第7组,对应分辨率为 $35.4 \text{ lp/mm}$ ,趋近于相机的Nyquist采样频率下的分辨率,分辨率提高了19%。

从图中看出,虽然经过相位差异技术进行图像恢复后的分辨率得到了较大的提高,但是该图像垂直方向比水平方向更清楚,局部仍表现出相对较大的“像散”,这是由于在光学系统中采用的21单元变形镜的初始面形误差中存在较大的像散所致,接下来的试验中计划将变形镜与哈特曼探测器组成闭环校正结构,以校正光路中残余的像差,进一步进行的图像恢复。

在上面的试验中,用光源照明鉴别率板时,其方向性太强,影响了图像恢复的效果。为了克服这一问题,随后在实验过程中直接用光纤光源作为物方目标进行再一次恢复,图7是以光纤为目标的图像恢复前后的成像对比。从图中同样可以看出恢复前后的图像分辨率提高较为明显,进一步验证了利用该Offner光学系统进行图像恢复的正确性和合理性。

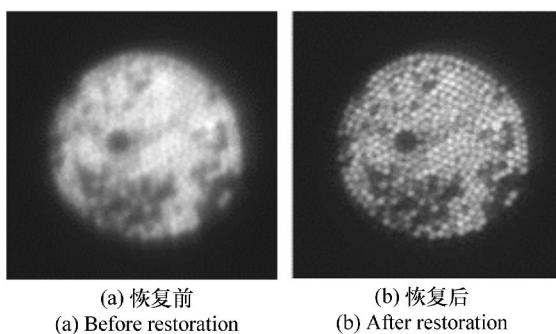


图7 恢复前后的光纤图像对比

Fig. 7 Comparison of images for optical fiber before and after restoration

#### 4.2 辅助检测

对本文设计的Offner光学系统,除了进行图像恢复外,还以光纤光源为目标,分别用相位差异的相关算法和Shack-Hartmann波前探测器对光路最后的波面进行测量,比较两者之间的差异。

图8(a)是相位差异算法解算测量出的系统波面图,图8(b)是Shack-Hartmann波前探测器测量出的系统波面图。两个测量结果的波面逆时针

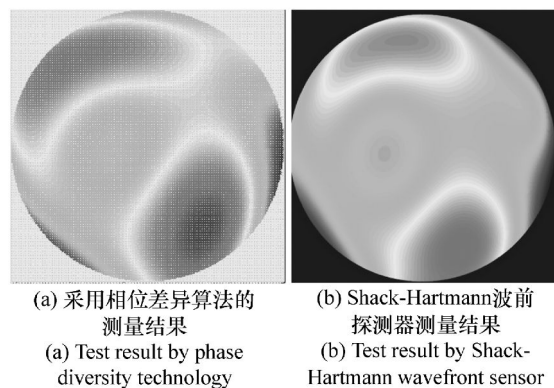


图8 辅助检测的结果对比

Fig. 8 Result comparison between PD and S-H tests

旋转了 $7^\circ$ ,这是由Shack-Hartmann波前探测器存在 $7^\circ$ 倾斜角造成的。经过相位差异算法解算测得的波像差PV值为 $1.471\lambda$ ,RMS值为 $0.284\lambda$ ;经过Shack-Hartmann波前探测器测量出的系统波像差PV值为 $1.819\lambda$ ,RMS值为 $0.298\lambda$ ,均与变形镜的面形误差 $0.282\lambda$ 基本吻合。经过计算分析可以得出,相位差异算法与Shack-Hartmann波前探测器测量的PV值相差23.6%,RMS值相差5%。分析表明,这些测量的差异值主要是由以下几个原因造成的:

(1) 该实验将平行平板用在汇聚光路中进行分光,相对于相位差异光路,该平行平板为波前探测器光路部分带来的像差为 $0.09\lambda$ 。

(2) 离焦的精度对相位差异算法测量结果的影响较大。

(3) 光纤尺寸已经与相机Nyquist频率下的极限分辨尺寸接近,这对结果也有一定的影响。

接下来的实验中,除了考虑用变形镜与哈特曼探测器组成闭环校正机构外,还要采用分光棱镜代替平行平板玻璃来进行分光,用提高离焦精度等方法来改进测量结果。

## 5 结论

针对地基大口径望远镜的分辨率受大气波前畸变相位的影响而无法提高这一问题,本文设计了一种Offner光学系统。以一片抛物面同轴Offner反射镜作为关键元件,利用该Offner系统进行图像恢复和光学系统波前误差检测。该系统

通过高速 CCD 相机在靶面上的不同位置同时捕获系统在焦像面和离焦像面之间的相位差异,并解算当前时刻的瞬时波前畸变量,获得恢复后的清晰图像。该系统分别对 2 号鉴别率板和光纤光源进行了图像恢复,分辨率提高了 19%。最后利用该系统对带有初始面形变形镜的系统波前误差

进行了辅助测量,测量结果与波前探测器的测量结果基本相同。所给出的实验结果证明,该 Offner 光学系统能够进行图像恢复和光学辅助测量,并且完全满足要求,有望投入大口径望远镜的相关应用中。

#### 参考文献:

- [1] PAXMAN R G,THELEN B J,MURPHY R J,*et al.*. Phase-diverse adaptive optics for future telescope[J]. *SPIE*,2007,6711:671103.
- [2] THELEN B J,PAXMAN R G,CARRARA D A,*et al.*. Overcoming turbulence-induced space-variant blur by using phase-diverse speckle[J]. *J. Opt. Society Am.*,2009,26(1):206-217.
- [3] 韩昌元. 空间光学的发展与波前传感技术[J]. *中国光学*,2008,1(1):13-24.  
HAN CH Y. Progress in space optics and wavefront sensing technique[J]. *Chinese Optics*,2008,1(1):13-24. (in Chinese)
- [4] GEORGES J A,DORRANCE P,GLEICHMAN K,*et al.*. Automatic calibration of a phase-diversity wavefront sensing and control testbed[J]. *SPIE*,2007,6711:671106.
- [5] WARMUTH M W,PARKER S W,WILSON A J,*et al.*. Operation of phase-diverse adaptive-optics with extended scenes [J]. *SPIE*,2008,7093:709307.
- [6] 吴元昊,王斌,赵金宇,等. 利用相位差异技术恢复宽带白光图像[J]. *光学精密工程*,2010,18(8):49-54.  
WU Y H,WANG B,ZHAO J Y,*et al.*. Restoration of broadband white light image using phase diversity technique[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(8):49-54. (in Chinese)
- [7] 汪宗洋,王建立,王斌,等. 基于相位差异的图像复原方法[J]. *光电工程*,2010,37(12):25-29.  
WANG Z Y,WANG J L,WANG B,*et al.*. Image restoration based on phase diversity[J]. *Opto-Electronic Eng.*,2010,37(12):25-29. (in Chinese)
- [8] 刘伟. 小型 Offner 凸光栅光谱成像系统的结构设计及分析[J]. *中国光学*,2010,3(2):157-163.  
LIU W. Design and analysis of structure of compact offner spectral imaging system[J]. *Chinese Optics*,2010,3(2):157-163. (in Chinese)

**作者简介:**明 名(1983—),男,湖南临澧人,助理研究员,主要从事大口径光学系统的设计、光学检测与装调技术等方面的研究。E-mail: mingm1118@yahoo.com.cn

吕天宇(1984—),男,吉林长春人,研究实习员,主要从事光学仪器设计等方面的研究。

E-mail: lvtianyu1984@sina.com

邵 亮(1982—),男,吉林桦甸人,研究实习员,主要从事大型光学望远镜结构支撑等方面的研究。

E-mail: shaol@mail.ustc.edu.cn

王 斌(1980—),男,吉林省吉林市人,助理研究员,主要从事数值分析、数学最优化以及图像处理与恢复等方面的研究。E-mail: eatingbeen@sohu.com