

文章编号 1004-924X(2010)08-1849-06

# 利用相位差异技术恢复宽带白光图像

吴元昊,王 斌,赵金字,明 名,董磊,杨轻云,王鸣浩,王国强  
(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:**研究了用于扩展目标成像的相位差异技术。该技术利用焦面和离焦面上的两幅图像之间的相位差异来估算波前相位畸变,同时对采集的图像进行恢复。设计了白光目标成像实验系统,用宽带白光作光源,在实验室搭建实验平台,模拟无穷远处目标和波前相位畸变。采用直角梯形分光棱镜将光路分为两个通道,在一台相机上同时采集两个通道像面上的图像,消除了相机不同产生的差异,极大地抑制了噪声对图像恢复的影响,分光后系统抗两个通道独立的高斯白噪声的能力为 10%。实验结果显示恢复后的图像分辨率提高了 19%,表明该技术是适合光电成像系统的图像恢复技术。

**关键词:**相位差异;波前畸变;图像恢复;相位估计

**中图分类号:**TP391.4;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1849

## Restoration of broadband white light image using phase diversity technique

WU Yuan-hao, WANG Bin, ZHAO Jin-yu, MING Ming, DONG Lei,  
YANG Qing-yun, WANG Ming-hao, WANG Guo-qiang

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

**Abstract:** The Phase Diversity (PD) technique used in wavefront detection was studied. The technique utilizes the PD between the two images on the focus and defocus to estimate the wavesfront phase aberration and to restore the degraded images. A white light imaging system was designed and a experimental platform which takes a broadband white light as a source was established, then the system above was used to simulate broadband white objects and wavefront phase aberrations in infinite distances. To grab the two images of different channels only by the same camera, a right angle trapezoid prism was designed to split the light beam into two channels, which eliminates the system deviation from different cameras and suppresses the effect of noises on the image restoration. After splitting, the denoising ability of the system for white Gaussian noise has reached 10%. Moreover the experiments also demonstrate that the resolution of the restored image has increased by 19% as compared with that of a original image. These results show that the proposed method is a good mean to restore degraded images in photoelectric image systems.

**Key words:** phase diversity; wavefront aberration; image restoration; phase estimation

收稿日期:2009-12-01;修订日期:2010-01-18.

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

## 1 引言

地基大口径望远镜的分辨率受到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<sup>[1-2]</sup>。相位差异(Phase Diversity, PD)技术利用光学系统焦面和离焦面上的两台相机采集波前畸变的图像,并利用数字图像处理的方法来解算波前相位畸变,从而得到较为清晰的恢复图像。其光学结构简单清晰,可以在随机扩展目标的作用下,实时解算波前畸变量。在具有已知目标的情况下,能够校正光学系统的误差和拼接镜的面形差异,恢复模糊图像等。因此,PD 技术是目前波前探测器发展的一个重要方向,其计算量大的缺点已随着硬件水平的不断提高逐渐得到改善,不再是制约该技术发展的瓶颈。

1979 年, Gonsalves 第一次提出相位差异技术<sup>[3]</sup>,利用焦面和离焦面上的两个 CCD 传感器采集的数字图像来解算波前相位的畸变量。不但简化了波前探测器的光路和复杂度,也使系统能够对扩展目标进行波前探测,摆脱了多数波前探测器对点目标的依赖。Paxman 及其同事经过多年钻研,将该理论进一步丰富,建立了更合理的理论结构<sup>[4-6]</sup>,在解算相位畸变量的同时,将采集的图像恢复到高分辨率水平<sup>[7]</sup>。给出了高斯噪声和泊松噪声情况下的数学模型,并引进贝叶斯理论,大大提高了此技术在噪声情况下的估计精度。目前,该理论已经成功应用于太阳观测<sup>[8-9]</sup>、卫星观测<sup>[10]</sup>以及水平方向的景物观测领域<sup>[11]</sup>,获得了高分辨率的观测图像。

本文在以上研究的基础上,采用一台高速 CCD 相机分别捕获成像系统焦面和离焦面上的两幅图像,利用两幅图像之间的相位差异,估算当前时刻的瞬时波前畸变量,并获得恢复后的清晰图像。本文简化了实验系统宽带白光的模型,利

用白光成像,恢复出较为清晰的图像,图像分辨率提高了 19%。

## 2 算法原理

高斯噪声模型的成像公式如式(1):

$$d(x) = f(x) * h(x) + n(x), \quad (1)$$

其中: $d(x)$ 表示相面上采集的目标图像, $f(x)$ 表示目标的理想图像, $h(x)$ 表示点扩散函数, $n(x)$ 表示加性噪声,这里采用高斯噪声模型。

用频域形式表示如式(2),其中大写字母是傅里叶变换后的频域表示:

$$D(u) = F(u)H(u) + N(u). \quad (2)$$

### 2.1 相位差异模型

相位差异技术采用两个通道分别对目标成像,两个通道之间存在某些已知的相位差异。通常选用易行的离焦量差异,将两个通道定义为焦面通道和离焦面通道。焦面通道的成像面在光学系统的焦面上,离焦面通道的成像面与光学系统的焦面之间产生一段已知光程,从而在相面上产生了相应的离焦量。

两个通道所成的图像由下面的公式表示,

$$D_{\text{infocus}}(u) = F(u)H_{\text{infocus}}(u) + N_{\text{infocus}}(u), \quad (3)$$

$$D_{\text{defocus}}(u) = F(u)H_{\text{defocus}}(u) + N_{\text{defocus}}(u). \quad (4)$$

由傅里叶光学,衍射受限光学系统的点扩散函数与光瞳函数有关,得到:

$$H(u) = P(u) \otimes P(u), \quad (5)$$

其中: $P(u)$ 表示光瞳函数, $\otimes$ 是自相关算符,

$$P(u) = A(u)e^{i(\phi(u) + \theta(u))}, \quad (6)$$

其中: $A(u)$ 是光瞳振幅函数, $\phi(u)$ 是未知像差, $\theta(u)$ 是系统已知像差,包括两个通道的离焦量和某些系统像差等。 $\phi(u)$ 可以分解成泽尼克多项式的和:

$$\phi = \sum_m^M \alpha_m Z_m. \quad (7)$$

其中: $\alpha_m$ 表示第  $m$  项泽尼克系数, $Z_m$ 是第  $m$  项的泽尼克基底。

由此,只要求出泽尼克多项式的系数,就可以求得未知像差,从而得到光学系统的点扩散函数。

用点扩散函数恢复采集到的模糊图像,就可以获得目标的清晰图像,克服系统像差的影响。

在高斯噪声模型下,目标与两个通道成像的均方差可以用作似然函数:

$$L(u, \alpha) = \sum_u (|D_{\text{infocus}}(u) - F(u)H_{\text{infocus}}(u, \alpha)|^2 + |D_{\text{defocus}}(u) - F(u)_{\text{defocus}}(u, \alpha)|^2), \quad (8)$$

应用最大似然估计,得到与真实目标无关的目标函数:

$$L_M(u, \alpha) = - \sum_u \frac{|D_{\text{infocus}}(u)H_{\text{defocus}}^*(u, \alpha) - D_{\text{defocus}}(u)H_{\text{infocus}}^*(u, \alpha)|^2}{|H_{\text{infocus}}(u, \alpha)|^2 + |H_{\text{defocus}}(u, \alpha)|^2}. \quad (9)$$

用最优估计的方法迭代寻找使目标函数最小的泽尼克系数,同时也可以得出恢复后的图像。

### 2.2 噪声影响

两个成像通道各自的噪声同样也会对系统产生一定的影响。在前期的模拟仿真中,对此模型的理想焦面图像和离焦图像加入高斯噪声,当噪声方差小于 10% 的时候,仍然可以得到正确结果,说明只要将两个通道的高斯噪声各自抑制在 10% 以下,系统就可以正常工作。

### 2.3 宽带白光模型的假设简化

假设目标成像函数可以分解成相位响应和光谱响应两个相互独立的函数的乘积形式:

$$f(x, a, \lambda) \approx f_A(x, a) f_\Lambda(x, \lambda), \quad (10)$$

其中:  $f_A(x, a)$  是系统的相位响应函数,  $f_\Lambda(x, \lambda)$  是系统的光谱响应函数。

则成像函数可以表示为:

$$d(\alpha, x) = \int_x f_\Lambda(\alpha, x') \bar{h}(\alpha, x' - x) dx', \quad (11)$$

其中:  $\bar{h}(\alpha, x)$  表示宽带白光的点扩散函数,

$$\bar{h}(\alpha, x) = \int_\lambda f_\Lambda(\lambda) h(\alpha, x, \lambda) r(\lambda) d\lambda. \quad (12)$$

对于反射系统或采用双胶合透镜的简单折射系统,色差可以忽略不计,因此  $f_\Lambda(x, \lambda)$  可以作为常数处理,  $r(\lambda)$  由相机的响应函数给出,如图 1 所示。

因此,宽带白光点扩散函数可以简化为:

$$\bar{h}(\alpha, x) \approx \tau \int_\lambda h(\alpha, x, \lambda) r(\lambda) d\lambda. \quad (13)$$

其中  $\tau$  为常量。由此,基于以上假设的宽带白光点扩散函数可以简化成只与相机的响应曲线

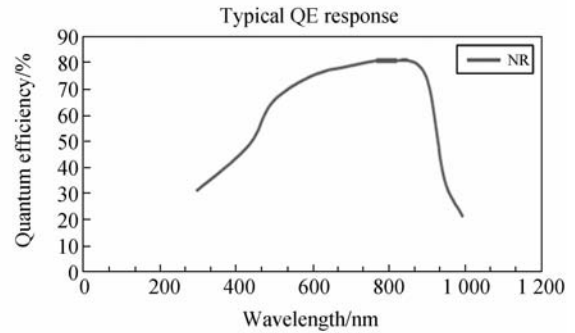


图 1 相机量子效率

Fig. 1 Quantum efficiency of camera

有关的函数。

### 3 实验系统组成

实验系统(图 2)对无穷远处的扩展目标成像,并模拟传输过程中的扰动。采用一个相机对焦面和离焦面两个通道同时成像,利用相机采集的图像解算波前畸变,同时对图像进行恢复。实验系统由目标模拟、扰动模拟和相位差异成像 3 个部分组成,实验平台如图 3 所示。

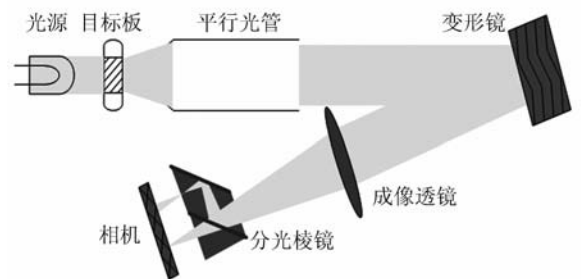


图 2 相位差异成像组成

Fig. 2 Formation of phase diversity imaging

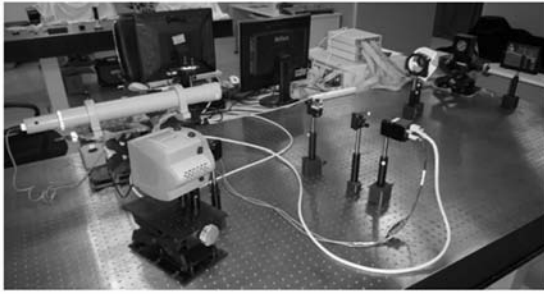


图 3 实验布局

Fig. 3 Experimental layout

目标模拟采用由白炽灯和毛玻璃组成的光源、目标板和平行光管组成,模拟无穷远处的扩展目标。目标板采用 2 号分辨率板。如图 4 所示。

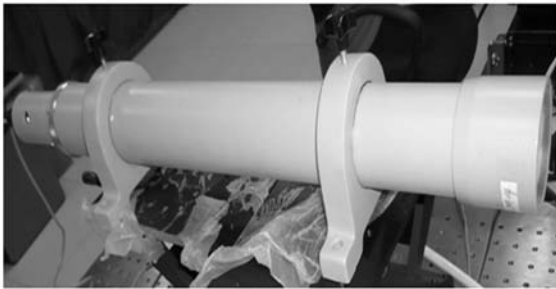


图 4 光源部分

Fig. 4 Light source

扰动模拟部分采用变形镜,如图 5。成像部分由双胶合凸透镜,分光棱镜和相机组成,其中直角梯形分光棱镜将光路分为焦面和离焦面两个通道,并由棱镜厚度产生两个通道的光程差,从而形成了离焦面的离焦量。采用同一个相机同时对两个通道成像,消除了不同通道之间由相机不同而产生的差异,较好地抑制了噪声干扰。凸透镜的直径为 29mm,焦距为 1000mm。直角梯形分光

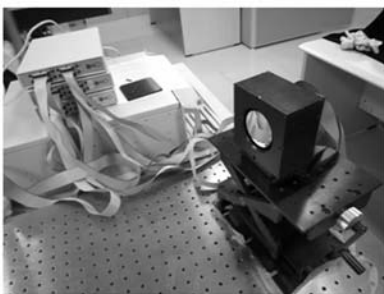


图 5 变形镜

Fig. 5 Deformable-mirror

镜各直角边长度均为 10 mm,胶合面为半反半透面,外斜面为全反射面。如图 6 所示。

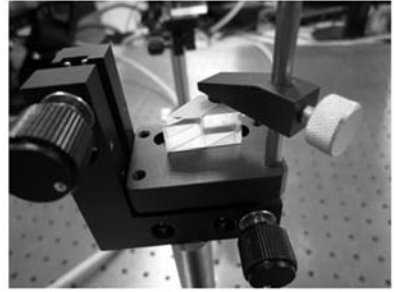
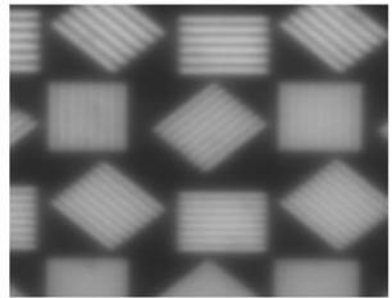


图 6 直角梯形分光棱镜

Fig. 6 Right angle trapezoid prism

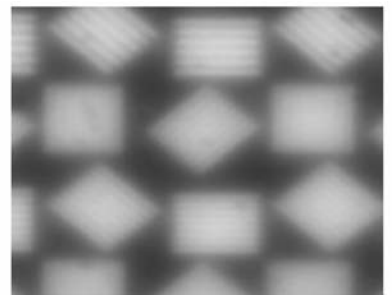
## 4 实验结果

相机采集了 16 位黑白图像,焦面和离焦面两个通道的图像分别成像在相机的左右半面上。将实验采集的焦面图像和离焦图像分别取目标同一位置  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$  大小的区域,如图 7 (a)、(b)所示,子图选取的是分辨率板的第 12 组及其附近的图像,用联合估计的方法对图中的两幅图像进行波前畸变估计,并得到恢复后图像,如图 7(c)所示,恢复后,可以清晰地分辨图上分辨率板第 3 行以上的条纹。



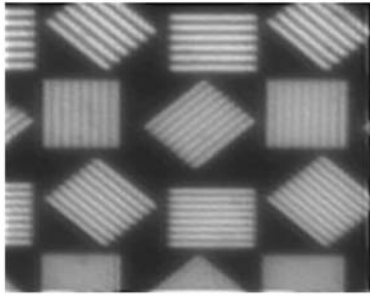
(a) 焦面子图像

(a) Focus sub-image



(b) 离焦面子图像

(b) Defocus sub-image

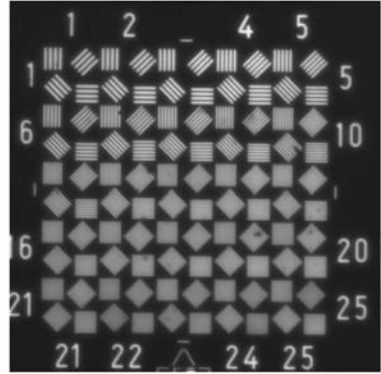


(c) 重建图像

(c) Reconstructed image

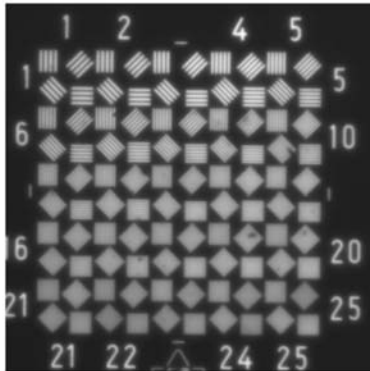
图 7 实验采集的图像及恢复结果

Fig. 7 Original images and result



(b) 恢复后的焦面图像

(b) Reconstructed image in focus plane



(a) 整个焦面图像

(a) Total image in focus plane

用计算得到的点扩散函数恢复原始分辨率板图像(焦面通道的图像),得到了更高分辨率的清晰图像。采用了维纳滤波的方法,判断了分辨率板的清晰度,分辨率平均提高了 3 组左右。经过专家肉眼辨认,图像的分辨率由第 7 组,35.4 lp/mm 增加到第 10 组,42 lp/mm,分辨率增加了 19%。恢复前和恢复后的图像如图 8 所示。

## 5 结 论

本文合理简化了反射系统与简单折射系统的宽带白光点扩散函数模型,并用宽带白光作光源,在实验室搭建了实验平台,实现了白光相位差异技术的图像采集和图像恢复。利用直角梯形分光棱镜分光并产生离焦量,在一台相机上同时采集两个通道的图像,有效地降低了不同相机的差别对系统造成的影响。实验恢复后的图像在视觉上有很大改观,分辨率提高了 19%。本文用相位差异技术实现了图像恢复,但并未对采集图像进行实时恢复,今后的实验中将引入高速处理器,以求大幅提高图像恢复的运算速度。

## 参考文献:

- [1] 李宏壮,林旭东,刘欣悦,等. 400 mm 薄镜面主动光学实验系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2076-2083.  
LI H ZH, LIN X D, LIU X Y, *et al.*. Experiment system of 400 mm thin-mirror active optics[J]. *Opt. Precision Eng.* 2009, 17(9): 2076-2083. (in Chinese)
- [2] 明名,王建立,张景旭,等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1):104-108.

- MING M, WANG J L, ZHANG J X, *et al.*. Error budget and analysis for optical system in large telescope[J]. 2009, 17(1):104-108. (in Chinese)
- [3] GONSALVES R A, CHILDLAW R. Wave-front sensing by phase retrieval[C]. *Applications of Digital Image Processing III*, 1979, 207:32-39.
- [4] SELDIN J H, PAXMAN R G, CARRARA D A. Deconvolution of narrow-band solar images using aberrations estimated from phase-diverse imagery [C]. *SPIE*, 1999, 3815:155-163.
- [5] PAXMAN R G, SCHULZ T J, FIENUP J R. Joint estimation of object and aberrations by using phase

- diversity[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1992, A9:1072-1085.
- [6] PAXMAN R G, SELDIN J H. Fine-resolution astronomical imaging with phase-diversity speckle [J]. *SPIE*, 1993, 2029:287-298.
- [7] PAXMAN R G, SELDIN J H, KELLER C U. Phase-diversity data sets and processing strategies [C]. *High Resolution Solar Physics: Theory, Observations, and Techniques*, 1999, 13:311-329.
- [8] WARMUTH M W, PARKER S W, WILSON A J, *et al.*. Operation of phase diverse adaptive-optics with extended scenes [J]. *SPIE*, 2008, 7093, 709307:1-11.
- [9] PAXMAN R G, SELDIN J H, LOFDAHL M G, *et al.*. Evaluation of phase-diversity techniques for solar-image restoration [J]. *Astrophysical Journal*, 1996, 467:1087-1099.
- [10] SELDIN J H, REILEY M F, PAXMAN R G. Space-object identification using phase-diverse speckle[J]. *SPIE*, 1997, 3170:0277-786X.
- [11] SMITH M W. Simulated performance of an optical system that uses deconvolution of multiple, phase diverse, aberrated images[J]. *Novel Optical Systems Design and Optimization VI*, 2003, 5174: 60-68.

### 作者简介:



**吴元昊**(1977—),男,吉林长春人,助理研究员,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



**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



**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、电控总体等方面的研究。E-mail: zhaoyj@ciomp.ac.cn



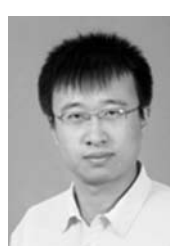
**明 名**(1983—),男,湖南临澧人,助理研究员,2007年于大连理工大学获得硕士学位,主要从事光学设计、光学检测、大口径光学系统等方面的研究。E-mail: mingm1118@yahoo.com.cn



**董 磊**(1982—),男,山东济宁人,2004年、2007年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为激光物理与技术和傅里叶光学。E-mail: nodepression@126.com



**杨轻云**(1977—),男,湖南邵阳人,副研究员,2006年于吉林大学获得博士学位,主要从事图像处理、人工智能等方面的研究。qqyang\_jlu@yahoo.com.cn



**王鸣浩**(1981—),男,吉林长春人,助理研究员,2010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,主要从事地基大口径望远镜图像处理方面的研究。E-mail: Wpaul007@163.com



**王国强**(1975—),男,吉林长春人,2009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,主要从事空间目标光学特性分析及空间目标探测与识别技术的研究。E-mail: wang-gq19751110@126.com