

非相干数字全息自适应光学波前校正特性研究

郭小乐¹ 万玉红¹ 满天龙¹ 刘增华²

(¹北京工业大学应用数理学院, 微纳信息光子技术研究所, 北京 100124)
(²北京工业大学机械工程及应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要 非相干数字全息自适应光学是一种新型的自适应波前探测和校正的技术。它利用全息图可以完整记录光波场的特性进行波前探测, 结合适当的数值再现算法对光波前像差进行校正。基于菲涅耳非相干相关数字全息术 (FINCH), 从理论上阐明了非相干数字全息自适应的基本原理, 并给出了数值仿真结果。采用改进的迈克耳孙干涉仪光路配置, 分别记录待观测物体与引导星的全息图, 利用引导星全息图的复共轭对待测物光波进行波前校正, 从实验上定量地研究了引导星尺寸、选取位置对波前校正效果的影响, 在系统各光学元件给定的情形下, 明确了引导星选择的空间和系统等晕区范围, 实现了良好的波前校正效果。

关键词 全息; 非相干数字全息; 自适应光学; 波前探测; 波前校正

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1109004

Correction Characteristics of Wavefront Aberration in Incoherent Digital Holographic Adaptive Optics

Guo Xiaole¹ Wan Yuhong¹ Man Tianlong¹ Liu Zenghua²

¹*Institute of Information Photonics Technology, College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

²*College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Abstract Incoherent digital holographic adaptive optics is a new technology of wavefront sensing and correction. Combined with appropriate numerical algorithm, wavefront sensing and compensation can be achieved by the wavefront recording and reconstruction ability of the holography. Based on the basic principle of the Fresnel incoherent correlation holography (FINCH), the incoherent digital holographic adaptive optics is investigated through theoretical analysis and simulations. Holograms of the guide star and the distorted object are recorded respectively using a modified Michelson interferometer. Aberrations in the distorted hologram can be compensated digitally by using the complex conjugate of the guide star hologram. The effect of the size and position of the guide star on the wavefront compensation are investigated quantitatively through experiments. The aberrations can be well compensated by the guide star chosen from a suitable area which is measured by the parameters of system. Furthermore, the isoplanatic region of the system is demonstrated.

Key words holography; incoherent digital holography; adaptive optics; wavefront sensing; wavefront correction

OCIS codes 090.1995; 090.1000; 100.3175

1 引言

全息术^[1]提出之初被设想为一种相干成像技

术,要有一个合适的相干参考光波与一个被物体衍射或者散射的光波干涉才能记录全息图,或者说只

收稿日期: 2014-04-18; 收到修改稿日期: 2014-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(61107002)、北京工业基础研究基金(X4006111201301)

作者简介: 郭小乐(1990—),女,硕士研究生,主要从事非相干数字全息术及其应用方面的研究。

E-mail: guoxiaole@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 万玉红(1976—),女,博士,副教授,主要从事数字全息与三维成像、体全息技术及其应用等方面的研究。

E-mail: yhongw@bjut.edu.cn(通信联系人)

有在相干光照明,来源于任意两物点的光是空间互相干的情形下,才能记录物体的全息图。随着全息术的发展,人们发现不只是在相干光照明的条件下可以产生全息图,采用空间非相干光照明同样也可以用于全息图的记录^[2]。非相干全息术相较于传统的全息术有很多优点,它降低了对光源相干性的要求,在非相干光照明的条件下实现了全息记录,将全息术的应用范围从相干光扩展到了白光、荧光等非相干光领域^[3-7]。非相干数字全息术结合了数值再现算法^[8-9]的优势,使得全息图的重建过程更加灵活。目前,非相干数字全息术已经在自适应光学^[10-12],生物荧光成像^[13-14]等领域展现了其应用潜力。

非相干全息术的基本原理可以解释为非相干物体上的同一物点发出的光波被分束后是空间自相干的,能够相互干涉形成点源全息图,所有点源全息图的非相干叠加就构成了物体的全息图。在计算机中可模拟光波照明全息图进行菲涅耳衍射^[15],使物体三维位置信息得以重建。适当的分波技巧是实现空间非相干光照明情形下全息图记录的关键。Rosen等^[16]提出了基于空间光调制器衍射分波的非涅耳非相干相关数字全息术(FINCH),实现了共路同轴的非相干数字全息图的记录。这一技术的提出拓展了全息术新的应用领域。Kim等^[10-12]将FINCH技术应用于自适应光学,提出了一种采用非相干同轴相移数字全息的自适应光学波前检测和波前校正技术。非相干数字全息自适应光学(IDHAO)技术相比于传统的自适应光学^[17]技术具有全场测量、测量动态范围大、光路配置简单和成本较低等优势,并且采用数值算法校正相比传统自适应技术中机械校正更加灵活。目前关于非相干数字全息自适应光学的研究工作主要集中于定性分析系统畸变的类型和强度以及噪声等因素对图像的校正效果。但该技术用于天文成像中还需考虑很多因素,例如成像分辨率、灵敏度、引导星选取的范围、系统的等晕或非等晕性以及运行速度等。

自适应光学系统有很大的技术挑战,引导星的选取和系统等晕性的问题就是其中之一^[18]。在目前的天文自适应光学系统中,可以采用自然目标,也可以采用激光引导星进行波前探测。以激光引导星为例,由于激光引导星与目标星体之间存在高度差和角度差,进而在波前探测中引入了非等晕性误差,该误差是一个偏离角度 α 和引导星高度 h 的函数,在没有高度差或者引导星较高的情况下,角度偏离

增大,则非等晕性误差增大^[19]。本文基于FINCH原理,结合同轴相移技术^[20],研究了非相干数字全息自适应光学中引导星尺寸、引导星与待测物体的相对位置等关键因素对系统波前校正效果的影响。定量考察了引导星在物平面内不同位置选取时波前校正的效果,从而明确了非相干数字全息自适应光学系统中的等晕区。

2 理论基础

非相干数字全息自适应光学技术即为分别记录待测物体与引导星的全息图,利用引导星全息图的复共轭对待测物光波进行恢复,完成波前校正和重建过程。实验原理如图1所示,物体上一点发出的球面波经由分束器(BS)被分成两路等强度的光波,一路光波经曲率为 f 的凹面镜反射后与经过空间光调制器(SLM)反射以后的光波相干涉,形成点源全息图。扩展型物体的全息图为所有点源全息图的非相干叠加。

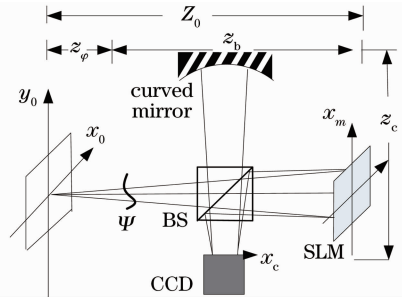


图1 非相干数字全息自适应光学原理示意图
Fig. 1 Scheme of incoherent digital holographic adaptive optics

在非相干数字全息记录过程中,物体上任一点发出的光波是空间自相干的,任意两点发出的光波是互不相干的。设物体的强度分布为 $u(x_0, y_0)$,系统引入位相畸变(作为系统像差) $\Psi(x_\Psi, y_\Psi)$,则扩展型物体的全息图 $I_\Psi(x_c, y_c)$ 为^[11]

$$I_\Psi(x_c, y_c) = \iint u(x_0, y_0) D_\Psi(x_c - x_0, y_c - y_0) dx_0 dy_0 = u(x_c, y_c) * D_\Psi(x_c, y_c), \quad (1)$$

式中符号 $*$ 表示二维卷积, $D_\Psi(x_c, y_c)$ 为含有位相畸变的点源全息图,其强度表示为^[11]

$$D_\Psi(x_c, y_c) = |u_A(x_c, y_c) + u_B(x_c, y_c)|^2, \quad (2)$$

式中 $u_A(x_c, y_c)$, $u_B(x_c, y_c)$ 分别为CCD接收到的经凹面镜和SLM反射的光波复振幅分布,也是来源于同一物点的物光波和参考光波。在全息图记录过程中结合四步相移^[20]技术,以抑制再现像中零级

项和共轭像对原始物信息的干扰。相移角为 θ_i ($i = 1, 2, 3, 4$), I_{Ψ_i} 代表记录的第 i 个带有相移角 θ_i 的全息图, 则扩展型物体复值全息图 $H_{F\Psi}(x_c, y_c)$ 为^[20]

$$H_{F\Psi}(x_c, y_c) = \frac{1}{4}[(I_{\Psi_1} - I_{\Psi_3}) - j(I_{\Psi_2} - I_{\Psi_4})], \quad (3)$$

函数 $H_{F\Psi}(x_c, y_c)$ 中包含了光路系统中引入的畸变相位, $D_0(x_c, y_c)$ 为理想衍射传播的点扩展函数。不考虑成像系统中引入畸变的影响, 对复值全息图 $H_{F\Psi}(x_c, y_c)$ 重建, 恢复的物光场为

$$\begin{aligned} u_t(x_c, y_c) &= H_{F\Psi}(x_c, y_c) * D_0^*(x_c, y_c) = \\ &= u(x_c, y_c) * D_{F\Psi}(x_c, y_c) * D_0^*(x_c, y_c) = \\ &= u(x_c, y_c) * [D_{F\Psi}(x_c, y_c) * D_0^*(x_c, y_c)], \quad (4) \end{aligned}$$

若使用实验测量的含有畸变位相的点源复值全息图 $D_{F\Psi}(x_c, y_c)$ 的复共轭 $D_{F\Psi}^*(x_c, y_c)$ 对物体全息图进行数值再现, 恢复的物光场为

$$\begin{aligned} u_r(x_c, y_c) &= \\ &= u(x_c, y_c) * [D_{F\Psi}(x_c, y_c) * D_{F\Psi}^*(x_c, y_c)] = \\ &= u(x_c, y_c) * [D_{F\Psi}(x_c, y_c) \otimes D_{F\Psi}(x_c, y_c)] \approx \\ &= u(x_c, y_c) * \delta(x_c, y_c) = \\ &= u(x_c, y_c), \quad (5) \end{aligned}$$

式中符号 \otimes 表示相关运算, (5) 式与 (4) 式对比可以得出, 采用实验测量的引导星全息图的复共轭卷积物体全息图进行数值重建时, 再现像强度分布近似等于物平面强度分布, 结果去除了畸变的干扰。

在研究的非相干数字全息自适应光学技术中, 如果引导星的选取在系统的等晕区内任一位置, 设引导星位于物平面 (a, b) 处, 则此时波前探测获得的引导星全息图只是中心位置发生相应改变, 记为 $D_{F\Psi}(x_c - a, y_c - b)$, 利用该引导星对获得的物体全息图进行校正再现, 恢复的物光场为

$$\begin{aligned} u_p(x_c, y_c) &= \\ &= u(x_c, y_c) * [D_{F\Psi}(x_c, y_c) * D_{F\Psi}^*(x_c - a, y_c - b)] = \\ &= u(x_c, y_c) * [D_{F\Psi}(x_c, y_c) \otimes D_{F\Psi}(x_c - a, y_c - b)] \approx \\ &= u(x_c, y_c) * \delta(x_c - a, y_c - b) = \\ &= u(x_c - a, y_c - b), \quad (6) \end{aligned}$$

从上述分析可以看出, 如果要想实现良好的波前校正, 波前探测过程中引导星的选取是关键因素。实验过程中为了获取实际的点扩展函数, 通常采用直径较小的针孔或发光二极管(LED)等自发光物体作为点源, 即自适应波前探测中的引导星。且(5)式中点源全息图自相关近似等于 δ 函数, 这对引导星的尺寸提出了要求, 引导星的直径应足够小。但同时

要考虑探测器件的灵敏度, 保证有足够的光强能被探测, 所以需要对引导星的尺寸进行优选。

3 数值仿真和实验验证

由理论分析得出, 探测波前位相畸变的引导星直径越小, 校正结果越接近理论值, 并且为了满足成像系统的线性空不变特性, 引导星需在系统轴上等晕区内选取。为了探究不同位置引导星对畸变的校正效果, 首先通过数值仿真来分析, 在给定像差情形下, 系统的等晕成像情形。这里以光轴上引导星再现像与偏离原点位置引导星的再现像相关度的大小来评价系统成像的等晕性。数值仿真过程物平面尺寸为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$, 像素数为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 使用的照明光源中心波长为 633 nm , 采用泽尼克多项式来产生波前位相畸变, 将该位相畸变置于 BS 前, 点源发出的光波透过该位相畸变传播后, 经 BS 后分为两束光波, 一束光波的 SLM 反射, 并附加一定的相移量, 另一束经曲率为 100 mm 的凹面镜反射, 两束反射光经 BS 合束后相干涉, 衍射传播 230 mm 后得到含有畸变的菲涅耳点源全息图。沿与 y 轴 45° 夹角方向(输入平面对角线方向)由边缘向中心逐点移动引导星的位置, 直至物平面原点。计算原点位置引导星与该位置处引导星再现像相关系数, 结果如图 2 所示, 图 2 中横轴表示引导星与原点的距离。纵轴为两引导星再现像相关系数。由图 2 可以看出, 当引导星偏离原点越远, 其再现像与原点引导星再现像相关系数值越小, 该点在波前探测中由于偏离中心而引入的探测误差及波前校正误差也会增大。

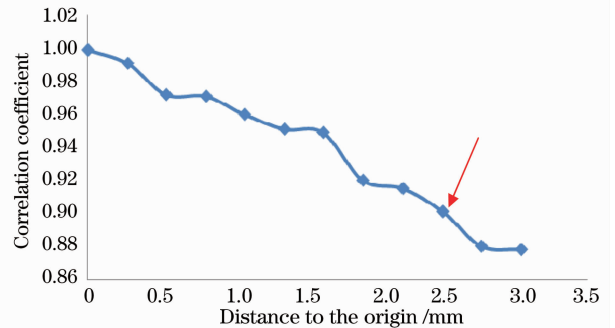


图 2 原点位置引导星再现像与沿对角线平移后引导星再现像相关系数曲线

Fig. 2 Correlation coefficient curve of the guide star images which are in the center and in the diagonal

图 3 给出了在二阶泽尼克多项式为畸变位相下的数值仿真实验结果。其中图 3(a)为标准分辨率板, 图 3(b)由二阶泽尼克多项式 $Z_2^2 = r^2 \sin(2\theta)$ 生成的位相畸变, 该畸变模式的物理含义为像散, 图 3(c)为模

拟生成的系统畸变后的点源复值全息图,图 3(d)为分辨率板复值全息图,图 3(e)为对图 3(d)进行菲涅耳衍射传播得到的物体再现像,即未经像差校正的物体再现像,图 3(f)为位于原点位置的引导星对分辨率板全息图进行波前校正获得的再现像,图 3(g)为距离原点 2.5 mm 处引导星全息图,该点在图 2 中被红色箭头标记,从图 2 中看出该位置与原点位置引导星再现像相关系数为 0.901,图 3(h)为该位置引导星对分辨率板校正结果。将图 3(h)与图 3(f)对比可以明显看出,再现像中数字已不能清晰分辨,分辨率板再现像的质量有了明显下降。结合图 2 和

图 3 可以看出,随着引导星与物面原点之间距离的增加,引导星在波前探测中的误差不断增加,波前畸变校正的效果会有影响,因此使用该技术时,应该保证引导星在原点位置一定区域内选取,这一点同传统自适应光学中引导星与物体之间的角度差应该小于等晕角的情形相一致,这里定义该区域为系统的等晕区。该等晕区的大小与仿真中使用的透镜焦距和 CCD 记录距离有关,数值仿真结果中可以看出,在引导星移动到距离中心 2.5 mm 的位置(图 2 中红色箭头标记处)时,物体校正后的再现像质量下降严重,因此确定 5 mm×5 mm 范围为模拟中的等晕区。

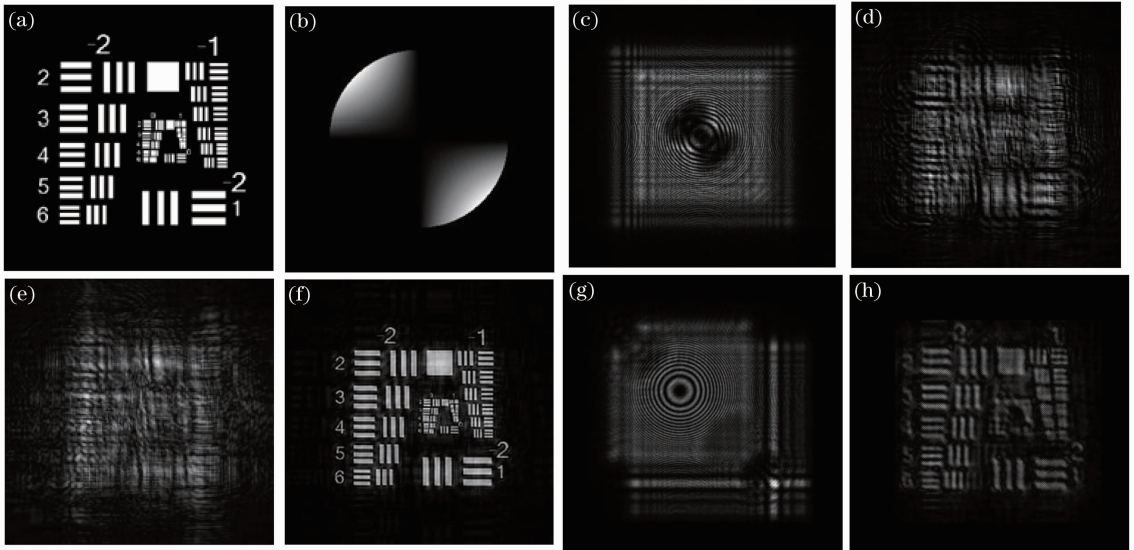


图 3 非相干数字全息自适应光学系统中引导星位置选择对波前像差校正效果。(a)物体;(b)附加像差;(c)原点位置含有像差的点源复值全息图;(d)含有像差的分辨率板复值全息图;(e)未校正像差的再现像;(f)轴原点位置引导星对像差校正后再现像;(g)距离原点 2.5mm 处引导星全息图;(h)为(g)图引导星对像差校正的结果

Fig. 3 Simulation results of wavefront correction effect with the different positions of the guide star in the IDHAO system. (a) Original object; (b) additional aberration; (c) complex-value hologram with aberration of the guide star in the center location; (d) the complex-value hologram with aberration of the object; (e) reconstructed image without aberration compensation; (f) reconstructed image aberration compensation when guide star in the center; (g) guide star hologram with a distance of 2.5 mm to the origin; (h) reconstructed image aberration compensation by the guide star hologram of (g)

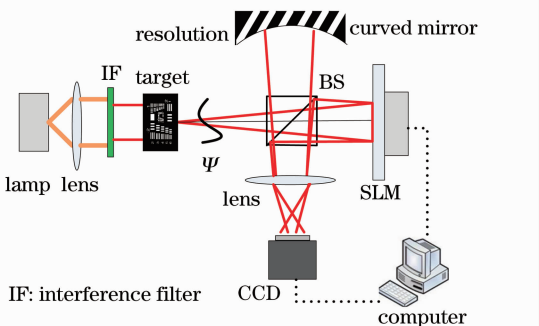


图 4 实验光路示意图

Fig. 4 Optical set-up of the experiments

在实验室中搭建了同轴相移的非相干数字全息自适应光路进行实验验证。高压电弧灯发出的白光作为系统光源,经过焦距为 150 mm 的准直透镜准直后经过中心波长为 633 nm,带宽为 10 nm 的干涉滤光片(IF)后变为单色光,采用改进的迈克耳孙干涉光路,实验中使用的位相型畸变物为倾斜放置且中心偏离光轴的大焦距透镜。物光波衍射传播经位相畸变引入的像差后,波前形貌发生改变,光波位相附加一个函数形式未知的位相因子,经过 BS 后被等强度的分为两束,其中一束被曲率为 100 mm 的凹面镜反射,另一束被位相型空间光调制器反射,

两束光经过 BS 合束后,再经过成像透镜最终到达 CCD。实验光路如图 4 所示。

图中 SLM 作为相移器,通过改变加载在其上的灰度图改变该路的位相达到相移的目的,采用四步相移技术,四幅全息图加载相移角分别为 $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi/2$, $\theta_3 = \pi$, $\theta_4 = 3\pi/2$ 。理论分析中的点源为空间无限小的点,但在实验中使用的点源都具有一定空间尺寸。在光场强度达到 CCD 灵敏度的情况下,孔径尺寸越小,待测物体的校正效果越理想。为了验证引导星的尺寸大小对校正效果的影响,分别

采用准单色光照明的直径为 50、100 以及 250 μm 的针孔作为引导星进行畸变波前探测,该引导星放置与物体同一平面内。实验结果如图 5 所示,50 μm 的引导星对待测物体的成像校正效果良好,孔径尺寸增大到 100 μm 时,对畸变的校正效果明显下降,引导星尺寸增加到 250 μm 时,对位相畸变已起不到校正效果。因此,在非相干数字全息自适应光学系统中,当引导星直径过大时,参与物体全息图再现的引导星不能起到畸变校正的作用。

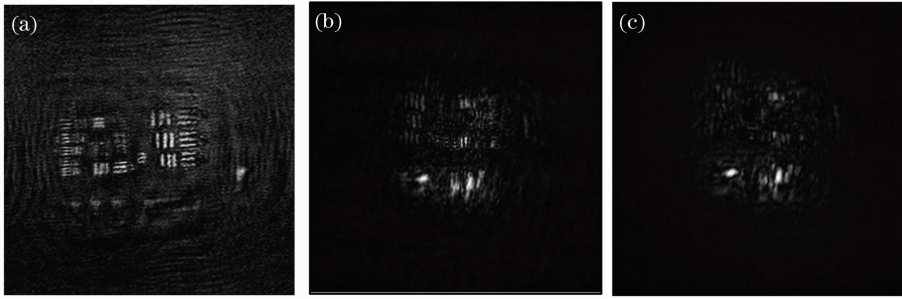


图 5 非相干数字全息自适应光学系统中引导星尺寸对波前校正效果的影响。(a)直径 50 μm 引导星波前校正再现结果;
(b)直径 100 μm 引导星波前校正再现结果;(c)直径 250 μm 引导星波前校正再现结果

Fig. 5 Experimental results of wavefront correction depends on the size of guide star in the IDHAO system. the corrected image by the guide star with diameter of (a) 50 μm , (b) 100 μm , (c) 250 μm

对引导星尺寸优选之后,进一步的实验主要研究引导星选取位置对波前校正效果的影响。在理论分析部分已经提到,传统天文成像自适应光学补偿过程,引导星与被观测遥远星体和星系之间的夹角应小于等于该系统的等晕角,即来自引导星的参考光波面需在待测星体的等晕角内,否则由于引导星的非等晕性引入的波面误差还需多重引导星等技术去除。使用改进的迈克耳孙干涉仪,实验中首先需要考虑全息图记录问题,在满足点源全息图能够被 CCD 记录的条件,研究该区域边缘位置引导星对全息图的再现结果。为了能够获取引导星全息图,物平面能够产生全息图的区域大小与系统光路配置有关,如非相干光源的时间相干长度等。为了研究物平面中心和边缘位置引导星对全场范围内物信息的校正效果,实验中采用 5 个针孔作为输入物体,5 孔呈十字交叉分布,中心孔径位于光轴上,其他 4 个孔分别位于 x_0 轴、 y_0 轴 ± 2.5 mm 处,该四个针孔位于实验系统物平面获得引导星全息图的临界位置,在此区域外的照明位置放置引导星在 CCD 上不能获得该点的全息图。在 BS 前加入倾斜且中心偏离主光轴的透镜作为系统引入的位相畸变,该位相畸变主要为彗差和球差,将物平面中心位置针

孔作为系统引导星进行畸变校正,分别记录物体和引导星全息图,实验结果如图 6 所示,图 6(a)为含有畸变的物体全息图,图 6(b)为未校正畸变的物体再现像,图 6(c)采用物平面中心位置针孔作为系统引导星获得的波前畸变校正后的再现像,改变引导星的位置,将分别位于 x_0 轴、 y_0 轴上偏离原点位置针孔作为系统引导星进行畸变校正,实验结果如图 6(d)、(e)所示,图 6(d)、(e)分别为 x_0 、 y_0 轴上 2.5 mm 处引导星对物平面的恢复结果,图 6(f)为图 6(c)、(d)、(e)红框中针孔的半峰全宽示意图,红、绿、蓝三条曲线分别对应引导星位于中心位置、 x_0 轴 2.5 mm 位置及 y_0 轴上 2.5 mm 位置的再现结果,从图 6(f)可以看出,在物平面能够获取引导星全息图的范围内,不同位置的引导星进行畸变校正时,物体均能被良好校正,且引导星距离物体中心位置较远时与采用中心位置时恢复出的图像信号相比较,强度损失为 20%~35%。

由理论分析可知,传统自适应光学系统中所选择的引导星应在遥远的待测星体的等晕角内,由于探测平面距离成像系统非常遥远,因此等晕角往往很小。对于非相干数字全息自适应光学系统,则要求引导星在物平面能够产生全息图的区间内,经测量,在本文

实验光路配置下,物平面约 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 区域内,均能获得引导星全息图,并且从实验结果可以看出临界

位置引导星对物体校正效果在可接受范围内,因此确定该区域为实验中引导星选取的等晕区。

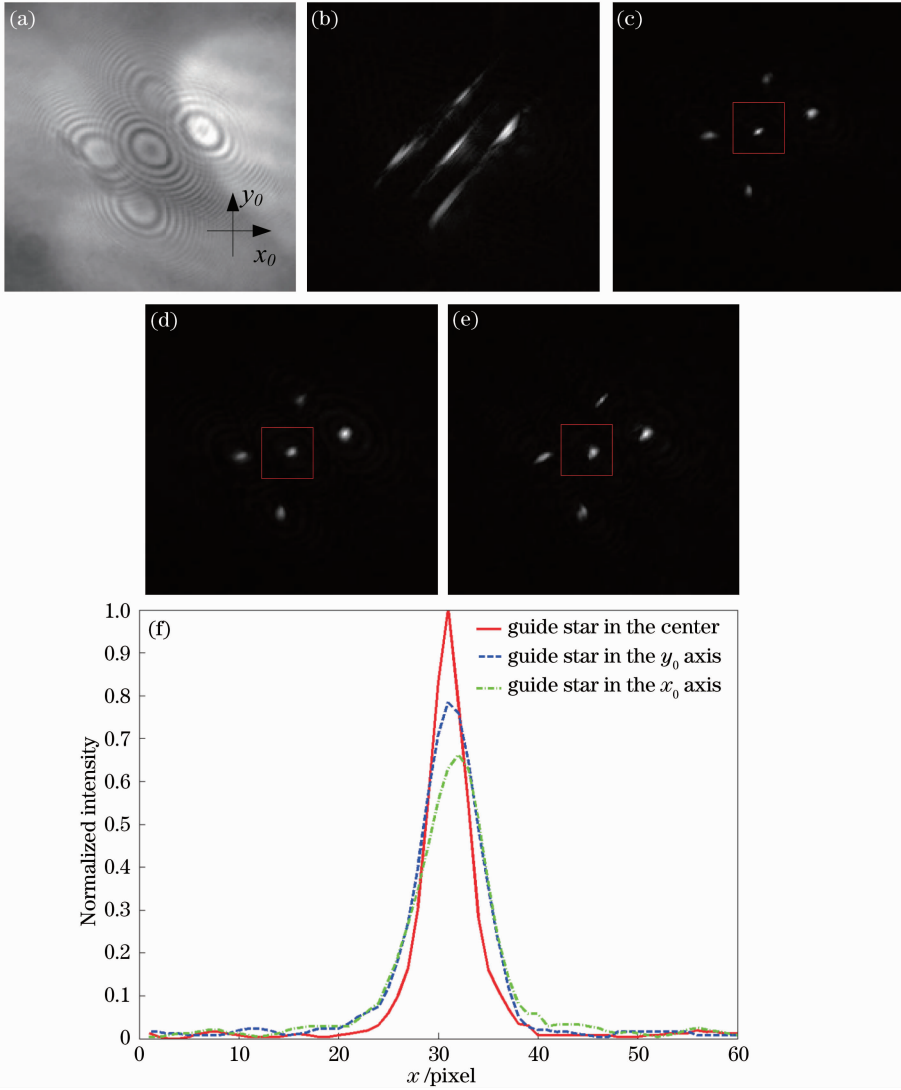


图 6 非相干数字全息自适应光学系统中引导星位置对波前校正效果的影响。(a)畸变的相移全息图;(b)未校正畸变的再现像;(c)中心位置引导星畸变校正再现像;(d) x_0 轴 2.5 mm 处引导星畸变校正再现像;(e) y_0 轴 2.5 mm 处引导星畸变校正再现像;(f)图(c)、(d)、(e)中心位置针孔半峰全宽图

Fig. 6 Experimental results of dependence of wavefront correction on the position of guide star in the IDHAO system. (a) One of the raw holograms with aberration; (b) uncorrected image; corrected image by the guide star (c) in the center, (d) in the x_0 axis 2.5 mm; (e) in the y_0 axis 2.5 mm; (f) the full width at half maximum of the center pinhole in Fig. 6(b)、(c) and (d)

4 结 论

验证了非相干数字全息自适应光学技术利用全息图探测和重建校正光路中的静态位相畸变的可行性,通过计算机数值仿真和实验定量研究了引导星的位置、尺寸两个关键因素在波前探测中对校正效果的影响,并且获得了在当前实验光路配置下的系统等晕区范围。该波前校正的方法结合了非相干数字全息技术高分辨率成像、畸变测量动态范围大的

优点。引导星关键问题的研究对于非相干数字全息自适应光学技术的进一步发展具有较高的借鉴价值。该项技术未来的研究方向包含将现有的开环静态反馈整合为闭环动态实时校正,这将对天文成像领域及眼底视网膜成像等领域的自适应校正系统有较大的应用价值。

参 考 文 献

- 1 D Gabor. A new microscopic principle [J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- 2 A W Lohmann. Wavefront reconstruction for incoherent objects [J]. *J Opt Soc Am*, 1965, 55(11): 1555-1556.
- 3 G Cochran. New method of making Fresnel transforms with incoherent light[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(11): 1513-1517.
- 4 T C Poon, A Korpel. Optical transfer function of an acousto-optic heterodyning image processor[J]. *Opt Lett*, 1979, 4(10): 317-319.
- 5 N T Shaked, J Rosen. Multiple-viewpoint projection holograms synthesized by spatially incoherent correlation with broadband functions[J]. *J Opt Soc Am A*, 2008, 25(8): 2129-2138.
- 6 Wan Yuhong, Man Tianlong, Tao Shiquan. Imaging characteristics and research progress of incoherent holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209004.
万玉红, 满天龙, 陶世荃. 非相干全息术成像特性及研究进展 [J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209004.
- 7 Liu Yingchen, Fan Jinping, Zeng Fanchuang, *et al.*. Recording, reconstruction and realization of white-light Fresnel incoherent digital holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1009002.
刘英臣, 范金坪, 曾凡创, 等. 白光菲涅耳非相干数字全息的记录、再现及实现[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1009002.
- 8 Li Junchang, Song Qinghe, Gui Jinbin, *et al.*. Research of image plane filtering technique in digital holographic wavefront reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900135.
李俊昌, 宋庆和, 桂进斌, 等. 数字全息波前重建中的像平面滤波技术研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900135.
- 9 Rong Lu, Wang Dayong, Wang Yunxin, *et al.*. Phase retrieval Methods in in-line digital holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209006.
戎路, 王大勇, 王云新, 等. 同轴数字全息中的相位恢复算法[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209006.
- 10 Myung K Kim. Adaptive optics by incoherent digital holography [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(13): 2694-2696.
- 11 Myung K Kim. Incoherent digital holographic adaptive optics[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(1): A117-A130.
- 12 Changgeng Liu, Xiao Yu, Myung K Kim. Phase aberration correction by correlation in digital holographic adaptive optics[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(12): 2940-2949.
- 13 Joseph Rosen, Gary Brooker. Fluorescence incoherent color holography[J]. *Opt Express*, 2007, 15(5): 2244-2250.
- 14 Xiaomin Lai, Yuan Zhao, Xiaohua Lü. Fluorescence holography with improved signal-to-noise ratio by near image plane recording [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(13): 2245-2247.
- 15 Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. 3rd Ed. Colorado, Roberts and Company Publishers, 2005.
- 16 Joseph Rosen, Gary Brooker. Digital spatially incoherent Fresnel holography[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(8): 912-914.
- 17 Yan Zhaojun, Li Xinyang, Rao Changhui. Multi-channel adaptive control algorithm for closed-loop adaptive optics systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0301002.
颜召军, 李新阳, 饶长辉. 自适应光学闭环系统实时多路自适应控制算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0301002.
- 18 Chen Jingyuan, Zhou Yu, Chang Xiang, *et al.*. Unified method for anisoplanatism of adaptive optics systems [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0413001.
陈京元, 周钰, 常翔, 等. 研究自适应光学非等晕性的统一方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0413001.
- 19 Shen Feng, Jiang Wenhan. Modal decomposition of anisoplanatic error of atmospheric turbulence for a laser guide star [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 348-355.
沈锋, 姜文汉. 激光导引星大气湍流波前非等晕性误差的像差模式分解[J]. *光学学报*, 2003, 23(3): 348-355.
- 20 Ichirou Yamaguchi. Phase-shifting digital holography [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(16): 1268-1270.

栏目编辑：何卓铭