

一种提高数字全息自适应光学系统成像分辨率的方法

李顺^{1,2*}, 王地^{1,2}, 陆彦婷^{1,2}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042

摘要 结合传统光学成像系统的性能评价方法,在数字全息自适应光学系统中利用点全息图的自相关函数来评价系统的成像性能。受白噪声的自相关函数近似为狄拉克函数的启发,通过增加点全息图的随机性,使其自相关函数接近狄拉克函数,以提高数字全息自适应光学系统的空间分辨率。提出一种使用随机相位板来增加点全息图的随机性,进而提高数字全息自适应光学系统成像分辨率的方法。对该方法进行数值模拟,研究随机相位板像素个数和随机相位均方差对系统成像分辨率的影响,并在实验室内搭建实验光路对该方法进行实验验证。实验结果表明,使用随机相位板能够有效提高数字全息自适应光学系统的成像分辨率。

关键词 全息; 非相干数字全息; 计算光学; 分辨率; 随机相位板

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0709001

Method for Improving Imaging Resolution of Digital Holographic Adaptive Optical System

Li Shun^{1,2*}, Wang Di^{1,2}, Lu Yanting^{1,2}

¹Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

Abstract Based on the performance evaluation method of traditional imaging optical systems, this study reveals that the autocorrelation function of the point hologram can be used to evaluate the imaging performance of incoherent digital holographic adaptive optics (IDHAO) system. Inspired by the fact that the autocorrelation function of the ideal white noise function is approximately a Dirac δ function, we propose that increasing the randomness of the point hologram can make its autocorrelation function close to the Dirac δ function and improve the imaging resolution of the IDHAO system. Accordingly, a practical method which introduces a random phase plate into the IDHAO system, is proposed and implemented to increase the randomness of the point hologram. The proposed method is evaluated through numerical simulations and effects of the pixel number and the standard deviation of phase in the random phase plate on the imaging resolution of the IDHAO system are investigated. Finally, an optical experiment is performed in the laboratory to evaluate the proposed method and experimental results demonstrate that the random phase plate can effectively improve the IDHAO system's imaging resolution.

Key words holography; incoherent digital holography; computational optics; resolution; random phase plate

OCIS codes 090.1995; 100.2000; 350.5730

1 引言

近年来光学全息技术飞速发展,数字全息技术

在成像领域的发展更是迅速^[1-6]。尤其是非相干数字全息技术的提出^[7],使得全息技术的应用范围不再局限于相干光源照明领域,同时令自然发光物体

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-02-22; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(11573047)、国家自然科学基金青年科学基金(11703060,11803058)、中国科学院南京天文光学技术研究所青年人才专项经费(Y015)

* E-mail: sli@niaot.ac.cn

的数字全息成像成为可能。非相干数字全息技术引起了国内外研究人员的广泛关注^[8-19]。基于非相干数字全息的原理, Kim^[20-21]提出了非相干数字全息自适应光学(IDHAO)的概念。与传统的自适应光学系统相比, IDHAO 系统具有光路结构简单、成本低的特点。同时, 与传统的图像后处理技术相比, 该成像方法的处理速度很快, 能够达到准实时成像观测的要求。因此, 该技术具有很好的发展前景。该方法提出后, 国内的研究人员也积极开展了相关的工作, 如北京工业大学的郭小乐等^[22]研究了引导星的尺寸和位置对 IDHAO 系统像差校正结果的影响, 明确了系统中不同引导星的等晕区范围。但是目前 IDHAO 系统对湍流像差的校正结果并不理想, 导致系统的空间分辨率不高, 这也是该技术至今未能投入实际应用的重要原因之一。

随机相位板在光学领域的最初应用是光学加密^[23-24], 随着数字成像技术的发展, 它还被用于超分辨率成像领域^[25]。Vijayakumar 等^[26-27]提出将随机相位板应用于光学数字全息技术, 以提高非相干数字全息三维成像系统的轴向分辨率, 使用随机相位板的非相干数字全息系统使三维成像的轴向分辨率达到了普通成像光学系统的要求。这些研究工作表明, 在数字全息成像技术中合理使用随机相位板, 有可能改进系统的性能。

本文在研究 IDHAO 系统成像性能的基础上, 提出利用随机相位板改善系统空间分辨率的方法, 并进行了相关的数值模拟和室内实验。实验结果表明, 该方法能够有效改善 IDHAO 系统的空间分辨率, 可为该技术实际应用于天文观测和生物医学活体细胞成像等领域提供参考。本文首先简要介绍了 IDHAO 系统的基本原理, 并采用点全息图的自相关函数来评价系统的成像性能, 进而提出采用随机相位板改进系统成像性能的方法; 然后, 进行数值模拟, 对比分析增加随机相位板前后 IDHAO 系统所获得的目标图像, 研究不同参数随机相位板对系统空间分辨率的影响; 最后, 在实验室内搭建了实验光路, 并对比分析了数值模拟结果和实验结果。

2 基本原理

IDHAO 系统的基本结构如图 1 所示, 其原理详见参考文献^[21]。目标上某一点发出的光经过分光镜后分别入射到反射镜 A 和反射镜 B 上, 经两镜反射的光再次通过分光镜后在 CCD 上叠加形成干涉条纹。可将整个目标在 CCD 上的光强分布视为

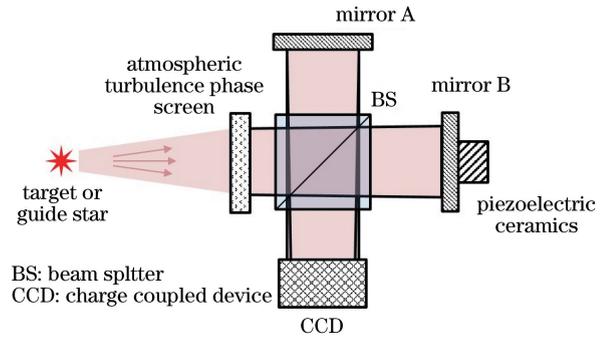


图 1 IDHAO 系统结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of IDHAO system

目标上所有点在 CCD 上所形成的光强的总和。使用相移技术, 可以除去光强分布中的常数项, 得到目标的菲涅耳全息图。采用 4 步相移法, 可得到目标的菲涅耳全息图(物全息图)的表达式^[21]:

$$H_{obj} = J_{img} * \exp \left[i \frac{k}{2} \frac{x^2 + y^2}{z_{ab}} + i\phi(x, y) \right], \quad (1)$$

式中: H_{obj} 为目标的全息图; J_{img} 为目标理想像; $*$ 表示卷积; (x, y) 为 CCD 像面上的坐标; z_{ab} 为受物距、像距和反射镜焦距大小影响的长度量; k 为光波的波数; ϕ 为受湍流像差、反射镜焦距和相机位置影响的复杂函数。物面上坐标原点发出的光所形成的全息图(点全息图)可以表示为

$$H_{pin} = A \exp \left[i \frac{k}{2} \frac{x^2 + y^2}{z_{ab}} + i\phi(x, y) \right], \quad (2)$$

式中: H_{pin} 为点全息图; A 为点全息图中心点的光强。由(1)式和(2)式可知, 物全息图也可以表示为目标理想像与点全息图的卷积。该菲涅耳全息图的重建可以使用目标全息图和点全息图的相关运算来实现^[21]:

$$I_{img} = H_{obj} \otimes H_{pin}, \quad (3)$$

式中: I_{img} 为目标的重建像; \otimes 表示相关运算。通过相关运算, IDHAO 系统可同时实现全息图的重建和湍流像差的校正。

将目标全息图写成目标理想像与点全息图卷积的形式, (3)式可以写为^[21]

$$I_{img} = J_{img} * H_{pin} \otimes H_{pin}. \quad (4)$$

(4)式为理解 IDHAO 系统成像的原理提供了一个新角度: 由 IDHAO 系统得到的图像, 相当于物体的理想像与点全息图自相关函数的卷积。而传统成像光学系统的像与系统点扩展函数的关系为

$$I_{img} = J_{img} * I_{PSF}, \quad (5)$$

式中: I_{PSF} 为光学系统的点扩展函数。对比(4)式和(5)式可以得出: 在 IDHAO 系统中, 点全息图自相

关函数的作用相当于传统成像光学系统的点扩展函数,其形状决定了该系统的性能和成像质量。因此,可以使用点全息图的自相关函数来评价 IDHAO 系统的成像性能。在理想情况下,若 IDHAO 系统点全息图的自相关函数为二维狄拉克函数(δ),即

$$H_{\text{pin}} \otimes H_{\text{pin}} = \delta, \quad (6)$$

则根据 IDHAO 系统获得的全息图可重建出目标的理想像,即

$$I_{\text{img}} = J_{\text{img}} * \delta = J_{\text{img}}. \quad (7)$$

因此,可以通过改变点全息图的形貌,使其自相关函数接近狄拉克函数,从而提高 IDHAO 系统的成像分辨率。

理想随机白噪声的自相关函数为狄拉克函数,因此可通过增加点全息图的随机性,使其自相关函数接近狄拉克函数。为了增加点全息图的随机性,利用随机相位板(该随机相位板可提供空间随机相位,由 $N \times N$ 个像素阵列组成,每个像素都有一个确定的相位值,但各个像素的相位值总体上呈随机分布),来扰乱 IDHAO 系统中一条光路中光束的反射相位,使反射波前的形状由平面或球面变为二维随机表面。

使用随机相位板改进 IDHAO 系统成像分辨率的基本原理总结如下:首先,在 IDHAO 系统中引入随机相位板来增加点全息图强度分布的随机性,令点全息图的自相关函数更加接近二维狄拉克函数;而点全息图的自相关函数即为 IDHAO 系统的点扩

展函数,根据成像理论,点扩展函数越接近狄拉克函数,光学系统的成像分辨率就越高,因此随机相位板能够提高 IDHAO 系统的成像分辨率。

3 数值模拟

为了验证增加点全息图随机性是否能够提高系统的分辨率,首先使用数值方法对 IDHAO 系统进行建模。数值模拟光路与图 1 所示的原理光路类似,只是在反射镜 B 的前面增加了一块随机相位板,在成像过程中该随机相位板固定不变,只有一种相位分布。模拟光路的具体参数为:目标和导星都处于远离反射镜面的位置,在数值模拟中将物距设置为 20000 mm;大气湍流相位板置于较近位置,近似为反射镜面处(反射镜 A 和 B 在光路中距离目标和 CCD 的距离相等)。反射镜 A 的焦距为 3000 mm,反射镜 B 设为平面反射镜,全息图采集位置(CCD 位置)距离反射镜 1000 mm。系统中加入峰值为 4 个波长的 Zernike 波面代表湍流像差,数值模拟系统的工作波长设定为 633 nm。

首先模拟不加随机相位板时该 IDHAO 系统的像差校正能力,然后在反射镜 B 的表面增加随机相位板,模拟增加相位板后系统的像差校正能力和成像结果。加随机相位板前后,系统的点全息图、点全息图的自相关函数以及自相关函数的剖面如图 2 和图 3 所示。

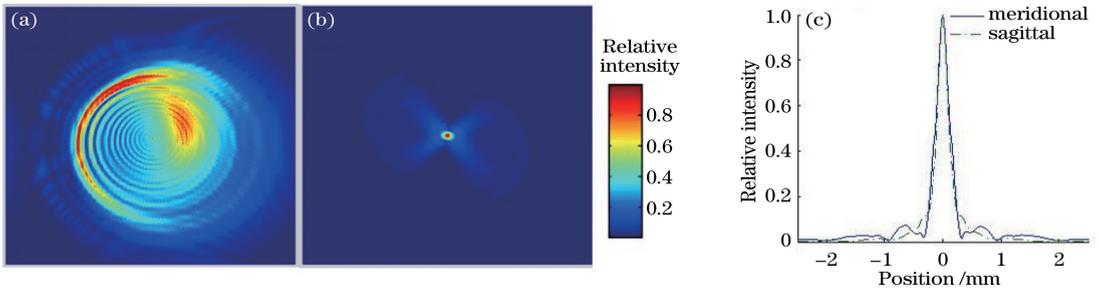


图 2 未加随机相位板时 IDHAO 系统的点全息图。(a)点全息图(强度);
(b)点全息图的自相关函数;(c)点全息图自相关函数的剖面

Fig. 2 Point hologram of IDHAO system without random phase plate. (a) Point hologram (amplitude);
(b) autocorrelation function of point hologram; (c) sectional view of autocorrelation function of point hologram

由图 3(a)可知,使用随机相位板后,反射光束相位的随机性增加,导致系统的点全息图出现更多的随机分布。对比图 2(c)和图 3(c)所示的自相关函数剖面发现,使用随机相位板后,点全息图的随机性增加,使得其自相关函数更加接近 δ 函数,进而提高 IDHAO 系统的分辨率。图 4 分别给出了数值模拟实验的成像目标,未加随机相位板时 IDHAO 系

统的重建像和增加随机相位板后 IDHAO 系统的重建像,其中右下角的方框内为模拟的两颗星的放大图。对比图 4 所示的放大结果可以看出:未加随机相位板时,系统虽然能够校正像差并重建目标像,但是在所获得的目标像中无法看到目标的细节特征(如每颗星的形状等);在系统中增加随机相位板后,在系统所成像中可以看到每颗星的形状。因此可以

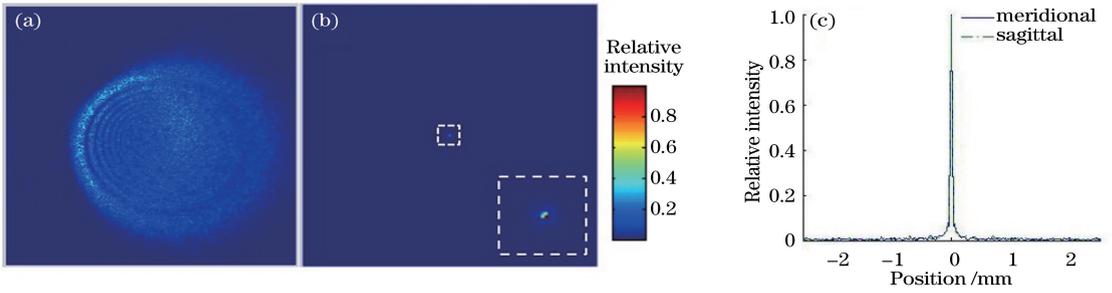


图 3 加随机相位板后 IDHAO 系统的点全息图。(a)点全息图(强度);
(b)点全息图的自相关函数;(c)点全息图自相关函数的剖面

Fig. 3 Point hologram of IDHAO system with random phase plate. (a) Point hologram (amplitude); (b) autocorrelation function of point hologram; (c) sectional view of autocorrelation function of point hologram

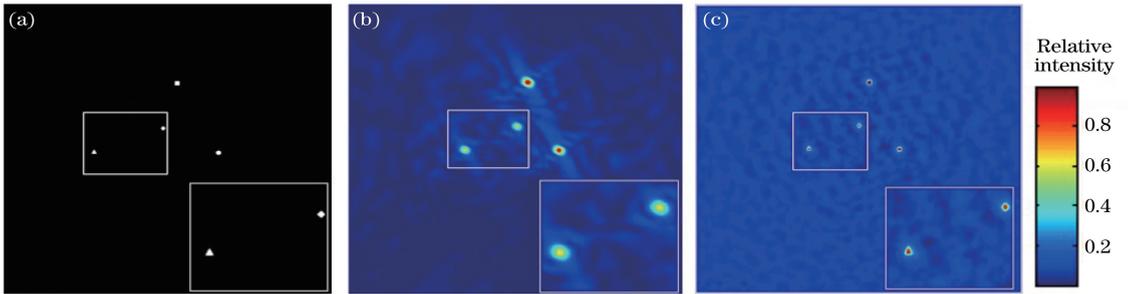


图 4 成像结果对比。(a)成像目标;(b)未加相位板的重建像;(c)加相位板后的重建像

Fig. 4 Comparison of imaging results. (a) Imaging object; (b) image reconstructed by IDHAO system without random phase plate; (c) image reconstructed by IDHAO system with random phase plate

认为,增加随机相位板确实可以提高数字全息自适应光学系统的分辨率。经过计算得到:未加随机相位板时,图 2(c)所示的点全息图自相关函数的半峰全宽为 $225 \mu\text{m}$;在光路中增加随机相位板后,图 3(c)所示的点全息图自相关函数的半峰全宽变为 $39 \mu\text{m}$ 。因此,增加随机相位板后系统的空间分辨率大约提高了 6 倍。

上述数值实验所使用的随机相位板参数如下:相位板共有 256×256 个像素,各个像素的相位呈正态分布,均值为 2π ,均方差为 0.6π 。为了进一步确定不

同参数的相位板对系统成像分辨率的影响,使用分辨率板图像作为成像目标,并改变模拟实验中随机相位板的参数,对系统的成像性能进行模拟实验。

首先,在不改变系统中其他光学元件参数、湍流像差、随机相位板像素数(256×256 个)、相位均值的情况下,改变各个像素相位间的均方差,模拟随机相位板各个像素相位间均方差分别为 0.4π 、 0.6π 和 0.8π 时, IDHAO 系统的像差校正及全息图重建结果如图 5 所示。可以看到,系统分辨率随着随机相位板均方差的增大而提高。

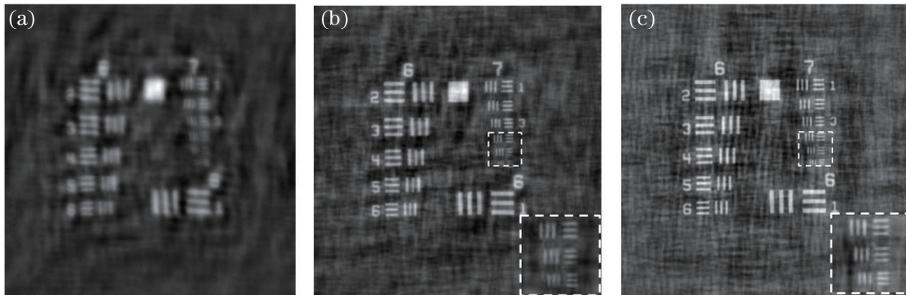


图 5 采用不同均方差随机相位板的系统重建像结果。(a) 0.4π ;(b) 0.6π ;(c) 0.8π

Fig. 5 Images reconstructed by IDHAO system with random phase plates having different standard deviations.

(a) 0.4π ; (b) 0.6π ; (c) 0.8π

随后,在不改变系统其他光学参数和随机相位板各个像素所呈相位均方差(0.8π)的情况下,改变随机相位板的像素个数,模拟 IDHAO 系统性能随相位板像素个数的变化情况。当相位板的像素数分

别为 256×256 、 128×128 和 64×64 时, IDHAO 系统的像差校正及全息图重建结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,随机相位板的像素数越多,系统的分辨率越高。

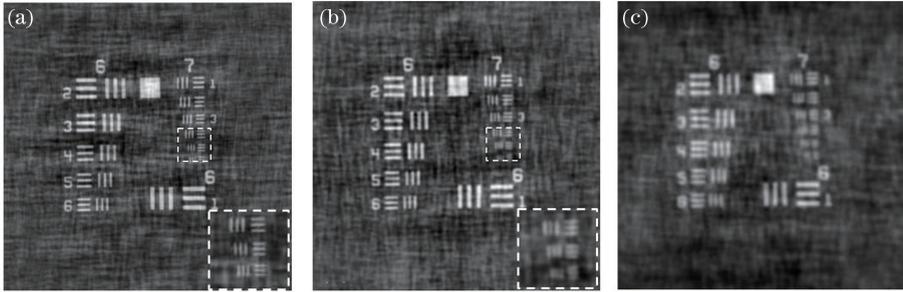


图 6 采用不同像素数的随机相位板的系统重建像结果。(a) 256×256 ; (b) 128×128 ; (c) 64×64

Fig. 6 Images reconstructed by IDHAO system with random phase plates having different pixel numbers.

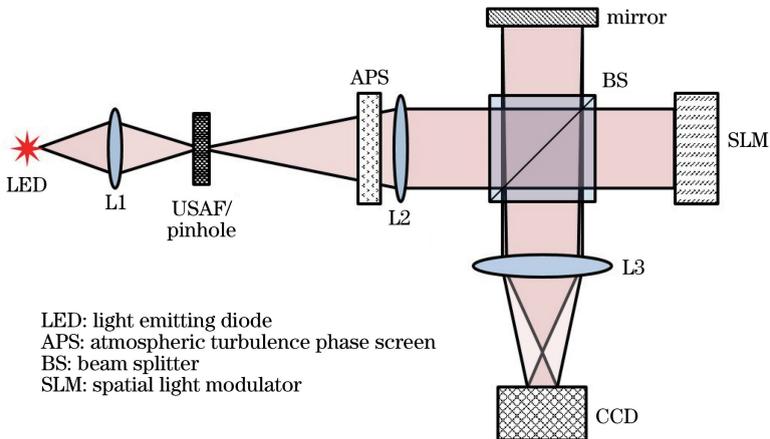
(a) 256×256 ; (b) 128×128 ; (c) 64×64

通过数值模拟实验可得到以下结论:1)在光路中使用随机相位板能够提高 IDHAO 系统的成像分辨率;2)随机相位板各个像素相位间的均方差越大,系统获得的图像越清晰;3)随机相位板像素数量越多,系统获得的图像越清晰。综上所述,在 IDHAO 系统中使用随机相位板可增加点全息图的随机性,进而提高系统的分辨率;而增大随机相位板相位的均方差和像素数量,都可以等效为增加了点全息图的随机性(均方差变大增加了相位的随机性;像素数量增多,随机相位的个数增多,也可以认为增加了光束波前整体的随机性,进而增大了点全息图的随机性),从而提高了系统的分辨率。这也从另一面证实了本研究的设想——随机性越大,点全息图的自相关函数越接近狄拉克函数, IDHAO 系统的成像分辨率越高。因此,可以在 IDHAO 系统中使用具有较大相位均方差和较多像素数的随机相位板来提高

系统的分辨率。

4 室内实验及结果

在实验室搭建的实验光路如图 7 所示,其中光源为单颗发光二极管(LED)光源,中心波长为 635 nm ,带宽为 15 nm 。LED 发出的光经过透镜 L1,成像于观测目标或针孔上。观测目标为透射式分辨率板(1951UASF 测试靶),针孔直径为 $50 \mu\text{m}$ 。经过成像目标或针孔出射的光,经过大气湍流相位板(该相位板由本课题组自行研制,具体参数见参考文献[28])和准直透镜,入射到 IDHAO 系统中。该 IDHAO 系统类似于迈克耳孙干涉仪结构,其中一个反射镜为凹面镜,焦距为 300 mm ,另一个反射镜用反射式空间光调制器代替。该空间光调制器为液晶相位式空间光调制器,具有 512×512 个像素,单个像素的大小为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,工作于 $615 \sim$



LED: light emitting diode
APS: atmospheric turbulence phase screen
BS: beam splitter
SLM: spatial light modulator

图 7 实验光路示意图

Fig. 7 Optical configuration of experimental setup

700 nm波段。成像相机位于距离反射镜约 200 mm 处,用于采集干涉图。在 CCD 相机与分光镜之间放置一个焦距为 100 mm 的透镜 L3,以提高 CCD 所采集全息图的对比度。

实验时,利用空间光调制器产生 $\pi/2$ 、 π 和 $3\pi/2$ 的相移,同时可以用它代替随机相位板,在光路中加入随机相位阵列。首先,使用空间光调制器产生相移,此时空间光调制器在光路中的作用就是一个能够移动的反射镜,从而实现了不加随机相位板情况下的 IDHAO 系统。在这种情况下采集到的点干涉

图、目标干涉图以及通过干涉图获得的全息图如图 8 所示。然后,利用空间光调制器产生随机相位,并分别附加不同的相移,这样就可以用空间光调制器实现增加随机相位板的 IDHAO 系统。图 9 为在增加随机相位板的情况下,采集到的点干涉图、目标干涉图,以及由干涉图获得的全息图。图 10(a)所示为在光源照明下的观测目标,图 10(b)和图 10(c)所示分别为加随机相位板前后 IDHAO 系统的重建像。从图 10 可以看出,增加随机相位板确实提高了 IDHAO 系统的成像分辨率。

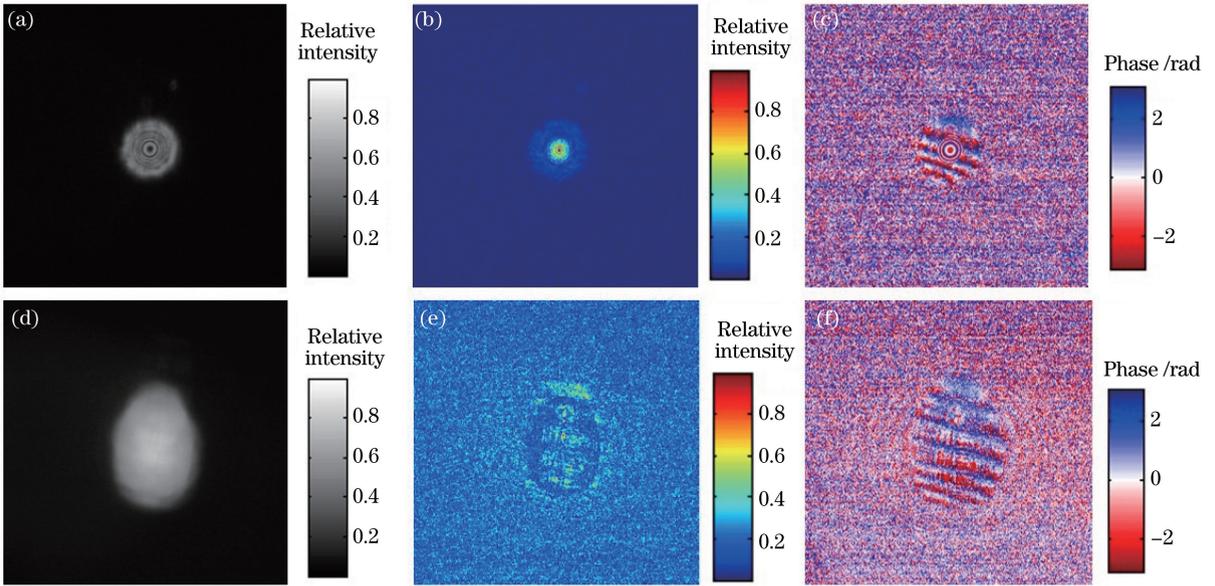


图 8 未加随机相位板时系统采集的干涉图及干涉图合成的全息图。(a)针孔干涉图;(b)针孔全息图振幅;(c)针孔全息图相位;(d)目标干涉图;(e)目标全息图振幅;(f)目标全息图相位

Fig. 8 Interferograms and holograms acquired by experimental setup without random phase plate. (a) Interferogram of pinhole; (b) amplitude of pinhole hologram; (c) phase of pinhole hologram; (d) interferogram of object; (e) amplitude of object hologram; (f) phase of object hologram

5 结 论

在分析 IDHAO 系统成像原理的基础上,采用点全息图的自相关函数来评价系统的性能,并提出使用随机相位板使系统的点全息图随机化,进而提高系统成像分辨率的想法。通过数值模拟和室内实验验证了该设想,并证实随机相位板确实能够提高 IDHAO 系统的成像分辨率,获得较高的成像质量,为该技术的推广应用提供了参考。

使用 IDHAO 系统校正湍流像差时,要求物全息图和导星全息图具有相同的湍流像差。因此,在实际的天文观测中,要求 IDHAO 系统能够在大气相干时间内完成目标和导星全息图的采集。目前, IDHAO 系统需要 4 次曝光才能完成 1 幅全息图的

采集,所以该技术目前仅能够应用于台站视宁度较好、湍流像差变化缓慢的情况。若要在更加广泛的领域内使用该技术,则需要进一步提高 IDHAO 系统的时间分辨率。如何提高系统的时间分辨率,也是目前 IDHAO 技术的重要研究方向之一。

为了提高系统的空间分辨率,传统的光学成像系统需要尽量消除系统像差,扩大口径,以改善系统的点扩展函数。本文中的 IDHAO 系统采用随机相位板来增加点全息图的随机性,使点全息图的自相关函数接近狄拉克函数,进而提高系统的成像分辨率,为提高光学系统成像分辨率提供了一种新思路。由于点全息图的自相关函数并不受系统衍射极限的限制,配合合适的光学结构和随机相位板,该方法有望实现超分辨率成像。而本研究所采用的使自相关

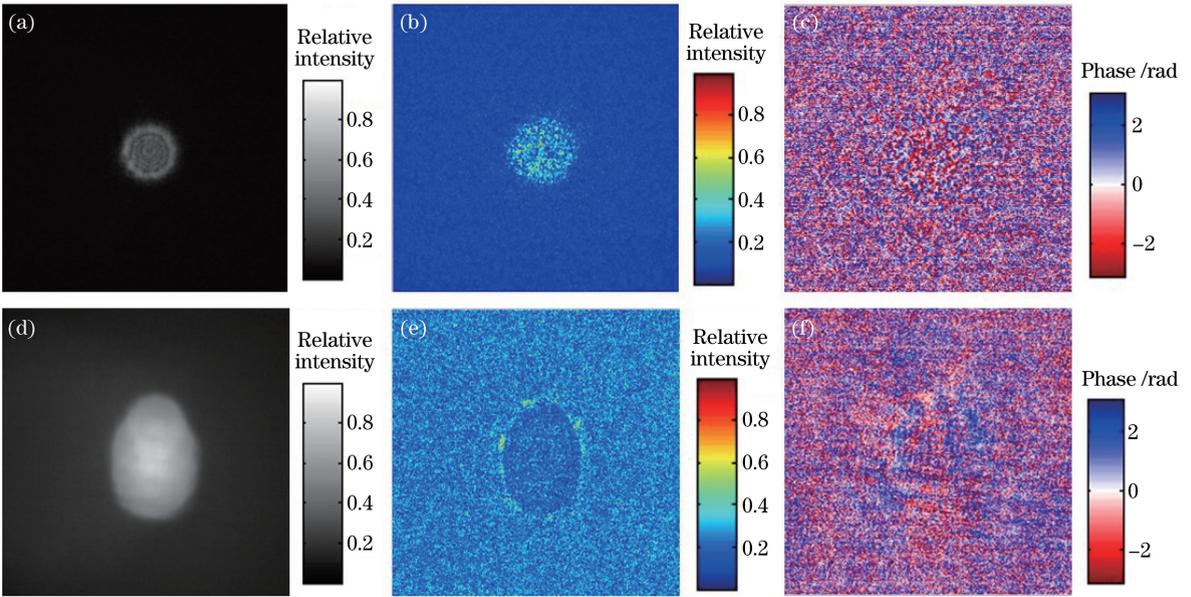


图 9 加随机相位板后系统采集的干涉图及由干涉图合成的全息图。(a)针孔干涉图;(b)针孔全息图振幅;(c)针孔全息图相位;(d)目标干涉图;(e)目标全息图振幅;(f)目标全息图相位

Fig. 9 Interferograms and holograms acquired by experimental setup with random phase plate. (a) Interferogram of pinhole; (b) amplitude of pinhole hologram; (c) phase of pinhole hologram; (d) interferogram of object; (e) amplitude of object hologram; (f) phase of object hologram

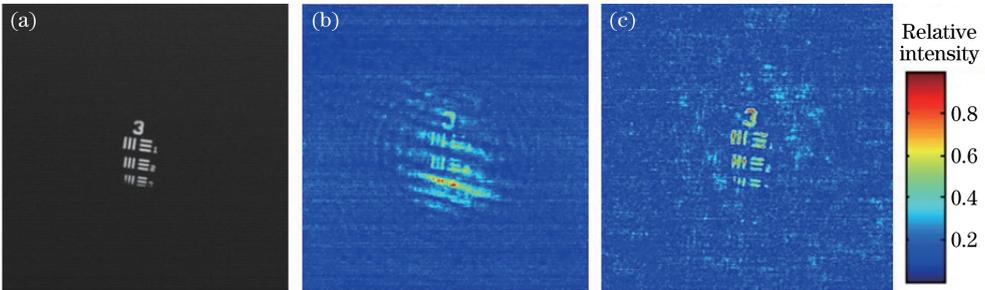


图 10 成像结果对比。(a)成像目标;(b)未加相位板系统重建像;(c)加相位板后系统重建像

Fig. 10 Comparison of imaging results. (a) Imaging object; (b) image reconstructed by experimental setup without random phase plate; (c) image reconstructed by experimental setup with random phase plate

函数接近狄拉克函数的方式,也有望成为光学超分辨率成像的一种方法。

参 考 文 献

[1] Osten W, Faridian A, Gao P, *et al.* Recent advances in digital holography [Invited] [J]. Applied Optics, 2014, 53(27): G44-G63.

[2] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. Optics Letters, 1997, 22(16): 1268-1270.

[3] Cuhe E, Bevilacqua F, Depeursinge C. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging [J]. Optics Letters, 1999, 24(5): 291-293.

[4] Schnars U, Falldorf C, Watson J, *et al.* Digital holography and wavefront sensing [M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 39-68.

[5] Hariharan P. Optical holography: principles, techniques, and applications [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[6] Martínez-León L, Clemente P, Mori Y, *et al.* Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4975-4984.

[7] Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel holography [J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 912-914.

[8] Rosen J, Siegel N, Brooker G. Theoretical and experimental demonstration of resolution beyond the Rayleigh limit by FINCH fluorescence microscopic imaging[J]. Optics Express, 2011, 19(27): 26249-26268.

- [9] Katz B, Rosen J, Kelner R, *et al.* Enhanced resolution and throughput of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) using dual diffractive lenses on a spatial light modulator (SLM) [J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 9109-9121.
- [10] Kashter Y, Rosen J. Enhanced-resolution using modified configuration of Fresnel incoherent holographic recorder with synthetic aperture [J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20551-20565.
- [11] Kelner R, Katz B, Rosen J. Optical sectioning using a digital Fresnel incoherent-holography-based confocal imaging system[J]. *Optica*, 2014, 1(2): 70-74.
- [12] Nguyen C M, Muhammad D, Kwon H S. Spatially incoherent common-path off-axis color digital holography[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(6): 1504-1509.
- [13] Wan Y H, Man T L, Tao S Q. Imaging characteristics and research progress of incoherent holography[J]. *Chinese Journal of 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.
- [14] Weng J W, Yang C P, Li H. Self-interference incoherent digital holography by compressive sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0209001.
翁嘉文, 杨初平, 李海. 自干涉非相干数字全息的压缩感知重建[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0209001.
- [15] Zhang W B, Liu Y F, Li D Y, *et al.* Incoherent digital holographic microscopic imaging based on Michelson interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0309001.
张文斌, 刘亚飞, 李德阳, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的非相干数字全息显微成像[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0309001.
- [16] Zhou H Q, Wan Y H, Man T L. Adaptive imaging by incoherent digital holography based on phase change [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(4): 044202.
周宏强, 万玉红, 满天龙. 基于相位变更的非相干数字全息自适应成像[J]. *物理学报*, 2018, 67(4): 044202.
- [17] Zhao Z C, Yang X F, Xu T X, *et al.* Point spread function of incoherent digital holography based on spiral phase modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 014203.
赵忠超, 杨旭锋, 许天旭, 等. 基于螺旋相位调制的非相干全息点扩展函数研究[J]. *物理学报*, 2018, 67: 014203.
- [18] Bai Y H, Zang R H, Wang P, *et al.* Single-shot incoherent digital holography based on spatial light modulator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 064202.
白云鹤, 臧瑞环, 汪盼, 等. 基于空间光调制器的非相干数字全息单次曝光研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(6): 064202.
- [19] Ji T, Zhang L, Li W, *et al.* Research progress of coded aperture correlation holography[J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 080005.
计婷, 张乐, 李伟, 等. 非相干编码孔径相关全息研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 080005.
- [20] Kim M K. Adaptive optics by incoherent digital holography[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2694-2696.
- [21] Kim M K. Incoherent digital holographic adaptive optics [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(1): A117-A130.
- [22] Guo X L, Wan Y H, Man T L, *et al.* Correction characteristics of wavefront aberration in incoherent digital holographic adaptive optics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(11): 1109004.
郭小乐, 万玉红, 满天龙, 等. 非相干数字全息自适应光学波前校正特性研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1109004.
- [23] Unnikrishnan G, Joseph J, Singh K. Optical encryption by double-random phase encoding in the fractional Fourier domain [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(12): 887-889.
- [24] Mogensen P C, Glückstad J. Phase-only optical encryption [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(8): 566-568.
- [25] Rivenson Y, Stern A, Javidi B. Single exposure super-resolution compressive imaging by double phase encoding [J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 15094-15103.
- [26] Vijayakumar A, Kashter Y, Kelner R, *et al.* Coded aperture correlation holography-a new type of incoherent digital holograms [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12430-12441.
- [27] Vijayakumar A, Kashter Y, Kelner R, *et al.* Coded aperture correlation holography system with improved performance [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F67-F77.
- [28] Jia P, Zhang S J. Simulation and fabrication of the atmospheric turbulence phase screen based on a fractal model [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(5): 584-590.