

用于湍流像差校正的双编码孔径非相干数字全息术

刘天奇^{1,2,3}, 李顺^{1,2*}, 陆彦婷^{1,2}¹中国科学院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;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于非相干数字全息自适应光学原理,提出一种基于双编码孔径相位调制的非相干数字全息成像方法。该方法使用两块编码孔径相位板对受大气湍流影响的波前进行调制,单次曝光即可获得校正像差和恢复图像所需的点全息图或物全息图,对点全息图与物全息图进行相关运算获得湍流像差校正后的重建图像。相比非相干数字全息自适应光学技术,系统结构和成像过程简化,系统时间分辨率大为提高。数值模拟结果表明,所提方法能达到与加入随机相位板后的非相干数字全息自适应光学技术一致的校正效果,相比传统非相干光学系统能有效应对湍流像差的影响,并且对不同程度湍流像差取得基本一致的图像清晰度。室内实验结果进一步证实所提方法具有克服湍流像差、重建清晰目标图像的能力。

关键词 计算光学; 非相干数字全息; 编码孔径相位板; 像差校正

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP250566

Dual-Coded Aperture Incoherent Digital Holography for Turbulence Aberration Correction

Liu Tianqi^{1,2,3}, Li Shun^{1,2*}, Lu Yanting^{1,2}¹Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;²CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology (Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology), Nanjing 210042, Jiangsu, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This paper introduces an incoherent digital holographic imaging approach that utilizes dual-coded aperture phase modulation, based on the principles of incoherent digital holographic adaptive optics (IDHAO). In the proposed method, wavefronts affected by atmospheric turbulence are modulated by dual-coded aperture phase plates. Consequently, the point holograms or object holograms required for aberration correction and image reconstruction can be acquired through a single exposure. Then, the turbulence-aberration-corrected image can be reconstructed by performing correlation operations between the object hologram and the point hologram. Compared with the classical IDHAO, this approach simplifies system architecture and imaging process while improving temporal resolution. Numerical simulations demonstrate that the proposed method achieves correction performance comparable to modified IDHAO incorporating a random phase plate. Additionally, it outperforms classical IDHAO systems by better correcting turbulence-induced aberrations and maintaining consistent image clarity across varying turbulence conditions. Laboratory experiments confirm that the proposed approach can overcome turbulence-induced aberrations, yielding high-quality target reconstructions.

Key words computational optics; incoherent digital holography; coded aperture phase plate; aberration correction

1 引言

随着光电器件与计算机性能的迅速发展,基于传

统全息与计算光学技术的数字全息术已经成为光学成像领域的研究热点^[1-6]。数字全息术使全息图从干板记录与光学重建转变为数字记录与数字重建,极大提

收稿日期: 2025-01-23; 修回日期: 2025-04-12; 录用日期: 2025-04-24; 网络首发日期: 2025-04-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12273081)

通信作者: *sli@niaot.ac.cn

高了全息成像的效率与灵活性。作为数字全息术的重要分支,非相干数字全息术能够利用物体上同一点发出光波的空间自相干性来记录全息图,摆脱传统全息术对相干光源的依赖,因此在显微成像^[7-8]、彩色全息^[9-10]、立体成像^[11-12]、超分辨率成像^[13-14]、自适应光学^[15-16]等众多领域的研究越加广泛。基于菲涅耳非相干数字全息^[17]成像原理, Kim^[18]将非相干数字全息技术应用于大气湍流像差的校正,提出了非相干数字全息自适应光学(IDHAO)。IDHAO利用数值处理的方式替代了传统自适应光学中的波前传感器和波前校正器等硬件,通过适当的全息图再现算法实现了对湍流像差的补偿。相比传统自适应光学技术, IDHAO具有光路结构简单、成本低的优势,有很好的发展潜力,受到了诸多国内外学者的关注^[19-22]。

IDHAO使用迈克耳孙干涉仪结构,结合球面镜来实现光波的分束和干涉,使用点源作为导星记录其干涉条纹,并利用四步相移技术得到导星的复值全息图,重复干涉过程记录下目标物体的复值全息图。对导星全息图与目标全息图进行相关运算,从而实现湍流像差的补偿和全息图重构。IDHAO系统虽然能够在一定程度上校正光路中的湍流像差,但是校正效果并不理想,导致其成像的空间分辨率不高。文献[21]提出通过增加随机相位板提高IDHAO的空间分辨率,获得了更高的成像质量。IDHAO要求导星全息图和目标全息图具有相同的湍流像差,即需要系统能够在大气相干时间内完成导星和目标全息图的采集。

但目前IDHAO系统需要4次曝光才能完成一幅全息图的采集,要将该系统实际应用于大气湍流下的天文观测,还必须克服系统时间分辨率不高的问题。

为了提高系统的时间分辨率,本文提出采用双编码孔径非相干数字全息对湍流像差进行校正的数字全息自适应成像技术。该技术使用两块编码孔径相位板对受湍流影响的波前进行调制,通过单次曝光即可获得点全息图(即导星全息图)或物全息图,大大减少了采集全息图所需时间,使在大气相干时间内完成点全息图和物全息图的采集成为可能。相比经典IDHAO系统,该方法的光学结构更为简单,并且具有更高的时间分辨率和空间分辨率。本文首先介绍了双编码孔径非相干数字全息系统校正湍流像差成像的基本原理,利用数值模拟实验验证了该系统校正湍流像差成像的效果,并与IDHAO系统作了对比分析。然后,模拟了系统在不同湍流强度下的成像性能。最后,在实验室内搭建实验光路,验证了理论分析及数值模拟的结果。

2 基本原理

双编码孔径非相干数字全息成像系统的基本结构如图1所示,主要包括准直透镜、偏振片、编码孔径相位板和成像相机。位于光轴上的点光源发出的光经过大气湍流相位畸变 $\Psi(x, y)$ 后被透镜 L_1 收集并在其焦点处聚焦成像,通过 L_1 焦点的光束经过透镜 L_2 准直,并通过偏振片P到达相位型空间光调制器(SLM)。并通过偏振片P到达相位型空间光调制器(SLM)。

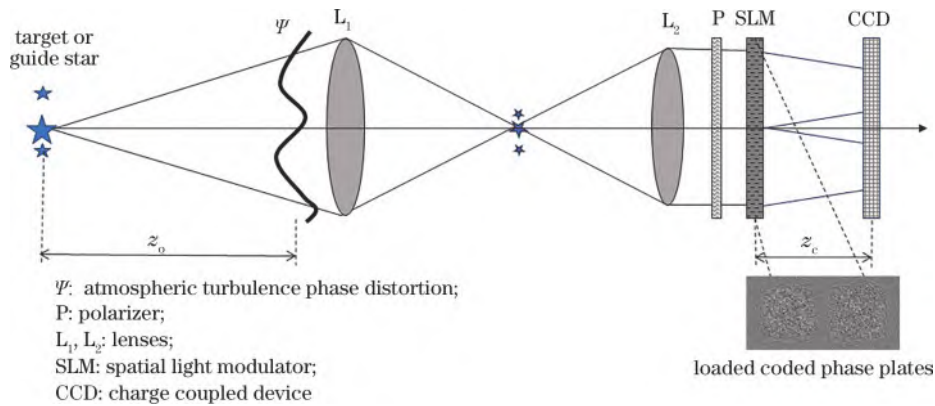


图1 双编码孔径非相干数字全息成像系统结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of dual-coded aperture incoherent digital holographic imaging system

在SLM上加载有并列放置的两个编码孔径相位板。两个相位板的相位分别由伪随机相位、线性相位和球面相位叠加而成。其中:两个伪随机相位分别通过G-S(Gerchberg-Saxton)算法^[23]获得;两个编码孔径相位板上加载的线性相位为相反方向,以使通过相位板后的两束光波分别偏向不同方向;球面相位相当于一个正透镜,使光束在焦平面处图像传感器上聚焦。最终SLM上加载的相位函数可以表示为

$$\Phi_{\text{SLM}} = \left[\exp(i\varphi_1)L(s) + \exp(i\varphi_2)L(-s) \right] \cdot Q\left(\frac{-1}{z_c}\right) = \exp[i\varphi_{\text{co1}}(x, y)] + \exp[i\varphi_{\text{co2}}(x, y)] \quad (1)$$

式中: φ_1 和 φ_2 分别为两个编码孔径相位板的伪随机相位分布; φ_{co1} 、 φ_{co2} 分别为增加倾斜和球面相位后的两个伪随机相位;线性函数 $L(s)$ 表示为 $L(s) = \exp[i2\pi(s_x x + s_y y)/\lambda]$, s_x 、 s_y 表示物光波通过编码相位板后沿光轴方向偏转角度的余弦值,因为并列放置

两个编码孔径相位板,通过相位板后两光束分别沿 x 轴正方向和负方向偏转,这里设置 $s_y = 0$; 球面波传输因子 $Q(a)$ 表示为 $Q(a) = \exp\left[i\pi a(x^2 + y^2)/\lambda\right]$; z_c 为 SLM 与图像传感器之间的距离。

经过两个编码孔径相位板的调制后,含有大气湍流像差的波前最终传播到图像传感器上,会同时产生两个分离的光强分布:

$$I_{\Psi} = \left| Q\left(\frac{1}{z_0 M^2}\right) \cdot \exp\left[i\Psi\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right)\right] \cdot \exp\left[i\varphi_{\text{co1}}(x, y)\right] * Q\left(\frac{1}{z_c}\right) \right|^2 + \left| Q\left(\frac{1}{z_0 M^2}\right) \cdot \exp\left[i\Psi\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right)\right] \cdot \exp\left[i\varphi_{\text{co2}}(x, y)\right] * Q\left(\frac{1}{z_c}\right) \right|^2 = I_{\Psi_1} + I_{\Psi_2} \quad (2)$$

式中: z_0 表示观测目标与望远镜间的距离; I_{Ψ_1} 和 I_{Ψ_2} 表示传感器捕获到的两个光强分布,分别对应两个编码孔径相位板; $M = f_2/f_1$, f_1 , f_2 分别是透镜 L_1 , L_2 的焦距; * 表示二维卷积。

在利用非相干数字全息系统进行成像时,会在图像重建过程中引入显著的背景噪声,因此通常需要记录多幅图像进行叠加,得到复值全息图^[18],或者对两幅图像进行相减,得到双极点全息图^[24],以提高重建图像的对比度和成像质量。为了在提高系统时间分辨率的同时保证成像的空间分辨率,通过使用两块编码孔径相位板调制波前,在传感器上得到式(2)所示的两个光强分布后,分别提取这两个光强分布,再将其相减,进而得到双极点全息图:

$$H_{\text{pin}, \Psi} = I_{\Psi_1} - I_{\Psi_2} \quad (3)$$

由于编码孔径相位板的相位调制作用,含有湍流像差的波前衍射到传感器上的两个光强分布具有随机性,得到的双极点全息图也呈现出一种随机分布的散斑图样,其自相关函数在原点处会产生一个尖锐的峰值,且在其他位置接近零,表现出与狄拉克函数 δ 相似的性质,即 $H_{\text{pin}, \Psi} \otimes H_{\text{pin}, \Psi} \approx \delta$, \otimes 代表相关运算。

该光学系统是一个典型的非相干成像系统,物全息图可以表示为物体的理想像与点全息图的卷积:

$$H_{\text{obj}, \Psi} = I_{\text{obj}} * H_{\text{pin}, \Psi} \quad (4)$$

可以通过物全息图和点全息图的相关运算重建目标像:

$$I_{\text{rec}} = H_{\text{obj}, \Psi} \otimes H_{\text{pin}, \Psi} = I_{\text{obj}} * H_{\text{pin}, \Psi} \otimes H_{\text{pin}, \Psi} \quad (5)$$

由式(5)可以看到,目标的重建像即为目标物体的理想像与点全息图自相关函数的卷积,本文中点全息图自相关函数近似为 δ 函数,则进一步得到

$$I_{\text{rec}} \approx I_{\text{obj}} * \delta = I_{\text{obj}} \quad (6)$$

也就是说,经过编码孔径相位板的伪随机相位调制,系统的点全息图的自相关函数接近 δ 函数,通过物全息图和点全息图的相关运算,系统的重建图像接近理想像,即通过相关运算同时实现了全息图的重建和湍流像差的校正。

经过研究发现采用相位滤波技术^[25]处理后的点全息图,可进一步提高重建像的信噪比。则最终全息图的重建过程可表达为

$$I_{\text{rec}} = H_{\text{obj}, \Psi} \otimes H'_{\text{pin}, \Psi} \quad (7)$$

式中: $H'_{\text{pin}, \Psi} = \mathcal{F}^{-1}\left\{\exp\left\{i \cdot \arg\left[\mathcal{F}\left(H_{\text{pin}, \Psi}\right)\right]\right\}\right\}$, 其中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换, \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换, \arg 表示提取相位。

3 数值仿真

为了验证双编码孔径非相干数字全息成像系统校正大气湍流像差的成像效果,根据图 1 所示的原理光路对系统进行了数值模拟。设定系统使用的非相干光源工作波长为 633 nm, 模拟所加的湍流像差由泽尼克多项式 $z_2^2 + z_4^4$ 表示, 峰值为 4 个波长, 将该湍流像差置于成像系统入瞳处。物平面尺寸设置为 1 cm × 1 cm, 每个像素尺寸为 10 μm × 10 μm 。含有大气湍流像差的物光波经过准直透镜后通过两个编码孔径相位板, 经调制的物光波传播到与相位板相距 150 mm 的传感器平面。

图 2(a) 展示了系统引入的波前像差。图 2(b)~2(d) 为对双编码孔径非相干数字全息成像系统的仿真结果。其中图 2(b) 所示为点源在传感器上的光强分布, 其形态呈现为两个散斑图像。这两个散斑图像是物光波引入湍流像差后, 通过两个编码孔径相位板调制形成的。提取这两个散斑图像并将它们相减, 可以得到双极点全息图, 如图 2(c) 所示。图 2(d) 展示了双极点全息图的自相关函数, 它也是点源的重建像, 其尺寸大约为 1 个像素。为了进行对比分析, 在相同波前像差下对经典 IDHAO 系统和加入随机相位板后的 IDHAO 系统进行了数值模拟。图 2(e)~2(g) 所示为经典 IDHAO 系统的仿真结果, 图 2(e) 为采用四步相移法获取的 4 幅点源干涉图, 从图中可以观察到波前像差所带来的显著影响。图 2(f) 是通过叠加这 4 幅具有不同相移值的点源干涉图而得到的复值点全息图, 图 2(g) 展示了其自相关函数, 其尺寸约为 5 个像素。图 2(h)~2(j) 所示为加入随机相位板后的 IDHAO 系统仿真结果, 可以看到, 系统的点全息图出现更多的随机分布, 其点全息图自相关函数也为 1 个像素大小, 说明其点源的重建效果与双编码孔径非相干数字全息成像系统相当。

从式(5)和式(6)可以看到, 系统的成像质量与点全息图自相关函数直接相关, 点全息图半峰全宽越小,

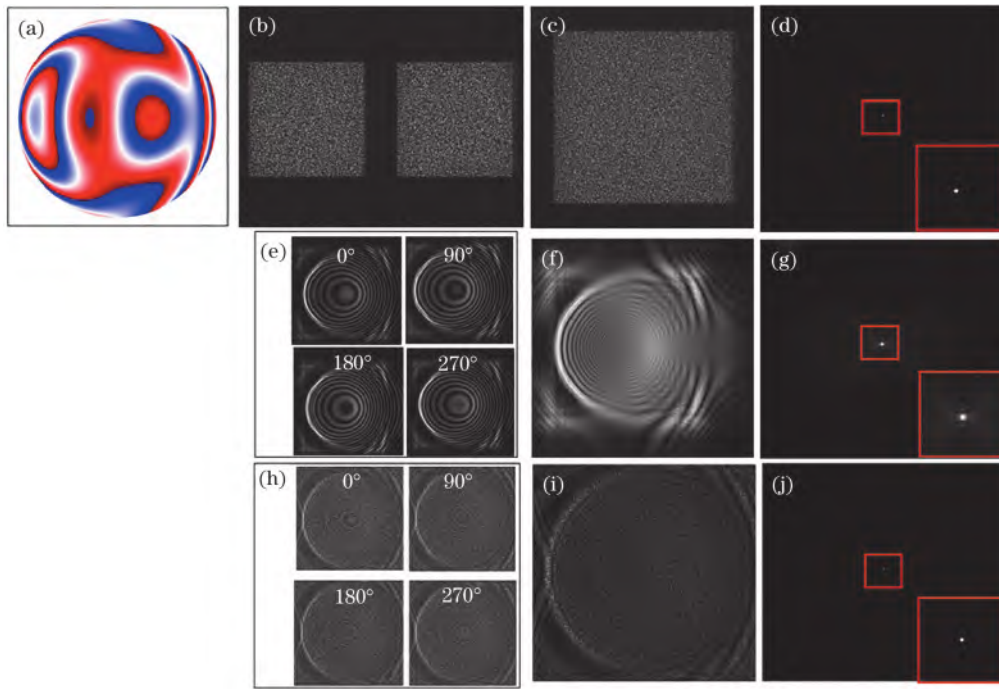


图2 数值模拟。(a)相位畸变;(b)(c)(d)分别为点源在传感器上的两个光强分布、双极点全息图、点全息图的自相关函数;(e)(f)(g)分别为经典IDHAO系统点源在传感器上的干涉图(相位常数分别为 0° 、 90° 、 180° 、 270°)、复点全息图、点全息图的自相关函数;(h)(i)(j)分别为加入随机相位板后的IDHAO系统的相应结果

Fig. 2 Numerical simulation. (a) Phase distortion; (b), (c), and (d) represent the intensity distributions of the point source on the sensor, the bipolar point hologram, and the autocorrelation function of the point hologram, respectively; (e), (f), and (g) represent the interference patterns (with phase constants of 0° , 90° , 180° , and 270°) of the point source on the sensor in the classic IDHAO system, the complex point hologram, and the autocorrelation function of the point hologram, respectively; (h), (i), and (j) represent the corresponding results of the IDHAO system incorporating a random phase plate

重建图像的分辨率越高。因此对两个系统点全息图自相关函数的剖面进行了对比,如图3所示。曲线a表示IDHAO系统点全息图自相关函数的剖面,其半峰全宽约为 $50\ \mu\text{m}$;曲线b表示加入随机相位板后的

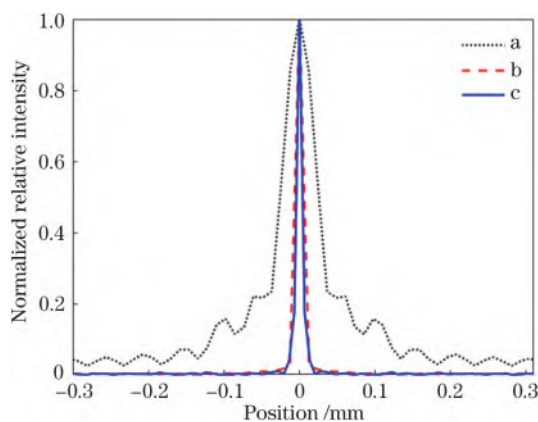


图3 点全息图自相关函数的剖面对比图(曲线a:IDHAO系统;曲线b:加入随机相位板后IDHAO系统;曲线c:双编码孔径非相干数字全息成像系统)

Fig. 3 Comparison of profiles of autocorrelation functions for point holograms (curve a: IDHAO system; curve b: IDHAO system incorporating a random phase plate; curve c: dual-coded aperture incoherent digital holographic imaging system)

IDHAO系统点全息图自相关函数的剖面,其半峰全宽约为 $10\ \mu\text{m}$;曲线c表示编码孔径非相干数字全息成像系统的点全息图自相关函数剖面,其半峰全宽也约为 $10\ \mu\text{m}$ 。通过这一对比说明,相比经典IDHAO系统,编码孔径非相干数字全息成像系统在空间分辨率上有了显著提升,并且与加入随机相位板后的IDHAO系统性能相当。

图4展示了系统对扩展目标的重建结果,图5展示了3幅重建图像虚线处的强度曲线。图4(a)是成像目标。图4(b)是IDHAO系统的重建图像,从图中可以看出,尽管IDHAO系统在一定程度上对湍流像差进行了校正,但成像效果并不理想,细节特征已经变得模糊,难以辨认。图4(c)是加入随机相位板后的IDHAO系统的重建图像,成像清晰度大幅提高,重建图像中细节特征依然清晰可见。图4(d)为编码孔径非相干数字全息成像系统重建图像,其细节特征也清晰可见,与图4(c)大致相同。通过图5中重建图像局部强度剖线的对比也可以看到,其成像分辨率与加入随机相位板后的IDHAO系统相当。因此由图4和图5可以得出结论:在相同的湍流像差条件下,编码孔径非相干数字全息成像系统校正湍流像差的能力比起经典IDHAO系统有较大提升,并且其分辨率与加入随机相位板后的IDHAO系统基本相同。

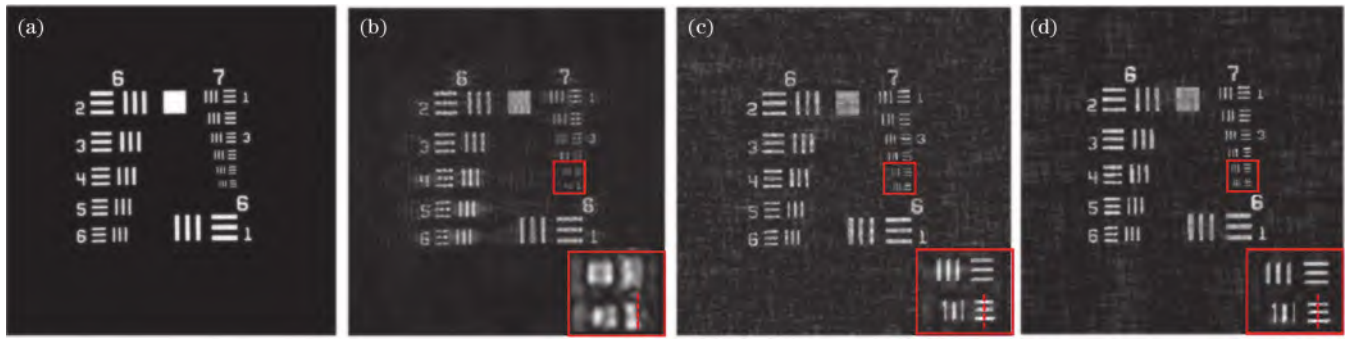


图4 重建结果对比。(a)成像目标;(b) IDHAO系统的重建像;(c)加入随机相位板后 IDHAO 系统的重建像;(d)双编码孔径非相干数字全息成像系统的重建像

Fig. 4 Comparison of reconstruction results. (a) Imaging target; (b) reconstructed image from IDHAO system; (c) reconstructed image from IDHAO system incorporating a random phase plate; (d) reconstructed image from dual-coded aperture incoherent digital holographic imaging system

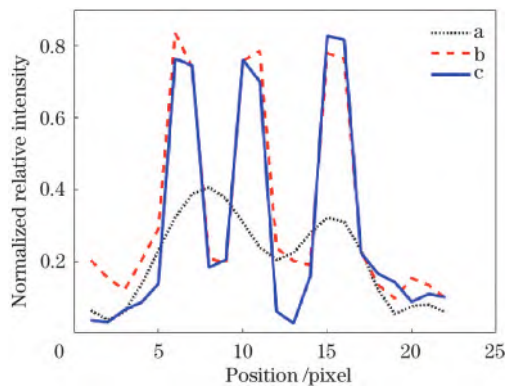


图5 重建结果的强度曲线对比(曲线 a: IDHAO 系统; 曲线 b: 加入随机相位板后 IDHAO 系统; 曲线 c: 双编码孔径非相干数字全息成像系统)

Fig. 5 Comparison of intensity curves for the reconstruction results (curve a: IDHAO system; curve b: IDHAO system incorporating a random phase plate; curve c: dual-coded aperture incoherent digital holographic imaging system)

为了对比所提方法校正湍流像差成像的效果,分别计算了在相同湍流设置情况下,传统光学系统通过湍流像差直接成像和使用所提方法校正湍流像差两种情况下系统的调制传递函数(MTF),其中所提方法校正湍流像差后的 MTF 通过点全息图的自相关函数获得,如图 6 所示。可见所提方法校正湍流像差后,系统 MTF 有明显提升,说明该方法能够校正湍流像差,提高成像质量。

为了进一步验证编码孔径非相干数字全息成像系统在校正大气湍流像差方面的性能,使用数值模拟方法分析了不同大气湍流像差影响下系统的成像效果。设置望远镜光学系统的口径为 1 m,在大气湍流相干长度 r_0 分别为 0.15、0.10、0.05 m 的情况下(工作波长为 633 nm),系统的重建结果及其局部强度剖线的对比如图 7 所示。可以看到,在不同相干长度的大气湍流下,该系统对同一目标的成像结果保持着良好的清晰

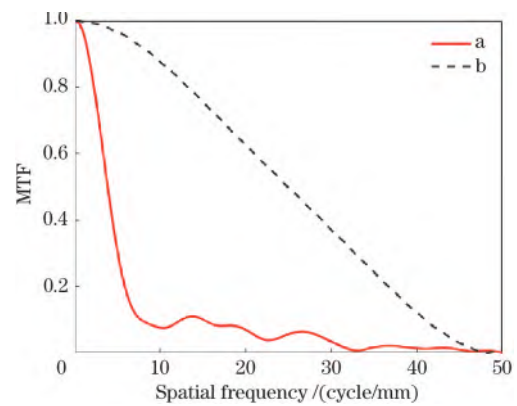


图6 MTF 曲线对比(曲线 a: 传统成像光学系统; 曲线 b: 双编码孔径非相干数字全息成像系统)

Fig. 6 MTF curve comparison (curve a: conventional imaging optical system; curve b: dual-coded aperture incoherent digital holographic imaging system)

度,未出现显著的差异。这表明,编码孔径非相干数字全息成像系统在校正不同程度的大气湍流像差方面同样有效。

上述数值模拟的结果表明,含有大气湍流像差的物光波经过两个编码孔径相位板的相位调制后,传感器上的光强呈现出两个类似随机散斑的强度分布,其相减所得到的点全息图的自相关函数接近 δ 函数。通过点全息图和物全息图的相关运算,可以同时实现全息图的重建和湍流像差的校正。相比 IDHAO 系统,编码孔径非相干数字全息成像系统不仅能够通过单次曝光获得点全息图或物全息图,其成像的空间分辨率也与加入随机相位板后的 IDHAO 系统相当。同时,与传统光学系统相比,双编码孔径非相干数字全息成像系统能有效缓解湍流影响,并在不同强度的大气湍流条件下均表现出良好的成像效果。

4 实验验证

在实验室中搭建了编码孔径非相干数字全息成像系统进行实验验证,实验光路如图 8 所示。该系统使

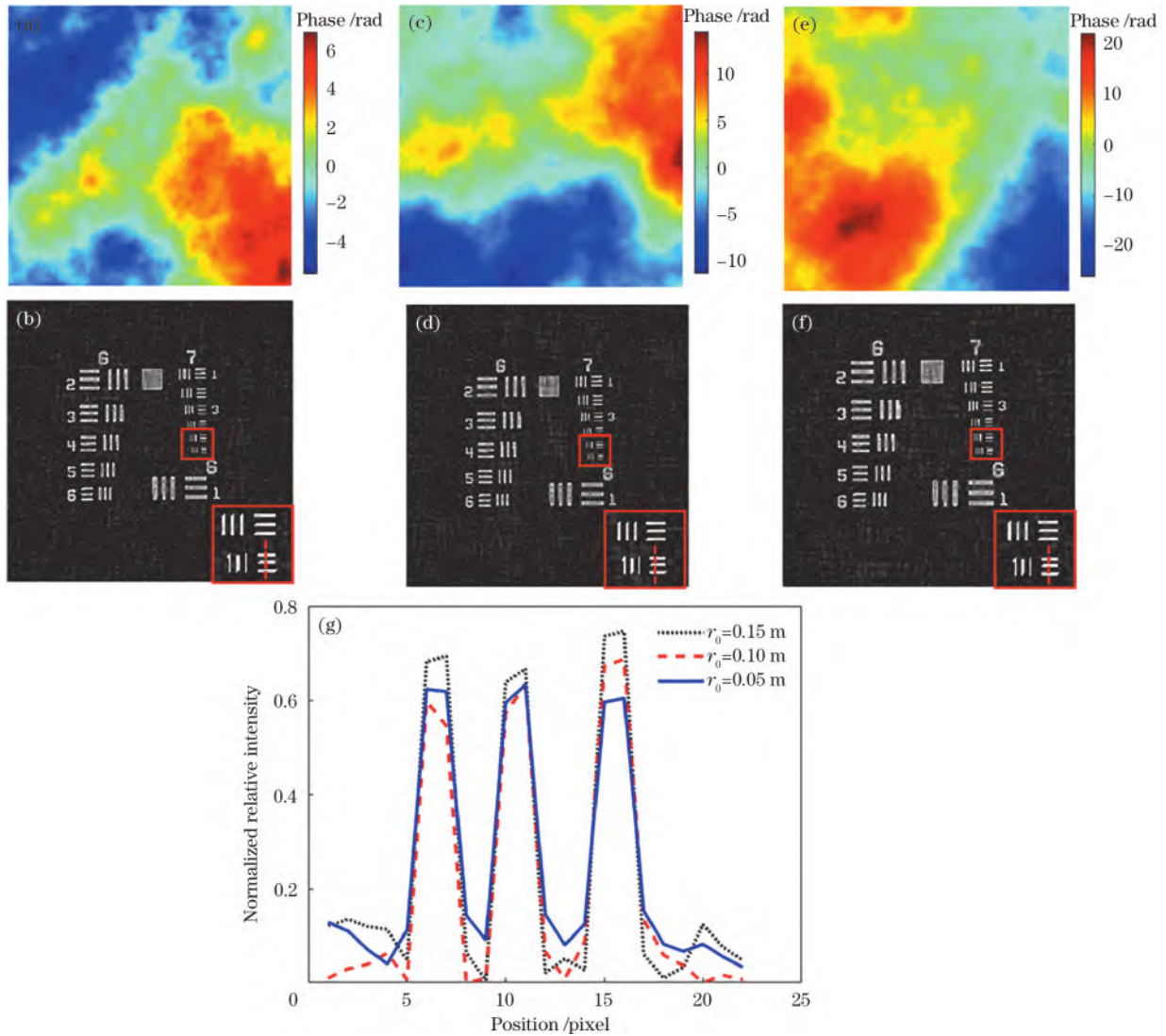


图7 不同大气相干长度 r_0 下的成像结果。(a)(c)(e)为 $r_0=0.15$ 、 0.10 、 0.05 m 时的相位分布；(b)(d)(f)为(a)(c)(e)对应的重建像；(g)强度曲线对比
 Fig. 7 Imaging results under different atmospheric coherence lengths r_0 . (a), (c), and (e) are the phase distributions when $r_0=0.15$, 0.10 , 0.05 m, respectively; (b), (d), and (f) are the reconstructed images corresponding to (a), (c), and (e), respectively; (g) comparison of intensity curves

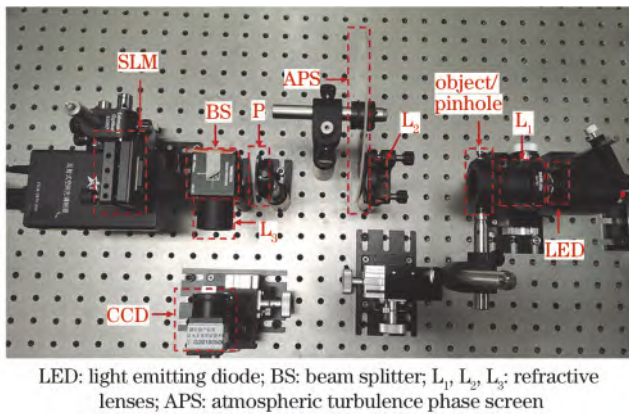


图8 实验光路照片

Fig. 8 Photograph of the experimental optical path

用中心波长为 620 nm 的 LED(大恒光电 GCI-060401, 3 W, $\lambda=620$ nm, $\Delta\lambda=10$ nm)作为非相干光源,光经过

透镜 L_1 聚焦后照射到针孔或目标物体上。实验中采用的针孔直径为 $20 \mu\text{m}$, 目标物体为 USAF1951 透射式分辨率板的一部分。从针孔或者物体衍射出的光被透镜 L_2 收集并准直, 并通过大气湍流相位板(相位板的具体参数见参考文献[26])。通过调整偏振片 P 使入射光的偏振方向与 SLM(中科微星 FSLM-2K70-P02, 反射式, 相位调制, $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 分辨率, $8.0 \mu\text{m}$ 像素间距)的液晶光阀方向保持一致。SLM 上加载有两个并列放置的编码孔径相位板, 每个相位板尺寸为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。图像传感器 CCD (Thorlabs DCC3260M, $1936 \text{ pixel} \times 1216 \text{ pixel}$ 分辨率, $5.86 \mu\text{m}$ 像素间距, 41.0 frame/s 最大帧率)放置在距离 SLM 约 150 mm 处, 为提高采集图像的对比度, 在 CCD 和分光镜之间放置了一个焦距为 100 mm 的透镜 L_3 。经 SLM 调制并反射的光通过透镜 L_3 后成像于

CCD。不统计实验光路中目标和湍流像差模拟部分,编码孔径非相干数字全息实验系统仅包括偏振片、分光镜、SLM、透镜和 CCD 相机各 1 个,整个实验光路成本不到 8 万元。而且由于在实验过程中 SLM 产生的相位是固定不变的,实际应用时可以将提前设计好的相位分布刻蚀在玻璃板上制成编码孔径相位板,代替 SLM 和偏振片,进一步降低系统的成本。

实验时首先使用针孔,采集通过湍流和实验光路的光强分布;然后把针孔换成目标物体,采集目标物体在 CCD 上形成的光强分布。在实验过程中单幅图像的曝光时间约为 25 ms,经过两次曝光完成图像采集工作。图 9(a)和图 9(c)分别展示了 CCD 记录的针孔和目标物体的光强分布。使用计算机从每幅图像中提取出对应的两个光强分布,并对其进行差值运算,得到如图 9(b)和图 9(d)所示的点全息图和物全息图。对物全息图与经过相位滤波处理的点全息图进行相关运算,以实现目标物体的重建。经测算,在个人计算机[处理器: Intel(R) Core(TM) i5-9400F CPU@2.90 GHz;内存: 16.0 GB;操作系统: Windows 11, 64 bit]上对采集到的光强图像进行运算和全息图重建所用的总时间约为 20 ms。如果设计专门的高速图像处理电路进行运算,全息图重建速度会更快。

图 10(b)展示了经过编码孔径非相干数字全息成

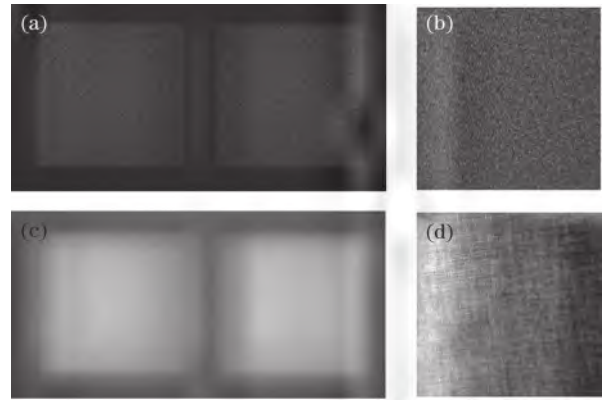


图 9 全息图采集。(a)针孔在传感器上的光强;(b)点全息图;(c)目标物在传感器上的光强;(d)物全息图
Fig. 9 Hologram acquisition. (a) Light intensity at the sensor with a pinhole; (b) point hologram; (c) light intensity at the sensor with the target object; (d) object hologram

像系统重建的目标图像,而图 10(a)为利用相同口径的光学成像系统通过相同的大气相位板对目标直接成像的结果。从两者的对比中可以明显看出,由于大气湍流的影响,直接成像结果模糊不清,而通过所提方法获得的全息图重建像保持了良好的清晰度和质量。图 10(c)展示了图 10(a)和图 10(b)中图像的局部强度剖面,可以看出,编码孔径非相干数字全息成像系统有效克服了湍流像差带来的模糊影响,分辨能力显著提升。

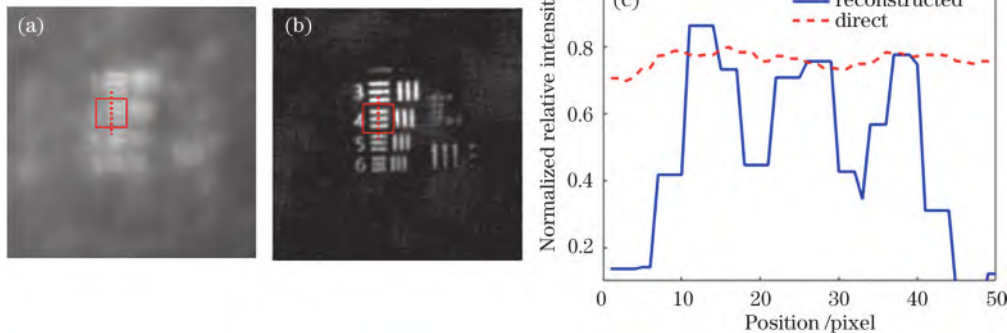


图 10 成像结果对比。(a)传统光学系统经过湍流直接成像;(b)编码孔径非相干数字全息成像系统的重建像;(c)虚线处的强度曲线
Fig. 10 Comparison of imaging results. (a) Direct imaging through turbulence using a traditional optical system; (b) reconstructed image of coded aperture incoherent digital holographic imaging system; (c) intensity curve along the dashed line

5 结 论

本文提出了一种利用双编码孔径相位板对含有湍流像差的波前进行校正的非相干数字全息成像方法。该方法将两块伪随机相位板采集的图像合并成双极点全息图,能够在一次曝光中获得校正像差和恢复图像所需的点全息图或物全息图,省去了 IDHAO 系统的相移和干涉过程,大大提高系统的时间分辨率。相关数值模拟和实验验证表明,该编码孔径非相干数字全息成像系统能够有效校正由湍流引起的像差,实现清晰成像,进一步推动了非相干数字全息成像技术在湍

流像差校正领域的发展。目前,该方法在准单色光(带宽约为 10 nm)照明条件下进行了相应的理论分析和实验验证,证明了该技术的可行性和有效性。该技术的发展成熟不仅可以为天文单色成像观测提供新的技术手段,降低天文成像观测的成本,还可以广泛应用于生物医学成像、空间目标探测等多个领域。由于实际相位元件对不同波长光的折射率差异,会产生不同的相位差。因此在宽带成像中,相位元件的色差会影响全息图重建效果和清晰度。如何消除相位元件色差的影响是该技术进一步发展所面临的重要问题和未来研究的方向之一。

参 考 文 献

- [1] Wang A, Zhu J F, Wu J G, et al. Compressed computational imaging based on optical differentiation[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(24): 6988-6991.
- [2] 黄郑重, 曹良才. 数字全息与定量相位成像: 进展与展望(特邀)[J]. *光子学报*, 2024, 53(9): 0911001.
Huang Z Z, Cao L C. Digital holography and quantitative phase imaging: advances and prospects (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(9): 0911001.
- [3] Bacca J, Martinez E, Arguello H. Computational spectral imaging: a contemporary overview[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2023, 40(4): C115-C125.
- [4] Rangarajan P V, Faccio D, Lee S A, et al. Computational optical sensing and imaging: introduction to the feature issue[J]. *Optics Express*, 2024, 32(10): 17255-17259.
- [5] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. *Applied Physics Letters*, 1967, 11(3): 77-79.
- [6] 林星羽, 于瀛洁. 计算成像技术在光学检测领域的研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(10): 1-12.
Lin X Y, Yu Y J. Research progress of computational imaging in the field of optical measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(10): 1-12.
- [7] 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.
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.
- [8] Yanagawa T, Abe R, Hayasaki Y. Three-dimensional mapping of fluorescent nanoparticles using incoherent digital holography[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3312-3315.
- [9] Tahara T, Koujin T, Matsuda A, et al. Incoherent color digital holography with computational coherent superposition for fluorescence imaging[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): A260-A267.
- [10] Kim M K. Full color natural light holographic camera[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9636-9642.
- [11] 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.
- [12] Naik D N, Pedrini G, Takeda M, et al. Spectrally resolved incoherent holography: 3D spatial and spectral imaging using a Mach-Zehnder radial-shearing interferometer[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1857-1860.
- [13] Bulbul A, Rosen J. Super-resolution imaging by optical incoherent synthetic aperture with one channel at a time[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1172-1181.
- [14] Kashter Y, Vijayakumar A, Rosen J. Resolving images by blurring: superresolution method with a scattering mask between the observed objects and the hologram recorder[J]. *Optica*, 2017, 4(8): 932-939.
- [15] Kim M K. Adaptive optics by incoherent digital holography[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2694-2696.
- [16] Man T L, Wan Y H, Yan W J, et al. Adaptive optics via self-interference digital holography for non-scanning three-dimensional imaging in biological samples[J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(6): 2614-2626.
- [17] Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel holography[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 912-914.
- [18] Kim M K. Incoherent digital holographic adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(1): A117-A130.
- [19] 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.
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.
- [20] Jang C, Kim J, Clark D C, et al. Holographic fluorescence microscopy with incoherent digital holographic adaptive optics[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, 20(11): 111204.
- [21] 李顺, 王地, 陆彦婷. 一种提高数字全息自适应光学系统成像分辨率的方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0709001.
Li S, Wang D, Lu Y T. Method for improving imaging resolution of digital holographic adaptive optical system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0709001.
- [22] Li S H, Kner P. Self-interference digital holography with computational aberration correction[J]. *Optics Express*, 2024, 32(20): 35406-35418.
- [23] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from images and diffraction plane pictures[J]. *Optic*, 1972, 35: 237-250.
- [24] Rai M R, Vijayakumar A, Rosen J. Single camera shot interferenceless coded aperture correlation holography[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3992-3995.
- [25] Horner J L, Gianino P D. Phase only matched filter[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(6): 812-816.
- [26] 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.