

非相干相关数字全息术:原理、发展及应用

王玉红*, 刘超, 满天龙, 菅孟静, 马腾, 张沁, 秦怡

北京工业大学理学部物理与光电学院, 北京 100124

摘要 全息术最初被设定为一种相干成像技术,通过物光和参考光干涉形成全息图,对全息图进行重建可以实现三维成像和物信息的获取。全息图记录过程要求物体上任意两点的光场具有空间互相干性,这一特性限制了全息术在非相干光领域的应用。空间非相干光的普遍存在和易获取等优点,使得非相干全息术的提出和发展具有重要意义。非相干全息术源于 20 世纪 60 年 Mertz 和 Young 提出的菲涅耳波带片编码成像理论,是指在空间非相干光照明情形下利用某种编码孔径对图像进行变换,实现全息图记录和再现的技术。Lohmann 把这一技术进一步发展基于分波技巧的干涉成像技术(源于同一物点的物光和参考光相干涉),实现了非相干物体的波前再现,从而明确了非相干全息记录过程中物光场中任意两点之间的互相干不再是全息图记录的必要条件。经过几十年的发展,科研人员利用非相干全息术在全息图的记录机制、重建算法、成像性能提升和应用等方面都取得了显著成果。本文聚焦于阐明空间非相干光情形下基于编码相位掩模波前调制的自干涉或无干涉数字全息术的成像原理及其演化技术的发展和應用,并在此基础上探讨该技术下一步的发展和有潜力的研究方向。

关键词 成像系统; 数字全息; 非相干全息; 互相关重建; 三维成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811004

Incoherent Correlation Digital Holography: Principle, Development, and Applications

Wan Yuhong*, Liu Chao, Man Tianlong, Jian Mengjing, Ma Teng, Zhang Qin, Qin Yi
School of Physics and Optoelectronics, Faculty of Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract According to D. Gabor's proposal, holography is a coherent imaging technique where the object's three-dimensional information is first recorded and then reconstructed from the hologram that obtained through the interference of object and reference beams. The coherence of light originating from any two points on the object is required for holographic techniques. However, this requirement on spatial coherence prevents holography from being used in incoherent light applications. Indeed, the development of incoherent holography is important because the incoherent light sources widely exist and are easy to obtain in nature compared with the laser source. Mertz and Young first proposed Fresnel-zone-plate coded imaging technique with incoherent illumination and explained their methodology according to holographic theory. Lohmann further presented wavefront retrieval of incoherent objects based on the skills of beam split and self-interference of an object beam and a same originated reference beam, thereby forming the academic idea of incoherent holography. The spatial coherence is no longer necessary in incoherent holography since using specific beam splitting skills to form the hologram of incoherent illuminated or self-luminous objects by the interference of two beams that originated from the same point. In the past few decades, enormous efforts have been addressed to develop the basic principle and reconstruction algorithms and improve imaging performances and applications of incoherent holography. This review focuses on demonstrating the basic concept and applications of various incoherent coded aperture correlation digital holography techniques, with or

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-08-15; 录用日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(61575009)、北京市自然科学基金(4182016)

通信作者: *yhongw@bjut.edu.cn

without a two-beam interference, to provide a clear picture of recent progress in incoherent holography. We also discussed the main challenges and limitations of existing methods and potential directions in which efforts can be made to advance incoherent research holography.

Key words imaging systems; digital holography; incoherent holography; cross-correlation reconstruction; three-dimensional imaging

OCIS codes 090.1995; 110.1758; 100.1830; 100.3010; 100.6890

1 引言

光学成像技术由来已久,我国早在两千多年前就已经开始对成像技术进行研究。墨子和他的学生做了世界上最早的小孔成像实验,并对实验结果进行了精辟的解释。光学成像技术作为人类观察探测世界的工具,一直是科学研究的热点之一。从二维成像到三维成像,再到多维成像,从受限于衍射极限的传统显微成像到突破衍射极限的超分辨显微成像,从对静态样品的长时间扫描成像到对动态样品的实时快速成像等,光学成像技术一直在不断革新和突破,并在许多应用领域发挥着重要的作用。空间非相干光源的普遍存在和易获取等优点,使得基于此类光源的非相干成像技术具有更广泛的需求,从而得以不断的研究及发展。

基于小孔成像原理发展而来的 X 射线相机在天文学领域得到了广泛的应用,但是由于针孔集光能力弱,其对遥远星体成像的应用受限。Mertz 和 Young^[1]把 X 射线相机的针孔替换为一个菲涅耳波

带片(Fresnel zone plate, FZP),并将菲涅耳波带片作为编码孔,在待测星体经过编码孔径后,在探测平面得到相应波带片的投影,将这些菲涅耳波带片按强度叠加所形成的图样记录下来,再通过适当的方法进行重建,从而得到待测星体的像。Mertz 和 Young 将这一成像方法称为图像的菲涅耳变换(记录过程如图 1(a)所示),并进一步利用 Rogers^[2]的理论解释了这一成像过程。他们指出在非相干光照照明物体的情形下,将一个菲涅耳波带片作为编码孔,构成物体的所有点通过这个编码孔进行适当变换,在记录平面得到这些变换后图像的叠加图样,这一图样也被称为全息图,它以独特的方式编码了物体强度(振幅)信息和三维位置信息。通过适当的解码方式(例如记录过程的逆变换)就可以重建全息图,从而实现原始物体三维成像。图 1(b)所示为 Mertz 和 Young 当时的实验结果,实验时用不透明屏上的多个针孔类比于待测星体,并利用可见光来记录全息图。考虑到抑制全息图再现时会出现噪声,图 1(c)给出了利用分离焦点的方法进行全息图再现时的光路图。



图 1 菲涅耳变换和重建图像^[1]。(a)全息图的记录示意图(X射线相机原理);(b)实验记录的全息图(左)和重建像(右下);(c)全息图重建时的光路图

Fig. 1 Images of Fresnel transformation and reconstruction^[1]. (a) Schematic of the recording of hologram (X-ray star camera); (b) hologram recorded by the experiment (left) and reconstruction image (lower right); (c) light-path of the hologram reconstruction

丹尼斯·伽伯(D. Gabor)^[3]在提出全息术之初就把全息术设想为相干成像的一种手段,参与干涉的两束光波具有空间互相干性是实现全息图记录的必要条件。利用光的干涉记录物体完整的波前信息(振幅和相位),利用光的衍射实现原始物信息的三维重建。相比较而言,Mertz 和 Young 的方法首次

将全息术拓展到非相干光领域,物光场中任意两点发出的光波的空间互相干性不再是必要条件。成像系统的光源可以是空间非相干光,因此这一技术也被称为非相干全息术。Mertz 和 Young 的建议是非常有意义的,因为相较于相干光,非相干光在实践中更普遍、更容易获取。从 Mertz 和 Young 的实验

结果可以看出,全息图和再现像的质量均较差。出现这一结果的原因之一是 Mertz 和 Young 的理论是基于几何光学的投影,并未考虑光波的衍射,当实验中采用可见光作为信号源时,不可避免地会发生衍射效应。

Lohmann^[4]进一步发展了非相干全息术的理论,突破了基于菲涅耳波带片投影编码孔径成像的理论机制局限,提出了非相干物体或自发光物体的波前重建方法。Lohmann 的基本思想是利用适当的光学分波技巧,将物体上每一点发出的光波分成两束,源于同一物点的两束光由于具有空

间自相干性而干涉产生全息图,不同物点产生对应的全息图,所有点源的全息图按强度非相干叠加得到物体的全息图。根据 Lohmann 的观点,分波技术是实现非相干全息记录的关键,他在已发表的论文中阐明了几种主要的分波方式,包括采用双焦距透镜的分振幅法[图 2(a)]、采用菲涅耳波带片的分振幅法[图 2(b)]、采用双孔径或其他元件的分波前法[图 2 中(c)、(d)]。当然,利用迈克耳孙干涉仪、马赫-曾德尔干涉仪等光路配置也可以实现期望的分波,记录非相干光照明下物体的全息图。

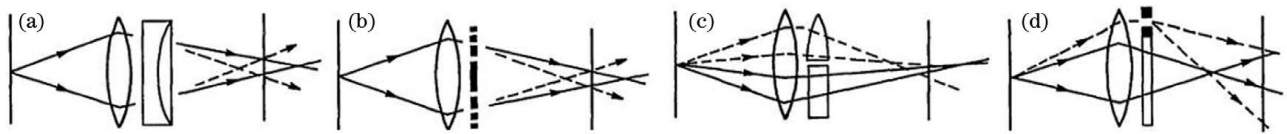


图 2 非相干全息分波方式示意图^[4]。(a)采用双折射透镜的分振幅法;(b)采用菲涅耳波带片的分振幅法;(c)采用透镜和玻璃平板的双孔径分波前法;(d)采用针孔和玻璃平板的双孔径分波前法

Fig. 2 Schematic of incoherent holographic wave splitting mode^[4]. (a) Amplitude beam splitting by means of a birefringent double-focus lens; (b) beam splitting by diffraction on a Fresnel zone plate; (c) beam splitting by division of aperture, one half of which is covered by a lens, the other half by a plane plate for compensation of thickness; (d) beam splitting by division of aperture, which is divided into unequal portions

无论是分波前还是分振幅的方式,只要保证是对同一波前进行操作,即分开的两束光源于同一物点,则两束光波可以互相干涉形成点源全息图,所有点源全息图叠加就可以得到物体的全息图。参与干涉的两束光波的波面形状决定了所生成的点源全息图是否具有菲涅耳波带片的形式。Cochran^[5]随后发展了一种基于三角干涉光路的非相干菲涅耳全息成像方法。Stroke 和 Restrick^[6]提出一种利用空间非相干光照明傅里叶变换全息图的记录和重建方法。Leith 等^[7]提出了一种采用光栅分波的非相干全息成像方法。尽管这些方法中使用了不同的光学成像技术或元件对样品发出的光波进行分割,但是其非相干全息术的原理是一致的。至此,非相干全息术的学术思想基本成型。

综上,非相干光源照明的物体或者自发光物体上的任意一点发出的光波经过某种光学技巧分为两束,这两束同源的光波可以干涉形成点源全息图。物体上每一个点源经过这样的过程可以产生一个二维干涉图样的强度分布,将对应物点的强度和三维位置信息编码于对应干涉图样的条纹对比度、中心位置、条纹的形状和疏密程度。因为编码方式是独特的,所以不会有两个物点产生相同的条纹,从而可以从全息图再现得到原始物体的三维信息,实现三

维成像。需要强调的是,非相干全息光源还需要保证具有一定的单色性,以保证光场的时间相干性,这一点可以通过波长窄带滤波的方式使光源近似为准单色光来实现。

非相干全息术早期存在的主要局限在于菲涅耳波带片或其他形式的点源全息图强度叠加,导致记录的物体全息图(object hologram, OH)中含有较强的直流偏置。当物体结构复杂时,直流偏置的存在会降低全息图的调制度和信噪比,极大地影响重建图像的质量,因而限制了该技术的实际应用。为了解决这一问题, Kim 等^[8-12]对 Cochran^[5]提出的三角全息术进行优化,引入了相移技术对直流偏置进行抑制以提高重建图像的信噪比,并对系统的成像分辨率和光学传递函数等参数进行分析。但是,由于记录介质的灵敏度和动态范围等性能参数的限制,非相干全息术在发展初期还难以实现对复杂样品的高质量成像。

随着光电子技术、图像处理技术的快速发展,以及光电器件的升级换代,数字全息术得以提出和发展,也涌现出多种不同的记录非相干数字全息图的方法。扫描全息术利用一个随时间变化的菲涅耳波带片(time-dependent Fresnel zone plate, TD-FZP)对三维物体的不同二维层面进行扫描,通过 TD-

FZP 与物体的相关性实现了全息图的记录和重建^[13]。根据扫描全息术的原理,该技术既可以作为一种相干成像技术,也可以作为一种非相干成像技术,其最大的贡献就是与荧光显微技术结合,首次实现了荧光全息图的记录和荧光样品的三维显微成像^[14-15]。扫描全息显微术在近几年的研究中取得了一系列的进展,其横向分辨率可以达到亚微米^[15-16]。然而,扫描全息显微术需要对样品进行二维横向扫描,且扫描过程通过机械运动装置来实现,数据采集速度相对较慢。基于多角度投影的方法也可以实现空间非相干光情形下全息图的记录和成像^[17-18],但该技术和扫描全息术一样,并不是基于空间光干涉的思想,所以在本文中不再赘述。

2007 年 Rosen 等^[19]提出了菲涅耳非相干相关全息(Fresnel incoherent correlation holography, FINCH)技术,随后将这一技术用于荧光显微成像,实现了非扫描的荧光样品全息图的记录和再现^[20]。图 3 为 FINCH 的全息图记录原理示意图,图 4 为基于 FINCH 技术的非扫描荧光显微成像系统示意图。FINCH 技术利用在空间光调制器(spatial light modulator, SLM)上加载相位掩模的方式进行衍射分光和相移,实现非相干全息图的记录,并通过数值计算来重构原始物体的三维信息。该技术将物点的深度信息通过菲涅耳波带片的条纹疏密程度来编码,横向信息通过条纹图样的横向位置直接体现,不需要借助于任何扫描装置和移动部件就可以记录样品的三维信息。

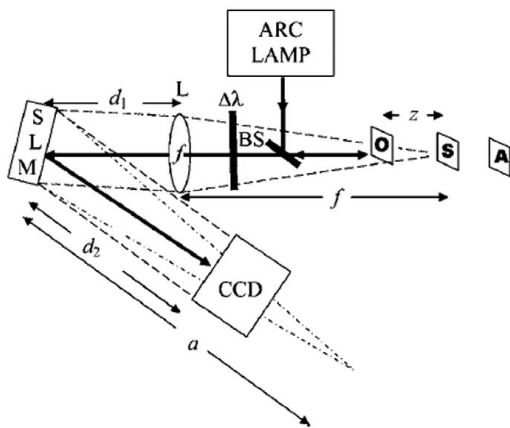


图 3 FINCH 全息记录原理示意图^[19]

Fig. 3 Schematic of FINCH recorder ($f=25$ cm, $\Delta\lambda=60$ nm)^[19]

作为一种空间非相干光情形下的干涉成像技术,FINCH 以其非扫描三维成像的优势吸引了研究人员的关注。提升 FINCH 的成像分辨率、成像质

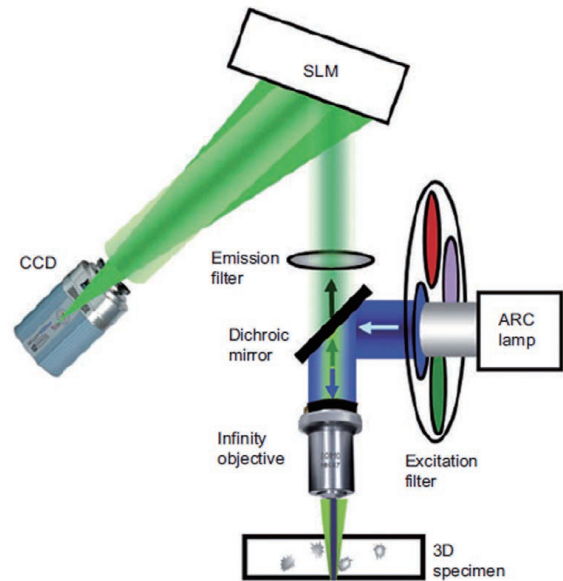


图 4 基于 FINCH 的非相干扫描荧光显微成像示意图^[20]

Fig. 4 Schematic of a motionless microscopy system based on FINCH in upright fluorescence microscopes^[20]

量和成像速度以充分发挥该技术的优势,推进其在相关领域中的应用,一直是研究的焦点。根据编码孔径相关成像的理论,除了菲涅耳变换,任何可以实现图像变换的方法只要存在逆变换都可以用来实现非相干全息图的记录和再现,也就是说点源全息图可以是菲涅耳波带片的形式,也可以是傅里叶变换的形式,还可以是其他可能的形式。基于这一思想,Vijayakumar 等^[21]提出了编码孔径相关全息(coded aperture correlation holography, COACH)技术。在 COACH 系统中,点物的衍射光波经过 SLM 加载的随机编码相位掩模(coded phase mask, CPM)调制后,与来自同一物点的未被 SLM 调制的光波进行干涉,产生该物点的全息图,并作为系统的点扩展函数(point spread function, PSF)或者点扩展全息图(point spread hologram, PSH),此时 PSH 具有类随机散斑的强度分布。利用不同轴向深度处的 PSH 编码系统深度信息,通过对应层面的 PSH 和物体全息图的互相关操作重建物体图像。2017 年,Vijayakumar 等^[22]进一步提出了无干涉编码孔径相关全息技术(interferenceless coded aperture correlation holography, I-COACH),虽然系统 PSH 仍然呈随机散斑状分布,但该技术中利用特殊设计的 CPM,不再利用分波和两波干涉来实现全息图的记录,系统结构更加简单,数据的采集及处理过程更为简便。

与采用激光光源照明的全息术或者采用其他光

源但设定为相干成像的数字全息术相比,非相干全息术的照明光源十分容易获取,而且记录过程中不会产生类似于激光全息术中固有的散斑噪声,可以有效提高再现像的质量。这些特性使非相干全息术在荧光三维成像、非相干全息三维显示、天文学等领域具有独特的应用优势。但是,非相干全息术也存在一定的局限。非相干全息术利用物光与同源的自参考光干涉实现全息图的记录,来源于同一物点的物光和参考光只是整体光波中很小的一部分,所以点源干涉条纹的强度很弱,并且具有一定的曝光偏置量。当物点增多时,所有点源全息图非相干叠加会导致形成的全息图质量降低,从而得不到良好的再现像。关于非相干全息术的研究可以归结为如何克服其局限,使该技术在相应领域发挥潜在优势而得到实际应用的基本问题。本文主要综述在空间非相干光情形下基于编码相位掩模波前调制实现自干涉或无干涉全息图记录和再现的机制、实现的技术和近年来这些技术在成像分辨率、再现像质量、应用等方面的研究进展。

2 非相干相关数字全息术的记录与再现机制

从系统的角度来看,所研究的成像系统被设定为线性空间不变。一般情形下,根据统计光学的理论,考虑到光源上任意两点间互相干强度传播到物

面上的分布,可以用来界定光学成像系统是完全相干、部分相干,还是完全非相干的情形。如果光源为有限尺寸的热光源,对于相干情形,必要条件是光源尺寸足够小,使其在物平面上产生的相干面积明显超过振幅扩散函数覆盖的面积,或者说由物体看到光源的张角明显小于由物体看成像系统入瞳的张角。对于非相干情形,必要条件是物体照明相干面积既要小于振幅扩散函数覆盖面积,又要小于物体振幅透过率函数的最小结构面积,并且对于非相干系统,还要看物函数和点扩展函数卷积后角谱的展宽,当以物体造成的最大衍射角为中心时,光源所张的半角必须至少填满成像系统入瞳所张的半角,系统可以是完全非相干的成像系统。对于自发光物体而言,物体上任意两点间不具有空间互相干性,可以认为成像系统是完全非相干系统。

对于非相干数字全息成像系统,可以通过对照明系统、成像系统的设计来保证非相干成像这一前提,则后续理论分析中需要考虑系统对光场强度的传递具有线性空间不变的特性。非相干数字全息成像系统的一般模型如图 5 所示,该系统可分为照明、记录和重建三个模块,每一个模块作为一个独立的系统都具有其自身的脉冲响应,可分别进行分析以明确系统的特性,从而得出系统的最终成像特性。对系统进行全链条式优化设计,也是提高系统成像性能的有效途径。

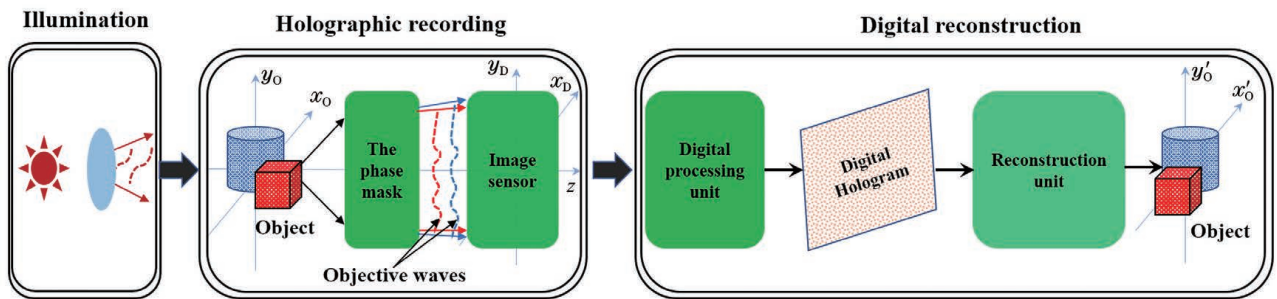


图 5 非相干相关数字全息成像系统的一般模型示意图

Fig. 5 General model schematic of incoherent correlation digital holographic imaging system

根据非相干光线性空间不变系统的输入-输出关系,在记录过程中,将探测器上得到全息图 $I(x_D, y_D)$ 作为记录模块的输出,可以用系统的输入物函数的强度 $o_1(x_0, y_0, z_0)$ 与记录系统的强度点扩展函数(脉冲响应) $h_1(x, y, z)$ 的卷积表示。记录系统

的强度点扩展函数即为当物平面上的输入为点物时得到的全息图, 本文将其称为点扩展全息图。对应于记录的过程,重建过程则是空域中的去卷积操作,实际操作中往往通过频域内的逆滤波来实现。因此,非相干相关数字全息记录和再现过程的数学描述为

$$I(x_D, y_D) = o_1(x_0, y_0, z_0) * h_1(x, y, z) + n(x, y), \quad (1)$$

$$o'_1(x'_0, y'_0) = I(x_D, y_D) \otimes h_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{I_1(u, v) H_1^*(u, v)}{|H_1(u, v)|^2} + \frac{N(u, v) H_1^*(u, v)}{|H_1(u, v)|^2} \right], \quad (2)$$

式中： $*$ 表示卷积运算； \otimes 表示相关运算； \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换函数； $n(x, y)$ 为系统成像过程中引入的噪声； $I_1(u, v)$ 、 $H_1(u, v)$ 和 $N(u, v)$ 分别对应于全息图、系统点扩展函数和系统噪声的频谱； $H_1^*(u, v)$ 为 $H_1(u, v)$ 的复共轭函数。

基于非相干相关数字全息的数学模型，可以进一步针对不同的记录机制进行具体分析。图 6 给出了 FINCH、COACH 和 I-COACH 的记录原理示意图，本文把它们统一到非相干编码孔径相关全息的理论框架进行分析。

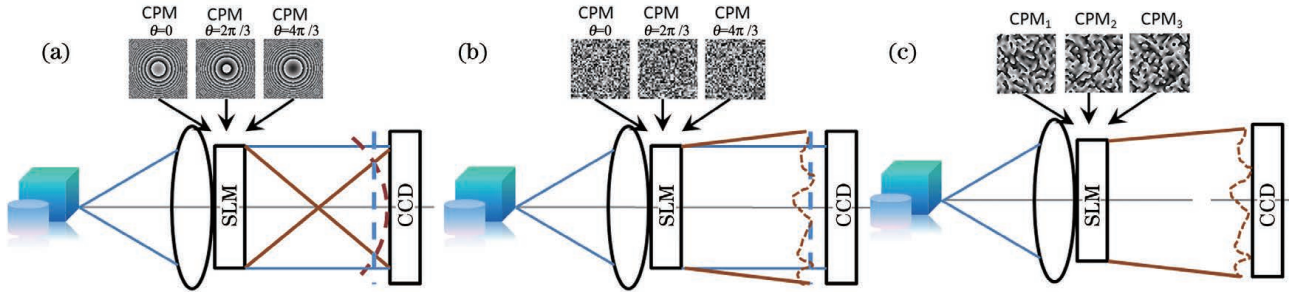


图 6 非相干相关数字全息记录机制示意图。(a) FINCH；(b) COACH；(c) I-COACH

Fig. 6 Schematic of recording mechanism of incoherent correlation digital holography. (a) FINCH; (b) COACH; (c) I-COACH

编码相位掩模在非相干全息图的记录中扮演着重要角色，直接决定了 PSH 的形式。以 FINCH 为例，源于物体上同一点的光波经过 SLM 上加载的

编码相位掩模分光，继续传播到记录平面进行干涉，记录平面 (x_D, y_D) 上得到的 PSH 具有与菲涅耳波带片的 PSH 类似的形式，其强度分布为

$$I(x_D, y_D, z) = C^2 + C^2 \cos[\varphi(x_D - x, y_D - y, z)] = C^2 + \frac{1}{2} C^2 \exp[i\varphi(x_D - x, y_D - y, z)] + \frac{1}{2} C^2 \exp[-i\varphi(x_D - x, y_D - y, z)], \quad (3)$$

式中： C^2 为一个含有物点强度信息的常量； i 为虚数单位； $\varphi(x_D - x, y_D - y, z) = \pi[(x_D - x)^2 + (y_D - y)^2]/(z\lambda)$ ，它是编码了物点深度信息以及横向位置信息的二次相位因子，物体所处的轴向深度变化将会体现在这一相位分布的变化上，其

直观表现就是点源全息图条纹的疏密程度随物体轴向位置 z 变化。由 (3) 式可知，物体的全息图为所有点源全息图的非相干叠加，可表示为物光场的强度透过率函数与点源全息图的卷积积分：

$$H(x_D, y_D) = C^2 \iiint o(x_0, y_0, z) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \exp[i\varphi(x_D - x_0, y_D - y_0, z)] + \frac{1}{2} \exp[-i\varphi(x_D - x_0, y_D - y_0, z)] \right\} dx_0 dy_0 dz. \quad (4)$$

同轴的光路配置在全息图重建过程中受到零级项和孪生项的干扰。结合相移技术，对同一物体实现多幅相移全息图的记录，构建复值全息图，是抑制再现

像中直流项和共轭项串扰的有效手段。以三步定步长相移数字全息为例，带有相移角 θ_k ($k=1, 2, 3$) 的单幅全息图的形式可表示为

$$H_k(x_D, y_D) = C^2 \iiint o(\xi_0, \eta_0, z) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \exp[i\varphi(x_D - \xi_0, y_D - \eta_0, z) + i\theta_k] + \frac{1}{2} \exp[-i\varphi(x_D - \xi_0, y_D - \eta_0, z) - i\theta_k] \right\} d\xi_0 d\eta_0 dz. \quad (5)$$

由三幅相移全息图叠加得到的复值全息图可以表示为

$$H_F(x_D, y_D) = H_1(x_D, y_D) [\exp(-i\theta_3) - \exp(-i\theta_2)] + H_2(x_D, y_D) [\exp(-i\theta_1) - \exp(-i\theta_3)] + H_3(x_D, y_D) [\exp(-i\theta_2) - \exp(-i\theta_1)] = C^2 \iiint o(\xi_0, \eta_0, z) \{ \exp [i\varphi(x_D - \xi_0, y_D - \eta_0, z)] \} d\xi_0 d\eta_0 dz. \quad (6)$$

可以看到, (6) 式所示的复值全息图中去掉了 (4) 式中的直流项 (常数项) 和孪生项 (后一个复指数函数项)。

从 FINCH 的记录机制可以看出, 虽然理论分析时将全息图的记录过程认为是物体强度与系统 PSH 的卷积, 但由于 PSH 具有明确的数学形式, 实际记录过程中并不需要单独记录系统的 PSH, 便可通过计算全息图和理论构建的 PSH 之间的卷积方式对物体进行三维重建。因此, 全息图的记录过程不需要移动系统的任何部件或任何扫描过程。但是, 为了克服同轴光路配置记录过程中存在的直流项和共轭项对重建图像的影响, 还需在全息记录过程中使用相移技术。

编码孔径相关数字全息 (COACH) 记录过程仍然要考虑两束光波的干涉, 编码相位掩模是利用 Gerchberg-Saxton (GS) 算法生成的随机相位掩模, 系统的 PSH 不再具有菲涅耳波带片的形式, 而是呈随机散斑状分布。在 COACH 记录机制中, 虽然 PSH 也编码了物点的深度信息, 但是由于 PSH 对物点所处的深度位置 z 敏感, 超过 z 的轴向相关长度变化会引起 PSH 的显著不同, 因此为了实现三维成像, COACH 技术需要记录不同 z 位置处物点的全息图来编码成像系统的深度, 建立 PSH 函数库, 并通过物函数与 PSH 函数库中不同深度处的 PSH 进行相关运算来重建不同深度处的物信息。COACH 记录机制下 PSH 的强度形式可以表示为

$$I_k(x_D, y_D) = \left| C \sqrt{A(x_0, y_0, z_s)} L\left(\frac{x_0}{z_s}, \frac{y_0}{z_s}\right) Q\left(\frac{1}{z_s}\right) Q\left(-\frac{1}{f_0}\right) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \exp [i\varphi_k(x, y) + i\theta_k] \right] * Q\left(\frac{1}{z_h}\right) \right|^2, \quad (7)$$

式中: z_s 为物体到成像系统第一个透镜的距离; z_h 为 SLM 到全图记录平面的距离; $\sqrt{A(x_0, y_0, z)}$ 为处于空间 (x_0, y_0, z_s) 点的强度; C 为复常数; $\varphi_k(x, y)$ 为由 GS 算法获得第 k 次相移对应的 CPM; $L\left(\frac{x}{z}, \frac{y}{z}\right) = \exp [i2\pi(b_x x + b_y y)/\lambda z]$; $Q(b) = \exp [-i\pi b(x^2 + y^2)/\lambda]$ 。

为了抑制同轴光路配置引入的直流项和共轭项对重建过程的影响, 在 COACH 记录过程中同样可以引入三步相移技术, 对于同一轴向深度处的物点分别记录三幅不同的相移全息图, 构建复值 PSH,

然后使物点在轴向方向移动, 记录不同深度处的 PSH, 从而建立不同深度的 PSH 函数库, 不再需要对该扩展型物体沿轴向方向进行扫描。

I-COACH 仍然采用同轴共路的记录光路配置, 但记录过程中不再考虑双波干涉。为了抑制同轴光路成像中偏置项及直流项的影响, 需要在 GS 算法中输入不同的初始相位函数进行 k 次计算, 获得 k 个独立的 CPM, 并用于记录全息图, PSH 函数库及物体全息图的记录过程与 COACH 相同, 但记录过程中不再需要在 SLM 上对 CPM 进行定步长相移。I-COACH 的 PSH 可以描述为

$$I_k(x_D, y_D) = \left| C \sqrt{A(x_0, y_0, z_s)} L\left(\frac{x_0}{z_s}, \frac{y_0}{z_s}\right) Q\left(\frac{1}{z_s}\right) Q\left(-\frac{1}{f_0}\right) \exp [i\varphi_k(x, y)] * Q\left(\frac{1}{z_h}\right) \right|^2, \quad (8)$$

式中: $\varphi_k(x, y)$ 为由 GS 算法获得的第 k 次计算对应的 CPM。

为了直观地说明几种记录机制下非相干相关数字全息术的基本成像特性, 仿真生成了相同数值孔径的 FINCH、COACH 和 I-COACH 系统的 PSH。图 7 所示为三种记录机制下利用三步相移技术生成

的 PSH。在 FINCH 和 COACH 记录过程中, 需要利用 SLM 在编码相位掩模上进行定步长的整体相移, 分时曝光、记录三幅具有不同相移的全息图; 而在 I-COACH 的 PSH 的生成过程中, 利用 GS 算法生成三幅具有不同初始相位的 CPM, 分别用来记录三幅全息图。从图 7 可以直观地看到不同记录机制

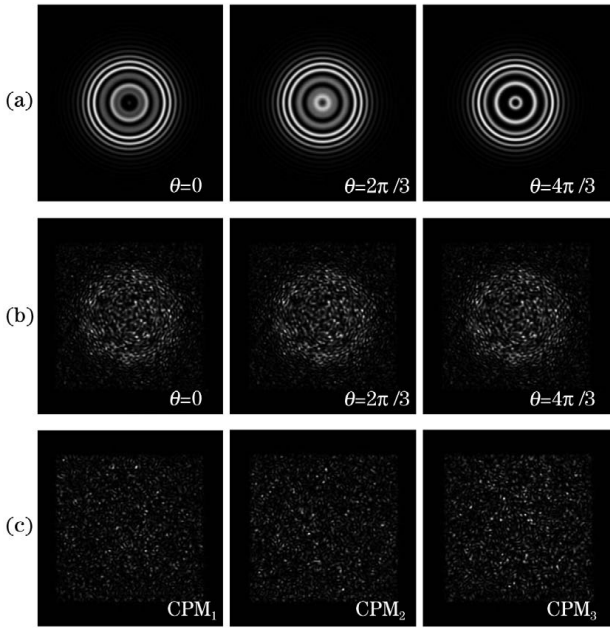


图 7 FINCH、COACH、I-COACH 系统记录的具有不同相移值的 PSH。(a) FINCH; (b) COACH; (c) I-COACH

Fig. 7 PSH with different phase-shift values obtained by FINCH, COACH, and I-COACH system, respectively. (a) FINCH; (b) COACH; (c) I-COACH

下点源全息图的分布形式。在 FINCH 记录机制下,系统的 PSH 具有菲涅耳波带片的形式,而 COACH 和 I-COACH 的 PSH 不再具有菲涅耳波带片的形式。系统点源全息图的形式由成像系统相位编码掩模的形式决定,而 PSH 特性也对不同记录机制的非相干数字全息成像系统的成像特性有直接的影响。

数字全息图的重建作为记录过程的逆运算,在空域操作中是一个去卷积的过程,也可以是在频域里进行逆滤波的处理。但是,受到全息图记录机制的变化,三维信息编码的方式,系统引入的噪声等

因素的影响,全息图的重建算法需要考虑相关因素的影响,从而进行与记录机制相洽的操作,以获得质量良好的重建图像。FINCH 技术所记录的 PSH 具有菲涅耳波带片的形式,可通过计算全息图菲涅耳衍射方式模拟衍射传播的过程进行重建,如(9)式所示;也可以通过计算物体全息图与系统 PSH 的相关性来再现,如(10)式所示。某一再现距离 z_r 处的物体再现像 $o'(x', y')$ 通过衍射积分及互相关方法计算得到,公式分别为

$$o'(x'_0, y'_0, z_r) = H_F(x_D, y_D) * \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda z_r}(x'^2 + y'^2)\right], \quad (9)$$

$$o'(x'_0, y'_0, z_r) = I(x_D, y_D, z_r) \otimes H_F(x_D, y_D), \quad (10)$$

式中: $I(x_D, y_D, z_r)$ 为 FINCH 系统的 PSH,其形式可以由(3)式给出。

图 8 所示为 FINCH 三步相移记录的点源全息图通过衍射传播重建、互相关重建和结合相位滤波的互相关重建的结果。图 9 给出了对应于图 8 中点源重建像中心截面的强度分布曲线。从图 8 和图 9

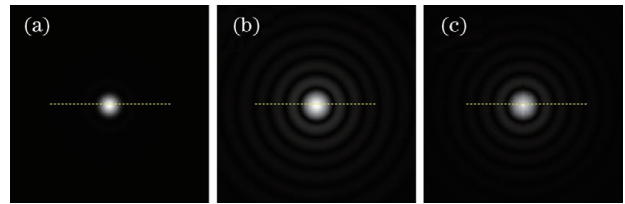


图 8 利用不同重建方法得到的 FINCH 点源全息图的重建图像。(a)衍射重建;(b)互相关重建;(c)相位滤波互相关重建

Fig. 8 Reconstructed images of hologram of point source in FINCH. (a) Diffraction reconstruction; (b) cross-correlation correlation reconstruction; (c) cross-correlation reconstruction with phase filtering

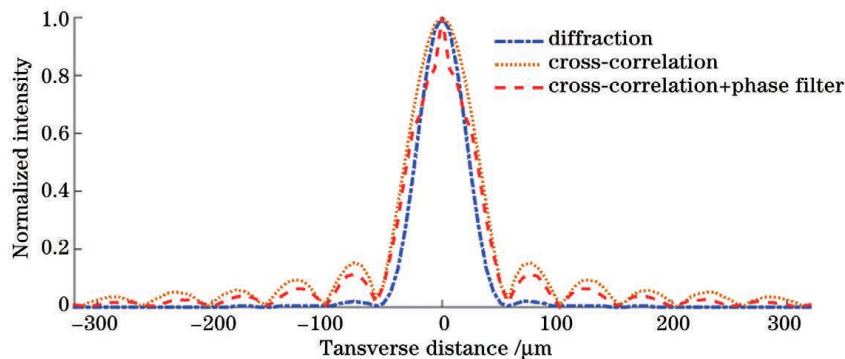


图 9 利用不同重建方法获得的 FINCH 点源再现像中截面强度分布曲线

Fig. 9 The intensity distribution curves of reconstruction images of point source in FINCH system by different reconstruction methods

可以看出,衍射传播重建和互相关重建方法的结果基本一致,重建过程中采用适当的滤波方式可以有效提升重建像图像的质量。

COACH 和 I-COACH 系统具有类似的重建方

法。通过相移获得物体的复值全息图,该全息图与不同轴向位置的复值 PSH 互相关重建该层面物体像,得到一系列不同层面的像,可构建原始物体的三维像。因此,重建像可以描述为

$$O_{re;i} = H_{F,psih;j}(x_D, y_D) \otimes H'_{F,oh}(x_D, y_D) = \mathcal{F}^{-1} [\mathcal{F}_{F,oh}(x_D, y_D) \cdot \mathcal{F}'_{F,psih;j}(x_D, y_D)] = \mathcal{F}^{-1} \{ |\mathcal{F}_{F,oh}| \exp\{i \cdot \arg[\mathcal{F}_{F,oh}(x_D, y_D)]\} \exp\{-i \cdot \arg[\mathcal{F}_{F,psih;j}(x_D, y_D)]\} \}, \quad (11)$$

式中: $H_{F,psih;j}$ 、 $H_{F,oh}$ 分别为第 j 层点物复值全息图和物体复值全息图; $\mathcal{F}_{F,psih;j}$ 和 $\mathcal{F}_{F,oh}$ 分别为 $H_{F,psih;j}$ 和 $H_{F,oh}$ 的傅里叶变换函数。

在 I-COACH 中,由于 CCD 记录的点物强度响应及物体强度响应 $I_{obj,k}(x_D, y_D)$ 和 $I_{psih,k}(x_D, y_D)$ 都为正的实值函数,互相关重建产生严重的背景噪声。为了减小重建像背景噪声,将 $I_{obj,k}(x_D, y_D)$ 和 $I_{psih,k}(x_D, y_D)$ 投影到复值域,采用三步相移的方式获得 PSH 和物体的复值全息图,因此 COACH 与 I-COACH 在复值全息图的获取方式上有所区别。I-COACH 中 PSH 和物体的复值全息图分别表示为

$$H_{F,psih}(x_D, y_D) = \sum_{k=1}^K I_k(x_D, y_D) \exp(i\theta_k), \quad (12)$$

$$H_{F,oh}(x_D, y_D) = \sum_{k=1}^K I_{obj,k}(x_D, y_D) \exp(i\theta_k), \quad (13)$$

式中: K 为相移的次数。将(12)、(13)式代入(11)式即可得到对应层面的重建像。基于上述 FINCH、COACH 和 I-COACH 的记录和再现机制的数学模型,图 10 给出了相同数值孔径下三种记录系统的点

物全息图的再现像及其强度分布曲线,图 11 给出了三种记录机制下轴向 100 mm 范围内 PSF 的分布情况。从仿真结果可以看到,FINCH、COACH 及 I-COACH 尽管记录的点源全息图类型不同,但这几类非相干全息成像系统 PSH 的再现像光场强度分布并无明显区别。

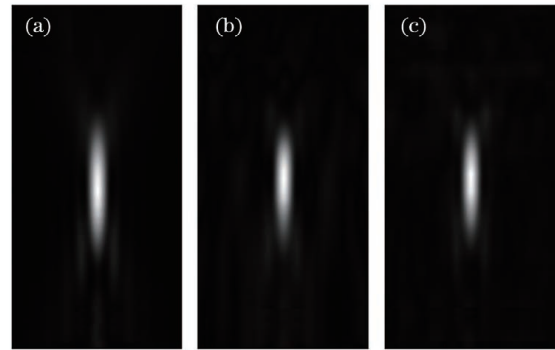


图 11 不同记录机制下轴向 100 mm 内 PSF 的分布特性。

(a)FINCH;(b)COACH;(c)I-COACH

Fig. 11 Axial distribution of PSF in the range of 100 mm under different recording mechanisms.

(a) FINCH; (b) COACH; (c) I-COACH

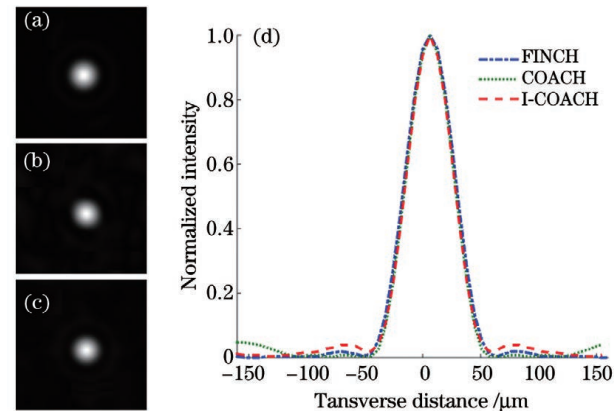


图 10 不同记录机制下的点源全息图重建像及中截面归一化强度曲线。(a) FINCH;(b) COACH;(c)I-COACH;(d)归一化强度曲线

Fig. 10 Reconstructed images of hologram of point source and the normalized intensity distribution curves under different recording mechanisms.

(a) FINCH; (b) COACH; (c) I-COACH; (d) normalized intensity distribution curves

为了进一步比较 FINCH、COACH 和 I-COACH 的重建图像的分辨率特性,仿真计算了同一深度平面上两点全息图再现像及其强度分布曲线,结果如图 12 所示。根据瑞利判据,若两点的 PSF 宽度相同,则两点的距离与系统的分辨率密切相关,此时影响分辨率的重要因素是系统的放大倍率。因此,与数值孔径相同的 COACH 及 I-COACH 非相干成像系统相比,FINCH 具有更大的放大倍率,故横向分辨率更高。

非相干相关数字全息术理论上可以通过物体全息图和 PSH 的相关运算重建出任何深度的物体的信息;不同的是,FINCH 技术通过改变不同的再现距离 z_r 来获得不同深度处的物信息在焦再现,而 COACH 和 I-COACH 则通过物体全息图与不同深度处 PSH 互相关来重建不同深度处的物信息。综合上述分析可以看出,非相干相关数字全息术利用

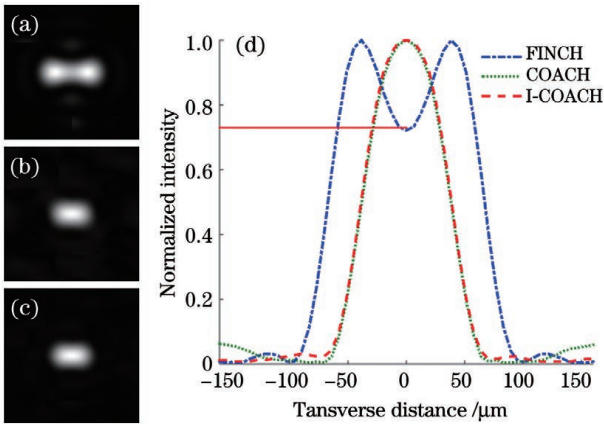


图 12 不同记录机制下重建图像的横向分辨特性比较。
(a) FINCH; (b) COACH; (c) I-COACH; (d) 归一化强度分布曲线

Fig. 12 Lateral resolution comparison of reconstructed images under different recording mechanisms.

(a) FINCH; (b) COACH; (c) I-COACH;
(d) normalized intensity distribution curves

系统的点源全息图编码物体的深度信息,通过分别再现不同深度层面的信息来获得物体的三维像。FINCH 技术在全息图记录过程中无需移动部件和任何扫描过程,成像具有横向超分辨率和准无限大成像景深的特点;COACH 和 I-COACH 技术采用随机相位编码掩模调制系统光瞳函数,需要记录不同深度处的点源全息图来编码(标定)系统的深度,具有较高的轴向分辨率。从某种记录机制成像的基本特性出发,研究如何发挥其成像的优势,突破成像的局限,并探索相适应的应用,一直是非相干相关数字全息研究的技术路线。

3 非相干相关数字全息术的发展

非相干相关数字全息术的成像优势能否得到充分体现,该类技术应用能否得到推进,这在很大程度上取决于其可以实现的成像分辨率和成像质量。因此,对提升非相干相关数字全息术成像分辨率和成像质量的研究一直是学者关注的焦点。

3.1 成像分辨率增强或提升

Rosen 等^[23]在提出 FINCH 的基本概念后注意到该技术可能具有的特殊成像特性,并从线性系统的角度出发,在理论上比较了 FINCH 和相干及非相干透镜直接成像系统在点扩展函数和调制传递函数特性上的差别。他们在研究中指出 FINCH 的成像性能取决于全息记录时所使用的具体光路配置,如全息记录距离和 SLM 上加载的相位掩模的具体参数等。记录参数存在最优值,即探测器与分波元

件 SLM 之间的距离 z_h 和 SLM 上加载的分波掩模的焦距 f_d 满足 $z_h/f_d=2$ 。在上述最优的全息记录条件下,相同数值孔径的 FINCH 的分辨能力分别达到对应的非相干或相干成像系统的 1.5 或 2 倍^[23]。Rosen 等^[24]此后针对 FINCH 的系统配置进行了详细的理论分析和实验研究,研究结果表明,当物镜的数值孔径一定时,FINCH 的横向分辨能力将随着点源的轴向位置变化而改变。与相同数值孔径的成像系统相比,FINCH 的横向分辨率为相干情形下透镜直接成像系统的 1~2 倍,为非相干情形下透镜直接成像系统的 0.7~1.5 倍。

研究人员通过提升光学元件的性能或结合其他光学技术的方法,对 FINCH 的横向和轴向成像分辨率进行了优化提升。Brooker 等^[25]利用渐变折射率透镜代替 SLM 作为分光元件,提高了实际 FINCH 系统的成像质量。Siegel 等^[26]使用双折射晶体透镜作为分波元件,实现了横向超分辨率的荧光显微成像。该研究中以 110 nm 直径的荧光微球为实验样品进行成像,实验结果如图 13 所示,系统横向分辨最小尺寸达到了 149 nm,这是目前为止 FINCH 技术在不结合其他技术的前提下所实现的分辨能力最高的宽场非相干全息显微成像。Quan 等^[27]使用带有衍射光栅的双焦透镜提高了 FINCH 系统记录的全息图的信噪比。Kashter 等^[28]通过结合合成孔径技术提高了 FINCH 的横向分辨率并实现了超分辨率成像。Kashter 等^[29]和 Jeon 等^[30]分别结合结构照明技术,实现了基于 FINCH 的超分辨率成像。同时,为了解决 FINCH 在轴向分辨率上的不足,Kelner 等^[31]和 Siegel 等^[32]将 FINCH 与共焦显微技术结合,提高了系统的轴向分辨能力,实现了基于点扫描的 FINCH 层析成像。Vijayakumar 等^[21]从全息图的记录机制入手,改变全息图记录过程中相位编码掩模的形式,利用 COACH 技术来提高系统的轴向分辨率,并进一步提出了光路系统更加简化的 I-COACH 技术^[22],其成像的轴向分辨率亦高于 FINCH。2020 年,Rai 等^[33]提出了 SRI-COACH,通过控制 CPM 的散射度来改善 I-COACH 系统的成像性能,该实验的主要结果如图 14 所示。图 14(a)~(c)所示分别为分辨率板重建像的信噪比、可见度和 ξ (可见度与信噪比的乘积)随 CPM 散射程度和稀疏点数的变化曲线,图 14(d)所示为最佳散射度 $\sigma=0.132$ 和稀疏点数 $N=20$ 情形下的物体重建像,其最小可分辨的空间频率为 14.25 lp/mm,图 14(e)所示为透镜直接成

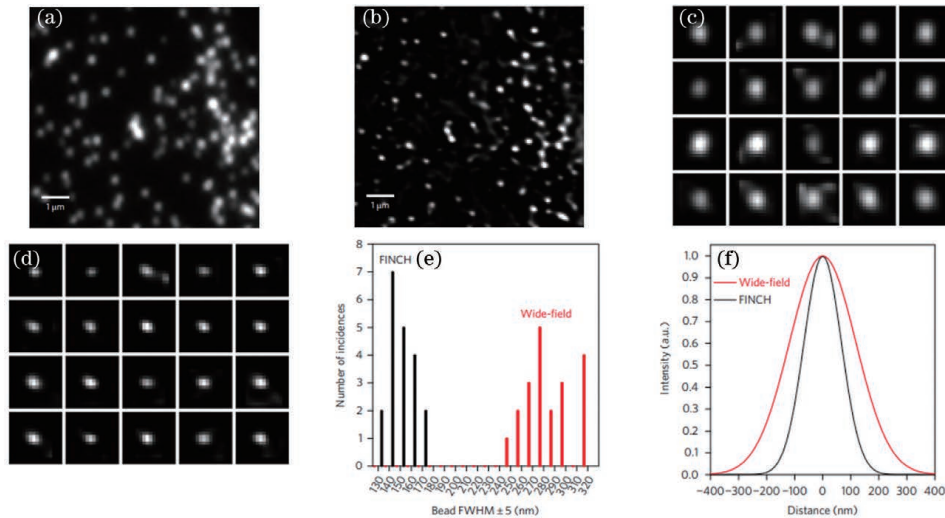


图 13 基于双折射晶体的 FINCH 显微成像结果^[26]。(a)宽场显微结果;(b)FINCH 成像结果;(c)(d)图 13(a)、(b)所示视场范围内随机选取的 20 个微球的成像结果;(e)图 13(c)、(d)所示的微球像的半峰全宽的统计直方图;(f)宽场显微和 FINCH 所实现的以平均半峰全宽计算的点扩展函数横切强度分布

Fig. 13 Resolution comparison of wide-field and α -BBO FINCH imaging of fluorescent beads^[26]. $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ zoomed selections of 110 nm fluorescent beads for resolution comparison of the same area between (a) wide-field fluorescence and (b) α -BBO-FINCH images, the full fields were $62 \mu\text{m} \times 62 \mu\text{m}$; (c) (d) $1 \mu\text{m}^2$ zoomed images of the same randomly selected beads from Figs. 13(a) and (b), respectively, the beads in the respective parts of Figs. 13(c) and (d) are the same; (e) a histogram of full-width at half-maximum (FWHM) size distributions among the 20 beads that were measured in Figs. 13(c) and (d), showing the approximately twofold reduction in FWHM by FINCH; (f) plots depicting the average FWHM sizes of the 110 nm beads as measured by wide-field fluorescence and α -BBO-FINCH microscopy, with normalized Gaussian functions of the average width measured from the 20 selected beads

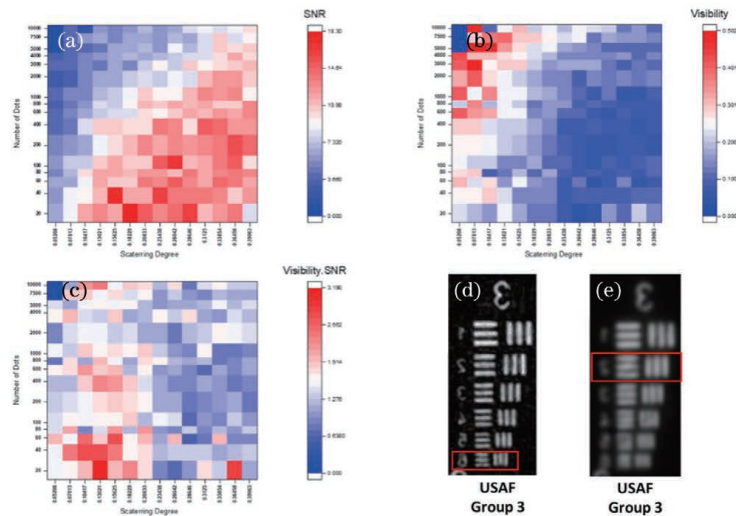


图 14 SRI-COACH 的实验结果^[33]。(a)重建像的信噪比随 CPM 散射程度和稀疏点数的变化;(b)重建像的可见度随 CPM 散射程度和稀疏点数的变化;(c)重建像的 $\xi(\sigma, N)$ (可见度与信噪比的乘积)随散射程度和稀疏点数的变化;(d)最佳散射度和稀疏点数的分辨率板重建像;(e)透镜直接成像结果

Fig. 14 The experiment results of the SRI-COACH. (a) The SNR of reconstructed image varied with CPM scattering degree and number of sparse points; (b) the visibility of reconstructed image varied with CPM scattering degree and number of sparse points; (c) $\xi(\sigma, N)$ (product of visibility and signal-to-noise ratio) of reconstructed image varied with CPM scattering degree and number of sparse points; (d) resolution plate reconstruction with optimal scattering degree and number of sparse points; (e) direct imaging result

像的结果,最小可分辨的空间频率为 8.98 lp/mm。结果表明,SRI-COACH 的分辨率比相同数值孔径的透镜直接成像系统的分辨率提高了约 1.6 倍。

3.2 成像质量的提升

光源的时间相干性是影响 FINCH 系统实际成像性能的重要因素。Lai 等^[34]和 Wan 等^[35]分别分析了光源时间相干性对 FINCH 点源全息图尺寸的影响,通过对分波掩模的具体参数进行优化,提升了成像分辨率和信噪比。实际 FINCH 系统所能实现的成像性能还受限于 SLM 等器件的调制效率。Siegel 等^[36]对数值重建算法展开研究,利用在重建过程中使用 Hamming 窗口对传递函数进行滤波的方式提高了 FINCH 重建像的质量。Nobukawa 等^[37]理论分析了非相干数字全息图的离散采样要求,并通过对全息图进行空间平均后处理的方式,抑制了重建像中由探测器引入的噪声。Choi 等^[38]通过使用中心带有针孔的偏振器件,抑制了 FINCH 重建像中由离焦像引入的噪声,提高了系统的轴向重建质量。本课题组的 Man 等^[39]采用压缩感知算法对全息图进行重建,提高了 FINCH 系统的轴向成像质量,记录了由轴向相距 5 mm 的两个物体构成的简单三维样品的全息图,使用衍射重建算法和压缩重建算法获得的结果如图 15 所示。可见,在对全息图进行三维压缩重建时,处于不同深度的样品信息间的串扰明显减小。

COACH 具有比 FINCH 更普遍的记录机制,系统的相位掩模在选择上更具一般性,原理上可以是任意的二维相位函数^[40]。利用 GS 算法获取 CPM,可以尽可能地保证 CPM 及其空间频谱都是纯相位函数,从而有助于降低成像系统的背景噪声。通过改进 GS 算法来优化系统相位编码掩模 CPM,进而调制系统的 PSH,这是提高 COACH 和 I-COACH 系统成像质量的有效途径之一。Rosen 等^[41]在 GS 算法中通过有限带宽内的均匀矩形强度分布方式迭代获取 CPM,并通过引入相移的方法提高了重建像质量,改进的 GS 算法及实验结果如图 16(a)所示。Rai 等^[42]对 I-COACH 系统响应的稀疏性展开研究,将 GS 算法中有限带宽内的均匀强度分布改进为随机强度分布,进而提出一种通过控制点扩展函数的稀疏性来获得高质量重建像的 SI-COACH 技术,GS 算法及实验结果如图 16(b)所示。受编码孔径成像中环形编码孔径成像的启发,本课题组的 Wan 等^[43]通过改进的 GS 算法首次合成了具有环形稀疏系统响应的 CPM,环形系统响

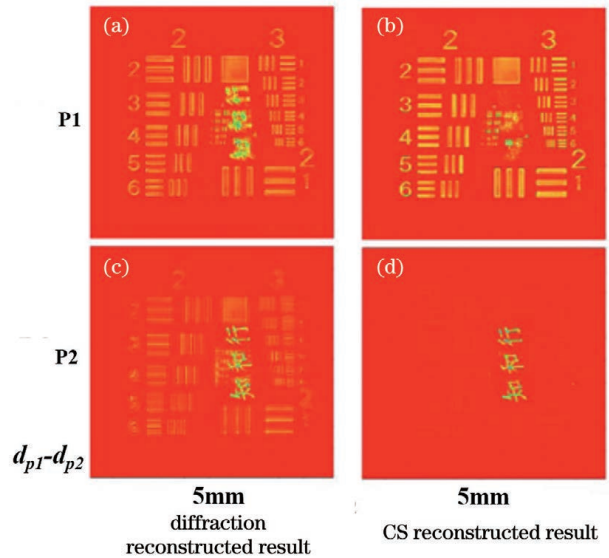


图 15 对 FINCH 全息图进行衍射传播重建和压缩重建的实验结果^[39]。衍射重建得到的(a)P1 和(b)P2 平面样品的在焦再现像;压缩重建得到的(c)P1 和(d)P2 平面样品的在焦再现像

Fig. 15 Reconstructed results obtained by the diffraction propagation method and CS method, respectively. (a) The diffraction reconstructed result focused on the P1 plane; (b) the diffraction reconstructed result focused on the P2 plane; (c) the CS reconstructed result focused on the P1 plane; (d) the CS reconstructed result focused on the P2 plane

应较稀疏系统响应具有更优的调制传递函数,从而使得重现像的背景噪声更低、对比度更高,实验结果如图 16(c)所示。

改进重建算法是提高重建像质量的有效方法之一。2020 年,本课题组的 Liu 等^[44]将非线性成像特殊参数重建视为噪声并施加调制参数,提出一种具有噪声抑制参数的非线性重建(MP-NLR)方法,实验结果如图 17 所示。2021 年,本课题组的 Wan 等^[43]通过构建新型纯相位滤波互相关重建算法实现了 I-COACH 单次曝光全息图重建像的快速高质量获取,实验结果如图 18 所示。

3.3 其他成像性能指标的提升

Bouchal 等^[45]对 FINCH 的成像性能及其与具体全息记录参数之间的关系展开了详细的理论和实验研究,并优化了该技术的成像视场。Imbe^[46]对系统的横向放大倍率进行研究,并通过在样品的傅里叶平面进行分波的方式设计了一种拥有固定横向放大倍率的非相干全息成像方法。Tang 等^[47]移动分波掩模的光轴,并通过图像拼接的方式扩大了

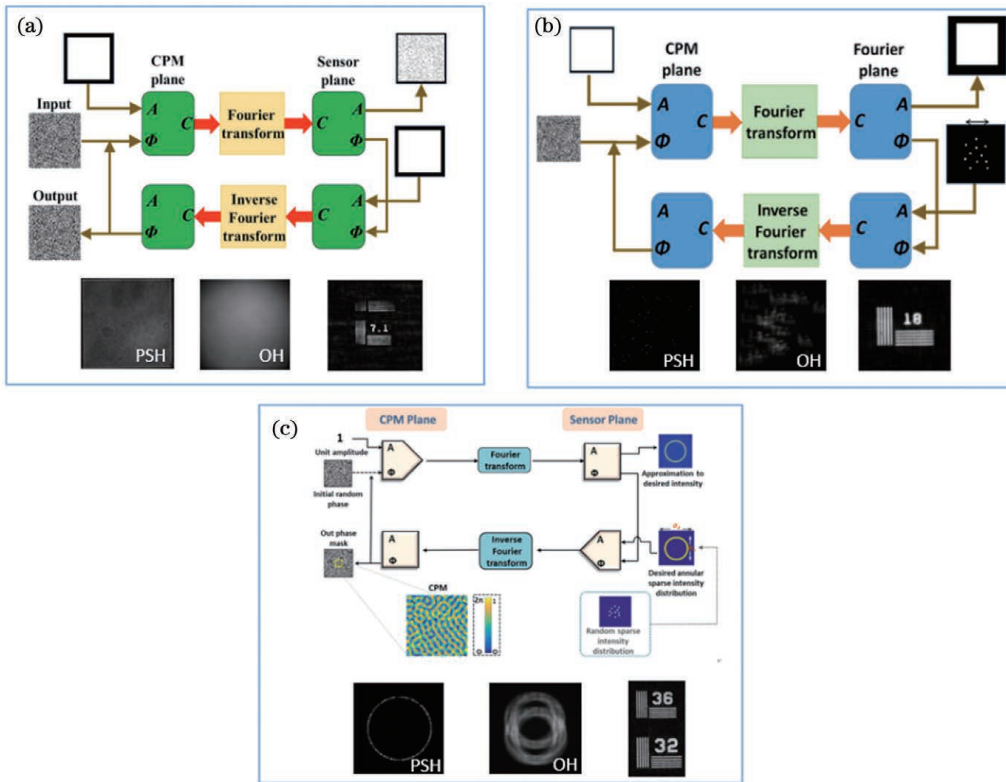


图 16 改进的 GS 算法及对应的 PSH、物体全息图及重建像。(a)COACH^[41]; (b)SI-COACH^[42]; (c)AI-COACH^[43]

Fig. 16 Improved GS algorithms and corresponding PSH, object holograms, and reconstructed images.

(a) COACH^[41]; (b) SI-COACH^[42]; (c) AI-COACH^[43]

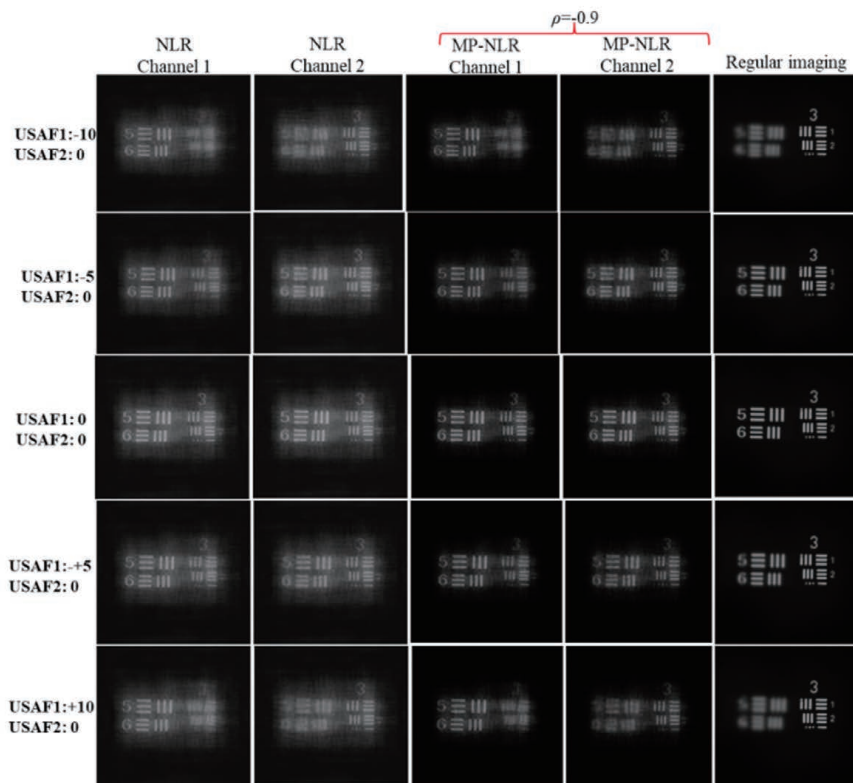


图 17 MP-NLR 成像方法与非线性及常规成像比较^[44]

Fig. 17 Comparison of MP-NLR imaging method with non-linear and conventional imaging^[44]

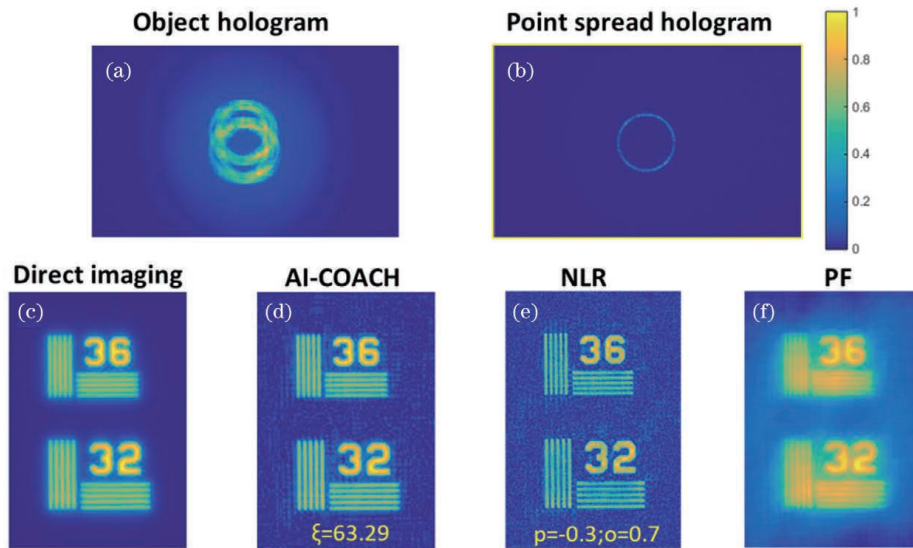


图 18 具有环形稀疏系统响应但不同重建算法的重建像比较^[43]。(a)物体全息图;(b)PSH;(c)直接成像;(d)单次曝光 AI-COACH 成像;(e)非线性重建像;(f)纯相位滤波重建像

Fig. 18 Comparison of reconstructed images with different reconstruction algorithms with ring sparse system response^[43]. (a) Object hologram; (b) PSH; (c) direct imaging; (d) single camera shot imaging of AI-COACH; (e) non-linear adaptive reconstruction; (f) phase filtering reconstruction

FINCH 的成像视场。为了提高 FINCH 的成像速度, Kelner 等^[48-49]提出了一种单通道傅里叶变换非相干数字全息成像方法, 无需相移, 仅从单次曝光的全息图即可重建离轴物体的三维信息, 其实现光路

和初步实验结果如图 19 所示^[48]。Tahara 等^[50]提出了一种两步相移的自干涉数字全息术, 该技术减少了所需记录全息图的数量, 提高了系统的成像速度。本课题组的 Man 等^[51]验证了通过使用并行相

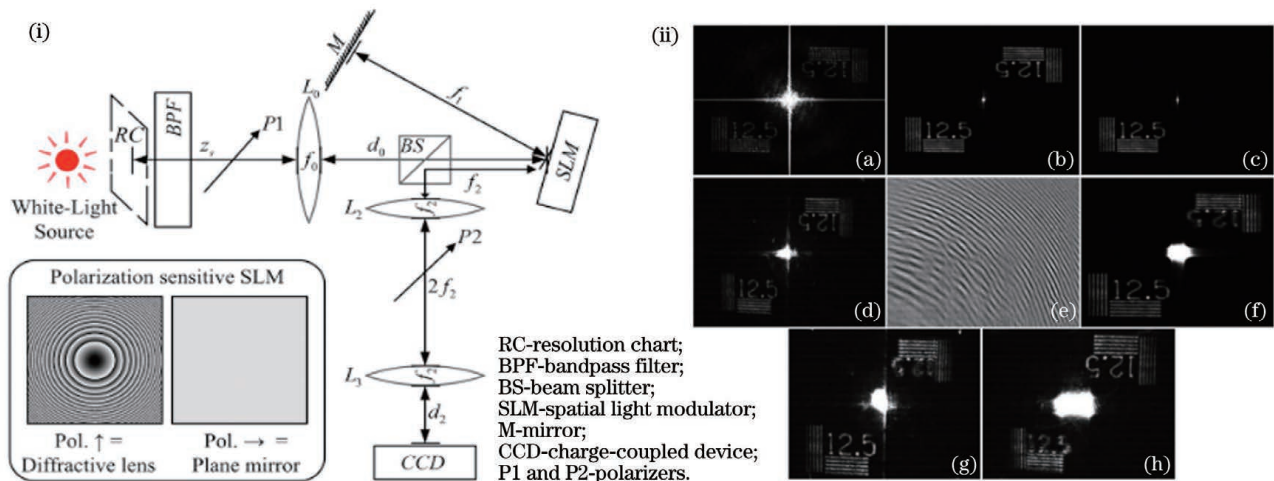


图 19 单次曝光单通道傅里叶变换非相干数字全息成像方法的系统光路和实验结果^[48]。(i)系统光路示意图;(ii)实验结果, (ii-a)~(ii-d)单次曝光直接傅里叶变换重建、两次曝光抑制直流项重建和三次曝光相移重建的结果, (ii-e)实验中记录的全息图, (ii-f)最佳重建距离处的重建像, (ii-g)和(ii-h)分别为物像及其孪生像聚焦时的重建像

Fig. 19 Schematic of system optical path and experimental results of Fourier incoherent single channel holography (FISCH) recorder^[48]. (i) Schematic of system optical path; (ii) experimental results. (ii-a)–(ii-c) are digitally reconstructed images for $z_s = 30$ cm from a single exposure, two, and three exposures holograms, respectively; (ii-d) is the optically reconstructed equivalent of (ii-b); (ii-e) is a two exposures hologram (shown partially to reveal details, recorded with $z_s = 25$ cm) and (ii-f) is its digitally reconstructed image at the best plane of focus; (ii-g) and (ii-h) are optical reconstructions of (ii-e) at the best plane of focus of one of the images and its twin, respectively

移技术实现 FINCH 单次曝光成像的可行性,并在重建过程中引入压缩感知技术来提高重建像的质量。Nobukawa 等^[52]和 Sakamaki 等^[53]分别对利用棋盘状分布的相位光栅实现分波和相移的非相干全息术展开研究,并实现了单次曝光成像。Liang 等^[54]使用几何分布相位透镜,将并行相移技术应用到 FINCH 中,实现了单次曝光的三维成像。

Kumar 等^[55]提出一种 LI-COACH 技术,将两个独立的 CPM 结合线性相移及二次相位,只需曝光即可在同一视场中获得两个独立的 PSH 或 OH,提高了系统的时间分辨率。2018 年 Rai 等^[56]提出一种自适应非线性重建方法,该方法只

需分别对单次曝光的 PSH 和 OH 通过对应频域中的振幅进行参数调制,即可获得不同类型滤波器的互相关重建像。Rai 等^[57]通过由拼接产生对应大视场的 PSH 和 OH 的方式实现了 I-COACH 系统视场的扩展。2021 年,该课题组提出一种扩展 I-COACH 景深的方法,通过将产生远场锥形光束的四次相位掩模与衍射透镜及 GS 算法生成随机稀疏 CPM 相结合,获得能够扩展景深的混合型相位掩模,在不改变任何光路的情形下,实现了 I-COACH 系统景深的扩展^[58]。图 20 所示为 I-COACH 双通道景深扩展成像与直接透镜成像结果的比较。

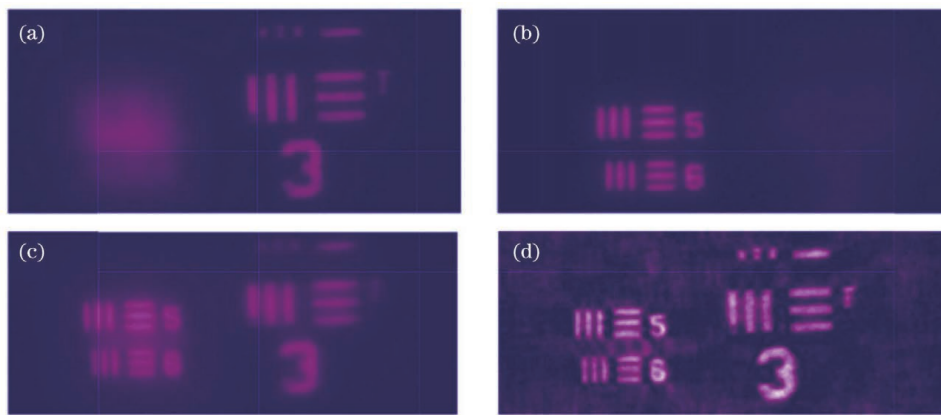


图 20 I-COACH 系统景深扩展双通道成像实验结果^[58]。(a) 常规 I-COACH 通道 1 物体直接成像;(b) 常规 I-COACH 通道 2 物体直接成像;(c) 景深扩展双通道直接成像;(d) 景深扩展双通道 I-COACH 成像

Fig. 20 Results of depth-of-field extended dual channel imaging experiment with I-COACH system^[58]. (a) (b) Direct images of objects in two axial positions; (c) direct image with RQPF and DSL; (d) reconstructed image of DOFE-based modified I-COACH

4 非相干相关数字全息术应用研究进展

非相干相关数字全息术可实现空间非相干照明或荧光等自发光样品的非扫描三维成像。在特定实验条件下,该技术拥有比传统非相干成像方法更优的横向分辨能力或轴向分辨能力。然而,该技术也存在诸如成像信噪比低、轴向成像性能差及成像速度慢等固有局限。因此,如何从实际需求出发,寻找最能发挥自干涉非相干数字全息术优势的具体应用领域,成为研究人员需要考虑的重要问题之一。从该类技术近些年的发展来看,对其应用的研究探讨可以分为两大类:一是利用 FINCH 技术的横向超分辨率、点源复值全息图等优势来开发该技术的应用领域;另一类是基于 COACH 技术在轴向分辨率、成像速度、利用编码

相位掩模对系统点扩展函数的调制等优势来开发该技术的应用领域。

4.1 基于 FINCH 的应用研究进展

1) 三维荧光显微成像

Rosen 等^[20]在提出 FINCH 技术的基本原理后不久便将其应用到荧光显微成像中,并给出了花粉粒和肌肉组织内神经纤维的非扫描三维重建结果。然而,由于早期 SLM 等器件在调制效率等性能上的限制,FINCH 重建像的质量仍低于传统荧光显微成像结果,通过理论分析可知,该技术在横向分辨能力上的优势难以得到体现。此后,经过多个课题组针对全息记录参数进行优化研究,以及采用了具有更高调制效率的渐变折射率透镜或双折射晶体透镜作为分光元件后,FINCH 所记录全息图的信噪比以及重建像的质量得到了较大提高,并最终实现了细胞内细胞器结构的荧光超分辨彩色三维成像,横向分辨率达到了 149 nm^[26],实验结果如图 21 所示。

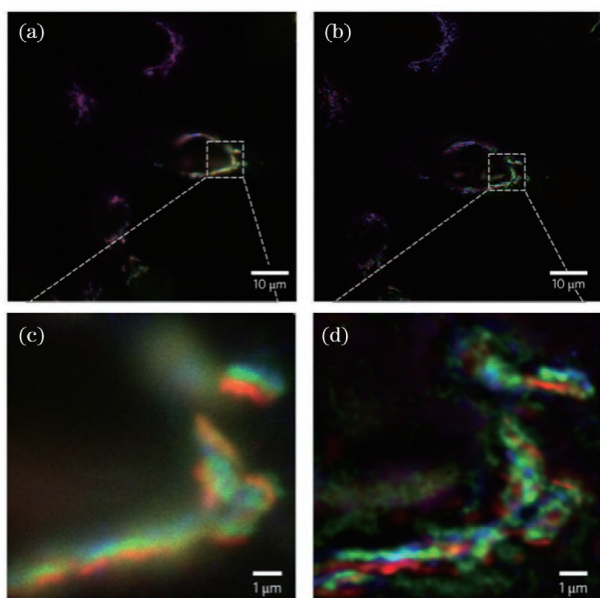


图 21 基于 FINCH 技术实现的针对细胞高尔基体的荧光超分辨率显微成像结果^[26]。(a)宽场成像；(b)FINCH 全息重建结果；(c)图 21(a)中虚线方框所示范围的放大图像；(d)图 21(b)中虚线方框所示范围的放大图像

Fig. 21 Comparative imaging of three different Golgi apparatus proteins in HeLa cells by wide-field and α -BBO FINCH^[26]. (a) Wide-field image; (b) reconstructed results of FINCH; (c)(d) enlarged images in the range shown in the dotted box in Figs. 21(a) and (b) respectively

除了在非扫描三维成像及横向分辨率上的优势,对点源复值全息图相位信息的更充分利用赋予了 FINCH 技术更大的应用潜能。Kim^[59]参考自适应光学的基本原理,通过分别记录点源和扩展物体非相干全息图的重建方式,实现了系统中光学像差的自适应校正。实际上,由于样品的全息图是由点源全息图的强度叠加构成,任意两个点源全息图之间不会产生相干叠加。对于每一个点源全息图来说,其相位部分均不受串扰地包含了对应物点的三维位置信息以及该物点所发出光波经过系统传播后可能含有的由样品本身或光学系统所引入的光学像差信息。因此在自干涉全息系统中,PSH 的获取并不是实现自适应像差校正的必要条件。基于这一考虑,本课题组的 Man 等^[60]提出了基于 FINCH 的自适应三维荧光显微成像计算方法,成功校正了由光学系统或样品本身所引入的复杂空间各向异性光学像差,整个过程仅需要一幅通过四步相移曝光后获得的复值全息图。图 22 所示为荧光标定的乳腺癌细胞骨架的自适应 FINCH 三维显

微成像的计算结果。Sheng 等^[61]基于衍射理论对 FINCH 系统的点扩展函数进行分析,得到重建像相位与样品发出光波在两个正交方向上的相位差之间的关系,并依此对双折射材料实现了相衬成像。Siegel 等^[62]结合 FINCH 与共焦显微以及并行相移等技术,实现了单次曝光超分辨率显微成像,如图 23 所示。对比通过共焦成像和共焦非相干相关全息术(CINCH)成像所获得的针对细胞内荧光染色后的微管的结果,发现 CINCH 重建像的横向成像分辨率达到了 118 nm,是目前已发表成果中共焦 FINCH 成像方法所实现的最高横向成像分辨能力。

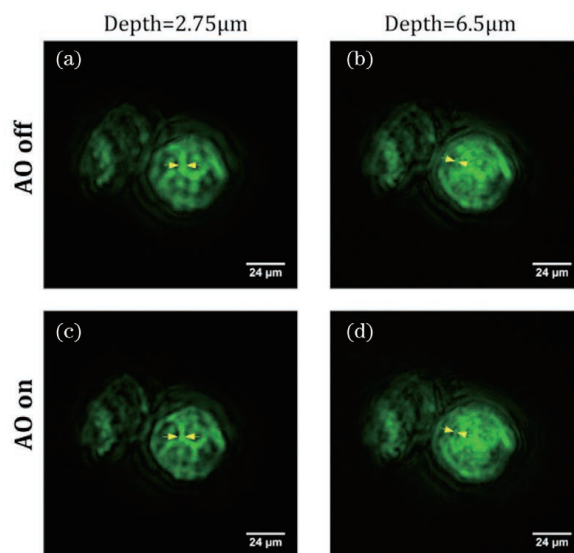


图 22 基于 FINCH 的计算自适应三维荧光显微成像结果^[60]。(a)2.75 μm 和(b)6.5 μm 深度处乳腺癌细胞骨架的自适应像差校正前重建像；(c)2.75 μm 和(d)6.5 μm 深度处乳腺癌细胞骨架的自适应像差校正后重建像

Fig. 22 Computational adaptive 3D fluorescence microscopic imaging results based on FINCH of actin-labeled MCF7 breast cancer cells^[60]. (a) (b) before and (c) (d) after AO correction on different layers within the cell, (a) (c) depth is 2.75 μm , and (b)(d) depth is 6.5 μm

2) 彩色成像或与光谱成像结合

在基于 FINCH 实现非相干照明样品的全息三维成像的同时,对照明光中不同波长所包含信息的发掘和利用,可为该技术的应用提供更多可能。结合多通道彩色成像的基本原理,Rosen 等^[63]基于 FINCH 对处在不同轴向位置的两个骰子进行彩色三维成像,其结果如图 24 所示。Kim^[64]提出了一种非相干彩色全息术,实现了自然光照射下景物的

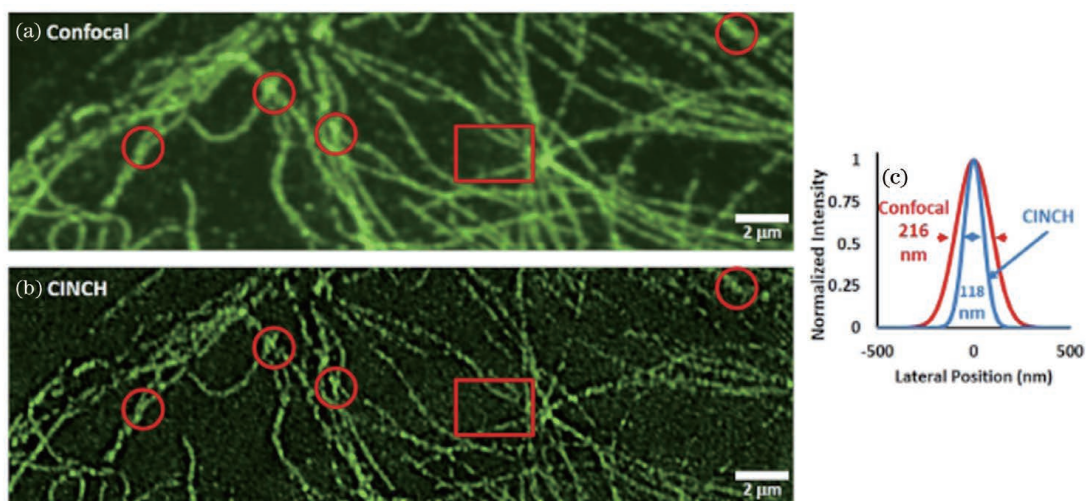


图 23 共焦显微镜与共焦 FINCH 的实验结果比较^[62]。(a)细胞微管的共焦扫描显微；(b)细胞微管的共焦 FINCH 显微 (CINCH) 荧光超分辨成像；(c)图 23(a)(b)中红框所示范围微管的横截面强度分布

Fig. 23 Comparison of experimental results of confocal microscopy and confocal-FINCH (CINCH)^[62]. (a) Confocal images of microtubules; (b) super-resolved CINCH images of microtubules; (c) plots of microtubule lateral FWHM from the images shown in Figs. 23(a) and (b)

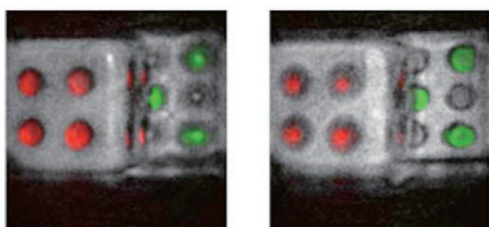


图 24 基于 FINCH 对处在不同平面的骰子的彩色三维非相干全息成像结果^[63]

Fig. 24 Incoherent holographic 3D color imaging results for the dice on different planes based on FINCH^[63]

全息记录与再现。Wan 等^[65]实现了基于三角干涉的非相干离轴傅里叶彩色全息成像, 仅需三幅不同颜色通道下记录的全息图即可实现样品彩色图像的三维重建, 实验结果如图 25 所示。Hara 等^[66]结合 FINCH 和多波长复用相移技术, 用单色相机实现了非相干彩色数字全息成像。Tahara 等^[67]利用基于计算相干叠加技术的 FINCH 系统实现了生物细胞的彩色荧光成像。

3) 荧光自干涉数字全息超分辨定位三维追踪或成像

点源全息图具有强度叠加特性, 随着样品中点源数量的增加(即样品细节的增加), 自干涉非相干全息系统中所记录的全息图的信噪比急剧下降, 进而导致重建像的质量受到影响。虽然可以通过相移的方式抑制全息图中的直流背景噪声, 提高所获得的复值全息图的信噪比, 但是受到相机动态范围等性能的限制, 针对复杂荧光样品的成像效果依然难

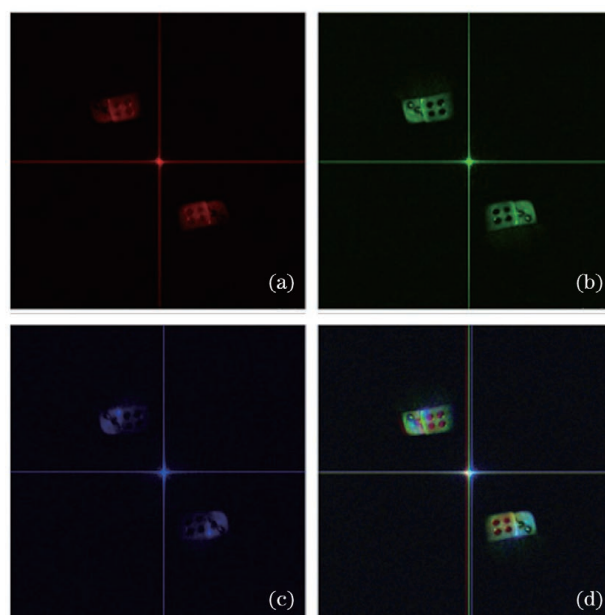


图 25 基于三角干涉的非相干离轴傅里叶彩色全息成像结果^[65]。(a)~(c)三个不同颜色通道的全息重建像；(d)经过色差校正后的彩色合成重建像

Fig. 25 Incoherent off-axis Fourier color holographic imaging results based on triangular interference^[65]. (a)–(c) the hologram reconstruction images corresponding to three different color channels respectively; (d) color reconstruction image after chromatic aberration correction

以令人满意。并且, 三维成像技术中存在的主要局限之一, 即由离焦像引入的背景噪声, 也限制了自干

涉非相干全息技术在显微成像中的应用。然而,并非所有实际应用中均需要对复杂的荧光样品进行观察。或者,可以通过单分子成像领域中一些常用的光学方法对荧光团进行控制,以减少某一时刻样品内被激发的荧光团的数量。因此,在单分子成像或荧光微粒的三维运动轨迹追踪等具体应用领域中,可以避开一些自干涉非相干全息术的局限,充分发挥其在非扫描三维成像上的优势^[68-69]。

Yanagawa 等^[70]对基于自干涉非相干全息技术的荧光微粒三维追踪进行研究,所获得的横向和轴向定位精度分别约为 50 nm 和 70 nm。Marar 等^[71]对基于自干涉全息术实现的三维定位的精度进行实验研究,所实现的横向和轴向定位精度分别为 5 nm 和 40 nm。图 26 给出了该研究所记录的荧光微粒的全息图及对其进行重建后获得的三维定位精度等信息^[71]。该课题组随后的理论研究结果表明,相比于现有方法,自干涉全息术在三维定位应用中的优势在于,在较大的轴向范围(20 μm)内,其在

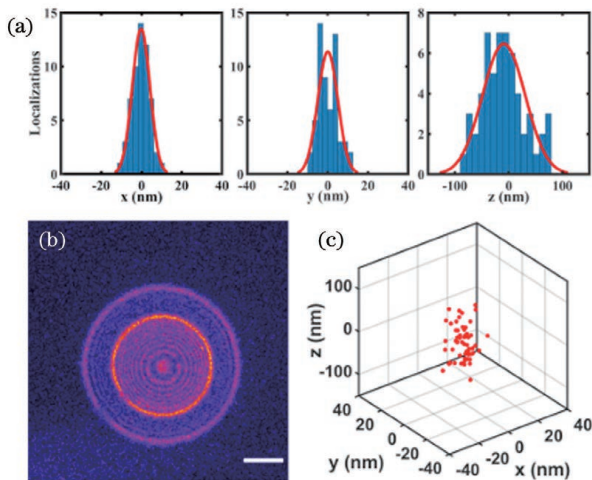


图 26 基于非相干全息术实现的 0.1 μm 直径荧光微粒三维定位^[71]。(a)68 次独立定位实验结果在三个空间维度上的分布直方图;(b)相机所记录的荧光微粒的全息图,比例尺为 50 μm ;(c)68 次独立定位结果在三维空间中的分布情况

Fig. 26 3D localization of a single 0.1 μm fluorescent bead based on incoherent holography^[71]. (a) Histograms of 68 localizations in x , y , and z of one single 0.1 μm red (580/605) fluorescent bead on a coverslip, and the standard deviations of the measurements are $\sigma_x = \sigma_y = 5$ nm and $\sigma_z = 40$ nm; (b) representative image of a single bead imaged with SIDH acquired in one 50 ms frame, and the scale bar is 50 μm ; (c) localizations plotted in three dimensions

三个空间维度上可以提供近乎相同的定位精度(小于 50 nm,存在一定背景噪声的情形下)^[72]。因此,与现有通过在系统中引入像散实现的三维定位方法相比,基于自干涉全息术的三维定位方法在采集速度上具有优势,且更适用于较厚样品的三维成像。

4.2 COACH 技术的应用研究进展

COACH 作为新型的非相干数字全息术,在研究初期已展示出强大的应用潜力,其改进的编码掩模孔径、数字全息记录的方式及计算物体重建像倚重算法的优越性,使得 COACH 技术具有更宽的光谱应用范围、较高的轴向分辨率及快速的三维成像能力^[73]。

部分孔径成像以稀疏的多个小孔径按照一定规则排列来实现等效数值孔径的单个大孔径光学系统成像,对于降低光学系统设计成本、提高系统灵活性具有重要意义。2017 年, Bulbul 等^[74-76]基于 I-COACH 系统提出一种环形相位掩模的部分孔径成像系统(PAIS),通过图 27(a)所示的 PAIS 系统相位掩模合成方法将 GS 算法生成的 CPM 设计为环形孔径,并结合二次相位及线性相位合成最终的相位掩模,在相同孔径下能够获得较透镜成像更高质量的重建像,如图 27(b)所示。为了进一步提升部分孔径成像系统的性能,该课题组对 PAIS 系统相位掩模环形孔径的排布方式进行优化,从而提出一种改进的 PAIS 系统,即 M-PAIS 系统,相位掩模的合成方式如图 27(c)所示,通过结合稀疏化 CPM 的获取方法获得随机稀疏 CPM 后,规则地选取 8 个环形孔径作为最终的 CPM,然后依旧采用图 27(a)所示的方式合成最终的相位掩模。通过对掩模的优化设计,M-PAIS 具有更优的 MTF 响应曲线,因此成像性能得到进一步提升^[76]。

透过散射介质成像是现阶段计算光学成像的研究热点之一。在 I-COACH 系统中,CPM 与散射介质均具有随机性,因此 Mukherjee 等^[77]将散射介质与透镜组合等效代替 SLM 对物光进行调制,并通过非线性方法获得重建像,光路结构及部分成像结果如图 28 所示。

Vijayakumar 等^[78]提出了通过在 COACH 系统中加入衍射透镜的方法进行四维成像的方案,其光路如图 29 所示,用不同波长的非相干光源照射三维物体,并在相同条件下通过相同的 CPM 记录物体全息图。在不同的轴向位置用不同波长对应的 PSH 函数库,利用物体全息图与用特定波长记录的 PSH 的互相关性,可以重建出轴向位置利用特

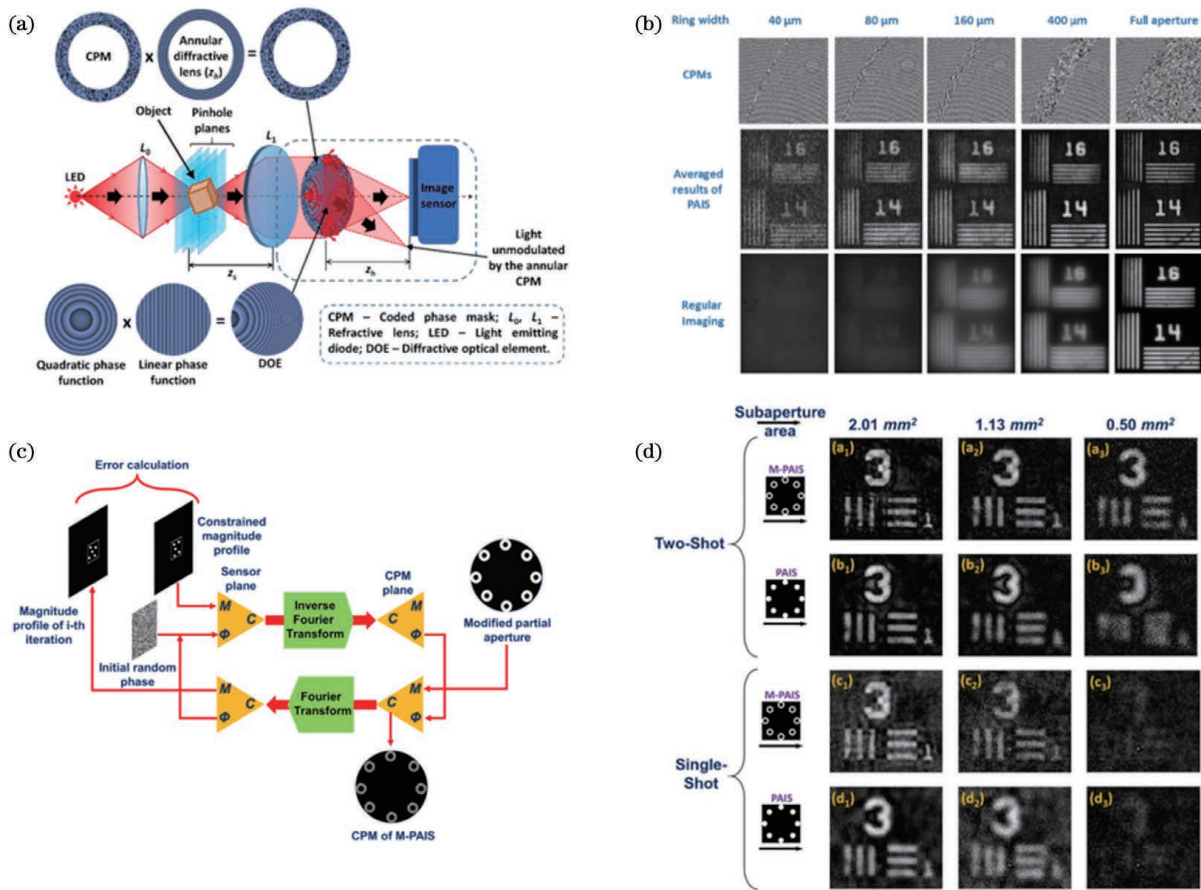


图 27 部分孔径成像相位掩模的获取及成像结果比较^[74-76]。(a) PAIS 系统相位掩模的合成方法；(b) PAIS 系统不同环形孔径尺寸掩模重建与直接成像结果比较；(c) M-PAIS 系统相位掩模的获取方法；(d) PAIS 与 M-PAIS 系统成像结果比较

Fig. 27 Phase mask acquisition for partial aperture imaging and comparison of imaging results^[74-76]. (a) Synthesis method of phase mask for PAIS system; (b) comparison of the reconstructed images of PAIS system with different annular aperture size masks and direct imaging results; (c) acquisition method of phase mask for M-PAIS system; (d) comparison of imaging results between PAIS and M-PAIS systems

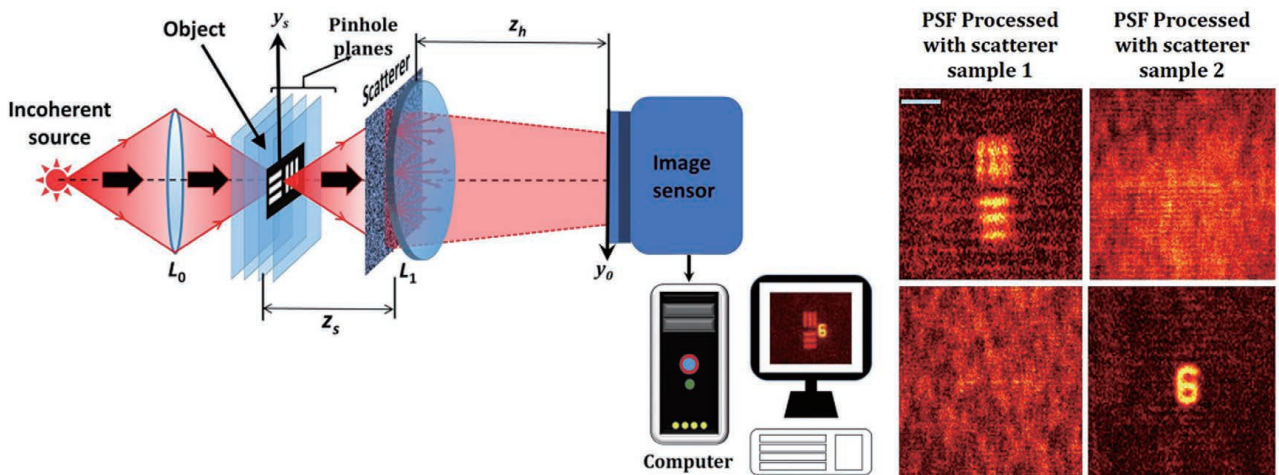
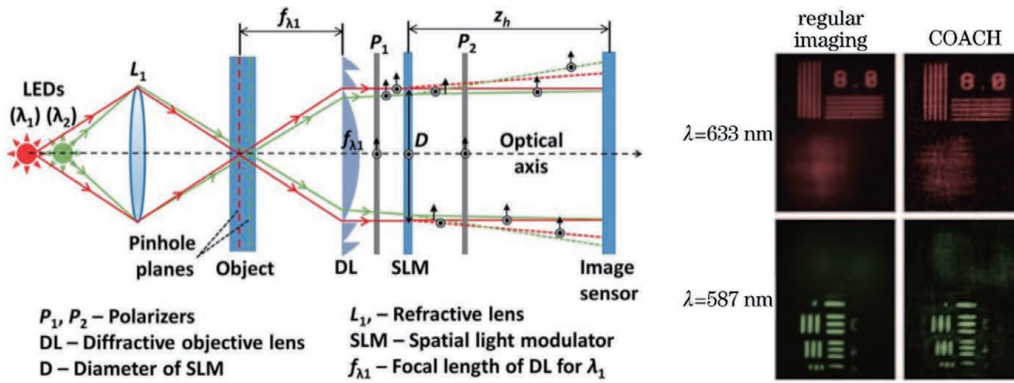


图 28 COACH 散射介质成像系统及成像结果^[77]

Fig. 28 COACH scattering medium imaging system and imaging results^[77]

图 29 COACH 系统中多光谱成像系统结构及实验结果^[78]Fig. 29 Structure and experimental results of multispectral imaging system in the COACH system^[78]

定波长照射的物体,由于衍射透镜的焦距随入射波长的变化而变化,因而该方案实现了光谱信息的记录。

5 总结与展望

本文从空间非相干光照明全息术的基本原理出发,分析了非相干全息术的技术特点、实现手段及相应的应用领域。非相干相关数字全息术作为一种三维成像技术,可在不对样品进行扫描的前提下快速得到全息图,而后通过后处理的方式重建三维样品内不同深度处的强度分布。因此,该技术在三维成像的时间分辨率方面具有天然的优势。以 FINCH 为代表的自干涉非相干全息技术具有横向超分辨成像的能力。在不结合其他技术的前提下,该技术可实现超衍射极限分辨能力的三维宽场荧光成像。相比于现有的其他超分辨显微技术,自干涉非相干全息超分辨成像方法具有更为简洁的光学系统结构,且在时间分辨率和光漂白等方面具有优势。需要着重说明的是,非相干全息术中记录的样品复值全息图中同时包含了振幅与相位信息,其中的相位部分和物光场的相位并没有直接的关系。然而,相位部分不仅编码了样品中离散物点的三维位置信息,还包含了光学像差和物光波在系统传播过程中于两个正交方向上可能具有的相位差等信息。因此,除了利用数值计算方法三维重建不同深度处样品的强度分布外,在非相干全息术中还可通过对相位信息的进一步发掘,在不额外添加光学元件的前提下实现自适应像差校正等功能,极大地扩展了该技术在实际应用中的潜能。自干涉非相干全息术具有灵活的分波方式。对比采用简单的透镜相位分布进行分波的 FINCH 技术和采用 CPM 进行分波的 COACH 技术可以发现,不同的分波掩模决定了系统所具有

的成像特性。根据具体的应用需求对分波掩模进行设计,可能使得自干涉非相干全息技术在某些特定应用中具有独特的优势。

尽管近年来诸多课题组从系统成像质量和分辨率等方面对非相干全息术进行了优化研究并取得了显著效果,但是该技术目前仍然存在一些局限。非相干全息术所记录的全息图由诸多点源全息图非相干叠加形成,因此全息图中存在较大的直流偏置,导致全息图的信噪比等质量参数随着样品复杂程度的增加而急剧下降。这种由全息图质量下降造成的重建像的信噪比和分辨率降低问题,是非相干全息术目前存在的主要局限之一,影响了其在复杂生物样品成像中的实际应用。以 FINCH 为代表的自干涉非相干全息技术虽然具有更高的横向分辨率,但其轴向分辨率却低于大多数成像方法。同时,由于在理论上根据单幅二维全息图重建三维样品全息图的过程是非适定的,因此某特定二维平面上样品的重建像必定受到来自其他平面信息的串扰,这使得非相干全息术在对厚的组织样品成像时所实现的成像性能受到了很大限制。

诸多课题组尝试解决非相干全息术中存在的问题,例如:通过结合并行相移技术,在不损失时间分辨率的前提下利用相移技术抑制全息图中的直流偏置,提高系统成像质量;结合共焦成像的基本原理,保留自干涉非相干全息术在横向分辨率上的优势,同时提高其轴向分辨率。然而,这些方法虽然在一定程度上突破了上述局限,同时也牺牲了如采样频率和时间分辨率等其他系统性能。实际上,对所有具体的成像方法而言,其在某一方面具有优势的同时必然伴随着其他方面的局限。在对非相干全息技术某一性能参数进行优化研究的同时,也可以通过探索与其固有优势最匹配的具体应用领域的方式,

最大化地利用和发挥该技术的应用潜力。

通过对非相干全息术发展的综述,并结合本课题组多年来在该领域的具体研究工作的体会,尝试对该技术在未来的可能发展方向及应用领域进行展望。目前非相干全息术的理论模型中大量借用了相干光学的基础概念。实际上,非相干全息成像过程可分为两步,即空间非相干的全息记录过程和相干过程中的全息数值重建过程。因此,结合统计光学中的理论对现有理论模型进行优化,可能有利于更为清晰地对非相干全息术的成像特性进行解释。并且,对理论模型的优化有利于对全息图中包含的信息进行更充分的发掘。这可能涉及对重建像的相位部分所包含的具体物理信息进行更好的解释等问题。目前自干涉非相干全息术所涉及的分波方式只有较为简单的类透镜相位分布及较为广义的用于产生伪随机强度分布的相位分布两类。实际上,不同的应用领域对于系统成像特性的要求不尽相同。从实际应用的需求出发,通过对非相干全息系统中分波掩模的具体形式进行设计,使得系统能够产生合适的点源全息图,将能更好地发挥非相干全息术在某些具体应用中的优势。这可能要对不同于菲涅耳波带片形式的点源全息图进行探索。

在生命科学和生物物理研究领域中的一些有力成像工具,如单分子成像技术,可以通过对分子荧光进行控制的方式减少视场范围内发光点源的数量,以便对单个荧光分子的运动过程进行分析。这一特性恰恰可以突破非相干全息术的主要局限,即点源数量增加造成的全息图质量下降问题。因此,在提升成像性能的同时,扬长避短地探索非相干全息术在更多实际场合中的应用,是未来该技术的主要发展方向之一。近年来超表面等技术快速发展,使得光学元件的光能利用率不断提升,为更复杂的衍射分波元件的加工提供了一种新的选择。在非相干全息术中探索更高效率的新型光学元件的应用,将有利于对系统成像信噪比和分辨率等参数进行优化和提升。

参 考 文 献

- [1] Mertz L, Young N O. Fresnel transform of images [C]//Proceeding of the International Conference on Optical Instruments and Techniques, 1961, Chapman Hall, London. [S.l.:s.n.], 1961: 305-310.
- [2] Rogers G L. Gabor diffraction microscopy: the hologram as a generalized zone-plate [J]. *Nature*, 1950, 166: 237.
- [3] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [4] Lohmann A W. Wavefront reconstruction for incoherent objects[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(11): 1555-1556.
- [5] Cochran G. New method of making Fresnel transforms with incoherent light [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(11): 1513-1517.
- [6] Stroke G W, Restrick R C. Holography with spatially noncoherent light [J]. *Applied Physics Letters*, 1965, 7(9): 229-231.
- [7] Leith E N, Upatnieks J. Holography with achromatic-fringe systems[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(8): 975-980.
- [8] Kim S G, Lee B, Kim E S. Removal of bias and the conjugate image in incoherent on-axis triangular holography and real-time reconstruction of the complex hologram [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4784-4791.
- [9] Kim S G, Lee B, Kim E S, et al. Resolution analysis of incoherent triangular holography [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(26): 4672-4678.
- [10] Kim S G. Synthesis and analysis of optical transfer function of the modified triangular interferometer by two-pupil synthesis method[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2004, 8(4): 182-187.
- [11] Kim S G, Ryeom J. Phase error analysis of incoherent triangular holography[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): H231-H237.
- [12] Kim S G. Analysis of effect of phase error sources of polarization components in incoherent triangular holography [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2012, 16(3): 256-262.
- [13] Poon T C. Scanning holography and two-dimensional image processing by acousto-optic two-pupil synthesis [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, 2(4): 521-527.
- [14] Schilling B W, Poon T C, Indebetouw G, et al. Three-dimensional holographic fluorescence microscopy [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(19): 1506-1508.
- [15] Indebetouw G, Zhong W. Scanning holographic microscopy of three-dimensional fluorescent specimens [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(7): 1699-1707.
- [16] Poon T C. Optical scanning holography: a review of recent progress [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, 13(4): 406-415.
- [17] Shaked N T, Katz B, Rosen J. Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-

- viewpoint-projection based methods [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): H120-H136.
- [18] Rivenson Y, Stern A, Rosen J. Compressive multiple view projection incoherent holography [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6109-6118.
- [19] Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel holography [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 912-914.
- [20] Rosen J, Brooker G. Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(3): 190-195.
- [21] 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.
- [22] Vijayakumar A, Rosen J. Interferenceless coded aperture correlation holography: a new technique for recording incoherent digital holograms without two-wave interference [J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13883-13896.
- [23] 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.
- [24] Rosen J, Kelner R. Modified Lagrange invariants and their role in determining transverse and axial imaging resolutions of self-interference incoherent holographic systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 29048-29066.
- [25] Brooker G, Siegel N, Rosen J, et al. In-line FINCH super resolution digital holographic fluorescence microscopy using a high efficiency transmission liquid crystal GRIN lens [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5264-5267.
- [26] Siegel N, Lupashin V, Storrie B, et al. High-magnification super-resolution FINCH microscopy using birefringent crystal lens interferometers [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(12): 802-808.
- [27] Quan X, Matoba O, Awatsuji Y. Single-shot incoherent digital holography using a dual-focusing lens with diffraction gratings [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 383-386.
- [28] 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.
- [29] Kashter Y, Vijayakumar A, Miyamoto Y, et al. Enhanced super resolution using Fresnel incoherent correlation holography with structured illumination [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1558-1561.
- [30] Jeon P, Kim J, Lee H, et al. Comparative study on resolution enhancements in fluorescence-structured illumination Fresnel incoherent correlation holography [J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9231-9241.
- [31] 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.
- [32] Siegel N, Brooker G. Improved axial resolution of FINCH fluorescence microscopy when combined with spinning disk confocal microscopy [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22298-22307.
- [33] Rai M R, Rosen J. Resolution-enhanced imaging using interferenceless coded aperture correlation holography with sparse point response [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 5033.
- [34] Lai X M, Zhao Y, Lü X H, et al. Fluorescence holography with improved signal-to-noise ratio by near image plane recording [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2445-2447.
- [35] Wan Y H, Man T L, Chen H, et al. Effect of wavefront properties on numerical aperture of Fresnel hologram in incoherent holographic microscopy [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(4): 044203.
- [36] Siegel N, Rosen J, Brooker G. Faithful reconstruction of digital holograms captured by FINCH using a Hamming window function in the Fresnel propagation [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3922-3925.
- [37] Nobukawa T, Katano Y, Muroi T, et al. Sampling requirements and adaptive spatial averaging for incoherent digital holography [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33634-33651.
- [38] Choi K H, Yim J, Min S W. Optical defocus noise suppressing by using a pinhole-polarizer in Fresnel incoherent correlation holography [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F121-F127.
- [39] Man T L, Wan Y H, Wu F, et al. Self-interference compressive digital holography with improved axial resolution and signal-to-noise ratio [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F91-F96.
- [40] Vijayakumar A, Kashter Y, Kelner R, et al. Coded aperture correlation holography system with improved performance [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F67-F77.
- [41] Rosen J, Vijayakumar A, Rai M R, et al. Review of 3D imaging by coded aperture correlation holography (COACH) [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9: 605.
- [42] Rai M R, Rosen J. Noise suppression by controlling the sparsity of the point spread function in interferenceless coded aperture correlation holography

- (I-COACH) [J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24311-24323.
- [43] Wan Y H, Liu C, Ma T, et al. Incoherent coded aperture correlation holographic imaging with fast adaptive and noise-suppressed reconstruction [J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8064-8075.
- [44] Liu C, Man T L, Wan Y H. Optimized reconstruction with noise suppression for interferenceless coded aperture correlation holography [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(6): 1769-1774.
- [45] Bouchal P, Bouchal Z. Wide-field common-path incoherent correlation microscopy with a perfect overlapping of interfering beams [J]. *Journal of the European Optical Society*, 2013, 8: 13011.
- [46] Imbe M. Optical configuration with fixed transverse magnification for self-interference incoherent digital holography [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2268-2276.
- [47] Tang M Y, Wu M T, Zang R H, et al. Fresnel incoherent digital holography with large field-of-view [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(10): 104204.
- [48] Kelner R, Rosen J. Spatially incoherent single channel digital Fourier holography [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3723-3725.
- [49] Kelner R, Rosen J, Brooker G. Enhanced resolution in Fourier incoherent single channel holography (FISCH) with reduced optical path difference [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20131-20144.
- [50] Tahara T, Kozawa Y, Ishii A, et al. Two-step phase-shifting interferometry for self-interference digital holography [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 669-672.
- [51] Man T L, Wan Y H, Wu F, et al. Four-dimensional tracking of spatially incoherent illuminated samples using self-interference digital holography [J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 109-113.
- [52] Nobukawa T, Muroi T, Katano Y, et al. Single-shot phase-shifting incoherent digital holography with multiplexed checkerboard phase gratings [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1698-1701.
- [53] Sakamaki S, Yoneda N, Nomura T. Single-shot in-line Fresnel incoherent holography using a dual-focus checkerboard lens [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(22): 6612-6618.
- [54] Liang D, Zhang Q, Wang J, et al. Single-shot Fresnel incoherent digital holography based on geometric phase lens [J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(2): 92-98.
- [55] Kumar M, Vijayakumar A, Rosen J. Incoherent digital holograms acquired by interferenceless coded aperture correlation holography system without refractive lenses [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 11555.
- [56] Rai M R, Vijayakumar A, Rosen J. Non-linear adaptive three-dimensional imaging with interferenceless coded aperture correlation holography (I-COACH) [J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18143-18154.
- [57] Rai M R, Vijayakumar A, Rosen J. Extending the field of view by a scattering window in an I-COACH system [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1043-1046.
- [58] Rai M R, Rosen J. Depth-of-field engineering in coded aperture imaging [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 1634-1648.
- [59] Kim M K. Adaptive optics by incoherent digital holography [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2694-2696.
- [60] 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.
- [61] Sheng W, Liu Y W, Shi Y Y, et al. Phase-difference imaging based on FINCH [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2766-2769.
- [62] Siegel N, Brooker G. Single shot holographic super-resolution microscopy [J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 15953-15968.
- [63] Rosen J, Brooker G. Fluorescence incoherent color holography [J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2244-2250.
- [64] Kim M K. Full color natural light holographic camera [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9636-9642.
- [65] Wan Y H, Man T L, Wang D Y. Incoherent off-axis Fourier triangular color holography [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8565-8573.
- [66] Hara T, Tahara T, Ichihashi Y, et al. Multiwavelength-multiplexed phase-shifting incoherent color digital holography [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10078-10089.
- [67] 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.
- [68] Yang J Y, Dong H, Xing F L, et al. Single-molecule localization super-resolution microscopy and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1200001.
- 杨建宇, 董浩, 邢福临, 等. 单分子定位超分辨成像技术进展及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(12): 1200001.

- [69] Li Y Z, Li C K, Hao X, et al. Review and prospect for single molecule localization microscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(24): 240002.
李雨竹, 李传康, 郝翔, 等. 基于单分子定位成像技术的研究及展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(24): 240002.
- [70] Yanagawa T, Abe R, Hayasaki Y. Three-dimensional mapping of fluorescent nanoparticles using incoherent digital holography [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3312-3315.
- [71] Marar A, Kner P. Three-dimensional nanoscale localization of point-like objects using self-interference digital holography[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 591-594.
- [72] Marar A, Kner P. Fundamental precision bounds for three-dimensional optical localization microscopy using self-interference digital holography[J]. *Biomedical Optics Express*, 2021, 12(1): 20-40.
- [73] Rosen J, Vijayakumar A, Kumar M, et al. Recent advances in self-interference incoherent digital holography[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, 11(1): 1-66.
- [74] Bulbul A, Vijayakumar A, Rosen J. Partial aperture imaging by systems with annular phase coded masks [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33315-33329.
- [75] Dubey N, Rosen J, Gannot I. High-resolution imaging system with an annular aperture of coded phase masks for endoscopic applications[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15122-15137.
- [76] Bulbul A, Rosen J. Partial aperture imaging system based on sparse point spread holograms and nonlinear cross-correlations[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 21983.
- [77] Mukherjee S, Vijayakumar A, Kumar M, et al. 3D imaging through scatterers with interferenceless optical system[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1134.
- [78] Vijayakumar A, Rosen J. Spectrum and space resolved 4D imaging by coded aperture correlation holography (COACH) with diffractive objective lens [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(5): 947-950.