

·封面文章·

非相干编码孔径相关全息的研究进展

计婷^{**}, 张乐, 李伟, 孙雪莹, 王剑南, 刘杰涛, 邵晓鹏^{*}

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 阐明了编码孔径相关全息记录和再现的基本原理,介绍了现有记录编码孔径相关全息图的系统与方法,着重分析了成像系统的分辨率及再现像质量,并讨论了该技术目前存在的问题与研究方向。编码孔径相关全息已经在动态三维成像、多光谱成像、自适应光学,以及生物医学、军事等领域中展现出了其应用潜力。

关键词 全息; 数字全息; 非相干全息; 三维成像; 成像分辨率; 再现像质量

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.080005

Research Progress of Incoherent Coded Aperture Correlation Holography

Ji Ting^{**}, Zhang Le, Li Wei, Sun Xueying, Wang Jiannan, Liu Jietao, Shao Xiaopeng^{*}

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract The basic principle of recording and reconstructing for the coded aperture correlation holography is clarified, and the existing systems and methods for recording the coded aperture correlation holography are introduced. The imaging resolution and reconstruction quality are mainly analyzed. The existing problems and the research directions for this technology are also discussed. Coded aperture correlation holography has been demonstrated its potential applications in the fields of dynamic three-dimensional imaging, multi-spectral imaging, adaptive optics, biomedicine, and military.

Key words holography; digital holography; incoherent holography; three-dimensional imaging; imaging resolution; image reconstruction quality

OCIS codes 090.1995; 070.2025; 110.6880; 100.6640; 100.3020

1 引言

根据照明方式,传统光学成像系统大体可分为 2 类,即相干光学成像系统和非相干光学成像系统^[1]。典型的相干光学成像系统有光学相干层析成像系统、光学全息成像系统等。传统的光学全息成像方法利用光的空间相干性,通过干涉记录、衍射再现的方式实现成像。故传统全息大都采用高相干性的激光作为光源。然而,采用激光光源的成像系统不仅对环境要求极高,还会产生散斑噪声和寄生干涉,且无法应用到白光领域(白光非相干光),这些因素极大地限制了传统的光学全息成像的应用^[2]。非相干全息技术可以很好地解决这一问题,它打破了传统光学全息成像技术对光源相干性的要求,可

应用于材料表面检测、生物细胞探测、三维目标跟踪、大型望远系统等。

自 1961 年美国科学家 Mertz 和 Young 提出非相干全息成像概念以来,非相干全息理论得到不断发展和完善^[3-7]。非相干全息其实是基于光的空间自相干性,因而分波尤为重要。早期提出的分波方法主要分为三类:分振幅分波法^[4,8-9]、孔径分波法^[4-6]和衍射分波法^[10-11]。分波后的物光与其同源的自参考光在记录平面进行干涉,从而获得非相干全息图。早期记录非相干全息图的方法有:1979 年美国爱荷华大学的 Poon 等^[12-13]提出的利用点探测器扫描记录包含物体信息与菲涅耳波带片的非相干全息图的方法;2001 年以色列本-古里安大学的 Li 等^[14]提出的通过对一组不同角度拍摄的图像进行

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-11-06; 录用日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61575154)、中央高校基本科研业务费(SA-ZD160501)、111 引智计划(B17035)

* E-mail: xpshao@xidian.edu.cn; ** E-mail: 1471206476@qq.com

计算并合成非相干全息图的方法。

非相干全息的记录与衍射分波随着电荷耦合器件(CCD)和空间光调制器(SLM)的出现变得更加简单且方便^[15]。2007年,Rosen等^[16-17]提出了菲涅耳非相干相关全息(FINCH)术,利用SLM进行衍射分光 and 相移,并在CCD上记录非相干全息图,通过与相干数字全息相同的重建方法来重构物体的三维信息。为提高系统分辨本领和改善再现像质量,2009年,以色列本-古里安大学的Katz等^[18-23]将合成孔径的相关理论与非相干数字全息成像结合起来,提出了一种基于菲涅耳元件的合成孔径(SAFE)技术。利用该技术所构建的成像系统突破了传统成像系统分辨率的限制,其分辨率超过了瑞利分辨极限。2013年美国南佛罗里达大学的Hong等^[24]结合计算成像的方法,利用超分辨率图像重建技术提高非相干数字全息的成像分辨率。目前,FINCH技术已经被应用在高分辨率合成孔径成像^[19]、非相干彩色全息^[25]、非扫描荧光生物样品显微成像^[26]和自适应光学^[27-28]等领域。

由于FINCH系统的调制传递函数(MTF)同时具有相干成像系统的形状和非相干成像系统的带宽,因此其分辨率比传统的非相干成像系统高1.5倍,比相干成像系统的分辨率高2倍^[29-30]。进一步分析FINCH的分辨率发现,其横向分辨率高于常规成像系统,但轴向分辨率较低^[31]。为了提高系统的轴向分辨率,2016年,以色列的Vijayakumar等^[32]提出了一种新的基于FINCH的非相干全息技术——编码孔径相关全息(COACH)。由点物衍射的经编码相位掩模(CPM)调制的光,与同源衍射的未调制光进行干涉,由双波干涉产生的脉冲响应记作点扩展全息图(PSH),作为重建函数。生成PSH后,将一个复杂的物体放置在同样的位置上,用相同的CPM记录该物体全息图,通过PSH和物体全息图之间的互相关来重建物体的像。为了重建出三维图像,需要通过移动点物(即针孔)的轴向位置进行训练,从而得到一个PSH库。COACH具有高轴向分辨率、高光谱分辨率^[33]、超分辨率^[34]等优点。

双波干涉记录全息图的系统对光源的相干性要求较高,并且光路复杂性较高。而Vijayakumar等发现,物体的三维信息不仅存储在全息图的相位中,同样也存储在振幅中,因此双波干涉不再是唯一的记录方法。2017年,Vijayakumar等^[35]在COACH的光学结构上进行简化,提出了一种无干涉非相干数字全息技术——无干涉编码孔径相关全息(I-

COACH)。点物衍射的光在全部被CPM调制后由CCD记录,经过相移得到PSH,在同样的CPM下记录复杂物体的全息图,最后通过互相关来重建目标。在I-COACH中,存储、传输和处理数据都更容易,并且系统成像的横向和轴向分辨率与等效数值孔径(NA)的常规成像系统的分辨率相当。与FINCH和COACH相比,I-COACH不需要双波干涉,光学结构更为简单,对光功率的要求较低。同年,Vijayakumar等^[36]对I-COACH系统进行进一步改进,提出了无透镜的I-COACH系统——无透镜非干涉编码孔径相关全息(LI-COACH),简化了相移过程,并对重建算法进行优化,其全息图的记录与重建过程与I-COACH相同。采用无透镜系统不但消除了像差并且增大了视场。

COACH系统虽然提高了轴向分辨率,却产生了背景噪声,这是COACH系统需要解决的基本问题。2018年,以色列本-古里安大学的Rai等^[37]提出了一种非线性自适应的重建方法,将重建过程视为一个光学模式识别问题,通过选择最优化的重建函数进行图像重构,不仅抑制了直流偏置和背景噪声,而且提高了系统的时间分辨率。相同课题组的Mukherjee等^[38-39]将该方法与散射介质相结合,提出了一种不需要任何关于目标的先验信息的单镜头成像技术,通过全息图的熵来选择非线性重建过程的最优化参数,实现了透过散射介质的自适应非线性成像。

本文详细介绍COACH成像技术及其改进方法和相关衍生技术。阐述COACH成像的基本原理,分析并讨论其光路结构、成像分辨率和再现像质量,总结了多帧平均及非线性重构技术等改进方法,展望了未来COACH技术的研究路线和发展前景。

2 COACH 成像原理

COACH成像至少需要在相同的条件下使用相同的CPM记录2幅全息图:一幅全息图称为物体全息图,包含被观测物体的信息;另一幅全息图是用点源记录的PSH。通过PSH与物体全息图的互相关来重建目标。由于相位掩模的随机性,当针孔或物体的轴向距离超过相关长度时重建图像会被严重破坏,导致图像的质量下降。因此,为了在不同的平面上重建目标,需要采用训练的方式获得PSH库。COACH的光路如图1(a)所示,其全息图的记录过程为:LED光源发出的非相干光通过透镜 L_1 聚焦针孔上,被物体衍射的光通过透镜 L_2 收集并准

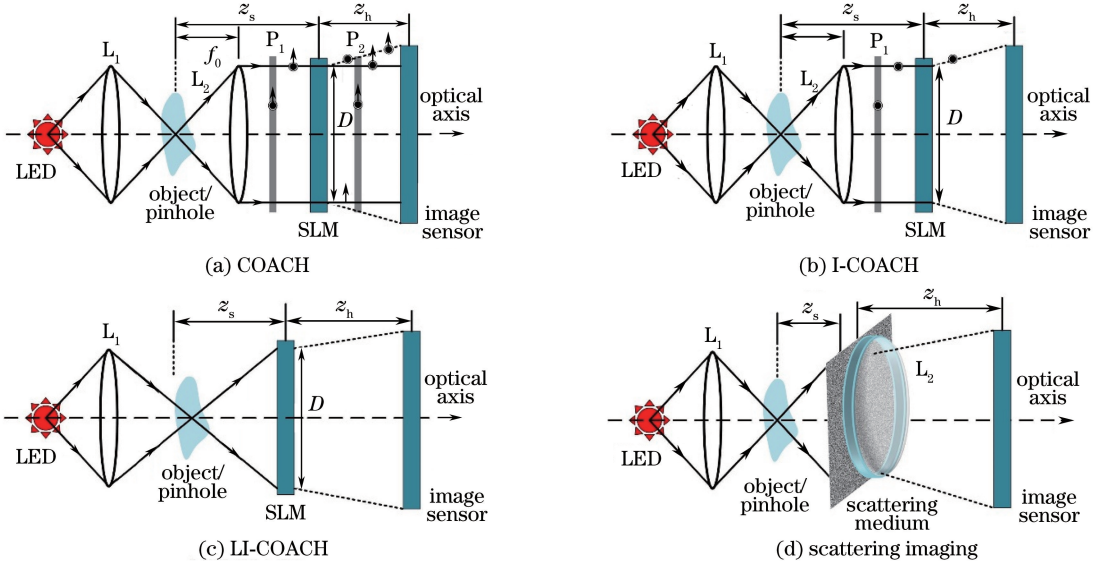

 图 1 成像光路示意图。(a) COACH^[32]; (b) I-COACH^[35]; (c) LI-COACH^[36]; (d) 散射成像^[39]

 Fig. 1 Schematic of imaging optical paths. (a) COACH^[32]; (b) I-COACH^[35]; (c) LI-COACH^[36]; (d) scattering imaging^[39]

直后照射到纯相位调制的 SLM 上。加载了 CPM 的 SLM 对偏振方向与 SLM 一致的光进行相位调制,对偏振方向与 SLM 垂直的光直接透射(反射式 SLM 则对偏振方向与 SLM 垂直的光直接反射)。同一物点发出的光在通过 SLM 后一部分被调制,另外一部分未被调制,2 束光在 CCD 平面进行干涉记录,经过相移后得到 PSH。图 1(a)中偏振片 P_1 的作用是根据光束的偏振特性将入射光分为 2 束,偏振片 P_2 的作用是将透过 SLM 的 2 束光进行合束。将物体放在与针孔相同的轴向位置处,在相同的条件下使用相同的 CPM 记录得到物体全息图。

当对物体进行记录时,任意的非相干照明的二维物体都可以将其看成无数个点的集合: $t(x, y) = \sum_j a_j \delta(x - x_j, y - y_j)$,其中 a_j 表示第 j 个点的强度, $\delta(x, y)$ 为脉冲响应函数, (x, y) 为物平面位置坐标, (x_j, y_j) 为 j 点在物平面的坐标。于是 CCD 平面记录的第 k 次强度响应 $I_k(u, v)$ 为^[32]

$$I_k(u, v) = \sum_j \left| A_j \exp \left[\frac{i2\pi(x_j u + y_j v)}{\lambda f_0} \right] + \exp(i\theta_k) B_j \exp \left[\frac{i2\pi(x_j u + y_j v)}{\lambda f_0} \right] \times G(u - u_j, v - v_j) \right|^2, \quad (1)$$

式中: λ 为入射光波长, f_0 为透镜 L_2 的焦距, $\exp(i\theta_k)$ 为相移项函数, θ_k 为第 k 次相移值, (u, v) 为 CCD 平面位置坐标, $G(u, v)$ 为 CPM 经过自由空间传输后在 CCD 平面得到的复振幅函数, A_j 与 B_j 为

平面波振幅。(1)式可以看作一束未调制的平面波和一束调制后的平面波干涉的结果。对在 SLM 上加的 CPM 进行 3 次相移($\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 120^\circ, \theta_3 = 240^\circ$),则在 CCD 平面可记录 3 幅强度图像(I_1, I_2, I_3),通过相移公式^[32]

$$H(u, v) = I_1(u, v) [\exp(-i\theta_3) - \exp(-i\theta_2)] + I_2(u, v) [\exp(-i\theta_1) - \exp(-i\theta_3)] + I_3(u, v) [\exp(-i\theta_2) - \exp(-i\theta_1)], \quad (2)$$

合成全息图,通过对得到的 PSH 与物体全息图进行互相关即可重建物体^[32],表达式为

$$P(u, v) = H_{\text{object}} \otimes H_{\text{PSH}} = \iint \left[\sum_j A_j^* B_j G(u - u_j, v - v_j) \right] \times G^*(u - u_j, v - v_j) du dv = \sqrt{3}i \sum_j A_j^* B_j \delta(u - u_j, v - v_j), \quad (3)$$

式中 $*$ 表示取共轭。

然而, Vijayakumar 等发现,相位信息在重建过程中是可有可无的,因而不再需要双波干涉来记录物体的三维信息。在此基础上, I-COACH 系统通过去掉 COACH 光路中的偏振片 P_2 以消除双波干涉,利用偏振片 P_1 使得入射光的偏振方向与 SLM 保持一致,从而直接对所有入射光进行调制,如图 1 (b)所示。I-COACH 系统的实验原理、流程与结果皆与 COACH 类似,具有相同的时间分辨率,并且其光路复杂程度较低,易于实现。对于 I-COACH 光路,一个放置在 $(\vec{r}_s, z_s) = (x_s, y_s, z_s)$ 处振幅为 $\sqrt{I_s}$ 的点物在 CCD 平面的强度响应为^[35]

$$I_k(\bar{\mathbf{r}}_0; \bar{\mathbf{r}}_s, z_s) = \left| \sqrt{I_s} C_1 L(\bar{\mathbf{r}}_s/z_s) Q(1/z_s) \right. \\ \left. Q(-1/f_0) \exp[i\Phi_k(\bar{\mathbf{r}})] \otimes Q(1/z_h) \right|^2, \quad (4)$$

式中: $Q(1/z) = \exp[i\pi(\lambda z)^{-1}(x^2 + y^2)]$ 和 $L(\bar{\mathbf{r}}_s/z) = \exp[i2\pi(\lambda z)^{-1}(x_s x + y_s y)]$ 分别表示二次相位函数和线性相位函数, z 为传输距离, C_1 为复常数, $\Phi_k(\bar{\mathbf{r}})$ 为 CPM 的相位函数, $\bar{\mathbf{r}}_s = (x_s, y_s)$ 为物平面的坐标向量, $\bar{\mathbf{r}}$ 为 SLM 平面坐标向量, $\bar{\mathbf{r}}_0 = (u, v)$ 为 CCD 平面位置向量, z_s 为物平面到 SLM 的距离, z_h 为 SLM 到 CCD 的距离, \otimes 为卷积运算。则一个二维目标 $t(\bar{\mathbf{r}}_s) = \sum_j a_j \delta(\bar{\mathbf{r}}_s - \bar{\mathbf{r}}_{s,j})$ 在 CCD 平面的强度响应为^[35]

$$I_k(\bar{\mathbf{r}}_0, z_s) = \sum_j a_j I_k \left[\left(\bar{\mathbf{r}}_0 - \frac{z_h}{z_s} \bar{\mathbf{r}}_{s,j} \right); 0, z_s \right], \quad (5)$$

式中 $\bar{\mathbf{r}}_{s,j}$ 表示第 j 点在物平面上的坐标。

此外,与 COACH 不同的是, I-COACH 虽然也需要 3 次相移,但只需直接将强度投影到指定方向并叠加即可合成全息图^[35],合成全息图可表示为

$$H(\bar{\mathbf{r}}_0, z_s) = \sum_{k=1}^K I_k(\bar{\mathbf{r}}_0, z_s) \exp(i\theta_k), \quad (6)$$

式中: $I_k(\bar{\mathbf{r}}_0, z_s)$ 为 CCD 采集到的强度响应; $k = 1, 2, \dots, K$ 为相移次数; θ_k 为第 k 次相移投影角度。I-COACH 不需要在 SLM 上对 CPM 进行相移,其重建过程与 COACH 相同。

由于无透镜系统没有像差,为了获得更好的强度响应, Vijayakumar 等去掉了 I-COACH 光路中的透镜 L_2 , 提出了无透镜的 LI-COACH 系统,达到了消除像差、扩大视场的目的,如图 1(c)所示。LI-COACH 系统中的 SLM 直接对物体发出的衍射球面波进行调制并在 CCD 平面进行记录。与 I-COACH 相比, LI-COACH 系统不仅在光路上进行了简化,而且对计算过程也进行了简化,只需要 2 次曝光响应就可得到全息图,有效地提高了时间分辨率。LI-COACH 系统具有与常规成像系统一样简单的光路结构,但不同的是,该系统可进行三维成像。因为在物平面与像平面之间只有一个光学元件,所以 LI-COACH 系统有效地扩大了成像系统的视场。对于 LI-COACH 光路,物体在 CCD 平面的强度响应与 I-COACH 类似,只需去掉透镜的响应函数即可,不同的是全息图 $H(\bar{\mathbf{r}}_0, z_s)$ 是通过计算 2 次强度响应 $I(\bar{\mathbf{r}}_0, z_s)$ 的差得到的,即

$$H(\bar{\mathbf{r}}_0, z_s) = I_1(\bar{\mathbf{r}}_0, z_s) - I_2(\bar{\mathbf{r}}_0, z_s). \quad (7)$$

综上所述, COACH、I-COACH 以及 LI-COACH 系

统具有以下异同点: 1) 均为同轴光路,需采用相移技术来消除 0 级像与孪生像,重建时需要记录 PSH 与物体全息图并进行互相关运算,三维重建时还需要记录 PSH 库; 2) COACH 通过双波干涉记录全息图,而 I-COACH 与 LI-COACH 均摒弃了双波干涉; 3) COACH 中的 SLM 对入射平面波进行部分调制,而 I-COACH 中的 SLM 对入射平面波进行完全调制, LI-COACH 中的 SLM 对入射球面波进行完全调制; 4) 合成全息图时, COACH 与 I-COACH 至少需要记录 3 幅 PSH, 而 LI-COACH 只需要 2 幅,在记录时 COACH 所用的 CPM 不独立,而 I-COACH 与 LI-COACH 所用的 CPM 则完全独立。

在 COACH 及其衍生系统中,获得 CPM 是成像的关键步骤。利用 G-S (Gerchberg-Saxton) 算法^[40-41]生成 CPM 的流程如图 2 所示,其中 C 为复振幅, A 为振幅, Φ 为相位, z_s 为物平面到 CPM 平面的距离, z_h 为 CPM 平面到 CCD 平面的距离, \otimes 为卷积符号, l 为迭代次数。将随机相位 $\exp[i\Phi_{\text{rand}}(x, y)]$ 与起源于 z_s 处的发散球面波相乘,在 SLM 平面提取相位并与一个全 1 的振幅矩阵点乘,得到复振幅场 F1。经过菲涅耳传输后获得复振幅场 F2,再用中心为 1、边缘为 0 填充的矩阵更新 F2 的振幅,0 与 1 的分布与 CCD 靶面匹配,获得新的复振幅场 F3。逆向菲涅耳传输得到 F4,用 F4 的相位更新 F1 的相位并进行下一次迭代,直到满足 G-S 算法约束条件。最后一次迭代得到的相位与 $Q(-1/z_s)$ 相乘,以消除输入球面波相位 $Q(1/z_s)$ 的影响。

3 成像分辨率的提高与再现像质量的提升

为了提高 FINCH 的轴向分辨率, Vijayakumar 等提出了 COACH 系统,其成像分辨率与具有相同 NA 的常规成像系统相当,但 COACH 系统可以进行三维成像。COACH 系统满足拉格朗日不变量,与 FINCH 系统相比横向分辨率有所降低,而轴向分辨率有所提高。同样地, I-COACH 与 LI-COACH 均满足拉格朗日不变量,因而成像分辨率与具有相同 NA 的常规成像系统近似。

COACH 及其改进的相关系统的分辨率如表 1 所示,其中 D 为光束直径, d 为针孔直径。

FINCH 和 COACH 的重建强度与针孔距透镜 L_2 焦平面的轴向距离之间的关系如图 3 所示,并且 I-COACH 与 LI-COACH 和 COACH 具有相同的线性关系^[32, 35-36]。图 4 为常规成像系统、FINCH、

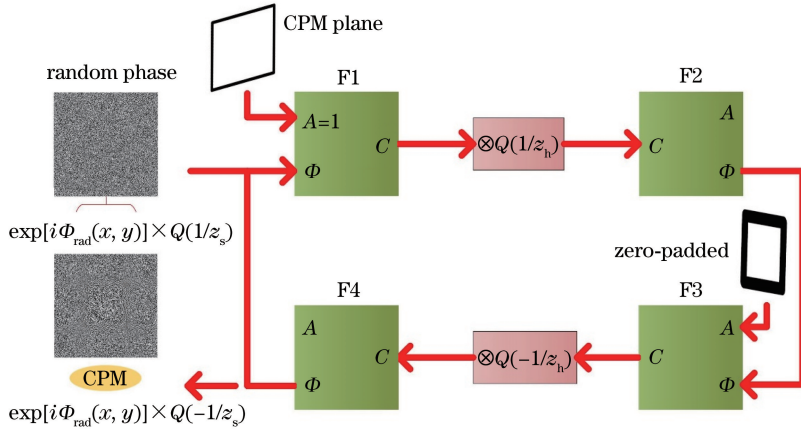


图 2 利用 G-S 算法生成 CPM 的流程图^[36]

Fig. 2 Flow chart of CPM generation with G-S algorithm^[36]

表 1 COACH 及其相关系统的分辨率

Table 1 Resolutions of COACH and related systems

System	Lateral resolution	Axial resolution
Regular imaging system	$0.61\lambda/NA$ ^[42]	$2\lambda/(NA)^2$ ^[42]
COACH	$1.22\lambda f_0/D$ ^[32]	$2\lambda/(NA)^2$ ^[32]
I-COACH	$1.22\lambda z_s/D$ ^[35]	$8\lambda(z_s/D)^2$ ^[35]
LI-COACH	$\text{Max}(d, 1.22\lambda z_s/D)$ ^[36]	$\text{Max}[8d^2/\lambda, 8\lambda(z_s/D)^2]$ ^[36]

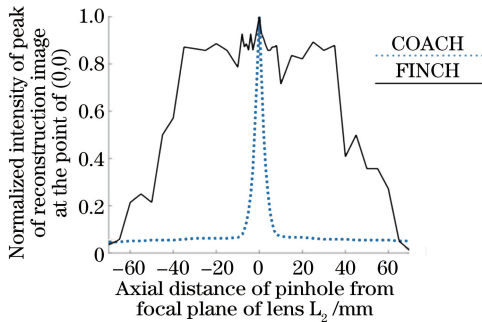


图 3 归一化重建强度与针孔距透镜 L_2 焦平面的轴向距离之间的关系^[32]

Fig. 3 Relationship between normalized reconstruction intensity and axial distance of pinhole from focal plane of lens L_2 ^[32]

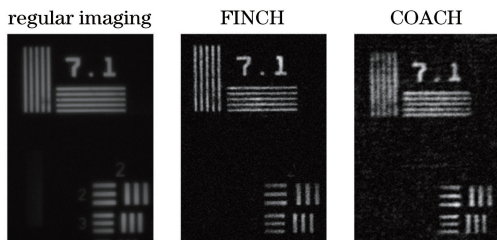


图 4 常规成像系统、FINCH 和 COACH 的成像结果图^[32]

Fig. 4 Imaging results of regular imaging system, FINCH and COACH^[32]

COACH 对 NBS1963A 分辨率靶上的元素 7.1 lp/mm 和 USAF1951 分辨率靶中的第 2 组中的元素 2 和 3 的成像结果, 可以很明显地看到 COACH 成像结果具有很大的背景噪声。

如图 1 所示, COACH、I-COACH 以及 LI-COACH 系统均为同轴光路, 故三者不可避免地会出现直流偏置项与共轭像。相移技术是消除全息图直流偏置项和共轭像的最直接和最常用的方法^[7]。因此 COACH 系统采用三步相移来消除直流偏置项与共轭像。但是针对系统的固有背景噪声, 相移技术也无法解决。Vijayakumar 等^[43] 发现 COACH 系统在重建过程中的背景噪声主要来源于生成 CPM 的 G-S 算法。G-S 算法有 2 个约束条件: 1) 基于卷积理论, 利用对应复全息图的自相关可重建点物; 2) 自相关等于光谱函数平方的傅里叶变换。然而 G-S 算法无法同时满足这 2 个约束条件, 理论要求生成的 CPM 在空域和频域分布的相位函数都是均匀的, 然而实际上生成的 CPM 在空域上分布的相位函数是均匀的, 在频域上分布的相位函数是近似均匀的。

为了提高重建质量、降低背景噪声, 可将重建过程看作一个光学模式识别问题^[37, 44-46]。原本使用进行相关重建的过程可以看作在光学模式识别中使用匹配滤波器, 但是 PSH 的自相关峰不是最尖锐的, 因而其重建效果不是最好的。使用纯相位滤波器^[45] 的重建结果明显优于匹配滤波器, 但仍不是最好的。2018 年 Rai 等^[37] 提出非线性自适应的重建方法, 在频域对物体进行重建。对于点物, 其频域自适应的重建结果 $F(C)$ 为

$$F(C) = |F(I_{\text{PSH}})| \exp(i2\pi z_h \bar{\mathbf{r}}_s \cdot \bar{\mathbf{v}}/z_s) |F(I_{\text{PSH}})|^r, \quad (8)$$

式中：“F”表示傅里叶变换； I_{PSH} 为PSH的强度； $\bar{v} = (v_x, v_y)$ 为频域坐标； (o, r) 为指数。对于点物，要获得最好的重建结果，则 C 尽可能地接近 $\delta(\bar{r}_o - z_h \bar{r}_s / z_s)$ 或者 $F(C)$ 尽可能地接近 $B \times \exp(i2\pi z_h \bar{r}_s \cdot \bar{v} / z_s)$ ，其中 B 为常数。为了取得最好的重建结果，则(8)式的指数 o 和 r 应当满足 $o+r=0$ 且 $o, r \in [-1, 1]$ 。在模式识别中，一般用“熵”来衡量相关峰的尖锐程度^[46]。熵是对一个系统中无序度的度量，当重建图像的幅度分布在整个图像平面上时，熵取最大值；当重建图像的幅度在很小的区域内累积时，熵取最小值。熵越小，重建图像的信噪比(SNR)越大，重建质量越好。因此，在选择重建函数时，当熵取最小值时计算对应的 (o, r) 值并代入(8)式即可。图5为非线性重建结果，其中箭头1表示用最小归一化熵(等于1)的重建结果，箭头4, 2, 3分别为用匹配滤波器、纯相位滤波器和逆滤波器进行重建的结果。

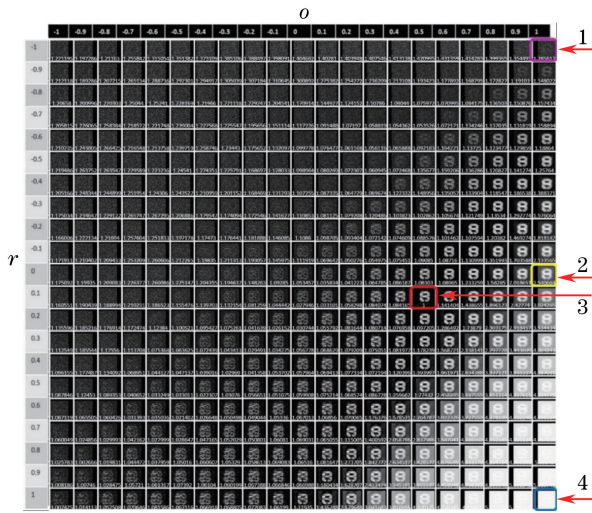


图5 不同 (o, r) 对应的非线性重建结果^[37]

Fig. 5 Nonlinear reconstruction results corresponding to different (o, r) ^[37]

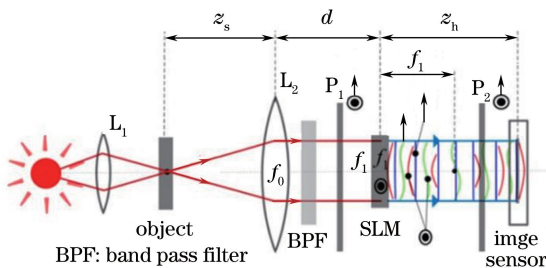


图6 混合FINCH-COACH光学结构示意图^[43]

Fig. 6 Structural diagram of hybrid FINCH-COACH^[43]

除此之外，Vijayakumar 等还提出了利用混合FINCH-COACH系统或平均技术的方法来降低背

景噪声。混合系统结构如图6所示，Vijayakumar等通过合并COACH与FINCH的相位掩模来达到混合系统的目的，并引入一个传输因子 α 来控制系统的混合度，则该系统的CPM可表示为^[43]

$$t_k(\bar{r}) = Q \left(\frac{1}{f_1} \right) \exp [i\alpha\Phi(\bar{v})] \exp(i\theta_k), \quad (9)$$

式中 f_1 为二次相位函数的焦距。

当 α 接近 1 时，该系统接近 COACH 系统，其轴向分辨率与背景噪声越大，相反地， α 接近 0 时，该系统接近 FINCH 系统，其轴向分辨率与背景噪声越小。混合FINCH-COACH系统不同值对应的归一化重建强度与轴向距离之间的线性关系如图7所示。为了在降低背景噪声的同时取得较高的轴向分辨率，可通过选择适当的 α 使混合系统达到动态平衡。值得一提的是，该混合系统同时具有COACH和FINCH系统各自的性质，但是这些性质均被削弱，并且混合系统不满足拉格朗日不变量条件。图8所示为不同传输因子下混合系统和常规成像系统对NBS1963A分辨率靶中目标10 lp/mm和USAF1951分辨率靶中目标4(11.31 lp/mm)、5(12.70 lp/mm)和6(14.25 lp/mm)的成像效果。

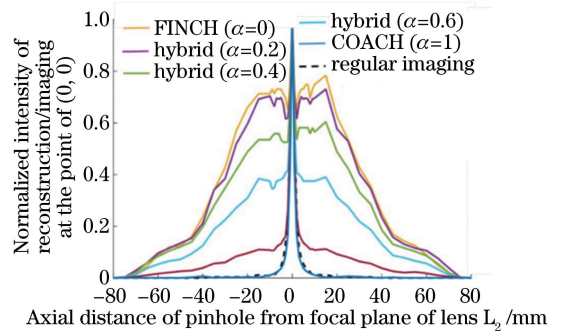


图7 归一化重建强度与轴向距离之间的线性关系^[43]

Fig. 7 Linear relationship between normalized reconstruction intensity and axial distance^[43]

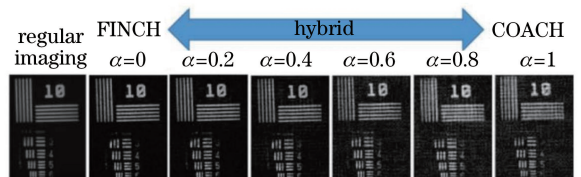


图8 不同传输因子对应成像结果^[43]

Fig. 8 Imaging results corresponding to different transmission factors^[43]

平均COACH(Averaged COACH)技术是通过降低时间分辨率来降低背景噪声的。假设每2个CPM之间都是独立的，则记录由 m 个独立的CPM得到复全息图，并对所有全息图作平均处理，当 m

取极值时,背景噪声可降至为零。该系统与混合系统相比保留了 COACH 系统的轴向分辨率的特性,但是却牺牲了时间分辨率,其记录、存储、传输和处

理数据的过程更加耗时。图 9 给出了在 m 种不同 CPM 平均重建 m 次以后,平均 COACH 对物体 10 lp/mm 的重建结果。

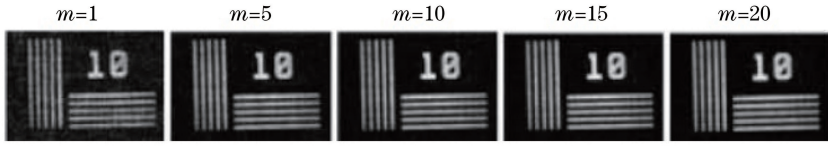


图 9 当 CPM 数量不同时,COACH 的平均重建结果^[43]

Fig. 9 Average reconstruction results of COACH for different numbers of CPMs^[43]

4 COACH 相关技术研究与应用

FINCH、COACH 等非相干全息系统主要用于三维物体重建,其中 FINCH 与 COACH 均采用了双波干涉的方案,而 I-COACH 与 LI-COACH 不再使用双波干涉,并且 LI-COACH 只需要记录 2 幅强度响应图像,因此 LI-COACH 的时间分辨率最高。

对 COACH 进行深入研究,发现 COACH 不仅具有较高的轴向分辨率,还具有很好的光谱分辨率。紧接着,Vijayakumar 等^[33]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,其光路示意图如图 10 所示。用不同波长的光源照射三维物体,通过 CPM 记录物体全息图。在相同的条件下,Vijayakumar 等采用相同的 CPM,在不同的轴向位置用不同的波长的光照射点物,记录并获得 PSH 库。利用物体全息图与用特定波长记录的 PSH 的互相关,Vijayakumar 等可重建出在特定的轴向位置特定波长照射的物体。由于衍射透镜的焦距随着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。同一平面不同波长记录的重建结果如图 11 所示,显然在特定波长处的重建质量最好。

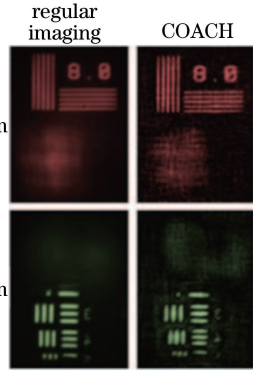


图 11 光谱重建结果^[33]

Fig. 11 Spectral reconstruction results^[33]

行调制,其光路结构如图 1(d)所示。Mukherjee 等结合自适应重建方法成功实现透过散射介质三维成像,其重建结果如图 12 所示。

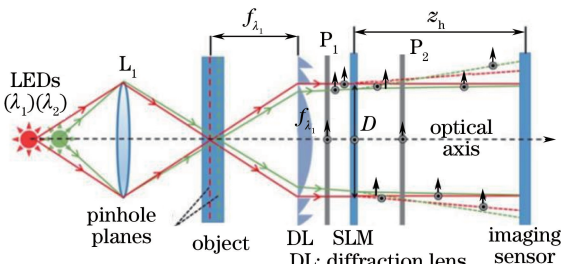


图 10 4D 成像的 COACH 结构^[33]

Fig. 10 COACH configuration for 4D imaging^[33]

如何透过散射介质成像一直都是一个研究热点。考虑到 CPM 与散射介质均具有随机性,Mukherjee 等将散射介质引入到 LI-COACH 系统中,用一个散射介质加透镜代替 SLM 来对物光进

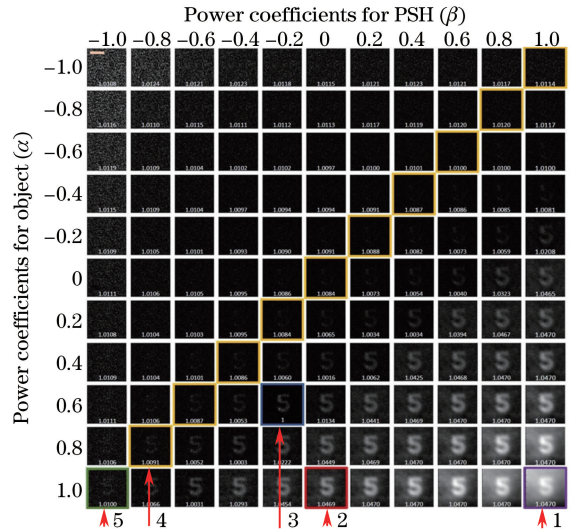


图 12 基于散射介质对数字“5”的非线性重建,比例尺:350 μm ^[39]

Fig. 12 Nonlinear reconstruction of digit ‘5’ based on scattering medium, scale bar: 350 μm ^[39]

图 12 中箭头 1,2,5 分别为用匹配滤波器、纯相位滤波器和逆滤波器滤波进行重建的结果,箭头 4 表示满足方程 $\alpha + \beta = 0$ 的重建结果,而箭头 3 表示

熵值最小时的重建结果。这种简单的、非相干的、无干涉的通过散射介质进行单帧成像的技术,不仅实现了自适应非线性的单平面和多平面成像,还实现了荧光染料标记物体的非侵入成像。此外,为了获得足够高的探测 SNR,上述 COACH 系统均采用一个 $100\ \mu\text{m}$ 的针孔来获取 PSH,虽然更小的针孔会提供更好的分辨率,但是物光的光强会变弱,从而会影响系统 SNR 等。

I-COACH 系统每次重建都至少需要采集 3 幅图像,因而其传输、处理数据的过程较为耗时。为了提高时间分辨率,研究人员提出了单帧成像技术,这为 I-COACH 用于动态实时成像提供了可能^[47]。利用 G-S 算法生成 2 个 CPM,并使它们在 SLM 上并排显示,用作系统孔径。将针孔衍射的光引入系统中,记录对应于这 2 个 CPM 的 2 个脉冲响应,并且对二者作差以去除全息图的直流偏置项、减小背景噪声。采用同样的方法训练记录 PSH 库,物体在任意平面上的图像是通过物体全息图与 PSH 库中相应的全息图之间的互相关来进行重建,其光路如图 13 所示。需要注意的是,为了使经过 2 个 CPM 调制的脉冲响应在 CCD 平面上分离,互不影响且不重叠,2 个 CPM 需要沿水平轴与 2 个具有相同周期和相反相位的线性相位板相乘。为了满足 G-S 算法的约束条件,还需要将 CPM 与相应的线性相位的乘积与二次相位函数相乘,使其覆盖全孔径,CPM 合成流程如图 14 所示。

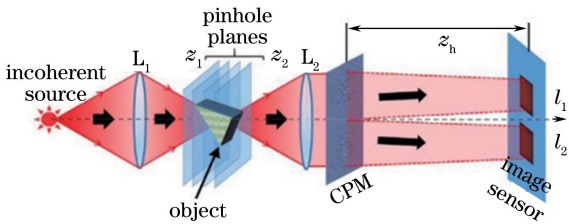


图 13 单镜头 COACH 成像系统^[47]

Fig. 13 Single camera COACH imaging system^[47]

Rai 等^[48]在扩大 I-COACH 成像视场方面也做了相应研究,将 I-COACH 的视场扩展到 CCD 面积所限制的范围之外。Rai 等将所记录的多个 PSH 拼接在一起产生一个 SPSH(Synthetic PSH),其面积是 CCD 记录的任何一个 PSH 的 9 倍。如图 15 所示,首先,将位于光轴上的点物在 CCD 上所产生的脉冲响应记录在 SPSH 的中心部分;然后,将点物横向移动到预设的位置上,记录 SPSH 以外部分的信息;其次,将横向范围超过 CCD 边界的物体放置在与点物相同的轴向位置处,并记录物体全息图;

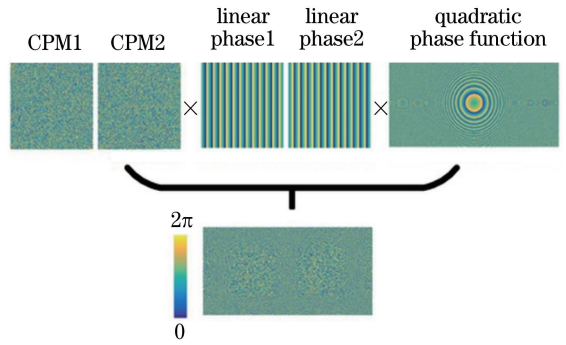


图 14 单镜头 COACH 成像系统 CPM 合成示意图^[47]

Fig. 14 Schematic of CPM synthesis for single camera COACH imaging system^[47]

最后,对物体全息图进行零填充使其具有与 SPSH 相同的大小,并通过互相关重建物体。在该技术中,I-COACH 的视场被扩展,但是其重建结果的 SNR 却降低了,重建图像的质量有所下降,针对这一问题,可通过对一定数量的重建图像作平均来补偿。当然,还有许多技术,如粒子编码^[49]、卷积技术^[50]和干涉图的复用^[51],均可用于扩展成像系统的视场。

对于大型望远镜系统,成像透镜不仅需要消耗大量材料而且精度不够高,目前一般采用合成孔径技术,通过多个小型透镜覆盖全孔径进行成像。2017 年,Bulbul 等^[52]在 I-COACH 的基础上,通过利用面积低至总孔径面积 1.4% 的合成环形 CPM 证明了部分孔径成像系统(PAIS)可进行三维成像,如图 16 所示。在 PAIS 中,首先,从点物衍射的光被环形 CPM 调制,并被相同孔径规格的环形衍射透镜投射到 CCD 平面上,由此产生的强度响应被记录,生成 PSH;然后,将物体放置在与点物体的相同轴向位置处,使用相同的 CPM 记录物体全息图;最后,通过上述二个全息图之间的互相关来重建物体图像。该系统虽然可进行小孔径成像,但是系统的畸变量随着孔径的减小而增加。不同半径对应的 PAIS 系统的成像结果如图 17 所示,随着环形孔径半径的增大,成像系统的分辨率越来越高,图像的质量也越来越好,接近全孔径成像。在地面和太空望远镜等大型成像系统中,可通过环形分布的小型透镜成像代替全孔径透镜成像,从而达到节省材料、降低成本的目的。

5 结束语

简要介绍了 COACH 技术的发展和建立过程,详细介绍了 COACH 技术的研究进展。COACH

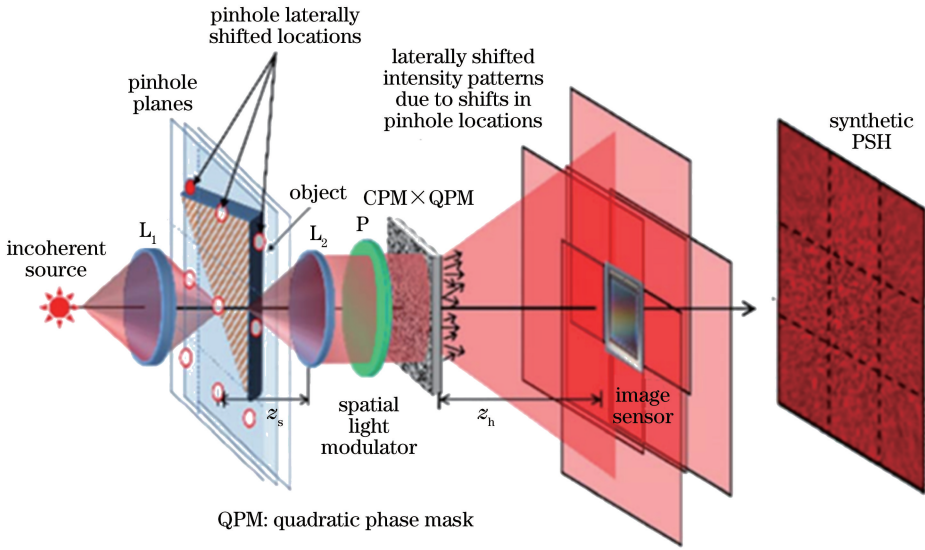


图 15 I-COACH 扩展视场的原理图^[48]

Fig. 15 Schematic of field of view extension for I-COACH^[48]

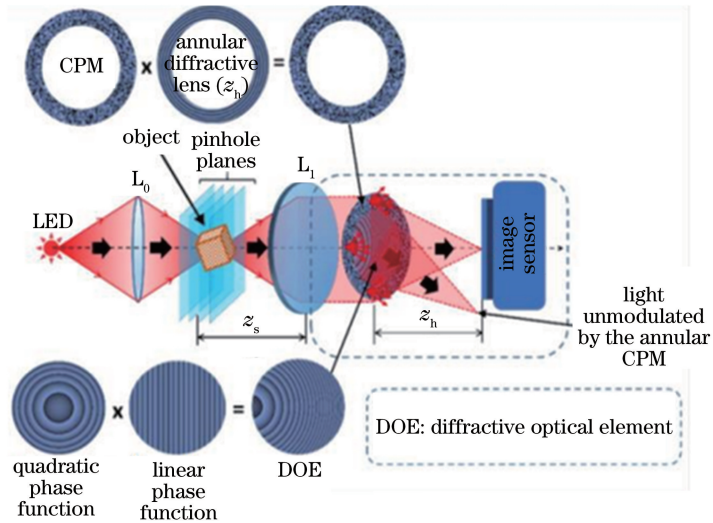


图 16 PAIS 光学结构示意图^[52]

Fig. 16 Structural diagram of PAIS^[52]

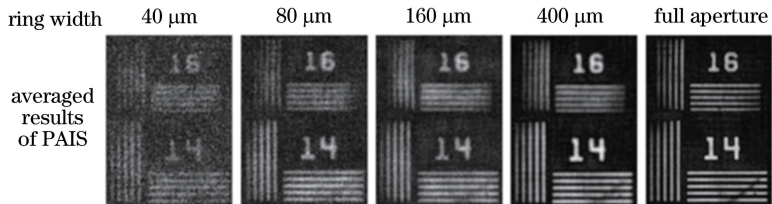


图 17 不同半径的 PAIS 系统成像结果^[52]

Fig. 17 Imaging results of PAIS systems with different radii^[52]

系统是一种简单、非扫描、高分辨率的三维成像系统，将物体的三维信息压缩到一个二维全息图内，其存储、传输和处理数据都更容易，并且具有与相同 NA 的常规成像系统相当的分辨率。I-COACH 和

LI-COACH 在 COACH 系统上进行了简化，抛弃双波干涉，保留了三维高分辨率成像能力。自 COACH 系统被提出以来，针对 COACH 等系统的研究主要集中在如何提高成像分辨率、抑制噪声、提

高重建质量以及提高 COACH 系统成像性能等方面。同时,COACH 系统的发展时间相对较短,有待研究解决的问题、可完善之处及具体应用领域的推进工作还有很多。

综合相关文献及报道,通过分析总结来看,该技术的进一步发展亟需突破以下重难点:1) 目前 COACH 技术的基础理论还需要进一步研究扩展,可提出一种系统的、全方位的、自适应的研究理论来解释传播、记录与重建过程;2) COACH 技术的衍射分波与编码大都采用 SLM 技术,SLM 的衍射效率与调制度对成像结果有较大的影响,可研究设计一种更加稳定的纯光学元件取代 SLM 进行衍射分波与编码;3) 目前 COACH 系统采用窄带光源(带宽一般为 10~30 nm)进行成像,拓展光源谱宽也是未来的研究趋势,比如实现白光成像;4) 有关 COACH 的研究基本采用二维平面目标,并且需要多次记录,利用 COACH 技术对动态目标或者纵向移动的物体进行成像和追踪也可作为一个研究方向;5) 所有 COACH 技术的重建过程都需要先记录轴向位置对应的 PSH,如何摒弃 PSH 实现无先验重建也是研究的难点所在。

除了解决上述问题外,针对 COACH 系统目前还有几个未来较有前景的研究方向值得进一步研究和拓展:1) 将 CPM 的伪随机性扩展到完全随机,引入散射介质进行相位编码,从而实现透过大气和生物组织等动态散射介质成像;2) 现阶段的 COACH 成像至少需要记录 2 幅强度图像,可考虑使用单个 CPM 实现单幅成像,再结合非线性重建来提高系统的时间分辨率;3) 光路中 SLM 的靶面大小限制了 COACH 的成像视场,可利用合成孔径或叠层成像等技术实现大视场成像并提高成像分辨率。

综上所述,COACH 技术是一种具有很好发展与应用前景的高分辨率三维计算成像技术。可以预见,COACH 技术将来不仅在光学显微和生物医学领域有广泛的应用,在天文探测与军事侦查等方面也有巨大的应用前景。

参 考 文 献

[1] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. Qin K C, Liu P S, Chen J B, *et al.*, Transl. 3rd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 91-119.
约瑟 W 古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 91-119.

[2] Men G F, Pascal P, Wang H Y, *et al.* Research progress of Fresnel incoherent correlation digital holography[J]. *Imaging Science and Photochemistry*, 2017, 35(2): 199-207.
门高夫, Pascal Picart, 王华英, 等. 菲涅耳非相干相关数字全息研究进展[J]. *影像科学与光化学*, 2017, 35(2): 199-207.

[3] Mertz L, Young N O. Fresnel transformations of images[C] // *Optical Instruments and Techniques*. London: Chapman and Hall Ltd, 1961: 305-310.

[4] Lohmann A W. Wavefront reconstruction for incoherent objects[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(11): 1555-1556.

[5] Stroke G W, Restrick R C III. Holography with spatially noncoherent light [J]. *Applied Physics Letters*, 1965, 7(9): 229-231.

[6] Cochran G. New method of making Fresnel transforms with incoherent light[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(11): 1513-1517.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Shi S X, Wang X E, Ma L. Physical optics and applied optics[M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2014: 91-104.
石顺祥, 王学恩, 马琳. 物理光学与应用光学[M]. 3 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 91-104.

[10] Leith E N, Upatnieks J. Holography with achromatic-fringe systems[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(8): 975-980.

[11] Kato M, Suzuki T. Fourier-transform holograms by Fresnel zone-plate achromatic-fringe interferometer [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, 59(3): 303-307.

[12] Poon T C, Korpel A. Optical transfer function of an acousto-optic heterodyning image processor [J]. *Optics Letters*, 1979, 4(10): 317-319.

- [13] Chen H. Investigation of key problems on Fresnel incoherent correlation holography [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
陈昊. 菲涅耳非相干相关数字全息术关键问题研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [14] Li Y Z, Abookasis D, Rosen J. Computer-generated holograms of three-dimensional realistic objects recorded without wave interference [J]. Applied Optics, 2001, 40(17): 2864-2870.
- [15] Zhu W F. Research on the characteristics of incoherent digital holographic imaging based on spatial light modulator [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
朱五凤. 基于空间光调制器的非相干数字全息成像特性研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [16] Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel holography [J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 912-914.
- [17] Li Y Y, Qin W, Gao Z, *et al.* Two-step phase-shifting based incoherent digital holographic microscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040901.
李滢滢, 秦琬, 高志, 等. 基于两步相移的非相干数字全息显微技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040901.
- [18] Katz B, Rosen J. Incoherent optical imaging using synthetic aperture with Fresnel elements [C] // Digital Holography and Three-dimensional Imaging, April 26-30, 2009, Vancouver, Canada. Washington DC: Optical Society of America, 2009: PJTuB37.
- [19] Katz B, Rosen J. Super-resolution in incoherent optical imaging using synthetic aperture with Fresnel elements [J]. Optics Express, 2010, 18(2): 962-972.
- [20] Katz B, Rosen J. Could SAFE concept be applied for designing a new synthetic aperture telescope [J]. Optics Express, 2011, 19(6): 4924-4936.
- [21] 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.
- [22] Kashter Y, Rivenson Y, Stern A, *et al.* Sparse synthetic aperture with Fresnel elements (S-SAFE) using digital incoherent holograms [J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20941-20960.
- [23] Gong Q X, Wang P, Bai Y H, *et al.* Imaging characteristics of synthetic aperture incoherent digital holography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080901.
弓巧侠, 汪盼, 白云鹤, 等. 合成孔径非相干数字全息的成像特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080901.
- [24] Hong J, Kim M K. Resolution enhancement of incoherent digital holography using the super resolution image reconstruction technique [C] // Digital Holography and Three-Dimensional Imaging. April 21 - 25, 2013, Kohala Coast, Hawaii, USA. Washington DC: Optical Society of America, 2013: DTh1A. 3.
- [25] Rosen J, Brooker G. Fluorescence incoherent color holography [J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2244-2250.
- [26] Rosen J, Brooker G. Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy [J]. Nature Photonics, 2008, 2(3): 190-195.
- [27] Kim M K. Adaptive optics by incoherent digital holography [J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2694-2696.
- [28] Kim M K. Incoherent digital holographic adaptive optics [J]. Applied Optics, 2013, 52(1): A117-A130.
- [29] 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.
- [30] Weng J W, Tan S Y. Imaging resolution of self-interference incoherent digital holographic system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0609006.
翁嘉文, 谭穗妍. 自干涉非相干全息成像系统分辨率 [J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0609006.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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: 11555.
- [37] 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.
- [38] Mukherjee S, Vijayakumar A, Kumar M, *et al.* 3D imaging through scatterers with interferenceless optical system [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1134.
- [39] Mukherjee S, Rosen J. Imaging through scattering medium by adaptive non-linear digital processing [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10517.
- [40] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*. 1972, 35(2): 227-246.
- [41] Yang G Z, Dong B Z, Gu B Y, *et al.* Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 209-218.
- [42] Pawley J B. *Handbook of biological and confocal microscopy* [M]. 3rd ed. Plenum Press, 2006: 1-19.
- [43] Vijayakumar A, Kashter Y, Kelner R, *et al.* Coded aperture correlation holography system with improved performance [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F67-F77.
- [44] Lugt A V. Signal detection by complex spatial filtering [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1964, 10(2): 139-145.
- [45] Horner J L, Gianino P D. Phase-only matched filtering [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(6): 812-816.
- [46] Fleisher M, Mahlab U, Shamir J. Entropy optimized filter for pattern recognition [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(14): 2091-2098.
- [47] Rai M R, Vijayakumar A, Rosen J. Single camera shot interferenceless coded aperture correlation holography [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3992-3995.
- [48] 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.
- [49] Zalevsky Z, Gur E, Garcia J, *et al.* Superresolved and field-of-view extended digital holography with particle encoding [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2766-2768.
- [50] Li J C, Tankam P, Peng Z J, *et al.* Digital holographic reconstruction of large objects using a convolution approach and adjustable magnification [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 572-574.
- [51] Girshovitz P, Shaked N T. Doubling the field of view in off-axis low-coherence interferometric imaging [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(3): e151.
- [52] Bulbul A, Vijayakumar A, Rosen J. Partial aperture imaging by systems with annular phase coded masks [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33315-33329.