

合成孔径非相干数字全息的成像特性

弓巧侠*, 汪盼, 白云鹤, 臧瑞环, 杜艳丽, 宋冲, 马凤英

郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 基于菲涅耳非相干数字全息记录和再现的基本理论,对合成孔径非相干数字全息成像过程进行理论分析和计算;模拟仿真空间光调制器上加透镜的方式对合成孔径非相干数字全息成像特性的影响,并对模拟结果进行分析;比较相位子全息图先拼接再重建、先重建再拼接2种再现方法对再现像质量的影响,并对仿真结果进行实验验证。结果表明:中心孔径是最重要的子孔径,采用中心孔径加4个十字型子孔径的成像性能较好,或者采用双透镜对称加载模式,可以减少合成孔径的子孔径数,缩短全息记录时间;证明了合成孔径技术在非相干数字全息中的适用性。

关键词 全息;非相干数字全息;合成孔径;分辨率;空间光调制器

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.080901

Imaging Characteristics of Synthetic Aperture Incoherent Digital Holography

Gong Qiaoxia*, Wang Pan, Bai Yunhe, Zang Ruihuan, Du Yanli, Song Chong, Ma Fengying

School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract Based on the recording and reconstruction theory of Fresnel incoherent digital holography, we analyze and calculate the imaging process of the synthetic aperture incoherent digital holography. The effect of mounting the double lens symmetry mode on a spatial light modulator on imaging characteristics of synthetic aperture incoherent digital holography is simulated, and the simulation results are analyzed. We compare two representation methods including different phase sub-holograms which are first spliced and reconstructed or first reconstructed and spliced. The simulation results are verified by experiments. The results show that the central aperture is the most important sub-aperture. The central aperture and four cross-bonding sub-apertures has better imaging performance, or the double lens symmetry mode can greatly reduce the number of sub-apertures and the holographic recording time. The applicability of synthetic aperture technique in incoherent digital holography is verified.

Key words holography; incoherent digital holography; synthetic aperture; resolution; spatial light modulator

OCIS codes 090.1995; 110.1220; 100.3010; 230.3720

1 引言

传统的全息术对光源的相干性要求较高,而且容易产生相干散斑噪声,非相干光全息术使用空间非相干光来照明物体以实现全息图的记录,克服了这一缺点,且再现像质量较高。2007年,Rosen等^[1]提出了一种基于空间光调制器(SLM)分光的非相干数字全息术,即菲涅耳非相干相关数字全息术(FINCH)。该技术利用SLM将来自于物体上同一点的光波分成2束,这2束光相互干涉,在物光场

的菲涅耳衍射区得到一个类似于菲涅耳波带片(FZP)的点源全息图。物体表面产生或反射的所有点源全息图非相干叠加后被CCD记录,从而获得物体的全息图,最后在计算机上通过数值计算及重建获得物体的再现像。该技术无须对物体在空间或时间上进行扫描,可以快速获取真实三维物体的全息图。SLM前置不同的光路可以实现荧光显微成像、望远成像、共聚焦显微成像等^[2-4],引起了国内外学者的广泛关注^[5-8]。

进一步提高FINCH系统成像分辨率是推进该

收稿日期: 2018-01-03; 修回日期: 2018-02-08; 录用日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(11504333)、河南省高等学校重点科研项目(16A140035)、河南省高校科技创新团队和创新人才支持计划(18IRTSTHN016)

* E-mail: gqx1205@zzu.edu.cn

技术发展的重要方向^[9-13]。Rosen 等^[9]按照线性系统理论对 FINCH 成像过程进行分析,认为 FINCH 是一种相干过程与非相干过程混合的成像系统。FINCH 系统点扩展函数的半峰全宽取决于光路设计、SLM 与 CCD 之间的距离,以及 SLM 上加载衍射透镜焦距之比。Brooker 等^[10]利用 SLM 本身对入射光偏振方向敏感的特性,在 SLM 前后放置 2 个偏振片,最大程度地利用 SLM 上的像素,显著提高了再现图像的分辨率,几乎接近瑞利判据的极限。在优化条件下,FINCH 的成像分辨率比传统的非相干成像系统提高了 1.5 倍,比相干成像系统的分辨率提高了 2 倍。将 FINCH 成像系统与标准显微镜成像系统的成像情况进行比较后发现,FINCH 成像系统的成像分辨率优于标准显微镜成像系统^[11]。Bouchal 等^[5]发现,通过改进实验光路增大 SLM 后 2 束自相干光重合的面积,能提高系统的分辨率。

随着菲涅耳非相干相关数字全息技术研究不断深入^[14-17],为了提高系统分辨本领和改善再现像质量,人们尝试将合成孔径技术引入到数字全息领域^[18-20]。合成孔径技术是一种在不大幅增加单个设备(系统)难度和复杂性的前提下,明显提高图像质量的方法,已在雷达、航空航天、天文、水声传感、遥感、显微成像等重要领域得到了广泛应用。将合成孔径技术用于数字全息的研究,即将用多个较小的子孔径代替传统的大体积、不可分离的大孔径系统,不仅减小了系统的体积和降低了成本,还提高了图像的分辨率。

目前,国内外的已有研究主要集中于相干数字全息孔径合成方面,所观察的目标需要用激光照射,这使得它的发展受到一定限制。原因是在实际成像中,不是所有观测物体都能被激光照射,特别是在望远系统中。2007 年,Indebetouw 等^[21]在扫描非相

干全息中引入合成孔径技术,并将其应用于显微成像技术。虽然这种方法是基于非相干全息术的,但观察的样品切片必须被来自 2 个激光器形成的干涉条纹扫描。2010 年,Katz 等^[22]通过在竖直方向上同时移动空间滤波器、偏振片、SLM 和 CCD,成功验证了将合成孔径技术应用于菲涅耳非相干相关数字全息技术的可行性;2011 年,Katz 等^[3]分析了合成孔径 FINCH 技术在望远成像系统中的可行性,并对 8 m 处由 2 个相互独立的 He-Ne 激光器形成的点源进行记录和再现。2014 年,Kashter 等^[23]通过将空间光调制器 SLM₁ 和 SLM₂ 沿着光轴对称移动,记录 9 幅数字全息图,然后进行拼接,实现了再现像分辨率在二维方向上的提高。菲涅耳非相干相关数字全息属于同轴全息,为了去除孪生像和直流项,每幅全息图要在不同的相移角度上拍摄 3 次,这样获得 1 幅完整全息图需要拍摄 27 次,记录时间过长,且受外界环境影响较大。本文在理论分析合成孔径菲涅耳非相干相关数字全息成像机理的基础上,提出了一种更简单的合成孔径非相干数字全息成像技术,在 SLM₁ 和 SLM₂ 上同时加载双透镜模式,只需要记录 5 个位置,大幅缩减了记录时间;此外,比较不同相位子全息图先拼接再重建、先重建再拼接这 2 种再现方法,对这 2 种方法的再现像的分辨率进行比较。

2 合成孔径非相干数字全息记录与再现机理

合成孔径非相干数字全息术通过 SLM 的上下移动形成子孔径,每个子全息图的记录与再现过程与 FINCH 相同。图 1(a)所示为 Kashter 等^[23]设计的合成孔径非相干数字全息光路图。

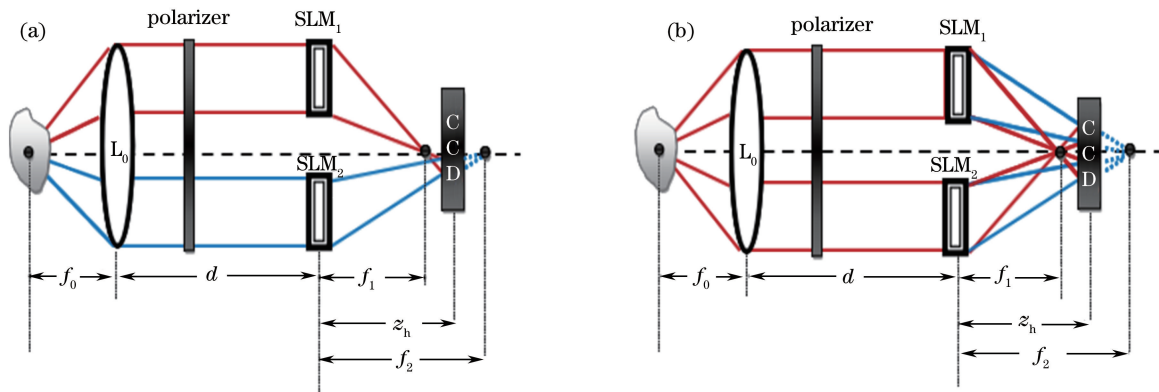


图 1 合成孔径非相干数字全息记录光路图。(a)单透镜模式^[23]; (b)双透镜模式

Fig. 1 Schematic configurations of synthetic aperture incoherent digital holography recorder.

(a) Single lens mode^[23]; (b) double lens mode

图 1(a)所示的中心区域采用 FINCH 双透镜光路记录,空间光调制器 SLM₁、SLM₂可以对称地沿光轴上下移动,在 SLM₁ 与 SLM₂ 上分别加载焦距为 f_1 、 f_2 的透镜模式,经过 SLM₁、SLM₂ 的 2 束光波干涉后被 CCD 记录;然后保持 2 个 SLM 不动,加载透镜的焦距互换,即 SLM₁ 与 SLM₂ 上分别加载焦距为 f_1 、 f_2 的透镜模式,并将这种加载方法称为对称单透镜模式。拼接 1 幅完整的全息图需要 9 幅子全息图,每幅子全息图需要拍摄 3 次,以去除孪生像及直流项。SLM 作为分光元件和移相元件,加载波长为 λ 、2 个焦距分别为 f_1 和 f_2 的透镜相位掩模,第 (m, n) 级次曝光,其复振幅反射系数 $P_{mn}(x, y, \theta)$ 为

$$P_{mn}(x, y, \theta) = C_1 Q\left(-\frac{1}{f_1}\right) \text{rect}\left(\frac{x - A_x m}{A_x}, \frac{y - A_y n}{A_y}\right) + C_2 Q\left(-\frac{1}{f_2}\right) \exp(i\theta) \text{rect}\left(\frac{x + A_x m}{A_x}, \frac{y + A_y n}{A_y}\right), \quad (1)$$

式中: A_x 和 A_y 分别为孔径在 x 轴和 y 轴方向的值; θ 为相移角度; C_1 、 C_2 为复常数; 为了书写简单, 记 $Q(b) = \exp[i\pi b \lambda^{-1}(x^2 + y^2)]$ 。在 SLM 上加载的矩形子孔径为

$$\text{rect}\left(\frac{x}{\alpha}, \frac{y}{\beta}\right) \equiv \begin{cases} 1, & (|x|, |y|) \leq (\alpha/2, \beta/2) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: α 为 x 轴方向孔径宽度; β 为 y 轴方向孔径宽度。

与 FINCH 成像系统相比较,合成孔径非相干数字全息成像 SLM 上加载掩模的反射系数多了一个二维孔径函数 rect , m 和 n 取不同的值可以控制孔径在 SLM 上的位置。通过改变 rect 函数中参数的值,可以控制 SLM 上加载子孔径的大小及位置。图 2 所示为合成孔径形成示意图。全息图由 9 幅子全息图组成。



图 2 合成孔径形成示意图。(a) $m=n=0$ 时中心区域双透镜模式; (b) $m=n=-1$ 时, 距离中心移动 $(-A_x, A_y)$ 双透镜模式; (c) $m=n=1$ 时, 距离中心移动 $(A_x, -A_y)$ 双透镜模式

Fig. 2 Schematics for forming synthetic aperture. (a) Double lens mode imaging of center region when $m=n=0$; (b) shift $(-A_x, A_y)$ from mask distance center of focal length f_1 and f_2 when $m=n=-1$; (c) shift $(A_x, -A_y)$ from mask distance center of focal length f_1 and f_2 when $m=n=1$

本课题组设计的光路更简单,在 SLM₁、SLM₂ 上同时加载焦距为 f_1 、 f_2 的透镜模式,如图 1(b)所示,通过 SLM₁ 焦距为 f_1 的球面波与通过 SLM₂ 焦距为 f_2 的球面波相干,同时通过 SLM₁ 焦距为 f_2 的球面波与通过 SLM₂ 焦距为 f_1 的球面波也相

干,这 2 条干涉条纹在光轴两侧对称分布,CCD 同时记录 2 个子孔径的干涉图。SLM 作为分光元件和移相元件,加载波长为 λ 的 2 个焦距分别为 f_1 和 f_2 的透镜相位掩模,第 (m, n) 级次曝光,其复振幅反射系数 $P_{mn}(x, y, \theta)$ 为

$$P_{mn}(x, y, \theta) = \left[C_1 Q\left(\frac{-1}{f_1}\right) + C_2 Q\left(\frac{-1}{f_2}\right) \exp(i\theta) \right] \text{rect}\left(\frac{x - A_x \cdot m}{A_x}, \frac{y - A_y \cdot n}{A_y}\right) + \left[C_1 Q\left(\frac{-1}{f_1}\right) + C_2 Q\left(\frac{-1}{f_2}\right) \exp(i\theta) \right] \text{rect}\left(\frac{x + A_x \cdot m}{A_x}, \frac{y + A_y \cdot n}{A_y}\right). \quad (3)$$

在焦距为 f_0 的透镜 L 的焦平面附近任意一点 $\mathbf{r}_s(x, y, -f_0)$ 的全息图由 $M \times N$ 个次全息图组成,最终在 CCD 上记录的光强为

$$I(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s) = \sum_{m=(1-M)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=(1-N)/2}^{(N-1)/2} \left| \sqrt{I_s} C(\mathbf{r}_s) L(-\mathbf{r}_s) Q\left(\frac{1}{f_0}\right) Q\left(-\frac{1}{f_0}\right) \cdot Q\left(\frac{1}{d}\right) \times P_{mn}(x, y, \theta) \cdot Q\left(\frac{1}{z_h}\right) \right|^2, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0)$ 为 CCD 平面位置矢量; \mathbf{r}_s 为物点的位置矢量; I_s 为物点强度; C 为复常数; L 表示线性相移量。当 M 和 N 取奇数时, $P_{mn}(x, y, \theta)$ 由 (3) 式表示。将 (1) 式代入 (3) 式,并分离变量,则 (3) 式可写为

$$I(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s) = \left[C_3 + C_4(\mathbf{r}_s)Q\left(-\frac{1}{z_r}\right)L(-\mathbf{r}_r)\exp(-j\theta) + C_4^*(\mathbf{r}_s)Q\left(\frac{1}{z_r}\right)L(\mathbf{r}_r)\exp(j\theta) \right] \times \sum_{m=(1-M)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=(1-N)/2}^{(N-1)/2} \text{rect}\left(\frac{x - A_x \cdot m}{A_x}, \frac{y - A_y \cdot n}{A_y}\right), \quad (5)$$

式中: C_3 和 C_4 为常数; z_r 为再现距离; \mathbf{r}_r 为像点的横向位置矢量。(5)式表示通过合成孔径双透镜 FINCH 系统记录的一个物点,即合成孔径非相干数字全息系统的点扩展函数(PSF),合成孔径的大小为 $M \times A_x \times N \times A_y$,以间隔 A_x 在 x 轴方向移动 M 次,以间隔 A_y 在 y 轴方向移动 N 次。(5)式右端前半部分为 FINCH 成像系统的点扩展函数,rect 函数为各个子孔径方程,(5)式即为各子全息图强度的加和。

由图 2 可知,基于 SLM 的 FINCH 合成孔径技术与传统合成孔径技术不同,前者通过在 SLM 上分别加载大孔径掩模的不同部分,并将这些拼接在一起,形成一个更大的 SLM 加载掩模。对于 FINCH 成像系统,等效 PSF 宽度^[9]为

$$\Delta = \frac{1.22\lambda z_r}{R_h}, \quad (6)$$

式中: z_r 为再现距离; R_h 为 SLM 分光后 2 束相干光在 CCD 上重合的半径,与 SLM、CCD 间的距离 z_h 有关。当 $z_h/f_d = 2$ 时,2 束相干光的重合面积最大,FINCH 的最小可分辨尺寸为

$$\Delta_e^{\min} = \frac{0.61\lambda f_d}{R_0}, \quad (7)$$

式中: R_0 为 SLM 半径; f_d 为 SLM 上加载透镜的焦距。FINCH 系统确定后,为了获得最小的分辨率,可以根据 SLM 加载透镜的焦距计算 SLM 与 CCD 间的距离。由(1)式和(2)式可以看出,将 9 个子孔径的掩模拼接起来就是一幅完整的大孔径 SLM 掩模。

为了去除孪生像和直流项,结合三步相移技术,调节记录全息图时 SLM 上附加的相位常数 θ ,每个 (m, n) 级位置记录 3 次,得到 3 幅全息图,将 3 次记录的全息图进行线性叠加得到一个复值全息图:

$$H(\mathbf{r}_0) = I_s(\mathbf{r}_s) * I(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s). \quad (8)$$

采用角谱衍射法在计算机中模拟衍射过程,最终得到消除零级像和共轭像的清晰再现像^[8]。

3 模拟与实验

3.1 对称单透镜合成孔径模拟仿真

在基于合成孔径技术的菲涅耳非相干数字全息成像的模拟研究中,为了保持模拟条件的可重复性,

在每次模拟仿真中,以利用画图软件得到的 512 pixel \times 512 pixel 黑底白色的字母作为待测物体,如图 3 所示。非相干光源的中心波长 $\lambda = 632.8$ nm; SLM 和 CCD 的参数均如下: $N_x \times N_y = 512$ pixel \times 512 pixel, $\Delta x = \Delta y = 6.45$ μ m,其中 N_x 和 N_y 分别为 x 方向和 y 方向的像素数, Δx 和 Δy 分别为 x 方向和 y 方向的像素间隔; SLM 上加载单透镜模式, $f_1 = 20$ mm, $f_2 = \infty$, $z_r = 40$ mm。在模拟合成孔径时,将 SLM 分成大小相同的 9 个区域,并且 $A_x = A_y = 170$ 。



图 3 成像待测物体

Fig. 3 Imaging object

为了说明合成孔径技术在非相干数字全息中应用的效果,以图 3 作为待测物体进行数字全息记录与再现模拟仿真,结果如图 4 所示。由图 4(b)、(e)可知,随着成像系统孔径减小,背景衍射效应增加,再现像清晰度下降。由图 4(h)可知,待测物体能够清晰再现,成像效果与图 4(b)所示大孔径的效果相同,说明合成孔径在理论上可以实现与大孔径相同的成像效果。

3.2 去除中心孔径的对称单透镜合成孔径的模拟仿真

模拟加载去除中心孔径的对称单透镜合成孔径对成像质量的影响,结果如图 5 所示。在 SLM 上模拟仿真加载去除中心孔径的对称单透镜模式的子孔径掩模,如图 4(h)和图 5(b)所示,去除中心孔径掩模后,再现像模糊。由图 5(c)可知,对比度明显下降,说明去除中心孔径后,再现像分辨率下降。Kashter 等^[24]认为,物体辐射的绝大部分光强主要集中在菲涅耳全息平面的中心区域。因此,中心孔径是合成孔径中的关键孔径,会显著影响成像质量,在进行全息记录时,应尽可能将待测物体置于整个光路的中心。

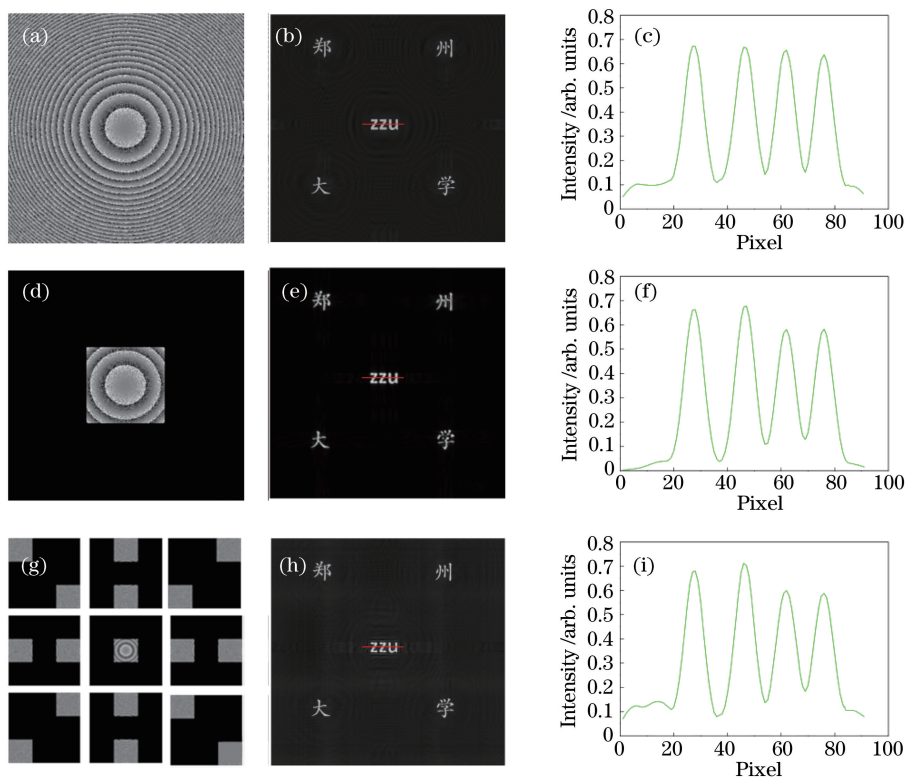


图 4 孔径大小对成像的影响。(a)孔径大小为 512 pixel \times 512 pixel;(b) 512 pixel \times 512 pixel 孔径的再现像;(c) 512 pixel \times 512 pixel 再现像的强度分布;(d)孔径大小为 170 pixel \times 170 pixel;(e) 170 pixel \times 170 pixel 孔径的再现像;(f) 170 pixel \times 170 pixel 再现像的强度分布;(g) 170 pixel \times 170 pixel 合成 512 pixel \times 512 pixel 孔径;(h)合成孔径的再现像;(i)合成孔径再现像的强度分布

Fig. 4 Effect of aperture size on imaging properties. (a) Aperture size of 512 pixel \times 512 pixel;(b) reconstructed image for aperture with size of 512 pixel \times 512 pixel;(c) intensity distribution of reconstructed image with aperture size of 512 pixel \times 512 pixel;(d) aperture size of 170 pixel \times 170 pixel;(e) reconstructed image for aperture with size of 170 pixel \times 170 pixel;(f) intensity distribution of reconstructed image with aperture size of 170 pixel \times 170 pixel;(g) mask for combined nine sub-apertures (170 pixel \times 170 pixel);(h) reconstructed image for synthetic aperture;(i) intensity distribution of synthetic aperture

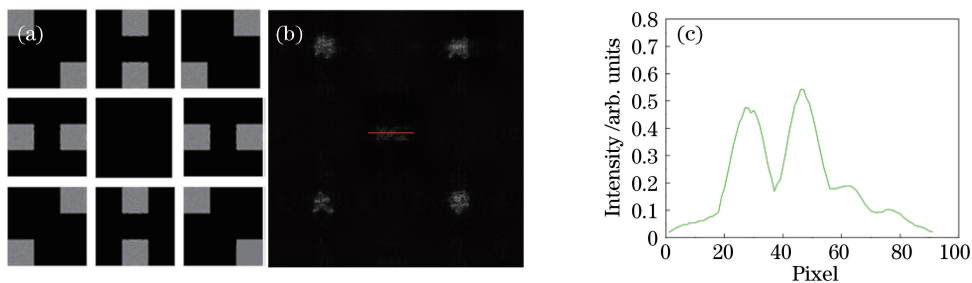


图 5 中心孔径对成像质量的影响。(a)去除中心孔径的 170 pixel \times 170 pixel 合成孔径;(b)去除中心孔径的再现像;(c)强度分布

Fig. 5 Effect of center-aperture on imaging properties. (a) Synthetic aperture of 170 pixel \times 170 pixel after removing the center-aperture;(b) reconstructed image after removing the center-aperture;(c) intensity distribution

3.3 子孔径加载方式对成像质量的影响

图 6 所示为模拟子孔径加载方式对成像质量的影响。一种加载方式是在子孔径位置只加载单一透

镜;另一种是加载双透镜模式,在加载双透镜时, f_1 和 f_2 各占像素数的 1/2。在 SLM 上加载双透镜模式后,会在光轴两侧的对称部分出现 2 个干涉,相当

于 CCD 一次记录了图 1(a) 所示的 2 个对称孔径的全息图, 这样 1 幅完整的全息图只需要记录 5 幅子全息图, 大大缩短了合成孔径的成像时间, 同时也减小了外界环境变化对成像过程的影响。由图 6 可知, 2 种加载方式的成像质量及分辨率相同, 说明双透镜模式也可以获得同等孔径大小的成像质量, 且

记录时间更短。

采用合成孔径非相干数字全息成像, 1 幅完整的全息图由 9 幅子全息图组成, 每幅子全息图要在不同相移处拍摄 3 次, 这样获得完整全息图需要拍摄 27 次, 因此成像时间较长, 成像速度慢。图 7 所示为 5 个子孔径合成孔径对成像质量的影响。保留

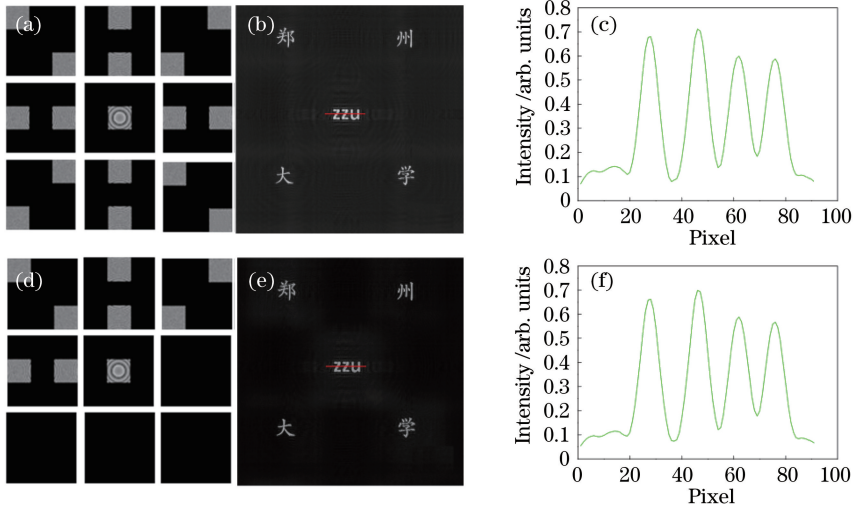


图 6 透镜模式对成像质量的影响。(a)单透镜孔径模式;(b)单透镜再现像;(c)单透镜强度分布;
(d)双透镜孔径模式;(e)双透镜再现像;(f)双透镜强度分布

Fig. 6 Effects of lens modes on imaging properties. (a) Single lens mode; (b) reconstructed image for single lens mode; (c) intensity distribution for single lens mode; (d) double lens mode; (e) reconstructed image for double lens mode; (f) intensity distribution for double lens mode

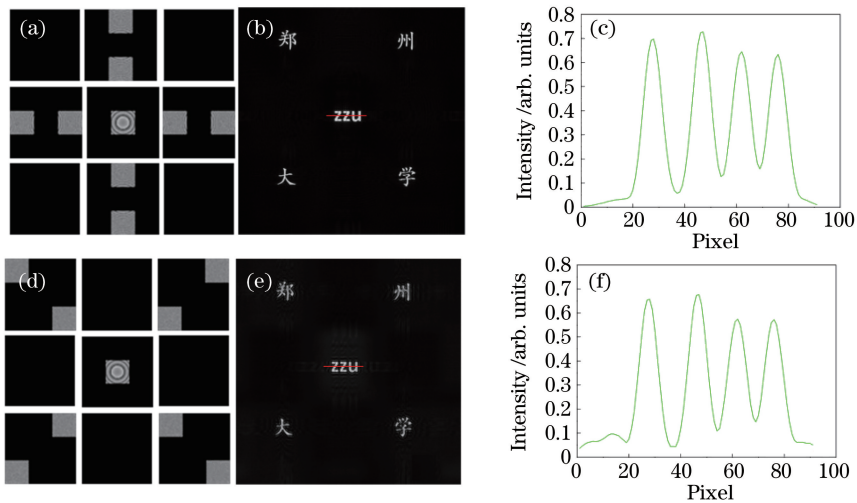


图 7 5 个子孔径合成孔径对成像质量的影响。(a)中心孔径加 4 个十字型子孔径;(b)加载十字型子孔径后的再现像;
(c)加载十字型子孔径后的强度分布;(d)中心孔径加 4 个四角型子孔径;
(e)加载四角型子孔径后的再现像;(f)加载四角型子孔径后的强度分布

Fig. 7 Effects of synthetic aperture with five sub-apertures on imaging properties.

(a) Central aperture and four cross-bonding sub-apertures; (b) reconstructed image with cross-bonding sub-apertures; (c) intensity distribution with cross-bonding sub-apertures; (d) central aperture and four diagonal sub-apertures; (e) reconstructed image with four diagonal sub-apertures; (f) intensity distribution with four diagonal sub-apertures

中心孔径,再加边上 4 个子孔径,有 2 种加载方式,一种是十字型,另外一种为四角型。由图 7 可知,中心孔径加十字型合成孔径与 9 个子孔径合成孔径成像质量接近,图 7(f)曲线也基本保持平滑。这是因为物体发出的光强主要集中在菲涅耳全息平面的中心区域,并且随着距中心点距离的增加而快速减弱;位于对角线上的子孔径距离中心点较远,光强非常弱,对合成孔径成像的贡献不大,所以为了加速成像,可以采用中心孔径加十字型合成孔径成像。

3.4 再现过程对成像质量的影响

合成孔径非相干数字全息的再现像可以用 2 种再现方法来进行实验:一种是把所有子孔径得到的

再现像融合成一幅再现像;另一种是把相位值(θ)相同的所有子相移全息图先拼合成一幅总的相移图,然后再用角谱衍射法进行全息重构,最终得到再现像。图 8 所示为再现方法对成像质量的影响。由图 8(a)和图 8(c)可知,与子全息图直接拼接的合成孔径非相干数字全息再现方法相比,用各子孔径成像对应的 0° 、 120° 、 240° 相移全息图先进行合成,再通过角谱衍射法再现,可显著提高再现像的分辨率。先将相位值相同的子相移全息图融合成总的相移图,相移图获取了所有子孔径信息,再通过三步相移技术去除孪生像及零级项得到高质量全息图,因此再现像质量好。

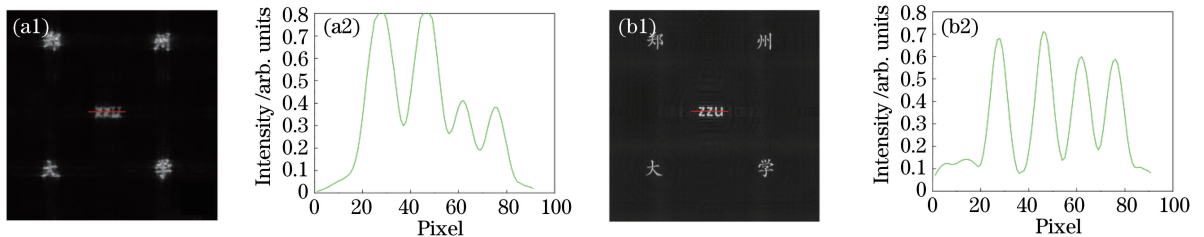


图 8 再现方法对成像质量的影响。(a)各子孔再现像直接合成再现像及其强度;
(b)对各子孔对应的相移全息图先合成后再再现的再现像及其强度

Fig. 8 Effect of reconstruction methods on imaging properties. (a) First reconstructed and spliced image and its intensity;
(b) first spliced and reconstructed image and its intensity

3.5 实验验证

搭建 FINCH 光路,对上述理论分析及模拟结果进行实验验证。实验采用非相干白光氙灯作为连续光谱光源(CEL-TCX250 型,北京中教金源科技有限公司,光纤输出功率为 250 W,光斑半径约为 1 cm),窄带滤光片 BF 的中心波长为 632.8 nm,带宽为 20 nm,偏振片 P 的偏振方向与 SLM 的液晶长轴方向一致,准直透镜 L_2 的焦距 $f = 250$ mm。将 SLM(BNS 型, $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$) 像素划分为 9 个 $170 \text{ pixel} \times 170 \text{ pixel}$ 的子孔径,形成合成孔径非相干数字全息成像系统。该实验操作简单,合成孔径概念也可以用实验证明。在 SLM 上随机选取 $1/2$ 像素加载焦距 $f_1 = 245$ mm 的透镜相位,剩余

的 $1/2$ 加载焦距 $f_2 = 255$ mm 的透镜相位,如图 2 所示。CCD (Hamamatsu Digital C8484-05 型, $1344 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$) 的像素大小为 $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$,为了便于后续处理,实现全息图的高效重建,拍摄时采用 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。以 R1L3S5P、MNED ZZU 这 2 个型号的分辨率板作为测试物体,为了得到最佳分辨率,SLM 与 CCD 间的距离 $z_0 = 250$ mm。在实验中发现,除了中心孔径外,其他子孔径的成像都非常模糊,因此,通过 MALAB 软件将中心孔径的再现像和其他子孔径的再现像非进行非线性融合处理,结果如图 9 所示。由图 9 可知,加载双透镜模式掩模比单透镜模式掩模合成的再现像质量好,但不如同大小孔径

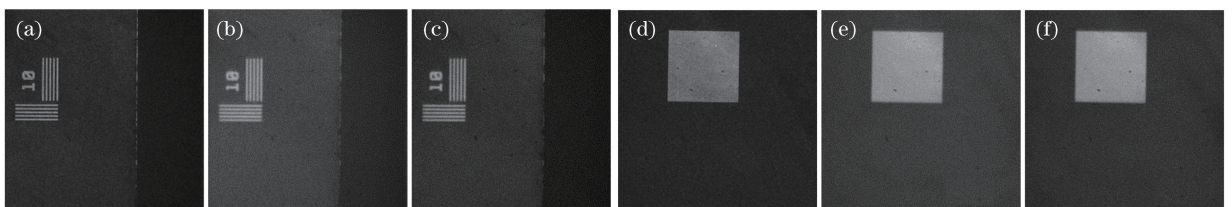


图 9 (a)、(d) $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 再现像;(b)、(e)单透镜模式再现像;(c)、(f)双透镜模式再现像

Fig. 9 (a), (d) Reconstructed image for $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$; (b), (e) reconstructed image for single lens mode;
(c), (f) reconstructed image for double lens mode

512 pixel×512 pixel的再现像的质量(因受实验条件的限制),说明可通过进一步改善实验过程来提高成像质量。但实验结果依然能够表明,合成孔径技术是一种提高非相干数字全息再现像分辨率的有效方法。

4 结 论

菲涅耳非相干相关全息术通过对 FINCH 成像系统光路进行设计,优化 SLM 与 CCD 之间的距离以及在 SLM 上加载透镜焦距比值等,可以提高分辨率。但现有 CCD 较小的靶面面积和较大的像素尺寸使得整个系统分辨率的提高受到限制。在非相干数字全息系统中,通过控制 SLM 上加载透镜的模式可以实现合成孔径技术,提高系统分辨率,为非相干数字全息术的进一步应用奠定了基础。

基于 SLM 的合成孔径技术与传统合成技术的区别在于:传统合成孔径技术在整个成像过程中的系统装置没有变化,只是整个成像系统在空间位置上有所移动,各子孔径的空间位置不同会引入相位差,将子全息图拼接成一幅大的全息图,对后续算法要求特别高;而基于 SLM 的合成孔径技术,通过计算机编程可以在 SLM 上加载不同的掩模,相当于将一幅大孔径的掩模分割成小的子孔径掩模进行分别加载。在实际操作中,通过微位移平台精确控制 SLM 的位置,在后续子全息图合成一幅全息图时,空间位置引起的相位差很小,能大幅提高再现像的质量。

参 考 文 献

- [1] Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel holography [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 912-914.
- [2] 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.
- [3] Katz B, Rosen J. Could SAFE concept be applied for designing a new synthetic aperture telescope? [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 4924-4936.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Zeng F C, Fan J P, Zhao H, *et al.* Visual evaluation of the FINCH recording quality [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2015, 57(6): 1403-1406.
- [7] Siegel N, Lupashin V, Storrie B, *et al.* High-magnification super-resolution FINCH microscopy using birefringent crystal lens interferometers [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 802-808.
- [8] Shi X, Zhu W F, Yuan B, *et al.* Experimental study of the incoherent digital holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1209003.
石侠, 朱五凤, 袁斌, 等. 非相干光照明数字全息实验研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1209003.
- [9] 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.
- [10] Brooker G, Siegel N, Wang V, *et al.* Optimal resolution in Fresnel incoherent correlation holographic fluorescence microscopy [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5047-5062.
- [11] Katz B, Rosen J, Kelner R, *et al.* Enhanced resolution and throughput of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) using dual diffractive lenses on a spatial light modulator (SLM) [J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 9109-9121.
- [12] Rivoenson Y, Stern A, Javidi B. Improved depth resolution by single-exposure in-line compressive holography [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(1): A223-A231.
- [13] Kashter Y, Rivoenson Y, Stern A, *et al.* Enhanced-resolution by sparse synthetic aperture with Fresnel elements (S-SAFE) [C] // *Frontiers in Optics/Laser Science*. San Jose: Optical Society of America, 2015: FTh4D.3.
- [14] Liu Y C, Fan J P, Zeng F C, *et al.* Recording, reconstruction and realization of white-light Fresnel incoherent digital holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 1009002.
刘英臣, 范金坪, 曾凡创, 等. 白光菲涅耳非相干数字全息的记录、再现及实现 [J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1009002.
- [15] Liu Y F, Zhang W B, Xu T X, *et al.* Study on in-line incoherent digital holographic microscopy in

- reflection configuration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1109002.
- 刘亚飞, 张文斌, 许天旭, 等. 反射式同轴非相干数字全息显微成像系统研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1109002.
- [16] 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.
- [17] Yang X F, Zhang W B, Xie Y L, *et al.* Incoherent on-axis digital holographic telescope system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 120902.
- 杨旭锋, 张文斌, 谢一琳, 等. 非相干同轴数字全息望远系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 120902.
- [18] Li Q, Ding S H, Li Y D, *et al.* Research on reconstruction algorithms in 2.52 THz off-axis digital holography [J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2012, 33(10): 1039-1051.
- [19] Ding S H, Li Q, Li Y D, *et al.* Continuous-wave terahertz digital holography by use of a pyroelectric array camera [J]. Optics Letters, 2011, 36(11): 1993-1995.
- [20] Li Q, Ding S H, Li Y D, *et al.* Experimental research on resolution improvement in CWTHz digital holography [J]. Applied Physics B, 2012, 107: 103-110.
- [21] Indebetouw G, Tada Y, Rosen J, *et al.* Scanning holographic microscopy with resolution exceeding the Rayleigh limit of the objective by superposition of off-axis holograms [J]. Applied Optics, 2007, 46(6): 993-1000.
- [22] Katz B, Rosen J. Super-resolution in incoherent optical imaging using synthetic aperture with Fresnel elements [J]. Optics Express, 2010, 18(2): 962-972.
- [23] 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.
- [24] 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.