

基于螺旋相位调制的非相干全息点扩散函数研究

赵忠超 杨旭锋 许天旭 何九如 弓巧侠 杜艳丽 董林 袁斌 马凤英

Point spread function of incoherent digital holography based on spiral phase modulation

Zhao Zhong-Chao Yang Xu-Feng Xu Tian-Xu He Jiu-Ru Gong Qiao-Xiao Du Yan-Li Dong Lin  
Yuan Bin Ma Feng-Ying

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 014203 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171442

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171442>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I1>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于数字全息图的光纤折射率测量研究](#)

Refractive Index Measurement Research for Optical Fiber Based on Digital Hologram

物理学报.2015, 64(6): 064204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064204>

[像面数字全息的重建相位误差分析和改善](#)

Analysis and improvement of reconstruction phase error in the image plane digital holography

物理学报.2014, 63(24): 244201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244201>

[数字全息术测定涡旋光束拓扑电荷数](#)

Measuring topology charge of vortex beam using digital holography

物理学报.2014, 63(24): 244202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244202>

[Research on speckle denoising by lensless Fourier transform holographic imaging with angular diversity](#)

物理学报.2014, 63(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154205>

[双Lloyd镜数字全息显微测量术](#)

Digital holographic microscope employing dual-Lloyd's mirror

物理学报.2014, 63(10): 104207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104207>

# 基于螺旋相位调制的非相干全息点扩散函数研究\*

赵忠超 杨旭锋 许天旭 何九如 弓巧侠 杜艳丽  
董林 袁斌<sup>†</sup> 马凤英<sup>‡</sup>

(郑州大学物理工程学院, 郑州 450001)

(2017年6月23日收到; 2017年10月12日收到修改稿)

分析了菲涅耳非相干相关全息 (Fresnel incoherent correlation holography, FINCH) 系统中纯相位空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 加载螺旋相位掩模时的点扩散函数. 以氙灯为照明光源搭建了 FINCH 系统, 电荷耦合器记录的点源全息图与点扩散函数模拟结果一致. 采用该系统分别在 SLM 上加载双透镜掩模和螺旋相位调制双透镜掩模两种情况下对分辨率板和非染色洋葱细胞成像, 给出了成像对比结果. 结果表明: 采用螺旋相位调制的 FINCH 系统可以在几乎不牺牲分辨率的情况下提高图像的边缘对比度; 同样, 对相位物体也可以实现图像的边缘提取和识别. 该方法在实时监测活细胞的分裂、形变等方面具有重要应用前景.

**关键词:** 非相干数字全息, 点扩展函数, 螺旋相位调制, 边缘提取

**PACS:** 42.40.-i, 87.57.nt

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171442

## 1 引言

全息术<sup>[1]</sup>是利用光的干涉和衍射原理记录并再现物体真实三维空间信息的技术. 传统全息术采用相干光源照明, 不仅对系统的稳定性要求极高, 而且还会引入严重的相干噪声, 限制了其在众多领域中的应用. 自1961年 Mertz 等<sup>[2]</sup>将全息术推广到非相干领域后, 基于各种不同分光技术的非相干全息术得到了飞速发展<sup>[3-8]</sup>. 此外, 随着计算机处理速度的提高和电荷耦合器 (CCD) 的问世, Goodman 等<sup>[9]</sup>首次提出了利用计算机再现全息图的思想. 1971年, Huang<sup>[10]</sup>提出了数字全息的概念. 1994年, Schnar 和 Jüptner<sup>[11,12]</sup>利用 CCD 记录并实现了全息图再现的完全数字化. 自此, 数字全息术<sup>[13-17]</sup>受到了越来越多的关注. 数字全息技术省却了干板复杂的化学湿处理过程, 在纯相位物体定量成像方面具有显著的优势.

近年来, 国内外众多研究小组对非相干光源

照明下的数字全息进行了研究. Kim<sup>[4,18]</sup>利用迈克耳孙干涉装置在自然光下实现了彩色物体的远距离全息记录和再现, 并应用于自适应光学领域. Wan 等<sup>[3]</sup>对非相干数字全息成像系统的研究进展和成像特性分别进行了介绍, 并基于三角干涉光路提出了离轴非相干傅里叶彩色数字全息术 (incoherent Fourier triangular color digital holography, IFTCH). Rosen 和 Brooker<sup>[19]</sup>于2007年提出了一种基于 SLM 分光的 FINCH 技术, 该技术具有光路简单、既无时间扫描也无空间扫描、获得全息图速度快、分辨率高, 且易于与现有成熟光学系统匹配的特点, 因此一经提出便被应用于荧光显微<sup>[20]</sup>、白光反射全息成像<sup>[21]</sup>和彩色 3D 成像<sup>[22]</sup>等领域. 2012年, Bouchal 和 Bouchal<sup>[23]</sup>采用 FINCH 系统实现了图像边缘信息的提取, 具体方法为: 在 SLM 上加载螺旋相位调制的双透镜相位掩模, 记录物体的全息图并数值再现后得到边缘提取的图像信息. 但文献<sup>[23]</sup>中并未给出系统螺旋点扩散函数

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11674290, 61505178)、河南省高等学校重点科研项目 (批准号: 15A140038, 16A140035, 18A140032) 和河南省科技开放合作计划项目 (批准号: 152106000045) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yuanbin@zzu.edu.cn

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: mafy@zzu.edu.cn

的数学表达式,也未验证系统对相位物体的边缘提取与识别能力.

本文从波动光学角度出发,给出了基于纯相位SLM的FINCH系统螺旋点扩散函数表达式;实验研究了系统的脉冲响应,得到了与点扩散函数模拟结果一致的结论,证明了点扩散函数表达式的正确性;采用该系统对分辨率板成像,在几乎不损失分辨率的情况下实现了图像边缘提取;对非染色的洋葱细胞进行全息拍摄,验证了系统对相位物体的边缘提取与识别能力.

## 2 理论分析

图1为FINCH记录光路原理图,  $z_s$  是物平面与透镜L之间的距离,  $d$  是空间光调制器到透镜L的距离,  $z_h$  是SLM到CCD的距离.

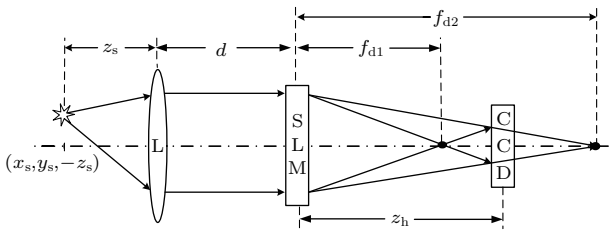


图1 FINCH系统记录光路原理图

Fig. 1. Schematic diagram of FINCH system.

将SLM所有像素随机分成两等份,分别加载两个透镜(焦距分别为  $f_{d1}$  和  $f_{d2}$ )的相位.为实现螺旋相位调制,在其中一个透镜上叠加螺旋相位  $m\varphi$ . SLM的振幅反射系数为

$$R(x, y) = B \exp \left[ -\frac{i\pi}{\lambda f_{d1}}(x^2 + y^2) + i\theta \right] + B' \exp \left[ -\frac{i\pi}{\lambda f_{d2}}(x^2 + y^2) + im\varphi \right], \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $\theta$  为相移常数,  $m$  为拓扑荷数,  $\varphi = \arctan(y/x)$  为SLM平面的方位角,  $B$  和  $B'$  均为常数.

假设点源位于透镜L(焦距  $f_0$ ) 焦平面附近的光轴上,坐标为  $(0, 0, -z_s)$ . 傍轴条件下,其发出的球面波在透镜L前表面的复振幅可近似表示为

$$\frac{A}{\sqrt{x^2 + y^2 + z_s^2}} \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda z_s}(x^2 + y^2) \right], \quad (2)$$

式中  $A$  为球面半径为1处的振幅,利用数学关系可得

$$\frac{A}{z_s} \exp \left[ -\frac{x^2 + y^2}{2z_s^2} \right] \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda z_s}(x^2 + y^2) \right]. \quad (3)$$

令  $\sigma^2 = 2z_s^2$ , 经过透镜L后复振幅为

$$\frac{A}{z_s} \exp \left[ -\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} \right] \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda f_e}(x^2 + y^2) \right], \quad (4)$$

式中  $f_e = \frac{1}{z_s} - \frac{1}{f_0}$ , 再传播距离  $d$ , 入射至SLM表面的复振幅为

$$\frac{A}{z_s} \exp \left[ -\frac{(x^2 + y^2)}{\sigma'^2} \right] \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda f}(x^2 + y^2) \right], \quad (5)$$

式中

$$\sigma'^2 = \sigma^2 \left[ d^2 \left( \frac{1}{f_e} + \frac{1}{d} \right)^2 + \frac{4d^2}{k^2 \sigma^4} \right],$$

令

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} - \frac{\sigma^2}{\sigma'^2} \left( \frac{1}{f_e} + \frac{1}{d} \right),$$

再经SLM反射后变成两束自相干的光波,传播距离  $z_h$  后在CCD表面的复振幅分别为

$$\frac{AB}{z_s} \exp \left[ -\frac{(x^2 + y^2)}{\sigma'^2} \right] \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda f_1}(x^2 + y^2) + i\theta \right] \times \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda z_h}(x^2 + y^2) \right], \quad (6a)$$

$$\frac{AB'}{z_s} \exp \left[ -\frac{(x^2 + y^2)}{\sigma'^2} \right] \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda f_2}(x^2 + y^2) + im\varphi \right] \times \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda z_h}(x^2 + y^2) \right], \quad (6b)$$

式中  $\frac{1}{f_1} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f_{d1}}$ ,  $\frac{1}{f_2} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f_{d2}}$ . 利用贝塞尔函数的性质

$$\begin{cases} \exp \left[ \frac{ik\rho r}{D} \cos(\gamma - \varphi) \right] \\ = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} i^l J_l \left( \frac{k\rho r}{D} \right) \exp[i l(\gamma - \varphi)] \\ J_m(-x) = (-1)^m J_m(x) \\ \int_0^{2\pi} \exp[i(l-m)\varphi] d\varphi = \begin{cases} 2\pi & (l = m) \\ 0 & (l \neq m) \end{cases} \end{cases}, \quad (7)$$

和公式

$$\int_0^\infty x e^{-\alpha x^2} J_m(\beta x) dx = \frac{\sqrt{\pi}\beta}{8\alpha^{\frac{3}{2}}} \exp \left( -\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) \times \left[ I_{\frac{1}{2}m-\frac{1}{2}} \left( \frac{\beta^2}{8\alpha} \right) - I_{\frac{1}{2}m+\frac{1}{2}} \left( \frac{\beta^2}{8\alpha} \right) \right], \quad (8)$$

两束相干光束在 CCD 表面发生干涉, 强度分布即点扩散函数 (PSF) 为

$$\begin{aligned} I_{\text{psf}}(x, y) &= C(x^2 + y^2) + C_1(x^2 + y^2) \\ &\times \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_r}(x^2 + y^2) + i\theta - i\delta - im\gamma\right] \\ &+ \text{c.c.}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $\delta$  为螺旋光束传输中产生的相位延迟,  $\gamma$  为 CCD 平面的方位角,  $C$  和  $C_1$  为关于  $(x^2 + y^2)$  的函数,

$$\begin{aligned} \frac{1}{z_r} &= \frac{\sigma'^2}{\sigma''^2} \left(\frac{1}{f_2} + \frac{1}{z_h}\right) - \frac{\sigma'^2}{\sigma''^2} \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{z_h}\right), \\ \frac{\sigma''^2}{\sigma'^2} &= 2z_h^2 \left(\frac{1}{f_2} + \frac{1}{z_h}\right)^2 + \frac{8z_h^2}{k^2\sigma'^4}, \\ \frac{\sigma''^2}{\sigma'^2} &= z_h^2 \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{z_h}\right)^2 + \frac{4z_h^2}{k^2\sigma'^4}, \end{aligned}$$

c.c. 是等号右边第二项的复共轭. 由点扩散函数表达式 (9) 可知 CCD 平面上记录的点源全息图具有螺旋结构, 对应拓扑荷为  $m$ . 具有不同相位常数的点源全息经线性处理消除零级像和孪生像后得到的复值全息具有螺旋相位, 螺旋相位中心存在一个相位奇点, 此处相位不确定, 振幅为零, 因此相位奇点处光强为零 (螺旋相位波前在该处干涉相消), 即再现后得到中心光场被抑制的空心点像.

设非相干光照射下物体表面强度为  $g(x_s, y_s, -z_s)$ , 其在 CCD 上记录的干涉图案为三维物体表面所有点源全息图的非相干叠加,

$$\begin{aligned} H(x, y) &= C \iiint g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s \\ &+ C_1 \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_r}[(x - M_T x_s)^2\right. \\ &\left. + (y - M_T y_s)^2] + i\theta - i\delta - im\gamma\right\} dx_s dy_s dz_s \\ &+ \text{c.c.}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $M_T$  为横向放大率.

相位常数分别为  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  时, CCD 记录的全息图分别为  $H_1(x, y), H_2(x, y), H_3(x, y)$ . 再现时, 将 3 次记录的全息图进行线性叠加得到的复全息  $H_F(x, y)$  为

$$\begin{aligned} H_F(x, y) &= H_1(x, y)[\exp(\pm i\theta_3) - \exp(\pm i\theta_2)] \\ &+ H_2(x, y)[\exp(\pm i\theta_1) - \exp(\pm i\theta_3)] \end{aligned}$$

$$+ H_3(x, y)[\exp(\pm i\theta_2) - \exp(\pm i\theta_1)]. \quad (11)$$

利用角谱衍射算法<sup>[24]</sup>模拟衍射过程实现数值再现, 得到再现像

$$\begin{aligned} S(x, y, z_r) &= F^{-1}\left\{F[H_F(x, y)]\right. \\ &\left.\times \exp[ikz_r\sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}]\right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $F$  和  $F^{-1}$  分别表示正逆傅里叶变换,  $f_x$  和  $f_y$  表示与  $x, y$  对应的频域坐标.

## 3 模拟与实验分析

### 3.1 点扩散函数

采用 (9) 式模拟 FINCH 系统的螺旋点扩散函数, 相位常数为  $0^\circ$ 、拓扑荷为 1 时的仿真结果如图 2(a) 所示, 对应的模拟再现像如图 2(c) 所示. 为验证点扩散函数表达式的正确性, 以直径  $20 \mu\text{m}$  的小孔作为点源进行实验, 图 2(b) 为相移常数为  $0^\circ$  时 CCD 记录的小孔全息图 (拓扑荷  $m = 1$ ), 图 2(d) 为对应的再现像. 比较图 2(a) 和图 2(b) 及图 2(c) 和图 2(d), 并考虑到 CCD 响应灵敏度等因素的限制, 模拟结果与实验结果基本一致.

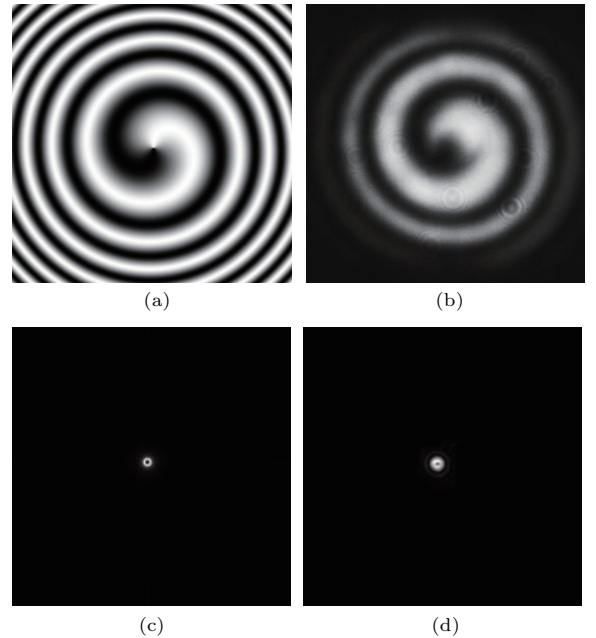


图 2 (a)  $\theta$  为  $0^\circ$  时模拟点源全息图; (b)  $\theta$  为  $0^\circ$  时实验点源全息图; (c) 模拟点源再现像; (d) 实验点源再现像  
Fig. 2. (a) The simulated holograms with the phase factor equals zero; (b) the experimental holograms with the phase factor equals zero; (c) simulated reconstructed image; (d) experimental reconstructed image.

### 3.2 振幅物体的全息记录与再现

搭建如图3所示的反射式非相干数字全息记录系统, 测试物体为USAF1951分辨率板. 反射式空间光调制器像素大小为 $8\ \mu\text{m}$ , 像素数为 $1920 \times 1080$ , CCD像素大小为 $4.54\ \mu\text{m}$ , 像素数为 $2750 \times 2200$ , 实验中只使用了 $1024 \times 1024$ 个像素点. 其中光源为白光连续光谱光源, BS为分束器, 准直透镜 $L_2$ 的焦距为 $250\ \text{mm}$ , 偏振片P的偏振方向与SLM的液晶长轴方向一致, 窄带滤光片BF的带宽为 $20\ \text{nm}$ , 中心波长为 $632.8\ \text{nm}$ . 分辨率板到透镜 $L_2$ 的距离为 $330\ \text{mm}$ , 透镜 $L_2$ 到SLM的距离为 $150\ \text{mm}$ , SLM和CCD之间的距离为 $z_h$ , 为获得最佳干涉效果, 其具体数值需与SLM上加载的透镜焦距大小相匹配. 实验中取 $f_{d1} = 245\ \text{mm}$ ,  $f_{d2} = 255\ \text{mm}$ ,  $z_h = 250\ \text{mm}$ , 拓扑荷 $m = 1$ .

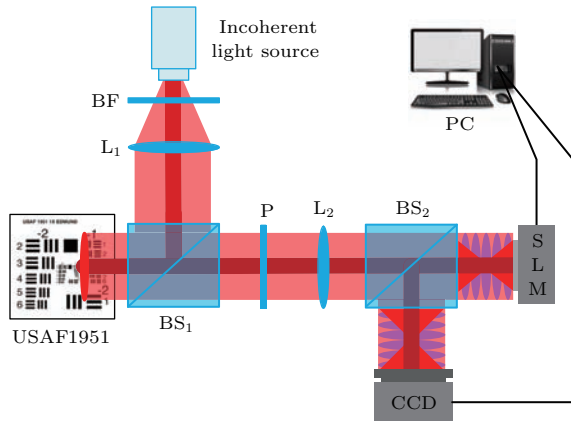


图3 非相干数字全息实验光路

Fig. 3. Experimental set-up of incoherent digital holography.

为验证系统对振幅物体的边缘提取与识别特性, 需要在SLM上分别加载双透镜相位掩模和螺旋相位调制的双透镜掩模, 并在两种相位调制模式下, 改变相位常数 $\theta$ 分别为 $0^\circ$ ,  $120^\circ$ 和 $240^\circ$ 时各拍摄三张全息图后进行数字重建. 图4(a)和图4(c)分别为 $\theta = 0^\circ$ 时双透镜相位掩模及对应模式下记录的全息图, 图4(b)和图4(d)分别为 $\theta = 0^\circ$ 时螺旋相位调制双透镜相位掩模及对应模式下记录的全息图. 在计算机中对所记录不同相位常数的全息图进行处理及再现, 获得的再现像如图5所示. 其中图5(a)为双透镜相位掩模调制下分辨率板的再现像, 图5(b)为螺旋相位掩模调制下分辨率板的再现像, 图5(c)中的实线和虚线分别对应图5(a)和图5(b)中竖线部分的归一化强度分布曲线. 对

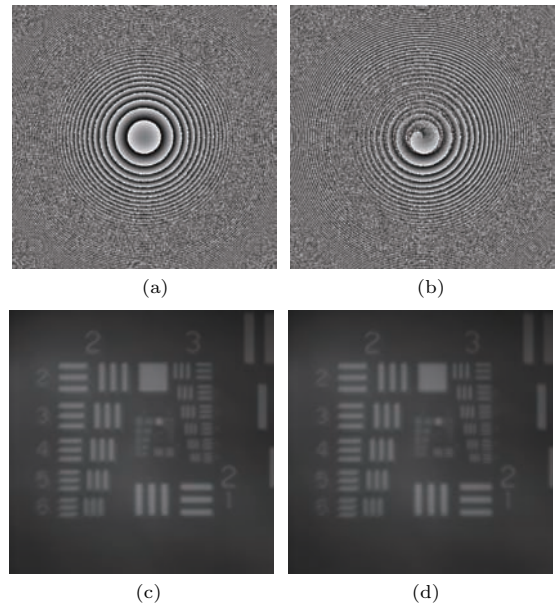


图4  $\theta$ 为 $0^\circ$ 时(a)双透镜相位掩模, (b)螺旋相位调制下的双透镜相位掩模, (c)双透镜模式下记录的全息图, (d)螺旋相位调制模式下记录的全息图

Fig. 4. (a) Double lens phase mask with the phase factor equals zero, (b) holograms captured under double lens masks with the phase factor equals zero, (c) spiral phase mask with the phase factor equals zero, (d) holograms captured under spiral phase mask with the phase factor equals zero.

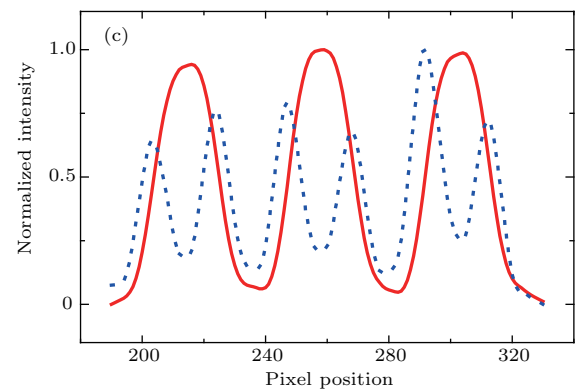
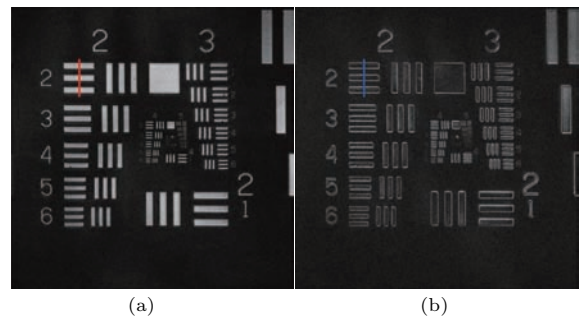


图5 分辨率板再现像 (a) 双透镜相位掩模调制; (b) 螺旋相位掩模调制; (c) (a)和(b)中竖线部分的归一化强度分布

Fig. 5. The reconstructed images of resolution target: (a) Double lens phase mask modulation; (b) spiral phase mask modulation; (c) normalized intensity curves of the vertical line in (a) and (b).

比图 5(a) 和图 5(b) 可知, 当 SLM 加载螺旋相位调制的双透镜掩模 ( $m = 1$ ) 时, 可实现图像各向同性的边缘提取, 再现像背景噪声小, 可在不牺牲分辨率的情况下实现图像的边缘提取与识别.

### 3.3 纯相位物体的全息记录与再现

为验证螺旋相位调制的双透镜系统对纯相位物体的成像特性, 采用非染色洋葱表皮细胞作为记录物体. 为获得实验结果, 需在图 3 所示实验装置中记录物体前加一个 20 倍的显微镜头, 并采用透射式照明光路, 其他元件及参数均不变. 图 6(a) 和图 6(b) 分别为相位常数为  $0^\circ$  时双透镜相位掩模和螺旋调制的双透镜相位掩模两种模式下记录的全息图, 图 6(c) 和图 6(d) 分别为图 6(a) 和图 6(b) 两种模式下对应的再现图. 可以看出, 螺旋相位调制模式得到的再现像有效地抑制了细胞内部的光场, 具有更清晰的边缘信息. 该特性在非标记、动态实时细胞形态分析方面有潜在的应用价值.

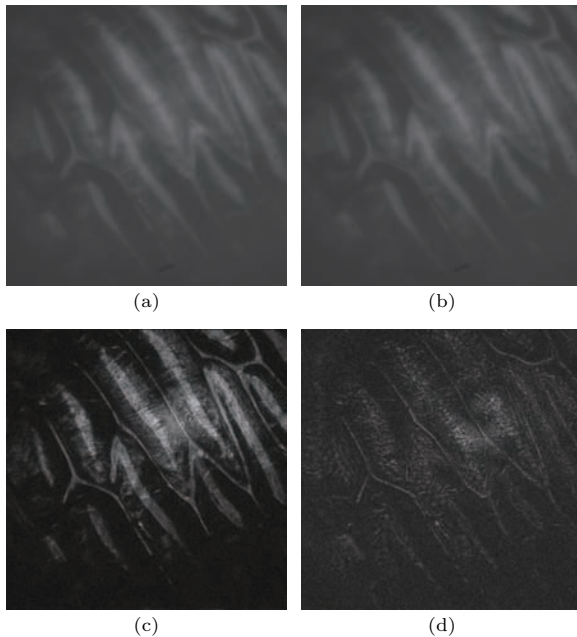


图 6 (a)  $\theta$  为  $0^\circ$  时双透镜相位掩模下记录的全息图; (b)  $\theta$  为  $0^\circ$  时螺旋相位掩模下记录的全息图; (c) 双透镜相位掩模下的再现像; (d) 螺旋相位掩模下的再现像

Fig. 6. Holograms recorded under (a) double lens phase mask and (b) spiral phase mask with the phase factor equals zero; reconstructed images under (c) double lens phase mask and (d) spiral phase mask.

## 4 结 论

从波动光学角度出发, 分析了螺旋相位调制下 FINCH 系统的记录与再现原理, 给出了系统螺旋

点扩散函数的表达式, 模拟结果与实验结果相吻合. 采用螺旋相位调制的双透镜系统对分辨率板成像, 在几乎不损失分辨率的情况下实现了图像边缘提取的效果. 对非染色洋葱细胞成像, 获得了相比于非螺旋调制模式更清晰的细胞边缘信息. 该系统对光路的稳定性和光源的相干性等方面要求不高, 可以在非相干光照明下实现对振幅或相位物体的边缘提取, 在活细胞的分裂、形变监测及医学检验等领域有重要应用前景.

### 参考文献

- [1] Gabor D 1948 *Nature* **161** 777
- [2] Mertz L, Young N O 1962 *Optical Instruments and Techniques* London, United Kingdom, July 11–14, 1961 p305
- [3] Wan Y, Wang D, Man T 2014 *Opt. Express* **22** 8565
- [4] Kim M K 2013 *Opt. Express* **21** 9636
- [5] Naik D N, Pedrini G, Osten W 2013 *Opt. Express* **21** 3990
- [6] Rosen J, Brooker G 2007 *Opt. Express* **15** 2244
- [7] Cochran G 1966 *J. Opt. Soc. Am.* **56** 1513
- [8] Stroke G W, Restrick R C 1965 *Appl. Phys. Lett.* **7** 229
- [9] Goodman J W, Lawrence R W 1967 *Appl. Phys. Lett.* **11** 77
- [10] Huang T S 1971 *Proc. IEEE* **59** 1335
- [11] Schnars U, Jüptner W P O 2002 *Meas. Sci. Technol.* **13** R85
- [12] Schnars U, Jüptner W 1994 *Appl. Opt.* **33** 179
- [13] Yang J, Wu X C, Wu Y C, Yao L C, Chen L H, Qiu K Z, Cen K F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114209 (in Chinese) [阳静, 吴学成, 吴迎春, 姚龙超, 陈玲红, 邱坤赞, 岑可法 2015 物理学报 **64** 114209]
- [14] Li J C, Peng Z J, Fu Y C 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 064201
- [15] Zhang Q X, Lü X X, Yu Q T, Liu G Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2764
- [16] Lu X W, Li J Z, Chen H Y 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 104209
- [17] Li J C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134203 (in Chinese) [李俊昌 2012 物理学报 **61** 134203]
- [18] Kim M K 2012 *Opt. Lett.* **37** 2694
- [19] Rosen J, Brooker G 2007 *Opt. Lett.* **32** 912
- [20] Rosen J, Brooker G 2008 *Nat. Photon.* **2** 190
- [21] Rosen J, Brooker G 2012 *Adv. Opt. Techn.* **1** 151
- [22] Shi X, Zhu W F, Yuan B, Du Y L, Gong Q X, Guo M T, Liang E J, Ma F Y 2015 *Chin. J. Las.* **42** 265 (in Chinese) [石侠, 朱五凤, 袁斌, 杜艳丽, 弓巧侠, 郭茂田, 梁二军, 马凤英 2015 中国激光 **42** 265]
- [23] Bouchal P, Bouchal Z 2012 *Opt. Lett.* **37** 2949
- [24] Li J C, Song Q X, Pascal P, Gui J B, Lou Y L 2014 *Chin. J. Las.* **41** 81 (in Chinese) [李俊昌, 宋庆和, Picart Pascal, 桂进斌, 楼宇丽 2014 中国激光 **41** 81]

# Point spread function of incoherent digital holography based on spiral phase modulation\*

Zhao Zhong-Chao Yang Xu-Feng Xu Tian-Xu He Jiu-Ru Gong Qiao-Xiao Du Yan-Li  
Dong Lin Yuan Bin<sup>†</sup> Ma Feng-Ying<sup>‡</sup>

(School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(Received 23 June 2017; revised manuscript received 12 October 2017)

## Abstract

Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) has attracted much attention because it is able to record the holograms of three-dimensional (3D) samples under incoherent illumination with just a charge coupled device (CCD) and spatial light modulator (SLM). The FINCH technology achieves the splitting and phase shifting of the incident beam by loading a phase mask on an SLM. Three holograms, whose phase factors are different from each other, are recorded sequentially by a CCD. After the three holograms are superposed in the computer, the zero order image and a twin image are eliminated, and a complex hologram is obtained. The 3D properties of the object are revealed when the complex hologram is reconstructed in the computer. Spiral phase filters (SPFs) are commonly used to produce optical vortices, which can enhance and recognize image edges. In this paper, the spiral phase modulated FINCH system illuminated by Xenon lamp is built, in which the phase-only SLM is space-division multiplexed by a helical lens (superposed by an SPF and a lens) and a conventional lens. The mathematical model of spiral phase modulated FINCH system is established based on wave optics theory. The specific forms of the point spread function (PSF) and the reconstruction distance of the system are given for the first time. Experiments are conducted by using a small aperture with a diameter of 20 nm as a point source, the point source hologram recorded by CCD and the reconstructed image are consistent with the simulated ones. When the system is used for imaging resolution target and unstained onion cells, the edge contrast enhancement effects are obtained without the loss of resolution. The results show that the spiral phase modulated FINCH system can not only improve the edge contrast of the amplitude object, but also extract the edge information or recognition of the phase objects. This method has an important application prospect in the quantitative imaging of phase objects such as in real-time monitoring cell division and deformation of living cells.

**Keywords:** incoherent digital holography, point spread function, spiral phase modulation, edge extraction and recognition

**PACS:** 42.40.-i, 87.57.nt

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171442

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11674290, 61505178), the Natural Science Foundation of Henan Province of China (Grant Nos. 15A140038, 16A140035, 18A140032), and the Henan Science and Technology Open Cooperation Project, China (Grant No.152106000045).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [yuanbin@zzu.edu.cn](mailto:yuanbin@zzu.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [maf@zzu.edu.cn](mailto:maf@zzu.edu.cn)