

菲涅耳非相干相关全息相移技术

臧瑞环, 汤明玉, 段智勇, 马凤英, 杜艳丽, 刘晓旻, 弓巧侠

(郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 菲涅耳非相干相关全息术(Fresnel Incoherent Correlation Holography, FINCH)属于同轴全息系统,需要通过相移技术去除零级像和共轭像。通过对 FINCH 系统记录及再现过程的理论分析,根据系统点扩散函数推导出了 n 步相移数学计算公式,模拟仿真了相移步数 n 对 FINCH 系统成像质量的影响,并搭建了非相干光反射式数字全息记录系统,对模拟结果进行了实验验证。模拟仿真及实验结果表明:通过增加相移步数不能显著提高再现像质量;二步相移能够提高记录速度,通过去除原始图像和小波分解的方法可以抑制零级像,提高再现像质量;通过对三步相移每个相移全息图拍摄多次求平均值后得到的再现像与拍摄一次得到的再现像对比发现,随着拍摄次数的增加,得到的再现像质量越来越好,背景噪声大大减弱,再现像强度越来越大,为 FINCH 系统再现像质量的改善提供了新的思路和新的实验基础。

关键词: 全息术; 菲涅耳非相干相关全息术; 相移技术; 小波分解

中图分类号: O438 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0825001

Fresnel incoherent correlation holography with phase-shifting technology

Zang Ruihuan, Tang Mingyu, Duan Zhiyong, Ma Fengying, Du Yanli, Liu Xiaomin, Gong Qiaoxia

(School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The Fresnel Incoherent Correlation Holography (FINCH) technology is an on-axis system, which needs phase-shifting technology to eliminate the conjugate image and the zero-order image. Based on the theory of FINCH imaging system, the formula of n -step phase-shifting method was derived, an experimental light path of incoherent light reflection digital holographic recording was constructed. The effect of n -step phase-shifting on the FINCH imaging system through simulation and experiment was studied. The results show that the quality of the reconstructed image cannot significantly improved by increasing phase-shifting steps; two-step phase-shifting can enhance recording speed, whose zero-order image can be suppressed by eliminating original image and wavelet decomposition. A comparison was made between the reconstructed images obtained separately by averaging hologram and hologram

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(51175479, U1704155); 河南省高等学校重点科研项目(16A140035, 18A140032);

2018 年度河南省高校科技创新团队(18IRTSTHN016)

作者简介: 臧瑞环(1990-), 女, 硕士生, 主要从事白光非相干数字全息成像方面的研究。Email: 445502625@qq.com

导师简介: 弓巧侠(1977-), 女, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事非相干数字全息成像方面的研究。Email: gqx1205@zzu.edu.cn

photographing once of three-step phase-shifting, and the result shows that the quality of the reconstructed image is getting better and better with the increase of the shots. Not only the background noise is greatly weakened, but also the intensity of the pixels becomes stronger and stronger, which provides a new way and new experimental basis to promote the development of the FINCH system.

Key words: holography; Fresnel incoherent correlation holography; phase-shifting technology; wavelet decomposition

0 引言

1948 年, Gabor^[1]首次提出了全息术的概念, 能够同时记录物体的振幅和相位信息, 是真正意义上的三维成像技术, 而传统全息术对于光源的一致性和系统的稳定性有很高的要求, 所以应用范围有限。1961 年, L.Mertz 和 N.O.Young^[2]提出了在非相干光照明下利用菲涅耳波带片作编码掩模, 物体发出或反射的光通过此编码孔, 在记录平面内投影叠加, 形成带有相位和强度信息的全息图。非相干全息术的出现使全息记录过程不再依赖相干光源, 全息术得到了快速发展和应用, 其中最引人注目的技术是, 2007 年, J.Rosen 等^[3]提出的基于空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 的菲涅耳非相干相关全息术 (Fresnel Incoherent Correlation Holography, FINCH)。该记录系统不需任何扫描装置和移动部件, 快速拍摄三张具备不同相移量的全息图就可以在计算机中利用算法完成对样品三维信息的重构, 这种全息技术已经在反射白光全息成像^[4]、3D 荧光物体的多色全息成像^[5]、显微成像^[6-7]和三维显示测量^[8-9]方面显示了极大应用潜力。

数字全息和光学全息一样, 根据记录光路分为离轴全息和同轴全息。在离轴数字全息中, 物波的频谱和零级像以及共轭像的频谱是分开的, 通过空间滤波可以直接提取出物波项, 易于实现快速全息记录。但现有的 CCD 感光板尺寸和分辨率远小于传统记录材料, 采用同样的图像传感器, 同轴数字全息能够实现更高横向分辨率的再现像, 因此非相干数字全息术多采用同轴全息记录。如何消除或降低零级像和共轭光波对再现物光波的影响, 是数字全息术领域的研究热点之一^[10-12], 其中最典型的是相移技术, 即通过连续调节参考光的相位获得多

幅全息图后, 再采用线性运算去除零级像以及共轭像^[13-14]。FINCH 系统去除孪生像影响采用的相移步数通常为三步和四步, 为了提高记录速度, 人们还采用二步相移技术, 但二步相移经过线性运算后, 不能消除零级像。

文中在分析 FINCH 记录过程的理论上, 对二步相移、三步相移、四步相移技术给出了数学模型和计算公式, 针对二步相移不能完全消除零级像对再现像质量的影响, 提出了去除原始图像和小波分解两种方法; 通过对 FINCH 记录不同步数相移线性处理模拟仿真和实验验证, 结果表明单纯增加相移步数不能显著提高再现像质量, 但对三步相移中每个子全息图拍摄 3、6、10 次求平均值得到的再现像与拍摄一次的进行对比, 发现通过增加每步相移拍摄次数, 能显著提高再现像质量, 为改善 FINCH 系统再现像质量提供了一种新思路。

1 相移技术原理

1.1 FINCH 系统的成像原理

图 1 为 FINCH 系统记录原理示意图, 并标出各个元件之间距离及透镜焦距大小。为了简要描述系统成像过程, 先给出系统的脉冲响应函数。

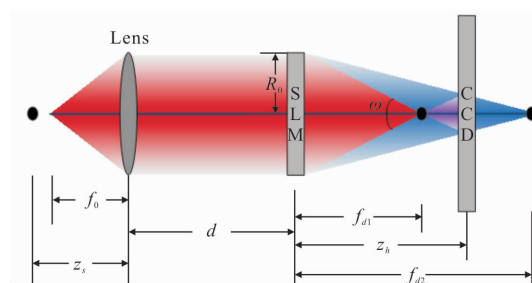


图 1 FINCH 系统记录示意图

Fig.1 Schematic diagram of FINCH imaging system

在距离透镜 z_s 平面处取任一点源, 坐标为 $o(x_s, y_s, z_s)$ 。点源在自由空间传播遵循菲涅耳衍射理论, 根据傍轴近似, 透镜对入射光波相位变换可写成: $\exp\left(-ik\frac{x^2+y^2}{2f}\right)$ 。在 SLM 加载双透镜相位掩模, 随机选取一半像素加载焦距为 f_{d1} 的透镜模式, 另一半像素加载焦距为 f_{d2} 的透镜模式, 因此, SLM 上加载的振幅反射系数方程可写为:

$$R(x, y) = BQ\left(\frac{-1}{f_{d1}}\right) + B'Q\left(\frac{-1}{f_{d2}}\right)\exp(i\theta) \quad (1)$$

式中: B, B' 为常数; θ 为相移常数。

文中为了书写方便, 以 $Q(b) = \exp[i\pi b\lambda^{-1}(x^2+y^2)]$ 表示。SLM 将入射的一束光波变成曲率半径不同的两束光束, 发生相互干涉, 通过 CCD 记录自相干涉条纹。根据波动光学理论分析及计算得到任意点源在 CCD 平面的振幅分布, 即系统脉冲响应函数^[15]:

$$U(x, y; \vec{r}_s, z_s) = \left[C(\vec{r}_s, z_s) L\left(\frac{-\vec{r}_s}{z_s}\right) Q\left(\frac{1}{z_s}\right) Q\left(-\frac{1}{f_0}\right) \cdot Q\left(\frac{1}{d}\right) \right] \cdot \left[B\exp(i\theta)Q\left(\frac{-1}{f_{d1}}\right) + B'Q\left(\frac{-1}{f_{d2}}\right) \right] \cdot Q\left(\frac{1}{z_h}\right) \quad (2)$$

式中: $L(\vec{r}_s) = \exp[i2\pi\lambda^{-1}(x_s x + y_s y)]$ 表示线性相移量; $C(\vec{r}_s, z_s) = \exp[i\pi(z_s\lambda)^{-1}(x_s^2 + y_s^2)]$ 表示和点源位置相关的复常数; λ 为中心波长; \vec{r}_s 为物点的位置矢量, 其在 x 和 y 轴方向的分量分别为 x_s 和 y_s 。

由于 CCD 只能记录光场的强度分布, 那么由公式(1)复振幅分布可得出在 CCD 上记录的光强分布, 即点源全息图, 也称为系统的强度点扩散函数 (PSF)^[15]:

$$I_p(x, y; \vec{r}_s, z_s) = |U(x, y; \vec{r}_s, z_s)|^2 = C + C_1 \exp\left\{ \frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] + i\theta \right\} + c.c. \quad (3)$$

式中: C, C_1 为复常数; $c.c.$ 为等号右侧第二项的复共轭; M_T 为系统的垂轴放大率; z_r 为再现距离。若物体表面反射强度分布为 $g(x_s, y_s, z_s)$, 则 CCD 上记录的物体全息图为所有物点强度点扩散函数的非相干叠加^[12, 16-17], 即:

$$H(x, y) = \iint g(x_s, y_s, z_s) I_p(x, y; \vec{r}_s, z_s) dx_s dy_s dz_s = C \iint g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s + C_1 \iint g(x_s, y_s, z_s) \cdot$$

$$\exp\left\{ \frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] + i\theta \right\} dx_s dy_s dz_s + c.c. \quad (4)$$

为了去除零级像和共轭像的影响, 需要调节公式中的相位因子 θ , 拍摄不同相位常数的全息图, 再进行线性运算, 最后只得到实像信息。根据拍摄次数 n , 将这个过程称之为 n 步相移技术。

1.2 n 步相移原理

FINCH 系统核心器件为 SLM, 有两个作用: (1) 将同一物点发出的光分成两个曲率半径不同的球面波, 形成自干涉的两束光; (2) 相移器, 通过调节加载在 SLM 上掩模的相位因子 θ , 得到不同相移角度的全息图。根据公式(2)、(3), 对 FINCH 记录过程进行了理论分析, 得到不同相移步数 n 及对应相移因子 θ 值。

二步相移的计算公式如下:

$$H_F(x, y) = \frac{1}{2}(H_1(x, y) + iH_2(x, y)) = C' \iint g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s + C_1' \iint g(x_s, y_s, z_s) \cdot \exp\left\{ -\frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] \right\} dx_s dy_s dz_s \quad (5)$$

式中: θ_1, θ_2 可以取 $0^\circ, 90^\circ$, 也可以取 $90^\circ, 180^\circ$ 。

三步相移的计算公式如下:

$$H_F(x, y) = H_1(x, y)[\exp(\pm i\theta_3) - \exp(\pm i\theta_2)] dx_s dy_s dz_s + H_2(x, y)[\exp(\pm i\theta_1) - \exp(\pm i\theta_3)] dx_s dy_s dz_s + H_3(x, y)[\exp(\pm i\theta_2) - \exp(\pm i\theta_1)] dx_s dy_s dz_s = C_2 \iint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{ \mp \frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] \right\} dx_s dy_s dz_s \quad (6)$$

其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别取 $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ 。

四步相移的计算公式如下:

$$H_F(x, y) = H_1(x, y)[\exp(\pm i\theta_3) - \exp(\pm i\theta_2) - \exp(\pm i\theta_4)] \cdot dx_s dy_s dz_s + H_2(x, y)[\exp(\pm i\theta_4) - \exp(\pm i\theta_1) - \exp(\pm i\theta_3)] \cdot dx_s dy_s dz_s + H_3(x, y)[\exp(\pm i\theta_1) - \exp(\pm i\theta_2) - \exp(\pm i\theta_4)] \cdot dx_s dy_s dz_s + H_4(x, y)[\exp(\pm i\theta_2) - \exp(\pm i\theta_1) - \exp(\pm i\theta_3)] \cdot dx_s dy_s dz_s \quad (7)$$

其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 分别为 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 。

通过相移计算去除零级像和共轭像的全息图使用角谱衍射算法^[18]得到再现像:

$$S(x, y, z) = F^{-1}\{F[H(x, y)]\exp[ikz_r\sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}]\} \quad (8)$$

对比公式(5)、(6)、(7)可以看出, 采用三步相移

和四步相移可以通过计算直接去除零级像和共轭像,但是二步相移的方法只能去除共轭像,不能直接去除零级像即干涉图案背景信息的影响。

2 相移技术模拟仿真和实验

2.1 模拟仿真

图 2 为采用图 1 所示 FINCH 系统 n 步相移技术成像模拟实验结果。把对应的全息图记录下来,然后再现。

模拟结果如图 2 所示,图中 PSNR 是一种图像质量客观评价标准,单位是 dB,数值越大,表示图像失真越小,定义为: $PSNR=10\log_{10}\left[\frac{(2^n-1)^2}{MSE}\right]$, 对于

256 阶度图像, n 取 8。MSE 表示当前图像与参考图像的均方误差(MSE),假若 $M、N$ 分别表示图像水平和垂直方向的像素数,则 $MSE=\frac{1}{M\times N}\sum_{i=1}^M\sum_{j=1}^N(x(i,j)-y(i,j))^2$,文中参考图像采用的是原始图像,如图 2(d)所示。图 2(a2)~(c2)中三个峰值对应了原始图片中三行字,其中基线值代表了背景项。由图 2 可以看出,随着相移步数的增加,再现像的 PSNR 越来越大,证明再现像的质量越来越好。对比图 2(b1)、(b2)、(c1)、(c2),可以看到四步相移再现像质量比三步相移的并没有显著提高,PSNR 值没有增加多少,所以为了提高记录速度,选择三步相移技术较好。从图 2 能明显发现,二步相移的再现像质量较差,背景

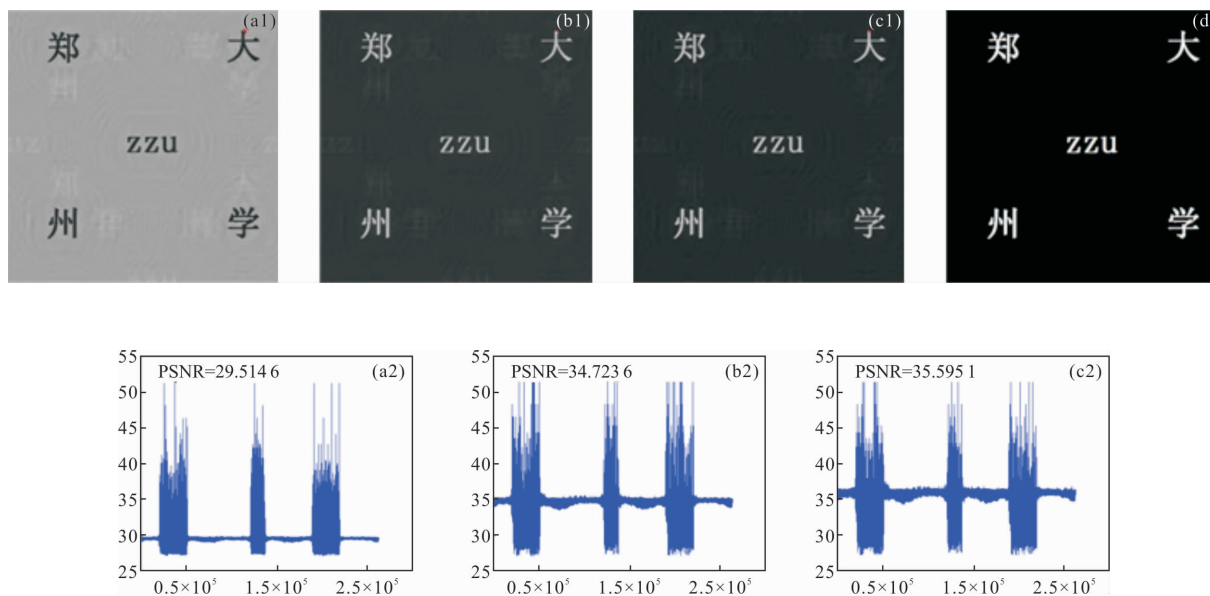


图 2 FINCH 系统相移技术成像模拟仿真结果:(a1) 二步相移再现像;(b1) 三步相移再现像;(c1) 四步相移再现像;
(a2)~(c2) 分别为(a1)~(c1)的峰值信噪比(PSNR);(d) 原始图像

Fig.2 Simulation results of phase-shifting technology in FINCH imaging system: (a1) reconstructed image of two-step phase-shifting;
(b1) reconstructed image of three-step phase-shifting; (c1) reconstructed image of four-step phase-shifting;
(a2)~(c2) correspond to the PSNR of (a1)~(c1); (d) original image

噪声比较大,二步相移 PSNR 图中基线值明显低于三步相移与四步相移的,由公式(5)也可以看出二步相移线性运算不能消除零级像。

为了抑制二步相移零级像对再现像质量的影响,采用了去除原始图像和小波分解的方法。具体方法为在 SLM 加载相移掩膜前先拍摄一幅不包含相

移信息的原始图像,然后用采集到的两张相移全息图减去原始图像,再利用小波分解抑制相减后的零级像,以公式(5)进行再现,结果如图 3 所示。

从模拟仿真的结果可以看出,小波分解可以抑制公式(5)中的零级像,减少再现像的背景噪声,提高再现像质量。

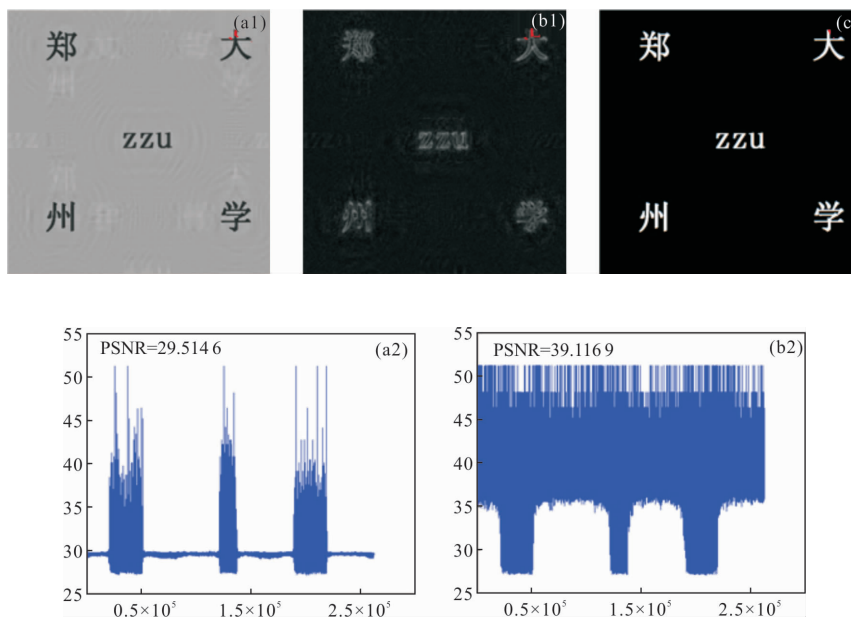


图 3 FINCH 系统二步相移模拟仿真结果:(a1) 二步相移直接再现像;(b1) 小波分解抑制零级像得到的再现像;
(a2)和(b2) 分别为(a1)和(b1)的峰值信噪比(PSNR); (c) 原始图像

Fig.3 Simulation results of two-step phase-shifting in FINCH imaging system: (a1) direct reconstructed image; (b1) reconstructed image with wavelet decomposition; (a2) and (b2) correspond to the PSNR of (a1) and (b1); (c) original image

2.2 实验结果与分析

搭建如图 4 所示的实验光路, 透镜 L_1 焦距为 60 mm, BS 为分束器, 以分辨率板 USAF1951 作为

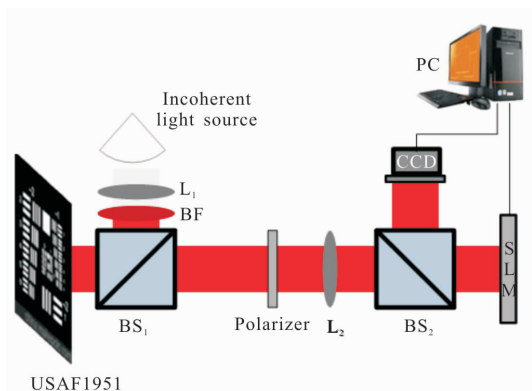


图 4 非相干光反射式数字全息记录实验光路

Fig.4 Experimental light path of incoherent light reflection digital holographic recording

待测物体, 位于准直透镜 L_2 的焦平面上 ($f_0=250$ mm)。用中心波长在 632.8 nm, 带度为 20 nm 的滤光片对入射的白光进行滤波。透镜 L_2 到 SLM 的距离是 140 mm。根据 FINCH 记录原理, 经过 SLM 后两束

光要在 CCD 获得最大重合面积, SLM 与 CCD 之间距离必须满足 $z_0=2f_0f_{d2}/(f_{d1}+f_{d2})$ 。实验中, $f_{d1}=245$ mm, $f_{d2}=255$ mm, BS_2 到 SLM (BNS HSPDM512, 512 pixel \times 512 pixel) 的距离加上 BS_2 到 CCD 的距离之和是 250 mm, 透镜 L_2 到 SLM 的距离是 140 mm。SLM 为 BNS 纯相位反射式 HSPDM512, 像素数为 512 \times 512 pixel, 像素大小为 15 μ m。CCD 为 Hamamatsu Digital Camera C8484-05, 像素大小为 6.45 μ m, 像素数为 1 344 \times 1 024 pixel, 拍摄时使用的像素点为 1 024 \times 1 024 pixel。

图 5 为不同相移步数对再现像质量影响的实验结果。从图 5 中再现像及在划红线处对应的强度分布图可以看到, 当相移步数越小的时候, 成像质量越差。尤其是二步相移的再现像, 由于零级像不能完全消除, 背景噪声特别严重。

为了抑制零级像对二步相移再现像的影响, 采用了去除原始图像和小波分解的方法, 实验结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出去除原始图像得到的再现像虽然背景噪声减弱了, 但是造成了再现像部分细节的损失, 而小波分解重构得到的再现像不仅

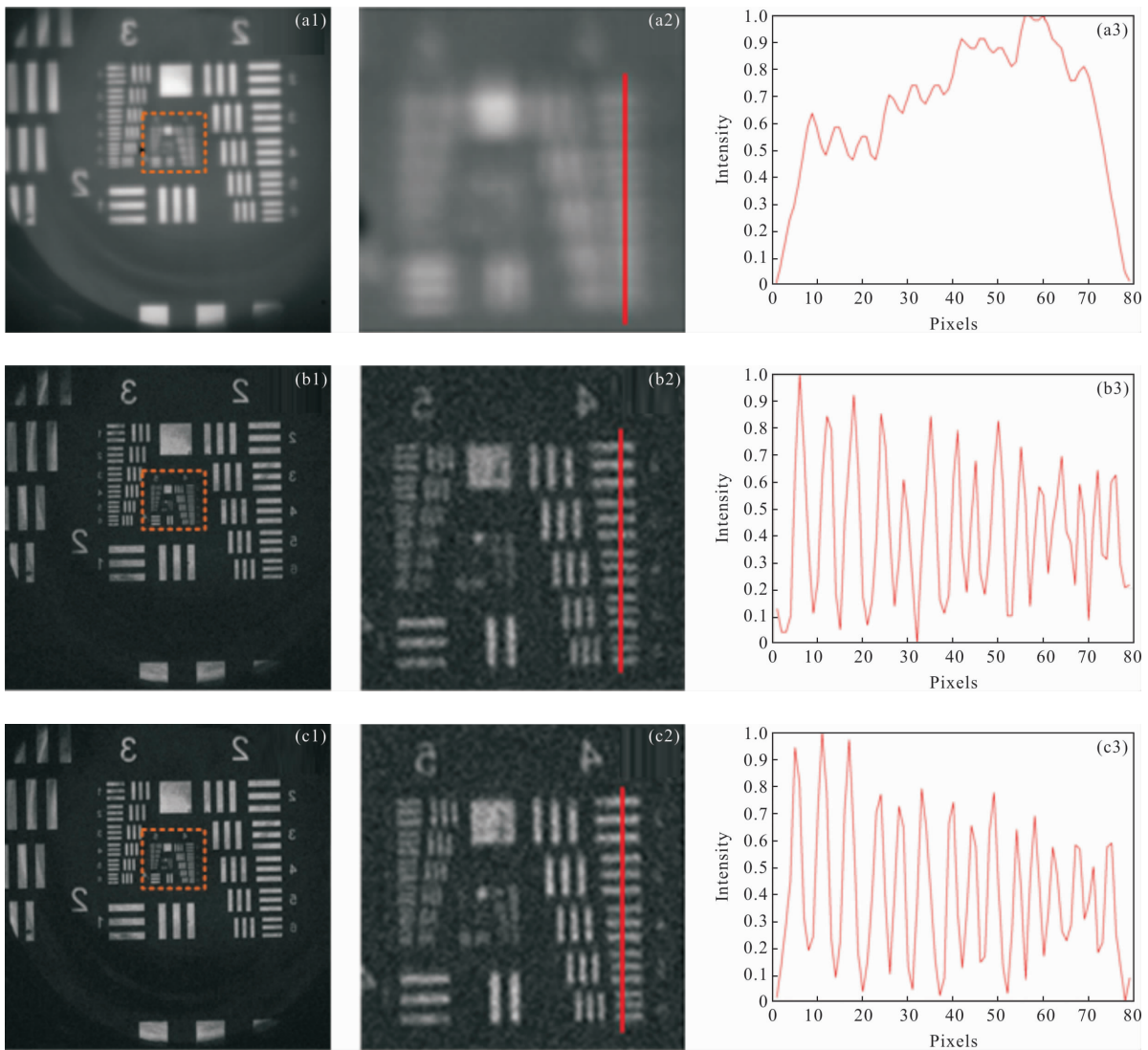
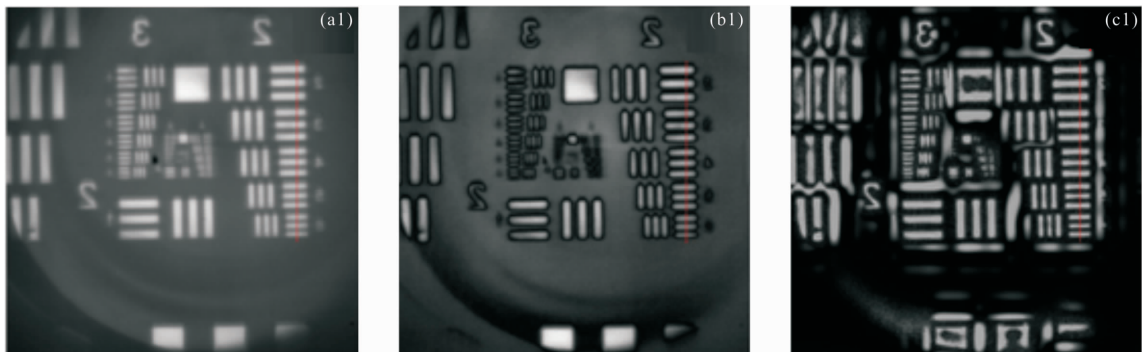


图 5 FINCH 系统不同相移步数的再现像及在红线位置处的强度变化图:(a1) 二步相移再现像;(b1) 三步相移再现像;(c1) 四步相移再现像;(a2)~(c2) 分别为(a1)~(c1)中心部分放大图;(a3)~(c3) 分别为(a2)~(c2)划红线部分对应的强度分布

Fig.5 Reconstruction image and intensity distribution at the position of the red line of different phase-shifting steps in the FINCH system: (a1) the reconstructed image of two-step phase-shifting; (b1) the reconstructed image of three-step phase-shifting; (c1) the reconstructed image of four-step phase-shifting; (a2)~(c2) correspond to the magnified images of the red box area in (a1)~(c1); (a3)~(c3) correspond to the intensity distribution of (a2)~(c2)



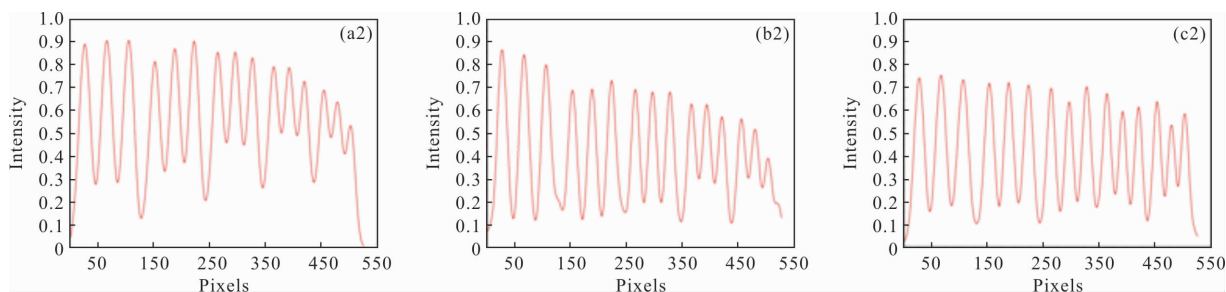


图 6 FINCH 系统二步相移再现像及在红线位置处的强度变化图:(a1) 二步相移直接再现像;(b1) 去除原始图像得到的再现像;
(c1) 小波分解抑制零级像得到的再现像;(a2)~(c2) 分别为(a1)~(c1)划红线部分对应的强度分布

Fig.6 Reconstruction image and intensity distribution at the position of the red line of two-step phase-shifting in the FINCH system:
(a1) direct reconstructed image; (b1) reconstructed image with eliminating original image; (c1) reconstructed image with
wavelet decomposition; (a2)~(c2) correspond to the intensity distribution of (a1)~(c1)

使背景噪声大大减弱,而且再现像的轮廓更加清楚。

为了进一步探究 n 阶相移对 FINCH 系统再现像质量的影响,对三步相移每一个相移子全息图分

别拍摄 1、3、6、10 次,通过 MATLAB 编程求出每一个子全息图的平均值后,再利用公式(6)进行再现,具体实验结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,随着

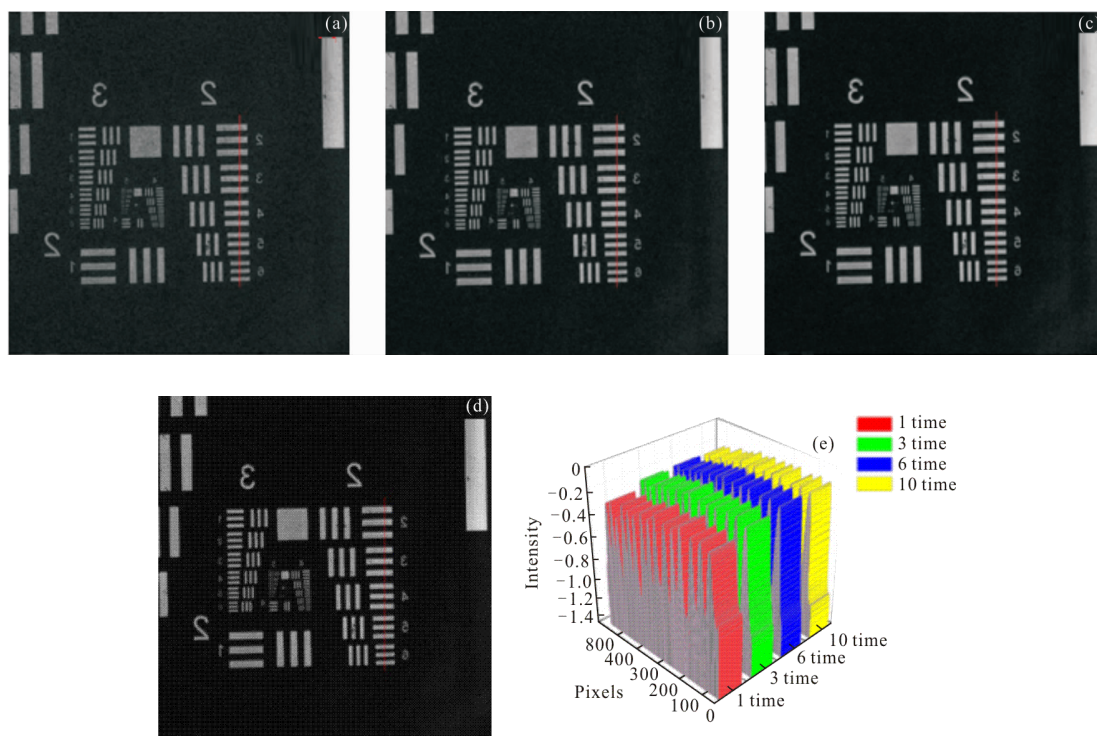


图 7 FINCH 系统三步相移的再现像及红线位置处的强度变化图:(a) 每个子全息图拍摄一次得到的再现像;(b) 每个子
全息图拍摄 3 次求平均值后得到的再现像;(c) 每个子全息图拍摄 6 次求平均值后得到的再现像;(d) 每个子全息图
拍摄 10 次求平均值后得到的再现像;(e), (a)~(d)划红线部分对应的强度分布(图中红色对应(a),绿色对应(b),蓝色对
应(c),黄色对应(d))

Fig.7 Reconstruction image and intensity distribution at the position of the red line of three-step phase-shifting in the FINCH system:
(a)~(d) are the reconstructed images obtained by averaging hologram with 1, 3, 6, 10 times, respectively; (e) corresponds to
the intensity distribution of (a)~(d) (the red corresponds to (a), the green corresponds to (b), the blue corresponds to (c),
the yellow corresponds to (d))

拍摄次数的增加,得到的再现像质量越来越好,不仅背景噪声大大减弱,而且像素强度越来越大,这间接证明了 FINCH 系统的再现像质量会随着相移步数的增加而提高,也为提高 FINCH 系统的再现像质量提供了新思路。

3 结 论

FINCH 是一种单通道、非扫描、无运动的快速记录三维物体的非相干数字全息技术,近年来,受到人们广泛关注。FINCH 技术属于同轴全息,需要通过相移技术去除零级像及孪生像的影响。文中在分析 FINCH 成像记录机理的基础上,推导了 n 阶相移公式,并对相移步数 n 对成像质量影响进行了模拟仿真与实验验证。为了提高记录速度,可以采用二步相移技术,通过去除原始图像与小波分解的方法提高再现像质量。而通过对三步相移拍摄多次求平均值后得到的再现像与拍摄一次得到的再现像的对比发现,拍摄次数越多,再现像的背景噪声越弱,再现像质量越高,这为改善 FINCH 技术再现像质量提供了新的实验依据,为 FINCH 技术的进一步应用与发展提供实验基础。

参 考 文 献:

- [1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161 (4098): 777-778.
- [2] Mertz L, Young N O. Fresnel transformations of images[J]. *SPIE Milestone Series MS*, 1996, 128: 44-49.
- [3] Joseph Rosen, Gary Brooker. Digital spatially incoherent Fresnel holography[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(8): 912-914.
- [4] Rosen J, Brooker G. Fresnel incoherent correlation holography (FINCH): A review of research [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2012, 1(3): 151-169.
- [5] Rosen J, Brooker G. Fluorescence incoherent color holography [J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2244-2250.
- [6] Wang Tian, Yu Jia, Yang Yu, et al. Correction method of phase distortion in digital holographic microscopy detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3615-3620. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] Zhao Jie, Wang Dayong, Wang Huaying, et al. Measurement of geometrical parameters of microstructure with digital holography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (s1): 177-180. (in Chinese)
- [9] Gu Huarong. Data compression coding technologies for computer-generated holographic three-dimensional display[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0609001. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] Chen Baoxin. Study on compressive digital in-line holography [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015: 36-43. (in Chinese)
- [12] Bai Yunhe, Zang Ruihuan, Wang Panet, et al. Single-shot incoherent digital holography based on spatial light modulator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(6): 064202. (in Chinese)
- [13] Yamaguchi I. Phase-shifting digital holography [C]//Digital Holography and Three-Dimensional Display Boston, 2006: 145-171.
- [14] Qin W, Yang X, Li Y, et al. Two-step phase-shifting fluorescence incoherent holographic microscopy [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(6): 060503.
- [15] 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.
- [16] Zhao Zhongchao, Yang Xufeng, Xu Tianxu, et al. Point spread function of incoherent digital holography based on spiral phase modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 67 (1): 014203. (in Chinese)
- [17] Xu T, He J, Ren H, et al. Edge contrast enhancement of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) microscopy by spatial light modulator aided spiral phase modulation[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 29207-29215.
- [18] Li Junchang, Song Qinghe, Picart Pascal, et al. Discussion of wavefront reconstruction algorithm of off-axis digital holography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 41 (2): 0209008. (in Chinese)