

# 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究

沈 川 张 成 刘凯峰 韦 穗 程 鸿 张 庆

(安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

**摘要** 基于纯相位空间光调制器的全息显示系统在重构显示时,再现像的视觉效果受到空间光调制器像素结构引起的多级衍射光和多级再现像的干扰。在分析具有有限填充因子空间光调制器的像素结构对再现像影响的基础上,提出了一种提高全息再现像的视觉效果并且再现像成像位置和大小可调节的方法。先加载闪耀光栅到纯相位全息图,其次通过叠加会聚球面波相位,分离再现像与空间光调制器像素结构引起的多级衍射光的聚焦平面的位置,再利用光阑和高通滤波器的共同作用,消除高级衍射光、多级再现像以及零级光干扰对重构视觉效果的影响,最后引入成像透镜,调节再现像的成像位置与大小。建立了一套基于硅基液晶的全息显示系统用于实验验证。实验结果表明,最终的单一再现像清晰且可以方便地调节成像位置和大小。该方法同样适用于各种基于像素结构空间光调制器的全息光学系统。

**关键词** 全息;空间光调制器;纯相位全息图;硅基液晶

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0309001

## Research on Issues about Reconstructed Holographic Image Based on a Pixelated Spatial Light Modulator

Shen Chuan Zhang Cheng Liu Kaifeng Wei Sui Cheng Hong Zhang Qing

(Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)

**Abstract** When utilizing the phase-only spatial light modulator (SLM) for holographic display, the visual impression of reconstructed image is disturbed by multi-order diffraction beams and multi-order reconstructed images because of the pixelated structure of the SLM. After the effects of a pixelated SLM with a limited fill factor on the reconstructed image are analyzed, the method that improves the visual impression of reconstructed image and adjusts the position and size of the image is investigated. Firstly, synthesizing phase-only hologram and digital blazed grating, subsequently adding the phase of the convergent spherical wave, the two focus planes of reconstructed image and the multi-order beams caused by the pixelated structure of the SLM can be separated. Then both the aperture and the high pass filter are used to eliminate the influences of higher diffraction orders, multi-order images and zero order light on the visual impression of reconstructed image simultaneously. Eventually an imaging lens is used to adjust position and size of the reconstructed image. A holographic display system based on liquid crystal on silicon (LCOS) is set up to demonstrate this method. The experimental results show that the final reconstructed image not only has good quality but also has the conveniently adjustable position and size. This method can also be applied to various optical systems based on pixelated SLMs.

**Key words** holography; spatial light modulator; phase-only hologram; liquid crystal on silicon

**OCIS codes** 090.2870; 090.1970; 070.6120; 070.6110; 090.1760

## 1 引 言

近年来,为了满足动态、实时显示要求,结合空

间光调制器(SLM)和计算全息的全息显示技术得到了迅速发展<sup>[1~7]</sup>。液晶空间光调制器(LC-SLM)

**收稿日期**: 2011-08-01; **收到修改稿日期**: 2011-10-31

**基金项目**: 国家自然科学基金(60872106)和安徽大学青年科学研究基金(kjqn1010)资助课题。

**作者简介**: 沈 川(1986—),男,硕士研究生,主要从事全息显示方面的研究。E-mail: shenchuan2502@163.com

**导师简介**: 韦 穗(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事计算视觉与三维全息显示等方面的研究。

E-mail: swei@ahu.edu.cn(通信联系人)

作为一种可编程的液晶显示器件,可以应用于各种需要波阵面控制的场合中。基于衍射理论的全息显示系统可以利用纯相位调制 LC-SLM 加载相位全息图,调制入射光,重构显示二维图像。作为 LC-SLM 的一种,硅基液晶(LCOS)具有高集成度、高分辨率、大的开口率、更小的尺寸、快速响应等优点<sup>[8]</sup>,被越来越多地用于全息光学系统中<sup>[9,10]</sup>。

然而,利用 LCOS 这类像素结构的 SLM(具有有限的填充因子)动态显示全息图,获得高质量的再现像仍然面临着诸多的挑战。全息显示系统的重构平面中包含了 SLM 像素结构引起的多级衍射光以及多级全息再现像的干扰,这对于再现像的成像质量以及视觉效果是不利的。针对以上问题,很多学者开展了相应的研究。Arrizon 等<sup>[11]</sup>分析了具有有限填充因子的 SLM 的衍射效率问题。Agour 等<sup>[12]</sup>提出通过设置  $4f$  系统,在频域进行滤波处理消除高级衍射光的影响,改善再现像的视觉效果。Palima 等<sup>[13]</sup>提出当采用有限填充因子的 SLM 进行全息重构时,可以引入一个修正光与光轴上的零级光相互干涉,此方法能够抑制零级光的影响。Christmas 等<sup>[14]</sup>分离全息再现像与零级光的聚焦位置,再通过滤波消除零级光的干扰。Zhang 等<sup>[15]</sup>在此基础上通过加载发散球面波相位和线性相位的组合到纯相位全息图上,在全息再现时消除零级光的影响。以上研究者的工作在消除高级衍射光和零级光对再现像干扰等方面做出了有益的尝试。考虑到实际全息再现时往往需要调节再现像的位置和大小,本文在现有方法的基础上,提出了消除 SLM 像素结构引起的多级衍射光以及多级全息再现像干扰的方法,同时可以方便地调节再现像的位置和大小,并建立了一套全息显示系统用于实验验证。

## 2 纯相位 SLM 的成像分析

本文研究的全息显示系统是利用纯相位 SLM 加载相位全息图,实现对入射光的调制,重构显示二维图像。考虑具有有限填充因子的纯相位 SLM,其单个像素结构为正方形,几何结构如图 1 所示,像素数为  $M \times M$ ,像素间距为  $\Delta d$ ,其中像素活动区的边长为  $d$ ,则 SLM 的透射率函数可以表示为<sup>[16]</sup>

$$t(x,y) = a(x,y) \left\{ \text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \otimes q(x,y) + \left[ \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta d}, \frac{y}{\Delta d}\right) - \text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \right] \otimes p(x,y) \right\}, \quad (1)$$

式中  $\text{rect}$  为矩形函数,

$$a(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x}{M\Delta d}, \frac{y}{M\Delta d}\right) = \text{rect}\left(\frac{x}{M\Delta d}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{M\Delta d}\right),$$

$$q(x,y) = \exp(i\varphi) \sum_{m,n=0}^{M-1} \delta(x - m\Delta d, y - n\Delta d),$$

$$p(x,y) = \exp(i\varphi_c) \sum_{m,n=0}^{M-1} \delta(x - m\Delta d, y - n\Delta d),$$

$a(x,y)$  为 SLM 的孔径函数,  $\varphi$  为加载到 SLM 的活动区的相位分布,  $\varphi_c$  为 SLM 的非活动区(死区)引起的常量相位偏移,  $\otimes$  表示卷积运算。

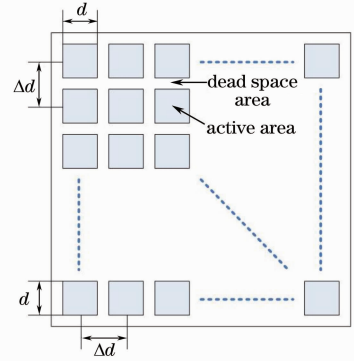


图 1 SLM 的像素结构图

Fig. 1 Structure of pixelated SLM

当全息显示系统重构显示时,重构平面的复振幅分布  $T(u,v)$  是 SLM 的透射率函数  $t(x,y)$  的傅里叶变换,可表示为

$$T(u,v) = \mathcal{F}\{t(x,y)\} = A(u,v) \otimes \{d^2 \text{sinc}(ud, vd) Q(u,v) + [\Delta d^2 \text{sinc}(u\Delta d, v\Delta d) - d^2 \text{sinc}(ud, vd)] P(u,v)\}, \quad (2)$$

式中

$$A(u,v) = \mathcal{F}\{a(x,y)\},$$

$$\text{sinc}(u,v) = \frac{\sin(\pi u)}{\pi u} \frac{\sin(\pi v)}{\pi v},$$

$$Q(u,v) = \mathcal{F}\{\exp(i\varphi)\} \otimes \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \delta\left(u - \frac{m}{\Delta d}, v - \frac{n}{\Delta d}\right),$$

$$P(u,v) = \mathcal{F}\{\exp(i\varphi_c)\} \otimes \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \delta\left(u - \frac{m}{\Delta d}, v - \frac{n}{\Delta d}\right),$$

式中  $\mathcal{F}\{\}$  表示傅里叶变换,二维函数  $Q(u,v)$  表示经过采样的相位全息图的傅里叶变换,  $P(u,v)$  表示采样间隔为  $\Delta d$  的离散结构 SLM 的傅里叶变换。当  $u=v=0$  时,复振幅分布  $T(u,v)$  可表示为

$$T(0,0) = d^2 Q(0,0) + (\Delta d^2 - d^2) P(0,0) = [\mu Q(0,0) + (1 - \mu) P(0,0)] / \Delta d^2, \quad (3)$$

式中  $\mu = (d/\Delta d)^2$  表示 SLM 的填充率 ( $\mu <$

100%)。由(3)式可知,  $T(0,0)$  中的第一项为全息图再现像的零频部分, 第二项是由像素结构 SLM 自身非活动区(死区)引起的零级光。

### 3 高衍射级光及零级光干扰的消除

#### 3.1 相位全息图的预处理

当全息再现时, 在重构平面上可以观察到衍射图样。由第 2 部分的分析可知: 重构平面的衍射图样由两部分组成, 第一部分是像素化 SLM 本身的二维光栅结构所引起的多级衍射光, 第二部分是相位全息图所对应的多级再现像, 各级再现像位于第一部分中各相邻干涉级极大之间。此时在零级和一级干涉极大位置之间, 产生 4 个亮度最大, 大小相同的一级再现像(见后续实验研究), 而全息再现时希望得到一个亮度最大的单一衍射再现像, 所以对相位全息图进行预处理, 加载数字闪耀光栅到纯相位全息图, 使零级和一级干涉极大位置之间的再现像位置发生偏移, 其中心与零级干涉极大位置重合<sup>[17]</sup>。二维数字闪耀光栅的表达式为

$$\varphi_{bg}(m, n) = \frac{2\pi}{T} \text{mod}(bm + cn, T), \quad (4)$$

式中  $\text{mod}$  表示取余运算,  $-M/2 \leq m \leq M/2 - 1$ ,  $-M/2 \leq n \leq M/2 - 1$ ,  $T$  为数字闪耀光栅的周期。不同的  $b, c$  值对应不同方向的数字闪耀光栅。此时加载到 SLM 上的相位分布为

$$\varphi' = \text{mod}(\varphi + \varphi_{bg}, 2\pi). \quad (5)$$

#### 3.2 多级衍射光和多级再现像干扰的消除

常见的全息显示系统(SLM 采用反射型 LCOS)示意图如图 2(a)所示, 其中 LCOS 与透镜  $L_1$  之间的距离为  $z$ , 透镜  $L_1$  的焦距为  $f_1$ 。当全息显示系统重构显示时, LCOS 自身像素结构引起的多级衍射光与相位全息图对应的多级再现像都聚焦在透镜  $L_1$  的后焦面。为了消除 LCOS 像素结构引起的零级光的影响, Christmas 等<sup>[14]</sup> 提出在相位全息图上叠加发散球面相位的方法分离两者的聚焦位置。如图 2(b)所示, 将发散球面波相位信息  $\phi_{ds}$  叠加到全息图的相位分布上, 相位  $\phi_{ds}$  的表达式为

$$\phi_{ds}(x, y) = -\frac{k}{2r}(x^2 + y^2), \quad (6)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长,  $r$  为发散球面波的半径。

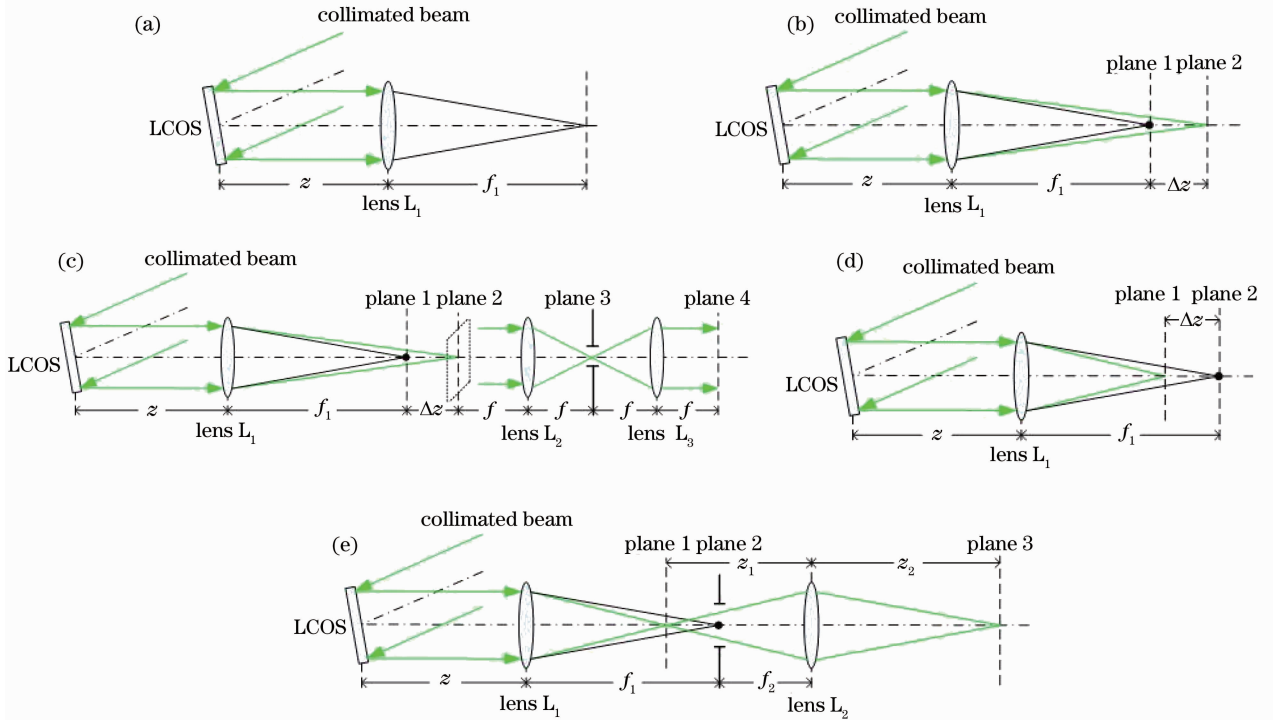


图 2 光学示意图。(a)原先的全息显示系统;(b)发散球面波相位;(c)发散球面波相位+4f 系统;(d)会聚球面波相位;(e)提出的全息显示系统

Fig. 2 Optical arrangement diagram. (a) Original holographic display system; (b) with adding the phase of divergent spherical wave; (c) with adding the phase of divergent spherical wave +4f system; (d) with adding the phase of convergent spherical wave; (e) proposed holographic display system

发散球面波相位仅作用于 LCOS 的活动区, 由第 2 部分的分析可知, 当全息再现时, 多级衍射光 (包括零级光) 的聚焦位置保持不变, 仍然位于透镜  $L_1$  的后焦面, 即平面 1 处, 而多级再现像的聚焦位置后移至平面 2 处, 通过在平面 1 处设置高通滤波器可以滤除 LCOS 像素结构引起的零级光的影响。根据透镜的成像公式, 平面 1 与平面 2 之间的距离  $\Delta z$  可表示为

$$\Delta z = \frac{(r+z)f_1}{r+z-f_1}. \quad (7)$$

在消除了 LCOS 像素结构引起的零级光后, 尽管透镜  $L_1$  的尺寸限制了高级衍射光和高级再现像的通过, 但重构平面的衍射图样仍然包括 LCOS 像素结构引起的次高级衍射光和相位全息图对应的次高级再现像, 为了消除它们的影响, 可以采用  $4f$  系统 (透镜  $L_2$  和透镜  $L_3$  的尺寸固定) 通过频域滤波的方法来实现<sup>[12]</sup>。系统示意图如图 2(c) 所示, 透镜  $L_2$  和透镜  $L_3$  的焦距都为  $f$ , 构成  $4f$  系统, 最终在平面 4 处可以得到单一的亮度最大的全息再现像。

图 2(c) 所示的全息显示系统综合了目前已有的消除高级衍射光和零级光的方法, 可以实现单一全息再现像的显示, 但是该全息显示系统在单一方向上的物理长度过长, 且所采用的器件数量较多, 对于光路的搭建提出了更高的要求。针对系统在单一方向上物理长度过长的问题, 本文提出可以通过叠加会聚球面波相位到纯相位全息图上的方法, 使再现像的聚焦位置前移, 如图 2(d) 所示, 从而改善这一问题。对于反射型 LCOS, 会聚球面波相位  $\phi_{cs}$  为

$$\phi_{cs}(x, y) = \frac{k}{2r}(x^2 + y^2). \quad (8)$$

透镜  $L_1$  的焦距为  $f_1$ , 此时加载到 LCOS 上的相位分布为  $\varphi_{\text{final}} = \varphi' + \phi_{cs}$ , 会聚球面波相位也仅作用于 LCOS 的活动区域, 当全息显示时, 多级再现像聚焦在平面 1, LCOS 像素结构引起的多级衍射光仍然聚焦在透镜  $L_1$  的后焦面, 即平面 2 处, 此时平面 1 位于平面 2 前方  $\Delta z$  处,  $\Delta z$  的表达式为

$$\Delta z = \frac{(r-z)f_1}{r-z-f_1}. \quad (9)$$

在平面 2 处设置高通滤波器, 即可滤除 LCOS 像素结构引起的零级光。

同样,  $4f$  系统增加了全息显示系统在单一方向上的物理长度, 同时其所需器件较多, 实现较复杂。本文采用空间域滤波的方法解决了这一问题, 搭建了一个新的基于反射型 LCOS 的全息显示系统, 如图 2(e) 所示。在平面 2 处设置光阑, 直接滤除

LCOS 像素结构引起的次高级衍射光和相位全息图对应的次高级再现像 (透镜  $L_1$  的尺寸固定)。图 2(e) 中透镜  $L_2$  的引入, 是为了调节再现像的成像位置和大小。根据透镜的几何成像公式

$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{f_2}, \quad (10)$$

式中  $f_2$  为透镜  $L_2$  的焦距,  $z_1$  为物距,  $z_2$  为像距, 则可以在距离透镜  $L_2$  后的  $z_2$  位置即平面 3 处观察到清晰的再现像。通过改变透镜  $L_2$  的位置, 可以在不同成像位置获得不同放大率的清晰再现像。为了得到放大的实像, 设定  $f_2 < z_1 < 2f_2$ , 相对于平面 1 处的再现像, 放大率为  $z_2/z_1$ 。

相比于图 2(c) 所示的系统, 图 2(e) 所示的全息显示系统在实现了单一全息再现像显示的同时, 系统单一方向上的物理长度更短, 所采用的器件数量更少, 且可以方便地调节全息再现像的大小。

## 4 实验结果

根据图 2(e) 所示的原理图搭建了一套基于 LCOS 的全息显示系统用于验证本文提出的方法。系统装置图如图 3 所示, 1 为半导体绿光激光器, 波长为 532.8 nm, 2 为空间滤波器, 3 为准直透镜, 4 为 LCOS 及其驱动电路, 5 为透镜  $L_1$ , 6 为高通滤波器和光阑, 7 为透镜  $L_2$ 。入射激光经过空间滤波器扩束滤波后, 得到均匀的出射光斑, 光斑经过准直后照射到 LCOS。选用的 LCOS (Three-Five Systems, MD1280) 分辨率为 1280 pixel  $\times$  1024 pixel, 像素间距  $\Delta d$  为 12  $\mu\text{m}$ , 填充率  $\mu$  约为 87%。透镜  $L_1$  的焦距  $f_1$  为 500 mm, 直径  $D_1$  为 100 mm, 透镜  $L_2$  的焦距  $f_2$  为 300 mm, 直径  $D_2$  为 50 mm, LCOS 与透镜  $L_1$  的距离  $z$  为 350 mm, 高通滤波器中用于滤除零级光的圆形黑纸片的直径为 2 mm, 光阑的尺寸约为 18 mm  $\times$  16 mm。

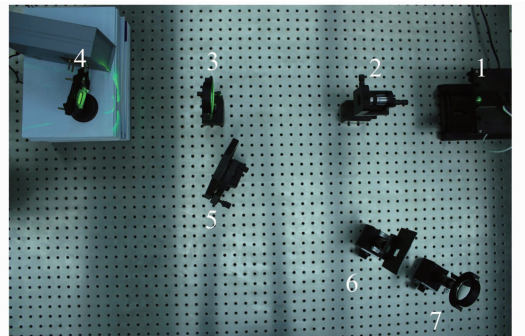


图 3 基于 LCOS 的全息显示系统

Fig. 3 Holographic display system based on LCOS



实验中的纯相位全息图是采用迭代傅里叶变换算法(IFTA)<sup>[18]</sup>计算的结果,采用图2(a)所示的全息显示系统重构显示二维图像,当加载到LCOS上的相位分布为 $\varphi$ 时结果如图4(a)所示,可以观察到明显的多级衍射图样,与3.1节的论述相一致,图中的亮点为LCOS像素结构引起的各级干涉极大值,其中重构平面正中央的零级光亮度最大。因为全息再现像能量受到单缝衍射图样的调制,零级干涉极大和一级干涉极大位置之间的4个相同的一级再现像亮度最大,其他各级全息再现像的亮度依次减弱,且一级再现像自身越靠近零级光的部分能量越大。实际显示时希望得到单一的亮度大且能量分布比较均匀的全息再现像,因此加载数字闪耀光栅(参数 $b=1, c=1, T=2$  pixel), LCOS上的相位分布变为 $\varphi'$ ,此时的重构显示结果如图4(b)所示。重构平面中央的单个全息再现像亮度最大且能量分布比较均匀,但重构平面中仍然存在LCOS像素结构引起的

次高级衍射光、零级光和相位全息图对应的次高级再现像。为了消除它们的影响,采用图3所示的系统,叠加会聚球面相位(球面波的半径 $r=1000$  mm)到全息图上,即加载到LCOS上的相位分布为 $\varphi_{\text{final}}$ ,使多级再现像与LCOS像素结构引起的多级衍射光的聚焦位置分离,在透镜 $L_1$ 的后焦面放置高通滤波器以消除零级光的影响。与此同时,放置光阑在透镜 $L_1$ 的后焦面处,滤除次高级衍射级光和次高级全息再现像的干扰。这样,通过高通滤波器和光阑的共同作用,达到了保留重构平面正中央亮度最大且能量分布比较均匀的单一全息再现像的目的。改变透镜 $L_2$ 的位置,实验中选取 $z_1$ 分别为450 mm和410 mm,在 $z_2$ 为900 mm和1120 mm处得到的单一再现像分别为如图4(c)和(d)所示,放大倍数分别约为2倍和2.7倍。通过分析比较,最终的重构显示结果与理论分析相符合。

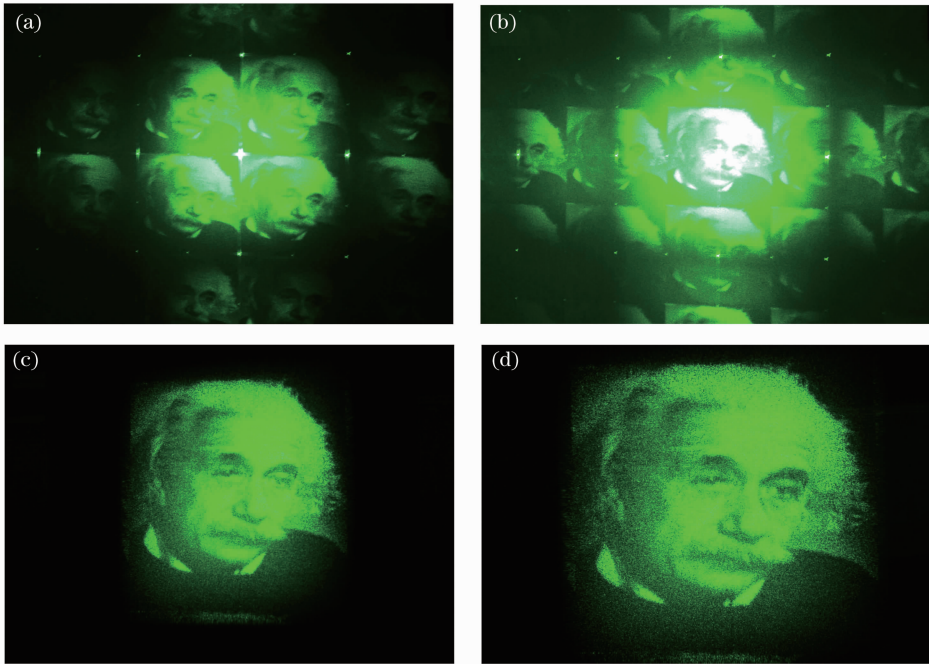


图4 (a)原始相位全息图的再现像;(b)相位全息图加载数字闪耀光栅后的再现像;(c)  $z_1=450$  mm再现像;  
(d)  $z_1=410$  mm再现像

Fig. 4 (a) Reconstructed image of original phase hologram; (b) reconstructed image of phase hologram with adding digital blazed grating; (c) reconstructed image  $z_1=450$  mm; (d) reconstructed image  $z_1=410$  mm

## 5 结 论

针对基于衍射理论的全息显示系统,分析了纯相位SLM的像素结构对重构成像的影响。为了改善全息再现像的视觉效果,提出了消除SLM像素结构引起的多级衍射光以及多级全息再现像干扰的

方法,得到了清晰的单一再现像。考虑到实际显示的需要,引入成像透镜,实现再现像的位置和大小可调节,实验结果表明本文的方法是可行的。此外,本方法同样适用于其他基于各种像素结构SLM的全息光学系统。下一步的工作方向是利用多个

## SLM 实现大视场角的全息显示。

## 参 考 文 献

- 1 M. Stanley, P. B. Conway, S. Coomber *et al.*. A novel electro-optic modulator system for the production of dynamic images from giga-pixel computer generated holograms [C]. *SPIE*, 2000, **3956**: 13~22
- 2 M. L. Huebschman, B. Munjuluri, H. R. Garner. Dynamic holographic 3D image projection [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 437~445
- 3 T. Ito, K. Okano. Color electroholography by three colored reference lights simultaneously incident upon one hologram panel [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(18): 4320~4325
- 4 A. Schwerdtner, R. Haussler, N. Leister. Large holographic displays for real-time applications [C]. *SPIE*, 2008, **6912**: 69120T
- 5 Han Chao, Wei Sui, Liu Kaifeng. Coding of tiling algorithm hologram of Fractional fourier and dynamic display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3299~3303  
韩 超, 韦 穗, 刘凯峰. 分数傅里叶分块算法全息图的编码与动态显示[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3299~3303
- 6 Han Chao, Wei Sui, Quan Xilong *et al.*. Holographic display of digital micromirror device [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 190~194  
韩 超, 韦 穗, 权希龙 等. 数字微镜器件的全息显示 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 190~194
- 7 Zheng Huadong, Dai Linmao, Wang Tao *et al.*. Optoelectronic reconstruction of three-dimensional scene based on multiple fractional-Fourier-transform holograms [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 020901  
郑华东, 代林茂, 王 涛 等. 三维物场多重分数傅里叶变换全息图光电再现实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(2): 020901
- 8 Ge Aiming, Sui Zhan, Xu Keshu. Characteristics of phase-only modulation using a reflective liquid crystal on silicon device [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(10): 2481~2485  
葛爱明, 隋 展, 徐克瑞. 反射型 LCOS 器件纯相位调制特性的研究 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(10): 2481~2485
- 9 A. J. Cable, E. Buckley, P. Mash *et al.*. Real-time binary hologram generation for high-quality video projection applications [J]. *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 2004, **35**(2): 1431~1433
- 10 M. Reichert, S. Zwick, T. Haist *et al.*. Fast digital hologram generation and adaptive force measurement in liquid-crystal-display-based holographic tweezers [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(5): 888~896
- 11 V. Arrizon, E. Carreon, M. Testorf. Implementation of Fourier array illuminators using pixelated SLM: efficiency limitations [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **160**(4-6): 207~213
- 12 M. Agour, E. Kolenovic, C. Falldorf *et al.*. Suppression of higher diffraction orders and intensity improvement of optically reconstructed holograms from a spatial light modulator [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(10): 105405
- 13 D. Palima, V. R. Daria. Holographic projection of arbitrary light patterns with a suppressed zero-order beam [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(20): 4197~4201
- 14 J. Christmas, N. Collings, A. Georgiou. Blocking Zero-Order in Phase Shift Hologram Generation [P]. UK Patent GB2438458, 2007-11-28
- 15 Hao Zhang, Jinghui Xie, Juan Liu *et al.*. Elimination of a zero-order beam induced by a pixelated spatial light modulator for holographic projection [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(30): 5834~5841
- 16 D. Palima, V. R. Daria. Effect of spurious diffraction orders in arbitrary multifoci patterns produced via phase-only holograms [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(26): 6689~6693
- 17 Yu Yingjie, Wang Tao, Zheng Huadong. Optimization of optoelectronic reconstruction of phase hologram by use of digital blazed grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3154~3160  
于瀛洁, 王 涛, 郑华东. 基于数字闪耀光栅的位相全息图光电再现优化 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(5): 3154~3160
- 18 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, **35**: 237~246

栏目编辑:何卓铭