第 43 卷 第 19 期/2023 年 10 月/光学学报 研究论文

光学学报

再现域模型相位补偿法提高液晶空间光调制器全息再现像质量研究

胡驰[1]，张锦[1*]，孙国斌[1]，蒋世磊[1]，刘严严[2]

[1]西安工业大学光电工程学院，陕西 西安 710021；

[2]电磁空间安全全国重点实验室，天津 300308

摘要 针对液晶空间光调制器(LC-SLM)全息再现结果受零级衍射光斑和本身黑栅效应影响，导致再现像光能利用率低和均匀性较差的问题，本文提出一种利用数字闪耀光栅对再现像进行偏离并结合全息再现域模型的相位补偿法，有效提高了再现像的均匀性。其主要原理为：在设计的相位全息图上加载一定周期的数字闪耀光栅后，根据再现区域的光强分布情况反推出补偿量，并将其和原物光波进行合成，重新计算相位全息图实现对再现结果的调整，在避免了零级衍射光斑影响的同时，提高了全息像的再现效果。通过对相位补偿量进行优化计算和仿真验证，并搭建全息再现光路，将补偿计算后的相位加载到空间光调制器(SLM)上进行再现实验验证和测试，实验结果表明，补偿后的再现像均匀性提高为原来的2倍，且光能利用率也有一定的提高。研究结果表明，本文所提出的再现域模型相位补偿法能有效提高SLM全息再现像的均匀性和光能利用率。因此该方法对基于SLM的全息再现或光场调控质量的提高具有一定的应用价值。

关键词 全息；液晶空间光调制器；全息再现；再现域；相位补偿

中图分类号 O438.1；O436.1 **文献标志码** A **DOI**：10.3788/AOS230527

1 引 言

随着空间光调制器(SLM)的不断发展，无论是光场调控[1-2]、光束整形[3-4]、光束偏转[5-6]，还是全息再现[7-9]，对其的应用十分广泛，其优势无与伦比；但自身由于受工艺条件的限制，也有多处缺陷，如零级光斑和多级衍射像的存在会对输出光场结果的质量带来一定影响。因此，近年来，国内外许多学者为了提高再现像的质量，对其展开了研究，王迪等[10]提出了一种抑制斑点噪声的全息显示方法，在计算重建图像的有效观察区域内，通过像素分离将对象点分成组，可以有效降低斑点噪声显示重建图像。何晨等[11]基于U-Net神经网络实现了对再现像的强度增强。王君等[12]提出了一种自适应加权GS算法，用来近似二次相位以抑制再现像中的伪像。

对于利用液晶空间光调制器(LC-SLM)进行全息再现时，由于衍射像的光能利用率低、均匀性差等问题，在设计全息图时，为了提高衍射像的能量，对其叠加数字闪耀光栅[13]，合理控制闪耀条件会将再现像的位置移动到衍射场的中央，极大地提高再现像的光能利用率。但是零级光斑会在再现结果的中央位置严重干扰结果的质量。

因此，本文针对此问题展开研究，为了得到在没有零级光斑的情况下，均匀性和光能利用率高的全息再现结果，提出了再现域模型相位补偿法，对全息图加载一定周期的数字闪耀光栅，根据全息再现结果再现域的能量分布，逆推出补偿量，将其和原物光波进行合成，重新计算相位全息图，这样既保证了没有零级光斑的影响，又保证了衍射像高的光能利用率和均匀性等优势，并用实验验证了此方法的可行性。用此方法设计的相位结构的再现结果相比于原始相位结构的再现结果的均匀性提高了2倍，且光能利用率也有所提高。该方法为利用LC-SLM进行全息再现时改善再现结果的质量提供了理论参考。

2 再现域模型相位补偿法基本原理

2.1 菲涅耳全息图计算原理

如图1所示，设$O(x,y)$、$R(x,y)$分别表示物光波和参考光波。在菲涅耳衍射区，全息面复振幅分布[14]可表示为

收稿日期：2023-02-07；**修回日期**：2023-03-04；**录用日期**：2023-03-21；**网络首发日期**：2023-05-08

基金项目：陕西省教育厅重点实验室科研计划(18JS053)、陕西省科技厅重点实验室项目(2013SZS14-P01)、装备预研重点实验室基金(2021JCJQLB055018)

通信作者：*zhangjin@xatu.edu.cn

$$U(\xi,\zeta)=\frac{\exp(\mathrm{j}kd)}{\mathrm{j}\lambda d}\iint O(x,y)R(x,y)\exp\left\{\frac{\mathrm{j}k}{2d}\left[(\xi-x)^2+(\zeta-y)^2\right]\right\}\mathrm{d}x\mathrm{d}y,\tag{1}$$

式中，波矢 $k=2\pi/\lambda$。对式(1)进行离散处理后，设全息面像素总数为 $M\times N$，Δx、Δy 分别为物面分辨率，$\Delta\xi$、$\Delta\zeta$ 分别为全息面的分辨率，令 $m\Delta\xi=\xi$、$n\Delta\zeta=\zeta$、$s\Delta x=x$、$t\Delta y=y$，其中，$m=1,2,3,\cdots,M$、$n=1,2,3,\cdots,N$、$s=1,2,3,\cdots,M$、$t=1,2,3,\cdots,N$。则全息面的复振幅的离散化表达式为

$$U(m,n)=\frac{\exp(\mathrm{j}kd)}{\mathrm{j}\lambda d}\exp\left[\frac{\mathrm{j}k}{2d}\left(m^2\Delta\xi^2+n^2\Delta\zeta^2\right)\right]\times\sum_{s=1}^{M}\sum_{t=1}^{N}O(s,t)R(s,t)\exp\left[\frac{\mathrm{j}k}{2d}\left(s^2\Delta x^2+t^2\Delta y^2\right)\right]\exp\left[-\frac{\mathrm{j}k}{d}\left(m\Delta\xi\cdot s\Delta x+n\Delta\zeta\cdot t\Delta y\right)\right]。\tag{2}$$

令物面采样间隔 $\Delta x=\frac{\lambda d}{M\Delta\xi}$，且 $\Delta y=\frac{\lambda d}{N\Delta\zeta}$，则式(2)可以写为

$$U(m,n)=\frac{\exp(\mathrm{j}kd)}{\mathrm{j}\lambda d}\exp\left[\frac{\mathrm{j}\pi}{\lambda d}\left(m^2\Delta\xi^2+n^2\Delta\zeta^2\right)\right]\times\sum_{s=1}^{M}\sum_{t=1}^{N}O(s,t)R(s,t)\exp\left[\mathrm{j}\pi\lambda d\left(\frac{s^2}{M^2\Delta\xi^2}+\frac{t^2}{N^2\Delta\zeta^2}\right)\right]\exp\left[-\mathrm{j}2\pi\left(\frac{ms}{M}+\frac{nt}{N}\right)\right]。\tag{3}$$

令 $C_1=\frac{\exp(\mathrm{j}kd)}{\mathrm{j}\lambda d}\exp\left[\frac{\mathrm{j}\pi}{\lambda d}\left(m^2\Delta\xi^2+n^2\Delta\zeta^2\right)\right]$、$C_2=\exp\left[\mathrm{j}\pi\lambda d\left(\frac{s^2}{M^2\Delta\xi^2}+\frac{t^2}{N^2\Delta\zeta^2}\right)\right]$，式(3)可以改写为

$$U(m,n)=C_1\cdot\mathscr{F}\left[O(s,t)R(s,t)\cdot C_2\right],\tag{4}$$

式中，$\mathscr{F}$ 为傅里叶变换。

因此，全息图的相位可表示为 $\varphi(m,n)=\arg\left[U(m,n)\right]$，在SLM上用灰度图表示所对应 φ 的相位信息。然后运用迭代算法(GS算法[15])在输入面和输出面之间进行多次迭代，求出最优的相位解。

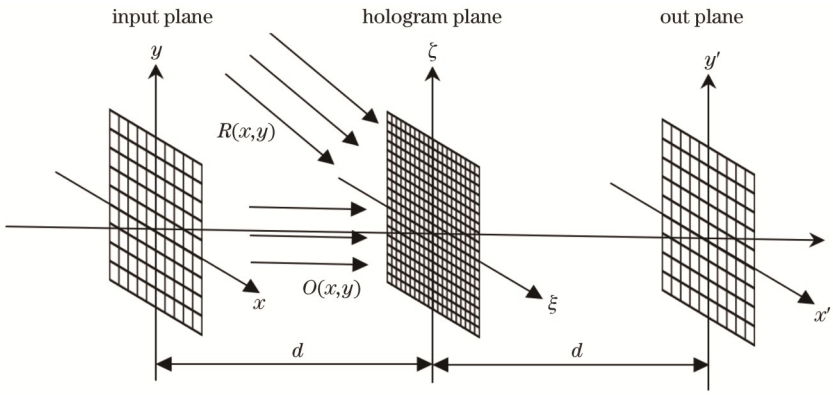

图1 离散全息图记录和再现空间坐标关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spatial coordinate relationship between discrete holographic recording and reproduction

2.2 基于SLM的全息再现

SLM的结构相当于一个二维周期光栅，内部结构如图2所示，SLM的像元为正方形，大小为 $d\times d$，其中只有 $d'\times d'$ 为有效区域，有效区域内液晶可以控制进行相位调制，其余部分为像元间隙，它的构造也就导致会产生零级光斑和多级衍射像，因此把这一现象称为“黑栅效应”。

其光栅衍射图样如图3中单缝衍射包络所示，由像素的有效区域尺寸 d' 决定。取 $\sin\theta/\lambda$ 为横坐标，θ 为衍射角，可得到单缝衍射中央亮区的宽度为 $2/d'$，次级亮纹宽度均为 $1/d'$。由光栅方程可知，干涉极大产生的条件需满足光栅方程[16]：

$$d\sin\theta=m\lambda,\tag{5}$$

式中，d 为光栅的周期(像素尺寸)，仍以 $\sin\theta/\lambda$ 为横坐标可得到干涉极大的位置如图3所示，各级干涉极大位置坐标分别为 m/d，$m=0,\pm1,\pm2,\pm3,\cdots$。

用SLM进行全息再现时，再现的各级衍射像位于各个干涉相邻极大级之间，位置如图3中“太阳”图标所示，坐标为 $m/2d$，$m=\pm1,\pm3,\pm5,\cdots$，并且这些再现像的能量分布受到单缝衍射图样的影响。

2.3 叠加数字闪耀光栅的SLM再现像分析

下面对相位结构叠加闪耀光栅后，SLM的再现像

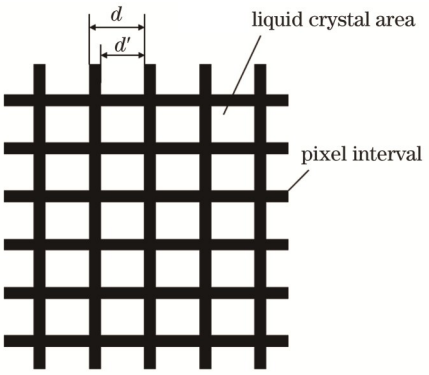

图 2 SLM 像元栅格结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SLM pixel raster structure

位置和能量分布的变化情况进行了分析说明。

在全息图中加入数字闪耀光栅后，再现像偏移的角度 θ 与全息图的最小特征尺寸（SLM 像元）d 和像素数 T 的关系为

$$\frac{\sin\theta}{\lambda}=\frac{1}{dT}。\tag{6}$$

因此可得到离散化的二维数字闪耀光栅的相位结构表达式为

$$\varphi_1(m,n)=\frac{2\pi}{T}\mathrm{mod}(am+bn,T),\tag{7}$$

式中：全息面像素总数为 $M\times N$，其中 $m=1,2,3,\cdots,M$、$n=1,2,3,\cdots,N$；T 为数字闪耀光栅对应的像素数；mod( )为取余函数；$a=1$、$b=0$ 为竖直槽向的数字闪耀光栅，$a=0$、$b=1$ 为水平槽向的数字闪耀光栅。将计算的相位结构 $\varphi(m,n)$ 和数字闪耀光栅 $\varphi_1(m,n)$ 的相位结构进行叠加再对 2π 进行取余处理就得到全息面的相位分布 φ' 为

$$\varphi'(m,n)=\mathrm{mod}\left[\varphi(m,n)+\varphi_1(m,n),2\pi\right]。\tag{8}$$

如图 4 所示，为 SLM 用于全息再现时多级衍射效

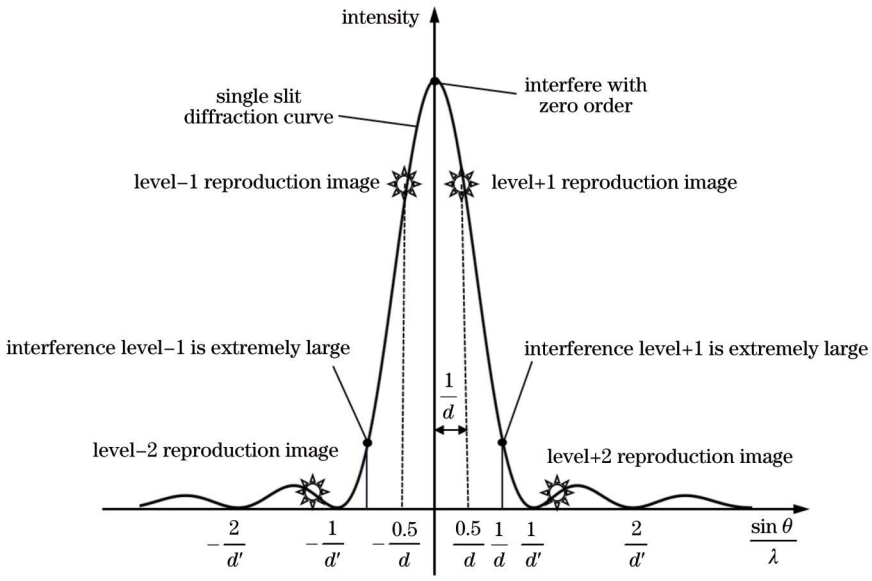

图 3 SLM 全息再现多级衍射效应光强分布图

Fig. 3 Light intensity distribution of multistage diffraction effect in SLM holographic reproduction

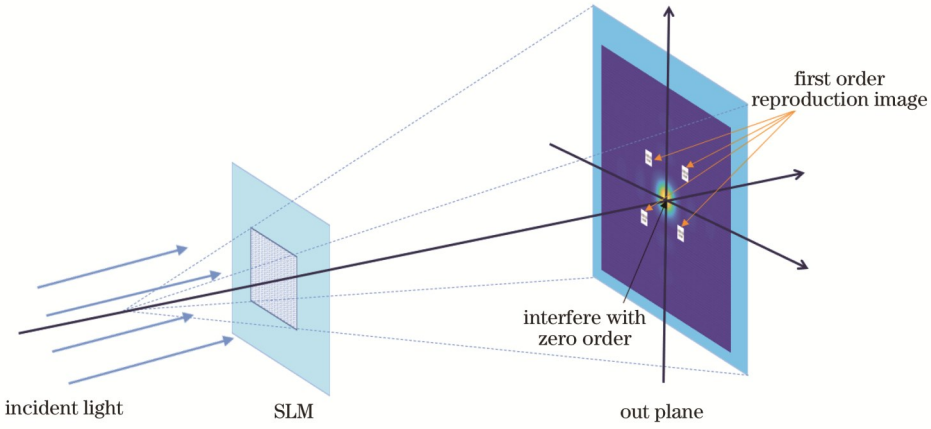

图 4 SLM 用于全息再现多级衍射效应示意图

Fig. 4 Schematic diagram of SLM used for holographic reproduction of multistage diffraction effect

应示意图，在二维情形下，上述的干涉零级就是所谓的零级光斑，其四周有四个相对称的能量较大的再现像可以观察到，其余的再现像能量都较小很难观察清楚。但是再现像的能量分布受着零级光斑和衍射包络的影响，在实际应用中只希望得到一个能量高的像，如图 5 所示，有研究[17]在全息图的基础上叠加一个水平和一个竖直槽向的数字闪耀光栅，把其中的一个像经过两次移动到中央位置干涉零级上，使其充分利用光能。

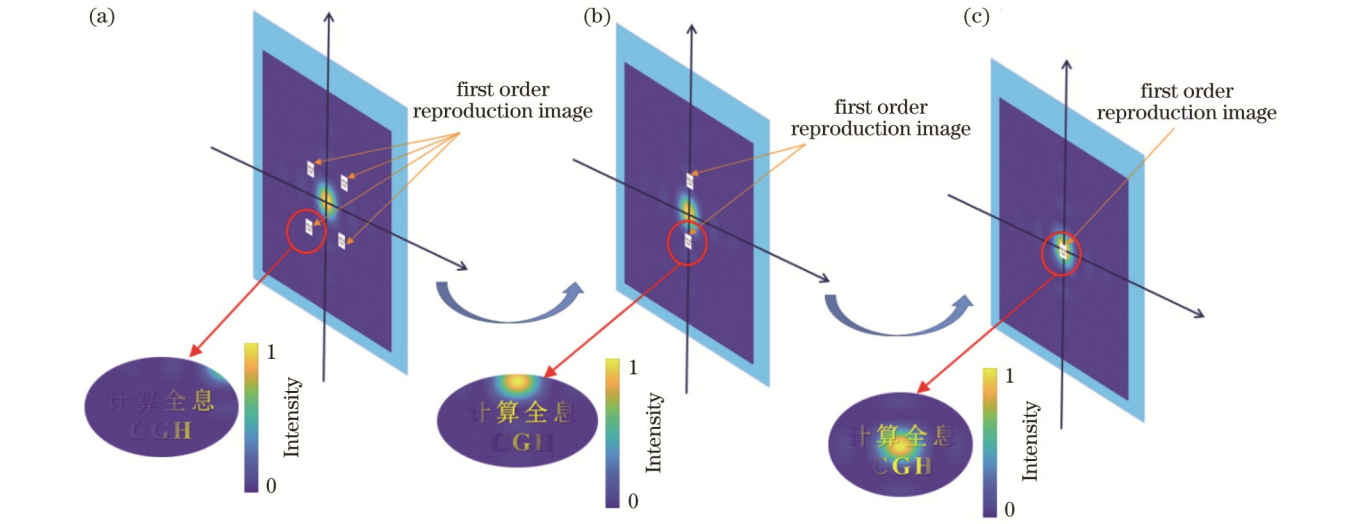

图 5 叠加闪耀光栅后再现像改变示意图。(a)未叠加闪耀光栅的再现像；(b)叠加竖直槽向数字闪耀光栅的再现像；(c)水平竖直槽向均叠加数字闪耀光栅的再现像

Fig. 5 Schematic diagram of reproduced image change after superimposing blazed grating. (a) Reproduced image without blazed grating superimposed; (b) reproduced image superimposed with vertical slot to digital blazed grating; (c) reproduced image superimposed with horizontal and vertical slot to digital blazed gratings

但是由上述研究中的局部放大图可以看出，图 5(c)中存在一个严重的问题，虽然光能得到了充分的利用，但是零级光斑严重影响着再现结果的质量。

2.4 再现域模型相位补偿法原理及计算流程

根据输出面再现像的位置和能量分布情况，对输出面的结果进行分析讨论，目的是既要保证再现像不受零级光斑的影响，又要保证光能利用率和均匀性尽可能地高，在利用数字闪耀光栅的基础上，还要进行补偿处理。

因此，本研究提出利用一个竖直槽向的数字闪耀光栅将任意两个像移动到输出面的中央位置，如图 6 所示，由图 6(a)的未叠加数字闪耀光栅变为图 6(b)的叠加了一个周期为 2 pixel 的竖直槽向的数字闪耀光栅[17]，需要的是在这两个一级再现结果中任意选取一个，从图 6(b)的局部放大图可以看出，由于再现像未在输出面中央，有效地避免了零级光斑对输出结果的影响，但是由于输出面的光强对称性，会造成再现结果的能量分布不均匀。因此，本文在此基础上提出了一种新的方法，再现域模型相位补偿法，即利用输出面再现域内的已知光能分布结果，反算出需要的补偿量，在进行全息图的计算时，进行相位补偿处理，可得到无中央零级光斑、光能利用率高、均匀性高的再现结果。

在上述理论下，对再现域模型相位补偿法进行理论分析计算，具体计算步骤如下：

1)首先确定初始全息计算条件，主要包含再现原图像、再现距离、再现像尺寸大小；

2)根据再现像的大小划定一个包含再现像所有能量分布的一个方形范围称为再现域，如图 7 所示，虚线部分所包含的区域即为再现域；

3)将再现域内的所有值设置为 1，其余设置为 0，进行全息再现计算，将计算的相位结构加载竖直(或水平)槽向的数字闪耀光栅，利用 SLM 再现得到再现结果；

4)得到的再现结果是能量分布不均匀的再现域图样，将得到的图像结果进行拟合归一化处理，得到一个完整的补偿量，为了补偿再现结果的不均匀性对补偿量进行取反；

5)将其取反的结果和原始图像进行合成，得到新的补偿结果，即原始图像，然后再次计算相位全息图，得到的全息图对其再次加载相同参数的数字闪耀光栅，得到的再现像即为光能利用率高、光强分布均匀且没有零级光斑影响的结果。

如图 8 所示，将传统计算全息图的流程和改进后计算全息图的流程进行对比，图 8(a)为原始计算方法，图 8(b)为再现域模型相位补偿法的计算方法，两者的差别即为虚线框出的部分，也就是根据再现域对相位进行补偿处理的部分。

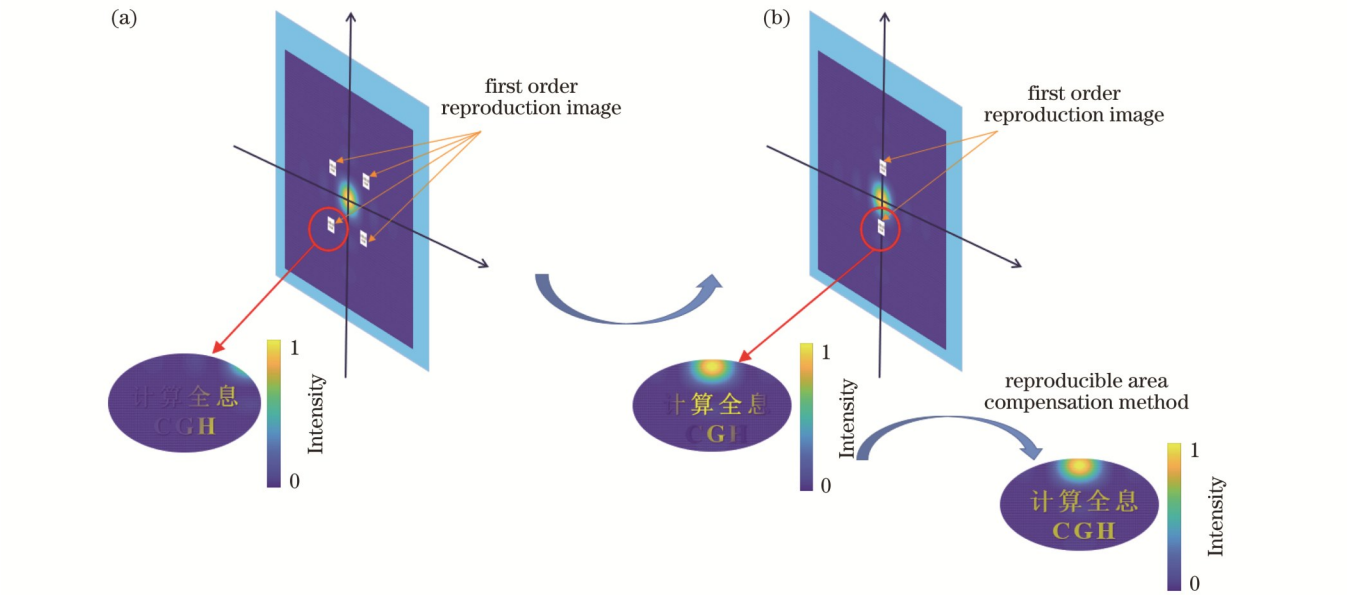

图 6 再现域模型相位补偿法再现像变化示意图。(a)未叠加闪耀光栅的再现像;(b)叠加竖直槽向数字闪耀光栅并补偿的再现像

Fig. 6 Schematic diagram of reproduced image change by phase compensation method of reproduction domain model. (a) Reproduced image without blazed grating superimposed; (b) reproduced image superimposed with vertical slot to digital blazed grating and compensation

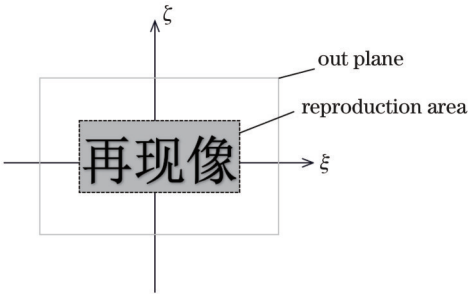

图 7 再现域确定示意图

Fig. 7 Schematic diagram of reproduction domain determination

3 基于SLM的再现域模型相位补偿法仿真计算

3.1 初始条件的确定

采用菲涅耳全息计算原理,将图 9 作为全息再现的原始图像,波长 $\lambda=632.8$ nm,全息面像素总数 $M\times N=512\times512$,再现距离 $d=100$ mm,全息面的分辨率 $\Delta\xi=\Delta\zeta=4.5$ μm,物面分辨率 $\Delta x=\Delta y=0.023$ mm。

3.2 SLM再现域模型相位补偿仿真结果

根据已知的再现像大小,利用再现域模型相位补偿法,确定出再现域如图 10 所示,然后计算出叠加周期为 2 pixel 的竖直槽向数字闪耀光栅对应的全息图,利用 LC-SLM 进行全息再现得到再现域的再现结果如图 11(a)所示,将其进行补偿计算后,得到的再现结果如图 11(b)所示。

根据再现域的再现结果进行补偿量合成,合成过程需要对图 11 的离散数据结果进行取舍、插值、平滑、合成[18-19],得到的结果如图 12(a)所示,取反后的补偿量如图 12(b)所示,按照其结果的光能量分布,很明显地对输出面进行了反向补偿。补偿后的再现域再现结果如图 11(b)所示,可以看出均匀性有很大的提高,为了对一幅图像进行全息再现,将补偿量和原始图像进行合成,为了便于观察合成结果,图 13(b)用三维视图显示出补偿后的结果。

合成后的图 13(a)即为补偿后的再现图,补偿后的再现图也是需重新计算的原物光波,然后再次进行全息图的计算,将得到的结果叠加上周期为 2 pixel 的竖直槽向数字闪耀光栅,即可得到所需的全息图结果。

4 SLM再现像效果的实验验证与评价

为了验证上述理论分析的准确性,利用图 14 所示的全息再现光路进行实验验证,光源由氦氖激光器(波长为 632.8 nm)发出,经过扩束准直系统(BE)后,再经过偏振片(POL),使光具有一定的偏振特性,然后经过分光棱镜(BS)后,垂直入射到 LC-SLM(SLM 为 UpoLabs 公司 HDSLM45R 反射式,分辨率为 1920 pixel×1080 pixel,像元大小为 4.5 μm,填充因子为 91%),反射后经过 BS 和反射镜后再次经过 4f 系统[20]滤波处理后,到达输出面 CCD(分辨率为 4096 pixel×3000 pixel,像元大小为 3.45 μm)上观察记录结果,由于实验中所选取的 CCD 靶面尺寸与再现图像区域大小相匹配,零级光斑没有进入 CCD 中,因此就没有用光阑对零级光斑进行遮挡。

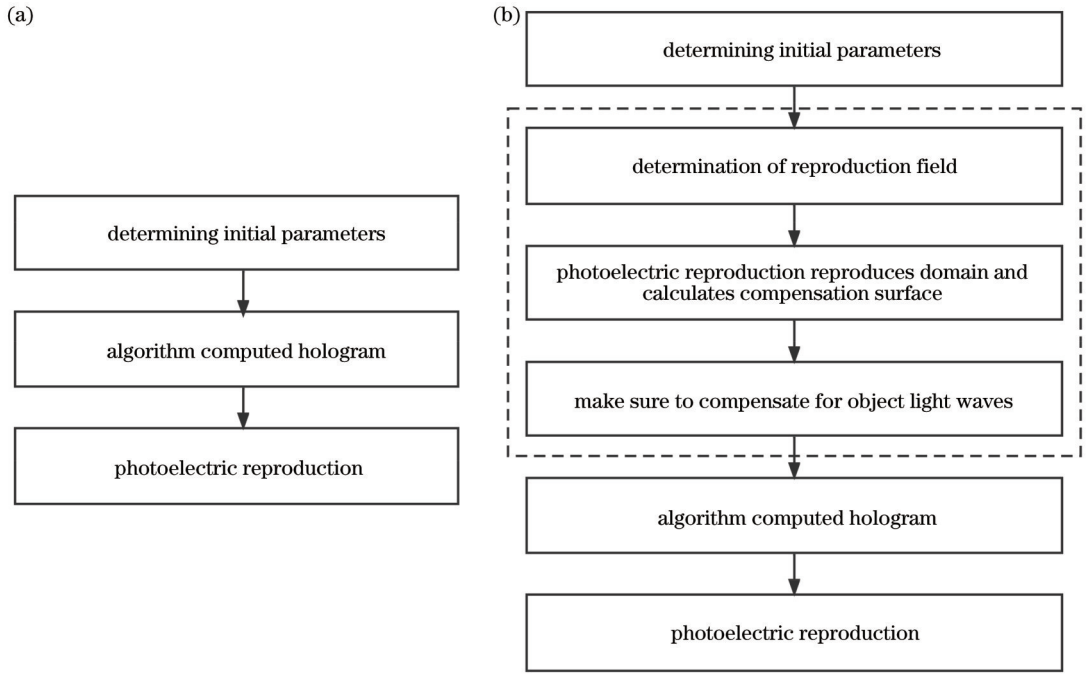

图 8 计算流程图。(a)原始全息计算流程图;(b)再现域模型相位补偿法计算流程图

Fig. 8 Calculation flow chart. (a) Flow chart of original holographic calculation; (b) flow chart of repruduction domain model phase compensation calculation

图 9 原始图像

Fig. 9 Original image

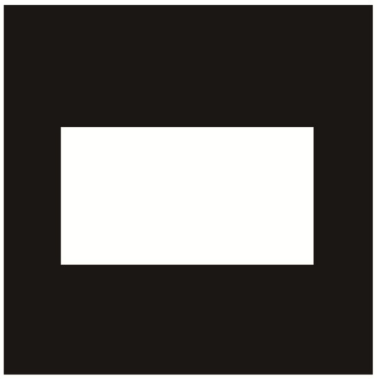

图 10 再现域图像

Fig. 10 Image of reproduction domain

验证传统方法和上述方法两种再现实验结果,如图 15 所示,图 15(a)为传统方法计算出来的全息图,图 15(b)为本文提出方法计算出来的全息图,通过计算机将其加载在 SLM 上进行全息再现,观察再现结果。

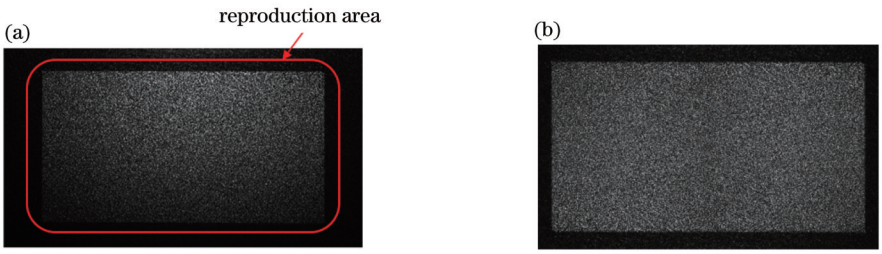

图 11 再现域再现结果及补偿计算后得到的再现结果。(a)再现域的再现结果;(b)补偿计算后得到的再现结果

Fig. 11 Reproduction results of reproduction domain and reproduction results after compensation calculation. (a) Reproduction results of reproduction domain; (b) reproduction results after compensation calculation

在用 CCD 进行观察时,需要合理地控制其曝光量,因为当曝光量达到饱和时,结果的均匀性是体现不出来的,因此本实验结果对多组不同的曝光量下的再现结果都进行了测量。图 16 为在曝光量未达到饱和

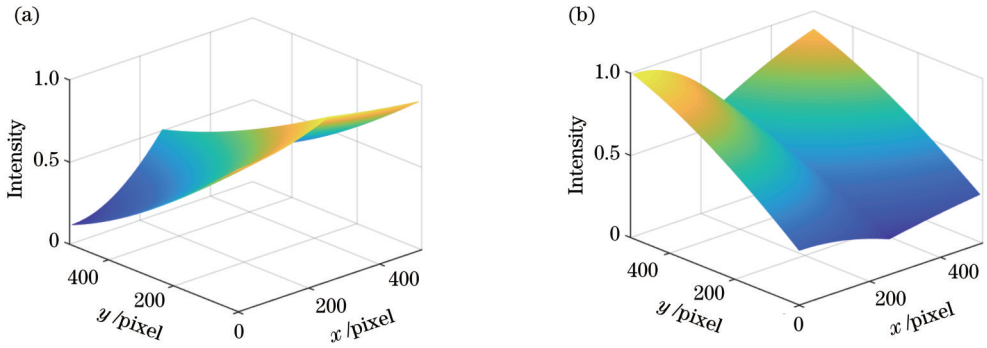

图 12 逆推出归一化补偿量。(a)原始补偿量;(b)取反后补偿量

Fig. 12 Inverse derivation of normalized compensation amount. (a) Original compensation amount; (b) compensation amount after inversion

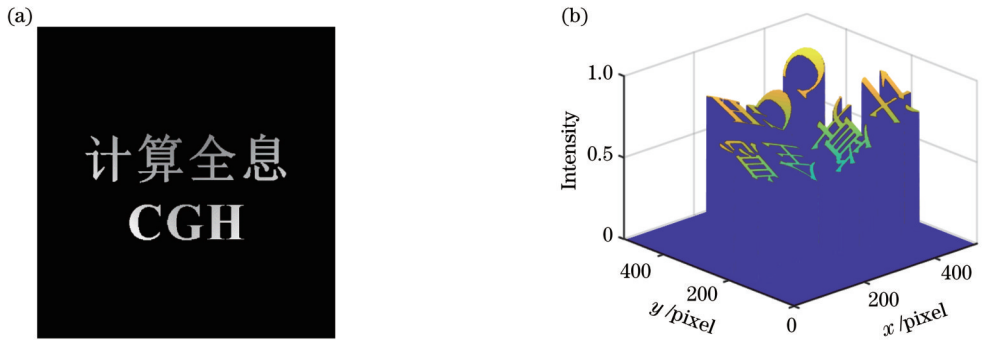

图 13 补偿后的再现图。(a)补偿后的再现图;(b)补偿后的三维再现图

Fig. 13 Reproduction image after compensation. (a) Diagram of reproduced image after compensation; (b) diagram of 3D reproduced image after compensation

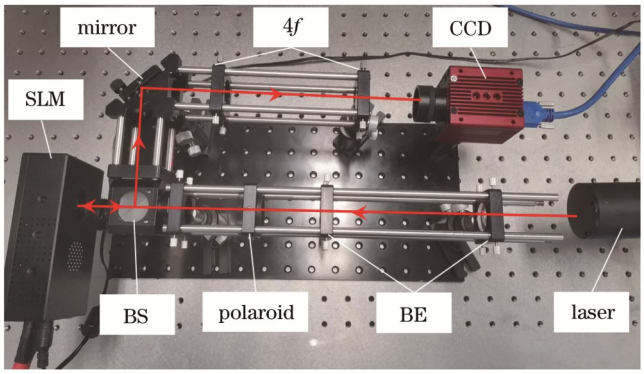

图 14 全息实验验证光路

Fig. 14 Optical path of holographic experiment for verification

阈值下,曝光量分别为 900～3000(lx·s)之间记录的再现结果,通过对比未改进和改进后的结果可以发现,改进后的全息再现像,无论位于中心区域的还是在边角处,“计算全息”和“CGH”几个字符各笔画的亮度的一致性都有了很大的提高,相比于改进前中心区域比边角区域亮度高的特点,再现像的光能量分布均匀性有了很大改善。不仅能量分布更均匀,且光能利用率也有所增加。

目前,国际标准组织未对全息再现像的质量评估进行统一的度量。但是大部分常以对图像的衡量方法为准[21-23]。为评价模拟计算全息再现像的质量,常用峰值信噪比(PSNR)和均方根误差(RMSE)两种客观评价指标来衡量。由于本文是采用 LC-SLM 进行全息再现实验,并采用相机拍摄记录再现像,并对图像进行灰度处理及计算。为表述更通俗易懂,在此基础上将其定义为“有效图形区域”内的光能量分布均匀性(LEH)和光能利用率(η_e)。“有效图形区域”是指输出面内能量应该聚集的区域,对应于本文的实例,如图 16 所示,具体为“计算全息”和“CGH”所有笔画所在的区域。理想情况下,所有光能量都应该聚集在有效图形区域,该区域之外能量为零。然而,通常情况下,由于全息再现像存在噪声,导致再现像的质量降低。光能利用率是指输出面内集中在有效图形区域内的光能量与入射光能量的比值,即全息再现像“计算全息”和“CGH”所有笔画位置聚集的光能量总和与入射光能量的比值。同样地,LEH 限定为输出面有效图形区域内的 LEH,对应于本文实例,体现为“计算全息”和“CGH”各笔画亮度的一致性或均匀性,对于有效图形区域而言,为了得到其对应的图像能量信息,采用阈值分割法对其进行处理,可得到与之对应的有用信息,代入式(9)进行计算即可。LEH 和 η_e 的具体计算公式为

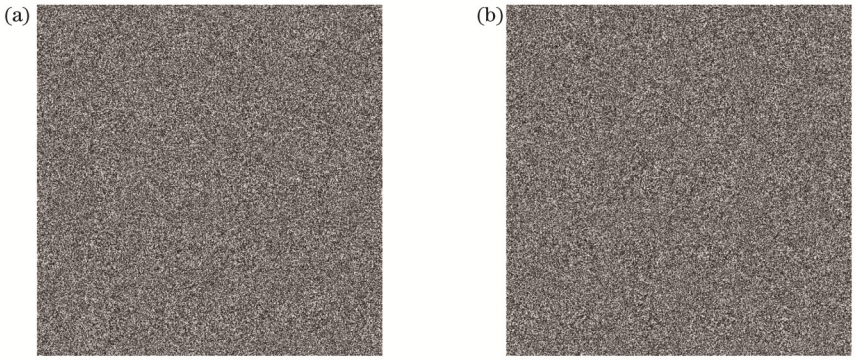

图 15 菲涅耳衍射相位全息图。(a)未补偿的相位全息图;(b)补偿后的相位全息图

Fig. 15 Fresnel diffraction phase hologram. (a) Uncompensated phase hologram; (b) compensated phase hologram

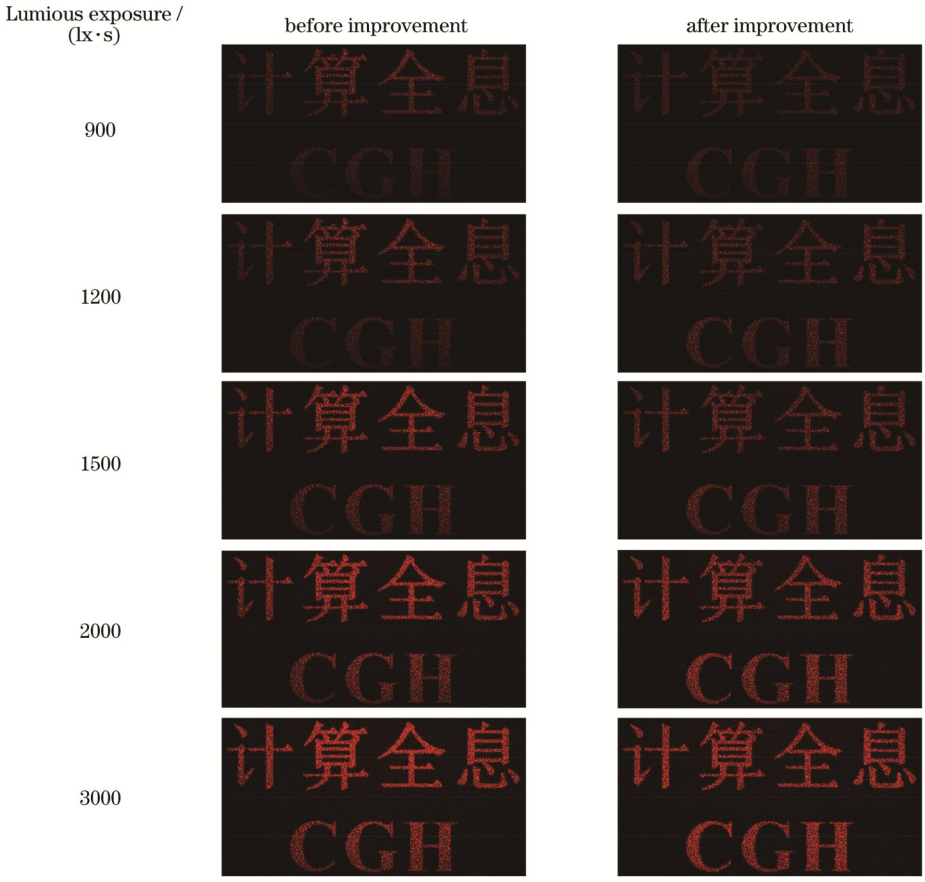

图 16 不同曝光量下的再现结果

Fig. 16 Reproduction results under different exposures

$$\begin{cases} \eta_e = \dfrac{\sum\limits_{(x',y')\in W} \left|U\left(x',y'\right)\right|^2}{N_W \left|U_0\right|^2} \\ U_{\mathrm{LEH}} = 1 - \sqrt{\dfrac{\sum\limits_{(x',y')\in W} \left[\dfrac{\left|U\left(x',y'\right)\right|^2}{\left|\overline{U}\right|^2} - 1\right]^2}{N_W}} \end{cases}, \tag{9}$$

式中:U_{LEH}为光能量分布均匀性;W为输出面再现域有效图形区域(理论光能不为零的区域);$\left|U\left(x',y'\right)\right|^2$为输出面再现域有效图形区域内各采样点的光能值;$\left|\overline{U}\right|^2$为输出面再现域有效图形区域内的平均光能值;$\left|U_0\right|^2$为输入光能值;$N_W$为输出面再现域有效图形区域内采样点数之和。

按照式(9)计算图 16 结果中所对应的光能均匀性和光能利用率,得到如图 17 所示的在不同曝光量下,提出方法计算的结果和原始方法计算出来的结果的光能利用率和均匀性之间的变化曲线图,从图中可以看出,改进前后不仅均匀性有了很大的提高,而且光能利用率也有提高。

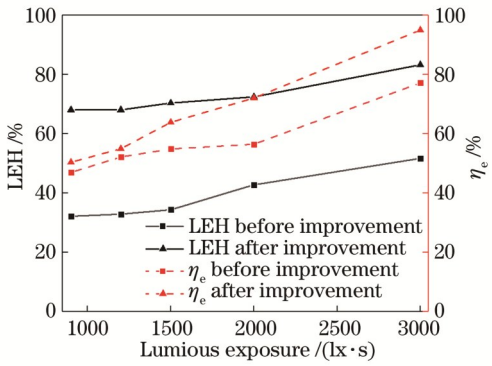

图 17 改进前后输出结果质量对比曲线图

Fig. 17 Quality comparison curves of output results before and after improvement

因此，从上述实验结果可以看出，同一曝光量在没有降低光能利用率的前提下，改进后比改进前再现结果的均匀性提高了约 2 倍。证明该方法对改善 SLM 全息再现像质量具有较好的实际效果。

5 结 论

本文对 LC-SLM 进行全息再现时，输出结果的再现像受 SLM 黑栅效应影响，从而导致再现像受到零级衍射干扰和均匀性差等现象进行研究，通过分析再现像的光能分布情况，提出了利用再现域模型相位补偿法对其进行相位补偿，结果表明，在其他条件不变时，设计全息图时叠加竖直（或水平）槽向一定周期的数字闪耀光栅后，根据再现域的光能分布情况反推出补偿量，并将其与原物光波进行合成，重新进行设计计算全息图，得到的再现结果均匀性相比于未改进时提高了约 2 倍，且光能利用率也有所提高。实验结果验证了该方法能够在使用 LC-SLM 进行全息再现时避免零级光斑影响的同时，还能有效改善全息再现结果的均匀性和光能利用率。该研究结果对利用 SLM 进行光场调控及其全息再现时改进输出结果质量具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] 周源，李润泽，于湘华，等. 基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J]. 光子学报，2021，50(11): 1123001.
Zhou Y, Li R Z, Yu X H, et al. Progress in study and application of optical field modulation technology based on liquid crystal spatial light modulators (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11): 1123001.

[2] Rubinsztein-Dunlop H, Forbes A, Berry M V, et al. Roadmap on structured light[J]. Journal of Optics, 2017, 19(1): 013001.

[3] 陈怀新，隋展，陈祯培，等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. 光学学报，2001，21(9): 1107-1111.
Chen H X, Sui Z, Chen Z P, et al. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 1107-1111.

[4] 孔德键，孙小燕，董卓林，等. 飞秒激光空间光束整形加工技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(11): 111416.
Kong D J, Sun X Y, Dong Z L, et al. Progress in femtosecond laser processing technology based on space beam shaping[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111416.

[5] 杨裕，谷一英，胡晶晶，等. 基于相位型空间光调制器的光束控制技术研究[J]. 红外与激光工程，2022，51(7): 418-426.
Yang Y, Gu Y Y, Hu J J, et al. Research on beam control technology based on a phase spatial light modulator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7): 418-426.

[6] 丁科，亓波. 基于二维标量衍射的液晶光束偏转性能仿真[J]. 中国激光，2016，43(2): 0205005.
Ding K, Qi B. Beam steering performance simulation of liquid crystal spatial light modulator based on 2D scalar diffraction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0205005.

[7] 隋晓萌，何泽浩，曹良才，等. 基于液晶空间光调制器的复振幅全息显示进展[J]. 液晶与显示，2021，36(6): 797-809，758.
Sui X M, He Z H, Cao L C, et al. Recent progress in complex-modulated holographic display based on liquid crystal spatial light modulators[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(6): 797-809, 758.

[8] 梁言生，姚保利，马百恒，等. 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵[J]. 光学学报，2016，36(3): 0309001.
Liang Y S, Yao B L, Ma B H, et al. Holographic optical trapping and manipulation based on phase-only liquid-crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0309001.

[9] 夏军，常琛亮，雷威. 基于液晶空间光调制器的全息显示[J]. 物理学报，2015，64(12): 124213.
Xia J, Chang C] L, Lei W. Holographic display based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64 (12): 124213.

[10] Wang D, Li N N, Liu C, et al. Holographic display method to suppress speckle noise based on effective utilization of two spatial light modulators[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 11617-11625.

[11] 何晨，房鸿，张宁超. 基于深度学习的单帧同轴数字全息重建方法[J]. 光子学报，2021，50(12): 1210004.
He C, Fang H, Zhang N C. Single-shot on-axis digital holography reconstruction method based on deep learning[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12): 1210004.

[12] Wu Y, Wang J, Chen C, et al. Adaptive weighted Gerchberg-Saxton algorithm for generation of phase-only hologram with artifacts suppression[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 1412-1427.

[13] 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.
Yu Y J, Wang T, Zheng H D. Optimization of optoelectronic reconstruction of phase hologram by use of digital blazed grating [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(5): 3154-3160.

[14] Schnars U, Juptner W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. Measurement Science & Technology, 2002, 13(9): R85-R101.

[15] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. Optik, 1972, 35: 237-246.

[16] 田芊，廖延彪，孙利群. 工程光学[M]. 北京：清华大学出版社，2006.
Tian Q, Liao Y B, Sun L Q. Engineering optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

[17] 郑华东. 数字全息三维立体显示关键技术研究[D]. 上海：上海大学，2009.
Zheng H D. Study on the key techniques of three-dimensional display based on optoelectronic holography[D]. Shanghai: Shanghai University, 2009.

[18] 范影乐，杨胜天，李轶. MATLAB 仿真应用详解[M]. 北京：人民邮电出版社，2001.
Fan Y L, Yang S T, Li Z. Detailed explanation of MATLAB simulation application[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2001.

[19] 杨大地，王开荣. 数值分析[M]. 北京：科学出版社，2006.

Yang D D, Wang K R. Numerical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006.

[20] Qi Y J, Chang C L, Xia J. Speckleless holographic display by complex modulation based on double-phase method[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 30368-30378.

[21] Jiao S M, Jin Z, Chang C L, et al. Compression of phase-only holograms with JPEG standard and deep learning[J]. Applied Sciences, 2018, 8(8): 1258.

[22] Shimobaba T, Blinder D, Makowski M, et al. Dynamic-range compression scheme for digital hologram using a deep neural network[J]. Optics Letters, 2019, 44(12): 3038-3041.

[23] 成珂阳, 李琦. 深度学习用于连续太赫兹同轴数字全息重建[J]. 中国激光, 2023, 50(19): 1914001.
Cheng K Y, Li Q. Deep learning for reconstruction of continuous terahertz in-line digital holography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(19): 1914001.

Study on Improving Quality of Liquid Crystal Spatial Light Modulator Holographic Reproduction Images by Phase Compensation Method of Reproduction Domain Model

Hu Chi[1], Zhang Jin[1*], Sun Guobin[1], Jiang Shilei[1], Liu Yanyan[2]

[1]*School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an* 710021, *Shaanxi, China*;

[2]*National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin* 300308, *China*

Abstract

Objective With the continuous development of spatial light modulators, it has been widely applied in many fields, such as light field control, beam shaping, beam deflection, and holographic reproduction, with unparalleled advantages. However, due to limitations of process conditions, it also has many defects. The existence of zero-order spots and multi-order diffraction images caused by its own "black-matrix effect" will exert certain effects on the quality of the output light field, which leads to a low utilization rate of light energy and poor uniformity of reproduced images. However, most studies nowadays are conducted from the perspective of algorithm design to improve the reproduced image quality of holographic display. But when the liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) is employed for holographic display, due to the influence of the "black-matrix effect", the light energy distribution of the reproduced results follows the sinc function distribution, so that the energy distribution of the reproduced images is not uniform. We propose a method to improve the uniformity of the reproduced images through digital blazed grating to deviate the reproduced images and combine with the phase compensation method of the holographic reproduction domain model. This method provides theoretical assistance to improve the quality of reproduction results when LC-SLMs are leveraged for holographic reproduction.

Methods Based on the principle of Fresnel hologram calculation, our main design principle is analyzing the influence of zero-order spots and multi-order diffraction images produced by the "black-matrix effect" of the LC-SLM adopted for holographic reproduction on the results. Then with an aim at avoiding the offset of the zero-order spots on the reproduced images by digital blazed grating superimposed on the hologram, and finally to compensate for the uneven distribution of light energy, the phase is compensated according to the proposed reproduction domain model. The steps are as follows. First, the reproduction domain is determined according to the size of the reproduction image, and after loading a certain period of digital blazed grating based on the original design hologram, the compensation amount is inverted according to the light intensity distribution of the reproduction domain reproduction results and then synthesized with the original light wave. Recalculating the hologram can achieve the adjustment of the reproduction results. The quality of the holographic reproduction results is improved by avoiding the influence of zero-order spots on the reproduction results.

Results and Discussions Due to the influence of the grid structure when LC-SLM performs holographic reproduction (Fig. 2), when the hologram is loaded, the reproduction results shown in Fig. 4 will have multi-order diffraction images and zero-order spots, which seriously affects the quality of the reproduction results. We propose the phase compensation method of the reproduction domain model (Fig. 6) according to the digital blazed grating deviation from the reproduction image and then compensate the phase according to the light energy of the reproduction domain, which can improve the uniformity of reproduction results. the calculation flow chart is shown in Fig. 8(b). Through the optimization calculation and simulation verification of the phase compensation amount and the construction of the holographic reproduction optical path (Fig. 14), the phase after compensation calculation is loaded onto the SLM for reproduction experimental verification and tests. The experimental results show that the uniformity of the reproduced image after compensation is twice as much

as that of the original one, and the utilization rate of light energy is also improved to a certain extent, as shown in Figs. 16 and 17.

Conclusions We analyze the light energy distribution of the reproduced image when the LC-SLM performs holographic reproduction, and propose a phase compensation method through the reproduction domain model to compensate for its phase. The results show that after adding a certain period of digital blazed grating to the design hologram, the compensation amount is inverted according to the distribution of light energy in the reproduction domain, and then synthesized with the original light wave and redesigned to calculate the hologram. The uniformity of the reproduced results is twice as much as that of the unimproved one, and the utilization rate of light energy is also improved. The experimental results prove that the method can effectively improve the uniformity and light energy utilization of holographic reproduction results while avoiding the effect of zero-order spots when LC-SLMs are employed for holographic reproduction. The results of this study are useful for improving the quality of output results when spatial light modulators are adopted for light field modulation and holographic reproduction.

Key words holography; liquid crystal spatial light modulator; holographic reproduction; reproduction domain; phase compensation