

基于参数空间遍历的空间光调制器量化取值优化

何泽浩, 隋晓萌, 曹良才, 金国藩*

精密测试技术及仪器国家重点实验室, 清华大学精密仪器系, 北京 100084

摘要 由于现有空间光调制器(SLM)的调制特性,连续取值的复振幅型计算全息图(CGH)通常需要被转换为离散取值的纯振幅型或纯相位型 CGH。将连续值近似为离散值的量化过程会对 CGH 的全息重建质量产生显著的影响。选择峰值信噪比(PSNR)作为重建质量的评价依据,采用参数空间遍历法,定量评估了 CGH 振幅和相位的量化取值对重建质量的影响。评估过程充分考虑了分辨率、补零范围、重建距离、重建波长、随机相位、像素间距、位深度及相位调制偏差等关键参数对全息重建的作用。在此基础上,提出了针对现有和未来 SLM 的最佳量化方案。

关键词 全息; 计算全息; 全息显示; 振幅; 相位; 量化

中图分类号 O436 **文献标志码** A

doi: 10.3788/CJL202148.1209002

1 引言

计算全息是信息光学领域的重要研究方向之一,通过数值计算完成目标物体的数字记录,利用空间光调制器(SLM)和光学装置实现被记录信息的光学复现^[1-3],可以应用在三维显示^[4]、光束调制^[5]、全息加密^[6-7]及全息印刷^[8]等领域。

通过全息算法,直接得到的全息面分布通常是连续的复振幅分布。这些全息复振幅分布需要借助 SLM 才能实现光学全息三维重建。常见的 SLM 有数字微镜器件(DMD)、硅基液晶器件(LCoS)和超表面器件等类型。其中,DMD 通常为纯振幅型 SLM,LCoS 通常为纯相位型 SLM,超表面器件通常为复振幅型 SLM。针对不同类型的 SLM,全息平面上的复振幅分布需要被编码成不同类型的计算全息图(CGH)^[9-11]。全息图的编码过程可能存在误差,进而导致全息重建质量下降。此外,SLM 通常具有像素化的结构,每个像素的调制值一般只能是一系列离散的取值。编码 CGH 时,不仅需要以特定的分辨率对全息平面上的连续信号进行抽样,还需要将像素的取值近似为可用的调制状态。抽样和近似的过程导致了全息重建质量的下降。这种误差通常被称作全息重建的量化误差。

除了量化误差外,SLM 本身的制造精度不足以及使用环境不符合设计条件等因素也会制约 CGH 的全息重建质量。这种情况本质上是 SLM 的实际调制值与理想调制值不同导致的,通常在纯相位型 SLM 上较为常见。它导致的重建误差可以通过查找表(LUT)校正的方式消除^[12-14]。当前,常用的 LUT 校正方法需要对 SLM 像素进行标定,存在操作复杂、耗时较长等不足。

SLM 的量化误差和 LUT 的调制偏离制约了 CGH 的全息重建质量。设计量化误差评价方法,优化 SLM 量化参数,对 CGH 的高质量重建具有重要意义。在之前的研究基础上^[15],本文提出了一种基于参数空间遍历的 SLM 量化取值优化方法。所提方法考虑了更加多样的系统变量,使用了更加密集的参数空间,评估了分辨率、补零范围、重建距离、重建波长、随机相位、像素间距、CGH 位深度及 SLM 相位调制偏差等对全息重建质量的影响,给出了复振幅型 SLM 和纯相位型 SLM 在高质量计算全息应用中的最佳量化取值。本工作的研究结果可以为现有的和未来的 SLM 量化设计提供指导。

2 基本原理

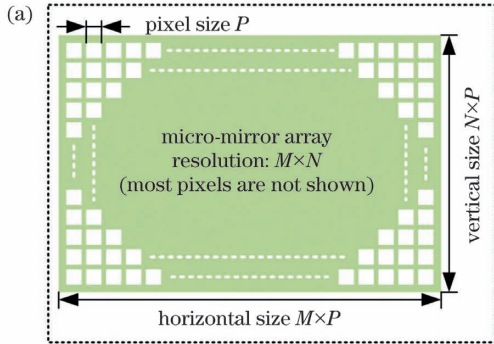
DMD、LCoS 等常见的 SLM 通常具有像素化的

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-04-08; 录用日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(62035003,61775117)、清华大学自主科研计划(20193080075)

*E-mail: jgf-dpi@mail. tsinghua. edu. cn

结构。图 1(a)展示了一块 DMD 的面板结构。该面板由离散的电控微镜构成,总分辨率为 $M \times N$,每一块电控微镜的边长为 P 。电寻址信号可以独立控制每块电控微镜的开关状态,进而实现入射光波的调制。电控微镜的开关状态可以看作二进制信号,



因此 DMD 每个像素的取值并不连续。同时,SLM 的实际调制值与理想调制值也往往不同。图 1(b)展示了一块 LCoS 实际调制值与理想调制值偏离的现象。因此,需要针对 SLM 的量化误差和 LUT 的调制偏离对全息重建产生的影响展开研究。

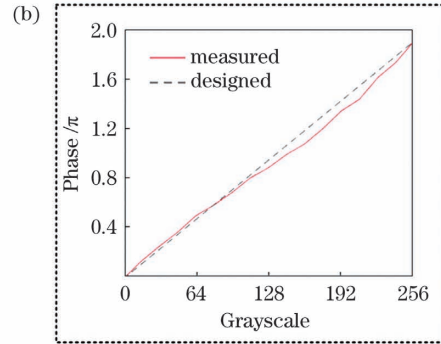


图 1 SLM 的量化误差与 LUT 的调制偏离。(a) DMD 面板像素的离散化结构;(b) LCoS 实际查找表与设计查找表的调制偏离

Fig. 1 Quantization error of SLM and modulation deviation of LUT. (a) Pixel discrete structure of the DMD panel; (b) modulation deviation of the designed LUT and the measured LUT of LCoS

采用角谱传播模型计算目标物体的 CGH。角谱传播模型是一种基于平面波解的传播模型,可以描述近场光波的衍射传播,算法的采样间隔与传播距离无关,通过两次傅里叶变换即可获得全息平面上的复振

幅分布,重建结果能够呈现显著的三维效果,是一种兼顾了计算速度、重建精度及算法复杂度的波前传播模型。将全息平面设置为起始平面,该平面上的复振幅分布 $\tilde{E}_H(x, y, 0)$ 可以通过角谱传输方程描述^[16]:

$$\tilde{E}_H(x, y, 0) = F^{-1} \left\{ F \{ E_O(x, y, z_0) R(x, y, z_0) \} \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} z_0 \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中:全息平面的深度 $z=0$; F^{-1} 为傅里叶逆变换, F 为傅里叶变换; $E_O(x, y, z_0)$ 为目标物体的振幅; z_0 为全息平面与物平面之间的距离; $R(x, y, z_0)$ 为叠加在目标物体表面上的随机相位; λ 为全息重建波长; u 和 v 分别为 x 和 y 方向的空间频率。如果 α 和 β 分别表示光波与 x 和 y 方向的夹角,则 u 和 v 可以分别表示为

$$u = \frac{\cos \alpha}{\lambda}, v = \frac{\cos \beta}{\lambda}. \quad (2)$$

为了避免计算过程引入误差,影响分析结果的准确性,(1)式所示的全息图计算模型需要位于适当的距离区间内。根据香农-奈奎斯特采样定理^[17],当物平面与全息平面间的距离过大时,全息重建质量会受到角谱传递函数混叠误差的影响而下降。为了简化分析,一维情形下的角谱传播模型可以写为

$$\tilde{E}_H(x) = F^{-1} \left\{ F \{ E_O(x) R(x) \} \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} z_0 \sqrt{1 - (\lambda u)^2} \right] \right\}, \quad (3)$$

$$H_z(u) =$$

$$\exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} z_0 \sqrt{1 - (\lambda u)^2} \right] = \exp [j\varphi(u)], \quad (4)$$

式中: $H_z(u)$ 为一维的角谱传递函数; $\varphi(u)$ 为 $H_z(u)$ 的相位部分。设 $f(u)$ 为 $\varphi(u)$ 的局域空间频率,则 $f(u)$ 可表示为

$$f(u) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial u} \varphi(u) = - \frac{z_0 u}{\sqrt{\lambda^{-2} - u^2}}. \quad (5)$$

由角谱传播模型的特点可知,全息平面的采样窗口宽度、采样间隔等参数均与物平面的相等。假设物平面上采样窗口的宽度为 L ,一维情形下的分辨率为 M ,采样间隔为 d ,根据香农-奈奎斯特采样定理,一维角谱传递函数 $H_z(u)$ 的最大采样间隔 Δu 应满足^[18]

$$\Delta u = (2L)^{-1} \leq |2f(u)|^{-1}. \quad (6)$$

由于 $|2f(u)|$ 是一个单调递增的函数,其最大值出现在 $u = u_{\max} = M/(2L)$ 处。此时,重建距离应满足

$$z_0 \leq z_{0\max} = \frac{L \sqrt{4\lambda^{-2}L^2 - M^2}}{M} = Md \sqrt{4\lambda^{-2}d^2 - 1}, \quad (7)$$

式中: $L = Md$; $z_{0\max}$ 为角谱传播模型的最大传播距离, 又被称作角谱传播的“有效距离”。

除了传播距离上限 $z_{0\max}$ 外, 光学全息重建过程还存在传播距离下限 $z_{0\min}$ 。当传播距离过小时, 不同衍射级次的全息重建结果会在重建平面相互重叠, 制约了全息重建质量。以零级衍射区域为例, 为了避免相邻的 ± 1 级衍射结果与零级衍射结果重叠, 不同级次对应点间的距离应该大于全息重建图像的宽度。由光栅衍射公式可知, $+1$ 级的衍射角度为

$$\theta_{+1} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right). \quad (8)$$

为了确保 $+1$ 级的衍射结果不与零级衍射结果重叠, 不同级次对应点之间的距离应满足

$$L = Md \leq z_0 \tan\left[\arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right)\right]. \quad (9)$$

由(9)式可推导出, 光学全息重建过程的最小传播距离 $z_{0\min}$ 应满足

$$z_0 \geq z_{0\min} = \frac{Md}{\tan\left[\arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right)\right]}. \quad (10)$$

在实际的光学系统中, 可以通过光路偏转装置或滤波装置来避免不同级次的重叠。但是, 对于许多不便于安装附加光学装置的计算全息显示系统而言, 全息平面与物平面之间的距离应位于 $[z_{0\min}, z_{0\max}]$ 区间内。

为了定量评估全息重建质量, 采用峰值信噪比 (PSNR) 作为评价指标, 其数学形式^[19]为

$$P_{\text{SNR}} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{MN \cdot m_{\text{gray}}^2}{\sum_M \sum_N [I_O(m, n) - I_r(m, n)]^2} \right\}, \quad (11)$$

式中: m_{gray} 为目标图像和重建图像的最大灰阶值; $I_O(m, n)$ 和 $I_r(m, n)$ 分别为目标物体和重建结果的像素强度值。PSNR 值越高, 全息重建质量越好。对于常见的 8 bit 图像, 最大灰阶 m_{gray} 为 255。

针对不同类型的 SLM, 全息图生成和重建的过程可以由图 2 表示。考虑到常用 SLM 的像素取值多为离散值, (1) 式计算得到的连续型复振幅分布通常需要量化为离散的纯振幅或纯相位分布:

$$E_A(x, y, 0) = \frac{1}{2^{B_a}} \times \text{floor} \left\{ \frac{\text{abs}[\tilde{E}_H(x, y, 0)]}{\max\{\text{abs}[\tilde{E}_H(x, y, 0)]\}} \times 2^{B_a} \right\}, \quad (12)$$

$$E_P(x, y, 0) = \frac{2\pi}{2^{B_p}} \times \text{floor} \left\{ \frac{\arg[\tilde{E}_H(x, y, 0)]}{2\pi} \times 2^{B_p} \right\}, \quad (13)$$

式中: $E_A(x, y, 0)$ 为量化后的纯振幅型 CGH; $E_P(x, y, 0)$ 为量化后的纯相位型 CGH; $\text{abs}[\cdot]$ 为取绝对值运算; $\arg[\cdot]$ 为取幅角运算; $\text{floor}[\cdot]$ 为对小数值向下取整运算; B_a 和 B_p 分别为量化后振幅和相位的位深度。

由(1)、(12)和(13)式可知, CGH 计算中可变的参数有 4 个, 即重建距离、随机相位、重建波长及

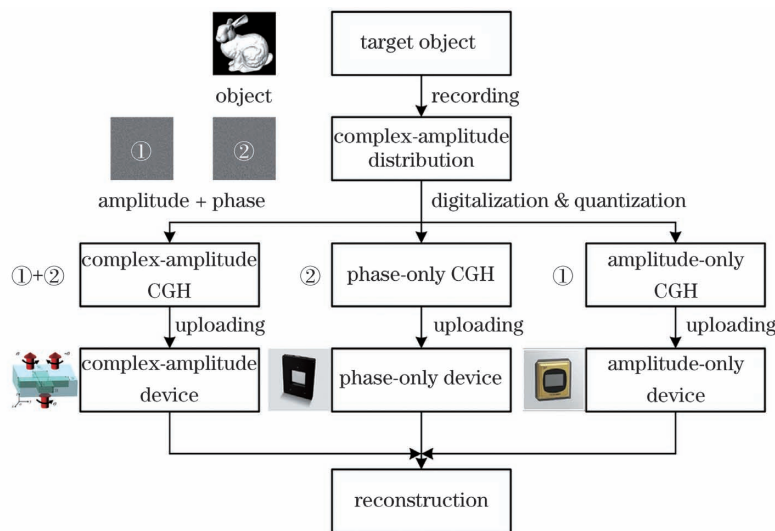


图 2 全息记录和重建过程

Fig. 2 Holographic recording and holographic reconstruction

CGH 的位深度。由于常用的 SLM 具有离散的像素结构,SLM 的分辨率和像素间距同样是影响全息重建质量的关键参数。此外,全息平面的记录尺寸决定了 CGH 中包含的频率信息,可以决定物体的重建质量。在角谱传播模型中,全息平面的尺寸和物平面的相同,对目标物体进行补零操作可以同时改变全息平面的记录尺寸。最后,LUT 的调制偏差会制约 CGH 的全息重建质量,分析中需要考虑相位调制偏差对重建质量的影响。

为了保证分析结果的全面性,使用参数空间遍历法研究了分辨率、补零范围、重建距离、重建波长、随机相位、像素间距、CGH 位深度及 LUT 调制偏差等参数发生变化时的全息重建情况。同时,为了确保研究特定参数时不被其他参数干扰,使用控制变量法,改变全息重建过程中的某一个特定参数时,其他所有的参数均保持不变。

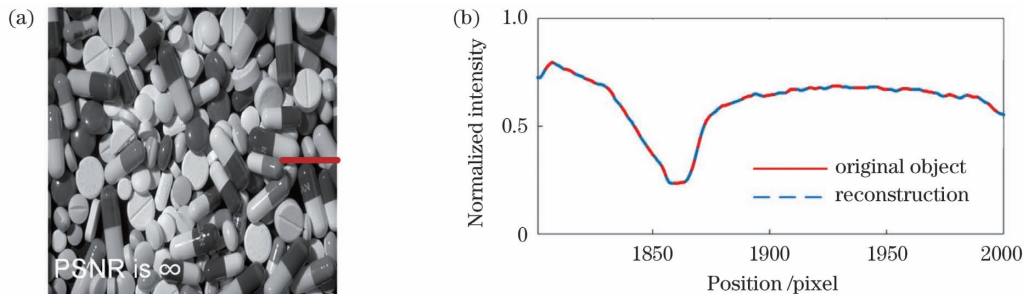


图 3 复振幅全息图的全息重建。(a)目标物体的全息重建结果;(b)原始目标物体和全息重建结果的强度分布曲线

Fig. 3 Holographic reconstruction of continuous complex-amplitude CGH. (a) Holographic reconstruction result of the target object; (b) intensity distribution curves of original target object and its reconstruction result

为了保证分析结果的全面性,定量分析分辨率、补零范围、重建距离、重建波长及像素间距等相关参数对全息重建质量的影响。遍历分析结果表明,对于连续型复振幅全息图,无论系统参数如何变化,重建结果的 PSNR 值始终为无穷大。没有量化误差时,复振幅型全息图的计算和重建是完全的互逆过程,不受系统参数的干扰。

受到 SLM 量化参数的限制,CGH 往往以离散取值的形式存储于计算机中。为了确定振幅和相位中哪个参数的量化过程对全息重建质量的影响更为显著,分别分析了其中一个参数保持连续型分布不变时,另一个参数量化为 8-bit 时的全息重建质量。当振幅采用 8-bit 量化取值且相位采用连续取值时,目标物体 Pills 的全息重建结果 PSNR 值为 53.24 dB。振幅的 8-bit 量化取值造成了全息重建质量的下降,全息图的计算和重建过程不再是完全的互逆过程。不过,考虑到目标物体重建结果的

3 结果分析

使用二维图像“Pills”作为全息计算中的目标物体。为了分析量化过程对全息重建质量的影响,首先计算连续型复振幅 CGH 的重建结果作为参考对象。计算中,全息重建距离设定为 80 mm,以满足(7)和(10)式对角谱衍射模型传播距离的要求。目标物体的初始分辨率为 2000×2000 ,重建波长为 532 nm,CGH 的像素间距为 $4 \mu\text{m}$ 。使用连续型复振幅 CGH 进行重建时,目标物体 Pills 的复现结果如图 3(a)所示。此时,重建结果相对原始目标物体的 PSNR 为无穷大。图 3(b)展示了原始目标物体和全息重建结果在图 3(a)直线所示区域的强度分布曲线,二者完全重合。因此,连续型复振幅全息图的计算和重建可以等效看作完全的互逆过程,重建质量不受量化误差的影响。

PSNR 值在 50 dB 以上,8-bit 量化取值的振幅对重建质量的影响几乎可以忽略。

图 4 中的实线展示了当振幅被量化为 8-bit 而相位保持连续值时,全息重建结果 PSNR 值随分辨率的变化趋势。仿真中,目标物体的分辨率从最初的 2000×2000 逐渐增加到 4000×4000 ,每次在 x 和 y 方向上的像素数量增加幅度均为 200。结果表明,随着 CGH 分辨率的增加,复振幅 CGH 的全息重建结果 PSNR 值在 PSNR 平均值 $R_{\text{PSNR,ave1}}$ 附近波动,且波动范围通常在 1 dB 左右。此外,使用控制变量法分别改变补零范围、重建距离、重建波长及像素间距等相关参数时,重建结果的 PSNR 值具有和图 4 中的实线类似的变化趋势。

当相位采用 8-bit 量化取值且振幅采用连续取值时,目标物体 Pills 重建结果的 PSNR 值为 45.04 dB。与振幅采用 8-bit 量化取值时相比,相位采用 8-bit 量化取值对全息重建质量的影响更为明

显,重建结果的 PSNR 值下降幅度更为显著。图 4 中的点虚线展示了单纯量化相位时全息重建结果 PSNR 值随分辨率的变化趋势。这个趋势与图 4 实线十分类似。但是,此时的平均值 $R_{\text{PSN,ave2}}$ 相比 $R_{\text{PSN,ave1}}$ 减小了 7.43 dB。使用控制变量法分别改变重建距离、重建波长及像素间距等参数,单纯量化相位时的重建结果 PSNR 值仍然具有类似趋势。

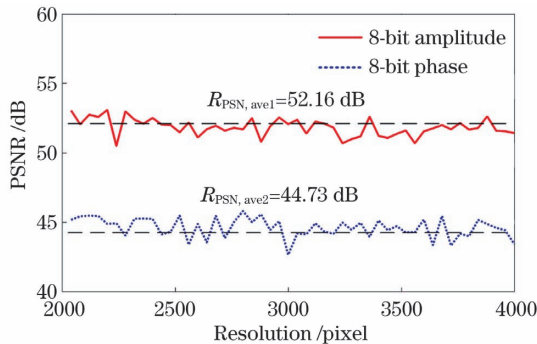


图 4 振幅和相位分别量化为 8-bit 时全息重建像 PSNR 与分辨率的关系

Fig. 4 Relationship between PSNR and resolution when a complex CGH with 8-bit amplitude or phase is used

然而,对于相位采用 8-bit 量化取值的复振幅型全息图,改变目标图像的补零范围时,全息重建质量呈现出了与图 4 点虚线完全不同的变化趋势。补零操作如图 5(a)所示。在原始目标物体外侧放置像素值始终为 0 的黑色边框,可以得到新的目标物体。新目标物体的中心始终是分辨率为 2000×2000 的原始目标物体。通过补零操作,新目标物体的分辨

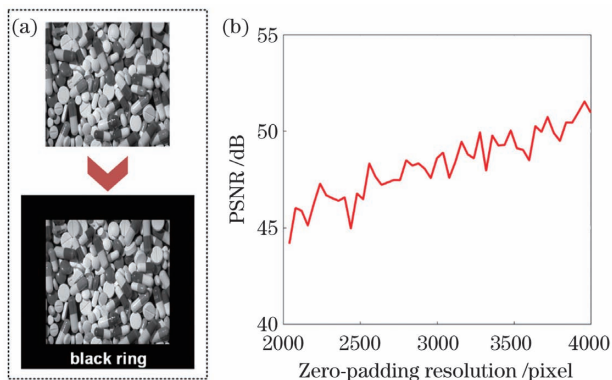


图 5 补零对全息重建结果的影响。(a)补零操作过程示意图;(b)相位量化为 8-bit 时全息重建像 PSNR 与补零区域分辨率的关系

Fig. 5 Influence of zero-padding operation on holographic reconstruction results. (a) Schematic of zero-padding operation; (b) relationship between PSNR of holographic reconstruction and zero-padding resolution when a complex CGH with 8-bit phase is used

率由最初的 2000×2000 逐渐提升到 4000×4000 ,每次在 x 和 y 方向上的像素增加幅度均为 50 个像素。由图 5(b)可以看出,此时全息重建结果的 PSNR 值呈现非常明显的上升趋势。总分辨率为 4000×4000 时,全息重建结果的 PSNR 值较不补零时增加了 6.32 dB。更大尺寸的全息图意味着全息记录过程中物体频率信息的损失越少,提高了全息重建结果的质量。对于相位采用 8-bit 量化取值的复振幅型全息图,补零操作是一种提高全息重建质量的有效方法。从物理含义上来看,补零操作相当于使用较高分辨率的 SLM 重建较低分辨率的目标物体。此时,全息重建结果的准确性显著提高。

除了可以提升目标物体的全息重建质量,补零操作还可以扩展角谱传播模型的有效距离。假设补零后的目标物体分辨率由 $N_x \times N_y$ 扩展至 $2N_x \times 2N_y$,由(7)式可知,此时角谱传播模型的有效距离将从 $z_{0\max}$ 扩展至 $2z_{0\max}$ 。同时,考虑到黑色边框像素的取值为 0,全息重建时,即使不同衍射级次的黑色边框重建结果相互重叠,也并不会影响目标物体区域的全息重建结果。因此,补零操作不会改变(10)式的传播距离下限 $z_{0\min}$ 。

通过全息算法获得的复振幅分布需要借助 SLM,才能实现全息光学重建。现存的动态 SLM 往往是纯振幅型或纯相位型器件,难以实现复振幅分布的直接调制。为了解决这一问题,通常需要根据器件的调制特性将复振幅分布进一步编码成纯振幅型或纯相位型 CGH。忽略复振幅中的振幅信息,可以得到具有连续像素取值的纯相位型 CGH,相应重建结果的 PSNR 值为 12.02 dB。可以看出,振幅的丢失对全息重建质量的影响极为显著。

纯相位型 CGH 重建结果的 PSNR 值与目标物体分辨率、重建距离及重建波长之间的关系与图 4 所示的趋势相似,但平均 PSNR 值大幅下降至 12 dB 左右。补零范围对全息重建结果的影响与图 5(b)类似,但总分辨率为 4000×4000 时,全息重建结果的 PSNR 值仅为 16.11 dB,与图 5(b)相比,PSNR 的最大值下降了 34.77 dB。

在实际的光学全息系统中,上传至纯相位型 SLM 表面的 CGH 通常具有 8-bit 量化的相位值。对连续型纯相位 CGH 进行 8-bit 量化后,目标物体 Pills 重建结果的 PSNR 值下降为 11.97 dB,与连续型纯相位 CGH 相比,下降幅度不足 0.1 dB。相对于舍弃复振幅分布中的振幅信息,相位取值 8-bit 量化对全息重建质量造成的影响几乎可以忽略不计。

一些特定的计算全息应用,如高分辨率全息实时显示,对全息图的分辨率和刷新率具有极高的要求,为系统带来非常大的数据存储和传输负担。为了减小数据存储和传输负担,尝试对纯相位型 CGH 的位深度进行了压缩。图 6(a)展示了位深度不同时纯相位型 CGH 重建结果的 PSNR 值。结果表明:纯相位型 CGH 的位深度由 1-bit 变为 5-bit 时,全息重建结果的 PSNR 值逐渐增大;随着位深度继续上升超过 5-bit 时,重建结果的 PSNR 值渐渐保持不变。因此,将纯相位型 CGH 的位深度由 8-bit 压缩为 5-bit,可以减小全息图的信息冗余,在不改变全息重建质量的前提下,减小了 37.5% 的全息数据带宽,降低了对系统存储能力和传输能力的要求。

对于纯相位型 SLM, LUT 常用于建立全息图灰度值与 SLM 表面相位调制量之间的关系。理想状态下,对于量化取值为 8-bit 的纯相位型 SLM,全息图 $[0, 255]$ 的灰度值对应了器件表面 $[0, 2\pi]$ 的相位调制量。全息图改变一个灰度值,SLM 对应像素的相位调制量改变 $\pi/128$ 。但是,考虑到 SLM 的加工工艺和使用环境经常偏离理想状态,因此实际应用中全息图灰度值和器件相位调制量之间的对应关系经常与预设的 LUT 存在差异。例如,当一款纯相位型 SLM 的相位调控范围变为 $[0, 3\pi]$ 时,全息图改变一个灰度值,SLM 对应像素的相位调制量改变 $3\pi/256$ 。这种相位调制偏移现象常常会降低全息重建质量。图 6(b)展示了纯相位型 SLM 最大

相位调控范围与全息重建结果之间的关系。纯相位型 SLM 表面的相位调控范围由 $[0, \pi/8]$ 增加到 $[0, 2\pi]$ 时,相位调制状态越来越接近 LUT 的理想设计条件,全息重建结果的 PSNR 值逐渐提高;相位调控范围由 $[0, 2\pi]$ 继续增加到 $[0, 4\pi]$ 时,相位调制状态越来越远离 LUT 的理想设计条件,全息重建结果的 PSNR 值逐渐下降。全息重建质量的最优点出现在相位调控范围为 $[0, 2\pi]$ 时。

由(11)式可以看出,PSNR 的取值很大程度上会受到目标物体本身分布的影响,因此它是一个评价图像质量的相对指标而非绝对指标。使用 PSNR 值作为全息重建质量的评价标准时,很难准确给出人眼刚好能识别图像的 PSNR 下限值。不过,经过大量的仿真重建,对于图 3(a)所示的目标物体 Pills,发现当重建结果的 PSNR 值大于 9 dB 时,全息重建结果都可以被肉眼识别。此时,SLM 的相位调控范围位于 $[0, 0.8\pi]$ 和 $[0, 3.1\pi]$ 之间的区域。图 6(c)和图 6(d)展示了相位调控范围为 $[0, \pi]$ 和 $[0, 3\pi]$ 时的全息重建结果,此时目标物体的信息仍然能够辨别。LUT 的精确校正过程需要对 SLM 表面进行严格的标定,操作步骤繁琐,校正时间冗长。面向全息防伪这类对全息重建质量要求不高的计算全息应用场景,对 LUT 进行严格的校正并不具备很高的性价比。此时,对 LUT 进行粗略校正,保证全息图 $[0, 255]$ 的灰度值对应的相位调控量在合理的范围内线性变化即可。

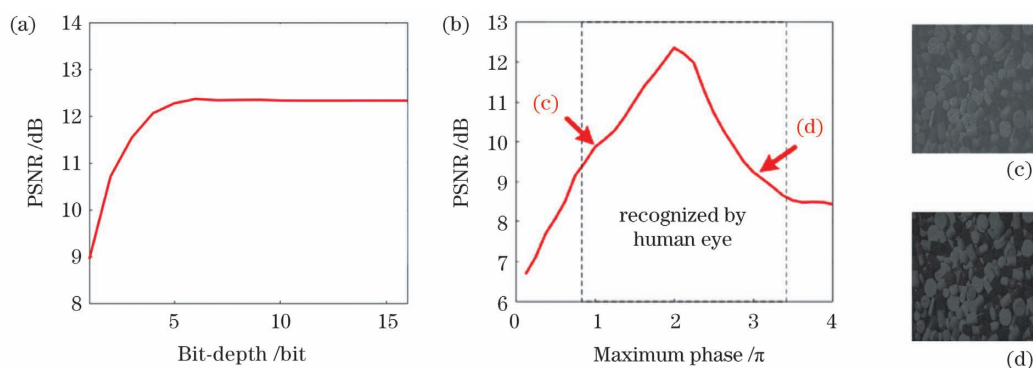


图 6 全息重建质量分析。(a)全息重建像 PSNR 随相位量化值的变化趋势;(b)全息重建像 PSNR 随最大相位调制量的变化趋势;(c)相位调制范围为 $[0, \pi]$ 时的重建结果;(d)相位调制范围为 $[0, 3\pi]$ 时的重建结果

Fig. 6 Quality analysis of holographic reconstructions. (a) Variation trend of PSNR of reconstructed hologram with phase quantization value; (b) variation trend of PSNR of reconstructed hologram with maximum phase modulation; (c) reconstruction result with a phase modulation range of $[0, \pi]$; (d) reconstruction result with a phase modulation range of $[0, 3\pi]$

纯相位型 CGH 能量利用率高、共轭像容易消除,适合用在计算全息显示系统中。不过,舍弃振幅信息在一定程度上制约了全息重建结果 PSNR 值

的上限。为了提升纯相位型 CGH 的全息重建质量,需要设计优化的全息计算和编码方法。迭代法通过多次正、逆向的全息波前传播计算,优化了全息

平面的相位分布,实现了全息重建质量的提高^[20-21]。面向纯相位型 SLM 的复振幅编码方法^[22-24]记录了全息平面的复振幅信息,可以获得较高的全息重建质量。图 7 展示了双相位编码方式对纯相位型 CGH 的提升效果^[22],此时全息重建结果的 PSNR 值较传统相位型 CGH 提升了 10.77 dB。当前,针对纯相位型 CGH 的计算与编码方法依然存在分辨率受限、光学系统复杂度高、计算量大等问题,需要在未来的研究中继续改进。

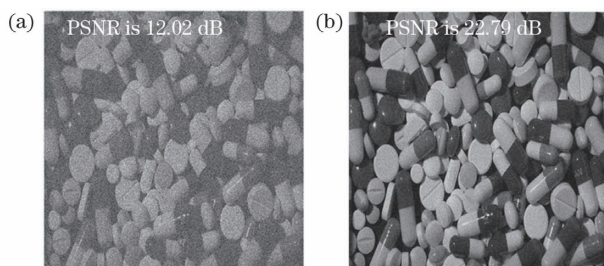


图 7 全息重建结果。(a)纯相位型 CGH 全息重建结果;
(b)双相位型 CGH 全息重建结果

Fig. 7 Holographic reconstructions. (a) Holographic reconstruction results of phase-only CGH;
(b) holographic reconstruction results of double-phase CGH

图 8 展示了复振幅型 CGH 的振幅和相位量化到不同比特深度时的 PSNR 等高线。复振幅分布的振幅和相位相互制约,同时影响着全息重建质量。相位的量化取值固定时,增加振幅的量化取值,重建结果的 PSNR 值存在上限;当振幅的量化取值固定时,增加相位的量化取值,重建结果的 PSNR 值也存在上限。在复振幅型 CGH 的量化参数优化过程中,必须同时考虑振幅和相位的量化参数,不能孤立优化。初始仿真中,CGH 的像素间距设置为 $4 \mu\text{m}$ 。当像素间距减小至 $1 \mu\text{m}$ 时,图 8 中的仿真结果依然有效。超表面器件这类复振幅型 SLM 受限于当

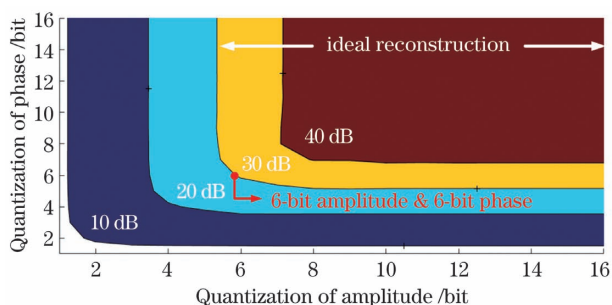


图 8 复振幅型 CGH 振幅和相位量化过程中 PSNR 等高线

Fig. 8 Contour map of PSNR during quantization of amplitude and phase in complex-amplitude CGH

前加工工艺,振幅和相位的量化台阶数越多,器件的加工成本也就越高。考虑到重建结果的 PSNR 值大于 30 dB 时,全息重建质量的变化往往难以被人眼分辨,因此具有 6-bit 振幅和 6-bit 相位的超表面器件通常可以用来提供理想的计算全息显示效果。

4 结 论

提出了基于参数空间遍历的量化取值优化方法,研究了 SLM 量化性能参数对全息重建质量的影响,给出了复振幅型 SLM 和纯相位型 SLM 在高质量全息显示应用中的最佳量化取值。主要研究结论列举如下:

1) 无论分辨率、补零范围、重建距离及重建波长等系统参数如何变化,连续型复振幅 CGH 的计算和重建过程均为无误差的互逆过程;

2) 对于复振幅型 CGH,振幅或相位的量化都会导致全息重建质量下降,但相位量化对全息重建质量的影响比振幅量化要更为显著;

3) 全息重建结果的 PSNR 值大于 30 dB 时,重建质量的变化通常难以被人眼分辨,因此对于复振幅型 SLM,6-bit 振幅加 6-bit 相位的量化取值可以提供理想的全息显示效果;

4) 对于纯相位型 SLM,不经过计算和编码优化时,5-bit 的相位量化取值可以达到全息重建质量的上限,通过压缩全息图的信息冗余,可以将全息数据存储量减小 37.5%;

5) 面向全息防伪这类对全息重建质量要求不高的应用场景,对 LUT 进行严格的校正不具备性价比,通常只需对 LUT 进行粗略校正,以保证全息图 $[0, 255]$ 的灰度值对应的相位调控量在合理的范围内线性变化,即可达到应用目的。

参 考 文 献

- [1] Xu F Y, Yang X, Yao J Y, et al. High-resolution multiview dynamic holographic 3D display [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0109001. 许富洋, 杨鑫, 姚建云, 等. 高分辨率多视点动态全息 3D 显示[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0109001.
- [2] Ju Y G, Park J H. Foveated computer-generated hologram and its progressive update using triangular mesh scene model for near-eye displays [J]. Optics Express, 2019, 27(17): 23725-23738.
- [3] Su P, Cao W B, Ma J S, et al. Fast computer-generated hologram generation method for three-dimensional point cloud model [J]. Journal of Display Technology, 2016, 12(12): 1688-1694.

- [4] Wang Z, Zhang X, Lü G Q, et al. Hybrid holographic Maxwellian near-eye display based on spherical wave and plane wave reconstruction for augmented reality display[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 4927-4935.
- [5] Rao S L, Wu P C, Zhang C C, et al. Energy-controllable femtosecond laser fabrication based on spatial light modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102008.
饶生龙, 吴培超, 张晨初, 等. 基于空间光调制器的能量可控飞秒激光加工[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102008.
- [6] Han C, Wan R, Liu Y, et al. A double encryption algorithm research based on computer generated hologram[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0909001.
韩超, 万芮, 刘洋, 等. 基于计算全息图的双重加密算法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0909001.
- [7] Kong D Z, Cao L C, Shen X J, et al. Image encryption based on interleaved computer-generated holograms [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2): 673-678.
- [8] Campbell M, Sharp D N, Harrison M T, et al. Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography [J]. Nature, 2000, 404(6773): 53-56.
- [9] Sui X M, He Z H, Jin G F, et al. Band-limited double-phase method for enhancing image sharpness in complex modulated computer-generated holograms [J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2597-2612.
- [10] Wang X Y, Zhang H, Cao L C, et al. Generalized single-sideband three-dimensional computer-generated holography[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2612-2620.
- [11] Jiang Q, Cao L C, Zhang H, et al. Improve the quality of holographic image with complex-amplitude metasurface[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 33700-33708.
- [12] Li R J, Cao L C. Progress in phase calibration for liquid crystal spatial light modulators [J]. Applied Sciences, 2019, 9(10): 2012.
- [13] Li R J, Gao Y H, Cao L C. *In situ* calibration for a phase-only spatial light modulator based on digital holography [J]. Optics Engineering, 2020, 59(5): 053101.
- [14] Gao Y H, Li R J, Cao L C. Self-referenced multiple-beam interferometric method for robust phase calibration of spatial light modulator [J]. Optics Express, 2019, 27(23): 34463-34471.
- [15] He Z H, Sui X M, Jin G F, et al. Optimal quantization for amplitude and phase in computer-generated holography[J]. Optics Express, 2021, 29(1): 119-133.
- [16] Zhao Y, Cao L C, Zhang H, et al. Accurate calculation of computer-generated holograms using angular-spectrum layer-oriented method [J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25440-25449.
- [17] Nakamura T, Yamaguchi M. Rapid calibration of a projection-type holographic light-field display using hierarchically upconverted binary sinusoidal patterns [J]. Applied Optics, 2017, 56(34): 9520-9525.
- [18] Claus D, Iliescu D, Rodenburg J M. Coherence requirement in digital holography [J]. Applied Optics, 2013, 52(1): A326-A335.
- [19] He Z H, Sui X M, Jin G F, et al. Distortion-correction method based on angular spectrum algorithm for holographic display [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(11): 6162-6169.
- [20] Deng Q L, Lin B S, Chang H T, et al. MGSA-type computer-generated holography for vision training with head-mounted display [J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(6): 433-437.
- [21] Chen C Y, Chang H T, Chang T J, et al. Full-color and less-speckled modified Gerchberg-Saxton algorithm computer-generated hologram floating in a dual-parabolic projection system [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(11): 110901.
- [22] Sui X M, He Z H, Zhang H, et al. Spatiotemporal double-phase hologram for complex-amplitude holographic displays [J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(10): 100901.
- [23] Mendoza-Yero O, Mínguez-Vega G, Lancis J. Encoding complex fields by using a phase-only optical element[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1740-1743.
- [24] Chen Z Z, Zeng T T, Qian B J, et al. Complete shaping of optical vector beams[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 17701-17710.

Optimization of Quantization Value for Spatial Light Modulators Based on Parameter Space Traversal

He Zehao, Sui Xiaomeng, Cao Liangcai, Jin Guofan*

*State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Abstract

Objective Obtaining high-quality reconstruction is desirable in computer-generated holography. Continuous complex-amplitude computer-generated holograms (CGHs) can present the most enhanced reconstruction quality because accurate amplitude and phase values rather than approximate values are obtained. However, in a practical system, CGHs need to be uploaded on the spatial light modulator (SLM). The most commonly used SLMs can only modulate either amplitude or phase. In addition, SLMs generally have pixelated structures with limited value ranges. It is necessary to sample the continuous distribution into a two-dimensional matrix with specific resolution and discrete pixel values in practical applications. This characteristic may harm the holographic reconstruction quality. Therefore, an optimization method based on parameter space traversal is proposed in this study to evaluate the effect of quantization on the holographic reconstruction quality. Various related parameters are considered in the evaluation. Proper quantization in some specific applications is also suggested.

Methods The CGH of a target object is calculated using the angular-spectrum model. In this model, when the reconstruction distance is too large, an aliasing error in the transfer function will be introduced. The maximum reconstruction distance, also called the effective distance, is determined by the Shannon-Nyquist sampling theorem. Meanwhile, when the reconstruction distance is too small, different diffraction orders on the reconstruction plane will interfere with each other. The minimum reconstruction distance is determined by the grating function. To quantitatively evaluate the reconstruction quality, the peak signal-to-noise ratio (PSNR) is used as the index to measure the difference between the reconstructed and target objects. Moreover, a traversal method is used to quantitatively evaluate the influence of quantization. Considering the pixelated structure and discrete value ranges of current SLMs, the continuous complex-amplitude distribution is converted into quantized amplitude- or phase-only distribution by rounding down decimals to integers.

Results and Discussions PSNRs of reconstructions via continuous complex-amplitude CGHs are infinite (Fig. 3). No matter how many related parameters, such as resolution, zero-padding area, reconstruction distance, reconstruction wavelength, and pixel pitch change, this conclusion remains unchanged. The calculation and reconstruction of continuous complex-amplitude CGHs were inverse processes. The 8-bit quantization of amplitude in complex-amplitude CGHs induced the degradation of reconstruction quality. The calculation and reconstruction of CGHs were not perfect inverse processes in this situation. However, the difference is negligible (Fig. 4). Compared with results by complex-amplitude CGHs with 8-bit quantized amplitude, results by complex-amplitude CGHs with 8-bit quantized phase presented a worse reconstruction quality. In addition, a zero-padding operation could improve the quality of the reconstruction by CGHs with 8-bit quantized phase. When the size of the target objects was doubled via the zero-padding operation, the PSNRs of reconstructions increased by 6.32 dB (Fig. 5). Phase-only CGHs were obtained by neglecting the amplitude of the complex-amplitude. The neglect of the amplitude had an extremely negative impact on reconstruction quality. PSNRs of reconstruction by phase-only CGHs decreased by 34.77 dB compared with those by complex-amplitude CGHs with 8-bit quantized amplitude. In some specific applications, quantization parameters could be selected appropriately. Phase-only CGHs with 5-bit quantization were proved to be suitable for the applications of dynamic holographic displays. Practically, a look-up table (LUT) often deviates from the designed one. However, a small phase modulation deviation had little effect on the reconstruction quality. In the application of anticounterfeiting, rough calibration for LUT could also be effective (Fig. 6). The reconstruction quality was affected by the quantization of both amplitude and phase. A small increase in the quantization of both amplitude and phase induced a better effect than a huge increase in the quantization of only amplitude or phase (Fig. 8). This conclusion was also applicable when the pixel pitch was less than 1 μm , which would provide guidance for designing meta-surface devices.

Conclusions Because of the modulation characteristics of available SLMs, complex-amplitude CGHs with continuous values usually need to be converted to amplitude- or phase-only CGHs with discrete values. The quantization process of approximating continuous values to discrete values has a significant influence on the holographic reconstruction quality. In this study, a traversal method is used to quantitatively evaluate the influence of quantization. Various parameters, such as resolution, zero-padding area, reconstruction distance, reconstruction wavelength, random phase, and pixel pitch are considered. For phase-only CGHs, neglecting the amplitude has an extremely negative impact on reconstruction quality. The PSNRs of reconstruction by phase-only CGHs decrease by 34.77 dB compared with those by complex-amplitude CGHs with 8-bit quantized amplitude. In some specific applications, quantization parameters can be selected appropriately. Dynamic holographic display, holographic anticounterfeiting, and the design of meta-surface devices are discussed specifically. We hope this study will provide a guideline for designing CGH-based systems.

Key words holography; computational holography; holographic display; amplitude; phase; quantization

OCIS codes 090.1760; 090.2870