

# 基于数字闪耀光栅的位相全息图光电再现优化<sup>\*</sup>

于瀛洁<sup>†</sup> 王 涛 郑华东

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

(2008 年 7 月 21 日收到, 2008 年 9 月 26 日收到修改稿)

针对利用液晶空间光调制器(LC-SLM)进行全息图光电再现过程中,再现像面存在多级衍射像造成单一像能量利用率低的问题,提出了一种在位相全息图中加载数字闪耀光栅的方法,以提高全息图光电再现中单一衍射像的衍射效率.分析了闪耀光栅作为衍射光学元件的特性及其对光波进行位相调制的原理,并阐述了在 LC-SLM 中加载数字闪耀光栅对位相全息图光电再现时像面能量分布的影响.搭建了基于 LC-SLM 的位相全息图光电再现实验系统.理论分析表明,在其他条件不变的情况下,加载竖直(或水平)槽向周期为 2 pixels 的数字闪耀光栅可使单一衍射像的能量提高 130.2%,而加载竖直及水平槽向周期均为 2 pixels 的数字闪耀光栅可使单一衍射像的能量提高 429.7%.实验结果验证了该方法可有效地提高单一衍射像的能量,改善了全息再现系统的光能利用效率.

关键词:全息光电再现,位相全息图,数字闪耀光栅,液晶空间光调制器

PACC: 4240J, 4225

## 1. 引 言

振幅全息图对入射光的强度进行调制,衍射效率较低,位相全息图不调制光波的强度,而只对光波的位相进行调制,因而具有较高的衍射效率<sup>[1-3]</sup>.由液晶分子的电光效应可知,在一定的外加电场作用下,液晶分子的指向矢发生偏转而呈现有序的排列,从而可以实现对入射光波的复振幅进行调制.国内外学者对以液晶作为介质的空间光调制器(SLM)的特性进行了大量的研究<sup>[4-7]</sup>,并将其应用到光束整形与偏转控制<sup>[8-10]</sup>、全息显示<sup>[11-14]</sup>、相移控制<sup>[15]</sup>、干涉测量<sup>[16]</sup>等各个领域.

液晶空间光调制器(LC-SLM)具有位相调制特性和实时性的特点,使其可以动态地承载位相全息图,从而能够实现动态全息显示<sup>[13,14]</sup>.1989年, Barnes 等<sup>[13]</sup>利用液晶电视(LCTV)位相调制特性,将计算全息图载入 LCTV,实现了全息图的光电再现.1991年, Amako 等<sup>[14]</sup>利用电控双折射液晶空间光调制器(ECB-SLM)实现了对可编程位相全息图的重构.国内学者也利用 LC-SLM 开展了位相全息图光电再现的实验研究<sup>[17]</sup>.

实时性是利用 LC-SLM 实现全息图光电再现的一大特点,但与传统位相全息图记录介质相比, LC-SLM 作为承载介质时存在多级衍射像,从而造成单一衍射像能量降低.本文利用光栅理论和标量衍射理论对位相全息图光电再现过程中再现像位置及其能量进行分析,探讨单个衍射像能量较低的原因.针对该问题,提出一种在位相全息图中加载数字闪耀光栅方法以提高单个衍射像的能量.从理论上分析了数字闪耀光栅的工作原理,并分析了在位相全息图中加载数字闪耀光栅对光电再现像位置和能量的影响.

## 2. 位相全息图的计算与承载方法

制作位相全息图的传统方法是通过改变记录介质厚度或折射率的分布来记录光场复振幅分布.除此之外,在计算机中也可对物光和参考光的干涉场进行模拟并进行编码和存储,这种获得全息图的方式称为计算机全息图(CGH).CGH 按编码方式也可分为振幅 CGH 和位相 CGH 两种.为提高衍射效率,本研究采用后者.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60772124),上海市科委科技攻关计划(批准号 075115001)和上海大学研究生创新基金(批准号 Shucx080215)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yingjieyu@staff.shu.edu.cn.

## 2.1. 位相全息图的计算

设物光波和参考光波在全息面上的表达式分别为

$$O(x, y) = O_0(x, y) \exp(j\varphi_0(x, y)), \quad (1)$$

$$R(x, y) = R_0(x, y) \exp(j\varphi_R(x, y)), \quad (2)$$

则在全息面上形成的干涉场的位相为

$$\varphi_H(x, y) = \varphi_0(x, y) - \varphi_R(x, y). \quad (3)$$

为了制成位相全息图,设物光波振幅和参考光波在全息面上的振幅为常数,对物光波信息位相的进行编码就可以得到一幅位相全息图,离散表达式为

$$\varphi_H(k, l) = \varphi_H(x, y) \times \text{rect}\left(\frac{x}{H}, \frac{y}{W}\right) \times \sum_k \sum_l \delta(x - k\Delta x, y - l\Delta y) \quad (4)$$

式中,  $-M/2 \leq k \leq M/2 - 1$ ,  $-N/2 \leq l \leq N/2 - 1$ ,  $M, N$  为  $x, y$  方向上的像素总数,  $\Delta x, \Delta y$  分别为全息面上的采样间隔,  $H, W$  分别为全息记录面的高度和宽度.

## 2.2. 光电器件承载位相全息图方法

空间光调制器(SLM)是一种对光波的空间分布进行调制的器件,可以改变光的振幅、位相、偏振态等<sup>[17,18]</sup>.本研究采用了德国 HOLOEYE 公司的反射式 LC-SLM(型号为 LC-R2500),利用其灰度-位相的调制特性来实现位相全息图的承载.

图 1 所示为 LC-R2500 在入射光波长为 632.8 nm 时测得的幅值和位相调制特性曲线<sup>[19]</sup>.由图 1 (a)可知 LC-SLM 对光的位相调制量与灰度值成一一对应关系.因此可以把 (4) 式得到每一点的位相值转化为相应的灰度值.

在实验过程中,将转化得到的灰度值图片加载到 SLM 上,当相干光照射到 SLM 上后,SLM 每个像素上的液晶将会根据灰度值大小对该像素上的光进行位相调制,而不改变其幅值,从而可以把全息面上的位相恢复出来,进而再现出相应的物信息.

## 3. 位相全息图光电再现像的优化

LC-SLM 本身也是一种光栅,当用其进行位相全息图光电再现时,与传统的位相全息图再现有所不同.

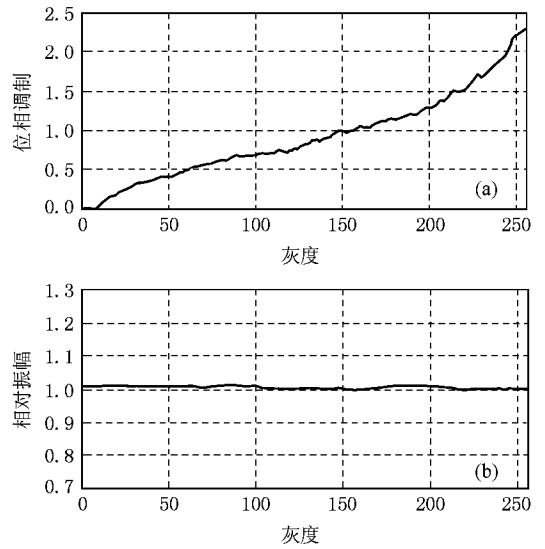


图 1 液晶空间光调制器调制特性曲线 (a) 灰度-位相调制特性 (b) 灰度-振幅调制特性

## 3.1. 位相全息图光电再现理论分析

当相干光束入射到 SLM 表面,光波受到调制后并发生衍射,在远场可以观察到衍射图样.当 SLM 不加载任何信号时,SLM 相当于一个周期排列的二维矩形光栅.以一维光栅的分析方法对其成像规律进行分析.

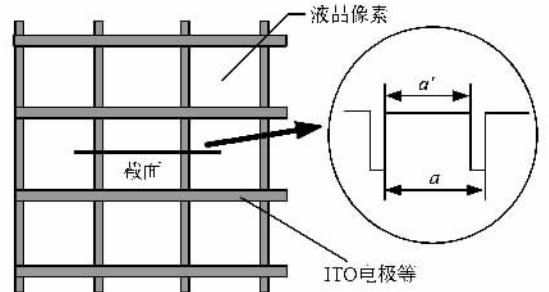


图 2 液晶空间光调制器微结构示意图

LC-R2500 的像素大小为  $19 \mu\text{m}$ ,开口率为 93%,图 2 所示为结构示意图,图中局部放大区域为一维截面,其中  $a$  为像素间隔, $a'$  为像素的有效长度,由开口率定义可计算得  $a/a' = 1.0370$ .其一维光栅衍射图样如图 3 中单缝衍射包络所示,由像素有效长度  $a'$  决定.取  $\sin\theta/\lambda$  为横坐标, $\theta$  为衍射角,可知单缝衍射中央亮区的宽度为  $2/a'$ ,次级亮纹宽度均为  $1/a'$ .由光栅方程可知,干涉极大产生的条件需满足光栅方程<sup>[20]</sup>

$$a \sin \theta = k \lambda, \quad (5)$$

式中,  $a$  为光栅的周期(像素间隔), 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  $\pm k/a, k=0, 1, 2, \dots$

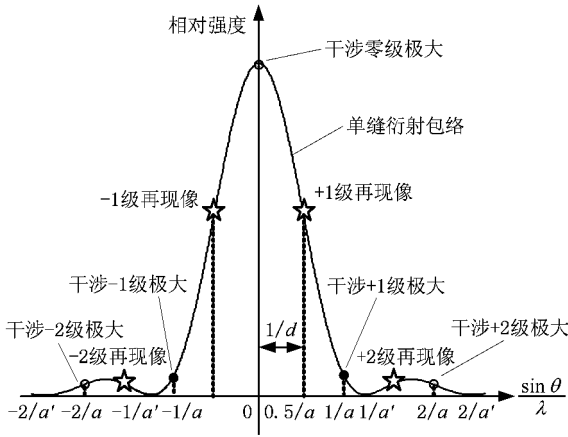


图 3 液晶空间光调制器衍射成像位置示意图

在 SLM 上加载一幅位相全息图, 再现的各级衍射像处于各相邻干涉级极大之间, 其中心位置如图 3 中“空五角星”所示, 位置坐标为  $\pm k/2a, k=1, 3, 5, \dots$  这些再现像的能量受到单缝衍射图样的调制. 在二维情形下, 其中零级附近有四个再现像能量较大, 其余的再现像能量都较小. 在这种情况下位相全息图的光电再现虽能够得到四个相同且能量比较高(相对于同一图中其他衍射级次)的一级再现像, 但是光能没有得到充分利用. 在实际情况下我们只希望得到一个能量高的像, 因此考虑利用数字闪耀光栅把其中的一个像闪耀到干涉零级上, 使其充分利用光能.

### 3.2. 闪耀光栅的特性及其对光电再现像的优化方法

闪耀光栅是一种基本的衍射光学器件, 通常为反射型位相光栅, 一般以  $2\pi$  为周期对光波的位相进行调制. 其主要用来重新调整光的衍射方向, 使能量集中特定能量级上, 具有极高的衍射效率; 另外闪耀光栅还具有很好的分光作用, 广泛应用于菲涅尔透镜、光谱仪等光学器件中.

#### 3.2.1. 二元闪耀光栅特性

如图 4 所示, 为二元闪耀光栅的结构示意图, 光栅的周期为  $d$ , 每个周期由  $N$  个台阶组成,  $N$  一般取  $2^k, k=1, 2, 3, \dots$  每个台阶的宽度为  $d' = d/N$ , 闪耀角为  $\gamma$ , 每个台阶的高度为  $\Delta h$ . 当相干光垂直入射到光栅的宏观表面  $AB$  时, 光波到达台阶微观

反射面时将被反射, 出射时由于光波受到周期的位相调制而发生方向改变, 也就产生了光的衍射角. 在此过程中, 可以把每一个台阶看作一个完全透光的单缝, 台阶面通过光程差实现对光波的相位调制.

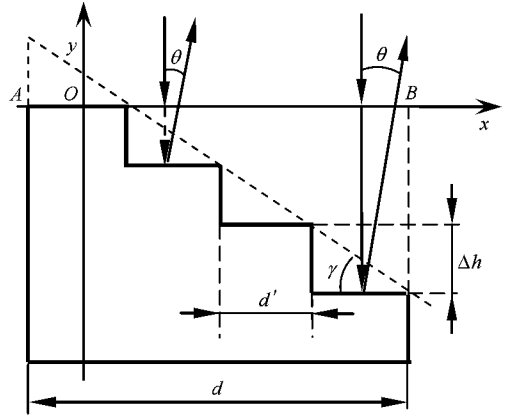


图 4 二元闪耀光栅示意图

图 4 所示二元闪耀光栅远场复振幅分布为<sup>[21]</sup>

$$\tilde{E} = \sum_m d' \text{sinc}(d'u) \frac{\sin N\pi(u - u_0)d'}{\sin\pi(u - u_0)d'} \frac{1}{d} \delta\left(u - \frac{m}{d}\right), \quad (6)$$

式中,  $u_0 = \frac{2\sin\gamma}{\lambda}, u = \frac{\sin\theta}{\lambda}, \theta$  为衍射角.

由上式可知, 二元闪耀光栅的夫琅和费衍射的复振幅分布与普通振幅型光栅的复振幅分布类似, 是单缝衍射和多缝干涉的共同结果. 单缝衍射极大的位置由  $u_0$  决定, 各级干涉的位置由  $m/d$  决定. 若单缝衍射极大位置与干涉一级重合, 即

$$u_0 = \frac{2\sin\gamma}{\lambda} = \frac{1}{d}. \quad (7)$$

可得  $2d\sin\gamma = \lambda$  称之为闪耀条件. 其物理意义为: 当光垂直于数字闪耀光栅宏观面  $AB$  入射, 被光栅面反射后再出射, 整个过程在  $A, B$  处产生的光程差为一个波长.

由上述分析可得: 当闪耀光栅满足闪耀条件时, 闪耀光栅的作用相当于把光的能量进行了搬移, 其搬移量为  $1/d$ .

#### 3.2.2. 数字闪耀光栅优化光电再现像的方法

由于计算机可以控制 LC-SLM 对光的调制性能, 根据二元闪耀光栅台阶结构特性, 可以方便地在 LC-SLM 上实现二元闪耀光栅, 我们称之为数字闪耀光栅.

根据 3.2.1 分析, 若要利用 LC-SLM 实现数字闪耀光栅并且满足闪耀光栅条件, 要求数字闪耀光栅

在一个周期内对光波的最大调制量为  $2\pi$ . 在 LC-SLM 调制特性曲线中, 仅利用调制范围在 0 到  $2\pi$  间的一段曲线.

由 2.1 可知, 离散化后的全息图像素总量为  $M \times N$ , 因此在位相全息图中加载数字闪耀光栅时, 闪耀光栅像素总量也应为  $M \times N$ . 二维数字闪耀光栅的数学表达式为

$$\varphi_B(k, l) = \frac{2\pi}{T} \text{mod}(bk + cl, T), \quad (8)$$

式中,  $-M/2 \leq k \leq M/2 - 1$ ,  $-N/2 \leq l \leq N/2 - 1$ ,  $T$  为数字闪耀光栅的周期, 取  $T = k \text{pixels}$ ,  $k = 2, 3, 4, \dots$ . 取不同的  $b, c$  值可以得到不同方向的数字闪耀光栅, 取不同  $T$  值可以得到不同闪耀角的数字闪耀光栅. 由 2.1 可知, 原位相全息图的相位值为  $\varphi_H(k, l)$ , 加载数字闪耀光栅后的位相大小为

$$\mathcal{T}(k, l) = \varphi_H(k, l) + \varphi_B(k, l), \quad (9)$$

式中  $\mathcal{T}(k, l)$  的最大值可能大于  $2\pi$ , 由二元光学的基本知识可知, 只要将  $\mathcal{T}(k, l)$  对  $2\pi$  取余, 最后得到全息面上位相分布为

$$T'(k, l) = \text{mod}[\varphi_H(k, l) + \varphi_B(k, l), 2\pi] \quad (10)$$

根据 2 中所述方法制作位相全息图, 并在全息图中加载数字闪耀光栅, 参数取  $b = 1, c = 0, T = 2 \text{pixels}$ , 相当于加周期为两个像素的竖直槽向的数字闪耀光栅.

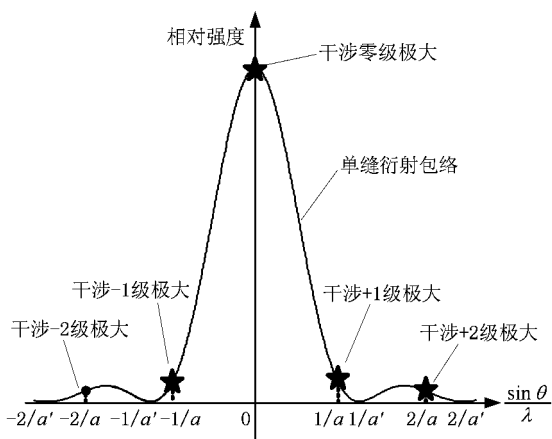


图 5 加载数字闪耀光栅后再现像位置示意图

加载一维数字闪耀光栅后的再现像位置如图 5 所示. 与图 3 相比, 再现像将发生水平方向偏移(再现像移动方向与加载的数字闪耀光栅的槽面法向有关), 由 3.2 节的分析可知再现像移动的距离为  $1/d = 0.5/a$ , 移动后像的位置为  $\pm k/a, k = 0, 1, 2, \dots$ , 如图 5 中“实五角星”所示. 与图 3 中再现像位置对比

可知, 闪耀光栅把图 3 中的一个一级衍射像闪耀到图 5 所示的干涉零级上, 同时其余各级衍射像也发生了相应的移动. 图 5 中只画出了四个与图 3 中“空五角星”相对应的“实五角星”, 而事实上在其他干涉极大处也有衍射像存在, 但其能量由于受单缝衍射图样的调制而显得较弱.

### 3.2.3. 再现像的能量分析

先考虑一维情形, 衍射光强度分布应为复振幅的平方, 则图 3 中单缝衍射强度分布为

$$I = \text{sinc}^2\left(\frac{a' \sin\theta}{\lambda}\right). \quad (11)$$

不妨设图 3 中 +1 级衍射像被闪耀到图 5 所示的干涉零级上, 其横坐标为  $0.5/a$ , 即  $\sin\theta/\lambda = 0.5/a$ , 将其代入(11)式, 得 +1 级再现像的能量

$$I = \text{sinc}^2\left(\frac{a'}{2a}\right). \quad (12)$$

由于  $a/a' = 1.037$ , 可得  $I = 0.4345$ . 与图 5 对比可知, 当 +1 级再现像被闪耀至干涉零级极大处时, 其横坐标变为“0”. 根据(11)式可计算出, 此时 +1 级再现像强度变为“1”(即单缝衍射的归一化最大强度), 该强度是原来的 2.302 倍.

由图 2 分析可知, 液晶空间光调制器为二维栅格结构, 其夫琅禾费衍射场的再现像与各级干涉极大的强度受到两个单缝衍射包络的正交耦合调制. 与图 3、图 5 的一维情形类似, 考察 (+1, +1) 级再现像, 其位置坐标为  $(0.5/a, 0.5/a)$ , 则其能量为

$$I = \text{sinc}^2\left(\frac{a'}{2a}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{a'}{2a}\right), \quad (13)$$

计算得  $I = 0.1888$ . 在加载了竖直及水平槽向的数字闪耀光栅后, 不妨设 (+1, +1) 级再现像被闪耀至干涉零级极大处, 其横坐标变为  $(0, 0)$ . 相应地, 其强度变为“1”, 该强度是原来的 5.297 倍.

## 4. 实验结果与分析

为了验证上面分析的正确性, 我们设计了如图 6 所示的全息图光电再现装置. 其中, 1 为半导体激光器(波长 635 nm, 功率为 150 mW); 2 为扩束透镜(10 倍显微物镜); 3 为起偏器; 4 为凸透镜(焦距  $f = 160 \text{ mm}$ ); 5 为计算机(用来控制 LC-SLM 及全息图输入); 6 为 CGH 位相全息图; 7 为反射式液晶空间光调制器(LC-R2500, 分辨率为  $1024 \times 768$ ); 8 为观察屏; 9 为光电再现像.

光经由半导体激光器发出, 经扩束透镜扩束后

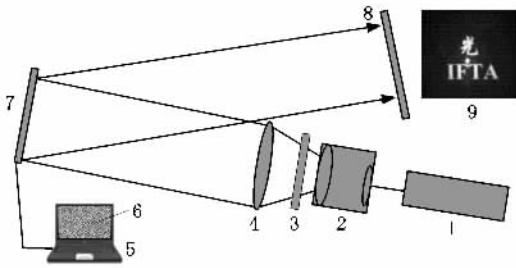


图 6 全息光电再现装置示意图



图 7 原图像

再经起偏器,使光具有一定的偏振态从而获得 SLM 的调制特性,凸透镜用来控制光的会聚角,然后光入

射到已经加载位相全息图的 SLM 上,其对光进行调制后衍射成像.然后用 CCD(像素总量为  $1280 \times 1024$ )记录结果.

图 7 所示为原图像,利用 2.1 介绍的原理制作的傅里叶变换位相全息图如图 8(a)所示,然后在全息图中加载竖直槽向的数字闪耀光栅(参数为  $b = 1, c = 0, T = 2 \text{ pixels}$ ),得到的位相全息图模式如图 8(b)所示,若在图 8(b)的基础上再加载水平槽向的数字闪耀光栅(参数为  $b = 0, c = 1, T = 2 \text{ pixels}$ ),则得到模式为图 8(c)所示的位相全息图.

利用图 6 所示光路对图 8(a)所示位相全息图进行光电再现,由 CCD 采集,结果如图 9(a)所示.从再现结果中可以看出,当直接将一幅位相全息图加载到 SLM 上进行光电再现时,根据 3.1 节的分析,二维情况下,在观察面内可得到分布在 4 个不同区域内的亮度相同的 4 个一级衍射像,其余各级衍射像亮度较低.在这种情况下虽然得到光电再现像,但 4 个同级衍射像分占了光的衍射能量,造成了单个像的能量降低.

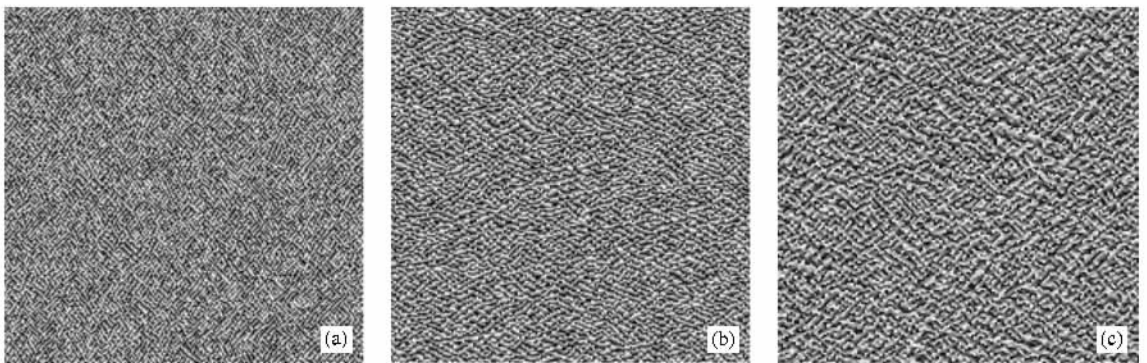


图 8 加载闪耀光栅对位相全息图模式的影响 (a)未加载闪耀光栅的位相全息图 (b)加载竖直槽向数字闪耀光栅后的位相全息图 (c)在(b)的基础上加载水平槽向数字闪耀光栅后的位相全息图



图 9 位相全息图光电再现像 (a)图 8(a)的再现像 (b)图 8(b)的再现像 (c)图 8(c)的再现像

对图 8(b)所示的位相全息图进行光电再现,并用 CCD 记录光电再现的结果如图 9(b)所示.根据 3.2.2 分析,加载竖直槽向的数字闪耀光栅(参数为  $b=1, c=0, T=2$  pixels)使观察屏上四个再现像在水平方向发生了偏移(偏移量为  $0.5/a$ ),由于单像素衍射图样对能量的调制作用,在观察屏上可以得到两个较亮的像,其他的像能量较弱.在采集过程中 CCD 的参数及光路的各种参数均保持不变,可以看到光电再现像的能量得到一定的提高.

对图 8(c)所示的位相全息图对其进行光电再现,用 CCD 记录光电再现的结果如图 9(c)所示.对比图 9(b)我们发现,光电再现像在竖直方向发生偏移,由于在全息图中加载竖直和水平槽向的数字闪耀光栅的周期均为  $T=2$  pixels,使单一再现像的中心移到干涉零级位置.同样由于单缝衍射图样对能量的调制使只有一个能量高且清晰的像.在记录过程中仍然保持 CCD 参数及光路参数不变,可见单个衍射像的能量得到了明显的提高.由 3.2.3 分析可知,经过加载竖直槽向闪耀光栅后,光电再现像的强度是原始再现像强度的 2.302 倍.单一再现像的能量比加载数字闪耀光栅前提高了 130.2%.同理,经过依次加载竖直槽向和水平槽向的闪耀光栅后,最终光电再现像强度则是原始再现像的 5.297 倍,理论上使单一再现像的能量比未加载数字闪耀光栅时提高了 429.7%.

本文实验中,对图 9(a)中左上角字母“T”、图 9(b)上部字母“T”及图 9(c)中的字母“T”的笔画所在的像素区域分别计算灰度平均值,得到的灰度均值分别为 41.2, 121.1 和 212.0. 相对于图 9(a),图 9

(b)和图 9(c)中字母“T”的灰度值分别提高了 193.9%和 414.6%.测量结果与理论分析结果基本相符.测量误差主要与所选区域的位置和大小、CCD 的非线性、激光散斑等因素有关.

## 5. 结 论

位相全息图具有较高的衍射效率,利用液晶空间光调制器位相调制特性可以实现位相全息图的动态光电再现,且能够消除共轭像的影响.针对位相全息图光电再现中出现的单个衍射像能量较低的问题,通过在位相全息图中加载数字闪耀光栅,可以有效地提高单个衍射像能量.理论分析表明,在其他条件不变的情况下,加载竖直(或水平)槽向周期为 2 pixels 的数字闪耀光栅可使单一衍射像的能量提高 130.2%,而加载竖直及水平槽向周期均为 2 pixels 的数字闪耀光栅可使单一衍射像的能量提高 429.7%.实验结果验证了该方法能有效改善全息光电再现系统的光能利用效率,提高单一再现像的能量.此外,通过改变所加载数字闪耀光栅方向及其周期,还可以控制位相全息图光电再现像位置及能量大小,有利于提高全息光电显示的灵活性和动态效果.

在光电再现过程中可发现观察屏中间存在残留零级斑,主要原因是:1) LC-SLM 调制特性曲线测量误差造成位相全息图到灰度图的映射关系误差的影响;2) 实验所使用的 LC-SLM 填充率为 93%,剩下的 7%带来的零级残留;3) LC-SLM 表面保护玻璃对光的反射和衍射的影响.后续工作中将研究如何消除残留零级斑对再现像的影响.

[1] Su X Y, Li J T 1999 *Information optics* (Beijing: Science Press) p144 (in Chinese) [苏显渝、李继陶 1999 信息光学(北京:科学出版社)第 144 页]

[2] Tricoles G 1987 *Appl. Opt.* **26** 4351

[3] Li M, Larsson A, Eriksson N, Hagberg M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1516

[4] Kirsch J C, Gregory D A, Thie M W, Jones B K 1992 *Opt. Eng.* **31** 963

[5] Toenaye J L B, Dupont L 1997 *Appl. Opt.* **36** 1730

[6] Ge A M, S Zh, Xu K Sh 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2481 (in Chinese) [葛爱明、隋展、徐克 2003 物理学报 **52** 2481]

[7] Liu Y J, Xuan L, Hu L F, Cao Zh L, Li D Y, Mu Q Q, Lu X H 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 1682 (in Chinese) [刘永军、宣丽、胡立发、曹召良、李大禹、穆全全、鲁兴海 2005 光学学报 **25** 1682]

[8] Love G D 1997 *Appl. Opt.* **36** 1517

[9] Chen H X, Sui Z, Chen Z P 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 1108 (in Chinese) [陈怀新、隋展、陈祯培 2001 光学学报 **21** 1108]

[10] Liu B H, Zhang J 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 899 (in Chinese) [刘伯晗、张健 2006 中国激光 **33** 899]

[11] Ren X Y, Cheng X, Liu X, Han Y Y, Guo Ch Sh 2005 *Acta Phot. Sin.* **25** 110 (in Chinese) [任秀云、程欣、刘轩、韩玉晶、国承山 2005 光子学报 **25** 110]

[12] Zhang X J, Liu X, Li H F 2007 *J. Zhejiang University (Engineering Science)* **41** 1519 (in Chinese) [张晓洁、刘旭、李海峰 2007 浙江大学学报(工学版) **41** 1519]

[13] Barnes T H, Eijun T, Matusda K, Ooyama N 1989 *Appl. Opt.* **28** 4845

[14] Amako J, Sonohara T 1991 *Appl. Opt.* **30** 4622

- [ 15 ] Guo C S , Zhen Y R , Wang H T , Wang Y R , Cai L Z 2003 *Appl. Opt.* **42** 6975
- [ 16 ] Baker K L , Stappaerts E A 2006 *Opt. Lett.* **31** 733
- [ 17 ] Hu L F 2005 *Chin. J. Liq. Cryst. and Disp.* **20** 93 ( in Chinese )  
[ 胡立发 2005 液晶与显示 **20** 93 ]
- [ 18 ] Esener S , Horner J L , Johnson M 1992 *Appl. Opt.* **31** 3879
- [ 19 ] [http://www.holoeye.com/download\\_area.html](http://www.holoeye.com/download_area.html)
- [ 20 ] Tian Q , Liao Y B , Sun L Q 2006 *Engineering optics* ( Beijing : Tsinghua University Press ) p234 ( in Chinese ) [ 田 芊、廖延彪、孙利群 工程光学(北京:清华大学出版社)第 234 页 ]
- [ 21 ] Yu D Y , Tan H Y 2006 *Engineering optics* ( Beijing : Mechanical Industry Press ) p365 ( in Chinese ) [ 郁道银、谈恒英 2006 工程光学(北京:机械工业出版社)第 365 页 ]

## Optimization of optoelectronic reconstruction of phase hologram by use of digital blazed grating<sup>\*</sup>

Yu Ying-Jie<sup>†</sup> Wang Tao Zheng Hua-Dong

( Department of Precision Mechanical Engineering , Shanghai University , Shanghai 200072 , China )

( Received 21 July 2008 ; revised manuscript received 26 September 2008 )

### Abstract

The utilization efficiency of light energy is affected by the multi-order images during the reconstruction of holograms based on liquid crystal spatial light modulator ( LC-SLM ) , which leads to the low intensity of single image . A novel method is proposed to improve the diffraction efficiency of single reconstructed image by synthesizing phase hologram and digital blazed grating . The property and principle of wave-front modulation are analyzed by use of digital blazed grating as diffractive optical element ( DOE ) . The effect of digital blazed grating on the reconstructed image of phase hologram by use of LC-SLM is also described . Holographic optoelectronic display system based on LC-SLM is set up for phase hologram reconstruction . Theoretical analysis shows that , the intensity of single reconstructed image is increased by 130.2 per cent by adding digital blazed grating with period of 2 pixels in vertical or horizontal direction , and 429.7 per cent with the same period of digital blazed grating in vertical & horizontal directions . The experimental result also verifies that , by the proposed method , the energy intensity of single reconstructed image is increased and the utilization efficiency of light energy is improved .

**Keywords** : electro-holographic reconstruction , phase hologram , digital blazed grating , liquid crystal spatial light modulator ( LC-SLM )

**PACC** : 4240J , 4225

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60772124 ) , the Key Technologies R&D Program of STCSM ( Grant No. 075115001 ) , and the Shanghai University Innovation Fund for Graduates ( Grand No. Shucx080215 ) .

<sup>†</sup> E-mail : yingjieyu@staff.shu.edu.cn .