

文章编号: 0258-7025(2004)06-0693-05

液晶光调制计算全息相移器

荣振宇¹, 国承山^{1,2}, 张 莉¹, 刘 轩¹, 任秀云¹, 王慧田²

(¹ 山东师范大学物理系, 山东 济南 250014; ² 南京大学固体微结构国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要 在同轴相移数字全息实验中, 相移量的准确性、稳定性对实验结果起着很重要的作用, 因此相移器的研究已成为相移数字全息实验研究中的一个重要内容。在以往应用的相移器中, 大多是通过机械驱动改变光程来实现相移, 这种方法会使光路变得复杂。提出了一种新型的相移器——液晶光调制计算全息相移器, 它将大大简化光路的设计, 同时避免机械运动, 实现相移量的全数字化控制。该相移器是基于计算全息原理和傅里叶变换的位移定理所提出的, 它将液晶显示器(LCD)作为光学显示元件, 通过适当改变显示在液晶显示器上的计算全息图的编码, 使其同时实现波面变换和相移。给出了液晶光调制计算全息相移器的理论分析, 并通过实验测量表明其相移量的波动范围仅在 0.036 rad 以内, 具有很高的精确性、可重复性和稳定性, 最后验证了该相移器用于同轴相移数字全息实验的可行性。

关键词 信息处理技术; 计算全息; 数字全息; 相移器

中图分类号 TB 877 **文献标识码** A

Computer-Generated Holographic Phase Shifter with Liquid Crystal Display

RONG Zhen-yu¹, GUO Cheng-shan^{1,2}, ZHANG Li¹,

LIU Xuan¹, REN Xiu-yun¹, WANG Hui-tian²

(¹ Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China
² National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract Exact phase shifts are very important for phase-shifting digital holography or interferometry. Some phase-shifting methods suitable for different applications have been proposed; but most of them often require precise moving or rotating drivers. A new digital phase shifter with liquid crystal display (LCD) is proposed in this paper. In this method, the phase shifts needed in digital holography are induced by changing encodes of the computer-generated holograms (CGH) displayed on the LCD. The advantage of this method is that the phase shifts can be controlled digitally and no any precise mechanical moving or rotating element is required. Both the theoretical analysis and experimental results demonstrate the feasibility of this approach. The phase stability of the LCD as a phase shifter is studied experimentally. The experiments showed that the range of the phase fluctuates is below about 0.036 rad.

Key words information processing technique; computer-generated holography; digital holography; phase shifter

1 引 言

数字全息曝光时间短, 没有湿处理过程, 具有方便、灵活的特点, 对于记录过程中引入的各种诸如像差、噪声等不利因素可以通过编程来消除其影响, 使得数字再现像的质量大大提高^[1~3]。更为重要的

是, 数字全息再现过程可同时获得被记录物体再现像的振幅和相位分布, 而不只是光强分布, 由此可得到被记录物体的表面亮度和形貌分布等信息, 可方便地用来进行多种测量, 诸如形貌测量、变形测量、振动测量、生物粒子监视、构件缺陷检测等^[4]。

由于记录材料分辨率的限制, 数字全息常常采

收稿日期: 2003-03-10; 收到修改稿日期: 2003-05-06

作者简介: 荣振宇(1978—), 男, 山东师范大学现代光学实验室硕士研究生, 主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: wdrzhy@sina.com.cn

用同轴装置,并利用相移的方法消除它的自相关像和共轭像,从而再现出所需要的原始像。这种相移技术不仅可以有效地消除自相关像和共轭像,而且可以提高再现像的分辨率和扩大视场^[5~7]。在此项技术中,最为关键的就是相移器,它的精度、可重复性以及稳定性都直接影响测量精度及再现像的成像质量。

目前,实现相移的方法很多,主要有压电陶瓷晶体法、光栅相移法、偏振相移法、倾斜玻璃法等^[8]。但是,这些方法都需要有能够精确进行移动或旋转的驱动装置。本文提出并研究了一种可以避免机械运动且能够精确产生特定相移量的新方法,即利用实时显示在高分辨液晶空间光调制器上的计算全息图产生特定光波并实现特定的相移,我们称其为液晶光调制计算全息相移器(CGH-PS)。如果将整个实验过程预先编好程序,就可方便、快速地记录多幅相移干涉图。同以往的方法相比,此方法的优点是在相位的改变过程中无机械操作,全部数字控制,可重复性好,并能同一器件上同时实现波面变换和相移两种操作。

2 理论分析

计算全息相移器是基于液晶显示器(LCD)的显示性能和计算全息的灵活性所提出的。液晶显示器作为一种空间光调制器(SLM),无论是振幅调制还是位相调制,它都是利用液晶的电光效应来实现对光波的调制。根据物波形成方式或再现光路的不同,计算全息图可分为计算傅里叶变换全息图、计算像全息图和计算菲涅耳全息图等类型。为了便于光学再现,实验上常采用计算傅里叶变换全息图。利用液晶显示器的计算机接口,把一幅编码图样显示到液晶显示器上,并将其放入光路中用一束相干平面波垂直照射,液晶显示器就会按照所编码的信息来调制光波。在它的透射光场中沿正一级衍射方向的分量波将再现原始波,沿直透方向的分量波将具有平面波前,在另一侧的负一级衍射分量将再现原始波的共轭波;另外还对称地分布着一些高级衍射波。当透射光经过一个傅里叶变换透镜之后,在透镜的后焦面的中心就会出现一个亮点,两边对称地分布着正负一级像和高级次像。同时,由傅里叶变换的位移定理可知,当液晶显示器上显示的计算全息图的编码图样发生适当位移时,它的频谱面上的非零级衍射项就会相应地携带上相移因子,且相移

因子的大小是由位移量决定的。依据此原理,就可以通过实时地改变液晶显示器上显示的编码图,使之发生特定位移,从而实现它的频谱面上的非零级项的相移。因此,只要提取出它的正一级项或负一级项,就既可以实现波面变换,又可以实现定量的相移操作。

计算全息图的编码方法很多,主要有迂回相位法,修正离轴参考光法、二元脉冲密度编码法和相息图法等。下面以李威汉^[9]的四阶迂回相位法为例,具体说明液晶光调制计算全息相移器的原理。假设所要编码的复振幅为 $A(x,y)\exp[i\varphi(x,y)]$,用实部和虚部可表示为

$$A(x,y)\exp(i\varphi) = A(x,y)\cos(\varphi) + iA(x,y)\sin(\varphi) \quad (1)$$

在四阶迂回相位法中,抽样后的每一个单元被等分为四个部分,分别对应于复平面中实轴和虚轴的四个分量。用第一部分内的开孔面积大小来表示复振幅正的实部分量,第二部分的开孔面积大小来表示复振幅正的虚部分量,用第三、第四部分的开孔面积大小来分别表示复振幅负的实部分量和负的虚部分量。由于任意单元的相邻两部分(每一单元的第四部分和同一单元的第一部分相邻)之间的位相差为 $\pi/2$ (以一级衍射光作为再现波的情况),所以当需要产生 $\pi/2$ 或其整数倍的相移时,只需将每一单元中的各部分顺次向后移动一个或几个部分即可。由(1)式以及位移定理可知,编码图案的这种变化除了在其非零级频谱项上增加一常数相位因子外,对再现波面不会有任何其他影响。对于四阶迂回相位编码计算全息图,上述操作可以重复实现 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 顺序的定量相移,这种相移操作也正是常用的四步相移干涉计量术和四步同轴相移数字全息中所需要的。实际上,一个复振幅最多只需两个分量就可以表示出来,所以在实际编码中,每一单元最多也只需开两个孔。另外也可以采用灰度值的方法来表示复振幅的四个分量的大小。理论上,采用 256 阶灰度在同样的空间尺寸的情况下其量化效果要好于以开孔大小来表示相应分量大小的方法。

下面结合四步相移同轴数字全息记录过程,进一步说明液晶光调制计算全息相移器的原理与使用。图 1 为利用该方法的同轴相移数字全息系统实验光路图。如图所示,一束被准直扩束的激光经分光镜 BS1 产生两束光,经 M_1 反射的光照射物体 O 作为物光; M_2 所反射的光照射显示有编码图样的液晶显示器,产生所需要的携有特定相移的参考光。

由于液晶显示器的抽样会造成编码图样的频谱的周期性重复,所以必须在液晶显示器的频谱面上放置一个具有适当通光孔径的滤波器 F 滤出所需要的再现波前。然后两束光波再经 BS2 实现同轴叠加,产生无透镜傅里叶变换全息图。干涉所得的全息图由 CCD 记录并存入计算机。在四步相移法中,所需的相移角 δ_n 分别是 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 。利用上述四阶迂回相位编码方法设计四幅计算全息图来实现所需的相移。图 2 给出了这四幅计算全息图同一编码单

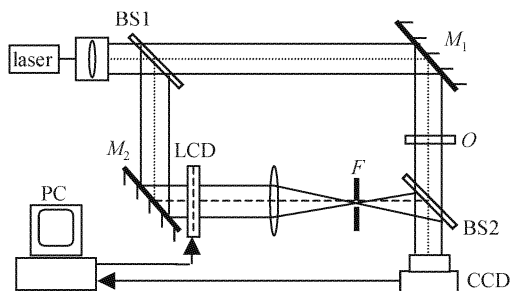


图 1 利用液晶光调制计算全息相移器作为相移器件的同轴相移数字全息的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of in-line digital holography using CGH-PS as the phase-shifting device

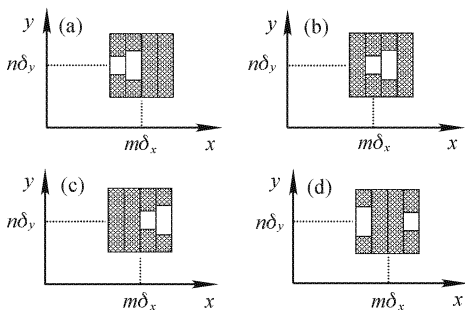


图 2 利用四阶迂回相位法所编码的计算全息图的一个单元

(a), (b), (c), (d) 分别表示它的相移量为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$

Fig. 2 Construction of a typical cell in phase-detour CGH and its phase shift of (a) 0 rad, (b) $\pi/2$ rad, (c) π rad and (d) $3\pi/2$ rad

元的编码示意图,其中单元尺寸为 $\delta_x \times \delta_y$ 。将这样的四幅计算全息图依次显示到液晶光调制器上,并用 CCD 记录下对应不同相移时的干涉图样 $I(x, y, \delta_n)$ 。利用以下四步相移算法^[10]

$$U(x, y) = \frac{1}{4A_r} \{ [I(x, y; 0) - I(x, y; \pi)] + i[I(x, y; \pi/2) - I(x, y; 3\pi/2)] \} \quad (2)$$

就可获得 CCD 面上的物波光场的复振幅分布。在此基础上通过计算机数值运算,就可数字再现物波

的振幅或相位分布。

实际上,由于计算全息编码方法的灵活性及多样性,选用不同的编码方法,可以产生各种不同的相移。例如,采用修正离轴干涉法,通过适当改变制作计算全息干涉图样时所用参考光的相位,可使计算全息图的再现波面产生更为精细和多样的相移,以满足不同的需要。

3 实验结果与分析

实验中所用的激光器是波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,其输出功率为 40 mW,所用的液晶显示器是 Sony LCX029 型,其像素大小为 $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$,点阵数是 1024×768 。物光波和参考光波的干涉图样由 MTV-1881 CCD 记录,该 CCD 的点阵数为 768×576 ,每一个点阵大小为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ 。实验中显示在液晶显示器上的编码图样是采用上述四阶迂回相位法对一平面波进行抽样编码的计算全息图,其每一编码单元为 $8(\text{像素}) \times 8(\text{像素})$ 。

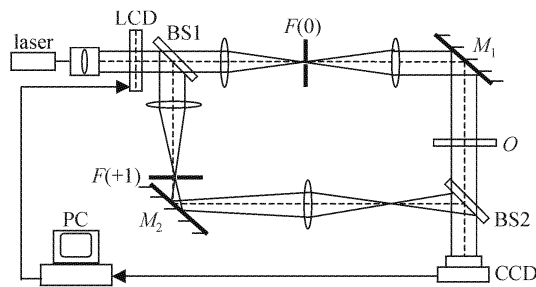


图 3 改进的利用液晶光调制计算全息相移器作为相移器件的同轴相移数字全息的实验装置

Fig. 3 Improved experimental setup of in-line digital holography using CGH-PS as the phase-shifting device

首先采用图 1 所示的实验装置测量了液晶光调制计算全息相移器产生相移的稳定性和准确性,其中物体是一个均匀透射率物体。在实验中发现,液晶显示器驱动电源的稳定性会对实验结果产生较大的影响,它的电压的波动会造成液晶显示器整体相位的漂移。但这个影响对于各衍射级次均是相同的,因此针对这一点又对图 1 的实验装置进行了改进,如图 3 所示。激光经准直扩束后直接垂直照射液晶显示器,经液晶显示器调制的衍射光再被 BS1 分为两束,在原物光支路上放一针孔滤波器滤出衍射光的直流分量,再经过一傅里叶透镜后变成平面波垂直照射物体;在原参考光支路上用另一针孔滤波器滤出所需的计算全息图的正一级(或负一级)再

现波前,再经过一成像透镜后在某一点处成像,并使得该点的位置与物体的位置关于分光镜 BS2 对称,从而也构成了无透镜傅里叶变换光路。经如此改进的光路就能在很大程度上消除由液晶显示器电源的不稳定性所带来的系统误差。在实验过程中,通过专用控制程序将事先设计好的理论相移量分别为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 的四幅计算全息图依次以每隔 25 s 的时间间隔显示到液晶显示器上,同时控制 CCD 每隔 0.5 s 记录一幅干涉图样。然后,对这一过程中连续记录下的四组共 200 幅干涉图样进行以下数据处理:首先将第一组数据进行求和平均,在平均掉各种随机噪声后作为一个衡量的标准,即认为它的相移量为零;然后测量出另外三组干涉图中的每一幅相对于第一组标准值的相移量。图 4 为所记录的干涉图样中的 4 幅(每组选一幅)。图 5 为利用所记录的干涉图通过测量所获得的正一级衍射光的实际相移曲线图。该图定量描述了液晶光调制计算全息相移器的相移-时间响应特性。其中,虚线代表在拍摄各组干涉图时的理论相移值,分别为 $0, 1.571, 3.142, 4.712$ (rad),而实心点代表从各幅干涉图实际测量出的相移量。

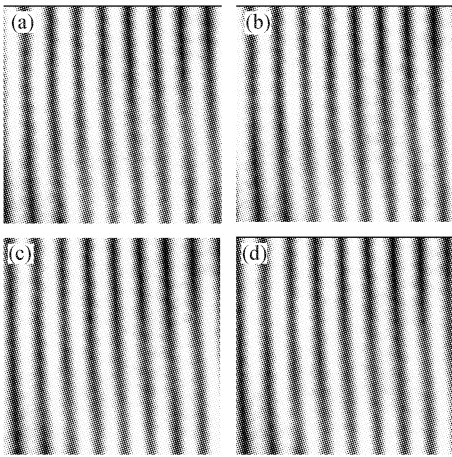


图 4 CCD 拍摄的四幅全息干涉图(每组选一幅)
其中(a),(b),(c),(d)的相移量分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$
Fig. 4 Images recorded by CCD camera with the phase-shift of (a) 0 , (b) $\pi/2$, (c) π , (d) $3\pi/2$

通过分析该曲线图可以看出以下三点:首先,液晶光调制计算全息相移器可以在极短的时间内就改变其相移量,表明它的延迟效应很小;其次,各组的实际测量值都很接近理论预定值,实测值与理论值之间的偏差大都在 0.02 rad (1.146°) 以内,说明此方法产生的相移量准确度较高;最后,它的实际测量

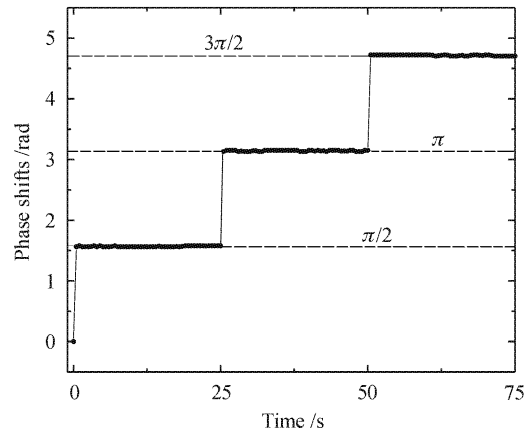


图 5 液晶光调制计算全息相移器的相移-时间响应曲线
Fig. 5 Response characteristic of phase-shifting vs time by CGH-PS

值总是在一个很小的范围内波动,其波动范围是 0.036 rad ,表明液晶光调制计算全息相移器的稳定性也良好。由所测得的数据经统计计算后得到的数据如表 1 所示。由于实验中所采用的是普通 He-Ne 激光器和普通 CCD 摄像头,也没有采取特殊的防振措施,实际测量出的相移量的微小波动及偏差与激光源的频率和输出功率的不稳定性,CCD 噪声,外界振动干扰等因素导致的相位波动具有相同的数量级。如果采用稳频激光器、低噪声 CCD 和高稳定实验环境,实验结果会更理想。

表 1 测量结果的统计数据

Table 1 Statistics of the measured phase-shifting values

Theoretical value	Mean value	Median value	Standard deviation
$\pi/2$	1.566	1.567	$8.7595e^{-3}$
π	3.116	3.116	$9.4299e^{-3}$
$3\pi/2$	4.709	4.710	$7.4147e^{-3}$

为了进一步考察液晶光调制计算全息相移器在相移数字全息实验中的可行性,我们实际进行了利用液晶光调制计算全息相移器实现相移的四步相移同轴数字全息实验。在图 3 所示的光路图中放置一透明片作为物体(繁体字“體”),CCD 平面到物体的距离 $d = 400 \text{ mm}$ 。利用 CCD 记录下对应不同相移的全息图,采用(2)式所示的四步相移算法,就可数字再现出原物波在 CCD 平面的复振幅分布。实验及其处理结果如图 6 所示。图 6(a)为用 CCD 记录的一幅全息图;图 6(b)为图 6(a)直接数字再现的结果。由此可以看出其中混有严重的共轭像和自相关

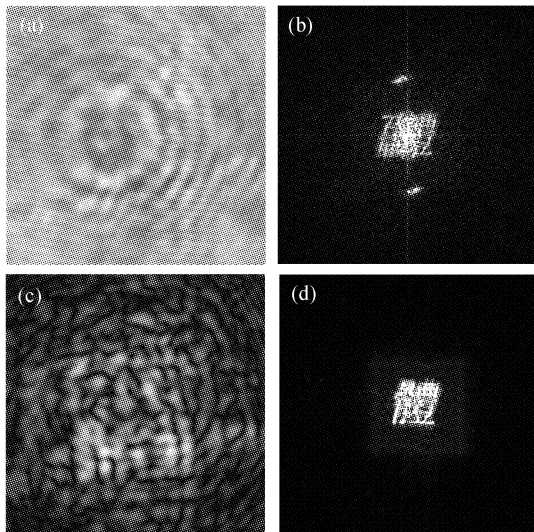


图 6 (a)为 CCD 记录的一幅全息图;(b)为(a)直接数字再现的结果;(c)为采用(2)式算法计算所得的 CCD 平面上的物波的复振幅分布;(d)为根据(2)式算法对(c)的数字再现的结果

Fig. 6 (a) One of four digital holograms recorded on CCD camera; (b) Image reconstructed directly by the hologram shown in Fig. 6(a); (c) Amplitude distribution of the object wave on CCD plane derived from four digital holograms according to Eq. (2); and (d) final image from the object wave derived according to Eq. (2)

像的影响;图 6(c)为采用(2)式算法利用四组全息图计算所得的 CCD 平面上物波复振幅分布的照片;而图 6(d)为经过相移算法的处理后得到全息图进行数字再现的结果,其共轭像和自相关像的影响得到了很好的消除,成像质量大大提高。这个结果充分证明了液晶光调制计算全息相移器完全可以应用到数字相移全息实验中。

4 结 论

利用实时显示在液晶显示器上的计算全息图作为相移器件的方法是完全可行的。这种新型的液晶

光调制计算全息相移器具有相移量完全数字化控制,定量性和重复性都较好的特点,是实现精确步进相移的良好途径。随着高分辨空间光调制技术和器件的成熟和发展,这种液晶光调制计算全息相移器可望在数字相移全息技术和干涉计量技术中得到实际应用。特别在零差干涉测量实验中,该相移器不仅可以用于产生特定相移,而且还可以同时实现零差测量所需的某些特殊波面的变换。

参 考 文 献

- 1 Liu Cheng, Li Yinzhu, Li Liangyu *et al.*. A new way to eliminate the zero-order image in digital holography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):1024~1026
刘 诚,李银柱,李良钰等. 数字全息测量技术中消除零级衍射像的方法[J]. 中国激光, 2001, **A28**(11):1024~1026
- 2 Guo Chengshan, Wang Weitian, Li Jian *et al.*. Elimination of zero-order diffraction spot in digital reconstruction of hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8):1073~1076
国承山,王伟田,李 健等. 全息图数字再现中零级衍射斑的消除[J]. 光学学报, 1998, **18**(8):1073~1076
- 3 Liu Cheng, Liu Zhigang, Cheng Xiaotian *et al.*. Spatial-filtering method for digital reconstruction of electron hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2):150~154
刘 诚,刘志刚,程笑天等. 数字滤波法再现电子全息图[J]. 光学学报, 2003, **23**(2):150~154
- 4 Liu Cheng, Li Liangyu, Li Yinzhu *et al.*. Digital holography free of zero-order diffraction and conjugate images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4):427~431
刘 诚,李良钰,李银柱等. 无直透光和共轭像的数字全息[J]. 光学学报, 2002, **22**(4):427~431
- 5 Ichirou Yamaguchi, T. Zhang. Phase-shifting digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16):1268~1270
- 6 Songcan Lai, B. King, M. A. Neifeld. Wave front reconstruction by means of phase-shifting digital in-line holography [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **173**(1):155~160
- 7 Chengshan Guo, Li Zhang, Huitian Wang *et al.*. Phase-shifting error and its elimination in phase-shifting digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(19):1687~1689
- 8 Qian Kemao, Xu Boqin, Wu Xiaoping. Phase measurement method in optical interferometry [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2001, **16**(3):239~249
钱克矛,续伯钦,伍小平. 光学干涉计量中的位相测量方法[J]. 实验力学, 2001, **16**(3):239~249
- 9 W. H. Lee. Sampled Fourier-transform hologram generated by computer [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(3):639~643
- 10 Ichirou Yamaguchi, J. Kato, S. Ohta *et al.*. Image formation in phase-shifting digital holography and applications to microscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(34):6177~6186