

# 斜入射下液晶空间光调制器纯相位调制特性研究

鲁 强<sup>1,2</sup> 盛 磊<sup>1</sup> 张 鑫<sup>1</sup> 白继清<sup>1</sup> 乔彦峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 利用 Zygo 干涉仪对斜入射下液晶空间光调制器的纯相位调制特性进行了测量。建立了斜入射下液晶空间光调制器的纯相位调制数学模型,研究了斜入射角度对相位调制特性的影响,搭建了基于 Zygo 干涉仪的测量系统,对不同入射角度下的相位调制特性进行了测量。测量结果表明:不同入射角度下相位调制量近似线性递增,入射角度越大,相位调制量递增的斜率越小;相同灰度值下,随着入射角度的增加,相位调制量逐渐减小;入射角度小于 5°时相位调制曲线几乎重合,相同灰度值下相位调制量最大相位差为 0.032λ。

**关键词** 光学设备;液晶空间光调制器;纯相位调制;斜入射;相位调制特性

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0112001

## Investigation on Pure Phase Modulation Characteristics of Liquid Crystal Spatial Light Modulator at Oblique Incidence

Lu Qiang<sup>1,2</sup> Sheng Lei<sup>1</sup> Zhang Xin<sup>1</sup> Bai Jiqing<sup>1</sup> Qiao Yanfeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The pure phase modulation characteristics of a liquid crystal spatial light modulator are measured at oblique incidence using Zygo interferometer. The establishment of a mathematical model of pure phase modulation of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence, the effects of oblique incident angle of the phase modulation characteristics, structures based Zygo interferometer measurement system, and phase modulation characteristics under various incident angles are measured. The measurement results show that, at various incident angles, phase modulation increases approximately linearly, and the larger the incident angle, the smaller the increasing slope. With the same gray scale value the phase modulation amount decreases when the incident angle increases. When the incident angle is less than 5°, phase modulation curves almost coincide, and the maximum phase difference of the phase modulation amount is 0.032λ with the same grayscale value.

**Key words** optical devices; liquid crystal spatial light modulator; pure phase modulation; oblique incidence; phase modulation characteristics

**OCIS codes** 230.3720; 060.0560; 050.1970

## 1 引 言

液晶空间光调制器(LCSLM)是利用液晶的电控双折射原理实现对空间光波的相位和强度调制,能通过旋转偏振片控制入射偏振光的偏振方向来实现对入射光的纯相位调制。LCSLM具有功耗小、可编程控制、像素高等优点,在无线激光通信、自适应光学等领域被广泛用作湍流模拟器和波前校正器<sup>[1-10]</sup>。

收稿日期: 2015-07-17; 收到修改稿日期: 2015-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(11403064, 61102023)

作者简介: 鲁 强(1989—),男,博士研究生,主要从事激光通信光学系统设计方面的研究。E-mail: luqiang52177@163.com

导师简介: 乔彦峰(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电测量方面的研究。

E-mail: qiaoyf@ciomp.ac.cn(通信联系人)

目前反射式液晶空间光调制器都是在入射偏振光垂直入射下使用的,在光路中采用分光器件(例如分光棱镜)将入射光和出射光分离,分光器件的引入会导致光强的损失,使得 LCSLM 的使用受到限制。入射偏振光以一定的角度斜入射到 LCSLM 上可以解决分光器件带来的光强损失问题,但是垂直入射下的相位调制特性不能沿用到斜入射情况,需要重新测量。传统的相位调制特性检测方法如偏光干涉法、双孔干涉法、泰曼-格林法<sup>[11-13]</sup>都是测量垂直入射下的相位调制特性,对斜入射下相位调制特性的研究很少。Panzai 等<sup>[14]</sup>利用双孔干涉法对斜入射下相位调制特性进行了研究,这种分振幅干涉方法通过读取条纹移动量反算相位调制量,环境因素对条纹的形状影响很大。虽然文章提出了一种新的条纹读取方法,但是并不能从根本上消除环境造成的条纹移动误差。叶必卿等<sup>[15]</sup>利用偏光干涉法测得了相位调制量和液晶分子倾角以及斜入射角度的关系,但是并没有得到斜入射下相位调制量随灰度值的函数曲线,而且偏光干涉法需要利用测得的光强值反算相位值,增加了计算量,同时对光强的稳定性要求较高。此外,上述两种方法都是通过 CCD 读取光强值,每个斜入射角度下的相位调制特性需要测量 256 个灰度值下的光强值,实验步骤繁琐。

基于 Zygo 干涉仪的斜入射下相位调制特性测量方法具有操作方便、数据精度高、受环境影响较小的优点,一个入射角度下的相位调制特性只需测量一次,测量工作大大简化。本文建立了 LCSLM 斜入射下纯相位调制的理论模型,介绍了 Zygo 干涉仪光路原理和测量方法,测量了斜入射下纯相位调制曲线,并对实验结果进行了分析和讨论。

## 2 斜入射下纯相位调制模型

一束线偏振光垂直入射到 LCSLM 时可以分解为寻常光 o 光和非寻常光 e 光。光波电矢量的振动方向与液晶分子光轴平行的非寻常光的折射率为  $n_e$ ;光波电矢量的振动方向与液晶分子光轴垂直的寻常光的折射率为  $n_o$ 。在电场作用下,液晶分子轴会沿电场方向旋转一个角度  $\varphi$ ,o 光的折射率不随偏转角  $\varphi$  发生变化,而 e 光的折射率会随偏转角  $\varphi$  的变化而改变,这就是液晶分子的电控双折射效应,如图 1(a)所示。偏转角  $\varphi$  可表示为

$$\varphi = \begin{cases} 0, & V \leq V_c \\ \frac{\pi}{2} - 2 \arctan \left[ \exp \left( \frac{V_c - V}{V_0} \right) \right], & V > V_c \end{cases} \quad (1)$$

式中  $V_0$  是电压值常数,  $V_c$  是阈值电压,当驱动电压大于阈值电压时液晶分子轴就会产生偏转。垂直入射时,入射光方向与液晶分子轴夹角为  $\theta(\theta = \pi/2 - \varphi)$ ,角度  $\theta$  为法线方向与液晶分子轴的夹角。此时,e 光的等效折射率为

$$n_e(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \varphi + n_o^2 \cos^2 \varphi}} \quad (2)$$

液晶空间光调制器利用液晶分子的电控双折射效应,通过改变线偏振光的偏振方向实现对入射光进行强度或者相位调制。调节线偏振光的偏振方向平行于液晶分子轴方向,LCSLM 会对入射线偏振光产生纯相位调制<sup>[16-18]</sup>,此时只有 e 光没有 o 光。e 光单次通过 LCSLM 液晶层时的相位大小为

$$\phi = \frac{2\pi d n_e(\theta)}{\lambda} \quad (3)$$

式中  $d$  是 LCSLM 的液晶层厚度, $\lambda$  是入射光的波长。液晶空间光调制器通过用户查找表(LUT)将输入灰度值与驱动电压值建立对应关系,根据(1)式,输入灰度值的改变会引起液晶分子轴的偏转,e 光的等效折射率  $n_e(\theta)$  相应改变。当对液晶空间光调制器不同像素施加不同的灰度值,液晶分子转角各不相同,由(3)式可以知道不同灰度值下 e 光的光程大小各不相同,这就是 LCSLM 纯相位调制原理。如图 1(b)所示。

(1)式和(2)式说明 e 光的等效折射率  $n_e(\theta)$  是灰度值  $h$  的函数,当对 LCSLM 施加不同的灰度值时,  $n_e(\theta_h)$  各不相同。 $h=0$  时 e 光等效折射率为  $n_e(\theta_0)$ ,以灰度值为 0 时的 e 光的光程为基准,灰度值为  $h$  时相比于灰度值为 0 的相位差如下

$$\delta_h = \frac{2\pi 2d [n_e(\theta_h) - n_e(\theta_0)]}{\lambda} \quad (4)$$

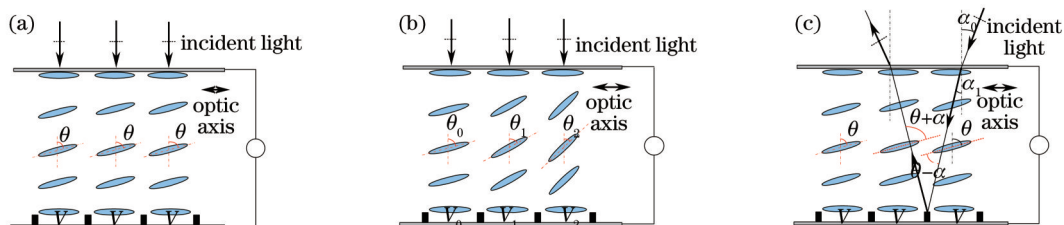


图1 LCSLM 纯相位调制原理图。(a) 相同电压垂直入射; (b) 不同电压垂直入射; (c) 相同电压斜入射

Fig.1 Modulation schematic of LCSLM pure phase. (a) Vertical incident at the same voltage; (b) vertical incident at different voltages; (c) oblique incident at the same voltage

$\delta_h$  和灰度值 0~255 的对应关系就是 LCSLM 纯相位调制特性。

当入射偏振光以  $\alpha_0$  角度斜入射时[图 1(c)], 通过液晶层的折射角变为  $\alpha_1$ , 角度  $\theta$  为法线方向与液晶分子轴的夹角, 线偏振光入射时与液晶分子轴夹角可以表示为  $\theta - \alpha_1$ , 对应折射率大小为  $n_c(\theta - \alpha_1)$ , 线偏振光出射时与液晶分子轴夹角表示为  $\theta + \alpha_1$ , 对应折射率大小为  $n_c(\theta + \alpha_1)$ 。同(4)式, 得到斜入射下纯相位调制量大小为

$$\delta_h = \frac{2\pi d[n_c(\theta_h - \alpha_1) + n_c(\theta_h + \alpha_1) - 2n_c(\theta_0)]}{\lambda \cos \alpha_1} \quad (5)$$

利用 Matlab 仿真软件得到不同灰度值下, 相位调制量随入射角度的变化曲线, 仿真中各参数为:  $n_e=1.824$ ,  $n_o=1.525$ ,  $d=3.284 \mu\text{m}$ ,  $\lambda=632.8 \text{ nm}$ , 仿真结果如图 2 所示。

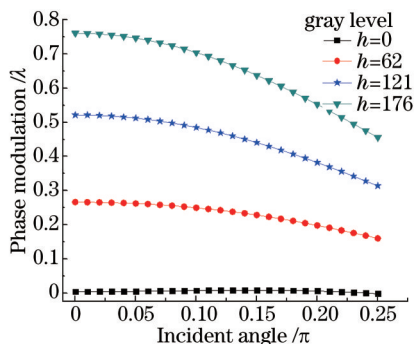


图2 相位调制量与入射角度的关系

Fig.2 Correlation between phase modulation and incident angle

从图 2 可以看出: 相同灰度值下随着入射角度的增加相位调制量逐渐变小; 相同入射角度下, 相位调制量与灰度值近似线性增大; 灰度值等于 0 时, 各入射角度下相位调制量相等; 相同灰度值下, 入射角度小于  $0.025 \pi$  时相位调制量基本不变。根据折射定律可求得斜入射下光线在液晶中的折射角度  $\alpha_1$ :

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{n_o \sin \alpha_0}{n_e} \quad (6)$$

当斜入射角度小于  $5^\circ$  时, 根据(6)式得到  $\alpha_1 \ll 2.74^\circ$ , 近似认为

$$\frac{n_c(\theta_h - \alpha_1) + n_c(\theta_h + \alpha_1)}{2} \approx n_c(\theta_h), \quad (7)$$

代入(5)式得到

$$\delta(|\alpha_0| \leq 5^\circ) \approx \delta(\alpha_0 = 0^\circ). \quad (8)$$

### 3 测量方法

基于 Zygo 干涉仪搭建了如图 3 所示的实验测量光路。所用干涉仪是 Dynafiz 动态干涉仪, 测量波长为  $632.8 \text{ nm}$ , 测量口径为  $4 \text{ inch}$  ( $1 \text{ inch}=2.54 \text{ cm}$ ), 像素为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 测量精度优于  $0.01\lambda$ 。其原理是将干涉仪的出射光斜入射到 LCSLM, 用一块反射镜将出射光按原路返回干涉仪, 形成干涉条纹实现纯相位测量。由于激光在 LCSLM 中走过的光程是实际使用中的 2 倍, 测量时将 Zygo 干涉仪系数因子设为原来的一半。测量 Holoeve 公司生产的 PLUTO-NIR-015-C 型反射式液晶空间光调制器, 像素为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ ,

像素大小  $8 \mu\text{m}$ , 液晶有效区域为  $15.36 \text{ mm} \times 8.64 \text{ mm}$ 。

干涉仪发射的准直激光到达标准平面镜 TP1 后分成两部分, 一部分光经过标准平面镜后反射回干涉仪内部, 另一部分光透射出去到达偏振片 P, 偏振片 P 将干涉仪发出的光源变成线偏振光, 偏振方向平行于 LC-SLM 液晶分子轴方向, LC-SLM 对由偏振片 P 入射的线偏振光产生纯相位调制, 并将入射线偏振光反射到标准平面镜 TP2, 平面镜 TP2 将入射光线原路返回, 再次经过 LC-SLM 反射和偏振片透射返回干涉仪, 与经过标准镜反射回来的部分光源形成干涉条纹实现相位测量。

实验测试过程如图 4 所示。对 LC-SLM 施加全幅  $h=0$  的灰度图测得测量光路的静态畸变相位图 1。静态畸变  $\delta$  包括 LC-SLM 自身 Si 基板不平引起的相位差  $\delta_L$ 、偏振片引入的相位差  $\delta_0$  以及测量环境引起的相位差  $\delta_E$  三部分。前两项误差不随时间改变, 同时由于测试过程中实验空间密闭, 外界环境相对稳定, 测试间隔时间很短, 认为第三项误差也是常量。

$$\delta = \sum \delta_i \quad (i = L, O, E). \quad (9)$$

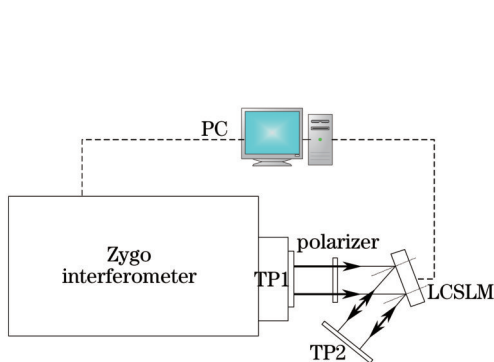


图 3 Zygo 干涉仪测量装置图

Fig.3 Experimental setup of Zygo interferometer

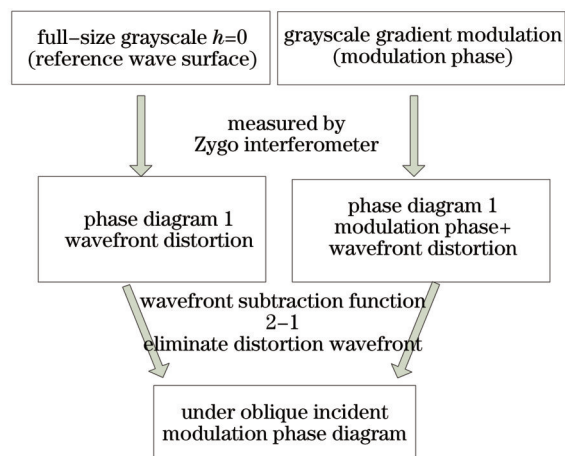


图 4 测试方法流程图

Fig.4 Flowchart of test method

对空间光调制器施加如图 5(a) 所示的灰度图, 灰度图分为左、中、右三部分, 比例为 1:3:1。左边部分灰度值都为 0, 中间部分灰度值为 0~255 线性递增, 右边部分灰度值都为 255, 测得此时的相位图 2, 如图 6 所示。测得的相位图 2 包括由灰度图产生的纯相位调制量和上面测得的静态畸变图两部分。利用干

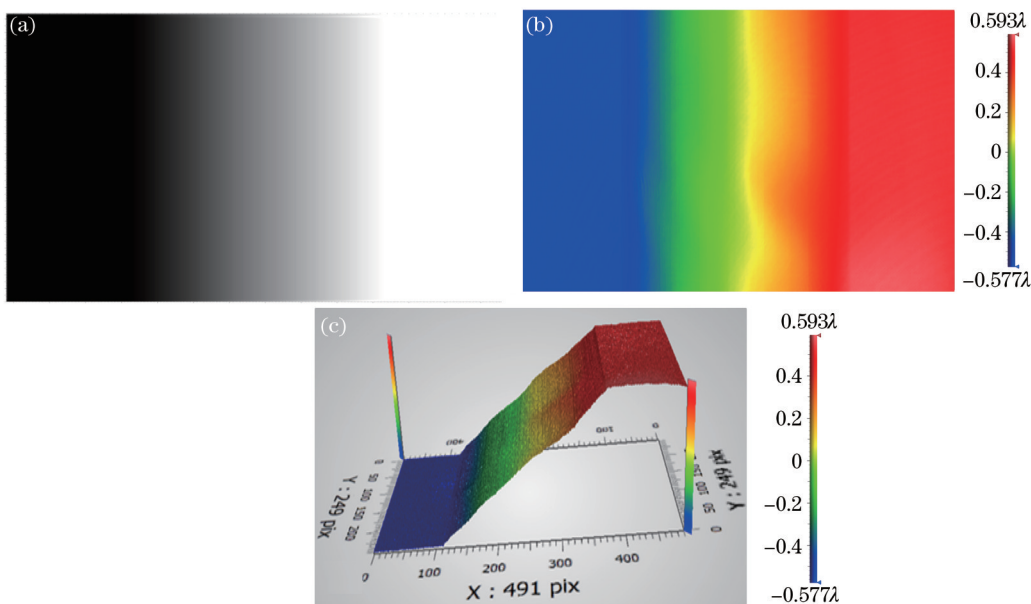


图 5 斜入射下相位调制图。(a) 灰度图; (b) 二维相位图; (c) 三维相位图

Fig.5 Phase modulation image at oblique incidence. (a) Grayscale; (b) dimensional phase diagram; (c) three-dimensional phase diagram

涉仪自带相减功能,将相位图 6(b)去除静态畸变相位得到该入射角度下纯相位调制图。图 5(b)和图 5(c)分别为入射角为 10°时的纯相位调制矩阵二维和三维图。利用 Origin 软件拟合纯相位调制图中的相位矩阵和灰度值的对应曲线,即为该入射角度下的纯相位调制曲线。改变 LCSLM 入射偏振光的斜入射角度,重复上述实验步骤,就可以得到 LCSLM 在不同入射角度下的纯相位调制曲线。

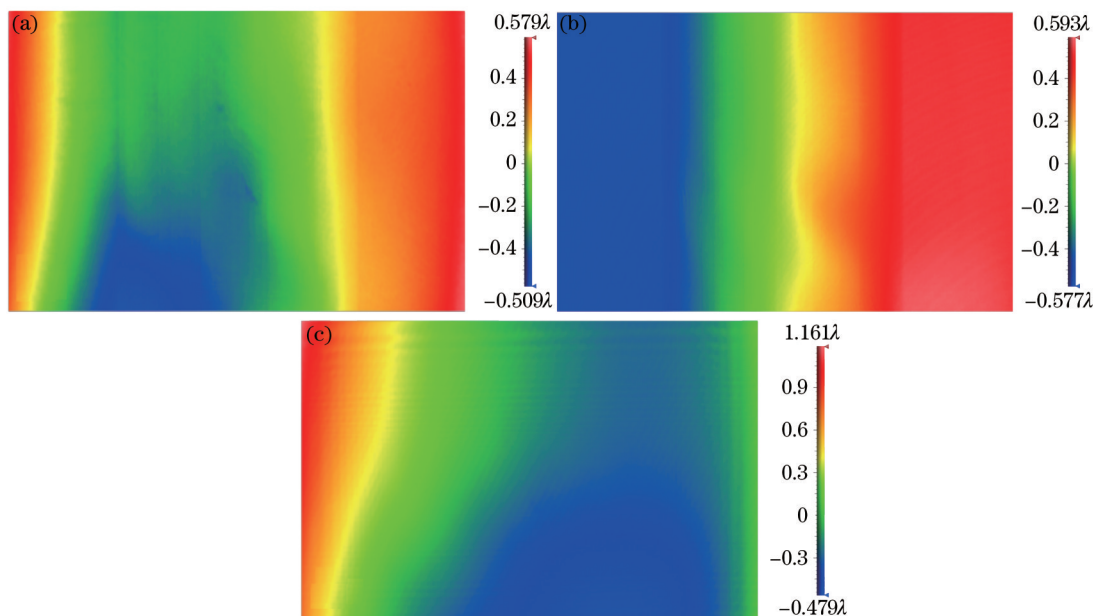


图 6 相位图 2 组成示意图。(a) 相位图 2; (b) 调制相位图; (c) 畸变相位图

Fig.6 Composition schematic of phase figure 2. (a) Phase diagram 2; (b) modulation phase diagram; (c) distortion phase diagram

#### 4 分析与讨论

图 7 为利用 Origin 软件拟合不同入射角度下(0°、10°、20°、30°、40°、45°)的相位调制曲线,Origin 拟合结果如表 1 所示。不同入射角度下相位调制曲线近似线性递增,入射角度越大,递增的斜率越小。在相同灰度值下,随着入射角度的增加,相位调制量逐渐减小。这与文章上面的仿真结果相符合。

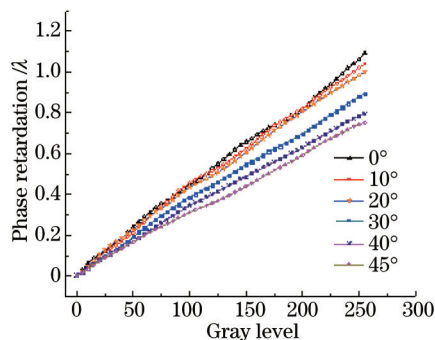


图 7 不同入射角度下纯相位调制曲线

Fig.7 Pure phase modulation curves at various incident angles

表 1 不同入射角度下纯相位调制曲线拟合值( $y=a+bx$ )

Table 1 Pure phase modulation curve fitting value at various incident angles

Incident angle	$a$	$b$	$R$ -square
0°	0.03176	0.00407	0.99814
10°	0.02404	0.00403	0.99807
20°	0.03176	0.00386	0.99875
30°	0.02377	0.00344	0.998
40°	0.01889	0.00309	0.9985
45°	0.01485	0.00290	0.99881

不同入射角度下的相位调制总量变化曲线如图8所示,随着入射角度的增加,相位调制总量逐渐减小,入射角度越大相位调制总量减小得越大。45°入射角时相位调制量减小到 $0.751\lambda$ ,相对于0°入射角时 $1.089\lambda$ 减小了 $0.338\lambda$ 。在实际波前模拟时需要考虑斜入射时相位调制总量会减小的问题。

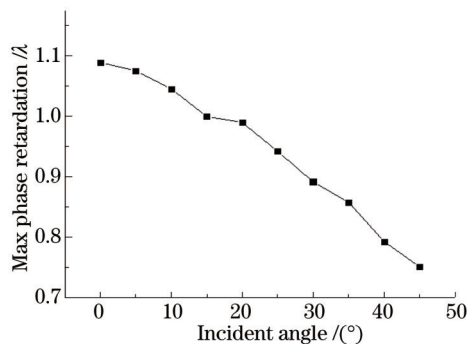


图8 不同入射角度下的最大相位调制量

Fig.8 Maximum phase modulation amount under various incident angles

在小角度入射条件下(0°、1°、3°、5°)测得LCSLM相位调制曲线如图9所示,小角度入射下LCSLM相位调制曲线几乎重合,观察发现灰度值130~210区间内调制曲线的相对差异较大。以0°相位调制曲线为基准,用不同角度的相位调制量减去0°的相位调制量得到图10所示的相位调制差异图。

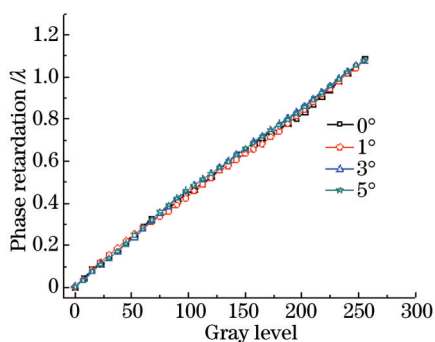


图9 小角度入射下LCSLM纯相位调制特性

Fig.9 LCSLM pure phase modulation characteristics of small incident angles

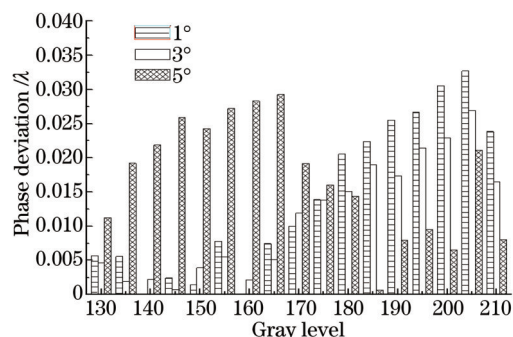


图10 不同角度相位调制差异图

Fig.10 Difference image of phase modulation at different angles

在近似垂直入射(5°以内)的条件下,最大相位差为 $0.032\lambda$ ,这与(8)式得出的结论相同。那么,在波前模拟中如果将入射角度控制在5°范围以内,就可以利用垂直入射时的调制曲线,这样将大大降低LCSLM测量要求。

## 5 结 论

针对斜入射下液晶空间光调制器的相位调制特性测量问题,提出利用Zygo干涉仪的测量方法。基于液晶分子的电控双折射效应推导出纯相位调制下LCSLM相位调制量公式,进一步得出斜入射时的相位调制量公式。利用Zygo干涉仪测量光路测得了不同入射角度下纯相位调制曲线,测量结果表明:不同入射角度下相位调制曲线近似线性递增,入射角度越大,递增的斜率越小;在相同灰度值下,随着入射角度的增加,相位调制量逐渐减小;小角度(5°以内)入射下LCSLM相位调制曲线几乎重合,相同灰度值下相位调制量最大相位差为 $0.032\lambda$ ,小角度入射的情况下可以使用垂直入射下的纯相位调制曲线。该方法操作简单,每个斜入射角度只需一次测量,同时由于干涉仪软件直接读出相位的优点可以直接得出结果,没有中间计算过程。受环境影响较小,利用Zygo干涉仪测量的结果精度高。该研究结果对LCSLM斜入射下进行波前模拟具有一定的意义。

## 参 考 文 献

1 Hallstig E, Sjoqvist L, Lindgren M. Characterization of a liquid crystal spatial light modulator for beams steering[C]. SPIE, 2002, 4632: 187-196.

- 2 Wang Xiaozhang, Li Qi, Zhong Wen, *et al.*. Drift behavior of Airy beams in turbulence simulated by using a liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1213001.  
王晓章, 李琦, 钟文, 等. 液晶空间光调制器模拟艾里光束在湍流中的漂移[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1213001.
- 3 Cai Dongmei, Yao Jun, Jiang Wenhan. Performance of liquid crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 285-291.  
蔡冬梅, 姚军, 姜文汉. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 285-291.
- 4 Gao Hongyue, Yu Yingjie, Zheng Huadong. Real-time dynamic holographic three-dimensional video display based on a super fast response liquid crystal thin film[J]. Chinese J Lasers, 2014, 42(2): 0209013.  
高洪跃, 于瀛洁, 郑华东. 基于超快液晶薄膜的实时动态全息三维动态全息显示[J]. 中国激光, 2014, 42(2): 0209013.
- 5 Pei Chuang, Jiang Xiaoyu, Zhao Kai, *et al.*. Fast realization of full parallax holographic stereograms for 3D objects[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 1029-1036.  
裴闯, 蒋晓瑜, 赵铠, 等. 三维物体全视差全息体视图的快速计算[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 1029-1036.
- 6 Shi Yubin, Ma Haotong, Ma Yanxing, *et al.*. Numerical simulation of high accuracy and high efficient beam steering based on liquid crystal optical phase array[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202002.  
师宇斌, 马浩统, 马阎星, 等. 基于液晶相控阵高精度高效率光束偏转数值仿真[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202002.
- 7 Schmidt J D, Goda M E, Duncan B D. Aberration production using a high resolution liquid-crystal spatial light modulator[J]. Appl Opt, 2007, 46(13): 2423-2433.
- 8 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei, *et al.*. Laser beamshaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 1107-1111.  
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.
- 9 Rong Zhenyu, Han Yujing, Wang Shuzhen, *et al.*. Generation of arbitrary vector beams with cascaded liquid crystal spatial light modulator[J]. Optical Express, 2014, 22(2): 1636-1644.
- 10 Lin Yixiang, Ai Yong, Shan Xin, *et al.*. Simulation of two-dimensional target motion based on a liquid crystal beam steering method[J]. Optics Engineering, 2015, 54(5): 056102.
- 11 Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman-Green interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(9): 1360-1364.  
张洪鑫, 张健, 吴丽莹. 泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1360-1364.
- 12 Xiao Dongxun, Robert W. Phase calibration of spatially nonuniform spatial light modulators[J]. Applied Optics, 2004, 43(35): 6401-6405.
- 13 Cai Dongmei, Xue Lixia, Ling Ning, *et al.*. Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(11): 19-23.  
蔡冬梅, 薛丽霞, 凌宁, 等. 液晶空间光调制器相位调制特性研究[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 19-23.
- 14 S Panzai, Dayong Wang, Jie Zhao, *et al.*. Study of oblique incidence characterization of parallel aligned liquid crystal on silicon[J]. Optics Engineering, 2015, 54(3): 037109.
- 15 Ye Biqing, Chen Jun, Norihiro Fukuchi, *et al.*. Characterization of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3): 374-378.  
叶必卿, 陈军, 福智昇央, 等. 液晶空间光调制器的斜入射特性[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 374-378.
- 16 Zhang Jian, Wu Liying, Liu Bohan. Liquid crystal spatial light modulator and real-time transform of interferential light wavefront[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 124-127.  
张健, 吴丽莹, 刘伯晗. 液晶空间光调制器与相干光波前实时变换[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 124-127.
- 17 Sun Shouhong, Guo Lihong, Ge Xinhong. EMC prediction of liquid crystal display module under transient irradiation in electromagnetic field[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3160-3166.  
孙守红, 郭立红, 葛欣宏. 瞬变电磁场辐照下液晶显示模块的电磁兼容预测[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3160-3166.
- 18 Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa, *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1682-1686.  
刘永军, 宣丽, 胡立发, 等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1682-1686.