

# 激光与光电子学进展

## 基于偏振显示的液晶空间光调制器 相位特性研究

马亚云<sup>1</sup>, 赵冬娥<sup>1,2\*</sup>, 张斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

<sup>2</sup>中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 为了校准液晶空间光调制器, 基于偏振显示原理提出一种测量液晶空间光调制器相位调制特性的方法。首先分析液晶空间光调制器对入射线偏振光偏振态的调制特性, 然后建立椭圆偏振光经过角向偏振显示器后的长轴方向与液晶空间光调制器相位调制量的理论关系, 并搭建测量液晶空间光调制器相位特性的光学系统。结果表明, 所用的空间光调制器的最大相位调制量为  $2.45\pi$  rad, 在 15~210 灰度范围内的相位调制曲线近似呈线性分布。最后采用反插值法对相位调制曲线进行线性校正, 并生成输入灰度和驱动灰度的查找表, 校正后的相位调制曲线与理想线性调制曲线的相关系数可达 0.9993。

**关键词** 光学器件; 液晶空间光调制器; 角向偏振显示器; 相位调制; 相位测量; 反插值法

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0723004

## Research on Phase Characteristics of Liquid Crystal Spatial Light Modulator Based on Polarization Display

Ma Yayun<sup>1</sup>, Zhao Dong'e<sup>1,2\*</sup>, Zhang Bin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Information and Communication Engineering, North University of China,  
Taiyuan, Shanxi 030051, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China,  
Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** To calibrate liquid crystal spatial light modulators, a method for measuring their phase modulation characteristics is proposed based on the principle of polarization display. First, the modulation characteristics of the liquid crystal spatial light modulator to the polarization state of the incident polarized light are analyzed. Then, a theoretical relationship is established between the long axis direction of the elliptically polarized light after passing through the azimuthally polarization axis finder and the phase modulation amount of the liquid crystal spatial light modulator. By building an optical system, the phase characteristics of the liquid crystal modulator are measured. The results show that the maximum phase modulation of the spatial light modulator used is  $2.45\pi$  rad, and the phase modulation curve within the gray scale range of 15 to 210 approximately meets the linear distribution. Finally, the phase modulation curve is linearly corrected by applying inverse interpolation, and a look-up table of the input gray scale and the driving gray scale is generated. The correlation coefficient between the corrected phase modulation curve and the ideal linear modulation curve reached 0.9993.

收稿日期: 2020-08-13; 修回日期: 2020-09-07; 录用日期: 2020-09-14

基金项目: 山西省青年科学基金(201901D211280)、山西省高等学校科技创新项目(2019L0565)

\*E-mail: zhaodong'e@nuc.edu.cn

**Key words** optical devices; liquid crystal spatial light modulator; azimuthally polarization axis finder; phase modulation; phase measurement; inverse interpolation method

**OCIS codes** 230.3720; 230.6120; 060.5060

## 1 引言

液晶空间光调制器(LCSLM)是一种基于液晶分子电控双折射效应的器件,具有体积小、驱动单元数多、空间分辨率高、能耗低,以及易于编程控制等优点<sup>[1-3]</sup>,在自适应光学、无线激光通信、激光光束整形、全息光镊、精密测量和涡旋激光产生等领域具有广泛的应用<sup>[4-13]</sup>。在众多的应用领域中,编程控制空间光调制器完成设定的相位操作是实现光波调制的核心,而调制器的相位调制量随驱动信号的变化关系直接决定了调制效果,因此了解和掌握器件的相位调制特性非常关键。在空间光调制器的相位特性研究方面,特外曼-格林干涉法、马赫-曾德尔干涉法、横向剪切干涉法和共路干涉法是目前常用的方法<sup>[14-18]</sup>。特外曼-格林和马赫-曾德尔干涉法属于分振幅双路干涉的方法,要求实验装置具有很好的稳定性,因此存在一定的局限性。横向剪切干涉法中存在零级与一级光斑的强度差异,这会导致干涉条纹对比度不明显。角向偏振显示器作为一个线栅偏振器件,线偏振光通过角向偏振显示器后会出现“沙漏”状的光强分布,两个相对的楔形暗区的中心线平行于线偏振光的偏振方向<sup>[19]</sup>。角向偏振显示器作为一种可视化的偏振测量器件,具有装置简单、测量精度高和抗环境干扰性强等优势<sup>[20-21]</sup>。

本文根据角向偏振显示器的工作原理,提出一种基于偏振显示的 LCSLM 相位特性测量方法。首先理论分析椭圆偏振光通过角向偏振显示器后的光强分布,建立通过测量椭圆偏振光的长轴方向来研究反射式 LCSLM 相位调制特性的理论模型。然后使用计算机向 LCSLM 加载不同灰度值的灰度图像,并对入射的线偏振激光进行相位调制,通过对 CCD(Charge Coupled Device)相机所采集的图像进行处理,获取相位调制后的椭圆偏振光的长轴方向与驱动灰度值之间的映射关系,并测量了 LCSLM 的相位调制特性。最后采用反插值法对相位调制曲线进行线性校正。

## 2 测量原理

LCSLM 的每个像素都可以被驱动电压独立控

制,制造商将调制器的驱动电压映射为在 0~255 之间的灰度值<sup>[22]</sup>。使用计算机将灰度图像加载到 LCSLM 的驱动器中,用来控制液晶分子的转动。通过确定调制前后光波的相位变化与计算机所加载的灰度图像的灰度值间的对应关系,就可以测量空间光调制器的相位特性。

### 2.1 LCSLM 的相位调制原理

LCSLM 具有电控双折射效应,能够改变入射光的偏振态。反射式 LCSLM 的原理如图 1 所示。当一束偏振方向与 LCSLM 液晶分子光轴( $x$ 轴)的夹角为  $\theta$  的线偏振光入射到 LCSLM 时,可分解为电矢量振动方向与液晶分子光轴平行的非寻常光( $e$ 光),以及电矢量振动方向与液晶分子光轴垂直的寻常光( $o$ 光), $e$ 光和 $o$ 光的折射率分别为  $n_e$  和  $n_o$ 。在外加电场的作用下,液晶分子光轴会沿着电场方向旋转  $\varphi$ ,但 $o$ 光的折射率不会随着偏转角的变化而发生变化,而 $e$ 光的折射率随  $\varphi$  变化的关系满足<sup>[22]</sup>

$$n_e(\varphi) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \varphi + n_e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (1)$$

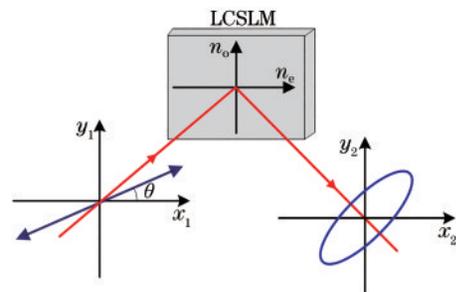


图 1 反射式 LCSLM 的示意图

Fig. 1 Schematic of reflective LCSLM

对于偏振方向与 LCSLM 液晶分子光轴存在夹角的入射光束经过 LCSLM 反射后, $o$ 光和 $e$ 光之间随外加电场变化的相位差  $\delta$ <sup>[22]</sup>可表示为

$$\delta(\varphi) = \frac{4\pi d}{\lambda} [n_e(\varphi) - n_o], \quad (2)$$

式中: $d$ 为 LCSLM 液晶层的厚度; $\lambda$ 为入射激光的波长。由于存在  $\delta$ ,线偏振光经过 LCSLM 调制后变成椭圆偏振光,其轨迹可表示为

$$\frac{E_x^2}{A_x^2} + \frac{E_y^2}{A_y^2} - 2 \frac{E_x E_y}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (3)$$

式中:  $A_x$  和  $A_y$  分别为经过 LCSLM 反射后 e 光 ( $x$  轴) 和 o 光 ( $y$  轴) 的振幅;  $E_x$  和  $E_y$  分别为 e 光和 o 光的电场矢量。

由 (3) 式可获得椭圆偏振光的长轴与  $x$  轴的夹角  $\alpha$  随  $\delta$  变化的关系为

$$\tan(2\alpha) = \frac{2A_x A_y \cos \delta}{A_x^2 - A_y^2} = \frac{2r_o r_e A_{x0} A_{y0} \cos \delta}{r_e^2 A_{x0}^2 - r_o^2 A_{y0}^2}, \quad (4)$$

式中:  $A_{x0}$  和  $A_{y0}$  分别为入射的线偏振光在 LCSLM 的  $x$  轴和  $y$  轴上的振幅,  $A_{y0} = A_{x0} \tan \theta$ ;  $r_o$  和  $r_e$  分别为 LCSLM 对 o 光和 e 光的振幅反射率;  $A_x = r_e A_{x0}$ ;  $A_y = r_o A_{y0}$ 。若 LCSLM 对 o 光和 e 光的反射率相同, 则 (4) 式可简写为

$$\tan(2\alpha) = \tan(2\theta) \cos \delta. \quad (5)$$

由 (5) 式可知, 经过 LCSLM 调制后的椭圆长轴方向是关于  $\delta$  的函数, 通过对椭圆长轴方向的测量就可以研究 LCSLM 的相位调制特性。

### 2.2 角向偏振显示器测量 LCSLM 相位特性的原理

角向偏振显示器是由多个线性偏振器件构成且具有同心圆通光轴的偏振器件, 其每一个小区域都可看作通光轴方向垂直于径向的线性偏振器件<sup>[17-18]</sup>。对于偏振方向与 LCSLM 光轴的夹角为  $\theta$  的入射线性偏振光, 经过 LCSLM 反射后入射到角向偏振显示器中, 透过角向偏振显示器的光强空间分布可表示为

$$I(r, \beta) = A_x^2(r, \beta) \sin^2 \beta + A_y^2(r, \beta) \cos^2 \beta + 2A_x(r, \beta) A_y(r, \beta) \sin \beta \cos \beta \cos(\delta + \pi), \quad (6)$$

式中:  $\beta$  为以  $x$  光轴为参考的极角;  $r$  为极径;  $A_x(r, \beta)$  和  $A_y(r, \beta)$  分别为 LCSLM 反射光在不同方向上的空间振幅;  $\pi$  为相位差, 其为 o 光和 e 光在通光轴上的投影所产生的附加相位。由 (6) 式可导出透过角向偏振显示器的光强取得极大值的方向角  $\beta_M$  满足

$$\tan(2\beta_M) = \frac{2A_x(r, \beta_M) A_y(r, \beta_M) \cos \delta}{A_y^2(r, \beta_M) - A_x^2(r, \beta_M)} = \frac{2r_o r_e A_{x0}(r, \beta_M) A_{y0}(r, \beta_M) \cos \delta}{r_o^2 A_{y0}^2(r, \beta_M) - r_e^2 A_{x0}^2(r, \beta_M)}. \quad (7)$$

若 LCSLM 对 o 光和 e 光的反射率相同, 则 (7) 式可简写为

$$\tan(2\beta_M) = -\tan(2\theta) \cos \delta. \quad (8)$$

从 (8) 式可以看到, 透过角向偏振显示器的光强极值方向依赖于  $\delta$ , 且光强极大值的方向垂直于椭圆偏振光的长轴方向。使用 CCD 相机来记录透过角向偏振显示器的光强分布, 并采用图像处理方

法来获得相应的椭圆偏振光的长轴方向 ( $\beta_M + \pi/2$ ), 就可以获得 LCSLM 的相位调制特性。

根据 (3) 式和 (6) 式模拟椭圆偏振光的振动轨迹曲线和透过角向偏振器的光强分布, 如图 2 所示。从图 2 可以看到, 线偏振光经过 LCSLM 调制后变成椭圆偏振光, 经过角向偏振显示器后的光强分布呈“沙漏”状, 且“沙漏”的两个相对楔形暗区的中心轴随着调制相位的变化而变化, 因此使用角向偏振显示器可以测量空间光调制器的相位调制特性。

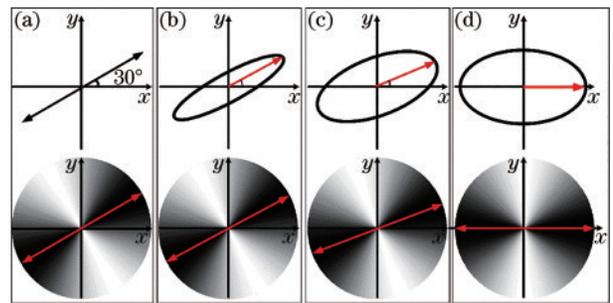


图 2 在不同  $\delta$  值下的椭圆偏振光的振动轨迹曲线和透过角向偏振器的光强分布图。(a) 0; (b)  $\pi/6$ ; (c)  $\pi/3$ ; (d)  $\pi/2$

Fig. 2 Vibration trajectory curves of elliptically polarized light and light intensity distribution through azimuthally polarization axis finder at different  $\delta$  values. (a) 0; (b)  $\pi/6$ ; (c)  $\pi/3$ ; (d)  $\pi/2$

### 3 实 验

采用偏振显示的方法测量 LCSLM 相位特性的实验装置如图 3 所示, 其中 PC 为个人计算机。激光

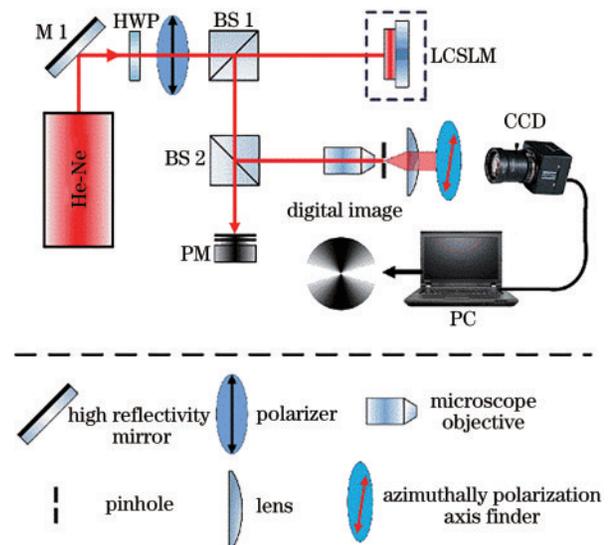


图 3 测量 LCSLM 相位特性的实验装置示意图  
Fig. 3 Schematic of experimental setup for measuring phase characteristic of LCSLM

光源使用中心波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,其出射的线偏振激光经过半波片(HWP)和偏振片后被分光比为 50:50 的分光棱镜 BS 1 分为两束,其中偏振片用以调节偏振方向,半波片用以控制透过偏振片的激光功率。LCSLM 为 Holoeye 公司生产的分辨率为 1920 pixel $\times$ 1080 pixel 的反射式纯相位 LCSLM(型号为 PLUTO-NIR-011),像素尺寸为 8  $\mu\text{m}$ ,有效工作区域为 15.36 mm $\times$ 8.64 mm。经过 BS 1 后的激光正入射到 LCSLM 中,经过 LCSLM 反射后再次经过 BS 1,其中 BS 1 反射的光束经过分光棱镜 BS 2 后分为功率相等且传输方向垂直的两束光,而被 BS 2 反射后的激光通过一个由 20 $\times$ 的显微物镜、直径为 25  $\mu\text{m}$  的针孔和准直透镜组成的空间滤波和扩束系统后变为平行光,该平行光通过角向偏振显示器后形成“沙漏”图像。透过分光棱镜 BS 2 后的激光入射到光功率计(PM)(型号为 PD300-1W, Ophir)中,用以测量 LCSLM 对不同偏振入射激光的反射率。

实验中,采集“沙漏”图像使用的 CCD 相机为 Lumenera Lm165,其分辨率为 1040 pixel $\times$ 1392 pixel,像素尺寸为 6.45  $\mu\text{m}$ 。首先将 CCD 相机采集到的不同驱动灰度值下对应的图像传输到 PC 中,并逐一对图像进行处理,获得每个图像上两个相对楔形暗区的

中心轴,然后再根据(7)式或(8)式即可求解  $\delta$ 。

## 4 实验结果与分析

为了检测系统的测量精度,在图 3 实验装置的基础上,先使用平面反射镜代替 LCSLM,并在 BS 1 和 BS 2 之间插入 1/4 波片。平面反射镜反射回的线偏振激光经过 BS 1 反射并通过 1/4 波片后变成椭圆偏振光,且椭圆偏振光的轴向与 1/4 波片的光轴方向一致。实验过程中,先精细调节偏振片将线偏振激光的偏振方向调为水平,再顺时针旋转 1/4 波片,并使用 CCD 相机来采集椭圆偏振光透过角向偏振显示器后的“沙漏”图像。获取沙漏图像中心线的图像处理过程如图 4 所示。首先读取 CCD 所采集的灰度图像;接着按照设定的阈值对图像进行二值化处理,并删除图像中的微区域;然后对二值化图像进行形态学滤波以填充空白区域;最后分别找出填充后图像中相对楔形暗区(暗域)和楔形亮区(亮域)的中心对称轴线。将亮域的中心对称轴线旋转 90 $^\circ$ 后求解旋转后亮域和暗域对称轴线的斜率,从而获得二者相对于水平方向( $x$ 轴)的夹角,并将二者的均值作为该幅图像的椭圆长轴方向。依次对相同条件下采集的 5 幅灰度图像进行处理,并将 5 次测量结果的均值作为最终的椭圆长轴方向。

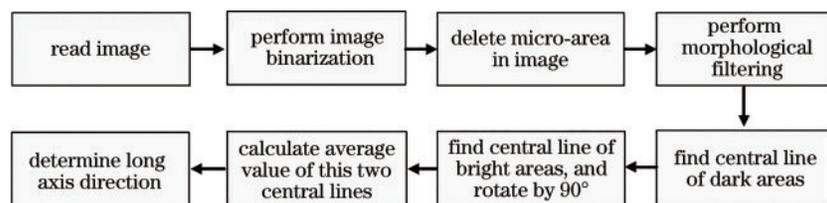


图 4 图像处理流程

Fig. 4 Flowchart of image processing

实验过程中,当 1/4 波片的光轴与水平方向的夹角在 90 $^\circ$ ~46 $^\circ$ 之间变化时,沿顺时针方向每 4 $^\circ$  旋转一次 1/4 波片,使用 CCD 相机采集的椭圆偏振光经过角向偏振显示器后的部分“沙漏”图像如图 5(a)~5(f)所示。由于 1/4 波片的光轴与水平方向的夹角在 90 $^\circ$ ~46 $^\circ$ 之间变化,椭圆偏振光的长轴方向垂直于波片的光轴,因此图 5 相对楔形暗区的中心轴线方向对应于椭圆偏振光的长轴方向,而相对楔形亮区的中心轴线方向与光轴方向相同。为了与设定的 1/4 波片的光轴角度对应,图像处理过程中提取楔形亮区的中心轴线,如图 5 虚线所示。中心轴线与水平方向的夹角如表 1 所示,其中  $\theta_T$  为设定的 1/4 波片的光轴与水平方向的夹角,  $\theta_M$  为

5 次结果的平均值。

从表 1 可以看到,采用偏振显示的方法测量椭圆偏振光的方向具有较高的精度,可以有效进行 LCSLM 相位特性的测量。由角向偏振显示器测量 LCSLM 相位特性的原理可知,椭圆的长轴方向还依赖于 LCSLM 对偏振方向平行(p 偏振)和垂直(s 偏振)于液晶分子光轴的入射光束的反射率,因此测量了 LCSLM 对 p 和 s 偏振光的反射率。当测量 p 偏振光的反射率时,先精细调节图 3 的偏振片,使入射到空间光调制器的激光偏振方向与 LCSLM 液晶分子光轴方向相同,再调节半波片来控制入射到 LCSLM 的激光功率为 1 mW。由于 LCSLM 反射的激光先后经过 BS 1 和 BS 2 后,功率计监视到

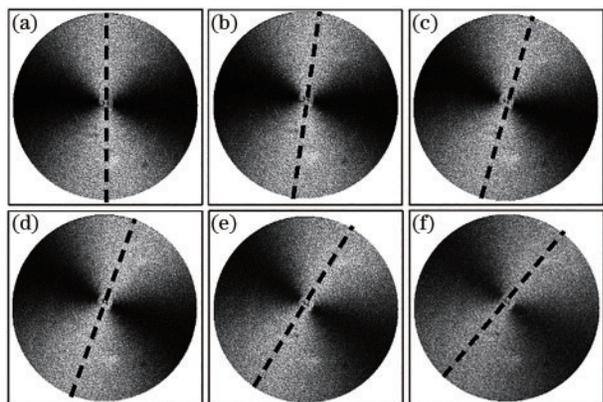


图 5 不同夹角下的图像。(a)90°;(b)82°;(c)74°;(d)66°;(e)58°;(f)50°

Fig. 5 Images at different angles. (a) 90°; (b) 82°; (c) 74°; (d) 66°; (e) 58°; (f) 50°

表 1 不同采集次下的测量结果

Table1 Measurement results under different acquisition times

$\theta_T / (^\circ)$	1	2	3	4	5	$\theta_M / (^\circ)$
90	89.85	89.95	90.12	89.81	89.83	89.91
86	86.21	86.08	85.99	85.98	86.13	86.08
82	82.01	81.98	81.80	81.82	81.91	81.90
78	77.98	77.92	78.04	77.82	77.93	77.94
74	74.18	73.95	74.15	74.07	74.11	74.09
70	69.95	70.05	70.11	70.08	69.94	70.03
66	66.01	65.95	65.88	65.91	65.86	65.92
62	62.08	62.04	62.12	61.98	62.11	62.07
58	58.02	58.04	57.93	57.89	57.95	57.97
54	54.11	54.08	54.06	54.15	54.02	54.08
50	50.03	49.86	49.94	49.89	49.85	49.91
46	46.16	46.25	46.28	46.26	46.28	46.25

的功率为 LCSLM 反射功率的 1/4, 因此功率计测得的 4 倍功率值即为 LCSLM 在相应灰度级下的反射率。将偏振片逆时针旋转 90°, 即可测量 LCSLM 对偏振方向垂直于液晶分子光轴的入射光束的反射率。实验测得的 LCSLM 对两种偏振态的反射率与计算机所输入的灰度级的变化关系如图 6 所示。

从图 6 可以看到, LCSLM 对两个正交偏振光的反射率几乎相同, 并且在纯相位的调制模式下, 伴随的振幅调制可以忽略不计。

将偏振片逆时针旋转 30°, 使入射的激光偏振方向与 LCSLM 的液晶分子光轴方向成 30° 夹角, 使用 CCD 采集记录不同灰度级下对应的“沙漏”图像, 并使用 MATLAB 软件对一系列的“沙漏”图像进行处理, 获得不同灰度级下对应椭圆偏振光的长轴方向。根据(8)式求解与灰度级对应的  $\delta$ 。为了评价

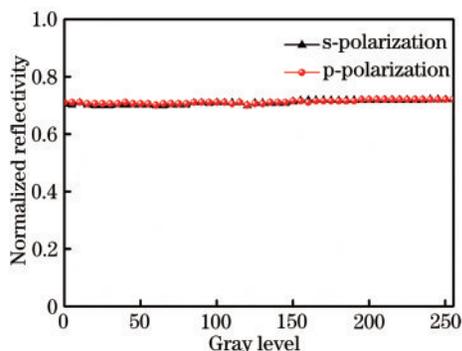


图 6 LCSLM 的反射率与灰度级的关系

Fig. 6 Relationship between reflectivity and gray level of LCSLM

调制器的相位均匀性, 测量调制器的中心、上边界和左边界三个部位的相位调制特性, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看到, LCSLM 的相位均匀性较好, 最大相位调制量为  $2.45\pi$  rad, 在 0~15 和 215~255 这两个灰度范围内的相位调制结果较线性拟合结果偏差较大, 而在 15~210 灰度范围内相位调制曲线近似呈线性分布。

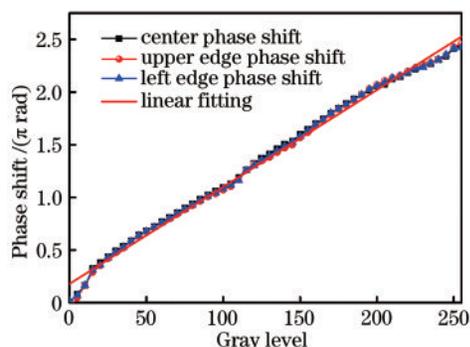


图 7 LCSLM 的相位调制特性曲线

Fig. 7 Phase modulation characteristic curves of LCSLM

为了保证调制器在  $0 \sim 2\pi$  之间实现线性相位的调制, 采用反插值法对相位进行线性校正。在图 7 的相位调制特性曲线中, 15~240 的灰度范围对应于一个周期的相位变化, 并且相位曲线较光滑, 将该区间的实际测量曲线记为

$$\varphi = f(g), g \in [15, 240], \varphi \in [0.31\pi, 2.31\pi]. \quad (9)$$

采用反插值法构造的输入灰度值与调制相位间的理想线性函数为

$$\varphi' = kg', k = 2\pi/255, g' \in [0, 255]. \quad (10)$$

利用已知节点对  $\varphi$  进行反插值, 可得到  $g$  与  $g'$  的关系为

$$g = f^{-1}(kg'). \quad (11)$$

由(11)式得到的驱动灰度值与输入灰度值之

间的对应关系如图 8 所示,将原始测量数据中的灰度值替换为查找表中的相应灰度值,获得的理论数据和相位调制曲线如图 9 所示。

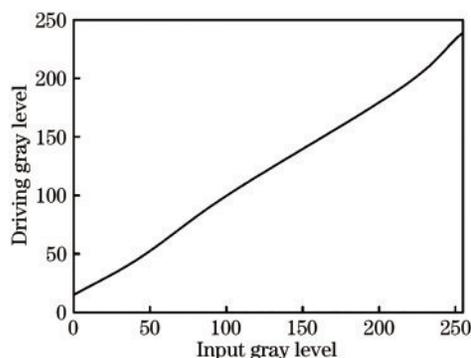


图 8 驱动灰度值与输入灰度值的对应关系

Fig. 8 Correspondence between driving gray value and input gray value

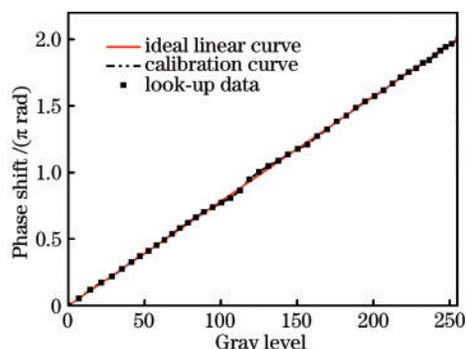


图 9 反插值法校正后的相位调制曲线

Fig. 9 Phase modulation curves corrected by inverse interpolation method

为了验证反插值法的校正效果,将校正前后的相位调制曲线分别与理想线性曲线进行对比。从图 9 可以看到,校正前,15~240 范围内的驱动灰度值所对应的实测相位调制曲线与理想线性调制曲线的相关系数为 0.9982,校正后的相关系数提高至 0.9993,同时调制曲线与理想线性调制曲线间的方均根误差 (RMSE) 由校正前的 0.0390 下降至 0.0110,和方差 (SSE) 由 0.0712 下降至 0.0040。因此,采用反插值法得到的理论相位调制曲线非常接近理想线性曲线。

## 5 结 论

提出一种基于角向偏振显示器测量 LCSLM 相位特性的方法,理论推导 LCSLM 反射光的偏振态与相位调制量之间的关系。根据角向偏振显示器的工作原理,进一步建立椭圆偏振光通过角向偏振

显示器后的长轴方向与 LCSLM 相位调制量间的映射关系。实验过程中,使用计算机为 LCSLM 加载 0~255 范围内的一系列灰度值图像,对入射到调制器的线偏振光进行调制,使用 CCD 相机采集调制后的光波在角向偏振显示器上的光强分布图像。使用 MATLAB 软件对图像进行处理,得到不同灰度值对应的椭圆偏振光长轴方向。结果表明,所用 LCSLM 的最大相位调制量为  $2.45\pi$  rad,在 0~15 和 215~255 这两个灰度范围内的相位调制结果较理想线性调制曲线偏差较大。采用反插值法对相位调制曲线进行线性校正,校正后的相位调制曲线与理想线性调制曲线的相关系数可达 0.9993。该方法操作简单,为测量和评价 LCSLM 的相位调制特性提供一种新思路,研究结果对提高基于 LCSLM 相移技术的微形变、形貌和折射率等参数的测量精度具有一定意义。

## 参 考 文 献

- [1] Yang H, Tong S F, Zhang L, et al. Beam deflection control technology based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 110603.  
杨赫, 佟首峰, 张磊, 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 110603.
- [2] Zhang H X, Zhang J, Wu L Y. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman-Green interferometer[J]. Chinese Journal of 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.
- [3] Wu Y L, Nie J S, Shao L. Method to measure the phase modulation characteristics of a liquid crystal spatial light modulator[J]. Applied Optics, 2016, 55(31): 8676-8682.
- [4] Brooks M R, Goda M E. Atmospheric simulation using a liquid crystal wavefront-controlling device[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5553: 258-268.
- [5] Chen Q, Wang H C, Hu X, et al. Spatial light modulator and its applications in free-space optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050008.  
陈沁, 王华村, 胡鑫, 等. 空间光调制器及其在空间光通信中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 050008.

- [6] Chen B Y, Xu Z Y, Zhang S H, et al. Laser diode beam shaping method based on complex amplitude modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0605005.  
陈本永, 徐哲毅, 张世华, 等. 基于复振幅调制的半导体激光光束整形方法[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0605005.
- [7] Liu W J, Pang H, Cao A X, et al. Design and experiments of annular beam shaping device with low speckle noise[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0222001.  
刘文静, 庞辉, 曹阿秀, 等. 低散斑环形光束整形器件的设计及实验[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0222001.
- [8] Liang Y S, Yao B L, Lei M. Applications of holographic optical tweezers in biological research [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(2): 0207020.  
梁言生, 姚保利, 雷铭. 全息光镊在生物学研究中的应用[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 0207020.
- [9] Na Y, Ko D K. High-resolution refractometry using phase shifting interferometry based on spatial light modulator and vortex probe [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 112: 479-484.
- [10] Zhao D E, Wang S Y, Ma Y Y, et al. Measurement of micro-displacement based on the interference of vortex beams and spherical wave [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0413005.  
赵冬娥, 王思育, 马亚云, 等. 基于涡旋光与球面波干涉的微位移测量研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0413005.
- [11] Ma W C, Shen W, Hu D T, et al. Phase modulation characteristics of LCSLM and its applications in aspheric surface measurements [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 222301.  
马文超, 申文, 胡栋挺, 等. LCSLM 相位调制特性及其在非球面测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 222301.
- [12] Ngcobo S, Litvin I, Burger L, et al. A digital laser for on-demand laser modes [J]. Nature Communications, 2013, 4: 2289.
- [13] Yang W D, Qiu X D, Chen L X. Research progress in detection, imaging, sensing, and micromanipulation application of orbital angular momentum of beams [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500013.  
杨伟东, 邱晓东, 陈理想. 光轨道角动量分离、成像、传感及微操控应用研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500013.
- [14] Shan X, Duan M Y, Ai Y, et al. Calibration approaches of the phase nonlinearity of the phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(6): 0623001.  
单欣, 段梦云, 艾勇, 等. 纯相位液晶空间光调制器相位校正方法[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 0623001.
- [15] Dai Y Y, Antonello J, Booth M J. Calibration of a phase-only spatial light modulator for both phase and retardance modulation [J]. Optics Express, 2019, 27(13): 17912-17926.
- [16] Dou R S, Giles M K. Closed-loop adaptive-optics system with a liquid-crystal television as a phase retarder [J]. Optics Letters, 1995, 20(14): 1583-1585.
- [17] Ren X Y, Cai C W, Wang Z, et al. The phase modulation properties measurement of LCSLM by common-path lateral shearing interferometry [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(5): 899-904.  
任秀云, 蔡春伟, 王翥, 等. 横向剪切干涉法共路测量 LCSLM 的相位调制特性[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 899-904.
- [18] Miao Y, Bai F Z, Liu Z, et al. A common-path interferometry applied to measure phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 021204.  
苗悦, 白福忠, 刘珍, 等. 采用共光路干涉法测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 021204.
- [19] Huang Y, Ye H A, Gao L X, et al. New method of generating vectorial polarized beams [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0402004.  
黄妍, 叶红安, 高来勛, 等. 矢量偏振光束产生新方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0402004.
- [20] Zhang W J, Zhang Z W, Sun Y Q, et al. Polarization display and measurement experiment of elliptically polarized beam [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(5): 0526003.  
张文静, 张志伟, 孙运强, 等. 偏振显示及椭圆偏振光测量实验[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 0526003.
- [21] Lei B, Liu S G. Efficient polarization direction measurement by utilizing the polarization axis finder and digital image processing [J]. Optics Letters, 2018, 43(12): 2969-2972.
- [22] Lu Q, Sheng L, Zhang X, et al. Investigation on pure phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0112001.  
鲁强, 盛磊, 张鑫, 等. 斜入射下液晶空间光调制器纯相位调制特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0112001.