

## 基于相位型空间光调制器的光束控制技术研究

杨 裕<sup>1</sup>, 谷一英<sup>1</sup>, 胡晶晶<sup>2</sup>, 邓鹏程<sup>1</sup>, 钱 坤<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024;  
2. 大连理工大学 物理学院, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 非机械伺服控制的液晶空间光调制器 (LCSLM) 通过控制加载在每个像素上的电压能够实时调制波前相位实现光束偏转, 基于菲涅耳透镜模型和闪耀光栅模型验证了光束偏转控制能力, 包括偏转距离、衍射效率与不同模型参数之间的关系, 入射光波长为 1550 nm 时,  $x$  轴或  $y$  轴可实现的最大偏转角度为  $6.96^\circ (\pm 3.48^\circ)$ , 光束能够在光轴方向与二维平面偏移。针对光束的高速灵敏、精准和大角度的扫描应用需求, 提出了基于 LCSLM 的光波前相位调控算法, 通过计算需要补偿的相位建立相位变换模型并满足光束控制流程, 设计并构建了基于 LCSLM 的光束偏转及扫描实验系统, 实验结果表明光场中任意位置的光斑可在接收视场  $360^\circ$  范围内灵活偏移控制。该研究对于自由空间无线光通信、光束敏捷控制、非机械式光束的捕获瞄准跟踪等领域具有重要的应用价值。

**关键词:** 空间光通信; 液晶空间光调制器; 相位调制; 光束偏转

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210743

## Research on beam control technology based on a phase spatial light modulator

Yang Yu<sup>1</sup>, Gu Yiyi<sup>1</sup>, Hu Jingjing<sup>2</sup>, Deng Pengcheng<sup>1</sup>, Qian Kun<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering and Instrument Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The nonmechanical servo-controlled liquid crystal spatial light modulator (LCSLM) can modulate the wavefront phase in real time to achieve beam deflection by controlling the voltage loaded on each pixel. The beam deflection control ability is verified based on the Fresnel lens model and the blazed grating model. Including the relationship between deflection distance, diffraction efficiency and different model parameters, when the incident light wavelength is 1550 nm, the maximum deflection angle that can be achieved by the  $x$ -axis or  $y$ -axis is  $6.96^\circ (\pm 3.48^\circ)$ , and the beam can be aligned with the two-dimensional plane offset. Aiming at the high-speed, sensitive, precise and large-angle scanning application requirements of the beam, a light wavefront phase adjustment algorithm based on the LCSLM is proposed. The phase conversion model is established by calculating the phase that needs to be compensated, and the beam control process is satisfied. The LCSLM-based beam is designed and constructed with a deflection and scanning experimental system, and the experimental results show that the light spot at any position in the light field can be flexibly shifted and controlled within a  $360^\circ$  receiving

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2022-01-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB2203201); 国家自然科学基金 (61805032, 61520110063, 61727816); 中央高校基本科研业务费; 大连市双创项目 (2018J11CY006)

作者简介: 杨裕, 女, 硕士生, 主要从事微波光子技术方面的研究。

导师简介: 谷一英, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微波光子技术方面的研究。



空间光调制器是一种体积小、质量轻、数字化可编程的衍射光学元件,主要由上下平行的两个电极板和夹在电极板之间的液晶层组成,利用液晶的电控双折射效应,通过改变非寻常光折射率来调制光波前相位<sup>[10]</sup>。文中使用 LCSLM 的像素数为 1920×1080。下文利用菲涅耳透镜和闪耀光栅对光束的作用,通过改变 LCSLM 上所加载的对应模型相位图,进行了理论分析与实验验证,实现了光束分别在焦深和二维平面的移动。

## 2 光束偏转控制模型

### 2.1 焦深方向光斑偏移

菲涅耳透镜与传统的球面透镜相比,具有更大的孔径、焦距短、材料用量更少、质量和体积更小的特点。平面波经过菲涅耳透镜后会形成会聚或发散的球面波,在中心轴上产生不同位置的焦点<sup>[11]</sup>。叠加菲涅耳透镜相位之后,衍射的图像会沿着光轴方向前后移动,对系统的焦距影响如图 2 所示。

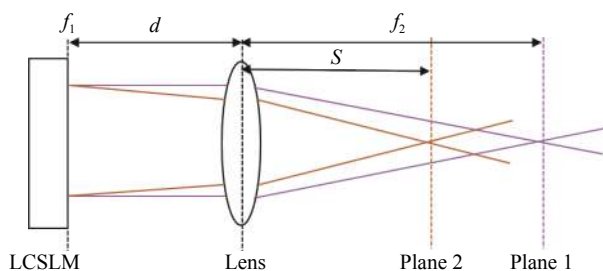


图 2 叠加菲涅耳透镜系统焦距图

Fig.2 Superimposed Fresnel lens system focal length map

叠加菲涅耳透镜的相位对系统焦距的影响用以下公式描述。 $d$ 为 LCSLM 到透镜的距离; $f_1$ 为 LCSLM 上叠加的菲涅耳透镜的焦距; $f_2$ 为普通球面透镜的焦距,即原本平行入射光通过透镜的焦距,则这两者的组合焦距为:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (1)$$

则第二透镜到组合系统后焦点的距离后焦距  $S$ ,即叠加菲涅耳透镜之后的会聚光束的焦深位置可表示为:

$$S = \frac{f_2 \cdot (d - f_1)}{d - (f_1 + f_2)} \quad (2)$$

叠加一个菲涅耳透镜相位,原本平行入射的光变为会聚或发散的光,经过透镜聚焦到正常焦点的前方或后方。图 3(a)为菲涅耳透镜相位图,在 LCSLM 上加载不同焦距的菲涅耳透镜相位图进行实验,利用 CCD 观察到光斑的中心位置如图 3(b)~(e) 所示。

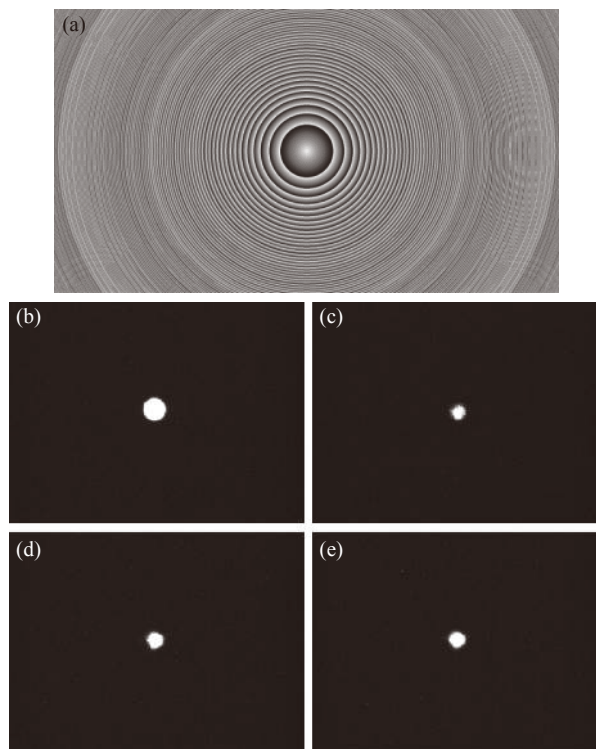


图 3 (a) 焦距 400 mm 菲涅耳透镜相位图; (b) 初始光斑; (c) 焦距 200 mm 光斑; (d) 焦距 300 mm 光斑; (e) 焦距 400 mm 光斑

Fig.3 (a) Phase diagram of a Fresnel lens with a focal length of 400 mm; (b) Initial spot; (c) A spot with a focal length of 200 mm; (d) A spot with a focal length of 300 mm; (e) A spot with a focal length of 400 mm

从实验结果可以看出,施加菲涅耳相位图可以实现光束会聚的功能,改变焦距,在焦平面可以观察在焦深方向 ( $Z$ 轴) 移动的光斑,而  $X$ 、 $Y$  方向的坐标不变,图中光斑坐标均为  $(0,0)$ 。而光斑大小不同可能是菲涅耳透镜的边缘作用以及在系统测量过程中产生的误差。

### 2.2 二维平面光束偏转

当对 LCSLM 的各个电极施加不同的电场时,液晶的指向朝着电场方向倾斜,液晶面板上呈线阵型排列的  $N$  个像素单元的折射率  $n_e$  发生变化,施加倾斜的相位延迟即可改变光束的出射方向,因此 LCSLM

调制光波前的  $2\pi$  相位变化量等效于周期性阶梯型的闪耀光栅分布<sup>[12]</sup>。

对于  $m$  级衍射光, 像素尺寸为  $D$  时, 光束偏转角的推算公式为:

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{mD} \quad (3)$$

闪耀光栅能量大部分都分布在一级衍射上,  $m=2$  时, 会同时在  $\pm 1$  两级衍射级发生闪耀, 两级衍射光强相等。  $m$  为其他值时, 都是在  $+1$  衍射级发生闪耀, 随着  $m$  的增大, 衍射位置逐渐靠近衍射零级, 由光束偏转角推导公式可知,  $\lambda$ 、 $D$  一般不变, 液晶光束偏转角主要取决于单个周期内液晶像素单元数量,  $m$  越大, 光束偏转角越小。

当光正入射到 LCSLM 上, 带有调制信息的出射光经透镜聚焦在接受面上, 如图 4 所示, 通过相位调制实现在二维平面  $X$ - $Y$  方向偏转, 汇聚点坐标为  $(x_1, y_1)$ , 出射光束的偏转角度为  $(\theta_x, \theta_y)$ 。

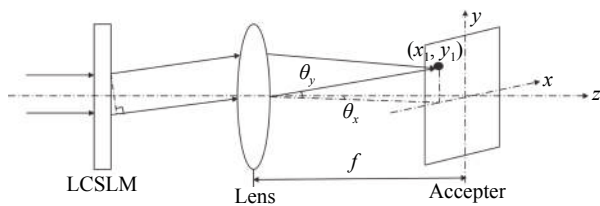


图 4 LCSLM 调制的光束偏转角度图

Fig.4 Diagram of LCSLM modulated beam deflection angle

其中:

$$\begin{aligned} \theta_x &= \arctan(x_1/f) \\ \theta_y &= \arctan(y_1/f) \end{aligned} \quad (4)$$

$\theta$  较小时, 光斑偏移距离与光栅周期之间的关系可用公式 (5) 表示:

$$x = \frac{\lambda}{mD} f = \frac{1}{m} x_0 \quad (5)$$

式中:  $x_0$  为光栅周期为像素尺寸  $D$  时的偏移距离。

基于闪耀光栅的光束偏转实验, 设计了如图 5 所示的系统结构图。光源经过扩束准直后, 经偏振镜变为水平线偏振光后入射至分光棱镜, 经反射垂直入射至 LCSLM 的液晶面板上进行光束偏转调制, 调制后的光束出射光经过 BS 通过透镜汇聚于 CCD 来观察和测量光斑。

根据 LCSLM 的相位调制特性计算出相应的相位

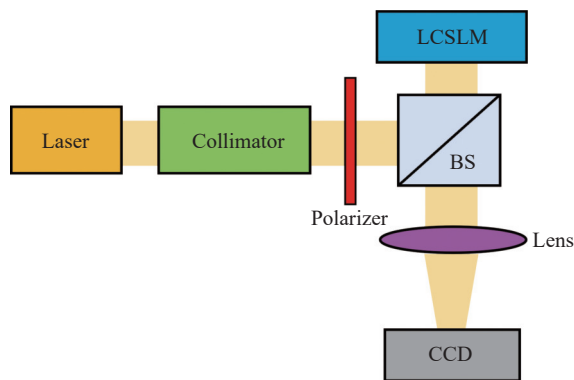


图 5 基于闪耀光栅系统结构图

Fig.5 Structure diagram based on blazed grating system

灰度驱动图, 每个像素上的不同灰度值即可改变不同像素上的相位延迟量, 通过控制软件, 将生成的不同相位图加载在 LCSLM 上进行实验, 在接收屏可以观察到如图 6 所示的结果。改变闪耀光栅的衍射角度、旋转角度等参数, 可以看到光斑发生明显偏移。

从实验结果可以看出, 衍射角度越大,  $0 \sim 2\pi$  变化周期越多, 光栅周期越小, 光斑偏移距离越大, 与前面的理论分析结论一致, 且表现在水平方向平移。零级光来自于像素间隔的反射以及 LCSLM 表面玻璃的反射, 不被相位调制, 所以原始光斑有很弱的一部分没有被调制。光栅方程满足关系:  $d \sin \theta = \lambda$ , 其中  $\lambda$  为波长, 表 1 是实测偏移距离  $S$  与光栅周期  $d$  之间的关系, 其中单个像素大小  $D=6.4 \mu\text{m}$ 。

将表 1 中的光栅周期  $d$  作为  $X$  轴, 偏移距离  $S$  作为  $Y$  轴, 画出的偏移距离与光栅周期之间的关系曲线如图 7 所示, 可以看出, 随着光栅周期的增多, 偏移距离逐渐减小。

LCSLM 对于单一方向 ( $X$  轴或  $Y$  轴) 可实现的最大偏转角度为  $\theta_{\max}$ :

$$\theta_{\max} = \arcsin \left( \frac{\lambda}{2d_{\text{pix}}} \right) \quad (6)$$

式中:  $d_{\text{pix}}$  为单个像素的大小<sup>[7]</sup>。

LCSLM 对于单一方向 ( $X$  轴或  $Y$  轴) 可实现的最小偏转角度为  $\theta_{\min_x}$  和  $\theta_{\min_y}$ :

$$\begin{aligned} \theta_{\min_x} &= \arcsin \left( \frac{\lambda}{d_{SLMx}} \right) \\ \theta_{\min_y} &= \arcsin \left( \frac{\lambda}{d_{SLMy}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $d_{SLMx}$  和  $d_{SLMy}$  为有效工作区域的边长。

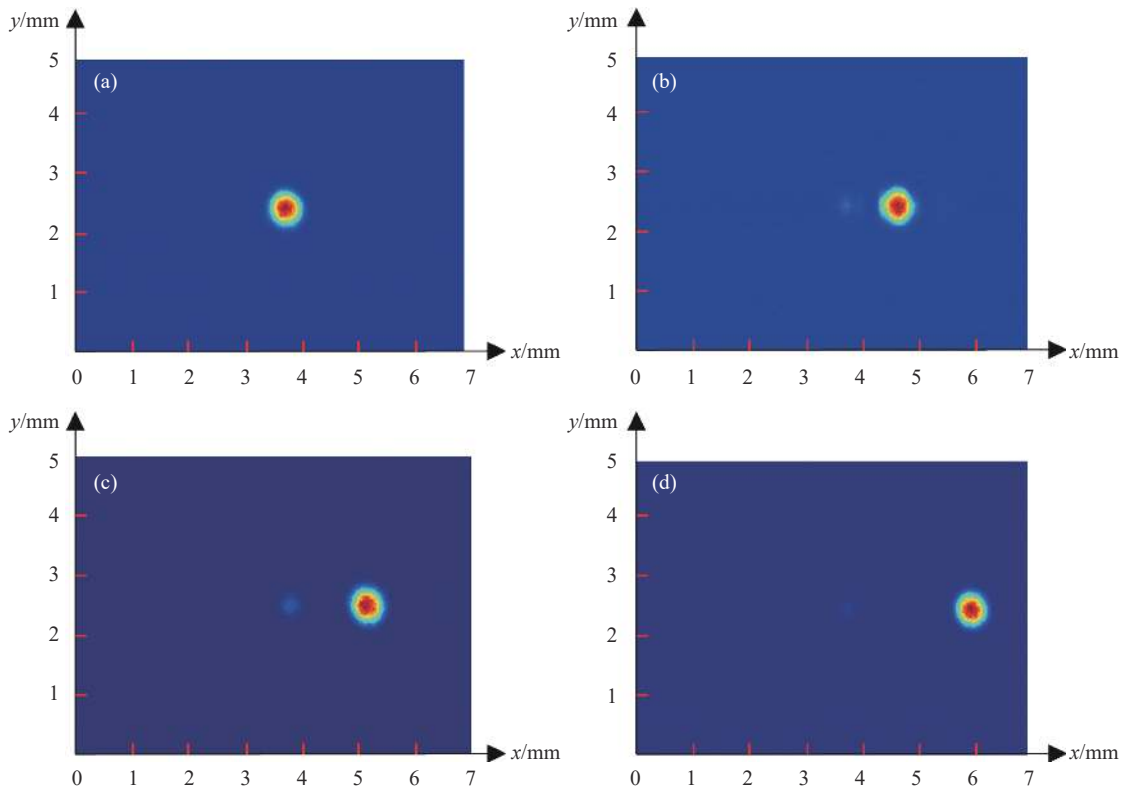


图 6 不同衍射角度的光斑图。(a) 初始光斑坐标 (3 887 μm, 2 745 μm ); (b)  $\theta_x=0.2$  坐标 (4 807 μm, 2 742 μm ); (c)  $\theta_x=0.3$  坐标 (5 305 μm, 2 709 μm); (d)  $\theta_x=0.5$  坐标 (6 165 μm, 2 727 μm);

Fig.6 Spot patterns with different diffraction angles. (a) Initial spot coordinates (3 887 μm, 2 745 μm); (b)  $\theta_x=0.2$  coordinates (4 807 μm, 2 742 μm); (c)  $\theta_x=0.3$  coordinates (5 305 μm, 2 709 μm); (d)  $\theta_x=0.5$  coordinates (6 165 μm, 2 727 μm)

表 1 偏移距离  $S$  与光栅周期  $d$  的关系 ( $D=6.4 \mu\text{m}$ )

Tab.1 Relationship between the offset distance  $S$  and the grating period  $d$  ( $D=6.4 \mu\text{m}$ )

$\theta$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$d/\mu\text{m}$	138 $D$	69 $D$	46 $D$	34 $D$	27 $D$
$S/\mu\text{m}$	402	920	1 418	1 857	2 278

入射波长为 1 550 nm, 经计算单一方向可实现的最大偏转角度为  $6.96^\circ(\pm 3.48^\circ)$ ,  $X$ 、 $Y$  方向的偏转精度分别为  $0.0073^\circ$  和  $0.0129^\circ$ 。实验中光斑分析仪距离光路出射端为 260 mm,  $X$ 、 $Y$  方向都实现了  $0\sim\pm 0.5^\circ$  的光束偏转。当衍射角度恒为  $0.5^\circ$  时, 改变相位图的旋转角度, 出射光斑结果如图 8 所示。

从实验结果可以看出, 衍射角度一定时, 改变相位图的旋转角度, 可以使光斑在二维平面  $x$ - $y$  偏移。这些实验现象与理论预测一致, 验证了 LCSLM 的相位校正能力。从实验结果可以看出除了本身的偏移

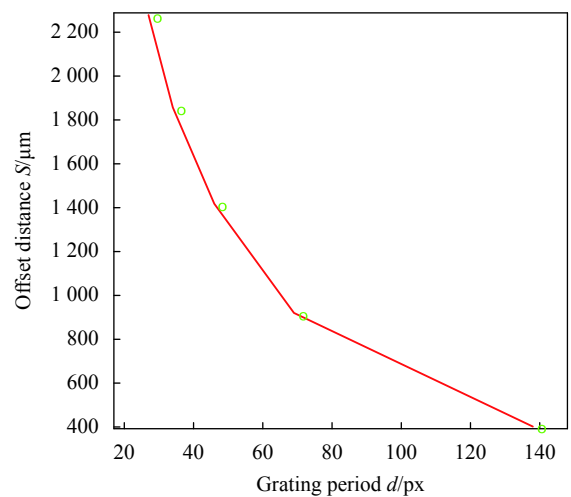


图 7 光斑偏移距离与光栅周期的关系

Fig.7 Relationship between the spot offset distance and the grating period

点外, 还会有很弱的镜像点存在, 这是因为闪耀光栅本身的结构导致的, 衍射角度变大时,  $\pm 1$  级的衍射点

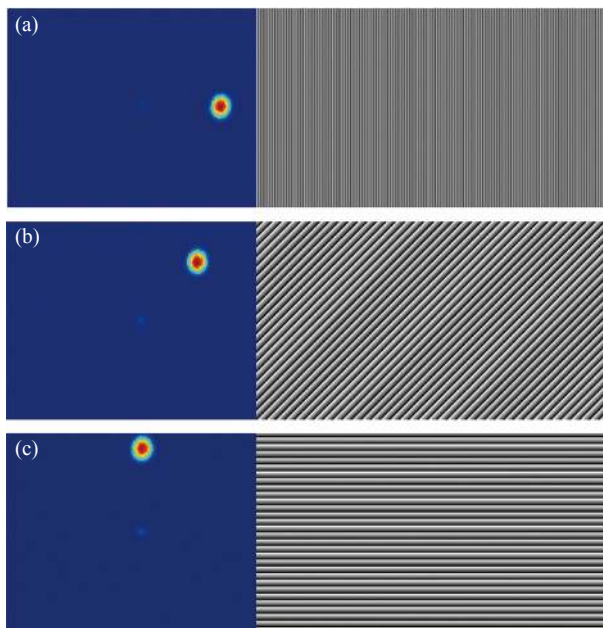


图 8 出射光斑及相位灰度图。(a) 初始光斑坐标 (6165 μm, 2727 μm); (b) 旋转角度 45°光斑坐标 (5497 μm, 4303 μm); (c) 旋转角度 90°光斑坐标 (3909 μm, 4978 μm)

Fig.8 Outgoing spot and phase gray scale map. (a) Initial spot coordinates (6165 μm, 2727 μm); (b) 45° rotation angle spot coordinates (5497 μm, 4303 μm); (c) Rotation angle 90° spot coordinates (3909 μm, 4978 μm)

越弱,衍射效率就越低。后续若闪耀光栅叠加菲涅耳透镜模型可以实现光束在三维方向的偏转。

### 3 光束偏转扫描控制实验系统

#### 3.1 LCSLM 相位图算法

主光路为光束通过透镜聚焦在 CCD 平面形成光斑,从 CCD 的光斑推导透镜前的相位。从点光源  $(x_0, y_0)$  发出的光,其波面表现为球面波,发散球面波在与点光源相距为  $z$  的  $x$ - $y$  平面上产生的复振幅为:

$$U(x, y) = \frac{a_0}{z} \exp(jkz) \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} \quad (8)$$

式中:  $a_0$  为点源自身的振幅;  $k = 2\pi/\lambda$  代表波矢。透镜将发散的球面波变换成一个会聚的球面波,根据前后变换的光场分布及高斯公式,焦距为  $f$  透镜的相位变换因子可表示为:

$$t(x, y) = \exp\left[-j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2)\right] \quad (9)$$

根据公式 (8) 和公式 (9) 可得透镜前的光场分布为:

$$U'(x, y) = U(x, y) \exp\left[j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2)\right] \quad (10)$$

利用编程语句提取透镜前光场相位  $\varphi$ , 若偏移接收视场中心位置,则在  $2\pi$  范围内需要补偿相位为  $2\pi - \varphi$ 。若要偏移接收视场任意位置,图 9 所示为一维方向上相位变换模型。

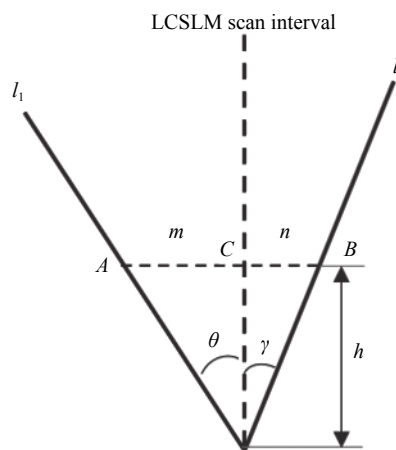


图 9 相位变换模型

Fig.9 Phase shift model

式中:  $l_1$  为变换前相位分布;  $l_2$  为变换后相位分布。相应变换点为  $A$ 、 $B$ , 根据公式 (4) 可知  $(\theta_x, \theta_y)$ , LCSLM 的像素坐标  $(x_h, y_h)$ , 根据最后想要定位到 CCD 上的坐标, 同理可知  $(\gamma_x, \gamma_y)$ , 所以  $AC$  间距离  $m$ ,  $BC$  间距离  $n$  可表示为:

$$\begin{aligned} m_x &= \tan \theta_x \cdot x_h \\ m_y &= \tan \theta_y \cdot y_h \\ n_x &= \tan \gamma_x \cdot x_h \\ n_y &= \tan \gamma_y \cdot y_h \end{aligned} \quad (11)$$

LCSLM 上每个像素对应的相位为:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (m_x + m_y + n_x + n_y) \quad (12)$$

0~255 灰度与相位呈线性关系:

$$G = \varphi \frac{255}{2\pi} \quad (13)$$

根据以上算法得到对应的相位灰度图加载在 LCSLM 上对光束进行偏移控制, 具体的光束控制流程如图 10 所示。首先把预先生成的相位图预读入内存, 随时调用。选择偏移模式, 包括偏移到光场中心

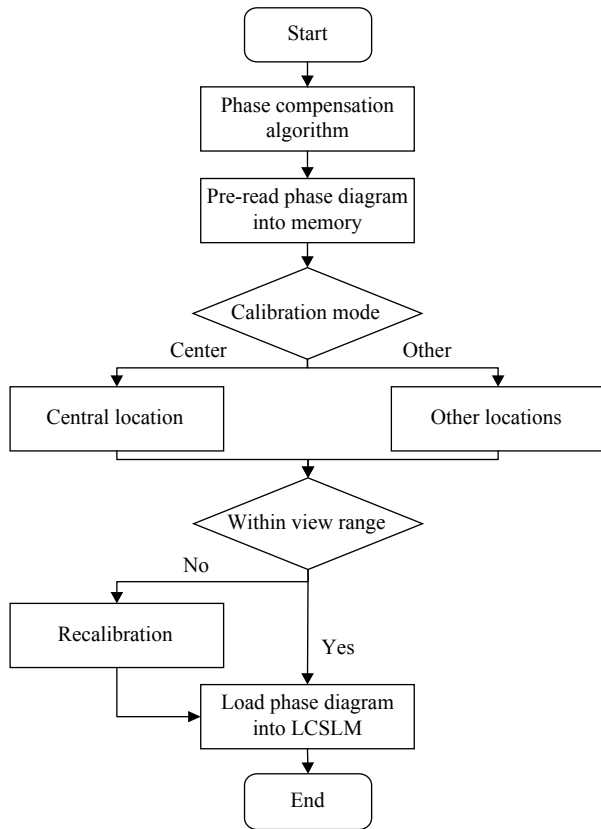


图 10 光束控制流程图

Fig.10 Flow chart of beam control

位置或 360°范围内其他位置,如果在视场范围内,则加载相位图到 LCSLM 上,否则重新校正偏移。

### 3.2 实验结果

为了验证基于 LCSLM 高速灵活的光束偏转能力,设计空间光束偏转控制实验系统,在室内搭建实验平台,如图 11 所示,测试系统主要由激光器、光纤准直器、起偏器、空间光调制器、分光棱镜、CCD 相

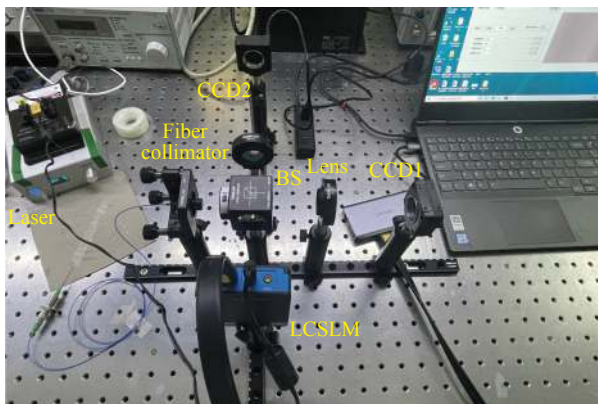


图 11 实验实物图

Fig.11 Physical image of the experiment

机等构成。采用 1550 nm 的激光经过准直器扩束准直,使入射激光尽可能接近平行光,并能充满液晶靶面,扩束后的光束入射到偏振片变为水平线偏振光,再经分光棱镜被分成两束光路,一束光经透镜聚焦到 CCD1 而得知光斑坐标,另一束反射光垂直入射到 SLM 上,根据光斑坐标反推透镜前相位,通过计算机控制软件来补偿光波前相位,从而改变出射光的位置。经 SLM 反射的出射光经过 BS 入射到 CCD2 一路接收来观察和测量光斑。

根据 CCD1 成像一路的坐标位置和透镜的相位变换作用,根据 LCSLM 液晶屏的大小确定扫描面范围,反推透镜之前的光场并提取光场相位分布,通过 LCSLM 补偿该相位改变等相位面为垂直方向,使光斑偏移到光场的中心位置。

根据 CCD1 接收的光斑坐标分别为 (1.050 mm, 0.188 mm)、(-1.313 mm, -0.938 mm)、(0.938 mm, -1.125 mm),推导透镜之前的光束相位分布,补偿该相位得到的灰度值分布及其灰度相位图如图 12 所示,其中只展示坐标为 (1.050 mm, 0.188 mm) 的补偿

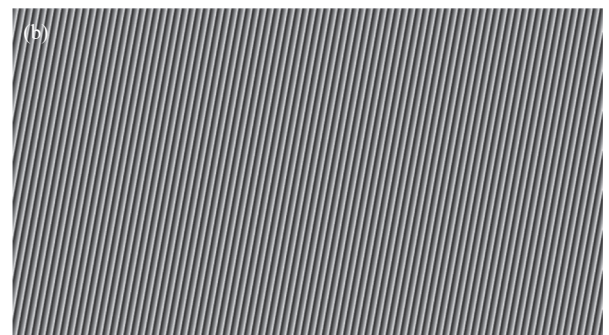
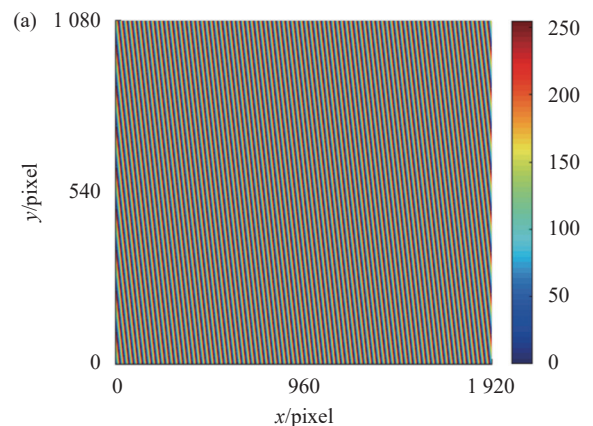


图 12 (a) 1920×1080 pixel 灰度值分布; (b) LCSLM 灰度相位图

Fig.12 (a) 1920×1080 pixel gray value distribution; (b) LCSLM grayscale phase map

相位图。

经 LCSLM 调制,使用相同的两个 CCD 相机标定,通过加载补偿的相位图,任意位置的光斑都可偏移到光场中心位置,在另一路 CCD2 观察光斑如图 13 所示。

从实验结果中可以看出,光场中任意位置的光斑可以精确定位到中心位置,基于 LCSLM 的光波前相位调控算法,光斑也可以在接收视场的任意范围内偏

移。此款 LCSLM 的光学利用率为 75% 左右,加上其他光学器件的损耗,偏移后的光斑能量有所下降。以 60 frame/s 的速率使光斑在视场范围内进行十字扫描,扫描结果如图 14 所示。红色标记为初始光斑位置,  $a\sim h$  分别为同一光束经过不同相位控制后,在光场中不同位置的汇聚结果图。

由于 LCSLM 的衍射效率和像素间隔的问题,光斑强度会减弱,实验中误差产生的原因主要是 LCSLM

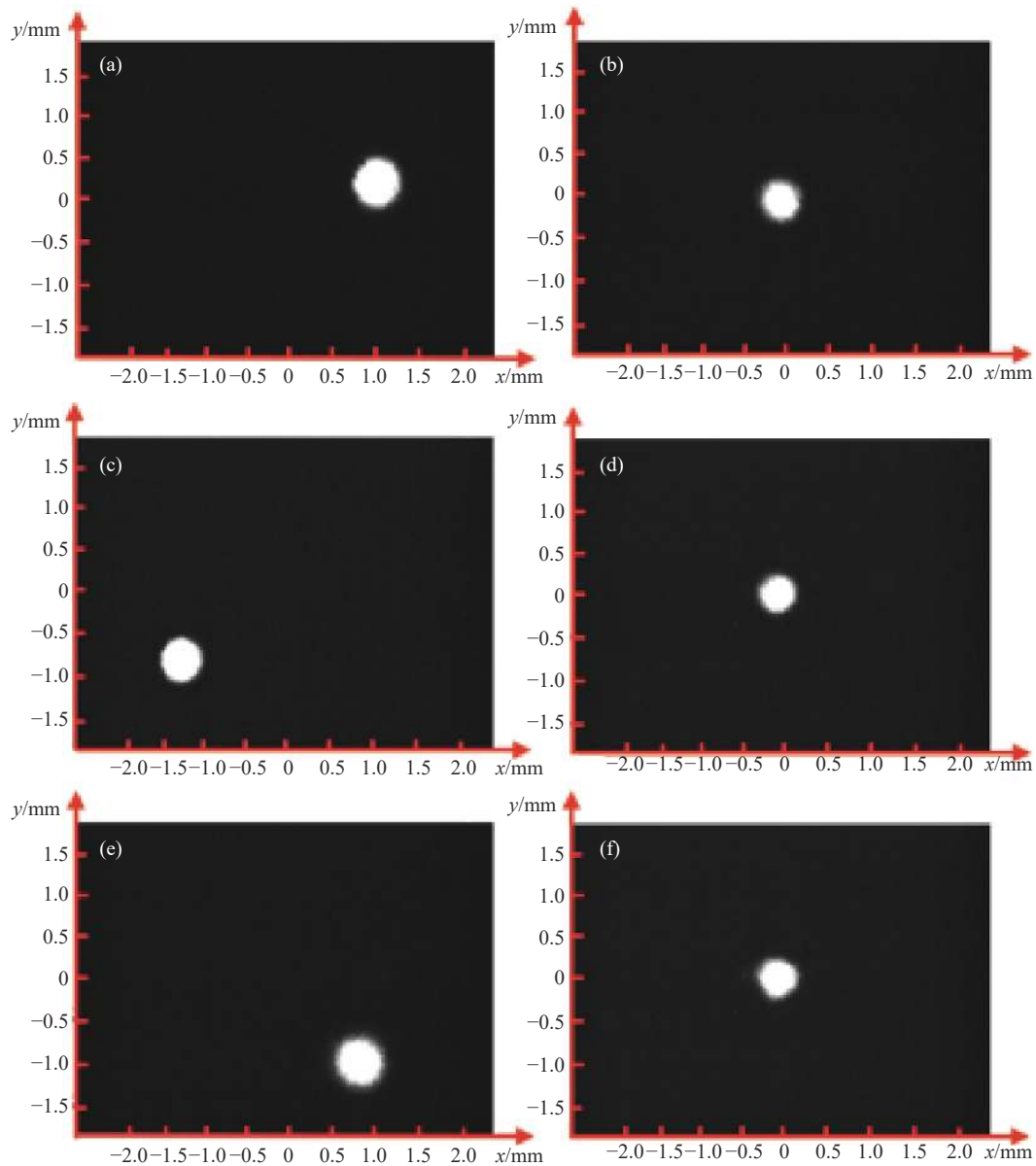


图 13 (a) 初始光斑坐标 (1.050 mm, 0.188 mm); (b) 初始光斑坐标 (-1.313 mm, -0.938 mm); (c) 初始光斑坐标 (0.938 mm, -1.125 mm); (d)-(f) 调制后光斑坐标 (0,0)

Fig.13 (a) Initial spot coordinates (1.050 mm, 0.188 mm); (b) Initial spot coordinates (-1.313 mm, -0.938 mm); (c) Initial spot coordinates (0.938 mm, -1.125 mm); (d)-(f) Modulated spot coordinates (0,0)



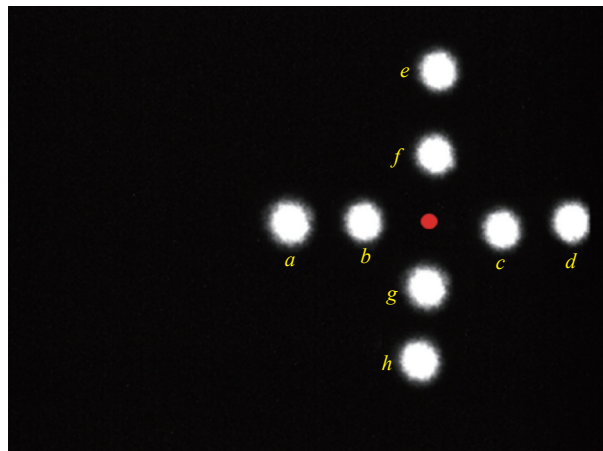


图 14 光斑十字扫描结果图

Fig.14 Result of the cross scan of the spot

像素的离散结构导致相位延迟存在偏差,此外,实验装置的光路也存在装调误差与测量误差,两路光路 CCD 标定不一致时,光斑偏移就会产生误差。

#### 4 结 论

文中利用空间光调制器的高分辨率,单独像素寻址的高速纯相位调制作用及可编程特性,提出一种满足光束高速灵活的偏转方案。在 LCSLM 上分别加载菲涅耳透镜相位图和闪耀光栅相位图,可实现光束在光轴方向和二维平面的偏移。针对空间光通信中光束的高速精确的扫描技术,设计了基于 LCSLM 的光束偏转扫描控制实验系统,提出了基于 LCSLM 的光波前相位调控算法,通过补偿等相位面使任意位置的光斑可偏移定位到接收光场中心位置或其他位置,实现了 LCSLM 对光束灵活偏转控制的能力。后续应优化相位图算法,能够实现自适应实时控制光束。

#### 参考文献:

[1] Jiang H L. Space Laser Communication Technology and System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)

[2] David E, Jorgen B, Emma E, et al. Improved beam steering accuracy of a single beam with a 1D phase-only spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18275-18287.

[3] Steven S, Jay S. Advances in liquid crystal based devices for wavefront control and beam steering[C]//SPIE, 2005, 5894: 180-192.

[4] Xu D, Tan G, Wu S T. Large-angle and high-efficiency tunable phase grating using fringe field switching liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12274-12285.

[5] Xiao W B. Research on beam deflection control technology based on liquid crystal optical phased array[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

[6] 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. (in Chinese)

[7] Zheng X B, Zhang X, Luan L, et al. Research on beam wide-angle scanning technology based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 2020, 41(4): 816-821. (in Chinese)

[8] Yang F Y, Huang Z Q, Peng Y W. Research on the algorithm of spatial light modulator for multi-beam two-dimensional deflection [J]. *Liquid Crystal Display*, 2020, 35(6): 537-546. (in Chinese)

[9] Xu M, Zhou Z, Ren H, et al. Liquid-crystal array based on polymer network liquid crystal [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(5): 053105.

[10] Liu C, Hu L, Mu Q Q, et al. Open-loop control of liquid-crystal spatial light modulators for vertical atmospheric turbulence wavefront correction [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(1): 82-89.

[11] Zang X, Hu W G, Wu D S, et al. Reflective liquid crystal spatial light modulator for beam convergence control [J]. *Optics Technology*, 2017, 43(6): 524-527. (in Chinese)

[12] Wang F M, Zhang Y H, Huang W, et al. Calibration of LC-SLM with strip grating phase image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0706005. (in Chinese)