

基于液晶空间光调制器的光束偏转控制技术

杨 赫, 佟首峰, 张 磊*, 常 帅, 宋延嵩, 赵 馨, 范新坤

长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 为实现基于液晶空间光调制器的非机械式光束智能控制, 利用像素个数为 1920×1080 的硅基液晶空间光调制器搭建了一个实验系统。该系统能在空间内实现大角度、高衍射效率、连续指向的单光束, 同时还可将入射光分成 2、3、4、5 束并单独控制每个分光束的偏转角度。介绍了空间光调制器的相位调制原理、理论模型, 验证了光束偏转控制及分光束功能, 分析测试系统的光路及原理, 最后对实验结果进行总结并提出建议与展望。

关键词 光通信; 光束偏转控制技术; 液晶空间光调制器; 多光束控制

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.110603

Beam Deflection Control Technology Based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Yang He, Tong Shoufeng, Zhang Lei, Chang Shuai, Song Yansong, Zhao Xin, Fan Xinkun

Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to realize non-mechanical beam intelligent control based on liquid crystal spatial light modulator, a test system is built with silicon-based liquid crystal spatial light modulator whose pixel number is 1920×1080 . The system can obtain the single beam with large angle, high diffraction efficiency, continuous steering in space, divide the incident light beam into 2, 3, 4, 5 beams and control deflection angle of each beam separately. Phase modulation principle and theoretical model of the spatial light modulator are introduced. The beam deflection control function and the beam splitting function are verified. The light path and the principle of the test system are analyzed. Finally, we sum up the test results and put forward the suggestion and prospect.

Key words optics communications; beam deflection control technology; liquid crystal spatial light modulator; multi-beam control

OCIS codes 060.5060; 120.5060; 230.3720; 230.4110

1 引言

由于传统光束偏转控制技术具有结构复杂、功耗高、机械惯量控制复杂等无法克服的缺点, 非机械式光束偏转控制在激光通信^[1-3]中有着不可替代的作用。非机械式光束偏转控制技术^[4-6]是指利用衍射原理对光束波前进行调制, 实现纯电控的光束偏转控制, 克服了传统的机械式光束偏转控制技术的许多缺点。利用液晶材料的电控双折射特性, 人们研制出用于非机械伺服控制的纯相位型液晶空间光调制器(LCSLM)。

2012年, Feng等^[7]提出了一种基于液晶空间光调制器光束偏转和相位调制技术的结构紧凑、调制效率高的零误差自由空间光通信链路, 实现了偏转角度为 3° 且调制带宽为 1.25 GHz 的长距离自由空间无线光

收稿日期: 2017-04-24; 收到修改稿日期: 2017-06-07

作者简介: 杨 赫(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事空间激光通信系统中光束偏转控制技术方面的研究。

E-mail: 572666864@qq.com

导师简介: 佟首峰(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间遥感与激光通信等方面的研究。

E-mail: tsf1998@sina.com

* 通信联系人。E-mail: zhanglei004171@163.com

通信。2015年, Xu等^[8]提出了一种通过调节相控单元电压切换边界电场(FFS)来调节相位的光栅模型, 能够实现衍射率大于32%的12.1°光束偏转, 同时可以在3个不同衍射级之间自由切换, 上升时间和衰减时间分别为0.21 ms和2.95 ms。国内外的许多研究单位已经完成调制器的制备并实现光束偏转的控制; 有的单位已将调制器做成闭环系统, 研究其在空间光通信中的应用、优化算法, 仿真分析标量衍射下液晶光束的偏转性能^[9-11]。但是这些成果较国外研究尚有较大差距。

基于液晶空间光调制器的非机械伺服控制技术难以同时实现大偏转角度、高偏转效率、高偏转精度单束光的获取和多束光的实时控制。针对上述问题, 建立了基于菲涅耳波带理论^[12-13]的液晶相控阵模型, 实现单束光最大偏转角度为4°的高精度连续偏转, 在±1°偏转角度范围内的衍射效率最高达76.1%, 同时实现了多束光的实时控制。

2 空间光调制器的相位调制原理

液晶实际上是一种介于固态和液态之间特殊状态的物质。根据分子排列方式的不同, 液晶可分为向列相、近晶相、胆甾相^[14]3种。图1(a)、(b)、(c)分别为向列相、近晶相、胆甾相液晶分子结构图。向列相液晶分子的排列方向是一致的; 近晶相液晶分子不仅排列方向一致而且成层状; 胆甾相液晶分子排列与前两者均不同, 呈螺旋状结构。向列相液晶和近晶相液晶分子的棒状结构以及特殊的排列结构使其呈现单轴晶体的特性, 即平行和垂直液晶分子长轴方向的折射率不同。当入射偏振光与向列相液晶分子长轴方向成 ω 角度入射时, 分解为平行和垂直液晶分子长轴方向的2个方向, 折射率分别为 n_o 和 n_e , 该现象为液晶的双折射效应。

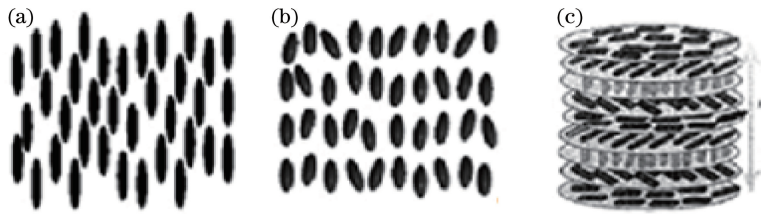


图1 液晶分子结构图。(a)向列相;(b)近晶相;(c)胆甾相

Fig. 1 Molecular structure of liquid crystal. (a) Nematic phase; (b) smectic phase; (c) cholesteric phase

在向列相液晶层的两侧施加电场, 液晶分子将在电压值超过某一阈值后重新取向, 这使得单轴晶体的光轴方向发生改变。该现象被称为液晶的电致双折射效应。纯相位型液晶空间光调制器的工作原理便是利用电控双折射效应, 通过对入射光的纯相位调制来实现光束的偏转, 该调制器是实现激光束智能控制的理想调制器件。

3 空间光调制器的理论模型

3.1 纯相位菲涅耳透镜设计

平面波经过菲涅耳波带片后, 会产生较多会聚或者发散的球面波, 菲涅耳波带片的某个级次决定这个球面波所代表的焦距与振幅, 在其中轴上会产生多个会聚点。

设菲涅耳波带透镜为 a 阶 b 个环带。其中 a 为相位级数, 即相位为 2π 的一个环带的台阶数; b 为菲涅耳透镜所包含的波带片数。每个台阶的相位等高, 且均为 $2\pi/a$, 各台阶的相位分布随着环带的相位变化而变化。根据上述设置以及标量衍射理论, 焦点的位置 z 决定于

$$-2mn\pi/a + 2\pi R^2/(2abz\lambda) = 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, ab - 1, \quad (1)$$

式中 R 为菲涅耳透镜的半径。焦点的位置为

$$z = R^2/(2nb\lambda), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

菲涅耳透镜可以消除所有高衍射级次, 使光的能量尽可能地集中在一个主焦点。由于菲涅耳透镜有多个离散的相位台阶, 所以它具有分离相位级次功能。当 $n=1$ 时菲涅耳透镜焦点的位置可表示为

$$z = R^2 / (2b\lambda) = f_0, \quad (3)$$

式中 f_0 为 $n=1$ 时菲涅耳透镜的焦距。通过改变 b 可以得到一系列离散的主焦点。

根据菲涅耳波带片的标量衍射原理,可设计纯相位型的菲涅耳波带透镜。将通过平移相位图改变会聚点空间位置的过程,等效成透镜沿光轴方向运动,使会聚焦点始终跟随透镜光轴移动,从而改变光束传播方向。相比振幅调制器件,纯相位器件具有能量利用率高、衍射效率高等优点,因此菲涅耳透镜常采用纯相位调制模式。根据标量理论,相位调制是指过空间一点的所有光的强度实现相干叠加,如图 2 所示。其核心思想是相位图上任意一点的光传播到 C 点时相位一致,满足干涉相长。

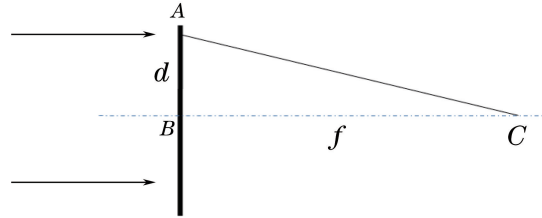


图 2 相位调制后的光束传播

Fig. 2 Beam propagation after phase modulation

假设平行光束照射到相位图板上,等效透镜的焦距为 f ,相位板上 A 点到光轴的距离为 d ,则 A 点到会聚点的距离 L 为

$$L = \sqrt{d^2 + f^2}, \quad (4)$$

则不同路径到会聚点的距离差 S 为

$$S = L - f = \sqrt{d^2 + f^2} - f, \quad (5)$$

根据(4)式和(5)式可以得到

$$d = \sqrt{2Sf + S^2}, \quad (6)$$

当 S 为波长的整数倍时,会聚点是干涉相长的,由于 $S \ll f$, (6)式可简化为

$$d = \sqrt{2Sf}, \quad (7)$$

式中 $S = n\lambda$, $n = 1, 2, 3, \dots$ 。通过取不同的 n 值可计算出每一个周期 2π 对应的空间距离 d_n ,对应的空间光调制器的像素个数 P 表示为

$$P = d_n / u, \quad (8)$$

式中 u 为像素大小。则每个像素对应的相位值为

$$\alpha = \frac{S - k\lambda}{\lambda} 2\pi = \frac{\sqrt{(P_v u)^2 + f^2} - f - k\lambda}{\lambda} 2\pi, \quad (9)$$

式中 P_v 为第 v 个像素, $k = 0, 1, 2, \dots$ 。

根据以上设计完成的相位图可实现空间会聚点的干涉相长,达到透镜会聚的效果。由于调制器像素受电压控制,其亮度曲线与输入电压呈非线性关系,导致亮度与电压之间的差异较大,需要进行线性化处理。这里用 $0 \sim 255$ 灰度值(DN, X_{DN})线性代表 $0 \sim 2\pi$ 的相位,即

$$X_{DN} = \frac{\alpha}{2\pi} \times 255 = \frac{\sqrt{(P_v u)^2 + f^2} - f - k\lambda}{\lambda} \times 255. \quad (10)$$

一维情况下,图 2 中 B 点到 A 点距离上的所有像素的灰度值,经(10)式计算可得到相位灰度值曲线分布如图 3 所示。图 3 是在波长为 632 nm 、焦距为 180 mm 、调制器像素大小为 $6.4 \text{ }\mu\text{m}$,一维取样 300 个像素下得到的每个像素的灰度值分布曲线。将(10)式扩展到二维分布,可得到等效透镜会聚的二维分布相位图如图 4 所示,像素个数取 500×500 ,其他参数不变。

3.2 偏转角度及衍射效率分析

调制器指标为像素大小为 $6.4 \text{ }\mu\text{m}$,像素个数为 1920×1080 。为提高衍射效率,将光轴中心设计在像素范围以内,其最大移动量为 500。该设计可在 $-2^\circ \sim 2^\circ$ 范围内实现 1000 细分,空间角分辨率可达到 $35 \text{ }\mu\text{rad}$ 。

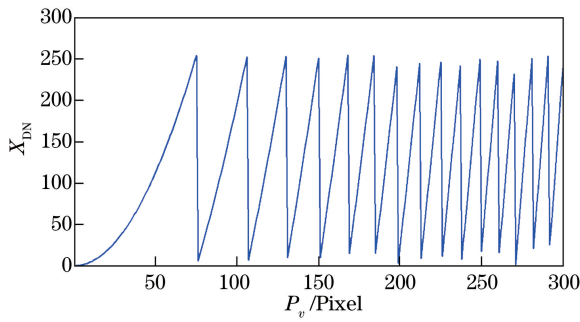


图3 不同像素上的灰度值分布曲线

Fig. 3 DN distribution curve of different pixels

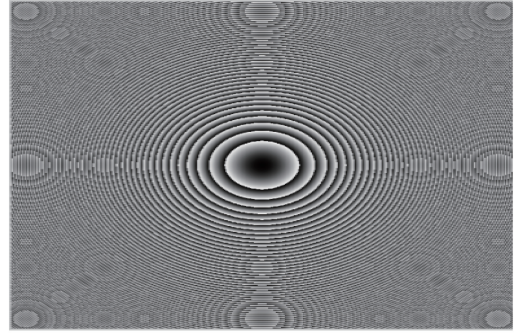


图4 计算合成的纯相位菲涅耳透镜相位图

Fig. 4 Calculated phase diagram of pure phase Fresnel lens

会聚点的最大移动距离 d 为 $500 \times 6.4 \times 10^{-3} = 3.2$ mm, 最大移动距离对应最大偏转角度, 即 $\theta = 2^\circ$ 。此时, 设计的菲涅耳透镜焦距 f 为 $3.2 / \tan 2^\circ = 91.64$ mm, 其几何关系如图 5 所示。

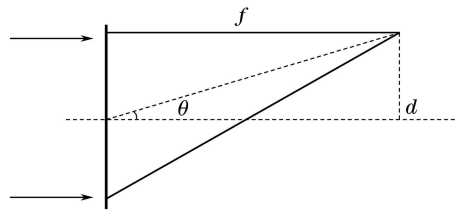


图5 会聚点一维扫描的几何关系

Fig. 5 Geometrical relationship of one-dimensional scanning focal point

为提高器件的衍射效率引入相位级数 a , 不影响焦距大小, 则菲涅耳波带片的衍射效率可表示为

$$\eta = \text{sinc}^2(j + 1/a), \quad (11)$$

式中 $j = 0, 1, 2, \dots$ 。当考虑主焦点时, $j = 0$, (11)式变为

$$\eta = \text{sinc}^2(1/a) = \left[\frac{\sin(\pi/a)}{\pi/a} \right]^2, \quad (12)$$

根据(12)式可得衍射效率和相位级数 a 的关系, 如表 1 所示。

表1 衍射效率随相位级数的变化

Table 1 Variation of diffraction efficiency with phase series

a	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
$\eta / \%$	10	41	68	81	88	91	93	95	97	98	98	99

从表 1 中可以看出, 当相位级数达到 8 位时, 衍射效率可达到 95%。在上述焦距指标和像素大小下分析一维相位分布, 300 像素以内的每个 2π 周期均被量化到 8 位以上, 因此具有较高的衍射效率。

3.3 相位图生成算法

将多个点平均分配到 1920×1080 屏幕上, 然后独立控制分屏幕的相位图, 可实现每个会聚点的独立控制。如图 6 所示, 设计 5 个会聚点, 可将屏幕分为 5 个 384×1080 的子屏幕, 每个子屏幕进行相位填充, 通过调制, 在焦平面处可实现 5 个会聚点的独立运动控制。

由于像素点数量较多, 计算量非常大, 将控制数据以单帧图片方式预读入内存, 根据用户指令的方式调用控制数据可以大幅改善响应速度, 最快可达到 60 Hz。单光束控制时, 将液晶空间光调制器等效成一个菲涅耳透镜, 通过索引控制相位图来改变会聚光束点的位置; 多光束控制时, 将液晶空间光调制器等效成一个菲涅耳透镜阵列, 改变每个菲涅耳透镜单元的会聚光点位置来控制分光束。这一过程可以用图 7 所示的流程示意图来表示。根据控制软件输入的 X 、 Y 坐标范围来判断当前的相位图是否满足要求。如果坐标输入值在偏移范围内, 则直接偏移相位图; 如果不在偏移范围内, 则根据 X 、 Y 重新索引调用相应的相位图, 然后再进行偏移, 最终将相位图数据加载到空间相位调制器上完成对光束的调制, 实现光束偏转功能以及单光束模式与多光束模式之间的转换。

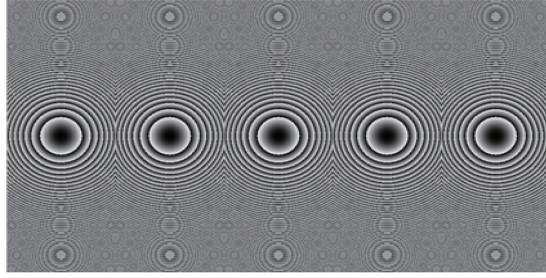


图 6 5 个独立控制的拼接相位图

Fig. 6 Five independent control mosaic phase diagram

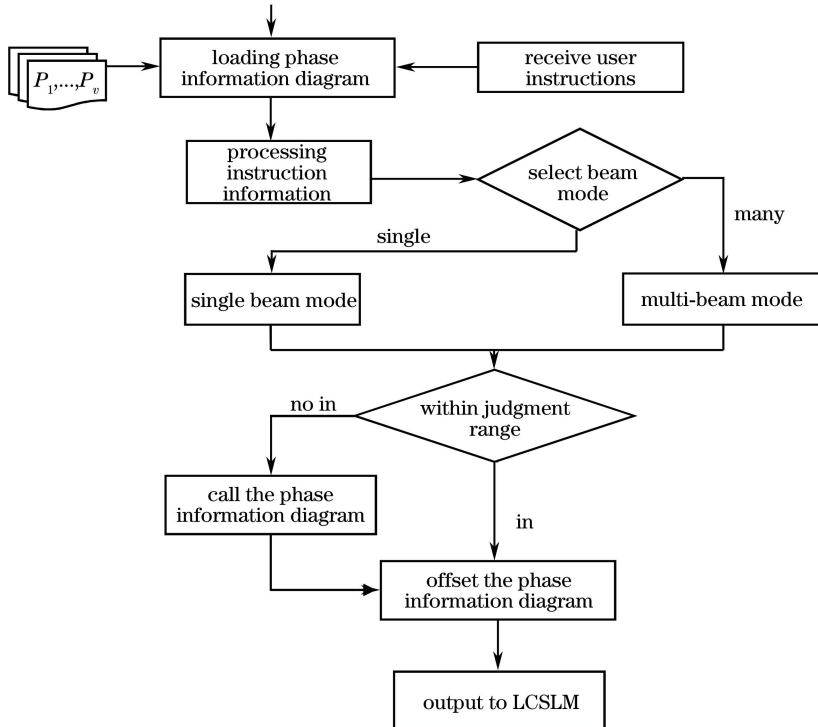


图 7 光束控制系统流程图

Fig. 7 Flow chart of beam control system

4 空间光通信光束偏转控制系统实验

为了完成空间光调制器的功能指标测试,在室内搭建实验平台,如图 8 所示。测试系统主要由激光器、

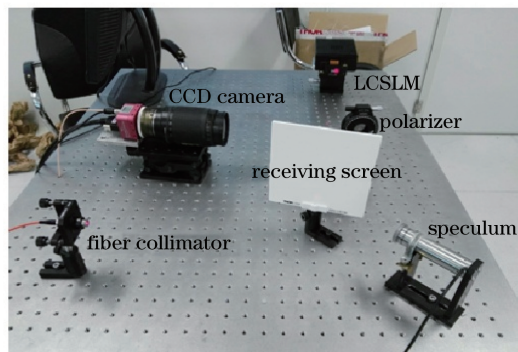


图 8 测试实验实物图

Fig. 8 Picture of test experiment

光纤准直器、光阑、扩束器、起偏器、空间光调制器、观测屏、分光棱镜、CCD 相机等构成。采用 650 nm 的激光经过准直器准直、光阑空间滤波后,扩束镜压缩光束束散角,使入射激光尽可能接近平行光,并能充满液晶靶面,扩束后的光束经 45° 角的反射镜反射后,入射到一个起偏器变为线偏振光,再垂直入射到液晶屏并充满液晶靶面。通过计算机控制软件的输入来改变出射光的位置和会聚焦点数量(分光束数量)。调制器反射出的光经分光棱镜被分成两束光路。一束光打在接收屏上,用于观察和测量;另一束光由 CCD 相机接收,用于精度检测。该实验分为 4 部分:偏转角范围测试,偏转精度测试,衍射效率测试,多光束的分光功能测试。下面详细分析各部分测试结果。

4.1 偏转角范围测试

根据测试实验系统功能,通过软件控制输入偏移量,可以将调制器的出射光斑成像到白板上。分别测量出光斑在白板 X、Y 方向上的最大偏移距离 s ,结合已知白板与调制器之间的距离 t ,可以计算出最大偏转角 θ :

$$\tan \theta = \frac{s}{t} \times \frac{\pi}{180} \quad (13)$$

根据实验数据绘制出控制器输入值(即通过控制软件输入的光斑偏移量,这里只给出 X 轴)与偏转角度 ($-2^\circ \sim 2^\circ$) 之间曲线如图 9 所示。

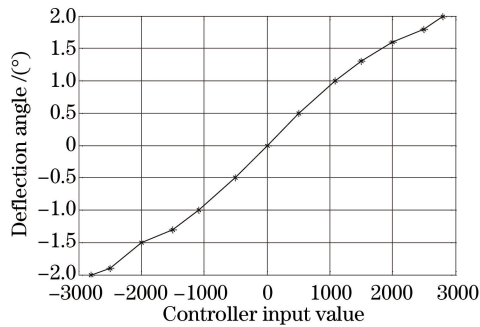


图 9 控制器输入(X 轴)与偏转角度关系曲线

Fig. 9 Relation curve between controller input (X axis) and deflection angle

控制器输入值范围为 $-2800 \sim 2800$,可以实现平面内 5600×5600 个角度的近似连续的光束偏转控制。在 $-1000 \sim 1000$ 之间时,控制器输入值与偏转角度近似为线性关系,激光束在二维方向上均达到 $\pm 1^\circ$ 的角度偏转,此时光斑质量较好,衍射效率较高,在 $65.2\% \sim 76.1\%$ 之间。最大可以达到二维方向上 $\pm 2^\circ$ 的角度偏转,但此时光斑的衍射效率以及光斑质量降低。故实验中设置偏转角度范围为 $-1^\circ \sim 1^\circ$,控制器输入值范围为 $-1000 \sim 1000$ 。这样,每一个控制器输入值对应 $1/1000^\circ$,对应的偏转分辨率约为 $17.45 \mu\text{rad}$ 。

4.2 偏转精度测试

光束偏转精度用光束偏转误差来定义,表达式为

$$\epsilon = (\theta - \theta') / \beta, \quad (14)$$

式中 β 是衍射极限下的光束发散角, θ 是期望的光束偏转角, θ' 是实际测得的光束偏转角。光束偏转误差越小,光束偏转精度越高。偏转精度测试通过 CCD 相机和图像采集板检测光斑坐标的变化来实现。控制软件控制调制器偏转一定角度后,观察并统计相机采集到光斑的坐标变化。由于相机的单个像素角分辨率为 $141 \mu\text{rad}$,当像素值 X 坐标变化为 1 时,对应的偏转角度为 $141 \mu\text{rad}$ 。而软件控制移动 1 个 X 值(或 Y 值)对应的调制器偏转角度约为 $17.5 \mu\text{rad}$ 。如果想要实现更高精度检测,需要利用图像采集板对相机像素进行细分,这里对相机像素进行 10 细分。但是由于所选用的激光器质量的限制,其出射光的远场光斑质量不好,导致光斑不稳定,在调整得非常好的时候,可以基本保证单个像素不跳变,单像素分辨率为 $141 \mu\text{rad}$ 。根据相机抓拍记录下光斑细分的结果绘制偏转角度与精度的关系曲线图,如图 10 所示,结果显示偏转精度为 μrad 量级,小于 $85 \mu\text{rad}$ 。

4.3 衍射效率测试

用光功率计对调制器输入与输出光进行能量测量,分析其在不同偏转角下的衍射效率。衍射效率 η 表示为

$$\eta = I_o / I_i, \quad (15)$$

式中 I_o 为从液晶空间光调制器出射的光束主光斑能量, I_i 为入射到液晶空间光调制器的光斑能量。实验中记录了光斑从 -1° 到 $+1^\circ$ 的衍射效率, 得到出射光斑的衍射效率与偏转角度的关系, 如图 11 所示。

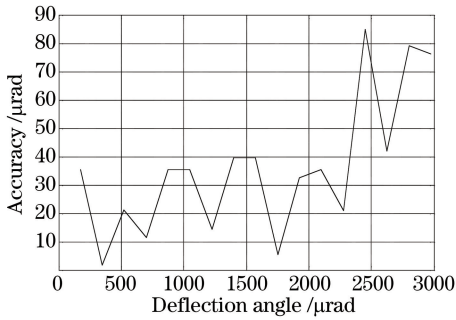


图 10 偏转精度与偏转角度的关系曲线

Fig. 10 Relation curve between deflection accuracy and deflection angle

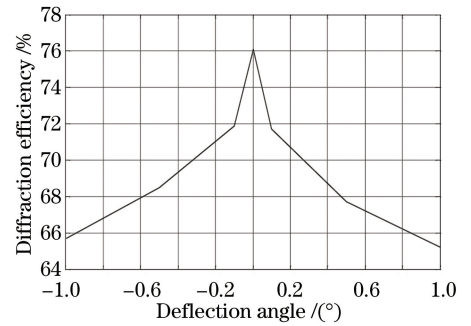


图 11 衍射效率曲线

Fig. 11 Diffraction efficiency curve

从图 11 可以看出, 当偏转角为 1° 时, 衍射效率最低, 在 65.5% 左右; 当光斑在原点, 即 $X=0$ 时, 衍射效率最高为 76.1%。当偏转角度增大, 衍射效率逐渐降低, 且下降速度逐渐变缓, 在 $\pm 0.1^\circ$ 以内下降速度最快。

4.4 多光束的分光功能测试

实验过程中通过计算机控制输入 2、3、4、5 分光命令, 在白板或相机靶面上观测光斑分布情况并记录保存下光斑图像。调整偏振片使光斑达到最佳效果, 为了方便观察经液晶空间光调制器反射的出射光, 入射光需与液晶屏成 5° 夹角。

图 12(a)~(d) 为空间光调制器将主光束分成 2、3、4、5 束光的效果图。通过控制软件可以完成空间分光束指向功能, 最多分光束为 5 束, 每束光的指向角可以通过控制器输入, 连续指向不同方向。多光束模式下每个分光束的控制器输入范围与单光束模式相同。经初步测试, 每个分光束的偏转范围与单光束模式下的偏转范围大致相同, 均为 $\pm 2^\circ$ 。多光束模式下随着分光束偏转角度的改变, 其能量也随之改变, 能量分布不均匀。通过理论分析, 其原因是给定分光束不同输入值相当于给单个菲涅耳透镜输入不同的位置, 而菲涅耳透镜的边缘位置和中心位置对光的会聚焦点不同, 造成每个分光束在同一接收屏上的光斑大小及能量分布不一。

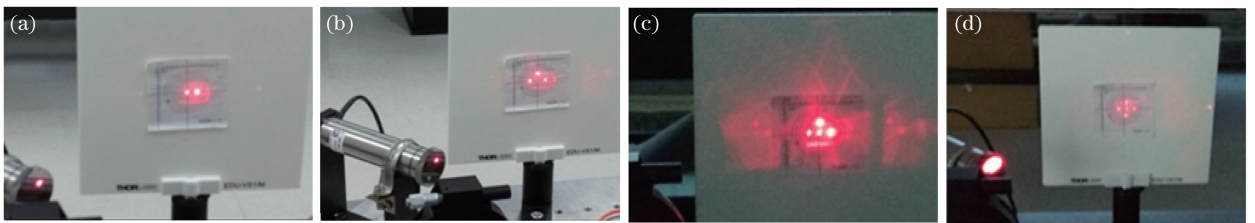


图 12 空间光调制器分光效果图。(a) 2 束光; (b) 3 束光; (c) 4 束光; (d) 5 束光

Fig. 12 Splitting effect diagram of spatial light modulator. (a) 2 beams of light; (b) 3 beams of light; (c) 4 beams of light; (d) 5 beams of light

5 结 论

基于硅基液晶的空间光调制器可以实现单光束和多光束两种模式之间的转换。完成了单、多束光空间连续指向, 最多分光束数量为 5 束。单束光指向时测试偏转角度最大可以达到 4° , 偏转精度误差为 μrad 量级。光束偏转角度在 $\pm 1^\circ$ 以内时, 光斑衍射效率大于 65.2%。在保证衍射效率和精度的前提下, 单光束指向模式的偏转角度、连续性等方面性能均大大提高, 且实现了多光束控制。下一步工作将对多光束模式下的每个分光束的偏转范围、偏转精度、衍射效率等性能展开研究。

参 考 文 献

- [1] Jiang Huilin. The technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 1-21.
姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 1-21.
- [2] Akaishi A, Takahashi T, Fujino Y, *et al.* Development of optically controlled beam-forming network[J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, 95(11): 3404-3411.
- [3] Wang J, Yang J, Fazal I, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488-496.
- [4] Zou Yongchao. Studies on large-field-of-view beam steering based on liquid crystal phased array[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
邹永超. 基于液晶相控阵的大角度光束偏转技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [5] Zhang Jian, Fang Yun, Wu Liying, *et al.* Liquid crystal beam steering technologies[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 325-334.
张建, 方运, 吴丽莹, 等. 液晶光束偏转技术[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 325-334.
- [6] Gao Yunshu. Research on diffraction effect of LC-SLM and its applications[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
高云舒. 液晶空间光调制器的衍射特性及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [7] Feng F, White I H, Wilkinson T D. Holographic beam steering a directly modulated two-electrode high brightness tapered laser diode for optical wireless communications[C]. 2012 Asia Communications and Photonics Conference, 2012: ATh2C.7.
- [8] 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.
- [9] Ding Ke, Qi Bo. Beam steering performance simulation of liquid crystal spatial light modulator based on 2D scalar diffraction[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0205005.
丁科, 亓波. 基于二维标量衍射的液晶光束偏转性能仿真[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0205005.
- [10] Chen Qin, Wang Huacun, Hu Xin, *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.
- [11] Li Luyao, Yan Lianshan, Ye Jia, *et al.* Mode conversion technology based on adaptive simulated annealing algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1206004.
李路遥, 闫连山, 叶佳, 等. 基于自适应模拟退火算法的光学模式转换技术[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1206004.
- [12] Kang S, Zhang X, Xie C, *et al.* Liquid-crystal microlens with focus swing and low driving voltage[J]. Applied Optics, 2013, 52(3): 381-387.
- [13] Xu M, Zhou Z, Ren H, *et al.* A microlens array based on polymer network liquid crystal[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(5): 053105.
- [14] Wang Dong. Research on agility control technology of laser beam by using phase-only liquid crystal spatial light modulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
王东. 基于纯相位液晶空间光调制器的激光束敏捷控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.