

# 高精度连续变倍率激光扩束系统设计

张洁<sup>1</sup>,倪小龙<sup>2,3</sup>,刘智<sup>2\*</sup>,齐冀<sup>2</sup>,姚海峰<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学 电子信息工程学院,吉林 长春 130000;

2. 长春理工大学 空间光电技术研究所,吉林 长春 130000;

3. 长春光客科技有限公司,吉林 长春 130000)

**摘要:**为了实现对激光束的准直变倍扩束,提出了一种基于液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)实现数字变焦透镜的方法,并利用这种方法搭建了基于 LC-SLM 的变焦扩束系统。首先根据透镜相位变换原理和 LC-SLM 的相位调制特性由计算机编程生成不同焦距的数字透镜相位调制图,实现不同焦距的数字透镜功能,通过凸透镜对平行光束的汇聚作用,验证该功能的有效性,平均误差为 0.95%。上述结果说明 LC-SLM 能够实现变焦透镜功能。接下来,通过与汇聚透镜组合实现对激光束的连续变倍率准直扩束。该系统的扩束倍率为  $2\times \sim 5\times$ ,均方根误差为 0.539 7 mm,峰谷值为 0.99 mm。实验结果表明,本文提出的方法可以实现对激光束不同倍率的扩束且扩束比连续可变。该系统解决了传统变焦系统无法满足多变的激光扩束需求的问题,且结构简单,精度高,在激光扩束应用方面具有广泛应用前景。

**关键词:**数字变焦透镜;液晶空间光调制器;激光扩束系统;相位调制图

**中图分类号:** TN246 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20191203.0693

## Design of laser beam expansion systems with high precision and continuous variable ratios

ZHANG Jie<sup>1</sup>, NI Xiao-long<sup>2,3</sup>, LIU Zhi<sup>2\*</sup>, QI Ji<sup>2</sup>, YAO Hai-feng<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China;

2. Institute of Space Optics and Electronics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China;

3. Changchun Guang Ke Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China)

\* Corresponding author, E-mail: liuzhiqi@cust.edu.cn

**Abstract:** In order to achieve collimation and zoom expansion in laser beams, a method of creating digital

收稿日期:2018-08-31;修订日期:2018-10-30

基金项目:国家自然科学基金(No. 61475025, No. 61775022);吉林省科技发展计划(No. 20170521001HJ, No. 20180519012JH);中国博士后科学基金资助项目(No. 2017M621179)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61475025, No. 61775022); Program of Jilin province Science and Technology Development Plan(No. 20170521001HJ, No. 20180519012JH); China Post-doctoral Science Foundation(No. 2017M621179)

zoom lenses based on LC-SLM(Liquid Crystal Spatial Light Modulator) is proposed and a zoom beam expansion system based on LC-SLM is built using this method. Firstly, according to the principles of lens phase transformation and the phase modulation characteristics of LC-SLM, the phase modulation maps of digital lenses with different focal lengths are generated using computer programming to obtain the function of digital lenses with different focal lengths. The effectiveness of the function is verified with the convergence of convex lenses to parallel beams. The average error is 0.95%. It can be concluded that LC-SLM can achieve the function of digital lenses with different focal lengths and realize a zoom lens' function. A  $2\times \sim 5\times$  continuous magnification collimation of the laser beam is then attained by combining it with the converging lens. The beam expansion error is 0.539 7 mm, and the peak valley value is 0.99 mm. The experimental results show that the method proposed in this paper can be used to expand the laser beam to different multiples and the beam expansion ratio can be varied continuously. This system solves the problem that the traditional zoom systems cannot meet the changing demands of laser beam expansion. It has a simple structure with high precision and has great significance in the applications of laser beam expansion.

**Key words:** digital zoom lens; liquid crystal spatial light modulator; laser beam expanding system; phase modulation map

## 1 引言

在激光通信应用中,激光器发出的光束半径通常较小,为了获得较大的通信距离以及较好的通信效果,需要较大口径的光束来保障接收端能够获得足够的光功率<sup>[1]</sup>。通常采用搭建激光扩束系统压缩激光空间发散角,从而使输出光束满足口径要求,达到对激光束准直扩束的目的<sup>[2]</sup>。为了满足实际应用中多变的口径需求,就需要扩束比连续可变<sup>[3]</sup>。国内外对于激光变焦系统的研究已较为成熟。叶井飞等人利用变焦镜头和定焦镜头实现了对激光束  $2\times \sim 13\times$  的透射式连续变倍扩束<sup>[4]</sup>。单娟等人设计了一款  $2\times \sim 6\times$  的透射式激光连续变倍系统<sup>[5]</sup>。卢政伟等人研制了一种基于巴塞格林系统的大口径激光发射的复合式无遮拦激光扩束器,可以提高激光发射效率<sup>[6]</sup>。Edmund Optics 公司研制出了一款激光扩束器可以对不同波长的激光束进行  $2\times \sim 8\times$  连续变倍扩束。CVIMG 公司研制出了 LBV 系列激光扩束系统实现了对激光束  $2.5\times \sim 10\times$  的连续变倍扩束。但是传统的激光变焦扩束系统需要利用多块组合透镜,受到光学元器件制作工艺、系统组装精度的限制,往往存在着结构复杂、体积大、响应慢、精度低等缺点,无法满足多变的激光扩束需

求。为解决上述问题,考虑到液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)具有可编程,体积小,功耗低,无须机械转动,响应速度快,测量精度高等优点<sup>[7-9]</sup>,本文提出采用主动的光学变焦系统,将 LC-SLM 作为主动光学元件加入到光学变焦系统中。本文设计的基于 LC-SLM 的变焦系统可以实现对激光束  $2\times \sim 5\times$  倍的连续变倍率准直扩束,且该系统具有响应速度快、操作方便,结构简单、精度高、维护成本较低等优点。然而,由于液晶只能对线偏振光进行校正,因此需要利用偏振片产生偏振光,这会导致能量的损失,另外,液晶还存在无法承受大功率激光照射的不足。因此,该系统不适合大功率以及对功耗敏感的场所。

## 2 基于 LC-SLM 的激光扩束系统的原理与设计

### 2.1 LC-SLM 实现数字透镜功能的原理

由于 LC-SLM 具有可编程性,故通过给其加载不同灰度信息的相位调制图可以控制加在其上的电压,通过改变外加电压可以改变液晶分子的指向,从而使液晶分子折射率发生变化,当入射光经过折射率不同的液晶分子后,就会产生光程差  $\Delta\varphi$ ,从而实现入射光波的相位调制<sup>[10-12]</sup>。利用

这一特性,使用 MATLAB 编程制作数字透镜相位调制图并加载到 LC-SLM 上,就可以实现数字变焦透镜的功能<sup>[13]</sup>。

光程差  $\Delta\varphi$  可表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d, \quad (1)$$

式中,  $d$  表示液晶盒的厚度,  $n_o$  表示寻常折射率,  $n_e$  表示异常折射率。

由透镜的相位调制原理,相位调制因子为  $\exp[-j\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)]$ ,用 LC-SLM 模拟透镜的关键在于如何实现相位调制因子的调制特性。由于衍射光学元件的相位函数范围为  $[0, 2\pi]$ ,根据 LC-SLM 的计算原理<sup>[14]</sup>,LC-SLM 模拟的透镜相位调制图的相位分布函数为<sup>[15]</sup>:

$$\varphi(x, y) = \text{mod}_{2\pi}\left[\frac{\pi}{\lambda f_{\text{LC-SLM}}}(x^2 + y^2)\right], \quad (2)$$

其中,  $x, y$  是从透镜中心测量笛卡尔横向坐标,  $\text{mod}_{2\pi}x$  表示  $x$  取模运算,  $f_{\text{LC-SLM}}$  表示基于 LC-SLM 的数字透镜的焦距,  $\lambda$  表示入射光的波长。

若想利用 LC-SLM 模拟一个焦距为  $f_{\text{LC-SLM}}$  的透镜,通过 Matlab 编程可得到透镜的相应调制图。加载到 LC-SLM 上,便可以实现数字变焦透镜的功能。

## 2.2 基于 LC-SLM 的激光变倍率扩束系统基本原理

激光光束为高斯光束,光束呈双曲线状。激光光束经过扩束系统的扩束原理如图 1 所示。

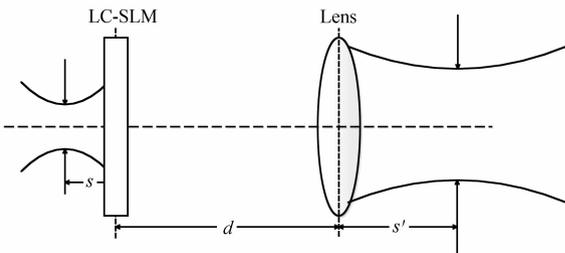


图 1 激光通过扩束系统的传输

Fig. 1 Transmission of laser beam through a beam expansion system

入射光束束腰为  $\omega_0$ ,物距为  $s$ ,通过扩束系统后变为束腰为  $\omega'_0$ 、像距为  $s'$  的高斯光束,则有如下数学表达式:

$$s = \frac{f}{f_{\text{LC-SLM}}}(f_{\text{LC-SLM}} + f) - \left(\frac{f}{f_{\text{LC-SLM}}}\right)^2 s', \quad (3)$$

其中,  $f$  为透镜的焦距,  $f_{\text{LC-SLM}}$  为 LC-SLM 的焦距。

伽利略望远镜的放大率由物镜和目镜的焦距决定。表达式为:

$$M = \frac{\omega'_0}{\omega_0} = \frac{f}{f_{\text{LC-SLM}}}, \quad (4)$$

发散角与束腰的关系成反比:

$$\frac{\theta}{\theta'} = \frac{\omega_0}{\omega'_0} = \frac{f_{\text{LC-SLM}}}{f}, \quad (5)$$

当  $s = f_{\text{LC-SLM}}, s' = f$  时,光束经过 LC-SLM 后的束腰半径  $\omega'_0$  达到极大值,表达式为:

$$\omega'_0 = \frac{\lambda f_{\text{LC-SLM}}}{\pi \omega_0}, \quad (6)$$

由式(5)、式(6)得:

$$\frac{\theta'}{\theta} = \frac{\pi \omega_0^2}{f_{\text{LC-SLM}} \lambda}, \quad (7)$$

由公式(3)得当  $s \gg f_{\text{LC-SLM}} + f$  时,  $s \approx -\left(\frac{f}{f_{\text{LC-SLM}}}\right)^2 s'$ ,在 LC-SLM 的焦面上将出现一个光点,此时的光束束腰为:

$$\omega'_0 = \frac{\lambda f_{\text{LC-SLM}}}{\pi \omega(l)}, \quad (8)$$

式中,  $\omega(l)$  表示高斯光束半径。

由上可知该扩束系统的准直倍率即发散角的缩小倍率为:

$$M' = \frac{\theta}{\theta'}. \quad (9)$$

根据上述分析得:

$$M' = \frac{f\omega(l)}{f_{\text{LC-SLM}}\omega_0} = M\sqrt{H - \left(\frac{\lambda S}{\pi\omega_0^2}\right)^2}. \quad (10)$$

因此,激光扩束系统在扩大光束直径的同时,还可以实现光束的准直输出。

本文基于 LC-SLM 设计的变焦模块,由发散镜组和汇聚镜组组成,且前后两组共焦。由于 LC-SLM 可以模拟焦距可变的透镜,用来模拟发散透镜与汇聚透镜结合构成变焦模块。如图 2 所示。

由式(2)及图 2 可知,系统扩束比  $M$  又可以表示为:

$$M = \frac{f_{\text{Lens}}}{f_{\text{LC-SLM}}} = \frac{h_{\text{out}}}{h_{\text{in}}}. \quad (11)$$

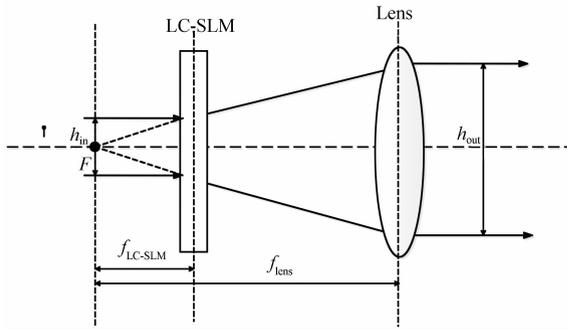


图 2 基于 LC-SLM 的变焦模块

Fig. 2 Zoom module based on LC-SLM

LC-SLM 模拟可自定义焦距的透镜,焦距用  $f_{LC-SLM}$  表示。因为 LC-SLM 与汇聚透镜共焦,当  $f_{LC-SLM,1}$  由  $f_{LC-SLM,1}$  变为  $f_{LC-SLM,2}$  时,为了使 LC-SLM 与汇聚透镜继续保持共焦,则需要将 LC-SLM 移动距离  $d$ 。

$$d = f_{LC-SLM,1} - f_{LC-SLM,2} \quad (12)$$

从以上分析可以看出,  $M$  不仅与系统中透镜的焦距有关,还与透镜间的距离有关。

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 LC-SLM 实现数字透镜功能验证实验

本文所设计的激光扩束系统的核心是 LC-SLM 可以实现变焦透镜的功能,为了验证此功能,将 LC-SLM 上加载焦距为正的透镜相位调制图,即此时用 LC-SLM 模拟一个凸透镜。根据菲涅尔透镜的性质,取模运算后的相位分布菲涅尔环带从内到外逐渐密集,达到一定程度时,则 LC-SLM 的相位调制量将会出现误差<sup>[16]</sup>。LC-SLM 的调制特性需求,相邻像素之间的最大相位差为  $\pi$ 。因此,  $f_{LC-SLM}$  应该满足<sup>[17]</sup>:

$$|f_{LC-SLM}| > \frac{2r_{\max}d}{\lambda} = \frac{Nd^2}{\lambda} \quad (13)$$

其中,  $N$  表示液晶层的像素个数,  $d$  表示像素间隔,  $\lambda$  表示激光器的波长。

本文选用美国 BNS 公司的纯相位液晶空间光调制器,其分辨率为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ,有效尺寸为  $7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$ ,由公式(13)计算可得  $|f_{LC-SLM}| > 147 \text{ mm}$ 。

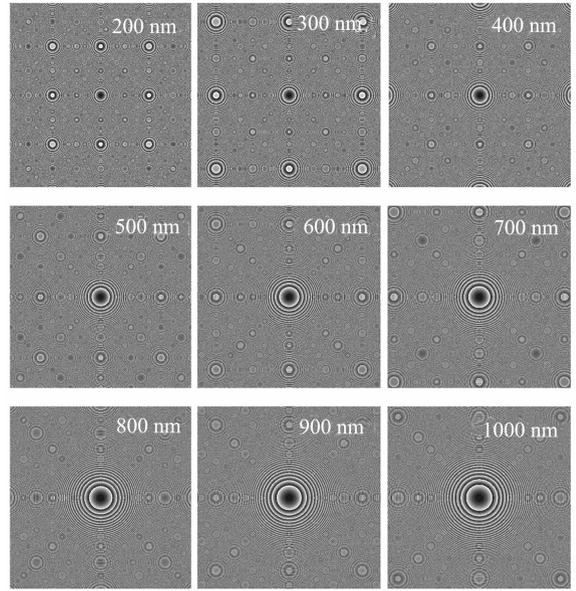
图 3  $\lambda = 785 \text{ nm}$  时不同焦距的变焦透镜相位调制图Fig. 3 Phase modulation diagrams of zoom lens with different focal lengths when  $\lambda = 785 \text{ nm}$ 

图 3 是波长为  $785 \text{ nm}$  下不同焦距的变焦透镜相位调制图。基于 LC-SLM 的可变焦实验系统图如图 4 所示。

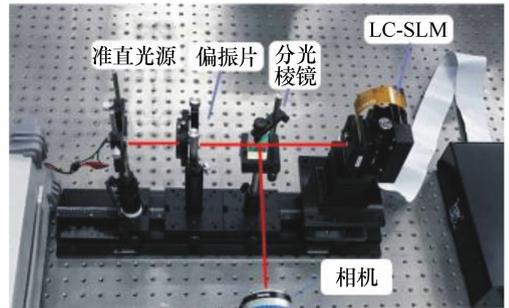


图 4 基于 LC-SLM 的变焦透镜实验系统图

Fig. 4 Experimental system diagram of a zoom lens based on LC-SLM

波长为  $785 \text{ nm}$  的准直平行光束,经过偏振片得到满足 LC-SLM 纯相位调制的偏振光,将焦距为  $f = 200 \text{ mm}$  的透镜相位调制图加载到 LC-SLM 上,这时 LC-SLM 相当于一个焦距为  $200 \text{ mm}$  的凸透镜,根据凸透镜对平行光束的汇聚作用知,在焦点处可以得到一个最小、最亮的光斑。如图 5 所示,将 LC-SLM 放置在一个标有刻度线的滑轨上,来回移动 LC-SLM 的位置,通过相机观察接收到

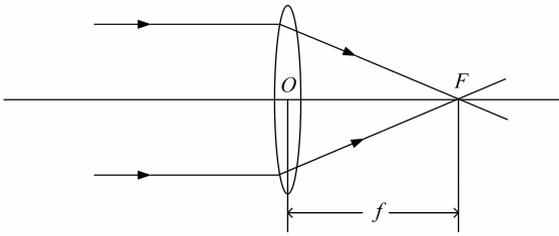


图5 凸透镜对平行光的汇聚作用示意图

Fig.5 Schematic of convergence effect for convex lens to parallel light

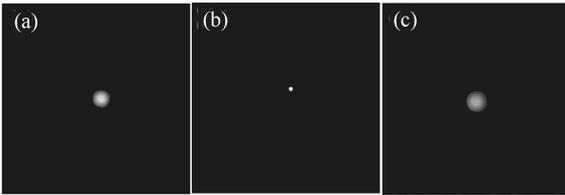


图6 相机接收的光斑图像

Fig.6 Spot images received by the camera

的光斑的变化,并记录光斑最小最亮时 LC-SLM 的位置。图6中(a)、(b)、(c)为由相机记录的距离 LC-SLM 分别为 195、200 和 208 mm 处的光斑图像。

实验结果表明:光斑最小、最亮时距离为 200 mm,也就是透镜理论焦距处。符合凸透镜对平行光束的汇聚作用规律,即可以实现透镜功能。

加载焦距不同的透镜相位调制图,来回移动 LC-SLM,通过相机观察记录焦点位置,测得实际焦距值。为了减少随机误差,每个实验数据重复测量 3 次,再取平均。记录实验结果如表 1 所示。图 7 为 LC-SLM 变焦透镜焦距曲线。由于 LC-SLM 电光效应的非线性,以及制作工艺上存在反射镜层表面不平整、液晶层厚度不均匀的问题,导致相位调制函数不是理想的线性关系,存在相位畸变,即 LC-SLM 变焦透镜理想焦距值与实际焦距值存在一定偏差。与平均误差为 0.95% 时,可认为 LC-SLM 能够实现变焦透镜功能。

表 1 基于 LC-SLM 变焦透镜焦距理论值与测量值

Tab.1 Theoretical values and measurement values of focal length of zoom lens based on LC-SLM

$f_{LC-SLM}$ 理论值/mm	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$f_{LC-SLM}$ 测量值/mm	200	300	405	491	604	708	812	910	989

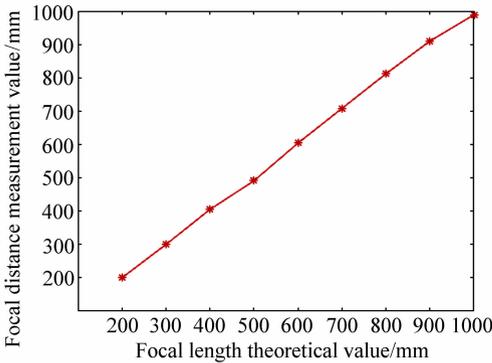


图7 LC-SLM 变焦透镜焦距曲线

Fig.7 Focal length curve of a LC-SLM zoom lens

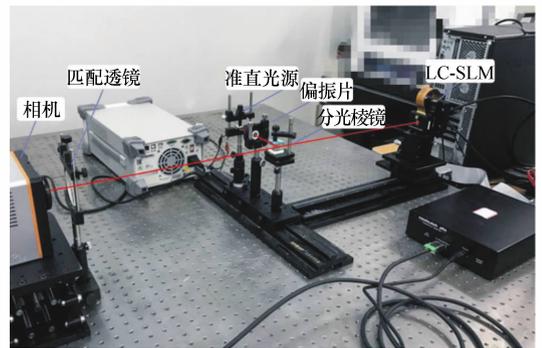


图8 基于 SC-SLM 的变倍率扩束系统实验图

Fig.8 Experimental diagram of magnification beam expansion system based on SC-SLM

### 3.2 基于 LC-SLM 的激光扩束系统实验

结合前面对基于 LC-SLM 的变倍率激光扩束技术的分析与讨论,搭建了如图 8 所示的基于 LC-SLM 的激光扩束系统,为了方便器件的移动,底部设置两个标有刻度的滑轨。入射激光波长  $\lambda = 785 \text{ nm}$ , 光束直径  $D = 6 \text{ mm}$ , 汇聚透镜的焦距

和直径要根据系统的具体指标来确定,系统的扩束倍率为  $2 \times \sim 5 \times$ , 选用的 LC-SLM 的通光孔径  $D_{LC-SLM} = 7.68 \text{ mm}$ , 若入射的准直平行光束高度  $h_{in}$  达到最大,即  $h_{in} = D_{LC-SLM}$  若使扩束倍率为  $M = 5 \times$ , 由公式(11)可知出射光束高度  $h_{out}$  应满足

$h_{out} = 5h_{in}$ 。则匹配透镜的通气孔径  $D_{lens} = h_{out} = 38.4 \text{ mm}$ 。因此,匹配透镜的直径应大于  $38.4 \text{ mm}$  才能满足实验要求。对于汇聚透镜焦距的选择,LC-SLM 可模拟透镜的最小焦距为  $147 \text{ mm}$ ,根据式 (11),当系统扩束比达到最大值  $M = 5 \times$ ,  $|f_{LC-SLM, min}| = 147 \text{ mm}$  时,若想满足设定扩束比值,则  $f_{lens} = 735 \text{ mm}$ 。所以本文选定的匹配透镜焦距为  $f = 800 \text{ mm}$ ,直径为  $D = 50 \text{ mm}$ 。

以  $M = 2 \times$  为初始状态,首先在 LC-SLM 上加

载  $f_{LC-SLM} = -400 \text{ mm}$  的透镜相位调制图,LC-SLM 与匹配透镜距离为  $400 \text{ mm}$ ,记录相机此时接收到的光斑图。当  $M = 3 \times$  时,由公式 (11) 和 (12) 得,在 LC-SLM 上加  $f_{LC-SLM} = -266.7 \text{ mm}$  的透镜相位调制图,LC-SLM 向前移动  $133.3 \text{ mm}$ ,记录相机此时接收到的光斑图。同理得到  $M = 4 \times$  和  $M = 5 \times$  时相机接收到的光斑图。不同的扩束倍率对应的相位调制图、LC-SLM 移动距离及相机接收到的光斑图如图 9 所示。

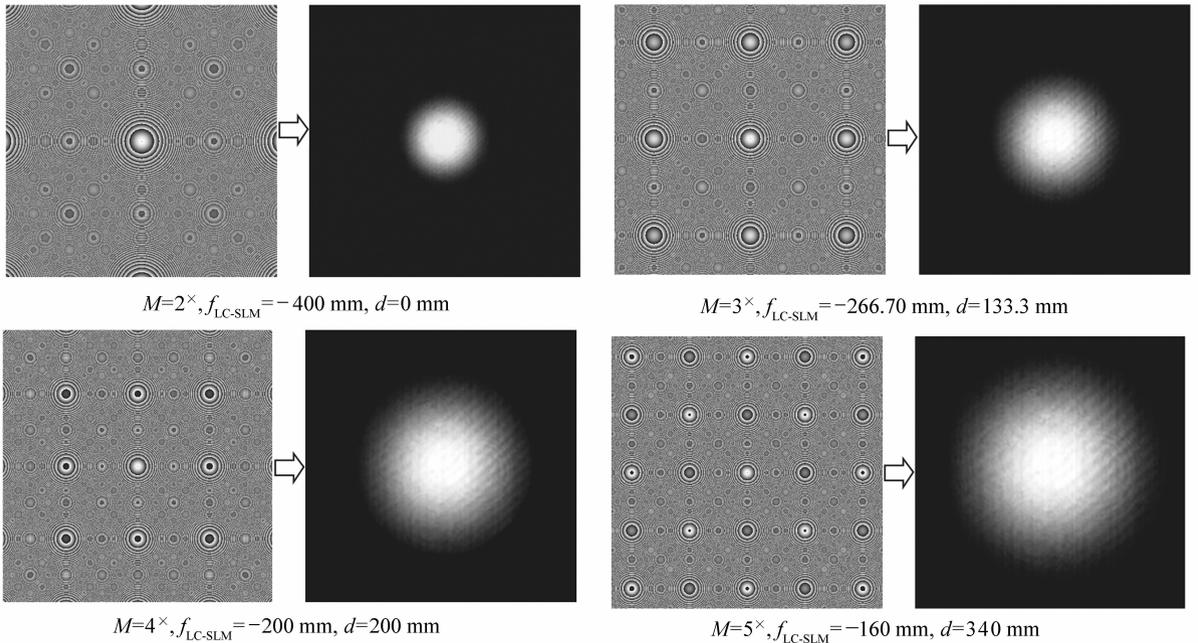


图 9 不同扩束倍率对应的相位调制图与相机接收到的光斑图

Fig. 9 Phase modulation diagrams corresponding to different beam expansion ratios and the spot patterns received by the camera

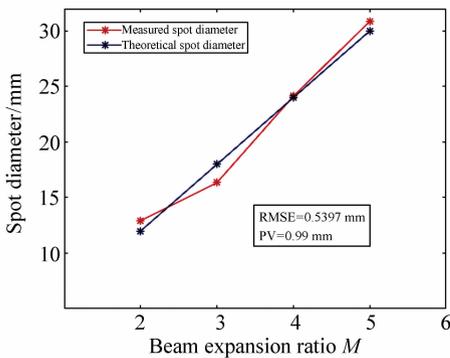


图 10 光斑直径曲线

Fig. 10 Light spot diameter

表 2 经基于 LC-SLM 变倍率激光扩束系统扩束后的光斑直径实测值与理论值数据

Tab. 2 Measured values and theoretical values of spot diameter by using magnification laser beam expanding system based on LC-SLM

扩束倍率 $M$	$f_{LC-SLM}/\text{mm}$	理论光斑直径/mm	实测光斑直径/mm
$2 \times$	-750	12	12.32
$3 \times$	-500	18	17.05
$4 \times$	-375	24	24
$5 \times$	-300	30	30.4

通过 MATLAB 求出上述光斑的直径。实验测得的直径数据与理论直径进行对比如表 2 所

示。光斑直径曲线如图 10 所示,经计算得到基于 LC-SLM 变倍率激光扩束系统  $RMSE = 0.5397$  mm,  $PV = 0.99$  mm。

## 4 结 论

本文利用凸透镜成像原理,证实了 LC-SLM

能够实现透镜功能。结合 LC-SLM 的相位调制特性和透镜相位变换理论,得到不同焦距的数字透镜相位调制图,实现透镜焦距自定义功能。利用这一功能将其加入到变焦系统中,实现了激光光束口径连续扩束,扩束范围为  $2\times \sim 5\times$ 。解决了传统变焦系统需要使用多个透镜组件带来的不便,缩小了变焦系统体积,简化了操作,提高了激光扩束的精度。

## 参考文献:

- [1] 向劲松. 采用光纤耦合及光放大接收的星地光通信系统及关键技术[D]. 成都:电子科技大学,2007.  
XIANG J X. Fiber coupled and optically preamplified satellite-to-ground bidirectional laser communication system and its key technologies[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology,2007. (in Chinese)
- [2] 王子余. 几何光学和光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,1989.  
WANG Z Y. *Geometrical Optics and Optical Design*[M]. Hangzhou:Zhejiang University Press,1989. (in Chinese)
- [3] 孔祥蕾,郝沛明. 变焦扩束系统的光学设计[J]. 应用光学,2001,22(5):7-11.  
KONG X L,HAO P M. Optical design of zoom beam expander system[J]. *Applied Optics*,2001,22(5):7-11. (in Chinese)
- [4] 叶井飞,高志山,叶海水,等. 大变倍比近红外无焦激光扩束系统[J]. 光学精密工程,2013,21(5):1129-1136.  
YE J F,GAO ZH SH, YE H SH, *et al.*. Near-infrared afocal kaser bean expanding system with large zoom ratio[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013, 21(5): 1129-1136. (in Chinese)
- [5] 单娟,张鹏,付玉虎. 激光变焦扩束光学系统设计[J]. 光学与光电技术,2013,11(4):72-76.  
SHAN J,ZHANG P,FU Y H. Design of optical zooming system used for collimating laser beams[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2013, 11(4):72-76. (in Chinese)
- [6] 卢政伟,邵帅,马亚坤. 复合式无遮拦激光扩束器的设计[J]. 中国光学,2018,11(4):582-589.  
LU ZH W,SHAO SH,MA Y K. Design of a composite laser beam expander without obscuration[J]. *China Optics*,2018, 11(4):582-589. (in Chinese)
- [7] 陈魏华. 基于空间光调制器的主动光学变焦系统的初探[D]. 合肥:安徽大学,2012:1-56.  
CHEN W H. Preliminary research of active optical zoom system based on spatial light modulator[D]. Hefei:Anhui University, 2012:1-56. (in Chinese)
- [8] 张颖,赵海博. 带有补偿器的液晶相位可变延迟器[J]. 光学精密工程,2009,17(8):1798-1803.  
ZHANG Y,ZHAO H B. Liquid crystal variable retarder attached with compensator[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(8):1798-1803. (in Chinese)
- [9] 曹召良,李小平,宣丽,等. 液晶自适应光学研究进展[J]. 中国光学,2012,5(1):12-19.  
CAO ZH L,LI X P,XUAN L, *et al.*. Recent progress in liquid crystal adaptive optical techniques[J]. *China Optics*, 2012,5(1):12-19. (in Chinese)
- [10] 胡立发,彭增辉,王启东,等. 纯位相液晶调制器的响应特性计算[J]. 液晶与显示,2017,32(3):182-189.  
HU L F,PENG Z H,WANG Q D, *et al.*. Calculation of electro-optical characteristics of phase-only liquid crystal modulator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,2017,32(3):182-189. (in Chinese)
- [11] 李小平,胡五胜,于洪丽,等. 基于液晶空间光调制器的相位差波前探测技术定量研究[J]. 液晶与显示,2017,32(3):234-239.  
LI X P,HU W SH,YU H L, *et al.*. Quantitative analysis on phase diversity technique based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,2017,32(3):234-239. (in Chinese)
- [12] 杜升平,傅承毓,黄永梅,等. 一种液晶相位调制特性的测量方法[J]. 光子学报,2017,46(1):93-100.

- DU SH P, FU CH Y, HUANG Y M, *et al.*. A method of measure the liquid-crystal's modulating characteristic [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46 (1): 93-100. (in Chinese)
- [13] 刘春梅. 基于 LCOS 光学变焦系统研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2013: 1-29.  
LIU CH M. LCOS-based optical zoom system research [D]. Hefei: Anhui University, 2013: 1-29. (in Chinese)
- [14] BUCKLEY E. Holographic display devices: US Patent, US2009/0207466 [P]. 2009-08-20.
- [15] REICHERTER M, HAIST T, WAGEMANN E U, *et al.*. Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(9): 608-610.
- [16] ZWICK S, SCHAUB C, HAIST T, *et al.*. Light fields with an axially expanded intensity distribution for stable three-dimensional optical trapping [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19941-19950.
- [17] 李颖奎, 齐冀, 张洁, 等. 基于液晶空间光调制器的变倍率激光扩束技术研究 [J]. *液晶与显示*, 2018, 33(9): 764-771.  
LI Y K, QI J, ZHANG J, *et al.*. Laser beam expanding technology based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(9): 764-771. (in Chinese)

#### 作者简介:



张洁(1992—),女,河南安阳人,硕士研究生,2012年于郑州航空工业管理学院获得学士学位,主要从事液晶空间光调制器和大气激光传输方面的研究。  
E-mail: 1061674754@qq.com



刘智(1971—),男,吉林长春人,博士,教授,1993年、2001年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间激光通信技术和激光在复杂信道中传输特性方面的研究。E-mail: liuzhiqi@cust.edu.cn