

文章编号:1007-2780(2018)09-0764-08

基于液晶空间光调制器的变倍率 激光扩束技术研究

李颖奎¹, 齐 冀², 张 洁², 倪小龙², 刘 智^{2,*}, 杨 阳²

(1. 中国航空工业集团公司 洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471023;

2. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 由于激光器发出的光束通常在毫米量级, 然而在激光测距、激光通信、激光全息等领域中需要较宽的光束, 因此需要对激光束进行准直扩束。本文提供了一种基于 LC-SLM 的变倍率激光扩束方法, 利用 LC-SLM 产生透镜的波前。由计算机数值模拟出焦距不同的变焦透镜相位调制图, 将其加载到 LC-SLM 上, 利用焦距不同的变焦透镜相位调制图的灰度信号来控制 LC-SLM 外加电压变化, 实现了基于 LC-SLM 的变焦透镜功能。根据伽利略望远镜形式的扩束系统, 本文利用 LC-SLM 的变焦透镜功能与匹配透镜配合, 搭建了基于 LC-SLM 的变倍率激光扩束系统, 实现对激光束的变倍扩束。实验结果表明, 该系统实现了 $2\times\sim 10\times$ 连续变倍率激光扩束。系统结构简单、精度高、响应速度快, 具有很大的实用价值。

关键词: 激光扩束; 液晶空间光调制器; 变焦透镜

中图分类号: TN212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183309.0764

Laser beam expanding technology based on liquid crystal spatial light modulator

LI Ying-kui¹, QI Ji², ZHANG Jie², NI Xiao-long², LIU Zhi^{2,*}, YANG Yang²(1. China Aviation Industry Corporation Luoyang Electro-optical Equipment Research Institute,
Luoyang 471023, China;2. Fundammental Science on Space-Groud Laser Communication Technology Laboratory,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: It needs a wider beam in laser ranging, laser communication, laser holography and so on, but the laser beam is in the millimeter scale, therefore, collimating and expanding the beam of the laser beam is needed. This article provides a variable-rate laser beam expanding method based on LC-SLM. Using LC-SLM to produce the wavefront of a lens, The phase modulation graph of the zoom lens with different focal length is simulated by the computer. It is loaded on the LC-SLM, and the change of the LC-SLM applied voltage is controlled by the gray signal of the phase modulation graph of the zoom lens with different focal length. The function of the zoom lens based on the LC-SLM is realized. According to the beam expansion system of Galileo telescope, in this paper, a variable rate

收稿日期: 2018-06-08; 修订日期: 2018-07-19.

* 通信联系人, E-mail: liuzhiqi@cust.edu.cn

laser beam expansion system based on LC-SLM is built by using the function of the zoom lens of LC-SLM and the matched lens to achieve the multiplex beam expansion of the laser beam. Experimental results show that the system realizes continuous variable rate laser beam expanding at $2^{\times} \sim 10^{\times}$. The system has simple structure, high accuracy and fast response speed, and has great practical value. It is of great practical value.

Key words: laser beam expanding; Liquid crystal spatial light modulator; Zoom lens

1 引言

激光本身具有相干度高、单色性好、方向性强和亮度高等优点,在军事、工业、农业、医疗等国防建设和国民经济领域中应用广泛。激光器发出的光束直径通常在毫米量级,然而在激光测距^[1]、激光通信、激光全息、激光干涉、雷达跟踪等领域中需要较宽的光束。因此需要激光扩束系统来实现对激光束的准直扩束,激光扩束系统能够压缩激光空间发散角,使输出光束满足口径要求^[2-3]。为满足不同领域及不同仪器设备对激光束口径的要求,需要扩束比连续可变的系统。传统的机械式激光变倍扩束系统存在着结构复杂、精度低、响应慢及像质低等缺点,无法满足越来越高的激光扩束需求。

随着光学技术的快速发展,一些可变焦透镜加入到了变焦系统中,例如,将液体透镜^[4-6]、变形镜^[7-8]、液晶透镜^[9-10]等主动光学元件应用到光学变焦系统中,实现基于透镜的自变焦来改变系统的焦距,为变焦系统提供了新的变焦方式。本文对激光扩束系统的变倍扩束方法进行了新的探索,将液晶空间光调制器(Liquid Crystal On Silicon Modulator,以下简称 LC-SLM)应用到激光扩束系统中,LC-SLM 可以对入射光波进行实时调控。液晶具备校正单元数多、价格低廉、制作容易、结构小巧,可编程、易控制、灵活性高等优点^[11]。基于 LC-SLM 的激光扩束系统可以实现 $2^{\times} \sim 10^{\times}$ 连续变倍率扩束。

2 原理

2.1 激光变倍率扩束原理

为实现对激光束的准直扩束,先用短焦距的透镜将高斯光束聚焦,获得极小腰斑后,再用长焦距的透镜来改变其方向性^[12],形式上相当于采用倒置的望远镜系统,如图 1 所示,利用其来压缩高

斯光束发散角,增大光束腰斑尺寸,实现对高斯光束的准直扩束。

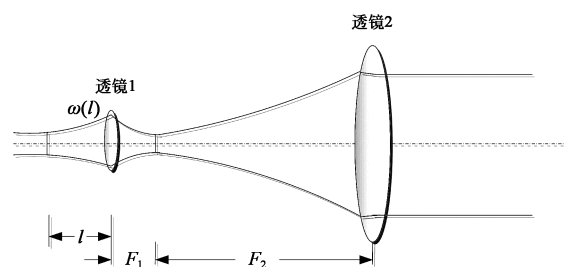


图 1 采用倒置望远镜系统准直高斯光束

Fig.1 Collimated gaussian beam with an inverted telescope system is used

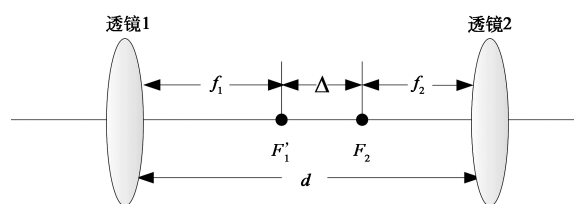


图 2 变倍组

Fig.2 Zooming group

为实现激光束的扩束倍率连续变化,需要采用变焦距光学系统。在变焦距系统中,焦距的改变是通过改变组成系统的组元间的间隔来实现的。对于最简单的变倍组可由两个透镜组成。如图 2 所示,透镜 1 的焦距为 f_1 ,其焦点为 F'_1 ,透镜 2 的焦距为 f_2 ,其焦点为 F_2 , F'_1 与 F_2 之间的距离为 Δ ,透镜 1 与透镜 2 之间的距离为 d ,根据几何光学原理,变倍组焦距 f 可以表示为:

$$f = -\frac{f_1 f_2}{\Delta}, \quad (1)$$

$$\Delta = d - (f_1 + f_2), \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以看出,变倍组的焦距 f 与 f_1 , f_2 , d 三个参数有关,由于普通透镜的焦距为固定值,即 f_1 和 f_2 为定值,欲实现变焦,须通过改变两个透镜间的距离 d 才能实现。

2.2 基于 LC-SLM 的可变焦透镜

液晶分子在外加电场的作用下发生偏转,液晶的排列结构发生改变,使液晶盒变成一个类似于光轴倾斜于表面的晶片,对入射光产生双折射效应。因此,可以通过控制 LC-SLM 外加电场的大小实现对入射光束相位调制。基于 LC-SLM 的可变焦透镜是一种自身焦距可变的透镜,可通过外加灰度信号的变化来控制其焦距变化,实现变焦透镜功能。利用 LC-SLM 这一特性,将其应用到激光扩束系统中以实现系统的变倍率扩束功能。

在孔径尺寸有限的情况下,薄透镜透过率函数可以表示为:

$$t(x, y) = P(x, y) \exp \left[-j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right], \quad (3)$$

其中: f 为透镜的焦距, $P(x, y)$ 为透镜的孔径函数,可以定义为:

$$P(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{透镜孔径内} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}. \quad (4)$$

透镜的相位因子 $\exp \left[-j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right]$ 表示透镜的相位调制作用。而透镜本身的特性决定了其相位因子的大小,即其对入射光的不同调制作用。在近轴条件下,透镜通过式(3)能够实现对入射光波的相位调制。

若想利用 LC-SLM 模拟一个焦距为 f 的薄透镜,则需要利用 LC-SLM 实现式(3)中相位因子所示的相位调制。因此,根据 LC-SLM 的相位调制特性,利用 LC-SLM 产生透镜的波阵面,通过计算机编程的方式得到透镜的相位调制图,将不同焦距的透镜相位调制图加载到 LC-SLM 上,便可以实现焦距可变的变焦透镜功能。

焦距为 f 的透镜调制波长为 λ 的入射光的波阵面,它的相位分布函数为^[13]:

$$\varphi(x, y) = (x^2 + y^2)k/2f, \quad (5)$$

其中: $k = 2\pi/\lambda$ 。由于衍射光学元件相位函数被限制在 $0 \sim 2\pi$ 范围内,当相位超过 2π ,对相位函数 $\varphi(x, y)$ 作以 2π 为周期的量化处理。当最大相位调制深度等于 2π 时,衍射光学元件的相位分布函数为^[14]:

$$\varphi'(x, y) = \text{mod}_{2\pi}[\varphi(x, y)], \quad (6)$$

式中: $\text{mod}_{2\pi}$ 表示对相位取模 2π 运算。通过利用这种方法,当 LC-SLM 在特定波长条件下,使

相位函数的相位不超过 LC-SLM 的 2π 相位调制深度,这样便可以有效扩大 LC-SLM 的相位调制范围。

基于以上分析,为使 LC-SLM 具有焦距为 $f_{\text{LC-SLM}}$ 的变焦透镜功能,在 LC-SLM 上显示的透镜的相位调制图的相位分布函数为^[15]:

$$\varphi_{\text{透镜}}(x, y) = \text{mod}_{2\pi} \left[\frac{\pi}{\lambda f_{\text{LC-SLM}}} (x^2 + y^2) \right]. \quad (7)$$

通过式(7)可以看出,LC-SLM 的相位分布函数与非涅尔透镜的透过率函数分布很相似。由于本文欲实现基于 LC-SLM 的激光变倍率扩束,需要研究 LC-SLM 变焦透镜的焦距与系统放大倍率的关系。因此首先需要根据 LC-SLM 特性来分析利用 LC-SLM 模拟生成的变焦透镜的焦距范围。

经过取模运算后的相位分布,菲涅尔环带随半径的增大而越加密集,当最外层的环带超出 LC-SLM 本身的分辨能力时,LC-SLM 将无法准确达到相应的相位调制量,即其不能够实现理论焦距的变焦透镜功能^[16]。由于 LC-SLM 像素化结构的特性,要求相邻像素之间的相位差不能超过 π 。因此,LC-SLM 模拟的透镜焦距应该满足:

$$|f_{\text{LC-SLM}}| > \frac{2r_{\text{max}}d}{\lambda} = \frac{Nd^2}{\lambda}, \quad (8)$$

其中: N 为 LC-SLM 像素个数, d 为像素间隔, λ 为入射光波长。

本文所选用的 LC-SLM 液晶空间光调制器,其分辨率为 512×512 ,像素间隔为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,有效尺寸为 $7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$,将以上参数代入式(8)中可得:

$$|f_{\text{LC-SLM}}| > \frac{Nd^2}{\lambda} = 147 \text{ mm}, \quad (9)$$

根据上述理论分析,本文所采用的 LC-SLM 可模拟的透镜的最小焦距为 $|f_{\text{LC-SLM, min}}| = 147 \text{ mm}$ 。当 LC-SLM 模拟的透镜焦距满足此焦距范围要求时,通过利用不同焦距相位调制图的灰度信息来控制 LC-SLM 外加电压的变化,使器件内液晶分子指向发生改变,即改变了器件内液晶分子的折射率,便可以实现基于 LC-SLM 的变焦透镜功能。

2.3 基于 LC-SLM 的激光变倍率扩束系统设计

2.3.1 扩束系统设计思路及形式的选择

本文采用伽利略望远镜形式的扩束系统,如

图3所示。LC-SLM相当于望远镜中的目镜,利用其模拟焦距可变的透镜,与匹配透镜配合使用实现对激光束的变倍扩束。

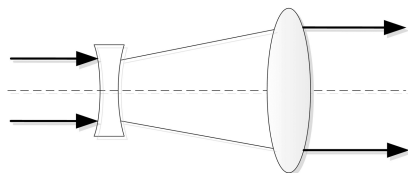


图3 伽利略望远镜形式扩束系统

Fig.3 Galileo telescope beam - expanding system in form

2.3.2 基于LC-SLM的变倍率扩束过程分析

基于LC-SLM的激光变倍率扩束模块由LC-SLM和匹配透镜组成,LC-SLM与匹配透镜共焦使用,如图4所示。设定系统放大倍率为 $2^x \sim 10^x$,

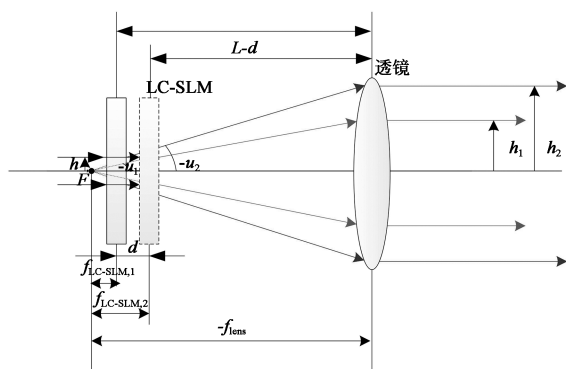


图4 基于LC-SLM的激光变倍率扩束原理图

Fig.4 Principle diagram of laser variable magnification expansion based on lc-slm

令入射光高度为 h_{in} ,出射光高度为 h_{out} ,则系统扩束比 M 为:

$$M = \frac{h_{out}}{h_{in}} = -\frac{f_{lens}}{f_{LC-SLM}}. \quad (10)$$

设定LC-SLM模拟的透镜的焦距为 $f_{LC-SLM,1}$,LC-SLM与匹配透镜共焦,此时LC-SLM与匹配透镜距离为 L ,系统的放大倍率 $M = \frac{h_1}{h}$ 。当LC-SLM模拟的透镜的焦距从 $f_{LC-SLM,1}$

变到 $f_{LC-SLM,2}$ 时,LC-SLM与匹配透镜将不共焦,为使LC-SLM与透镜再次共焦,需将LC-SLM向右移动 d 的距离,此时LC-SLM与匹配透镜距离为 $L-d$,系统放大倍率为 $M = \frac{h_2}{h}$ 。从以上分析可以看出,系统的扩束倍率将会随着LC-SLM模拟透镜焦距的变化及其与匹配透镜的间距的变化而发生改变。

2.2.3 扩束系统组元参数的确定

根据设计指标要求,本文选定的匹配透镜焦距为 $f=1\,500\text{ mm}$,直径为 $D=80\text{ mm}$ 。根据式(10)可知,基于LC-SLM激光变倍率扩束系统扩束比 M 会随着LC-SLM焦距 f_{LC-SLM} 及其与匹配透镜的间隔的变化而变化。利用数值计算方法可以计算出不同扩束比下扩束系统所对应的 f_{LC-SLM} 及LC-SLM移动距离 d 。以扩束倍率 $M=2^x$ 为基准,此时 $f_{lens}=1\,500\text{ mm}$, $f_{LC-SLM}=750\text{ mm}$,系统放大倍率、 f_{LC-SLM} 以及LC-SLM移动距离 d 对应关系如表1所示。

表1 不同扩束比时所对应的 f_{LC-SLM} 及LC-SLM移动距离 d

Tab.1 f_{LC-SLM} and distance d that LC-SLM moves corresponding to different beam expanding ratios

M	2^x	3^x	4^x	5^x	6^x	7^x	8^x	9^x	10^x
f_{LC-SLM}/mm	-750	-500	-375	-300	-250	-214.28	-187.5	-166.66	-150
d/mm	0	250	375	450	500	535.72	562.5	583.4	600

2.3.4 基于LC-SLM的激光变倍率扩束系统结构设计

基于以上分析,设计了一种基于LC-SLM的激光变倍率扩束系统,如图5所示。此时LC-SLM工作在正入射条件下,激光经过准直扩束装置,再经偏振片入射到分光棱镜上,一部分光束透射,另一部分光束反射到LC-SLM上,光束经

LC-SLM调制后再次反射,经分光棱镜透射后通过匹配透镜出射得到准直平行的扩束光束。

3 实验与结果分析

由计算机编程模拟得到如图6所示的图像,将其称为变焦透镜相位调制图。将变焦透镜相位

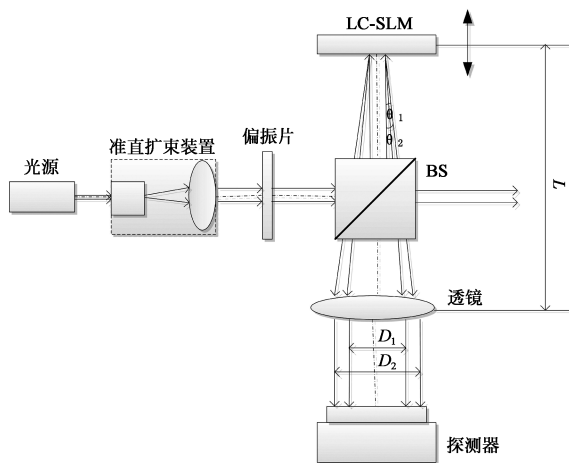
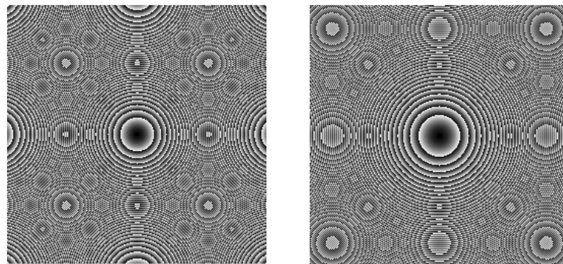
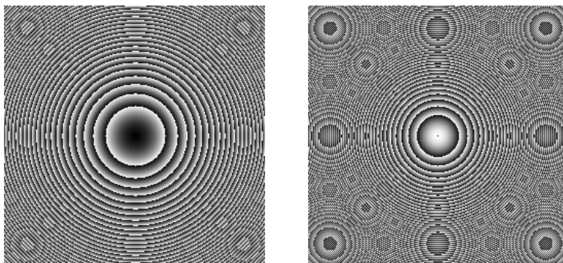
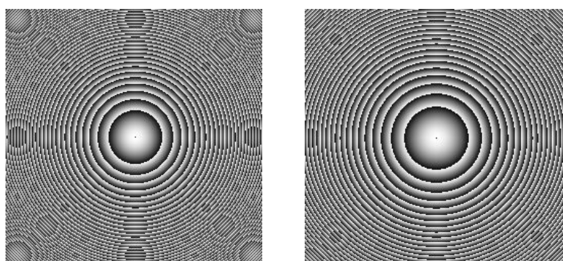


图 5 基于 LC-SLM 的激光扩束系统原理图

Fig.5 Schematic diagram of laser beam expanding system based on LC-SLM

(a) $f = 200 \text{ mm}$ (b) $f = 300 \text{ mm}$ (c) $f = 600 \text{ mm}$ (d) $f = -300 \text{ mm}$ (e) $f = -500 \text{ mm}$ (f) $f = -700 \text{ mm}$ 图 6 $\lambda = 785 \text{ nm}$ 时, 计算机模拟的不同焦距的变焦透镜相位调制图Fig.6 $\lambda = 785 \text{ nm}$, Phase modulation diagram of zoom lens with different focal lengths simulated by computer

调制图加载到 LC-SLM, 即通过采用焦距不同的相位调制图的灰度信息来控制外加电压的变化, 改变 LC-SLM 器件内液晶分子指向, 即改变折射率, 从而可以实现基于 LC-SLM 的变焦透镜功能。图 6 为波长为 785 nm 下的不同焦距的变焦透镜相位调制图。

根据图 5 所示的基于 LC-SLM 的激光扩束系统原理图, 进行系统的搭建与实验。首先, 将 LC-SLM 放置标有刻度线的滑轨上, 将光源、准直扩束装置、偏振片及分光棱镜放置在另一个标有刻度线的滑轨上, 匹配透镜放置在与 LC-SLM 距离为 750 mm 处, 由表 1 可知, 此时对应系统扩束比 $M = 2\times$, 本文以扩束系统扩束比为 $M = 2\times$ 为基准对器件进行摆放。

同样, 若想实现系统扩束比为 $M = 3\times$, 只需将 LC-SLM 沿滑轨向匹配透镜方向精确移动 250 mm ,

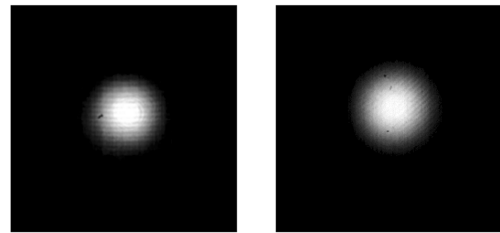
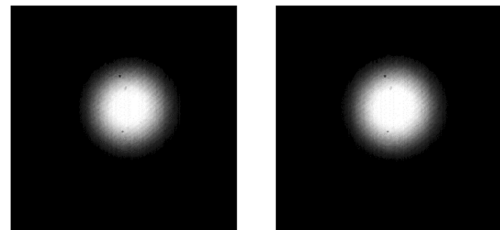
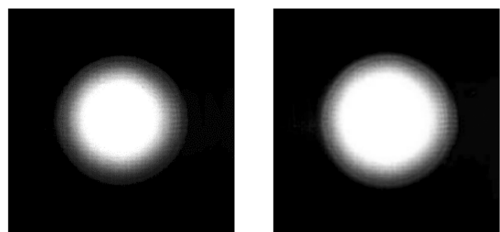
(a) $M = 2\times$ (b) $M = 3\times$ (c) $M = 5\times$ (d) $M = 7\times$ (e) $M = 8\times$ (f) $M = 10\times$

图 7 相机采集到的经基于 LC-SLM 的激光扩束系统后的不同扩束比下的光斑图像

Fig.7 Speckle images collected by the camera under different beam expanding ratios after laser beam expanding system based on LC-SLM

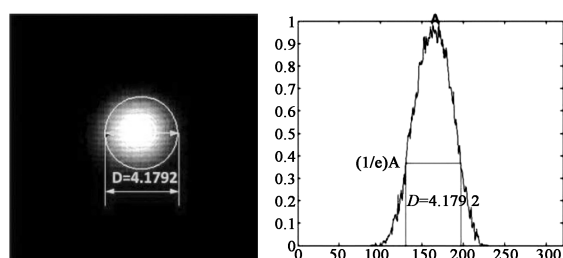
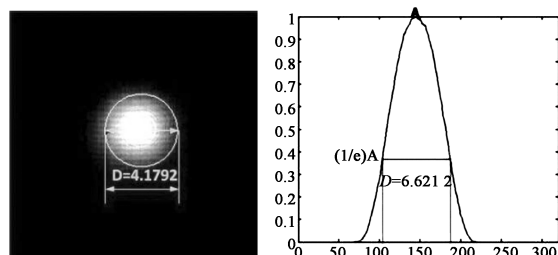
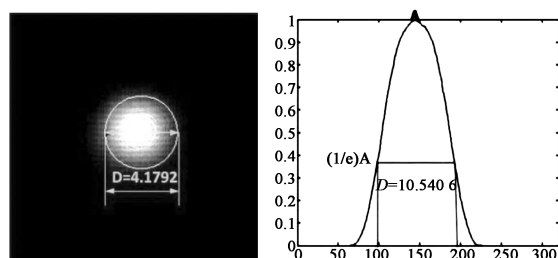
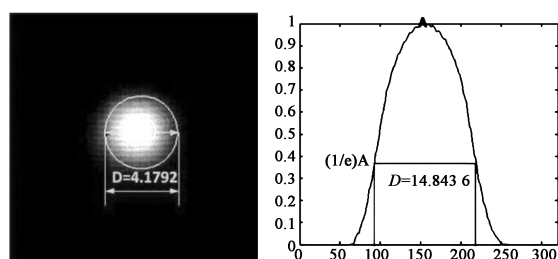
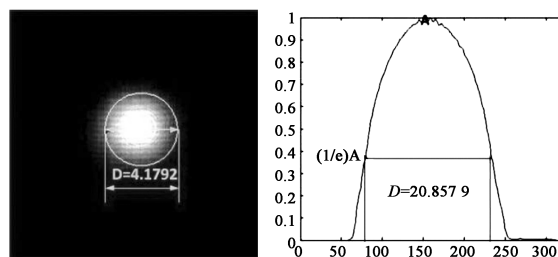
(a) $M = 2^x$ 时,实际光斑直径 $D=4.1792$ (b) $M = 3^x$ 时,实际光斑直径 $D=6.6212$ (c) $M = 5^x$ 时,实际光斑直径 $D=10.5406$ (d) $M = 7^x$ 时,实际光斑直径 $D=14.8436$ (e) $M = 10^x$ 时,实际光斑直径 $D=20.8579$

图8 光斑及其横截面图

Fig.8 Light spot and its cross section

然后在 LC-SLM 上加载焦距为 $f = -500 \text{ mm}$ 的变焦透镜相位调制图,光束经基于 LC-SLM 的激光扩束系统后出射,用相机对出射的准直平行光束进行接收,并记录结果。在同样的实验条件下,分别对系统扩束比为 $M = 4^x$ 、 $M = 5^x$ 、 $M = 6^x$ 、 $M = 7^x$ 、 $M = 8^x$ 、 $M = 9^x$ 、 $M = 10^x$ 进行实验及结果记录。图 7 为部分相机接收到的经基于 LC-SLM 的激光扩束系统后不同扩束比下的激光光斑图像。对相机采集到的光斑直径进行分析。

通过 MATLAB 软件分析得到每幅光斑图像对应的高斯光束能量分布图,利用光束能量分布图可以求得相机采集到的实际光斑直径大小,即经扩束后的出射光束实际直径,将其与理论值进行对比分析,可以得到基于 LC-SLM 的变倍率激光扩束系统的扩束精度。

根据上述理论,通过 MATLAB 软件能够求得相机采集到的实际光斑直径大小,经基于 LC-SLM 的变倍率激光扩束系统扩束后的不同扩束比下的光斑及其横截面图如图 8 中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)所示。

将光斑直径的实际值与其理论值数据列表如 2 所示。绘制不同扩束比下光斑直径理论值与实际值曲线,如图 9 所示,横坐标表示光斑直径理论值,纵坐标表示光斑直径实际值。

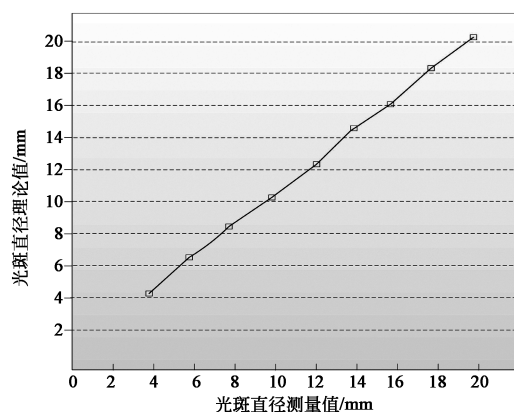


图9 光斑直径测量曲线

Fig.9 Spot diameter measurement curve

实验结果表明:由于 LC-SLM 相位调制函数不是理想的线性关系,实际测得的扩束光束直径稍稍大于其理论值(如表 2 所示),但误差均在 10%以内,可见,本文提出的方法可以实现对激光束的 $2^x \sim 10^x$ 连续变倍率扩束。

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际值与理论值数据

Tab.2 The actual and theoretical data of spot diameter after laser beam broadening based on LC-SLM variable-power laser beam expanding system

M	2^x	3^x	4^x	5^x	6^x	7^x	8^x	9^x	10^x
光斑直径理论值/mm	4	6	8	10	12	14	16	18	20
光斑直径实际值/mm	4.179	6.621	8.423	10.541	11.879	14.844	16.124	18.252	20.858

4 结 论

本文利用 LC-SLM 对光束的相位调制特性, 将 LC-SLM 引入到激光扩束系统中, 利用 LC-SLM 实现变焦透镜取代传统光学透镜, 采用数值

计算方法计算出不同倍率扩束系统所需透镜相位调制图, 将计算机编程模拟得到的变焦透镜相位调制图加载到 LC-SLM 上, 实现基于 LC-SLM 的激光变倍率扩束。实验结果表明, 基于 LC-SLM 的激光变焦扩束系统可以实现 $2^x \sim 10^x$ 连续变倍率扩束。

参 考 文 献:

- [1] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2009: 79-83.
ZHOU B K, GAO Y Z, CHEN C R, *et al.* *Laser Principle* [M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 79-83. (in Chinese)
- [2] 李晓彤. 几何光学和光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997: 142.
LI X T. *Geometric Optics and Optical Design* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997: 142. (in Chinese)
- [3] 齐光, 王书新, 李景林. 空间传感器高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件设计[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 99-106.
QI G, WANG S X, LI J L. Design of high volume fraction SiC/Al composite mirror in space remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 99-106. (in Chinese)
- [4] KUIPER S, HENDRIKS B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(7): 1128-1130.
- [5] 张鹰. 基于液体透镜的变焦距光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
ZHANG Y. Research on zoom lens design with liquid lenses [D]. Changchun: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [6] FANG C L, DAI B, ZHUO R, *et al.* Focal-length-tunable elastomer-based liquid-filled plano-convex mini lens [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 404-407.
- [7] MARTINEZ T, SANTIAGO F, WICK D V, *et al.* Active optical zoom for tracking. Advanced Maui optical and space surveillance technologies conference [C]//RYAN S. *The Maui Economic Development Board*. Wailea, Maui, Hawaii, 2008: E12.
- [8] IEMMI C, CAMPOS J. Anamorphic zoom system based on liquid crystal displays [J]. *Journal European Optical Society Rapid Publications*, 2009, 4(4): 38-42.
- [9] CHEN C W, CHO M, HUANG YP, *et al.* Three-dimensional imaging with axially distributed sensing using electronically controlled liquid crystal lens [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 4125-4127.
- [10] 杨兰, 王敏帅, 徐恭勤, 等. 低电压驱动液晶变焦透镜的设计与优化[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0922003.
YANG L, WANG M S, XU G Q, *et al.* Design and optimization of low voltage driving variable focal length liquid crystal lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0922003. (in Chinese)
- [11] 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 Z L, LI X P, XUAN L, *et al.* Recent progress in liquid crystal adaptive optical techniques [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 12-19. (in Chinese)

- [12] 金国藩,李景镇.激光测量学[M].北京:科学出版社,1998:168-169.
JIN G P, LI J Z. *Laser Surveying* [M]. Beijing: Science Press, 1998: 168-169. (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 C M. *LCOS-based optical zoom system research* [D]. Hefei: Anhui University, 2013: 1-29. (in Chinese)
- [14] 赫尔齐克 H P.微光学元件、系统和应用[M].周海宪,译.北京:国防工业出版社,2002:5.
ZHOU H X H P. *Microoptics Components, Systems and Applications* [M]. ZHOU H X, trans. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 5. (in Chinese)
- [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.

作者简介:李颖奎(1979—),男,吉林省吉林市人,硕士,高工。2004年在长春理工大学获理学学士学位,2017年在长春理工大学获工学硕士学位,主要研究方向光电系统研发。E-mail:13838454132@163.com

刘智(1971—),男,吉林长春人,博士,教授,1993年在长春光学精密机械学院获得学士学位,2001年在长春光学精密机械学院获得硕士学位,2004年在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,主要研究方向为空间激光通信技术和激光在复杂信道中传输特性。E-mail: liuzhiqi@cust.edu.cn