

文章编号 1004-924X(2016)增-0156-06

## 基于液晶空间光调制器的多焦菲涅尔透镜

许忠保<sup>1\*</sup>, 王双迎<sup>1</sup>, 刘文超<sup>1</sup>, 陶伟森<sup>1</sup>, 宋丛珊<sup>2</sup>

(1. 湖北工业大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北省纤维检测局, 湖北 武汉 430061)

**摘要:** 为了在保持分辨率的前提下提高传统成像透镜的焦深, 提出了一种基于纯相位空间光调制器(PLUTO)的多焦菲涅尔透镜延拓焦深的方法。在分析空间光调制器承载菲涅尔透镜原理及对透镜最小焦距、衍射效率限制因素的基础上, 将多个不同焦距的菲涅尔透镜与闪耀光栅镶嵌在一起, 并通过 Matlab 编程在液晶空间光调制器的像素区域。通过 PLUTO 的像素控制特性, 实现多个透镜的相位随机等概率分布在 PLUTO 的每个像素中。根据每个透镜的轴向焦点相互交叠的原则, 获得了焦深为 16 mm 的复用透镜。实验结果表明, 与具有相同数值孔径的单透镜相比, 复用透镜的焦深增加了 5 倍; 而且在整个焦深范围内, 焦斑大小基本保持不变与单透镜有着相近的成像分辨率。

**关键词:** 空间光调制器; 多焦复用透镜; 菲涅尔透镜; 焦深延拓; 衍射效率

**中图分类号:** O439 ; O753.2 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20162413. 0156

## Multifocal Fresnel lens based on liquid crystal spatial light modulator

XU Zhong-bao<sup>1\*</sup>, WANG Shuang-ying<sup>1</sup>, LIU Wen-chao<sup>1</sup>, TAO Wei-sen<sup>1</sup>, SONG Cong-shan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068;

2. Hubei Province Fibre Inspection Bureau, Wuhan 430061, China)

\* Corresponding author, E-mail: xuzhangb@163.com

**Abstract:** Subject to the restrictive relation between resolution and focal depth of traditional imaging lens, a multi-focal Fresnel lens based on phase-spatial light modulator (PLUTO) was developed for the extension of the depth of focus. Based on the analysis of the restrictions imposed by Spatial Light Modulator (SLM) on principle, minimum focal length and diffraction efficiency of Fresnel lens, the Fresnel lens of different focal lengths combined with the blazed grating were programmed in the pixel region of Liquid Crystal Spatial Light Modulator (LC-SLM) by Matlab. The pixel control characteristics of PLUTO enabled the phases of multiple lenses equiprobably distributed in each pixel of PLUTO. In accordance with the overlapping principle for axial focuses of each lens, the multiplex lens with a focal depth of 16 mm was obtained. Compared with a single lens with the same numerical aperture, the focal depth achieved by the multiplex lens is increased by 5 times. In addition, the focal spot remains in the same size, with approximate imaging resolution to single lens within the whole range of depth of focus.

**Key words:** spatial light modulator; multiplexing multifocal lens; Fresnel lens; extended focal depth; diffraction efficiency

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61077086)

## 1 引言

长焦深成像器件在精密激光加工、光学扫描、成像<sup>[1-4]</sup>等领域具有重要的应用潜力,长期以来倍受研究者的关注。在传统光学设计中,为了增加系统的焦深,常采用减小相对孔径的方法,但这种方法以减小系统的光通量,降低成像系统分辨率为代价。1987年德尔宁<sup>[5]</sup>提出无衍射光束之后,相继出现了无限窄圆环<sup>[6]</sup>、圆锥透镜<sup>[7]</sup>等长焦深成像方法,但这些方法存在焦深范围不易控制和轴上光强振荡,图像对比度和分辨率在焦深范围内不断变化等缺陷。基于能量守恒法则<sup>[8]</sup>的衍射混合系统<sup>[9-11]</sup>解决了焦深范围的可控性及光场分布震荡等问题。该方法通过折射器件和衍射器件的有机结合,由折射器件承担系统的光焦度,确定焦面位置,衍射器件的位相调制系统的光场分布,通过优化衍射器件的位相函数,将原本集中于焦点处的光能量向焦点两边轴向扩充,达到扩展成像系统焦深的目的。林勇等<sup>[11]</sup>利用同一个元件实现折射和衍射的功能,通过 Zemax 的优化得到了可用于实际加工的长焦深光学元件。

近年来,随着二元光学器件加工技术的发展,利用光瞳滤波技术实现长焦深逐渐成为了研究热点<sup>[12-13]</sup>。根据衍射理论,光学系统的光瞳函数定义为出瞳面的透过率空间分布,或者是相对应的人瞳面的透过率空间分布,因此通过设计适当的光瞳函数能够改变成像系统的衍射分布,达到改变系统点扩散函数,扩展系统焦深的目的。王伟<sup>[13]</sup>等利用三环位相型光瞳滤波函数,实现了轴向焦深扩展和横向的超分辨成像。然而,由于成像系统对波前质量的高度敏感特性,这种方法对器件的加工质量要求非常高<sup>[14-15]</sup>。

本文提出了一种基于液晶纯相位空间光调制器(PLUTO型)的多焦菲涅尔透镜延拓焦深方法。通过 PLUTO 的像素控制特性,将多个不同焦距的菲涅尔透镜与闪耀光栅镶嵌在一起,依据每个透镜的轴向焦点相互交叠的原则,在保持分辨率基本不变的条件下,达到了增加焦深的目的。

## 2 空间光调制器承载菲涅尔透镜原理

一个焦距为  $f$  的菲涅尔透镜的相位分布函数可以表示为:

$$\varphi(x, y) = -\frac{\pi}{\lambda f}(x^2 + y^2), \quad (1)$$

其中:  $\lambda$  表示入射波长,  $x, y$  表示以透镜中心为原点的坐标。考虑一个具有二维离散像素结构的 PLUTO,其分辨率为  $M \times N$ ,像素中心间距为  $d$ ,以 PLUTO 的中心为坐标原点,将式(1)离散化后其相位模型可表示为:

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

式中:  $-\frac{M}{2} \leq k \leq \frac{M}{2}$ ,  $-\frac{N}{2} \leq l \leq \frac{N}{2}$ ,  $\text{mod}_{2\pi}$  表示以  $2\pi$  取余操作。根据式(2)中的相位模型可知随着焦距的减小,菲涅尔透镜包含更高的空间频率,然而,PLUTO 自身的离散特性限制了它表示空间频率的能力<sup>[16]</sup>。对于一个  $M \times N$  像素的空间光调制器,其  $x, y$  方向的最大空间坐标分别是:  $\frac{Md}{2}$  和  $\frac{Nd}{2}$ ,则显示在 PLUTO 上菲涅耳透镜的最高空间频率可以表示为:

$$H_{x,\max} = \frac{Md}{2\lambda f}; H_{y,\max} = \frac{Nd}{2\lambda f}. \quad (3)$$

根据奈奎斯特抽样定理可知,抽样频率应该大于上述频率的 2 倍,PLUTO 中抽样频率即为 PLUTO 的像素间隔  $d$ ,所以:

$$\frac{Md}{2\lambda f} \leq \frac{1}{2d}; \frac{Nd}{2\lambda f} \leq \frac{1}{2d}. \quad (4)$$

由此可以得到 PLUTO 承载菲涅尔透镜时,最小焦距的限制条件为:

$$f_{\min} \geq \frac{\max(M, N) d^2}{\lambda}. \quad (5)$$

PLUTO 像素结构相当于一个二维矩形光栅,所以衍射能量分散、衍射效率低,因此,考虑利用数字闪耀光栅将光能量集中到所需要的光谱级次上,从而提高衍射效率。根据二元光学衍射理论,加载周期为 8 像素的数字闪耀光栅后,其+1 级的衍射效率可以达到 95%,在水平方向加载了数字闪耀光栅后,菲涅尔透镜的相位模型可表

示为:

$$\varphi(x, y) = \text{mod}_{2\pi} \left\{ -\frac{\pi}{\lambda f} [(kd)^2 + (ld)^2] + \frac{2\pi}{8} l \right\}. \quad (6)$$

在 PLUTO 出厂时,通常厂家给出了(灰度-相位)客户查找表,但具体到某一器件时需要 PLUTO 进行伽马校正<sup>[17]</sup>。本文采用泰曼-格林干涉系统对 PLUTO 的相位进行标定<sup>[18]</sup>,在 0~255 的灰度范围内每隔 10 个灰度值标定一次,得到了一系列的标定点,把这些标定点通过最小二乘拟合得到灰度与相位的映射函数,标定点和拟合曲线如图 1 所示。

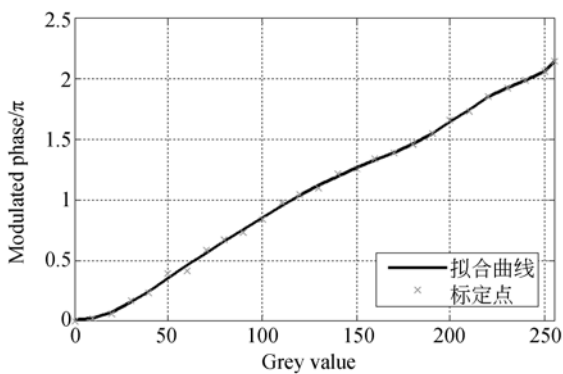


图 1 空间光调制器特性曲线

Fig. 1 Characteristic curve of spatial light modulator

根据拟合曲线可以计算出相位完成一个变化周期(0~2π)所对应的驱动灰度值为 0~243,将该段区间的曲线标记为:

$$\varphi = f(g), g \in [0, 243], \varphi \in [0, 2\pi]. \quad (7)$$

制作复用透镜灰度图时,要根据每个像素点的相位调制量计算其对应的驱动灰度,所以还需求出式(7)的反函数,得到式(8)所示的关系:

$$g = f^{-1}(\varphi), \varphi \in [0, 2\pi], g \in [0, 243]. \quad (8)$$

得到相位-灰度的关系后就可以利用 Matlab 编程实现复用透镜。

### 3 实验

#### 3.1 复用透镜灰度图的制作

制作复用透镜的过程如图 2 所示。其中,用 Matlab 生成二维矩阵时用到了 randsrc 函数,randsrc 函数是随机函数中的一种,可以通过它将

$n$  个焦距值随机均匀地赋值给二维矩阵,使  $n$  个菲涅尔透镜随机均匀地分布在 PLUTO 像素中,每个焦距的菲涅尔透镜平均分配  $\frac{M \times N}{n}$  个像素点。

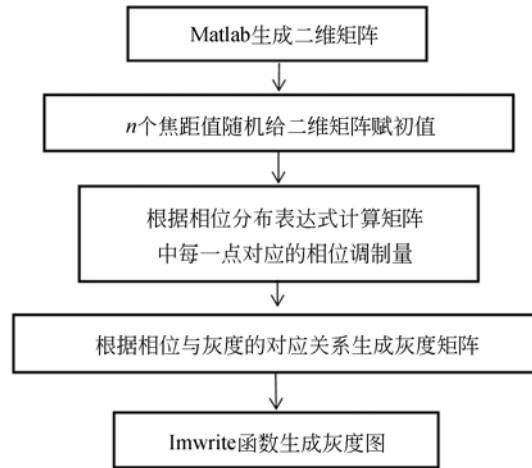


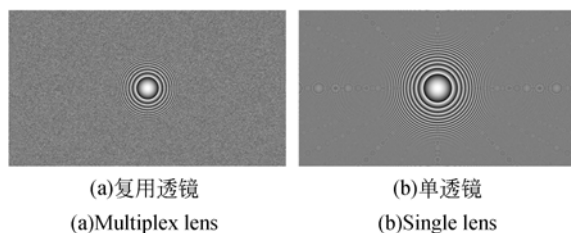
图 2 复用透镜制作流程图

Fig. 2 Flow chart of multiplexing lens production

实验采用德国 HOLOEYE 公司生产的 PLUTO 型液晶空间光调制器,像面尺寸为 15.36 mm×8.64 mm,分辨率为 1 920×1 080,像元尺寸为 8 μm,氦氖激光器输出波长为 632.8 nm,则根据式(5)可以计算出在此实验条件下菲涅尔透镜的最小焦距应大于 194.2 mm。其衍射焦深为:

$$\delta = 4\lambda(f/D)^2, \quad (9)$$

式中: $D$ 为透镜的通光口径,则对于一个焦距为 300 mm 的菲涅尔透镜,根据式(9)可以计算出其焦深为 3.05 mm。本文生成的复用透镜焦距为 300~316 mm,根据每个透镜的轴向焦点相互交叠的原则,每隔 2 mm 作为一个焦距值,根据式(2)的相位模型生成了多焦复用透镜灰度图,如图



(a)复用透镜 (a)Multiplex lens (b)单透镜 (b)Single lens

图 3 灰度图

Fig. 3 Grayscale images

3(a)所示。为了便于比较复用透镜具有延拓焦深的作用,本文还制作了焦距为 300 mm 的单透镜,其灰度控制图如图 3(b)所示。

### 3.2 实验过程及结果

如图 4 所示实验光路,由氦氖激光器出射的光束经准直扩束后,经起偏器调节偏振态,使入射光的偏振方向与液晶分子的长轴方向一致,此时 PLUTO 处于纯相位调制状态<sup>[19]</sup>。将灰度图通过 VGA 接口加载到 PLUTO 上,通过 CCD 接收 PLUTO 承载的多焦复用透镜对平行光进行调制后得到的聚焦光斑。

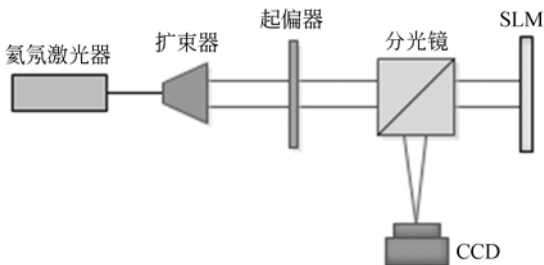


图 4 实验光路

Fig. 4 Optical setup for experiment

实验时,先将图 3(b)所示的单透镜灰度图加载到 PLUTO 上,CCD 放置在距离 300 mm 的焦平面处接收聚焦光斑,结果如图 5(a)所示。图 5(a)表明,接收到的聚焦光斑比较模糊,并且除了中心较亮的主光斑外,还有多个较暗的光斑,衍射效率比较低。故本文根据式(6)重新生成了加载了数字闪耀光栅的单透镜灰度控制图,将它加载

到 PLUTO 上,得到了图 5(b)。图 5(b)中光斑的位置在水平方向发生了偏移,这是闪耀光栅对光束偏转作用的体现,但光斑的强度比图 5(a)要更强,并且其它级次的光斑也基本不存在,衍射效率得到了提升。基于这个原因,以下实验中的灰度控制图都加载了闪耀光栅。

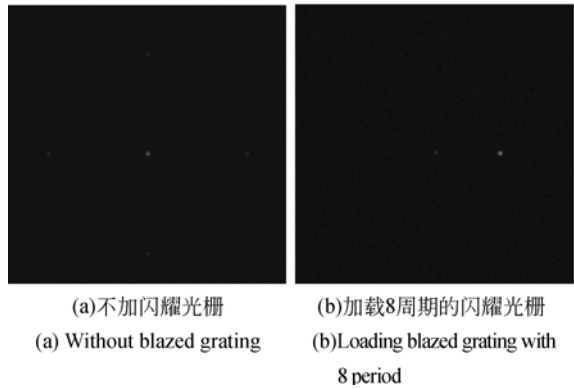


图 5 透镜加载闪耀光栅实验结果

Fig. 5 Results of lens load blazed grating experiment

为了验证复用透镜延拓焦深的效果,将焦距为 300~316 mm 的复合透镜加载到 PLUTO 中,利用 CCD 分别在距离空间光调制器 300, 304, 308, 312, 316 mm 三处接收图像,并与单透镜做比较,结果如图(6)所示。通过 Matlab 检测其焦斑直径(图中用  $D_f$  表示,单位:pixel),焦距为 300 mm 的单透镜在焦平面处的聚焦光斑直径为 9 pixel,在 CCD 偏离其焦平面后,焦斑直径迅速扩大,在 316 mm 处,焦斑直径达到了 105 pixel;

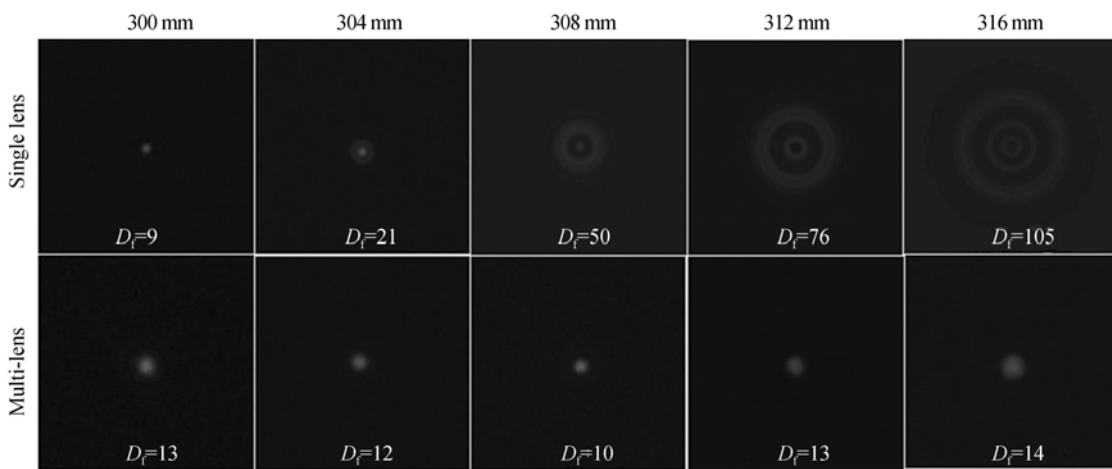


图 6 复用透镜与单透镜聚焦效果图

Fig. 6 Focusing spots of multiple lens and single lens

而复用透镜的聚焦光斑直径总体上没有太大变化,在 308 mm 处焦斑光强度稍强,焦斑直径为 10 pixel,在 300 mm 和 316 mm 两个焦距边界处的光斑稍微模糊一些,焦斑直径分别为 13 pixel, 14 pixel。虽然,复用透镜比单透镜在焦平面处的焦斑直径稍大,但是差别不远,最大也不到 5 pixel。整个焦深范围内,复用透镜的分辨率基本保持一致且与单透镜接近。

若改变复用透镜的生成间隔,每隔 1 mm 作为一个焦距值,在整个焦深范围内焦斑直径的变化将更小。此外,为验证菲涅尔透镜焦距对主焦点衍射效率的影响,本文还将焦距在 600~616 mm 的复用透镜灰度图加载到空间光调制器上,得到的聚焦光斑的强度要比 300~316 mm 的复用透镜强,这是由于菲涅尔透镜每个波带的相位变化周期为  $2\pi$ ,当菲涅尔透镜焦距越大,每个波带就有足够多的像素数来表达相位从  $0\sim 2\pi$  的变

化,主焦点的衍射效率越高,得到的光强越强。因此,在用空间光调制器承载菲涅尔透镜时,同时应考虑焦距对主焦点衍射效率的影响。

## 4 结 论

本文根据 PLUTO 的纯相位调制特性,利用 Matlab 编程将多个菲涅尔透镜随机均匀地分布在 PLUTO 像素中,实现了焦距范围在 300~316 mm 的多焦复用透镜。通过对 PLUTO 抽样问题的理论分析,给出了 PLUTO 承载复用透镜时,最小焦距的限制条件,并利用数字闪耀光栅提高了复用透镜的衍射效率。最后,通过实验对复合透镜的聚焦效果进行了测试。结果表明,相比于相同口径的单透镜,该多焦复用透镜的焦深增加了 5 倍,并且在整个焦深范围内,聚焦光斑的大小基本保持着与单透镜相近的分辨率。

## 参考文献:

- [1] 刘友强,曹银花,潘飞,等. 激光加工用半导体激光器的光束变换[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 455-461.  
LIU Y Q, CAO Y H, PAN F, *et al.*. Beam transformation of diode lasers used in laser processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 455-461. (in Chinese)
- [2] 余金清,尹韶云,殷智勇,等. 高均匀长工作深度激光整形系统设计[J]. 光电工程, 2014(8): 80-84.  
YU J Q, YIN SH Y, YIN ZH Y, *et al.*. High uniform long working depth laser shaping system design [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014(8): 80-84. (in Chinese)
- [3] 苏亚辉,汪金礼,杨亮,等. 飞秒激光全息并行加工中的多焦点均一性[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 1936-1941.  
SU Y H, WANG J L, YANG L, *et al.*. Uniformity of multi-foci for holographic femtosecond laser parallel fabrication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 1936-1941. (in Chinese)
- [4] 张薇,田维坚. 大焦深内窥镜光学系统设计[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 558-560.  
ZHANG W, TIAN W J. Design of a kind of large depth of focus endoscope system [J]. *Optical Tech-*
- nique*, 2009, 35(4): 558-560. (in Chinese)
- [5] DURNIN J, MICELIN J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [6] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1987, A4: 651-654.
- [7] SERGEI Y P, ARI T F. Apodization of generalized axicons to produce uniform axial line images [J]. *Pure and Applied Optics*, 1998, 7(3): 537-548.
- [8] SOCHACKI J, BARA S, JAROSZEWICZ Z, *et al.*. Phase retardation of the uniform-intensity axilens [J]. *Opt. Lett.*, 1992, 17(1): 7-9.
- [9] FLORES A, WANG M R, YANG J J. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(30): 5618-5630.
- [10] 张慧,丁雪梅,谭久彬. 折-衍混合长焦深光学元件的焦深特性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 64-70.  
ZHANG H, DING X M, TAN J B. A study on focal depth characteristic of hybrid refractive-diffractive element with long focal depth [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 64-70. (in Chinese)
- [11] 林勇,胡家升. 实现长焦深的衍射光学元件设计方法[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(1): 152-156.  
LIN Y, HU J SH. Method for design of diffractive optical elements with long focal depth [J]. *J.*

- Dalian University of Technology*, 2010, 50(1): 152-156. (in Chinese)
- [12] 方朝龙,张耀举.用三区三元相位滤波器提高近场光存储系统的焦深[J].激光杂志,2011,32(3):12-13.  
FANG CH L,ZHANG Y J. Increasing focal depth of near-field optical storage systems by a three-zone ternary phase filter[J]. *Laser Journal*, 2011, 32(3):12-13. (in Chinese)
- [13] 王伟,周常河,余俊杰.三环位相型光瞳滤波器的横向超分辨与轴向焦深扩展[J].物理学报,2011,60(2):248-252.  
WANG W,ZHOU CH H,YU J J. Transverse super-resolution and extended axial focal depth realized by three-zone annular phase pupil filter[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(2):248-252. (in Chinese)
- [14] ZHAO W,QIU L,FENG Z. Effect of fabrication errors on superresolution property of a pupil filter[J]. *Optics Express*, 2006, 14(16):7024-7036.
- [15] LIU T, TAN J, LIU J. Spoke wheel filtering strategy for on-axis flattop shaping[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3):2822-35.
- [16] 林培秋,应朝福,徐展斌,等.基于纯位相液晶空间光调制器的可变焦透镜的实现[J].应用光学,2010,31(3):376-380.  
LIN P Q,YIN CH F,XU ZH B, et al.. Implementation of controllable zoom lens based on phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3):376-380. (in Chinese)
- [17] 夏军,常琛亮,雷威.基于液晶空间光调制器的全息显示[J].物理学报,2015(12):7-13.  
XIA J,CHANG CH L,LEI W. Holographic display based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2015(12):7-13. (in Chinese)
- [18] 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):84-88.  
DAN X,DUAN M Y,AI Y. Calibration approaches of the phase nonlinearity of the phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6):84-88. (in Chinese)
- [19] 刘永军,连佳,胡立发,等.液晶器件相位调制特性研究[J].光子学报,2009,38(4):745-749.  
LIU Y J, LIAN J, HU L F, et al.. The investigation of phase modulation of liquid crystal device[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4):745-749. (in Chinese)

#### 作者简介:



许忠保(1963—),男,河南信阳人,博士,教授,1985年、1992年于武汉测绘科技大学分别获得学士、硕士学位,2005年于华中科技大学获得博士学位,主要从事光电精密仪器与检测技术等方面的研究。E-mail: xuzhangb@163.com



王双迎(1992—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,2014年于湖北工业大学获得学士学位,主要从事光电精密仪器等方面的工作。E-mail: 895037731@qq.com