

doi: 10.3788/gzxb20144306.0623001

# 纯相位液晶空间光调制器相位校正方法

单欣, 段梦云, 艾勇, 胡亮

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

**摘 要:** 利用泰曼-格林干涉系统, 对纯相位液晶空间光调制器在 808nm 的相位调制特性进行了研究。为了提高其在大气湍流模拟时的仿真度, 采用近似法和反插值法对相位调制曲线完成了线性校正, 并对校正结果进行了对比分析。结果表明, 虽然近似法校正简单易行, 但经反插值法校正后, 相位调制曲线的线性相关度更高, 可达 0.9916, 校正误差更低, 仅为 0.06rad。通过对校正方法和误差来源的分析发现, 反插值法还具有优化灵活的特点, 能进一步改善校正效果, 更具应用价值。

**关键词:** 液晶空间光调制器; 相位调制; 线性校正; 近似法; 反插值法; 大气湍流模拟

中图分类号: TN241; TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0623001-5

## Calibration Approaches of the Phase Nonlinearity of the Phase-only Liquid Crystal Spatial Light Modulator

SHAN Xin, DUAN Meng-yun, AI Yong, HU Liang

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Based on the Tyman-Green interference system, the phase modulation character of the phase-only liquid crystal spatial light modulator at 808 nm was studied. In order to increase the simulation fidelity of the atmospheric turbulence, the approximation method and the inverse interpolation method were used to compensate the phase nonlinearity of the spatial light modulator, and the calibration effect were compared with each other. Results show that, although the approximation method is straightforward, the inverse interpolation method can get a higher linearity of 0.9916 and a lower calibration error of 0.06 rad. Moreover, after analyzing the calibration process and the error source, the inverse interpolation method is found to be more flexible to get a further improvement in the linear calibration, which is more significant to the practical application of the liquid crystal spatial light modulator.

**Key words:** Liquid crystal spatial light modulator; Phase modulation; Linear calibration; Approximation method; Inverse interpolation method; Atmospheric turbulence simulation

**OCIS Codes:** 230.3720; 060.4048; 010.1330; 060.2605

## 0 引言

无线激光通信的大气湍流信道与其他类型的信道不同, 具有随机变化的特点, 会给无线激光通信链路带来许多不利影响<sup>[1-2]</sup>。因此, 大气湍流信道的研究一直是无线激光通信领域的研究热点, 对激光通信系统的设计和研发有着非常重要的意义。

根据大气湍流的成因, 可以在实验室内利用水或

空气为介质, 搭建对流湍流池, 模拟光斑受到的影响<sup>[3]</sup>。同时, 利用二维空间光调制装置(如变形镜、液晶空间光调制器等)控制光束波前相位的变化, 也能精确可控地再现受湍流影响的畸变波面<sup>[4-5]</sup>。其中, 液晶空间光调制器由于具有功耗低、质量小、无机械惰性<sup>[6]</sup>、高像素密度<sup>[7]</sup>等特点, 使得基于液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)的湍流模拟器在无线激光通信和自适应光学领域得到广

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11204220)和中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者: 单欣(1981—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为空间光通信及激光大气传输效应。Email: sx@whu.edu.cn

收稿日期: 2013-10-09; 录用日期: 2013-11-19

http://www.photon.ac.cn

泛的应用<sup>[8-11]</sup>.

由于液晶空间光调制器的相位调制呈较明显的非线性特性,为了凸显其作为动态衍射器件的优势并且提高大气湍流模拟的仿真度,需要对调制曲线进行校正,保证其在  $0 \sim 2\pi$  范围内能实现相位的线性调制<sup>[12-13]</sup>. 基于泰曼-格林干涉装置,本文对纯相位液晶空间光调制器在 808 nm 的相位调制特性进行了研究,从理论校正效果和实际校正效果两方面对两种常用的相位校正方法(近似法和反插值法)进行对比,完成了液晶空间光调制器相位调制的线性标定,并对校正方法进一步优化可能性展开了讨论.

## 1 液晶空间光调制器相位调制特性

### 1.1 相位调制原理

液晶空间光调制器通过控制液晶分子的等效折射率实现对入射光的相位控制. 液晶分子具有介电各向异性和电导各向异性,当液晶盒两端被施加电压时,液晶分子的排列状态发生变化,则会出现液晶的双折射现象. 液晶分子的长轴方向在外电场作用下会产生  $0^\circ \sim 90^\circ$  的偏转,使其折射率发生改变. 假设无外场条件下,液晶分子长轴方向平行于基板  $x$  轴方向. 当沿  $z$  轴方向加入外电场时,靠近基板的液晶分子由于基板的强锚定作用而不能偏转,而处于基板中间的液晶分子沿着电场方向偏转,当液晶分子长轴与  $x$  轴夹角为  $\theta$  时,其等效折射率为

$$n_e(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

经过液晶分子的调制后,入射的 e 光和 o 光之间的相位差可表示为<sup>[14]</sup>

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} [n_e(\theta) - n_o] dz \quad (2)$$

即通过外电场的作用改变液晶分子的长轴方向,达到控制出射光波相位的目的.

### 1.2 相位调制曲线测量

利用泰曼-格林光学干涉系统可对液晶空间光调制器的相位调制特性进行测量,通过干涉条纹的移动量反演出相位的改变量. 测试光路如图 1,光源为 808 nm 单模激光器,经扩束准直后,光斑直径为 7 mm. 使用偏振分光棱镜作为起偏器,令入射光偏振方向与液晶分子长轴方向一致,表现出液晶分子的纯相位调制特性<sup>[15]</sup>. 光束通过分光棱镜分成两束,分别经过反射镜和纯相位液晶空间光调制器反射,经叠加后形成干涉条纹. 空间光调制器采用 Holoeye 公司生产的 PLUTO-NIR-II,液晶屏尺寸为  $15.36 \times 8.64 \text{ mm}^2$ ,像素为  $1920 \times 1080$ ,帧频为 60 Hz. 通过驱动器,在液晶屏上加载不同灰度值的图像,控制液晶分子的外加电压,改变两光路的光程差,因而在 CCD 相机上可以观

测到干涉条纹的移动.

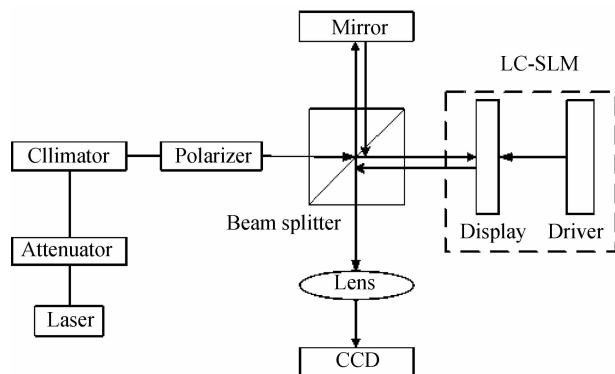


图 1 泰曼-格林干涉测试光路

Fig. 1 The experimental setup of Tyman-Green interference system

光程差与干涉条纹移动量的关系为

$$h = \lambda(\Delta/\Lambda) \quad (3)$$

式中,  $h$  是两光路的光程差,  $\lambda$  是光波波长,  $\Delta$  是干涉条纹的移动量,  $\Lambda$  是干涉条纹的周期宽度. 相位与干涉条纹移动量的关系则为<sup>[7]</sup>

$$\delta = 2\pi h/\lambda = 2\pi(\Delta/\Lambda) \quad (4)$$

外加电压为 0 时,对 CCD 采集到的干涉条纹图像处理后,计算出干涉条纹的周期宽度. 为提高计算准确度,可多次测量取均值. 为了得到相位与驱动灰度值之间的关系,在液晶空间光调制器上依次加载阶梯变化的灰度图像. 每幅图像下半部分的灰度值常设为 0,作为计算相位改变量的参考;而图像的上半部分,灰度值从 0 递增到 255,使液晶空间光调制器产生相应的相位延迟,导致光程差发生变化,产生有相对移动的干涉条纹. CCD 得到的干涉条纹如图 2.

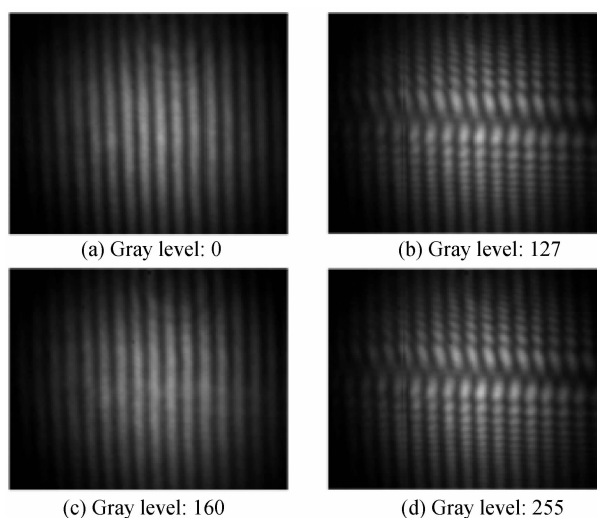


图 2 加载不同灰度值的干涉条纹

Fig. 2 Interference fringes being driven by different gray levels at the upper part of images

从干涉条纹的变化可以看出,当灰度值从 0 变化到 160 时,相位变化约为一个周期;当灰度值达到 255

时,条纹的变化显示已经超过一个相位周期.截取干涉图样的上下部分条纹,对比后即可得出偏移量,每隔3或4个灰度值测量一次相位的变化,共测得64个数据点.根据测得的数据,描点绘制出液晶空间光调制器原始的相位调制曲线,如图3.从调制曲线可以看出,液晶空间光调制器的相位随驱动灰度值的改变呈明显的非线性变化趋势,调制的最大相位为 $3.22\pi$ (对应驱动灰度值为255).当灰度值从0增至60时,调制相位变化陡峭;而灰度值超过100以后,相位变化平缓.

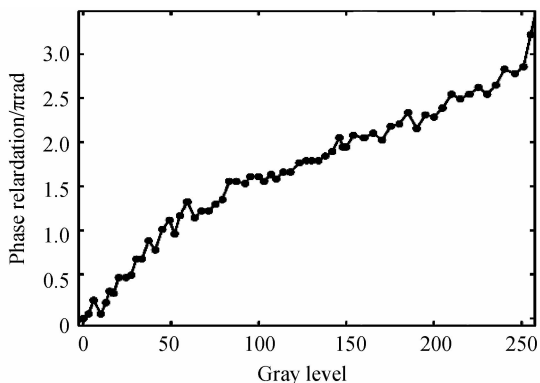


图3 原始的相位调制曲线

Fig. 3 The phase modulation characteristic for the factory default configuration

## 2 相位调制线性校正方法研究

液晶空间光调制器作为动态衍射器件,一般要求器件工作在 $0\sim 2\pi$ 的线性范围内,因此需要对非线性的相位调制特性进行补偿和校正.另外,为了提高大气湍流模拟时的仿真度,线性的相位调制也是对液晶空间光调制器的基本要求之一.

为了研究不同方法的校正效果,选取了两种最为常见的方法,分别为近似法和反插值法.

### 2.1 近似法

近似法要求在非线性的相位调制曲线上找到一段变化较为平滑的近似线性区间,然后将该区间近似为

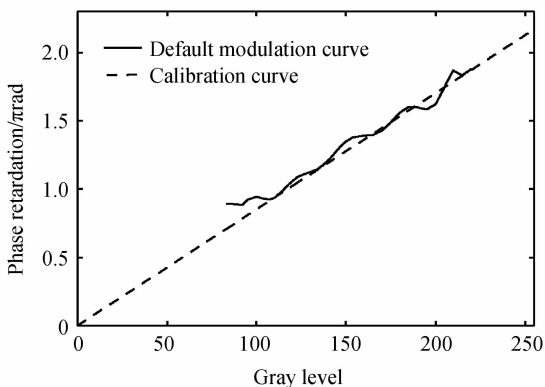


图4 近似法校正后的相位调制曲线

Fig. 4 The phase modulation curve calibrated by the approximation method

线性工作曲线.这种方法不需要建立查找表,因此是几种校正方法中最简单的一种.

从液晶空间光调制器相位调制曲线(图3)中可以看出,83~220的灰度值变化区间接近线性变化.以此段曲线为基础,将横坐标线性扩展至 $0\sim 255$ 的灰度范围内,纵坐标线性扩展至 $0\sim 2\pi$ 的范围,即可得到图4所示的校正后的理论相位调制曲线.

### 2.2 反插值法

反插值法是在实际输入灰度值和液晶空间光调制器的驱动灰度值之间建立一种非线性的映射关系,补偿器件原始相位调制曲线的非线性,使输入灰度与调制相位之间满足线性的对应关系.

在原始相位调制曲线中,相位完成一个变化周期对应的驱动灰度值在 $0\sim 154$ 的范围内,可将该区间的曲线记为

$$\varphi = f(g), g \in [0, 154], \varphi \in [0, 2\pi] \quad (5)$$

根据反插值法,需构造一个输入灰度值与调制相位间的理想线性函数为

$$\varphi' = kg', k = 2\pi/255, g' \in [0, 255] \quad (6)$$

利用作为已知结点对函数 $\varphi$ 进行反插值,可以得到 $g$ 与 $g'$ 之间的关系为

$$g = f^{-1}(kg') \quad (7)$$

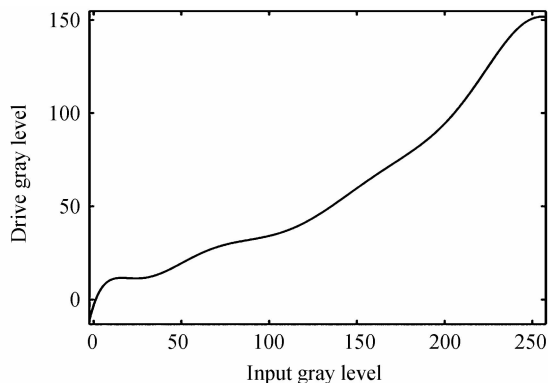


图5 驱动灰度值与输入灰度值间的关系

Fig. 5 The drive gray level as a function of the input gray level

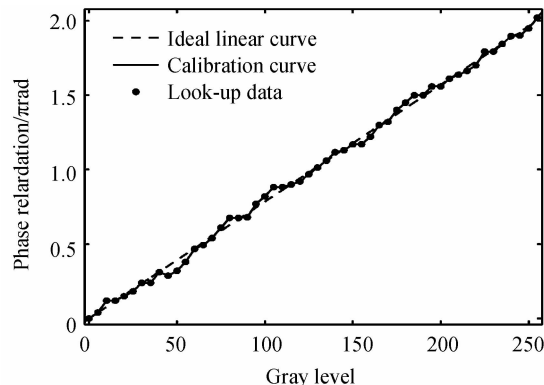


图6 反插值法校正后的相位调制曲线

Fig. 6 The phase modulation curve calibrated by the inverse interpolation method

结合原始的相位调制曲线关系,可给出液晶空间光调制器的驱动灰度  $g$  与输入灰度  $g'$  之间的数据查找表关系,如图 5. 经新的查找表并进行适当的优化之后得到图 6 所示的相位调制曲线.

### 2.3 校正效果对比

近似法以相位调制曲线中一段接近线性的曲线为基础直接做线性扩展,通过微调线性曲线斜率逼近实际选取的相位调制曲线. 因此,近似法校正后得到的理论曲线是一条理想的线性相位调制曲线.

而通过数据查找对应的反插值法则无法得到如此理想的效果. 为了验证反插值法校正效果,将液晶空间光调制器校正前后的相位调制曲线分别与理想线性曲线对比. 校正前,原始相位调制曲线(对应驱动灰度值范围为  $0 \sim 154$ )与理想线性曲线间的相关系数为  $0.8952$ ,校正后,相关系数提高到  $0.9979$ . 而相位调制曲线与理想线性曲线间的和方差(Sum of Square due to Error, SSE)由校正前的  $1.755$  下降到  $0.0383$ ,均方根(Root Mean Squared Error, RMSE)由  $0.202$  下降到  $0.02741$ . 通常,  $R$  越接近于  $1$  ( $R$  的正常取值范围为  $[0, 1]$ ),且 SSE 越接近于  $0$ ,表明数据曲线越接近于理想线性曲线. 因此,采用反插值法得到的理论相位调制曲线的线性度有较大提高,但仍与理想线性曲线存在微小差距.

通过近似和查找方法得到的仅为校正后的理论相位调制曲线(如图 4 和图 6),而在液晶空间光调制器的使用过程中,实际的相位调制效果才是真正制约器件仿真准确度的重要因素之一. 因此,将这两种方法校正后的理论调制曲线重新加载到液晶空间光调制器上,对实际的相位调制特性进行重新标定,并与理想线性曲线再次进行对比,以此作为衡量相位校正效果优劣的最终标准. 测试结果如图 7 和图 8. 近似法校正后的相位调制范围为  $0 \sim 2.31\pi$ ,与理想线性曲线的相关系数为  $0.9624$ ;反插值法校正后的相位调制范围为  $0 \sim 2.12\pi$ ,相关系数为  $0.9916$ . 与理想曲线相比,近似法

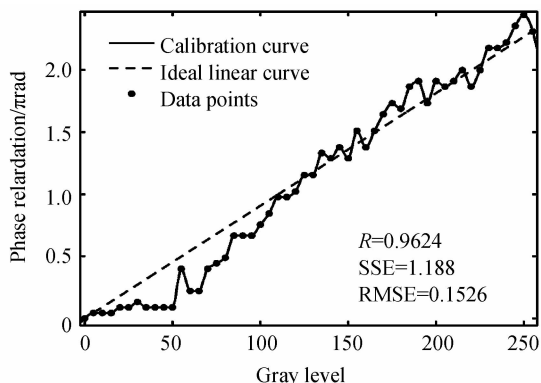


图 7 近似法校正后的实测相位调制曲线

Fig. 7 The actual phase modulation characteristic calibrated by the approximation method

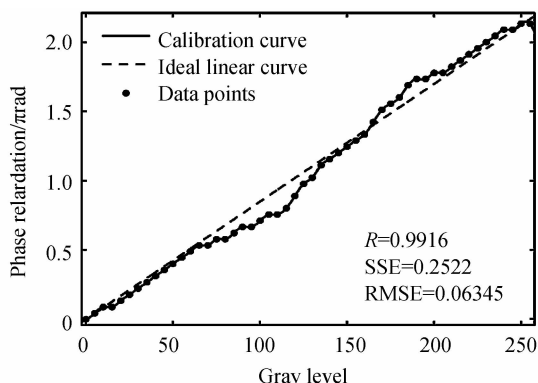


图 8 反插值法校正后的实测相位调制曲线

Fig. 8 The actual phase modulation characteristic calibrated by the inverse interpolation method

得到的相位调制均方根误差约为  $0.15$  rad,而反插值法则仅为  $0.06$  rad. 说明反插值法的实测效果更好,经校正后,液晶空间光调制器的相位调制更接近于理想的线性调制,并能满足一定的相位调制准确度要求.

从图 8 可以看出,利用反插值法校正后,输入灰度值在  $70 \sim 140$  以及  $180 \sim 210$  两个范围内,调制相位与理想值间的误差相对较大,从而影响了校正准确度. 但是从校正方法上看,完全可以通过进一步优化该区域的数据查找表关系,提高校正准确度、改善调制曲线线性度. 而近似法校正后,输入灰度小于  $100$  时,校正误差较大(图 7),这与近似法选取的近似区间有关. 在近似区间内误差较小,而近似区间外误差较大. 但是该方法缺乏有效手段对调制曲线的局部区域进行有针对性的优化,无法进一步改善校正效果. 另外,近似法相比反插值法,校正后的曲线波动明显,也不利于相位调制准确度的控制.

综合分析认为,虽然近似法操作简单方便,容易实现,但准确度不高. 而反插值法虽然复杂,可具有优化调整灵活、校正准确度高的特点,适用范围广泛,误差主要来源于测量误差和查找误差,需要尽量避免.

## 3 结论

本文对纯相位液晶空间光调制器的相位调制特性专门进行了研究. 利用泰曼-格林干涉光路,测得液晶空间光调制器的最大相位调制范围可达  $3.22\pi$ ,相位调制呈明显的非线性特性. 利用近似法和反插值法对相位调制曲线分别进行线性校正,得到了  $0 \sim 2\pi$  范围内近似线性的相位调制曲线. 对比较正后的实测相位调制曲线与理想线性曲线,两者间的相关系数分别提高至  $0.9624$  和  $0.9916$ ,误差分别降低至  $0.15$  rad 和  $0.06$  rad. 除此之外,反插值法还具有优化调制灵活的特点,使其校正效果明显优于近似法,能更好满足流模拟时液晶空间光调制器的准确度要求.

参考文献

- [1] 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,2005.
- [2] YU Lin-tao, SONG Lu, HAN Cheng, *et al.* Analysis and simulation of link power and communication performance in space-ground optical communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5): 543-547.  
于林韬,宋路,韩成,等. 空地激光通信链路功率与通信性能分析与仿真[J]. 光子学报, 2013, **42**(5):543-547.
- [3] SHEN Yong, LIU Jian-guo, ZENG Zong-yong, *et al.* Performance testing of atmospheric turbulence simulator[J]. *Jouranal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, **6**(3): 231-234.  
申永,刘建国,曾宗泳,等. 大气湍流模拟装置性能测试[J]. 大气与环境光学报, 2011, **6**(3):231-234.
- [4] GAN Xin-ji, GUO Jin. Research of laser scintillation effect based on physical simulation turbulent system [C]. SPIE, 2011, **8192**: 81923W.
- [5] LIU Yong-jun, HU Li-fa, CAO Zhao-liang, *et al.* Liquid crystal atmosphere turbulence simulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1960-1963.  
刘永军,胡立发,曹召良,等. 液晶大气湍流模拟器[J]. 光子学报,2006,**35**(12): 1960-1963.
- [6] WANG Jiang-tao, CHEN Xiang-ning. Characteristic of ferroelectric liquid craystal optical addressed spatial light modulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(1): 57-63.  
王江涛,陈向宁. 铁电液晶光寻址空间光调制器性能分析[J]. 应用光学,2012, **33**(1): 57-63.
- [7] ZHANG Hong-xin, ZHANG Jian, WU Li-ying. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a twyman-green interferometer [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2008, **35**(9): 1360-1364.  
张洪鑫,张健,吴丽莹. 泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1360-1364.
- [8] BROOKS M R, GODA M E. Atmospheric simulation using a liquid crystal wavefront controlling device [C]. SPIE, 2004, **5553**: 258-268.
- [9] PHILLIPS J D, GODA M E, SCHMIDT J. Atmospheric turbulence simulation using liquid crystal spatial light modulators [C]. SPIE, 2005, **5894**: 589406.
- [10] BURGER L, LITVIN I A, FORBES A. Simulating atmospheric turbulence using a phase-only spatial light modulator [J]. *South African Journal of Science*, 2008, **104**(3/4): 129-134.
- [11] WILCOX C C, SANTIAGO F, MARTINZ T, *et al.* Performance of a flexible optical aberration generator [J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(11): 116601.
- [12] HU Li-fa, XUAN Li, LIU Tong-jun. Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision [J]. *Optics Letters*, 2004, **12**(26): 6403-6409.
- [13] XUN Xiaodong, COHN R W. Phase calibration of spatially nonuniform spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(35): 6400-6406.
- [14] LI Xiang-zhi, HAN Cheng-shan, WEN Ming, *et al.* Research on wavefront distortion compensation based on liquid crystal space lightmodulator [J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(2): 187-191.  
李祥之,韩诚山,文明,等. 基于液晶空间光调制器的波前畸变补偿研究[J]. 激光与红外,2011, **41**(2): 187-191.
- [15] LIU Yong-jun, LIAN Jia, HU Li-fa, *et al.* The investigation of phase modulation of liquid crystal device [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 745-749.  
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.