

基于液晶空间光调制器的光束偏转控制

张 彩^{1,2} 黄永梅¹ 亓 波¹ 边 疆¹ 吴琼雁¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 液晶空间光调制器(LCSLM)通过实时调制波前倾斜实现光束偏转,与传统的快反镜相比,具有非机械调制、体积小、功耗低、轻巧灵敏等优点,可应用于空间光通信中。简单介绍了液晶实现光束偏转的原理,并测试了 LCSLM 的调制特性,根据调制特性设计基于 LCSLM 的光束偏转闭环系统。实验结果表明 LCSLM 能有效地抑制光束抖动,使相对误差小于 $\pm 1.75\%$ 。分析了 LCSLM 的衍射效率对于光束质量的影响及液晶响应速度、系统传输时延和算法复杂度对控制系统带宽的制约。

关键词 光学器件;液晶空间光调制器;光束偏转;倾斜;抖动抑制;衍射效率

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0905005

Beam Steering Control Based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Zhang Cai^{1,2} Huang Yongmei¹ Qi Bo¹ Bian Jiang¹ Wu Qiongyan¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract Liquid crystal spatial light modulator (LCSLM) can realize beam steering by modulating wavefront tilt. Compared with fast steering mirror (FSM), LCSLM is smaller, lighter and lower power consumptive in a non-mechanical way. Thus, it can be applied as a beam steering control device in laser communication. The principle of liquid crystal beam steering is introduced. A close-loop control experiment is designed based on LCSLM to realize beam steering according to the modulation characteristic of LCSLM tested. The experimental results show that LCSLM can suppress jitter effectively. The relative error is less than $\pm 1.75\%$. The influence of diffractive effect on beam quality is analyzed, as well as the restriction of response time of liquid crystal, transmission delay and algorithm complexity on control bandwidth.

Key words optical devices; liquid crystal spatial light modulator; beam steering; tilt; jitter suppression; diffractive effect

OCIS codes 050.5080; 060.2605; 060.4510; 060.5060

1 引 言

自由空间光通信以其通信质量好、抗电磁干扰和抗辐射能力强、速度快、频带宽、容量大、安全保密性好、不需要频率许可等特点倍受人们的青睐。但在大气干扰条件下,激光远距离传输的对准是一个难题。捕获、跟踪和瞄准(ATP)是实现远距离空间光通信的核心技术,它由粗跟踪(捕获)和精跟踪(跟踪和瞄准)两部分组成。粗跟踪阶段主要是利用大型惯性机械部件来实现大角度的光束扫描,精跟踪

阶段利用快反镜(FSM)来实现。FSM 驱动电压高、功耗高、结构复杂、受谐振频率影响。与它相比,液晶空间光调制器(LCSLM)通过调制光波相位实现光束的非机械控制,驱动电压只有几伏,具有功耗低、重量小、轻巧灵敏等特点,并能在较大的偏转角度下保持较高的精度^[1],在小型化光束灵敏控制场合具有优势。欧美国家很早就开始了对 LCSLM 的研究,并取得了一系列的显著成果。美国雷声公司将液晶光学相控阵(LCOPA)集成到 APPLE 系统

收稿日期:2011-04-18;收到修改稿日期:2011-05-13

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目(YYYJ-0815)资助课题。

作者简介:张 彩(1986—),女,硕士研究生,主要从事液晶光束控制技术方面的研究。E-mail:rainbow_zc@gmail.com

导师简介:黄永梅(1968—),女,博士,研究员,主要从事伺服跟踪控制系统方面的研究。E-mail:hjn666@sohu.com

中,以实现目标捕获和跟踪等应用^[2],其中 LCOPA 就是专门用于光束偏转的 LCSLM。美国 TSC 公司研发的双频 LCOPA,响应频率达到千赫兹,Orzechowski 等^[3,4]将其应用于激光抖动抑制系统中。国内在这方面的研究起步较晚,到目前为止还没有将 LCSLM 用于 ATP 系统的实验成果。本文在分析液晶(LC)光束偏转原理的基础上,利用 LCSLM 设计光束偏转控制系统,实现扰动抑制的功能,并分析影响光束质量及光束偏转系统带宽的因素。

2 液晶光束偏转原理

LCSLM 的每个像素由向列液晶层和电极组成。向列液晶具有扭曲和电控双折射效应^[5,6],扭曲效应指自然状态下液晶分子呈扭曲排列,电压作用下分子趋于沿电场方向倾斜;电控双折射效应指在光经液晶层后分成寻常光(o光)和非常光(e光)。图 1 为液晶分子在 3 个电压阈值区间的倾斜状态,根据 Konforti 等^[7]的解释:当液晶分子两端电压在 freedericksz 阈值和光学阈值之间时,相位调制占主

要作用,此时液晶分子倾斜角度随电压的增大而增大。根据液晶分子的电控双折射效应理论,o光折射率保持不变,e光折射率随液晶分子倾斜角度的增大而减小^[7~11],进一步知电压越大 e 光折射率越小,LCSLM 利用液晶的这种特性进行相位调制。

图 2(a)为 LCSLM 的液晶面板,其像素单元按线阵型排列(又称 LCOPA),取连续的 N 个像素作为一个周期,从左到右加上递增的电压使 e 光折射率递减,在液晶层厚度相等的条件下等效光程差会递增, N 个像素等效于如图 2(b)所示的阶梯型玻璃器件。通过加周期的电压把整个 LCOPA 分成多个阶梯型玻璃器件,即模拟出了图 2(c)所示阶梯型闪耀光栅^[9~11]。光束最大偏转角度 θ 表示为^[12,13]

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{lN}\right), \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波长, l 为每个像素的宽度, N 为闪耀光栅一个周期内的像素个数。调节加在 LCOPA 上电压的大小,等效于调整阶梯型闪耀光栅的台阶高度和周期大小,从而调整光束偏转角度的大小。

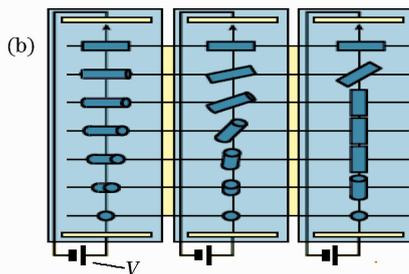
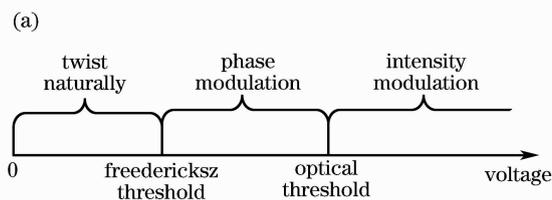


图 1 (a) 液晶分子电压区域;(b) 液晶分子的倾斜
Fig. 1 (a) Voltage on LC molecule; (b) tilt of LC molecule

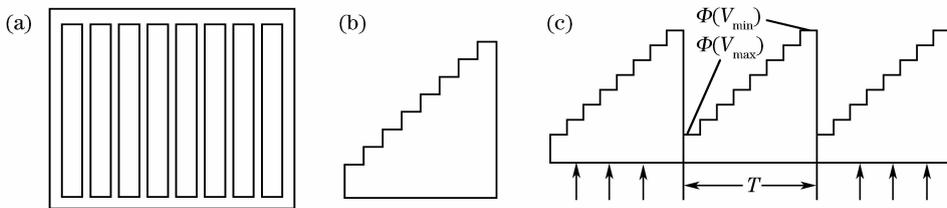


图 2 (a) 液晶面板;(b) 等效阶梯型玻璃器;(c) 闪耀光栅
Fig. 2 (a) Liquid crystal panel; (b) equivalent stepped glass device; (c) blazed grating

3 液晶空间光调制器特性测试

为实现基于 LCSLM 的光束偏转闭环控制,搭建如图 3 所示的实验光路。实验中采用 Holoeye 公司的反射型纯相位液晶空间光调制器 pluto,其尺寸为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,通过 DVI 接口传输图像进行控制^[14],图像的灰度值对应一定电压;CCD 用

于探测光斑,尺寸为 $656 \text{ pixel} \times 494 \text{ pixel}$,每个像素大小为 $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$,帧频为 60 frame/s ;计算机计算 CCD 图像中光斑的质心坐标,生成相位图并通过 DVI 接口发送给 pluto。相位图由 z_1 和 z_2 两个参数生成, z_1 和 z_2 代表第 1 阶和第 2 阶 Zernike 系数,分别与光束在 x 方向和 y 方向的偏转量成正

比,分别控制光束在 x 方向和 y 方向的偏转。

在使用 pluto 进行光束控制之前,需要对它进行伽马校正,使得相位图灰度值与相位调制量成线性^[15,16],伽马校正的原理不再赘述。通过伽马校正,pluto 在 635 nm 波段可实现 2π 的相位调制,且调制近似线性。测量控制量 z_1 和 z_2 分别与 CCD 光斑质心坐标在 x 方向和 y 方向偏移量的线性度,及 x 方向

和 y 方向的是调制否相互影响。将 z_2 设为 0, z_1 在 $-400\sim 400$ 范围内进行光束扫描,得到如图 4 所示的结果,从图 4(a)可知 z_1 与光斑质心 x 坐标方向偏移量的线性度非常好;从图 4(b)可知光斑质心 y 坐标也随 z_1 的变化而变化,这是由于液晶面板或光束与水平面不平行而引起的 x 方向和 y 方向调制的耦合。 y 方向的测试方法相同,且结果相当。

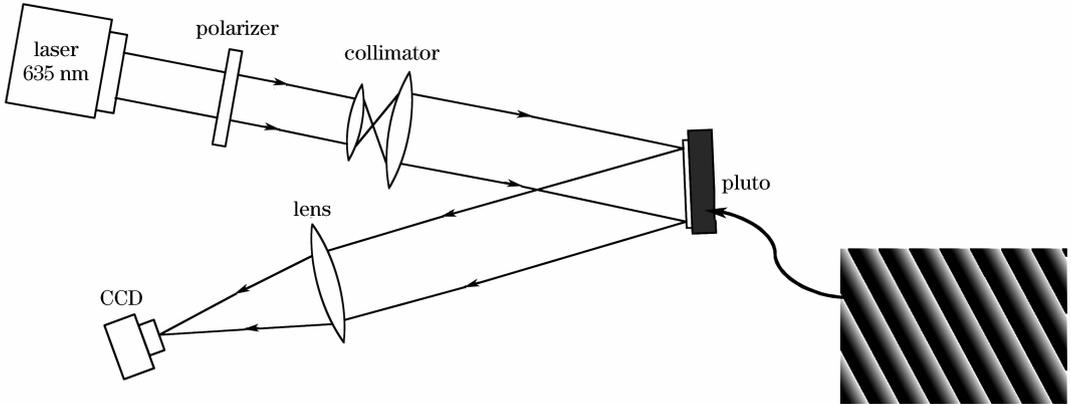


图 3 光束偏转实验光路图

Fig. 3 Diagram of the beam steering experiment

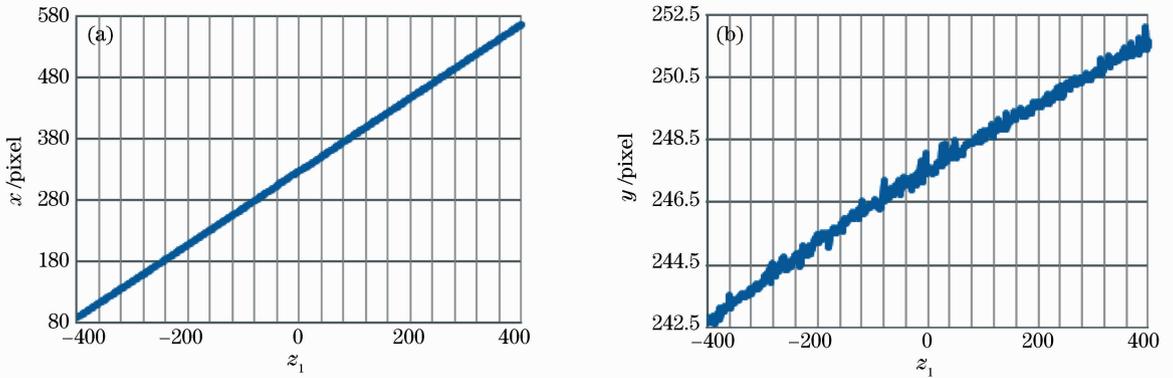


图 4 线性度和耦合量测试结果。(a) z_1 -光斑质心 x 坐标;(b) z_1 -光斑质心 y 坐标

Fig. 4 Result of the linearity test and coupling test. (a) z_1 - x value; (b) z_1 - y value

4 光束偏转控制实验

由测试知,经伽马校正后 pluto 单个方向上的调制是线性的, x 方向和 y 方向调制有较小的耦合。将 pluto 作为线性元件设计如图 5 所示为比例积分控制系统, k_0 为比例系数, k_1 为积分增益, k_0 和 k_1

共同影响系统收敛速度和稳定性。固定实验光路,通过多次阶跃响应测试得到较优值 $k_0 = 0.1, k_1 = 1.3$,使系统收敛速度快且超调量较小。以 $k_0 = 0.1, k_1 = 1.3$ 进行光束偏转,抑制光束正弦抖动。

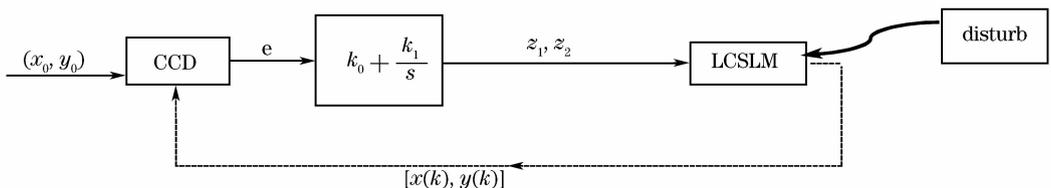


图 5 闭环控制系统框图

Fig. 5 Diagram of the close-loop system

5 实验结果及分析

在系统中加入正弦扰动 $f_{\text{disturb}} = B\sin(AN)$, B 为扰动信号幅值, N 为计数器, 扰动信号频率表示为

$$f = \frac{Af_n}{2\pi}, \quad (2)$$

式中系统采样频率 f_n 为 10 Hz。

图 6 为 $B = 20$ pixel, $A = 0.01$, 即 $f = 0.0159$ Hz 时, 目的坐标 x_0 为 300 pixel 时的扰动抑制实验结果, 光斑由初始偏置位置迅速收敛到 x_0 。控制系统有效地抑制了正弦扰动, 绝对抑制误差小于 ± 0.35 pixel, 相对误差小于 $\pm 1.75\%$ 。改变扰动信号频率进行多次实验, 抑制误差会随频率的增加而增大。

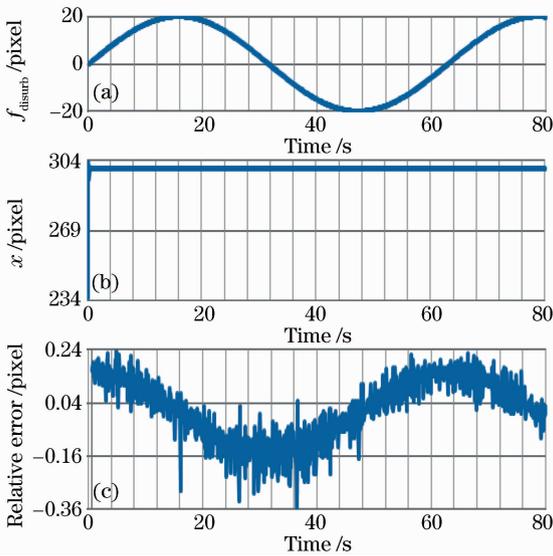


图 6 扰动抑制测试结果。

(a) 扰动; (b) x 坐标曲线; (c) 相对误差

Fig. 6 Result of the jitter suppression test.

(a) Disturbance; (b) x value curve; (c) relative error

以上实验结果表明, 在比例积分法控制下 pluto 抑制抖动的相对误差可小于 $\pm 1.75\%$, 误差随着信号频率的增大而增大, 这反映了控制系统的带宽特性, 影响系统带宽的主要因素为控制信号传输时延、液晶屏刷新频率、CCD 帧频、算法复杂度等。图 7 为基于 pluto 的光束偏转控制流程框图, 包含了影响系统带宽的各时间因素 T_0, T_1, T_2 和 T_3 。首先分析控制信号传输时延。LCSLM 具有较多像素单元, 且每个像素都需要一个独立的控制电压, 因此控制信号从计算机传输到 LCSLM 驱动电路需要较长时间。实验中控制信号为实时生成的图像, 它通过 DVI 接口传输到 pluto 驱动电路中转换成相应的电压, 消耗时间 T_1 约为 70 ms, 是影响系统带宽的最

主要因素。其次分析液晶屏刷新频率, 它受像素单元数及液晶响应速度的影响。pluto 尺寸为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 它分辨率高, 却限制了液晶屏刷新频率, 此外, 扭曲向列型液晶的响应速度受液晶自身特性的限制, 因此 pluto 的刷新频率仅为 60 Hz, 对应于 T_2 。再次, CCD 帧频也是影响系统带宽的因素, 实验中采用 CCD 帧频为 60 frame/s, 对应于 T_3 。最后, 是对控制算法复杂度的分析, 比例积分控制算法本身并不复杂, 但是生成并显示图像消耗时间较长, 对应于 T_0 。从以上分析知, 计算机通过 DVI 接口传输图像驱动 pluto 的方式带来了较大时延, 严重影响了控制系统的带宽, 针对此问题, 可以通过采用 PCIe 接口传输图像的方式来缩短时延; CCD 的速度可通过采用高帧频 CCD 的方式来改进; 但是, 液晶帧的刷新速度与液晶材料特性有关, 是影响系统带宽并制约液晶用于偏转控制系统的根本因素。

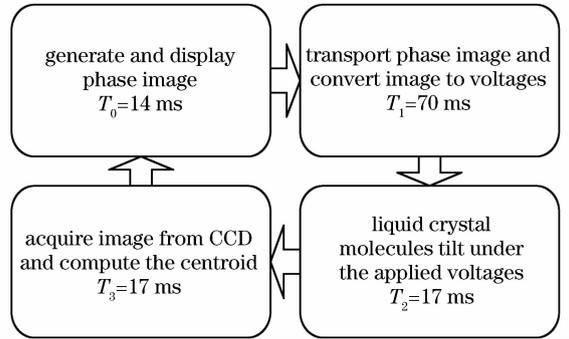


图 7 控制流程框图

Fig. 7 Diagram of the control flow

除了系统带宽问题外, LCSLM 的衍射效率引起的光束质量下降也会影响系统性能。图 8 为 $z_2 = 0, z_1$ 在 $-400 \sim 400$ 间扫描时的 CCD 光斑, 可以看出当 z_1 不为零时, CCD 上都不止一个光斑, 这与 LCSLM 的衍射效率有关。影响 LCSLM 衍射效

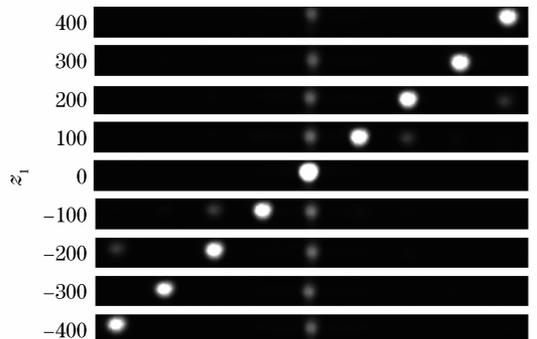


图 8 CCD 上光斑成像

Fig. 8 Image on CCD

率的主要因素是液晶填充因子和模拟闪耀光栅每个周期所包含像素个数^[17]。填充因子越高,衍射效率越高,而 pluto 填充因子只有 87%,最大衍射效率为 60%。闪耀光栅每个周期所包含像素个数越少,闪耀级次衍射效率越低,其他级次衍射效率越高。调制参量 z_1 增大,等效于减少了每个周期的像素个数,因此随着 z_1 的增加,闪耀级次光斑的强度会越来越弱,其他级次光斑会越来越亮。

6 结 论

进行了基于反射型 LCSLM 的光束偏转实验,使相对扰动抑制误差小于 $\pm 1.75\%$ 。作为光束偏转控制器,LCSLM 可以有效抑制扰动,但控制系统带宽受制于液晶屏驱动时延及液晶响应速度,低的衍射效率也会严重影响光束的质量。与实验中所用液晶空间光调制器 pluto 60% 的最大衍射效率和毫秒级的驱动速度相比较,目前的 LCSLM 产品中,最大零级衍射效率可达到 90%~95%,驱动时延可优化到微秒级,液晶屏刷新频率可以通过使用双频液晶^[3]或者使用铁电液晶提升到千赫兹级^[18],这将极大提高控制系统的带宽。控制系统的性能在很大程度上依赖于器件的性能,因此,通过改进驱动方式和引进新型器件可以提高液晶光束偏转系统性能。随着技术的发展,LCSLM 各方面的性能指标都将得到进一步提升,有希望在不久的将来从实验阶段走向实际应用。

参 考 文 献

- 1 Kong Lingjiang, Yi Wei, Yang Jianyu *et al.*. Research on accuracy of liquid crystal phased array component of laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5):1080~1085
孔令讲,易 伟,杨建宇等. 激光雷达液晶相控阵组件扫描精度分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5):1080~1085
- 2 Zhang Jian, Fang Yun, Wu Liying *et al.*. Liquid crystal beam steering technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2):325~334
张 健,方 运,吴丽莹等. 液晶光束偏转技术[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2):325~334
- 3 P. K. Orzechowski, S. Gibson, Tsao Tsu-Chin *et al.*. Nonlinear adaptive control of optical jitter with a new liquid crystal beam steering device [C]. *American Control Conference*, 2008. 4185~4190
- 4 P. K. Orzechowski. High-Performance Adaptive Control of Optical Jitter in Laser Beam Systems [D]. Los Angeles: University of California, 2007. 83~112
- 5 Wang Ning, Li Guohua, Yun Maojin. Voltage-dependent birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Chinese J.*

- Lasers*, 2002, **A29**(12):1064~1066
王 宁,李国华,云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12):1064~1066
- 6 Wang Wei, Li Guohua, Xue Dong. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7):970~972
王 伟,李国华,薛 冬. 液晶电控双折射率与电压关系的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7):970~972
- 7 N. Konforti, E. Marom, S.-T. Wu. Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(3):251~253
- 8 Li Huawei. A Scannable Liquid Crystal Blazed Grating [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. 30~33
李华伟. 一种可实现扫描的液晶闪耀光栅[D]. 成都:电子科技大学, 2007. 30~33
- 9 Liu Kun. The Design and Research of a Scannable Liquid Crystal Blazed Grating [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. 6~9
刘 坤. 可实现激光扫描的液晶闪耀光栅的设计与研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010. 6~9
- 10 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1231~1235
张翠玉,黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7):1231~1235
- 11 Kong Lingjiang, Zhu Ying, Yang Jianyu *et al.*. A new method of scanning angles screening of liquid crystal phased array component [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7):1961~1966
孔令讲,朱 颖,杨建宇等. 一种新的液晶相控阵组件波控方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7):1961~1966
- 12 Steven Serati, Jay Stockley. Advanced liquid crystal on silicon optical phased arrays [C]. *Aerospace Conference Proceeding, IEEE*, 2002, **3**:1395~1402
- 13 Jay Stockley, Steve Serati. Advances in liquid crystal beam steering [C]. *SPIE*, 2004, **5550**:32~39
- 14 Liu Bohan, Zhang Jian. Dynamical laser beams steering with phase-only spatial light modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):899~902
刘伯哈,张 健. 纯相位空间光调制器动态控制光束偏转[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):899~902
- 15 Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman-Green interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 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
- 16 Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12):1682~1686
刘永军,宣 丽,胡立发等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12):1682~1686
- 17 Cai Dongmei, Yang Huizhen, Ling Ning *et al.*. Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):491~495
蔡冬梅,杨慧珍,凌 宁等. 液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):491~495
- 18 David Engström, Michael J. O'Callaghan. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(9):1721~1726