

# 基于液晶光学相控阵的光束扫描研究进展

胡婕<sup>1,2,3</sup>, 杜升平<sup>1,2\*</sup>, 郭弘扬<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在空间激光通信领域中, APT(捕获、瞄准、跟踪)技术是核心技术之一,是建立可靠通信链路的重要保证。传统 APT 技术一般采用机械式转动来实现转向控制,存在体积大、转动惯量大、功耗高等缺点,无法满足空间激光通信轻量化、低功耗等实际要求,因此对非机械式光束扫描技术的研究具有重要意义。与传统 APT 技术相比,光学相控阵技术具有高扫描精度、随机偏转、稳定性好等优点,是目前非常有潜力的非机械式光束扫描技术之一,其中基于液晶材料的光学相控阵技术发展迅速。简要介绍了光学相控阵用于光束扫描的基本原理,综述了基于液晶材料的光学相控阵研究现状,分析了液晶光学相控阵用于光束扫描过程中的响应速度、偏转效率和偏转精度这 3 大关键性能指标以及影响因素,对提高关键性能的途径作了简要总结。

**关键词** 光通信; 光学相控阵; 光束扫描; 液晶; 捕获、瞄准、跟踪

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.110002

## Research Progress on Beam Scanning Based on Liquid Crystal Optical Phased Array

Hu Jie<sup>1,2,3</sup>, Du Shengping<sup>1,2\*</sup>, Guo Hongyang<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optical and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The acquisition, pointing, and tracking (APT) technology is important to establish the reliable links in space laser communication. The conventional APT technology employs a mechanical rotation method to achieve steering control. In addition, the conventional APT technology exhibits some significant disadvantages, including large volume and rotational inertia as well as high power consumption. Further, the classical APT technology cannot satisfy the practical requirements of space laser communication, i. e., light weight, miniaturization, and low power consumption. Therefore, to study the non-mechanical beam scanning technology is of considerable significance. When compared with the conventional APT technology, an optical phased array is a promising non-mechanical beam scanning technique because it provides various advantages, including high scanning accuracy, random deflection, and strong stability. The liquid crystal optical phased array (LCOPA) is observed to develop rapidly. In this study, we briefly introduce the basic principle of an optical phased array for beam scanning. Subsequently, we review the status of current research about LCOPAs. Further, three key performance indicators, i. e., response time, deflection efficiency, and deflection accuracy, as well as the influence factors are analyzed. In addition, the methods used to improve the LCOPA performances are also summarized.

**Key words** optical communications; optical phased array; beam scanning; liquid crystal; acquisition, pointing, and tracking

**OCIS codes** 060.2605; 230.2090; 160.3710; 050.5080

收稿日期: 2018-11-08; 修回日期: 2018-12-17; 录用日期: 2019-01-08

基金项目: 中科院先导项目量子通信资助(KX-002)

\* E-mail: du\_shengping@163.com

# 1 引言

光学相控阵技术在诸多非机械式光束偏转技术中发展迅速,逐渐成为相关技术领域中的研究热点,其实现方式是对波前相位进行调制,使光束在特定方向上偏转,以此达到光束扫描的目的<sup>[1]</sup>。在空间激光通信技术中,捕获、瞄准、跟踪(APT)技术是核心技术之一,对信息进行捕获、瞄准、跟踪,在激光通信、红外对抗、航天器等领域有着广阔的应用前景<sup>[2-5]</sup>。传统机械 APT 技术由于体积大、稳定性差、功耗高、响应速度慢以及不易和驱动电压相结合等缺点,极大地限制了空间光学、信息光学的发展,因此研究新型非机械式光束偏转技术尤为重要。在实际应用中,光学相控阵技术与传统 APT 技术相比,其以轻小化、多路同时控制、电控可编程等优点在众多光束偏转技术中占据独特优势。

1972 年 Meyer<sup>[6]</sup> 研制出一种基于铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)材料的一维光学相控阵。中国科学院上海光学精密机械研究所设计了一种基于 LiNbO<sub>3</sub> 材料的相控阵,实现了高速二维激光扫描<sup>[7]</sup>。Wight 等<sup>[8]</sup>于 1991 年研制出了一种基于砷化铝钾(AlGaAs)材料的一维光波导相控阵列,通过实验发现该器件能够以较小尺寸的阵元来获得较大偏转角度。石顺祥团队在我国首次将 AlGaAs 材料作为移相器,研制出扫描范围达 13.6° 的光波导阵列<sup>[9]</sup>。Thomas 等<sup>[10]</sup>利用锆钛酸铅陶瓷(PLZT)材料研制出一种 16 个可编程通道的固体阵列,可实现高效的光束扫描,但偏转范围仅为毫弧度数量级。由于利用 LiNbO<sub>3</sub>、AlGaAs 以及 PLZT 电光材料作为相控阵移相器材料存在阵元间距较大、驱动电压高、

集成性差等缺点,无法获得有效大角度光束扫描,而且器件损耗较大,不能满足航天器、激光雷达等重要领域对尺寸、重量、功耗、响应等方面的实际需求,因此将液晶材料用于光学相控阵移相器已成为研究热点。液晶光学相控阵已成功应用于激光相控阵雷达系统,并且将它作为激光雷达系统中的核心移相器是各国军备的重要趋势之一<sup>[5]</sup>。凭借轻小化、低驱动、低功耗等优点,液晶光学相控阵也可用于全息投影、医疗影像、车载雷达、微型扫描等民用方面,使微小型高科技产品成为可能,这更能说明液晶光学相控阵技术研究的重要性。本文简要阐述了光学相控阵的原理,介绍了国内外对液晶光学相控阵的研究现状,分析了影响关键性能的因素,并简要论述了提高关键性能的途径。

## 2 液晶光学相控阵技术

### 2.1 光束扫描实现方式

光学相控阵实现光束扫描的原理来源于微波相控阵,控制相邻阵元出射光波之间的相位关系,可以模拟出一个可控楔角的阶梯型闪耀光栅,使入射光束经过器件在远场特定方向上发生相长干涉,从而在该方向上产生一束能量会聚度较高的光束<sup>[1]</sup>。一维光学相控阵扫描原理如图 1 所示,图 1(a)为由  $N$  个阵元组成的一维相控阵列,各阵元间距  $d$ ,相邻阵元间电极相位差为  $\varphi$ ,图 1(b)为模拟出的阶梯型光栅。当波束以一定偏转角度  $\theta$  出射,在远场某特定点的电场可表达为<sup>[11]</sup>

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} \exp[j(n-1)kd \sin \theta], \quad (1)$$

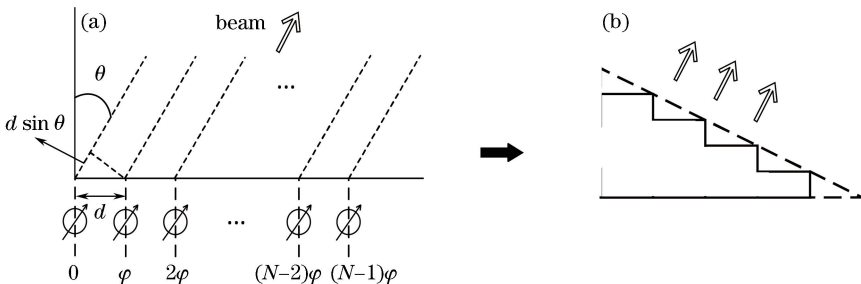


图 1  $N$  个阵元相控阵示意图。(a)相控阵模型;(b)模拟闪耀光栅

Fig. 1 Schematic of  $N$ -unit phase array. (a) Phased array model; (b) simulated blazed grating

式中: $k$ 为波数。经过化简和推导可得电极相位差  $\varphi$  和偏转角度  $\theta$  的关系为

$$\sin \theta = \frac{\varphi}{kd}. \quad (2)$$

(2)式为基于微波相控阵原理的光学相控阵技术用于光束扫描等方面提供了理论基础。可以通过两片一维相控阵器件级联或者单片二维器件实现二维偏转。另外,为了满足光束扫描系统大角度的实

实际需求,可将光学相控阵与体全息光栅、液晶偏振光栅、液晶棱镜等光学器件以一定的形式进行组合<sup>[12]</sup>。可用于光学相控阵的电光材料有  $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{AlGaAs}$ 、 $\text{PLZT}$  材料以及液晶,鉴于光学相控阵的应用前景,基于液晶材料的光学相控阵一直是非机械式光束偏转技术中的研究主流。

## 2.2 液晶光学相控阵

液晶相控阵(LCOPA)基本结构如图 2 所示,液晶层(nematic LC)上下两部分都有透明电极和玻璃

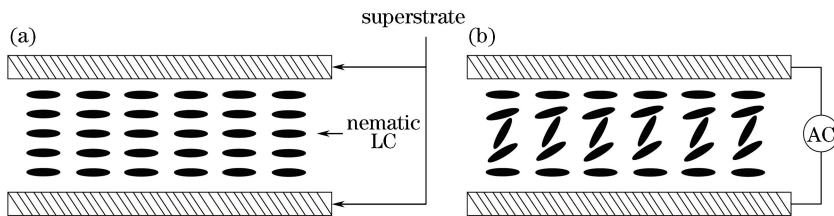


图 2 LCOPA 基本结构图。(a)不加电压;(b)施加电压

Fig. 2 Basic structure of LCOPA. (a) Without voltage applied; (b) with voltage applied

第 1 片可实现光束扫描的高性能液晶相控阵器件于 1989 年由美国雷声公司研制,如图 3(a)所示,其原理是利用周期性闪耀光栅模型,通过改变每周期的台阶数,即改变电压相位差来控制光束的偏转。该公司后续研制出不同规格的液晶光学相控阵,分别在偏转角为  $0.81^\circ$  和  $2^\circ$  时效率达 97% 和 85%<sup>[1]</sup>。美国空军研究室与 BNS 等公司合作,对液

晶相控阵在模拟太空环境中进行测试,结果表明,基于液晶材料的器件在模拟环境中并未受到太大的影响,这一实验也为后续将液晶光学相控阵器件应用于航天器等领域提供了重要依据<sup>[17]</sup>。近几年, Meadowlark 公司、麻省理工研究室、日本 Santec 公司等相关研究团队纷纷研制出二维液晶相控阵器件。

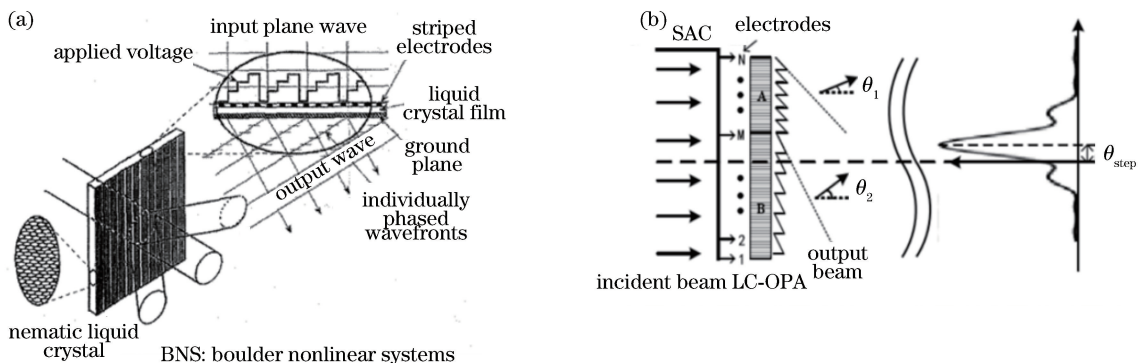


图 3 不同液晶相控模型。(a)雷声公司研制的液晶相控阵<sup>[1]</sup>;(b)子孔径相干法(SAC)实现高精度扫描<sup>[19]</sup>

Fig. 3 Different liquid crystal phase control models. (a) LCOPA by Raytheon<sup>[1]</sup>; (b) high-precision scanning with SAC<sup>[19]</sup>

在近十几年,国内各领域研究人员对液晶光学相控阵高度重视,电子科技大学、哈尔滨工业大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称长春光机所)、中国科学院光电技术研究所(简称成都光电所)等相关单位在器件结构设计、驱动电路、波控方法等方面进行了研究。电子科技大学<sup>[20-32]</sup>从 2000 年起初步研制液晶光学相控阵,2005 年研制出可实现连续偏转( $\pm 3^\circ$ )的一维透射式液晶相控阵,

2010 年提出一种基于非周期闪耀光栅模型的波控方法,将偏转效率提升了 10%~20%,2015 年提出子孔径相干法将分辨率提高到了  $6 \mu\text{rad}$ ,原理图如图 3(b)所示,该方法对单个移相器进行分区控制,如图中所示 A 区(扫描角度为  $\theta_1$ ,  $N$  为 A 区阵元数)和 B 区(扫描角度为  $\theta_2$ ,  $M$  为 B 区阵元数),最终扫描角度为  $\theta_{\text{step}}$ ,两个分区占比可自行设置,其与周期性光栅模型[见图 3(a)]相比较,弥补了光束偏转

角度离散的缺点。

哈尔滨工业大学最早将光束控制和液晶相控阵的理论、技术、应用作为整体项目,张健团队在液晶相控阵理论和关键技术方面进行相应的研究,自主研发出一维液晶光学相控阵,可实现最大偏转角度为 $2.0014^\circ$ 的连续偏转,并对“相位凹陷”现象影响衍射效率进行了定性分析。另外在光束整形、波前校正等方面进行了诸多实验,为后续相关研究提供了珍贵的理论基础<sup>[33-38]</sup>。长春光机所研究并建立电场与晶体折射率的关系,提出非规则光学相控阵的基本理论,随后对相位调制曲线非线性等问题进行了讨论<sup>[39-42]</sup>;2013年该研究所采用平行排列液晶盒作为液晶相控阵模型进行研究,讨论了基于优化盒厚的电压与响应时间的关系,并指出该关系普遍适用于其他具有固定相位调制量的呈平行排列的液晶光学器件<sup>[43]</sup>。成都光电所研究液晶相控阵虽起步较晚,但在短短几年时间内取得了显著的成果,2012年该研究所设计一种能够应用于APT技术的高精度、大角度光束偏转系统,首次通过液晶相控阵与沃拉斯顿棱镜级联实现角度放大,最终实现 $\pm 13.25^\circ$ 的光束偏转<sup>[44]</sup>;随后利用反射型液晶空间光调制器(Pluto)设计了光束偏转闭环系统,最大衍射效率可达到90%,驱动时延优化到微秒级,同时表明液晶响应速度、系统传输时延和算法复杂度对控制系统带宽都存在一定的制约<sup>[45-50]</sup>。

对液晶相控阵,国外的研究重点为研制基于新型液晶材料的光学相控阵,从器件本身的优化来提高液晶相控阵的整体性能,而国内由于工艺技术的限制,研究方向主要为探索新型波控方法和先进的驱动方式,希望能够根据不同波控方法研究出具有针对性的驱动方式。液晶相控阵用于光束扫描,响应速度、偏转效率和偏转精度是3大关键性能指标,为了满足军用民用等各方面的需求,提高这3大指标一直是液晶相控阵研究的重点和难点。

### 3 关键性能及其提高途径

#### 3.1 响应速度

液晶相控阵响应速度与液晶盒厚成正比,可表示为<sup>[51]</sup>

$$\tau = \frac{\gamma_1 l_d^2}{\kappa_{22} \pi^2}, \quad (3)$$

式中: $l_d$ 为液晶盒厚; $\gamma_1$ 和 $\kappa_{22}$ 分别为液晶的黏滞系数和弹性系数。该式表明为了获得更好的响应性能,需要进一步减小液晶盒厚以及降低黏滞系数等。

常用的液晶材料有铁电液晶、双频驱动液晶等。Gauza等<sup>[52]</sup>研制出一种提高液晶光学相控阵响应性能的含氟的双苯环异硫氰酸酯(NCS)体系液晶材料,实现了亚毫秒量级的响应速度。Engström等<sup>[53]</sup>采用基于铁电液晶材料的光学相控阵实现了 $200 \mu\text{s}$ 的响应速度。中国工程物理研究院制备出一种聚合物网络液晶材料,使响应性能从亚毫秒量级降至秒量级<sup>[12]</sup>。液晶相控阵的响应性能随着新型材料的研制与应用得到不断提升,通过分析可知,在应用过程中仍存在一定的不足和限制。为了使液晶光学相控阵在响应速度上有更大幅度的提升,需要探索更先进的驱动方式。

最常用的驱动方法是过驱动法,通过提高液晶电路的基础电压来对液晶器件进行过压驱动。2009年,Engström等<sup>[53]</sup>在液晶显示器领域应用过驱动技术进行研究,结果表明,通过过驱动技术可有效地提高液晶显示器件的响应速度。2006年一种基于Spiking算法的过驱动技术被应用到液晶空间光调制器,如图4所示,将0到 $2\pi$ 相位调制的上升时间在正常驱动电压条件下的300ms(空心矩形曲线)缩短为67ms(实心矩形曲线),下降时间从450ms(空心三角曲线)缩短为98ms(实心三角曲线)<sup>[54]</sup>。Hu等<sup>[55]</sup>利用过驱动和下冲电路相结合的驱动方法,使响应性能达到亚毫秒量级。近几年成都光电所对此也做了相关研究,在调制深度为 $2\pi$ 的情况下使用过驱动方法将上升和下降过程的响应时间分别缩短至16ms和18ms,有效缩短了响应时间,提高系统性能,其响应曲线如图5所示<sup>[48]</sup>。

针对响应速度提升的研究方向,一种是研制新型聚合物液晶材料,但利用该材料存在电压代价高以及

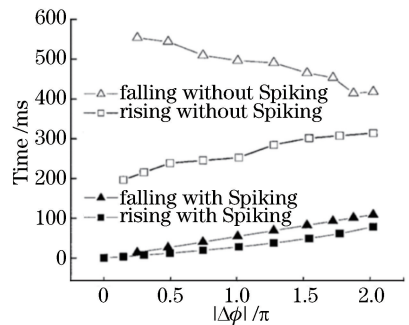


图4 在有无Spiking算法下的上升时间和下降时间( $\Delta\phi$ 为变化相位)<sup>[54]</sup>

Fig. 4 Rising time and falling time with and without Spiking algorithm ( $\Delta\phi$  is phase change)<sup>[54]</sup>

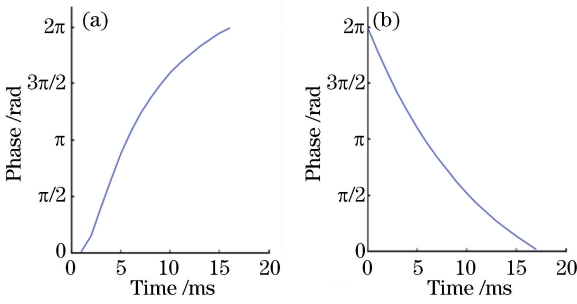


图5 0~2π 相位段响应曲线<sup>[48]</sup>。(a)上升过程;(b)下降过程

Fig. 5 Time response curves for 0-2π phase.

(a) Rising process; (b) falling process

耦合大等问题;另一种是基于新型材料探索先进的驱动方式。无论基于哪一种液晶材料,都会存在液晶晶体弹性形变带来的响应延迟等问题,需针对不同的

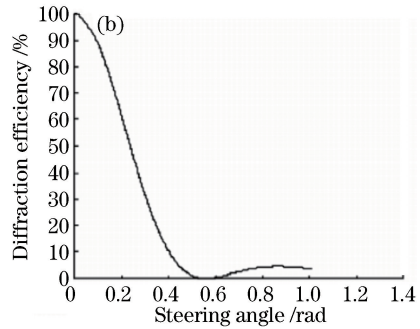
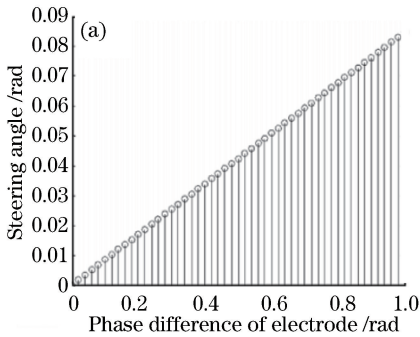


图6 基于相控阵模型的光束扫描<sup>[50]</sup>。(a)电极相位差与偏转角度的关系;(b)偏转角度与衍射效率的关系

Fig. 6 Beam scanning based on phased array model<sup>[50]</sup>. (a) Phase difference of electrode versus steering angle;

(b) steering angle versus diffraction efficiency

液晶相控阵阵元分辨率较高、晶体具有黏性等特点,导致相邻像素之间存在较强的非线性关联效应,称之为边缘场效应<sup>[56]</sup>,易导致实际的相位模式严重偏离理想模式。目前有效减小边缘场效应的方式有两种:一是基于优化控制方法,二是获取波前相位的方法。2003年,Harris<sup>[57]</sup>采用4种方法对电压-相位关系进行多项式系数优化,从优化结果可知这4种方法均可在有效扫描范围内达到较高的偏转效率,对比曲线如图7所示。国内也研究出多种波控算法,通过迭代反馈来实现波前相位的控制,理论计算表明在有效扫描范围内可将偏转效率提升10%以上<sup>[58-59]</sup>。这种直接计算液晶相控阵的实际相位分布,再进行迭代反馈是目前颇为有效的优化相位分布的算法,但由于该算法扩展性较差,无法满足实际应用的需求。随后研究人员在自适应光学优化随机并行梯度下降(SPGD)算法的基础上,提出一种控制并优化液晶相控阵偏转效率的方法,且适用于周期与非周期闪耀光栅模型,提高了波控算法的扩

液晶材料探索最佳适用的驱动方式。

### 3.2 偏转效率

根据液晶光学相控阵模型和光波衍射原理,利用理想相位模式下的液晶相控阵进行光束偏转时,衍射效率可表示为

$$\eta = \left[ \frac{\sin(\varphi/2)}{\varphi/2} \right]^2, \quad (4)$$

式中: $\varphi$ 表示为液晶电极相位差。成都光电所的研究人员根据相控阵模型针对波长为532 nm的光波进行了仿真,其电极相位差、偏转效率、偏转角度的关系如图6所示,当偏转角为0.133 rad时,衍射效率为81%<sup>[50]</sup>。当不考虑阵元相位量化的问题时,在视场内可扫描任意可分辨的角度,解决了闪耀光栅模型偏转角离散的问题。

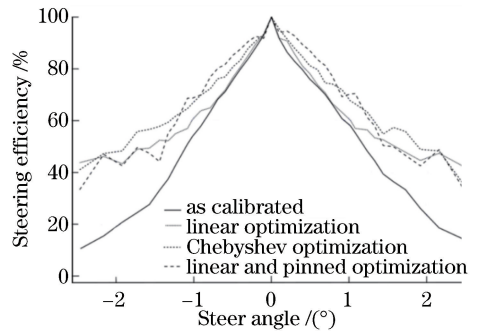


图7 利用4种优化方法提高衍射效率<sup>[57]</sup>

Fig. 7 Diffraction efficiency improvement by four optimization approaches<sup>[57]</sup>

展性<sup>[12]</sup>。蝙蝠算法在近期波控算法研究中受到青睐,与粒子群算法相比,该算法能够有效压缩波束旁瓣,提升主瓣能量,对同一偏转角度0.35 rad而言,可将偏转效率由62%提升至68%。蝙蝠算法可使主瓣更窄更集中,在液晶光学相控阵技术中有着较好的发展趋势<sup>[60]</sup>,电子科技大学 Xiao等<sup>[61]</sup>近两年提出的快

速搜索优化算法(RSA)也可使主瓣更窄更集中。

另一方面,在对液晶相控阵施加电压时,相位无法从  $2\pi$  快速重置回 0,而是产生如图 8 所示的下降回程区,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\Lambda_F$  为回程区大小。回程区在很大程度上影响偏转效率,回程区大小对效率的影响可表示为<sup>[1]</sup>

$$\eta_F = \left(1 - \frac{\Lambda_F}{\Lambda}\right)^2 \quad (5)$$

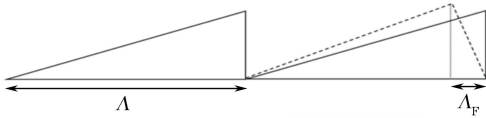


图 8 回程区  
Fig. 8 Flyback

图 9 是成都光电所在 2016 年基于二维标量衍射理论对偏转性能进行仿真与实验的结果对比<sup>[47]</sup>,上面的曲线表示为理论值,下面曲折的线表示为实际值,通过分析并指出主要差别是由相位重置产生的回程区造成的。

### 3.3 偏转精度

偏转精度是液晶相控阵器件用于光束扫描领域一个非常重要的性能指标,根据液晶相控阵原理,偏转角度可表示为<sup>[50]</sup>

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda\varphi}{2\pi a}\right), \quad (6)$$

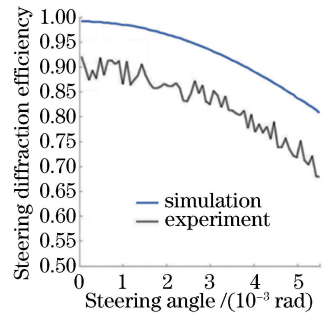


图 9 偏转衍射效率与偏转角度的关系<sup>[47]</sup>

Fig. 9 Steering diffraction efficiency versus steering angle<sup>[47]</sup>

式中:  $a$  为阵元间距;  $\varphi$  为相邻阵元间电极相位差。(6)式表明阵元间距、电极相位差和波入射光波产生的误差都将引起偏转精度误差。在电子科技大学的研究中,将误差因素分为距离和相位两大类,分别对各因素进行了仿真分析<sup>[62]</sup>。2014 年,该校自主研发了一种新型液晶光学相控阵,如图 10 所示,在偏转范围  $\pm 500 \mu\text{rad}$  内偏转精度可达  $2 \mu\text{rad}$ <sup>[21]</sup>。汪相如研究团队于 2017 年采用 2 片一维液晶光学相控阵级联的方式,如图 11 所示, PBS 为偏振分光棱镜, HWP 为半波片,在偏转范围  $0.19^\circ$  内,偏转精度优于  $25 \mu\text{rad}$ ,偏转效率可达  $84.7\%$ <sup>[24]</sup>。成都光电所利用二维标量衍射理论对偏转性能进行了实验仿真,结果表明偏转角度从  $86 \mu\text{rad}$  到  $2.5 \text{ mrad}$  范围内精度可达  $3 \mu\text{rad}$ <sup>[47]</sup>。

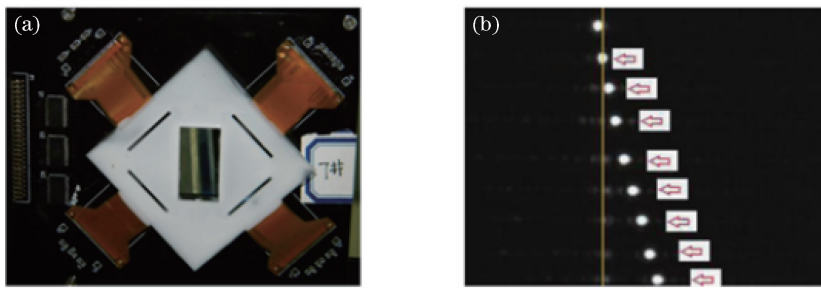


图 10 电子科技大学自主研发 LCOPA 和相关实验结果<sup>[20]</sup>。(a) LCOPA;(b) 光束偏转实验结果

Fig. 10 Self-made LCOPA and experimental result by University of Electronic Science and Technology of China<sup>[20]</sup>.

(a) LCOPA; (b) experimental result of beam steering

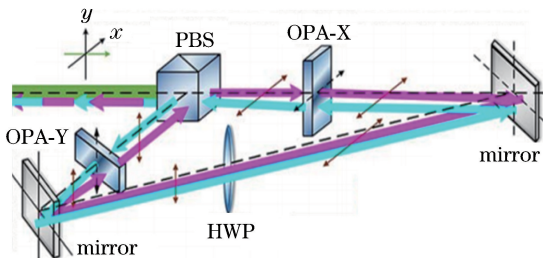


图 11 级联形式实现二维光束扫描<sup>[24]</sup>

Fig. 11 Cascaded scheme used for 2D beam scanning<sup>[24]</sup>

由于非线性关联效应、器件尺寸误差等影响,也可以通过设计闭环控制系统来减小部分误差<sup>[48]</sup>。但目前对提高偏转精度的研究较少,仍有提升空间,希望探索高精度的光束偏转方法。

## 4 结束语

液晶光学相控阵技术可实时、精确地控制光束进行扫描,具有驱动电压低、扫描精度高、随机指向、实时可编程、体积小、功耗低等优点,是目前最具优

势的非机械式光束偏转技术之一,对空间光通信技术的发展有着积极的影响。自2003年起美国国防部高级研究计划局(DARPA)、雷声公司、Rockwell公司、欧洲防务局、瑞典国防研究局等发达国家相关研究机构纷纷设立了激光束灵活扫描的项目,并提出利用液晶光学相控阵作为核心移相器来实现光束非机械式扫描的方案。液晶光学相控阵还可用于自适应光学、波前探测、3D成像等民用方面。另外目前液晶光学相控阵主要应用于低功率的系统,其原因是高功率激光所带来的影响会极大降低器件性能甚至损坏器件。因此在高功率激光束扫描这一方面,需要进行大量的研究,才能使液晶光学相控阵技术作为军用设备中的中流砥柱。由于工艺技术的限制,液晶光学相控阵仍有许多研究难点。为了有效提高器件的光束扫描性能,目前主要的解决方案是研究新型高双折射率液晶材料,未来研究路线可结合卷积神经网络探索出新型高效的波控方法,以弥补器件本身的缺点。

### 参 考 文 献

- [1] McManamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, *et al.* Optical phased array technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 268-298.
- [2] Geng L, Zhang Z P. Foreign spaceborne laser application[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(9): 919-925.  
耿林, 张忠萍. 国外空间激光应用技术研究进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(9): 919-925.
- [3] Zhang J. Research on beam deflection of non-mechanical APT based on liquid crystal [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.  
张杰. 基于液晶的非机械式 APT 的光束偏转研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [4] Bai S, Wang J Y, Zhang L, *et al.* Development progress and trends of space optical communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070001.  
白帅, 王建宇, 张亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070001.
- [5] McManamon P F, Bos P J, Escuti M J, *et al.* A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(6): 1078-1096.
- [6] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal [J]. Applied Optics, 1972, 11(3): 613-616.
- [7] Wan L Y, Liu L R, Zhang M L, *et al.* High speed electro-optic phased array for two dimensional laser beam scanner: CN2677961Y[P]. 2005-02-09.  
万玲玉, 刘立人, 张明丽, 等. 高速电光相控阵二维激光光束扫描器: CN2677961Y[P]. 2005-02-09.
- [8] Wight D R, Heaton J M, Hughes B T, *et al.* Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(8): 899-901.
- [9] Liang H W, Shi S X, Li J L. Study on characteristics of an optical waveguide array in a novel type of electro-optic scanners [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(11): 1654-1658.  
梁华伟, 石顺祥, 李家立. 新型电光扫描器中光波导阵列特性研究[J]. 光子学报, 2006, 35(11): 1654-1658.
- [10] Thomas J A, Fainman Y. Programmable diffractive optical element using a multichannel lanthanum-modified lead zirconate titanate phase modulator[J]. Optics Letters, 1995, 20(13): 1510-1512.
- [11] Ding L F, Geng F L. Principle of radar[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2002.  
丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [12] Zhao X J. Research on key technologies and applications of liquid crystal phase control arrays[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2014.  
赵祥杰. 液晶相位控制阵列关键技术及其应用[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2014.
- [13] Kimko E. LCD TV: principles and applications of liquid crystal display [M]. Wang X J, Tian J M, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1991.  
金子英二. 液晶电视: 液晶显示的原理和应用[M]. 王新久, 田建民, 译. 北京: 电子工业出版社, 1991.
- [14] McManamon P. An overview of optical phased array technology and status [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5947: 59470I.
- [15] Dorschner T A, Lambert L Q, Smith I W, *et al.* Electronic beam control for advanced laser radar[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3707: 316-326.
- [16] Tholl H D. Novel laser beam steering techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6397: 639708.
- [17] Linnenberger A, Serati S, Stockley J. Advances in optical phased array technology [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6304: 63040T.

- [18] Stockley J, Serati S. Cascaded one-dimensional liquid crystal opas for 2-D beam steering [C] // 2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 03TH8652), March 8-15, 2003, Big Sky, Montana, USA. New York: IEEE, 2003, 4: 1817-1822.
- [19] Tang Z H. Target location research based on distributed phased array radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.  
汤镇辉. 液晶光学相控阵的波束扫描方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [20] Song Y. Research on beam steering control model and algorithm for liquid crystal phased array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.  
宋艳. 液晶相控阵波束控制模型与算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [21] Wang X R, Tan Q G, Huang Z Q, *et al.* Liquid crystal optical phased array device with a fine steering precision of a few micro-radians [J]. Optics Communications, 2014, 313: 360-364.
- [22] Pan F. Research about liquid crystal phased array modeling and performance analysis [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.  
潘斐. 液晶相控阵建模与性能分析研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [23] Wang X R, Tan Q G, Huang Z Q, *et al.* Dual beam formation and 2-D scan technique of liquid crystal optical phased array[J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 631-635.  
汪相如, 谭庆贵, 黄子强, 等. 液晶光学相控阵的双波束成形和2维扫描技术[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 631-635.
- [24] Wu L, Wang X R, Xiong C D, *et al.* Polarization-independent two-dimensional beam steering using liquid crystal optical phased arrays [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(10): 101601.
- [25] Wang X R, Huang Z Q. Analysis and research on liquid crystal optical phase array component steering presicion[J]. Electro-Optic Technology Application, 2017, 32(4): 33-37.  
汪相如, 黄子强. 液晶光学相控阵组件扫描精度分析研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(4): 33-37.
- [26] Wang X R, He X X, Fang L, *et al.* Precision analysis on the phase delay measurement method of Fourier quarter-wave-plate on liquid crystal optical phased array[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(1): 7-12.  
汪相如, 贺晓娟, 方琳, 等. 傅立叶 1/4 波片法检测液晶光学相控阵移相量的精度分析[J]. 液晶与显示, 2017, 32(1): 7-12.
- [27] Liu K. Research and design of liquid crystal blazed grating capable of laser scanning [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.  
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.
- [28] Yang Z M, Kong L J, Xiao F, *et al.* Coherent beam combination based on array of liquid crystal optical phased arrays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121402.  
杨镇铭, 孔令讲, 肖锋, 等. 基于液晶相控阵阵列的激光相干合成方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121402.
- [29] Xiao F, Kong L J, Ai Y. A liquid crystal lens with tunable focal length based on principle of optical phased array technology [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s123003.  
肖锋, 孔令讲, 艾越. 一种基于光学相控阵技术的可变焦液晶透镜实现方法[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s123003.
- [30] Wang L, Lu Y X, Huang Z Q, *et al.* Influence of marginal effect of electric field on properties of liquid crystal grating[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2007, 22(1): 61-64.  
王俐, 卢亚雄, 黄子强, 等. 电场边缘效应对液晶光栅特性的影响[J]. 液晶与显示, 2007, 22(1): 61-64.
- [31] Zhuo R S. Study on the realization method of large aperture liquid crystal optical phased array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.  
卓儒盛. 大口径液晶光学相控阵实现方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [32] Xu J H, Wang X R, Huang Z Q, *et al.* PID tracking method of space laser communication based on liquid crystal optical phased array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 021202.  
许剑华, 汪相如, 黄子强, 等. 基于液晶光学相控阵的空间激光通信PID跟踪方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 021202.
- [33] Zhang H X, Zhang J, Wu L Y. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman-Green interferometer[J]. Chinese Journal of 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.
- [34] Zhang J, Xu L, Wu L Y, *et al.* Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1497-1502.  
张健, 徐林, 吴丽莹, 等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1497-1502.
- [35] Liu B H, Zhang J. Dynamical laser beams steering with phase-only spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(7): 899-902.  
刘伯晗, 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.
- [36] Liu B H, Wu L Y, Zhang J. Fast phases retrieval for diffraction optical devices optimal design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 219-224.  
刘伯晗, 吴丽莹, 张健. 一种用于衍射光元件优化设计的快速算法的研究[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 219-224.
- [37] Xu L. Research on phase delay and diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.  
徐林. 液晶光学相控阵相位延迟及衍射效率研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [38] Shi Y L. Research on driving technology of liquid crystal optical phased array for beam steering [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.  
石永亮. 用于光束偏转的液晶光学相阵列驱动技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [39] Zhu C Y. Study on the technology of spatial light modulation by electrical addressing [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2002.  
朱成禹. 电寻址空间光调制技术的研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2002.
- [40] Lü X P, Feng K C, Liu W Q. Theoretical study on the optical phased-array scanning [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2002, 25(2): 47-49.  
吕秀品, 冯克成, 刘伟奇. 光学相控阵扫描的理论研究 [J]. 长春理工大学学报, 2002, 25(2): 47-49.
- [41] Lü X P, Feng K C, Liu W Q. A design for laser television with optical phased array scanning [J]. *Journal of Shantou University (Natural Science Edition)*, 2003, 18(1): 43-47.  
吕秀品, 冯克成, 刘伟奇. 光学相控阵扫描激光电视的设计 [J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2003, 18(1): 43-47.
- [42] Cao Z L, Mu Q Q, Hu L F, *et al.* Nonlinear phase modulation of liquid crystal wavefront corrector and closed loop correction [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(2): 157-162.  
曹召良, 穆全全, 胡立发, 等. 液晶波前校正器位相调制非线性及闭环校正研究 [J]. 液晶与显示, 2008, 23(2): 157-162.
- [43] Qi M J, Wang Q D, Mu Q Q, *et al.* Study of response time depending on driving voltage of liquid crystal spatial light modulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 092302.  
齐梦娇, 王启东, 穆全全, 等. 驱动电压对液晶空间光调制器响应时间影响的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 092302.
- [44] Xiao W B, Huang Y M, Wu Q Y, *et al.* A wide-angle beam steering system based on Wollaston prisms [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(5): 588-592.  
肖文奔, 黄永梅, 吴琼雁, 等. 基于 Wollaston 棱镜的大角度液晶光束偏转系统 [J]. 光学技术, 2012, 38(5): 588-592.
- [45] Hao Y J. The research of non-mechanical beam steering controller in laser communication [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.  
郝雅静. 光通信中非机械式光束偏转控制器研究 [D]. 成都: 中国科学院大学, 2014.
- [46] Zhang C, Huang Y M, Qi B, *et al.* Beam steering control based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 0905005.  
张彩, 黄永梅, 亓波, 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0905005.
- [47] Ding K, Qi B. Beam steering performance simulation of liquid crystal spatial light modulator based on 2D scalar diffraction [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0205005.  
丁科, 亓波. 基于二维标量衍射的液晶光束偏转性能仿真 [J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0205005.
- [48] Guo H Y, Du S P. Influence of driving voltage on phase modulation of nematic liquid crystal [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(12): 28-31.  
郭弘扬, 杜升平. 驱动电压对向列型液晶调制相位的影响 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(12): 28-31.
- [49] Du S P, Fu C Y, Huang Y M, *et al.* A method of

- measure the liquid-crystal's modulating characteristic [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1): 0105001.
- 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): 0105001.
- [50] Du S P, Huang Y M, Fu C Y, *et al.* Liquid-crystal beam deflection wave control method based on phased array radar[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 581-586.
- 杜升平, 黄永梅, 付承毓, 等. 基于相控阵雷达模型的液晶光束偏转波控方法研究[J]. *应用光学*, 2017, 38(4): 581-586.
- [51] Dayton D, Browne S, Gonglewski J, *et al.* Characterization and control of a multielement dual-frequency liquid-crystal device for high-speed adaptive optical wave-front correction [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(15): 2345-2335.
- [52] Gauza S, Wen C H, Wu S T, *et al.* High birefringence liquid crystals for photonic applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5947: 594706.
- [53] Engström D, O'Callaghan M J, Walker C, *et al.* Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(9): 1721-1726.
- [54] Xun X D, Cho D J, Cohn R W. Spiking voltages for faster switching of nematic liquid-crystal light modulators [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(13): 3136-3143.
- [55] Hu H B, Hu L F, Peng Z H, *et al.* Advanced single-frame overdriving for liquid-crystal spatial light modulators[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3324-3326.
- [56] Cai D M, Xue L X, Ling N, *et al.* Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(11): 19-23.
- 蔡冬梅, 薛丽霞, 凌宁, 等. 液晶空间光调制器相位调制特性研究[J]. *光电工程*, 2007, 34(11): 19-23.
- [57] Harris S R. Numerical optimization of the performance of nematic liquid crystal optical phased arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5162: 157-171.
- [58] Cai D M, Yang H Z, Ling N, *et al.* Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection[J]. *Chinese Journal of 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.
- [59] Yin X H. Research on optimization algorithm of steering data for laser radar phased array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- 尹晓虎. 激光雷达液晶相控阵波控数据优化算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [60] Huang Z W, Wang C Y, Peng L H, *et al.* Beam optimization of liquid crystal optical phased array based on bat algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082303.
- 黄志伟, 王春阳, 彭丽华, 等. 基于蝙蝠算法的液晶光学相控阵波束优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082303.
- [61] Xiao F, Kong L J, Chen J. Beam-steering efficiency optimization method based on a rapid-search algorithm for liquid crystal optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4585-4590.
- [62] Kong L J, Yi W, Yang J Y, *et al.* Research on scanning accuracy of liquid crystal phased array component of laser radar [J]. *Chinese Journal of 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.