

激光与光电子学进展

激光通信中液晶光学相控阵技术的研究进展(特邀)

贺晓娴¹, 周思雨¹, 赵基翔², 汪相如^{1*}¹电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731;²新疆大学软件学院, 新疆 乌鲁木齐 830091

摘要 作为一种新兴的非机械式波束控制技术, 光学相控阵大大提高了系统的效率和稳定性, 具有低质量、小尺寸、快速波束赋形和低功耗等优点, 在多个领域得到了广泛的应用。本文从波束指向器的角度, 综述了液晶空间光学相控阵技术在激光通信中的研究进展。根据激光通信系统对波束指向器的性能要求, 从大口径、大角度、快速响应、多波束和偏转效率提升等多方面介绍了液晶光学相控阵领域的研究现状与最新进展, 总结了液晶光学相控阵目前面临的问题及未来的发展趋势。

关键词 激光通信; 光学相控阵; 液晶; 空间光调制器

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240715

Research Progress on Liquid Crystal Optical Phased Array Technology for Laser Communication (Invited)

He Xiaoxian¹, Zhou Siyu¹, Zhao Jixiang², Wang Xiangru^{1*}¹School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China;²School of Software, Xinjiang University, Urumqi 830091, Xinjiang, China

Abstract Optical phased array (OPA), a nonmechanical beam steering technology, greatly improves the efficiency and stability of optical systems. It offers various advantages, including lightweight construction, compact size, fast beamforming, and low power consumption, rendering it extensively applicable across various fields. This paper provides an overview of the research advancements in liquid crystal-based OPAs employed for beam steering in laser communication. Furthermore, we outline the current challenges and prospects of liquid crystal OPAs in laser communication.

Key words laser communication; optical phased array; liquid crystal; spatial light modulator

1 引言

随着科技的不断进步, 激光通信技术由于其大带宽、高速率、高安全性等特点, 迅速发展并成为通信领域的一项重要技术。其中, 波束指向器作为激光通信系统的重要组成部分之一, 受到了众多研究者的关注。传统的波束指向器通常依赖机械手段(机械转台+固定透镜), 采用步进电机带动机械透镜机构来实现光束的定向传输。在实现稳定的信号发射和接收的同时, 机械式系统结构的体积大、质量轻、能耗高、振动强等缺陷, 使得其在激光通信系统中的集成化应用受到较大的限制, 影响激光通信系统的整体性能^[1-2]。

光学相控阵(OPA)技术是非机械式波束指向器的核心技术。基于独立的移相单元对波束进行像素级调控, 实现非机械的高精度波束赋形。光学相控阵的体积小、质量轻、功耗低等优点也使它在空间激光通信领域有极大的应用前景^[3-5]。目前, 光学相控阵的方案主要有电光晶体相控阵^[6]、片上波导相控阵^[7]、纳米光子集成(NPA)^[8-9]、多量子阱(MQWs)^[10-11]、微机电系统(MEMs)^[12-13]和液晶光学相控阵(LCOPA)^[14-16]等。液晶光学相控阵基于液晶材料的双折射效应对激光进行调制。液晶是一种同时具备液体的流动性和晶体各向异性的材料, 其分子的转动状态可以随外加势场的变化而变化, 可以实现对激光的动态调控。得益于液

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-01-30; 录用日期: 2024-01-31; 网络首发日期: 2024-02-05

基金项目: 广东省重点领域研发项目(2019B010158001)、国家自然科学基金(62171082)

通信作者: *xiangruwang@uestc.edu.cn

晶材料的特性,与其他技术方案相比,液晶光学相控阵具备诸多的工程应用优势,如:低电压芯片驱动、百万像素阵列设计、大口径有效调制、快速液晶材料响应、宽光学波段工作、超低功耗、超小体积和质量等。液晶光学相控阵是激光通信系统中非机械式波束指向器的重要方案之一。

从系统光路的设计角度分类,液晶光学相控阵分为片上相控阵和空间光相控阵。片上光学相控阵是将液晶材料集成在面内硅光子通道中,作为移相区域介质对片内激光进行调制。由于其器件设计复杂,制造成本高,只能实现小面积功能器件,目前多应用于增强现实/虚拟现实(AR/VR)领域^[17]。空间光学相控阵又分为反射式和透射式液晶光学相控阵。反射式液晶光学相控阵常采用硅基板集成方式,能达到像素级分辨率和较快的波束切换时间,但系统光路构建较为复杂,且偏转角度较小,不能满足激光通信的角度需求,常用于矢量光束生成和全息显示等领域^[18]。透射式液晶光学相控阵将液晶材料封装在透明基底与透明导电膜之间,对激光的透射波前进行空间相位调制,使其发生偏转。透射式液晶光学相控阵可采用插拔式结构与激光系统适配,是目前激光通信系统中波束指向器的有效

手段。

本文首先介绍了液晶光学相控阵实现波束偏转控制的基本原理,其次根据激光通信系统对液晶光学相控阵的要求进行概述,包括大口径、大角度、快速响应波束指向技术、多波束生成技术、耐受功率阈值提升和效率提升方案。最后,指出目前液晶光学相控阵所面临的挑战,并进行归纳总结。液晶空间光学相控阵的深入研究推动其在通信领域的更深层次应用,使其成为激光通信领域的核心光学器件,为光通信技术带来更为创新和可持续的发展。

2 液晶空间光学相控阵基本原理

液晶光学相控阵的光束偏转模型如图 1^[19]所示,具备平面波前的入射激光,经过相控阵的调制后,附加了楔形近场相位,导致其远场波束偏离中心,形成波束偏转。如图 1 中的器件结构所示,液晶被封装在氧化铟锡(ITO)玻璃之间,其中一侧 ITO 电极经刻蚀形成周期性电极,另一侧为公共地极。通过使用驱动芯片给每个 ITO 电极加载不同的电压,来控制每个区域中液晶分子的排列状态,利用液晶材料的电控双折射特性形成楔形相位分布,实现对入射激光光束的控制。

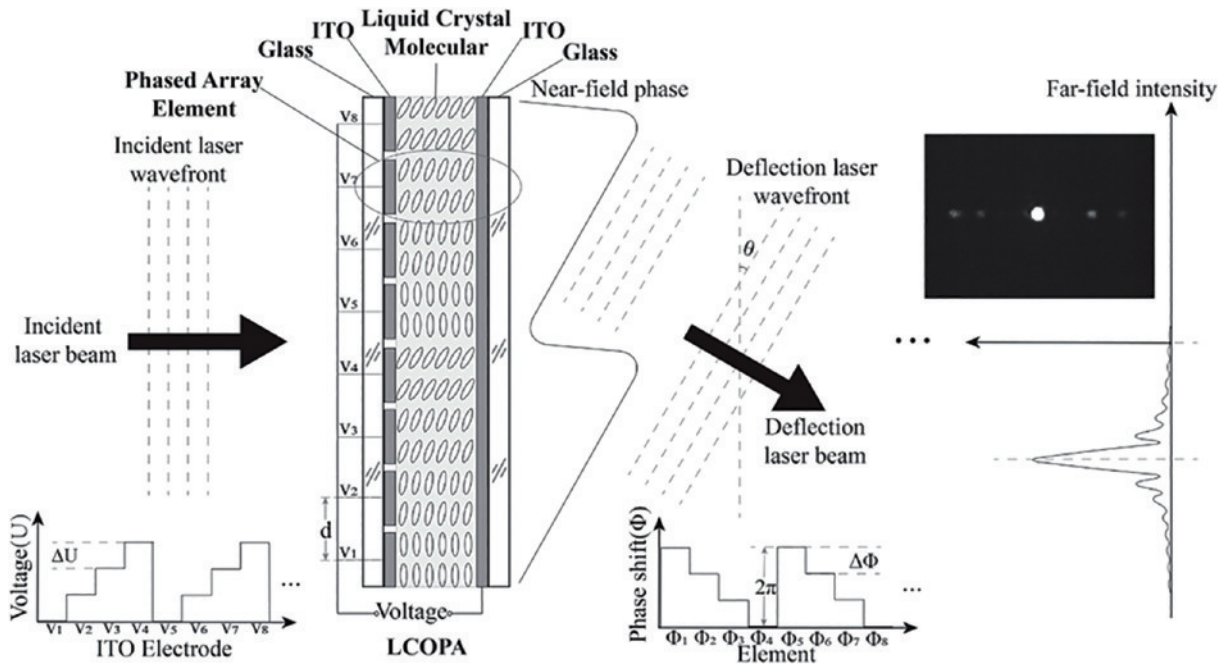


图 1 液晶光学相控阵光束偏转模型图^[19]

Fig. 1 Diagram of LCOPA beam deflection model^[19]

在不考虑干扰的情况下,液晶光学相控阵远场的光强分布与近场的相位满足夫琅禾费衍射条件,可以表示为

$$E_{\text{far}} = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(\frac{ikx^2}{2z}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\text{near}}(\xi) \exp(-i2\pi f_x \xi) d\xi, \quad (1)$$

式中: E_{far} 是远场电场分布; E_{near} 是近场电场分布;

$\frac{\exp(ikz)}{i\lambda z}$ 是一个复常数; $\exp\left(\frac{ikx^2}{2z}\right)$ 是一个常数相位因子。由此可知,远场的复振幅是近场复振幅的傅里叶变换。在实际数值计算中,对近场进行离散化,则可以使用快速傅里叶变换(FFT)对远场进行数值计算,得到远场分布。

从驱动控制的角度来看,液晶光学相控阵对近场

相位分布的调制主要有两种模型:周期性闪耀光栅模型和非周期光栅模型。周期性闪耀光栅模型的原理是通过改变一个周期内的电极数量来改变近场相位分布,从而实现在不同角度的偏转。采用周期性闪耀光栅模型调制相位分布时,其近场相位分布为

$$\phi(x) = \left[\sum_{n=1}^N \delta(x - nd) \exp(-j \cdot n \cdot \Delta\phi) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{d}\right) \otimes \sum_{m=1}^M \delta(x - mT) \right], \quad (2)$$

式中: d 为相邻电极间的间距; T 为光栅周期,一个周期

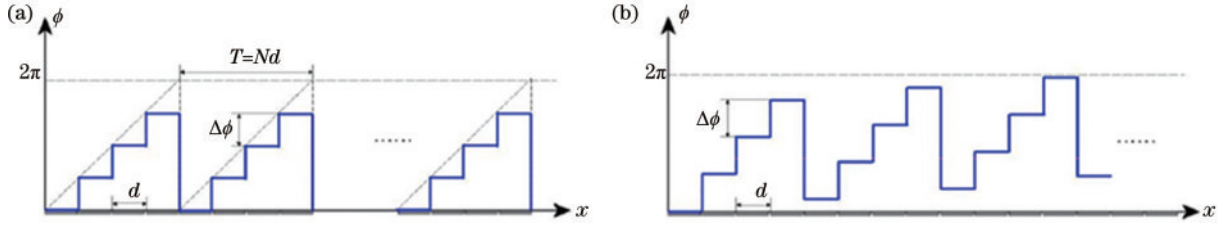


图 2 两种调制模型的相位分布。(a)周期性闪耀光栅相位分布;(b)非周期光栅相位分布

Fig. 2 Phase distribution of two modulation models. (a) Distribution of periodic blazed phase grating; (b) distribution of non-periodic phase grating

非周期光栅模型的原理是通过改变相邻电极间的相位差来改变近场相位分布,且当电极上的相移量超过 2π 时进行置位。采用非周期光栅模型得到的近场相位分布为

$$\phi(x) = \left[\sum_{m=0}^{M-1} \delta(x - md) \exp[j \cdot \text{rem}(m \cdot \Delta\phi, 2\pi)] \right] \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{d}\right), \quad (3)$$

式中: $\text{rem}()$ 为取余函数, $\text{rem}(m \cdot \Delta\phi, 2\pi)$ 表示对器件的相位进行 2π 置位。其理想相位分布如图 2(b)所示。

该方法的偏转角度 $\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\phi}{k_0 d}\right)$, k_0 为真空波数, d 在特定器件中为定值,因此偏转角度只与相邻电极之间的相位差有关系。由于相邻电极的相位差 $\Delta\phi$ 理想情况下可以取任意值,采用非周期光栅模型可以实现波束的连续扫描。

3 大口径液晶光学相控阵的研究进展

通光口径是影响液晶光学相控阵工作距离的重要参数。在自由空间光通信中,当光束在卫星中传输数千米时,较大的激光发散角会导致传输损耗增加从而限制通信距离。由于激光发散角与通光口径成反比,为了缩小激光发散角以减少传输损耗,需要更大口径的液晶光学相控阵。目前液晶光学相控阵可以通过口径拼接的方式来增加口径,如图 3(a)所示,在保证电极占空比的同时,通过增加驱动芯片的数量和空间拼接来增大口径,口径可达 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ^[20]。但口径的拼接会导致驱动芯片数量过多,当口径过大时,会出

现无法排布的问题。受限于驱动芯片的电极数和数据处理、传输能力,目前实现大口径的方案还有 PAPA (phased array of phased array) 结构^[21-22]与相干光束组合方案^[23-24]。

2004 年, Rockwell Scientific 公司提出 PAPA 结构,仅使用 1064 个数据通道实现了 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的有效通光口径,且扫描精度为 $20 \mu\text{rad}$ ^[21]。该结构采用两个不同的相控阵器件(OPA)进行级联,器件之间的对准难度较大,且需要复杂的半导体加工工艺。2018 年,电子科技大学卓儒盛^[25]基于传统的 PAPA 结构,提出了 PA-in-PA 结构大口径相控阵方法,在单个器件上实现 PAPA 结构。通过对 COM 电极进行分区域驱动,使用 2000 个数据通道,单个子孔径达到了 10 mm,器件总口径达到了 100 mm。研究显示:在此大口径器件结构设置下,当指向角度在 $-6^\circ \sim 6^\circ$ 范围内时,衍射效率大于 48%;当指向角度在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 范围内时,衍射效率大于 80%。

2007 年, Raytheon 公司在自适应光电锁相元件 (APPLE) 项目中提出了相干合束技术^[26]。采用 7 个口径为 30 mm 的独立子孔径相控阵合成为一个大口径光学相控阵。在后续的 FLASH 计划中,子孔径数目增加到 21 个,合成口径达到 200 mm 以上。但是相干合束技术对激光的时间及空间相干性要求很高,且需要高速闭环光学锁相技术。2019 年,电子科技大学 He 等^[27]提出了一种孔径可扩展的液晶光学复制相控阵(LC-ODAPA)的光学结构。采用该结构能在扩展口径的同时,几乎不增加驱动矩阵的数量。通过构建一维实验装置,实现了对原光学孔径 2 倍、3 倍及 4 倍

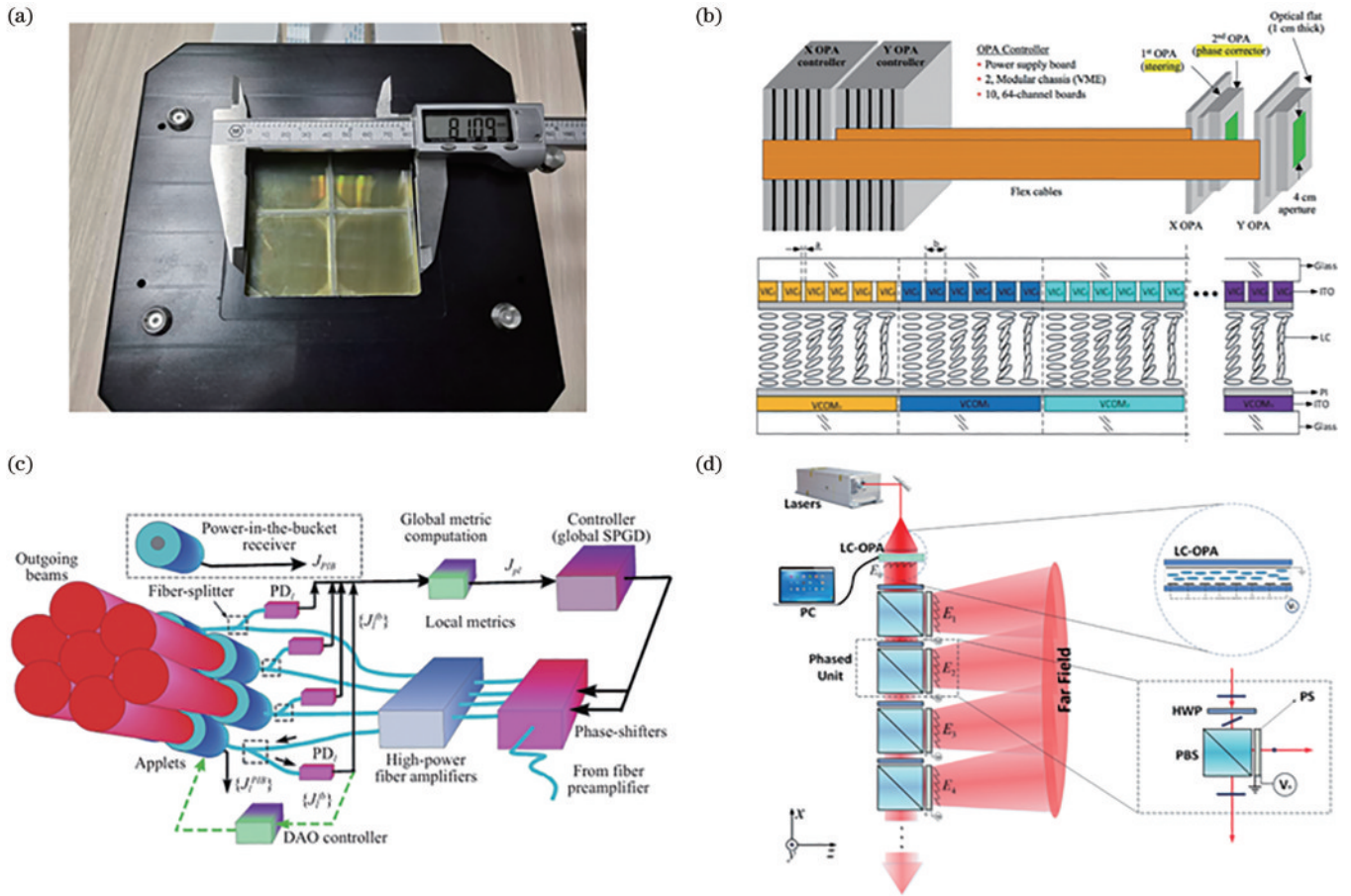


图 3 大口径 LCOPA 实现方法。(a) 拼接完成的 80 mm×80 mm 口径的液晶光学相控阵器件示意图^[20]；(b) PAPA(上)和 PA-in-PA(下)结构示意图^[21,25]；(c) 相干合束技术示意图^[26]；(d) 孔径可扩展的液晶相控阵光学结构示意图^[27]
 Fig. 3 Large aperture LCOPA realization methods. (a) Schematic diagram of a LCOPA device with aperture of 80 mm×80 mm^[20]；(b) schematic diagram of PAPA (upper) and PA-in-PA (lower)^[21,25]；(c) schematic diagram of coherent beam combining technology^[26]；(d) schematic diagram of liquid crystal optically duplicated array of phased array^[27]

的扩展,且主瓣的发散角比原发散角窄,远场的能量更集中。当偏转角在 0~15.5 mrad 范围内时,偏转误差的相对标准差为 0.025。

4 大角度液晶光学相控阵技术

波束指向范围是液晶光学相控阵在光通信领域应用发展的瓶颈之一。相较于更成熟的微波相控阵,光学相控阵的指向范围还相距甚远,但是系统对其的需求日益增长。因此液晶光学相控阵在实现更宽的波束指向范围上仍需要更多技术途径。根据液晶光学相控阵的指向角度公式 $\sin \theta = \Delta \phi / k_0 \Delta$,其波束指向范围受限于其电极周期宽度 Δ ,电极宽度要达到波长量级在制备工艺上是一个很大的难题。目前,研究人员提出级联方案,利用大角度的偏转器件(液晶偏振光栅)形成离散的角度点阵,小角度的连续偏转器件(液晶光学相控阵)对点阵进行填充,完成整个视场的扫描^[28]。液晶偏振光栅(LCPG)是通过调制偏振光的 PB (Pancharatnam-Berry) 相位来产生相位差实现角度偏转^[28-29]。LCPG 的工作原理如图 4(a)所示,将液晶分子以周期性排列的方式聚合在玻璃基底上,扫描角度

是固定的,单个器件的偏转效率大于 99%。LCPG 需要与可调的液晶波片级联,实现正负大角度的切换,如图 4(b)所示,沿着最下面一条光线看,液晶半波片将入射左旋圆偏振光切换为右旋圆偏振光,LCPG 将右旋光偏向右边时,偏振态变为左旋圆偏振,再经过一个半波片后偏振态切换为右旋圆偏振,LCPG 继续将光向右偏转,完成级联角度向右叠加。在系统中加入液晶光学相控阵,即可实现连续角度扫描,完整的级联系统如图 4(c)所示。

角度级联方案最先是由北卡罗来纳州立大学的研究团队提出。2008 年,该团队设计了多个液晶偏振光栅与液晶电控波片级联的大角度非机械式光束偏转技术,实现了分辨率为 1.25°、角度范围为 ±30°的大角度光束偏转,预计这种偏转方式最高透过率可达 87%^[28]。对于级联系统来说,当获取更大角度时就需要更多的级联器件,导致系统的损耗增加。需要平衡系统损耗与大角度偏转两个指标。美国 Meadowlark 公司通过使用光学胶水对级联系统进行折射率匹配,单个 LCPG 与可调的液晶波片级联组合效率可达 90%^[18,30]。2010 年 Kim 等^[31]设计了一个准三进制的级

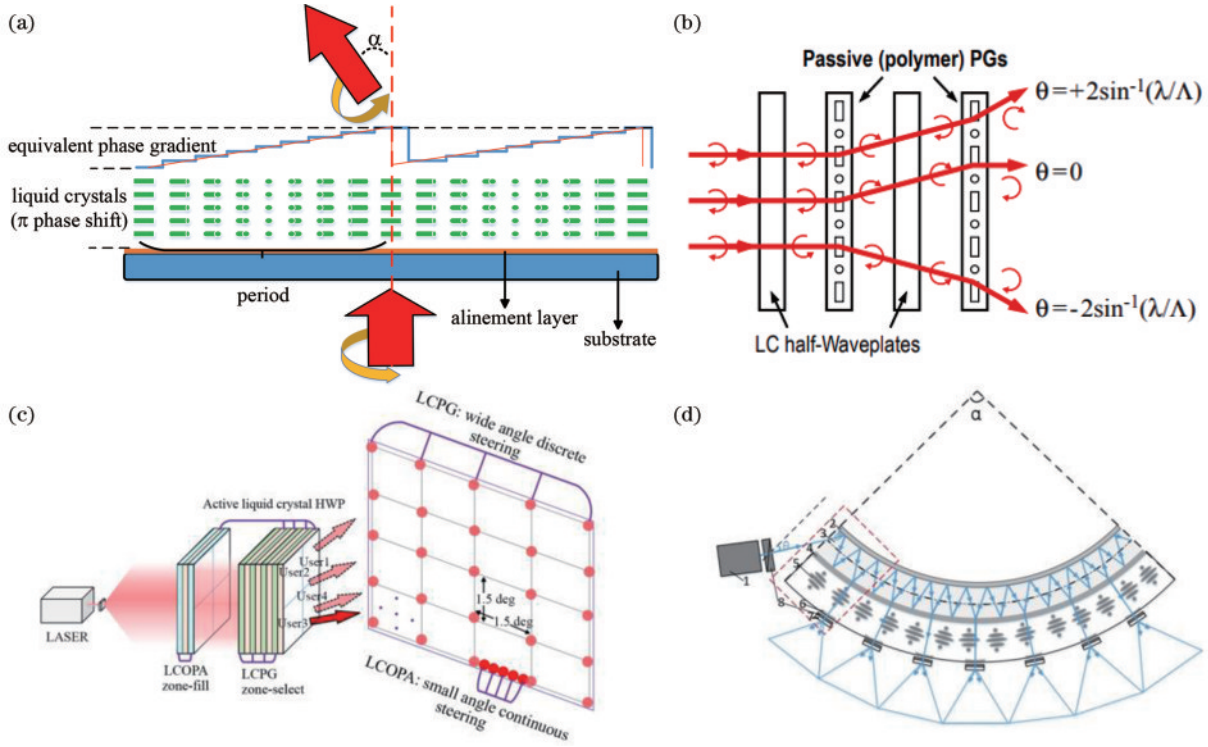


图 4 大角度 LCOPA 方案。(a) LCPG 工作原理示意图^[33]；(b) LCPG 与可调液晶波片级联,实现正负大角度的切换示意图^[28]；(c) 大角度级联系统示意图^[20]；(d) 共形相控阵波束指向范围拓展方法^[33]

Fig. 4 Wide-angle LCOPA methods. (a) Schematic diagram of the working principle of LCPG^[33]; (b) schematic diagram of LCPG cascaded with liquid crystal waveplates to realize large angle switching^[28]; (c) schematic diagram of large angle cascade system^[20]; (d) conformal phased array method to realize the beam steering range expansion^[33]

联方案,使用单个波片和 N 个偏振光栅来实现 $2(N+1)-1$ 个偏转角。由于使用了更少的器件,减少了吸收和菲涅耳反射造成的损耗,从而提高了整体偏转效率。在 1550 nm 波长的激光下,实现了分辨率为 1.7° ,最大偏转角为 52° ,一共 31 个角度的光束偏转,偏转效率约为 80% ^[32]。

目前,国内电子科技大学梁知清^[33]也提出了数字级联方案的视场范围拓展方法。采用多个液晶偏振光栅级联,实现区域选择的功能;液晶光学相控阵则用于小角度连续扫描,进行区域填充。使用偏转角为 0.75° 倍数的四级 LCPG 与偏转范围为 $\pm 0.75^\circ$ 的 LCOPA 级联,实现了 24° 视场的动态扫描,偏转精度为 $20 \mu\text{rad}$,响应时间为 20ms 量级。除了系统损耗,受限 LCPG 曝光工艺技术和折射率匹配工艺技术,级联方案的波前均匀性会随着器件口径的增大而降低。大角度与大口径在波前均匀性的限制下需要平衡。

平面天线理论中的拉格朗日不变量是制约目前光学相控阵指向范围的科学本质。突破平面阵列天线结构、采用共形结构是实现宽指向范围天线相控阵的重要思路。将传统相控阵技术中的平面阵列排布方式升级为立体曲面的阵列排布方式,可以从根本上突破拉格朗日常数的理论模型限制。电子科技大学的研究团队提出一种共形相控阵波束指向范围拓展方法,由共

形光传输层、胆甾相液晶器件和液晶光学相控阵组成,如图 4(d) 所示。光传输器件可以根据载物台的任意形状设计。视场被分为若干区域,弯曲光传输层器件实现光束的共形传输,胆甾相液晶器件利用布拉格反射效应作为区域选择开关,共同完成大角度离散作用,即区域选择功能;液晶光学相控阵完成离散区域之间的连续角度填充^[33]。使用 632.8nm 的激光以 10° 入射角入射器件,设计了四个区域选择域,将单个 OPA 1.5° 的视场范围拓展到了 5.1° 。

5 快速响应液晶光学相控阵技术

液晶光学相控阵的响应时间受到液晶材料的黏滞系数和弛豫特性的影响,难以满足迅速发展的激光通信技术对快速光束控制的需求。为了实现液晶器件快速响应、解决激光通信的快速建链需求,研究人员从多个方向展开了大量的研究工作。一般来说,液晶器件的响应时间与液晶盒厚度 h 、液晶材料的黏度 η 、液晶的弹性系数 k 和驱动电压 V 有关: $\tau_{\text{on}} = \frac{\eta h^2}{\Delta \epsilon V^2 - \pi^2 k}$, $\tau_{\text{off}} = \frac{\eta h^2}{\pi^2 k}$ 。所以,可以选择黏度系数较小的液晶材料或者调整液晶材料的配比从而降低液晶黏度,进而减小液晶的上升与下降时间。同时,降低液晶盒厚度与增大液晶材料的弹性系数也将大大缩短液晶的上升与下降时间。对于液晶的上升时间而言,增加

液晶的驱动电压也能起到缩短液晶上升时间的作用。但是,增加液晶的驱动电压会给液晶的驱动电路控制器增加难度,导致驱动电路太复杂。目前提升液晶响应速度的主要方法有:过驱动技术、改进液晶材料以及减少液晶盒厚。

过驱动技术是通过给液晶器件加载大于需求电压的过驱动电压,达到需求的相位后再切回其对应的电压,从而缩短液晶器件响应时间的方法。2006年,Xun等^[34]采用过驱动技术,使相移量为 3.5π 的空间光

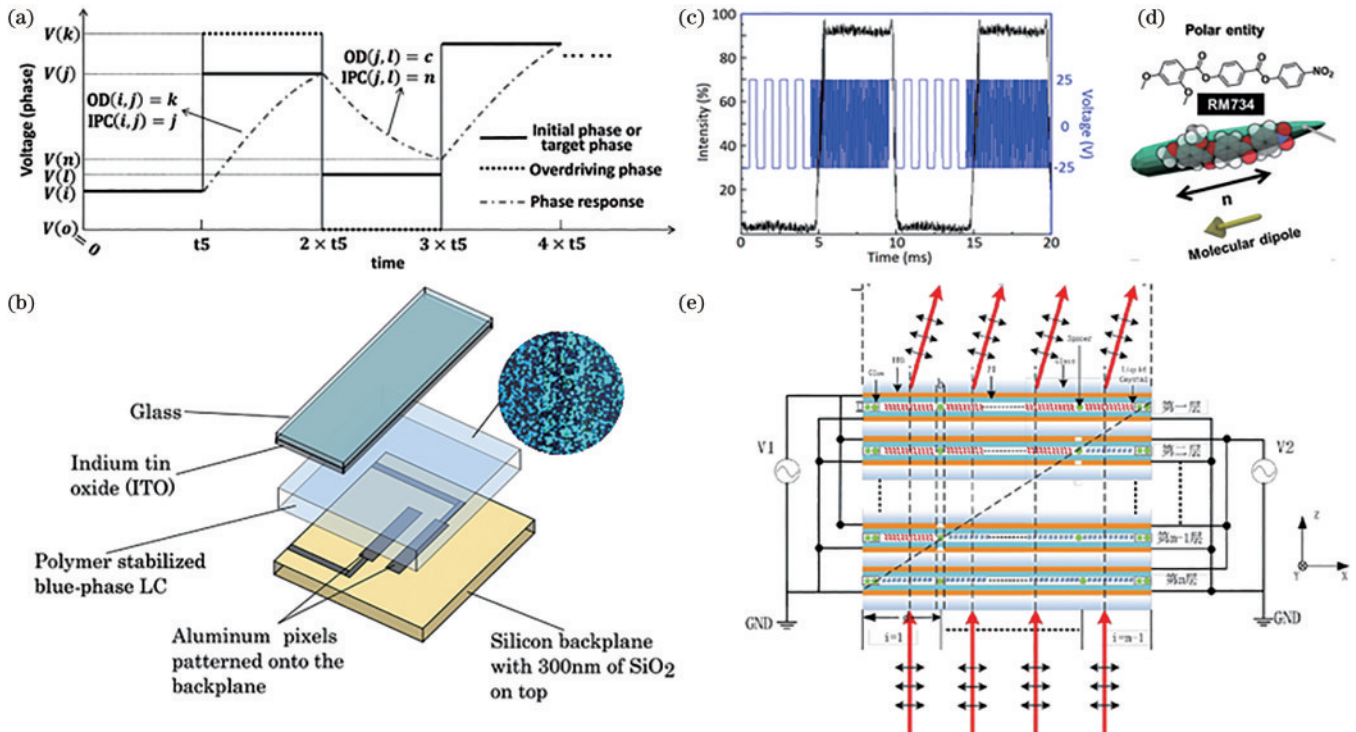


图5 快速响应方案。(a) 过驱动技术减少响应时间示意图^[34];(b) 快速响应蓝相液晶器件结构示意图^[44];(c) 双频液晶偏振光栅测试结果图^[51];(d) 铁电向列相液晶(RM734)的分子结构图^[57];(e) 快速响应的层叠阵列液晶器件结构示意图^[60]
 Fig. 5 Fast response methods. (a) Schematic diagram of reduce response time by spiking voltages^[34]; (b) Schematic diagram of fast response blue phase liquid crystal device^[44]; (c) test result of a dual-frequency liquid crystal polarization grating^[51]; (d) molecular structure of ferroelectric nematic phase liquid crystal^[57]; (e) schematic diagram of fast response cascade array liquid crystal device^[60]

过驱动技术虽然能在一定程度上提高响应速度,但是难以实现亚毫秒量级的快速响应。改进液晶材料是实现亚毫秒量级响应速度的重要途径。目前受到关注有望用于相位调制的快速响应液晶材料包括聚合物网络液晶、蓝相液晶、铁电液晶、双频液晶以及铁电向列向液晶等。2004年,美国佛罗里达大学的Wu课题组^[38]设计了一种在1550 nm波段的均匀排列聚合物网络液晶光调制器,且通过优化聚合物的浓度降低了光散射。响应时间相较于E44液晶快250倍,但阈值电压提高了25倍。2011年他们提出了1064 nm波段的聚合物网络液晶移相器。在70 °C的情况下,下降时间达到117 μ s,上升时间为45 μ s,但工作电压从1.42 V提高到了90 V^[39-40]。2020年他们提出了一种用于红外空间光调制器的聚合物网络液晶,其弛豫时间为亚毫

调制器的响应时间由400 ms缩短到71~77 ms之间,如图5(a)所示。2012年,中国科学院长春光学精密机械研究所Hu等^[35]采用过驱动技术,提高了开环自适应光学系统中有源矩阵寻址液晶空间光调制器的响应速度。2017—2019年,中国科学院光电技术研究所郭弘扬等^[36-37]也对过驱动技术进行了一些研究,所有驱动过程使用现场可编程逻辑门阵列(FPGA)实现,在5 V的驱动电压下,将响应时间从500 ms左右缩短到了30 ms左右。

秒量级,并分析了其在不同浓度下的电光特性^[41]。

蓝相液晶最早于1888年被发现,但在很长一段时间里对其的研究较少,因为蓝相存在的温度范围很窄。2011年,美国佛罗里达大学的Wu课题组^[42-43]对拓宽蓝相液晶的工作温度进行了研究,提出了一种聚合物致稳技术,并利用该技术研制出了一种亚毫秒响应的可调液晶相位光栅。2014年,剑桥大学的Wilkinson课题组^[44]提出了一种聚合物稳定蓝相液晶连续相位调制器件,实现了亚毫秒的电光响应,并不改变入射光的偏振方向,器件结构和蓝相液晶显微镜图如图5(b)所示。

铁电液晶最早于1975年由物理学家Meyer等^[45]发现,这是一种具有螺旋结构以及自发极化特性的新型液晶材料,但要对其进行取向较为困难。2012年,香港科技大学的Srivastava等^[46]展示了一种基于铁电液晶

的快速可切换光栅,该器件的响应时间达到了 $20 \mu\text{s}$,同时具有 7000:1 的对比度及较高的衍射效率。2015 年,北京航空航天大学 Guo 等^[47]提出了铁电液晶器件中的反向双稳态效应,基于该效应制备的器件在 11 V 的低驱动电压下具有 $160 \mu\text{s}$ 的响应时间和 1000:1 的对比度。但铁电液晶只有两态,目前还无法实现连续角度扫描。

2006 年,美国佛罗里达大学的 Wu 团队^[48-49]提出了一种基于扭曲型双频液晶的亚毫秒响应速度的相位调制器,但其驱动电路设计复杂且制备工艺难度较大。同年,他们提出了一种基于双频液晶的近红外相位调制器,响应时间为 0.5 ms 左右^[50]。2016 年,南京大学的 Duan 等^[51]设计了一种双频液晶偏振光栅,开关的响应时间分别为 $300 \mu\text{s}$ 和 $500 \mu\text{s}$,响应时间结果图如图 5(c) 所示。2019 年他们提出了一种使用双频液晶的透镜,其在聚焦状态与非聚焦状态的切换时间在亚毫秒量级^[52]。

铁电向列相液晶是一种新兴的液晶材料,其具有低驱动电压、亚毫秒量级响应速度以及非线性光学响应等优点,引起了广泛的关注。铁电向列相液晶(RM734)的分子结构如图 5(d) 所示,具有极强的自发极化和可重新定向的局部极化特性,可在低驱动电压下实现亚毫秒的电光响应^[53-56]。2022 年,华南理工大学的谢晓晨、黄明俊课题组^[57]合成了一种新型铁电向列相液晶,其能在室温下稳定存在。2021 年 Saha 等^[58]提出了一种新的高极性铁电向列相液晶分子 RT11001,该分子具有 NF、NhF、colhF 三种铁电态。2023 年,电子科技大学的研究团队研究铁电向列相液

晶的取向工艺以及驱动方法,制备了铁电向列相液晶移相器,实现了 0.91π 的相移量以及亚毫秒的响应速度^[59],该种液晶材料有望实现具备连续扫描功能的亚毫秒液晶光学相控阵。

根据响应时间公式,通过降低液晶盒厚可显著缩短响应时间,但降低盒厚同时会导致相移量的减少,因此如何在降低盒厚的同时保证液晶器件的相移量是一个问题。2020 年,电子科技大学研究团队提出了一种液晶激光转向器结构,通过降低单层液晶盒厚来缩短响应时间,同时采用相位叠加的方式保证器件整体的相位调制深度,如图 5(e) 所示。该器件的响应时间在 1~3 ms 之间^[60]。基于此,2023 年电子科技大学李鸣凤^[59]提出了二维的层叠阵列液晶器件,该器件最大偏转角为 $40 \mu\text{rad}$,最小分辨角度为 $2 \mu\text{rad}$,响应时间为亚毫秒量级,最快可达到 $300 \mu\text{s}$ 。

6 任意多波束生成技术

自由空间光通信正从点对点的模式向构建激光通信网络方向发展。为了实现多颗卫星间激光通信组网,发射接收终端需要具备一对多、多对多的激光传输能力,因此对光学相控阵提出了任意多波束生成的要求。研究人员已针对透射式液晶光学相控阵产生多波束提出了多种方法^[61],包括偏振分束技术、子孔径方法、全息法等。偏振分束技术通过级联多个液晶光学相控阵和电控波片,通过电控波片对光束偏振态进行调制,实现了双波束的二维扫描^[62],如图 6(a) 所示。但该方案级联的器件较多,会引入较大的插入损耗和偏振损耗,导致系统衍射效率低。

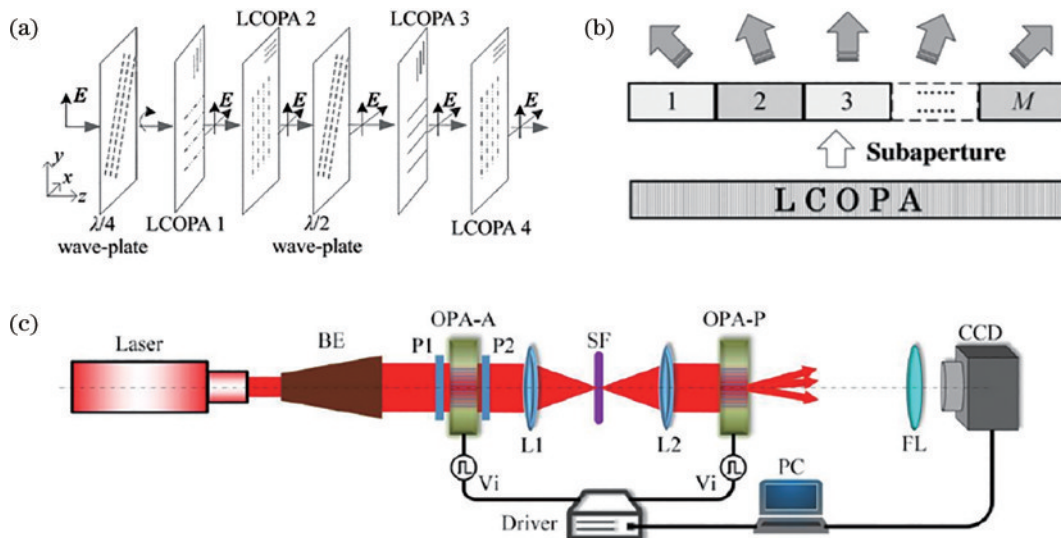


图 6 任意多波束形成方法。(a)偏振分束技术^[62];(b)子孔径方法示意图^[64];(c)幅相级联法^[67]

Fig. 6 Arbitrary multiple beam forming methods. (a) Polarization beam splitter method^[62]; (b) sub-aperture method^[64]; (c) cascaded method of amplitude modulating and phase modulating^[67]

子孔径方法是将单片液晶光学相控阵划分为若干个独立可控的子孔径区域,分别调控各子孔径的相位以实现多波束。2012 年电子科技大学的 Pan 等^[63]提出

的基于一维液晶光学相控阵的双光束偏转模型就属于子孔径方法。他们分析了不同因素对该模型远场衍射性能的影响并提出了一种相位迭代算法。2017 年,电

子科技大学的 Xiao 等^[64]采用子孔径方法,可以生成的波束数量与子孔径的数量相同,如图 6(b)所示。全息法是通过将目标远场情况进行傅里叶逆变换得到近场相位全息图,再将其加载到液晶光学相控阵上来实现多波束。2000 年,Ge 等^[65]使用 120×128 的纯相位空间光调制器与快速衍射光学设计算法实现了在远场生成任意图案。2007 年,Leonardo 等^[66]提出了一种新的相位全息图生成算法,该算法能实现几乎完美的效率和均匀性。

2020 年,电子科技大学的研究团队提出了幅相级联法(CAP)来生成多波束^[67]。如图 6(c)所示,该方法将两个液晶光学相控阵器件进行级联,第一个器件对振幅进行调制,然后通过一个 $4f$ 成像系统成像到第二个器件再对相位进行调制,最终得到生成多波束所需的近场分布。2023 年,该团队基于反射型幅相级联法,构建了二维多波束生成系统,能够实现快速的任意多波束生成,提升了对任意波束的角度、功率、发散角度的独立多参数可控^[68]。

7 波束控制偏转效率提升

在自由空间激光通信中,激光经过液晶光学相控阵后的波束性能决定了系统对激光能量的利用率,从而影响到跟踪稳定性和通信误码率等关键指标。相控阵的波束性能由于受到回程区、工艺误差、电压量化精度等因素影响而恶化,使得相控阵器件按照理论公式计算的电压对应实际波束性能与理论差距很大。一方面,制作工艺客观条件的限制使得实际参数出现误差,例如液晶相控阵的液晶厚度与设计不符,同时液晶器件不同位置的液晶厚度也存在差距,这会导致不同阵元工作时表现出错误的相位,降低波束效率,又如器件封装中上下图案对齐存在一定程度距离错位导致旁瓣增大;另一方面,由于光学相控阵的电极阵元之间的距离为微米级,电极之间存在电或热耦合效应。而要得到优秀的波束性能,目前的研究主要可以分为两种方法,第一种是优化液晶光学相控阵器件的阵元设计,第二种是通过算法优化液晶光学相控阵的控制数据。

2001 年,Ye 等^[69]提出了一种遗传算法来实现用于激光光束整形的衍射光学元件的优化设计。2005 年,Khodier 等^[70]提出使用粒子群优化算法来得到具有最小旁瓣电平的线阵图形,实现了用粒子群优化算法来求解相控阵阵元最佳位置。2019 年,Liu 等^[71]提出了一种多智能体遗传算法用于设计稀疏阵光学相控阵,抑制远场衍射图中的峰值旁瓣比。优化后的 128 通道稀疏阵列可实现 $\pm 60^\circ$ 的波束控制范围,峰值旁瓣比为 -16.21 dB。基于器件阵元设计的波束性能优化方法虽然有效,但是大多为针对特定器件进行的优化,不具有普适性。

而通过特定的优化算法,在控制系统中实现波束性能优化则更能适用于各种情况。2003 年,Haellstig

等^[72]提出了液晶光学相控阵的边缘效应模型,通过放大相位置位区的电压并利用高斯核卷积迭代的方法增加了扫描范围并提高了效率。同年,Harris^[73]提出利用切比雪夫多项式来重建电压与相位的关系,通过对电压的迭代提高了衍射效率。2007 年 Liu 等^[74]研究了一种基于锐度性能指标直接优化的新型自适应光学系统,并且基于图像的锐度信息和随机并行梯度下降(SPGD)算法对波前相位恶化进行了优化。2017 年电子科技大学的 Xiao 等^[75]提出了一种提高液晶光学相控阵波束指向效率的快速搜索算法,验证了其相较于模式搜索法在优化速度上的提升。2018 年,Paine 等^[76]证明了在存在模拟噪声的情况下,训练的卷积神经网络在相控阵阵元较多的情况下可以比自适应优化算法随机优化更快。2021 年 Shpakovych 等^[77]提出了一种新的相干激光光束阵列的相位控制方案。通过光束的散射模式的稀疏强度检测的反馈回路训练神经网络,用于推导应用于移相器的相位校正。2023 年,电子科技大学的研究团队提出了一种通用的光束偏转效率自适应优化算法,该算法通过降低解空间的维度,极大地提高了优化迭代的收敛速度。

8 结束语

液晶光学相控阵在激光通信系统中的角色是至关重要的,但也面临着挑战。从液晶材料的混配来看,目前相控阵所使用的液晶材料均为热致液晶,液晶材料是由多种有机物混配而成的,其性质随着温度的变化而变化,提高材料的温度稳定性是一大挑战。液晶材料的混配会影响其黏度和弹性系数,从而影响相控阵的响应时间。另一方面,液晶材料的双折射系数与其混配的有机物种类有关,综合考虑多个参数混配出完美的液晶材料是一大挑战。

从器件设计的角度来看,液晶光学相控阵的波束指向范围与其电极周期宽度 Λ 成反比,但电极周期宽度的减小需要工艺技术的提升,目前要达到波长量级在制备工艺上是一个很大的难题。另一方面,通过减小电极周期宽度来增大角度,会导致器件口径减小。若要维持口径不变就需要更多的电极数,这也带来更多的控制芯片需求量和待处理数据量,波束控制算法的难度也大大增加。因此,目前液晶光学相控阵的波束指向范围的扩大主要通过器件级联解决,在保证单个器件是小电极周期的同时,满足大口径的要求。但器件级联的个数越多,系统的插损越大,会大大影响通信效果,如何实现满足通信需求的级联波前和透过率是一大难题。并且,由于所级联的大角度器件是固定角度器件,目前的级联系统无法实现任意多波束生成,这也需要从系统设计、波控算法等角度进行突破。此外,液晶光学相控阵的波束控制效率是制约其在激光通信系统应用的关键问题。虽然目前已经提出多种效率提升的优化算法,但其效果还有很大的优化空间,需

要从液晶光学相控阵的材料、结构、控制和系统等多个方向进行综合性突破。

目前,液晶光学相控阵的各个技术指标已经有较大的突破,具备较大的口径、较大的波束指向角度和多波束生成能力。随着技术的不断成熟,液晶光学相控阵技术发展的主要趋势是更快的波束指向速度和更高的波束指向效率,尤其是兼顾各个技术指标的同时提升综合性能,其在激光通信波束指向领域将会迎来更为广泛的应用。这种无机械、像素级波束调控的技术优势将不仅仅局限于激光通信,在其他领域也发挥着独特的作用,例如光学传感、全息显示和激光雷达等。

参 考 文 献

- [1] McManamon P F, Watson E A, Dorschner T A, et al. Nonmechanical beam steering for active and passive sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1969: 2-10.
- [2] McManamon P F. Agile nonmechanical beam steering[J]. Optics & Photonics News, 2006, 17(3): 24-29.
- [3] McManamon P F, Watson E A. Optical beam steering using phased array technology[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3131: 90-98.
- [4] Serati S, Hariman J. Spatial light modulator considerations for beam control in optical manipulation applications[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6326: 63262W.
- [5] Linnenberger A, Serati S, Stockley J. Advances in optical phased array technology[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6304: 63040T.
- [6] 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.
- [7] Vasey F, Reinhart F K, Houdré R, et al. Spatial optical beam steering with an AlGaAs integrated phased array [J]. Applied Optics, 1993, 32(18): 3220-3232.
- [8] Sun C M, Yang L S, Li B H, et al. Parallel emitted silicon nitride nanophotonic phased arrays for two-dimensional beam steering[J]. Optics Letters, 2021, 46(22): 5699-5702.
- [9] Sun C M, Li B H, Shi W, et al. Large-scale and broadband silicon nitride optical phased arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2022, 28(6): 8200710.
- [10] Gilbreath G C, Rabinovich W S, Meehan T J, et al. Progress in development of multiple-quantum-well retro modulators for free-space data links[J]. Optical Engineering, 2003, 42(6): 1611-1617.
- [11] Piwonski T, Pulka J, Viktorov E A, et al. Refractive index dynamics of quantum dot based waveguide electroabsorbers[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(5): 051107.
- [12] Yoo B W, Megens M, Chan T, et al. Optical phased array using high contrast gratings for two dimensional beamforming and beamsteering[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12238-12248.
- [13] Wang Y M, Zhou G Y, Zhang X S, et al. 2D broadband beamsteering with large-scale MEMS optical phased array [J]. Optica, 2019, 6(5): 557-562.
- [14] McManamon P F, Ataei A. Progress and opportunities in the development of nonmechanical beam steering for electro-optical systems[J]. Optical Engineering, 2019, 58(12): 120901-120901.
- [15] 王琦, 高旭峰, 张大伟, 等. 液晶光学相控阵技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700007. Wang Q, Gao X F, Zhang D W, et al. Research progress in liquid crystal optical phased array technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1700007.
- [16] Guo H R, Wang X R, Li J, et al. Research review on the development of liquid crystal optical phased array device on the application of free space laser communication[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10841: 108410C.
- [17] Notaros M, Coletto A G, Raval M, et al. Integrated liquid-crystal-based variable-tap devices for visible-light amplitude modulation[J]. Optics Letters, 2024, 49(4): 1041-1044.
- [18] Escuti M J, Kim J, Oh C, et al. Beam steering devices including stacked liquid crystal polarization gratings and related methods of operation: US8982313[P]. 2015-03-17.
- [19] Huang Y W, Wang K Z, He X X, et al. Fast, closed-loop iterative system-on-chip of deflection efficiency enhancement for a liquid crystal optical phased array[J]. Applied Optics, 2022, 61(6): 1583-1592.
- [20] Liang Z Q, Huang Y W, He X X, et al. Four-access, 80 mm aperture all phase-controlled liquid crystal laser antenna[J]. Optical Engineering, 2022, 61(10): 105113.
- [21] Serati S, Masterson H, Linnenberger A. Beam combining using a phased array of phased arrays (PAPA) [C]//2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, March 6-13, 2004, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2004
- [22] 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.
- [23] Song Y, Kong L J, Chen J, et al. Improvement for the steering performance of liquid crystal phased array[J]. Optoelectronics Letters, 2009, 5(3): 177-181.
- [24] Wu L, Wang X R, Xiong C D, et al. Design and experimental demonstration on improved high order grating for wide angle beam steering of liquid crystal optical phased array[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10096: 100960Q.
- [25] 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. 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.
- [26] Vorontsov M. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wavefront control concept[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5895: 589501.

- [27] He X X, Wang X R, Wu L, et al. Aperture scalable liquid crystal optically duplicated array of phased array[J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 174-180.
- [28] Kim J, Oh C, Escuti M J, et al. Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7093: 709302.
- [29] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1984, 392(1802): 45-57.
- [30] Meadowlark Opics[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://www.meadowlark.com/bns-acquisition-information>.
- [31] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. High efficiency quasi-ternary design for nonmechanical beam-steering utilizing polarization gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7816: 78160G.
- [32] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. Demonstration of large-angle nonmechanical laser beam steering based on LC polymer polarization gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8052: 80520T.
- [33] 梁明清. 液晶光学相控阵波束指向范围的拓展方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Liang Z Q. Research on the expansion method of beam pointing range of liquid crystal optical phased array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
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.
- [37] 郭弘扬, 杜升平, 黄永梅, 等. 液晶空间光调制器过驱动方法的FPGA实现[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(7): 0722002.
Guo H Y, Du S P, Huang Y M, et al. FPGA implementation of the overdriving method of liquid crystal spatial light modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0722002.
- [38] Fan Y H, Lin Y H, Ren H W, et al. Fast-response and scattering-free polymer network liquid crystals for infrared light modulators[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(8): 1233-1235.
- [39] Sun J, Xianyu H Q, Chen Y, et al. Submillisecond-response polymer network liquid crystal phase modulators at 1.06- μm wavelength[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(2): 021106.
- [40] Sun J, Chen Y, Wu S T. Submillisecond-response and scattering-free infrared liquid crystal phase modulators[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20124-20129.
- [41] Li Y, Yang Z Y, Chen R, et al. Submillisecond-response polymer network liquid crystal phase modulators[J]. *Polymers*, 2020, 12(12): 2862.
- [42] Yan J, Wu S T. Polymer-stabilized blue phase liquid crystals: a tutorial[J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(8): 1527-1535.
- [43] Yan J, Li Y, Wu S T. High-efficiency and fast-response tunable phase grating using a blue phase liquid crystal[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1404-1406.
- [44] Hyman R M, Lorenz A, Morris S M, et al. Polarization-independent phase modulation using a blue-phase liquid crystal over silicon device[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): 6925-6929.
- [45] Meyer R B, Liebert L, Strzelecki L, et al. Ferroelectric liquid crystals[J]. *Journal De Physique Lettres*, 1975, 36(3): 69-71.
- [46] Srivastava A K, Hu W, Chigrinov V G, et al. Fast switchable grating based on orthogonal photo alignments of ferroelectric liquid crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(3): 031112.
- [47] Guo Q, Zhao X J, Zhao H J, et al. Reverse bistable effect in ferroelectric liquid crystal devices with ultra-fast switching at low driving voltage[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2413-2416.
- [48] Huang Y H, Wen C H, Wu S T. Polarization-independent and submillisecond response phase modulators using a 90° twisted dual-frequency liquid crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(2): 021103.
- [49] Ren H W, Lin Y H, Wu S T. Polarization-independent and fast-response phase modulators using double-layered liquid crystal gels[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(6): 061123.
- [50] Nie X Y, Wu T X, Lu Y Q, et al. Dual-frequency addressed infrared liquid crystal phase modulators with submillisecond response time[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2006, 454(1): 123-133.
- [51] Duan W, Chen P, Wei B Y, et al. Fast-response and high-efficiency optical switch based on dual-frequency liquid crystal polarization grating[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(2): 597-602.
- [52] Duan W, Chen P, Ge S J, et al. A fast-response and helicity-dependent lens enabled by micro-patterned dual-frequency liquid crystals[J]. *Crystals*, 2019, 9(2): 111.
- [53] Sebastián N, Cmok L, Mandle R J, et al. Ferroelectric-ferroelastic phase transition in a nematic liquid crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(3): 037801.
- [54] Chen X, Korblova E, Glaser M A, et al. Polar in-plane surface orientation of a ferroelectric nematic liquid crystal: Polar monodomains and twisted state electro-optics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(22): e2104092118.
- [55] Chen X, Korblova E, Dong D P, et al. First-principles experimental demonstration of ferroelectricity in a thermotropic nematic liquid crystal: Polar domains and striking electro-optics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(25): 14021-14031.
- [56] Lavrentovich O D. Ferroelectric nematic liquid crystal, a

- century in waiting[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(26): 14629-14631.
- [57] Zhao X H, Zhou J C, Li J X, et al. Spontaneous helielectric nematic liquid crystals: electric analog to helimagnets[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(42): e2111101118.
- [58] Saha R, Nepal P, Feng C R, et al. Multiple ferroelectric nematic phases of a highly polar liquid crystal compound [J]. Liquid Crystals, 2022, 49(13): 1784-1796.
- [59] 李鸣凤. 基于液晶移相体制的亚毫秒光束控制方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
Li M F. Research on submillisecond beam control method of liquid crystal phase shifting system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [60] 刘晓鹏. 基于液晶激光转向器和LCPG的级联光束控制方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Liu X P. Cascaded beam control method based on liquid crystal laser steering gear and LCPG[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [61] Luo H P, Sun C M, Li B H, et al. Multi-beams forming and steering based on optical phased array[C]//2023 IEEE 8th Optoelectronics Global Conference (OGC), September 5-8, 2023, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2023: 110-113.
- [62] 汪相如, 谭庆贵, 黄子强, 等. 液晶光学相控阵的双光束成形和2维扫描技术[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 631-635.
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.
- [63] Pan F, Kong L J, Yang X B, et al. Dual beam deflection of liquid crystal optical phased array[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(S2): S020502.
- [64] Xiao F, Kong L J. Optical multi-beam forming method based on a liquid crystal optical phased array[J]. Applied Optics, 2017, 56(36): 9854-9861.
- [65] Ge L, Duelli M, Cohn R W. Enumeration of illumination and scanning modes from real-time spatial light modulators[J]. Optics Express, 2000, 7(12): 403-416.
- [66] Leonardo R D, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1913-1922.
- [67] 吴亮. 液晶光学相控阵器件与波控方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Wu L. Research on liquid crystal optical phased array devices and beam-forming method[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [68] Zhuo R S, He X X, Wu L, et al. Reconfigurable multiple beams forming method based on liquid crystal on silicon[J]. Optics Laser Technology, 2023, 161: 109189.
- [69] Ye J Y, Yuan X C, Zhou G Y. Genetic algorithm for optimization design of diffractive optical elements in laser beam shaping[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4594: 118-127.
- [70] Khodier M M, Christodoulou C G. Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(8): 2674-2679.
- [71] Liu C X, Xu W H, Zhou L J, et al. Multi-agent genetic algorithm for sparse optical phased array optimization [C]//2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 2-5, 2019, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [72] Haellstig E, Stigwall J, Lindgren M, et al. Laser beam steering and tracking using a liquid crystal spatial light modulator[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5087: 13-23.
- [73] Harris S R. Numerical optimization of the performance of nematic liquid crystal optical phased arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5162: 157-171.
- [74] Liu J G, Li L, Hu X Q, et al. Wavefront error correction with stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6834: 683413.
- [75] 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.
- [76] Paine S W, Fienup J R. Machine learning for improved image-based wavefront sensing[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1235-1238.
- [77] Shpakovych M, Maulion G, Kermene V, et al. Experimental phase control of a 100 laser beam array with quasi-reinforcement learning of a neural network in an error reduction loop[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 12307-12318.