

文章编号: 1005-5630(2023)02-0075-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.002.010

液晶相控阵技术的研究进展

罗娜, 杨文皓, 王琦

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 液晶相控阵是一种基于液晶的电控可编程光学相控器件, 具有体积小、质量轻、功耗低和易于控制等优点。通过对入射光束相位的调制来精确控制波束转向, 不仅实现了器件的空间快速灵活扫描, 能够对运动中的目标进行自动跟踪、捕获和瞄准, 而且使系统集成度更高, 降低了制造成本, 可广泛应用于激光雷达和空间光通信等领域。总结了国内外对液晶相控阵技术的研究进展, 主要包括波束控制、系统分析建模和系统性能优化。同时也介绍了液晶相控阵在高能激光、空间光通信和激光雷达中的应用研究进展。

关键词: 液晶相控阵; 光束精确偏转; 高能激光; 空间光通信; 激光雷达

中图分类号: O 753.2 **文献标志码:** A

Research progress in liquid crystal phased array technology

LUO Na, YANG Wenhao, WANG Qi

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Liquid crystal phased array is a kind of electronically controlled programmable optical phased array device based on liquid crystal, which has the advantages of small size, light weight, low power consumption and easy control. The device can precisely control the beam steering by modulating the phase of the incident beam, which not only realizes the performance of fast and flexible the spatial scanning for automatically acquisition, tracking and aiming at the moving targets, but also improves the system integration, and reduces the manufacturing cost. Liquid crystal phased array can be widely used in the fields of radar and space optical communication and other fields. This paper summarizes the research progress and key technologies of liquid crystal phased array at home and abroad, mainly including beam control, system analysis and modeling, and system performance optimization. The application and research progress of liquid crystal phased array in high-energy laser, space optical communication and Lidar are also introduced.

Keywords: liquid crystal phased array; precise beam deflection; high power laser; space optical communication; lidar

收稿日期: 2022-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(61775140)

第一作者: 罗娜(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为液晶相控器件。E-mail: 203590544@stu.usst.edu.cn

通信作者: 王琦(1984—), 女, 副教授, 研究方向为微纳光学。E-mail: shelly3030@163.com

引 言

光束偏转技术是指控制光束在一定空间内进行精准的指向,因其具有灵巧、精准和保密性强等优势,在激光雷达、空间光通信、生物医学和军事等诸多领域有着广泛的应用背景^[1-5]。光束偏转是实现目标搜索、瞄准、跟踪、捕获和成像的重要技术环节,传统的光束偏转技术^[6-8]主要依靠机械转动装置实现光束指向控制。但是传统机械式光束偏转具有体积大、能耗高、系统复杂和不易控制等缺点。随着新型激光雷达和空间光通信技术的出现,对光束偏转技术的要求也越来越高,传统的机械式光束偏转技术已经不能满足现代技术的需求,因此许多新型光束偏转技术应运而生,主要包括微机械式光束偏转技术、声光光束偏转技术和电光光束偏转技术。

微机械式光束偏转技术通过微机电系统控制微小位移实现光束偏转,该技术虽然对机械式光束偏转技术进行了优化,但是存在结构复杂,能耗高的缺点;声光光束偏转技术是利用声光效应来构建成不同的光栅,使光束衍射到相应的角度来实现光束偏转的技术^[9],与微机械式光束偏转技术相比具有结构简单、驱动功率小和易操作等优点,但是偏转角度小,衍射效率低;电光光束偏转技术不同于微机械式和声光光束偏转技术,它是利用电光效应使介质折射率发生变化,从而对光束方向进行控制。液晶作为电光光束偏转技术的主要材料,其具有驱动电压低、相位调制深度大和损伤阈值高等优点^[10],更能满足新型激光雷达和空间光通信技术的需求。

本文从国内外的研究现状对液晶相控阵进展进行介绍,并对液晶相控阵关键技术的研究进行了总结,介绍了液晶相控阵在激光雷达、空间光通信和激光雷达中的应用。

1 液晶相控阵技术

液晶相控阵是以液晶为相位调制材料,结合电控可编程电极阵列的相控调制器件,每个电极和它所控制区域的液晶组成一个可控单元,当对每个可控单元施加不同驱动电压时,会使液晶分子的指向矢发生不同程度上的偏转,进而影响到

液晶分子的有效折射率,达到对该器件的光束进行相位调制,改变光束的出射方向,在指定的方向上产生远场干涉,实现光束偏转。其具备结构紧凑、体积小、重量轻和驱动电压低等优点,不仅可以提高激光光束指向的分辨率,精准空间扫描角度^[11],而且能够提供精确稳定的、快速捷变的光束偏转和波束赋形^[12]。在激光雷达、空间光通信和红外追踪等领域具有重要的研究应用价值。

1.1 国外研究现状

国外对于液晶相控阵的研究开始得比较早。1984年,美国的Raytheon公司就着手进行了研究,5年后,世界上第一个液晶相控阵器件问世,所使用的波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 。1991年,Raytheon公司又研制出了一个有效口径为 $4.3\ \text{cm}\times 4.1\ \text{cm}$,单元间距为 $1\ \mu\text{m}$ 的液晶相控阵,如图1(a)所示。1996年,Raytheon公司研制出了一种一维反射式液晶相控阵,该器件具有更高的衍射效率,有效口径为 $2\ \text{cm}\times 2\ \text{cm}$,有5000根电极,电极间距为 $2\ \mu\text{m}$,其使用波长为 $1.06\ \mu\text{m}$,可实现 $\pm 5^\circ$ 范围内的角度偏转。2000年,Rockwell Scientific公司研制出有效口径为 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$,相控单元宽 $10\ \mu\text{m}$,长 $5\ \text{mm}$,在有效空间内含有512根电极,工作波长为 $1.5\ \mu\text{m}$,可在 $\pm 1.5^\circ$ 范围内实现连续偏转的液晶相控器件,如图1(b)所示^[13]。结合大角度偏转装置,能够实现 $\pm 20^\circ$ 范围内的连续角度偏转,制成的样机如图1(c)所示^[13]。2001年,美国的BNS公司推出首个基于LCoS(Liquid Crystal on Silicon)的一维反射式液晶相控阵^[14],如图1(e)所示,此器件有效口径为 $0.74\ \text{cm}\times 0.74\ \text{cm}$,电极宽度 $1\ \mu\text{m}$,电极间距 $0.8\ \mu\text{m}$,具有4086个可控单元,驱动电压 $5\ \text{V}$,工作波长在 $514\sim 1550\ \text{nm}$ 之间,偏转角度为 $\pm 3^\circ$ ^[15]。2004年,BNS又发布一款电极数为12288根,电极宽度 $1\ \mu\text{m}$,电极间距缩小为 $0.6\ \mu\text{m}$,驱动电压从 $5\ \text{V}$ 增加到 $13.2\ \text{V}$ 的液晶相控阵^[16],如图1(f)所示。2005年Rockwell Scientific公司推出了双频液晶透射式液晶相控阵,不同于反射式,它具有更低的系统Swap^[17](体积、重量和功率),如图1(d)所示。2006年,BNS公司推出了一维液晶空间光调制器,

该器件的独立可控阵元数为 12288 根,有效孔径为 $19.66\text{ mm}\times 19.66\text{ mm}$,零级衍射光效率为 80%~90%,光束偏转角度为 $\pm(4^\circ\sim 7^\circ)$,响应时间为 5~30 ms,工作波长范围为 635 nm~1.55 μm 。

2007 年, BNS 公司又推出了二维液晶空间光调制器,该器件独立可控阵元数为 512×512 ,工作波长范围为 532 nm~1.55 μm 。两款产品的实物图如图 1(h)—(j)所示。

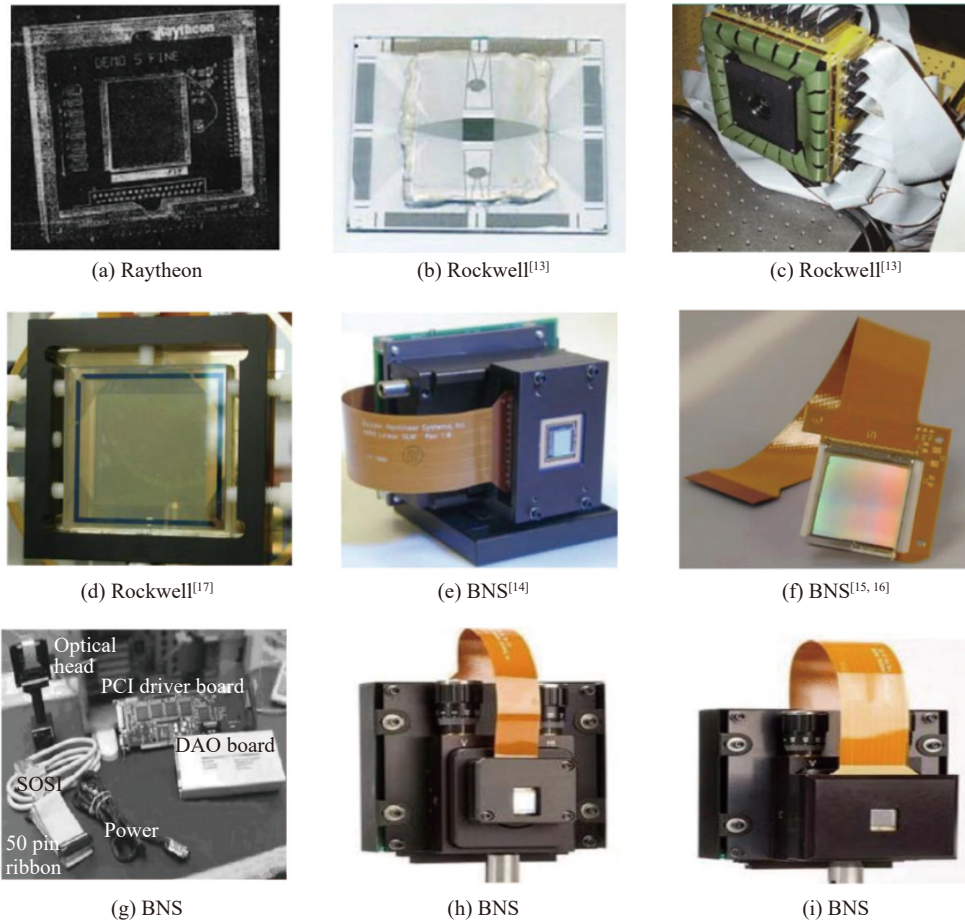


图 1 国外研究进展

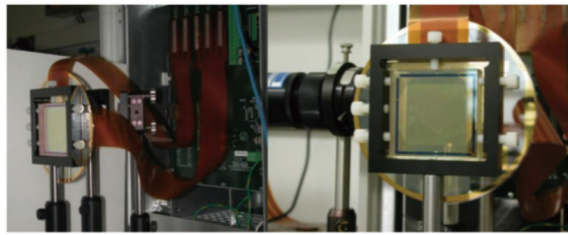
Fig. 1 Research progress abroad

为了获得更大角度的偏转, BNS 公司提出通过级联的方法,将两个相控阵器件进行级联。Rockwell Scientific 公司通过此法,最终获得了有效口径为 $4\text{ cm}\times 4\text{ cm}$,电极宽度为 $8\text{ }\mu\text{m}$,工作波长为 1.55 μm ,偏转角为 $\pm 1.25^\circ$ 的液晶相控器件,系统样机如图 2(a)所示。2007 年 Raytheon 公司根据 APPLE 项目,对器件进行优化,电极数增至 10000 根,电极间距 $1\text{ }\mu\text{m}$,有效口径 4 cm ,并进行了 $113\text{ W}/\text{cm}^2$ 耐受激光功率测试,如图 2(a)所示。如图 2(b)所示,采用粗精两级系统,提高了角度偏转范围,该系统能够实现 $\pm 20^\circ$ 角度偏转。2009 年,David 等公布了一种利用铁电液晶制成的光学相控阵,可实现

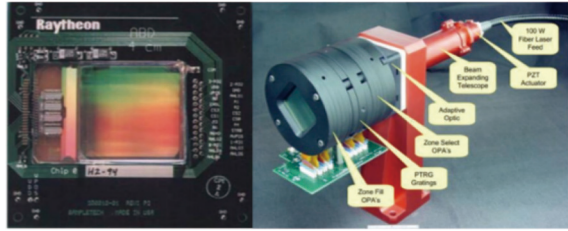
0 至 2 弧度的角度偏转,偏转效率可达 91%^[18]。2017 年,SLM 公司制作并发表了一款二维液晶相控阵,独立可控电极数为 20736 根,单元天线的尺寸为 $8\text{ }\mu\text{m}\times 8\text{ }\mu\text{m}$,有效孔径为 $15.36\text{ mm}\times 8.64\text{ mm}$,响应速度很快,仅有 5.6 ms^[19]。2019 年,新加坡材料研究与工程研究所 Yin 等^[20]提出一种基于一维纳米天线透射式液晶空间光调制器,可以在 $0\sim 11^\circ$ 的偏转角度内实现光束扫描,衍射效率大于 35%。

1.2 国内研究

相比较国外的研究,国内对液晶相控阵的研究开始的相对较晚。2002 年,长春光机所,以



(a) Rockwell 公司透射式相控阵



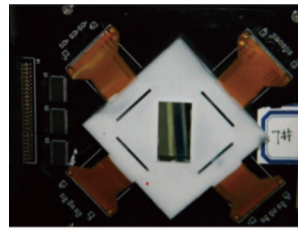
(b) Raytheon 公司高能激光系统

图 2 液晶光学相控阵系统

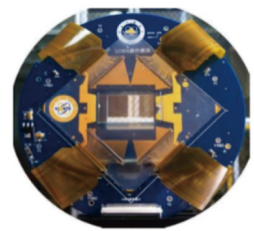
Fig. 2 Liquid crystal phased array system

液晶为调制材料设计出了用于实验的光学相控阵扫描系统^[21]。2006年,电子科技大学在对液晶光栅的原理和理论进行了分析计算后设计出了电控液晶光栅^[22]。2008年,哈尔滨工业大学对液晶相控阵进行了数学建模和仿真,研制出的一维透射式液晶相控阵,最大偏转角为 2.0014° ^[23]。2010年,电子科技大学研制出了电极周期为 $5\ \mu\text{m}$,电极间距为 $1\ \mu\text{m}$,液晶盒 $6\ \mu\text{m}$,电极宽度为 $4\ \mu\text{m}$ 的液晶相控阵,总的驱动电极数为1920根,通光口径为 $11\ \text{cm}\times 11\ \text{cm}$,有效区域 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$,可对 $1.62\ \mu\text{m}$ 波长的光束进行光束偏转,实现了 $\pm 3^\circ$ 范围内的角度扫描,如图3(a)所示。2016年,电子科技大学在原有的液晶相控器件的基础上进行了优化,设计出了第二代液晶相控器件,电极宽度为 $4\ \mu\text{m}$,电极间隔 $1\ \mu\text{m}$,液晶盒厚为 $7\ \mu\text{m}$,阵列大小为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$,可控阵元电极数为1920根,在入射激光波长为 $1064\ \text{nm}$ 的条件下,实现了 $\pm 5^\circ$ 范围内的连续光束扫描。如图3(b)所示。2018年,电子科技大学设计出一种PA-in-PA结构的大口径液晶空间光调制器,其可以在 $0^\circ\sim 3^\circ$ 范围内实现光束偏转,光束衍射效率超过80%。2019年,李松振等人设计了一种二维液晶光栅,在外加电场的作用下,二级光的衍射效率可达80%,它可以实现低散射、高效率的光束偏转。2020年,合肥工业大学提出了一种基于向列相液晶的F波段

移相器,该器件面积为 $4\ \text{mm}\times 4\ \text{mm}$,厚度为 $490\ \mu\text{m}$,当外加电压从 $0\sim 4\ \text{V}$ 时,相移变化从 $0^\circ\sim 350.7^\circ$ 。2021年,电子科技大学设计并制作出了可堆叠光学相控阵,可适用于任何液晶材料,转向精度可达 $10\ \mu\text{rad}$,最快响应时间为 $1.52\ \text{ms}$,且这种结构具有实现亚毫秒响应的潜力。



(a) 第一代液晶相控阵



(b) 第二代液晶相控阵

图 3 电子科技大学研制的液晶光学相控阵

Fig. 3 Liquid crystal optical phased array developed by UESTC

2 液晶相控阵关键技术研究

2.1 波束控制

单个的液晶相控阵器件可实现的角度偏转有限,为增大角度偏转范围、提高分辨率,人们开始研究多个元件的组合。2004年,佛罗里达大学级联多个电控双折射棱镜,将作为精扫描的液晶相控阵器件与一组二进制的棱镜组合,光束通过每一层双折射棱镜都能获得一定的角度放大,经过一系列的双折射棱镜后系统能够达到 $\pm 48^\circ$ 的偏转范围,如图4(a)所示。2009年,Raytheon公司将液晶空间光调制器与体全息光栅级联,实现了 $\pm 45^\circ$ 范围内的二维光束扫描,衍射效率为15%~20%。2011年,电子科技大学将布拉格光栅与液晶空间光调制器级联,在 $0\sim 11.82^\circ$ 范围内实现了连续扫描,光束偏转效率为 $\sim 2\%$ 。2017年,Steven^[24]等人将他们新研制的多个液晶光栅级联在一起,实现了二维光栅扫描,扫描范围为 $64^\circ\times 64^\circ$,角度分辨率为 3.2° ,衍射效率可达80%。2017年,电子科技大学的汪相如团队^[25]将两组一维液晶相控阵器件分别放在两条光路上得到二维光束小角度范围内的扫描,当偏转角度在 0.19° 范围内时,偏转精度大于 $25\ \text{rad}$,偏转

效率为 84.7%，光路图如图 4(b) 所示。2018 年，电子科技大学提出将液晶相控阵与倒置望远镜系统结合，也实现了光束在大角度范围的扫描。2019 年，长春理工大学将液晶偏振光栅与液晶半波片级联，并将两组这样的组合分别放在 X、Y 方向上，实现了二维光束的扫描，扫描视场为 $40^\circ \times 40^\circ$ ，如图 4(c) 所示。

2.2 系统分析建模

扫描模型^[26]，1996 年，美国空军高级研究实验室建立了分析光学相控阵的通用模型——闪耀光栅模型。闪耀光栅模型又在 S.Serati 分析和应用中进一步发展。在 2010 年，孔令讲提出非周期闪耀模型^[27]，丰富了扫描模型种类。周期闪耀光栅模型能够实现的偏转角度有限且呈离散状态，而非周期闪耀光栅模型能实现任意连续的角度偏转，但是会受到调制精度和电压量化的影响。2016 年，汪相如为实现超高精度扫描，提

出子孔径相干法^[28]，进一步优化了扫描模型。

器件模型^[26]，主要用于分析边缘效应、回程区和相位凹陷对液晶相控阵的影响。为了分析影响衍射效率的因素，James 等^[29]分析了边缘效应，发现边缘效应会导致不对称的能量转移，且随着入射角的增大边缘效应的影响将会降低；徐林对相位凹陷和回程区进行了分析，发现衍射效率随着相位凹陷和回程区的变大而显著减小。因器件本身边缘效应无法忽略，并对器件性能产生很大的影响。Hallsting^[30]给出了边缘效应对波面展宽的经验模型并提出修正栅极电压降低边缘效应。Person 等^[31]提出使用修正全息图减小边缘效应。Chiang 提出使用圆偏振光减小边缘效应。Efron 和 Apter 对边缘效应进行了仿真，分析并验证了液晶层厚度和电极宽度越大边缘效应越强。

2.3 系统性能优化

系统性能优化包括精度优化与效率优化。Tholl^[32]发现波束偏转角是由波阵面展开的平均斜率决定。为了提高偏转精度，Engstrom 采取微调相位面法修正波阵面斜率，但这样会降低衍射效率。宋艳^[33]在未考虑边缘效应的影响下，提出电压量化台阶相位面平移法，提高了扫描精度和效率。周研等提出优化波阵面斜率法，修正了波束指向角度。

效率优化是衡量系统性能的重要因素。Hallsting 等发现衍射效率降低的直接原因是波阵面的相位畸变，给出了计算波阵面相位偏差均方根误差的公式，提出相位修正可以通过调节电压与波阵面的相位偏差的比例系数来实现^[30]。Mcmanamon 提出对电压进行校正可以采用爬山法^[34]，而尹晓虎^[35]则采用模式搜索自适应法对电压进行校正。Harris 提出调节电压-相位延迟系数对相位进行优化^[36]。卓一静等^[37]利用相位恢复算法获得真实波阵面分布，并利用波前迭代控制算法对波阵面相位畸变进行补偿。

3 液晶相控阵的应用

3.1 高能激光

目前，液晶相控阵高耐受功率的研究依然是

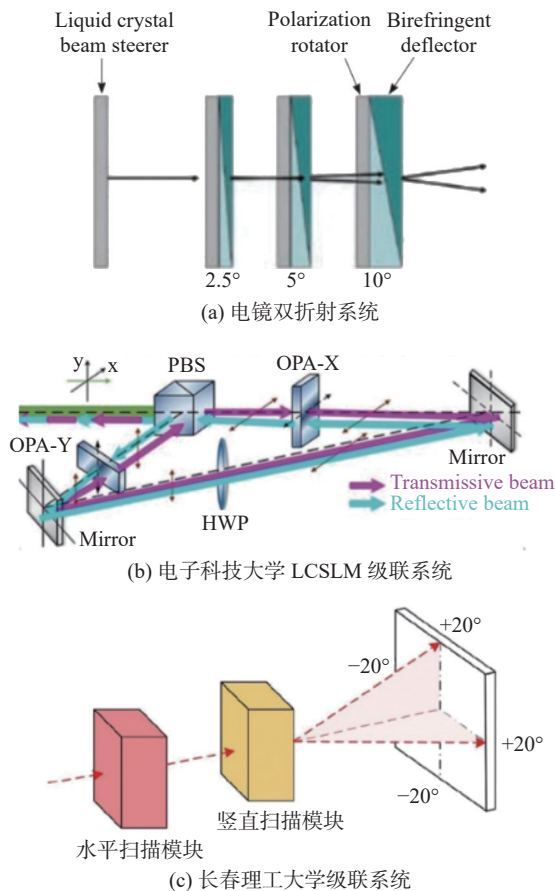


图 4 级联系统

Fig. 4 Cascade system

各国的研究热点。率先开始研究的是美国的 Raytheon 公司和美国空军研究实验室。Raytheon 公司早在 2007 年公布了可耐受激光功率高达 113 W/cm^2 的液晶相控阵，如图 2(b) 所示。2010 年，美国空军实验室公布他们所研制的可耐受 100 W/cm^2 功率的光学相控阵。在耐受功率研究过程中热沉积是主要解决的问题，一方面要减少产热，另一方面要增大散热。由于石英玻璃的导热系数为 $1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，而硅片的导热系数为 $148 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，因此将石英玻璃用硅片代替极大程度上增加了散热。传统的液晶相控阵结构是透射式的，而反射式液晶相控阵可以减少对激光的吸收，并且由于光束两次经过液晶层，它对光束产生的相位延迟量是透射式液晶相控阵的两倍，在结构上还可以在背面安装水冷散热系统，增加器件的散热，在激光应用中比透射式液晶相控阵更有优势。

2017 年，电子科技大学设计了反射式的液晶相控阵，设计了高效的散热模块导电层，耐受功率达到 272.4 W/cm^2 。

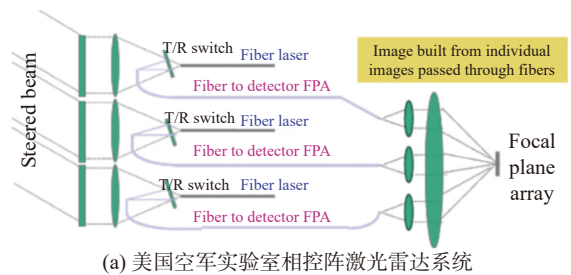
3.2 空间激光通信

液晶相控阵应用于空间激光通信领域是其发展的必然趋势。其传播信息容量大、通信频带宽、抗干扰能力强等优点让其在军用和民用领域都具有极大的优势。欧洲航天局(ESA)和日本是最早开始进行空间激光通信实验的。ESA 从 1985 年开始就发射了装有半导体激光器的卫星，并进行了太空中卫星与卫星之间的激光通信的实验。1994 年，ESA 建立了激光通信基站。2001 年 ESA 又搭建地球同步卫星激光通信，随后又发射了一枚中继卫星，与 1998 年法国发射的激光通信终端进行通信实验，在此过程中，通信速率可达 50 Mbit/s ，误码率为 10^{-6} 。同年又进行了激光通信基站与中继卫星之间的高速率通信，在实验过程中，地球同步卫星终端接收来自低轨卫星终端的数据，传输速率可达 50 Mbit/s ，方向传输速率为 2 Mbit/s ^[38]。2008 年 ESA 在 45000 km 的高空，使用激光通信技术进行了 1.8 Gbit/s 的激光实验。而日本也在 2003—2006 年间，完成激光通信测试，实现低轨卫星与地面

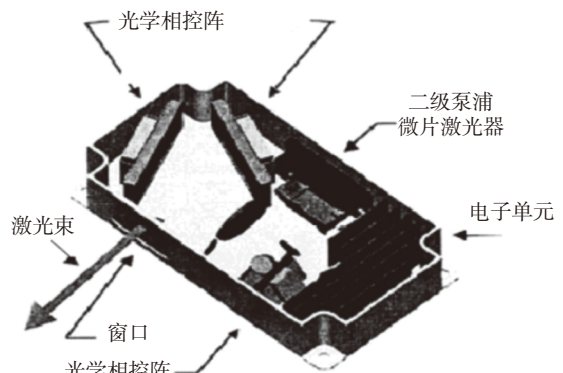
移动光学站的传输。2014 年日本设计完成了质量仅为 5.8 kg 的通信终端，最大传输距离可达 1000 km ，下行通信速率为 10 Mbit/s 。美国航天局在 2000 年完成激光通信演示系统，2013 年实现月球轨道与多个地面基站的通信，最大下行和上行速率分别达到 622 Mbit/s 和 20 Mbit/s 。2019 年，电子科技大学，提出一种双用户接入的光架构，可以显示中继卫星终端和用户终端的一对一通信链路，此架构跟踪精度小于 $50 \mu\text{rad}$ 。

3.3 激光雷达

液晶光学相控阵激光雷达具有扫描速度快、灵活性高、体积小、重量轻且能进行远距离扫描等优点，在军事和民用领域备受关注。2005 年美国空军实验公布了他们设计的液晶光学相控阵雷达系统，如图 5(a) 所示，其光学移相器大小为 4 cm ，此激光雷达系统的最大特点在于它的光束发射系统是 100 kW 的光纤激光器阵列，该阵列是由很多个 4 W 的光纤激光构成。2004 年，雷声公司设计了重 2 kg 的可编程相控阵激光雷达，体积小，仅约为 1600 cm^3 ($\approx 12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$)，总功耗小于 10 W ，其距离分辨率可达 0.2 m 且作用距离可实现 4000 m ，因其



(a) 美国空军实验室相控阵激光雷达系统



(b) Raytheon 公司相控阵激光雷达外观图

图 5 激光雷达系统

Fig. 5 Lidar system

响应速度慢, 稳定性不高, 没有进一步应用, 如图 5(b) 所示。2007 年, 雷声公司的 APG-79 相控阵激光雷达在经过美国海军的允许后装备在了 F/A-18 战斗机上, 它具有很强的目标跟踪能力, 在空攻击时可以在较远的距离上将目标截获, 如图 5(b) 所示。2007 年, 哈尔滨工业大学采用液晶光波导和达曼光栅研制出了相控阵激光雷达系统, 该系统能够实现二维扫描, 视场角为 $10^\circ \times 10^\circ$, 角分辨率为 0.67 mrad, 能够探测 1.52 km, 距离分辨率可达 1.5 ~ 1.9 m, 每帧扫描 25×50 个点, 成像速率可达 16~24 帧/s。电子科技大学和中国科技集团第 27 所研究所共同研制了液晶光学相控阵并进行了激光雷达实验。

4 结 论

液晶相控阵因其扫描精度高、轻便灵巧和驱动电压低等优势备受业内关注。本文总结了液晶相控阵国内外的研究现状和关键技术的研究, 同时也总结了液晶相控阵在激光、空间光通信和激光雷达中的应用成果。希望为液晶相控阵的后续研究提供一些参考。

参考文献:

- [1] WANG C M, WANG Q D, MU Q Q, et al. High-precision beam array scanning system based on Liquid Crystal Optical Phased Array and its zero-order leakage elimination[J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127610.
- [2] WANG Z S, WANG C Y, LIANG S N, et al. Diffraction characteristics of a non-mechanical beam steering system with liquid crystal polarization gratings[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7319 – 7331.
- [3] 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.
- [4] HE X X, LI M F, LIANG Z Q, et al. A liquid crystal stackable phased array to achieve fast and precise nonmechanical laser beam deflection[J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127598.
- [5] AL-ITHAWI S, HADI A. An overview of liquid crystal techniques and technology with applications to different research fields[J]. *Defect and Diffusion Forum*, 2020, 398: 117 – 124.
- [6] HOY C, STOCKLEY J, SHANE J, et al. Non-mechanical beam steering with polarization gratings: a review[J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 361.
- [7] GOZZARD D R, ROBERTS L E, SPOLLARD J T, et al. Fast beam steering with an optical phased array[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3793 – 3796.
- [8] 胡婕, 杜升平, 郭弘扬, 等. 可实现二维光束偏转的液晶相控阵模型 [J]. *光电子·激光*, 2020, 31(3): 248 – 253.
- [9] 杜升平. 应用于空间光通信的液晶光束偏转技术研究 [D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2017.
- [10] 黄帆, 汪相如, 贺晓娟, 等. 温度诱导液晶相控光束质量恶化分析 [J]. *光电工程*, 2021, 48(6): 200463.
- [11] 贺晓娟. 液晶光学相控阵的功率阈值提升方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [12] 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.
- [13] WINKER B, MAHAJAN M, HUNWARDSSEN M. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications[C]//Proceeding of 2004 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2004: 1702 – 1709.
- [14] 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, 2020.
- [15] 肖锋. 液晶光学相控阵关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [16] BAUCHERT K A, SERATI S A, FURMAN A. Advances in liquid crystal spatial light modulators[C]//Proceeding of SPIE 4734, Optical Pattern Recognition XIII. Orlando: SPIE: 2002: 35 – 43.
- [17] LIN Y H, MAHAJAN M, TABER D, et al. Compact 4 cm aperture transmissive liquid crystal optical phased array for free-space optical communications[C]//Proceedings of SPIE 5892, Free-Space Laser Communications V. San Diego: SPIE, 2005: 1 – 10.
- [18] 张天一. 基于液晶光学相控阵的多终端接入方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [19] 范佳鑫. 液晶空间光调制器光束指向控制方法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- [20] YIN S, ZENG D H, CHEN Y T, et al. Optically controlled terahertz dynamic beam splitter with adjustable split ratio[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(7): 1169.
- [21] 王丽. 液晶电控光栅研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006.

- [22] 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.
- [23] 李兰婷. 液晶光学相控阵光束指向控制技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [24] 王丽娜. 基于液晶偏振光栅的大角度光束偏转技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [25] 牛启凤. 液晶相控阵光束偏转关键技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [26] 李曼, 许宏. 光学相控阵技术进展及其应用 [J]. *光电技术应用*, 2011, 26(5): 8 – 10,41.
- [27] 孔令讲, 朱颖, 宋艳, 等. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0123001.
- [28] TANG Z H, WANG X R, HUANG Z Q, et al. Sub-aperture coherence method to realize ultra-high resolution laser beam deflection[J]. *Optics Communications*, 2015, 335: 1 – 6.
- [29] JAMES R, WILLMAN E, GHANNAM R, et al. Hydrodynamics of fringing-field induced defects in nematic liquid crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130(13): 134701.
- [30] HAELLSTIG E, STIGWALL J, LINDGREN M, et al. Laser beam steering and tracking using a liquid crystal spatial light modulator[C]//Proceeding of SPE 5087, Laser Systems Technology. Orlando: SPIE, 2003: 13 – 23.
- [31] PERSSON M, ENGSTRÖM D, GOKSÖR M. Reducing the effect of pixel crosstalk in phase only spatial light modulators[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22334 – 22343.
- [32] THOLL H D. Novel laser beam steering techniques[C]//Proceeding of SPIE 6397, Technologies for Optical Countermeasures III. Stockholm, Sweden: SPIE, 2006: 639708.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] HU J, DU S P, GUO H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110002.
- [37] 卓静一, 孔令讲, 周建华, 等. 一种液晶相控阵中基于迭代的相位恢复算法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0505001.
- [38] 谢珊珊, 梁晓莉. 国外卫星激光通信技术发展分析 [J]. *中国航天*, 2021(12): 42 – 46.

(编辑: 张 磊)