



液晶光学相控阵技术*

Liquid Crystal Optical Phased Array Technology

韩学勤¹ 李丽¹ 谭东杰² 刘国国² 张卫国³

1 北京航空航天大学 2 中国空空导弹研究院 3 北京市信息技术研究所

摘要: 详细介绍了国内外液晶相控阵研究发展情况, 阐述了液晶相控阵的基本原理, 通过分析偏转效率、响应时间和扫描角度, 对液晶相控阵性能进行了说明, 并提出了液晶相控阵技术的发展方向。

关键词: 液晶相控阵; 衍射效率; 响应速度; 扫描角度; 激光雷达

Keywords: liquid crystal phased array; diffraction efficiency; response speed; scanning angles; laser radar

0 引言

光束偏转技术是对激光光束方向精确控制的技术, 在目标探测、激光通信、光信息处理与存储、生物医学等诸多领域有着广泛的应用前景。传统的光束偏转系统依靠机械装置改变光轴方向, 实现光束偏转, 因其结构复杂、精度低、质量大、能耗高, 在运动过程中还需要克服惯性的影响, 使其性能受到很大的制约且不利于微型化。随着激光雷达

技术对扫描装置在精确度、灵活控制、低功耗等方面要求的不断提高, 各种更精确、非机械、纯电控、非惯性扫描的新型光束偏转技术不断兴起。

液晶光学相控阵是一种实时可编程光束控制器件, 它采用驱动电压低、相位调制深度大的向列相液晶作为相位调制的光电材料, 使器件具有体积小、重量轻、功耗低、易于实现微电子控制电路等独特优点, 不但解决了激光束指向的快

速、灵活控制和空间扫描问题, 而且使光电系统的集成度更高, 柔性控制能力更强, 制造成本更低。因此, 近年来液晶相控阵技术得到了更为深入的研究, 用液晶相控阵实现波束控制已成为激光雷达和自由空间光通信技术发展的重要趋势之一, 本文介绍了国内外液晶相控阵研究动态, 论述了影响液晶光学相控阵光束偏转性能的因素以及提高性能的途径, 并对发展方向做出了展望。

响测试精度的其他因素, 直管段减小到(5~7)DN也可以将检测误差控制在1%范围内。

4 其他

4.1 涡轮流量传感器仪表常数的标定

为确保已使用仪表的测量精度, 应进行定期检定和标定。检定和标定条件应接近于最终安装和运行条件。标定使用的流体(如航空燃油)与欲测流体预定的测量范围、压力、温度应相同。具体标定方法步骤详见技术说明书。

4.2 流量调节手段的改进

尽量将管路阀门由手动闸阀改为电动闸阀, 以实现燃油流量的平稳连续调节, 使流速分布均匀, 排除管路燃油扰动的影响, 提高检测的稳定性和准确性。

5 结束语

经过以上的技术处理, 新型航空燃油泵测验仪器的流量测量分辨率达到了1l/h, 误差降到1%以下, 比旧仪器的测量分辨率提高了近百倍, 误差大为减小。完全可以满足新型航空燃油泵的性能检测要求。

AST

参考文献

- [1] 刘欣荣. 流量计[M]. 北京: 水力电力出版社, 1984.
- [2] 朱德祥, 等. 流量仪表原理和应用[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1992.
- [3] 上海虹益仪器厂. 涡轮流量传感器使用说明书[Z]. 2000.

作者简介

刘振岗, 副教授, 主要从事海军航空装备保障教学和科研工作。



1 国内外发展概述

1.1 国外研究动态

1964年, Heilmeier等人发现了以动态散射方式工作的液晶显示器件。1971年, 美国休斯公司J.D.Margerum等人提出了第一个光导型透射式液晶光调制器, 用ZnS作光导层, 直流电压驱动, 工作于动态散射模式。由于处于直流工作状态容易引起液晶与电极间的电化学反应, 影响器件的使用寿命。1975年, J.Grinberg等人研制了用CdS作光导层, CdTe作光隔离层的交流反射式液晶光阀, 使液晶工作于混合场效应(即向列液晶的扭曲效应和双折射效应)之中。现在沿用的液晶空间光调制器基本上都采用了这种结构。

1988年, Konforti等发表了关于扭曲向列液晶(Twisted Nematic Liquid-Crystal)器件作为纯相位空间光调制器的理论研究, 定量地给出了液晶作为纯相位调制器的适用条件(典型电压范围为1~1.5V), 电压值低于该阈值, 可用来实现纯位相调制, 而高于该阈值, 则可实现强度调制。这个理论及实验虽然简单, 但是足以说明扭曲向列液晶可以产生纯位相的调制, 从而拉开了液晶电视作为纯相位调制器的研究序幕^[1]。1990年, Bill J. Cassarly在博士论文中研究了液晶空间光调制器的幅度和相位调制原理, 在此基础上制作出器件, 并对液晶光学相阵列在光束偏转及控制方面进行了可行性论证。

1996年, Paul F. McManamon提出液晶光学相阵列技术, 讨论了液晶相控阵的原理、光束偏转效率、偏转精度、色散特性、偏转范围、通光孔径和多光束偏转等技术问题, 对液晶光学相控阵技术进行了一次全面的技术总结, 并对其

应用领域提出了展望与分析。

20世纪90年代, 美国科罗拉多大学、肯特州立大学、空军研究中心、BNS(Boulder Nonlinear Systems)公司和雷神公司等机构先后研制出多种一维和二维的激光移相器阵列, 其中研制最多的是基于普通液晶的激光相控阵, 并且利用这种激光相控阵成功研制出了相控阵激光雷达样机。

1999年, 美国国防部高级研究计划局(DARPA)设立了光束敏捷控制(STAB)专题, 并向全国招标, 目的是研究用于军事的微器件激光束控制技术。雷神公司和洛克韦尔公司所领导的两个小组分别利用液晶相控阵实现了大范围内高精度的全电控制光束偏转系统。在此基础上, 空军研究实验室和雷神公司合作开发了光学相控阵机载激光终端系统和共形子孔径雷达系统。这种子孔径系统可以发射、接收以及快速控制光能, 并且每一个子孔径都可以传送图像。模块化的特性可以把几个光学孔径通过相干组合成一个任意尺寸的发送或接收阵列, 在任务灵活性和性能上与雷达和电子战系统等装备中的射频相控阵相近。

2001年, 美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)在加利福尼亚圣地亚哥举行的一次会议上, 展示了其开发的用于目标自动识别的小型光学相关器。其关键部件之一是由液晶相控阵光学阵列组成的激光束偏转器, 能够完成激光束在全息介质中的准确扫描和定位功能。

2006~2007年, BNS公司分别推出了一维和二维液晶相控阵列。一维液晶相控阵独立可控阵元数目为12288个, 调制器孔径为19.66mm×19.66mm, 零

级衍射效率可达80%~95%, 偏转角度范围为 $\pm 4^\circ \sim 7^\circ$, 液晶响应时间是5~30ms, 激光波长从635nm到1.55 μm ; 二维的液晶相控阵独立可控阵元数目为262144个, 有效孔径为7.68mm×7.68mm, 支持的激光波长为532nm、635nm、785nm、1064nm、1550nm。

2007年, 雷神公司在DARPA的APPLE项目中利用STAB项目中的原理样机作为光束定向器件, 基于阵列式的液晶光学相控阵实现了大口径光束偏转, 拉开了光学阵列使用的序幕, 图1为雷神公司展示的7个子孔径的原型阵列。



图1 含有7个子孔径的原型阵列

2009年, David Engstrom等人演示了一维铁电液晶空间光调制器。其使用了一种高倾斜度铁电液晶材料, 可以提供 $0 \sim 2\pi$ 之间91%的相位调制, 可以产生超过700个可分辨角度, 响应时间少于200 μs 。

除美国的诸多研究单位对光学相控阵进行详细的研究外, 其他国家对液晶光学相阵列、液晶空间光调制器也进行了深入的研究。

欧洲防务局(EDA)的先进激光束控制技术项目(ATLAS), 研究用于光电对抗、主动成像、目标识别、跟踪、搜索的非机械式光束方向控制和激光束整形技术。研究内容包括用于光束方向精细控制和用于波前校正的液晶空间光调制器; 用于扩展光束偏转范围的偏心微透镜阵列以及用于激光束整形的光寻址液晶空间光调制器等。

* 基金项目: 航空科学基金项目(20070151002)

瑞典和以色列也对基于液晶的光束方向的精细控制做了深刻研究。瑞典防务研究机构FOI在防务光电子项目中设立非机械光束控制技术课题,要求开发采用非机械激光束控制的合作目标通信演示系统,并对液晶空间光调制器用于激光束控制的可行性进行评估。

1.2 国内的研究动态

20世纪90年代,电子科技大学等单位开始研究激光雷达技术,并且制作出了激光雷达演示样机。2000年以后,电子科技大学对相控阵激光雷达技术的体制和系统结构进行了深入的前期概念研究与样机制作。

自2004年起,哈尔滨工业大学从理论层面对液晶相控阵技术进行了深入研究,根据Frank-Oseen液晶连续体弹性形变理论和静电场理论,建立了液晶相控阵内部的几何算法模型。2008年,哈工大张健等人研制了含有1024个驱动电极的液晶光学相控阵器件,由现场可编程门阵列(FPGA)对电极驱动电压进行可编程控制。经实验验证,该器件可以实现60个角度的准连续随机可编程电控偏转与扫描,最大偏转角度为 2.0014° 。2011年,王东等人提出了一种基于液晶相控阵的大角度连续高分辨光束偏转扫描装置及扫描方法实现了大角度光束偏转扫描^[2]。

另外,中国电子科技集团27所、11所、中科院长春光学精密机械与物理研究所、清华大学等研究所与高校也先后对激光雷达或相控阵激光雷达体制进行了前期探索,但这些研究成果基本上还局限于实验室阶段,还未开展对激光雷达相控阵技术的深入研究,特别是基于系统实现的研究。目前因受加工工艺的限制及技术手段的影响,液晶光学相控阵尚不能满足相控阵激光雷达工程

的需要。

2 性能分析

液晶光学相控阵是基于液晶电控双折射性和闪耀光栅原理的可编程光束偏转器件。其基本原理是通过外电场变化控制液晶分子指向矢以改变液晶层的双折射特性,从而对光波波前进行相位调制,而当液晶层对光束的相位调制呈周期性改变的斜坡时,液晶层等效为闪耀光栅。因此,通过改变液晶分子所处的电场控制调制光相位斜坡,实现衍射光特定能级闪耀。宏观上表现为光束偏转。

液晶光学相控阵作为一种可编程光束控制器件,对光束的控制能力是决定其器件性能好坏的重要因素。响应时间的快慢、扫描角度的大小和工作频带的宽度等都成为衡量液晶光学相控阵性能的重要指标,下面将对影响液晶相控阵性能的主要因素及解决方法进行讨论。

2.1 光束偏转效率

液晶光学相控阵是衍射元件,衍射效率是液晶相控阵能否有效利用入射激光能量的表现,也是整个扫描系统性能的重要指标,是决定系统性能好坏的关键因素。液晶光学相控阵的光束偏转效率定义为一级衍射光强与总入射光强的比值。表达式如下:

$$\eta = \left[\frac{\sin(\pi/N)}{(\pi/N)} \right]^2 \times \left(1 - \frac{\Lambda_b}{\Lambda} \right)^2$$

其中, η 为偏转效率, N 为一个周期内电极数, Λ_b 为相位回程区的宽度, Λ 为每个周期的总宽度。由上式可知相位回程区的存在会严重地影响偏转效率。

在液晶光学相控阵中,由于相邻驱动电极间电场边缘效应的存在,施加驱动电压时,复位处的相位不能从 2π 直接复位到0,而是出现如图2所示的相位回

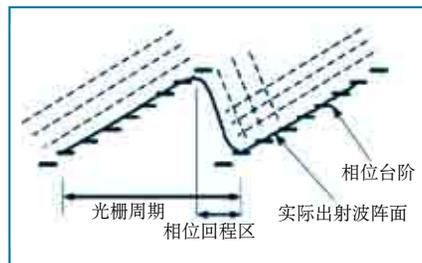


图2 边缘效应对波阵面的影响

程区。

相邻电极间电场边缘效应的存在不仅会导致出现相位回程区,而且在等效相延迟面上出现相位凹陷。入射平面光波通过液晶相控阵后远场衍射图如图3所示。

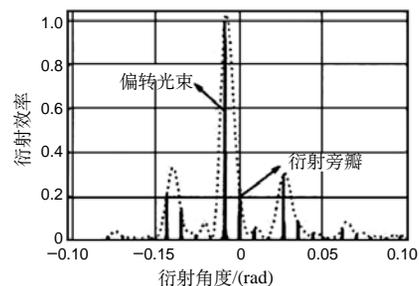


图3 平面波远场衍射图

图中虚线表示一个光栅周期内的相位分布对光强分布的调制作用。可以看到,最高的衍射峰偏离了零级位置,实现了光束的偏转,不过,在该衍射峰的两侧各出现一对较强的衍射旁瓣。

由上述分析可知,相位凹陷、相位回程区会严重影响偏转效率,实际应用中驱动电极尺寸、电极间距、液晶盒厚度及液晶材料本身等都会影响上述两个要素,而导致偏转效率的降低。近年来研究人员针对此问题提出的多种新的技术和解决方案。2004年,Cruneisen等人提出了使用光电导介质代替离散透明电极的方法,控制照射光电导介质的光强分布,可以在光电导介质上产生类似离散电极的效果,此方法消除了电场边缘效应带来的效率损失,显著提高

了偏转效率^[3]。2008年Shi Lei等人提出了一种V-COPA (vertical-continuous OPA)的液晶移相器结构,它能够在半波长盒厚的液晶中产生连续的相位延迟,而无需进行相的置位从而避免了相位回程区,研究显示该结构的衍射效率接近99.5%^[4]。2010年台湾交通大学制造了一种使用稳定聚合物的自由极化的蓝色液晶相控阵,它不仅能提高偏转效率还能提高系统的利用率^[5]。徐林等利用相位解析法建立表示相位凹陷的解析形式数学模型,定量分析了电极间距与相位凹陷的关系^[6]。

为了减少电场边缘效应对液晶光栅的影响,在液晶光栅的制作过程中,应使光栅的电极均匀、增大电极的宽度及增加液晶盒的厚度,但是电极宽度的增加会使液晶光栅的控制精度下降,而增加液晶盒厚度又使得响应时间增大,因此改变传统的电极排列和控制方式,研制新的液晶分子材料成为提高偏转效率的重要途径。

2.2 响应时间

液晶相控阵的响应时间即液晶分子取向变化的弛豫时间,它是决定液晶相控阵光束扫描速率的重要参数,液晶材料的响应时间是指在外电场作用下液晶分子从初始排列取向到达新的平衡取向位置时所需的时间,即上升时间 τ_r ;液晶分子从高能状态的取向位置,通过自身的弹性作用返回到初始取向分布状态的时间,即下降时间 τ_d 。根据液晶的流体力学以及液晶的连续弹性体理论可得出理论上升时间 τ_r :

$$\tau_r = \frac{\gamma h^2}{K\pi^2} \left(\frac{V^2}{V_h^2} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

其中 h 表示液晶盒厚度, γ 为液晶的黏滞系数, K 为液晶的弹性系数。其中 V_h 为门限电压值, V 为施加的电压。下降时间 τ_d 满足以下方程:

$$\tau_d = \frac{\gamma h^2}{K\pi^2} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,通过减小液晶盒的厚度、降低黏滞系数,改良液晶排列等都可以提高液晶分子的响应时间。目前采用向列液晶材料的液晶光学相控阵受材料特性、器件结构和驱动电压等因素的制约,响应时间一般在几毫秒到上百毫秒。激光雷达要求的波束切变频率要求千赫兹量级,激光成像雷达对响应时间的要求更高,传统的向列液晶器件已经不能满足上述要求,因而提高响应速度一直是液晶相控阵的研究热点。提高响应时间主要有以下几种思路。

1) 使用双折射率高的液晶材料

使用双折射率高的液晶晶体,降低材料的黏滞系数。在相同相位延迟情况下,高双折射率液晶材料可减小液晶厚度,从而显著提高响应速度。C.H.Wen等通过精细分子工程,获得了一些高双折射率低黏度的液晶材料,其中折射率最高可达0.7左右^[7]。

2) 掺杂高分子聚合物

通过掺杂一些高分子聚合物,改变液晶分子的受力状态,增强液晶分子形变后的恢复力,加快恢复速度。聚合物有独特的光电性质,在过去的20年里很多种不同的聚合物,其中最流行的是聚合物分散液晶(PDLC)和聚合物网络液晶(PLNC),研究者为了改善聚合物的性能做了大量的研究,John L. West^[8]和Shih-wei ke^[9]等人分别展示了新的应变液晶光栅,通过使用应变液晶可以显著提高相控阵响应时间。

3) 使用双频液晶材料

利用双频液晶水平介电常数随驱动电压频率变化的特点,一个频率的电场使液晶指向矢量形变,另外一个频率辅助液晶松弛,这样可以使液晶分子

在平行和垂直于电场方向上都能快速变化,从而比传统的列向型液晶响应速度更快,响应时间能缩短一个量级。M. Mahajan通过使用双折射液晶材料显著提高了液晶响应时间,但是也使驱动电路变得更加复杂^[10]。

4) 铁电液晶

传统的液晶相控阵为向列型液晶,其光电相应速度并不令人满意。铁电液晶的出现加快了液晶相控阵的发展。铁电液晶属于近晶型液晶,其组成液晶的分子具有固定的电极距,在外电场的作用下,不经过极化过程便会发生分子的重新取向,因而具有良好的响应时间。2009年,Engstrom等人用该材料实现了响应时间为200 μ s的光学相控阵^[11]。

2.3 扫描角度

从工作原理来看,液晶光学相控阵实际上是一种可编程相位光栅。如图4所示,通过在器件的驱动电极上施加一定的电压,使入射光波通过器件的相位调制后获得周期性锯齿状相位延迟分布,形成一个闪耀光栅,从而实现光束的偏转。

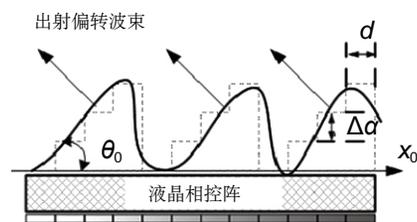


图4 液晶相控阵出射波阵面

对于波长为 λ 的入射光,其最大偏转角满足下式:

$$\sin\theta_o + \sin\theta_{in} = \lambda / (Nd)$$

式(3)中, θ_{in} 为入射角, θ_o 为入射角, λ 为入射光波长, d 为电极有效尺寸, N 为每个周期内的电极数。当前由于工艺水平的限制很难将电极尺寸做到光波数量级以下,无法实现波束的大角度 $\pm 45^\circ$ 偏转,限制了液晶相控阵激光雷



达的某些应用。通过在液晶移相阵列后串联光学组件实现光束大角度的偏转,其中液晶相控阵实现小角度范围内的角度精确扫描,光学组件则负责拓展扫描角度。液晶相控阵实现大角度偏转的方式有全息玻璃法,雷神公司采用该方法实现了大角度扫描^[12]。第二种方法是将液晶移相器与双折射棱镜级相联,光首先通过偏振旋转器改变偏转方向,偏振方向决定光通过双折射棱镜偏转的方向,通过二者的结合,实现大角度的偏转,在STAB项目中,Rockwell Scientific公司采用了该方法^[13]。第三种方法是利用极化光栅和液晶移相器串联实现波束的大角度偏转,该方法使用多层的LCPGs获得大的角度^[13]。

2.4 工作频宽

液晶光学相控阵利用液晶分子的双折射效应实现光束控制,类似于一种闪耀光栅,由于受液晶材料自身特性和控制电极尺寸的限制,其只能对特定波长和特定方向的线偏振光起作用,通常在可见光和红外波段能够较好的工作,而在其他波段受到限制。在工作频宽方面,多波长输入输出的液晶光学相控阵研究也取得了一定的进展^[14]。

除了上述几个因素之外,扫描精度也是液晶光学相控阵的一个重要指标,量化误差、制造误差和高斯预处理误差是影响扫描精度的主要因素,孔令讲等人对上述因素进行了仿真和定量分析^[15]。

3 结论与展望

液晶光学相控阵因其可通过编程控制、轻便灵活、响应快速等极大的优势和潜力引起了业内的广泛关注。本文详述了液晶相控阵的发展历史,对液晶相控阵的工作原理进行了简要说明,分析了影响液晶相控阵的主要

性能指标。但是,由于材料和工艺的限制,液晶光学相控阵技术还面临许多问题,因此今后的工作主要是寻找新的材料提高偏转效率、降低器件的响应时间、减小电场边缘效应、增大扫描角度、拓展工作频宽。另外,目前液晶光学相控阵技术主要用于低功率系统中,高能激光束偏转技术尚未展开,加强对高能激光下液晶光学相控阵的特性研究将大大拓宽液晶光学相控阵技术的使用范围。

AST

参考文献

- [1] Konforti N, Marom E, Wu S T. Phase only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators[J]. Optics Letters, 1988, 13(3): 251-253.
- [2] 王东, 张建, 刘翔. 基于液晶相控阵的大角度连续高分辨光束偏转扫描装置及扫描方法: 中国, CN102073186 A[P]. 2011.
- [3] Mark T G. Programmable diffractive optics for wide-dynamic-rang wavefront control using liquid-crystal spatial light modulators [J]. Optical Engineering, 2004, 43(6): 13871393.
- [4] Shi L, McManamon P F. Liquid crystal optical phase plate with a variable in-plane gradient[J]. IEEE J Appl Phys, 2008, 104.
- [5] Lin Yi-Hsin, Chen Hung-Shan. Polarizer-free and fast response microlens arrays using polymer-stabilized blue phase liquid crystals[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(11): 113505.
- [6] Xu Lin, Wu Liying, Zhang Jian, et al. Effect of phase valley on diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array[J]. SPIE, 2008, 7133: 71333L.

[7] Wen C H. High birefringence and low viscosity liquid crystals [D]. Orlando: University of Central Florida, 2006.

[8] West J L, Zhang Ke, Zhang Matt, et al. Stressed liquid crystals and their application[J]. SPIE, 2005, 5936.

[9] Ke Shih-Wei, Lin T H, Fuh A Y. Tunable grating based on stressed liquid crystal [J]. Opt Express, 2008, 16: 2062-2067.

[10] Mahajan M, Wen B. Voltage calibration of dual-frequency liquid crystal devices for infrared beam steering applications [C]. Proceedings of SPIE, 2005, 5892.

[11] Engstrom D et al. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array [J]. Applied Optics, 2009, 48(9): 1721-1726.

[12] Glebov L. Fluorinated silicate glass for conventional and holographic optical elements[C]. Proc SPIE Window Dome Technol Mater X, 2007, 6545: 654-507.

[13] Khan S A, Riza N A. Demonstration of 3-dimensional wide angle laser beam scanner using liquid crystals[J]. Opt Express, 2004, 12(5): 868-882.

[14] Sharma N, Zmuda H. MIMO based optical phased array technology with electronic beam steering for laser radar applications. [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7700: 77000E/1-77000E/5.

[15] 孔令讲, 易伟, 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.

作者简介

韩学勤, 硕士研究生, 研究方向为激光成像。