

激光技术

液晶光学相控阵组件扫描精度分析研究

汪相如, 黄子强

(电子科技大学 电子科技大学技术研究院, 成都 610054)

摘要: 依据液晶相控阵波控方式的基本原理, 对影响液晶相控阵扫描精度的因素进行分析, 针对三种典型的影响因素进行了理论仿真分析, 并通过实验测量液晶相控偏转精度, 能够优于 $2 \mu\text{rad}$ 量级。

关键词: 液晶; 光学相控阵; 扫描精度

中图分类号: O432.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-04-0033-05

Analysis and Research on Liquid Crystal Optical Phase Array Component Steering Precision

WANG Xiang-ru, HUANG Zi-qiang

(Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: According to the basic principle of liquid crystal phased array beam steering mode, the influence on the steering precision of the liquid crystal phased array is analyzed. Precision on steering angle of liquid crystal optical array has been theoretically analyzed on the relative three main reasons. Meanwhile, experimental research has also been finished to obtain encouraging result indicates that precision is better than $2 \mu\text{rad}$.

Key words: liquid crystal; optical phase array; steering precision

1 液晶相控阵波控原理

液晶光学相控阵的概念来源于微波相控阵, 通过控制每个相控单元的初始相位, 实现对出射波束进行非机械式的角度偏转。在液晶光学相控阵中, 是通过改变加载到各个电极上的相控电压 $V_1 \cdots V_n$, 来调节液晶分子的双折射率, 进而产生不同的相位延迟 $\varphi_1 \cdots \varphi_n$, 使出射激光束在设定的方向上形成相位相干, 得到高强度的激光束主瓣, 实现激光波束的扫描。

图1所示为液晶相控阵波控方式的示意图。

图1中 d 为单个相控单元的长度, 这里的相控单元就是电极, $\Delta\phi$ 为相邻电极的相位差, θ 则为对应的偏转角度。由相控阵原理可知它们之间的关

系式为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\phi}{kd}\right) \quad (1)$$

其中, 电极宽度 d 是常量; k 是激光的真空波数。所以只需更改相邻电极之间的相位差 $\Delta\phi$, 使得出射光束等相位波前的斜率变化, 就可以控制激光波束的偏转, 实现波束扫描。由关系式可知, 激光真空波长 λ , 电极周期 d , 相邻电极的间隔 $\Delta\phi$ 精度是影响偏转角度的三个直接物理量。其他造成这三者改变的变量都可能是造成偏转角度改变的原因。

在现代激光通信中, 单频激光器的应用越来越广泛, 因此在系统中对于激光真空波长的变换一般不必考虑, 即 λ 可以认为是不变的。

依据液晶光学相控器件相位的延迟量是由加

载器件两端的馈电电压而造成液晶分子的转动,从而产生了折射率的变化而实现,产生的相位调制量为

$$\phi = kn_{\text{eff}}L \quad (2)$$

其中,等效折射率 $n_{\text{eff}} = \frac{1}{L} \int_0^L n(z) dz$ 。

因此偏转角度为

$$\theta = \arcsin \left[\frac{L}{d} (n_{\text{eff}}(x_0 + d) - n_{\text{eff}}(x_0)) \right] \quad (3)$$

其中,相邻两个位置 x_0 和 $x_0 + d$ 的等效折射率 $n_{\text{eff}}(x_0 + d)$ 和 $n_{\text{eff}}(x_0)$ 除了与液晶材料有关 (n_{\perp} 和 n_{\parallel} , ε_{\perp} 和 ε_{\parallel} , K_{11}/K_{22} 和 K_{33}), 还与馈电电压有关 U 。因此除了液晶材料的参数外,还与期间的厚度 L /电极周期 d 有关。

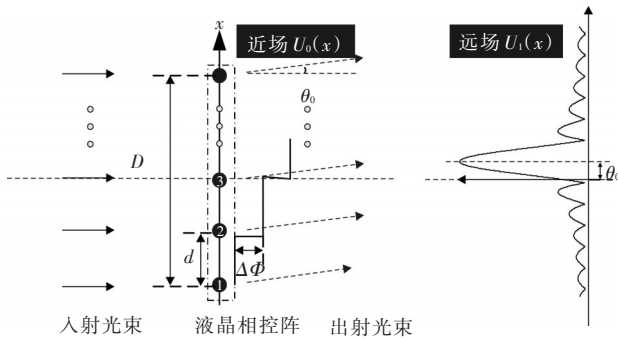


图1 液晶相控阵原理图

2 液晶相控阵扫描精度

扫描精度是液晶相控阵扫描组件的一个非常重要的性能指标,为了衡量液晶相控阵的扫描精度,基于以下两点定义扫描精度误差:首先,精度的高低是以误差的大小来衡量的,误差越小精度越高;其次,在液晶相控阵中,扫描角度是离散分布的,并且扫描角度的间隔与 $B_{3\text{dB}}$ 有关,这里 $B_{3\text{dB}}$ 为扫描波束的 3 dB 主瓣宽度。所以文中用扫描角度误差 $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_1$ (θ_0 为理想的扫描角度; θ_1 为实际扫描角度) 和 $B_{3\text{dB}}$ 比值 ξ 来表示扫描精度误差, $\xi = \Delta\theta/B_{3\text{dB}}$ 。

根据高斯函数的衍射极限公式(全宽)为

$$B_{3\text{dB}} = \frac{4\lambda}{\pi\omega} \quad (4)$$

由于 ω 是相控阵器件的通光孔径即光腰半径,可以得到激光束散角衍射极限(全宽) $B_{3\text{dB}} = 135 \mu\text{rad}(28^\circ)$

由液晶相控阵波控原理可知, d , ϕ 的误差将导致扫描角度误差增大,从而使得液晶相控阵的扫描精度误差增大。这里将影响 d 值的因素统称为距离因素,影响 ϕ 的因素统称为相位因素。例如,液晶相控阵在工作过程中温度上升,电极受热膨胀,即 d 值变大;由于电极宽度 d 是微米量级,制造工艺难度大,制造误差会使现实中的电极宽度偏离理想值,这些是距离因素;另外由于制造过程中液晶盒厚度的不均匀、器件量化位数的限制、高斯光束的修正影响等原因,会使各个电极上的相位差 ϕ 产生误差,这些因素就属于相位因素。在现实中,距离因素和相位因素往往是同时存在并综合作用,影响液晶相控阵的扫描精度。

3 扫描精度仿真分析

对三种典型的影响扫描角度误差的因素—电压量化误差、电极制造工艺误差、高斯预处理误差进行分析,通过引入以上误差并利用夫琅和费衍射积分公式计算扫描光束的远场波束分布以及实际的扫描角度值和对应的扫描精度误差。

液晶相控阵的仿真模型参数为:电极宽度: $5 \mu\text{m}$;激光波长: $1.064 \mu\text{m}$;通光孔径: 10mm 。

上述参数中激光波长依据激光雷达常用波长选取,电极宽度是结合现在的工艺限制设定。同时若设定扫描角度范围为 $0^\circ \sim 3^\circ$,扫描角度个数为 524 个,则可得最小要求实现扫描角度为 0.0057° ($100 \mu\text{rad}$)。

3.1 电极制作工艺误差

因为液晶相控阵的电极宽度为几个微米,对加工精度要求高,制造工艺难度非常大,往往无法保证工艺的精确度。所以实际制造出的电极宽度会有一定的误差,有些电极会被加宽,有些电极会缩短,导致 d 的误差,从而对偏转角度精度造成一定程度的影响。

为了对制作工艺误差进行仿真分析,首先必须建立一个仿真模型来描述这种误差。单个电极的加工误差由许多相互独立的随机因素引起的,而且这些误差因素又都没有任何特殊的倾向,因此可以选择正态分布模型描述液晶光栅的制作工艺误差,正态模型能最真实的体现现实中的制造误差其函

数表达式为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

其中, y 为分布的概率密度; μ 为均值; σ 为标准差。图2是对正态模型的仿真结果。其中图2是:均值为0, 标准差为1的正态分布, 按照刻蚀工艺的计数条件, 一般认为电极的刻蚀精度是 $1 \mu\text{m}$, 因此这样的假设是合理的, 并且工艺条件会用于该假设条件。

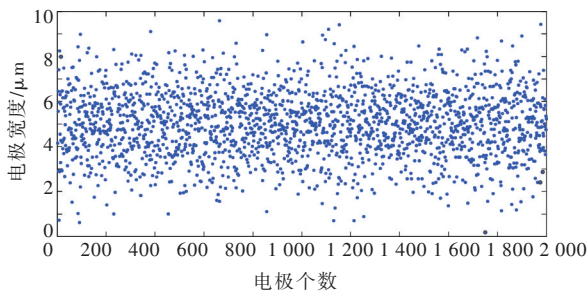


图2 电极宽度制造误差分布图

图中的纵坐标表示电极宽度, 横坐标表示电极个数。图中2000根电极样本的均值是 $5 \mu\text{m}$, 而围绕着直线正态分部的离散点, 表示了每个样本的实际电极宽度, 图中大多数的点会落在均值不远, 只有少量的点会远离均值, 满足正态分布的基本特性。

基于上述误差模型, 再利用瑞利公式进行仿真。结果如图3所示。

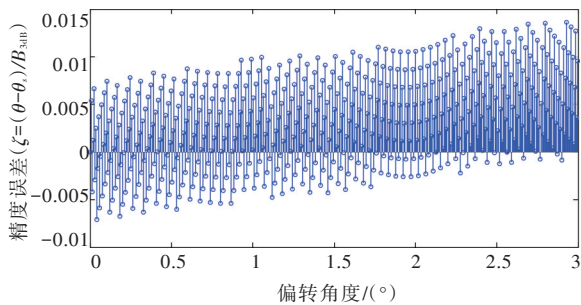


图3 制造误差扫描精度误差图

图中, 横坐标表示偏转角度, 纵坐标表示精度误差 ξ ($\xi = \Delta\theta/B_{3\text{dB}}$), 这里的 ξ 值是多次仿真试验的均值。从图中可以看出, 量化误差造成的精度误差 $\xi < 1.5\%$, 但是精度误差 ξ 一方面随着扫描角度的增大而成增大趋势, 由于 ξ 表征的是目标光斑中

心的偏转误差与光斑直径的比值, 小于 1.5% 的设计是能够满足要求的。

3.2 电压量化误差

液晶相控阵的波控器在实现过程中, 受硬件条件的限制——DA的量化位数有限, 使加载在液晶相控单元——电极上的电压值是离散的电压值, 当对各个电极加载相控电压 $V_1 \cdots V_n$ 时, 有些电压值只能用D/A产生的离散电压值中最靠近它的电压值代替它。而相控电压的误差, 将导致相位延迟的误差, 从而影响扫描精度。

对 $0^\circ \sim 3^\circ$ 之间等间隔的500多个扫描角度的扫描精度进行计算仿真。仿真结果如图4所示。

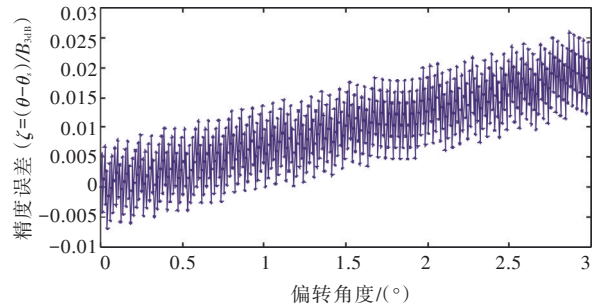


图4 量化误差扫描精度误差图

图中, 横坐标表示偏转角度, 纵坐标表示精度误差 ξ ($\xi = \Delta\theta/B_{3\text{dB}}$)。随着偏转角度的增减, 扫描的误差总体表现出逐渐升高的特点, 在 3° 范围内, 误差能够保持在 3% 以内, 也即是说, 在目标位置上, 中心的误差是光斑半径的 3% 以内, 小于一般系统对相对误差小于 5% 的判据, 因此是能够被接受的。图5是偏转角度为 3° 时, 远场的分布图。中心表现出有微小的偏差。

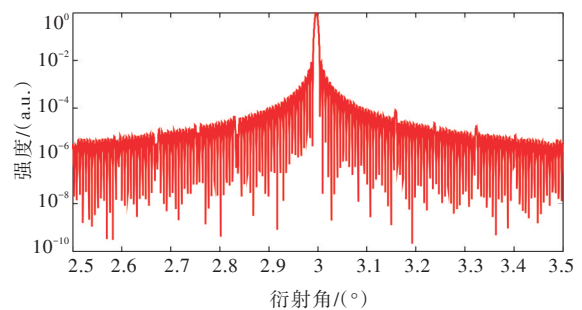


图5 偏转角度为 3° 时, 远场特性图

3.3 其他因素

液晶对入射激光的调相作用是通过电控液晶分子转动而产生,因此除了驱动的馈电电压的量化级次对相位的精度有影响外,液晶材料特性也是影响其相位精度的主要原因,根据相位调制量 $\phi = kn_{\text{eff}}L$ 。

决定等效折射率 n_{eff} 的材料参数有:折射率(n_{\perp} 和 n_{\parallel}),介电常数(ϵ_{\perp} 和 ϵ_{\parallel}),弹性系数(K_{11}/K_{22} 和 K_{33})。

对于给定的材料,按照特定的工艺条件,整体材料是能够保证不变的。但是这些材料或多或少的受到温度/湿度/辐照/应力/等外界环境的变化,而产生时间不稳定性和空间均匀性。但是往往这些外界环境的影响对相控精度的模型是非常复杂的,因此采用概率论的方法来对其研究,将研究的参数统一到每根电极上的相位随机量上,而不单独考虑所有的环境因素,这也是合理的,因为所有的环境因素最终影响都是每根电极上的相位的控制精度。

受到环境因素影响后,假设每根电极上位置处的等效折射率为

$$n_{\text{eff}} = k \cdot n_{\text{eff0}} \quad (6)$$

其中, n_{eff0} 按照相控理论模型,应该实现的等效折射率; k 是随机修正系数,每根电极位置的修正系数 k 满足正态分布,其中均值 $\mu = 1$, 标准差 $\sigma = 0.1$, 因此其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

针对从 $0^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 范围内的扫描,指向误差如图 6 所示。当每根电极上所产生的相位有相比真实相位满足正态分布 10% 的偏差时,指向角度的误差在 2.5% 以内,能够满足精度设计要求。

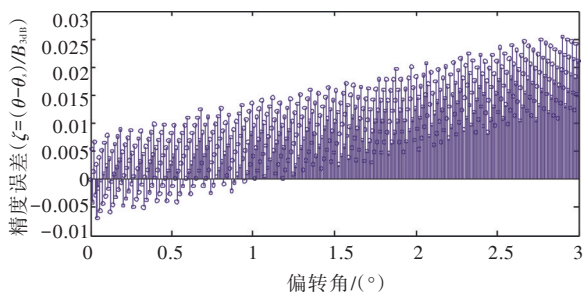


图 6 指向误差与偏转角度的关系

4 实 验

采用自行研制的液晶光学相控阵系统,核心器件如图 7 所示,搭建高精度测试平台,采用质心法提取光斑质心,进而获取光束偏转角度的方法,进行液晶光学相控阵的偏转精度测试实验。

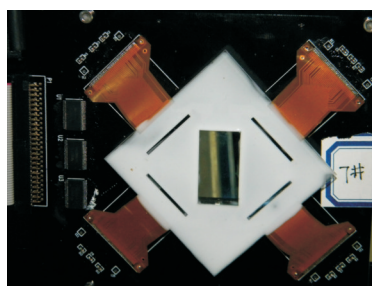
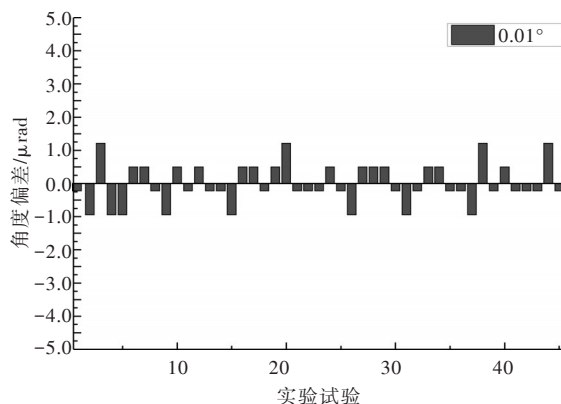
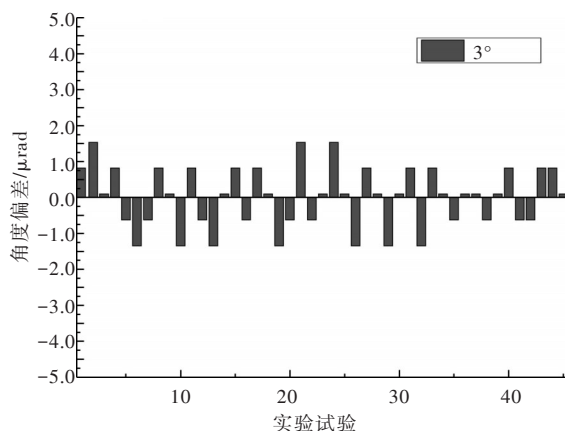


图 7 液晶光学相控阵核心组件——移相器阵列

针对 0.01° 和 3° 分别进行了 45 次重复性实验,测量结果如图 8a 和图 8b 所示。



(a)小角度的重复精度测试结果



(b)大角度的重复精度测试结果

图 8 小角度和大角度的重复精度的测试结果

当偏转角度为 3° 时,受到CCD靶面限制,而无法使得0点位置和1级点位置同时能够在CCD中显示,如果采用更小焦距的透镜则容易受到透镜球差的影响使得光斑中心位置测量造成系统误差。但是针对重复精度的测量并不受到其影响,偏转角度的重复精度与原先0点的位置信息无关,只与1级位置的均方差有关。

在凌晨3点左右的最小环境系统噪声的条件下,依据测试结果可以发现,采用将近50次的重复测量,更小的降低系统噪声。当测试结果在小角度(0.01° 和大角度 3°)重复精度均在1个 μrad 以下,也就是说,测试结果的标准差优于测试系统的精度,因此受限于测试系统,只能说相控阵的重复精度优于测试系统的测试精度 $2\mu\text{rad}$ 。

按照图8的测试结果,针对小角度(0.01°)和大角度(3°)分别经过45次往复测量,光斑质心位置的标准差是 $0.086\mu\text{m}$ 和 $0.113\mu\text{m}$ 。小于质心法求解的最小精度亚微米,因此液晶光学相控阵的重复精度优于目前测试系统的测量精度 $2\mu\text{rad}$ 。

5 结 论

对液晶光学相控阵组件的扫描精度进行了研究,提出了一种对扫描精度误差进行定量计算的方法,并利用该方法对影响激光束扫描精度的三种典型因素进行了仿真,得出以下结论:电压量化、电极宽度、相位随机量。当电压量化、电极宽度给定足够余量的情况下,其精度误差 ξ 均能够控制在3%以内。在考虑相位随机量时,考虑包含各种外界环境因素的统一模型,如果相位随机程度是理论值的

10%以内时,其指向误差能够控制在2.5%以内。

参考文献

- [1] 索国国,汪相如,黄子强,等.傅里叶 $\lambda/4$ 波片双折射检测方法[J].激光技术,2016,40(1):131-135.
- [2] 贺晓娴,汪相如,李曼,等.液晶中波红外光学相控阵关键技术研究进展[J].红外与激光工程,2016,45(8):0830003-1-0830003-6.
- [3] 杜静,汪相如,黄子强,等.液晶的介电各向异性分布对液晶微带线特性的影响[J].红外与激光工程,2016,45(8):0820001-1-0830001-6.
- [4] 汪相如,谭庆贵,黄子强,等.基于液晶相控阵的聚焦式相干合成建模及性能[J].激光技术,2013,37(5):631-635.
- [5] 汪相如,谭庆贵,黄子强,等.基于液晶相控阵的聚焦式相干合成建模及性能[J].激光技术,2013,37(5):631-635.
- [6] 谢文,熊彩东,刘玉民,等.折射率径向平方律变化的增益引导光纤的束缚因子[J].激光与红外,2008,38(1):67-69.
- [7] 戴竞,张敏明,何岩,等.新型液晶光学相控阵的特性研究[J].光子学报,2014,43(2):0223002-1-0223002-6.
- [8] 邹永超,周朴,司磊,等.液晶光学相控阵光束偏转效率研究[J].中国激光,2011,48:061402-1-061402-6.
- [9] 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.
- [10] 于森,朱丽伟,尹龙承.液晶光学相控阵激光雷达系统设计及边缘效应对边瓣影响的研究[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2014,30(1):30-32.
- [11] 韩学勤,李丽,谭东杰,等.液晶光学相控阵技术[J].航空科学技术,2012(1):65-69.

《光电技术应用》期刊栏目介绍

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等。