

文章编号:1002-2082(2017)04-0581-06

基于相控阵雷达模型的液晶光束偏转波控方法研究

杜升平^{1,2,3}, 黄永梅^{1,3}, 付承毓^{1,3}, 郭弘扬^{1,2}

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院 光束控制重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要:针对闪耀光栅模型光束偏转角度数量分布有限的缺点,提出一种基于相控阵雷达模型的液晶光束偏转波控方法。该方法控制液晶电极间相位差,通过改变液晶电极间相位差控制出射光波束方向。使用傅里叶光学方法推导该模型最大偏转角度、光束偏转角度与电极间调制相位关系以及衍射效率和偏转角度的关系。实验证明该方法可实现任意分辨角的光波束扫描,在 0.15° 光束扫描范围内实现优于 $20\ \mu\text{rad}$ 的连续光束偏转。

关键词:液晶;相控阵;闪耀光栅;傅里叶光学

中图分类号: TN985.98

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201738.0402001

Liquid-crystal beam deflection wave control method based on phased array radar

Du Shengping^{1,2,3}, Huang Yongmei^{1,3}, Fu Chengyu^{1,3}, Guo Hongyang^{1,2}

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: The steering approach of blazed grating limits the number and distribution of deflection angles of beam. Aiming at this disadvantage, a new liquid-crystal beam deflection wave control method based on phased-array radar model is proposed. The method controls the same phase difference between liquid crystal electrodes. The beam direction can be controlled by changing phase difference between liquid crystal electrodes. Finally, it is proved by experiment that this method can realize beam scanning with arbitrary resolution, continuous beam deflection accuracy is better than $20\ \mu\text{rad}$ within the range of 0.15° light beam scanning.

Key words: liquid-crystal; phased array; blazed grating; Fourier optics

引言

光束偏转器是自由空间激光通信和激光脉冲整形等领域中的关键器件之一^[1-5]。按实现的途径可分为机械式偏转器、声光偏转器和电光偏转器。机械式光束偏转器件一般体积大、质量大、功耗高,且不易和微电子驱动电路相结合,在有效载荷和柔性控制能力等方面要求较高场合应用受到了

限制。随着激光雷达和光通信技术的发展,基于液晶空间光调制器被开发出来,并且已有商业化产品面世。液晶空间光调制器是一种新型的可编程相位调制器件,它以驱动电压低、相位调制深度深的向列型液晶作为相位调制的电光材料,器件具有体积小、质量轻、功耗低、易于和微电子控制电路结合等独特优点,可以使激光束指向控制更

收稿日期:2016-12-21; 修回日期:2017-02-14

基金项目:中国科学院先导项目(KX-002)

作者简介:杜升平(1977-),男,四川南充人,高级工程师,博士研究生,主要从事非机械式光束偏转研究。E-mail: du_shengping@163.com

灵活,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,在自由空间光通信等领域具有重要的应用潜力。

常用的光束偏转波控方法是利用液晶晶体在电场的作用下产生双折射的原理,通过控制施加液晶单元两极间的电场强度改变出射光的相位,模拟光栅常数可变的闪耀光栅,从而得到所需角度的光束扫描。中科院光电技术研究所的肖文奔基于闪耀光栅偏转模型,利用液晶实现了闭环控制,推算出系统跟踪带宽约为 1.64 Hz,但未报道跟踪精度^[6]。20 世纪 90 年代,一种基于子阵列的粗扫描与精扫描结构相结合的方法被提出,该方法可减小电极寻址数量并实现角度的均匀扫描,但是其精扫描阵列只能实现较小的视场域扫描^[7-8]。近些年来又有一些基于精扫器件结合大角度扫描器件获取连续扫描的方法被提出,精扫器件通常采用液晶相控阵,大角度扫描器件通常采用多重体全息技术、偏光棱镜技术和液晶极化光栅等技术^[9]。上述方法中的液晶空间光调制器的波控模型均是建立在闪耀光栅的基础上,要求各光栅周期内的电极数相同,可实现光栅周期的数量有限,从而使得衍射角度的数量以及分布也受到限制,导致单片液晶空间光调制器在其视场范围内,尤其是大视场范围内无法实现连续扫描,想要实现大角度和高精度的光束偏转,往往需要多片液晶级联,一片实现粗偏转,另一片实现精偏转,这样又增加了系统的难度和算法复杂度。

闪耀光栅的原理是把大部分光能量从零级主级大转移到其他主极大上,液晶模拟闪耀光栅时像素单元的相位变化量呈周期性阶梯状排列以逼近闪耀光栅的锯齿状^[10],其光束偏转角和衍射效率由一个光栅周期内液晶电极数 M 决定。当一个光栅周期内液晶电极数 M 较多时,光栅偏转角较小,衍射效率较大,而一个光栅周期内液晶电极数较小时,光栅偏转角较大,衍射效率较小。随着一个光栅周期内电极数 M 的变化,闪耀光栅模型衍射角度呈离散、不均匀分布,仅可实现有限的角度,且大部分可实现的偏转角度集中在小角度区域,在偏转角度较大的区域,可实现的角度分布变得更加稀疏,在整个可偏转的角度范围内无法实现光束能量的连续偏转,波控受到了较大限制。本文针对闪耀光栅模型的不足,在微波相控阵雷达波束扫描理论基础之上,提出一种液晶相控阵

光束偏转方法,并利用傅里叶光学方法推导该波控方法下光束偏转角度、衍射效率和相位调制量的关系,通过仿真证明光束偏转方法可在不降低扫描效率的前提下,极大地增加单片液晶相控阵器件的可分辨扫描角度数量,并实验验证了该方法在单片液晶上可以实现较高精度的连续角度偏转。

1 相控阵雷达天线的波束扫描方法

为了克服机械扫描运动惯量大,扫描速度不高等缺点,相控阵雷达利用天线阵元间相位或者频率、时间等参量来控制出射波相位。通过在远场某一个角度形成同相相干,其他角度相位不同而相互抵消来实现波束方向控制,其中在阵列天线上采用控制移相器改变各阵元相位的方法称为相位扫描法^[11]。

如图 1 所示, N 个相控阵阵元组成的一维直线移相天线阵,天线各阵元间距为 d ,假设每个阵元为无方向性的点辐射性源,所有阵元的馈线输入端为等幅度同相位馈电,各移相器的移相量分别为 $0, \varphi, 2\varphi, \dots, (N-1)\varphi$,即相邻阵元激励电流之间的相位差为。

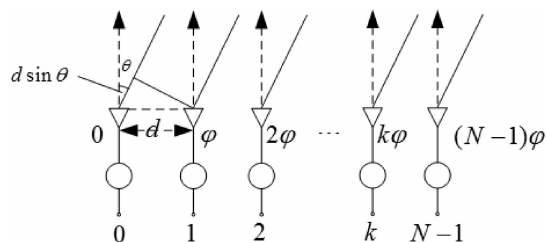


图 1 N 单元直线移相器

Fig. 1 N unit linear phase shifter

偏离法线 θ 方向的远场点场强应为各阵元在该点的辐射场矢量和:

$$E(\theta) = E_0 + E_1 + \dots + E_i + \dots + E_{N-1} = \sum_{k=0}^{N-1} E_k \quad (1)$$

忽略各阵元到该点距离上的微小差别对振幅的影响,可认为各阵元在该点的辐射场振幅相等,以 0 号阵元辐射场 E_0 的相位为基准,则有:

$$E_{(i)} = E \sum_{k=0}^{N-1} e^{ik(\phi - \varphi)} \quad (2)$$

式中: $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$ 为由于波程差引起的相邻阵元辐射场的相位差; ϕ 为相邻阵元激励电流相位差。任一液晶光栅单元辐射场与前一液晶光栅单元辐射场之间的相位差为 $\phi - \varphi$,按等比数列求和,并运

用欧拉公式, (2) 式可以简化为

$$E(\theta) = E \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(\phi - \varphi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(\phi - \varphi)\right]} e^{i\left[\frac{N-1}{2}(\phi - \varphi)\right]} \quad (3)$$

由(3)式可以看出, 当 $\phi = \varphi$ 时, 由于波程差引起的相位差正好与移相器引入的相位差相抵消, 导致各阵元远场分量同相相加, 场强值获得最大值, 此时有:

$$\phi = \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_0 \quad (4)$$

公式(4)可改写为

$$\theta_0 = a \sin \frac{\varphi \lambda}{2\pi d} \quad (5)$$

由(5)式可以看出, 如果阵元间电流相位差 $\varphi \neq 0$, 则远场场强最大值方向就要偏移, 波束偏转角度由相移器的相移量 φ 决定。

2 基于相控阵雷达模型的液晶光束偏转

2.1 光束偏转原理

液晶主要由电极与液晶盒组成, 单个电极与液晶盒一起构成了一个相控单元。在液晶电极上加载不同的电压, 液晶盒中液晶分子在外加电场作用下将发生指向矢偏转, 液晶分子可认为是刚性长棒状分子。当指向矢改变后其折射率 n_e 将发生改变, 入射光通过液晶盒后光程 $l = n_e \cdot l_0$ 也将发生改变, 其中 l_0 为液晶层的厚度, 入射光工作波长固定, 当通过液晶盒光程改变后其出射光相位将发生变化, 因此, 可以通过改变施加到各电极的电压改变液晶各像素单元的 e 光折射率 n_e , 从而改变光在各像素单元中传播的相位差, 即完成相位调制。

控制施加在各液晶电极上电压, 使各液晶电极上保持固定相位差 φ , 假设第一个液晶电极相位为 0, 从第一个液晶电极开始, 相位分布分别为 0, $\varphi, 2\varphi, \dots, (N-1)\varphi$ 液晶面可以模拟成类似相控阵雷达模型的光束偏转模型(图 2)。

在相控单元上加载不同的电压, 可以对入射光产生不同的相位延迟。因而对液晶相控阵列施加一定台阶电压面便可获得阶梯状相位延迟分布, 控制各个液晶单元间电压, 获得类似于相控阵雷达的液晶光学相控阵面。

调制相位为 0, 缝宽 a 的液晶狭缝孔径函数为 $\text{rect}(\frac{x}{a})$, 调制相位为 φ 的狭缝孔径函数可写为

$\text{rect}(\frac{x}{a})\exp(i\varphi)$, 不考虑缝间距, 液晶电极间距差固定为 φ 的液晶光学相控阵孔径函数可以写为^[12]

$$t(x, y) = \text{rect}(\frac{x}{a}) \otimes \sum_{m=0}^N \delta(x - ma) \exp(im\varphi) \quad (6)$$

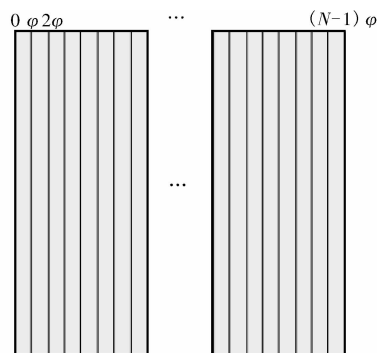


图 2 N 单元液晶光学相控阵

Fig. 2 N unit liquid crystal optical phased array

根据傅里叶光学理论, 只要写出衍射屏上的复振幅分布函数, 便可以通过傅里叶变换法求出透过孔径后衍射场的夫琅禾费衍射光强分布, 所以问题就转化成了对衍射屏处复振幅分布函数的表达。假设单位平面波入射, 则远场观察屏处复振幅为

$$\begin{aligned} \tilde{E}(u, v) &= F(t(x, y)) = F\left\{\text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \otimes \left[\sum_{m=0}^N \delta(x - ma) \exp(im\varphi)\right]\right\} = \\ &= a \text{sinc}\left(\frac{au}{\pi}\right) \cdot \left[\sum_{m=0}^N \exp(-im(2\pi au - \varphi))\right] \end{aligned} \quad (7)$$

利用等比数列求和公式, 公式(7)可整理为

$$\begin{aligned} \tilde{E}(u, v) &= a \text{sinc}\left(\frac{au}{\pi}\right) \cdot \left[\frac{\sin \frac{N(2\pi au - \varphi)}{2}}{\sin \frac{2\pi au - \varphi}{2}}\right] \cdot \\ &\quad \exp\left(i(N-1)\frac{2\pi au - \varphi}{2}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

可得远场观察屏光强分布:

$$\begin{aligned} I &= \tilde{E}(u, v) * \tilde{E}^*(u, v) = a^2 \text{sinc}^2\left(\frac{au}{\pi}\right) \cdot \\ &\quad \left[\frac{\sin \frac{N(2\pi au - \varphi)}{2}}{\sin \frac{2\pi au - \varphi}{2}}\right]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

当 $2\pi au - \varphi = 0$ 时, 公式(9)有极大值, 即光强 I 在该点有最亮点, 又因为 $u = \frac{\sin\theta}{\lambda}$, θ 为观察屏上点与法线夹角, 所以, 光强最大值点:

$$2\pi a \frac{\sin}{\lambda} = \varphi \quad (10)$$

即观察屏上光强最大值点与法线夹角:

$$\theta = a \sin \frac{\varphi \lambda}{2\pi a} \quad (11)$$

公式(11)与公式(5)完全相同,可见,把液晶面看作一个整体,保持液晶电极间相位差固定,通过改变液晶电极间相位差可以改变出射光偏转角度。如果不考虑相控单元相位量化的影响,液晶电极间距相位差 φ 可连续变化,在可扫描区域中,任何可分辨的衍射角度均可实现,可解决闪耀光栅模型偏转角不连续的问题。

图3是液晶光栅电极单元宽度 $1\ \mu\text{m}$,波长为 $532\ \text{nm}$ 光通过相控阵雷达模型液晶光束偏转器,液晶电极间相位差从0到1以 $0.02\ \text{rad}$ 递增,出射光束偏转仿真如图3所示,可见偏转角度随光栅单元间相位差均匀线性增加。通过改变光栅单元间相位差可以实现光束连续偏转,如果电极间相位差变化更小,则可以实现出射光更高分辨率的角度扫描。

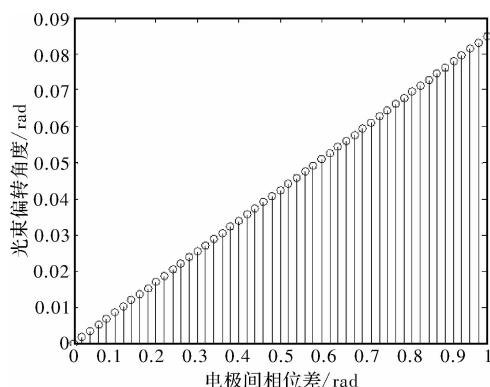


图3 相控阵单元相位差和偏转角度的关系

Fig. 3 Relation between steering angle and phase difference of phased array unit

2.2 衍射效率及最大偏转角度

当 $\varphi=0$ 时,光能量全部集中在 $\theta=0$ 的法线位置处,此时的光束能量 $I_0=1$,将公式(11)代入公式(9),可得各衍射角度上的衍射效率为

$$\eta = \frac{I}{I_0} = \left[\frac{\sin(\varphi/2)}{\varphi/2} \right]^2 \quad (12)$$

根据(12)式可得,当相位差 $\varphi=2\pi$ 时,此时衍射效率为0,有理论最大偏转角度 $\theta_{\max} = a \sin \frac{\lambda}{a}$,和闪耀光栅相同。

同样在液晶光栅电极单元宽度 $1\ \mu\text{m}$,波长为 $532\ \text{nm}$ 光通过相控阵雷达模型的液晶光束偏转器

后偏转角度与衍射效率关系如图4所示。随着偏转角度增大,衍射效率降低,当偏转角度为 $0.5\ \text{rad}$ 时,衍射效率下降到0。与闪耀光栅模型比较,当使用闪耀光栅模型,光栅常数 $M=4$ 时,此时偏转角度 $0.133\ \text{rad}$,衍射效率为 81% ,而使用相控阵雷达模型,偏转角度偏转角度 $0.133\ \text{rad}$,衍射效率仍为 81% ,可见,使用相控阵雷达模型并未降低衍射效率。

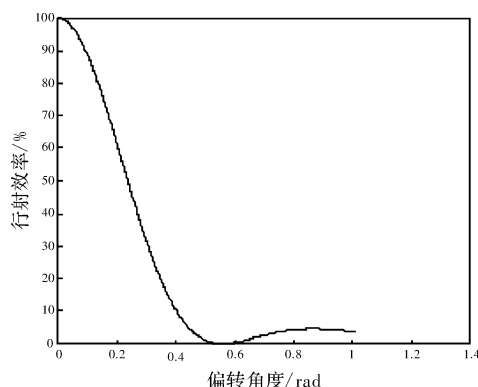


图4 相控阵模型衍射效率和偏转角度的关系

Fig. 4 Relation between diffraction efficiency and steering angle based on phased array radar

2.3 偏转精度分析

由液晶相控阵波控原理可知,偏转角度由光栅单元间距 a 和相控阵单元间相位差 φ 以及入射光波长 λ 决定,所以光栅单元间距、光栅单元间相位差 φ 以及入射光波长 λ 三者任一产生误差都将导致扫描角度误差。由电极 a 值变化带来的误差称为距离误差,而相位值 φ 和入射光波长 λ 带来的误差称为相位误差,距离因素和相位因素往往是同时存在并综合作用的^[13]。

2.3.1 距离误差

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 μm 量级,因此制造工艺难度大。制造误差会使现实中的电极宽度偏离理想值,影响液晶相控阵的扫描精度。单个电极宽度可以认为是相互独立,没有任何特殊的倾向性,因此可以认为液晶电极宽度符合期望值为宽度 a 的正态分布^[14]。

图5是电极宽度均值 $d=6\ \mu\text{m}$,方差分别是 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$,光束偏转误差多次实验平均值后的仿真结果。光束偏转误差在 10^{-4} 量级。其中实线为方差为1的正态模型,虚线是方差为1.5的正态分布模型,从图中可以看出光束偏转误差随着

扫描角度增大有增大的趋势, 且在同一偏转角度下, 电极距离误差方差越大, 偏转角度误差越大。

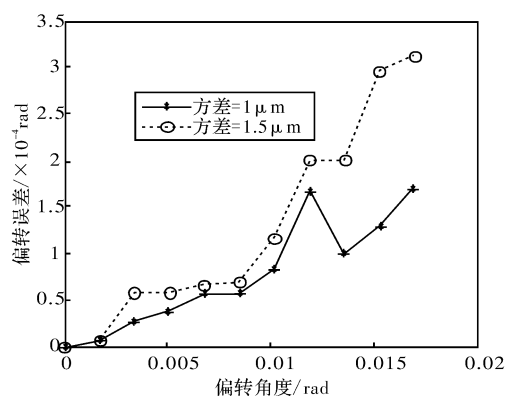


图 5 电极间距误差对偏转角度影响分析

Fig. 5 Analysis of influence of electrode distance error on deflection angle

2.3.2 相位误差

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及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, 这些因素属于相位因素。

液晶电极供电量化误差也会带来各电极间误差。液晶相控阵的波控器在实现过程中, 加载液晶相控单元-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时, 有些电压值只能离散电压值中最靠近它的电压值, 从而产生电压误差, 电压误差将导致相位延迟的误差, 从而影响扫描精度。同距离误差分析类似, 量化误差随光束偏转角度增大没有明显变化趋势, 当量化位数为 8 bit 时, 量化误差带来的光束偏转误差在 10^{-5} 量级, 误差较小。

3 实验验证

实验装置光路图如图 6 所示, 激光器发出的光经过扩束以后进入液晶相控阵, 液晶相控阵将光相位调制后经透镜在远场汇聚到 CCD 传感器上, CCD 采集脱靶量输出后送入计算机存储。

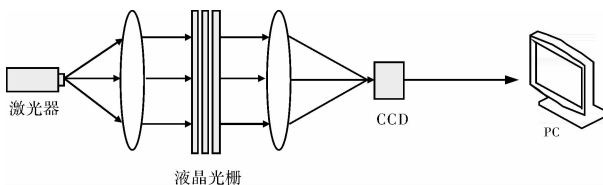


图 6 实验光路图

Fig. 6 Experimental optical path

图 7 是实验装置实物图, 实验中所用液晶是电

子科技大学光电学院研制的纯相位透射式液晶, 液晶光栅共 1 920 个电极, 电极宽度为 $3 \mu\text{m}$, 电极间距为 $2 \mu\text{m}$, 可认为一个电极单元为 $5 \mu\text{m}$ 。实验中先测出液晶的电光调制曲线, 找到电压和相位调制量的关系, 然后根据所需要的相位调制量对每一个电极施加相应的电压, CCD 所测得脱靶量换算为偏转角度和理论偏转角度如图 8 所示。随着液晶相控阵单元对入射光调制相位差的增大, 实测偏转角增加且和理论偏转角基本吻合, 相位符合理论分析, 其偏差正是因为光栅距离误差和相位误差等引起的。图 9 为角度偏转误差随相控阵单元间调制误差的关系, 随着偏转角度增加, 角度偏转误差会增加, 这是因为距离误差造成的精度误差会随着扫描角度的增大而成增大趋势^[13], 这些误差可以通过闭环控制来消除。

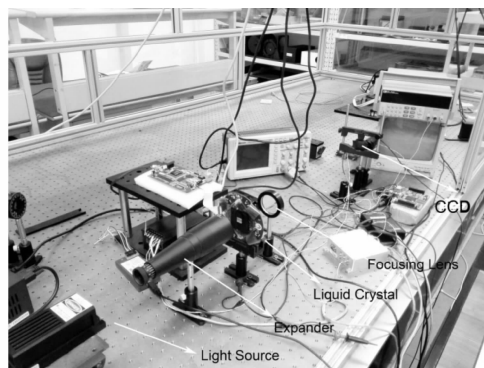


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental device

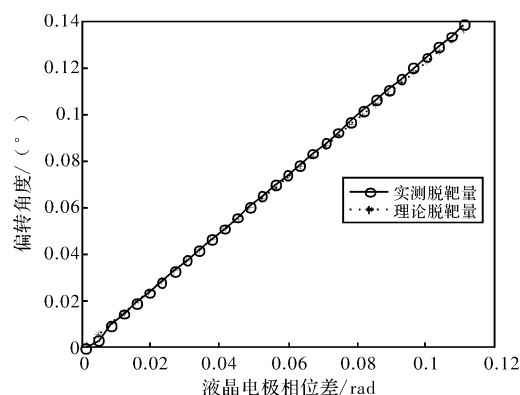


图 8 理论偏转角度和实际偏转角度的比较

Fig. 8 Comparison between theoretical steering angle and actual

4 结论

对液晶光束偏转模型进行了研究, 提出一种基于微波相控阵雷达的波控方法, 该方法控制液

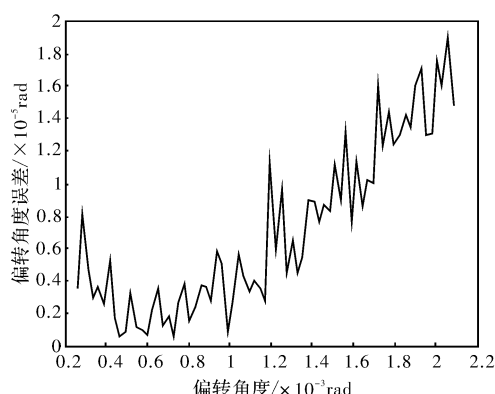


图9 偏转误差随相控阵单元间相位差关系

Fig. 9 Relation between steering error and phase difference

晶电极间相位差,通过改变液晶电极间相位差控制出射光波束方向,经过仿真和实验证明该波控方法理论上可实现在偏转角度内的任意角度光束偏转,很好地解决闪耀光栅的衍射角度离散及分布不均等问题。在不降低闪耀光栅对应衍射角度处的衍射效率情况下,实验证明该方法可实现任意分辨角的光波束扫描,在 0.15° 的光束扫描范围内实现了优于 $20\ \mu\text{rad}$ 的连续光束偏转,分析了液晶光束偏转误差的原因,有助于提高光束扫描精度。

参考文献:

- [1] Mcmanamon P F, Bos P J, Escuti M J, et al. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. IEEE, 2009, 97(6):1078-1096.
- [2] Thomas J A, Fainman Y. Optimal cascade operation of optical phased-array beam deflectors[J]. Applied Optics, 1998, 37(26):6196-6212.
- [3] Desandre L F, Gruneisen M T, Rotge J R. Phased array diffractive wavefront control system for continual agile beam steering and tracking[J]. SPIE, 2004, 5553:83-101.
- [4] Zou Y. Theoretical study on beam steering efficiency of liquid crystal optical phased array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6):061402.
- [5] Nikulin V V, Bouzoubaa M, Skormin V A, et al. Modeling of an acousto-optic laser beam steering system intended for satellite communication[J]. Optical

Engineering, 2001, 40(10):2208-2214.

- [6] Xiao Wenben. Beam deflection control based on liquid crystal optical phased array[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013. 肖文奔. 基于液晶光学相控阵的光束偏转控制技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2013.
- [7] Mcmanamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, et al. Optical phased array technology[J]. IEEE, 1996, 84(2):268-298.
- [8] Dorschner T A, Resler D P. Optical beam steerer having subaperture addressing: USA, 5093740[P]. 1992-03-03.
- [9] Mcmanamon P F, Bos P J, Escuti M J, et al. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems [J]. IEEE, 2009, 97(6): 1078-1096.
- [10] Zhang Cai, Huang Yongmei, Qi Bo, et al. Beam steering control based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9):113-117. 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): 113-117.
- [11] Ding Lufei. Radar principle[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002.
- [12] Song Guicai. Theory and application of physical optics[M]. Beijing, Peking University Press, 2010. 宋贵才. 物理光学理论与应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2010.
- [13] Kong Lingjiang, Yi Wei, Yang Jianyu, 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扫描精度分析[J]. 中国激光, 2009, 36(5):1080-1085.
- [14] BinHongzan, Zeng Qingfu. Mechanical manufacturing technology [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1990. 宾鸿赞, 曾庆福. 机械制造工艺学[M]. 北京:机械工业出版社, 1990.