

文章编号: 0258-7025(2009)05-1080-06

激光雷达液晶相控阵组件扫描精度分析

孔令讲 易伟 杨建宇 宋艳

(电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 610054)

摘要 扫描精度是激光雷达液晶相控阵扫描组件的一个重要指标。提出了一种对液晶相控阵扫描组件扫描精度误差进行定量计算的方法,利用瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)公式精确计算出扫描激光束的远场波束,得到角度误差值,采用角度误差值和 3 dB 主瓣宽度的比值对精度误差进行衡量。利用该方法对电压量化误差、制造误差、高斯预处理三种典型的因素进行了仿真分析,并得到三种误差造成的扫描精度误差量级分别为 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-5} 。因此,激光雷达液晶相控阵扫描组件的设计加工必须考虑加工精度对扫描角度的影响。

关键词 光学器件; 液晶相控阵; 扫描角度; 扫描精度

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1080

Research on Scanning Accuracy of Liquid Crystal Phased Array Component of Laser Radar

Kong Lingjiang Yi Wei Yang Jianyu Song Yan

(Department of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Scanning accuracy of phased-array laser radar is one of the significant features of liquid crystal phased-array component. One method is proposed to obtain the quantitative calculation of the scanning error. Rayleigh-Sommerfeld formula is utilized to figure out the far-field laser beam accurately and the angle errors is gained. Then the scanning error can be measured based on the ratio of angle error to 3 dB main-lobe width. Finally three typical factors which are voltage discreted, manufactural accuracy, and Gaussian pre-processing, are simulated using this method, and it can be concluded that the magnitudes of the scanning errors are on the orders of 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-5} , respectively. Thereby, the impact of the manufactural accuracy on the scanning accuracy must be emphasized for laser radar liquid crystal phased-array component.

Key words optical devices; liquid crystal phased array; scanning angle; scanning accuracy

1 引言

光学相控阵技术^[1]已成为目前激光雷达的重要发展方向,相对于机械扫描,具有扫描精度高、速度快、灵活、体积小、重量轻、功耗低等优点。扫描精度是光学相控阵扫描组件的一个重要性能指标^[1]。M. Kuriharaa 等^[2]分析了温度变化对液晶移相器的影响,而没有从激光雷达系统的角度对液晶移相器的扫描精度进行分析。由于液晶移相器的扫描精度对相控阵激光雷达非常重要,对影响液晶相控阵扫

描精度的因素进行了分析。

光学相控阵的基本构成单元是光移相器,目前光移相器主要基于两类电光材料^[3]:一类是电光晶体 LiNbO_3 , AlGaAs , 另一类是电光陶瓷 PLZT 和液晶。应用 LiNbO_3 , AlGaAs 及 PLZT 研制的光相控阵由于移相器间距很大,不能获得高效大角度光束控制并且小的孔径填充因子使得插损很大,因而不可能获得高性能也不可能实用化。要获得真正能实用化的光相控阵材料必须薄膜化。对于液晶器

收稿日期: 2008-08-05; 收到修改稿日期: 2008-11-19

基金项目: 十一五预研项目(04D1D20W0207150)资助课题。

作者简介: 孔令讲(1974—),男,博士,副教授,主要从事新体制雷达系统与雷达信号处理等方面的研究。

E-mail: ljkong@uestc.edu.cn

件,由于液晶的双折射率较大,液晶层厚度可比电光晶体或陶瓷显著降低,可以降低电场边缘效应和光衍射,因此近期的研究主要集中在采用以液晶为基础的相控阵^[4~7]。

本文介绍了液晶相控阵波控方式的基本原理,对影响液晶移相器扫描精度的三种典型因素:量化误差、制造误差、高斯预处理误差进行了初步的分析研究,并且提出了一种仿真方法。

2 液晶相控阵波控原理

液晶相控阵的原始概念来源于微波相控阵雷达。通过控制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。而激光透过不同双折射率的液晶会产生不同的相位延迟 $\varphi_1 \cdots \varphi_n$,从而控制各电极出射激光束之间的相位关系,使出射激光束在设定的方向上形成等相位波前,产生彼此加强的干涉。于是液晶相控阵便在此方向上得到高强度的激光束能量——主瓣,实现激光波束的扫描^[8~10]。而其他方向上的出射激光束都不满足彼此同相的调制,相互干涉的结果将是彼此相消。

图 1 所示为液晶相控阵波控方式示意图。

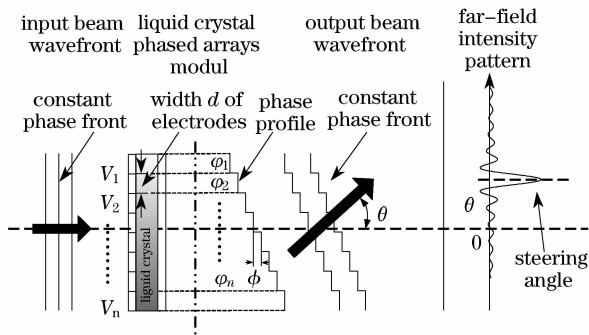


图 1 液晶相控阵原理图

Fig. 1 Principle of liquid crystal phased array

图 1 中 d 为单个相控单元的长度,即电极的宽度,这里的相控单元就是电极, ϕ 为相邻电极的相位差, θ 则为对应的偏转(扫描)角度。由相控阵原理可知它们之间关系为: $\theta = \arcsin\left(\frac{\phi \cdot \lambda}{2\pi d}\right)$ 。其中电极宽度 d 是常量,所以只需更改相邻电极之间的相位差 ϕ ,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,只要 d, ϕ 精确,角度 θ 必然精确。然而在现实中 d, ϕ 会受到各种因素的影响而偏离理想值,这样就会使偏转角度 θ 产生误差,影响液晶相控阵的扫描

精度。

3 液晶相控阵扫描精度

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:精度的高低是以误差的大小来衡量的,误差越小精度越高;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。本文用扫描角度误差 $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_1$ (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, $\xi = \Delta\theta/B_{3\text{dB}}$ 。

由液晶相控阵波控原理可知, d 和 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;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。

4 瑞利-索末菲公式

要对液晶相控阵的扫描精度进行分析,就必须精确地求其扫描角度。在传统的微波相控阵中,是通过叠加计算有限个离散阵元在远场的辐射强度,得到扫描主波束在远场的分部,从而求出其扫描角度。为了计算液晶激光相控阵扫描主波束在远场的分布,对液晶相控阵的光学模型进行了分析。当扫描角度不大于 5° 时,液晶相控阵模型是一个满足近轴条件^[11]的光学衍射模型。根据光学原理,一个满足近轴条件的光学衍射模型可以用夫琅和费公式较准确地计算其远场的波束分部。而夫琅和费公式是为了便于数学计算,在瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)公式的基础上合理近似得到的,所以瑞利-索末菲公式比夫琅和费公式更加精确。通过公式计算后便可获得液晶相控阵模型在远场的波束分布,并获得主瓣峰值位置,即为实际的扫描角度值,以及 $B_{3\text{dB}}$ 。本文的重点是分析扫描角度的精度,所以为了得到更精确

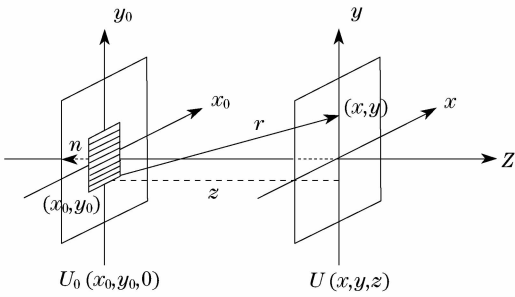


图 2 液晶相控阵光学衍射模型

Fig. 2 Optical diffraction model of liquid crystal phased array

图 2 是液晶相控阵光学衍射模型示意图,液晶相控阵位于 $Z=0$ 平面上,激光束通过液晶相控阵的传播距离为 z ,基于瑞利-索末菲公式可得。在远区位置 $Z=z$ 平面上形成的激光束的光强分布可表示为^[12]:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U_0 \frac{\exp(jk|\mathbf{r}|)}{|\mathbf{r}|} \times \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) ds, \quad (1)$$

式中 λ 为入射激光束波长, U_0 为液晶相控阵出射表面激光束的光强分布, k 非矢量为波数, \mathbf{r} 为 $Z=0$ 的平面上中心坐标为 (x_0, y_0) 的积分面元 ds 到远场 $Z=z$ 观测点 (x, y) 的矢量; \mathbf{n} 为垂直于 $Z=0$ 平面并与 Z 轴方向相反的单位矢量。对于一维光学相控阵, (1) 式又可表示为

$$U(x, z) = \frac{1}{j\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x_0, 0) \times \frac{\exp[jk \sqrt{z^2 + (x - x_0)^2}]}{z^2 + (x - x_0)^2} z dx_0. \quad (2)$$

(2) 式便是符合一维液晶相控阵光学模型的计算公式。由该式计算获得远场波束分布,从而获得主瓣峰值指向角,即实际扫描角度以及 $B_{3\text{ dB}}$ 。

5 影响扫描精度典型因素的仿真分析

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,通过引入误差并利用瑞利-索末菲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:电极个数:500个;电极宽度:5 μm ;激光波长:1.064 μm ;每个电极上的采样点数:20个。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的。同时若设定扫描角度范围为 $0^\circ \sim 0.3^\circ$,扫

描角度个数为 12 个,则可得最小要求实现扫描角度为 0.025° 。由光栅方程 $Nd\sin(\theta) = m\lambda$ 可计算出电极个数 N ,这里 λ 为激光波长, m 为衍射级次,考虑到衍射效率这里选取一级衍射^[13], θ 为扫描角度, d 为电极宽度, N 为每个光栅周期内的台阶个数即电极个数。因此可计算出最小角度时对应的最大 N 值,则电极个数的选取需大于该值。对应扫描角度为 0.025° 时 $N=487.7017$,考虑到计算量故选择电极个数为 500 个。

5.1 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— D/A 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。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。图 3 为扫描角度为 0.07° , D/A 量化位数为 6 位时,理想相位延迟分布图与有电压量化误差的相位延迟分布图的对比图。

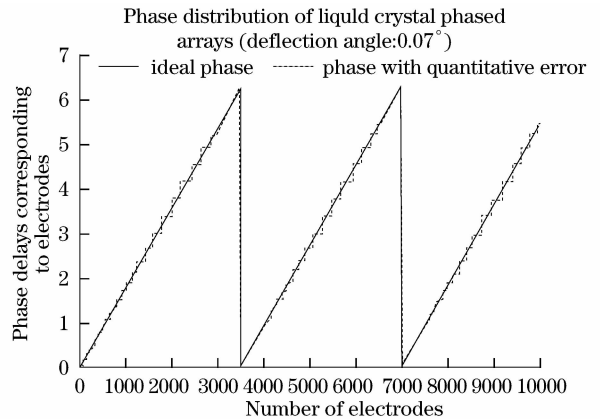


图 3 理想相位分布和有量化误差的相位分布图

Fig. 3 Distribution of ideal phase and the phase with quantitative error

图 3 中的“大阶梯”就是因为有些相控电压值无法产生,用最接近离散电压值代替的结果。这样的“大阶梯”会导致 ϕ 的误差,对扫描精度造成影响。本文利用瑞利-索末菲公式(2), $U_0(x_0, 0)$ 表示有量化误差的液晶相控阵出射表面的光强分布主要指相位延迟分布,对 $0^\circ \sim 0.3^\circ$ 之间等间隔的 12 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。横坐标表示偏转角度,纵坐标表示精度误差 ξ 。

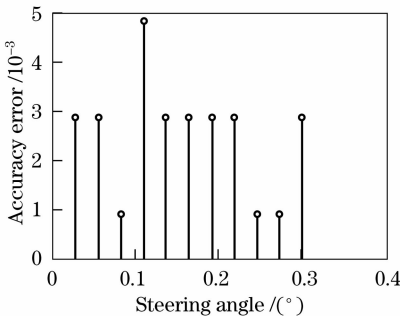


图4 量化误差扫描精度误差图

Fig. 4 Error of quantization error scanning accuracy

从图4可以看出,量化误差造成的精度误差 ξ 的量级为 10^{-3} 。

5.2 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些的误差,有些电极会被加宽,有些电极会缩短,导致 d 的误差,从而对激光雷达的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。通过综合分析和实际调查,由于加工电极数目多,单个电极的加工误差由许多相互独立的随机因素引起,而且这些误差因素中又都没有任何特殊的倾向^[14]。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,正态模型能最真实地体现现实中的制造误差,其函数表达式为: $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ 。其中 x 为分布

的概率密度, μ 为均值, σ 为标准差。图5是对正态模型的仿真结果,其中图5(a)是均值为0,方差为1的正态分布,图5(b)是均值为0,方差为1.5的正态分布。图中的纵坐标表示电极宽度,横坐标表示电极个数。图5(a)中直线表示理想的电极宽度值,而围绕着直线正态分布的离散点,表示实际的电极宽度。图中大多数的点会落在直线上或者偏离真线不远,只有少量的点会远离直线,且偏离直线越远的地方点会越少。不难看出图5(b)中偏离直线的点更多,因为方差越大,表示误差工艺的剧烈程度越大,会有更多的电极偏离理想的宽度值。

基于误差模型,再利用瑞利公式进行仿真,结果如图6所示。横坐标表示偏转角度,纵坐标表示精度误差 ξ ,这里的 ξ 值是多次仿真实验的均值。实线代表方差为1的正态模型,虚线代表方差为2的正态模型。从图中可以看出,量化误差造成的精度误

差 ξ 的量级为 10^{-2} ,并且精度误差 ξ 一方面随着扫描角度的增大而成增大趋势,另一方面,对于相同的角度精度误差也随方差的增大而成增大趋势。

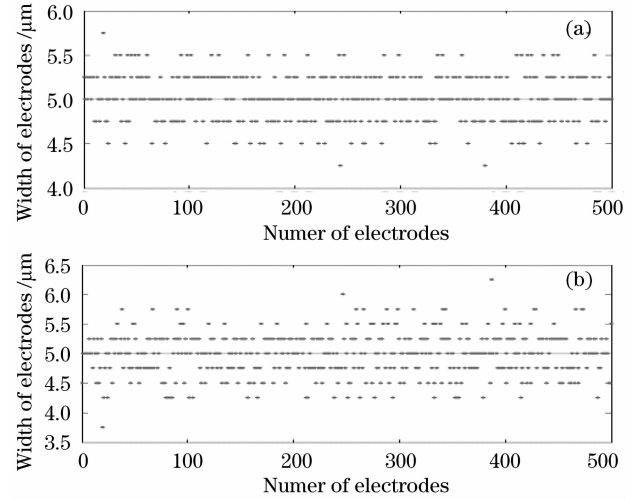


图5 电极宽度制造误差分布图

Fig. 5 Distribution of electrode width manufacturing error. (a) variance 1; (b) variance 2

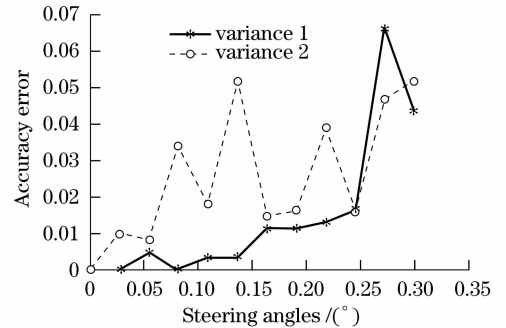


图6 制造误差扫描精度误差图

Fig. 6 Error of manufacturing error scanning accuracy

5.3 高斯预处理因素

激光束液晶相控阵入射激光束并不是理想的等相位激光束,而是高斯光束^[15]。在均匀透明介质中,高斯光束沿 Z 轴方向传播的光场分布为

$$E = \frac{c}{w(z)} e^{-\frac{x^2}{w^2(z)}} e^{-j[k(z + \frac{z^2}{2R(z)}) + \phi(z)]}, \quad (3)$$

式中 c 为常数因子, z 为激光束传输距离, x 为沿光束截面半径方向的坐标(标量),

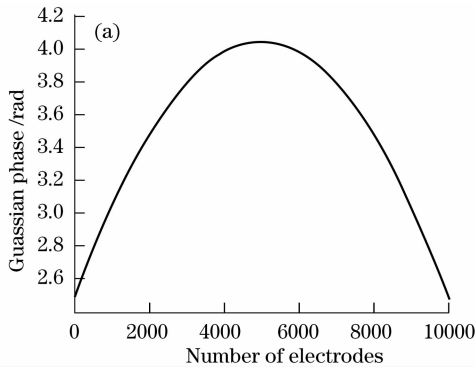
$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right], \quad (5)$$

$$\phi(z) = \arctan \frac{\lambda z}{\pi w_0^2}, \quad (6)$$

(4)~(6)式分别表示高斯光束的截面半径、波面曲面半径和相位因子。这里依据激光器的性能取高斯

光束的束腰半径 ω_0 为 $675 \mu\text{m}$, 截面半径 $\omega(z) = 500 \times 5/2$ 。由式(4)可求出 z , 由式(5), (6)可获得 $R(z)$ 和 $\phi(z)$, 从而获得高斯光束的相位分布仿真结果



如图 7(a)所示。如果采用高斯光束作为液晶相控阵的入射光束, 那么其远区光束分布图如图 7(b)所示, 将产生主瓣“分叉”的现象, 严重影响扫描精度。

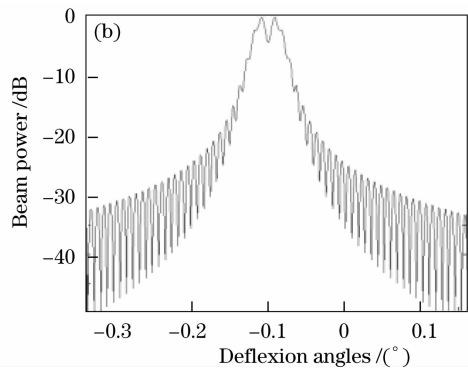


图 7 高斯光束相位分布图 (a) 及其对应的光束分布图 (b)

Fig. 7 Distribution of Gaussian beam phase (a) and far beam pattern (b)

为了有效控制高斯光束扫描, 必须对高斯光束进行“相位预处理”, 即在加载相控电压的时候, 提前考虑到高斯相位影响, 并把其影响抵消掉, 这样才能使出射激光束形成满足要求的等相位面。在进行相位预处理的过程中, 由于高斯相位是连续的, 而相控电压是阶梯形的, 这样就会出现出射激光束相位面的抖动, 导致 ϕ 的误差。图 8 是进行高斯修正后出射激光束相位分布图, 其中(a)是整个液晶相控阵的出射激光相位分布图, 图(b)~(d)分别为电极采样点

序号为 1220~1340, 4700~4780, 7700~7800 的相位延迟放大图。从图中可以看出, 高斯修正对出射激光束相位分布的影响会根据高斯光束自身的相位分布不同而不同, 在两边部分, 高斯光束相位变化剧烈, 所以影响较大。在中间部分高斯相位变化缓慢, 所以几乎没有影响。另外如 (b), (d) 所示, 在两边由于高斯光束相位变化斜率不同, 对出射激光束造成的影响也不一样。

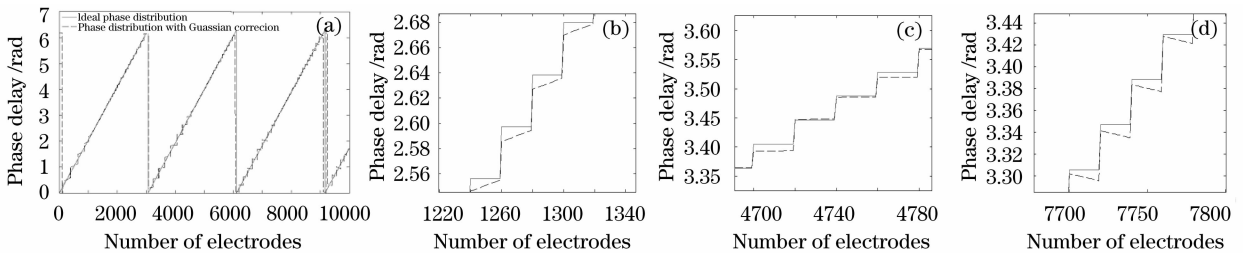
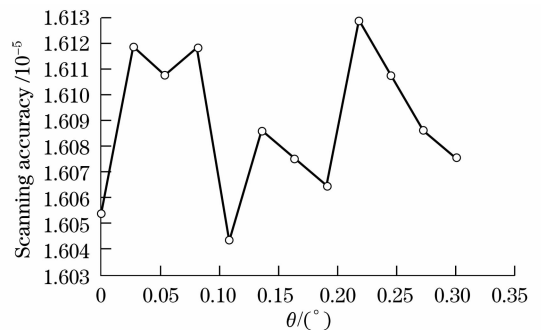


图 8 高斯修正后出射光束的相位分布

Fig. 8 Phase distribution of output beam with Gaussian correction, (a) phase distribution of ideal wavefront and wavefront Gaussian correction; (b) left part figure of the phase distribution; (c) middle part figure of the phase distribution; (d) right part figure of the phase distribution

利用瑞利-索末菲公式对 $0^\circ \sim 0.3^\circ$ 之间等间隔的 12 个扫描角度的扫描精度进行计算仿真。仿真结果如图 9 所示, 横坐标表示偏转角度, 纵坐标表示精度误差 ξ 。仿真结果证明, 高斯预处理造成的精度误差 ξ 的量级为 10^{-5} 。



6 结 论

对液晶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

图 9 高斯预处理扫描精度的误差分布

Fig. 9 Error of Gaussian pretreatment scanning accuracy

进行了仿真。电压量化、高斯预处理造成的精度误差 ξ 的量级分别为 10^{-3} 和 10^{-5} 。它们都是引起激光束相位面围绕理想相位面的“上下抖动”。电极制造工艺因素造成的精度误差 ξ 的量级为 10^{-2} , 要比前两种因素大, 而且随着制造误差的加剧和扫描角度的变大, 其对扫描精度的影响会越来越大。

参 考 文 献

- 1 P. F. Mcmanamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology[C]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2): 268~298
- 2 M. Kuriharaa, N. Hashimoto. Liquid crystal optics for laser beam modulation[C]. *SPIE*, 2006, **6374**:63740D
- 3 Liang Hongqiu, Yang Chuanren, Zhang Jihua *et al.*. Application of electro-optic materials in optical phased array technology[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2007, **2**:32~34
梁鸿秋, 杨传仁, 张继华 等. 电光材料在光学相控阵技术中的应用[J]. *电工材料*, 2007, **2**:32~34
- 4 Xinghua Wang, Bin Wang, Philip J. Bos *et al.*. Modeling and performance limits of a large aperture high-resolution wavefront control system based on a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Opt. Eng.* 2007, **46**: 044001
- 5 X. Wang, B. Wang, P. J. Bos *et al.*. Modeling and design of an optimized liquid-crystal optical phased array[J]. *Appl. Phys.*, 2005, **98**:073101-1
- 6 Y. Lin, M. Mahajan, D. Taber *et al.*. Compact 4 cm aperture transmissive liquid crystal optical phased array for free-space optical communications[C]. *SPIE*, 2005, **5892**:58920C
- 7 J. Stockley, S. Serati. Advances in liquid crystal beam steering [C]. *SPIE*, 2004, **5550**:32~39
- 8 Cai Dongmei, Yang Huizhen, Ling Ning *et al.*. Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):491~495
蔡冬梅, 杨慧珍, 凌 宁 等. 液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):491~495
- 9 Ruan Shengping, Ma Ji, Liu Yonggang *et al.*. Preparation of novel polymer dispersed liquid crystal grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 369~372
阮圣平, 马 骥, 刘永刚 等. 新型聚合物分散液晶相位光栅的制备[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 369~372
- 10 Zheng Jihong, Zhong Yangwan, Cai Mingrong *et al.*. Fabrication of electrical-controlled polymer dispersed liquid crystal switchable-focus holographic lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1107~1110
郑继红, 钟阳万, 蔡明荣 等. 电控聚合物分散液晶变焦全息透镜制作[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1107~1110
- 11 Huang Wanyun. Fourier Optical Tutorial[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing House, 1985
黄婉云. 傅里叶光学教程[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985
- 12 Li Changjun, Chen Bojing, Fan Bingze *et al.*. The Kirchhoff transfer function and Rayleigh-Sommerfeld transfer function of diffraction[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(1):87~89
李俊昌, 陈劲波, 樊则宾 等. 衍射的基尔霍夫传递函数及瑞利-索末菲传递函数[J]. *光电子 • 激光*, 2002, **13**(1):87~89
- 13 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1231~1235
张翠玉, 黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7):1231~1235
- 14 Bing Hongzan, Zeng Qingfu. Machine Manufacture Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1994
宾鸿赞, 增庆福. 机械制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 15 Yu Daoyin, Tan Yingheng. Engineer Optics[M]. Beijing: China Machine press, 1999
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999