

基于斜率近似的液晶相控阵指向精度修正算法

周 妍 孔令讲 潘 斐 肖 锋 艾 越

(电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘要 液晶相控阵的指向精度受到各种因素的影响。简单分析了影响液晶相控阵指向精度的几个关键因素,同时提出了一种指向精度修正算法。该算法利用单个电极内的相位近似斜率代替实际拟合波阵面斜率,通过不断调节电压台阶高度降低近似斜率与理想斜率的差距,从而降低精度误差,提高指向精度。仿真结果显示,在合理选择影响因子参数值来最大限度降低误差因素对指向精度影响的前提下,通过算法优化,归一化精度误差仍能降低 95% 以上,明显改善指向精度;同时液晶的最大相位延迟会限制相位的实现范围,对算法产生影响,适当调整最大相位延迟可进一步精确相位实现,提升算法的性能。

关键词 光学器件;液晶相控阵;指向精度;斜率近似;电压台阶修正

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s214001

Steering Accuracy Correction Algorithm of Liquid Crystal Phased Array Based on Slope Approximation

Zhou Yan Kong Lingjiang Pan Fei Xiao Feng Ai Yue

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract Steering accuracy of liquid crystal phased array (LCPA) is effected by kinds of factors. The paper analyzes some important factors that affect steering accuracy of LCPA, and a steering accuracy correction algorithm is proposed. The algorithm uses approximate slope of phase in a single electrode instead of slope of fitting wave front to decrease difference between approximate slope and ideal slope in the way of adjusting voltage staircase constantly, that reduces accuracy error and improves steering accuracy. Simulation results show that normalized accuracy error can still be reduced by more than 95% under the condition of minimizing accuracy influences by reasonable parameter setting, and steering angle is improved significantly; Meanwhile the maximum phase delay can limit the range of phase realization and further effect performance of algorithm. Appropriate maximum phase delay can achieve phase accurately and enhance performance of algorithm.

Key words optical devices; liquid crystal phased array; steering accuracy; slope approximation; voltage staircase correction

OCIS codes 050.1950; 230.1950; 230.3720

1 引 言

液晶相控阵技术由于其体积小、质量轻、能耗低、无惯性偏转等优点^[1~4],逐渐成为激光雷达的发展趋势,占据着核心地位。在科技日益发达的今天,

能否将波束能量传播至指定的位置进行精确扫描或者目标探测已显得尤为重要。指向精度作为衡量波束性能的重要指标之一,越来越引起重视。而光学器件之间的相互作用(边缘效应、占空比等)和技术

收稿日期: 2012-05-24; **收到修改稿日期**: 2012-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61178068)资助课题。

作者简介: 周 妍(1988—),女,硕士研究生,主要从事液晶相控阵相位恢复及波前优化等方面的研究。

E-mail: zgz578165044@163.com

导师简介: 孔令讲(1974—),男,博士,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(通信联系人)

手段的不成熟(液晶特性曲线测量、电压量化位数等),均会使偏转角度偏离理想角度,降低波束的指向精度。

影响波束质量的因素主要有液晶特性曲线、边缘效应、占空比、电压量化位数等,不当的参数设置会导致严重的波阵面畸形,降低波束质量,影响指向精度。Hallstig等^[5]提出利用电压与相位之间的比例关系进行精度修正,但由于液晶的非线性特性,无法精确测量比例关系,改善效果不明显。孔令讲等^[6,7]提出了一种基于相位台阶修正的优化方法,但只考虑到相位量化一种误差。

本文根据先前的研究成果,简单介绍了几种影响波束指向的主要因素,根据影响效果给出适当的参数值范围。然后针对各种因素的综合影响,提出一种指向精度修正方法,该方法用每个电极的近似相位斜率代替传统的拟合波阵面斜率,以减少近似斜率与理想波阵面斜率之间的差距为目标不断调整电压代码,从而提高指向精度。仿真结果表明该算法能有效地修正角度偏差,归一化精度可以降低95%以上,极大地改善指向精度。

2 影响因素分析

首先对文中用到的物理量进行说明,归一化精度误差 ϵ_{norm} 定义为实际偏转角度和理想角度的差值与波束宽度之比:

$$\epsilon_{\text{norm}} = \frac{\theta_{\text{error}} - \theta_{\text{ideal}}}{\theta_{\text{spot}}}, \quad (1)$$

式中波束宽度 $\theta_{\text{spot}} = \frac{\lambda}{Nd}$, λ 为激光波长, N 为电极总数, d 为相邻电极中心距离。 ϵ_{norm} 的正负代表了实际偏转角度相对于理想角度的偏转方向(正表示相对于理想角度偏大,负则相反),其值越接近零,波束指向越精确。

液晶的影响因素可以影响入射光的相位分布,从而影响出射波的强度分布,导致波束偏转发生变化,偏离理想角度。这里主要考虑以下几种影响因素(以下仿真参数设置为偏转角度 0.6° , 波长 $1.064 \mu\text{m}$, 电极数 64, 电极宽度 $5 \mu\text{m}$):

1) 液晶特性曲线

液晶的电光特性使其在加载电压时,出射光相位出现相应延迟,若在多个液晶上加载不同的电压,则会出现不同的相位延迟,形成波阵面。电压与相位延迟的对应关系即为液晶特性曲线,一般由实验测量得到,但由于测量手段的不精确反而会引入更

大的误差。仿真中一般以巴特沃兹滤波器模拟近似液晶特性曲线,其表达式为

$$\Phi = f_{\text{max}}/[1 + (v/V_c)^A], \quad (2)$$

式中 f_{max} 为液晶可实现的最大相位延迟, V_c 为相位延迟下降到一半时的对应电压, A 为特性参数。参数值的选取和液晶的制造厚度、宽度等特性有关,图 1 为 $f_{\text{max}} = 2\pi$, $V_c = 2$, $A = 4$ 时的液晶特性曲线图。

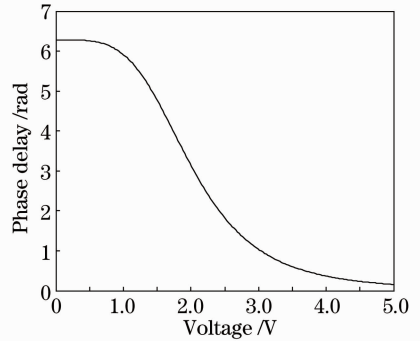


图 1 液晶特性曲线

Fig. 1 Characteristic curve of liquid crystal

2) 电极制造误差

液晶的体积非常小,在制造中难免会引入误差,使液晶盒表面不平整,影响波束的指向精度。液晶的这种不平整会引入多余的相位起伏误差^[8]:

$$\Phi(x) = 2\pi B \cos \left[2\pi \left(\frac{x - x_{\text{midpoint}}}{D} - 0.5 \right) \right], \quad (3)$$

式中 B 表示峰谷值的一半, x 代表盒表面的位置, x_{midpoint} 表示液晶移相器阵列的孔径中心位置, D 表示液晶移相器的宽度。图 2 给出了不同 B 值对归一化精度误差 ϵ_{norm} 的影响。

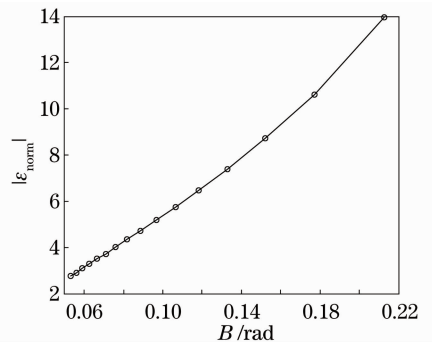


图 2 不同 B 值下的归一化精度误差

Fig. 2 Normalized accuracy error under different B values

由图 2 可以看出, B 值越小,归一化精度误差越小。对光强分布的影响就越小。为了减少工艺误差对指向精度的影响,应尽量降低 B 值的大小。然而由于液晶加工技术的限制,即使优良的加工技术也

只能达到 $B=\lambda/20=0.0533$ 左右,即在选择合适的 B 值后,归一化精度误差仍达到 3 左右,此误差不可忽略,本仿真条件下取 $B=0.0533$ 。

3) 占空比及边缘效应

由于制造工艺的原因,液晶之间的排列通常存在间隙,电极宽度与相邻电极中心距离之比即为占空比。理论上相邻电极之间的输出相位会存在凹区,但液晶之间的粘稠性使得电极边缘的相位受到相邻相位的影响,在相位跨度较大的地方形成回扫区域,从而使波阵面趋于平滑,即边缘效应,效果如图 3 所示。

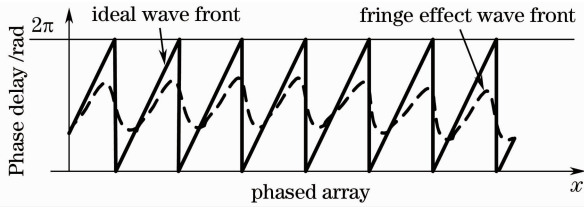


图 3 理想波阵面及受边缘效应影响的波阵面
Fig. 3 Ideal wave front and influenced fringe effect by wave front

为了具体研究边缘效应对指向精度的影响,建立数学模型^[9~11]:

$$\phi(x) = \varphi(x) \otimes G(x), \quad (4)$$

式中 $\varphi(x)$ 表示理想的出射波阵面, $\phi(x)$ 表示受边缘效应影响的波阵面, $G(x)$ 表示边缘效应的展宽核函数,满足公式 $G(x) = \exp(-x^2/\chi^2)$, χ 为展宽核函数的截面半径。图 4 给出了 $\chi = 3 \sim 12 \mu\text{m}$ 条件下的归一化精度误差效果图。

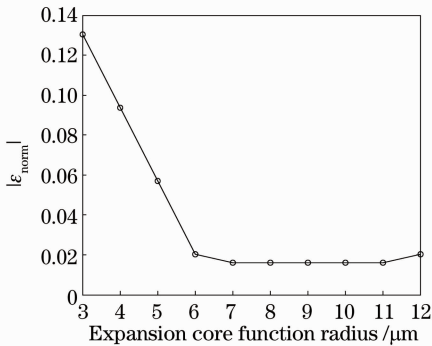


图 4 展宽核函数半径对归一化精度误差影响
Fig. 4 Influence of expansion core function radius on normalized accuracy error

由图 4 可知,边缘效应的平滑作用弥补了占空比带来的相位骤变,改善了指向精度。 χ 值在 [7, 11] 范围内对指向精度的影响较小,在 0.02 左右。 χ 的取值范围不仅与电极宽度、电极间距、盒厚等因素有关,还受液晶材料的特性的影响,本仿真条件下取

$\chi = 7 \mu\text{m}$ 。

4) 电压量化

一般的液晶电压是通过芯片驱动实现的,而芯片不可能连续实现所有电压值,因此电压量化的数量将决定相位的可选择程度。图 5 给出了电压量化位数对精度的影响。

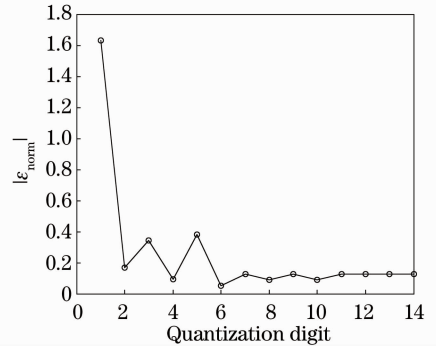


图 5 电压量化位数对精度误差影响

Fig. 5 Influences of voltage quantization digit on normalized accuracy error

由图 5 可知,当电压量化位数超过 6 时,对指向精度的影响已变得很小且趋于稳定,归一化精度误差在 0.15 左右。理论上电压位数越多时,可选择的相位数量就越多,指向精度自然变高,但过多的量化位数会给系统额外增加负担,因而一般折中选择量化位数 6~8。

综合以上误差分析,电极制造、边缘效应、电压量化造成的最小归一化精度误差分别在 3.00、0.02、0.15 左右,即 10^0 、 10^{-2} 、 10^{-1} 数量级。可见由制造误差造成的精度影响最大,边缘效应影响最小。

合理参数选择只能减少影响因素对指向精度的影响,却不能消除影响因素,且误差因子对指向精度的影响是一个综合过程,并非单纯的误差叠加。所以,在合理选择参数值的同时,还要对各种误差因子综合考虑,通过优化算法重新调整实际情况下电压与偏转指向的对应关系,以此来减小误差因素的影响。

3 算法原理及仿真分析

3.1 算法原理

根据光栅方程公式^[12],光束的偏转角度与相邻电极的恒定相位差有关

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda\varphi}{2\pi d}\right), \quad (5)$$

式中 φ 为相邻电极相位差,也就是波阵面的平均斜率,所以偏转角度由波阵面的平均斜率决定^[13]。通过不断减小实际波阵面斜率与理想波阵面斜率之间

的差距即可使偏转角度逐渐靠近理想角度,提高指向精度。

考虑到以上几种影响因素,提出了一种指向精度修正方法。该方法对电极进行循环优化,每次循环以所有电极为优化对象,首先比较单个电极近似斜率与理想波阵面斜率 φ 大小,以减少两者之间差距为目的,通过增加或减小电极电压调整电压台阶,找出减少两者差距的代码。以下为对所有电极进行一次循环优化的步骤:

设置参数总电极数为 N ,电压代码为 $1 \times N$ 维向量 \mathbf{y} ,初始值 $i=1$,以单个电极的两端采样相位差近似其斜率,波阵面理想平均斜率为 k ,第 i 个电极近似斜率为 k_i ,差值 $\Delta k = k_i - k$;

1) 若 $i > N$,结束本次循环,否则计算 k_i ,得出 Δk ,中间替代量 $k_1 = \Delta k$,若 $\Delta k = 0$,则本次循环中无需优化此电极, $i = i + 1$,返回1),若 $\Delta k > 0$,转4);

2) 若 $\mathbf{y}(i) = 1$,则无法降低代码,结束此电极优化, $i = i + 1$,返回1),否则 $\mathbf{y}(i) = \mathbf{y}(i) - 1$,再次计算 k_i ,得出 Δk ;

3) 若 $\Delta k > 0$,设置中间变量 $k_2 = \Delta k$,比较 k_1 与 k_2 绝对值大小,取绝对值较小的值对应的电压代码为更新代码, $i = i + 1$,返回1),否则 $i = i + 1$,返回1);

4) 若 $\mathbf{y}(i) = 2^M$,则已达到代码最大值,无法增加代码,结束此电极优化,令 $i = i + 1$,返回1),否则 $\mathbf{y}(i) = \mathbf{y}(i) + 1$,再次计算 k_i ,得出 Δk ;

5) 若 $\Delta k < 0$,设置中间变量 $k_2 = \Delta k$,比较 k_1 与 k_2 绝对值大小,取绝对值较小的值对应的电压代码为电极最优代码,令 $i = i + 1$,返回1),否则直接令 $i = i + 1$,返回1)。

流程图如图6所示。

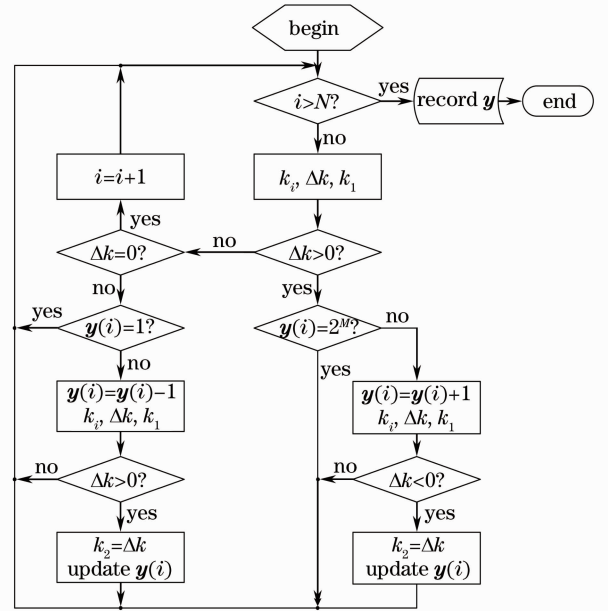


图6 算法流程图

Fig. 6 Flow chart of algorithm

3.2 仿真结果及分析

仿真参数设置为波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$,电极数 $N = 64$,相邻电极距离 $d = 5 \mu\text{m}$,占空比 80%,电压范围 $0 \sim 5 \text{ V}$,量化位数 $M = 6$,边缘效应核函数截面半径 $\chi = 7 \mu\text{m}$,液晶盒加工波动幅度值 $B = \lambda/20$,液晶特性曲线 $f_{\text{max}} = 2\pi$,对理想偏转角度 0.6° 下的精度误差进行修正。效果图如图7所示。

由图7可知,修正前的偏转角度 0.59° 与理想角度 0.6° 有一定偏差,归一化精度误差 $\epsilon_{\text{norm}} = 2.0980$,优化后的偏转角度已十分接近于 0.6° ,归一化精度误差降为 $\epsilon_{\text{norm}} = 0.0652$,降低了 96.89%,修正了波束偏转方向,提高了指向精度。图8给出了优化前后的波阵面分布。

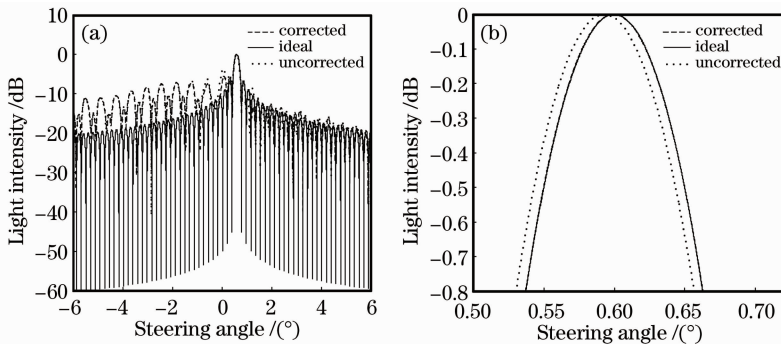


图7 优化前后远场光强分布对比图。(a)原图;(b)放大图

Fig. 7 Comparison of light intensity distribution in the far field before and after optimization. (a) Original; (b) amplified

从图8可以看出,优化后的波阵面相较于优化前更贴近于理想波阵面,但在顶端受到了液晶最大

相位延迟的限制,无法进一步优化。为了使优化性能更好,将 f_{max} 值扩展到 3π 进行比较。

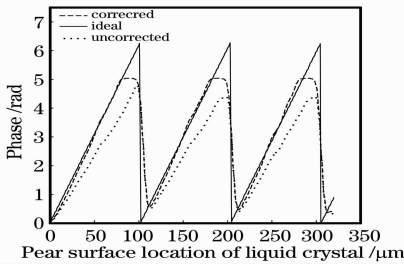


图 8 优化前后波阵面

Fig. 8 Wave front before and after optimization

与图 8 比较,图 9 的波阵面在相位顶端得到了较好的优化,最大值提升 1.3 rad 左右,达到理想相位最大延迟,更接近理想波阵面。图 10 给出了优化前后电极代码的变化情况。

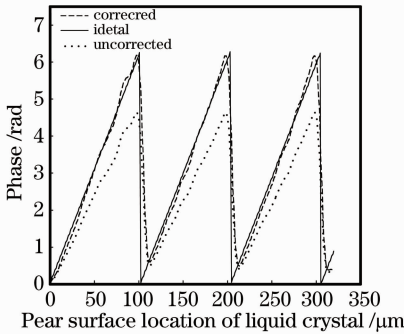
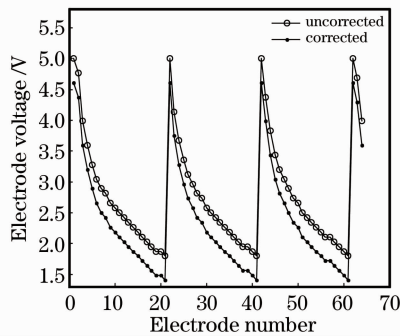
图 9 $f_{\max} = 3\pi$ 时优化前后波阵面Fig. 9 Wave front before and after optimization with $f_{\max} = 3\pi$ 

图 10 优化前后电极电压变化

Fig. 10 Voltage changes of electrode before and after optimization

为了便于比较 f_{\max} 值对指向精度的影响,表 1 列举了在不同 f_{\max} 值下的优化效果。

由表 1 可以看出,在一定范围内 ($2\pi \sim 4\pi$),随着 f_{\max} 值的增大,优化后的归一化精度误差 ϵ_{norm} 逐渐减少,超过此范围, ϵ_{norm} 将保持在一个恒定值,不再下降。这是由于在 ($0 \sim 4\pi$) 范围内的相位已不会限制电压台阶的变化,继续增大 f_{\max} 对优化已经没有效果。所以针对此优化结果,可选取 $f_{\max} = 4\pi$ 的

液晶特性曲线进行优化,最大程度提升优化性能。

表 1 不同 f_{\max} 值下的 ϵ_{norm} 值Table 1 Values of ϵ_{norm} among different f_{\max} values

| f_{\max} | 2π | 3π | 4π | 5π | 6π |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ϵ_{norm} | 0.0652 | 0.0286 | 0.0081 | 0.0081 | 0.0081 |

综上可得,各种误差因素的影响削弱了相位的延迟程度,使得在加载理想电压时,得到的实际波阵面较理想波阵面偏低。优化后,电极电压相较于优化前有所下降,与误差影响相互作用,得到的实际相位与理想相位更为贴近。所以在实际情况下,必须重新调整电压与相位之间的关系,以较大的相位延迟来减小误差因素带来的影响,可以在理想加载电压的基础上,相对减小电压值,获取在液晶特性曲线上相对较大的相位,以此抵消误差因子的影响程度。

4 结 论

液晶的各种误差影响到波束的指向精度,降低波束质量。分析了影响指向精度的几个主要因素,在此基础上提出基于单个电极斜率近似的修正算法。算法以减少单个电极内相位近似斜率与理想波阵面斜率之间差距为目的,逐个调整电压台阶为手段,不断优化直至提高指向精度。仿真结果显示,此算法能够将归一化精度误差降低 95% 以上,明显地降低角度偏转误差,提高指向精度。除此,不同的液晶最大相位延迟会对优化效果产生影响,可通过适当调整最大相位延迟值来提高算法性能。

参 考 文 献

- 1 P. F. McManamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology [J]. *IEEE*, 1996, **84**(2): 268~298
- 2 S. Harris. Characterization and application of a liquid crystal beam steering device[C]. *SPIE*, 2001, **4291**: 109~119
- 3 J. Harriman, S. Serati, J. Stockley. Comparison of transmissive and reflective spatial light[C]. *SPIE*, 2005, **5930**: 59302D
- 4 I. Anisimov, S. R. Harris, B. K. Stadler. Characterization of an optical phased array for use in free space optical communication antennas[C]. *SPIE*, 2008, **7091**: 709105
- 5 E. Hallstig, J. Stigwall, M. Lindgren. Laser beam steering and tracking using a liquid crystal spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2003, **5087**: 13~23
- 6 Kong Lingjiang, Yi Wei, Yang Jianyu *et al.*. Research on scanning accuracy of liquid crystal phased array component of laser radar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1080~1085
- 7 孔令讲, 易伟, 杨建宇等. 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
- 7 Lingjiang Kong, Ying Zhu, Yan Song *et al.*. Beam steering approach for high-precision spatial light modulators[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1085~1089
- 8 C. M. Titus, J. Pouch, H. Nguyen *et al.*. Diffraction efficiency of thin film holographic beam steering devices[C]. *SPIE*, 2002,

4825: 177~188

- 9 R. G. Lindquist, J. H. Kulick, G. P. Nordin *et al.*. High-resolution liquid-crystal phasegrating formed by fringing fields from interdigitated electrodes[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(9): 670~672
- 10 B. Apter, U. Efron, E. Bahat-Treidel. On the fringing-field effect in liquid-crystal beam-steering devices[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(1): 11~19
- 11 U. Efron, B. Apter, E. Bahat-Treidel. Studies of fringing field effects in liquid crystal beam-steering devices[C]. *SPIE*, 2005,

5936: 59360P

- 12 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2002. 267~276
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 267~276
- 13 Huang Wanyun. Fourier Optical Tutorial[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1985. 94~115
黄婉云. 傅里叶光学教程[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985. 94~115

栏目编辑: 胡 冰