

一种高精度液晶相控阵指向修正算法

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 电压的量化位数限制了波阵面相位的选择范围,导致波束的偏转角度偏离理想角度,从而降低指向精度。指向精度是液晶相控阵(LCPA)性能的重要指标之一。提出了一种提高指向精度的优化算法。该算法以最优化理论为依据,采用模式搜索方法,通过调整电压台阶的方式进行优化。首先分析了电压量化指向精度的影响,建立了波控模型,然后利用模式搜索法,以减小实际角度与理想角度之间偏差为目标进行相应的电压台阶修正。仿真结果表明,在扫描角度范围内,该算法能将归一化精度误差从 10^0 数量级降至 10^{-3} 数量级,优化效果显著。

关键词 光学器件;液晶相控阵;指向精度;模式搜索;电压台阶修正

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.012301

A Steering Correction Algorithm of Liquid-Crystal Phased Array with High Precision

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 Quantization digit of voltage limits the choice scope of wave front phase, causes actual angle deviating from ideal angle, and further decreases steering accuracy. Steering accuracy is one of the most significant performance indexes of liquid-crystal phased array (LCPA). An optimization algorithm is proposed aiming at improving steering accuracy. The algorithm is based on optimization theory; it adopts method of pattern search to optimize objective using the way of adjusting voltage staircase. The influence of voltage quantization on steering accuracy is analyzed first, and then model of wave control is established. Last the decreasing of deviations between actual angle and ideal angle is taken as objective to correct corresponding voltage staircases using pattern search. Simulation results show that the algorithm can decrease normalized accuracy error from order of 10^0 to 10^{-3} in the range of scanning angles, which is remarkable.

Key words optical devices; liquid-crystal phased array; steering accuracy; pattern search; voltage staircase correction

OCIS codes 230.1950; 230.3720; 050.1950

1 引言

液晶相控阵(LCPA)雷达以其体积小、能耗低和无惯性^[1~4]等优点,逐渐代替传统的机械扫描雷达而占据该领域的核心位置。指向精度作为衡量其性能的重要指标之一,越来越引起重视。然而电压量化引入的误差,使得某些相位无法实现,形成高度不同的阶梯型波阵面,导致实际偏转角度偏离理想角度,降低指向精度,从而不能进行精确的扫描定位。

Emil Hallstig^[5]提出利用电压与相位之间的比例关系进行指向精度修正,但由于液晶特性曲线的非线性

收稿日期: 2012-06-24; 收到修改稿日期: 2012-08-04; 网络出版日期: 2012-10-24

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)

性特性,无法精确得出电压与相位的比例关系,改善效果不明显。孔令讲等^[6]分析了电压量化对指向精度的影响,但未给出修正说明。D. Engstrom^[7]分析了相位均匀量化引入的误差,并提出了一种整体抬升波阵面高度的修正方法,但没有考虑到通过电压实现的相位是非均匀的。

考虑到电压量化引入的误差,提出了一种基于模式搜索^[8]的电压台阶修正算法。通过直接计算远场波束的归一化精度误差,采用模式搜索法,以步长为跨度提升或降低电压台阶,找出可以减小角度偏差的电压代码并进行更新,以此类推优化所有电极。仿真结果表明,在可扫描角度范围内,该算法能将归一化精度误差从 10^0 数量级降至 10^{-3} 数量级,明显减小实际偏转角度与理想角度之间的差距,改善指向精度。

2 影响因素及系统建模

首先对相关的物理量进行说明,以远场光强分布最大值对应的角度作为偏转角度。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,表达式为

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

式中 $\theta_{\text{spot}} = \frac{\lambda}{Nd}$ 为波束宽度, λ 为激光波长, N 为电极总数, d 为相邻电极中心距离,电极宽度和相邻相位差会影响角度的偏离程度 $\theta_{\Delta} = \theta_{\text{error}} - \theta_{\text{ideal}}$,但却不会影响 θ_{spot} 的大小。 θ_{Δ} 已可以说明角度之间的偏差,但其值往往需要很高的表达精度,所以与 θ_{spot} 之比进行归一化处理来方便表示。 ϵ_{norm} 的正负代表了实际偏转角度相对于理想角度的方向(正表示相对于理想角度偏大,负则相反),其值越接近零值,指向精度越高。 ϵ_{norm} 的绝对值 $|\epsilon_{\text{norm}}|$ 则显示了角度之间的偏离程度。

2.1 影响因素分析

电极由液晶构成,液晶的电光特性使得电压与相位之间存在非线性的对应关系,一般用巴特沃兹滤波器幅频特性进行模拟,表达式为

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

式中 Φ 为相位延迟, P_{max} 为液晶可实现的最大相位延迟, v 为电压, V_c 为相位延迟下降到一半时的电压值, A 为曲线的特性参数。由于波阵面是 2π 置位,考虑到液晶加载电压的承受能力及制造厚度的限制^[9],一般取 $P_{\text{max}} = 2\pi, V_c = 2, A = 4$ 。

根据光栅方程公式^[10],波束的偏转角度与相邻电极的相位差有关:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda\varphi}{2\pi d}\right), \quad (3)$$

式中 λ 为激光波长, d 为相邻电极中心距离, φ 为相邻电极相位差。由于光栅至少由两个电极组成,波束最大角度为

$$\theta_{\text{max}} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right), \quad (4)$$

即理想的波束扫描范围在 $[-\theta_{\text{max}}, \theta_{\text{max}}]$ 之间。通过在不同液晶上加载不同的电压,即可在电极之间实现不同的相位延迟,实现波束的偏转^[11]。

然而,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。电压波形由正、负半周期波形对称构成,正半周期高电平对应着均方根电压(个数为电压量化可实现的个数),电压代码与电压的关系可表示为

$$V_n = \sqrt{\frac{nV^2}{2^M}}, \quad (5)$$

式中 V 为最大电压, M 为量化位数, n 为电压代码序列。为了说明电压量化引起的相位不均匀实现,图 1 给出了示意图(代码序列间隔均扩大到 10 倍)。

由(5)式可知,当电压代码 n 越大时,相邻可选取电压之间的差距越小,电压分布越密,导致整个电压范围的选择为从疏到密的方式,从而在相位延迟较大时无法实现精细的选择,如图 1(b)所示。由(3)式可知,在大角度偏转下,相位取值较大,而可选择的相位较少,会引起较大的角度偏转误差。所以,相对于小角度,

大角度下的角度偏差将会更明显。

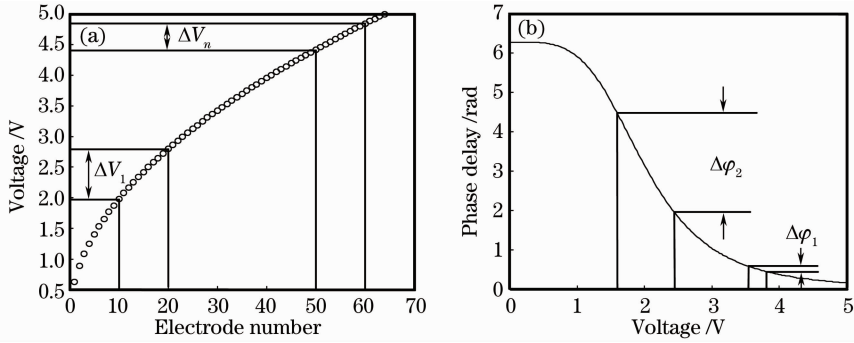


图 1 相位实现示意图。(a)电压实现;(b)相位实现

Fig. 1 Sketch of phase realization. (a) Voltage realization; (b) phase realization

考虑电压量化的影响,并结合单个电极内只能实现一种相位的情况,实际的输出波阵面为台阶高度不同的阶梯形状,与理想的直线型波阵面存在误差,导致远场波束偏转角度 θ_{error} 偏离理想角度 θ_{ideal} ,造成角度偏差 θ_{Δ} ,如图 2 所示。

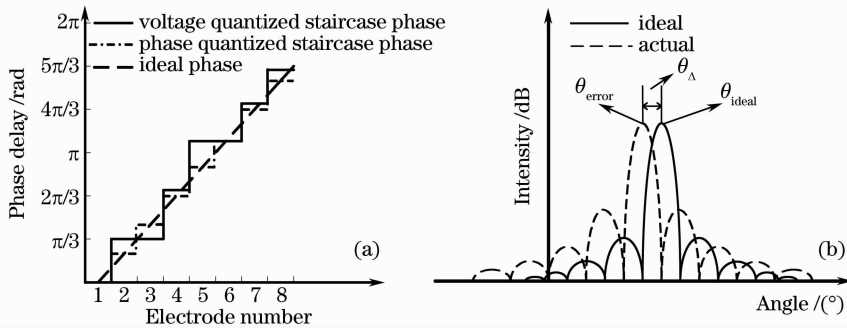


图 2 波阵面及波束强度分布示意图。(a)波阵面;(b)光强分布

Fig. 2 Sketch of wave front and intensity distribution of beam. (a) Wave front; (b) light-intensity distribution

2.2 系统建模

根据以上误差分析,建立系统模型:

- 1) 利用液晶特性曲线,根据可实现电压找出对应的相位来近似所需相位,反推得出实际电压及初始电压代码;
- 2) 利用傅里叶变换将波阵面转换为远场光强分布;
- 3) 通过远场光强分布计算归一化精度误差 ϵ_{norm} 。

算法最终的目的是降低实际偏转角度与理想角度之间的偏离程度,故选取 $|\epsilon_{\text{norm}}|$ 作为优化依据,以不断减小 $|\epsilon_{\text{norm}}|$ 为准则。而归一化精度 ϵ_{norm} 可以反映优化前后的角度相对于理想角度的位置变化(偏大或者偏小),所以选取 ϵ_{norm} 作为衡量算法的性能指标。

3 算法原理及仿真结果分析

3.1 算法原理

模式搜索法^[8]通过寻找具有较小目标函数值的方向,在迭代的过程中沿搜索方向逼近最优点,由此得出最优解。该方法是一种比较直观的搜索方法,但由于是直接对波束的角度偏差进行优化,不需要利用其它信息,故没有引入新的误差,所以能最大限度的进行优化。本算法以减少 $|\epsilon_{\text{norm}}|$ 作为优化目标,对每个电极台阶抬高或者降低进行搜索,找出可以减小 $|\epsilon_{\text{norm}}|$ 的代码,更新数据,以此类推对每个电极进行优化。

算法详细步骤如下:

- 1) 设置 N 个电极的初始电压代码 $D = [n_1, n_2, \dots, n_N]$,计算出初始归一化精度误差 ϵ_{norm} ,初始中间变量设置为 $\epsilon_d = |\epsilon_{\text{norm}}|$;

2) 以步长 δ 为跨度依次对其中一个电极的电压台阶进行提升 (或降低), 计算归一化精度误差 $\epsilon_{\text{norm_up}}$ ($\epsilon_{\text{norm_down}}$), 若可使 ϵ_d 降低, 则更新数据 D 、 $\epsilon_{\text{norm}} = \epsilon_{\text{norm_up}}$ ($\epsilon_{\text{norm}} = \epsilon_{\text{norm_down}}$) 及 ϵ_d ($\epsilon_d = |\epsilon_{\text{norm}}|$), 以相同方式继续优化下个电极。否则, 不更新;

3) 在上一轮所有电极搜索中均没有数据更新 (不满足修正条件), 则说明此时步长较大, 需要减小步长: 若 δ 已降至 1, 则无法调整电压台阶进行修正, 此时对应的电压代码即为最优代码。否则 $\delta = \delta/2$, 返回步骤 2) 以新步长继续优化。流程图如图 3 所示。

3.2 仿真结果及分析

本仿真参数设置: 入射激光波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, 电极总数 $N = 64$, 电压量化位数 $M = 4$, 占空比 100%, 相邻电极中心距离 $d = 5 \mu\text{m}$, 偏转角度 $0^\circ \sim 6.1078^\circ$, 步长初始值 $\delta = 8$ 。

为了验证算法的有效性, 对所有可扫描角度范围 $[0, \theta_{\text{max}}]$ (即 $0^\circ \sim 6.1078^\circ$) 内 611 个点进行仿真 ($[-\theta_{\text{max}}, 0]$ 与 $[0, \theta_{\text{max}}]$ 情况相同, 不需重复仿真), 比较优化前后 ϵ_{norm} 值的变化。

由图 4(a) 可看出, 与理想角度分布线相比, 实际偏转角度分布线存在弯曲现象 (两端和中间画圈处较明显), 从图 4(b) 的局部放大图可以更清楚地看出, 优化前的偏转角度相较于理想角度存在一定偏差, 严重降低了指向精度。在归一化角度 0.68° (实际角度 4.08° , 画圈处) 时偏差较明显, 初始归一化精度误差为 $\epsilon_{\text{norm}} = -6.3997$, 图 5 给出了优化后的角度偏转分布图。

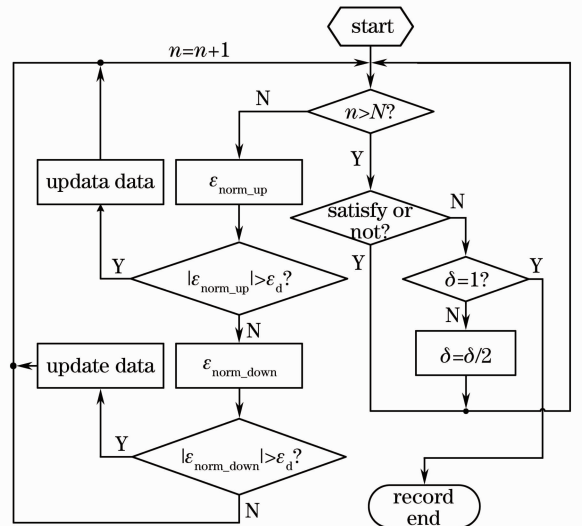


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

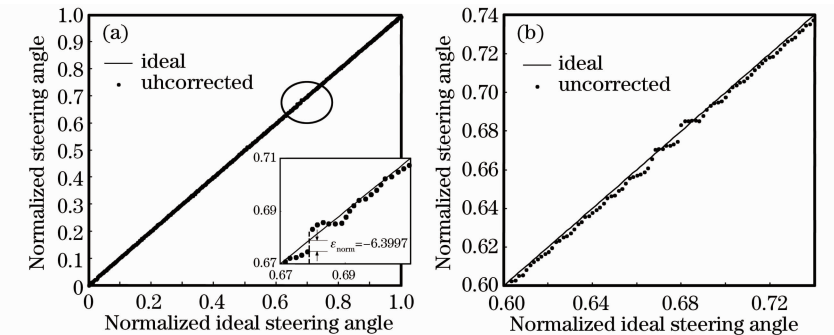


图 4 优化前角度偏转分布图。(a) $[0, \theta_{\text{max}}]$ 角度范围内; (b) 局部放大图

Fig. 4 Steering angle distribution before optimization. (a) Original; (b) locally amplified

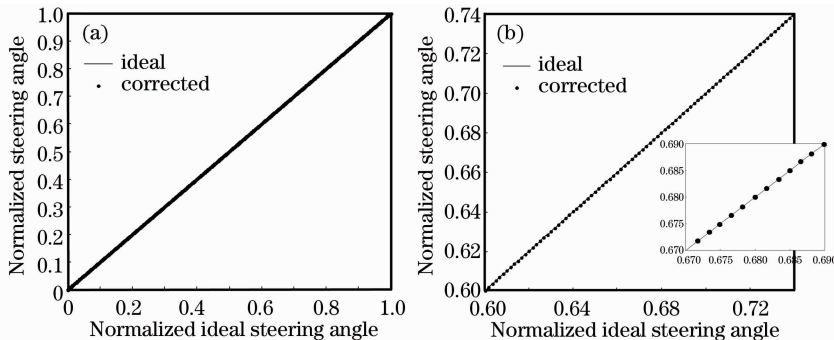


图 5 优化后角度偏转分布图。(a) $[0, \theta_{\text{max}}]$ 角度范围内; (b) 局部放大图

Fig. 5 Steering angle distribution after optimization. (a) Original; (b) locally amplified

从图 5 可以看出,优化后的角度偏转已经十分接近理想偏转角度,几乎与理想下的角度偏转分布一致,效果明显。图 6 继续给出了优化后的归一化精度误差值 ϵ_{norm} ,用数据验证算法的有效性。

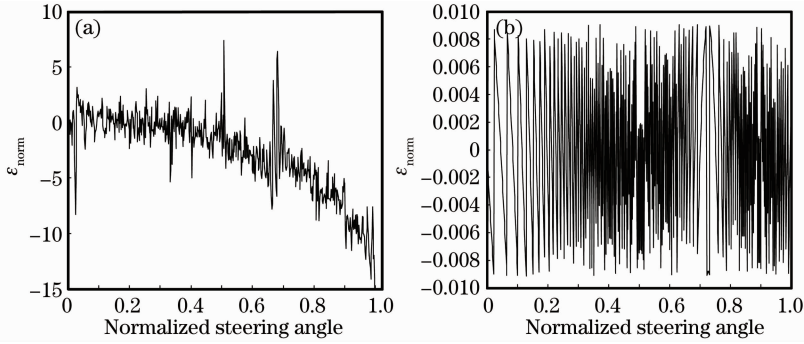


图 6 优化前后归一化精度误差分布图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 6 Normalized accuracy error distribution before and after optimization. (a) Uncorrected; (b) corrected

图 6 的数据显示,优化前的 ϵ_{norm} 与零值差距较大(即 $|\epsilon_{\text{norm}}|$ 值较大),存在较大的角度偏差,且随着角度的增大,偏差也随之变大,验证了之前提出的大角度下可选择相位较少导致误差较大的理论分析。优化后 $|\epsilon_{\text{norm}}|$ 下降显著(优化前为 10^0 数量级,而优化后只有 10^{-3} 数量级),明显改善了波束的指向精度。图 7 给出了图 4 误差较大处 4.08° (归一化角度 0.68°)优化前后远场光强分布图。

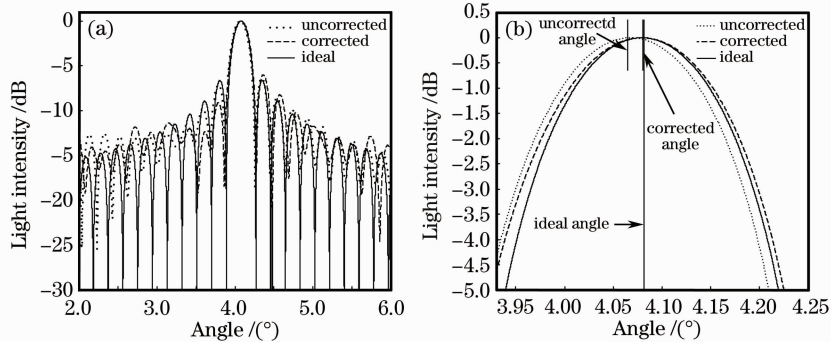


图 7 修正前后光强分布对比图。(a)原图;(b)放大图

Fig. 7 Comparison of light intensity distribution before and after correction. (a) Original; (b) amplified

由图 7 可看出,优化后的波束指向已经修正到了理想角度方位。由仿真计算得出优化前偏转角度与理想角度相差 $2.11 \times 10^{-2} (^\circ)$,优化后的波束指向与理想偏转角度仅相差 $8.25 \times 10^{-6} (^\circ)$,根据(1)式(本仿真中 $\theta_{\text{spot}} = 0.0033^\circ$)进行归一化处理即可计算出 ϵ_{norm} 从初始的 -6.3997 优化至 0.0025 ,极大地减小了角度偏差,波束指向得到修正,图 8 给出了此角度下优化前后电压加载情况。

为了直观地从角度偏转方面体现优化前后的差距,选取角度范围 $[0, \theta_{\text{spot}}]$ ($[0^\circ, 0.0033^\circ]$) 内 111 个点进行优化,结果如图 9 所示。

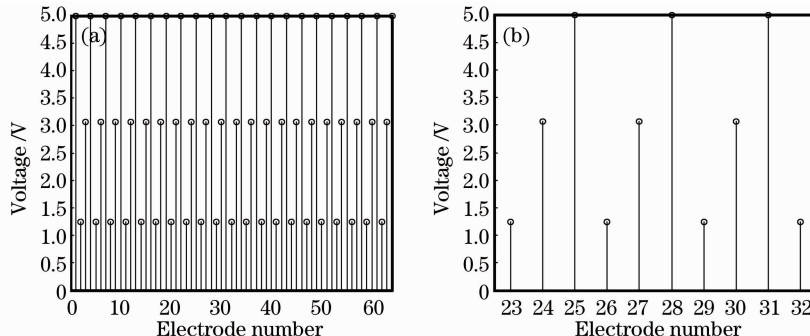


图 8 修正后各电极电压实现。(a)原图;(b)放大图

Fig. 8 Voltage realization after correction. (a) Original; (b) amplified

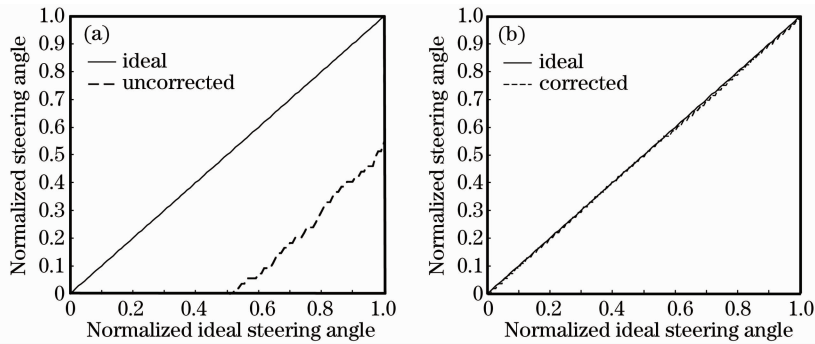


图9 角度偏转分布图。(a)未修正;(b)已修正

Fig. 9 Distribution of angle steering. (a) Uncorrected; (b) corrected

图9中,优化前的偏转角度分布与理想角度分布有明显的差距,优化后的角度基本与理想角度重合。考虑未优化角度偏转情况,在归一化角度 $[0^\circ, 0.5^\circ]$ 内(实际角度 $[0^\circ, 0.0016^\circ]$),角度没有偏转,这是由于角度在接近 0° 时,相邻电极之间的相位变化非常微弱,与所有电极相位最接近的可选择相位均为一个值,使得最终实现的电极相位没有任何差别,导致波束未发生偏转。优化后的角度通过抬高电极之间的相位差值消除了部分影响,改善了指向精度。

4 结 论

电压量化使得相邻电极相位差值不恒定,出射波阵面为高度不同的阶梯形状,从而导致远场波束偏转方向存在偏差,降低了指向精度。本算法直接选取归一化精度误差为优化对象,以最优化理论为依据,采用模式搜索方法,通过调整电压台阶的方式进行优化,从而降低偏转误差,提高指向精度。仿真结果显示,该算法能将归一化精度误差从 10^0 数量级降低至 10^{-3} 数量级,优化效果显著。

参 考 文 献

- 1 P. F. McManamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology[C]. 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**: 605~614
- 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. Laser beam steering and tracking using a liquid crystal spatial light modulation[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
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 D. Engstrom, J. Bengtsson, E. Eriksson *et al.*. Improved beam steering accuracy of a single beam with a 1D phase-only spatial light modulator[J]. Opt. Express, 2008, **16**(22): 18275~18287
- 8 Chen Baoling. Optimization Theory and Algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 332~336
陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 332~336
- 9 R. A. Soref, M. J. Rafuse. Electrically controlled birefringence of thin nematic films[J]. J. Appl. Phys., 1972, **43**(5): 2029~2036
- 10 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
- 11 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