

一种新的液晶相控阵组件波控方法

孔令讲¹ 朱 颖¹ 杨建宇¹ 张翠玉²

(¹ 电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 610054; ² 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 对于激光雷达中液晶相控阵组件, 如何选取一定数量的扫描角度, 使得光束扫描能够覆盖整个视场范围并满足扫描指标的要求是一个崭新的问题。提出了一种基于二元光栅波控模型的液晶相控阵组件扫描角度筛选方法; 该方法利用二元光栅波控模型对液晶相控阵组件的光束扫描进行控制, 并将扫描视场均匀覆盖、光束最大副瓣大小与衍射效率作为扫描角度筛选的约束条件, 通过遍历对比的方式实现扫描角度的筛选。仿真结果表明该筛选方法有效可行。

关键词 光学器件; 光学相控阵; 扫描角度; 二元光栅; 液晶相控阵

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1961

A New Method of Scanning Angles Screening of Liquid Crystal Phased Array Component

Kong Lingjiang¹ Zhu Ying¹ Yang Jianyu¹ Zhang Cuiyu²

¹ School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

² School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract Regarding the liquid crystal phased array component of radar, how to select a certain amount scanning angles so as to satisfy the conditions that the light-beams of all scanning angles can cover the field of view and meet the scanning index is a brand-new problem. This paper proposes a method of scanning angles screening based on the beam-steering model of binary grating. In the method, the scanning angles are obtained by using a traversal algorithm. The beamsteering model of binary grating is used to steer the light beam and the uniform coverage of the field of view, maximum sidelobe level, diffraction efficiency are regarded as constraint conditions of scanning angles screening. The simulation results from Matlab show that the method is effective and feasible.

Key words optical decices; optical phased array; scanning angles; binary grating; liquid crystal phased array

1 引 言

激光相控阵雷达是将相控阵技术引入激光雷达而引申出的一种全新概念的雷达系统。激光相控阵雷达的研究对于促进其它平台雷达完备性发展具有重要意义。在激光相控阵雷达中, 移相器阵列可由液晶相控阵组件实现。液晶相控阵组件主要是利用液晶晶体在电场的作用下, 可以产生双折射的原理, 通过控制加在各相控阵元两极间的电场强度, 改变出射

光的相位, 进而在口径内模拟一个带有可编程偏转角度的闪耀光栅, 从而得到所需角度的光束扫描^[1~7]。

闪耀光栅其本身是一种光学器件, 它的刻槽面与光栅面不平行, 两者之间有一夹角, 这样可将光能量转移并集中到某一级光谱上去, 实现该级光谱的闪耀。闪耀光栅在制作出来后, 其光栅周期与闪耀级次都已确定^[8]。而液晶相控阵组件所模拟的闪耀光栅能够随意更改其光栅周期与闪耀级次。其中光栅周

收稿日期: 2008-08-11; 收到修改稿日期: 2008-11-07

基金项目: 国家“十一五”预研资助。

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研究。

Email: ljkong@uestc.edu.cn

期由闪耀光栅内相控阵元的个数决定,闪耀级次由闪耀光栅内相控阵元的最大移相值决定。不同光栅周期、闪耀级次的闪耀光栅对应着不同的光束偏转角度^[3]。通过改变闪耀光栅的光栅周期与闪耀级次,就可以产生数量庞大的偏转角度,但其中包含许多不必要、无意义的冗余偏转角。因此如何在数量庞大的偏转角度中筛选出一定数量的偏转角度作为液晶相控阵组件扫描角度,同时又使得液晶相控阵组件光束扫描能够满足扫描指标要求并实现扫描视场均匀覆盖,就成了液晶相控阵组件研究中的重要问题。

本文提出了一种基于二元光栅波控模型的液晶相控阵组件扫描角度筛选方法。该方法根据扫描视场均匀覆盖为要求建立一组参考扫描角度。参考扫描角度需满足光束最大副瓣大小与衍射效率的约束条件。利用该参考扫描角度与数量庞大的可实现偏转角度进行遍历对比,可完成扫描角度筛选。其中约束条件中的各个指标是在结合国内工艺技术水平与初期系统可行性实验的初期指标基础上确定的。

2 液晶相控阵组件波控模型

液晶相控阵组件波控模型能够描述出射激光的相位分布情况,通过波控模型能够控制液晶相控阵组件,使得出射光束偏向预设角度,从而实现激光光束的扫描。在理想情况下,液晶相控阵的出射激光相位分布,可以用闪耀光栅模型描述^[1]。而在实际情况下,由于相控阵元本身具有一定的宽度,因此实际的出射激光相位分布为阶梯状分布,这与光学器件中的二元光栅非常类似^[8]。因此本文引用了一种二元光栅波控模型,此模型能够很好地描述此阶梯状相位分布。

二元光栅是光学工程中迅速发展的一类光学器件,利用锯齿形的相位轮廓逼近闪耀光栅。它继承了闪耀光栅的纯相位、同轴再现、极高衍射效率等优点^[9]。在二元光栅波控模型中,液晶相控阵组件的每个光栅周期被分成 N 个微小台阶,每个台阶对应一个相控阵元(其中 $N \geq 2$, 因为单个相控阵元无法构成相位斜面),相邻相控阵元移相差为 $2\pi m/N$, 其中 m 为闪耀级次, N 为单个光栅周期内的相控阵元个数。

图 1 为闪耀光栅与二元光栅的示意图^[8]。图 1 (b)中二元光栅的台阶数为 N 、光栅周期为 d ,相控阵元宽度为 $d' = d/N$ 、阶梯深度 Δh 为相邻相控阵元的移相差值。闪耀光栅与二元光栅都遵循光栅方程^[8~10]:

$$d \sin \theta = m \lambda, \quad (1)$$

式中 θ 为偏转角度, m 为闪耀级次, λ 为入射激光波长。

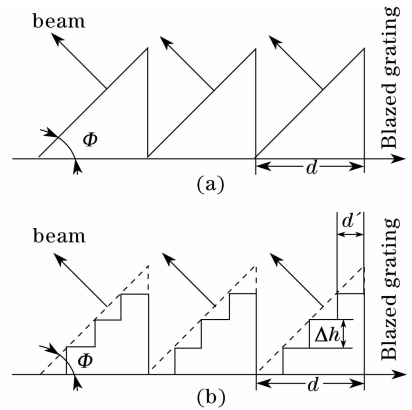


图 1 光栅示意图。(a) 闪耀光栅; (b) 二元光栅

Fig. 1 Two kinds of grating. (a) blazed grating;

(b) binary grating

由光栅方程可知,在激光波长一定的情况下,改变二元光栅波控模型的光栅常数与闪耀级次,就可以得到不同的偏转角度。假设液晶相控阵组件有 500 个相控阵元,则最多能形成 499 种光栅周期。如果每种光栅周期只取前 4 级闪耀角,理论上就能形成 1996 个偏转角度,但这其中包含了很多冗余的或不满足约束条件的偏转角度。

为了从这所有的可实现偏转角度中,提取出一定数量满足约束条件并且能均匀覆盖视场范围的偏转角,作为液晶相控阵的扫描角度,就需要制定一个系统的扫描角度筛选方法,用于对可实现偏转角度进行筛选。

3 扫描角度筛选

3.1 扫描角度筛选方法

图 2 为扫描角度筛选初步思路。图 2 中参考扫描角度可看作理想扫描角度,作为扫描角度筛选的参考依据,液晶相控阵不一定能够实现这些角度上的光束偏转。可实现偏转角度由液晶相控阵本身决

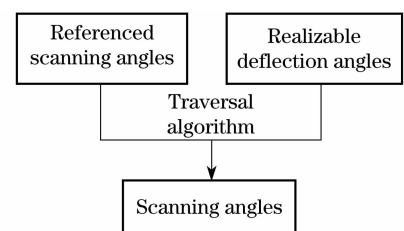


图 2 扫描角度筛选思路

Fig. 2 The method of scanning angles screening

定,受二元光栅波控模式约束。利用参考扫描角度与可实现偏转角度遍历比较,就可筛选出一定数量满足条件的扫描角度。

参考扫描角度能够均匀覆盖扫描视场,因此各参考扫描角度应紧挨主瓣宽度依次排列。如图 3 所示。其中主瓣宽度主要由两个主要参数决定:液晶相控阵组件孔径与入射激光高斯幅度分布。

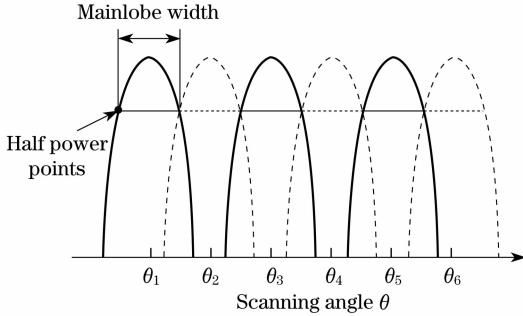


图 3 参考扫描角度分布示意图

Fig. 3 Distribution of referenced scanning angles

在相控阵雷达中,均匀线阵对应的天线方向图为

$$F_a(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta}, \quad (2)$$

式中 D 为液晶相控阵孔径大小, θ 为偏转角度, λ 为激光波长。当偏转角度较小时,主瓣宽度可由 $\theta_{0.5} = \frac{50.8}{D} \lambda$ 直接求出,主瓣宽度 $\theta_{0.5}$ 与液晶相控阵孔径 D 成反比关系^[11]。

由于液晶相控阵无法补偿入射激光的高斯幅度分布,激光的高斯幅度分布将会强加于液晶相控阵的出射激光的复振幅上,这等效于对各个相控阵元进行了幅度加权处理。所以实际液晶相控阵的方向图将不同于均匀线阵,主瓣宽度大小也会改变。

具体的激光高斯幅度分布表达式为

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right), \quad (3)$$

其中 A_0 为光束截面中心振幅, w 为光束截面半径(处于振幅下降到中心振幅 A_0 的 $1/e$ 处)。

另外光束衍射传播近似满足夫朗禾费衍射公式:

$$U_1(x_1) = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ik}{2z} x_1^2\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x_0) \exp(-i2\pi f_x x_0) dx_0, \quad (4)$$

式中 $f_x = \frac{x_1}{\lambda z}$, λ 为激光波长, $k = 2\pi/\lambda$, z 为激光传播

的距离, x_0 表示在液晶相控阵出射表面上的坐标轴, x_1 表示在远区传播了距离 z 后与出射表面平行的坐标轴。 U_0 和 U_1 分别表示激光束在液晶相控阵出射表面上和传播了距离 z 后的复振幅分布。

从(4)式中也可看出,出射激光复振幅分布 U_0 和远区激光复振幅分布 U_1 近似傅里叶变换关系。另外已知激光高斯幅度分布 A 对均匀分布的相控阵元进行了高斯幅度加窗处理。因此根据傅里叶的变换关系,高斯加窗后的 U_0 对应远场复振幅分布 U_1 的主瓣宽度将比未加窗的 U_0 的主瓣宽度要宽。

考虑扫描角度的衍射效率与最大副瓣约束条件要求,确定入射激光光束截面半径为液晶相控阵组件孔径的一半。此时远场光束分布第一副瓣的值将降到 -20 dB 以下。在理想平面波入射时,第一副瓣的值将只有 -13.3 dB。

3.2 扫描角度筛选步骤

扫描角筛选步骤如图 4 所示。为了完成扫描角度筛选,首先需得出一组参考扫描角度与一组可实现偏转角度;然后以最近替代为原则对两组角度进行遍历比较,筛选出最终的扫描角度;最后对各个筛选出的扫描角度进行仿真,验证筛选方法的有效性。

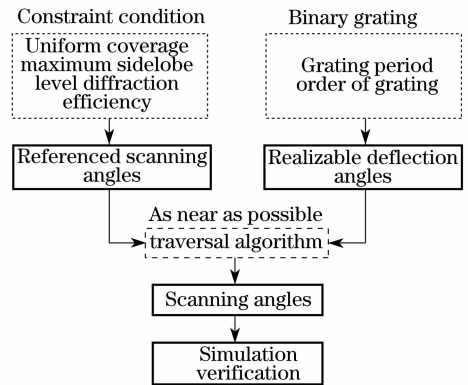


图 4 扫描角度筛选步骤

Fig. 4 Flow chart of scanning angles screening

3.2.1 获取参考扫描角度

在确定参考扫描角度前,需仿真远场光束的复振幅分布,以确定主瓣宽度的大小。仿真公式采用瑞利-索末菲公式,瑞利-索末菲公式比夫朗禾费与菲涅耳衍射公式能够更精确地描述光束的衍射过程^[12],

$$U_1(x_1) = \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x_0) \frac{\exp[jk \sqrt{z^2 + (x_1 - x_0)^2}]}{z^2 + (x_1 - x_0)^2} dx_0. \quad (5)$$

仿真参数如下:

激光波长: $1.064 \mu\text{m}$, 相控阵元宽度: $20 \mu\text{m}$,

相控阵元个数:500 个,相控阵组件孔径:1 cm, 扫描视场范围:0~0.3°。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°~0.3°,扫描角度个数为 50 个,则主瓣宽度估计要求为 0.006°。由均匀线阵的雷达主瓣宽度公式 $\theta_{0.5} = \frac{50.8}{D} \lambda$ 可知,所需的相控阵元个数要 450 个,考虑到激光的高斯幅度分布会增加主瓣宽度,因此将相控阵元个数定位为 500 个。下面的仿真结果证明 500 个相控阵元可正好满足要求。

仿真得出的偏转角度为 0°与 0.3°时对应的主瓣如图 5 所示。

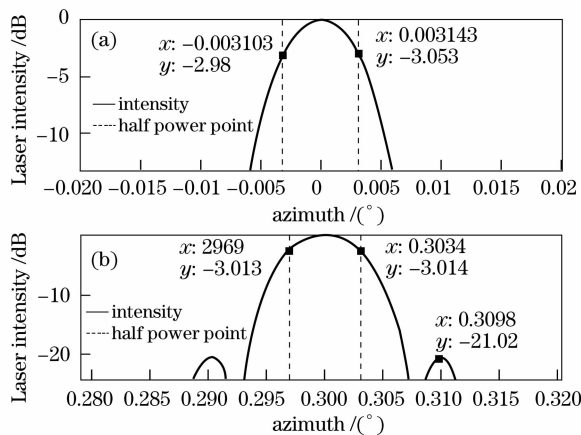


图 5 主瓣宽度示意图偏转角:(a) 0°; (b) 0.3°

Fig. Mainlobe width, deflection angle: (a) 0°; (b) 0.3°

由图 5 可知,偏转角度为 0°与 0.3°时,远场光束的主瓣宽度并没有较大的改变,都保持在 0.0062°左右,基本满足预期主瓣宽度的要求。因此设定参考扫描角的角度间隔为 0.006°,参考扫描角度为 0°~0.3°中平均分布的 51 个扫描角度。

3.2.2 获取可实现偏转角度

光栅周期的数量和闪耀级次的范围决定了可实现偏转角度的总数。在相控阵元总数确定的情况下,可实现的光栅周期数量也已确定。这样只要闪耀级次选择的范围越大,可实现偏转角度就会越多。然而增大闪耀级次的同时也会增加液晶相控阵的制作难度,因为闪耀级次越高,相控阵元所要求完成的移相值范围也要越大,同时液晶相控阵的反应速度也会减慢^[1],所以只需选择适当的闪耀级次范围,使得最大的可实现偏转角度间隔小于或约等于参考扫描角度的间隔 0.006°即可。

图 6 为选择各种闪耀级次范围对应的最大可实现偏转角度间隔。选择的闪耀级次范围越大,最大

的可实现偏转角度间隔越小。当选择 1~4 级闪耀级次时,最大的可实现偏转角度间隔为 0.0064°;选择 1~5 级闪耀级次时,最大的可实现偏转角度间隔为 0.0051°。由于 0.0064°已经与参考扫描角度的间隔 0.006°很接近,综合成本与制作难度考虑,选择 1~4 级闪耀级次^[9]。

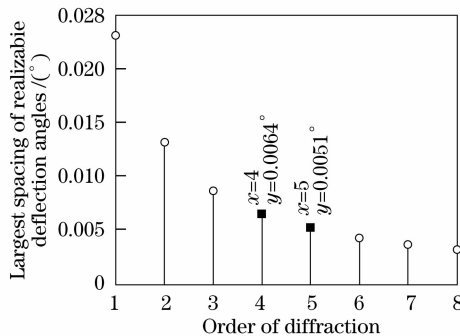


图 6 最大可实现偏转角度间隔

Fig. 6 Largest spacing of realizable deflection angles

图 7 为在选择 1~4 级闪耀级次时,0°~0.4°内所有的可实现的偏转角度。

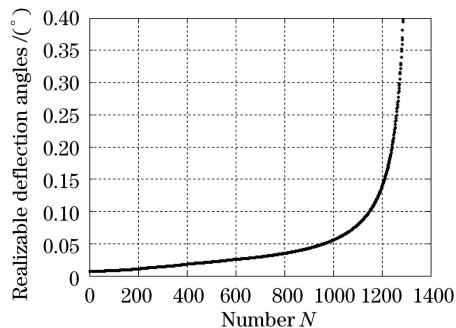


图 7 可实现的偏转角度分布

Fig. 7 Distribution of realizable deflection angles

可实现偏转角度大多数集中在小角度范围。0°~0.05°之间的偏转角度数量约为总角度数量的 75%,其中大多数的角度都将在扫描角筛选中剔除。

3.2.3 筛选最终的扫描角度

通过筛选的前两个步骤,已得到两组所需角度。筛选的具体方法为:依次提取参考扫描角度中的扫描角,将其与可实现偏转角度进行遍历比较;找出最接近扫描角的偏转角度,用于替代对应的参考扫描角;当全部的参考扫描角度替代完成后,就筛选出了最终的扫描角度。

图 8 为筛选出的扫描角度分布示意图。当角度较小时,筛选出的扫描角度与参考扫描角度基本吻合,只有在角度较大时,筛选出的扫描角度与参考扫描角度才有比较小的误差。筛选出的扫描角度足以能够满足视场均匀覆盖的要求。

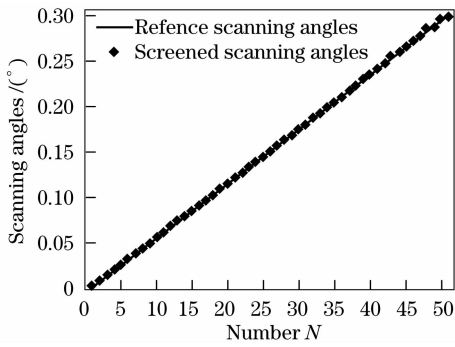


图 8 筛选的扫描角度分布

Fig. 8 Distribution of screened scanning angles

3.2.4 对各筛选出的扫描角度进行仿真

扫描角度筛选具体的约束条件: 1) 最大副瓣: ≤ -15 dB; 2) 衍射效率 $\geq 75\%$ 。

约束条件的确定, 在指标的制定上无具体可参照值, 各个指标参数是在结合国内工艺技术水平与初期系统可行性实验的初期指标基础上确定。

图 9 为仿真得到的各扫描角度衍射效率分布与最大副瓣大小分布。从图 9(a)可以看出, 筛选出的扫描角度衍射效率都在 95% 以上, 但随着扫描角度的增大, 扫描效率会逐渐降低。这主要是受相控阵雷达中阵元因子的影响, 阵元因子作为远区光强分布的包络, 降低了大角度时的光束能量, 因此阵元因子也同时决定了液晶相控阵最大可实现的扫描视场范围。在液晶相控阵中, 阵元因子即为单个相控阵元的方向图, 相控阵元宽度越宽, 对应的阵元方向图中主瓣越窄, 液晶相控阵在扫描角度增大时效率下降也就越快^[11]。因此液晶相控阵中的相控阵元越小越好, 但是由于加工工艺的影响, 这方面并不能很好地满足。另外液晶相控阵透过率也会一定地影响到扫描角度衍射效率, 不过在提高了液晶相控阵中

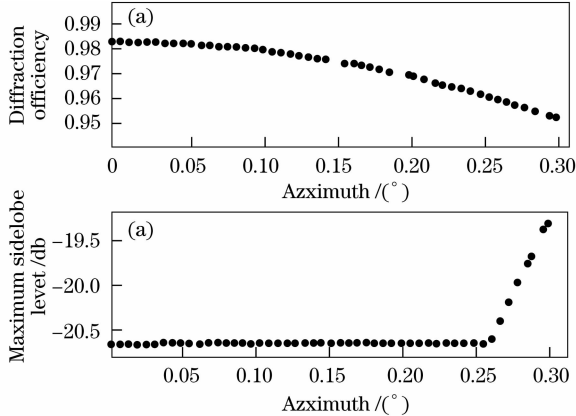


图 9 已筛选的扫描角度的 (a) 效率, (b) 最大副瓣分布

Fig. 9 screened scanning angles, (a) efficiency,

(b) maximum sidelobe level

液晶制作纯度并添加增透膜的情况下, 液晶相控阵阵列的理论透过率可达到 97% 以上, 并不会很大地降低衍射效率^[6,7]。

图 9 (b) 中, 各个扫描角的最大副瓣都在 -15 dB 以下, 但在扫描角接近 0.3° 时, 最大副瓣大小开始增加。主要原因是由于扫描角度较大时, 单个光栅周期内的相控单元数量减少, 对应的相位阶梯数量也减少, 加上边缘效应等因素的影响, 二元光栅的形状开始变差, 不能很好地似于闪耀光栅^[1]。这使得出射激光能量泄露到其他闪耀级次上, 并在其他闪耀级次上形成了大于自身闪耀级次第二旁瓣的副瓣。通过减小相控阵元宽度能够减少能量的外泄, 因为相控阵元宽度减小, 单个光栅周期内的相控单元数量将会增加, 相位阶梯数也会增加, 改善了出射相位分布。

从以上分析看出筛选出的扫描角度的衍射效率与最大副瓣大小足以满足预定的约束条件, 因此筛选出的扫描角度能够作为激光相控阵雷达的最终扫描角度。液晶相控阵组件筛选方法有效可行。

4 结 论

为了使得液晶相控阵组件光束扫描能够覆盖整个视场范围并满足光束扫描指标要求, 扫描角度筛选是必须首先解决的重要问题。本文首先提出了一种二元光栅波控模型, 用于控制液晶相控阵组件光束扫描, 并分析了二元光栅波控模型控制光束偏转的原理; 然后在此波控模型的基础上提出一种扫描角度筛选方法, 通过此筛选方法, 获得了最终的扫描角度; 最后对各个筛选出的扫描角度进行仿真分析, 由仿真结果可知, 该筛选方法有效可行。

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 R. M. Matic. Blazed phase liquid crystal beam steering[C]. *SPIE*, 1994, **2120**: 194~205
- 3 P. F. McManamon, E. A. Watson. Design of optical phased array beam steering with limited dispersion[J]. *Proc. IEEE*, 2001, **3**: 1583~1591
- 4 Ruan Shengping, Ma Ji, Liu Yonggang *et al.*. Preparation of novel polymer dispersed liquid crystal grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24** (03): 369~372
- 5 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** (03): 369~372
- 6 Wang Li. *The Research of the Electronic Control Grating of Liquid Crystal*[D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China, 2006: 28~37
- 7 王 丽. 液晶电控光栅研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2006: 28~37

- 6 Ren Hongwen, Huang Ximin, Wang Zongkai *et al.*. Diffraction properties of a polymer dispersed liquid crystal grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **18** (5): 631~634
任洪文,黄锡珉,王宗凯等. 聚合物分散液晶光栅的衍射特性的研究[J]. *光学学报*, 2008, **18** (5): 631~634
- 7 Zheng Jihong, Chen Gang, Gu Lingjuan *et al.*. Analysis of the major factors affecting the efficiency of H-PDLC volume grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(06): 524~528
郑继红,陈刚,顾玲娟等. 影响聚合物分散液晶体全息光栅衍射效率因素的分析[J]. *中国激光*, 2003, **30** (06): 524~528
- 8 Yu Daoyin, Tan hengying. *Optical Engineering*[M]. China Machine Press, 1999: 267~276
郁道银,谈恒英. *工程光学*[M]. 机械工业出版社, 1999: 267~276
- 9 Zhou Jin, Gao Wenqi. Binary optics and its application[J]. *Chin. J. Nature*, 1996, **18**(6): 349~352
周进,高文琦. 二元光学及其应用[J]. *自然杂志*, 1996, **18**(6): 349~352.
- 10 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
- 11 Cui Yongliang. *Design and Research of a New Electro-Optical Scanning System*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanic and Physics, 2002: 19~25
崔荣亮. 一种新型的电光式扫描系统的设计研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2002: 19~25.
- 12 Li Junchang, Chen Jingsong, Fan Zebin *et al.*. The kirchhoff transfer function and Rayleigh-Sommerfeld transfer function of diffraction[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, (01): 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, (01): 87~89.