

doi: 10.3788/gzxb20174601.0105001

一种液晶相位调制特性的测量方法

杜升平^{1,2,3}, 傅承毓^{1,3}, 黄永梅^{1,3}, 罗传欣^{1,3}, 汪相如⁴

(1 中国科学院光电技术研究所, 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, 成都 610209)

(4 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘 要:提出一种基于衍射光栅的液晶相位调制特性测量方法. 该方法利用液晶构建相位分别为 0 和 φ 的二值光栅, 通过傅里叶光学的方法推导衍射光栅第 0 级衍射光斑光强和调制相位 φ 之间的关系, 然后实测光强和液晶驱动电压之间的对应关系来得到相位和液晶驱动电压之间的对应关系, 即液晶相位光栅的相位调制特性. 最后利用测量相位调制特性结果构建液晶相控阵, 用光束偏转误差验证调制特性测量结果, 相位测量误差小于 1×10^{-3} rad.

关键词:衍射光栅; 液晶; 傅里叶光学; 调制特性; 相控阵

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0105001-8

A Method of Measure the Liquid-crystal's Modulating Characteristic

DU Sheng-ping^{1,2,3}, FU Cheng-yu^{1,3}, HUANG Yong-mei^{1,3}, LUO Chuan-xin^{1,3}, WANG Xiang-ru⁴

(1 *The Institute of Optics and Electronics the 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*)

(4 *School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

Abstract: A method to measure modulation property of liquid crystal based on diffraction grating was proposed. This method utilizes liquid-crystal to establish the binary phase gratings with the phase of 0 and φ respectively, the relation between intensity of zero-order diffraction spots and φ can be deduced by Fourier transformation, and the relation between intensity of zero-order diffraction spots and voltage of liquid crystal pole was measured by experiment. Therefore, relation between phase φ and voltage of pole liquid crystal can be achieved, that is the modulation property of this liquid crystal. Finally, the modulation property was used to creat liquid crystal phased array to steer laser beam, experimental results indicate that phase error is less than 1×10^{-3} rad.

Key words: Diffraction gratings; Liquid-crystal; Fourier optics; Modulating characteristic; Phased array

OCIS Codes: 050.1950; 160.3710; 060.5060; 120.5050

0 引言

液晶器件具有驱动电压低、驱动电流小、重量轻、调制相位可控等优点, 近年来, 在自适应光学、自由空间光通信、光束偏转等领域成为了研究热点之一^[1-6]. 液晶在使用之前必须要对在某一个波长下对相位调制特性进行测量, 才能根据期望得到的相位来施加相应的电压, 调制特性的测量将直接影响液晶器件的衍射效

基金项目: 中国科学院先导项目量子通信(No. KX-002)资助

第一作者: 杜升平(1977-), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要研究方向为非机械式光束偏转. Email: du_shengping@163.com

导师(通讯作者): 傅承毓(1952-), 男, 研究员, 主要研究方向为模式识别及智能控制. Email: wolfdsp@163.com

收稿日期: 2016-07-22; 录用日期: 2016-09-19

<http://www.photon.ac.cn>

率、偏转角度等重要指标。

液晶相位调制特性是指液晶相位随电极所加电场或磁场而改变的关系. 液晶的介电常量各向异性要远远大于磁导率各向异性^[7], 所以液晶的相位调制特性依赖于液晶相位和电极所加电场的关系. 调制特性的测量方法已经得到很广泛研究, 传统的方法主要是双缝干涉测量法^[8], 将液晶分为 2 个区域, 分别调制不同的相位, 通过 2 个不同相位调制区域的光再过双缝屏后在远场形成双缝衍射, 测量两组狭缝干涉条纹之间的偏移量计算相位调制量, 得到相位调制特性, 双缝法是通过测量液晶上局部位置的相位调制特性来作为整个器件的相位调制特性, 忽略了器件局部差异可能带来的影响. 2002 年四川大学的赵晓凤提出了径向剪切干涉法^[9], 该方法也是通过测量两个部分的干涉条纹的偏移量来确定液晶光栅的相位调制特性, 这种方法是一种共光路干涉法, 光路调整比较复杂, 后期数据处理量大. 数字相移干涉仪法同径向剪切干涉法一样^[10], 也是通过测量经过液晶相位光栅反射的光与 Zygo 干涉仪参考平面形成的干涉条纹来测量液晶光栅的相位调制特性. 这种方法光路简单, 但是 Zygo 干涉仪的光源是确定的, 所以只能对 Zygo 干涉仪光源波长处的相位调制特性进行测量, 而且 Zygo 干涉仪价格昂贵, 对实验环境的要求也很高. 本文提出了一种基于衍射光栅的液晶相位调制特性测量方法, 该方法将待测液晶构建成一维衍射光栅, 无需额外增加干涉测量装置, 光路也更简单, 可随意更换光源, 对震动等环境要求也更低, 利用光强来间接测量相位, 动态范围更大, 可以获得更高分辨率.

1 液晶相位调制原理

在外加电场或者磁场的作用下, 液晶分子的指向矢会发生改变, 电光特性也将因此发生改变, 当施加到液晶层的电压大于 Freedericksz 阈值而小于光学阈值时, 液晶分子将发生倾斜, 液晶分子的倾斜会改变液晶层的折射率, 折射率的改变将带来入射光的相位改变^[11].

由于液晶是单轴晶体, 当一束单色光入射到液晶面时, 会产生双折射效应, 其中一束折射光遵循光的折射定律的寻常光(o 光)其折射率为常量; 而另一束光可能不在入射面内, 且其折射率不为常量, 这束光叫非寻常光(e 光). e 光和 o 光在液晶中传播的折射率可以用折射率椭球来表示, 如图 1 所示, z 轴为液晶光轴方向, 当光沿着 k 方向传播时, 过椭球的中心 O 作一个与 k 垂直的平面, 此平面在椭球上截一个椭圆, 该椭圆的两个主轴 OA 、 OB 的方向即为沿着 k 方向传播的两条线偏振光的振动方向, 而 OA 、 OB 的长度即为它们的折射率, 即 n_e 和 n_o . OB 代表 o 光, 其振动方向垂直于 z 轴与 k 构成的平面, 其长度恒为 n_o . OA 代表 e 光, 其振动方向与 z 轴及 k 共面, 长度随 θ 角的变化而变化. 单轴晶体中传播的光都可以分解为沿 OA 方向的 e 光和沿 OB 方向的 o 光, 折射率计算如式(1). 沿着 z 轴方向椭球轴长为 n_o , 沿 xy 轴方向轴长为 n_o , 当给液晶层施加电压时, 液晶分子的指向在外电场的作用下沿着电场方向发生倾斜. 由于入射光的方向不变, 液晶分子的倾斜方向改变意味着 θ 角的改变, 由式(1)可知 n_e 将随 θ 角而改变.

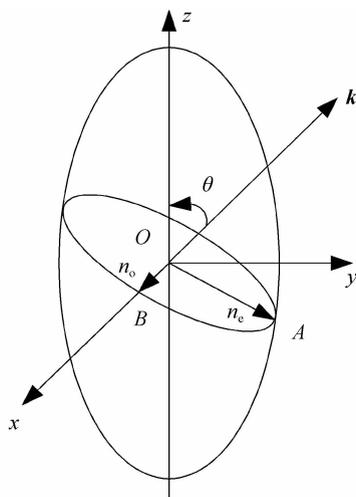


图 1 折射率椭球
Fig. 1 Index ellipsoid

$$\begin{cases} 1/n_e = \frac{\cos^2 \theta}{n_{\perp}^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_{//}^2} \\ n_o = n_{\perp} \end{cases} \quad (1)$$

由理论推导可知,由折射率改变带来的相位差为^[2]

$$\Delta\varphi = \frac{4\Delta V}{V_{th}}(n_{//} - n_{\perp}) \frac{d}{\lambda} \quad (2)$$

式中 V_{th} 为阈值电压, ΔV 为电压变化值, d 为液晶盒厚度, λ 为光波长. 可见,理想情况下,在液晶盒厚度不变、入射光波长不变的情况下,液晶电极电压大于阈值电压后,调制相位变化量 $\Delta\varphi$ 和电压改变 ΔV 成正比例关系,对应同一液晶器件,不同波长的光的相位调制特性也必然存在差异. 所以在使用前对液晶器件的相位调制特性进行测量是十分必要的.

2 测量原理

如图 2,在液晶面上构建一个液晶相位光栅,电极宽度为 a ,在平行于 y 轴方向分别施加电极电压为 0 和 V ,构建成相位延迟分别为 0 和 φ 间隔的液晶相位光栅.

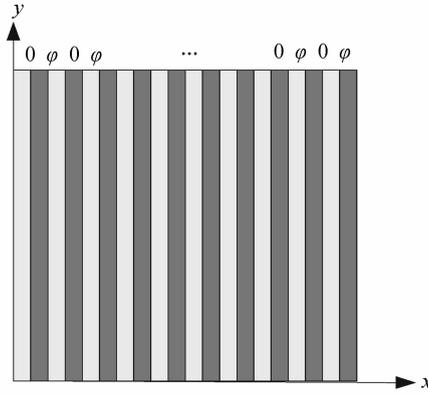


图 2 液晶相位光栅示意图

Fig. 2 Diagram of liquid crystal phase grating

如图 3,当激光扩束后通过液晶光栅衍射,将在远场形成衍射光斑,用 PSD 来探测衍射光斑光强的改变. 改变电极电压 V ,相应的就可以改变相位调制量 φ ,只要找到远场干涉光斑光强和相位调制量 φ 的关系,就可以通过测量光强得到对应相位调制量 φ .

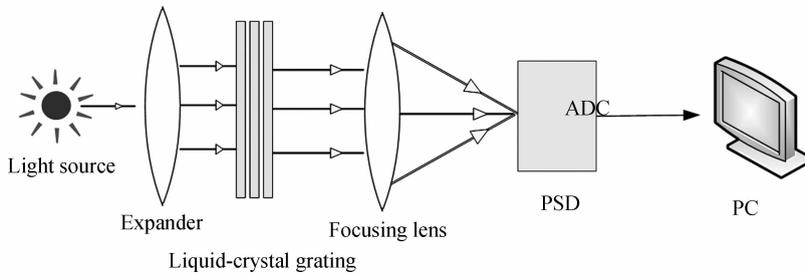


图 3 测量原理光路

Fig. 3 Beam path of phase measure principle

调制相位为 0,缝宽 a 的液晶光栅狭缝孔径函数为 $\text{rect}(x/a)$,调制相位为 φ ,缝宽 a 的液晶光栅狭缝孔径函数 $\text{rect}(x/a)\exp(i\varphi)$,液晶光栅孔径函数可以写为^[12]

$$t(x, y) = \text{rect}(x/a) \otimes \sum_{m=0}^N \delta(x/a - 2m a) + \exp(i\varphi) \text{rect}(x/a) \otimes \sum_{m=0}^N \delta[x/a - (2m + 1)a] \quad (3)$$

频率为 u_0 的入射光波函数可以写为

$$e(x, y) = E_0 \exp(i2\pi u_0 x) \quad (4)$$

衍射屏上的复振幅分布函数为

$$E(x, y) = e(x, y)t(x, y) = E_0 \exp(i2\pi u_0 x) \text{rect}(x/a) \otimes \sum_{m=0}^N \delta(x/a - 2ma) + E_0 \exp(i2\pi u_0 x) \exp(i\varphi) \text{rect}(x/a) \otimes \sum_{m=0}^N \delta[x/a - (2m+1)a] \quad (5)$$

根据衍射理论可知远场光束的衍射图样与液晶相控阵出射表面的光束复分布为傅里叶变换关系,可得出周期性闪耀光栅模型的远场光束复分布振幅为

$$\mathbf{E}(u, v) = \mathcal{F}(\mathbf{E}(x, y)) = \mathcal{F}[E_0 \exp(i2\pi u_0 x) \text{rect}(x/a) \otimes \sum_{m=0}^N \delta(x - 2ma)] + \mathcal{F}[E_0 \exp(i2\pi u_0 x) \cdot \exp(i\varphi) \text{rect}(x/a) \otimes \sum_{m=0}^N \delta[x - (2m+1)a]] = E_0 a [1 + \exp(i\varphi)] \frac{\sin 2N\pi a(u - u_0)}{\sin 2\pi a(u - u_0)} \quad (6)$$

各主极大光强分布为

$$I_M = |\mathbf{E}(x, y)|^2 = (CE_0 a)^2 [1 + \exp(i\varphi)]^2 \frac{\sin^2 2N\pi a(u - u_0)}{\sin^2 2\pi a(u - u_0)} \quad (7)$$

$a(u - u_0) = 0$ 时,第 0 级衍射光斑光强为

$$I_0 = (CE_0 a)^2 (1 + \exp(i\varphi))(1 + \exp(i\varphi))^* \quad (8)$$

$\varphi = 0$, 此时不发生衍射,第 0 级光斑处光强 E_0^2 , $\varphi \neq 0$, 利用欧拉公式将上式转化为三角函数,可得第 0 级衍射光斑的归一化光强为

$$I_0 = \frac{1 + \cos \varphi}{2} E_0^2 \quad (9)$$

改变 φ , 得调制相位和第 0 级衍射光强的关系如图 4. 由以上讨论可知,通过测量远场零级衍射光斑的光强,可以得到位于透镜前的相位光栅的相位调制量,再映射到电极所加电压,就可以得到相位调制量与所加电压的关系,也就求得液晶相位光栅的相位调制特性.

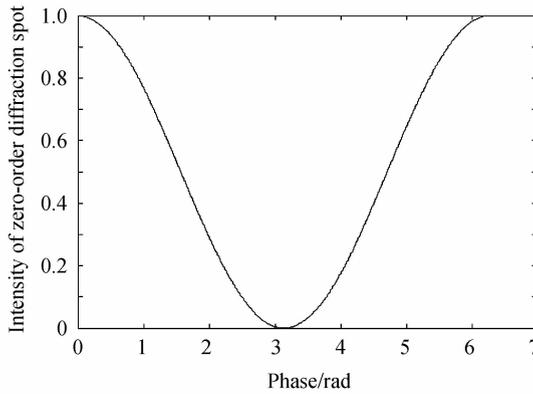


图 4 第 0 级衍射光强和液晶光栅调制相位关系

Fig. 4 Relation between intensity of zero-order diffraction spots and φ

3 实验及结果验证

3.1 液晶驱动方式

将列电压寻址周期的时段细分,分解为多个子段,在每个子段上根据要求按比例加上电压,全部子段都加上电压,该电极具有最高电压,全部子段都不加电压,则该电极电压为 0 V,通过调整所加电压的子段时间就可以调整该电极上电压,实现对电极电压可控.

实验中,液晶电极电压在 15 V 和 0 V 间切换,液晶公共电极在 10 V 和 5 V 间切换,来实现液晶 ± 5 V 交流驱动,然后再将 $+5$ V 和 -5 V 的供电周期细分为 255 个子段对液晶电极电压调整(见图 5).

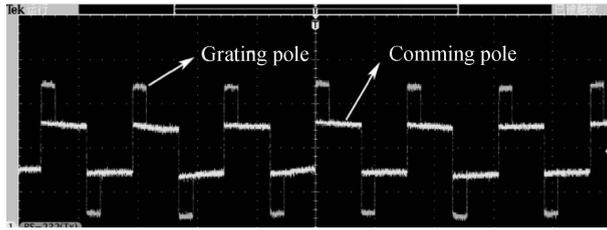


图5 液晶电极驱动电压

Fig. 5 Driver of the liquid-crystal pole

3.2 试验装置

图6为实验装置光路图.激光器发出的光经过扩束以后进入液晶光栅,相位调制分别为 0 和 φ 间隔的光经过透镜后汇聚在PSD传感器上,AD采集器采集PSD输出后送入计算机存储和处理.

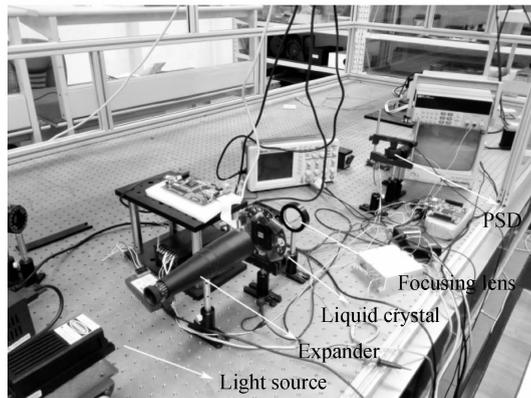


图6 实验装置光路

Fig. 6 Beam path of experiment system

3.3 光源噪声的处理

测量所使用的光源是半导体激光器,因为激光器供电电流涨落、载流子复合产生速率的涨落、以及光增益的涨落等会引起光源光强产生波动,从而带来对接收端PSD电压的波动^[13].

提高光源自身的稳定度会带来成本的增加,所以一般采用分光镜将光源分为两路来对消光源噪声,一路作为参考光,与调制后光对消来消除噪声的影响^[14],但引入分光棱镜后增加了光路的复杂性,更重要的是相位调制带来的光强变化也将改变噪声的幅度大小,而不能完全对消光源噪声.针对光源噪声的频谱特性分析后,本实验中采取的是多帧滑动平均的方法来消除光源噪声,同时增大光强来提高信噪比,平滑后光源噪声小于 10 mV .换算到相位测量误差小于 0.006 rad (见图7).

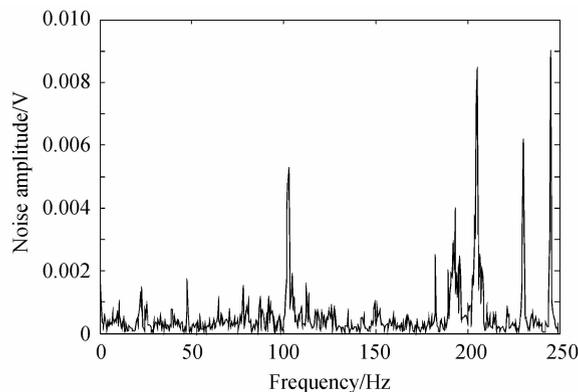


图7 滑动平均后噪声幅度曲线

Fig. 7 Noise of light source after moving average

3.4 试验结果

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 $2\ \mu\text{m}$, 光栅常量为 20, 前 10 个电极供电电压为 0 V, 后 10 个液晶电极供电电压 $\pm 5\ \text{V}$ 的 PWM 波, 调制占空比细分为 256 个等级, 从 0~100% 连续变化, 激光器波长为 671 nm, PSD 接收到的第 0 级光斑远场衍射光强变化如图 8.

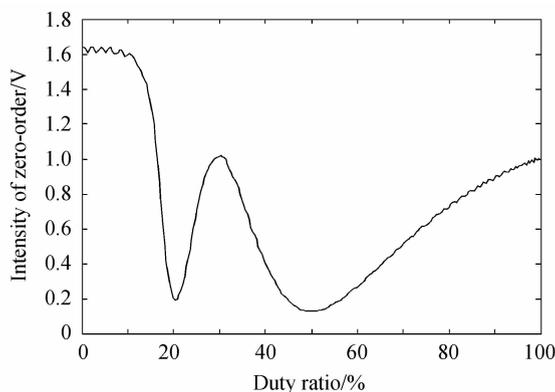


图 8 调制占空比和第 0 级衍射光强实测

Fig. 8 Actual relation between duty ratio and intensity of zero-order diffraction spots

从图 8 可以看出, 随着电极电压增加, 调制相位 φ 逐渐增加, 所构建的液晶相位光栅逐渐将能量从第 0 级转移到其他衍射次级, 当占空比约 20% 时, 第 0 级衍射光强最低, 此时调制相位 $\varphi = \pi$, 电压继续增加, 调制相位继续增加, 能量逐渐回到第 0 级衍射, 占空比约 30% 时, 第 0 级衍射光强回到最大值, 此时调制相位 $\varphi = 2\pi$, 电极电压继续增加, 671 nm 的光可实现 $0 \sim 4\pi$ 的相位调制. 光强值在 2π 和 4π 时幅度比相位为 0 时低, 这是液晶的粘滞特性导致液晶电极在 0 和 φ 间切换时不能相位突变引起衍射效率降低所决定的.

找到光强数据中第一个最小值对应的占空比, 该点相位调制为 π , 可计算出调制相位 $0 \sim \pi$ 区间各占空比值对应相位值, 同理可计算出 $\pi \sim 2\pi$ 区间各占空比值对应的相位值, 如图 9.

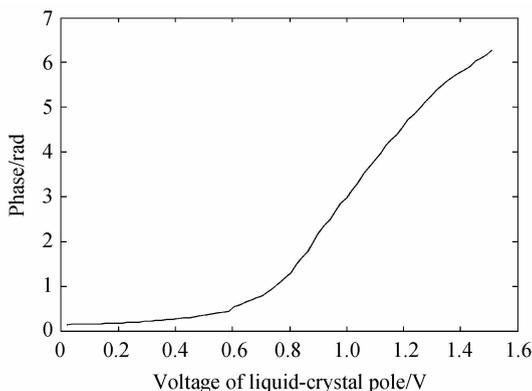


图 9 液晶电极电压和调制相位实测

Fig. 9 Actual relation modulating characteristic

从图 9 可以看出, 阈值电压约为 0.6 V, 当大于阈值电压后, 调制相位变化量 $\Delta\varphi$ 和电压改变 ΔV 接近正比例关系, 符合理论分析.

3.5 光束偏转验证

得到相位调制特性后, 可以在液晶电极上逐条施加递增的电压, 不同的电压在液晶阵列上会改变各阵元的激励相位, 从而实现波束的电扫描, 达到一定角度的光束偏转, 其扫描角度取决于式(10)^[15], 即

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

式中, φ 表示液晶相控阵相邻单元相位差, θ 表示液晶相控阵对光束的偏转角度. 从上式可见, 液晶相控阵对光束偏转角度 θ 是否精确, 取决于对单元电极衍射相位 φ 的精确控制.

在液晶单元上施加相位差 φ 从 $0 \sim 0.1\ \text{rad}$, 理论光束偏转角和实测光束偏转角如图 10, 实测值和理论吻合. 利用实测偏转角度反算可求出液晶各阵元所加的相位, 可得到液晶各阵元的相位误差如图 11, 在 $0 \sim 0.1$ 的

范围内,相位误差小于 1×10^{-3} rad,误差随着相位差增加而变大,原因是 φ 较大时量化误差较大^[16],和本身测量方法无关,降低驱动电压可减小量化误差,但同时会带来液晶响应时间增加,可以结合过驱动技术来提高响应速度。

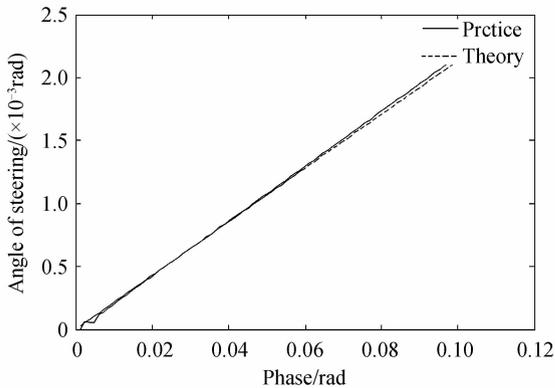


图 10 实际偏转角度和理论偏转角度对比

Fig. 10 Comparison of actual and theory steer angle

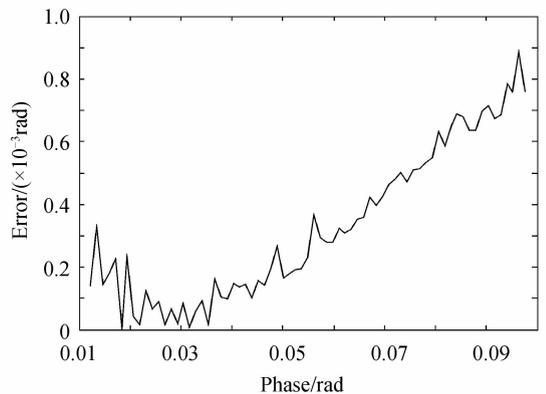


图 11 相位误差

Fig. 11 Phase error

4 结论

本文提出了一种基于衍射光栅的液晶相位特性测量方法,将第 0 级衍射光斑的光强映射到调制相位,同时测出第 0 级衍射光斑的光强和所加电极的电压之间的关系来获得相位调制和所加电压之间的关系,得到的相位调制特性和理论分析符合,并通过光束偏转的方法验证了测量误差小于 1×10^{-3} rad. 与干涉测量法等相比,这种方法具有光路简单、成本低、测量动态范围大、分辨率高等优点,是一种简单有效的测量液晶相位调制特性的方法。

参考文献

- [1] ZHANG Jian, FANG Yun, WU Li-ying, *et al.* Liquid crystal beam steering technologies [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(2): 325-334
张健, 方运, 吴丽莹, 等. 液晶光束偏转技术[J]. 中国激光, 2010, **37**(2):325-334.
- [2] O'BRIEN D C, FAULKNER G E, WILKINSON T D, *et al.* Design and analysis of an adaptive board-to-board dynamic holographic interconnect[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(16): 3297-305.
- [3] LIU Bo-han, ZHANG Jian. Dynamical laser beams steering with aphase-only spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(7): 899-902
刘伯晗, 张健. 纯相位空间光调制器动态控制光束偏转[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):899-902.
- [4] ZHAO Xiang-jie, ZHANG Da-yong, LUO Yong-quan. Electro-controllable optical beam deflection emdoying reflective liquid crystal spatial light modulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(6): 1324-1328.
赵祥杰, 张大勇, 骆永全. 反射式液晶空间光调制器电控光束偏转[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(6):1324-1328.
- [5] 孙亮. 基于光学相控阵的光束扫描研究[D], 长春长春理工大学, 2008.
- [6] CAI Dong-mei, XUE Li-xia, LING Ning, *et al.* Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11): 19-23.
蔡冬梅, 薛丽霞, 凌宁, 等. 液晶空间光调制器相位调制特性研究[J]. 光电工程, 2007, **34**(11):19-23.
- [7] 黄子强. 液晶显示原理[M]. 北京国防工业出版社, 2008.
- [8] DUFFEY J N, JONES B K, LOUDIN J A, *et al.* Optical characterization of the infocus TTV-6000 LCTV using custom drive electronics[C]. SPIE, 1995, **275**(4): 2439-2358.
- [9] ZHAO Xiao-feng, LI Da-hai, CHEN Zhen-pei. Measuring phase modulation characteristics of liquid crystal spatial modulators by using cyclic radial shearing interference[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2002, **39**(4): 675-679.
赵晓凤, 李大海, 陈祯培, 等. 利用径向剪切干涉法测量液晶空间光调制器的位相调制特性[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2002, **39**(4):675-679.
- [10] CAO Z L, XUAN L, HU L F, *et al.* Investigation of optical testing with a phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(4): 1059-1065.
- [11] 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.
- [12] 宋贵才. 物理光学理论与应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2010.

- [13] HU Gui-jun, SHI Jia-wei. Electrical noise in semiconductor lasers[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, **23**(3): 163-166.
胡贵军, 石家纬, 等. 半导体激光器的电噪声[J]. 半导体光电, 2002, **23**(3):163-166.
- [14] KONG Ning-jing, LI Chao, XIA Ming-liang, *et al.* Calibration of phase-modulation properties of liquid-crystal spatial-light modulator by mask-phase method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0305002.
孔宁宁, 李抄, 夏明亮, 等. Mask 相位法校准液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0305002.
- [15] 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [16] KONG Ling-jiang, YI Wei, YANG Jian-yu, *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件扫描精度分析[J]. 中国激光, 2009, **36**(5):1080-1085.