

### 基于变周期光栅法的液晶相控阵指向精度研究

曹宗新 钱奕龙 刘禹彤 李坤 李子凡 龚君豪 胡五生 张大伟 洪瑞金 毛红敏 陆焕钧 樊丽娜 曹召良

### Pointing accuracy research of liquid crystal phase array based on variable period grating method

CAO Zong-xin, QIAN Yi-long, LIU Yu-tong, LI Kun, LI Zi-fan, GONG Jun-hao, HU Wu-sheng, ZHANG Da-wei, HONG Rui-jin, MAO Hong-min, LU Huan-jun, FAN Li-na, CAO Zhao-liang

引用本文:

曹宗新, 钱奕龙, 刘禹彤, 李坤, 李子凡, 龚君豪, 胡五生, 张大伟, 洪瑞金, 毛红敏, 陆焕钧, 樊丽娜, 曹召良. 基于变周期光栅法的液晶相控阵指向精度研究[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2024-0097

CAO Zong-xin, QIAN Yi-long, LIU Yu-tong, LI Kun, LI Zi-fan, GONG Jun-hao, HU Wu-sheng, ZHANG Da-wei, HONG Rui-jin, MAO Hong-min, LU Huan-jun, FAN Li-na, CAO Zhao-liang. Pointing accuracy research of liquid crystal phase array based on variable period grating method[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2024-0097

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0097>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 等周期变倾角干涉条纹复用扩展增强现实耦合元件体光栅角度带宽

Expanding the angular bandwidth of augmented reality coupling element volume holographic grating by multiplexing equal-period and variable-inclination-angle interference fringes

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1157 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0050>

#### 基于液晶光波导的电控偏振旋转器

Electrically controlled polarization rotator based on liquid crystal optical waveguide

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 552 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0213>

#### 柔顺型光纤光栅水听器阵列理论与实验研究

Theoretical and experimental research on flexible fiber grating hydrophone array

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 366 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0079>

#### 非线性系统中双频光栅相位测量

Phase measurement with dual-frequency grating in a nonlinear system

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 726 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0013>

#### 基于衍射光栅的高精度干涉星敏感器的理论分析

High accuracy interferometric star tracker based on diffraction grating

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1368 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0051>

#### 像元映射变分辨率光谱成像重构

Pixel mapping variable-resolution spectral imaging reconstruction

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 1045 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0108>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-13

## 基于变周期光栅法的液晶相控阵指向精度研究

曹宗新<sup>†</sup>, 钱奕龙<sup>†</sup>, 刘禹彤<sup>1</sup>, 李坤<sup>2</sup>, 李子凡<sup>1</sup>, 龚君豪<sup>1</sup>, 胡五生<sup>4</sup>, 张大伟<sup>3</sup>,  
洪瑞金<sup>3</sup>, 毛红敏<sup>1</sup>, 陆焕钧<sup>1</sup>, 樊丽娜<sup>1\*</sup>, 曹召良<sup>1\*</sup>

(1. 江苏省高校低碳能源高效转化与利用重点实验室, 苏州科技大学物理科学与技术学院,  
江苏苏州 215009;

2. 苏州镭明激光科技有限公司, 江苏苏州 215100;

3. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

4. 济源职业技术学院基础部, 河南济源 459000)

† 共同第一作者

**摘要:** 液晶光学相控阵被广泛应用于激光雷达、激光通信以及激光武器中, 进行激光光束的扫描控制。为了实现液晶相控阵的最优设计和激光光束高精度控制, 本文重点研究工作波长、像素数、像素尺寸及有效灰度数对光束指向精度的影响规律。首先, 根据液晶相位调制原理, 仿真分析了周期光栅法和变周期光栅法的有效扫描角度和衍射效率; 然后基于驱动电压灰度等分相位调制量, 仿真分析指向误差随工作波长、像素数、像素尺寸以及有效灰度数的变化规律, 推导出多变量普适公式; 接着, 仿真分析了驱动电压灰度非等分相位调制量时的指向精度, 并和等分相位调制量的结果进行对比分析; 最后, 实验验证了有效灰度数、像素数和指向误差的关系, 初步证实了经验公式的有效性。本文的研究结果可为液晶相控阵的设计提供理论依据。

**关键词:** 液晶相控阵列; 变周期光栅法; 指向误差; 离散相位调制

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0097

收稿日期: 2024-05-27; 修订日期: xxxx-xx-xx

**基金项目:** “十四五”江苏省重点学科资助(项目编号: 2021135); 国家自然科学基金青年科学基金项目(项目编号: 22205155); 江苏省自然科学基金青年基金项目(项目编号: BK20220640); 江苏省高校基础科学(自然科学)研究面上项目(项目编号: 22KJB150011); This work was supported by Jiangsu Key Disciplines of the Fourteenth Five-Year Plan (No. 2021135); the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 22205155); the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grants No. BK20220640); the Natural Science Research of Jiangsu Higher Education Institutions of China (Grants No. 22KJB150011)

## Pointing accuracy research of liquid crystal phase array based on variable period grating method

CAO Zong-xin<sup>†</sup>, QIAN Yi-long<sup>†</sup>, LIU Yu-tong<sup>1</sup>, LI Kun<sup>2</sup>, LI Zi-fan<sup>1</sup>, GONG Jun-hao<sup>1</sup>, HU Wu-sheng<sup>4</sup>, ZHANG Da-wei<sup>3</sup>, HONG Rui-jin<sup>3</sup>, MAO Hong-min<sup>1</sup>, LU Huan-jun<sup>1</sup>, FAN Li-na<sup>1\*</sup>, CAO Zhao-liang<sup>1\*</sup>

(1. *Key Laboratory of Efficient Low-carbon Energy Conversion and Utilization of Jiangsu Provincial Higher Education Institutions, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and*

*Technology, Suzhou, 215009, China;*

*2. Suzhou Lumi Laser Technology Co., Ltd, Suzhou 215100, China;*

*3. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

*4. Basic Department, Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 454682, China)*

<sup>†</sup> *These authors contributed equally to this work*

*\* Corresponding author, E-mail: lnfan@mail.usts.edu.cn; caozl@usts.edu.cn*

**Abstract:** Liquid crystal optical phased array (LC OPA) is widely used in lidar, laser communication and laser weapons to scan and control laser beams. In order to realize the optimal design of LC OPA and high-precision control of laser beam, this paper focuses on the influence of working wavelength, number of pixels, pixel size and effective grey levels on beam pointing accuracy. Firstly, according to the principle of liquid crystal phase modulation, the effective scanning angle and diffraction efficiency of the period grating and the variable period grating methods are simulated and analyzed. Secondly, assuming the phase modulation is equally divided by the driving voltage, the variation law of the pointing error with the working wavelength, the number of pixels, the pixel size and the effective grey levels is simulated and analyzed, and the multivariable universal formula is derived. Thirdly, the pointing accuracy of the nonuniform phase modulation is simulated, analyzed, and compared with the results of the uniform phase modulation. Finally, the relationship between the effective grey levels and the pointing error is verified by experiments, and the validity of the empirical formula is preliminarily confirmed. The research results can provide a theoretical basis for the design of LC OPA.

**Key words:** liquid crystal phased array; variable period grating method; pointing error; discrete phase modulation

## 1 引言

液晶光学相控阵是一种电控可编程光学相控器,可广泛应用于激光雷达、激光通信和激光武器等领域<sup>[1-4]</sup>。相较于传统的机械运动式天线,液晶相控阵天线可实现波束的快速指向与扫描,且具有体积小、重量轻、低功耗、可编程控制和多目标识别与探测等特性,因而被广泛研究<sup>[5-7]</sup>。1989年, Raytheon 公司首次研制出高性能的液晶

相控阵列,实现了 $\pm 4^\circ$ 的光束离散偏转<sup>[8]</sup>。随后, Boulder Nonlinear Systems(BNS)公司研制出硅基液晶(LCoS)反射式一维液晶相控阵列,针对 $1 \times 4096$ 和 $1 \times 12288$ 阵列,在波长 $1550\text{ nm}$ 分别实现了 $\pm 3^\circ$ 和 $\pm 6.9^\circ$ 的光束连续偏转<sup>[9]</sup>。2004年, Rockwell 公司研制出双频液晶的二维液晶相控阵列,实现了 $\pm 1.5^\circ$ 的光束偏转<sup>[10]</sup>。随后,又研制出4个子区域的紧凑型透射式二维液晶相控阵列<sup>[11]</sup>。国内的液晶相控阵研究主要集中在哈尔滨工业大学、电子科技大学、中科院长春光机所、长春理工

大学、成都光电所等单位。电子科技大学在一维液晶光学相控阵的研制和波束控制方面进行了深入研究<sup>[12-14]</sup>。中科院长春光机所在二维液晶光学相控阵的研制和响应特性方面开展了详细研究<sup>[15-17]</sup>。哈尔滨工业大学开展了液晶相控阵的理论分析和工程应用研究<sup>[18-20]</sup>。成都光电所针对液晶相控阵的大角度扫描技术开展研究<sup>[21-23]</sup>。长春理工大学主要利用优化算法进行液晶相控阵的高精度控制研究<sup>[24-26]</sup>。

为了实现液晶相控阵技术在激光通信、激光雷达以及激光武器中的应用,需要其能够进行大角度光束扫描。目前主要采用二级级联策略来实现光束大角度偏转,第一级采用液晶相控阵实现小角度精调,第二级采用不连续的大角度扫描器件<sup>[27-29]</sup>。同时,由于液晶相控阵的像素结构导致光束指向精度受限,因而如何提升指向精度也被广泛研究。Paul F. McManamon 等提出利用变周期光栅法进行光束偏转,并分析了影响液晶相控阵衍射效率的因素<sup>[29]</sup>。孔令讲等对变周期光栅法的光束偏转精度和衍射效率进行了理论分析和实验验证<sup>[12]</sup>。2015年,汪相如等针对像素化因素导致的变周期光栅法指向精度低的问题,提出子孔径相干法并提升了扫描精度<sup>[14]</sup>。近年,丁科、杜升平、郭弘扬等分别对液晶相控阵的响应速度、偏转效率、偏转精度等关键性能进行了研究分析<sup>[21-22, 30, 31]</sup>。2017年,汪相如等对液晶光学相控阵的制作工艺误差、电压量化误差、液晶材料特性等对扫描精度的影响进行了分析<sup>[32]</sup>。2021年,王承邈提出径向子孔径相干法,进一步提升了液晶相控阵实际应用时的指向精度和稳定性<sup>[33]</sup>。2022年,范佳鑫等分析了电压量化、电极占空比和电压频率等因素的影响,并采用粒子群优化算法实现液晶相控阵的高精度指向<sup>[24]</sup>。

总之,指向精度是液晶相控阵的核心指标,非周期光栅法是光束偏转的基本方法。目前的研究集中在如何提升光束的偏转精度。少量工作初步研究了液晶相控阵的部分参数对光束偏转精度的影响,但是没有形成系统化研究,并给出普适规律和理论公式。而掌握液晶相控阵光束偏转精度的变化规律,对液晶相控阵的最优设计和实现高精度光束偏转的意义重大。本文基于变周期光栅法,重点研究有效灰度数、像素尺寸、工作波长和像

素数对光束偏转精度的影响,并给出定量变化规律,为液晶相控阵的应用提供技术和理论支撑。

## 2 基于变周期光栅法的光束偏转原理

### 2.1 液晶的相位调制原理

液晶具有各向异性,可看作单轴晶体材料,其具有寻常折射率  $n_o$  和非常折射率  $n_e$ 。液晶只能对线偏振光进行有效调制,当入射光的振动方向和液晶分子的排列取向成  $\theta$  角时,其非常折射率为:

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

当给液晶施加电压时,液晶分子会在电场作用下进行旋转,从而改变角度  $\theta$ ,进而改变非常折射率  $n_e(\theta)$ 。对于厚度为  $d$  的液晶盒,其相位调制量可表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(z) - n_o] dz, \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为工作波长。

液晶相控阵采用相息图原理进行光束偏转,其对光束相位进行  $2\pi$  取模(图 1(a)),把相位压缩到  $0-2\pi$  范围内,然后再对取模后的相位进行量化(图 1(b)),把连续的相位分布离散化。通过控制施加在不同液晶像素上的电压,即可获得如图 1(b)所示的相位分布。当光入射到该结构上时,会实现类似闪耀光栅的效果,对光束进行偏转,且偏转角度满足下式<sup>[33]</sup>:

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{Nd}, \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $d$  为像素尺寸,  $N$  为一个周内的像素数(量化级次)。

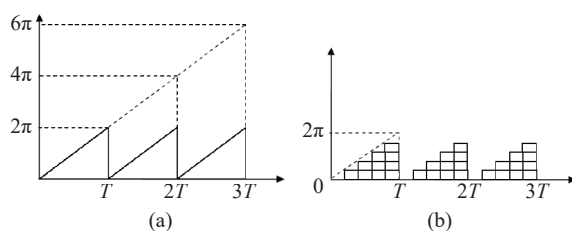


图 1 相息图工作原理: (a) 取模; (b) 量化

Fig. 1 Principle of kinoform: (a) Modulus; (b) Quantization

## 2.2 变周期光栅法

液晶相控阵采用相息图原理进行光束偏转,其基本结构是周期光栅(图 1(b)),即每个周期内的像素数相同。但是如果采用这种结构进行光束偏转,会导致光束扫描不连续,扫描精度低<sup>[12]</sup>。为了实现光束的高精度偏转,通常采用变周期光栅法 (Variable Period Grating, VPG)。即对实现任一偏转角度的相位分布,不考虑周期分布,只要其超过  $2\pi$  就进行取模和量化,最终结果如图 2 所示。从图中可以看出,其每个周期内的像素数都不同,因此是一个变周期光栅。

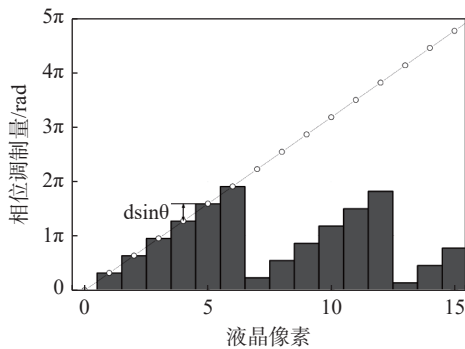


图 2 非周期光栅法的相位取模和量化

Fig. 2 Modulation and quantization of the phase for VPG

由变周期光栅法的工作原理可知,其根据光束的偏转角度进行相位的取模和量化,因此理论上其可以实现任意角度偏转。为了验证其连续的角度偏转能力,进行光束扫描角度和衍射效率仿真计算,仿真条件为:工作波长  $1.064 \mu\text{m}$ 、像素数 1024、像素尺寸  $17 \mu\text{m}$ 。为了和周期光栅法进行对比,同时也仿真了周期光栅的扫描角度,结果如图 3 所示。

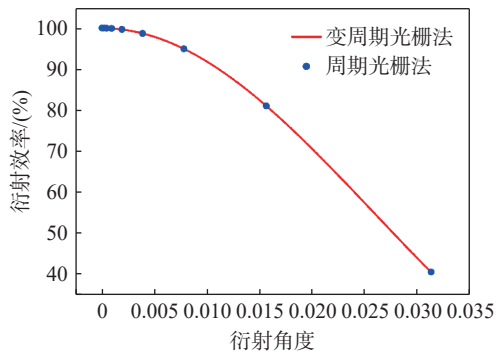


图 3 周期光栅和变周期光栅的衍射效率随衍射角度的变化

Fig. 3 Diffraction efficiency as a function of diffraction angle for period and variable period gratings

从图中可以看出,周期光栅法能够实现光束偏转的角度有限,而变周期光栅法能实现衍射角度的连续变化,且衍射效率和周期光栅法相同,和孔令讲等学者报道结果一致<sup>[12]</sup>。因此,本文基于变周期光栅法进行光束的指向精度仿真分析和实验验证。

## 3 等分相位的指向精度

### 3.1 偏转精度分析

光束指向精度是指理论偏转角度和光束实际偏转角度之间的差值,差值越小,指向精度越高。在液晶相控阵的实际使用中,给液晶施加的电压是不连续的,即能够施加的电压份数有限。比如,施加 10 bit 的电压,则其有效电压份数为 1024。由于施加电压的不连续,导致液晶产生的相位调制量不连续,离散的相位调制导致光束偏转误差。为了仿真离散的相位调制对光束偏转精度的影响,假设施加电压与相位呈线性等分关系。在本文中,采用液晶驱动电压的习惯表示方法,即利用灰度值来描述施加在液晶层上的电压。当有效灰度数  $N_G=32$  时,则将  $2\pi$  等分为  $N_G$  份,结果如图 4 所示。

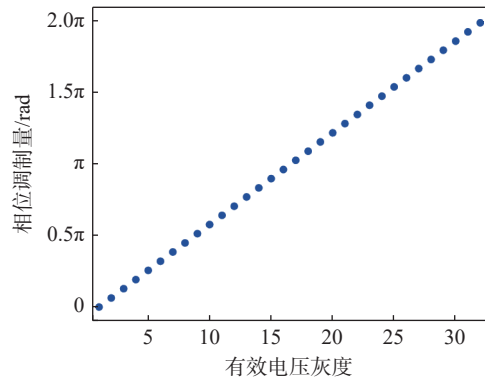


图 4  $N_G=32$  时等分相位调制量和有效电压灰度的关系  
Fig. 4 Uniform phase as a function of grey level for  $N_G=32$

指向误差产生的根本原因是,液晶产生的离散相位无法对任意输入角度产生对应的相位分布。对于偏转角度为  $\theta$  的光束,液晶相控阵需要产生的相位分布如图 5 所示,其中黑色的点为液晶像素的中心位置,其与横实线相交处即为该像素的理论相位值。从图中可以看出,角度  $\theta$  的理论相位位置为黑色虚线,因此对于角度  $\theta$  而言,其可以由液晶相控阵完美产生,没有指向误差。但

是当偏转角度如图中红色区域所示偏离  $\theta$  位置  $\Delta\theta$  时, 由于液晶相控阵的相位不连续性, 导致在该锥形区域内的角度, 无法准确找到对应的相位分布。为了实现光束偏转, 只能找最接近理论偏转角度的相位值。因此, 对于所有偏离小于  $\Delta\theta$  的角度, 能够找到的相位分布都和角度  $\theta$  的相位分布相同。进而, 在  $\theta \pm \Delta\theta$  范围内扫描角度, 液晶相控阵产生的角度都是  $\theta$ 。因此, 扫描角度的指向误差为  $\Delta\theta$ , 即其指向精度为  $\Delta\theta$ 。

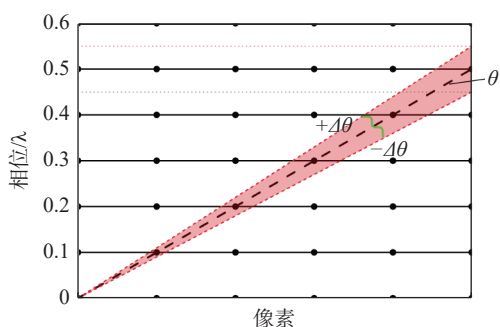


图5 液晶相控阵离散相位产生指向误差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the pointing error caused by discrete phase for liquid crystal phase array

为了仿真上述误差, 设工作波长  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ 、像素尺寸  $P_S=17 \mu\text{m}$ 、像素数  $P_N=1024$ 、有效灰度数  $N_G=32$ 。在输入角度为  $2.06'$  时, 液晶相控阵的离散相位分布如图6所示。

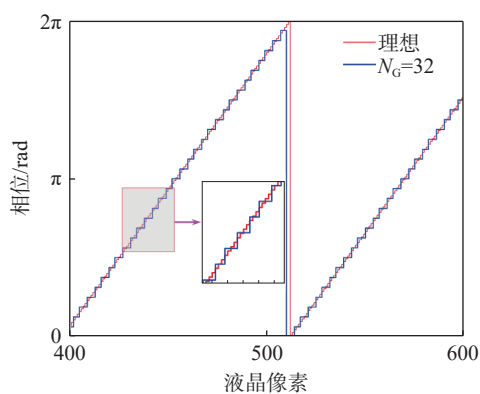


图6  $\theta=2.06'$  的量化相位分布: 红色实线代表理想分布, 蓝色实线代表  $N_G=32$  时相位分布

Fig. 6 Quantitation phase distribution at  $\theta=2.06'$ : the red and blue line represent the distribution of ideal and  $N_G=32$  respectively

图中红色实线为理论相位分布, 蓝色实线为有效灰度数  $N_G=32$  时的相位分布。可以看出, 由于有效灰度数较少, 导致相位分布和理论相位分布相差较大, 从而导致角度偏转误差。该偏转角度和输入偏转角度做差, 则可以得到指向误差。

为此, 仿真了不同偏转角度下的指向误差, 结果如图7所示。可以看出, 在不同偏转角度下, 其指向误差也不同, 且指向误差随角度呈规律性变化。指向误差在大多位置处小于  $1 \mu\text{rad}$ , 但在个别特殊位置处存在明显指向精度缺陷, 最大误差约  $3 \mu\text{rad}$ 。同时, 该误差分布形式和文献<sup>[33]</sup>报道的结果类似。

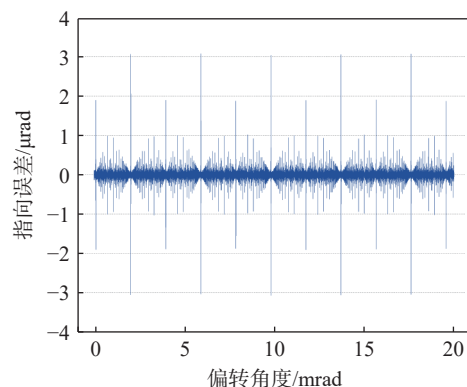


图7 指向误差随偏转角度的变化关系

Fig. 7 Relation between the pointing error and the rotation angle

### 3.2 工作波长对指向精度的影响

为了分析指向误差的变化规律, 首先仿真分析工作波长对指向精度的影响。仿真条件为:  $P_S=17 \mu\text{m}$ ,  $P_N=1024$ ,  $N_G=32$ 。本文后续的指向误差都采用3.1节的误差仿真方法进行误差计算。同时, 由于在不同角度下指向误差不同, 因此选取最大指向误差作为液晶相控阵的指向误差进行仿真分析。据此, 仿真了不同波长下液晶相控阵的指向误差, 同时为了分析其变化规律, 对仿真得到的离散数据进行曲线拟合, 结果如图8所示。

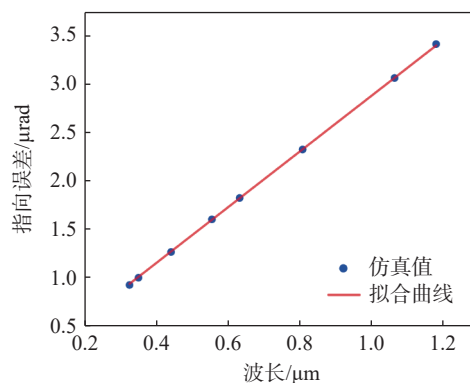


图8 指向误差随波长的变化关系:  $P_S=17 \mu\text{m}$ ,  $P_N=1024$ ,  $N_G=32$

Fig. 8 Pointing error as a function of wavelength at the condition of  $P_S=17 \mu\text{m}$ ,  $P_N=1024$  and  $N_G=32$

可以看出,指向误差随波长的增大而线性增加,其拟合结果为:

$$E_{Linear} = 2.87\lambda \quad (4)$$

其中,公式中  $E_{Linear}$  的单位为  $\mu\text{rad}$ ,且在后续的仿真中都采用该单位。

### 3.3 有效灰度数对指向精度的影响

为了仿真分析有效灰度数对指向精度的影响,采用如下仿真条件:  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $P_S=17 \mu\text{m}$ ,  $P_N=1024$ 。仿真计算结果如图 9 所示,可以看出,随着有效灰度数的增加,指向角误差逐步减小。类似的,也进行离散数据的曲线拟合,得到指向误差随有效灰度数的变化关系:

$$E_{Linear} = \frac{98}{N_G} \quad (5)$$

可以看出,其呈反比例函数变化。

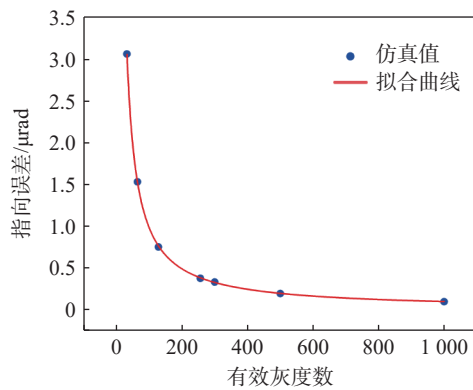


图 9 指向误差随有效灰度数的变化:  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $P_S=17 \mu\text{m}$ ,  $P_N=1024$

Fig. 9 Pointing error as a function of effective grey levels at the condition of  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $P_S=17 \mu\text{m}$  and  $P_N=1024$

### 3.4 像素尺寸对指向精度的影响

为了仿真分析像素尺寸对指向精度的影响,采用如下仿真条件:  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $N_G=32$ ,  $P_N=1024$ 。计算得到的指向误差与像素尺寸的关系如图 10 所示,可以看出,随着像素尺寸的增大,指向角误差逐步减小,且呈反比例函数形式。同时,也进行曲线拟合,得到如下公式:

$$E_{Linear} = \frac{52}{P_S} \quad (6)$$

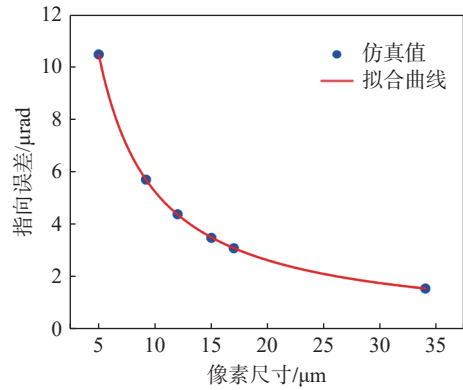


图 10 指向误差随像素尺寸的变化:  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $N_G=32$ ,  $P_N=1024$

Fig. 10 Pointing error as a function of pixel size at the condition of  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $N_G=32$  and  $P_N=1024$

### 3.5 像素数对指向精度的影响

为了仿真分析像素数对指向精度的影响,采用如下仿真条件:  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $N_G=32$ ,  $P_S=17 \mu\text{m}$ 。仿真计算得到的结果如图 11 所示,可以看出,随着像素数的增多,指向角误差逐步减小,且也呈反比例函数的变化趋势。同时也进行曲线拟合,得到指向误差随像素数的变化关系:

$$E_{Linear} = \frac{3151}{P_N} \quad (7)$$

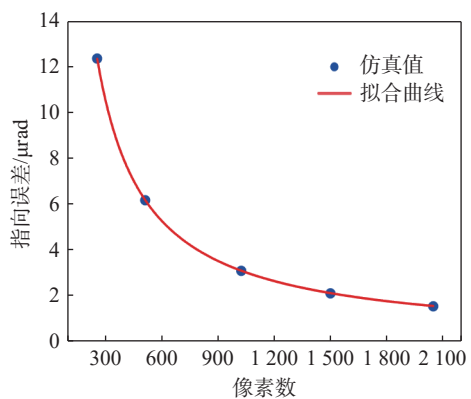


图 11 指向误差随像素数的变化:  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $N_G=32$ ,  $P_S=17 \mu\text{m}$

Fig. 11 Pointing error as a function of pixel number at the condition of  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $N_G=32$  and  $P_S=17 \mu\text{m}$

### 3.6 指向精度的多变量变化规律

为了得到指向精度随工作波长、有效灰度数、像素尺寸和像素数的多变量变化关系,需利用上述得到的单变量变化规律进行归纳分析。结合(4-7)式,指向误差可以写成如下形式:

$$E_{Linear} = a \frac{\lambda}{N_G P_N P_S}, \quad (8)$$

式中,  $a$  是系数。如果能够求出  $a$ , 则可以得到指向误差的定量变化规律公式。按照公式(8)的形式, 把 3.2 节的仿真条件即  $P_S=17 \mu\text{m}$ ,  $P_N=1024$ ,  $N_G=32$  代入到该式, 则有:

$$E_{Linear} = a \frac{\lambda}{N_G P_N P_S} = 1.8 \times 10^{-6} a \lambda, \quad (9)$$

该式和公式(4)相等, 即:

$$E_{Linear} = 1.8 \times 10^{-6} a \lambda = 2.87 \lambda, \quad (10)$$

则可以求解出系数  $a_\lambda=1.598 \times 10^6$ 。

把 3.3-3.5 节的仿真条件分别代入到公式(8), 并采用上述方法, 便可以分别求解出系数  $a_\omega$ 。计算得到  $a_{N_G}=1.601 \times 10^6$ ,  $a_{P_S}=1.601 \times 10^6$ ,  $a_{P_N}=1.61 \times 10^6$ 。可以看出, 不同仿真结果求出的系数  $a$  都近似相同。因此, 选取  $a=1.6 \times 10^6$ 。由于在前边的仿真中指向误差的单位是  $\mu\text{rad}$ , 不符合国际单位制, 换算成国际单位制后,  $a=1.6$ 。因此, 最终得到液晶相控阵指向精度的计算公式为:

$$E_{Linear} = \frac{1.6 \lambda}{N_G P_N P_S}, \quad (11)$$

为了验证公式(11)的有效性, 随机选取 10 组  $\lambda$ 、 $N_G$ 、 $P_N$ 、 $P_S$  数据如表 1 所示。然后, 针对该 10 组数据, 分别进行数值仿真和公式计算。最后, 通过比较仿真值和计算值的一致性, 来评价经验公式的有效性。

表 1 随机选取的液晶相控阵多变量数据

Tab. 1 Random selection data for the multivariable of liquid crystal phase array

组别	$P_S/\mu\text{m}$	$P_N$	$N_G$	$\lambda/\mu\text{m}$
1	10.0	1000	50	1.000
2	5.0	800	40	0.800
3	8.0	900	60	0.500
4	12.0	512	80	0.635
5	15.0	700	32	0.444
6	9.2	600	64	0.900
7	16.0	888	76	0.456
8	14.0	666	86	0.707
9	18.0	500	90	1.180
10	9.0	1200	100	1.300

仿真和计算结果如图 12 所示。同时, 为了定量评价仿真值和计算值的差异, 以二者的差值除以仿真值作为偏移量。由图 12 可以看出, 10 组数据的仿真值和计算值几乎重合。定量计算结果显示, 偏移量在 0 附近浮动, 最大值误差约 1.5%, 说明公式(11)有效, 可以用于计算液晶相控阵的指向精度。

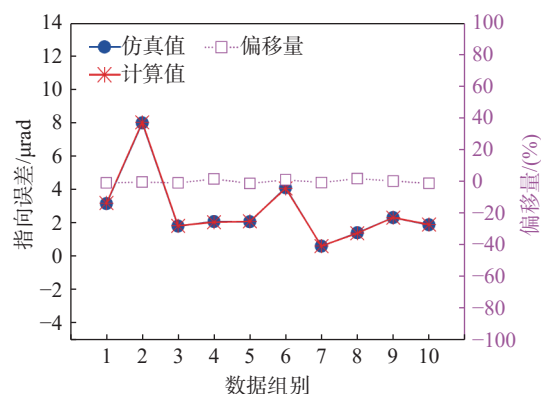


图 12 10 组数据的仿真和计算结果: 左侧纵坐标表示仿真值和计算值, 右侧纵坐标表示二者的偏移量

Fig. 12 Simulation and calculation results for 10 groups data: the left and right ordinates represent the pointing error of simulation and computation and the deviation respectively

## 4 非等分相位的指向误差

上述仿真基于液晶相控阵的驱动电压灰度能够对相位实现等分。但是实际情况中, 对液晶分子施加电压时, 相位随电压非线性变化<sup>[34]</sup>。即使利用 Gamma 校正技术进行线性化处理<sup>[34]</sup>, 其有效灰度也无法实现相位的等分。实际情况是, 液晶在驱动电压下的响应, 不仅其驱动电压和相位呈非线性关系, 其驱动电压和相位间隔也呈非线性变化, 即: 同样的驱动电压变化量, 产生的相位调制量不同。同时, 相同的驱动电压变化量, 在低压区产生的相位调制量大, 在高压区产生的相同调制量小, 且相位调制量变化呈 e 指数趋势。为了更贴近真实应用情形, 本文采用该 e 指数变化趋势, 对液晶相控阵的指向误差进行仿真分析。为了进行定量分析, 给出如图 13 所示的 e 指数变化关系。图中给出的是有效灰度数为 32 时的关系曲线, 其他有效灰度数下的变化关系也依据该曲线进行量化。



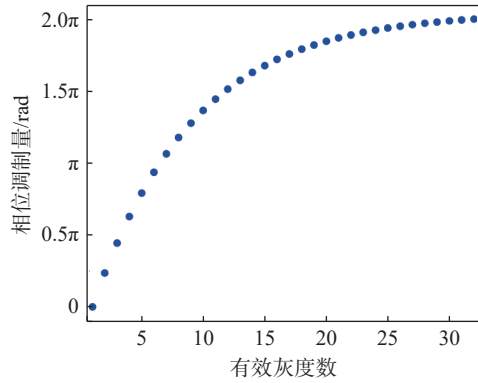
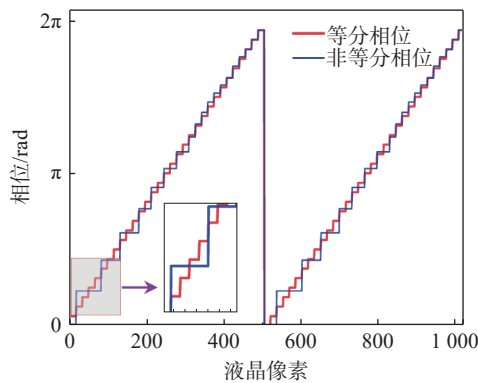


图 13 非等分相位调制量和有效灰度数的关系

Fig. 13 Nonuniform phase modulation as a function of effective grey levels

利用  $e$  指数变化关系, 在  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ,  $P_S=17 \mu\text{m}$ ,  $P_N=1024$ ,  $N_G=32$  的条件下进行仿真分析, 并和等分相位的结果进行对比。对于偏转角度  $\theta=0.41'$ , 首先仿真了其量化相位如图 14 所示。可以看出, 与等分相位相比, 非等分相位在小相位调制量区(低压区)的量化误差大, 而在大相位调制量区(高压区)的量化误差和等分相位相同。该特性会导致其在某些小角度下产生较大的指向误差, 下面进行详细分析。

图 14  $\theta=0.41'$ 时的等分和非等分量化相位分布Fig. 14 Uniform and nonuniform quantization phase distribution at  $\theta=0.41'$ 

在相位非等分情况下, 液晶相控阵指向误差的仿真结果如图 15 所示。可以看出, 指向误差随偏转角度的变化形式和相位等分的结果(图 7)类似, 绝大部分误差在  $1 \mu\text{rad}$  内, 且最大误差也在  $3 \mu\text{rad}$  左右。但在  $0^\circ$  附近存在明显的指向精度缺陷, 并表现为细锐尖峰, 最大值达  $3 \mu\text{rad}$ 。将图 7 与图 15 的数值相减, 得到的差值如图 16 所示。可以看出, 等分相位和非等分相位的角度指向误差的峰值位置差别较大, 导致二者的差值较大, 说

明相位的非均匀分布影响指向误差的大小和最大指向误差出现的位置。同时, 差值的最大值出现在  $0^\circ$  附近, 说明二者在小角度指向精度方面差别较大, 下边进行详细分析。

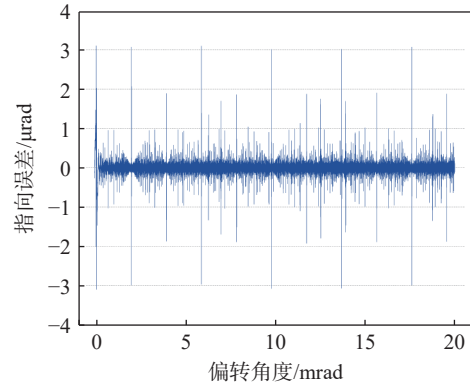


图 15 非等分相位的指向误差随偏转角度的变化

Fig. 15 Pointing error of nonuniform phase as a function of rotation angle

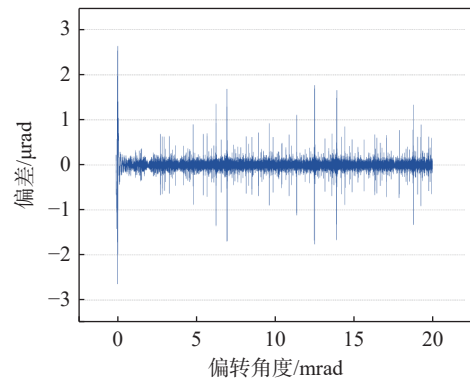


图 16 不同偏转角度下等分相位和非等分相位的指向误差的差值

Fig. 16 Difference of pointing error between uniform and nonuniform phase at different rotation angle

根据图 16 的仿真结果可知, 在角度为  $-0.02'$  处等分相位和非等分相位指向误差的差别最大。为了分析产生的原因, 给出在该角度处液晶相控阵的量化相位分布如图 17 所示, 图中虚线和实线分别表示等分和非等分相位。可以看出, 在该角度下, 非等分相位的最大量化相位只有  $0.122\lambda$ , 且量化台阶数为 2, 分别为 0 和 0.12。而对于等分相位, 相位为 4 台阶。因此, 台阶数少导致非等分相位的量化误差大, 从而最终导致指向精度低。

从上述仿真分析可以看出, 等分和非等分相位产生的角度指向误差分布类似, 且最大误差相

同。因此,理论上本文第3节在等分相位下得到的液晶相控阵指向精度公式也适用于非等分相位情形。为此,针对非等分相位也进行了类似第3节的仿真分析,结果和预期一致,也得到公式(11)的结果,限于篇幅,不再赘述。

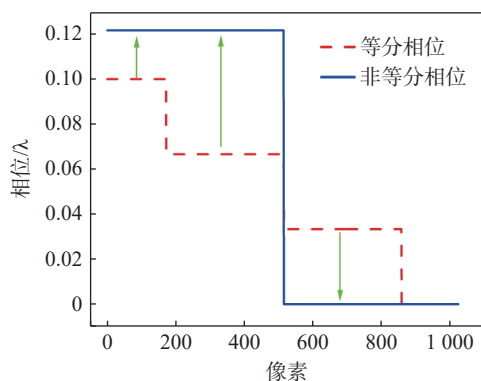


图 17  $\theta=-0.02'$ 处等分相位和非等分相位的量化相位分布  
Fig. 17 Quantitation phase distributions for uniform and nonuniform phase at  $\theta=-0.02'$

## 5 实验验证

为了验证仿真得到的经验公式的有效性,设计和搭建如图 19 所示的实验光路。波长  $1.064 \mu\text{m}$  的光纤输出激光,准直并经分束棱镜反射后,入射到液晶相控阵上;再经液晶相控阵反射后进入扩束系统,最后被透镜聚焦在相机上。液晶相控阵是美国 Meadowlark 公司的 HSP1K-500-1200-PC8,像素数  $1024 \times 1024$ ,像素尺寸  $17 \mu\text{m}$ ,相位调制量  $2\pi$ ,有效灰度数 256。聚焦透镜的焦距为  $500 \text{ mm}$ ,成像相机采用大恒图像的 MARS-6500-18GTM 相机,分辨率  $9344 \times 7000$ ,像素尺寸  $3.2 \mu\text{m}$ 。当液晶相控阵使激光光束进行偏转时,聚焦在相机上的焦点光斑就会移动,根据移动量和透镜焦距,即可计算得到偏转角度。仿真中,像素尺寸、像素数、有效灰度数和在工作波长都影响光束的指向精度。对于已有的液晶相控阵列,其像素尺寸一定。同时,对于实验系统,其激光器的工作波长也一定。因此,本实验仅验证有效灰度数和像素数对指向精度的影响。

首先验证有效灰度数对指向精度的影响,并分别使用  $N_G$  为 32、64、128 和 256 进行液晶相控阵的驱动控制。为了消除环境干扰,每次都采集 50 个光斑,并分别计算光斑质心,最后计算出平

均质心位置,作为该次的光斑质心位置。光斑质心位置通过下式计算:

$$x_c = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{i,j}}, \quad (12)$$

$$y_c = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{i,j}}, \quad (13)$$

式中,  $(x_{i,j}, y_{i,j})$  分别为  $(i, j)$  像素点处的坐标,  $I_{i,j}$  为  $(i, j)$  像素的强度灰度值。

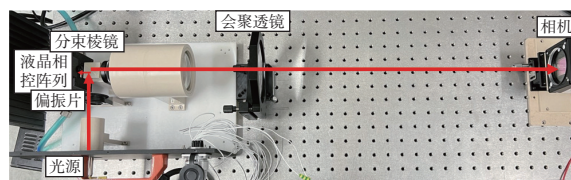


图 18 验证实验光路

Fig. 18 Experimental optical layout

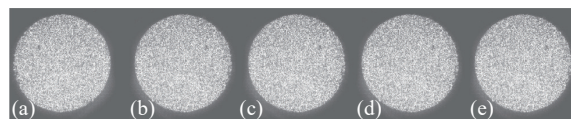


图 19 采集的光斑图像: (a) 没有施加电压, (b)  $N_G=32$ , (c)  $N_G=64$ , (d)  $N_G=128$ , (e)  $N_G=256$

Fig. 19 Acquired optical spot image: (a) Without the driving voltage, (b)  $N_G=32$ , (c)  $N_G=64$ , (d)  $N_G=128$ , and (e)  $N_G=256$

利用公式(12)和(13),首先计算出  $0^\circ$ 时光斑的质心位置  $(x_0, y_0)$ ,然后给液晶相控阵施加电压,使光束进行偏转,再计算出光束偏转后的光斑质心  $(x_1, y_1)$ 。光斑的偏移量便可以用下式求解:

$$\Delta c = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}, \quad (14)$$

则光斑的偏转角度为:

$$\tan \theta = \Delta c / f, \quad (15)$$

式中,  $f$  是聚焦透镜的焦距。

依据仿真结果,其在角度为  $0.02'$ 处的指向误差最大,因此,选取该角度作为液晶相控阵的偏转角度进行指向误差实验。实验中,首先在液晶相

控阵没有施加电压时采集 50 幅光斑图像;然后针对  $N_G$  为 32、64、128 和 256, 分别采集 50 幅光束偏转后的光斑图像, 不同情况下采集到的典型光斑图像如图 19 所示。利用采集到光斑图像和公式(12)和(13)计算质心位置。由于光斑在水平方向上进行偏转, 因此, 50 次测量得到的  $x$  方向上的质心坐标值如图 20 所示。可以看出, 由于环境振动等影响, 质心坐标有小范围波动, 不施加电压、 $N_G$  为 32、64、128、256 时的 RMS 值分别为: 0.386、0.198、0.616、0.361 和 0.269 个像素。为了减弱环境振动的影响, 对其取平均值, 得到没有施加电压、 $N_G$  为 32、64、128、256 时,  $x$  方向质心坐标分别为 793.644、796.101、795.738、795.341、795.329 个像素。

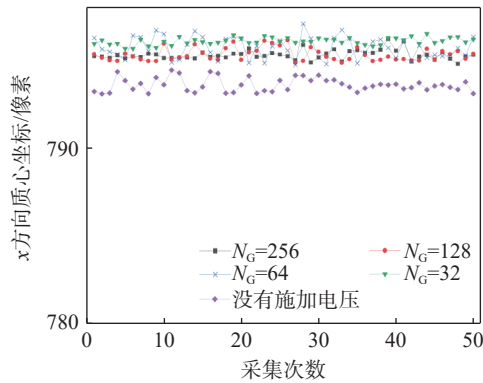


图 20 实验测量的水平偏转 50 次光斑质心

Fig. 20 Measured center of gravity of light spot at horizontal direction with 50 times

然后, 利用公式(14)和(15)可以求解得到光束的偏转角度。最后, 把理论偏转角度和实验测量的偏转角度做差, 得到不同有效灰度数下的光束偏转精度如图 21 所示。同时, 为了和经验公式进行对比, 图中也给出了仿真结果。实验结果显示, 随着  $N_G$  的增大, 指向误差逐渐减小, 且呈反函数形式, 且变化趋势和经验公式给出的结果近似一致。经过对比, 实验所测变化关系于仿真结果类似。但是实验的偏转误差大于仿真结果, 差值约  $13\mu\text{rad}$ , 分析认为是由于实验中环境振动导致。虽然采取多次平均的方法降低振动误差, 但是由于测量角度精度在微弧度量级, 还是会导致测量误差。

然后, 验证像素数对指向精度的影响, 同样在角度  $0.02'$  处进行指向误差实验。为了获得不同像素数, 在液晶相控阵列前加装一个可变光阑, 通

过控制光阑的大小来控制液晶相控阵列有效区域大小, 即像素数的多少。实验中, 针对像素数为 1024、702、512、320、200, 分别采集 50 幅光斑图像, 典型光斑图像如图 22 所示。可以看出, 随着光束口径的减小, 成像的光斑强度也逐渐减小。同时, 由于系统焦距不变, 因此在忽略衍射效应的情况下, 其光斑大小不变。利用相同的方法计算质心、光束偏转角度和指向精度, 结果如图 23 所示。类似的, 为了和经验公式的结果进行比较, 也给出理论计算的结果。实验结果显示, 随着像素数的增大, 指向误差逐渐减小, 呈反函数形式, 且和计算结果的变化趋势近似一致。同样地, 由于环境振动等影响消除的不彻底, 导致实验测量的指向误差大于理论计算的指向误差。但是同样偏转误差大于仿真结果, 由于不是隔振平台, 还是会导致较小的振动, 从而导致测量误差。此外, 结合图 21 和 23 的数据可以看出, 环境振动造成的指向误差在  $10\mu\text{rad}$  左右。本课题组前期的研究结果也印证了该影响<sup>[35]</sup>。文献 35 中图 15 的结果表明, 在不同角度下的指向误差为约  $0.00067^\circ$ , 即  $11.7\mu\text{rad}$  左右, 和本文的误差约  $10\mu\text{rad}$  基本一致。因此, 总体而言, 实验结果初步验证了仿真结果和经验公式的有效性。

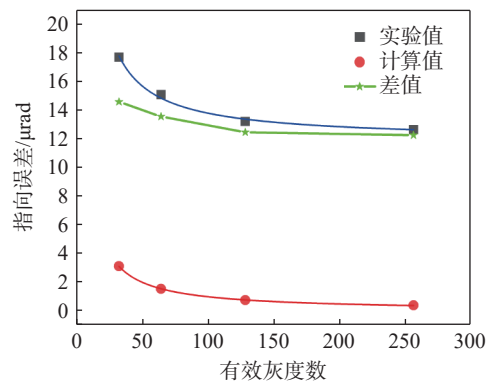


图 21 指向误差随有效灰度数的变化

Fig. 21 Experiment measured pointing error as a function of effective grey levels

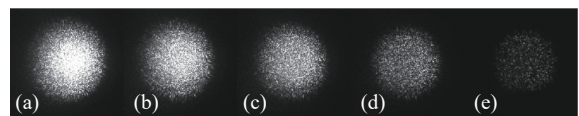


图 22 采集的光斑图像: 像素数=(a) 1024, (b) 702, (c) 512, (d) 320, (e) 200

Fig. 22 Acquired optical spot image: pixel number=(a) 1024, (b) 702, (c) 512, (d) 320, (e) 200

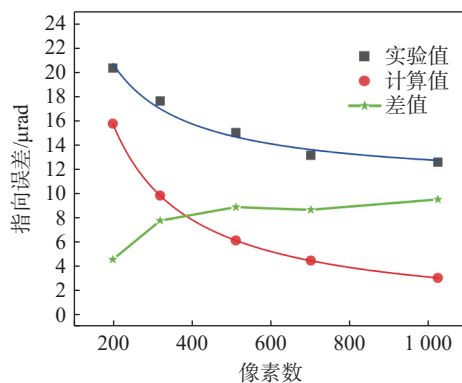


图 23 指向误差随像素数的变化

Fig. 23 Experiment measured pointing error as a function of pixel number

## 6 结 论

本文重点研究了液晶相控阵的指向误差和其多种参量之间的定量关系。首先, 仿真分析了周期光栅法和变周期光栅法的有效扫描角度, 结果显示, 非周期光栅法能够近似连续扫描, 而周期光栅仅能实现有限的扫描角度。然后基于驱动电压

灰度线性等分相位调制量, 分析了工作波长、像素数、像素尺寸及有效灰度数对光束指向精度的影响, 并归纳建立了四变量的指向精度计算公式。接着, 仿真分析了更接近实际应用的相位调制量随驱动电压呈 e 指数变化的情形, 并和等分相位调制量进行了对比分析。结果显示, 等分相位和非等分相位的指向误差基本相同, 但是最大指向误差对应的指向角度不同, 并给出产生原因。此外, 同样分析了光束指向精度随工作波长、像素数、像素尺寸及有效灰度数的变化规律, 结果和等分相位调制量的理论公式一致。

最后, 搭建实验光路, 并对有效灰度数、像素数与指向误差的关系式进行验证。结果显示, 在角度  $0.02'$  处, 得到指向精度随有效灰度数、像素数呈反比例函数变化, 该结果与经验公式计算得到的曲线变化趋势一致。因此, 初步验证了经验公式的有效性。本文得到的指向精度计算公式, 适用于像素结构的液晶相控阵列, 采用变周期光栅法时的指向精度计算和分析, 可为液晶光学相控阵的设计和应用提供理论依据, 进一步推动其在激光光束扫描中的应用。

### 参考文献:

- [1] 王琦, 高旭峰, 张大伟, 等. 液晶光学相控阵技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700007. WANG Q, GAO X F, ZHANG D W, *et al.*. Research progress in liquid crystal optical phased array technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1700007. (in Chinese).
- [2] HE X X, LI M F, LIANG ZH Q, *et al.*. A liquid crystal stackable phased array to achieve fast and precise nonmechanical laser beam deflection[J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127598.
- [3] WANG CH M, WANG Q D, MU Q Q, *et al.*. High-precision beam array scanning system based on Liquid Crystal Optical Phased Array and its zero-order leakage elimination[J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127610.
- [4] WANG Z SH, WANG CH Y, LIANG SH N, *et al.*. Diffraction characteristics of a non-mechanical beam steering system with liquid crystal polarization gratings[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7319-7331.
- [5] STOCKLEY J, SERATI S. Advances in liquid crystal beam steering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5550: 32-39.
- [6] WANG X R, WU L, LI M, *et al.*. Theoretical and experimental demonstration on grating lobes of liquid crystal optical phased array[J]. *International Journal of Optics*, 2016, 2016: 7175809.
- [7] WU L, WANG X R, XIONG C D, *et al.*. Improved high order grating method to realize wide angle beam steering on liquid crystal optical phased array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9795: 161-169.
- [8] MCMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, *et al.*. Optical phased array technology[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 268-298.
- [9] LINNENBERGER A, SERATI S, STOCKLEY J. Advances in optical phased array technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6304: 199-207.
- [10] WINKER B, MAHAJAN M, HUNWARDSSEN M. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications[C]. *SPIE*, 2004: 1702-1708. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [11] LIN Y H, MAHAJAN M, TABER D, *et al.*. Compact 4 cm aperture transmissive liquid crystal optical phased array for free-space optical communications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5892: 107-116.

- [12] 孔令讲, 朱颖, 宋艳, 等. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0123001.  
KONG L J, ZHU Y, SONG Y, *et al.*. A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0123001. (in Chinese).
- [13] LIANG ZH Q, HUANG Y W, HE X X, *et al.*. Four-access, 80 mm aperture all phase-controlled liquid crystal laser antenna[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(10): 105113.
- [14] TANG ZH H, WANG X R, HUANG Z Q, *et al.*. Sub-aperture coherence method to realize ultra-high resolution laser beam deflection[J]. *Optics Communications*, 2015, 335: 1-6.
- [15] HU L F, XUAN L, LIU Y J, *et al.*. Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision[J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6403-6409.
- [16] PENG Z H, LIU Y G, YAO L SH, *et al.*. Improvement of the switching frequency of a liquid-crystal spatial light modulator with optimal cell gap[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3608-3610.
- [17] WANG C, PENG Z, LIU Y, *et al.*. Radial sub-aperture coherence method used to achieve beam steering with high precision and stability[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6331-6347.
- [18] 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.  
LIU B H, ZHANG J. Dynamical laser beams steering with phase-only spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(7): 899-902. (in Chinese).
- [19] 徐林. 液晶光学相控阵相位延迟及衍射效率研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
XU L. *Research on phase delay and diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese).
- [20] 张健, 徐林, 吴丽莹, 等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(8): 1497-1502.  
ZHANG J, XU L, WU L Y, *et al.*. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1497-1502. (in Chinese).
- [21] 杜升平, 傅承毓, 黄永梅, 等. 一种液晶相位调制特性的测量方法[J]. *光子学报*, 2017, 46(1): 0105001.  
DU SH P, FU CH Y, HUANG Y M, *et al.*. A method of measure the liquid-crystal's modulating characteristic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1): 0105001. (in Chinese).
- [22] 杜升平, 黄永梅, 付承毓, 等. 基于相控阵雷达模型的液晶光束偏转波控方法研究[J]. *应用光学*, 2017, 38(4): 581-586.  
DU SH P, HUANG Y M, FU CH Y, *et al.*. Liquid-crystal beam deflection wave control method based on phased array radar[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 581-586. (in Chinese).
- [23] 肖文奔, 黄永梅, 吴琼雁, 等. 基于 Wollaston 棱镜的大角度液晶光束偏转系统[J]. *光学技术*, 2012, 38(5): 588-592.  
XIAO W B, HUANG Y M, WU Q Y, *et al.*. A wide-angle beam steering system based on Wollaston prisms[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(5): 588-592. (in Chinese).
- [24] 范佳鑫, 王春阳, 张宁. 液晶相控阵指向精度影响因素分析及优化方法[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(2): 65-73.  
FAN J X, WANG CH Y, ZHANG N. Analysis of factors affecting the steering accuracy of liquid crystal phased array and optimization method[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 45(2): 65-73. (in Chinese).
- [25] 黄志伟, 王春阳, 彭丽华, 等. 基于蝙蝠算法的液晶光学相控阵波束优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082303.  
HUANG ZH W, WANG CH Y, PENG L H, *et al.*. Beam optimization of liquid crystal optical phased array based on bat algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082303. (in Chinese).
- [26] 王春阳, 李兰婷, 史红伟, 等. 基于液晶相控阵的光束偏转控制方法研究[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(10): 857-863.  
WANG CH Y, LI L T, SHI H W, *et al.*. Beam deflection control method based on liquid crystal phased array[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(10): 857-863. (in Chinese).
- [27] BUCK J, SERATI S, HOSTING L, *et al.*. Polarization gratings for non-mechanical beam steering applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8395: 159-164.
- [28] MCMANAMON P F. Agile nonmechanical beam steering[J]. *Optics and Photonics News*, 2006, 17(3): 24-29.
- [29] MCMANAMON P F, BOS P J, ESCUTI M J, *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1078-1096.

- [30] 丁科, 元波. 基于二维标量衍射的液晶光束偏转性能仿真[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0205005.  
DING K, QI B. Beam steering performance simulation of liquid crystal spatial light modulator based on 2D scalar diffraction[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0205005. (in Chinese).
- [31] 郭弘扬, 杜升平. 驱动电压对向列型液晶调制相位的影响[J]. *国外电子测量技术*, 2017, 36(12): 28-31.  
GUO H Y, DU SH P. Influence of driving voltage on phase modulation of nematic liquid crystal[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(12): 28-31. (in Chinese).
- [32] 汪相如, 黄子强. 液晶光学相控阵组件扫描精度分析研究[J]. *光电技术应用*, 2017, 32(4): 33-37.  
WANG X R, HUANG Z Q. Analysis and research on liquid crystal optical phase array component steering precision[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(4): 33-37. (in Chinese).
- [33] 王承逸. 基于液晶光学相控阵的高精度光束指向控制技术[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.  
WANG CH M. *High precision beam pointing control technology based on liquid crystal optical phased array*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese).
- [34] 曹召良, 穆全全, 胡立发, 等. 液晶波前校正器位相调制非线性及闭环校正研究[J]. *液晶与显示*, 2008, 23(2): 157-162.  
CAO ZH L, MU Q Q, HU L F, *et al.*. Nonlinear phase modulation of liquid crystal wavefront corrector and closed loop correction[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(2): 157-162. (in Chinese).
- [35] 刘禹彤, 曹宗新, 李子凡, 等. 基于液晶偏振光栅的大口径激光光束扫描系统[J]. *应用光学*, 2024, 45(3): 557-567.  
LIU Y T, CAO Z X, LI Z F, *et al.*. Large-aperture laser beam scanning system based on liquid crystal polarization grating[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 557-567. (in Chinese).

#### 作者简介:



曹宗新(1999—), 男, 江苏扬中人, 硕士研究生, 2021年于苏州大学文正学院获得学士学位, 主要研究方向为激光雷达。E-mail: [caozx117@qq.com](mailto:caozx117@qq.com)



钱奕龙(2003—), 男, 江苏南通人, 2021级苏州科技大学在读本科生, 主要研究方向为激光雷达。E-mail: [2398015652@qq.com](mailto:2398015652@qq.com)



樊丽娜(1980—), 女, 山西榆次人, 博士, 实验师, 2020年于上海理工大学获得博士学位, 主要从事微纳光学器件方面的研究。E-mail: [lnfan@mail.usts.edu.cn](mailto:lnfan@mail.usts.edu.cn)



曹召良(1974—), 男, 河南济源人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事液晶自适应光学系统的光学设计、光学实验以及理论分析和模拟工作。E-mail: [caozl@usts.edu.cn](mailto:caozl@usts.edu.cn)