

# 基于液晶相控阵高精度高效率光束 偏转数值仿真

师宇斌 马浩统\* 马阎星 吕 洋 司 磊

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 液晶相控阵技术通过对光束波前进行控制,实现一定视场范围内高精度、任意角度的光束偏转。研究了基于多孔干涉原理和随机并行梯度下降算法实现光束偏转的方法,并通过对这两种方法进行数值仿真,实现对远场目标的指向,重点分析对比两者的指向精度和偏转效率。提出了一种新型的光束偏转方法,这种方法能够在整个光束偏转范围内都具有较大的指向精度和偏转效率。

**关键词** 光通信; 液晶相控阵; 多孔干涉; 随机并行梯度下降算法; 光束偏转

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0202002

## Numerical Simulation of High Accuracy and High Efficiency Beam Steering Based on Liquid Crystal Optical Phase Array

Shi Yubin Ma Haotong Ma Yanxing Lü Yang Si Lei

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Through controlling wavefront, liquid crystal optical phase array can realize precise and arbitrary angle beam steering within a certain field of view. Beam steering methods based on mutiaperature interference and stochastic parallel gradient descent algorithm are studied. By numerical simulating these two methods, beam can point to the target in far field. Pointing accuracy and steering efficiency have been compared and analyzed. A novel beam steering method is presented, which can improve beam pointing accuracy and beam steering efficiency in total range of beam steering.

**Key words** optical communications; liquid crystal optical phase array; multiaperature interference; stochastic parallel gradient descent algorithm; beam steering

**OCIS codes** 230.3720; 050.1970; 060.5060

### 1 引 言

光束偏转技术在激光通信<sup>[1]</sup>、目标跟踪<sup>[2]</sup>、定向能技术<sup>[3]</sup>等领域得到广泛的应用。传统的光学偏转系统通过万向节或者转向台等装置改变光轴的方向实现光束传输方向的改变,与之相比,基于液晶光学相控阵(LCOPA)的光束偏转技术通过控制波前实现光束偏转,具有轻便、灵活、高精度、可随机指向等优点<sup>[4-5]</sup>。目前,基于 LCOPA 的光束偏转技术已经被应用到了激光通信、目标跟踪、光镊等领

域<sup>[6-8]</sup>。这些领域的应用都要求能够实现连续、高精度的光束偏转,而常规的 LCOPA 光束控制方法都会造成一定的误差,并且实现偏转角度有限。国内外已经有学者在提高 LCOPA 光束偏转精度方面做了深入的研究,国内的 Kong 等<sup>[9]</sup>利用对一维波前阶梯相位的边缘进行迭代修正以提高光束偏转精度,Engström 等<sup>[10]</sup>利用对一维 LCOPA 第一个相移器的相位调制进行优化从而提高偏转精度。本文通过数值仿真,实现目标在视场范围内成像,通过基

收稿日期: 2013-06-25; 收到修改稿日期: 2013-10-04

作者简介: 师宇斌(1988—),男,硕士研究生,主要从事光束控制方面的研究。E-mail: monkey.backstreet@163.com

导师简介: 司 磊(1971—),男,博士,研究员,主要从事高能激光方面的研究。E-mail: w\_zt@163.com

\* 通信联系人。E-mail: mahaotong@163.com

于多孔干涉原理<sup>[10-11]</sup>和随机并行梯度下降算法 (SPGD)的光束偏转原理,控制 LCOPA 实现光束对目标精确指向,并分析了基于多孔干涉原理和 SPGD 算法的控制方法对光束指向精度的影响。

## 2 LCOPA 光束偏转理论分析

### 2.1 常规光束偏转理论

LCOPA 基于光波传输过程中相位发生  $2\pi$  周期性的改变并不会改变远场光强的分布原理,通过控制液晶电极对光束波前施加不同的相位倾斜,实现光束偏转<sup>[5]</sup>,结合光栅方程,可以得到

$$\theta = \arcsin[\lambda/(Nd)], \quad (1)$$

式中  $\theta$  是光束偏转角, $\lambda$  表示光波波长, $N$  表示单位周期内的电极数, $d$  为电极有效尺寸。通过对(1)式分析可以看出,一方面理论上能够实现的最大偏转角  $\theta_{\max}$  为  $\arcsin[\lambda/(2d)]$ ,另一方面由于  $N$  只能取整数,按照这种方式光束只能实现非连续偏转。

### 2.2 多孔干涉偏转理论

在常规偏转理论的基础上,发展的多孔干涉原理光束偏转理论<sup>[10-11]</sup>能够较好地指导光束连续偏转。假设期望实现的光束偏转角为  $\alpha$ ,那么所需实现的理想倾斜平面相位调制为

$$\phi^{\text{ideal}}(x, \alpha) = \frac{2\pi}{\lambda}x \sin \alpha + \varphi_0, \quad (2)$$

式中  $x$  为 LCOPA 平面内空间横坐标,  $\varphi_0$  为任意的初始相位补偿, $\lambda$  为入射波长。进一步考虑电极大小的影响,可以得到理想倾斜阶梯型相位调制为

$$\phi_j^{\text{ideal}}(\alpha) = \frac{2\pi}{\lambda}x_j \sin \alpha + \varphi_0, \quad (3)$$

式中  $j=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为一维 LCOPA 的电极总数,  $x_j$  表示第  $j$  个电极对应的 LCOPA 平面空间横坐标,  $\phi_j^{\text{ideal}}$  表示第  $j$  个电极上所需的相位分布。由于 LCOPA 不能产生  $0 \sim 2\pi$  之间的连续相位调制,受到相位量化的影响,假设相位量化数为  $M$ ,最终实现  $\alpha$  偏转时 LCOPA 上需要施加的相位调制为

$$\phi_j(\alpha) = \text{round}\left[\phi_j^{\text{ideal}}(\alpha) \frac{M}{2\pi}\right] \frac{2\pi}{M}, \quad (4)$$

式中  $\text{round}$  表示取整运算。通过上述原理,理论上能够在  $\pm\theta_{\max}$  范围内连续的偏转,并且可以实现角度和所需相位分布之间的对应关系,但是由于存在相位回程区、相位量化等因素,会造成光束偏转效率和精度的下降<sup>[12]</sup>。

### 2.3 基于自适应光学的无模型优化光束偏转

无模型优化自适应光学系统,通过对性能评价

函数  $J$  的优化,能够实现光束净化、光束整形等<sup>[13]</sup>。通过成像传感器件探测得到发射光强信息,利用控制器算法信号处理模块进行分析计算后,得到性能评价函数  $J$  的瞬态值,之后利用控制模块产生控制信号对相位逐步优化,最终逼近性能评价函数的全局极值。基于上述理论模型,可以结合成像传感器件获得相关的成像信息,选取特定的性能评价函数实现光束偏转。

常见性能评价函数有中心光强(CI)、斯特列尔比(SR)、环围能量(EE)、桶中功率(PIB)、误差函数(DF)和像清晰度函数(ISF)等<sup>[13]</sup>。采取 PIB 作为性能评价函数实现光束偏转,PIB 即为某一面积内环围能量与总能量的比值,其表达式为

$$J_{\text{PIB}} = \frac{\iint \tau(x, y) I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}, \quad (5)$$

式中  $I(x, y)$  为远场的光强分布,  $\tau(x, y)$  是选取桶分布的透射率函数分布。

除了选取特定的评价函数,还需要采用合适的优化算法才能够实现系统的快速收敛。目前在自适应光学系统中得到应用的优化算法有模拟退火算法、遗传算法和 SPGD 算法<sup>[14]</sup>。SPGD 是在同时扰动随机近似基础上的优化算法,已经应用到无波前传感自适应光学系统和光束控制领域<sup>[15]</sup>。本文采用双向扰动 SPGD 算法实现光束偏转控制,整个算法实现表述如下<sup>[13]</sup>。首先定义评价函数  $J = J(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \dots, \mathbf{u}_N)$  是施加在初始光束上的相位控制信号  $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \dots, \mathbf{u}_N)$  的函数。主动向相位调制器施加正向和负向随机的扰动电压  $\delta\mathbf{u}$ ,观察随机扰动电压带来的评价函数改变量  $\delta J^{(m+1)} = \delta J_+^{(m)} - \delta J_-^{(m)}$ ,根据评价函数变化量做如下更新

$$\mathbf{u}^{(m+1)} = \mathbf{u}^{(m)} + \gamma \delta\mathbf{u}^{(m)} \delta J^{(m)}, \quad (6)$$

式中参数  $\gamma$  为增益系数,  $\gamma$  为正值时使评价函数向极大方向优化,  $\gamma$  为负值时则使评价函数向极小方向优化。通过不断迭代,使评价函数趋向极值,最终实现光束偏转。

## 3 数值仿真研究

数值仿真实现光束指向的系统原理图如图 1 所示。目标光经过分束器后,通过透镜在电荷耦合器件(CCD)成像。激光器发射的光经过 LCOPA、分束器后,部分光束经过角反射器成像于 CCD,部分直接发射到远场。通过计算机不断获得的目标角位置信息和发射光束的位置信息,可以调节 LCOPA

产生特定的相位调制,实现发射光束指向视场范围内的目标。

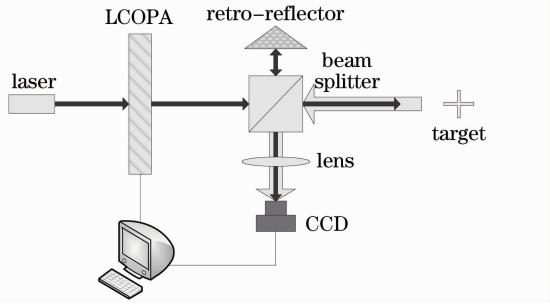


图1 LCOPA 光束指向仿真系统原理图  
Fig.1 Schematic diagram of LCOPA beam pointing at simulation system

在没有考虑相位回程区和填充比的情况下进行数值仿真研究,具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Physical parameter	Value
Optical wavelength / $\mu\text{m}$	1.064
CCD size /m	0.1
Sample rate number	256
Waist of Gaussian beam /mm	3
Radius of lens /m	0.05
Focal length of lens /m	20

由于发射光在透镜焦距处才能够获得较好的光斑信息,而目标并不一定能够在透镜焦距处清晰成像,会存在一定的离焦现象。图 2 是利用非相干成像原理数值仿真得出的不同离焦系数下成像光强分布。可以看出,目标成像的清晰度虽然发生了变化,但是进一步计算目标的质心却没有发生偏移。因此,基于仿真系统原理图,可以利用这个特性同时在图像传感器上得到发射光光强分布信息和目标成像的信息。

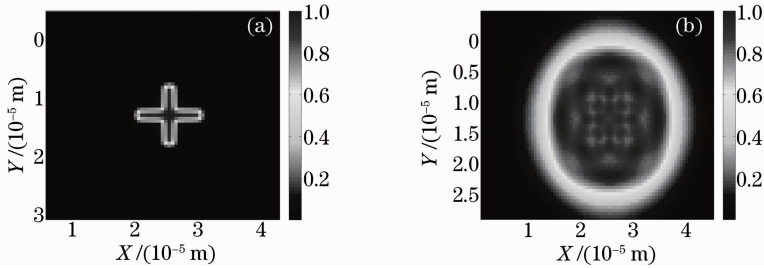


图 2 目标在不同离焦系数  $q$  下归一化远场成像。(a)  $q=0$ ; (b)  $q=2\pi$

Fig.2 Normalized imaging at different defocus coefficients  $q$  of target. (a)  $q=0$ ; (b)  $q=2\pi$

利用目标的质心,进一步计算得到发射光需要偏转的角度。采用多孔干涉方法以及 SPGD 算法分别实现光束偏转,最终可实现发射光斑趋于目标的质

心,如图 3 所示。当评价函数  $J$  趋于极值时得到图 3 (a)的远场光斑,图 3(b)是按多孔干涉原理实现的远场光斑分布,可以看到存在其他级次的衍射光斑。

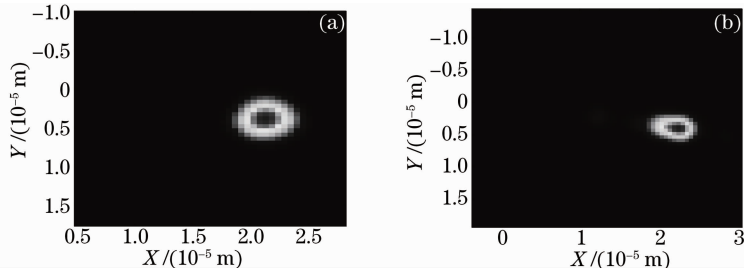


图 3 远场光强分布。(a) SPGD 方法; (b) 多孔干涉方法

Fig.3 Far field intensity distribution. (a) SPGD; (b) mutiaperture interference

进一步计算连续偏转的远场光斑,绘制得到连续角度变化的期望偏转角和实际偏转角之间的对应关系,如图 4(a)所示,如果进一步定义 PIB 为偏转效率评价标准,可得光束偏转效率和实现角度之间的对应关系,如图 4(b)所示。

从图 4(a)中可以看出利用 SPGD 算法实现的期望偏转角和实际偏转角一致,进一步验证,基本为

形如  $y=x$  的曲线,而利用多孔干涉方法实现的结果并不一致,并存在周期性的局部抖动,这是由相位量化的过程造成的。此外,随着角度的增大,可以看到常规偏转方法实现的偏转曲线和 SPGD 实现的角度进一步发生偏离。即采用多孔干涉的光束偏转方法,会使实际偏转角的误差增大。这是由于在较大角度偏转时,LCOPA 上加载的周期性相位调制

变密,使得相位量化和取整运算造成的误差变大。从图 4(b)可以看出,传统方法实现的光束偏转效率随着偏转角的增大而减小,而 SPGD 算法实现的光束偏转效率随着偏转角的增大在一定范围内基本保

持不变。此外,传统方法实现的光束偏转效率和角度变化关系的曲线在局部会出现比较剧烈的抖动,这同样是由相位量化和取整运算造成的。

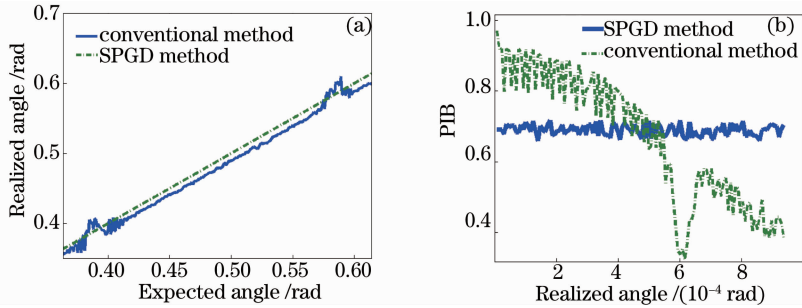


图 4 SPGD 算法和常规方法的比较。(a) 期望偏转角和实际偏转角的关系; (b) 实际偏转角和 PIB 的关系  
Fig. 4 Comparison of SPGD method with conventional method. (a) Relationship between expected angle and realized angle; (b) relationship between realized angle and PIB

在不考虑系统外部引入的各种误差情况下,系统的指向精度取决于 LCOPA 的偏转精度。定义指向误差

$$e = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \cdot d/f, \quad (7)$$

式中  $(x_0, y_0)$  为目标的质心,而  $(x, y)$  为仿真实现的远场光斑质心,  $d$  为单位像素大小,  $f$  为透镜的焦距。通过进一步计算比较,可以得到两种方法实现的指向误差函数随偏转角度变化的关系,如图 5 所示。

度的影响。可以看出,SPGD 方法具有较高的指向精度和偏转精度,并且,在较大角度偏转情况下,SPGD 方法占优势,但算法的实现需要一定的过程。多孔干涉的方法能够简单、快速实现光束偏转,并且,在小角度偏转时具有较高的偏转效率和精度。

综上所述,在 LCOPA 以及光学相控阵光束偏转的领域,可以采用 SPGD 算法和多孔干涉原理相结合的方法。在小角度范围时采用多孔干涉原理,在一定大角度范围采用 SPGD 算法,既能够有效地提高光束的指向精度,也能够提高光束偏转效率。

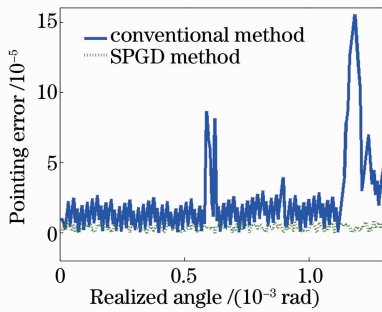


图 5 指向误差和实际偏转角度变化关系  
Fig. 5 Relationship between realized angle and pointing error

通过图 5 的比较,可以看到 SPGD 算法在一定范围内存在较小的指向误差。与之相比,多孔干涉方法存在较大的指向偏差,并且这种误差有随偏转角度增大而增大的趋势。

## 4 结 论

通过上述的数值仿真,利用 SPGD 和多孔干涉的原理实现了 0~1.3 mrad 范围内连续 190 个点的光束偏转,具体分析对比了 SPGD 和多孔干涉原理对光束偏转精度、偏转效率以及实现的指向精

## 参 考 文 献

- Sofka J, Nikulin V V, Skormin V A, *et al.*. Laser communication between mobile platforms [J]. *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions, 2009, 45 (1): 336 - 346.
- Su W, Hassebrook L G, Yalla V G. Active multispot projection for object tracking and recognition[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2004, 5557: 223 - 232.
- Weyrauch T, Vorontsov M A. Atmospheric compensation with a speckle beacon in strong scintillation conditions; directed energy and laser communication applications[J]. *Appl Opt*, 2005, 44 (30): 6388 - 6401.
- Zhang Jian, Fang Yun, Wu Liying, *et al.*. Liquid crystal beam steering technologies[J]. *Chinese J Laser*, 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.
- Memanamon P F, Bos P J, Escuti M J, *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[C]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97 (6): 1078 - 1096.
- Schmitz C H, Spatz J P, Curtis J E. High-precision steering of multiple holographic optical traps[J]. *Opt Express*, 2005, 13 (21): 8678 - 8685.
- Haellstg E, Stigwall J, Lindgren M, *et al.*. Laser beam steering and tracking using a liquid crystal spatial light modulator[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2003.
- Ha E, Allard L, Sjo L, *et al.*. Retrocommunication utilizing

- electroabsorption modulators and nonmechanical beam steering [J]. *Opt Engineering*, 2005, 44(4): 045001.
- 9 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.
- 10 Engström D, Bengtsson J, Eriksson E, *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.
- 11 Zou Yongchao. Studies on Large-Field-of-View Beam Steering Based on Liquid Crystal Phased Array[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. 22–23.  
邹永超. 基于液晶相控阵的大角度光束偏转技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. 22–23.
- 12 Wang X, Wang B, Bos P J, *et al.*. Finite-difference time-domain simulation of a liquid-crystal optical phased array[J]. *JOSA A*, 2005, 22(2): 346–354.
- 13 Zhou Pu. Study on Coherent Beam Combination Technology of Fiber Lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 48–70.  
周 朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 48–70.
- 14 Wang Xiaolin. Study on Optimization Algorithm Based Adaptive Optics in Laser Phased Array [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. 22–75.  
王小林. 激光相控阵中的优化式自适应光学研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. 22–75.
- 15 Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin, *et al.*. New technology and new configuration for high energy laser system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(1): 37–42.  
周 朴, 许晓军, 刘泽金, 等. 高能激光系统的新技术与新结构[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(1): 37–42.

栏目编辑:张 腾