

基于蝙蝠算法的液晶光学相控阵波束优化

黄志伟^{**}, 王春阳^{***}, 彭丽华, 史红伟^{*}, 牛启凤

长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了解决液晶光学相控阵实际偏转效率远低于理论水平的问题,分别从迭代次数和衍射效率两个方面,将蝙蝠算法与粒子群算法进行了对比。仿真结果表明,蝙蝠算法的优化效果良好,迭代速度快于粒子群算法的,且在相控阵的波束优化方面具有良好的应用前景。

关键词 光学器件; 液晶相控阵; 蝙蝠算法; 偏转效率; 波束优化

中图分类号 O432.2 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082303

Beam Optimization of Liquid Crystal Optical Phased Array Based on Bat Algorithm

Huang Zhiwei^{**}, Wang Chunyang^{***}, Peng Lihua, Shi Hongwei^{*}, Niu Qifeng

School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The actual deflection efficiency of the liquid crystal optical phased array is far below the theoretical level. In order to solve this problem, the bat algorithm is compared with the particle swarm algorithm from two aspects of the number of iterations and the diffraction efficiency, respectively. The simulation results show that, as for the bat algorithm, its optimization effect is fine, and its iteration speed is larger than that of the particle swarm algorithm. The bat algorithm possesses a good application prospect in the beam optimization of phased array.

Key words optical devices; liquid crystal phased array; bat algorithm; deflection efficiency; beam optimization

OCIS codes 230.3720; 050.1940; 140.3300

1 引言

液晶相控阵的基本工作原理是利用液晶的双折射效应,改变入射光的相位延迟,从而改变出射光在远场的复振幅分布,使光的能量集中在特定角度,进而实现光的偏转。而实现精准的相位调制的前提是能够获得外加电压与光束相位延迟之间的关系。在实际工作中,根据需要的偏转角度,推算出相应的相位延迟分布,再根据电场和相位的关系,查找对应的电压编码,将这些电压编码转换为与之对应的交流电压,并将其加载到液晶相控阵的阵列电极之上,激光通过液晶相控阵之后便会偏转到设定的角度^[1-3]。

液晶相控阵的思想源于微波相控阵,但又区别于微波相控阵,它通过控制相控阵阵元的电压,实现了对激光出射相位分布的精准调制,从而实现精准的波束

控制。液晶相控阵具有制作工艺成熟、驱动电压低、设备体积小等优点,用液晶相控阵对光束进行控制已逐步成为激光雷达和空间光通信的重要手段之一^[4]。

但液晶相控阵的实际偏转效率远远低于理论水平,一方面由于生产工艺的限制,液晶相控阵的液晶表面不能达到绝对平整,而轻微的不平整都会导致激光波束叠加一定的相位延迟,造成波前相位畸形;另一方面由于液晶相控阵阵元间距为微米量级,且都是分立的电极,相邻电极施加的瞬时电压不同,这会引入相位延迟误差。利用相位恢复思想和利用优化算法是常用的两种提高偏转效率的方法。由于很难获得准确的波前相位,因此相位恢复的方法很难在实际中得以应用,而利用优化算法对液晶相控阵的波束进行优化,效果明显,且易于在实际中应用,常用

收稿日期: 2017-12-27; 修回日期: 2018-02-09; 录用日期: 2018-03-07

* E-mail: qitiand@qq.com; ** E-mail: jalyanderic@outlook.com; *** E-mail: wangchunyang19@cust.edu.cn

的优化算法有模拟退火法、粒子群算法、遗传算法、蝙蝠算法等^[5-7]。

2 波控模型的建立

2.1 液晶相移特性曲线

要对相控阵实现精准的相位调制,首先需要得到液晶的相移特性曲线,即电压-相位($U-\varphi$)曲线。在进行液晶相控阵的建模和仿真时,常以巴特沃兹

曲线进行近似。巴特沃兹曲线为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{(1 + v/V_c)^{2M}}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为产生的相位延迟量, v 为加载在液晶两端的电压, M 为滤波器阶数, V_c 为取值常量。

2.2 液晶移相器模型的建立

液晶相控阵的每个移相器单元都可以看作是一个相控阵天线单元,如图 1 所示。

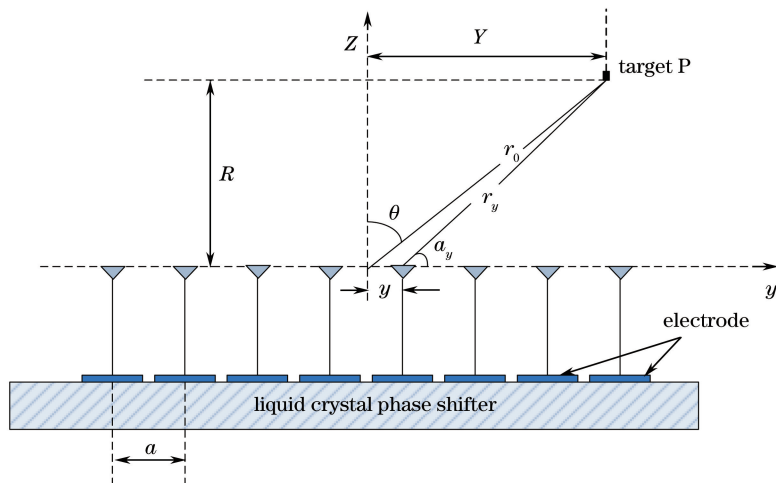


图 1 液晶相控阵移相器模型

Fig. 1 Phase shifter model of liquid crystal phased array

假设相控阵共有 N 个电极,电极与电极中心间隔为 a ,则整个液晶移相器的孔径宽度为 $D = N \times a$;设第 y 个单元的出射相位为 φ_y ,与目标 P 的距离为 r_y ,目标的垂直距离为 R ,出射光的方向函数和幅度值分别为 $f_y(\theta)$ 与 I_y , K 为比例常数,则在电极 y 处远场的光强度 E_y ^[8] 为

$$E_y = KI_y f_y(\theta) \frac{\exp(-j2\pi/\lambda r_y)}{r_y}. \quad (2)$$

2.3 液晶相控阵波束控制模型的建立

周期闪耀光栅模型和非周期闪耀光栅模型的原

理都是在出射波阵面上形成一种阶梯状相位分布,以达到角度偏转的目的^[4,9-10]。周期闪耀光栅模型扫描精度高,但能够扫描的角度是离散的且很少,非周期闪耀光栅模型的思想源于微波相控阵,即通过控制相邻电极的相位差来改变同向波前位置,以实现角度偏转,它能实现连续角度的扫描。实际上周期闪耀光栅模型是非周期闪耀光栅模型的一种特例,且非周期闪耀光栅模型包含了周期闪耀光栅模型的所有衍射角度,故非周期闪耀光栅模型更加全面、合理^[11-14]。

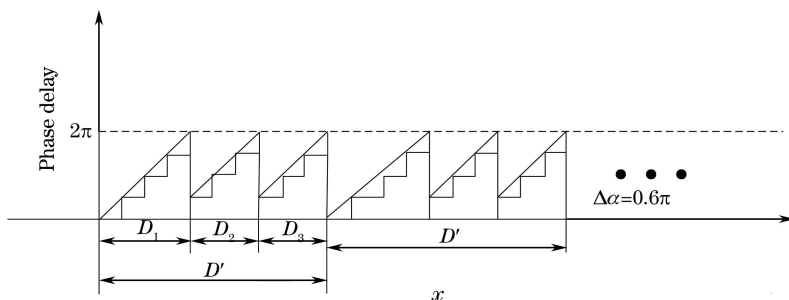


图 2 非周期连续扫描闪耀光栅的相位延迟分布

Fig. 2 Phase delay distribution of blazed grating with non-periodic continuous scanning

对液晶相控阵建立非周期控制模型,如图2所示。可以看出,光栅周期 $D_1 \neq D_2$, 阶梯相位面不再呈现周期性。由于图中相邻电极的相位延迟差 $\Delta\alpha = 0.6\pi$, 每个光栅周期内的阶梯个数 $N = 2\pi/\Delta\alpha = 10/3$, 而电极是无法离散划分的, 因此可以将三个阶梯相位面(即图中的 D_1, D_2, D_3) 合并, 得到新的光栅周期 $D' = 10A$, 并进行 2π 置位处理。故非周期闪耀光栅模型可以实现任意连续角度的扫描。

扫描角 θ 满足

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi A}{\lambda} \sin\theta, \quad (3)$$

式中 λ 为激光波长, A 为阵元间间距。非周期控制模型的出射相位分布同样由 $\Delta\alpha$ 决定, 其出射光束相位分布为

$$U'(x) = \left[\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(x - kA) \exp(jk\Delta\alpha) \right] \otimes W(A), \quad (4)$$

式中 k 为衍射级次, $\delta(\cdot)$ 为脉冲函数, $W(A)$ 为矩形窗函数, \otimes 表示卷积。

根据衍射理论中的傅里叶变换关系, 可得非周期控制模型的远场光束的复分布振幅^[4], 即

$$E(u) = C \frac{\sin(\pi u A)}{\pi u A} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(2\pi u - \frac{2\pi k}{A} + \frac{\Delta\alpha}{A}\right) = E_1(u)E_2(u), \quad (5)$$

式中 $E_1(u) = \frac{\sin(\pi u A)}{\pi u A}$, $E_2(u) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(2\pi u - \frac{2\pi k}{A} + \frac{\Delta\alpha}{A}\right)$, C 为常数, $u = \frac{\sin\theta}{\lambda}$ 。一般情况下 k 取 0, 将(2)式代入(4)式并化简, 可得到不同衍射角度远场光强分布:

$$I = |E(u)|^2 = \left[C \frac{\sin(\Delta\alpha/2)}{\Delta\alpha/2} \right]^2. \quad (6)$$

假设 $\Delta\alpha = 0$, 光束不发生偏转, 即能量全部集中在零级, 波束光强为 $I_0 = C^2$ 。根据(5)式可得到各衍射角度的衍射效率为

$$\eta = I/I_0 = \frac{[C \sin(\Delta\alpha/2)/\Delta\alpha/2]^2}{C^2} = \left[\frac{\sin(\Delta\alpha/2)}{\Delta\alpha/2} \right]^2, \quad (7)$$

当激光波长为 $1.064 \mu\text{m}$, 液晶相控阵列列个数为 480 时, 可实现的归一化偏转角度及其相应的衍射效率分布如图 3 所示。

3 蝙蝠算法

蝙蝠是一种靠声纳系统来捕食猎物和避开障碍

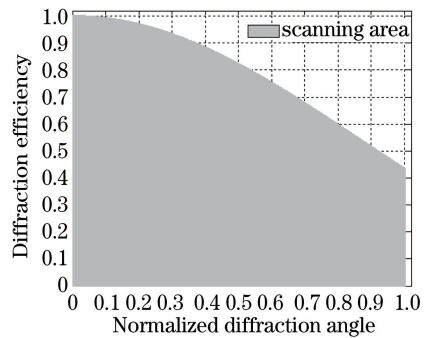


图 3 非周期控制模型衍射角度和相应的衍射效率

Fig. 3 Diffraction angles and corresponding diffraction efficiencies of non-periodic control model

物的生物, 它发射一定频率和响度的声波, 依据接收到的声波回波, 判断猎物所在的位置以及猎物移动的速度和方向, 并且能够在黑暗的环境下避开障碍物。蝙蝠发射声波的响度和频率大小与距离猎物的远近有关, 当蝙蝠越来越接近猎物时, 声波的响度将越来越小, 声波的频率将越来越高。蝙蝠算法就是依据上述蝙蝠捕猎的原理得到的, 蝙蝠算法中的每只蝙蝠就是空间解的一个维度分量。

3.1 蝙蝠的速度和位置更新

假设蝙蝠群在 d 维空间对最优解进行搜索, 且第 i 只蝙蝠在 t 时刻的速度为 $v_{id}(t)$, 位置为 $x_{id}(t)$, 那么它在 $t+1$ 时刻的速度 $v_{id}(t+1)$ 和位置 $x_{id}(t+1)$ 为

$$F_i = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min})\alpha, \quad (8)$$

$$v_{id}(t+1) = v_{id}(t) + [x_{id}(t) - x_*] F_i, \quad (9)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1), \quad (10)$$

式中 x_* 为当局最优解, F_i 为第 i 只蝙蝠所发射的声波频率, $\alpha \in (0, 1)$ 是一个随机产生的数, F_{\max} 和 F_{\min} 分别为蝙蝠发射频率的最大值和最小值。

如果从现有的全局最优解集中选出一个解(蝙蝠), 则更新这个最优解的位置为

$$\mathbf{x}_{\text{new}}(i) = \mathbf{x}_{\text{old}}(i) + \beta \mathbf{A}', \quad (11)$$

式中 $\mathbf{x}_{\text{new}}(i)$ 和 $\mathbf{x}_{\text{old}}(i)$ 分别为选出的最优解的新位置和旧位置, \mathbf{A}' 为当前蝙蝠群体发射的声波响度平均值, $\beta \in (-1, 1)$ 为一个 d 维的随机向量。

3.2 声波的速率和响度更新

蝙蝠所发射的声波速率 $R_i(t)$ 和响度 $A_i(t)$ 随着迭代过程不断更新, 当蝙蝠越来越接近猎物时, 声波的响度越来越低, 而速率越来越高, 具体更新公式如下:

$$R_i(t+1) = R_i(0) \times [1 - \exp(-\gamma t)], \quad (12)$$

$$A_i(t+1) = \lambda A_i(t), \quad (13)$$

式中 $\gamma > 0$, λ 和 γ 均为常数。且 $0 < \lambda < 1$ 。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $R_i(t) \rightarrow R_i(0)$, $A_i(t) \rightarrow 0$ 。

3.3 蝙蝠算法原理

蝙蝠算法先设置一个目标函数 $f(x)$, 这里为光束的衍射效率 η , 考虑入射光能量 I_0 恒定, 目标函数也可以表示为目标偏转点的光能量 I ; 蝙蝠算法的变量为蝙蝠位置 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 即为波控电压代码。为了求 $f(x)$ 的最大值, 赋给蝙蝠一个位置、速度、发射超声波的速率、频率和响度的初始值, 以及迭代次数 N 。如果迭代次数小于 N , 根据目标函数值寻找当前最优解 X , 更新速度、位置和频率, 以生成均匀分布的随机数 r_{rand} 。若 r_{rand} 大于发射速率, 则对当前的最优解进行一次随机的扰动以生成一个局部最优解; 若 r_{rand} 小于发射速率, 且得到的新解大于原先的最优解, 则接受新解, 同时减小发射速率和响度, 以寻找周围的更优解。如此循环便可求出当前最优的解^[15]。

蝙蝠算法结合了和声算法与粒子群算法的优点, 在迭代寻优上更具优势。粒子群算法存在过早

收敛的问题, 且容易陷于局部最优的劣势, 相比之下蝙蝠算法具有两个优势: 1) 频率可调节; 2) 可控制全局搜索和局部搜索的动态转换, 当条件满足时, 可从全局搜索跳转到局部搜索中去。

4 算法仿真

将蝙蝠算法应用于液晶光学相控阵波束优化, 为减少迭代次数, 提高效率, 将不加优化的电压代码作为变量初始值, 具体仿真参数设置如下: 种群大小均设置为 100, 阵列个数均为 480, 波束偏转角度均为 2° 。蝙蝠算法参数: 脉冲频率 $F_{\text{min}} = 0$, $F_{\text{max}} = 2$, $\alpha = 0.6$, 脉冲响度取值为 $[0, 1]$, 发射速率取值为 $[0, 1]$, 脉冲控制参数 $\gamma = \lambda = 0.7$ 。粒子群算法参数: $c_1 = c_2 = 1.484$, c_1 和 c_2 为学习因子, 用来调节学习的最大步长; $\omega = 0.648$, ω 为惯性权重, 用来调节对解空间的搜索能力。两种算法的迭代次数对比如图 4 所示。从图 4 可以看出, 当衍射效率均达到 61.8% 时, 蝙蝠算法所用的迭代次数只有粒子群算法的一半, 优化速度有所提高。

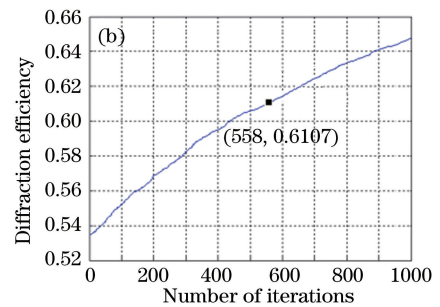
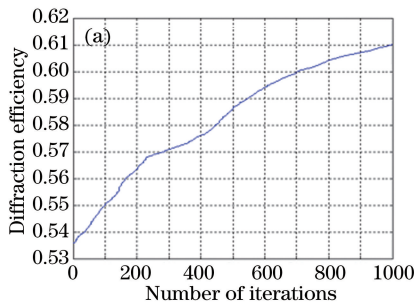


图 4 不同算法下的衍射效率优化曲线。(a) 粒子群算法; (b) 蝙蝠算法

Fig. 4 Optimization curves of diffraction efficiency under different algorithms.

(a) Particle swarm algorithm; (b) bat algorithm

利用优化算法的目的是减小甚至消除边瓣对主瓣能量的影响, 降低旁瓣能量, 提高主瓣能量。粒子群算法和蝙蝠算法对相控阵波束的优化效果如图 5

所示。从图 5 可以看出, 蝙蝠算法压缩旁瓣的效果良好, 且相对于粒子群算法, 旁瓣被压缩得更低, 主瓣更窄, 主瓣能量和衍射效率均有所提高。

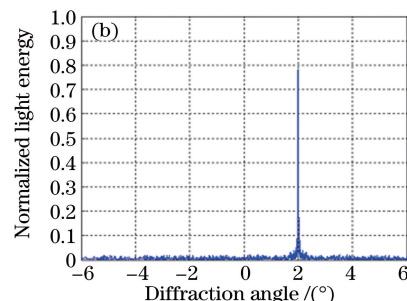
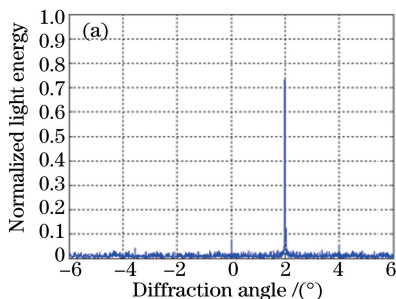


图 5 不同算法下的远场归一化光能量图。(a) 粒子群算法; (b) 蝙蝠算法

Fig. 5 Far-field normalized light intensity maps under different algorithms. (a) Particle swarm algorithm; (b) bat algorithm

5 结 论

随着空间光通信技术和激光雷达技术的不断发展,液晶光学相控阵技术的应用也越来越广泛。但液晶光学相控阵存在加工工艺缺陷以及极间干扰等问题,导致实际偏转效率远远低于理论水平。从硬件方面来提高偏转效率成本太高且难于实现,而从优化算法的角度来提高偏转效率效果明显且易于实现。研究表明,蝙蝠算法是一种高效的算法,在光学相控阵的波束优化方面具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Zou Y C, Zhou P, Si L, *et al.* Theoretical study on beam steering efficiency of liquid crystal optical phased array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(6): 061402.
邹永超, 周朴, 司磊, 等. 液晶光学相控阵光束偏转效率研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(6): 061402.
- [2] Lu Q, Sheng L, Zhang X, *et al.* Study on the pure phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator under oblique incidence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0112001.
鲁强, 盛磊, 张鑫, 等. 斜入射下液晶空间光调制器纯相位调制特性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0112001.
- [3] Zou Y C, Zhou P, Si L, *et al.* Study on the deflection efficiency of liquid crystal optical phased array beams[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(6): 061402.
邹永超, 周朴, 司磊, 等. 液晶光学相控阵光束偏转效率研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(6): 061402.
- [4] Kong L J, Zhu Y, Song Y. Study on the method of liquid crystal phased array wave control based on non periodic blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0123001.
孔令讲, 朱颖, 宋艳. 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.
- [5] Xiao F, Kong L J, Chen J. Beam-steering efficiency optimization method based on a rapid-search algorithm for liquid crystal optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4585-4590.
- [6] Savage N. Digital spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 170-172.
- [7] Yu M. Research on sidelobe compression of liquid crystal optical phased array laser radar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
于森. 液晶光学相控阵激光雷达中边瓣压缩的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [8] 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.
- [9] Yang H, Tong S F, Zhang L, *et al.* Study on controlling the beam deflection of based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 110603.
杨赫, 佟首峰, 张磊, 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 110603.
- [10] Zhou J H. Research on beam control technology of liquid crystal phased array[D]. Chengdu: University of Electronic Technology, 2014.
周建华. 液晶相控阵波控技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [11] Du S P, Huang Y M, Fu C Y. Liquid-crystal beam deflection wave control method based on phased array radar[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 581-586.
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.
- [12] Liang Y S, Yao B L, Ma B H, *et al.* Holographic optical capture and micromanipulation based on pure phase liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0309001.
梁言生, 姚保利, 马百恒, 等. 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0309001.
- [13] Zhang J, Fang Y, Wu L Y, *et al.* Liquid crystal beam deflection technique[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.
- [14] Du S P. Study on the beam deflection technique of liquid crystal applied to space optical communication [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
杜升平. 应用于空间光通信的液晶光束偏转技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [15] Yuan K Q, Xie K, Qiu Y. Antenna array optimization based on bat algorithm[J]. *Technology Innovation and Application*, 2017, 144(6): 48-49.
袁克强, 谢开, 邱宇. 基于蝙蝠算法的天线阵列优化[J]. *科技创新与应用*, 2017, 144(6): 48-49.