

基于改进粒子群算法的光学相控阵栅瓣优化

梅泽迅, 周木春*

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 光学相控阵激光雷达系统具有体积小、扫描速度快等特点,但栅瓣问题很大程度上限制了它的性能。采用不等间距光学相控阵方法破坏光学相控阵周期性从而抑制栅瓣的生成。提出一种改进的粒子群算法,引入自适应参数优化、扰动策略和最优保留策略改善传统粒子群算法寻优效果,不断优化光学相控阵最优阵元分布,最终得到使栅瓣降低至水平的阵元间距值。对所提基于改进粒子群算法的栅瓣优化算法进行模拟实验,测试结果表明最大栅瓣值降低至 0.0968,有效改善了栅瓣问题。最后使用所提算法对二维矩阵平面阵列进行研究,提出了二维非均匀光学相控阵的优化设计方法。

关键词 遥感; 激光雷达; 光学相控阵; 粒子群算法; 栅瓣抑制; 非均匀间隔

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222967

Grating Lobe Optimization of Optical Phased Array Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

Mei Zexun, Zhou Muchun*

School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China

Abstract Optical phased array LiDAR systems possess small sizes and high-speed scanning capabilities. However, their performance is severely limited by the grating lobe problem. The non-equal spacing optical phased array method resolves this limitation by breaking the periodicity of optical phased arrays and suppressing grating lobe formation. The proposed particle swarm optimization algorithm improved upon the traditional algorithm by introducing adaptive parameter optimization, a perturbation strategy, and an optimal retention strategy to improve the optimization effect of the traditional algorithm. Moreover, it continuously optimized the optimal element distribution of optical phased arrays to obtain the element spacing values that reduced the level of grating lobes. The grating lobe optimization method based on the improved particle swarm algorithm was simulated and tested. The test results revealed that the maximum grating lobe value can be reduced to 0.0968, effectively addressing the grating lobe problem. Finally, the proposed algorithm was used to study the two-dimensional rectangular planar array and an optimization design method for a two-dimensional nonuniform optical phased array was proposed.

Key words remote sensing; LiDAR; optical phased array; particle swarm optimization; grating lobe suppression; non-equal spacing

1 引言

近年来,激光雷达被广泛应用于自动驾驶技术中^[1]。传统的激光雷达以机械式激光雷达为主,机械式激光雷达通过机械装置旋转控制光束,达到光束扫描的目的,是目前发展较为成熟的激光雷达,但因为体积大、价格高、结构复杂、机械部件寿命短等缺点,特别

是高昂的成本,使得其大规模应用受到限制^[2]。因此,小型化、低成本、全固态的激光雷达成为当下重点研发的对象,其中,光学相控阵激光雷达渐渐成为近年研究的热点^[3]。

作为一种新型激光扫描技术,光学相控阵体积小,不受机械扫描系统的惯性约束,扫描速率更快^[4]。但由于光波波长较短,阵元的间距很难小于光波的一

收稿日期: 2022-11-04; 修回日期: 2022-11-17; 录用日期: 2022-12-23; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 中国博士后科学基金(2016M601817)

通信作者: *mczhou@sohu.com

半^[5]。此外,由于入射光源和驱动电压的干扰^[6],光学相控阵激光雷达会在远场形成栅瓣与旁瓣,损耗光束能量,影响光束扫描效率与精度,且扫描过程中随着扫描角度的增大,栅瓣与旁瓣会进一步增大,甚至可能超过主瓣。因此为提高光学相控阵激光雷达的性能,必须对栅瓣进行抑制。

非均匀的不等间距排列方式打破了光学相控阵等间距排列时阵元间距小于半个波长的限制,可以有效降低光学相控阵的栅瓣^[7],多位学者使用优化算法对该问题进行了研究。李瑾^[8]通过遗传算法使阵列间距遵循一定的变化规律,达到优化光束的效果。张守强^[9]将遗传算法与粒子群算法结合形成混合遗传-粒子群算法,将栅瓣降至-19.83 dB。李文磊等^[10]提出一种基于混合蝙蝠算法的解决方案,针对传统蝙蝠算法局部搜索能力弱的问题,融合遗传算法的算子将边模抑制比改善至优于-8 dB。陈建明等^[11]使用混沌优化粒子群算法寻找最优的相控阵元素分布,将最大栅瓣值降到0.2以下。

综上所述,光学相控阵激光雷达具有很大潜力,但栅瓣问题限制了其潜力的发挥。为抑制栅瓣,提高光学相控阵的性能,本文采用收敛速度快、搜索效率高的改进粒子群算法优化光学相控阵的阵元间距,引入自适应参数优化、扰动策略和最优保留策略改善传统粒子群算法寻优效果,不断优化光学相控阵最优阵元分布,最终对光学相控阵的栅瓣抑制起到了较好的效果。

2 基本原理

2.1 光学相控阵基本原理

光学相控阵的基本原理是:光场从光学天线发射,通过控制相控阵中每个独立单元的初始相位产生固定相位差,使发射的光束只在设定的方向上产生干涉,其余方向上不满足同相条件,不发生干涉。应用这种原理在指定方向上产生高强度光束^[12]。

等间距的一维光学相控阵由 N 个阵元组成,图 1 为其原理图。

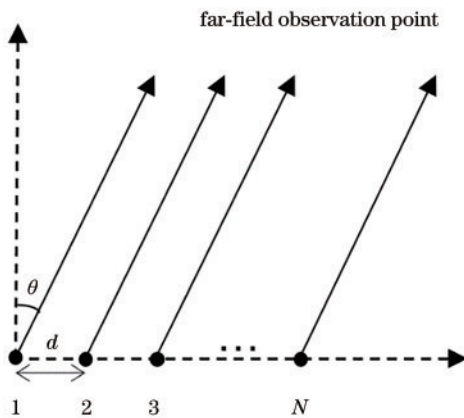


图 1 一维光学相控阵原理图

Fig. 1 Schematic of one dimensional optical phased array

假设光源的照射是均匀分布的,其远场电场分布为

$$E(\theta) = \sum_{i=1}^N \exp[ji(\Delta\varphi_d - \Delta\varphi)], \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi_d = kd \sin \theta$; $\Delta\varphi = kd \sin \theta_s$; θ 为阵元衍射角; θ_s 为阵列的扫描角度; $\Delta\varphi_d$ 是阵元间距 d 导致的相位差; $\Delta\varphi$ 是使光束偏转角度为 θ_s 时所需的相位差。

光学相控阵在远场由于干涉加强会出现最大光强方向,这些方向即为主瓣和栅瓣的位置,其出现条件为 $\frac{2\pi}{\lambda} d(\sin \theta_m - \sin \theta_s) = 0 + 2m\pi, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

式中: $m = 0$ 对应的是主瓣; $m \neq 0$ 时,在 $\theta_s = \theta_m$ 处出现栅瓣。为了避免栅瓣出现,需要保证光学相控阵间距小于半个波长,而这在工程上难度较大,因此需从改变阵元排布入手,破坏生成栅瓣的条件。采用不等间距的阵元排布可打破远场光强相位周期性结构。此时远场的电场分布为

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N \exp\left[jk \sum_{m=0}^n d_m(\sin \theta - \sin \theta_s)\right], \quad (3)$$

考虑单缝因子,则远场的相对光强为

$$I(\theta) = |E(\theta)|^2 = \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2 \times \left\{ \sum_{n=1}^N \exp\left[jk \sum_{m=0}^n d_m(\sin \theta - \sin \theta_s)\right] \right\}^2, \quad (4)$$

式中: $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2$ 为单缝因子; $\alpha = \pi a \frac{\sin \theta}{\lambda}$; a 是电极宽度; λ 是光的波长。

图 2(a) 为阵元间距为 $2 \mu\text{m}$ 的等间距光学相控阵远场光强图,图 2(b) 为不等间距光学相控阵远场光强图, λ 都为 $1 \mu\text{m}$ 。

可以看出,相比于等间距光学相控阵,不等间距光学相控阵最大栅瓣虽显著减小,但数值仍然较高,为进一步地抑制栅瓣,采用改进粒子群算法对光学相控阵的阵元排布进行优化。

2.2 改进的粒子群算法

粒子群算法(PSO)是一种智能优化算法。本实验中,一个粒子代表一组阵元间距值,算法根据适应度函数来评价历代栅瓣情况,取峰值旁瓣电平(L_{PSLL})作为适应度函数:

$$L_{\text{PSLL}} = \frac{I_{s \max}}{I_{\text{main}}}, \quad (5)$$

式中: $I_{s \max}$ 为最大栅瓣光强; I_{main} 为主瓣光强。

每次迭代时粒子都会更新自己的速度和位置,传统粒子群算法速度与位置的计算如下:

$$v_i^{(t+1)} = \omega v_i^{(t)} + c_1 r_1 (p_{\text{best}} - x_i^{(t)}) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - x_i^{(t)}), \quad (6)$$

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t)}, \quad (7)$$

式中: ω 为惯性权重参数; c_1, c_2 为加速因子; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

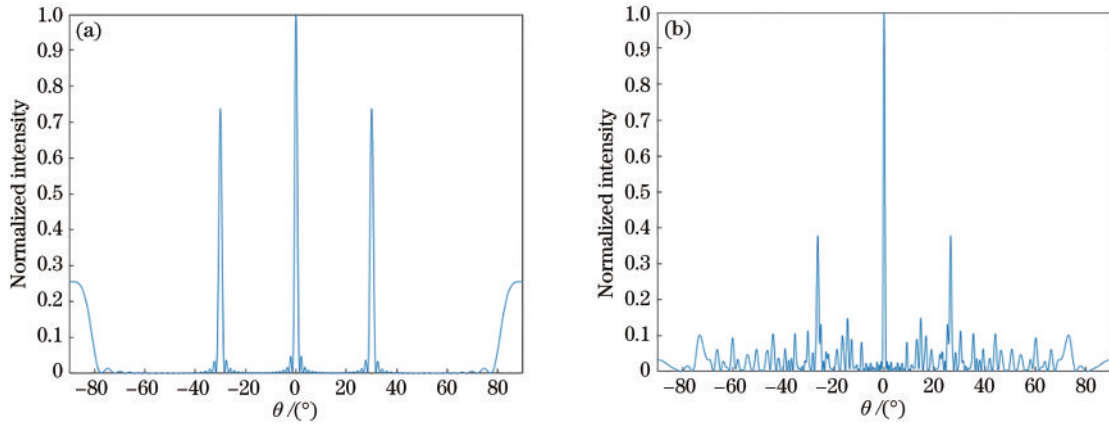


图2 光学相控阵远场光强图。(a)等间距;(b)不等间距

Fig. 2 Far-field light intensity of optical phased array. (a) Equal spacing; (b) non-equal spacing

1]之间的随机数; $x_i^{(t)}$ 为第*i*个粒子的位置; $v_i^{(t)}$ 为第*i*个粒子的速度; p_{best} 为个体最佳位置; g_{best} 为群体最佳位置。

所提改进粒子群算法做了如下几点改进:

1)自适应参数优化。采用结合正弦函数的方式对 ω 进行自适应优化,表达式如下:

$$\omega(t) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \sin\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{t}{T}\right)^2\right], \quad (8)$$

式中: t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为 ω 的最大值与最小值。

加速因子 c_1 、 c_2 分别控制粒子的自我学习和群体学习,设 c_1 初始值为2,终止值为0.5, c_2 初始值为0.5,终止值为2,利用待定系数法 $\begin{cases} c_1 = k_1\omega + b_1 \\ c_2 = k_2\omega + b_2 \end{cases}$ 得到 c_1 、 c_2 关于 ω 的线性方程组:

$$\begin{cases} c_1 = 3\omega - 0.7 \\ c_2 = -3\omega + 3.2^\circ \end{cases} \quad (9)$$

迭代前期 ω 、 c_1 应取较大值,而 c_2 较小,以利于粒子尽可能搜索解空间,提高找到全局最优阵元间距值的概率。后期减小 ω 、 c_1 ,增大 c_2 ,加快算法速度,使粒子群快速靠拢。

2)扰动策略。粒子群算法收敛速度过快易陷入局部极值,最终的阵元间距值很可能对栅瓣抑制效果不足。因此,所提算法引入扰动策略机制,每次更新时按照一定概率随机生成新的一组阵元间距值扰动粒子群。此处引入扰动概率 p_{disturb} ,其公式如下:

$$p_{\text{disturb}} = \begin{cases} p_{d1}, & 1 \leq t \leq T_1 \\ p_{d2}, & T_1 \leq t \leq T_2 \\ \vdots \\ p_{dc}, & T_c \leq t \leq T \end{cases}. \quad (10)$$

设置 c 个扰动概率值,并随着迭代次数增加而增加,即 $p_{d1} \leq p_{d2} \leq \dots \leq p_{dc}$ 。对每个粒子,在 $[0, 1]$ 区间内生成一个随机数 r ,若 r 小于 p_{disturb} ,则随机生成一个新粒子,若新粒子适应度值更好,则用其替换原粒子。

3)最优保留策略。为防止粒子朝栅瓣问题更严重的阵元间距值更新,也为了保存每一代适应度最优的粒子信息,将适应度最好的粒子直接复制到下一代替代适应度最差的粒子,提升算法收敛速度。

3 实验测试与结果分析

为得到低栅瓣的不等间距排布光学相控阵,以一维光学相控阵为例进行实验测试,验证所提方法的性能。选取的光学相控阵阵元数量为20,光的工作波长为 $1 \mu\text{m}$,由文献[10]可知,相邻阵元间隔要大于 $1.4 \mu\text{m}$,考虑工艺容差,将优化的相邻阵元的间距最小值限定为 $2 \mu\text{m}$,为了使整个器件尺寸不至于过大,将最大值限定为 $5 \mu\text{m}$,电极宽度为 $0.5 \mu\text{m}$ 。将改进粒子群算法应用于光学相控阵非等间距阵元优化,算法迭代次数为300,粒子群规模为30,随机选取符合限制的间距值作为第一代粒子群变量,令惯性权重最大值 ω_{\max} 为0.9,最小值 ω_{\min} 为0.4。设置3个扰动概率值, $T_1 = 100$, $T_2 = 200$, $P_{d1} = 0.1$, $P_{d2} = 0.4$, $P_{d3} = 0.7$ 。

首先,对于偏转角度为 0° 时的光学相控阵远场光强进行计算,使用改进的粒子群算法优化后的远场光强如图3(a)所示。在图2(b)中,未经算法优化的光学相控阵远场光强图最大栅瓣值为0.3787,算法优化后,可以看出,偏转角度为 0° 的远场光强图中栅瓣大幅度降低,最大栅瓣值为0.0968,下降了0.2819,栅瓣抑制率为74.4%。算法优化后的相控阵相邻阵元的最优阵元间距结果为 $4.616 \mu\text{m}$ 、 $4.827 \mu\text{m}$ 、 $2.190 \mu\text{m}$ 、 $3.052 \mu\text{m}$ 、 $4.870 \mu\text{m}$ 、 $3.604 \mu\text{m}$ 、 $2.431 \mu\text{m}$ 、 $3.085 \mu\text{m}$ 、 $2.561 \mu\text{m}$ 、 $2.732 \mu\text{m}$ 、 $3.354 \mu\text{m}$ 、 $3.541 \mu\text{m}$ 、 $3.557 \mu\text{m}$ 、 $2.992 \mu\text{m}$ 、 $4.353 \mu\text{m}$ 、 $2.263 \mu\text{m}$ 、 $2.304 \mu\text{m}$ 、 $4.208 \mu\text{m}$ 、 $4.107 \mu\text{m}$ 、 $4.225 \mu\text{m}$ 。确定间距分布参数后,进一步分析不同偏转角度时该组间距值的不等间距光学相控阵栅瓣被抑制的情况。图3(b)、(c)、(d)分别为偏转角度为 15° 、 30° 、 45° 时得到的光学相控阵远场光强图,其最大栅瓣值分别为0.1267、0.1621、0.2267。可以看出,随偏转角度的增加,光学相控阵的栅瓣会不断升

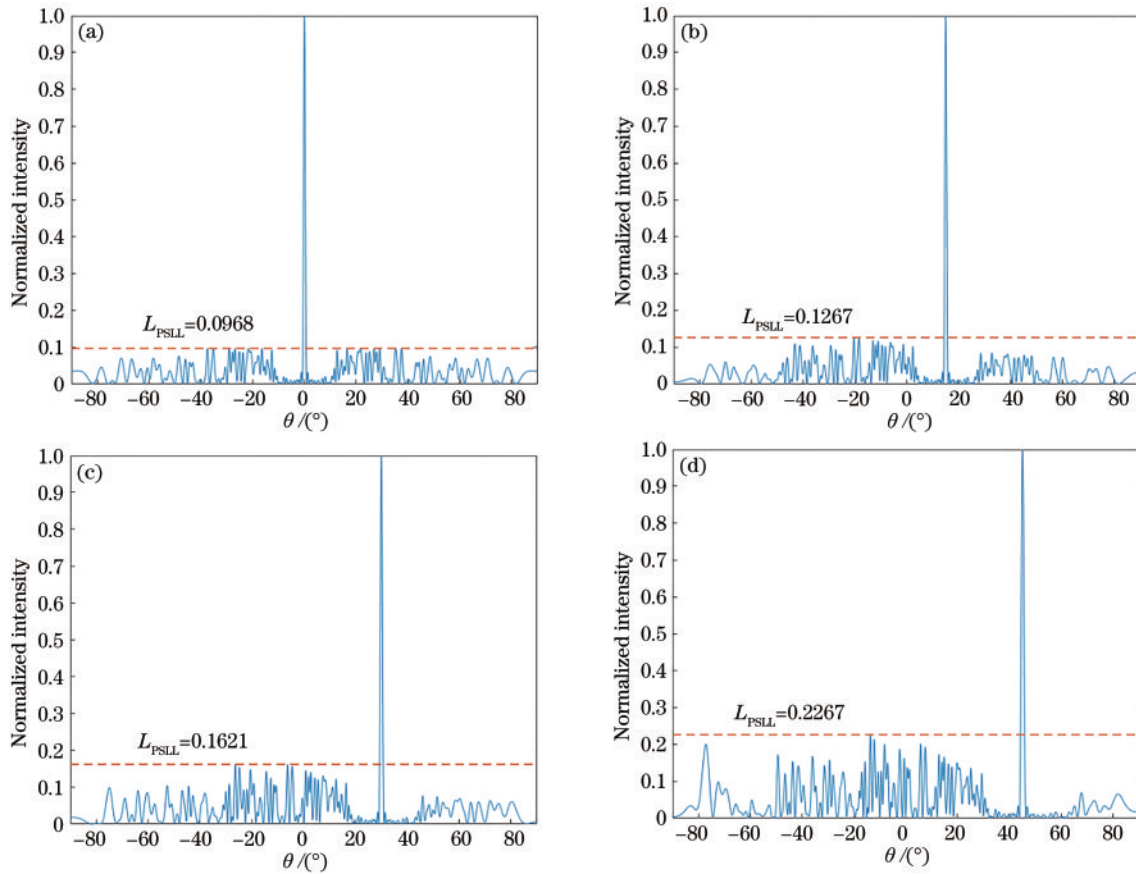


图 3 优化后光学相控阵远场光强图。(a) 0° ; (b) 15° ; (c) 30° ; (d) 45°

Fig. 3 Far-field intensity of optimized optical phased array. (a) 0° ; (b) 15° ; (c) 30° ; (d) 45°

高,且偏转相同角度时栅瓣增加的幅度更大,但在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 的扫描范围内栅瓣仍保持在较低的水平之内,在偏转角度为 0° 时效果最好。

将所提改进粒子群算法应用于不同规模、不同间距

范围的光学相控阵进行栅瓣优化,图 4 为阵列规模 $N=20$ 与 $N=30$ 时光学相控阵在 0° 偏转角下的栅瓣优化对比图,图 4(a) 最大栅瓣值为 0.0968,图 4(b) 最大栅瓣值为 0.0896,即增大光学相控阵规模会使栅瓣降低。

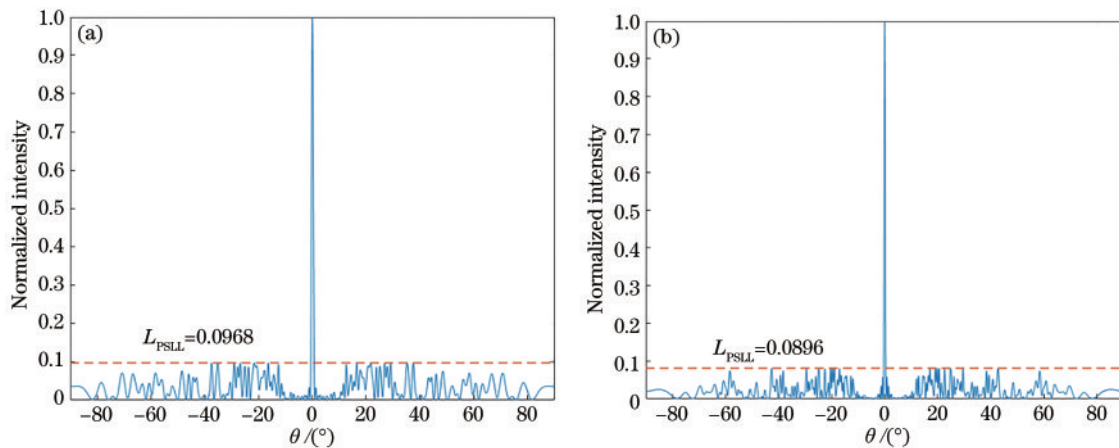


图 4 不同规模光学相控阵优化后远场光强图。(a) $N=20$; (b) $N=30$

Fig. 4 Far-field intensity of optimized optical phased array at different scales. (a) $N=20$; (b) $N=30$

图 5 为间距范围为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 与 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 时光学相控阵在 0° 偏转角下的栅瓣优化对比图,图 5(a) 最大栅瓣值为 0.0968,图 5(b) 最大栅瓣值为 0.1632。即随着单元间距范围的增加,光学相控阵的栅瓣也会增加。可见工程应用时,应在工艺技术水平允许的情况下将

光学相控阵尽可能做到阵列规模大而单元间距小,这样更有利于对栅瓣的抑制。

为了验证改进粒子群算法对光学相控阵性能的优化效果,将其与粒子群算法以及遗传算法进行比较,优化过程中各种参数与上文所述相同。此外,遗

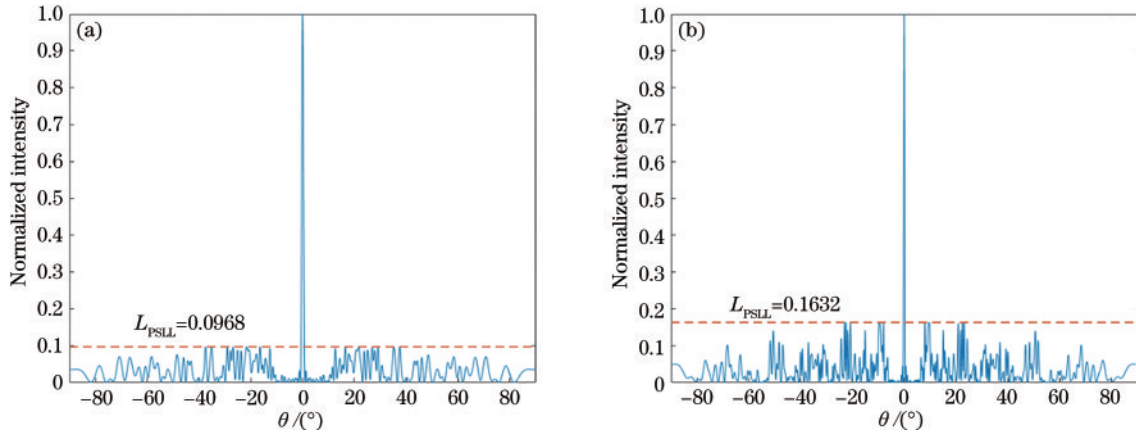


图 5 不同间距范围光学相控阵优化后远场光强图。(a) 2~5 μm; (b) 5~8 μm

Fig. 5 Far-field intensity of optimized optical phased array at different spacing ranges. (a) 2~5 μm; (b) 5~8 μm

传算法的交叉概率和变异概率代表染色体互相交换基因的概率和实现突变翻转的概率,因此交叉概率应取较大、变异概率应较小,本研究分别取 0.8 和 0.2。图 6

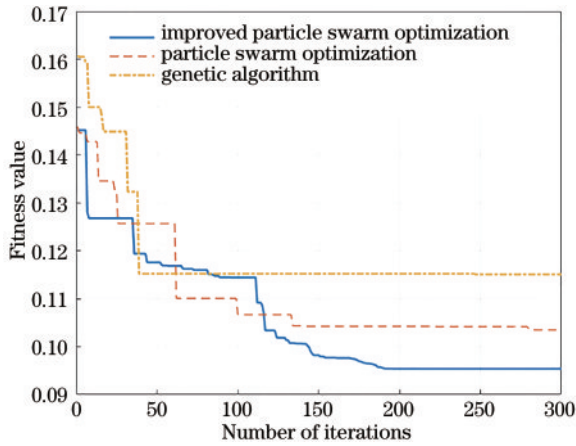


图 6 3 种优化算法收敛曲线对比图

Fig. 6 Comparison of convergent curves of three optimization algorithms

是 3 种优化算法在偏转角度 0°角时进行优化的收敛曲线,横坐标为迭代次数,纵坐标为历代最优适应度值。

从图 6 可以看出,所提改进粒子群算法对栅瓣的压缩效果最好,并且相对于其他算法更易跳出局部极值,寻找不等间距元素分布的水平更高。

将改进的粒子群算法推广到二维光学相控阵领域,对二维相控阵的行单元间距与列单元间距进行非等间距优化。以 10×10 规模的二维光学相控阵为例进行数值模拟分析,其余参数与一维光学相控阵优化时相同。优化前二维相控阵的间距为 2 μm,优化后得到的行排布间距值为 4.813 μm、3.374 μm、2.814 μm、3.097 μm、4.158 μm、3.572 μm、4.219 μm、3.879 μm、2.544 μm、2.224 μm,列排布间距值为 4.583 μm、4.111 μm、4.543 μm、3.194 μm、2.265 μm、2.5002 μm、2.443 μm、2.201 μm、3.674 μm、2.835 μm。优化前后的二维光学相控阵远场光强图如图 7 所示。其中,θ 为行偏转角度,φ 为列偏转角度。

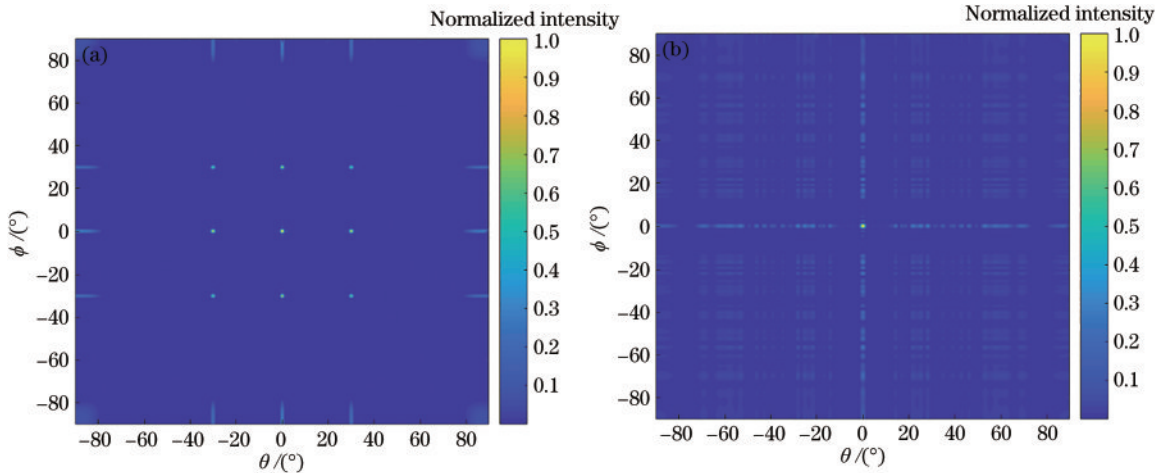


图 7 二维光学相控阵远场光强图。(a)等间距;(b)优化后的不等间距

Fig. 7 Far-field light intensity of 2D optical phased array. (a) Equal spacing; (b) non-equal spacing after optimization

优化后最大栅瓣值为 0.2861,可以看出优化后得到的非均匀间距二维光学相控阵的栅瓣减弱。因此,所提基于改进粒子群算法的非等间距优化方法可以推广至二维光学相控阵的应用当中。

4 结 论

针对栅瓣过高影响光学相控阵激光雷达性能问题,基于不等间距排布能够降低栅瓣的原理,提出一种基于改进粒子群算法优化光学相控阵栅瓣的方法,不断改善不等间距光学相控阵的间距值,最终得到了最优阵元间距分布,从而将栅瓣抑制到极低的水平。模拟测试结果表明,不等间距优化后的光学相控阵,栅瓣得到了很好的抑制,当扫描角度为 0° 时,优化后的一维光学相控阵最大栅瓣值降低到了 0.0968,相比未经算法优化前随即间距排布光学相控阵提升了 74.4%。虽然随着扫描角度的增大栅瓣也会增大,但在整个扫描范围内仍保持在较低水平,极大减小了栅瓣对整体扫描的影响。最后将基于改进粒子群算法的栅瓣抑制方法应用到二维光学相控阵领域,对其栅瓣也起到了良好抑制效果。

参 考 文 献

- [1] Hsu C P, Li B D, Solano-Rivas B, et al. A review and perspective on optical phased array for automotive LiDAR [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(1): 8300416.
- [2] Royo S, Ballesta-Garcia M. An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles[J]. Applied Sciences, 2019, 9(19): 4093.
- [3] 陈敬业, 时尧成. 固态激光雷达研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 47-57.
Chen J Y, Shi Y C. Research progress in solid-state LiDAR[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 47-57.
- [4] Raj T, Hashim F H, Huddin A B, et al. A survey on LiDAR scanning mechanisms[J]. Electronics, 2020, 9(5): 741.
- [5] Jin Y D, Wu J, Yan A M, et al. Optimum beam steering of optical phased arrays using mixed weighting technique [J]. Optik, 2014, 125(16): 4568-4571.
- [6] 彭丽华. 光波导光学相控阵的边瓣抑制算法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
Peng L H. Study on the method of side lobe suppression with optical wave-guide phased array[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [7] Yin S, Kim J, Wu F, et al. Ultra-fast speed, low grating lobe optical beam steering using unequally spaced phased array technique[J]. Optics Communications, 2007, 270(1): 41-46.
- [8] 李瑾. 光波导光学相控阵光束分析与优化[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
Li J. Light beam analysis and optimization of waveguide optical phased array[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [9] 张守强. 光波导相控阵波束指向控制方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
Zhang S Q. Study on beam pointing control method for phased array of optical waveguides[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [10] 李文磊, 陈敬业, 时尧成. 基于混合蝙蝠算法的低栅瓣光学相控阵[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1813001.
Li W L, Chen J Y, Shi Y C. Optical phased array with low grating lobes optimized by using hybrid bat algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1813001.
- [11] 陈建明, 郝一方. 光学相控阵栅瓣的改善及优化方法 [J]. 电光与控制, 2020, 27(2): 107-110.
Chen J M, Jia Y F. Improvement and optimization method of grating lobes of optical phased array[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2): 107-110.
- [12] 瞿荣辉, 叶青, 董作人, 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1861-1867.
Qu R H, Ye Q, Dong Z R, et al. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 1861-1867.