

引用格式:陈建明,郑一方. 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.

## 光学相控阵栅瓣的改善及优化方法

陈建明, 郑一方

(华北水利水电大学, 郑州 450045)

**摘要:** 光学相控阵技术具有扫描速度快、扫描精度高以及灵敏度高等优点,但是栅瓣的存在很大程度上限制了它的特性。提出了一种优化的不等间距方法,用于光学相控阵的光束扫描控制,分析了不等元素间距的光学相控阵对栅瓣抑制的影响,其中,通过改进的粒子群优化算法优化相邻元素的间距,得到最小峰值旁瓣电平。对一维光学相控阵进行数据模拟,仿真结果表明,采用改进的粒子群优化算法优化元素分布可以很好地抑制栅瓣,峰值旁瓣电平(PSLL)可以降低至 0.2 以下。

**关键词:** 光学相控阵; 光束控制; 粒子群算法; 栅瓣

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.023

## Improvement and Optimization Method of Grating Lobes of Optical Phased Array

CHEN Jianming, JIA Yifang

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** Optical phased array technology has the advantages of fast scanning speed, high scanning precision and high sensitivity, but the existence of grating lobes largely limits its characteristics. An optimized unequal spacing method is proposed for beam scanning control of optical phased arrays. The effects of optical phased arrays with unequal element spacing on grating lobe suppression are analyzed. The minimum Peak Side-Lobe Level (PSLL) is obtained by optimizing the spacing of adjacent elements by an improved particle swarm optimization algorithm. The data simulation of the one-dimensional optical phased array shows that, optimizing the element distribution with the improved particle swarm optimization algorithm can suppress the grating lobes well, and the PSLL can be as low as 0.2 or less.

**Key words:** optical phased array; beam control; particle swarm optimization; grating lobe

### 0 引言

光束控制是激光雷达、自由空间光通信和激光成像的主要技术之一<sup>[1]</sup>,在过去的几十年中,人们提出并实施了各种光束转向控制方法,包括机械波束转向、MEMS 波束转向和光学相控阵波束转向,其中,光学相控阵采用非机械光束转向技术<sup>[2-4]</sup>。1972 年 MEYER<sup>[5]</sup>使用块状钽酸锂移相器开发了一维光学相控阵,该阵列由 46 个相移器组成,相移器间距为 0.5 mm。随后人们对光学相控阵进行了大量的研究,但由于其存在栅瓣和旁瓣,会产生很大的能量损耗,导致扫描准确度降低。根据奈奎斯特采样准则,元素间距  $d$  应小于波

长  $\lambda$  的一半<sup>[6]</sup>,即  $d < \lambda/2$ ,在微波领域由于波长很长,容易满足此条件,然而光波波长很短,受当前加工工艺限制,很难满足  $d < \lambda/2$ ,因此在远场会产生栅瓣和旁瓣。为了提高光学相控阵的性能,必须对栅瓣进行抑制。JIN 等提出在光学相控阵器件后加一块复合板<sup>[7]</sup>,研究了振幅和相位调制的混合加权法对光学相控阵栅瓣的抑制,并对混合加权法进行了优化,最后得到理想的振幅和相位优化参数;张珊珊提出相位加权法<sup>[8]</sup>,在光学相控阵中引入步长系数,分析了步长系数变化对光学相控阵栅瓣消除的影响;YIN 等<sup>[9]</sup>提出使用不等间距相控阵的低栅瓣光束控制技术。但上述研究中尚未提出光学相控阵(OPA)的最佳元素分布。

对于光学相控阵的栅瓣问题,本文提出并研究了一种基于不等间距相控阵抑制栅瓣的方法,应用改进的粒子群算法来寻找理想的元素分布,可以快速优化

收稿日期:2019-03-04

修回日期:2019-12-05

作者简介:陈建明(1962—),男,河南洛阳人,学士,教授,研究方向为检测与自动化装置、模式识别与人工智能。

相控阵元素的分布,很好地抑制了栅瓣和旁瓣,通过对一维光学相控阵的模拟,研究了该方法的性能。另外,分析了不同扫描角度及不同参数下的峰值旁瓣电平(PSLL)变化。

## 1 等间距光学相控阵概述

等间距一维光学相控阵由  $N$  个阵元组成,阵元间距为  $d$ ,  $D$  为  $N$  个阵元的总间距,当平行光束垂直于光学相控阵入射时,光束通过光学相控阵发生偏转,基本原理如图 1 所示,其中,  $\theta_s$  是扫描角度,  $P$  为光束的主瓣位置。

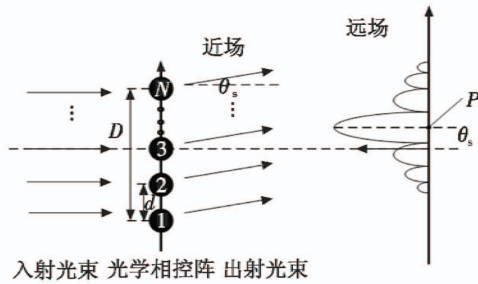


图 1  $N$  个阵元组成的等间距一维光学相控阵模型图

Fig. 1 Equidistant one-dimensional optical phased array model composed of  $N$  array elements

远场的电场分布表示为

$$E(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi)} \quad (1)$$

式中:  $\Delta\varphi_d$  为原本阵元间距产生的相位差;  $\Delta\varphi$  为偏转  $\theta_s$  所需要计算机控制的相邻阵元的相位差;  $N$  为光学相控阵的阵元数;  $n$  为迭代次数。基于式(1),在无单缝衍射因子时,远场的光强分布表示为<sup>[10]</sup>

$$I(\theta) = |E(\theta)|^2 = A^2 \frac{\sin^2 \left[ N \frac{\pi}{\lambda} d (\sin \theta - \sin \theta_s) \right]}{\sin^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} d (\sin \theta - \sin \theta_s) \right]} \quad (2)$$

式中,  $A$ ,  $\theta$  和  $\lambda$  分别为相同的发射振幅、衍射角和光波的工作波长。在式(2)的基础上,主瓣对应的角度为  $\theta_s$ , 栅瓣的角度为<sup>[11]</sup>

$$\theta = \pm \arcsin \left( \frac{m\lambda}{d} + \sin \theta_s \right) \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

式中,  $m$  表示阶数。

图 2 为光学相控阵在间距为  $6\lambda$  时远场光强分布,可以观察到与主瓣强度相似的栅瓣。

对于不等间距光学相控阵,阵元间距  $d$  不再是常数,此时相邻阵元的相位差为

$$\Delta\varphi_m = \frac{2\pi}{\lambda} d_m (\sin \theta - \sin \theta_s) \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

远场的电场分布为

$$E(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{m=0}^{n-1} d_m (\sin \theta - \sin \theta_s) \right]} \quad (5)$$

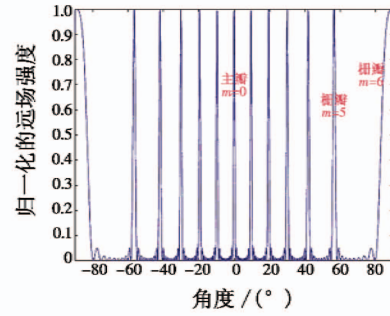


图 2 间距为  $6\lambda$  的光学相控阵远场强度分布图

Fig. 2 Far-field intensity distribution of optical phased array with spacing of  $6\lambda$

## 2 不等间距光学相控阵的改进

为了实现对栅瓣的最佳抑制,采用改进的粒子群优化算法优化不等间距,优化算法的流程如图 3 所示。

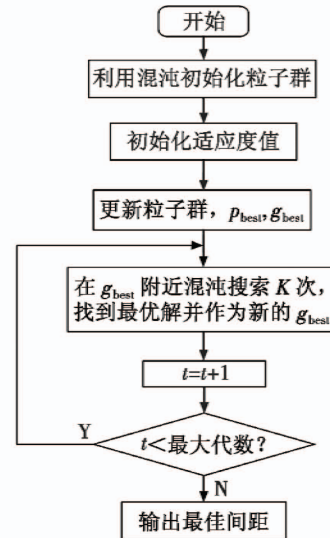


图 3 改进的粒子群算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the improved particle swarm algorithm

将粒子群算法与混沌优化算法相结合,对惯性权重进行优化。首先,在加工技术的限制下,随机生成一组初始元素间距,将其作为粒子在粒子群算法中使用,然后,对这些粒子在解决问题方面进行适应性评估,用峰值旁瓣电平(PSLL)的大小作为评估优异程度的标准。当 PSLL 越小时,表示优化得越好,即

$$L_{\text{PSLL}} = \frac{I_{\text{max, sidelobe}}}{I_{\text{mainlobe}}} \quad (6)$$

式中:  $I_{\text{max, sidelobe}}$  为旁瓣的最大光强;  $I_{\text{mainlobe}}$  表示主瓣的光强。在这种情况下,改进的粒子群算法目标是寻找最佳的元素分布,以此来最小化峰值旁瓣电平。通过使用混沌变量的伪随机性和遍历特征,模拟鸟类觅食的自然行为来执行搜索,完成出色的全局搜索,并将惯性权重设置为动态衰减趋势,有助于获得更好的自适应评估结果,惯性权重表示为<sup>[12]</sup>

$$\omega = \omega_m + \frac{\omega_M + \omega_m}{t} \quad (7)$$

式中： $\omega_M$  和  $\omega_m$  分别为惯性权重  $\omega$  的上限和下限； $t$  为进化代数。重复该优化过程，直到达到所需数量的循环或进化代数，当粒子群进化到下一代时，可以表示为

$$\begin{cases} V(t+1) = \omega V(t) + C_1 r_1 (p_{best} - X(t)) + C_2 r_2 (g_{best} - X(t)) \\ X(t+1) = X(t) + V(t+1) \end{cases} \quad (8)$$

式中：惯性权重  $\omega$  是当前速度  $V(t)$  的比例系数，取  $[0, 1]$  之间的随机数； $r_1$  和  $r_2$  均是  $[0, 1]$  之间的随机数； $C_1$  和  $C_2$  是学习因子，影响粒子群追踪最优解的快慢； $p_{best}$  为个体最优解； $g_{best}$  为全局最优解； $X(t+1)$  表示下一代的位置，由当前位置  $X(t)$  加下一代速度  $V(t+1)$  得到。在粒子群算法与混沌优化算法结合时，加入混沌变量，选择逻辑映射生成伪随机序列，可表示为<sup>[13]</sup>

$$Z: a_{n+1} = \mu a_n (1 - a_n) \quad (9)$$

式中： $Z$  为混沌变量； $a_n$  是混沌变量的一次取值； $\mu$  为控制参量。当  $\mu = 4$  时，混沌变量  $Z$  处于全混沌状态，具有混沌性。

### 3 仿真结果

以一维光学相控阵为例研究了该方法的性能。在仿真中，光学相控阵由 9 个阵元组成，光的工作波长为  $1 \mu\text{m}$ ，相邻阵元的间距在  $6 \sim 8 \mu\text{m}$  之间。对于改进的粒子群算法，根据栅瓣抑制情况对参数进行了优化，进化代数、粒子群大小和学习因子分别为 100, 40, 2，惯性权重的最大值与最小值分别为 0.9 和 0.4。首先，研究了扫描角度在  $0^\circ$  时光学相控阵的远场强度，对于改进的粒子群算法优化不等间距 OPA，远场强度如图 4 所示。

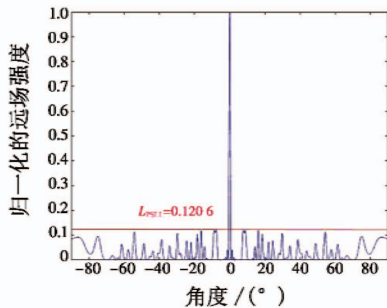


图 4 优化元素分布后扫描角度为  $0^\circ$  时的远场强度  
Fig.4 Far field intensity when the scan angle is  $0^\circ$  after optimizing the element distribution

图中，栅瓣被抑制并降至 0.1206。此时，OPA 相邻阵元间的理论优化距离分别为  $6.511 \mu\text{m}$ ,  $7.056 \mu\text{m}$ ,  $7.350 \mu\text{m}$ ,  $8.000 \mu\text{m}$ ,  $7.177 \mu\text{m}$ ,  $6.241 \mu\text{m}$ ,  $6.160 \mu\text{m}$ ,  $8 \mu\text{m}$ 。对于 PSLL，与文献[14]中用改进的遗传算法在  $1 \sim 3 \mu\text{m}$  优化不等间距相比，虽然提高了 0.02，但是采用改进的粒子群算法搜索速度快、效率高，加入混沌优

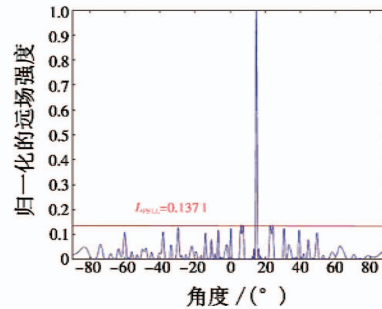
化很好地解决了容易陷入局部最优的缺点，并且对制造精度没有那么高的要求。如表 1 所示，为了验证改进粒子群算法的有效性，与遗传算法的运算时间相比较，改进的粒子群算法比传统的粒子群算法时间缩短了 20%。改进的遗传算法相比传统的遗传算法时间缩短了 12%，而改进的粒子群算法相比改进的遗传算法，时间缩短了 14%。

表 1 遗传算法和粒子群算法的运算时间对比表

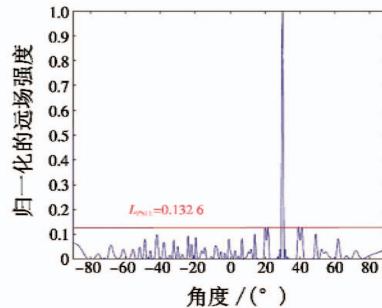
Table 1 Operation time of the genetic algorithm and the particle swarm optimization algorithm

	遗传算法运算时间/s	粒子群算法运算时间/s
传统	247	235
改进	218	188
时间缩短/%	12	20

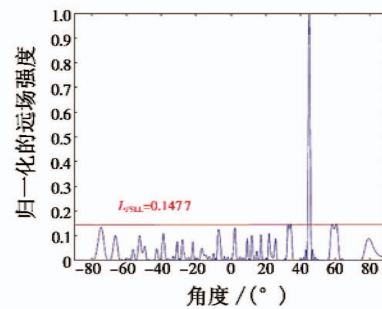
随后计算了在不同扫描角度的情况下对应的栅瓣抑制情况，如图 5 所示，表示了扫描角度分别为  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $60^\circ$  时不等间距光学相控阵的远场光强，相应的 PSLL 分别为 0.1371, 0.1326, 0.1477 和 0.1516。计算结果表明，通过改进的粒子群算法，对光学相控阵的元素分布进行优化，可以对栅瓣和旁瓣进行很好的抑制。



(a) 扫描角度为  $15^\circ$



(b) 扫描角度为  $30^\circ$



(c) 扫描角度为  $45^\circ$

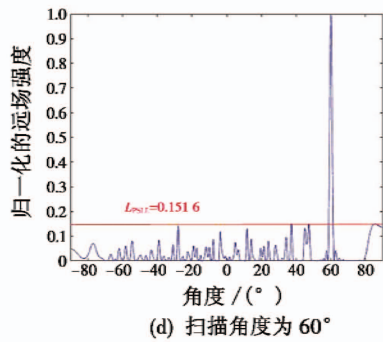


图5 不等间距光学相控阵的远场强度

Fig.5 Far-field intensity of unequal-spacing optical phased arrays at 15°, 30°, 45°, and 60°

在图5中可以看出,PSLL随着扫描角度的变化发生变化,对其仿真时,光波波长还是 $1\ \mu\text{m}$ ,相邻元素之间的距离为 $6\sim 8\ \mu\text{m}$ ,在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 的范围内,PSLL最高达到0.15,在扫描角度为 $0^\circ$ 时光束扫描效果最好,随着扫描角度的增大,PSLL会增大,但是整体保持在较低水平。作为比较,对 $0^\circ$ 时的光束方向计算不等间距OPA的PSLL,其中,元素间距从 $6\ \mu\text{m}$ 到 $8\ \mu\text{m}$ 线性增加,步长为 $0.3\ \mu\text{m}$ ,如图6所示,PSLL为0.1462,比采用改进粒子群算法优化后的PSLL高了0.02,结果表明,优化后的不等间距元素分布可以很好地抑制栅瓣。

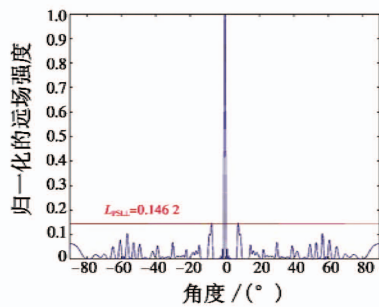


图6 扫描角度 $0^\circ$ 间距线性增加时光学相控阵远场强度

Fig.6 Far field intensity of optical phased array when the  $0^\circ$  spacing of scanning angle is linearly increased

## 4 结论

基于光学相控阵的栅瓣问题,提出并研究了一种通过改进的粒子群算法优化元素分布的栅瓣抑制光学相控阵,通过仿真分析了所提出的光学相控阵的性能。计算结果表明,在对元素分布进行优化后,可以很好地抑制不等间距光学相控阵的栅瓣。在模拟仿真中,对于一维光学相控阵,PSLL在 $0^\circ$ 方向达到0.12,尽管随着扫描角度的增大,PSLL会增大,但是在整个扫描范围内,PSLL仍保持在较低水平,极大地减小了栅瓣对整体扫描的影响。光学相控阵的低栅瓣光束转向技术

将有利于激光雷达、激光通信和高分辨率显示等的实际应用。

## 参考文献

- [1] 肖锋. 液晶光学相控阵关键技术研究[D]. 北京: 电子科技大学, 2018.
- [2] 闫爱民, 职亚楠, 孙建锋, 等. 光学相控阵扫描技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 49-55.
- [3] 吕秀品, 冯克成, 刘伟奇. 光学相控阵扫描的理论研究[J]. 长春理工大学学报, 2002, 25(2): 47-49.
- [4] 颜跃武, 安俊明, 张家顺, 等. 光学相控阵技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 58-68.
- [5] MEYER R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. Applied Optics, 1972, 11(3): 613-616.
- [6] JIN Y, WU J, YAN A, et al. Optimum beam steering of optical phased arrays using mixed weighting technique[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(16): 4568-4571.
- [7] JIN Y, YAN A, HU Z, et al. High speed and low side lobe optical phased array steering by phase correction technique[J]. Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials Innovations in Device Applications VII. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8847: 884716.
- [8] 张珊珊. 基于相位加权方法消除光学相控阵中的栅瓣[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [9] YIN S, KIM J H, WU F, et al. Ultra-fast speed, low grating lobe optical beam steering using unequally spaced phased array technique[J]. Optics Communications, 2007, 270: 41-46.
- [10] VISSER H J. Array and phased array antenna basics [M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [11] BALANIS C A. Antenna theory: analysis and design [M]. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [12] FENG Y, TENG G F, WANG A X, et al. Chaotic inertia weight in particle swarm optimization[C]//The 2nd International Conference on Innovative Computing, 2007: 475.
- [13] 曾艳阳, 冯云霞, 赵文涛. 基于 logistic 映射的自适应变尺度混沌粒子群算法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(10): 2241-2246.
- [14] ZHANG D, ZHANG F, PAN S. Grating-lobe-suppressed optical phased array with optimized element distribution [J]. Optics Communications, 2018, 419: 47-52.