

## 改进遗传算法在传声器阵列优化中的应用\*

曹孟华<sup>1</sup>, 李 龙<sup>2</sup>, 谢红卫<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**规则平面阵列因其结构周期性,在进行波束综合时存在主瓣宽、旁瓣电平等。对此,提出一种基于改进遗传算法的阵列优化方法。设计平面栅格传声器阵列,以满足阵元间距的要求,并构造以主瓣宽度为约束条件、以全局旁瓣电平为适应度的目标函数,对常规遗传算法进行改进,采取个体间自由交叉、随机的阵元数量强制变异的策略来增大种群的搜索范围。通过仿真,得到多个优化阵列,与几种规则平面阵列相比,在不同的信噪比输入下,经过改进遗传算法优化得到的随机阵列均有更好的表现。而相比于几种常规的优化算法,改进的遗传算法具有更强的搜索能力,得到数量更多、性能更优的随机阵列,由此证明了所提方法的可行性。

**关键词:**遗传算法;平面栅格;全局旁瓣电平;主瓣宽度

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)06-126-09

## Application of improved genetic algorithm in microphone array optimization

CAO Menghua<sup>1</sup>, LI Long<sup>2</sup>, XIE Hongwei<sup>1</sup>

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Due to its periodic structure, the regular planar array has problems, such as wide beamwidth, high global side lobe in beam synthesis. So, an array optimization method based on the improved genetic algorithm was proposed. A planar grid microphone array was designed to satisfy the requirement of element spacing. An objective function with the main lobe width as the constraint and the global side lobe level as the fitness was constructed. The strategy of free intersection among individuals and random element number forced mutation was adopted to increase the searching range of the population on the basis of conventional genetic algorithms. A number of optimized arrays were obtained through simulation. Compared with several regular planar arrays, the random arrays optimized by the improved genetic algorithm have better performance under different signal-to-noise ratio inputs; compared with several conventional optimization algorithms, the improved genetic algorithm has stronger search ability, the number of random arrays is more, and the performance is better, which proves the feasibility of the proposed method.

**Keywords:** genetic algorithm; planar grid; global side lobe level; beamwidth

自20世纪70年代以来,传声器阵列开始用来处理语音信号,并广泛地应用于定向拾音、语音增强、声源分离及定位等领域。在人工智能发展的大潮下,基于传声器阵列的语音识别技术也成为当前研究的热点。

但实际应用中的一个重要问题是,设备的便携性及成本对传声器阵列的几何结构及阵元数量有一定的限制。对于设备来说,传声器阵列的几何结构不能太大,否则会影响其便携性和易安装性,而传声器的数量太多则会影响成本,并带来计算及功耗的压力。同时,阵列的几何结构是决定阵列性能的重要因素。因此,在阵列尺寸及阵元

数量限制下,阵元几何结构的优化对于阵列性能的提高有着重要的意义。

传声器阵列一般分为规则阵列与非规则阵列。常见的规则阵列有同心圆、阿基米德螺旋线、渐开线等<sup>[1-4]</sup>,这些规则阵布放模式简单,便于制造,但由于其结构规整,容易产生重复空间采样及混叠效应等现象<sup>[5]</sup>;而非规则阵列位置向量一般线性无关,因此可以有效地抑制这些缺点。非规则阵列无法用具体的公式表达出来,通常需要用优化的方法产生。针对这个问题,粒子群算法<sup>[6]</sup>、模拟退火算法<sup>[7]</sup>、遗传算法<sup>[8-12]</sup>、蚁群算法<sup>[13]</sup>等智能算法已经被用来解决,但这些智能算

\* 收稿日期:2018-04-11

作者简介:曹孟华(1989—),男,山东潍坊人,博士研究生,E-mail:upcnudt@163.com;

谢红卫(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:xhwei65@163.com

法都有不同的优缺点,只能在一定程度上解决阵列优化问题。蚁群算法有较好的鲁棒性,适用于并行处理,但其收敛速度慢,容易陷入局部最优;模拟退火算法优点与蚁群算法相似,但缺点是算法性能与初始值有关而且对参数敏感;遗传算法虽然收敛速度慢,无确定的终止原则,但其基于概率搜索,具有摆脱局部最优的能力,因此在阵列优化问题中应用最广。

鉴于此,本文设计了方形平面栅格的稀疏阵列,以满足阵列尺寸及阵元间距的要求,并考虑到传声器尺寸的影响,将传声器布设在栅格的中心而非交线上。然后构造了以波束主瓣宽度为约束、以全局旁瓣电平为适应度的目标函数。

## 1 平面栅格阵列优化模型

### 1.1 平面栅格构型

衡量阵列性能的指标主要有主瓣宽度、旁瓣电平、阵增益等,几个性能之间往往不是相互独立的,阵列优化的目标就是在这些性能之间寻找最优的折中<sup>[14]</sup>。高的阵增益可以提高阵列对微弱目标的检测能力,在白噪声条件下,阵增益变为白噪声增益,此时白噪声仅与阵元数量有关,因此在限定传声器数量的情况下,本文不考虑对阵增益的优化。而低旁瓣可以有效抑制来自目标方向以外的干扰噪声,降低目标检测的虚警概率;窄的主瓣宽度则可以提高目标方向分辨能力,主瓣越窄,阵列的指向性越好。在约束主瓣宽度的前提下,对旁瓣进行抑制是传声器阵列优化的一个重要方向。

从波束形成的理论上来说抑制旁瓣的理想方法主要有两种:一种是选取一个极小的阵元间距以消除所有频率产生的栅瓣;另一种方法是使用数量足够多的传声器数量将旁瓣的电平降到很低的水平。但这两种方法在实际中并不可行,前者满足不了传声器尺寸的需求,后者则会受阵元空间大小与成本的约束。因此,更通常的做法是在阵列空间尺寸和阵元间距约束条件下,选择合适的阵元空间位置和阵列孔径最小化旁瓣电平。

相比于线型阵列,平面阵列可以同时测量方位角与俯仰角两位参数;而相比于三维立体阵列,平面阵列具有更简易的结构,便于实际中使用。因此,平面阵列具有更广的使用范围。本文针对平面栅格阵列进行优化,考虑到传声器尺寸的约束,在  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  的平面上,以  $3\text{ cm}$  为间距,将传声器阵元置于栅格中心位置,设定的平面栅格最多可以容纳 100 个传声器阵元,如图 1 所示。

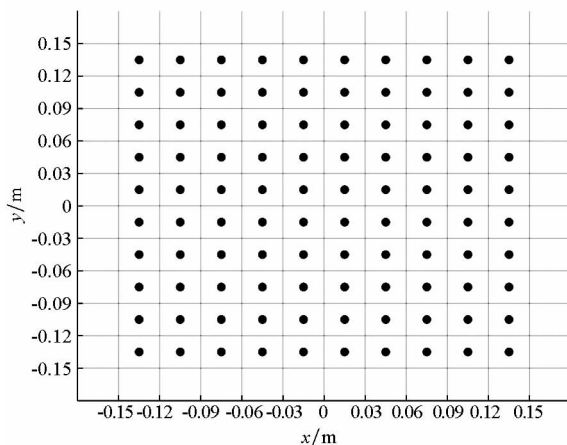


图1 平面栅格阵列

Fig. 1 Planar grid array

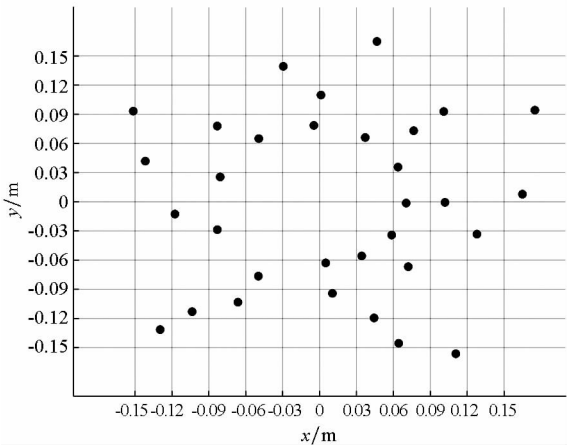
本文中优化的目标是从给定的 100 个阵元中选择 30 个阵元构成传声器阵列,使传声器阵列具有最佳所需性能。

### 1.2 目标函数设计

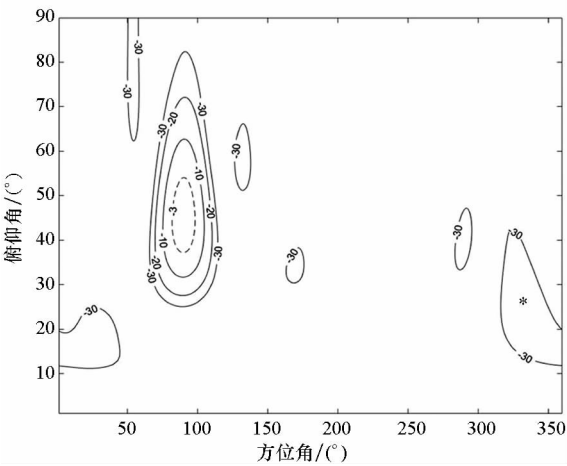
在线性阵列中,主瓣宽度一般定义为波束主瓣下降到  $-3\text{ dB}$  时的两方向夹角。在平面阵列中,影响主瓣宽度的因素除了方位角,还有俯仰角。假设平面阵列位于  $x-y$  平面上,方位角的侧向范围为  $[0^\circ, 360^\circ]$ ,俯仰角则定义为声源到坐标原点的连线与  $z$  轴间的夹角,测向范围为  $[0^\circ, 90^\circ]$ 。以渐开线平面阵列为例,阵元数量为 32,预设方位角为  $90^\circ$ ,俯仰角为  $45^\circ$ ,频率为  $3000\text{ Hz}$ :  $100\text{ Hz} : 3500\text{ Hz}$ ,主瓣宽度与最大旁瓣示意图 2 所示。

考虑使用三维波束图中主瓣下降到  $-3\text{ dB}$  的等高线内方位角与俯仰角所形成的面积表示主瓣宽度,面积越小,说明主瓣越窄。在三维平面范围内搜索除主瓣之外的峰值作为旁瓣。图 2(a) 为渐开线阵列阵元空间位置,图 2(b) 中虚线表示  $-3\text{ dB}$  等高线,“\*”表示最大旁瓣所在空间方位。

旁瓣电平对空域中可识别的目标声源信号搜索具有决定性作用,并且严重依赖于阵列的几何构造。因此,将旁瓣电平与主瓣电平之比作为优化的目标,该比值又称为峰值旁瓣电平(Peak Side-Lobe Level, PSLL)。PSLL 值越小,表示旁瓣峰值越低,阵列对空间其他方向干扰抑制越强。而影响主瓣宽度的主要因素为阵列孔径,但由于传声器自身的尺寸大小,阵元之间需要保持一定的距离。在整个阵列尺寸不大的情况下,主瓣的宽度不会变化太大,因此可将这两者作为约束条件。据此,目标函数可以构造为:



(a) 渐开线平面阵列  
(a) Involute planar array



(b) 渐开线阵列波束图  
(b) Involute array beam pattern

图 2 主瓣宽度与最大旁瓣示意

Fig. 2 Diagram of the beamwidth and maximum sidelobe

$$\begin{cases} \min [10 \lg(PSLL)] \\ BW_{-3\text{dB}} < BW_{\text{thr}} \\ d_{ij} > d_{\text{thr}} \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $BW_{\text{thr}}$  表示主瓣宽度约束阈值;  $d_{ij}$  表示任意两阵元间距;  $d_{\text{thr}}$  表示阵元间距约束阈值;  $i, j = 1, 2, 3, \dots, M$  ( $M$  为阵元数量)。

可以看出, 目标函数是一个典型的非线性表达式, 在主瓣宽度及阵元间距的约束下, 对输入的多个阵列计算 PSLL 值, 对应于最小 PSLL 值的阵列即为输出的最优解。在这种情况下, 共轭梯度法、拟牛顿法等常规的优化算法无法进行求解。因此可以考虑以遗传算法为代表的智能优化算法, 遗传算法广泛用于解决非线性优化问题, 其优势主要有四点:

- 1) 不需要计算适应度函数的导数;
- 2) 在每次迭代中, 采用的是随机操作;
- 3) 每次迭代是利用一组点而不是一个点开

展搜索;

4) 对解空间中可能存在的解进行编码, 而不是直接开展搜索。

遗传算法的以上特点使其可以很好地用于阵列优化, 但其对本文中平面栅格阵列优化问题并不能完全适配, 因此需要对其进行改进。

## 2 改进的遗传算法

遗传算法是基于种群的随机搜索算法, 适用于高度非线性的不连续多峰函数的优化以及无解析表达式的目标函数的优化。其搜索机制为: 模拟自然选择和自然遗传过程中发生的繁殖、交叉和基因突变现象, 在每次迭代中都保留一组候选解, 并按某种指标从候选解群中选取较优的个体, 利用遗传算子(选择、交叉和变异)对这些个体进行组合, 产生新一代的候选解群, 重复此过程, 直到满足某种收敛指标为止。

针对阵列优化模型的特点, 本文在编码、交叉、变异等环节对常规遗传算法进行改进, 使之适用于传声器阵列的优化。

### 2.1 种群初始化及编码

常规遗传算法进行编码时, 通常是将个体视为基因串构成的, 通过随机改变基因串中的一位或几位数字或字符产生新个体。但在图(1)所示的模型中, 与个体对应的是单个阵列, 阵列是由多个阵元构成的, 而阵元则是由二维空间坐标决定的, 因此不能简单地将个体用基因串表达。为更好地描述, 假定 100 个传声器阵元作为种群的所有染色体集合为  $U$ , 采用整数编码的方式<sup>[15]</sup>, 将染色体编码为 1~100。一次性从中随机抽取  $M$  个染色体可以构成一个个体, 对应于模型中的一个阵列, 如此随机抽取  $N$  次, 则可以构成一个种群。遗传算法模型与传声器阵列对应关系如表 1 所示。

表 1 遗传算法模型与传声器阵列对应关系  
Tab. 1 Correspondence between genetic algorithm model and microphone arrays

遗传算法	传声器阵列
基因	阵元坐标
染色体	阵元
个体	一个阵列
种群	多个阵列

### 2.2 选择、交叉与变异

选择是指遗传算法根据个体的适应度进行优胜劣汰, 是达尔文“适者生存”思想的体现。在遗

传算法的迭代过程中,持续追踪当前为止最好的染色体,即适应度最高的染色体。在一次迭代后,当前为止最好的染色体作为最优解的备选,实际上甚至可以将其复制到新一代种群中。这是典型的精英主义的做法,这种精英主义做法的策略容易导致种群被“超级染色体”主导。但是,实际应用表明,精英主义的策略在很多时候可以提高算法的性能。通常采取截断选择法得到用于交叉与变异的父代,即按照种群个体适应度对个体进行排序,选取适应度前 50% 的个体作为交叉与变异的父代。在本文中,首先通过约束阈值,即主瓣宽度筛选符合条件的子代,若剩余数目不足 50%,则随机生成新的个体补足种群;否则取 PSLL 值为适应度(PSLL 值越小,表示适应度越高),从而选择出进入下一次迭代的父代阵列。

交叉是种群中产生新个体的主要方式,其操作是在染色体层面进行的,两个父代之间随机交换一条或多条染色体,从而产生新的个体。在本文阵列模型中,传声器阵列是旋转对称的,通过单点交叉或多点交叉可能会产生相似或相近的阵列,因此为增强局部搜索的能力,采取随机交叉的策略:取  $D$  为任意两个个体所含染色体的并集,从  $D$  中随机抽取  $M$  个染色体构成交叉的新个体。染色体之间的交叉即阵列中阵元的交换,这种自由交叉配对的策略可以使多个阵元发生改变,对阵列几何构型进行较大幅度的调整,从而可以改善局部搜索的能力。

变异操作是对个体中的一个或几个基因按照概率进行随机改变,从而产生新的个体。通常变异概率设置比较小,因此只有很少的染色体会经历变异操作。在变异后的染色体中,只有很少的字符被改变。变异运算虽然不是种群产生新个体的最重要方式,但通过变异可以避免遗传算法陷入局部搜索。变异通常是以基因为单位进行的,在本文中,基因发生变异即阵元坐标发生改变,而阵元坐标发生改变也就是染色体发生改变,故采用的是以染色体为单位的变异。

染色体变异数量不能太少,否则跳不出局部搜索;染色体变异也不能太多,否则会变为随机搜索。因此本文在多点交叉的基础上,在每一代设置随机数量的染色体变异,并设定最大变异数量以避免陷入随机搜索。最大变异数量设置为  $N/5$ ,变异数量对应的概率分布设为:

$$p(n) = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^n}{\sum_{k=1}^{\frac{N}{5}} \left(\frac{1}{2}\right)^k} \quad n = 1, 2, 3, \dots, N/5 \quad (2)$$

其中,  $n$  为变异数量,  $p(n)$  为对应的概率。然后采用轮盘赌的方式抽样确定个体每一次变异染色体数量<sup>[16]</sup>。设  $C$  为变异个体染色体集合  $B$  关于种群染色体集合  $U$  的补集,根据染色体编码原则,分别从  $B$  与  $C$  中随机选择确定数量的染色体进行互换,即可完成变异操作。

根据以上方法,基于改进遗传算法的阵列优化流程如图 3 所示。

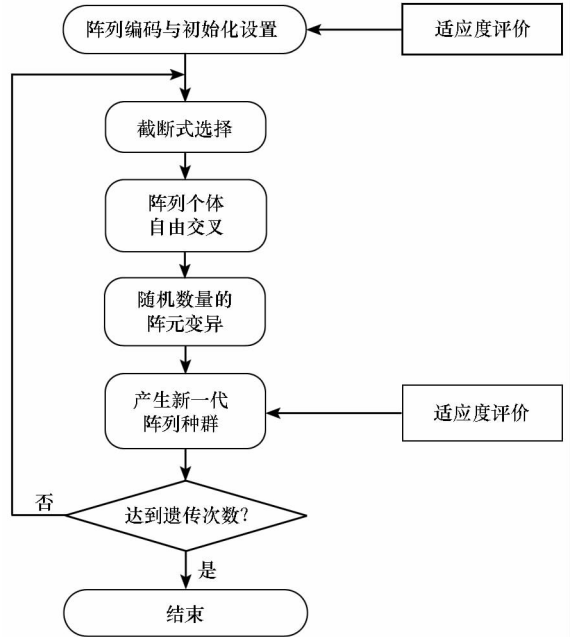


图 3 改进的遗传算法流程

Fig. 3 Improved genetic algorithm flow chart

### 3 仿真实验

#### 3.1 初始化设置

对 30 个阵元的稀疏阵列进行优化,参数设置如表 2 所示。

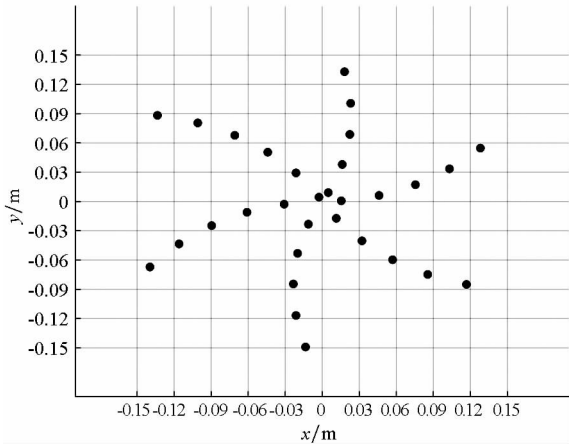
表 2 仿真参数设置

Tab. 2 Simulation parameter settings

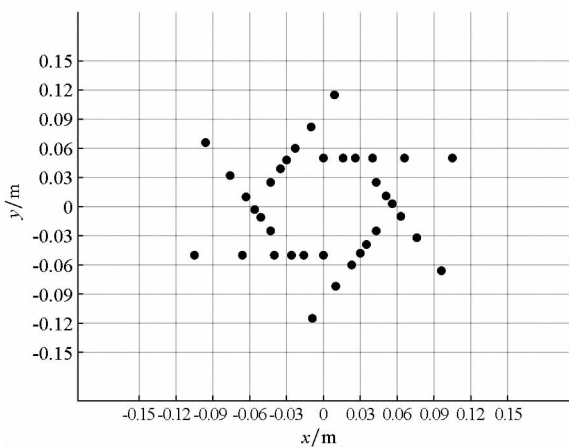
参数名称	设置数值
种群数量	50
遗传次数	50
染色体数量	30
方位角/(°)	90
俯仰角/(°)	45
频率/Hz	3000 : 100 : 3500

其中,俯仰角与方位角估计精度均设为  $1^\circ$ ,则三维空间中波束图划分为  $90 \times 360$  点。本文中主瓣宽度为约束,为获取比较合理的阈值,首先考察几种规则阵列的主瓣宽度。除了渐开线阵列,另外几种规则阵列空间坐标如图 4 所示,其中

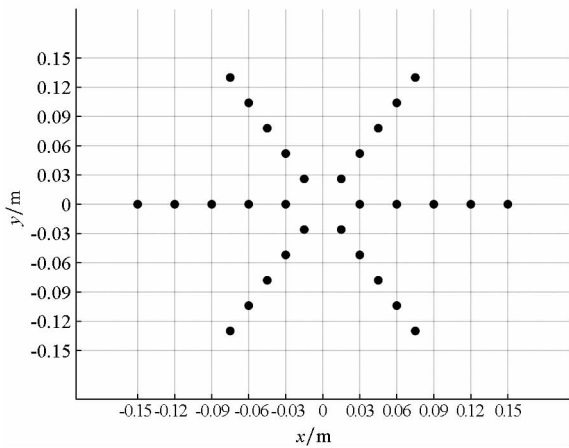
阿基米德螺旋线、车轮形、同心圆所含阵元数依次为 31、36、30。



(a) 阿基米德螺旋线阵列  
(a) Archimedes spiral array



(b) 车轮形阵列  
(b) Wheel array



(c) 同心圆阵列  
(c) Concentric circular array

图 4 几种规则阵列示意

Fig. 4 Several regular array schematic diagrams

计算几种规则阵列波束图的主瓣宽度如表 3 中所示,其中渐开线阵列的表现最好,仅为 216

点,据此设置主瓣宽度约束阈值  $BW_{thr}$  为 216。因为采用平面栅格阵列,故阵元间距约束不做考虑。

表 3 规则阵列主瓣宽度

Tab. 3 Beamwidth of regular array

规则阵列	主瓣宽度
渐开线阵列	216
阿基米德螺旋线	318
同心圆	345
车轮形	640

### 3.2 优化结果与分析

设置迭代条件为满足遗传次数时停止,并进行 5 次基于改进遗传算法的阵列优化仿真。5 次仿真得到的优化个体数目如图 5 所示。

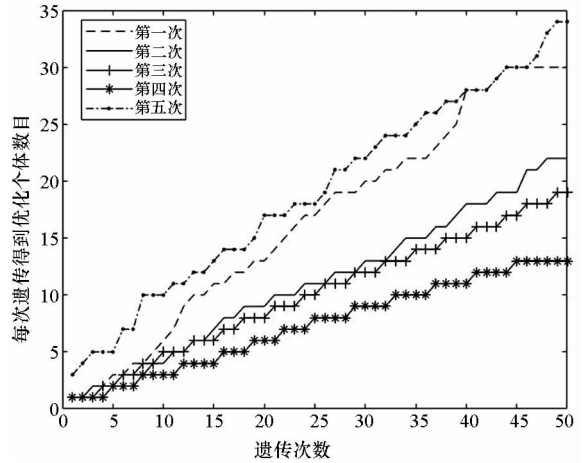


图 5 5 次仿真得到的优化个体数目  
Fig. 5 Number of individuals optimized after five times simulation

如图 5 所示,5 次仿真得到的优化个体数目波动较大,但最终获得的优化阵列的数目均在 10 个以上。综合考虑主瓣宽度与旁瓣电平,从 5 次仿真结果中选取的优化阵列如图 6 所示。

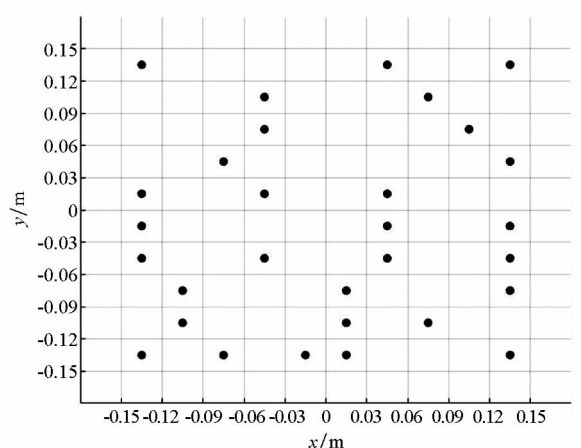
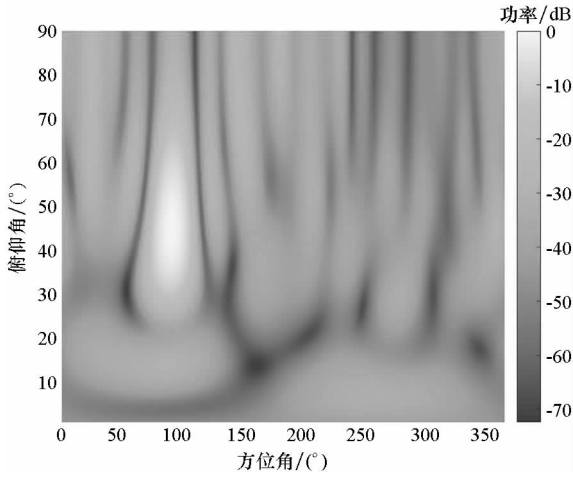


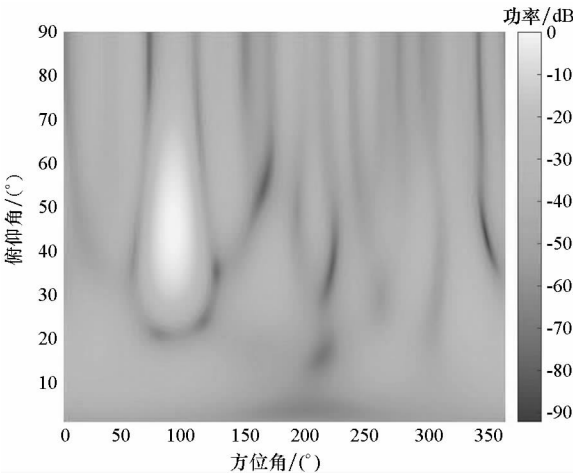
图 6 优化阵列  
Fig. 6 Optimized array

按照参数设定,作为对比,仿真几种规则阵列的波束图。加入白噪声,构造信噪比为 20 dB 的输入信号,考察优化阵列与几种规则阵列的波束图,比较结果如图 7 所示。



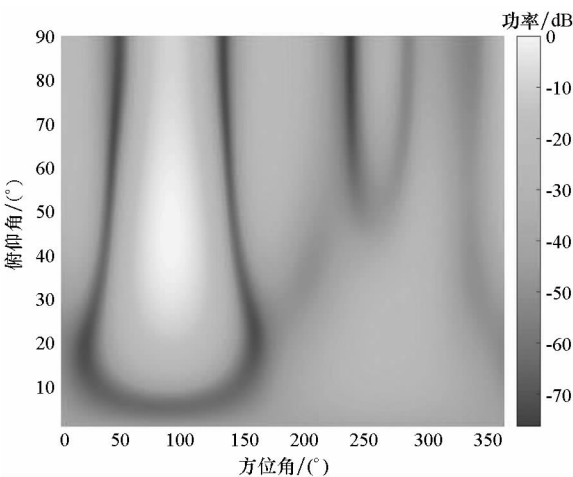
(a) 优化阵列波束图

(a) Optimized array beam pattern



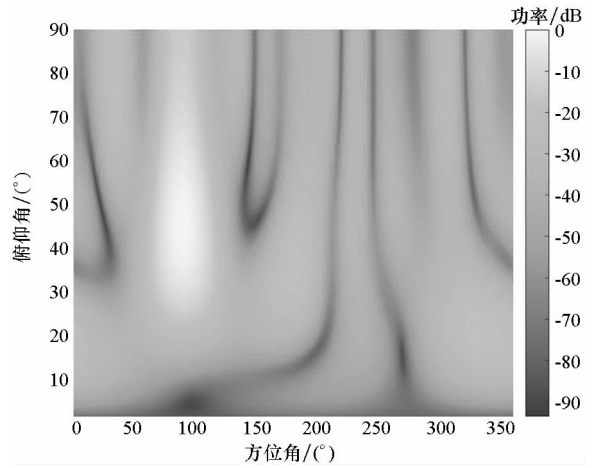
(b) 渐开线阵列波束图

(b) Involute array beam pattern



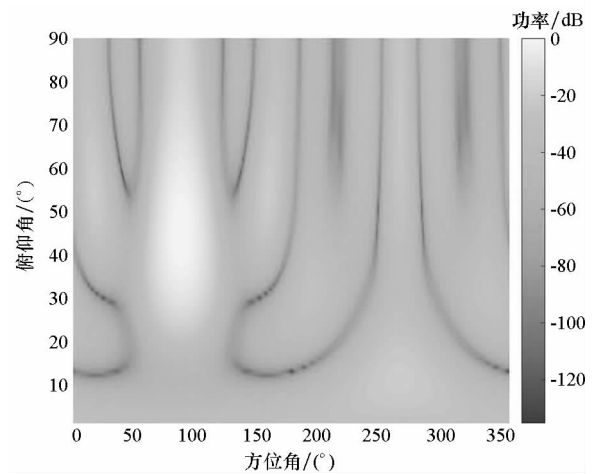
(c) 车轮形阵列波束图

(c) Wheel array beam pattern



(d) 阿基米德螺旋线阵列波束图

(d) Archimedes spiral array beam pattern



(e) 同心圆阵列波束图

(e) Concentric circular array beam pattern

图 7 阵列波束图对比

Fig. 7 Comparison of array beam pattern

直观来看,优化阵列的主瓣宽度与渐开线阵列相近,远远小于其他规则阵列;优化阵列的旁瓣数量比渐开线阵列的少,但多余其他规则阵列。计算得优化阵列的主瓣宽度为 200 点,小于渐开线阵列。考察旁瓣电平,计算优化阵列与几种规则阵列的 PSL 值,结果如表 4 所示。

表 4 PSL 值比较

Tab. 4 Comparison of PSL values

阵列类型	PSL 值/dB
优化阵列	-25.65
渐开线	-22.17
阿基米德螺旋线	-13.86
同心圆	-16.4
车轮形	-9.0

从表 4 中可以看出,优化阵列的 PSLL 值明显低于其他几种规则阵列。为检验优化阵列抗干扰能力,设置不同信噪比的输入,噪声取为白噪声,仿真 10 次后取平均值,结果如图 8~9 所示。

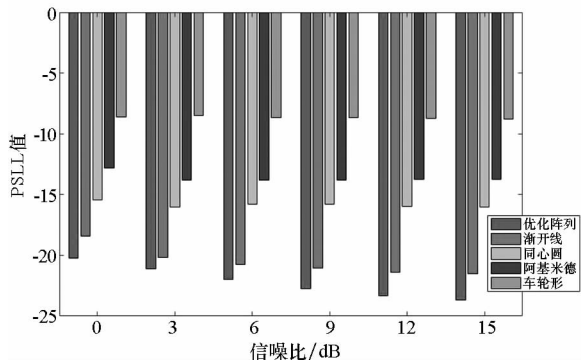


图 8 不同输入信噪比下 PSLL 值

Fig. 8 PSLL value with different input signal-to-noise ratio

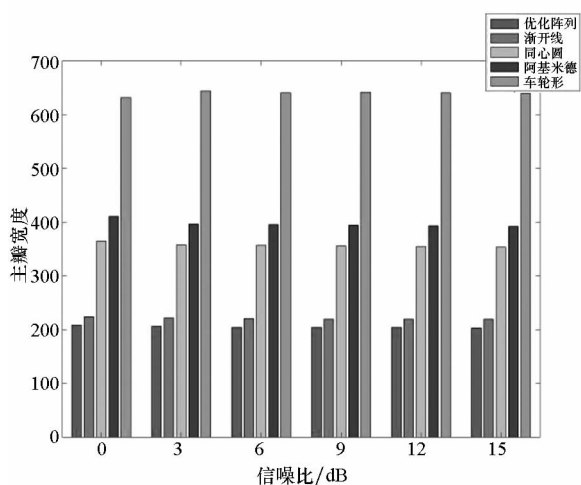


图 9 不同输入信噪比下主瓣宽度

Fig. 9 Beamwidth with different input signal-to-noise ratio

从图 8 与图 9 中可以看出,在不同的输入信噪比情况下,优化阵列在旁瓣电平方面依然优于其他几个规则阵列。优化阵列在保证主瓣宽度的前提下,可以有效地改善旁瓣电平。

最后考察在不同方位角与俯仰角下的优化阵列的性能。为定量比较,以固定方位角(设置为 90°)为例,计算不同俯仰角下的主瓣宽度与 PSLL 值,仿真结果如表 5 与表 6 所示。

表 5 不同俯仰角下主瓣宽度比较

Tab. 5 Comparison of beamwidth at different elevation angles

阵列类型	主瓣宽度			
	15°	30°	60°	75°
优化阵列	205	203	203	198
渐开线	441	250	263	323
阿基米德螺旋线	798	446	528	487
同心圆	707	393	451	468
车轮形	1311	723	847	706

表 6 不同俯仰角下 PSLL 值比较

Tab. 6 Comparison of PSLL value at different elevation angles

阵列类型	PSLL 值			
	15°	30°	60°	75°
优化阵列	-19.44	-24.72	-5.23	-0.33
渐开线	-19.38	-22.22	-5.20	-0.32
阿基米德螺旋线	-9.32	-18.95	-2.80	-0.18
同心圆	-10.93	-20.39	-3.26	-0.21
车轮形	-6.00	-21.76	-1.80	-0.11

如表 5~6 所示,在不同的俯仰角下,主瓣宽度与 PSLL 值会逐渐变化。在较高的俯仰角下,各阵列的 PSLL 值均会大幅上升,但优化阵列仍然优于各规则阵列;优化阵列的主瓣宽度始终保持在一个较低的水平,而其他几种规则阵列则下降严重,证明基于改进遗传算法得到优化阵列的方法具有可行性。

### 4 性能分析

为考察改进遗传算法的性能,分别采用常规遗传算法、粒子群算法以及模拟退火算法对本文中设计的平面栅格阵列进行优化仿真分析比较。

#### 4.1 常规遗传算法仿真分析

设置常规遗传算法中种群的规模与迭代的次数均为 50,交叉的父代个数设置为 8,变异在常规遗传算法中起到的作用比较小,通常会有少量的个体随机变异,变异的个数在此设置为 0~4 之间的随机数。仿真实验进行 5 次,得到的优化阵列数目如图 10 所示。

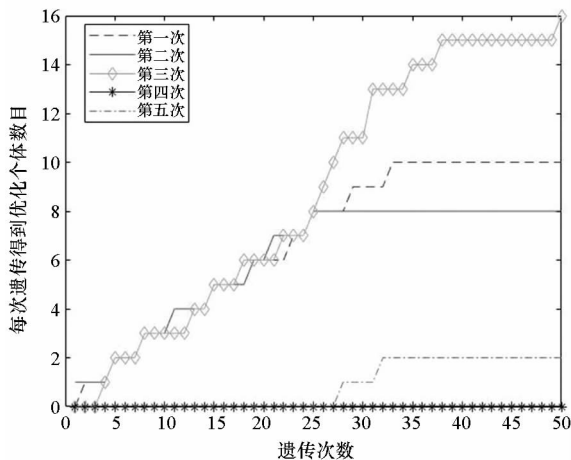


图 10 基于常规遗传算法的阵列优化

Fig. 10 Array optimization based on conventional genetic algorithm

如图 10 所示,基于常规遗传算法的阵列优化并不稳定,其中第三次可以达到改进遗传算法的效果,而第二次完全没有符合优化标准的阵列产生。

分析原因在于:遗传算法中初始阵列是随机生成的,但本文中设计的平面栅格阵列在初始化时,有可能产生构型相近的个体,常规遗传算法中的单点交叉或多点交叉产生的后代不足以丰富子代染色体的多样性;而且变异概率在常规遗传算法中一般取为较小的值,通过变异产生新个体的能力差,也可能使迭代过程中陷入局部最优,因此在迭代结束后仍有可能得不到符合优化标准的阵列。

#### 4.2 粒子群算法仿真分析

粒子群算法的特点之一是在每一次迭代中利用一组解进行搜索而不是一个解(与遗传算法一致),这种不确定算法能有更多的机会得到全局最优解。而且在持续追踪每个粒子当前最优解的基础上,粒子之间也会通过相互协作持续追踪群体的最优解。其追踪的机理是为每一个粒子赋予随机的速度和加速度,即将粒子随机移动,以扩大搜索的范围,从而在个体最优和群体最优的共同作用下,朝着某个最优解移动。

针对本文中的平面栅格阵列优化问题,粒子的移动也就是阵列坐标的变化,规定坐标只能横向或纵向移动,移动方向和距离随机选择,则每一个坐标的变化范围为 18 个点。为避免坐标离得太近,造成搜索解减少,随机选取一个阵列中的 12 个坐标进行移动,在理想情况下可实现整个平面坐标的遍历。为与改进遗传算法比较,选取初始粒子群的规模为 50,迭代次数也为 50,对峰值旁瓣电平与主瓣宽度同时进行优化,持续追踪两个目标的最小值,如果两个指标均优于渐开线阵列,则视为群体最优,否则,随机选择其中一个指标,并选择该指标下的最优个体作为群体最优。仿真实验进行 5 次,考察其群体最优,结果如表 7 所示。

表 7 基于粒子群算法的阵列优化

Tab. 7 Array optimization based on particle swarm algorithm

仿真次数	PSLL 值/dB	主瓣宽度
1	-21.60	202
2	-17.07	203
3	-23.70	216
4	-22.25	212
5	-22.3	206

在 5 次仿真中,有 3 次得到的优化阵列性能达到优化的指标,有 2 次的群体最优阵列只有主瓣宽优于渐开线阵列,而 PSLL 值不能满足要求。阵列优化成功率为 60%,相比于改进的遗传算法每次运行即可得到 10 个以上的优化阵列而言,相差较大。分析原因之一在于针对阵列的优化过程中,由粒子的移动产生的阵列构型是随机的,不能持续地向最优的阵型靠近,因此其实现形式在本质上等同于多个个体的并行搜索,相互之间无法协同,而且每一代中最优个体的邻域只能搜索一次,限制了阵列搜索的范围。

#### 4.3 模拟退火算法仿真分析

与遗传算法及粒子群算法不同的是模拟退火算法,其特点是对某个点展开搜索,核心在于通过一定的概率选择备选点作为下一次迭代点。为与改进的遗传算法及粒子群算法进行比较,对每次迭代中的最优解加 50 个不同的扰动,即生成 50 个不同阵列,迭代次数同样设置为 50。与粒子群算法相似,模拟退火算法在每一代持续追踪当前最优解。针对本文中阵列优化问题,以每一代中 PSLL 值与主瓣宽度均优于当前点的解作为下一次迭代点,如果不存在,则以一定的概率选择邻域内一点作为下一次迭代点,并记录每一代中的最优解。其中扰动的设计方式为:随机改变阵列中 10 个阵元的位置,从而生成新的阵列。仿真实验进行 5 次,得到的优化阵列指标如表 8 所示。

表 8 基于模拟退火算法的阵列优化

Tab. 8 Array optimization based on simulated annealing algorithm

仿真次数	PSLL 值/dB	主瓣宽度
1	-28.11	220
2	-25.60	211
3	-26.20	225
4	-25.60	223
5	-25.70	221

如表 8 中所示,在 5 次仿真中只得到 1 次两项优化指标均优于渐开线阵列的解,其余 4 次最优阵列可得到较好的峰值旁瓣电平,但主瓣宽度大于渐开线阵列,优化的效果弱于粒子群算法。

模拟退火算法在本文中应用的局限在于加入干扰产生的“邻域”完全是随机的。理论上,只要“邻域”足够大,从某种意义上来说便可以保证算法寻找到全局最优。但“邻域”设置太大,将导致



搜索过程变慢,寻找更优的备选点的难度也会变大,而且阵列优化的模型是非线性的,产生的“邻域”高度依赖于当前的最优解,因此初始点会变得很敏感,在很大程度上影响最终优化的指标。此时,使用模拟退火算法进行优化算法会变得不稳定,很大概率得不到符合优化条件的解。

## 5 结论

针对平面栅格阵列,利用改进的遗传算法进行了 30 个阵元阵列优化仿真设计。采用整数编码,省略解码过程,并采取种群内随机配对、自由交叉及随机数量的染色体强制变异的策略,增大了种群的搜索范围。对仿真得到的优化阵列进行了抗干扰测试与分析,结果显示优化阵列的性能在不同的指标下均优于其他几种规则阵列,证明了通过改进遗传算法对平面栅格阵列优化的可行性。最后分析了几种智能算法的特点与性能,显示了改进的遗传算法在进行平面栅格阵列优化方面的优势。

## 参考文献 (References)

- [1] 包子阳, 陈客松, 何子述, 等. 基于改进遗传算法的圆阵稀疏布方法[J]. 电子技术应用, 2008, 34(10): 110-112. BAO Ziyang, CHEN Kesong, HE Zishu, et al. A sparse circular arrays method based on modified genetic algorithm[J]. Application of Electronic Technique, 2008, 34(10): 110-112. (in Chinese)
- [2] 王冬霞, 齐畅, 周城旭, 等. 二维 DOA 估计中麦克风阵列优化设计[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(1): 103-109. WANG Dongxia, QI Chang, ZHOU Chengxu, et al. Microphone array optimization design for two-dimensional DOA estimation [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(1): 103-109. (in Chinese)
- [3] 辛渊博, 侯宏, 陈志菲, 等. 遗传算法用于波达方向估计的圆阵稀疏优化[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 250-253. XIN Yuanbo, HOU Hong, CHEN Zhifei, et al. Improvement of the DOA performance via circular array optimization by genetic algorithm[J]. Computer Simulation, 2011, 28(3): 250-253. (in Chinese)
- [4] 樊征兵, 宋亚辉, 张武林. 改进自适应遗传算法的平面传声器阵列优化[J]. 应用声学, 2017, 36(5): 429-437. FAN Zhengbing, SONG Yahui, ZHANG Wulin. Plane microphone array optimization based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Journal of Applied Acoustics, 2017, 36(5): 429-437. (in Chinese)
- [5] 王广鹏. 基于阿基米德螺线的稀疏面阵综合方法[J]. 火控雷达技术, 2011, 40(4): 1-4. WANG Guangpeng. A method of sparse plane arrays synthesis based on Archimedes spiral [J]. Fire Control Radar Technology, 2011, 40(4): 1-4. (in Chinese)
- [6] 袁智皓, 耿军平, 金荣洪, 等. 基于改进的粒子群算法的二维阵列天线方向图综合技术[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1236-1239. YUAN Zhihao, GENG Junping, JIN Ronghong, et al. Pattern synthesis of 2-D arrays based on a modified particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(5): 1236-1239. (in Chinese)
- [7] 廖先华, 杨建红, 张立军, 等. 基于模拟退火算法的平面稀疏阵优化[J]. 现代雷达, 2012, 34(10): 57-59. LIAO Xianhua, YANG Jianhong, ZHANG Lijun, et al. Optimization of planar sparse array using simulated anneal algorithm[J]. Modern Radar, 2012, 34(10): 57-59. (in Chinese)
- [8] Simpson M T, Hansen C H. Use of genetic algorithms to optimize vibration actuator placement for active control of harmonic interior noise in a cylinder with floor structure[J]. Noise Control Engineering Journal, 1996, 44(4): 169.
- [9] Chen K S, Yun X H, He Z S, et al. Synthesis of sparse planar arrays using modified real genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(4): 1067-1073.
- [10] Li Z B, Cedric Yiu K F, Feng Z G, et al. A hybrid descent method with genetic algorithm for microphone array placement design [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(3): 1486-1490.
- [11] Yu J J, Donohue K D. Optimal irregular microphone distributions with enhanced beamforming performance in immersive environments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(3): 2066-2077.
- [12] Bjeli M, Stanojevi M, Pavlovi D S, et al. Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(5): 3101-3104.
- [13] 赵小莹, 柯腾龙, 丁忆涵. 基于改进型蚁群算法的阵列天线综合[J]. 电波科学学报, 2012, 27(3): 447-451. ZHAO Xiaoying, KE Tenglong, DING Yihan. Pattern synthesis of antennas based on a modified ant colony optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(3): 447-451. (in Chinese)
- [14] 鄢社锋, 马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. YAN Shefeng, MA Yuanliang. Sensor array beam pattern optimization: theory with applications[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 何学辉, 朱凯然, 吴顺君. 基于整数编码遗传算法的稀疏阵列综合[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2277-2281. HE Xuehui, ZHU Kairan, WU Shunjun. Thinned array synthesis based on integer coded genetic algorithm [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(9): 2277-2281. (in Chinese)
- [16] 黄超, 张剑云, 朱家兵. 基于改进自适应遗传算法的阵列优化[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(3): 132-135. HUANG Chao, ZHANG Jianyun, ZHU Jiabing. Array optimization based on a modified adaptive genetic algorithm[J]. Fire Control and Command Control, 2016, 41(3): 132-135. (in Chinese)