

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107677

# 基于遗传算法的 HBT 干涉声定位阵列优化\*

刘梦然 彭阳 胡君豪 何程昊 邵星宇 聂磊  
(湖北工业大学 现代制造质量工程湖北省重点实验室 武汉 430068)

**摘要:** 针对声学定位性能易受麦克风阵列结构影响的问题,提出一种适用于汉伯瑞·布朗和特威斯(HBT)干涉定位的遗传算法阵列结构优化方案。该方法以相邻两阵元距离差值为个体构造中间种群,按基因由升序排序转换到距离间隔种群。接着以方向图函数为适应度函数,构造基于最大旁瓣电平的目标函数,将麦克风间距作为优化对象,把目标函数转化为无约束优化问题。通过遗传算法求解该问题,得到定位性能最高的阵列结构。仿真结果表明七元阵优化效果最为显著,近点定位旁瓣峰值由 0.437 4 降低至 0,远点定位干扰旁瓣数降低至 0,该方法可以有效提高定位精度。

**关键词:** 麦克风阵列;遗传算法;方向图函数;HBT干涉

**中图分类号:** TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.2060

## Optimization of HBT interferometric acoustic localization array based on genetic algorithm

Liu Mengran Peng Yang Hu Junhao He Chenghao Shao Xingyu Nie Lei

(Key Laboratory of Modern Manufacture Quality Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** A genetic algorithm array structure optimization scheme for Hanbury-Brown-Twiss (HBT) interference localization is proposed for the problem that the acoustic localization performance is easily affected by the microphone array structure. The method constructs intermediate populations with the distance difference between two adjacent array elements as individuals, and converts them to distance-spaced populations by gene sorted by ascending order. Then, the objective function based on the maximum parametric level is constructed with the directional map function as the fitness function, and the microphone spacing is taken as the optimization object to transform the objective function into an unconstrained optimization problem. The problem is solved by genetic algorithm to obtain the array structure with the highest localization performance. The simulation results show that the optimization effect of the seven-element array is the most significant, and the peak value of the near-point positioning partials is reduced from 0.437 4 to 0, and the number of distant-point positioning interference partials is reduced to 0. This method can effectively improve the positioning accuracy.

**Keywords:** microphone array; genetic algorithm; directional map function; HBT interference

## 0 引言

麦克风阵列在语音定位、智能机器人和视频会议等领域有着广泛的运用,在这些运用场景中麦克风阵列的结构与定位算法决定着整个系统的性能高低。目前大部分研究都是在固定麦克风阵列结构的情况对定位算法进行优化以提高整个系统的性能,或者对麦克风阵列结构研究局限于优化麦克风布局上,如 Cui 等<sup>[1]</sup>提出的 L 型阵列性能更加

优良,还有聂磊等<sup>[2]</sup>提出的在阵元间距为 20~100 m 范围内,阵间距为 7.5 m 时综合性能最优。这些优化的麦克风阵列结构中,每个麦克风放置为从均匀间隔放置麦克风阵列中稀疏掉某些麦克风阵元。孙建红等<sup>[3]</sup>使用对称七元空间交叉阵列提高俯仰角和方向角的定位精度。杨瑞峰等<sup>[4]</sup>在均匀圆阵的基础上引入投影算子提高方向角精度。Zhang 等<sup>[5]</sup>使用希尔伯特差分法提高时间延迟计算的抗噪性能和广义互相关计算精度。Liu 等<sup>[6]</sup>对空间麦克风阵列

收稿日期:2021-08-24

\* 基金项目:国家自然科学基金(51805154, 51975191)、国家级大学生创新创业训练计划(202010500011)、湖北工业大学启动基金(GCRC2020010)项目资助

进行优化求出更加准确的时间延迟来提高定位精度。文献[7]优化了阵元间隔为 0.5 m 整数倍的四元直线麦克风阵列结构。他们虽然对麦克风阵列结构起到了一些优化的作用,但是没有考虑到麦克风放置间隔为任意的情况。

本文通过遗传算法优化麦克风阵列结构,达到提高 HBT 干涉定位精度的目的。在麦克风阵列长度一定的条件下,构造阵列优化模型,通过遗传算法来对目标函数进行求解<sup>[8-9]</sup>,找到适应度函数最小值,即性能最优麦克风阵列结构,使优化后的阵列结构主瓣峰值更高、宽度更小并且旁瓣峰值降低显著。通过仿真对比实验,本文证明了该方法的有效性,本文的研究为麦克风阵列结构优化提供了一种新的方案。

### 1 HBT 干涉定位法

1956 年, Hanbury-Brown 和 Twiss 为了研究干涉法测量可见星体角直径的可行性,首次在实验中研究了光场的高阶相干性质—强度关联(俗称 HBT 实验)。声场和光场类似,都具有波动的性质性质,故可以将光学中 HBT (Hanbury and Brown-Twiss)干涉理论运用到声场中,通过提取声信号之间的的相干性信息,寻找信号源位置。

假设麦克风接收到的信号  $P$  为:

$$P = N_i + \frac{A}{r_i} \cos \left[ \omega_m \left( t - \frac{r_i}{v} \right) + \varphi_i \right] \quad (1)$$

式中:  $N_i$  为噪声,  $A$  代表声源信号的振幅,  $r_i$  为第  $i$  个麦克风  $M_i$  与声源  $S$  的距离,  $\omega$  表示声源角频率,  $v$  表示声音传播速度,  $\varphi_i$  表示第  $i$  个麦克风接收到声源信号的相位。

HBT 相关函数  $C(\Delta T_{ij})$  可表示为:

$$C(\Delta T_{ij}) = \frac{\langle P_i(t) \cdot P_j(t + \Delta T_{ij}) \rangle}{\langle P_i(t) \rangle \cdot \langle P_j(t) \rangle} \quad (2)$$

其中,  $P_i$  表示为第  $i$  个麦克风所接收到的声信号,  $P_j$  表示为第  $j$  个麦克风所接收到的声信号,  $\Delta T_{ij}$  表示第  $i$  个与第  $j$  个麦克风之间的时延<sup>[10]</sup>。

通过对每个可能出现声源的点进行声场 HBT 关联函数计算,找出关联函数值最大的点(即声源位置)。该方法的优势在于可以对远距离、低能量信号进行定位,针对该定位方法的相关优化研究较少。故本文选其作为定位系统里的算法部分,开展了对 HBT 干涉定位直线阵列结构优化研究。

### 2 遗传算法优化阵列

1969 年美国 Michigan 大学的 Holland 教授最先提出遗传算法,后来经过 DeJong, Goldberg 等的归纳总结,形成一类模拟进化算法<sup>[11]</sup>。它通过模拟自然界遗传机制和生物进化论,来搜索最优解。由于本文优化直线阵列结构时,麦克风间隔可以为任意值。这导致需要搜索范围很大,假若通过枚举法,计算机很难在如此巨大的空间内求出其最优解,而遗传算法是一种快速搜索方法,易于编程实现而且扩展性也强<sup>[12-13]</sup>。固本文选取遗传算法优化麦克风阵列的排布。

#### 2.1 适应度函数

遗传算法适应度函数选取关系到遗传算法的收敛速率以及可否找到最优解,所以适应度函数的设计应尽可能简单,降低计算的复杂性、缩短计算时间。

而且选取的适应度函数应能很好地反映出个体的性能指标,方便算法根据适应度的大小对个体进行优胜劣汰。麦克风阵列方向图常作为一项重要指标来评价麦克风阵列性能,麦克风数量、麦克风之间间距都会对其产生影响<sup>[14-15]</sup>。它不仅可以反映麦克风阵列性能即遗传算法中个体的适应度,还很简单便于计算,符合以上的要求,故本文选取其作为适应度函数。

直线麦克风阵列如图 1 所示,其方向图函数可以简化表示为:

$$F(\theta) = \sum_{m=0}^{N-1} C e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d_m (\sin\theta - \sin\theta_0)} \quad (3)$$

其中,  $d_m$  表示第  $m$  个阵元与第 1 个阵元的距离,  $\lambda$  是波长,  $\theta_0$  表示为主波束指向方向,  $\theta$  为入射角<sup>[16-17]</sup>。

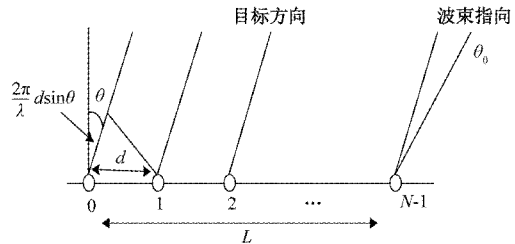


图 1 直线麦克风阵列简化图

#### 2.2 目标函数

假设阵列长度为  $L$ , 它由  $N$  个非均匀间距的传感器组成,各个麦克风的坐标用  $x_i$  表示。

最大旁瓣电平(max side-lobe level, MSL)可以表示为:

$$MSLL = \max_{j \in S} \{ F_{\text{dB}}(\theta) \} = \max_{j \in S} \left\{ \frac{F(\theta)}{\max(F(\theta))} \right\} \quad (4)$$

设相邻两个阵元之间的距离满足如下条件:

$$\min\{d_i - d_j\} \leq d_c, 1 \leq j \leq i \leq N \quad (5)$$

其中,  $d_c$  表示相邻两阵元之间的最小距离。为了让阵列总长度不变,直线阵两个端点处必须放置阵元,则:

$$\begin{cases} d_1 = 0 \\ d_N = L \end{cases} \quad (6)$$

这里将  $d_i$  拆分为  $x_i + (i-1)d_c$  个部分,则可以得到如下公式:

$$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_{N-1} \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 + d_c \\ x_3 + 2d_c \\ \vdots \\ x_{N-1} + (N-2)d_c \\ x_N + (N-1)d_c \end{bmatrix} = x + \begin{bmatrix} 0 \\ d_c \\ 2d_c \\ \vdots \\ (N-2)d_c \\ (N-1)d_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_N \in [0, L - (N - 1)d_c]$ 。

经过上述一系列操作就可以将  $d_m$  间接的转化到  $x_i$ , 这时的搜索范围就可以从  $[0, L]$  减小到  $[0, L - (N - 1)d_c]$ 。进而可定义如下适应度函数优化模型:

$$\min_x MSLL \tag{8}$$

式中:  $x = \{(x_1, x_2, \dots, x_N) \mid x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_N \in [0, L - (N - 1)d_c]\}$  为可行解集。最终通过优化  $x$  的取值, 来优化阵元的各个坐标, 使优化后的直线阵旁瓣电平MSLL最小, 提高阵列的空间分辨率, 进而提高定位精度。

2.3 遗传算法流程

本文选用遗传算法对直线阵列结构进行优化, 流程如下: 第1步, 以相邻两个阵元的距离的差值的作为个体, 产生初始的中间种群。第2步, 对每个个体的基因进行从小到大的排序, 然后变换到距离间隔种群。第3步, 计算每个个体的适应度, 判定其是否满足终止准则, 如果满足则算法停止, 输出最优个体为优化结果; 如果不满足, 则对中间种群的个体进行选择、交叉和变异的遗传操作, 再重复步骤1和2, 一直循环下去直到达到终止条件为止, 流程如图2所示。

1) 种群初始化

个体数量为  $NP$ , 个体维数  $L$  的实数值参数向量作为一个中间种群, 其中的每个个体表示为:

$$x_{i,g} \quad (i = 1, 2, \dots, NP) \tag{9}$$

由优化模型可知, 参数变量界限的范围是  $[0, L - (N - 1)d_c]$ , 个体的初始参数如下:

$$x_{ji,0} = \text{randn}[0, 1] \times (L - (N - 1)d_c), \quad i = 1, 2, \dots, NP; j = 1, 2, \dots, N \tag{10}$$

式中:  $\text{randn}[0, 1]$  表示在  $[0, 1]$  之间产生服从标准高斯分布的随机数。

2) 选择操作

采用比例选择法, 利用各个个体  $x_{i,g}$  适应度所占比例的大小来决定其子代保留的可能性。

$$p_i = \text{fit}_i / \sum_{i=1}^{NP} \text{fit}_i, \quad i = 1, 2, \dots, NP \tag{11}$$

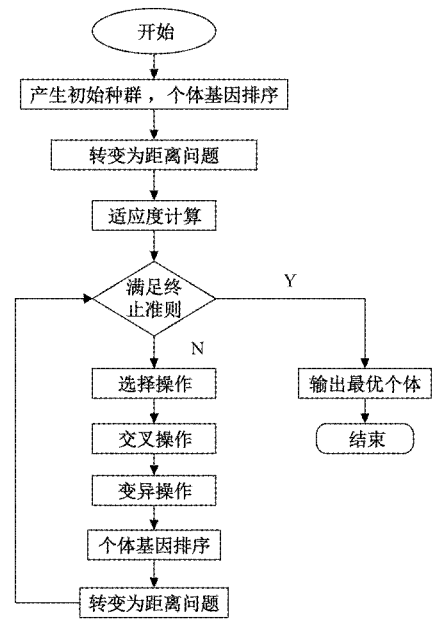


图2 遗传算法流程

3) 交叉操作

将选中的奇数个体  $x_{2i-1,g}$  和偶数个体  $x_{2i,g}$  进行搭配, 以交叉概率  $P_c$  交换它们之间的部分基因。

4) 变异操作

在区间  $[0, 1]$  中产生一个随机数  $r$ , 如果  $r < P_m$  ( $P_m$  为变异概率), 则对第  $(j, i)$  个基因进行变异操作, 用随机生成的值域中的参数替代它。

$$x_{ij,0} = \text{randn}[0, 1] \times (L - (N - 1)d) \tag{12}$$

本文选择对直线阵列结构进行优化, 假设直线阵阵元分别为 8、7、6 ( $L = 8、7、6$ ), 直线阵总长为 1 m, 总群数为 5 000 ( $NP = 5\ 000$ ), 交叉率为 0.8 ( $P_c = 0.8$ ), 变异率为 0.05 ( $P_m = 0.05$ ), 最大遗传代数为 100 ( $G = 100$ )。通过遗传算法找出阵列的最佳排列, 详细阵元坐标如表1所示。

表1 均匀阵列和优化阵列阵元坐标

阵元结构	均匀阵元坐标	优化阵元坐标
6元直线阵	(0,0)(0.2,0)(0.4,0)(0.6,0)(0.8,0)(1,0)	(0,0)(0.157,0)(0.292,0)(0.465,0)(0.637,0)(1,0)
7元直线阵	(0,0)(0.167,0)(0.334,0)(0.501,0)(0.668,0)(0.835,0)(1,0)	(0,0)(0.152,0)(0.220,0)(0.330,0)(0.425,0)(0.69,0)(1,0)
8元直线阵	(0,0)(0.143,0)(0.286,0)(0.429,0)(0.571,0)(0.714,0)(0.857,0)(1,0)	(0,0)(0.134,0)(0.170,0)(0.248,0)(0.328,0)(0.403,0)(0.7,0)(1,0)

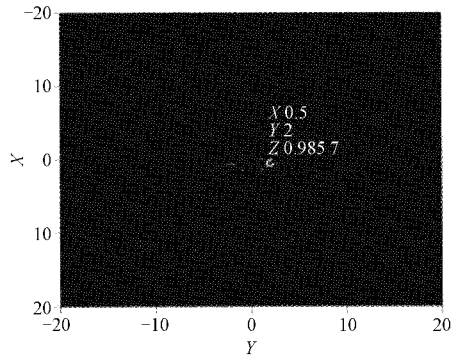
3 仿真验证

本文首先用 MATLAB 软件进行定位仿真, 然后对仿真结果进行分析, 通过比较传感器阵列定位性能来验证本文优化方案的可行性。由于直线阵麦克风阵列只能对近

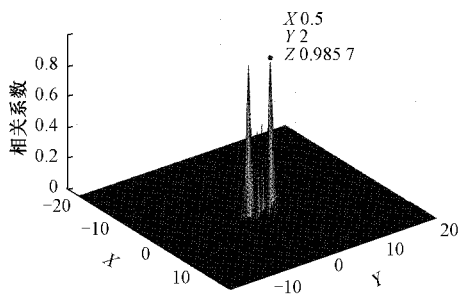
点声源精确定位, 但对远场声源只能辨别出来波方向, 所以本文设置近点声源(0.5, 2), 远点声源(0.5, 10)。

假设声源频率 1 500 Hz, 通过上一章遗传算法优化, 得到阵元数目为 8、7、6 个的优化阵列结构如表 1 所示。接下来分别对近声源点(0.5, 2)以及远声源点(0.5, 10)进行

定位仿真,观察阵元个数、阵元分布以及声源距离对定位结果的影响,图 3~6 为 6 元直线阵的详细仿真图。

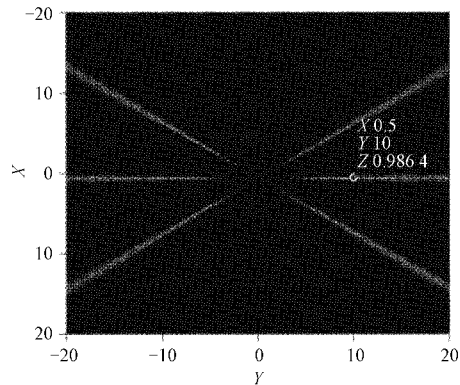


(a) 定位俯视图

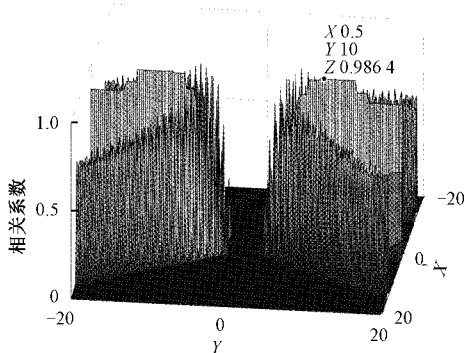


(b) 定位三维图

图 3 6 元均匀直线阵近点仿真定位

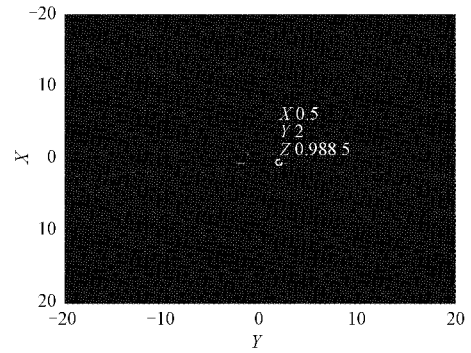


(a) 定位俯视图

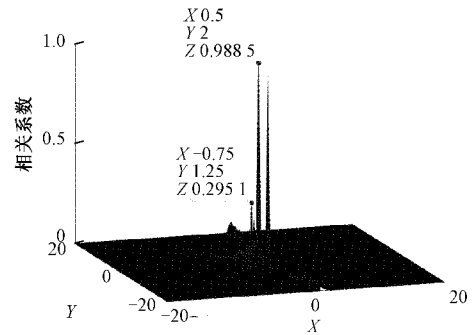


(b) 定位三维图

图 4 6 元均匀直线阵远点定位仿真图

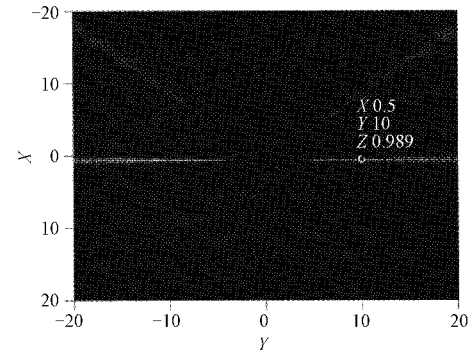


(a) 定位俯视图

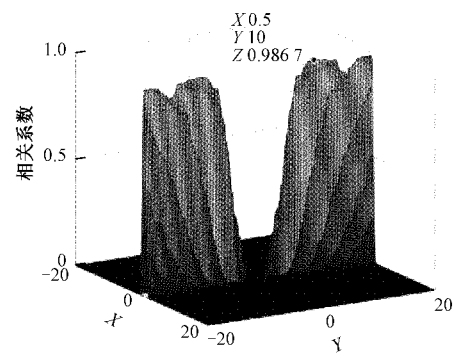


(b) 定位三维图

图 5 6 元优化直线阵列近点定位仿真图



(a) 定位俯视图



(b) 定位三维图

图 6 6 元优化直线阵列远点定位仿真图

在对远点声源定位时,旁瓣数越少越有利于精准确认声源方位。对近点定位时,两种结构的阵列都可以对声源

精准定位,故比较最大旁瓣峰值,峰值越低则性能越优。此外,直线麦克风阵列定位还存在左右舷模糊的问题。综合以上因素,本文将声源侧的旁瓣数量与旁瓣峰值作为评价标准。从图3和5的近点三维仿真定位对比可以发现,均匀直线阵列与优化直线阵列虽然都可以对声源点精确定位,但是优化直线阵列声源点的HBT关联系数值更大,最大旁瓣峰值也更低。可以得出结论:优化直线阵列具有更好的定位性能。

从图4和6的远点仿真定位对比可以看出,在相同条件下,优化直线阵列的主瓣峰值更高,几乎没有旁瓣。而均匀直线阵列,不仅有多个旁瓣,而且旁瓣峰值很高,已经不能区分旁瓣与主瓣,不具备对远点声源的定位能力。故可知优化直线阵列具有更好的定位性能。7元阵列与8元阵列的仿真结果与6元阵列类似,对近点声源定位时优化阵列都具有更低的旁瓣,对远点声源定位时优化阵列精确定波方向、无旁瓣干扰。详细对比如表2所示。

表2 仿真对比结果

阵列结构	均匀阵列		优化阵列	
	近点定位 (旁瓣峰值)	远点定位 (旁瓣数)	近点定位 (旁瓣峰值)	远点定位 (旁瓣数)
6元阵	0.555 5	2	0.295 1	0
7元阵	0.437 4	2	0	0
8元阵	0.160 6	2	0	0

上述结果表明,当阵列总长一定时,相较于均匀布置的阵列,经过遗传算法优化的阵列结构不论是对近点声源定位还是对远点声源定位,都具有更高的定位精度。

#### 4 结 论

为提高定位精度,本文开展了基于HBT干涉定位的直线阵列优化研究。本文以方向图函数为适应度函数,构建阵列优化模型。然后通过遗传算法对总长度1 m,阵元数分别为6、7、8的直线阵列结构的排布进行优化,得到定位性能最优的阵列结构。最后经HBT定位仿真验证,实验结果表明优化阵列定位效果更好,优化阵列的最大旁瓣峰值和旁瓣个数显著降低。本文的研究结果可以优化阵列结构、提高定位精度。

#### 参考文献

[1] CUI X W, YAN Y, HU Y H, et al. Performance comparison of acoustic emission sensor arrays in different topologies for the localization of gas leakage on a flat-surface structure[J]. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2019,300:111659.

[2] 聂磊,贾雯,李善强,等. HBT干涉声源定位技术的拓扑结构优化研究[J]. *微电子学与计算机*, 2020,37(5):

58-63.

- [3] 孙建红,张涛,焦琛. 麦克风数量与阵型对声源定位性能的影响[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019,33(11):14-21.
- [4] 杨瑞峰,温斐斐,郭晨霞. 基于UCA压缩感知的声源定位算法[J]. *电子测量技术*, 2021,44(7):46-49.
- [5] ZHANG Q, ZHANG L. An improved delay algorithm based on generalized cross correlation[C]. 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 2017, 395-399:8122323.
- [6] LIU H, KIRUBARAJAN T, XIAO Q. Arbitrary microphone array optimization method based on TDOA for specific localization scenarios[J]. *Sensors*, 2019, 19(19):4326.
- [7] 刘梦然,李善强,贾雯,等. 面向HBT干涉定位的直线式传感阵列结构优化[J]. *科学技术与工程*, 2020,20(13):5112-5116.
- [8] 马小梦,何岷,张长革. 递进型优化算法对相控阵天线阵列的波束优化[J]. *现代防御技术*, 2021,49(2):72-77.
- [9] 杜林倩,吕美琴,赵建平,等. 共形天线阵列的稀疏优化[J]. *通信技术*, 2021,54(1):25-29.
- [10] 邹静. 基于声场HBT干涉目标定位方法研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
- [11] 葛继科,邱玉辉,吴春明,等. 遗传算法研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2008(10):2911-2916.
- [12] 李岩,袁弘宇,于佳乔,等. 遗传算法在优化问题中的应用综述[J]. *山东工业技术*, 2019(12):242-243,180.
- [13] 范爽. 遗传算法理论研究及其应用[J]. *科技与创新*, 2017(23):21-22.
- [14] 王冬霞,赵光,郑家超. 麦克风阵列拓扑结构对语音增强系统性能影响的理论分析[J]. *辽宁工业大学学报(自然科学版)*, 2010,30(1):1-4.
- [15] 黄兆宇. 水下声学正视成像的稀疏基阵优化与设计[D]. 南京:南京信息工程大学,2016.
- [16] BENESTY J, CHEN J, HUANG Y. *Microphone array signal processing* [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [17] 从雯珊,陈辉,从海霞. 基于子阵的稀疏阵列方向图特性分析[J]. *电子信息对抗技术*, 2016,31(1):65-69.

#### 作者简介

刘梦然,博士,副教授,主要研究方向为声传感器和信号处理。

E-mail: liumengran1991@163.com

彭阳,硕士研究生,主要研究方向为声学定位。

E-mail: py199612@163.com