

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407714

# 声学探测无人机中的麦克风立体阵列优化设计\*

赵 慎<sup>1</sup> 诸皓冉<sup>1</sup> 周 超<sup>2</sup> 李 伟<sup>1</sup> 张 锐<sup>1</sup>

(1. 湖南工商大学智能工程与智能制造学院 长沙 410205; 2. 国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

**摘要:** 在基于声学信号探测与定位低空无人机的应用中, 针对现有规则平面麦克风阵列测向空间分辨力低、抗干扰能力差等问题, 建立适用于对无人机测向的随机立体阵列多约束优化设计模型, 并提出基于精英-锦标赛筛选策略的优化求解方法。以四环立体阵列为基础阵列构型, 最小化峰值旁瓣电平为优化目标, 设定阵列结构约束条件, 同时限定波束主瓣宽度, 构建多参数约束的随机立体阵列优化模型。进一步, 将精英策略与锦标赛策略相结合, 提出一种多融合筛选策略, 应用于遗传算法迭代求解过程中, 提升算法的收敛性和全局搜索能力, 以得到优化设计后的目标阵列构型。仿真和实验表明, 目标阵列的探测方向图中“野点”数量较少, 表现出较好的抗噪声性能和空间分辨力, 与四环立体阵列相比, 目标阵列对低空无人机的探测失效率降低了4.33%, 方位角误差与俯仰角误差分别降低了1.54°与0.73°, 最远探测距离提升了12 m。

**关键词:** 阵列构型; 声学探测; 多约束优化; 筛选策略; 峰值旁瓣电平

中图分类号: TB52; TN911.7

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.10

## Optimization design of microphone array for acoustic detection drones

Zhao Shen<sup>1</sup> Zhu Haoran<sup>1</sup> Zhou Chao<sup>2</sup> Li Wei<sup>1</sup> Zhang Rui<sup>1</sup>

(1. School of Intelligent Engineering and Intelligent Manufacturing, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China; 2. School of Intelligent Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In the application of detecting and locating low-altitude drones using acoustic signals, the existing planar microphone arrays face problems such as low directional resolution and poor interference resistance. The research focuses on addressing these challenges by establishing a stochastic three-dimensional (3D) array optimization design model with multiple constraints, suitable for drone direction finding. Additionally, an optimization-solving method based on an elite-tournament selection strategy is proposed. Based on a four-ring 3D array configuration, the model minimizes the peak side-lobe level as the optimization objective while setting array structural constraints and limiting the beam main lobe width. A multi-parameter constraint optimization model for stochastic 3D arrays is constructed. Furthermore, an elite-tournament selection strategy is proposed for optimizing the solution process. The elite strategy and tournament strategy are combined into a multi-fusion selection strategy, which is applied during the iterative process of genetic algorithm optimization. This combination enhances the convergence rate of the algorithm and its global search capability, leading to the achievement of the optimized array configuration. Simulation and experimental results show that the direction finding pattern of the target array exhibits fewer false detection points, demonstrating improved noise immunity and spatial resolution. Compared to the four-ring 3D array, the target array reduces the detection failure rate for low-altitude drones by 4.33%, and the azimuth and elevation angle errors decrease by 1.54° and 0.73°, respectively. The maximum detection distance is improved by 12 m.

**Keywords:** array configuration; acoustic detection; multi-objective optimization; selection strategy; peak side-lobe level

收稿日期: 2024-07-24 Received Date: 2024-07-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (62103426)、湖南省教育厅科学研究重点项目 (23A0464)、湖南省研究生科研创新项目 (QL20230271)、湘江实验室重大项目 (23XJ01003) 资助

## 0 引言

随着无人机在国防、农业、测绘等领域的广泛应用,“黑飞”、“滥飞”现象频发,严重危害个人隐私与公共场所安全<sup>[1]</sup>。研究适用于低空无人机的探测方法,已成为当前防空监测领域亟需解决的关键问题<sup>[2]</sup>。“低慢小”无人机体积小、飞行空域低,散射截面积小,目标反射电磁波信号能量弱,传统基于雷达、光电等技术手段的无人机探测方法存在成本高、复杂电磁环境适应性不足等问题<sup>[3]</sup>。声学探测方式利用声传感器阵列采集音频信号,基于声源(无人机)与阵列的空间关系,解算出信号波达方向(direction-of-arrival, DOA),实现对无人机的探测及定位,具有全时段工作、不受电磁环境干扰和成本低等优点<sup>[4-6]</sup>。

无人机音频信号主要由旋翼气动噪声、电机内部的电磁噪声组成,频率一般分布于 200~6 000 Hz<sup>[7]</sup>。不同型号的无人机结构、动力特性等不同,所产生的音频信号的中心频率和带宽存在差异,且均表现出非平稳性<sup>[8]</sup>。由于频带宽、非平稳等特征,使得常规窄带 DOA 估计方法表现不理想——存在频率偏移、相位失配等问题,测向结果误差较大<sup>[9]</sup>。相比之下,应用宽带信号处理方法可显著提升测向精度及探测稳健性。针对无人机的声学探测问题,当前研究集中于探测算法的改进<sup>[7,10-15]</sup>,而麦克风阵列构型直接影响着探测系统的抗干扰、精度等性能。规则平面阵一般应用于静态声源定位场景,其优点为阵元布局简单,但不适用于对空间信息要求高的场景<sup>[16]</sup>。与之相比,通过优化设计三维空间内的阵元位置,随机立体阵列可克服结构周期性,有效提升复杂环境下的声源探测性能。面向低空无人机声学探测问题,麦克风阵列构型设计的意义尤为重要。

在随机阵列的优化设计方面,离散粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和实数遗传算法(real genetic algorithm, RGA)等改进的优化算法得到普遍应用。Li 等<sup>[17]</sup>将阵元数量与峰值旁瓣电平(peak side-lobe level, PSLL)作为优化目标,提出一种多目标粒子群优化搜索模式,解决了全局最优阵列分布问题。曾浩等<sup>[18]</sup>将离散粒子群算法与多种搜索策略有机结合,提出了一种基于动态搜索策略的综合粒子群算法,并应用于多约束条件稀疏平面阵列的优化计算问题。Le Courtois 等<sup>[19]</sup>提出了兼顾 PSLL 与主瓣宽度(main lobe width, MLW)的多目标优化准则,利用 GA 对阵元位置进行优化,得出 41 阵元平面随机阵列,解决了高速列车的噪声测量问题。Boudaher 等<sup>[20]</sup>以非均匀性空间阵为基础,探究阵列设计中优化算法的搜索性能,并采用 PSLL 作为评价参数,优化平面随机阵构型。国强等<sup>[21]</sup>采用多

点变异策略与优良基因重组技术,加快了算法的收敛速度,解决了种群多样性不足问题。Gade 等<sup>[22]</sup>在轮形随机阵的基础上,进行阵列均匀分区,在每个区内随机布放阵元,优化目标设定为 PSLL 最小,经数值优化得到 84 阵元的披萨阵。结合现有研究成果可知,随机声阵列优化中存在的问题包括面向动态声源的探测需求,缺乏高效的随机立体声阵列设计理论<sup>[19]</sup>;普遍采用单一性能评价指标,而多目标优化模型求解的收敛性差<sup>[19]</sup>;在优化模型求解过程中,全局搜索与局部搜索之间不平衡<sup>[20]</sup>。

为此,本文参考同轴圆环阵<sup>[23-24]</sup>与三环立体阵<sup>[25]</sup>,设计四环立体型阵列,并基于其构型特点,设置阵元排布方式及其结构约束,限定 MLW 大小,以 PSLL 最小为优化目标,构建多约束条件下的优化模型;进一步,提出精英策略与梯度锦标赛策略相结合的筛选策略,解决种群多样性不足和算法收敛性差等问题,实现多约束条件下的优化模型解算。

## 1 随机立体阵列数学模型

### 1.1 阵列接收信号模型

如图 1 所示,设麦克风阵列由  $M$  个阵元组成,阵列参考阵元位于坐标原点,无人机位于球面角方向  $\Omega_0 = (\theta_0, \varphi_0)$ ,其中方位角  $\theta_0 \in [0^\circ, 360^\circ)$ ,俯仰角  $\varphi_0 \in [0^\circ, 90^\circ)$ 。首先按照窄带模型分析,在  $\Omega_0$  方向的阵列流形矢量为:

$$\mathbf{G} = [e^{-j2\pi\tau_1(\Omega_0)}, e^{-j2\pi\tau_2(\Omega_0)}, \dots, e^{-j2\pi\tau_M(\Omega_0)}]^\top \quad (1)$$

式中:  $f$  为信号的频点;  $\tau_m(\Omega_0)$  为阵元  $m$  相对参考阵元的传播延迟<sup>[6]</sup>。

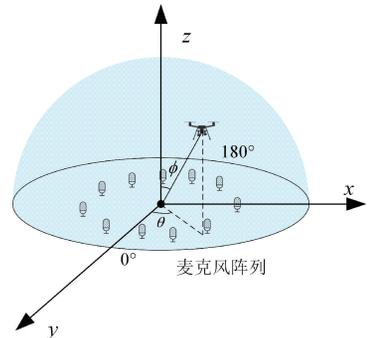


图 1 阵列接收信号模型

Fig. 1 Array signal reception model

阵列接收信号的频域模型为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{G}s + \mathbf{n} \quad (2)$$

式中:  $s$  为无人机信号;  $\mathbf{n}$  为阵列接收到的噪声矢量。

接收信号的互谱矩阵表示为:

$$\mathbf{C} = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] \quad (3)$$

进一步,对全部球面角进行扫描,记扫描方向  $\Omega$  的导向矢量为  $\mathbf{P}$ ,则常规波束形成输出功率为:

$$\sigma(\Omega) = \mathbf{w}^H(\Omega) \mathbf{C} \mathbf{w}(\Omega) \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{w}$  为常规波束形成的加权向量,且  $\mathbf{w} = \mathbf{P}/M$ 。

由于无人机音频信号一般为宽带信号,将其表示为  $K$  个窄带信号的叠加。以上窄带模型为单个频带的波束形成结果,第  $k$  个频点的波束形成输出功率为:

$$\sigma_k(\Omega) = \mathbf{w}_k^H(\Omega) \mathbf{C}_k \mathbf{w}_k(\Omega) \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{w}_k$  为第  $k$  个频点的加权向量。

为提高信噪比,取有效频带内的  $K$  个窄带信号波束求和,得到宽带波束形成输出为:

$$\sigma_B(\Omega) = \sum_{k=1}^K \sigma_k(\Omega) \quad (6)$$

### 1.2 优化模型

无人机声学探测实际场景中,存在大量背景噪声和干扰。在阵列优化设计过程中,以 PSLL 最小作为优化目标,以保证探测的稳健性<sup>[16]</sup>。记非主瓣区域为  $S_1$ ,适应度函数  $F$  表示为:

$$F = \max_{\Omega_1 \in S_1} \left( 20 \lg \left| \frac{\sigma_B(\Omega_1)}{\sigma_B(\Omega_0)} \right| \right) \quad (7)$$

参考文献[25]的三环立体型麦克风阵列结构,结合无人机的实际探测场景中的性能需求,在三环立体阵基础上构造一个额外层级,并依据同轴圆环阵阵元数量分布规则排布该层级阵元<sup>[23-24]</sup>,得四环立体阵,阵列布局如图 2(a) 所示。为解决随机立体阵结构设计问题,基于四环立体阵列结构,保留顶层中心阵元,分层级优化剩余阵元布局。其中,上层为半径为  $R$  的圆形区域,中层与下层分别为内环半径为  $R$ 、 $2R$ ,外环半径为  $2R$ 、 $3R$  的环形区域,相邻层级之间高度差均为  $h$ ,如图 2(b) 所示。

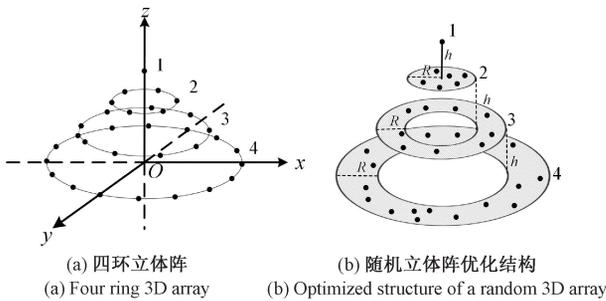


图 2 阵列分层示意图

Fig. 2 Schematic diagram of array layering

为追求较高的探测分辨率,限定波束主瓣宽度不超过四环立体阵波束主瓣宽度的  $p$  倍。此外,为避免空间混叠,阵元水平间距限制在半个波长以内;同时考虑阵元布设的结构,限定两个相邻阵元水平间距大于单个阵元的物理尺寸。由此得阵元间距为:

$$e \leq d_{m_1 m_2} \leq \lambda_{\min} / 2 \quad (8)$$

式中:  $e$  为单一阵元的物理尺寸大小;  $\lambda_{\min}$  为有效带宽内最大频率对应的波长。

依据上述约束条件,得到阵列优化模型为:

$$\begin{cases} \min & (F) \\ \text{s. t.} & MLW \leq p \cdot MLW_0 \\ & l_{i,1} = 0, i = 1 \\ & 0 < l_{i,m} \leq R, i = 2, m = 2 \cdots 7 \\ & R < l_{i,m} \leq 2R, i = 3, m = 8 \cdots 16 \\ & 2R < l_{i,m} \leq 3R, i = 4, m = 17 \cdots 32 \\ & |z_{i+1} - z_i| = h, i = 1, 2, 3 \\ & e \leq d_{m_1 m_2} \leq \lambda_{\min} / 2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $MLW_0$  为四环立体阵的主瓣宽度;  $i$  为阵列的层级;  $z_i$  为第  $i$  个层级的垂直高度;  $l$  为不同阵元至参考阵元的水平距离。

## 2 精英-锦标赛筛选策略

针对式(9)中的多约束优化模型求解问题,采用“精英-锦标赛”融合筛选策略,以有效避免优化过程中局部早熟,提升收敛速度。通过交叉、变异等遗传操作,实现随机立体阵列的优化,增强目标阵列的探测性能。算法流程如图 3 所示。

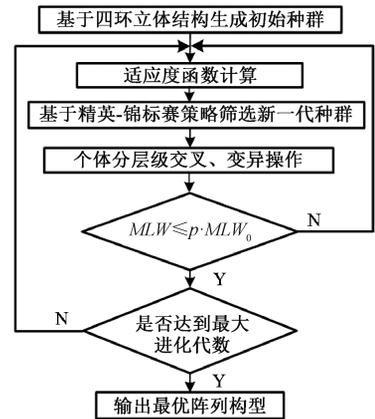


图 3 阵列构型求解流程

Fig. 3 Array configuration solution flowchart

### 2.1 种群初始化

表 1 所示为遗传算法模型与麦克风阵列的对应关系,设中心阵元位置固定,种群规模为  $N$ ,初始化种群矩阵  $\mathbf{U}_{\min}$  如式(10)所示。

$$\mathbf{U}_{\text{init}} = \begin{bmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & \cdots & u_{1,32} \\ u_{2,1} & u_{2,2} & \cdots & u_{2,32} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_{N,1} & u_{N,2} & \cdots & u_{N,32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha}_1 \\ \boldsymbol{\alpha}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\alpha}_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： $u$  为单一麦克风阵元； $\boldsymbol{\alpha}_n$  为第  $n(n=1, \dots, N)$  个个体，每个个体均代表一种阵列构型。 $\mathbf{U}_{\text{init}}$  中阵元位置依据阵列分层规则在各自层级内随机生成。

表 1 遗传算法模型与麦克风阵列对应关系

Table 1 The correspondence between genetic algorithm model and microphone array and the realization method

遗传算法	麦克风阵列
基因	麦克风位置
个体	单个阵列
种群	多个阵列

### 2.2 精英-锦标赛筛选策略

精英策略通过保留高适应度个体至下一代，确保优质解的连续性，但该策略存在过早陷入局部最优的风险，且候选种群多样性不足。锦标赛策略通过分组排序的方式选择高适应度个体作为候选个体保留至候选种群，与精英策略相比，锦标赛策略收敛速度较慢。为此，在传统锦标赛策略的基础上，引入基于适应度函数的梯度划分机制，确保候选种群多样性，并与精英策略相结合，得到“精英-锦标赛”筛选策略。核心思想为多样化遗传过程中的候选种群，包括“精英策略候选种群”和“锦标赛策略候选种群”。

步骤 1) 在种群进化过程中，依据适应度值由大到小对个体进行排序。

$$\mathbf{U}_F = \begin{bmatrix} u_{F_1,1} & u_{F_1,2} & \cdots & u_{F_1,32} \\ u_{F_2,1} & u_{F_2,2} & \cdots & u_{F_2,32} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_{F_N,1} & u_{F_N,2} & \cdots & u_{F_N,32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha}_{F_1} \\ \boldsymbol{\alpha}_{F_2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\alpha}_{F_N} \end{bmatrix} \quad (11)$$

步骤 2) 假设精英个体占比为  $l$ ，精英个体数量  $A = l \times N$ ，将  $A$  个精英个体直接保留至下一代，由精英个体组成的候选种群为：

$$\mathbf{U}_{\text{c-elite}} = \begin{bmatrix} u_{F_1,1} & u_{F_1,2} & \cdots & u_{F_1,32} \\ u_{F_2,1} & u_{F_2,2} & \cdots & u_{F_2,32} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_{F_A,1} & u_{F_A,2} & \cdots & u_{F_A,32} \end{bmatrix} \quad (12)$$

步骤 3) 将非精英个体 (数量为  $A-N$ ) 依据适应度大小均匀划分为 3 个梯度，并对每个梯度中的个体进行随机分组，组内个体根据适应度值进行排序，筛选前  $Q\%$  的个体保留至候选种群。重复上述过程，直至填满候选种群。

假设通过梯度锦标赛策略所得到的候选种群为  $\mathbf{U}_{\text{c-tour}}$ ，则完整候选种群表示为：

$$\mathbf{U}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{c-elite}} \\ \mathbf{U}_{\text{c-tour}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

该策略兼顾精英策略与梯度锦标赛策略的各自优势，可保留高适应度个体，增加候选种群多样性，提升全局搜索能力。针对不同应用场景，两类候选种群的比例影响着全局搜索能力与进化效率。

### 2.3 交叉与变异

依据阵列分层规则，将式 (13) 中候选种群矩阵分为 4 个子种群矩阵：

$$\mathbf{U}_c^T = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{c-elite}} \\ \mathbf{U}_{\text{c-tour}} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{c_1} \\ \mathbf{U}_{c_2} \\ \mathbf{U}_{c_3} \\ \mathbf{U}_{c_4} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： $\mathbf{U}_{c_1}$ 、 $\mathbf{U}_{c_2}$ 、 $\mathbf{U}_{c_3}$ 、 $\mathbf{U}_{c_4}$  分别表示阵列由上至下的 4 个层级对应的子种群矩阵。

在候选种群中随机选取若干对个体作为父代，实施交叉操作，根据交叉概率  $P_c$  交换父代基因，从而形成新的子代个体。变异操作面向候选种群中所有个体，根据变异概率  $P_m$ ，将个体的相应基因替换为随机基因。根据立体阵列的结构约束，交叉和变异操作仅在同层级进行，图 4 所示为交叉与变异操作示意图，其中不同颜色分别表示不同个体。

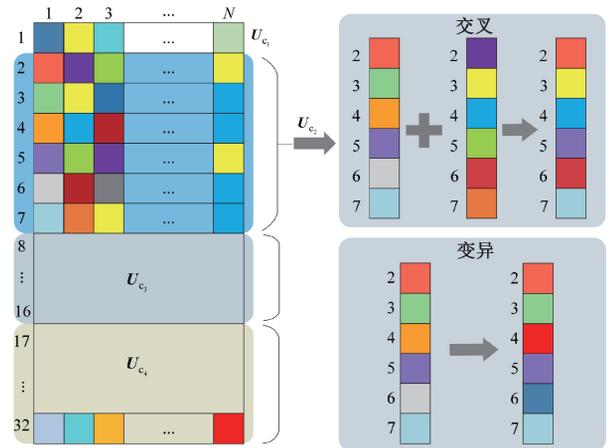


图 4 交叉与变异操作示意图

Fig. 4 Diagram of crossover and mutation operations

通过提升交叉概率  $P_c$  与变异概率  $P_m$ ，可改善算法搜索能力和种群多样性；而选择过高的  $P_c$  与  $P_m$  会破坏高适应度个体，导致无目的搜索。一般交叉概率设置为  $0.5 \sim 1$ ，变异概率设置为  $0.001 \sim 0.05$  [26]。

### 3 仿真分析

采用文献[27]方法仿真生成 1.3~1.7 kHz 频带的无人机宽带音频信号,并在信号中添加随机噪声以模拟实际环境中存在的干扰。将宽带信号分为 40 段窄带信号,计算每段窄带信号中心频率,并对各窄带信号进行波束形成,由各窄带波束输出合成宽带波束输出。根据式(9)所示阵列优化模型,验证筛选策略性能,寻找最优阵列构型。

#### 3.1 种群初始化

取阵元数量  $M = 32$ ,种群规模  $N = 100$ ,  $p = 1.1$ ,阵元物理尺寸  $e = 0.02$  m,阵列孔径  $L = 0.7$  m,阵列底层高度  $Z_4 = 0.04$  m,层级高度差  $h = 0.04$  m,交叉概率  $P_c = 0.8$ ,变异概率  $P_m = 0.05$ ,锦标赛策略保留比例  $Q = 50$ ,最大进化代数  $G_{max} = 500$ ,模拟声源距离阵列 10 m。根据 2.2 节分析,精英-锦标赛策略的性能与精英个体占比直接相关。采用增量搜索方式确定较优占比值,即以 5% 为增量,精英个体占比值自 5% 递增至 35%。每种占比值情况下进行 200 次蒙特卡洛仿真,得到适应度函数均值,仿真结果如表 2 所示。

表 2 部分精英个体占比性能统计(均值)

Table 2 The statistical values of performance metrics attributable to a proportion of elite individuals

精英个体占比/%	PSLL 进化初值/dB	PSLL 进化终值/dB	适应度函数增幅量化评估/%
5	-21.35	-33.90	59.00
10	-20.45	-33.42	63.42
15	-20.98	-33.96	61.87
20	-21.76	-33.21	52.62
25	-21.48	-33.44	55.68
30	-22.33	-33.42	49.66
35	-20.95	-33.36	59.24

由表 2 可知,当候选种群中精英个体占比为 10% 时,适应度函数的进化效果最优,增幅达 63.42%,PSLL 减小 12.97 dB。因此,在后续仿真分析中,选定精英个体占比为 10%,剩余个体采用梯度锦标赛策略进行筛选填充。

基于上述实验条件,对比 3 种筛选策略的性能关系,其标准化后的适应度进化曲线如图 5 所示,标准化后的适应度值本文简称为适应度值。

由图 5 可以看出,精英策略的适应度值在进化初期增长趋势较快,进化至 160 代左右逐步收敛;梯度锦标赛策略的适应度值在初期进化速度相对缓慢,当进化至 330 代左右时开始收敛,其适应度值逐渐超越精英策略;精英-锦标赛策略的适应度值在进化至 300 代后开始收敛,且进化效果较优。

对比可知,由于筛选多样性不足,精英策略存在过早

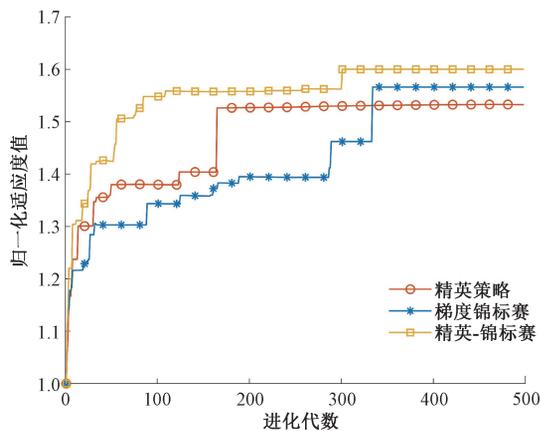


图 5 不同筛选策略下的适应度进化曲线  
Fig. 5 Fitness evolution curves under different selection strategies

收敛的问题;与之相比,梯度锦标赛策略表现出较好的全局搜索能力,但收敛速度较慢。精英-锦标赛策略兼具两种策略的优势,具有较快的收敛速度和全局搜索能力。

#### 3.2 目标阵列构型及性能分析

取与 3.1 节相同的仿真条件,基于精英-锦标赛筛选策略对阵列构型设计中的多约束优化模型进行求解,以得到优化目标阵列(简称目标阵列)。为验证优化设计效果,对比图 6 所示的四环立体阵(简称对比阵列),目标阵列如图 7 所示。

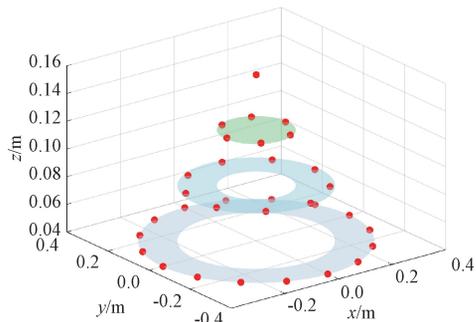


图 6 对比阵列

Fig. 6 Comparison 3D array

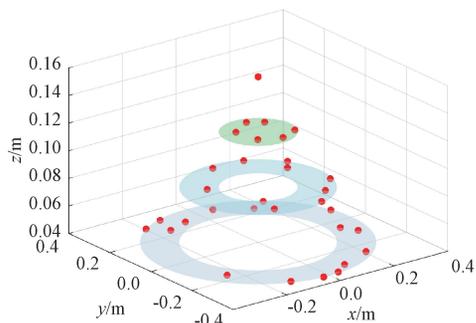


图 7 目标阵列

Fig. 7 Target array

为验证目标阵列性能,设计相关仿真,仿真中模拟声源设置于对比阵列和目标阵列正上方,在声源距离阵列

为 15、25、35 m 时,采用宽带波束形成方法得到空间功率谱图,如图 8 所示。

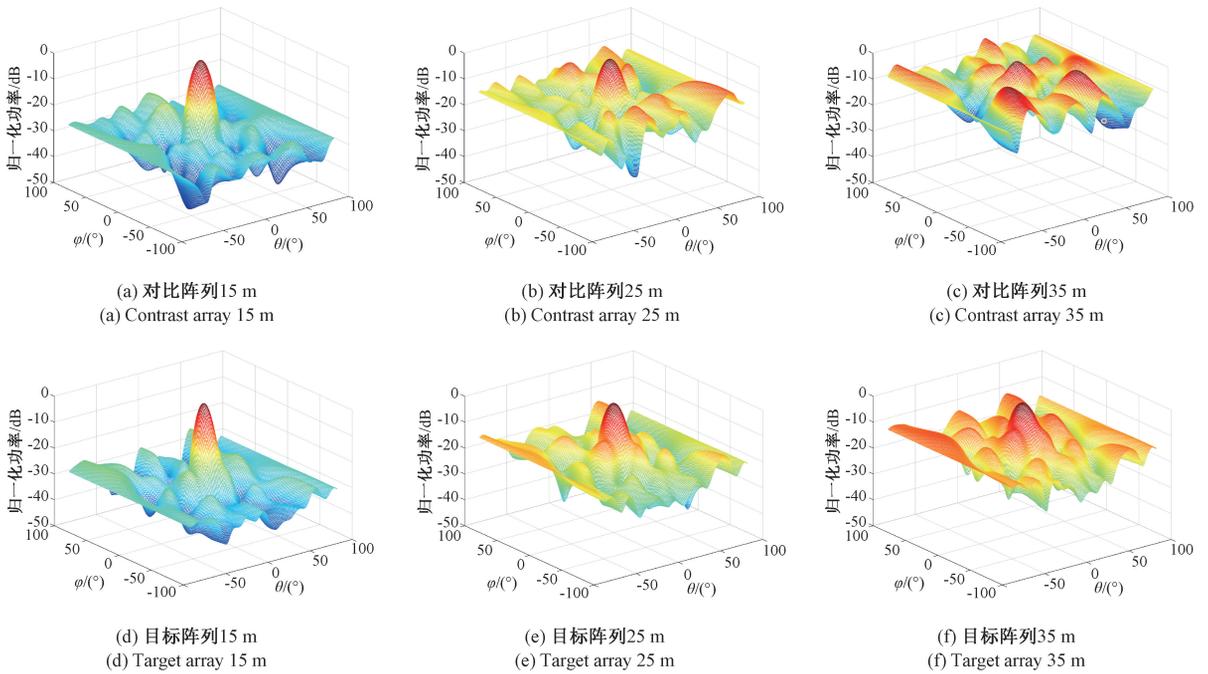


图 8 不同构型阵列的空间功率谱图

Fig. 8 Spatial power spectrum of different array configurations

由图 8(a)、(d)可知,当声源距离阵列 15 m 时,对比阵列和目标阵列的 MLW 和 PSL 分别为 16.55°、14.93°和 -20.62、-23.46 dB。图 8(b)、(e)中探测距离增至 25 m,对比阵列和目标阵列的 MLW 和 PSL 分别为 17.82°、17.16°和 -7.99、-11.39 dB。由图 8(c)、(f)可知,当探测距离增至 35 m 时,对比阵列和目标阵列的 MLW 为 20.71°和 18.81°,而对比阵列的 PSL 由于栅瓣的影响增至 0.12 dB,已无法测向,目标阵列的 PSL 为 -6.69 dB,仍可有效测向。

综合以上仿真结果可得,宽带波束形成方法对无人机音频信号的探测性能更优;与对比阵列相比,目标阵列可有效抑制旁瓣电平,避免栅瓣的产生,且 MLW 无大幅增加,表明目标阵列具有较好的空间分辨率和抗噪声性能。

### 4 实验验证

基于仿真所示两类阵列,搭建无人机的声学探测实验平台。两类阵列均由 32 个 WMM7035DTFN0 型 MEMS 麦克风组成。麦克风阵列采集的音频信号通过采集板(采样频率为 48 kHz)后,上传至 Orange Pi 进行数据预处理,进一步传输至上位机,通过宽带波束形成算法,实现无人机 DOA 信息的解算。实物如图 9 所示。实验采

用 DJ Phantom 4 Pro 型无人机,其最大水平飞行速度 72 km/s,最大上升速度 6 m/s,最大下降速度 4 m/s,垂直悬停精度 ±0.5 m,水平悬停精度 ±1.5 m。

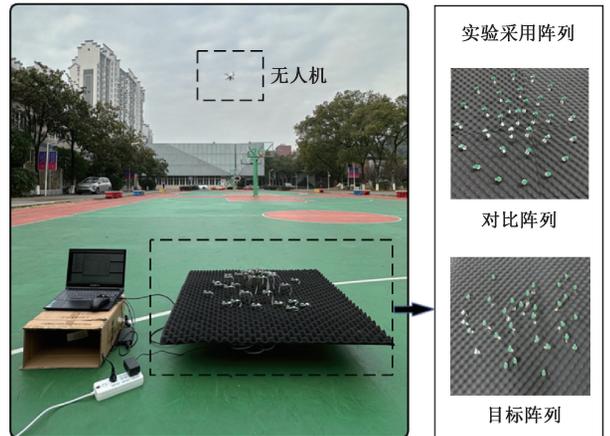


图 9 声学探测无人机实验

Fig. 9 Unmanned aerial vehicle detection experiment

#### 4.1 无人机音频信号频谱特征分析

无人机位于阵列正上空 5 m 处,对采集的包含环境噪声的无人机音频信号进行频谱分析,时频图如图 10 所示。

由图 10 可见,实验中无人机的音频信号主要集中在

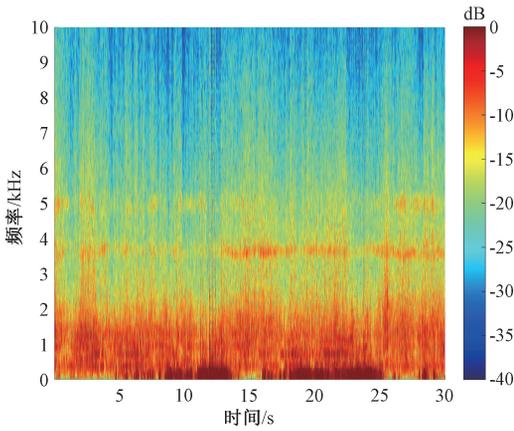


图 10 无人机实测信号时频图

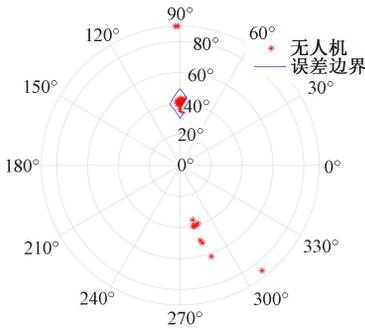
Fig. 10 Time frequency diagram of drone noise in real environment

0.3~1.8、3.5~3.8、4.9~5.1 kHz 3 个频段,其中 0.3~1.8 kHz 频段为气动噪声、3.5~3.8、4.9~5.1 kHz 频段

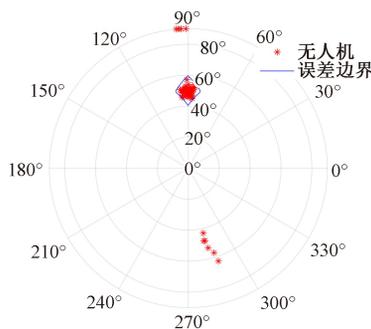
为电机噪声。由于高频信号传播衰减明显,为保证较远的探测距离,本文选择频率较低的气动噪声进行测向实验。此外,环境噪声大多集中于 1 kHz 以下,为避免环境噪声对探测结果产生干扰,设计带通滤波器保留 1~1.8 kHz 频段的信号,并将该信号分为  $K = 40$  段窄带信号。

### 4.2 无人机悬停实验

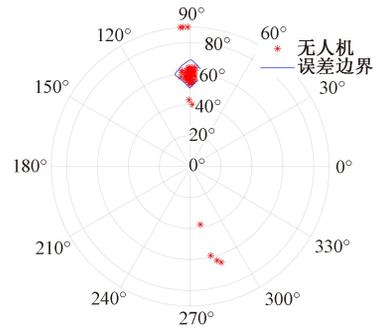
设计 3 种不同条件的悬停实验,以阵列中心阵元位置作为坐标原点,无人机相对阵列的坐标为 (0 m, 20 m)、(0 m, 20 m, 16.78 m)、(0 m, 20 m, 11.55 m),对应 DOA 分别为 (90°, 40°)、(90°, 50°)、(90°, 60°)。实验过程中,利用 DJ Go4 移动终端获取无人机飞行高度与距离。每种条件实验时间 100 s,按 1 s 分段进行波束运算得到探测方向,结果如图 11 所示。考虑无人机自身悬停误差及阵列标定误差,取 10° 作为界定阈值(图 11 中蓝色实线区域标识),当测向误差大于阈值时则判定测量结果为“野点”。探测结果的量化对比如图 12 所示。



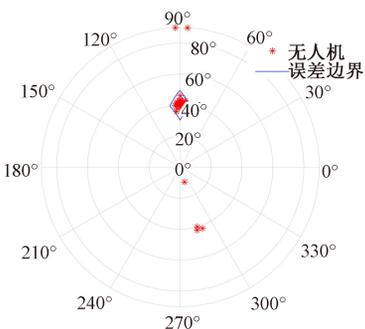
(a)  $\theta=90^\circ, \varphi=40^\circ$ 方向下对比阵列探测结果  
(a) Detection results of the comparison array in the  $\theta=90^\circ, \varphi=40^\circ$  direction



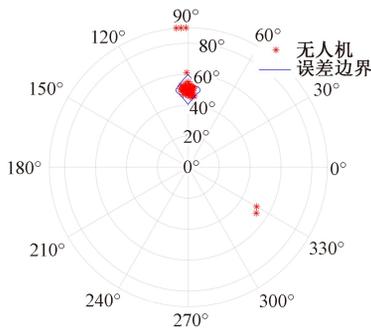
(b)  $\theta=90^\circ, \varphi=50^\circ$ 方向下对比阵列探测结果  
(b) Detection results of the comparison array in the  $\theta=90^\circ, \varphi=50^\circ$  direction



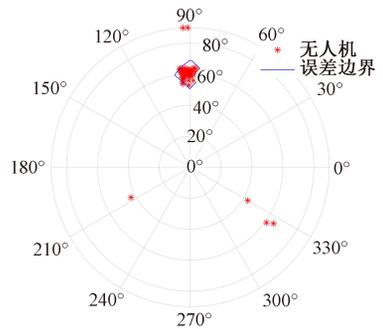
(c)  $\theta=90^\circ, \varphi=60^\circ$ 方向下对比阵列探测结果  
(c) Detection results of the comparison array in the  $\theta=90^\circ, \varphi=60^\circ$  direction



(d)  $\theta=90^\circ, \varphi=40^\circ$ 方向下目标阵列探测结果  
(d) Detection results of the target array in the  $\theta=90^\circ, \varphi=40^\circ$  direction



(e)  $\theta=90^\circ, \varphi=50^\circ$ 方向下目标阵列探测结果  
(e) Detection results of the target array in the  $\theta=90^\circ, \varphi=50^\circ$  direction



(f)  $\theta=90^\circ, \varphi=60^\circ$ 方向下目标阵列探测结果  
(f) Detection results of the target array in the  $\theta=90^\circ, \varphi=60^\circ$  direction

图 11 无人机悬停状态下探测方向图

Fig. 11 Detection of directional diagrams in unmanned aerial vehicle hovering state

由图 11(a)~(c)可见,对比阵列的测向结果较分散,且存在较多“野点”。相较于对比阵列,在图 11(d)~(f)

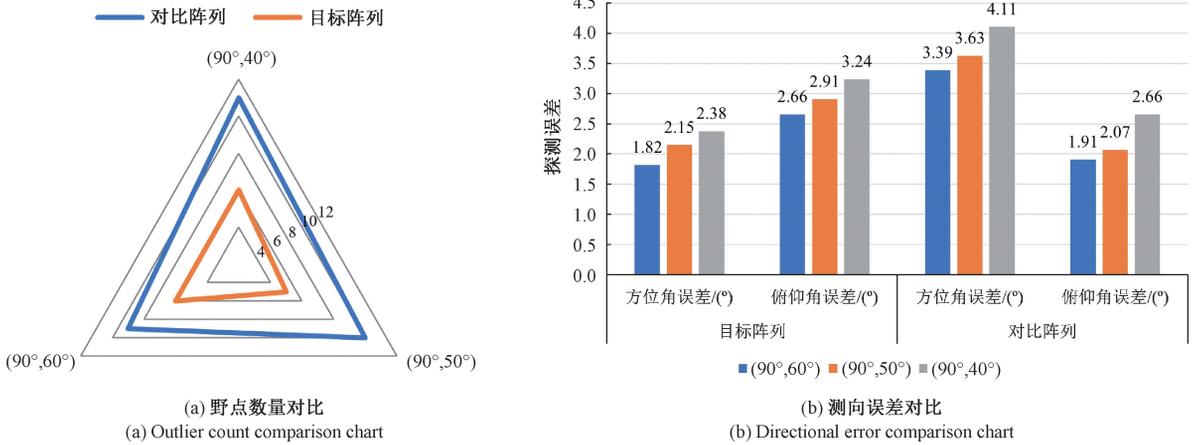


图 12 无人机悬停状态下不同方向探测结果量化对比

Fig. 12 Quantitative comparison of detection results in different directions under drone hovering conditions

中,目标阵列测向结果更集中,且“野点”数量明显较少,表明目标阵列具有更好的探测效果和干扰抑制能力。由图 12(a)、(b)可见,目标阵列所产生的“野点”数量、方位角误差和俯仰角误差均小于对比阵列,且随俯仰角的增加(探测距离降低)呈下降趋势。与图(8)对比,表明实验与仿真的一致性。综合分析上述实验结果,与对比阵列相比,目标阵列的探测失效率平均降低 4.33%,方位角与俯仰角误差平均降低 1.54°与 0.73°,验证了其对于低空无人机的探测有效性。

### 4.3 无人机飞行实验

设计无人机动态飞行实验,主要考虑竖直、水平两种飞行轨迹,实验参数如表 3 所示。

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

声源参数	竖直飞行实验	水平飞行实验
无人机飞行高度/m	11.5	
探测频率/Hz	1 000~1 800	
起始方向/(°)	(90,60)	(0,60)
终止方向/(°)	(270,60)	(180,60)

每种实验采样时间 20 s,按 1 s 分段进行波束运算得到探测方向。两类实验中无人机初始位置分别位于阵列正前方和正左方,无人机匀速直线飞行,直至阵列正后方和正右方对应位置,测向结果形成的轨迹如图 13 所示。

由图 13(a)、(c)可见,探测轨迹存在野点;与之相比,图 13(b)、(d)中目标阵列探测结果无野点,且与无人机飞行轨迹基本一致,验证其适用于无人机飞行状态探测场景。

### 4.4 无人机最远探测距离实验

无人机位于阵列正上空,通过两类阵列分别采集不

同距离时的音频数据。取每 1 s 数据实施测向计算,并对 10 次结果求和取平均,得到 10 s 内的测向误差均值。根据 4.2 节“野点”判定依据,当测向误差均值大于 10°时,界定当前距离为最远探测距离。

实验步骤设计如下:1) 取距离步进为 10 m,测试最远探测距离的大致区间;2) 进一步取距离步进为 1 m,测试最远探测距离的准确值。距离步进为 10 m 时,两类阵列探测距离与探测误差之间的关系如表 4 所示。

表 4 不同阵列的测向误差均值与距离关系

Table 4 The relationship between the mean detection error and distance for different arrays

探测距离/m	测向误差均值/(°)	
	对比阵列	目标阵列
10	3.69	3.56
20	5.21	4.79
30	6.99	6.16
40	9.67	7.88
50	12.10	9.51
60	—	11.76

由表 4 可知,对比阵列的最远探测距离为 40~50 m,而目标阵列的最远探测距离为 50~60 m。进一步,当探测距离为 41 m 时,对比阵列的测向误差大于 10°;当探测距离增至 53 m 时,目标阵列的测向误差逐渐超过 10°。由此可知,对比阵列与目标阵列的最远探测距离分别为 40 和 52 m。

### 4.5 阵列探测分辨率实验

为评估不同频率下阵列的测向分辨率,实验无人机位于阵列上方 10 m 处,对两类阵列采集的音频信号实施宽带波束形成运算,得到 1~1.4 kHz 与 1.4~1.8 kHz 两个频段的空间功率谱图,结果如图 14 所示。

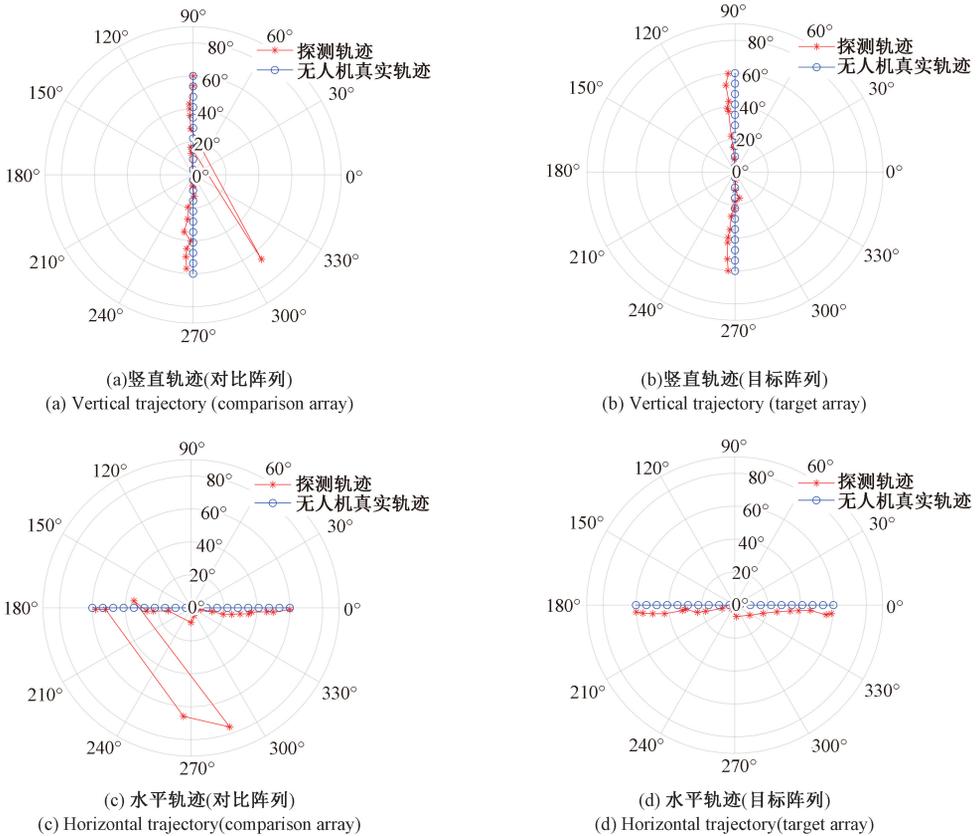


图 13 无人机飞行状态下探测轨迹

Fig. 13 Detection of flight paths in unmanned aerial vehicle flight status

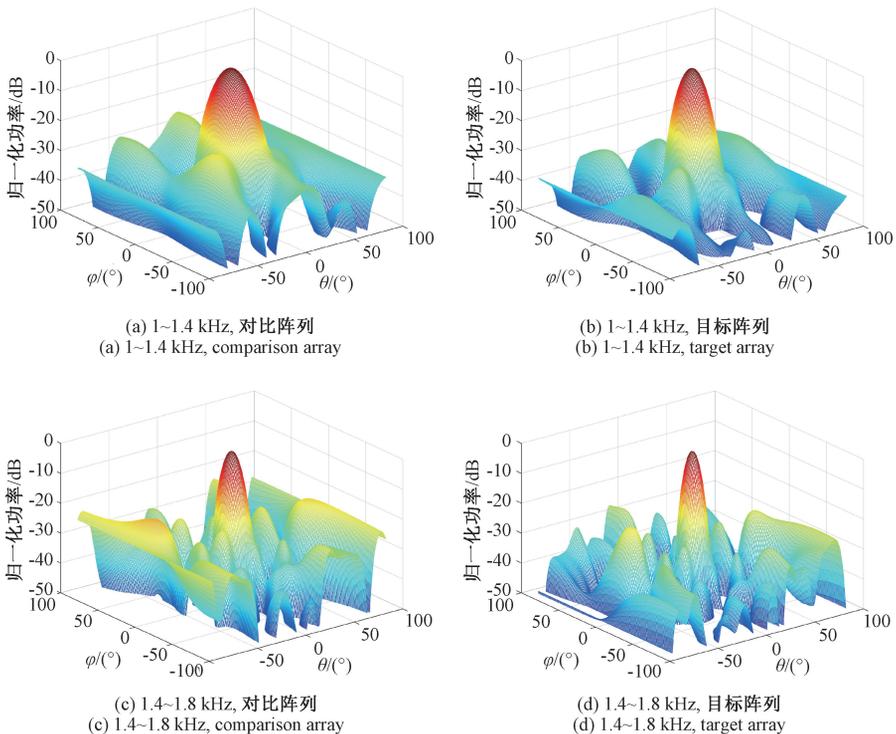


图 14 不同探测频率下两类阵列空间功率谱图

Fig. 14 Spatial power spectrum diagrams of two types of arrays at different detection frequencies

由图 14(a)、(b) 可知, 在 1~1.4 kHz 频段, 对比阵列、目标阵列的空间功率谱 MLW 分别为 15.96°、14.38°; 而在 1.4~1.8 kHz 频段, 两类阵列的空间功率谱 MLW 为 11.07°、8.83°。综合可见, 对于不同的探测频率, 目标阵列的测向分辨率均优于对比阵列。

## 5 结 论

本文从麦克风阵列的优化模型构建和求解两个角度出发, 基于随机立体阵列设计中的多个结构限制, 设置层级约束条件, 限定 MLW 大小, 构建了多约束阵列优化模型; 进一步, 在优化求解过程中结合精英策略与锦标赛策略, 提升了种群多样性, 避免陷入局部最优。数值仿真与对比实验表明, 精英-锦标赛策略兼具收敛速度快、全局搜索能力强的优势; 相较于对比阵列, 目标阵列的测向结果中野点数量明显减少, 表现出更优的探测性能。

综上, 本文提出的阵列优化方法为随机立体阵列的设计领域提供了新的技术途径, 未来研究将探索大规模分布式阵列的优化设计, 进一步提升探测范围与探测精度。

## 参考文献

- [ 1 ] SIVAKUMAR M, TYJ N M. A literature survey of unmanned aerial vehicle usage for civil applications[J]. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2021, 13: e4021.
- [ 2 ] XU C, LIAO X, TAN J, et al. Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation policies and technologies in urban low altitude[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 74175-74194.
- [ 3 ] 马越, 缪晨, 张若愚, 等. “低慢小”无人机雷达探测研究与展望[J]. *国防科技*, 2023, 44(5): 60-66.  
MA Y, LIAO CH, ZHANG R Y, et al. Current status and future prospects of research on radar detection of “Low, Slow and Small” drones [J]. *National Defense Technology*, 2023, 44(5): 60-66.
- [ 4 ] GUO J, AHMAD I, CHANG K H. Classification, positioning, and tracking of drones by HMM using acoustic circular microphone array beamforming [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, DOI:10.1186/s13638-019-1632-9.
- [ 5 ] ALKMIM M, CARDENUTO J, TENGAN E, et al. Drone noise directivity and psychoacoustic evaluation using a hemispherical microphone array[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, 152(5): 2735-2745.
- [ 6 ] UDDIN Z, NEBHEN J, ALTAFA M, et al. Independent vector analysis inspired amateur drone detection through acoustic signals[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 63456-63462.
- [ 7 ] BLANCHARD T, THOMAS J H, RAOOF K. Acoustic localization and tracking of a multi-rotor unmanned aerial vehicle using an array with few microphones [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(3): 1456-1467.
- [ 8 ] YANG Y, LIU Y, LI Y, et al. Aerodynamic and aeroacoustic characteristics of a multicopter propeller during forward flight [C]. 2018 Joint Propulsion Conference, 2018: 4892.
- [ 9 ] FERGUSON B G, LO K W. Turboprop and rotary-wing aircraft flight parameter estimation using both narrow-band and broadband passive acoustic signal-processing methods [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 108(4): 1763-1771.
- [ 10 ] 张芸萌, 董玫, 陈伯孝. 稀疏阵列的鲁棒矩阵填充 DOA 估计算法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2024, 46(5): 1477-1483.  
ZHANG Y M, DONG M, CHEN B X. Robust matrix completion DOA estimation algorithm for sparse array [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024, 46(5): 1477-1483.
- [ 11 ] AZRAD S, SALMAN A, AL-HADDAD S A R. Performance of DOA estimation algorithms for acoustic localization of indoor flying drones using artificial sound source [J]. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 2024, 56(1S): 469-476.
- [ 12 ] CAO S, WU D, LUO B, et al. Design and optimisation of microphone arrays based on acoustic positioning of small UAVs [C]. *International Conference on Optoelectronic Materials and Devices (ICOMD 2023)*, 2024, 13066: 83-90.
- [ 13 ] 陈鹏, 陈洋, 王威. 无人机声学定位技术综述 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2022, 50(12): 109-123.  
CHEN P, CHEN Y, WANG W. Review for UAV acoustic positioning [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(12).
- [ 14 ] 方鑫, 朱婧, 黄大荣, 等. 低 SNR 场景下微型无人机跟踪-检测融合方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(4): 79-88.  
FANG X, ZHU J, HUANG D R, et al. Integrated tracking and detection of micro UAV under low SNR environment [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2022, 43(4): 79-88.
- [ 15 ] 李蜀丰, 徐永绍, 刘秉政, 等. 基于改进 MUSIC 的声源定位方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(8): 212-219.  
LI SH F, XU Y SH, LIU B ZH, et al. Sound source localization method based on improved MUSIC [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*,

- 2021, 35(8):212-219.
- [16] LAI C C, NORDHOLM S E, LEUNG Y H. A Study into the Design of Steerable Microphone Arrays[M]. Perth: Springer, 2017.
- [17] LI H, HE F, CHEN Y, et al. Multi-objective self-organizing optimization for constrained sparse array synthesis[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2020, 58: 100743.
- [18] 曾浩, 蔡万翰, 任志刚, 等. 基于动态搜索策略离散粒子群算法的稀疏阵列约束优化[J]. 电子学报, 2023, 51(4): 783.
- ZENG H, CAO W H, REN ZH G, et al. Constrained optimization for thinned array based on discrete particle swarm optimization with dynamic search strategy[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(4): 783.
- [19] LE COURTOIS F, THOMAS J H, POISSON F, et al. Genetic optimisation of a plane array geometry for beamforming. Application to source localisation in a high speed train[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 371: 78-93.
- [20] BOUDAHER E, HOORFAR A. Comparison of nature-inspired techniques in design optimization of non-uniformly spaced arrays in the presence of mutual coupling[J]. Digital Signal Processing, 2020, 105: 102780.
- [21] 国强, 王亚妮, 袁鼎, 等. 基于改进整型遗传算法的稀疏矩形平面阵列优化[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(2): 105-111.
- GUO Q, WANG Y N, YUAN D, et al. Optimization of sparse rectangular planar array using modified integer genetic algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(2): 105-111.
- [22] GADE S, HALD J. Array designs optimized for both low-frequency NAH and high-frequency beamforming[R]. SAE Technical Paper, 2005.
- [23] WANG X, ZHENG X, ZHANG J, et al. Performance optimization of microphone array beamforming based on multi-circular ring microphone arrays combination[C]. Fluid-Structure-Sound Interactions and Control: Proceedings of the 5th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control 5, 2021: 153-159.
- [24] HAFIZOVIC I, NILSEN C I C, KJØLERBAKKEN M. Acoustic tracking of aircraft using a circular microphone array sensor[C]. 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2010: 1025-1032.
- [25] 林世余. 基于麦克风阵列的语音信号处理算法研究与立体阵列构型设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- LIN SH Y. Research on speech signal processing

algorithm based on microphone array and stereo array configuration design [D]. Xi'an: Xidian University, 2022.

- [26] DEY D K. Mathematical study of adaptive genetic algorithm (AGA) with mutation and crossover probabilities [J]. COMPUSOFT: An International Journal of Advanced Computer Technology, 2014, 3(5): 765-768.
- [27] HEUTSCH K, OTT B, NUSSBAUMER T, et al. Synthesis of real world drone signals based on lab recordings[J]. Acta Acustica, 2020, 4(6): 24.

### 作者简介



**赵慎**, 2005年于国防科技大学获得学士学位, 2007年于国防科技大学获得硕士学位, 2015年于国防科技大学获得博士学位, 现为湖南工商大学副教授, 主要研究方向为阵列信号处理、导航时空信息安全。

E-mail: zhaoshen\_nudt@163.com

**Zhao Shen** received his B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2005, M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2007, and Ph. D. from National University of Defense Technology in 2015 respectively. Now he is an associate professor in Hunan University of Technology and Business. His main research interests include array signal processing and navigation spatiotemporal information security.



**诸皓冉**, 2021年于武夷学院获得学士学位, 现为湖南工商大学智能工程与智能制造学院硕士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理。

E-mail: haoran\_zhu1113@163.com

**Zhu Haoran** received his B. Sc. degree from Wuyi University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Hunan University of Technology and Business. His main research interest includes array signal processing.



**周超**(通信作者), 2010年于武汉大学获得学士学位, 2012年于国防科技大学获得硕士学位, 2017年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学副教授, 主要研究方向为时空安全、卫星导航安全应用及无人机反制。

**Zhou Chao** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Wuhan university in 2010, M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2012, and Ph. D. from National University of Defense Technology in 2017, respectively. Now he is an associate professor in National University of Defense Technology. His main research interests include space-time security, satellite navigation security applications, and unmanned aerial vehicle countermeasure.