

激光与光电子学进展

一种自适应的麦克风阵列通道不一致校正方法

宋嘉宇^{1,2,3}, 王超懿^{1,2}, 刘华巍^{1,2}, 李宝清^{1,2}, 袁晓兵^{1,2,3*}

¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所微系统技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³上海科技大学信息学院, 上海 201210

摘要 基于麦克风阵列的波达方向估计在野外传感网络的理论研究和工程实践领域有着重要的战略意义,多通道麦克风阵列在进行声源定向时往往因为各个通道存在幅度和相位的不一致而产生定向误差。针对这一问题,提出了一种自适应的麦克风阵列通道不一致校正方法。该方法基于子空间分解原理构造了信号谱空间的目标代价函数,结合模拟退火算法模型,通过对代价函数最小化的方法,求得阵列的校正矩阵。通过计算机使用上述方法对 8 元麦克风阵列进行仿真模拟,并采用 4 元麦克风阵列进行实际测试,仿真及实际测试结果验证了该校正方法的可行性。

关键词 光信号处理; 麦克风阵列; 波达方向估计; 频谱分析; 模拟退火; 自适应校正

中图分类号 TN912.16

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1707001

An Adaptive Correction Method for Channel Inconsistency of Microphone Array

Song Jiayu^{1,2,3}, Wang Chaoyi^{1,2}, Liu Huawei^{1,2}, Li Baoqing^{1,2}, Yuan Xiaobing^{1,2,3*}

¹Key Laboratory of Microsystem Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100049, China;

³College of Information, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract The direction of arrival estimation, which is based on microphone arrays, has crucial strategic significance in the field of field sensor network theoretical research and engineering practice. Multi-channel microphone arrays often produce orientation errors due to the inconsistencies in the amplitude and phase of each channel when sound sources are oriented. In response to this problem, this study proposes an adaptive correction method for channel inconsistencies in a microphone array. This method constructs the objective cost function of the signal spectrum space based on the principle of subspace decomposition. Furthermore, it combines the simulated annealing algorithm model to obtain the correction matrix of the array by minimizing the cost function. Finally, the 8-element microphone array is simulated by the computer using the above method, and the 4-element microphone array is used for the actual test. The simulation and actual test results confirm the feasibility of the correction method.

Key words signal processing; microphone array; direction of arrival estimation; spectrum analysis; simulated annealing; adaptive correction

1 引言

利用声音传感器来对声场空间特性进行采样处理的方法已经广泛地应用于声音信号的处理研究中。相较于单麦克风系统,多通道麦克风阵列能够对不同空间方向的声音信号进行时空处理,实现噪声抑制、去除混响、声源定向、信号分离等功能。同时,多通道的麦

克风阵列在目标信号较远,以及存在大量噪声、混响等环境下的适应性更强,应用更广泛。近年来,以多信号分类(MUSIC)^[1]算法为代表的基于麦克风阵列的高分辨率谱估计定向方法在声呐、雷达、地质勘探、电子对抗等领域引起了重视,其测向精度也高于其他测向技术^[2]。但是,当麦克风阵列各个通道接收信号的幅度和相位存在不一致时,阵列对信号源的测向精度往往会

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2021-12-16; 录用日期: 2022-01-05

通信作者: *yuanxb@mail.sim.ac.cn

急剧下降,甚至对目标信源的来波方向产生完全错误的估计^[3]。因此,对通道不一致性进行校正是对声场空间特性进行处理过程中必须要解决的技术问题。

从 20 世纪 90 年代开始,国内外就已经有学者针对上述问题的解决方法展开了研究^[4]。早期的阵列通道不一致校正方法通过在远场设置辅助信号源来实现阵列通道不一致的校正,因此,阵列的有源校正方法所需代价较大,同时,这种经过内插存贮后的校正方法^[5]得到的流型矩阵也很难满足校正精度要求。Paulraj 等^[6]局限于均匀线阵列,对天线的协方差矩阵进行计算,估计出各个通道的增益以及信号源的方向。万明坚等^[7]采用子空间法来对阵列各通道增益和相位的不一致性进行校正,但是这种方法要求校正时阵列只能接收辅助源的信号,阵列结构也仅限于线性阵列。Pierre 等^[8]使用了辅助信号源校正的办法,利用一个已知信号源来估计出各个通道的增益和相位,对通道进行误差补偿后再估计信号源的方向。除了这种基于辅助信号的有源校正方法,另一种校正类算法根据优化函数联合估计的方法对影响阵列通道不一致的参数进行评估。陈建峰等^[9]采用自校正补偿法对各阵元的输出信号的能量进行归一化处理以抵消阵列间的增益误差,但这种方法只针对阵列的增益的不一致进行了校正,并未对通道的相位不一致进行处理。

近几年,对于麦克风阵列通道间不一致性的校正主要是从提升校正误差精度以及提高校正算法效率这两方面进行的:文献[10]基于有源校正的算法,从原始回波的角度出发,提出一种基于时域处理补偿幅度相位误差的方法;文献[11]基于相位校正和快速傅里叶变换的方法,提出了一种适应于变形相控阵列天线的自适应校正系统;文献[12]通过对粒子群优化技术的研究,实现了对阵列幅相误差以及数量位置故障的检测以及校正;文献[13]通过对阵列相位畸变的预估计,提出了一种有源集成波前传感预补偿的方法,以纠正未来从信号源到整个阵列处理过程中的相位差。

与传统方法有所不同的是,本文提出了一种麦克风阵列通道不一致的自适应校正算法。其创新性在于:1)该算法不受阵列排布方式的约束;2)该方法不需要其他已知信源的辅助,直接将待测目标信号源用于阵列的校正,并通过模拟退火模型快速寻优得到阵列的校正结果,也就是说,该算法可以直接使用目标信号源完成对阵列的校正同时得到阵列的定向估计结果;3)通过结合模拟退火算法的模型,对于每次退火过程进行快速寻优处理,使得校正优化的结果不断逼近并最终落入到全局最优解,从而能够完成对未知信号源的精确定向。通过计算机的模拟以及实际的阵列测试,仿真和实验结果印证了该算法的有效性。

2 问题的描述

子空间分解类的信号波达方向(DOA)估计方法,

将接收信号的协方差矩阵分解为信号子空间和噪声子空间,利用信号方向矢量和噪声子空间正交的性质构造出“针状”空间谱峰,从而大幅度提高算法的分辨能力,实现了目标信号源的高分辨率定向估计。本文基于上述子空间分解的基本原理,提出了一种阵列不一致的校正方法。

如图 1 所示,考虑一个 N 元的麦克风阵列,阵元间的排列方式可以是任意的,且阵元在平面内无方向性,以任意两个阵元间的连线为轴建立坐标系。假设有 M 个具有相同中心频率 ω 的远场窄带信号源入射到该麦克风阵列上,信号到达的方向分别是 $a(\theta_1), a(\theta_2), a(\theta_3), \dots, a(\theta_M)$, 各阵元接收到的噪声信号相互独立且与信号源不相关。

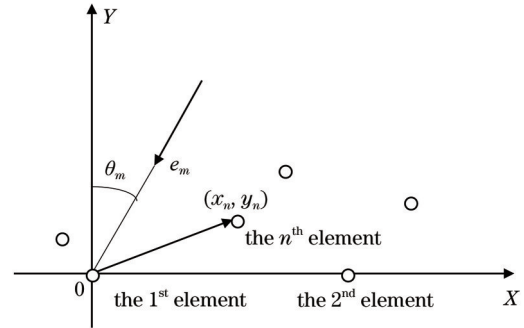


图 1 麦克风阵列信号模型

Fig. 1 Microphone array signal model

假设阵列各通道之间存在不一致性,在此信号模型下,阵列输出信号矢量 $\mathbf{X}(K)$ 为

$$\mathbf{X}(K) = \mathbf{\Gamma} \mathbf{A} \mathbf{S}(K) + \mathbf{N}(K), \quad (1)$$

式中: K 为快拍次数; $\mathbf{S}(K) = [s_1(k), s_2(k), s_3(k), \dots, s_M(k)]^T$ 为信号源的矢量矩阵; $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \mathbf{a}(\theta_3), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)]$ 是一个维度为 $N \times M$ 的流型矩阵; $\mathbf{a}(\theta_m) = [a_1(\theta_m), a_2(\theta_m), \dots, a_N(\theta_m)]^T$ 为阵列对第 m 个信号源的导向矢量,包含了阵列接收到的关于第 m 个信号的方向信息,流型矩阵中的元素 $a_N(\theta_m)$ 则反映了阵列的第 N 个阵元所接收到的第 m 个信号的信息, $a_N(\theta_m) = \exp[jk(x_n \sin \theta_m + y_n \cos \theta_m)]$; $\mathbf{N}(K) = [n_1(k), n_2(k), n_3(k), \dots, n_N(k)]^T$ 为噪声向量矩阵,其均值为 0, 方差为 σ ; $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}(1, r_2, r_3, \dots, r_N)$ 为不一致性矩阵,该矩阵以第一个阵元为参考,反映了阵列各个通道之间接收信号在幅度和相位上的差异, $r_i (i = 2, 3, 4, \dots, N)$ 表示相对于第一通道归一化后得到的第 i 个通道的传输系数。

输出信号的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(k)\mathbf{X}(k)^T] = \mathbf{\Gamma} \mathbf{A} \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H \mathbf{\Gamma}^H + \sigma^2 \mathbf{I}, \quad (2)$$

式中: 由于麦克风阵元数为 N , 因此 $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{S}(k)\mathbf{S}(k)^H]$ 是一个大小为 $N \times N$ 的方阵, 表示信号的相关矩阵。基于高分辨率频谱估计的 DOA 估计方法首先对协方差矩阵进行特征分解, 由于 \mathbf{R}_s 为非奇异矩阵, 目标信号源的个数为 M , 因此矩阵的秩为 M , 即

$\text{Rank}(\mathbf{\Gamma}\mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H\mathbf{\Gamma}^H) = M$ 。而阵列输出协方差矩阵 $\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(k)\mathbf{X}(k)^T]$ ，所以有 $\mathbf{R}^H = \mathbf{R}$ ，即阵列的协方差矩阵为 Hermite 矩阵，它的特征值都是实数，各特征向量正交。信号源向量矩阵 $\mathbf{S}(K)$ 是正定的，因此协方差矩阵 \mathbf{R} 特征分解后有 M 个正特征值，有 $N - M$ 个零特征值。而当噪声存在，即 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 存在时，由于 $\sigma^2 > 0$ ， \mathbf{R} 进行特征分解后的 M 个正特征值变成了与 σ^2 的和，而 $N - M$ 个零特征值为 σ^2 。也就是说，通过对协方差矩阵 \mathbf{R} 的特征分解，得到与信号有关的 M 个特征值和与噪声有关的 $N - M$ 个特征值。将 N 个特征值按照从大到小的顺序进行排列 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_M > \lambda_{M+1} = \dots = \lambda_N$ ，其对应的特征向量分别为 $\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2, \boldsymbol{\mu}_3, \dots, \boldsymbol{\mu}_N$ 。其中较大的 M 个特征值对应信号， $N - M$ 个较小的特征值对应噪声。将这 N 个向量构成的空间 \mathbf{E} 按照特征值从大到小的顺序划分为信号子空间 \mathbf{E}_s 和噪声子空间 \mathbf{E}_n ，由于噪声特征值对应的特征向量与导向矢量 \mathbf{A} 的列向量 $\mathbf{a}(\theta)$ 正交，即 $\mathbf{E}_n \perp \mathbf{E}_s$ 。空间谱函数 $P_m(\theta)$ 存在最大值，因此对信号源的定向只需对空间进行遍历搜索，谱峰所对应的方向角即为信号到达方向角。

$$P_m(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta)^H \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (3)$$

而由于阵列通道之间不一致矩阵 $\mathbf{\Gamma}$ 的存在， $\mathbf{E}_n^H \mathbf{a}(\theta) \neq 0$ ，定向结果存在一定偏差。在实际信号的处理中引入校正矩阵 $\mathbf{\Gamma}^* = \text{diag}(1, c_2, c_3, \dots, c_N)$ 来补偿误差矩阵。同样地，该矩阵以第一个通道为参考， $c_i (i = 2, 3, 4, \dots, N)$ 表示相对于第一通道归一化后第 i 个通道的补偿校正系数，则校正后的信号空间谱 $P_{me}(\theta) = \frac{1}{[\mathbf{\Gamma}^* \mathbf{a}(\theta)^H \mathbf{E}_n][\mathbf{E}_n^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{\Gamma}^*]}$ 。因此，基于子空间的阵列通道不一致校正的关键在于实现对误差校正矩阵 $\mathbf{\Gamma}^*$ 的计算。

3 模拟退火校正方法

综上所述，阵列通道不一致校正的问题最终转换为对误差校正矩阵 $\mathbf{\Gamma}^*$ 的求解，本节所提出的算法核心部分便是对补偿校正矩阵 $\mathbf{\Gamma}^*$ 的求解以及全局的自适应优化。

假设阵列接收到的信号源个数为 M ，将校正后信号空间谱的分母构造为代价函数 J_k ，表示为

$$J_k = \sum_{i=1}^M \left\| \mathbf{E}_n^H \mathbf{\Gamma}^* \mathbf{a}(\theta_m) \right\|_F^2, \quad (4)$$

式中： $\|\cdot\|_F^2$ 表示 Frobenius 范数； k 为寻优次数，一次寻优过程对应一次模拟退火处理，根据子空间分解的基本原理，当代价函数 J_k 取得最小值时所对应的方向角即为待测信号源的方向。因此，对补偿校正矩阵 $\mathbf{\Gamma}^*$ 的求解等效于求解下面的最小化问题：

$$\mathbf{\Gamma}^* = \arg \min \sum_{i=1}^M \left\| \mathbf{E}_n^H \mathbf{\Gamma}^* \mathbf{a}(\theta_m) \right\|_F^2 \quad (5)$$

采用模拟退火算法模型^[14]来对式(5)进行全局寻优，该算法借鉴固体退火的过程：当温度 T 很高时，内能较大，固体粒子处于快速无序运动的状态，系统不稳定；当温度 T 逐渐降低时，固体的内能逐渐减小，粒子逐渐趋于有序，最终固体温度 T 达到一个常温状态，内能降低到最小，这时粒子的状态达到最稳定。模拟退火算法结构简洁^[15]，同时对于初始点的选取依赖性不大，这样便可以在未知辅助信号源位置情况下模拟反复退火的过程实现阵列通道不一致的校正。

麦克风阵列各通道由于存在幅度和相位差，导致定向系统的估计精度不高，整个系统“固体”处于一种高能量、极不稳定的状态。对“固体”进行退火处理，通过全局寻优的方法求解校正矩阵，使用校正矩阵对流型矩阵进行修正以达到退火降温的目的，在这个过程中，“固体”的内能逐渐减小，粒子逐渐趋于有序，整个系统的定向精度也不断提升，而当固体温度逐渐稳定时，系统的定向精度也达到最优，阵列间存在的不一致也得到了校正。基于模拟退火模型的校正方法具体步骤如下。

1) 将阵列的补偿校正矩阵 $\mathbf{\Gamma}^*$ 定义为模拟退火模型中的模拟温度 T ，假设初始的补偿校正矩阵为 $\mathbf{\Gamma}_0^* = \mathbf{I}$ ，即对原式阵列不进行校正处理。采用 MUSIC 算法对阵列接收到的 M 个信号源进行 DOA 估计，得到阵列信号的导向矢量矩阵以及初次 DOA 估计结果 θ_m 。而由于阵列各通道存在不一致，系统的定向结果存在一定的偏差。即温度为 T_0 时，固体的状态不稳定，需要寻找最佳温度使得系统达到稳定。

2) 根据子空间理论，模拟退火过程中每次退火时固体的内能可用代价函数 J 来表示，第一次退火开始，引入补偿校正矩阵 $\mathbf{\Gamma}_1^*$ ，固体的内能 $J_0 = \sum_{i=1}^M \left\| \mathbf{E}_n^H \mathbf{\Gamma}_1^* \mathbf{a}(\theta_m) \right\|_F^2$ 。

最优化问题 $\mathbf{\Gamma}_1^* = \arg \min \sum_{i=1}^M \left\| \mathbf{E}_n^H \mathbf{\Gamma}_1^* \mathbf{a}(\theta_m) \right\|_F^2$ 的求解即通过退火使得固体的内能降到最低，其中 θ_m 为校正矩阵 $\mathbf{\Gamma}_0^* = \mathbf{I}$ 时 DOA 的估计值。假设 $\mathbf{\Gamma}_1^* \mathbf{a}(\theta_m) = \mathbf{B}(\theta_m) \boldsymbol{\delta}$ ，其中 $\mathbf{B}(\theta_m) = \text{diag}[a_1(\theta_m), a_2(\theta_m), \dots, a_n(\theta_m)]$ ， $\boldsymbol{\delta} = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_n]^T$ ($c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 为阵列相对于第一通道归一化后得到的第 i 个通道的补偿校正系数)。因此，最优化问题变为

$$\boldsymbol{\delta} = \arg \min \sum_{i=1}^M \left\| \mathbf{E}_n^H \mathbf{B}(\theta_m) \boldsymbol{\delta} \right\|_F^2 \quad (6)$$

$$\text{令 } \mathbf{Q} = \sum_{i=1}^M \mathbf{B}(\theta_m)^H \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{B}(\theta_m), \text{ 则有:}$$

$$\boldsymbol{\delta} = \arg \min \boldsymbol{\delta}^H \mathbf{Q} \boldsymbol{\delta} \quad (7)$$

校正方法的数学模型始终以第一个阵元作为参考，因此整个最优化问题满足如下约束条件，

$$\boldsymbol{\delta}^H \mathbf{W} = 1, \quad (8)$$

式中： $\mathbf{W} = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ 。因此，该问题变成了一个含约束项的优化问题。采用 Lagrange 乘子法来解决该约束优化问题，引入拉格朗日乘子 λ ，并构造函数 $F(\boldsymbol{\delta})$ ，

表示为

$$F(\boldsymbol{\delta}) = \boldsymbol{\delta}^H \mathbf{Q} \boldsymbol{\delta} + \lambda(\boldsymbol{\delta}^H \mathbf{W} - 1). \quad (9)$$

对 $F(\boldsymbol{\delta})$ 求偏导得到:

$$\nabla_{\boldsymbol{\delta}} F = \nabla_{\boldsymbol{\delta}}(\boldsymbol{\delta}^H \mathbf{Q} \boldsymbol{\delta}) + \lambda \nabla_{\boldsymbol{\delta}}(\boldsymbol{\delta}^H \mathbf{W} - 1) = 0. \quad (10)$$

求解式(10)可以得到:

$$\boldsymbol{\delta} = -\frac{\lambda}{2} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{W}. \quad (11)$$

同时, 由于 $\boldsymbol{\delta}^H \mathbf{W} = 1$, 得到 $\lambda = \frac{-2}{\mathbf{W}^H \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{W}}$, 代入可

以得到该最小值问题的解:

$$\boldsymbol{\delta} = \frac{\mathbf{Q}^{-1} \mathbf{W}}{\mathbf{W}^H \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{W}}. \quad (12)$$

求得代价函数值为 J_0 时的补偿校正矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}_1^*$, 表示为

$$\boldsymbol{\Gamma}_1^* = \text{diag}(\boldsymbol{\delta}). \quad (13)$$

3) “固体”经过一次退火后, 通过寻优得到补偿校正矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}_1^*$, 此时的退火温度为 T_1 , 使用校正矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}_1^*$ 对原始信号的导向矢量矩阵进行校正, 并通过 MUSIC

算法对目标信号源进行重新定向得到新的 DOA 估计结果, 同时计算第一次校正之后的系统内能 J_1 。

4) 按照步骤 2 的寻优方式, 并利用第一次退火后的 DOA 估计结果, 在退火温度为 T_1 的情况下对 J_1 进行快速寻优, 并重复对信号的 DOA 估计, 该过程也即对“固体”第二次退火处理。

5) 重复上面的步骤 K 次, 得到退火后的“固体”内能为 J_k 。构造矩阵 $\Delta = [J_k, J_{k+1}, J_{k+2}]$, 计算 Δ 的方差为 ξ , 比较 ξ 与预期校正阈值 ϵ 的大小。若 $\xi < \epsilon$, 则固体的内能基本保持不变, 停止退火。若 $\xi > \epsilon$, 则继续进行退火过程, 直至满足退火的终止条件 (ϵ 为校正误差)。

6) 模拟退火过程结束。整个校正算法通过 K 次模拟退火操作, “固体”的内能最终稳定在 J_k , 此时对应的最佳退火温度为 J_k 。也就是说, 通过对最优校正矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}_k^*$ 的求解, 实现了对阵列不一致的校正以及定向精准确度的提升。

以上算法流程如图 2 所示。

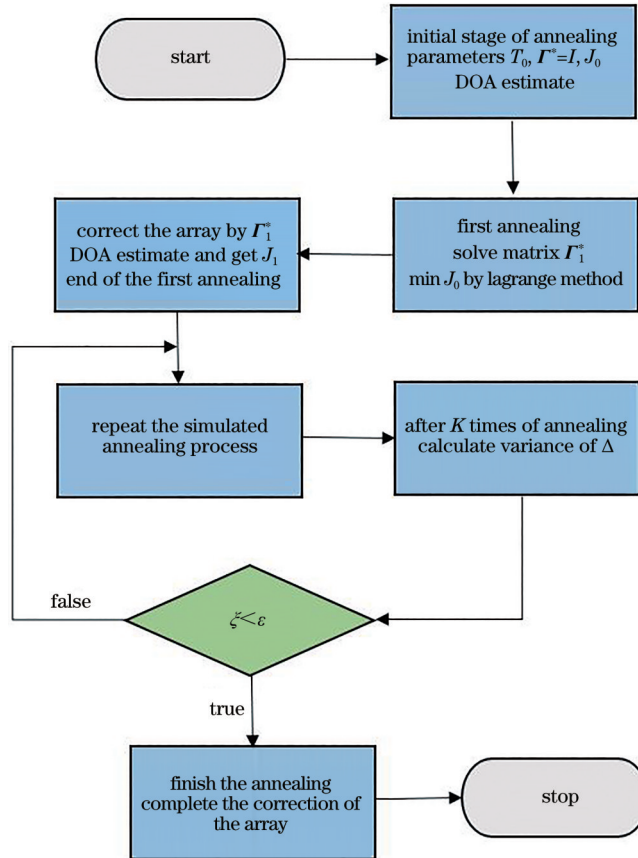


图 2 模拟退火算法流程图

Fig. 2 Flow chart of simulated annealing algorithm

4 实验结果与分析

实验分为三个部分: 第一部分主要探究了阵列通道不一致对信号估计的影响, 通过对比实验, 证实了阵列处理信号时对阵列通道不一致进行校正的必要性; 第二部分通过计算机构建仿真信号模拟了阵列校正的

过程, 验证了阵列通道自适应校正算法的可行性与有效性; 第三部分则是基于实验室的平台, 采集真实的目标信号来对算法进行验证。

4.1 阵列通道不一致的影响

阵列各通道接收信号的幅度增益以及相位存在差异, 会降低阵列性能, 从而使得信号源的到达方向估计

产生误差。

采用 MATLAB 软件探究阵列通道不一致的影响,阵列选取 8 元 ULA 阵列,孔径为半个波长,目标信号分别从 10° 和 60° 两个方向入射。基于第 2 节构建信号模型,以第 1 个阵元通道为参考,构造阵列幅度增益误差 A 为 $[1 \ 0.92 \ 1.02 \ 0.94 \ 1.05 \ 1.01 \ 1.06 \ 1.37]$,其标准差为 0.2,构造阵列相位误差 φ 为 $[0 \ 64.14 \ -28.54 \ -64.51 \ -27.42 \ 50.52 \ 20.46 \ 40.66]$,其标准差为 40° 。定义误差矩阵 Γ 表示为

$$\Gamma = \text{diag} \left[A \exp \left(\frac{j\varphi\pi}{180} \right) \right]. \quad (14)$$

可得, $\Gamma = \text{diag} [1 \ 0.96 \ 0.93 \ 0.77 \ 1.31 \ 1.25 \ 1.14 \ 1.26]$ 。阵列接收到的噪声信号为随机噪声信号,信噪比为 15,采用 MUSIC 算法进行 DOA 估计,快拍数为

200。仿真实验对比了阵列各通道不一致和一致两种情况下 DOA 估计的结果。

图 3(a) 中的两条曲线分别为阵列通道一致和不一致两种情况下的空间谱,可以看出当阵列通道之间不一致时,空间信号谱峰值没有阵列各通道一致时尖锐。通过对比还可以发现,两种情况下的定向结果也存在着差异。图 3(b) 展示了麦克风阵列存在幅度相位差时的空间谱,仿真信号源从 10° 和 60° 两个方向入射,在 30° 、 -12° 、 -34° 的位置,信号出现了“伪波峰”。图 3(c) 展示了阵列各通道之间不存在相位和幅度差异时的 DOA 估计结果,与图 3(b) 的估计结果不同,从图 3(c) 中可以明显看出其波峰只出现在 10° 和 60° 两个位置,而且波峰更加尖锐,具有较好的分辨性能以及渐近无偏的到达角估计。

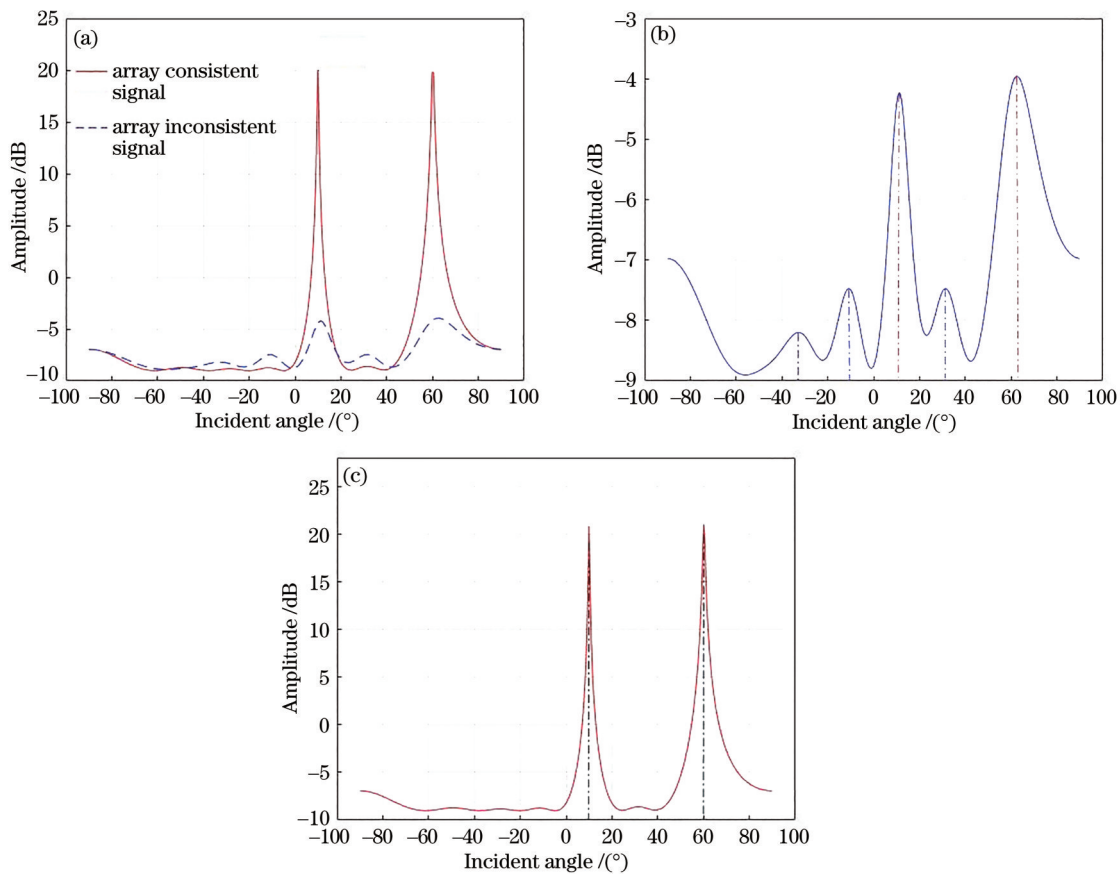


图 3 阵列通道不一致的影响。(a)对比图;(b)阵列通道不一致信号谱;(c)阵列通道一致信号谱

Fig. 3 Effect of inconsistent array channels. (a) Comparison chart; (b) signal spectrum with inconsistent array channels; (c) signal spectrum with consistent array channels

4.2 自适应校正算法的仿真实证

利用 MATLAB 软件,采用第 3 节的算法对实验 1 中的阵列进行两次误差校正,两次校正过程中校正误差阈值 ϵ 分别取 0.001 和 0.0001,其中仿真过程的参数选取与实验 1 一致。

图 4 展示了两次校正后的定向结果,与未校正的信号谱[图 5(a)]对比,可以发现两次校正后的麦克风阵列的定向性能都得到了明显的提升。原信号空间谱

在 30° 、 -12° 、 -34° 处的“伪峰”被消除,同时波峰所对应的位置也被校正,波峰的位置趋近于 10° 和 60° 。可见,该校正算法可以有效地对阵列通道的不一致性进行补偿修正,提升 DOA 估计的准确性。

图 5(b) 展示了直接校正方法^[16]的实验结果,该方法虽然也能够消除“伪峰”并且提升测向精度,但与本文算法相比,经过模拟退火算法校正后的信号空间谱峰更尖锐,并且 DOA 估计的角度值更加接近真实

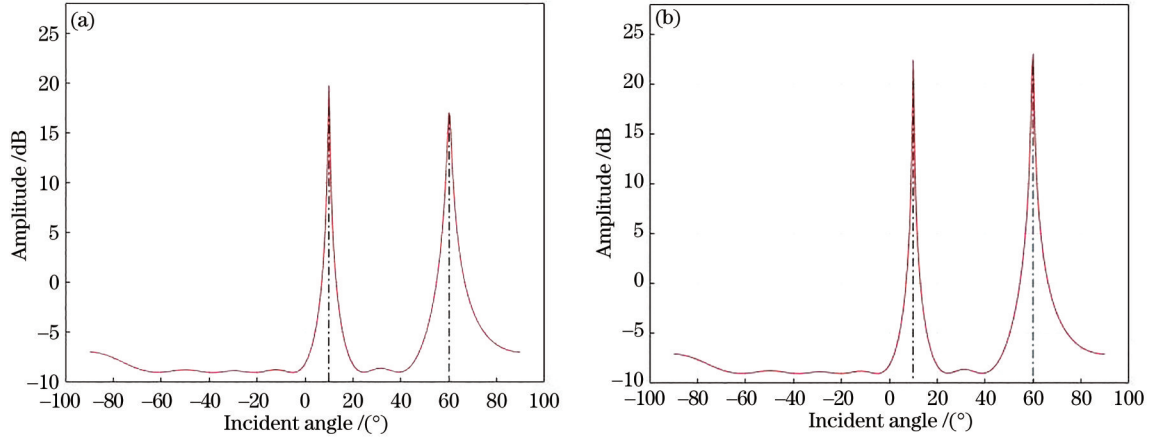


图 4 校正后的信号空间谱。(a)阈值为 0.001 时校正结果;(b)阈值为 0.0001 时校正结果

Fig. 4 Corrected signal spatial spectrum. (a) Correction result when the threshold is 0.001; (b) correction result when the threshold is 0.0001

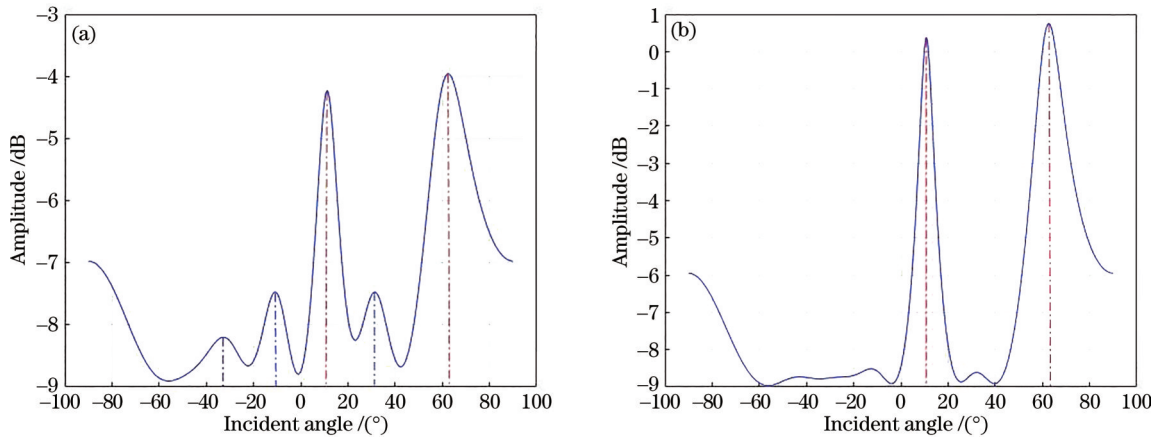


图 5 未校正与直接校正 DOA 估计信号谱。(a)未校正信号谱;(b)直接校正信号谱

Fig. 5 Uncorrected and directly corrected DOA estimation signal spectrum. (a) Uncorrected signal spectrum; (b) directly corrected signal spectrum

值,这也证实了基于模拟退火模型的校正方法的有效性。

4.3 外场实验验证

为了实际验证该校正方法的有效性,实验采用 4 元微机电系统(MEMS)传声器采集声音信号本来

进行测试。4 个阵元按照直线进行均匀布设,阵列孔径为 5 cm,将阵列信号的输出端连接至 NI(National Instruments)采集卡,采集卡模块的输出连接个人计算机(PC)端,对 PC 端的输出信号进行定向估计,整个信号采集模块如图 6 所示。图 7 为信号采集装置实物图。

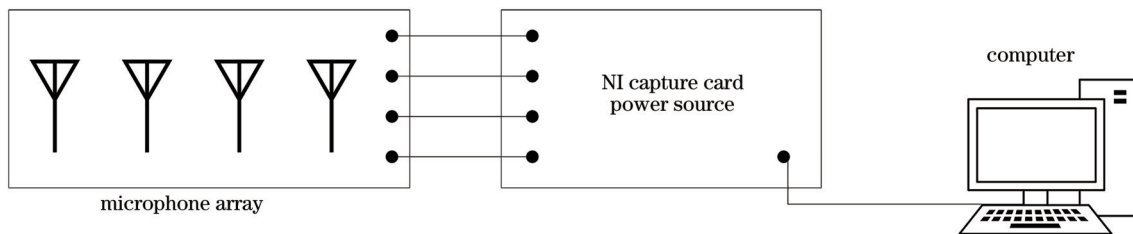


图 6 信号采集模块框图

Fig. 6 Signal acquisition module block diagram

信号采集实验在一个半消音室进行,将手机开启至扬声器模式播放轮式车经过硬土路的声音,轮式车辆的信号谱如图 8 所示。

将手机放置于 170°方向的远场位置,采用 MUSIC

算法进行 DOA 估计并使用本文模拟退火算法进行校正,校正前后的结果如图 9(a)、(b)所示。

从图 9 可以看出,使用本文方法进行校正之后,信号谱的峰值更加尖锐。由于实际使用的阵列在出厂时

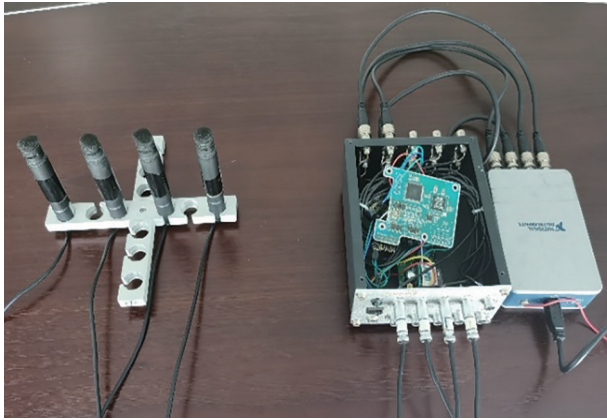


图 7 信号采集装置

Fig. 7 Signal acquisition device

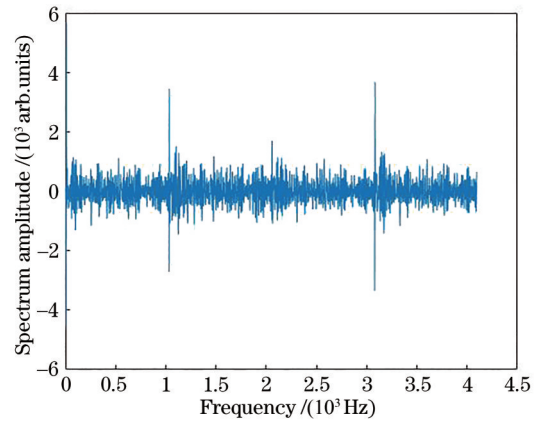


图 8 轮式车信号谱

Fig. 8 Wheeled car signal spectrum

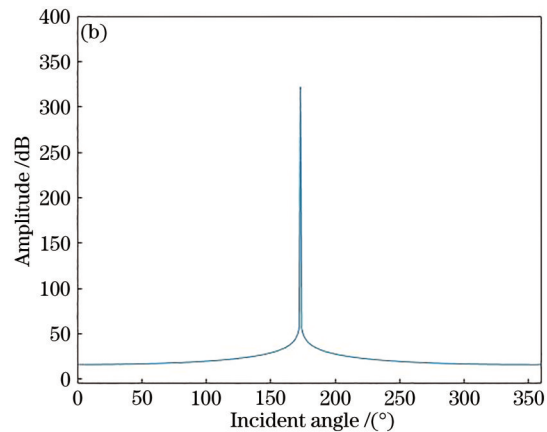
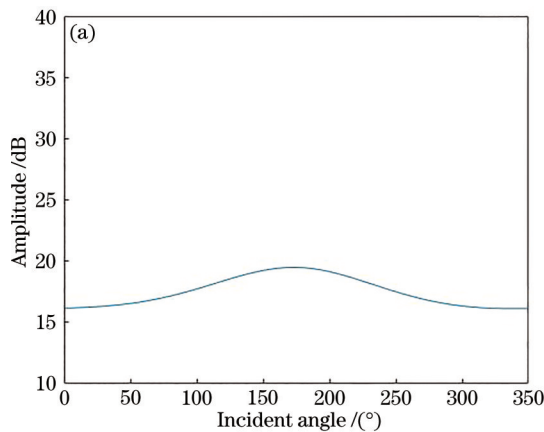


图 9 实际 4 元麦克风阵列校正结果。(a)校正前信号谱;(b)校正后信号谱

Fig. 9 Correction results of actual 4-element microphone array. (a) Signal spectrum before correction; (b) signal spectrum after correction

经过了误差校准,因此校正前后的 DOA 估计结果相差不大,实验结果也印证了这一点。为了验证校正算法对 DOA 估计精度的有效性,实验对 4 个通道采集到的信号样本进行了不同的幅度增强和相位延迟处理,用该方法模拟阵列通道间存在的幅度相位误差,重复校正定向过程。图 10 为处理后的轮式车辆信号谱,图 11

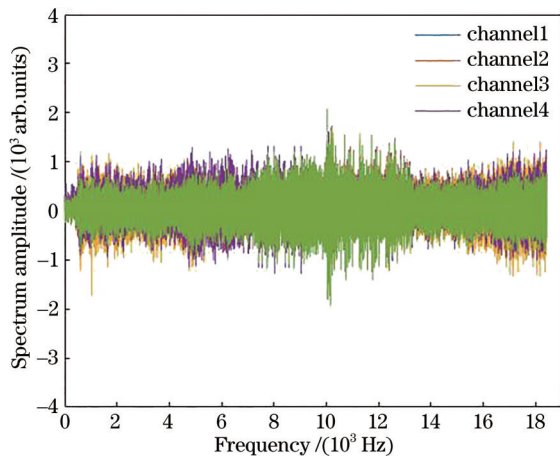


图 10 各通道不一致时信号谱

Fig. 10 Signal spectrum when channels are inconsistent

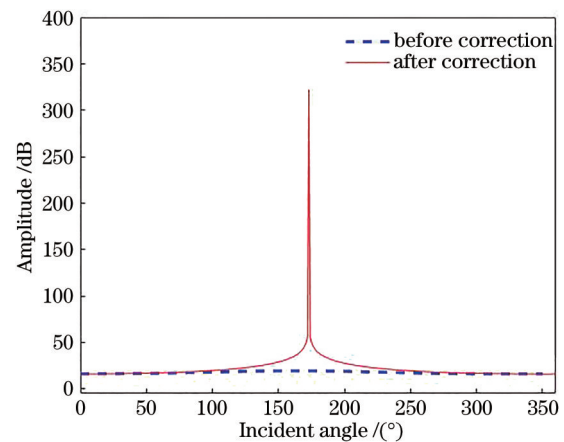


图 11 校正前后的 DOA 估计频谱图

Fig. 11 Spectrogram of DOA estimation before and after correction of DOA estimation results.

为了验证本文方法的普遍适用性,实验将声源的位置进行多次调整。实际的声源方向,未校正的 DOA 估计结果以及使用本文算法校正后的 DOA 估计结果如表 1 所示,通过对比可以看出本文算法的有效性。

表 1 实际方向与校正前后的 DOA 结果对比

Table 1 Comparison of actual direction and DOA results before and after correction

Parameter	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Actual direction /($^{\circ}$)	114.4	112.3	120.2	167.9	211.8	290	330.7	47.5
Uncorrected /($^{\circ}$)	113.4	111.7	117.2	161.5	215.3	284.1	324	42.9
Corrected /($^{\circ}$)	114.7	112.0	119.4	166.4	212.3	288.9	331.2	47.3

5 结 论

麦克风阵列各通道存在幅度和相位误差时,会引起阵列性能的下降,使得信号源的到达方向估计产生误差。因此,在使用麦克风阵列进行信号处理时完成阵列通道不一致的校正显得尤为重要。本文在子空间分解的基础上,采用基于模拟退火算法的模型实现了对误差矩阵的全局自适应最优估计。该方法突破了需要接收精准辅助信号源的限制要求,直接使用目标信号源并通过模拟退火的办法对阵列误差进行校正,此外,该方法不受阵列排布方式的限制,使得算法具有更强的实用性。同时,本文算法结合模拟退火模型和自适应优化算法,得到了全局最优的校正结果。最后,通过计算机仿真以及实际信号的实验验证了这一结论。

参 考 文 献

- [1] Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [2] Godara L C. Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(8): 1195-1245.
- [3] 曹圣红. 存在阵列误差条件下波达方向估计算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [4] Cao S H. Direction of arrival estimation algorithms in the presence of array error[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [5] Friedlander B. A sensitivity analysis of the MUSIC algorithm[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990, 38(10): 1740-1751.
- [6] Friedlander B, Weiss A J. Manifold interpolation for diversely polarized arrays[J]. IEEE Transactions On TASSP, 1992, 40(2): 1758-1774.
- [7] Paulraj A, Kailath T. Direction of arrival estimation by eigenstructure methods with unknown sensor gain and phase[C]//ICASSP '85. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, April 26-29, 1985, Tampa, FL, USA. New York: IEEE Press, 1985: 640-643.
- [8] 万明坚, 肖先赐. 用信号子空间法校准天线阵各通道增益和相位的非一致性[J]. 电子学报, 1992, 20(6): 93-96.
- [9] Wan M J, Xiao X C. Calibration of sensor gain and phase uncertainties using signal subspace methods[J]. Acta Electronica Sinica, 1992, 20(6): 93-96.
- [10] Pierre J, Kaveh M. Experimental performance of calibration and direction-finding algorithms[C]//ICASSP 91: 1991 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, April 14-17, 1991, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 1991: 1365-1368.
- [11] 陈建峰, 黄建国. 阵列误差校正的综合校正补偿法[J]. 声学学报, 1998, 23(6): 515-521.
- [12] Chen J F, Huang J G. A novel array calibration method-synthetic calibration and compensation method[J]. Acta Acustica, 1998, 23(6): 515-521.
- [13] Dong Y F, Li G W, Tan W X, et al. Amplitude and phase error correction method for array SAR processed in time domain[C]//IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, September 26-October 2, 2020, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1560-1563.
- [14] Tang B, Zhou J Z, Tang B F, et al. Adaptive correction for radiation patterns of deformed phased array antenna [J]. IEEE Access, 2019, 8: 5416-5427.
- [15] Zainud-Deen A S, Mallhat H A, Badway M M, et al. Detection and correction of faulty patterns in four-dimensional antenna linear array using particle swarm optimization[C]//2021 38th National Radio Science Conference (NRSC), July 27-29, 2021, Mansoura, Egypt. New York: IEEE Press, 2021: 39-46.
- [16] Geng C, Zou F, Li F, et al. Experimental demonstration of adaptive optics correction of the external aberrations for distributed fiber laser array[J]. IEEE Access, 2021, 9: 51464-51472.
- [17] 康立山. 非数值并行算法-第一册-模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [18] Kang L S. Non-numerical parallel operations (volume one)-simulated annealing algorithm[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [19] Daryanavard H, Harifi A. UAV path planning for data gathering of IoT nodes: ant colony or simulated annealing optimization[C]//2019 3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT), April 17-18, 2019, Isfahan, Iran. New York: IEEE Press, 2019: 18941498.
- [20] 杨勇, 谭渊, 张晓发, 等. 基于模拟退火算法的阵列模型有源校正方法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 91-94.
- [21] Yang Y, Tan Y, Zhang X F, et al. Calibration of array model with multiple sources based on simulated annealing [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(1): 91-94.