

文章编号:1006-1355(2020)06-0115-06

基于虚拟阵列的低频噪声源高分辨率定位方法

刘国强^{1,2}, 滕鹏晓², 李春书¹, 吕君², 程巍², 戴翊靖²

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130; 2. 中国科学院声学研究所, 北京 100190)

摘要:针对阵列成像声源定位系统对于低频噪声源定位空间分辨率低的问题,提出一种适用于低频噪声源的高分辨率定位方法。该方法在不改变传声器阵列孔径条件下,通过对传声器阵列在不同位置采集的噪声信号进行处理,合成虚拟的大孔径阵列,等效增大阵列的物理孔径,以虚拟阵列的信号输出值作为初始值,再使用多重信号分类(MUSIC)高分辨率算法对噪声源进行定位分析。将仿真实验结果与波束形成(SRP)算法进行对比分析,证明基于虚拟阵列的MUSIC噪声源定位方法在对中低频段噪声定位时具有较高的定位分辨率,同时对近距离的多个噪声源具有较好的分辨能力。

关键词:声学;声源定位;虚拟阵列;低频噪声;高分辨率定位

中图分类号:TB52

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2020.06.019

A High Resolution Localization Method for Low Frequency Noise Sources Based on Virtual Arrays

LIU Guoqiang^{1,2}, TENG Pengxiao², LI Chunshu¹,
LYU Jun², CHENG Wei², DAI Yijing²

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A high-resolution localization method for low-frequency noise sources is proposed. This method does not need to change the aperture of the microphone array. By processing the noise signals collected at different positions of the microphone array, a virtual large-aperture array is synthesized, which equivalently increases the physical aperture of the array. With the signal output value of the virtual array as the initial value and using the multiple signal classification (MUSIC) high resolution algorithm, the noise source is localized and analyzed. The comparative analysis of the simulation experiments and the beam forming (SRP) algorithm proves that the MUSIC noise source localization method based on virtual arrays has high positioning resolution in the middle and low frequency bands noise localization, and simultaneously it has better resolution for multiple noise sources localization in short distance range.

Keywords: acoustics; sound source localization; virtual array; low frequency noise; high resolution localization

阵列信号处理技术最早应用于雷达、声纳等军用系统中,随着科技的发展,该技术已经广泛应用于通信、电子、机器人等民用领域^[1-2]。传声器阵列噪声源定位是阵列信号处理技术的一个重要应用^[3]。基于传声器阵列的声源定位技术已经比较成熟,在对传声器阵列技术研究的过程中主要出现了3种基本算法:基于时延估计的定位算法、波束形成算法和高分辨率谱估计算法。时延估计算法在对多源定位时易受空间模糊的影响;波束形成算法计算量小,

稳健性好,常用于实时定位系统,但由于分辨率受限于瑞利限制,分辨率较低;基于高分辨率谱估计的MUSIC声源定位算法具有较高空间分辨率和定位精度^[4-5]。R. O. Schmidt于1979年提出多重信号分类(MUSIC)高分辨谱估计方法,用此方法研究信号子空间和噪声子空间。信号子空间由阵列接收到的数据协方差矩阵中与信号对应的特征向量组成,噪声子空间则由协方差矩阵中所有最小特征值(噪声方差)对应的特征向量组成,此方法利用信号子空间与噪声子空间的正交性来构造空间谱函数,通过谱峰的最大值搜索确定多个声源的位置。MUSIC算法具有较高的空间分辨能力,较传统的波束形成算法,能分辨空间相距较近的两个声源,尤其对低频噪声的噪声源识别意义显得更为重要。

收稿日期:2020-01-20

作者简介:刘国强(1991-),男,河北省邢台市人,硕士研究生,主要研究方向为机械故障检测。

通信作者:李春书,女,硕士生导师。

E-mail: chunshuli@126.com

近年来,噪声源定位技术在输变电设备噪声定位中得到了广泛应用,但是由于输变电设备产生的噪声以低频噪声为主^[6],传统传声器阵列声源定位方法对于低频噪声源的空间分辨率低^[7],难以检测出多个空间相近的噪声源,定位精度也不高,不能精确识别噪声源位置,因此,对低频噪声源的高精度定位方法研究对变电设备噪声治理、设备优化以及故障监测等具有重要意义^[8]。

由于低频噪声波长较长,采用传统的传声器阵列定位低频噪声源时,要保证其定位准确性,就需要扩大阵列孔径,这就会导致设备的尺寸增大,制造成本增加,同时尺寸的增加也会对运输、测量场地选择等方面带来更多的限制条件。为了在不改变原阵列孔径的前提下,提高传声器阵列声源定位系统定位低频噪声源的准确性,耿明昕等采用了合成孔径的方法结合波束形成算法对变电站噪声进行了定位研究^[9-10],结果表明采用合成孔径的方法可提高低频噪声源的定位精度,但是该方法的空间分辨率还不够高,不能有效分离距离较近的声源,为了进一步提高低频噪声源的定位分辨率,提出了用虚拟阵列技术与MUSIC算法相结合的高分辨率噪声源定位方法。

1 远场模型及传统MUSIC算法

1.1 远场模型

远场模型是传声器阵列声源定位中常用模型。当噪声源距离传声器阵列较远时,可将阵列接收到的声波看成是平面波,当声波以一定角度入射到传声器阵列时,各阵元接收到的声波方向近似相同,各阵元接收到的信号之间会产生延迟。以平面阵列为例,其远场信号模型如图1所示。

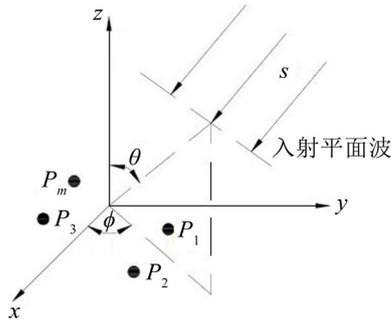


图1 远场声源模型

假设信号来波方向为 u ,角频率为 ω ,坐标原点处接收到的信号为 $x(t)$,信号来波方向用矢量表示为

$$u = \begin{pmatrix} -\sin\theta\cos\phi \\ -\sin\theta\sin\phi \\ -\cos\theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

设传声器阵列中有 M 个阵元, p_m 为第 m 个传声

器所在位置:

$$p_m = [x_m, y_m, z_m]^T \quad (2)$$

则第 m 个传声器采集到的信号相对于原点处的时间延迟为

$$\tau_m = \frac{u^T p_m}{c} = -\frac{1}{c} \quad (3)$$

$$[\sin\theta\cos\phi \cdot x_m + \sin\theta\sin\phi \cdot y_m + \cos\theta \cdot z_m]$$

其中: c 为测量环境中的声速。第 m 个传声器接收信号可写成:

$$x_m(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t - \tau_m) + n_m(t) \quad (4)$$

$$m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$$

其中: $n_m(t)$ 为第 m 个传感器的噪声信号, M 是传感器数量, N 是声源的数量。在窄带信号源假设的前提下,信号可以写成复包络形式^[12]:

$$s_n(t - \tau_m) \approx s_n(t) e^{-j\omega_n \tau_m} \quad (5)$$

根据式(5),式(4)可以写成:

$$x_m(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) e^{-j\omega_n \tau_m} + n_m(t) \quad (6)$$

$$m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$$

式(6)写成矩阵形式如下:

$$x(t) = A s(t) + n(t) \quad (7)$$

其中: $x(t)$ 为阵列接收数据向量, A 为方向矩阵, $s(t)$ 为信号向量, $n(t)$ 为噪声向量,具体可写为

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ e^{-j\omega_1 \tau_{21}} & \dots & e^{-j\omega_N \tau_{2N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{-j\omega_1 \tau_{M1}} & \dots & e^{-j\omega_N \tau_{MN}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: ω_n 为信号的角频率, $n = 1, 2, \dots, N$ 。

1.2 传统MUSIC算法

MUSIC算法是一种基于窄带信号源假设的一种超分辨DOA估计算法,MUSIC算法的基本思想是通过对阵列数据协方差矩阵的特征分解,得到相互正交的信号子空间和噪声子空间,利用信号子空间和噪声子空间之间的正交性关系,构造出空间谱峰,通过搜索谱峰实现信号方位估计。

阵列数据协方差矩阵特征分解为

$$R_{xx} = E\{x(t)x^H(t)\} = U_S \Sigma_S U_S^H + U_N \Sigma_N U_N^H \quad (9)$$

对协方差矩阵进行特征分解,通过求输出矩阵的秩和特征值,由特征值构造出协方差矩阵的特征向量和特征值构成的对角阵。 $\Sigma = \text{diag}[\lambda_1, \dots, \lambda_D, \lambda_{D+1}, \dots, \lambda_M]$ 和 $U = [u_1, \dots, u_D, u_{D+1}, \dots, u_M]$

分别为 R_{xx} 的特征值矩阵和与特征值对应的特征向量矩阵。 U_s 和 U_N 为信号子空间和噪声子空间,在理想条件下,信号空间矢量与噪声空间矢量是正交的:

$$a^H(\theta)U_N = 0 \quad (10)$$

在实际情况下,由于噪声的存在使得 $a^H(\theta)$ 与 U_N 并不能完全正交,需通过最小化搜索实现。其中 $a(\theta)$ 为方向向量, $a(\theta) = [1, e^{-j\omega\tau_{2\theta}}, \dots, e^{-j\omega\tau_{m\theta}}, \dots, e^{-j\omega\tau_{L\theta}}]$, $\tau_{m\theta}$ 是在空间搜索 θ 方向上到第 m 个传感器的时延。考虑到实际接收数据矩阵有限长,数据协方差矩阵的最大似然估计为

$$\hat{R} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x(t)x(t)^H \quad (11)$$

式中: L 代表快拍数,对每个传声器接收到的信号求协方差矩阵,进而求平均值,得到极大似然估计。并用实际输出的协方差矩阵 \hat{R} 进行特征分解,得到实际环境下的信号子空间部分 \hat{U}_s 和噪声子空间部分 \hat{U}_N ,由于实际环境的影响使得 $a^H(\theta)$ 与 U_N 并不能完全正交,为得到准确的估计结果,采用最小优化搜索来进行方位估计:

$$\theta_{\text{MUSIC}} = \arg \theta \left(a^H(\theta) \hat{U}_N \hat{U}_N^H a(\theta) \right) \quad (12)$$

由于阵列导向矢量与噪声子空间具有正交性,在信号入射方向上会出现一个极值,在功率谱的图像上会出现一个尖峰,根据尖峰位置对应的坐标求出入射角度, MUSIC 空间谱搜索公式为

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) \hat{U}_N \hat{U}_N^H a(\theta)} \quad (13)$$

2 基于虚拟阵列的 MUSIC 算法

传统 MUSIC 算法虽然具有较高的空间分辨率,但是它的分辨率仍然与噪声源的频率有关,随着噪声源频率降低,空间分辨率也随之降低。为了进一步提高低频噪声源的分辨能力,本文提出基于虚拟阵列的 MUSIC 算法,通过构建虚拟阵列,增加阵列孔径,而不增加阵列物理直径,提高阵列的空间分辨能力。虚拟阵列通过将阵列在同一平面内移动多个位置,然后通过一定的相位和空间位置补偿,将阵列的不同位置虚拟成一个大孔径阵列,以此进行噪声源定位以获得大孔径阵列的定位效果。

确定要测量的噪声源大概位置后,在测量位置和阵列之间放置一固定参考传声器,此传声器在进行信号采集过程中不间断采集噪声信号。传声器阵列在正对噪声源位置的平面内进行变换位置的间隔采样,采样过程如图2所示。定义传声器阵列第一次采样时的位置是参考位置,为保证虚拟阵列的阵元无重叠,在传声器阵列间隔采样过程中传声器阵

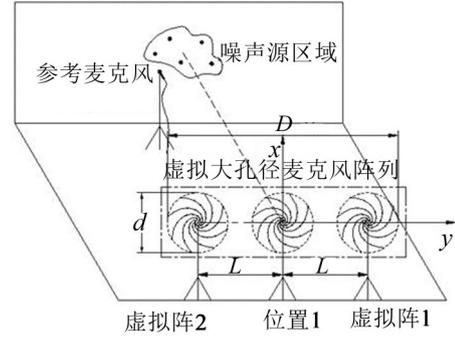


图2 虚拟阵列测量方法示意图

列水平或竖直移动的距离 l 大于阵列直径 d , 每次移动后的阵列所在位置都为虚拟阵列的子阵列, 当阵列沿同一个方向移动 n 次以后, 可合成虚拟阵列的孔径 $D = d \times (n + 1)$, D 为虚拟阵列的孔径。当进行移动位置的间隔采样之后, 将采集的信号经过一窄带滤波器, 利用 Hilbert 变换进行变换, 获得信号的解析形式, 计算参考阵列和子阵列的相位差之后, 对所有子阵列的采样信号进行合成, 用合成的信号进行噪声源定位算法处理, 所得结果即为虚拟阵列的噪声源定位结果。

以位置1处的阵列中心为坐标原点建立空间直角坐标系, 若噪声源区域有 E 个点声源, 则坐标原点处阵元接收到的声源信号为^[11]

$$p_k = \frac{B}{r_k} e^{j(\omega t - kr_k)}, 1 \leq k \leq m \quad (14)$$

其中: B 为声源信号的幅值; r_k 为第 k 个噪声源的坐标矢量; ω 为信号的角频率; $k = \frac{\omega}{c}$ 为波数; c 为空气中声速。移动后不同位置的阵列合成后形成虚拟的大孔径阵列, 在虚拟大阵列中, 第 n 个子阵列的第 m 个阵元接收到的声源信号为

$$x_{n,m}(t) = \sum_{k=1}^m \frac{B}{|r_{n,m} - r_k|} \exp \{ j(\omega t - k|r_{n,m} - r_k| + \theta_n) \} \quad (15)$$

其中: n 为虚拟阵列中阵列位置编号; $r_{n,m}$ 为 n 个子阵列的第 m 个阵元的坐标矢量; θ_n 是第 n 个子阵列的初始参考相位, 且 $1 \leq n \leq n_s, 1 \leq m \leq M$ 。

不同位置处的传声器阵列接收到的信号初始相位不同, 可利用固定位置处的参考阵元接收的信号计算出第 n 个阵列与第1个阵列之间的初始参考相位差 $\Delta\theta_{n,1}$:

$$\Delta\theta_{n,1} = E(\theta_{n,m} - \theta_{1,m}) = \arg \left[E \left(\frac{x_{n,m}/x_{n,ref}}{x_{1,m}/x_{1,ref}} \right) \right] \quad (16)$$

其中: $\theta_{n,m}, \theta_{1,m}$ 分别是第 n_1 和第1个子阵中第 m 个阵元的初始参考相位; $x_{1,m}, x_{n,m}$ 分别是第1个子阵和第 n 个子阵参考阵元采样的信号; \arg 表示幅角; E 表示

期望。

在 t 时刻时虚拟大孔径阵列的第 n 个子阵列的第 m 个阵元所接收到的信号为 $x_{n,m}(t)$, 合成之后的大孔径虚拟阵列第 n 个子阵列的第 m 个阵元所接收到的信号为 $x'_{n,m}(t)$, 它们之间的转换公式为

$$x'_{n,m}(t) = x_{n,m}(t)e^{j(\Delta\theta_{n,1})} \quad (17)$$

所有阵列接收到的信号通过式(17)转换后, 可以与第一个子阵接收到的信号实现同步, 从而将不同位置的子阵列接收到的信号转化成虚拟大孔径阵列的整体接收信号。若虚拟大孔径阵列的第 q 个传声器对应第 n 个子阵列的第 m 个阵元, 则 $y_q(t) = x'_{n,m}(t)$, 假设空间内有 E 个窄带信号源, 分别入射到以 3 个阵列构成的虚拟阵列上, 其中 $y(t)$ 为信号源, 整个虚拟阵列的接收信号可表示为

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \\ y_{m+1}(t) \\ \vdots \\ y_{2m}(t) \\ y_{2m+1}(t) \\ \vdots \\ y_{3m}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega_1\tau_{m,1}} & \cdots & e^{-j\omega_E\tau_{m,E}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega_1\tau_{m+1,1}} & \cdots & e^{-j\omega_E\tau_{m+1,E}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega_1\tau_{2m,1}} & \cdots & e^{-j\omega_E\tau_{2m,E}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega_1\tau_{2m+1,1}} & \cdots & e^{-j\omega_E\tau_{2m+1,E}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega_1\tau_{3m,1}} & \cdots & e^{-j\omega_E\tau_{3m,E}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_E(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ \vdots \\ n_m(t) \\ n_{m+1}(t) \\ \vdots \\ n_{2m}(t) \\ n_{2m+1}(t) \\ \vdots \\ n_{3m}(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

将式(12)写成矢量形式:

$$y(t) = A_E s(t) + n(t) \quad (19)$$

其中: $y(t)$ 为阵列接收信号的数据, 维数为 $3m \times 1$, $n(t)$ 为阵列受到的维数为 $3m \times 1$ 的噪声矢量, $s(t)$ 是维数为 $E \times 1$ 的空间信号矢量, A_E 是维数为 $3m \times E$ 的阵列方向矩阵, 并且:

$$A_E = [a_1(\omega_1), \cdots, a_E(\omega_E)] \quad (20)$$

对 $Y(t)$ 进行特征值分解:

$$R_{YY} = E \{ y(t)y^H(t) \} = U_S \Sigma_S U_S^H + U_N \Sigma_N U_N^H \quad (21)$$

采用最小优化搜索来进行方位估计:

$$\theta_{\text{MUSIC}} = \arg_{\theta} \{ a^H(\theta) \hat{U}_N \hat{U}_N^H a(\theta) \} \quad (22)$$

对虚拟阵列数据进行 MUSIC 算法处理的空间谱搜索公式为

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) \hat{U}_N \hat{U}_N^H a(\theta)} \quad (23)$$

合成的虚拟阵列信号经过 MUSIC 算法估计之后, 即可得到高分辨率定位的空间图谱。

3 仿真结果分析

为了验证本文定位算法的性能, 对前面理论分析进行仿真实验, 在使用单阵列和虚拟阵列时分别使用 SRP 定位算法和 MUSIC 定位算法对声源定位进行仿真对比实验。仿真中在 6×6 平面内构造点声源, 在距离声源 6 m、与声源面平行的平面上采用孔径为 1.6 m 的 64 阵元螺旋传声器阵列模型进行噪声源定位, 阵元位置图如图 3 所示:

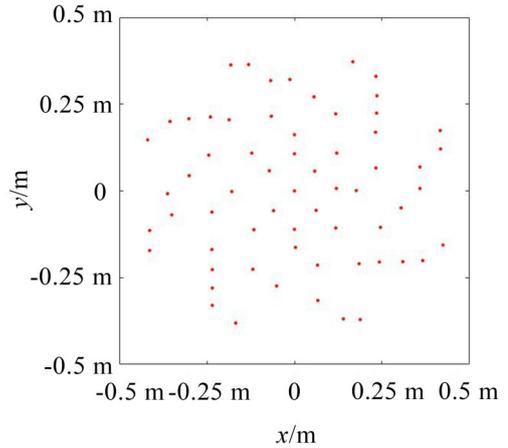


图 3 64 元阵列阵元位置图

3.1 基于虚拟阵列定位方法和单一阵列定位方法阵列定位结果比较

设置声源为位于 $[0, 0]$ 的点声源, 单声源频率为 400 Hz 时, 在 6 m 距离处测量, 分别使用单阵列 SRP 算法和基于虚拟阵列的 SRP 算法进行仿真对比, 仿真结果如图 4 和图 5 所示。从仿真结果可以看出, 在虚拟阵列孔径增大方向上 SRP 定位算法对声源的定位分辨率有所提高, 声源主瓣宽度变小, 但定位分辨率仍然较低。

3.2 使用虚拟阵列方法时 SRP 算法和 MUSIC 算法对单声源定位结果对比

在进行单声源 SRP 定位算法单阵列和虚拟阵列两种定位方法仿真对比的基础上, 得出虚拟阵列可提高定位分辨率的结论。分别使用 SRP 定位算法和 MUSIC 定位算法在虚拟阵列下对不同频率的单声源进行定位仿真对比, 仿真结果如图 6 和图 7 所示。从仿真结果可以看出, 虚拟阵列下 MUSIC 声源定位方法的定位分辨率更高, 且虚拟阵列下的 MUSIC 声源定位方法受频率影响小, 对低频噪声源仍有较高的定位分辨率。

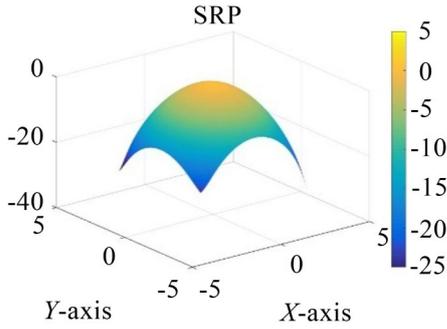


图4 单阵列SRP方法单声源(400 Hz)

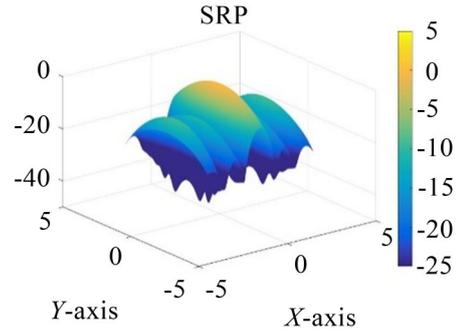


图5 虚拟阵列SRP方法单声源(400 Hz)

3.3 使用虚拟阵列方法时SRP算法和MUSIC算法对双声源定位结果对比

在单声源仿真基础上将声源增加为双声源,分

别使用SRP定位算法和MUSIC定位算法在虚拟阵列下对不同频率的双声源进行定位仿真对比,设置两声源距离为1 m,仿真结果如图8和图9所示。从

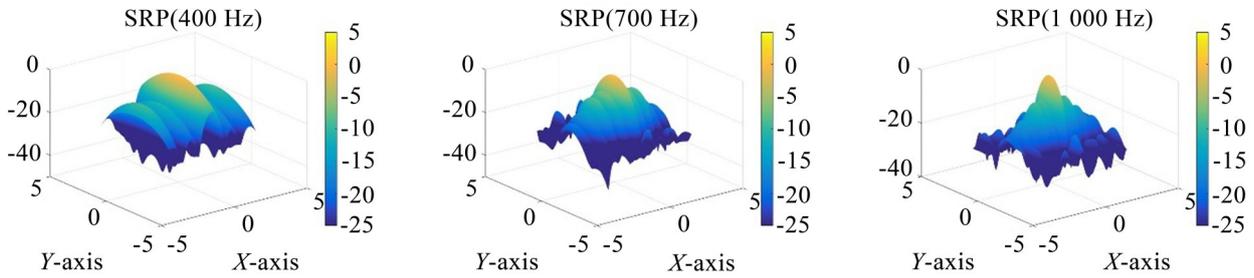


图6 虚拟阵列SRP方法对不同频率单声源定位仿真

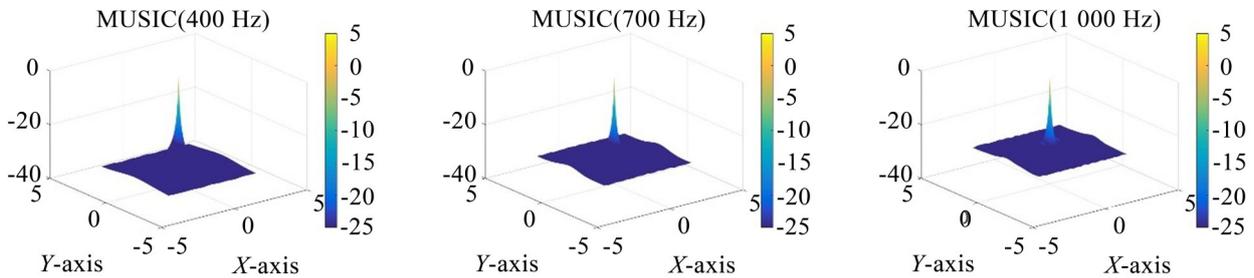


图7 虚拟阵列MUSIC方法对不同频率单声源定位仿真

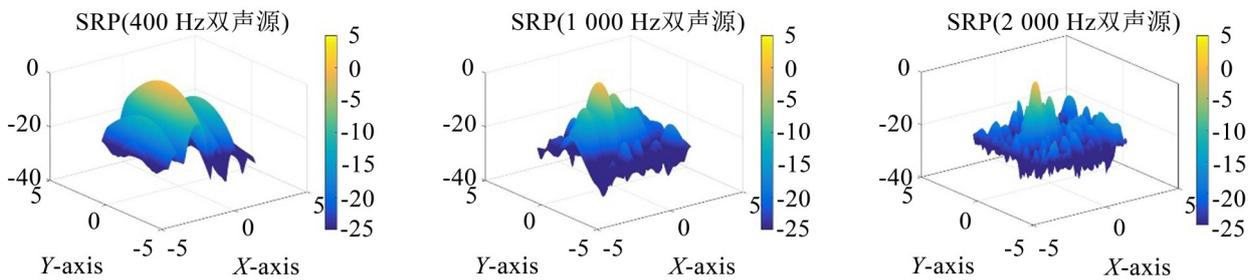


图8 虚拟阵列SRP方法对不同频率双声源定位仿真

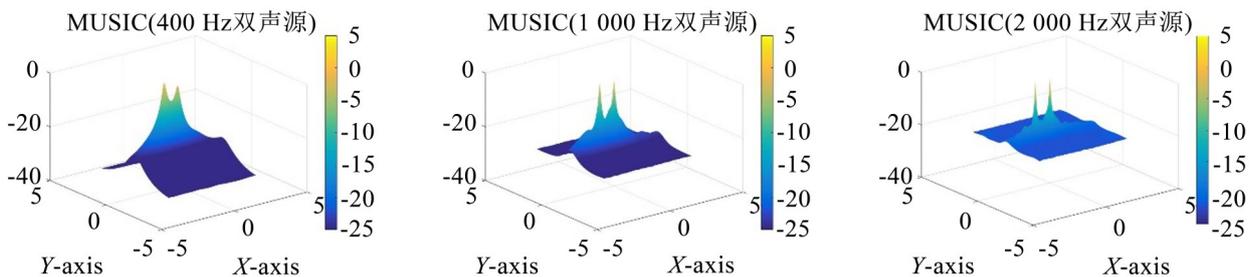


图9 虚拟阵列MUSIC方法对不同频率双声源定位仿真

仿真结果可以看出,虚拟阵列下的SRP声源定位方法对于低频率声源的定位分辨率较低,当频率在2 000 Hz以下时SRP定位算法不能有效分离距离为1 m的两个声源,而虚拟阵列下的MUSIC声源定位方法能够对最低为400 Hz的双声源进行有效的定位分离,因此,基于虚拟阵列的MUSIC声源定位方法是对低频噪声源更有效的高分辨率定位方法。

3.4 性能比较与分析

为对虚拟阵列下两种定位算法性能进行进一步对比分析,下面根据定位的位置误差来对算法的定位性能进行分析,取频率范围为400 Hz至2 000 Hz,频率间隔为100 Hz,对单声源进行17次定位仿真实验,对坐标的误差量做统计,分别对两种定位算法下X坐标误差和Y坐标误差进行绘图对比,对比结果如表1和图10所示。

表1 频率间隔100 Hz时两种算法的定位效果/m

频率/Hz	虚拟SRP算法			虚拟MUSIC算法		
	$x-x_0$	$y-y_0$	误差/m	$x-x_0$	$y-y_0$	误差/m
400	0.51	0.30	0.592	0.14	0.01	0.172
500	0.40	0.27	0.483	0.12	0.08	0.144
600	0.20	0.20	0.283	0.07	0.05	0.086
700	0.14	0.12	0.184	0.06	0.05	0.078
800	0.07	0.07	0.099	0.02	0.02	0.028
900	0.05	0.05	0.071	0.01	0.01	0.014
1 000	0.05	0.05	0.071	0.01	0	0.010
1 100	0.04	0.04	0.057	0.01	0	0.010
1 200	0.04	0.03	0.050	0.01	0	0.010
1 300	0.03	0.03	0.042	0.01	0	0.010
1 400	0.02	0.02	0.028	0	0	0
1 500	0.02	0.01	0.022	0	0	0
1 600	0.01	0	0.010	0	0	0
1 700	0.01	0	0.010	0	0	0
1 800	0	0	0	0	0	0
1 900	0	0	0	0	0	0
2 000	0	0	0	0	0	0

根据从仿真定位的坐标误差曲线可看出,在高频率时两种算法的定位效果误差很小,但是在频率较低时,虚拟阵列SRP算法的定位误差较虚拟阵列MUSIC算法的定位误差更大,因此,可以得出虚拟阵列MUSIC算法具有更高的定位精度。

4 结语

传声器阵列在定位低频噪声源时,由于受到阵列孔径的限制导致传声器阵列对低频噪声的定位分辨率较低,本文采用了虚拟阵列的方法将传声器阵列在不同位置采集的噪声信号合成为虚拟大孔径阵列的噪声信号,然后使用MUSIC声源定位算法对

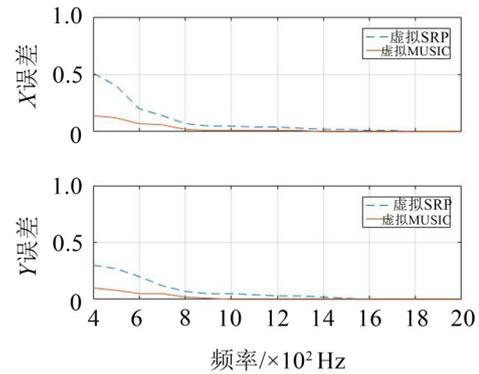


图10 两种算法定位误差曲线

信号进行噪声源定位分析。理论分析和实验仿真结果表明,基于虚拟阵列的MUSIC噪声源定位方法对低频噪声有很好的定位效果,在较宽的频率范围内有较强的抗噪声能力和较高的空间分辨能力。

参考文献:

- [1] 白国军,李军,纪红刚,等.声阵列测试技术在微型泵降噪中的应用研究[J].*噪声与振动控制*,2019,39(3):235-240+249.
- [2] 张鹭.卫星导航测控站的阵列信号测向技术应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [3] 宋玉来,岳磊,金江明,等.用小型传声器阵列测量环境噪声中简单声源声压级[J].*噪声与振动控制*,2015,35(2):141-145.
- [4] 刘哲,陈日林,滕鹏晓,等.基于平面传声器阵列的声源定位系统[J].*声学技术*,2011,30(2):123-128.
- [5] WU X, JIN S, YIBO L I, et al. Sound source localization based on microphone arrays[J].*Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(5): 682-686.
- [6] 王素文,张松光,王淑萍,等.虚拟声屏障在变压器低频降噪中的实验研究[J].*应用声学*,2015,34(6):487-494.
- [7] 叶虹敏,王强,袁昌明.扩展性噪声源定位的空间谱估计仿真研究[J].*中国计量学院学报*,2014(3):302-307.
- [8] CHUANMIN C, YANG G, SONGTAO L. Study on noise prediction model and control schemes for substation[J].*The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 1-7.
- [9] 吴健,赵明宇,耿明昕,等.基于矢量传声器阵列的低频声源定位[J].*电声技术*,2018,42(2):6-12+23.
- [10] SHU Y, ZHOU X, LI W. Analysis of low frequency oscillation and source location in power systems[J].*CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2018, 4(1): 58-66.
- [11] 耿明昕,吴健,安翠翠,等.基于传声器阵列合成孔径算法的变电站噪声源测量方法研究[J].*陕西电力*,2017,45(1):86-89.
- [12] 王永良,陈辉,彭应宁,等.空间谱估计理论与算法[M].北京:清华大学出版社,2004.