

林区气体压力管道泄漏超声定位自适应反卷积波束成形算法

徐敏玉, 邢涛*, 刘鉴建县, 杨阳
(东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 林区气体压力管道作为国家新型能源战略的重要载体, 其泄漏不仅造成直接经济损失, 更可能因林区生态系统的敏感性引发土壤污染、植被破坏甚至森林火灾等次生灾害。现有基于超声声源的定位方法在应对多泄漏源场景时, 存在高旁瓣伪影干扰和主瓣展宽导致的定位精度下降等问题。此外, 林区复杂地形、密集植被及环境噪声进一步限制了传统检测技术的适用性。为此, 提出一种自适应反卷积波束成形算法, 通过优化权重矩阵与反卷积迭代策略, 实现高精度泄漏定位。首先, 基于最小方差无失真响应 (minimum variance distortionless response, MVDR) 准则构造初始权重矩阵, 结合自适应迭代调整权重, 在抑制旁瓣干扰的同时增强目标信号聚焦能力; 其次, 通过高斯-赛德尔反卷积法迭代压缩主瓣宽度, 提升分辨率。为验证算法性能, 设置管径 150 mm、压力 0.8 MPa 的压力管道模型, 模拟 0.5 mm 与 0.7 mm 泄漏孔径的超声信号, 并搭建试验系统进行对比分析。结果表明, 与传统反卷积波束成形相比, 提出算法在信噪比 -10~20 dB 条件下, 声源 1 (0.7 mm 孔径) 定位误差降低 0.06 m, 声源 2 (0.5 mm 孔径) 误差降低 0.05 m, 且有效消除伪影现象。试验进一步验证了该方法在低信噪比 (-10~20 dB) 下的鲁棒性及计算效率优势。研究结果为林区复杂环境中压力管道微小泄漏的非接触式检测提供高精度解决方案, 兼具抗干扰性强、环境适应性高的特点, 对保障能源运输安全及生态环境保护具有重要意义。

关键词: 超声检测; 波束成形; 声源定位; 气体泄漏; 自适应; 反卷积; 阵列信号处理; 麦克风阵列; 声学成像

中图分类号: TH45; TE88; S776

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.020

Research on Adaptive Deconvolution Beamforming Algorithms for Ultrasonic Localization of Gas Pressure Pipeline Leaks in Forest Areas

XU Minyu, XING Tao*, LIU Jianjianxian, YANG Yang
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: As an important carrier of the national new energy strategy, the leakage of gas pressure pipelines in forest areas not only causes direct economic losses, but also may lead to secondary disasters such as soil pollution, vegetation destruction and even forest fires due to the sensitivity of forest ecosystems. The current ultrasonic sound source-based localization methods suffer from challenges such as high sidelobe artifact interference and insufficient localization accuracy caused by wide main lobe beamwidth in multi-leakage source scenarios. Moreover, the complex terrain, dense vegetation coverage, and environmental noise in forest areas further compromise the applicability of conventional detection techniques. In this paper, an adaptive inverse convolution beamforming algorithm is proposed to achieve high-precision leakage localization by optimising the weight matrix and the inverse convolution iteration strategy. Firstly, the initial weight matrix is constructed based on the minimum variance distortionless response (MVDR) criterion, and the weights are adjusted with adaptive iteration to enhance the focusing ability of the target signal while suppressing the interference of the

收稿日期: 2025-05-22

基金项目: 黑龙江省重点研发计划指导类项目 (432234015)。

第一作者简介: 徐敏玉, 硕士研究生。研究方向为超声无损检测。E-mail: xuminyu2022@163.com

* **通信作者:** 邢涛, 博士, 副教授。研究方向为石油管道的超声自动化检测、声学成像、基于物联网的管道腐蚀监测和螺栓应力检测。E-mail: 18345010608@126.com

引文格式: 徐敏玉, 邢涛, 刘鉴建县, 等. 林区气体压力管道泄漏超声定位自适应反卷积波束成形算法[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1310-1322.

XU M Y, XING T, LIU J J X, et al. Research on adaptive deconvolution beamforming algorithms for ultrasonic localization of gas pressure pipeline leaks in forest areas[J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1310-1322.

sidelobes. Secondly, the main lobe width is compressed through Gauss-Seidel deconvolutional iteration, thereby enhancing resolution. To validate the algorithm's performance, this study establishes a pressure pipeline model with a diameter of 150 mm and operating pressure of 0.8 MPa to simulate ultrasonic signals from 0.5 mm and 0.7 mm leakage orifices, while constructing an experimental system for comparative analysis. Results demonstrate that compared with conventional deconvolution beamforming, the proposed algorithm reduces localization errors by 0.06 m for Source 1 (0.7 mm orifice) and 0.05 m for Source 2 (0.5 mm orifice) under signal-to-noise ratio (SNR) conditions ranging from -10 dB to 20 dB, while effectively eliminating artifact interference. The experiments further validate the method's robustness and computational efficiency advantages under low SNR conditions (-10 dB to 20 dB). This study provides a high-precision solution for non-contact detection of minor pressure pipeline leaks in forest environments, characterized by strong anti-interference capability and superior environmental adaptability. The findings hold significant implications for ensuring energy transportation safety and ecological conservation.

Keywords: Ultrasonic detection; beamforming; source localization; gas leakage; adaptive; deconvolution; array signal processing; microphone array; acoustic imaging

0 引言

全球能源结构加速向低碳转型,天然气作为清洁能源的需求持续攀升。在运输领域,管道凭借成本低、运量大和效率高等优势,承担着全球50%以上的天然气输送任务^[1]。我国《“十四五”现代能源体系规划》明确提出,到2025年进口管道气输送能力将提升至1400亿 m^3/a 。随着林区油田等新型能源开发区域的拓展,地表压力气体管道已成为连接能源产区与消费端的核心动脉。然而,林区管道系统面临独特挑战:作为国家新型能源战略的重要载体,其泄漏不仅造成直接经济损失(单次泄漏可导致数百万立方米天然气损失);更因林区生态系统的敏感性,可能引发土壤污染、植被破坏甚至森林火灾等次生灾害。据GB/T 34346—2017标准显示,微小孔径泄漏情况占比高达50%,而这类腐蚀前期出现的微小泄漏孔往往危害更为隐蔽严重。而这对林区环境保护和经济效益构成重大威胁,使得气体泄漏检测和管道完整性管理成为现代能源体系的关键技术环节。

压力管道泄漏的检测方法有声波法^[2-3]、光纤传感技术^[4]和热学光学成像法及智能算法^[5]等多种方法。其中,光纤检测灵敏度高但林区复杂的地形地貌导致光纤布设困难,热成像直观但易受密集植被干扰,声波法因定位精度强和适用性广,已被广泛应用于长输管道和复杂管道系统中^[6]。压力气体管道发生泄漏形成湍流^[7],引发高频气体振动并以声波的形式传播^[8],其传播特性可用于反演泄漏源位置。基于麦克风阵列的声源定位技术通过捕捉压力管道表面气体泄漏超声信号,可实现非接触式检测,并能够有效处理多个泄漏源。波束成形计算简便稳健性强,被广泛用于确定异响噪声^[9]、气动噪声检测^[10]和压力管道泄漏定位^[11]等方面。麦克风阵列技术结合波束成形算法构建声场

能量分布图,可实现压力管道的泄漏检测,如结合到达方向估计(direction of arrival, DOA)用于检测输气管道泄漏的双阵列定位方法^[12];归一化的Function波束成形作为惩罚矩阵的波束成形定位方法^[13];用于连续气体泄漏定位的波束成形算法^[14];将波束成形用于增益蒸汽发生器管道的泄漏信号的定位方法^[15]等。然而,常规波束成形(conventional beamforming, CBF)因主瓣宽、旁瓣干扰显著导致空间分辨率不足。改进算法相继被提出,包括广义逆波束成形(generalized inverse beamforming, GIB)^[16]、函数波束成形^[17]以及反卷积波束成形等。其中反卷积波束成形算法因其能够有效提高分辨率和抑制旁瓣而备受关注。DAMAS算法^[18]通过将波束成形输出视为声源分布与点扩散函数(point spread function, PSF)的卷积,利用高斯-赛德尔迭代方法解卷积显著提高了成像分辨率,在处理多声源信号时表现出较高的精确性。然而,其迭代次数随声源数量增加而迅速增长,计算复杂度增大,而且计算PSF过程中旁瓣干扰,算法的动态范围受到限制,声源定位的精准度下降^[19]。综上,现有的波束成形算法中,常规波束成形主瓣宽分辨率低,反卷积波束成形算法多声源定位结果出现虚假声源干扰。为此,本研究提出了一种自适应反卷积波束成形算法,首先通过自适应方法优化权重矩阵(\mathbf{w}_{adpt})以减少常规波束成形的旁瓣干扰;其次在优化权重的波束成形结果上使用反卷积迭代策略,压缩主瓣提高定位分辨率;最后验证了该方法计算复杂度减小并解决了反卷积波束成形出现的虚假声源问题,通过对比平均绝对误差,证明该方法在多泄漏声源环境中提升了精确度。该方法基于传感器阵列和波束成形方法,通过检测压力气体管道泄漏声波来实现定位,以期为压力气体管道发生微小泄漏时的场景提供一种非接触式的技术支持。

1 泄漏声波产生机理

在压力管道运行过程中,当内外压差超过临界值时,被压缩气体将通过泄漏孔向低压区域高速流动形成泄漏。泄漏发生时,管道内介质流速与压力分布的突变会引发湍流现象^[7],而湍流中气体剧烈振动可产生20 kHz以上的高频声波,并以超声信号形式通过空气传播^[8]。实际工业环境中,泄漏声源信号的频率通常分布范围在6~80 kHz^[20],其中超声频段(>20 kHz)因其强方向性和低环境噪声干扰特性,成为泄漏源定位的关键特征信号。

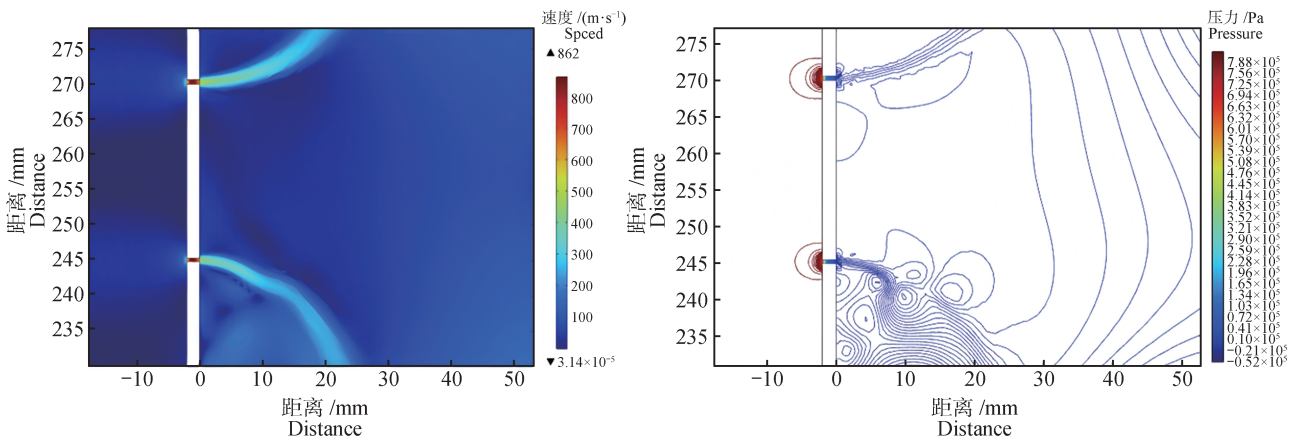


图1 气体压力管道泄漏声波声场分布图

Fig. 1 Distribution diagram of acoustic field caused by gas pressure pipeline leakage

根据Wang等^[22]给出的较为精确的泄漏声波频率与泄漏孔径及泄漏速度的关系,可以计算出泄漏声波的中心频率 f 。泄漏气体流速 $v=852$ m/s,漏孔直径 $d=0.0005$ m,计算可得取值 f 在34.080~20.448 kHz,可以得出泄漏声波信号必然有超声频率部分。上方为0.7 mm孔径的泄漏声波中心频率为27.727 kHz,下方为0.5 mm孔径的泄漏声波中心频率为34.080 kHz。为模拟实际泄漏场景,在扫描平面设置28 kHz与34 kHz双频声源,通过波束形成算法将探测区域网格化,逐点计算声功率分布以实现泄漏源成像。该模型通过有限元求解器计算湍流场与声场的动态耦合过程,其仿真结果可揭示不同孔径泄漏源的超声频率特征及空间能量分布规律,为后续阵列信号处理中的主瓣增强、多频分离等关键算法提供理论支撑,进而提升复杂工况下的泄漏定位精度与抗干扰能力。

2 自适应反卷积波束成形算法

2.1 阵列信号模型建立

基于超声信号的远场传播模型^[23],本研究选用阵元间距密集(直径0.04 m)的Underbrink螺旋阵列^[24],其小孔径设计可有效匹配超声短波长特性,避免空间

泄漏超声信号的频率特性与泄漏孔径尺寸、压差导致的流速密切相关^[21]。为定量研究该关系,本研究基于多物理场软件仿真平台(COMSOL Multiphysics)构建压力管道泄漏多物理场耦合模型,采用湍流模型模拟气体动力学过程。以DN150管道为参考设置管径150 mm、管内压力0.8 MPa的工况条件。在管道侧壁开设0.7 mm(上方)与0.5 mm(下方)双泄漏孔,右侧扩展300 mm×300 mm空气域作为声传播空间。物理场边界中,左侧定义为压力入口,右侧为自由出口,泄漏孔处设置瞬态流-固耦合界面以捕捉孔径边缘振动效应,如图1所示。

混叠。平面螺旋形传感器阵列上排布有 M 个传感器,孔径为 D ,以传感器阵列的中心点为原点建立三维笛卡尔坐标系(图2)。假设扫描平面与阵列板的距离为 z ,将扫描区域划分为 $N \times N$ 个网格,扫描平面一共有 $(N+1)^2$ 个网格点。

根据格林函数可以推导出方向向量 $\mathbf{G} \in \mathbf{C}^{M \times N}$,其元素可以表示为

$$g_{mn} = \frac{d_n}{d_{mn}} e^{-i\omega(d_{mn} - d_n)/c} \quad (1)$$

式中: d_{mn} 为第 n 个网格点到第 m 个传感器的距离; d_n 为第 n 个网格点到坐标原点的距离; c 为空气中的声速(340 m/s); $\omega = 2\pi f$,为角频率。

传感器阵列采集信号的前向传播模型为

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\mathbf{s} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{p} \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ 为第 M 个传感器阵列接收到的信号; $\mathbf{s} \in \mathbf{C}^{N \times 1}$ 为第 N 个网格平面上的声源信号。

波束成形最后输出声功率 \mathbf{P}^{CBF} 为

$$\mathbf{P}^{\text{CBF}} = \mathbf{w}^H \mathbf{p} \mathbf{p}^H \mathbf{w} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{w} \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ 为权重向量,在常规波束成形的权重向量为方向向量; \mathbf{H} 为矩阵的共轭转置符号。

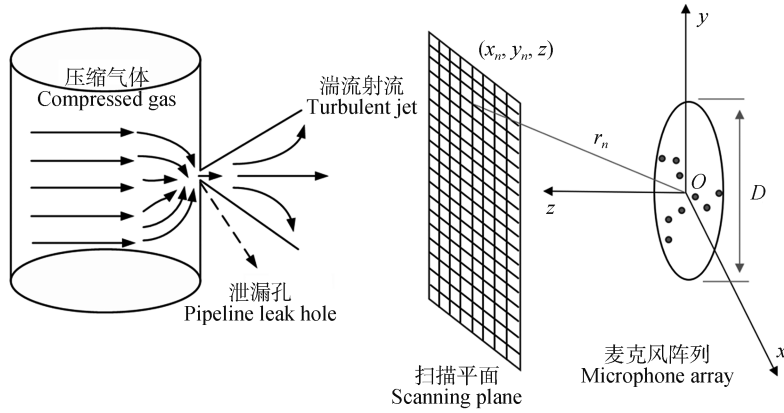


图 2 传感器阵列接收泄漏声波信号图

Fig. 2 Sensor array receives leakage acoustic wave signal image

2.2 反卷积波束成形

常规波束成形的声源云图中主瓣宽度大且分辨率低,为此反卷积方法被提出。反卷积波束成形的本质是在常规波束成形的计算基础上,对主瓣宽度压缩并减少旁瓣数目,从而提高声源定位的精度和分辨率。反卷积波束成形中,DAMAS算法实现简单,其建立声源信号与常规波束成形输出的线性方程为

$$\mathbf{P}^{\text{CBF}} = \mathbf{A}\mathbf{s}_0 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 为点扩散函数PSF矩阵,是常规波束成形对空间中单点单位幅度声源的响应; \mathbf{s} 为网格平面上的声源信号; \mathbf{P}^{CBF} 为波束成形计算得到的输出声功率。

由于矩阵并不满秩,不可以逆运算求解真实声源,故反卷积波束成形使用高斯赛德尔迭代法计算,并引入正约束保证每个结果非负。迭代过程为

$$\mathbf{x}_1^{(k)} = \mathbf{P}_1^{\text{CBF}} - \left[0 + \sum_{n'=n+1}^N \mathbf{A}_{1n'} \mathbf{x}_{n'}^{(k-1)} \right]_0 \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_n^{(k)} = \mathbf{P}_n^{\text{CBF}} - \left[\sum_{n'=1}^{n-1} \mathbf{A}_{nn'} \mathbf{x}_{n'}^{(k)} + \sum_{n'=n+1}^N \mathbf{A}_{nn'} \mathbf{x}_{n'}^{(k-1)} \right]_0 \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_N^{(k)} = \mathbf{P}_N^{\text{CBF}} - \left[\sum_{n'=1}^{N-1} \mathbf{A}_{Nn'} \mathbf{x}_{n'}^{(k)} + 0 \right]_0 \quad (7)$$

式中: $\mathbf{x}^{(k)}$ 为待求解目标声源; k 为迭代的次数。

反卷积波束成形通过多次迭代计算,能够有效地压缩主瓣、减小旁瓣影响,能够高分辨率定位泄漏声源。但是在多泄漏声源的定位场景,反卷积需要基于常规波束成形的计算结果迭代,由于常规波束成形结果旁瓣干扰和反卷积多次迭代累计的误差,反卷积波束成形定位结果会出现虚假声源。

2.3 自适应反卷积算法

为消除反卷积波束成形出现的虚假声源,避免其干扰计算的真实声源的定位结果,可以在常规波束成形计算部分通过使用优化权重来减少旁瓣,从而减少反卷积波束成形迭代次数和累计误差,以消除虚假声

源。自适应方法最小均方误差(least mean square, LMS)的核心思想是根据误差信号的梯度估计来更新权重,步长参数控制收敛速度和稳定性,其计算方法简单,能够快速收敛。LMS方法计算误差函数 $e(\mathbf{k})$ 为

$$e(\mathbf{k}) = \mathbf{d}(\mathbf{k}) - \mathbf{y}(\mathbf{k}) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{d}(\mathbf{k})$ 为期望信号; $\mathbf{y}(\mathbf{k})$ 为阵列加权输出信号。

用高斯迭代法寻找最佳权重向量 $(\mathbf{u}(\mathbf{k} + 1))$,计算公式为

$$\mathbf{u}(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{w}(\mathbf{k}) + \mu \mathbf{x}(\mathbf{k}) e(\mathbf{k}) \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x}(\mathbf{k})$ 为信号基阵; μ 是步长参数。单一使用LMS自适应方法优化权重效果并不理想。泄漏声波的超声信号频率高,不同声源计算得到的幅值相差较大,LMS方法会进一步放大幅值的差距。当幅值差距较大时,反卷积方法迭代时会把幅值过低的主瓣当成旁瓣误判,这导致定位结果低频率声源偶有丢失。

最小方差无失真响应方法(minimum variance distortionless response, MVDR)在目标信号方向保持无失真响应的同时,通过最小化输出功率抑制干扰和噪声。MVDR通过协方差矩阵 \mathbf{R} 的逆运算抑制干扰方向能量,同时约束目标方向增益为1,在满足波束置零条件下,用拉格朗日乘子法求解权重向量,公式为

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}}{\mathbf{G}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}} \quad (10)$$

通过自适应算法的权重向量对信号加权处理后,旁瓣减小,主瓣幅值增加,边界更加清晰。此时主瓣宽度仍然较大,声源定位的精确度模糊。继续使用高斯赛德尔迭代法进一步减小主瓣宽度,同时每次迭代中引入正约束,保证结果非负,迭代后得到计算真实声源 \mathbf{x} 。该方法可以有效减小主瓣宽度,提高空间分辨率。本研究提出一种自适应反卷积方法,结合2种自适应方法优化权重向量,再通过反卷积方法压缩主瓣提高分辨率。计算过程如下。

1)首先基于MVDR准则计算初始权重,约束目标方向增益为1,避免低频泄漏声源受较大旁瓣干扰淹没。

2)计算误差函数,用高斯迭代法寻找最佳权重向量,更新互谱矩阵,返回1)步骤计算,迭代至收敛条件,得到最佳权重矩阵 w_{adapt} 。

3)代入最佳权重矩阵 w_{adapt} 用常规波束成形计算,得到优化的波束成形结果。

4)计算点扩散矩阵,引入正约束保证每个结果非负,使用高斯赛德尔迭代法计算至收敛,得到最后定位结果,即计算所得的真实声源 x 。

3 数值模拟

为模拟实际泄漏场景,根据泄漏声场仿真结果,在扫描平面设置28 kHz与34 kHz频率下双声源。表1为

各声源投影至扫描平面网格位置。通过波束形成算法将探测区域网格化,逐点计算声功率分布以实现泄漏源成像。为验证算法有效性,在远场条件下,本研究构建最大直径为0.04 m的128通道UnderBrink多臂螺旋阵列。相比常规线性阵列,螺旋阵列可通过紧凑布局在有限空间内密集排布更多的阵元,且阵元间距更小,阵元间距能够满足空间采样定理(阵元间距小于半波长)。图3为阵列传感器分布图和声源位置图,螺旋阵列的螺旋角参数为 $5\pi/16$;传感器阵列中一共有8个螺旋臂,每个臂上有16个传感器,共计128个传感器。模拟阵列接收数据时空气中声速为340 m/s,扫描平面到阵列的距离为1 m。扫描平面为垂直于传感器阵列的 $0.16\text{ m}\times 0.16\text{ m}$ 平面,扫描平面划分为 101×101 的网格,每个网格间距为0.016 m。表2为仿真试验其他参数设置。

表 1 声源坐标表

Tab. 1 Coordinates table of each sound Source

声源序号 Source ID	X坐标/m X-coordinate	Y坐标/m Y-coordinate	Z坐标/m Z-coordinate	频率/kHz Acoustic frequency
1	0.25	0.25	1	28
2	-0.25	-0.25	1	34

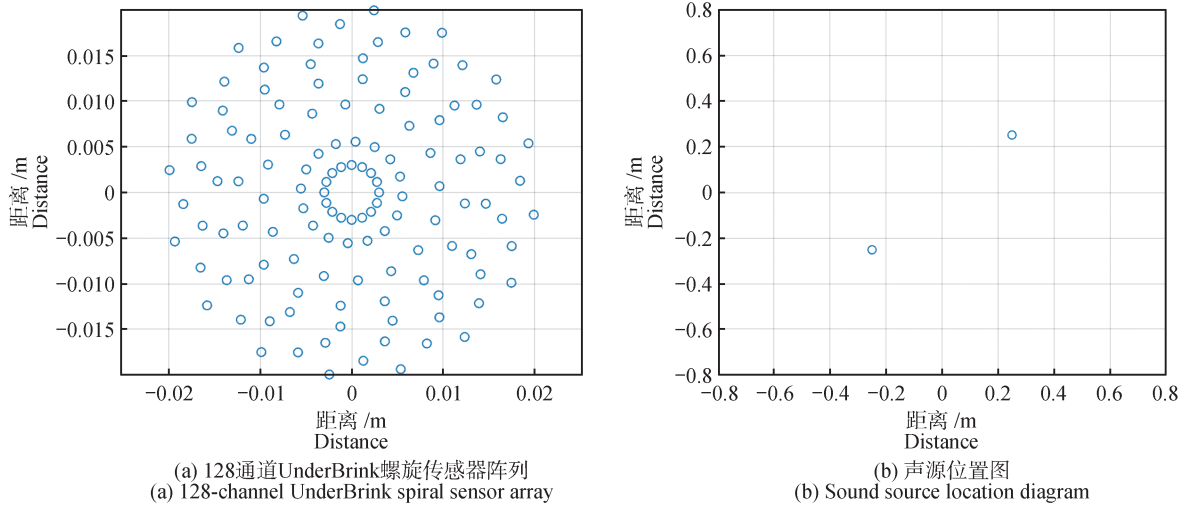


图 3 UnderBrink多螺旋臂阵列和声源位置图

Fig. 3 UnderBrink helical microphone array and sound source location

表 2 仿真参数表

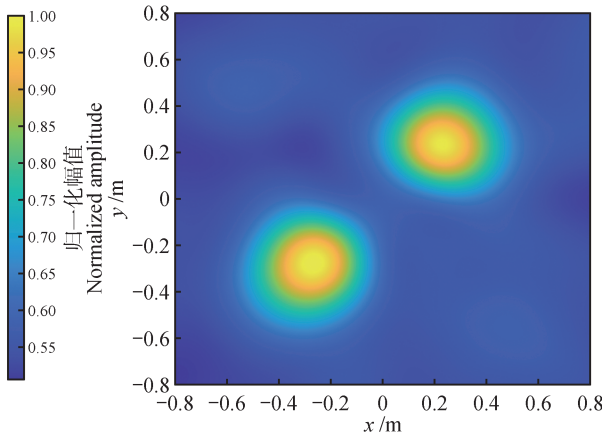
Tab. 2 Simulation parameter table

参数 Parameter	数值及范围 Numerical values and ranges	参数 Parameter	数值及范围 Numerical values and ranges
阵列最大直径/m Maximum array diameter	0.04	采样频率/kHz Sampling rate	300
传感器个数 Number of sensors	128	采样时间/us Sampling time	100
测量距离/m Measurement distance	1	扫描平面尺寸/m Scanning plane dimensions	1.6x1.6
信噪比/dB Signal-to-noise ratio	20	扫描平面网格总数 Total number of scanning plane grids	101x101

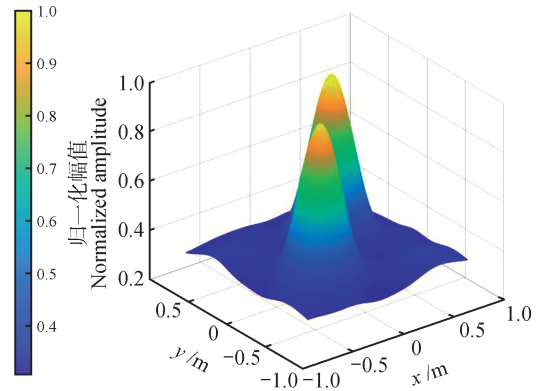
3.1 波束成形定位泄漏源

为验证自适应算法权重下的反卷积波束成形在复杂声源定位中的有效性,对比分析了常规波束成形波束图和自适应迭代计算权重矩阵下的常规波束成形声源云图及波束图。图4为普通波束成形和自适应权重

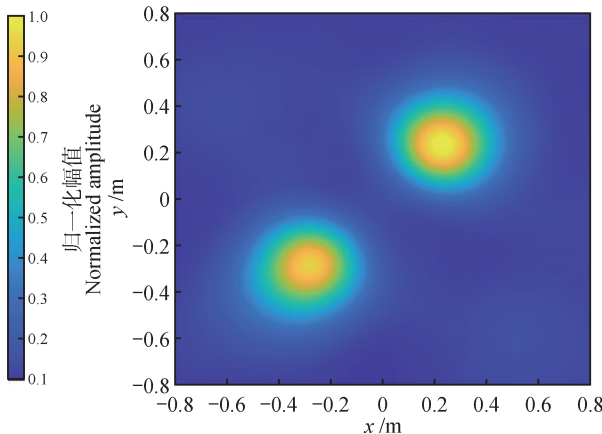
下的声源定位效果。与常规波束成形相比,自适应权重下波束成形结果的动态范围增加108%,主瓣宽度减小9.5%。自适应优化后的权重矩阵对信号的处理有效平衡了多频声源的功率分布,降低了背景噪声和旁瓣干扰,增加了定位声源功率对比度。



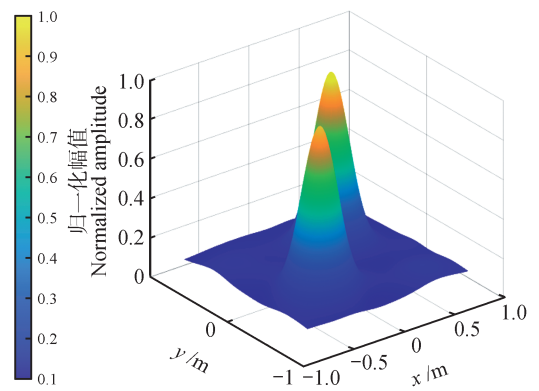
(a) 常规波束成形声源云图
(a) Conventional beamforming sound source cloud diagram



(b) 常规波束成形三维波束图
(b) Conventional beamforming 3D beam image



(c) 本研究权重矩阵 w_{adpt} 下波束成形声源云图
(c) The beamforming sound source cloud diagram under the weight matrix w_{adpt} of this paper image



(d) 本研究权重矩阵 w_{adpt} 下波束成形三维波束图
(d) Beamforming 3D beam image under the weight matrix w_{adpt} of this paper image

右上方声源频率为 28 kHz, 左下方声源频率为 34 kHz

The top right source frequency is 28 kHz, the bottom left source frequency is 34 kHz.

图 4 常规波束成形和自适应迭代计算权重矩阵下的常规波束成形声源云图和波束图

Fig. 4 Sound source cloud diagrams and beam images of conventional beamforming with and without adaptive iterative weight matrix

自适应优化权重下波束成形主瓣仍然较大,需要进一步压缩主瓣宽度以提高分辨率。为验证自适应反卷积方法的有效性,对比反卷积波束成形和自适应反卷积波束成形的波束图与声源云图。图5为反卷积波束成形算法和自适应反卷积波束成形算法计算所得声源云图,仿真试验参数与图4设置一致。可见反卷积波束成形的声源定位云图中有多个伪影情况出现,干扰识别真实声源位置;自适应反卷积波束成形的声源云图中,伪影现象基本消除,主瓣清晰且集中。

从上述仿真试验可看出,自适应算法通过调整权重矩阵,抑制反卷积算法中未优化权重导致的旁瓣能量泄漏,从而消除了反卷积波束成形结果中的伪影。权重矩阵的优化使得主瓣能量更加集中,旁瓣得到了有效抑制,伪影现象因此减少。

3.2 定位结果误差

考虑到实际场景中有可能地噪声影响,对信号添加不同的高斯噪声,并对比不同信噪比下的自适应反卷积波束成形的定位效果。图6、图7和图8分别为信

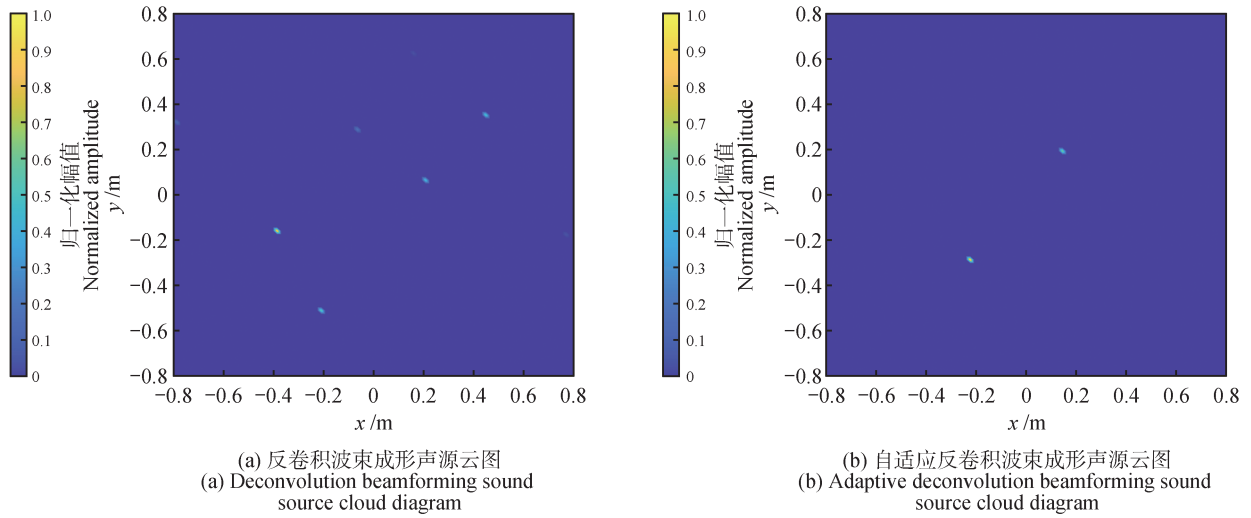


图5 2种定位算法下的声源云图

Fig. 5 Sound source cloud maps under two positioning algorithms

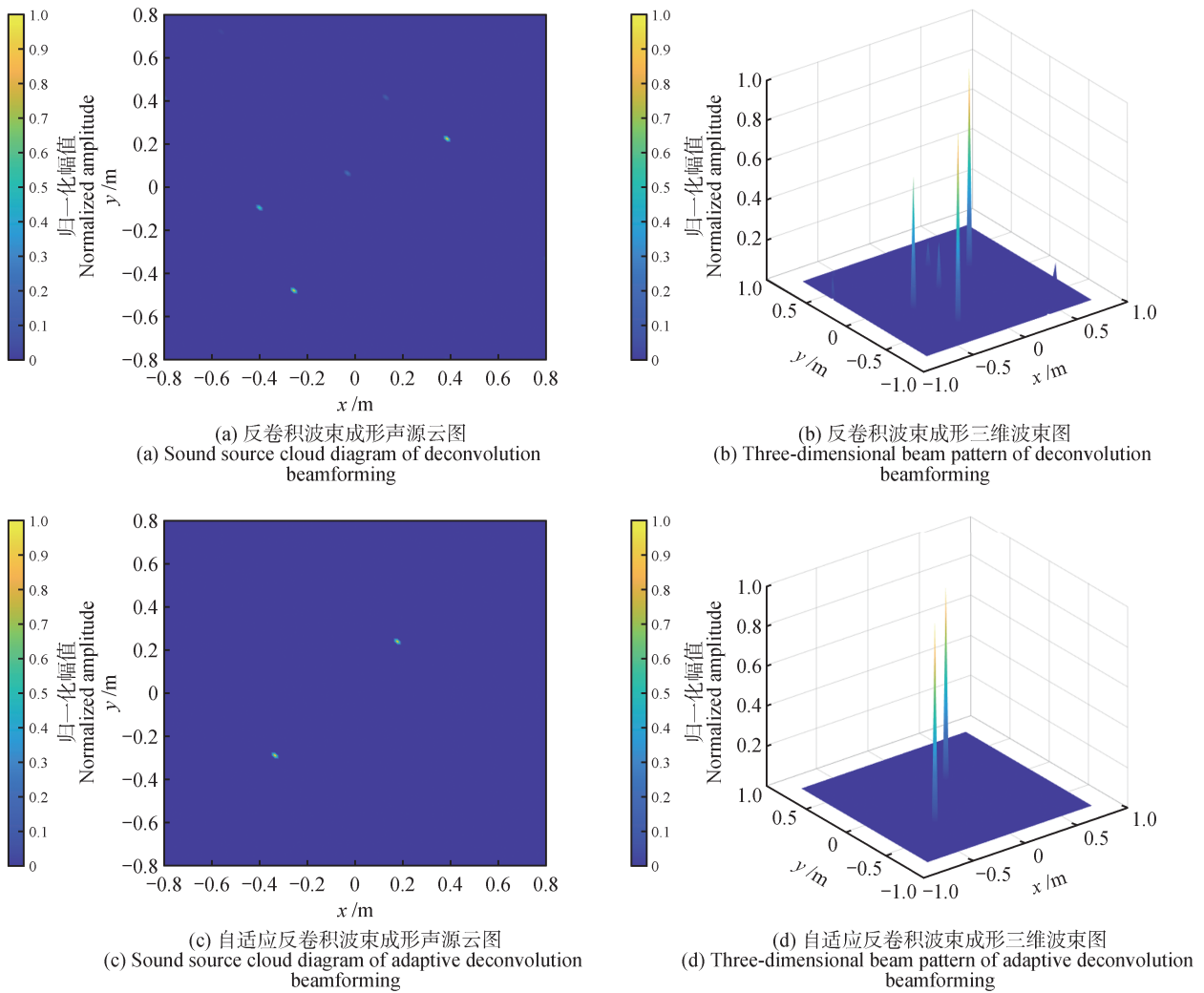


图6 SNR为10 dB反卷积波束成形和自适应反卷积波束成形定位结果

Fig. 6 The positioning results of deconvolution beamforming and adaptive deconvolution beamforming with SNR is 10 dB

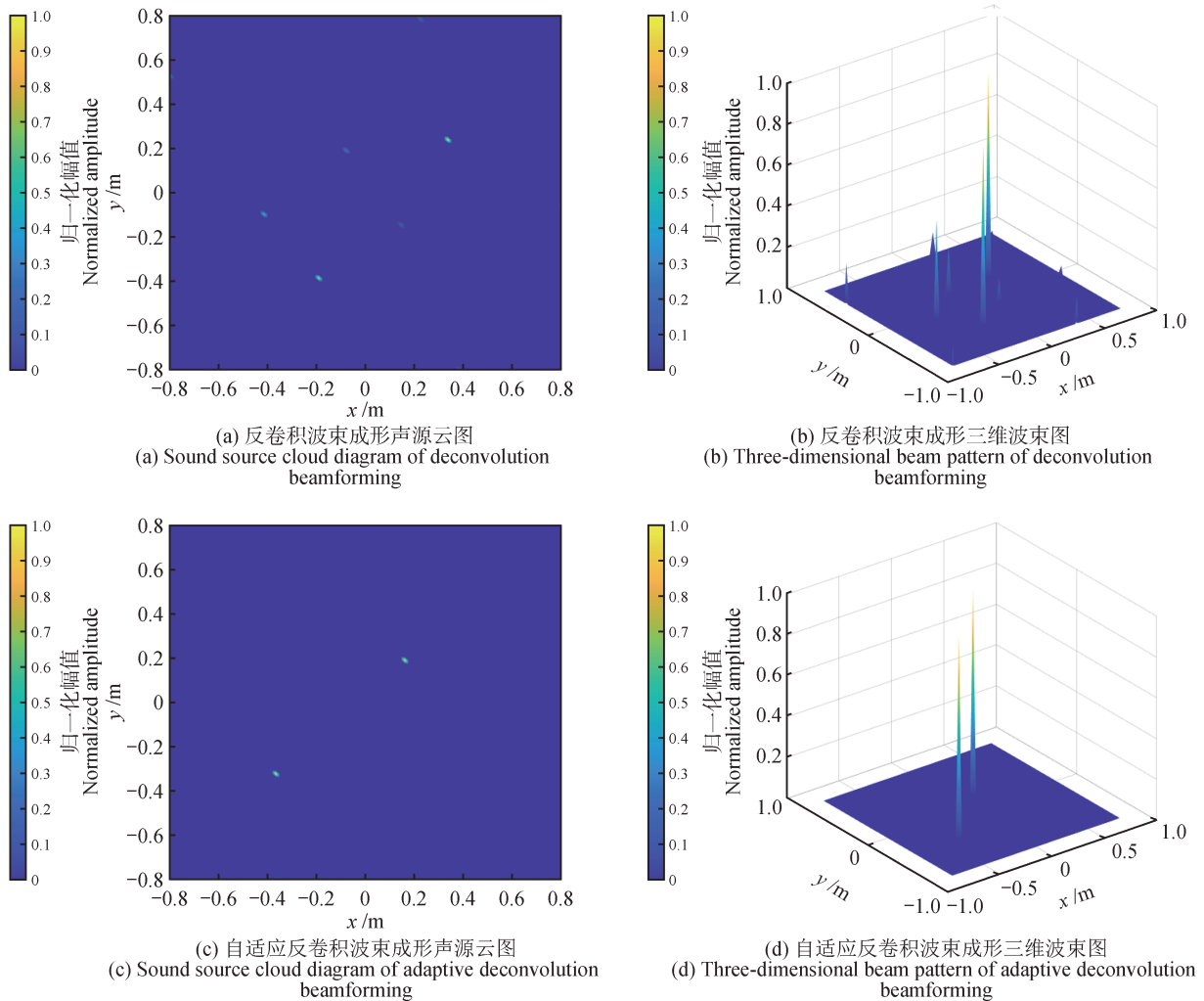


图7 SNR为0 dB 2种算法下定位结果

Fig. 7 The positioning results under two algorithms with SNR is 0 dB

噪比为10、0、-10 dB时,自适应反卷积波束成形和反卷积波束成形的定位结果。随着信噪比的降低,反卷积定位结果中伪影幅值增大且数量增加。但自适应反卷积方法下目标声源的定位结果依旧突出,反卷积定位结果中的伪影基本被消除。图9为10次重复计算的欧几里和距离均方误差(mean absolute error, MAE)分布曲线,自适应反卷积波束成形在-20~20 dB的信噪比范围内的均方误差比反卷积波束成形结果低。在信噪比为-5~5 dB的范围,自适应波束成形的均方误差减小至50%;在信噪比为-20 dB时自适应反卷积波束成形的均方误差增大;在信噪比为5~20 dB时,2种算法误差随信噪比增大下降幅度变缓。上述结果表明自适应反卷积波束成形方法的抗随机噪声的干扰能力更好。从2个声源的MAE结果中可见,频率更高的声源2的MAE相比声源1的MAE结果低,这是因为频率更高的声源波束成形计算的结果主瓣宽度更小,从而计算所得的误差范围更小。

图10为反卷积波束成形和自适应反卷积波束成形在同等收敛条件下迭代次数图和不同信噪比下同等收敛条件的2种算法的迭代次数图。自适应反卷积波束成形比反卷积波束成形达到相同收敛条件的迭代次数更少。反卷积波束成形随着收敛阈值和信噪比的变化,迭代次数波动较大;自适应反卷积波束成形在收敛阈值较小和低信噪比的条件下迭代次数稳定在10附近,只有当信噪比为-20 dB较为极端的情况下迭代次数增长到18,这验证了自适应反卷积波束成形算法更好的收敛性能。

从以上仿真结果可看出,自适应反卷积波束成形通过优化权重矩阵,聚焦主瓣、降低旁瓣幅值从而消除伪影。相比反卷积波束成形,自适应反卷积波束成形能够在多声源定位场景中更清晰地分辨真实声源位置。同时,自适应反卷积波束成形通过优化权重减少迭代次数,计算效率更高。

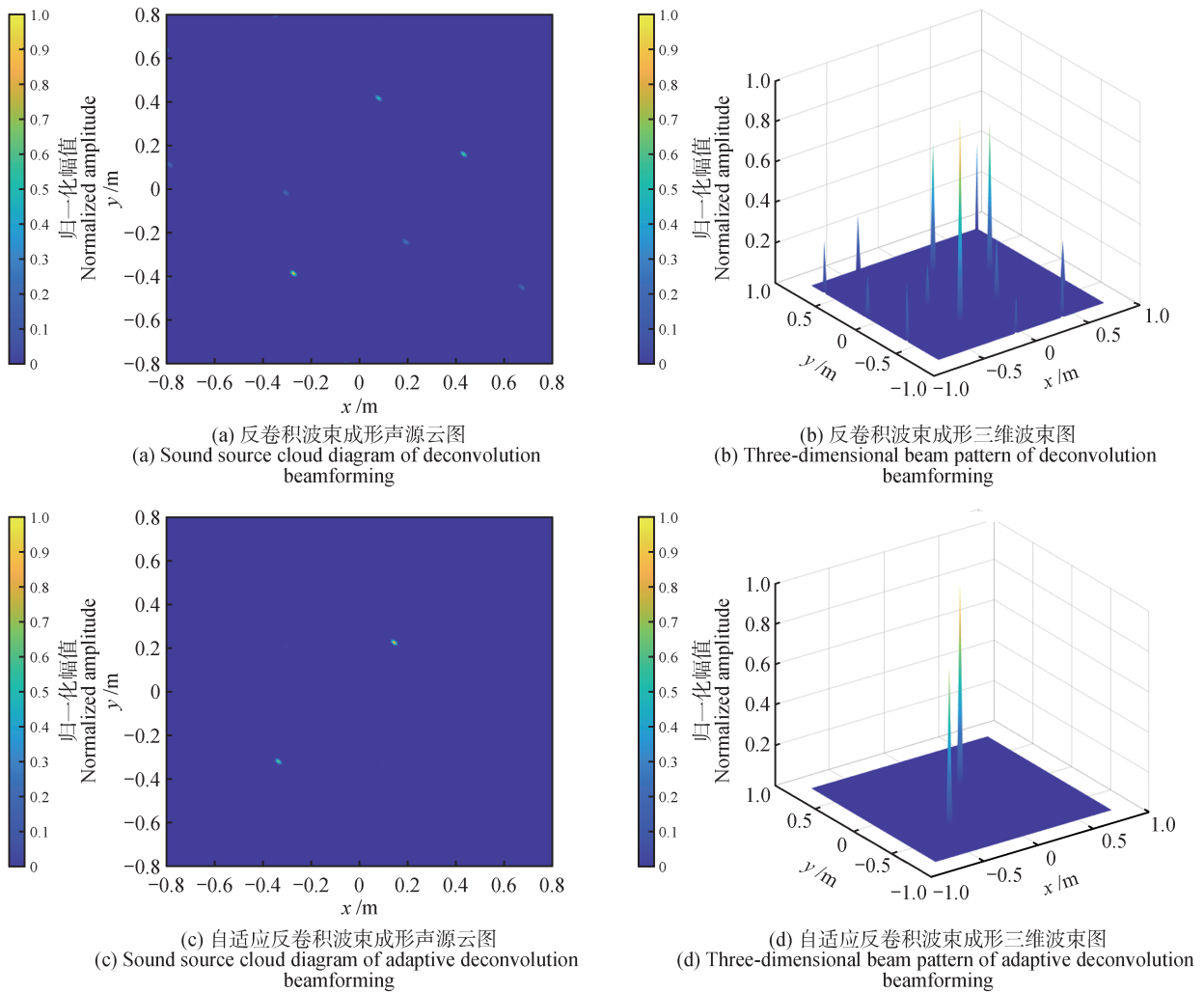


图8 SNR为-10 dB 2种算法下定位结果

Fig. 8 The positioning results under two algorithms with SNR is -10 dB

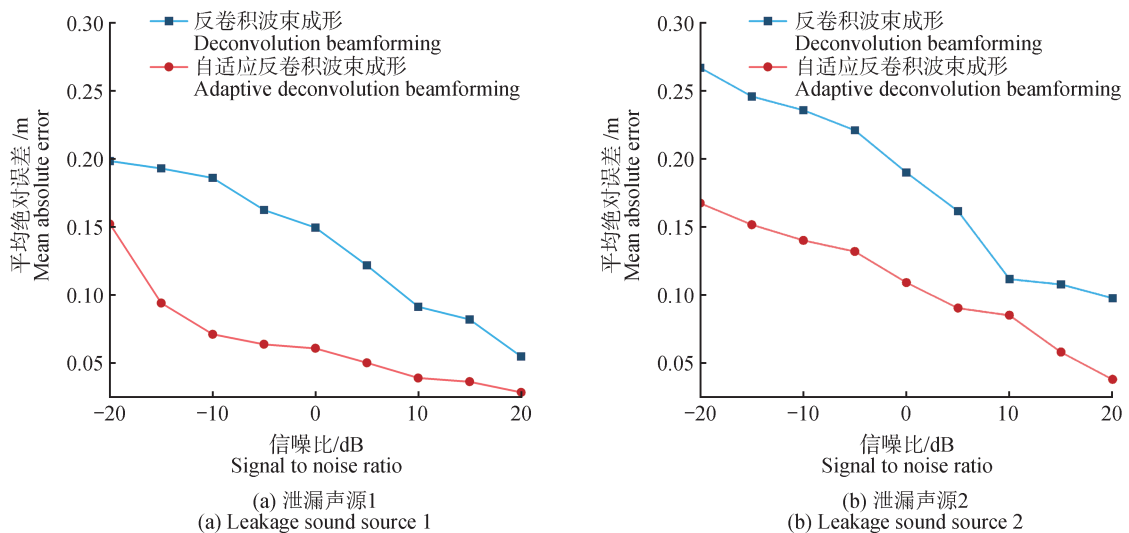


图9 泄漏源定位结果均方误差分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of mean-square error of leakage source positioning results

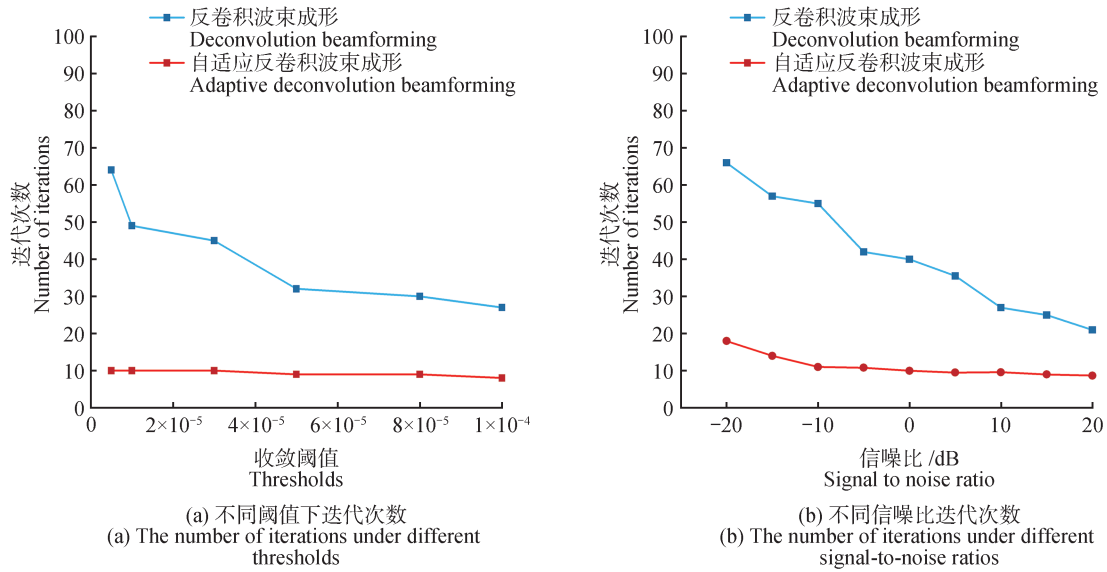


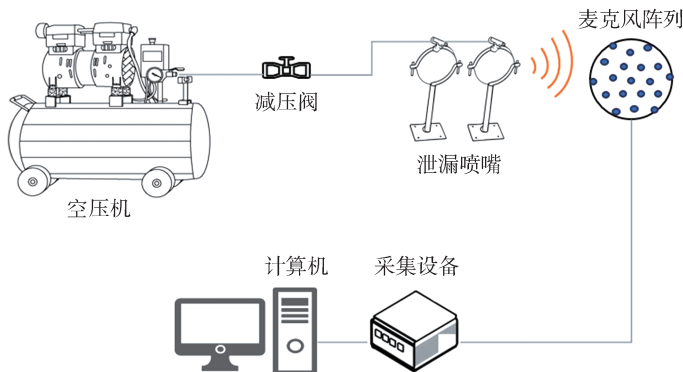
图 10 反卷积波束成形和自适应反卷积波束成形下迭代次数图

Fig. 10 Iteration number diagrams under deconvolution beamforming and adaptive deconvolution beamforming

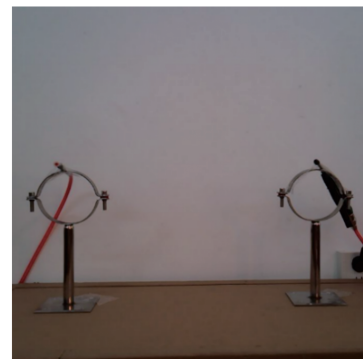
4 试验验证

试验采用由 128 个 MEMS 麦克风组成的螺旋传感器阵列,内置 FPGA 芯片可直接成像。采集到的数据通过 USB 接口上传给上位机,上位机基于 MATLAB 软件进一步优化计算波束输出及归一化处理形成声

像。图 11 为试验系统设置示意图和试验场景图。试验系统中空压机提供稳定的管道压力,连接减压阀保证管内压力为 0.8 MPa,再连接 2 个孔径为 0.5 mm 和 0.7 mm 的泄漏喷嘴,放置于阵列前方 1 m 处且分别位于 (0.5, 0)m、(-0.5, 0)m 处。



(a) 试验系统连接示意图
(a) Schematic diagram of the experimental system connection



(b) 试验场景图
(b) Experimental setup photograph

图 11 试验设置图

Fig. 11 Experimental setup image

设置采样率为 100 kHz,成像网格平面大小 1.6 m×1.6 m,扫描间隔为 0.016 m×0.016 m 大小的网格。在试验进行时,保证空压机停止工作,减小噪声影响。气体类型为空气,温度为 20 °C。考虑到超声波衰减情况,设置 4 dB 的补偿。图 12 为 3 种算法下的试验结果图,反卷积波束成形算法通过多次迭代,主瓣宽

度缩小,但经过多次计算 PSF 后,有虚假声源集中在真实声源周围分布。在自适应反卷积波束成形的定位结果中,通过优化权重降低旁瓣干扰,虚假声源消失。试验环境中噪声影响,多次 PSF 计算的误差导致定位结果略有波动,表 3 为 2 种算法下 10 次定位结果的平均绝对误差。

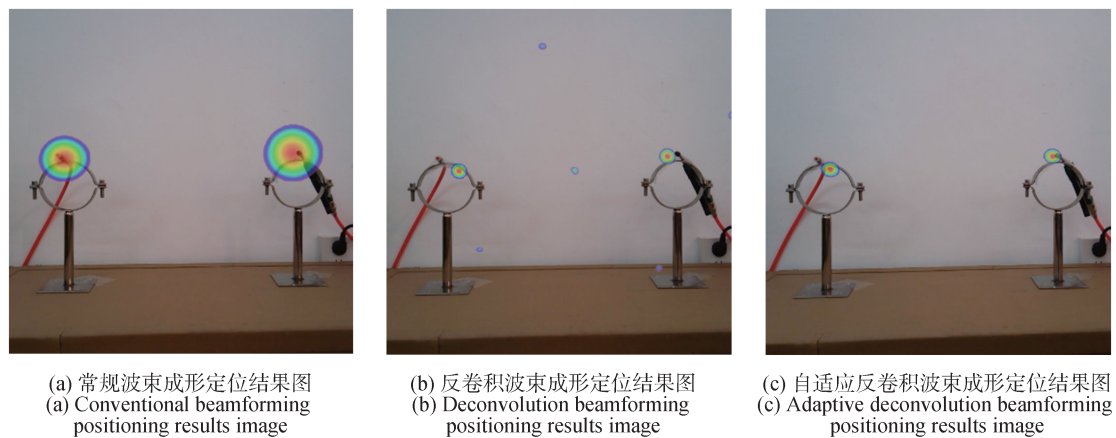


图12 试验结果图

Fig. 12 Experimental result diagrams

表3 常规波束成形、自适应反卷积波束成形算法的声源定位误差表

Tab. 3 Sound source positioning errors of conventional beamforming and adaptive deconvolution beamforming algorithms

波束成形方法 Beamforming	声源1的MAE /m Sound source 1 MAE	声源2的MAE /m Sound source 2 MAE
反卷积波束成形 Deconvolution beamforming	0.132 0	0.112 0
自适应下反卷积波束成形 Adaptive deconvolution beamforming	0.070 3	0.058 7

对比2种波束成形算法的定位性能,自适应反卷积波束成形展现出显著优势。反卷积波束成形结果显示,反卷积波束成形存在明显的虚假声源伪影,而自适应反卷积波束成形方法有效抑制了此类干扰,仅保留真实声源的清晰峰值。表3进一步表明,自适应算法将声源1和声源2的平均绝对误差(MAE)分别从0.132 m和0.112 m降低至0.070 3 m和0.058 7 m,定位精度提升约47%。这一改进得益于自适应权重优化与反卷积迭代策略的协同作用。试验结果与仿真结果基本一致,验证了自适应反卷积波束成形方法在高精度泄漏检测应用中的潜力。

5 结论

现有基于超声声源的定位方法在多泄漏场景中,仍有高旁瓣导致伪影现象和主瓣宽导致定位精度不足等问题。本研究提出了一种自适应反卷积波束成形算法,通过自适应算法调整权重矩阵减少旁瓣干扰,结合反卷积波束成形压缩主瓣宽度,实现了无虚假声源的高分辨率泄漏声源定位。并通过数值仿真和试验验证自适应反卷积算法有效性。得到以下结论:1)自适应权重下波束成形减小旁瓣,自适应反卷积波束成

形主瓣聚焦能力显著增强,仿真和实验验证了自适应反卷积波束成形消除虚假声源;2)在低信噪比(-20 ~ 20 dB)条件下,自适应反卷积算法能够得到高分辨率的定位结果,在信噪比大于5 dB时2个声源的MAE均小于0.10 m,随着信噪比增大,误差减小;3)声源2相比声源1的MAE更低,其原因是声源2的泄漏声波频率更高,计算过程中幅值更高主瓣宽度更小;4)自适应反卷积在同等信噪比下收敛速度更快,在同等收敛条件下,计算效率更高。综上,本研究提出的自适应反卷积波束成形算法解决了反卷积方法存在的虚假声源问题,并在多声源场景中提升了声源定位精度。未来可进一步优化计算效率以满足实时检测需求。

参 考 文 献

- [1] WANG Z, KONG Y H, LI W. Review on the development of China's natural gas industry in the background of "carbon neutrality" [J]. Natural Gas Industry B, 2022, 9(2): 132-140.
- [2] 尹渊博,李玉星,杨文,等. 成品油管道泄漏次声波监测及信号处理方法[J]. 油气储运, 2024, 43(8): 905-915.
YIN Y B, LI Y X, YANG W, et al. Study on infrasonic leak-

- age monitoring and signal processing for product oil pipeline [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(8):905-915.
- [3] 赵会军, 武伟强, 王克华, 等. 基于次声波法的油气管道泄漏检测与定位 [J]. *油气储运*, 2012, 31(3):215-218, 247.
ZHAO H J, WU W Q, WANG K H, et al. Infrasonic wave-based leakage detection and location technology for oil & gas pipelines [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2012, 31(3):215-218, 247.
- [4] 王洪超, 马云宾, 李淑娟, 等. 基于光纤声波传感器的管道泄漏监测技术研究 [J]. *山东工业技术*, 2024(5):40-45.
WANG H C, MA Y B, LI S J, et al. Research on pipeline leakage monitoring technology based on fiber optic acoustic sensor [J]. *Journal of Shandong Industrial Technology*, 2024(5):40-45.
- [5] 文玉梅, 张雪园, 文静, 等. 依据声信号频率分布和复杂度的供水管道泄漏辨识 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(6):1223-1229.
WEN Y M, ZHANG X Y, WEN J, et al. Identification of water pipeline leakage based on acoustic signal frequency distribution and complexity [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(6):1223-1229.
- [6] 袁文强, 郎究明, 曹江涛, 等. 基于声波法的管道泄漏检测技术研究进展 [J]. *油气储运*, 2023, 42(2):141-151.
YUAN W Q, LANG X M, CAO J T, et al. Research progress of pipeline leakage detection technology based on acoustic wave method [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(2):141-151.
- [7] 曹智敏, 胡斌, 李志农, 等. 输气管道泄漏声波识别和定位方法研究现状 [J]. *无损检测*, 2023, 45(3):49-57.
CAO Z M, HU B, LI Z N, et al. Research status of acoustic wave identification and location methods for gas pipeline leakage [J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2023, 45(3):49-57.
- [8] 郭欣, 闫荣鑫. 超声检漏方法及应用研究 [J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(6):739-741, 673.
GUO X, YAN R X. Ultrasonic leak testing method and its application [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(6):739-741, 673.
- [9] 赵卫东, 徐鑫蔚, 宋睿, 等. 汽车异响噪声源定位方法研究进展与展望 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(10):73-83.
ZHAO W D, XU X W, SONG R, et al. Research progress and prospects of the methods for locating the abnormal noise sources of automobile [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2022, 36(10):73-83.
- [10] 赵佳锡, 章荣平, 张俊龙, 等. 气动噪声源频域自适应区域积分算法及风洞试验应用 [J]. *振动与冲击*, 2023, 42(19):162-171.
ZHAO J X, ZHANG R P, ZHANG J L, et al. Frequency domain adaptive region integration algorithm for aerodynamic noise sources and its application in wind tunnel tests [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(19):162-171.
- [11] 贾笑云, 王秀清, 胡焯. 基于MVDR近场聚焦波束形成的管道缺陷声源定位 [J]. *天津科技大学学报*, 2021, 36(6):37-43.
JIA X Y, WANG X Q, HU Y. Sound source localization of pipeline defects based on MVDR near-field focused beamforming [J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2021, 36(6):37-43.
- [12] 郑晓亮, 廖冉, 王强. 埋地输气管道泄漏振动声源双阵列定位方法 [J]. *油气储运*, 2023, 42(6):641-652.
ZHENG X L, LIAO R, WANG Q. Dual-array localization of vibroacoustic source for leaks in buried gas pipelines [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(6):641-652.
- [13] 赵慎, 李伟, 覃业梅, 等. 惩罚函数波束形成声源识别算法及应用研究 [J]. *振动与冲击*, 2025, 44(1):315-324.
ZHAO S, LI W, QIN Y M, et al. Penalty function beamforming sound source identification algorithm and its application [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2025, 44(1):315-324.
- [14] ZHANG Y, WANG J Q, BIAN X, et al. A continuous gas leakage localization method based on an improved beamforming algorithm [J]. *Measurement*, 2017, 106:143-151.
- [15] KASSAB S, MICHEL F, MAXIT L. Water experiment for assessing vibroacoustic beamforming gain for acoustic leak detection in a sodium-heated steam generator [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 134:106332.
- [16] SUZUKI T. L_1 generalized inverse beamforming algorithm resolving coherent/incoherent, distributed and multipole sources [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(24):5835-5851.
- [17] DOUGHERTY R P. Functional beamforming [C]// *Proceedings on CD of the 5th Berlin Beamforming Conference*. Berlin, February 19-20, 2014.

- [18] BROOKS T F, HUMPHREYS W M. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 294(4/5): 856–879.
- [19] 赵慎, 李伟, 覃业梅, 等. 传声器阵列函数反卷积声源成像算法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(10): 112–119.
ZHAO S, LI W, QIN Y M, et al. Functional deconvolutional approach for the mapping of acoustic sources algorithm of microphone array [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(10): 112–119.
- [20] 庞炜涵, 张卫民, 陈国龙, 等. 压力容器微泄漏点的非接触超声定位检测研究 [J]. *仪表技术与传感器*, 2016(2): 63–65.
PANG W H, ZHANG W M, CHEN G L, et al. Tiny leak localization in pressure vessel by non-contacting ultrasonic method [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2016(2): 63–65.
- [21] 唐昉, 谢江辉. 一种舰船气体泄漏的声发射检测方法 [J]. *船舶工程*, 2017, 39(S1): 191–194.
TANG F, XIE J H. Acoustic emission detection method for warship gas leakage [J]. *Ship Engineering*, 2017, 39(S1): 191–194.
- [22] WANG D Y, ZHAO F Y, WANG T. The ultrasonic characteristics study of weak gas leakage [C]//2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM). August 5–7, 2015, Harbin, China. IEEE, 2015: 681–685.
- [23] 刘轩宇, 李鹏, 张立豪, 等. 联合 TCT 和 W-SpSF 的气体泄漏定位 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(5): 215–222.
LIU X Y, LI P, ZHANG L H, et al. Gas leak location using TCT and W-SpSF [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(5): 215–222.
- [24] Circularly symmetric, zero redundancy, planar array having broad frequency range applications: US6205224 [P]. 2001–03–20.