

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210679

埋地管道泄漏三维坐标-波速联合估计方法^{*}

王强¹, 薛生¹, 郑晓亮², 郑春山¹

(1. 安徽理工大学安全科学与工程学院 淮南 232001; 2. 安徽理工大学电气与信息工程学院 淮南 232001)

摘要:为实现埋地输气管道泄漏精确定位,使用加速度传感器在土表检测泄漏振动声波,并提出基于非均匀 L 形阵列的泄漏源三维坐标和波速联合估计方法。大孔径非均匀 L 形阵列内嵌小孔径 L 子阵,由小孔径子阵结合 Root-MUSIC 算法求解远场信源 DOA 与波速的约束关系,再利用大孔径 L 阵进行波速和近场信源距离的二维空间谱估计,最后根据估计结果计算三维坐标从而降低计算量。定位实验结果验证了 L 形阵列性能的优越性,基于 L 形阵列的联合估计法能够估计不同土壤条件下的泄漏振动声波传播速度,并得出泄漏源的三维坐标。相较于使用理论波速的定位方法,联合估计法定位误差降低了 90.9%,避免了理论波速误差对定位的不利影响。联合估计法的计算耗时比直接三维空间谱估计降低了 88%,且定位精度保持不变。根据远/近场判据计算出信源范围 $r_{\min} \sim r_{\max}$,实验验证该范围内可实现精确定位。

关键词: 管道泄漏;波速估计;三维定位;非均匀 L 阵;空间谱估计

中图分类号: TN911.7 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

A joint 3D coordinate and wave-speed estimation method for the buried pipe leak localization

Wang Qiang¹, Xue Sheng¹, Zheng Xiaoliang², Zheng Chunshan¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To accurately locate the leak in the buried gas pipes, accelerometers are mounted on the ground to detect the leak-induced vibroacoustic waves. A new method using nonuniform L-shape array is proposed to jointly estimate the 3D coordinate and wave-speed. A small-aperture L-shape subarray is embedded into the large-aperture L-shape array and is combined with the Root-MUSIC algorithm to find the relationship between DOA of far-field source and wave-speed. Then, the large-aperture L-shape array is used to perform 2D spatial spectrum estimation for wave-speed and near-field source distance. Finally, the 3D coordinate is calculated using the estimation results and the computational complexity is reduced. The results of localization experiments show a superiority performance of the used L-shaped array. The joint estimation method based on the L-shaped array can estimate the propagation speeds of leak-induced vibroacoustic waves in multiple soil conditions and the 3D coordinate of leak source is derived. Compared with the localization method using theoretical wave-speeds, the error in joint estimation method is reduced by 90.9%, which avoids the influence of error in theoretical wave-speed on localization. Compared with the direct 3D spatial spectrum estimation, the calculation time of the joint estimation method is reduced by 88% and the localization accuracy remains well. The range of signal source, $r_{\min} \sim r_{\max}$, is calculated by using the far-and near-filed criteria. Experiments evaluate that accurate localization can be achieved within this range.

Keywords: pipe leak; wave-speed estimation; 3D localization; nonuniform L-shape array; spatial spectrum estimation

0 引言

泄漏检测对于及早发现管道运行安全隐患具有重要意义。管道泄漏声波检测方法以泄漏噪声为检测对象,通过估计声源位置实现泄漏定位^[1-3]。目前,声波法研究集中在检测和分析沿管壁或管内流体传播的声波,沿管线固定安装的传感器可实现大范围检测定位^[4-6]。将光纤声学传感器或地震检波器布置在泄漏孔附近的土壤空间或地表,也可检测沿土壤介质传播的泄漏振动声波^[7]。因此,研究基于土介质波的泄漏振动声源定位方法,对于精确定位泄漏源和完善声波法体系具有实际意义。

近年来,泄漏声源特性研究为声波定位方法提供了理论依据。Ebrahimi-Moghadam 等^[8]推导了土壤粘性阻力和惯性阻力作用下的流体控制方程,数值分析结果表明土壤多孔介质阻隔导致泄漏气体衰减为亚音速流。在此基础上,张重^[9]使用声类比方法实现了埋地输气管道泄漏声场的数值分析。泄漏声源由气体可压缩性和不稳定流动所造成的湍流脉动诱导产生,对于亚音速流,气体与固壁(泄漏孔壁和周围土壤介质)耦合作用产生的偶极子声源占据主导^[1]。显然,偶极子声源与泄漏源高度重合,检测声源位置可实现泄漏定位。土介质波传播特性的理论分析和实验结果表明,衰减较慢的 P1 波和 S 波是土介质波的主要成分^[10-13]。P1 波和 S 波主要传播载体均为土壤固体框架,可采用地震检波器或加速度传感器耦合至土壤表面进行检测。P1 波的传播速度明显快于 S 波,二者波速相差可达一个数量级,且土壤参数对波速的影响较大。因此,明确泄漏振动声波沿土壤介质的传播速度,是实现泄漏定位的前提。

在阵列信号处理领域,高分辨率空间谱估计算法,如多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)^[14-15]、旋转不变技术信号参数估计(estimation of signal parameters via the rotational invariance technique, ESPR-IT)^[16-17]、加权子空间拟合(weighted subspace fitting, WSF)^[18]以及最大似然(maximum likelihood, ML)估计^[19],已应用于波达方向(direction of arrival, DOA)估计和信源定位。其中, MUSIC 算法估计性能较好,计算量适中,能够适用于多种阵列拓扑结构,得到了广泛研究和应用^[20-21]。在经典 MUSIC 算法的基础上,求根 MUSIC (Root-MUSIC)、基于特征空间(eigen space, ES)的空间谱估计等改进算法进一步提升了估计性能并降低了计算量^[22-23]。阵列技术在压力容器泄漏检测领域也得到了应用。将加速度传感器阵列布置在蒸汽发生器管道外壁,可实现泄漏振动声波信号的信噪比增益^[24]。使用传感器阵列检测结构体导波,可实现对压力容器表面气体泄漏声源的二维坐标定位^[25-26]。在埋地管道泄漏定位场景中,地表环境变迁增

加了泄漏位置的随机性,因此必须进行三维定位才能获得泄漏源的坐标。虽然 MUSIC、ML 等算法可以推广至三维模型,但算法的计算量过大,基于传感器阵列的三维定位计算量问题仍待解决。

针对埋地输气管道泄漏定位所存在的波速问题和三维定位计算量问题,提出泄漏振动声源三维坐标和波速的联合估计方法。设计了一种非均匀 L 形阵列,利用内嵌的小孔经均匀 L 形子阵获取 DOA 与波速的关系式,将三维坐标的空间谱估计过程转换为对波速和信源距离的二维估计,降低算法计算量的同时避免理论波速误差对定位的影响。在不同土壤条件下对定位方法进行了验证,并分析了算法的性能、计算量和定位范围。

1 方法概述

由土介质波的传播特性可知,使用加速度传感器检测衰减最小的 P1 波,有利于在实际应用中增大检测距离。进行空间谱搜索时,当扫描波速快于实际波速,调整扫描方向后对应的延时向量变化幅度有限,无法形成有效的空间谱搜索结果。P1 波的传播速度快于 S 波^[13],因此,使用 P1 波速度进行空间谱估计时,可忽略 S 波的影响。

相较于 MUSIC、WSF、ML 估计等搜索类空间谱估计算法,Root-MUSIC 算法通过多项式求解避免了谱峰搜索,同时其估计精度又高于 ESPRIT 算法。因此,可使用 Root-MUSIC 算法算出泄漏信号 DOA 与 P1 波传播速度 c 的关系式,再以波速 c 代替 DOA 进行空间谱搜索从而降低搜索维度,并实现波速估计。对于阵列拓扑结构的选取,均匀 L 形阵列由两个垂直的均匀线性阵列构成,可利用这种构型实现二维 Root-MUSIC 算法。相较于其它阵列, L 阵能够利用有限的阵元数获得更大的阵列孔径,阵列性能更强,且有利于拾取近场信号的距离信息从而实现三维定位。

基于此,提出利用非均匀 L 形阵列的泄漏源三维坐标-波速联合估计方法,原理如图 1 所示。大孔径非均匀 L 阵中嵌入一个小孔径均匀 L 子阵,子阵接收信号符合远场判据,将波速视为未知量,使用 Root-MUSIC 算法直接求解子阵信号 DOA 并得出以波速 c 为变量的 DOA 表达式— $\theta(c)$, $\varphi(c)$ 。大孔径 L 阵接收信号符合近场判据,可同时搜索包含二维 DOA 和信源距离 r 的三维空间谱,考虑波速约束关系的存在,可将三维搜索转化为对波速 c 和距离 r 的二维搜索。最后,将波速估计结果代入 DOA 表达式即可计算出三维坐标。该方法不涉及三维空间谱搜索,计算量较低,且实现了坐标与波速的联合估计。

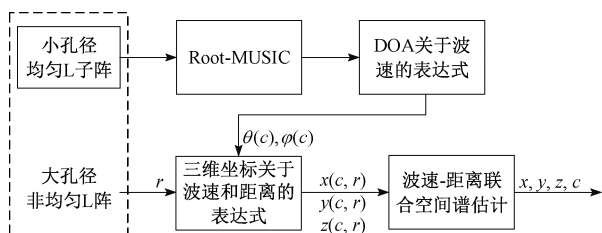


图1 联合估计法原理

Fig.1 Schematic of the joint estimation method

需要说明的是,本文研究基于实验室环境,通过理论公式推导(第2节)与实验测试(第3节)验证方法的有效性。但实际工程应用环境复杂多变,实验研究仍存在局限性,如管道运行工况、敷设条件以及泄漏工况均会对检测结果产生影响。本文仅针对单孔泄漏工况进行初步探讨,验证了新方法在3种土壤条件下的定位可行性,以为不易被地面人员察觉的微小泄漏检测定位提供新思路、新技术。

2 泄漏定位原理

2.1 DOA 与波速约束关系

首先进行小孔径L子阵信号建模,根据远场判据 $r > 2D^2/\lambda$ (r 为信源距离, D 为阵列孔径, λ 为波长)可知,使用小孔径阵列检测波长较长的P1波时其传播模型更倾向于远场模型。远场信号模型如图2所示,分别沿 x 轴和 y 轴方向按间距 d 布置 J 和 K 枚传感器,构成小孔径均匀L形阵列。P1波从泄漏源开始沿土壤介质按远

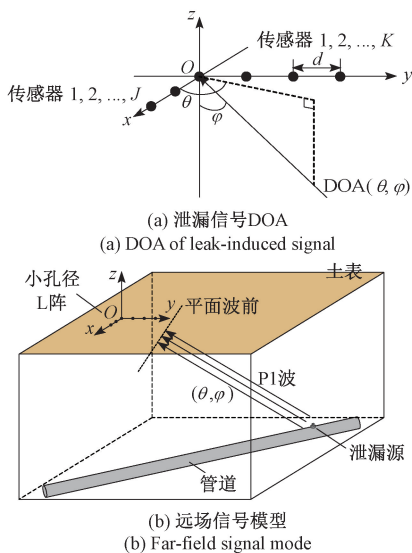


图2 小孔径L阵远场信号模型

Fig.2 Far-field signal mode of small-aperture L-shape array

场平面波模型传播至土表阵列,方位角 θ 为信号DOA在 xOy 面的投影与 x 轴正方向的夹角,俯仰角 φ 为DOA与 z 轴负方向的夹角(信号从地下向地表传播)。

只考虑单个泄漏源工况,即信源个数为1, x 轴传感器接收信号为:

$$\mathbf{X}_x(t) = \mathbf{A}_x \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}_x(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S}(t)$ 为原点处参考传感器的接收信号向量, $\mathbf{N}_x(t)$ 为噪声矩阵, x 轴阵列流形向量 $\mathbf{A}_x$ 的表达式为:

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j2\pi f d \cos\theta \sin\varphi / c) \\ \vdots \\ \exp[-j2\pi f (J-1) d \cos\theta \sin\varphi / c] \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据式(1)接收信号模型,得到 x 轴传感器接收信号的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{E}[\mathbf{X}_x(t), \mathbf{X}_x^H(t)] \quad (3)$$

对其进行特征分解可得:

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{E}_{x,S} \mathbf{\Sigma}_{x,S} \mathbf{E}_{x,S}^H + \mathbf{E}_{x,N} \mathbf{\Sigma}_{x,N} \mathbf{E}_{x,N}^H \quad (4)$$

式中: $\mathbf{E}_{x,S}$ 和 $\mathbf{E}_{x,N}$ 分别为信号和噪声子空间所对应的特征向量。经典的MUSIC算法根据噪声子空间特征向量 $\mathbf{E}_{x,N}$ 与阵列流形向量 $\mathbf{A}_x$ 的正交关系,得到MUSIC空间谱函数为(以 x 轴传感器为例):

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\mathbf{A}_x^H \mathbf{E}_{x,N} \mathbf{E}_{x,N}^H \mathbf{A}_x} \quad (5)$$

Root-MUSIC算法是MUSIC空间谱的求根形式,通过直接求解式(5)分母零点,以避免对空间谱的全局搜索。考虑到 $\mathbf{A}_x$ 为范德蒙形式,定义矢量 $\mathbf{p}(z) = [1, z, \dots, z^{J-1}]^T$, 其中 $z = \exp(-j2\pi f d \cos\theta \sin\varphi / c)$, 于是将空间谱搜索转化为求 $\mathbf{p}^H(z) \mathbf{E}_{x,N} \mathbf{E}_{x,N}^H \mathbf{p}(z)$ 的零点。

根据Root-MUSIC算法原理^[22],求解 z 在单位圆上的根,可使用 $\mathbf{p}^T(z^{-1}) = [1, z^{-1}, \dots, z^{-(J-1)}]^T$ 代替 $\mathbf{p}^H(z)$, 得到 x 轴传感器信号的空间谱分母零点求解多项式为:

$$f_x(z) = z^{J-1} \mathbf{p}^T(z^{-1}) \mathbf{E}_{x,N} \mathbf{E}_{x,N}^H \mathbf{p}(z) \quad (6)$$

式中:等号右边左乘了 z^{J-1} 项,则 $f_x(z)$ 构成 z 的 $2(J-1)$ 次多项式,该多项式有 $(J-1)$ 对关于单位圆镜像对称的根。针对单孔泄漏工况,求解式(6)最靠近单位圆的根 z_x , 得到 $\mu = \cos\theta \sin\varphi$ 解的表达式为:

$$\mu(c) = \text{angle}(z_x) c / (2\pi f d) \quad (7)$$

式中: $\text{angle}(\cdot)$ 表示求复数相角。仅通过式(7)无法解出 θ, φ 两个变量,接下来对 y 轴传感器信号进行相应处理,联立方程组求解两个变量。

同理,可得 y 轴传感器接收信号为:

$$\mathbf{X}_y(t) = \mathbf{A}_y \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}_y(t) \quad (8)$$

对应的 y 轴阵列流形向量 $\mathbf{A}_y$ 的表达式为:

$$\mathbf{A}_y = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j2\pi f d \sin\theta \sin\varphi/c) \\ \vdots \\ \exp[-j2\pi f (K-1) d \sin\theta \sin\varphi/c] \end{bmatrix} \quad (9)$$

y 轴传感器接收信号的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_y = \mathbf{E}[\mathbf{X}_y(t), \mathbf{X}_y^H(t)] \quad (10)$$

对其进行特征分解可得:

$$\mathbf{R}_y = \mathbf{E}_{y,S} \mathbf{\Sigma}_{y,S} \mathbf{E}_{y,S}^H + \mathbf{E}_{y,N} \mathbf{\Sigma}_{y,N} \mathbf{E}_{y,N}^H \quad (11)$$

式中: $\mathbf{E}_{y,S}$ 和 $\mathbf{E}_{y,N}$ 分别为信号和噪声子空间所对应的特征向量。此时重新定义矢量 $\mathbf{p}(z) = [1, z, \dots, z^{K-1}]^T$, 其中 $z = \exp(-j2\pi f d \sin\theta \sin\varphi/c)$, 对应的 y 轴求解多项式为:

$$\mathbf{f}_y(z) = z^{K-1} \mathbf{p}^T(z^{-1}) \mathbf{E}_{y,N} \mathbf{E}_{y,N}^H \mathbf{p}(z) \quad (12)$$

求解式(12)最靠近单位圆的根 z_y , 得到 $\nu = \sin\theta \sin\varphi$ 解的表达式为:

$$\nu(c) = \text{angle}(z_y) c / (2\pi f d) \quad (13)$$

联立式(7)和(13)得到 DOA 的解为:

$$\varphi(c) = \arcsin(\sqrt{\mu^2(c) + \nu^2(c)}) \quad (14)$$

$$\theta(c) = \arctan[\nu(c)/\mu(c)] \quad (15)$$

式(14)和(15)构成以 c 为变量的 DOA 表达式。

由 Root-MUSIC 的求解过程可知, 范德蒙形式为必要条件, 小孔径 L 子阵应为 x, y 轴方向的等间距均匀构型。

2.2 坐标-波速联合估计

增大阵列孔径, 使信号模型满足近场判据 $r < 2D^2/\lambda$, 得到大孔径阵列的近场信号模型如图3所示。如图3(a), 在小孔径 L 子阵右侧按间距 d' ($d' > d$) 增加若干枚传感器, 构成 M 元非均匀 L 阵。在不改变图2(a)所示 L 子阵均匀构型的同时, 非均匀 L 阵构型可在传感器数量有限的情况下获得更大的阵列孔径, 从而满足近场判据。

将位于坐标原点的传感器作为参考传感器, 结合图3(b)近场信号模型可得该 M 元阵列的接收信号为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (16)$$

阵列流形向量 $\mathbf{A}$ 的表达式为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j2\pi f(r_2 - r_1)/c] \\ \vdots \\ \exp[-j2\pi f(r_M - r_1)/c] \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: r_m 为泄漏源到传感器 m 的距离, $m = 1, \dots, M$ 。将参考传感器对应的距离 r_1 作为待估计的泄漏源距离 r , 结合式(14)和(15)所示 DOA 表达式, 可得图3(b)

所示泄漏源坐标以波速 c 和距离 r 为变量表达式为:

$$x(c, r) = r \sin\varphi(c) \cos\theta(c) \quad (18)$$

$$y(c, r) = r \sin\varphi(c) \sin\theta(c) \quad (19)$$

$$z(c, r) = r \cos\varphi(c) \quad (20)$$

则 r_m 可表示为:

$$r_m(c, r) = \sqrt{[x_m - x(c, r)]^2 + [y_m - y(c, r)]^2 + z^2(c, r)} \quad (21)$$

式中: x_m 和 y_m 为传感器 m 的坐标, 传感器位于土表, z 坐标取 0。将式(21)代入式(17)即可得到以 c 和 r 为变量的 M 元阵列流形向量 $\mathbf{A}(c, r)$ 。

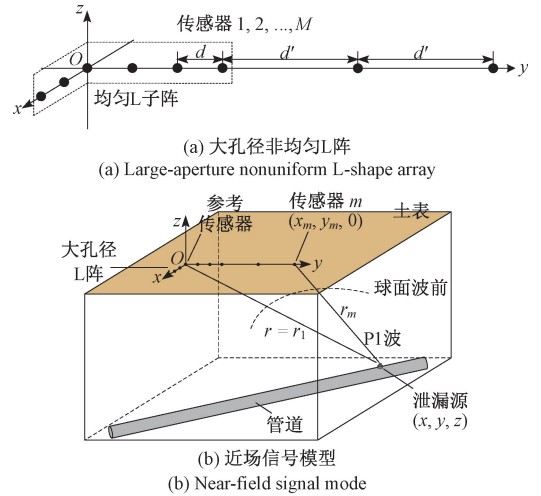


图3 大孔径 L 阵近场信号模型

Fig. 3 Near-field signal mode of large-aperture L-shape array

由上述推导可知流形向量 $\mathbf{A}(c, r)$ 不是范德蒙形式, Root-MUSIC 算法不再适用。基于特征空间 (eigen space, ES) 的空间谱估计算法直接搜索待估计参数, 对阵列结构无特殊要求, 可适用于非均匀 L 阵。相较于式(5)所示经典 MUSIC 空间谱, 基于 ES 的空间谱函数充分利用信号和噪声子空间, 估计性能更强^[23]。

接下来对波速 c 和距离 r 进行 ES 空间谱搜索。 M 元阵列信号的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}[\mathbf{X}(t), \mathbf{X}^H(t)] \quad (22)$$

特征分解得到信号和噪声子空间:

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}_S \mathbf{\Sigma}_S \mathbf{E}_S^H + \mathbf{E}_N \mathbf{\Sigma}_N \mathbf{E}_N^H \quad (23)$$

式中: $\mathbf{E}_S$ 和 $\mathbf{E}_N$ 分别为信号和噪声子空间所对应的特征向量。定义信号子空间为:

$$\mathbf{R}_S = \mathbf{E}_S \mathbf{\Sigma}_S \mathbf{E}_S^H \quad (24)$$

得到基于 ES 的二维空间谱函数^[23]:

$$P_{\text{ES}}(c, r) = \frac{\mathbf{A}^H(c, r) \mathbf{R}_S^+ \mathbf{A}(c, r)}{\mathbf{A}^H(c, r) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{A}(c, r)} \quad (25)$$

由式(25)可联合估计 c 和 r , 再代入式(18)~(20)即可得到坐标 x, y, z 的估计值。

3 定位实验

3.1 实验设置

根据图3所示大孔径L阵信号检测模型,搭建埋地输气管道泄漏振动声波检测实验平台。图4所示实验平台由供气装置、埋地管道以及数据采集设备构成。供气装置包含空压机、储气罐、减压阀以及球阀若干,实验过程向管道提供1 MPa持续稳定压力输出。埋地管道由预留直径1.5 mm圆形泄漏孔的DN100镀锌钢管构成,管道置于木质箱体底部,上方覆盖回填土。信号采集设备包含加速度传感器、采集仪和计算机。INV9828型加速度传感器灵敏度为500 mV/g,频响范围为0.2 Hz~2.5 kHz,输出信号为加速度(单位为 m/s^2)。INV3062C型采集仪支持8通道216 kHz采样率同步采集,土介质波频率低于1 kHz,将采样率设置为10 kHz以防止波形信息丢失。计算机CPU型号为i7 9750H,配备16 GB RAM。

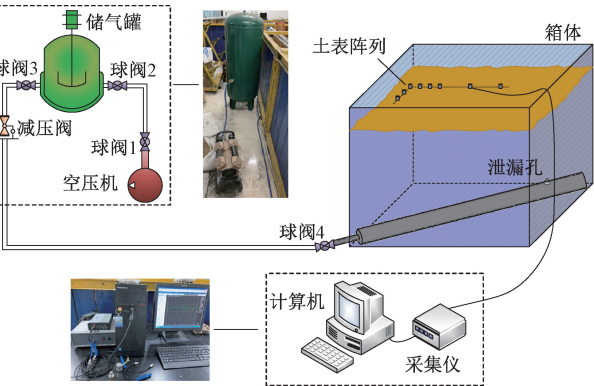


图4 实验平台
Fig.4 Experiment rig

参考文献[13]可知,土壤的含水饱和度、孔隙度参数会影响土介质波的传播速度。设置3种土壤的含水饱和度和孔隙度参数如表1所示,验证联合估计算法对不同土壤条件下泄漏位置和波速估计的估计效果。为了进行泄漏振动声波信号特征和相关性分析(3.2节),在土表设置2枚加速度传感器进行信号检测,传感器1、2到泄漏源的距离差为0.335 m。在3.2节信号分析的基础上,3.3节对不同泄漏位置和土壤条件进行坐标-波速联合估计。由于泄漏孔固定在管壁上,因此通过调整土表阵列位置和管道埋深来改变泄漏源与阵列的相对位置,泄漏源坐标及其与参考传感器的距离如表2所示。根据图2(a)和图3(a)所示阵列模型,设置小孔径L阵在 x 轴方向的传感器数量 $J=3$, y 轴方向的数量 $K=4$,小孔径L阵间距 $d=0.2$ m,右侧按间距 $d'=0.4$ m增加两枚传感器,构成8元非均匀大孔径L阵。小孔径L阵的孔径 $D_{\min}=0.72$ m,大孔径L阵的孔径 $D_{\max}=1.46$ m。

表1 土壤参数及理论波速(10~1 500 Hz)
Table 1 Soil parameters and theoretical wave-speeds (10~1 500 Hz)

土壤编号	含水饱和度	孔隙度	P1波理论波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	S波理论波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
土壤1	0.20	0.3	1 274	117
土壤2	0.20	0.4	1 191	125
土壤3	0.15	0.5	1 127	135

表2 泄漏源位置参数
Table 2 Position parameters of leak sources m

位置编号	坐标	距离
位置1	(1.0, 0.5, -0.5)	1.22
位置2	(-0.5, 0.5, -0.7)	0.99
位置3	(0.5, 0, -0.9)	1.03

3.2 泄漏振动声波信号分析

使用传感器1、2在土壤3条件下进行信号采集和分析,获取阵列信号处理所需的频率信息,并验证表1理论波速的准确性。图5为传感器1、2信号的波形和频谱。持续泄漏产生的振动声波信号为连续信号,能量集中在200~700 Hz频段,且峰值频响对应频率为400 Hz,属于中低频信号。

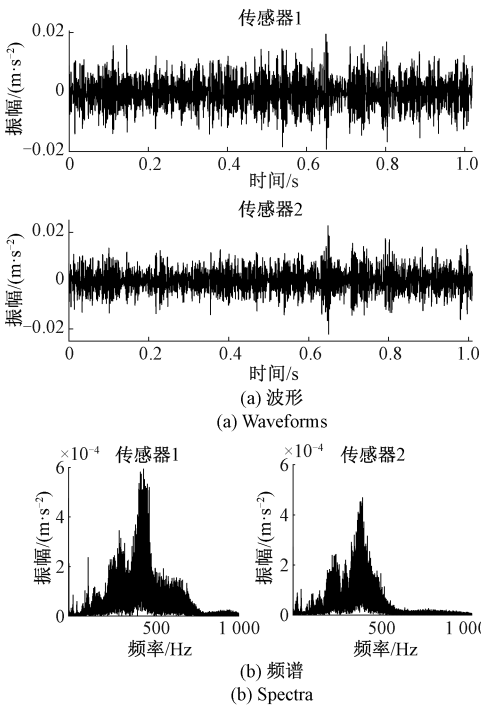


图5 传感器1、2信号波形频谱
Fig.5 Waveforms and spectra of sensor 1 and 2 signal

采用广义互相关算法^[27]进行两个传感器信号的相关系数分析。如图 6 所示,0 延时点右侧两个较为明显的峰值点对应延时值为 0.3 和 2.5 ms,结合距离差 0.335 m 可计算出速度为 1 116 m/s、134 m/s。对比表 1 可知,二者分别对应土壤 3 条件下 10~1 500 Hz 频段 P1 波和 S 波的传播速度,理论速度与实测速度的误差分别为 11 和 1 m/s。0 延时点左侧也存在多个峰值,延时值为负说明这些信号分量的方向与泄漏源相反,可以判断为来自实验箱体壁面反射的混响干扰信号。箱体反射与实际应用场景并不相符,因此使用 MVDR 波束形成器^[28]进行阵列信号的前置空域滤波处理,对滤波后的阵列信号进行坐标-波速联合估计。

3.3 坐标-波速联合估计

在不同土壤条件下进行泄漏源三维坐标和波速的联合估计实验,土壤参数和泄漏源位置如表 1、2 所示。根

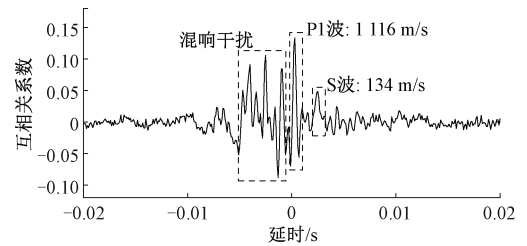


图 6 传感器 1、2 信号互相关系数

Fig. 6 Cross-correlation coefficients of sensor 1 and 2 signals

据表 1 理论波速计算出频率为 400 Hz 的 P1 波波长,结合阵列孔径以及泄漏源与参考传感器的距离,可判断大孔径和小孔径 L 阵接收信号分别符合近场和远场模型。

图 7 为不同土壤条件下 3 个泄漏位置的波速-距离联合估计二维空间谱输出。在同一土壤条件下,不同位置的波速估计结果一致;不同土壤条件下,相同位置的

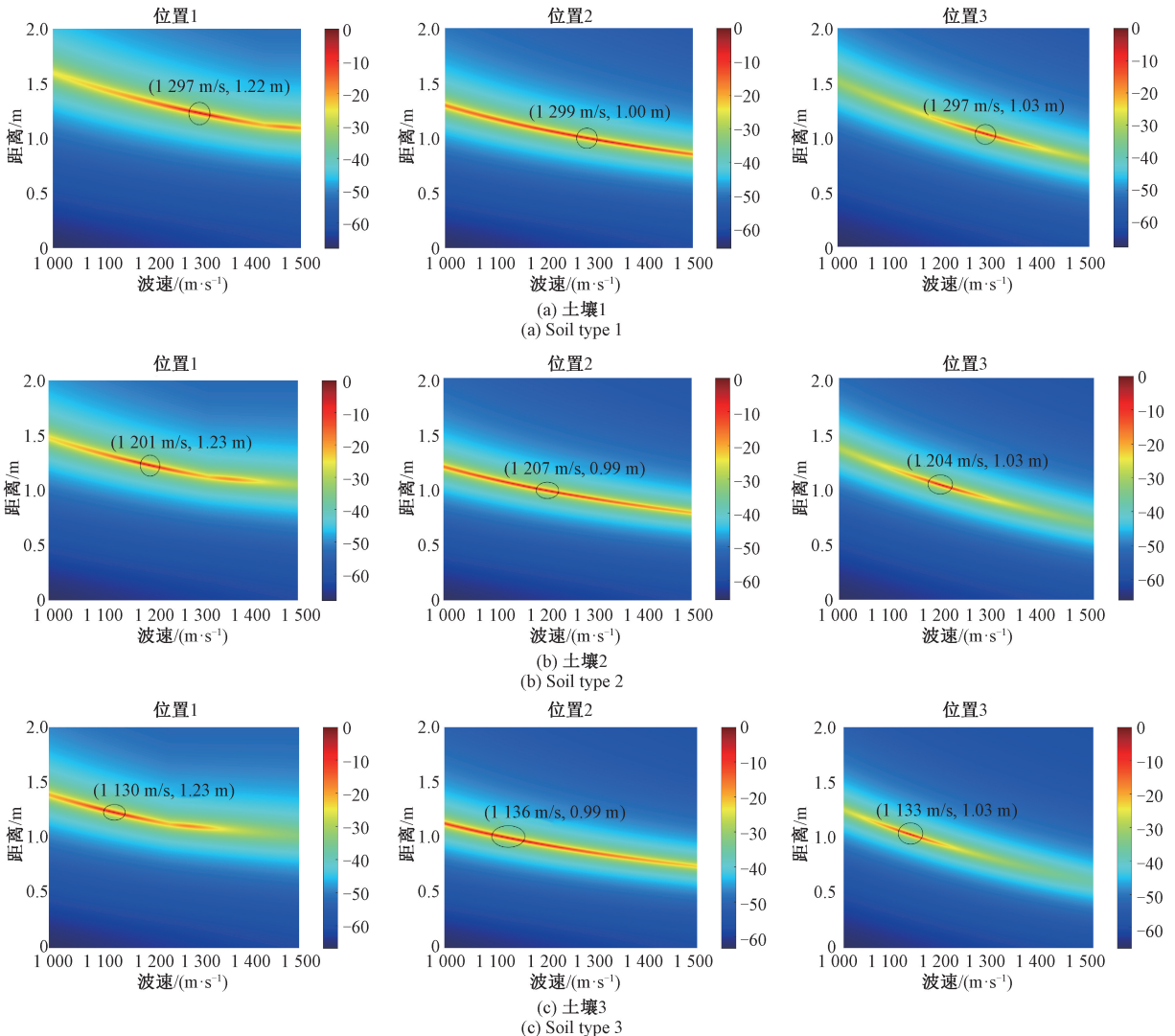


图 7 波速-距离联合估计二维空间谱

Fig. 7 Two-dimensional spatial spectra for joint wave-speed and distance estimation

距离估计结果保持一致。将波速和距离的估计结果代入式(18)~(20),得到泄漏源坐标的计算结果如表3所示,其中定位误差为坐标计算值与实际值的距离。定位误差小于0.015 m,表明所提出联合估计法对不同土壤条件下的泄漏源均实现了精确的三维定位。

表3 泄漏源坐标计算结果

Table 3 Results of leak source coordinate calculation			
泄漏位置	土壤条件	坐标计算值	定位误差 m
位置1	土壤1	(1.00, 0.50, -0.51)	0.010
	土壤2	(1.01, 0.50, -0.49)	0.014
	土壤3	(1.00, 0.50, -0.49)	0.010
位置2	土壤1	(-0.50, 0.50, -0.69)	0.010
	土壤2	(-0.49, 0.50, -0.69)	0.014
	土壤3	(-0.50, 0.50, -0.70)	0
位置3	土壤1	(0.50, 0.01, -0.89)	0.014
	土壤2	(0.50, 0, -0.91)	0.010
	土壤3	(0.50, 0, -0.90)	0

3.4 算法性能分析

1) 阵列构型的影响

对于本文所提出的联合估计方法,利用小孔径L形阵列进行准确的DOA估计从而获取DOA与波速的约束关系(2.1节),是实现精确定位的前提。文献[26]的研究结果表明,在阵元数量和阵元间距一致的情况下,阵列构型对气体泄漏声源的定位精度产生了影响。考虑到Root-MUSIC算法要求阵列流行向量包含相互垂直的分量,且要符合范德蒙形式。本节选取L形阵列、十字阵列以及矩形阵列进行DOA估计性能对比,十字阵列的实现方法参考文献[29]。将6枚加速度传感器按照等间距 $d = 0.2\text{ m}$ 排列成3种阵列构型,阵列构型如图8所示。

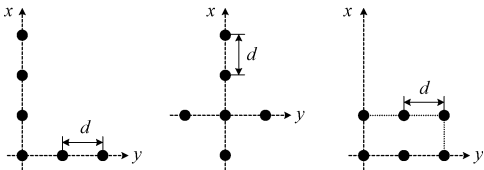


图8 阵列构型
Fig. 8 Array topologies

在土壤1、位置1条件下进行不同阵列构型的DOA估计性能对比,使用Root-MUSIC算法解出 $\theta(c)$ 和 $\varphi(c)$,再代入图7(a)所示土壤1、位置1的波速估计值

1 297 m/s 即可得到DOA估计结果。根据式(18)~(20)换算出DOA实际值为 $(26.57^\circ, 65.91^\circ)$,图9为3种阵列的DOA估计误差分布,每组测试重复5次,估计误差取5次测试平均值。

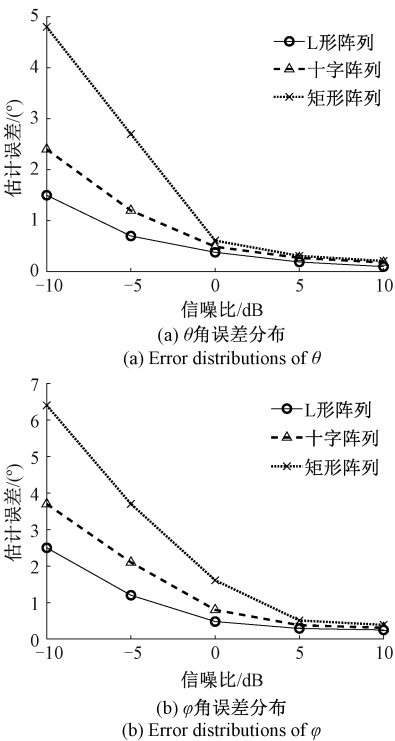


图9 DOA估计误差分布

Fig. 9 Error distributions of DOA estimation

由图9可知,随着信噪比降低,3种阵列构型的DOA估计误差逐渐增大。且整体上L形阵列的估计结果更加稳定,十字阵列和矩形阵列的估计精度则随着信噪比降低而快速衰减。分析原因为,L形阵列孔径更大,更有利于提高阵列分辨率,估计精度更高。因此,在本文实验条件下,选取L形阵列进行DOA估计更有利于提高定位精度。

对比图9(a)、(b)可知, φ 角的误差大于 θ 角。根据式(7)、(13)和(15), θ 角的计算过程自动消除了波速 c 这一变量,因此估计波速的误差对 θ 角估计精度的影响可以忽略。

2) 波速的影响

由图7空间谱得出的波速估计值与表1的理论预测值并非完全一致,这是因为土壤参数繁多且难以准确测量,导致实际波速与理论预测值难以完全吻合。因此,为分析波速对定位精度的影响,将理论波速代入式(14)、(15)和(25)进行DOA和距离估计并计算三维坐标,对比联合估计法的定位精度。

表4为使用理论波速和估计波速的定位结果,每组测试重复5次,估计波速和定位误差取5次测试平均值。

结果表明,在估计波速与理论波速存在差异的情况下,使用估计波速的定位误差小于使用理论波速,平均定位误差降低 90.9%。对比表 1 理论波速可知,土壤 1 的理论波速与估计波速相差最大,平均差值为 23.3 m/s;土壤 2 次之,平均差值为 12.7 m/s;土壤 3 最小,平均差值为 5 m/s。使用理论波速的定位误差随着差值的增加而增大,土壤 1 条件下定位误差已达到 0.2 m;而联合估计法的定位误差则始终保持稳定,小于 0.015 m。上述结果表明,联合估计法能够更加准确的估计出土介质波的传播速度,从而避免波速理论预测不精确造成的定位误差,提升定位精度。

表 4 使用理论波速和估计波速的定位结果
Table 4 Localization results using theoretical and estimation wave-speeds

土壤 条件	理论 波速 /(m·s ⁻¹)	泄漏 位置	联合估计法		使用理论波 速的定位 误差/m
			估计波速 /(m·s ⁻¹)	定位误差 /m	
土壤 1	1 274	位置 1	1 297	0.012	0.251
		位置 2	1 298	0.013	0.175
		位置 3	1 297	0.011	0.281
土壤 2	1 187	位置 1	1 202	0.013	0.110
		位置 2	1 205	0.012	0.149
		位置 3	1 204	0.012	0.101
土壤 3	1 130	位置 1	1 129	0.009	0.034
		位置 2	1 133	0.011	0.021
		位置 3	1 134	0.012	0.028

3) 算法计算量

直接将泄漏源坐标作为变量代入式(25)即可获得三维空间谱函数 $P_{\text{Es}}(x, y, z)$,从而实现泄漏源的三维定位。联合估计法的优势则在于能够以二维搜索代替三维搜索,降低空间谱搜索计算量。本节将对两种方法的定位精度和计算量。

表 5 为两种方法的定位误差和计算用时,其中地下空间的搜索范围为 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m} = 4\text{ m}^3$,三维空间谱搜索步长设置为 0.01 m。为避免波速的影响,两种方法均采用估计波速。根据阵列到空间边缘的最大距离换算出距离 r 的搜索范围为 0~1.73 m,搜索步长为 0.01 m,波速 c 的搜索范围为 1 000~1 500 m/s,步长为 1 m/s。定位实验组取土壤 1、位置 1。由表 5 可知,两种方法定位精度接近,但联合估计法的搜索步数相较于三维空间谱搜索方法减少了两个数量级,计算耗时降低了 88%。结果表明,联合估计法能够在保持定位精度的同时降低计算量。

表 5 联合估计法与三维空间谱搜索计算用时
Table 5 Calculation time of the joint estimation method and 3D spatial spectrum search

方法	步数	误差/m	用时/s
三维空间谱搜索	201×201×101=4 080 501	0.012	20.1
联合估计	501×174=87 174	0.010	2.4

4) 定位范围

由第 2 节分析可知,大孔径非均匀 L 阵的信号模型为近场模型,而小孔径均匀 L 阵则为远场模型。远/近场判据限制了泄漏源(信源)与传感器阵列的距离,本节将分析信源距离对定位的影响,从而得出实验条件下的定位范围。

大孔径 L 阵的孔径为 D_{max} ,小孔径 L 阵的孔径为 D_{min} 。由近场判据 $r < 2D^2/\lambda$ 可得大孔径 L 阵的最大信源距离为 $r_{\text{max}} = 2D_{\text{max}}^2/\lambda$,由远场判据 $r > 2D^2/\lambda$ 可得小孔径 L 阵的最小信源距离为 $r_{\text{min}} = 2D_{\text{min}}^2/\lambda$ 。根据 P1 波理论波速(表 1)计算出波长 λ ,再结合阵列孔径 D_{max} 、 D_{min} ,可得到不同土壤条件下的 r_{max} 和 r_{min} 如表 6 所示。

表 6 不同土壤条件下的 r_{max} 和 r_{min}
Table 6 r_{max} and r_{min} under multiple soil conditions

D_{max}/m	D_{min}/m	土壤	λ/m	r_{max}/m	r_{min}/m
1.46	0.72	土壤 1	3.19	1.34	0.33
		土壤 2	2.97	1.44	0.35
		土壤 3	2.83	1.51	0.37

对不同距离的泄漏源进行定位,由近及远设置 9 个信源距离:0.50、0.71、0.86、0.99、1.03、1.14、1.22、1.44 和 1.68 m。实验条件下管道最小埋深为 0.5 m,小于该深度则能在地表观察到泄漏现象,因此设置最短信源距离为 0.5 m。图 10 为不同土壤条件下定位误差随信源距离的变化趋势,每组测试重复进行 5 次,定位误差取 5 次测试平均值。由图 10 可知,0.71~1.22 m 范围内 3 种土壤条件下的定位误差均保持低于 0.015 m,结合表 6 可知此时信源距离处于 $r_{\text{min}} \sim r_{\text{max}}$ 范围内,能够实现精确定位。当信源距离减小至 0.5 m,3 种土壤条件下的定位误差分别增加至 0.021、0.023 和 0.019 m。分析原因为此时信源距离趋近于 r_{min} ,导致小孔径 L 阵的 DOA 估计精度下降,进而影响了联合估计法的定位精度。当信源距离增加至 1.68 m 时,3 种土壤条件下的定位误差均出现较大增幅,其中土壤 1 条件下的误差增幅最大,达到了 0.058 m。由表 6 可知土壤 1 条件下 P1 波长最长,计算出的 r_{max} 为 3 种土壤条件下最小,导致信源距离为 1.68 m 时近场判据已不再满足,定位误差随之增大。对

比土壤 2,3 可知,定位误差随着波长的减小以及 $r_{\max}$ 的增加而降低。

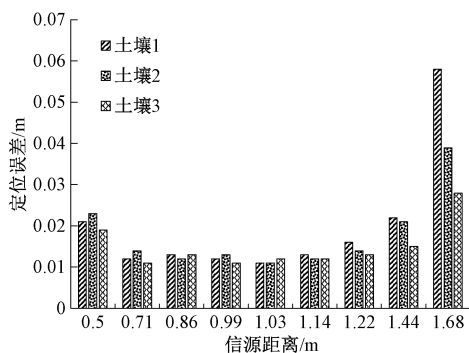


图 10 不同信源距离下定位误差分布

Fig. 10 Distribution of localization error under multiple distances of signal source

由实验结果可知,远/近场判据限制了 L 阵的定位范围,随着信源距离接近 $r_{\min}$ 或 $r_{\max}$,定位误差逐渐增大。因此,实际工程应用中应根据初步定位结果对阵列孔径进行调整,增大 $r_{\min} \sim r_{\max}$ 范围,从而保证泄漏源处于阵列的精确定位范围内。

4 结 论

针对埋地输气管道泄漏三维定位计算量大,波速先验知识缺乏等问题,提出基于非均匀 L 阵列的泄漏三维坐标和波速联合估计方法。搭建埋地输气管道泄漏振动声波检测实验平台,测试分析了沿土壤传播的泄漏振动声波信号先验知识。

定位实验结果表明,联合估计法能够估计出包含三维坐标和波速在内的泄漏信号四维参数。L 形阵列孔径更大,DOA 估计性能优于十字阵列和矩形阵列,更加适用于埋地输气管道泄漏定位场景。使用估计波速得出的定位误差相较于使用理论波速平均降低了 90.9%,说明在实验土壤条件下估计波速更能准确反应土介质波的实际传播速度。相较于直接三维空间谱估计,联合估计法在保持定位精度的同时实现了 88% 的计算量降幅。远/近场判据对非均匀 L 阵的精确定位范围存在限制,当信源距离接近 $r_{\min}$ 或 $r_{\max}$ 时定位误差增大。工程应用中应根据初步定位结果调整阵列孔径,使信源距离处于阵列的精确定位范围内。

参考文献

[1] 刘翠伟,李玉星,王武昌,等. 输气管道泄漏声波产生机理研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 17-23.
LIU C W, LI Y X, WANG W CH, et al. Leak-acoustics generation mechanism for natural gas pipelines [J].

Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 17-23.
[2] MOSTAFAPOUR A, DAVOODI S. A theoretical and experimental study on acoustic signals caused by leakage in buried gas-filled pipe[J]. Applied Acoustics, 2015, 87: 1-8.
[3] 刘翠伟,敬华飞,方丽萍,等. 输气管道泄漏声波衰减模型的理论研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 109-114.
LIU C W, JING H F, FANG L P, et al. A theoretical study on the attenuation model of leakage acoustic waves for natural gas pipelines [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20): 109-114.
[4] LIU C, LI Y, FANG L, et al. New leak-localization approaches for gas pipelines using acoustic waves [J]. Measurement, 2019, 134: 54-65.
[5] 郑晓亮,王强,薛生. 输气管道泄漏的线性阵列两步定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 171-178.
ZHENG X L, WANG Q, XUE SH. A two-step leakage location method for gas pipelines based on linear array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 171-178.
[6] ZHENG X, WANG Q, XUE S, et al. A beamforming-based joint estimation method for gas pipeline leak localization[J]. Measurement, 2021, 177, 109264.
[7] MUGGLETON J M, HUNT R, RUSTIGHI E, et al. Gas pipeline leak noise measurements using optical fibre distributed acoustic sensing[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 78, 103293.
[8] EBRAHIMI-MOGHADAM A, FARZANEH-GORD M, DEYMI-DASHTEBAYAZ M. Correlations for estimating natural gas leakage from above-ground and buried urban distribution pipelines[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 185-196.
[9] 张重. 埋地输气管道泄漏声源特性的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
ZHANG ZH. Research on the leakage source characteristics of buried gas pipeline [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
[10] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178.

- [11] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. higher frequency range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179-191.
- [12] SANTOS J E, CORBERO J M, JR J D. Static and dynamic behavior of a porous solid saturated by a two-phase fluid[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 87(4): 1428-1438.
- [13] 丁卫, 吴文雯, 王驰, 等. 用非饱和三相孔弹模型研究浅层土壤中地震波的传播特性[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 204-212.
DING W, WU W W, WANG CH, et al. Propagation characteristics of seismic waves in shallow soil with the unsaturated three-phase poroelastic mode [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 204-212.
- [14] DEY A, NANDI A, BASU B. Gold-MUSIC based DOA estimation using ULA antenna of DS-CDMA sources with propagation delay diversity [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 84: 162-170.
- [15] 李烁, 马云飞, 谢谨. 基于 Wi-Fi 入射信号到达角超分辨率估计的无源车速测量[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 268-276.
LI SH, MA Y F, XIE J. Device-free vehicle speed estimation based on ultra-resolution estimation of arrival angle of Wi-Fi incident signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 268-276.
- [16] 蔡星月, 高云鹏, 李云峰, 等. 基于自适应 TLS-ESPRIT 和改进全相位多密集谱间谐波检测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 199-207.
CAI X Y, GAO Y P, LI Y F, et al. Detection method of multi-dense spectrum inter-harmonics based on adaptive TLS-ESPRIT and improved all-phase [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 199-207.
- [17] YANG Y, CHU Z, YANG L, et al. Enhancement of direction-of-arrival estimation performance of spherical ESPRIT via atomic norm minimisation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 491, 115758.
- [18] BAO Q, HU W, WANG Q. A novel multi-site damage localization method based on near-field signal subspace fitting using uniform linear sensor array[J]. Ultrasonics, 2021, 116, 106485.
- [19] YANG J, YANG Y, LU J, et al. Iterative methods for DOA estimation of correlated sources in spatially colored noise fields[J]. Signal Processing, 2021, 185, 108100.
- [20] SWINDLEHURST A, KAILATH T. A performance analysis of subspace-based methods in the presence of model errors. I. The MUSIC algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(7): 1758-1774.
- [21] SWINDLEHURST A, KAILATH T. A performance analysis of subspace-based methods in the presence of model error. II. Multidimensional algorithms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(9): 2882-2890.
- [22] YAN F G, SHUAI L, WANG J, et al. Real-valued root-MUSIC for DOA estimation with reduced-dimension EVD/SVD computation[J]. Signal Processing, 2018, 152: 1-12.
- [23] ZHANG X, LV W, SHI Y, et al. A novel DOA estimation algorithm based on eigen space [C]. 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, IEEE, 2007: 551-554.
- [24] 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(C), 106332.
- [25] ZHANG Y, WANG J, BIAN X, et al. A continuous gas leakage localization method based on an improved beamforming algorithm [J]. Measurement, 2017, 106: 143-151.
- [26] CUI X, YAN Y, HU Y, 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.
- [27] PADOIS T, DOUTRES O, SGARD F, et al. Optimization of a spherical microphone array geometry for localizing acoustic sources using the generalized cross-correlation technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132(C): 546-559.
- [28] 王博, 谢军伟, 张晶, 等. 低快拍下基于 RBF 的 CSB sin-FDA 稳健波束形成 [J]. 振动与冲击, 2020,

39(6): 117-124.

WANG B, XIE J W, ZHANG J, et al. RBF-based CSB sin-FDA robust beamforming with insufficient snapshot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39 (6): 117-124.

[29] 刘全, 皇甫堪, 陈建文. 二维 Root-MUSIC[J]. 国防科技大学学报, 1998(6): 64-66.

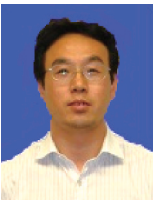
LIU Q, HUANGFU K, CEHN J W. 2D Root-MUSIC[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1998(6): 64-66.

作者简介



王强,2018 年于安徽理工大学获得学士学位,现为安徽理工大学博士研究生,主要研究方向为阵列信号处理、安全检测与监控。
E-mail: q. wang@ aust. edu. cn

Wang Qiang received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2018. He is currently a Ph. D. student at Anhui University of Science and Technology. His main research interests include array signal processing and safety detection and monitoring.



薛生(通信作者),1984 年于中国矿业大学获得学士学位,1991 年于新南威尔士大学获得博士学位,现为安徽理工大学教授,主要研究方向为安全科学与工程。
E-mail: sheng. xue@ aust. edu. cn

Xue Sheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 1984, and received his Ph. D. degree from University of New South Wales in 1991. He is currently a professor at Anhui University of Science and Technology. His main research interests include safety science and engineering.