

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006283

输气管道泄漏的线性阵列两步定位方法*

郑晓亮¹, 王强¹, 薛生²

(1. 安徽理工大学电气与信息工程学院 淮南 232001; 2. 安徽理工大学能源与安全学院 淮南 232001)

摘要:为了提高输气管道泄漏定位的精度和抗干扰能力,基于除自谱的互功率谱波束形成法,提出一种输气管道泄漏的线性阵列两步定位方法。进行 $M(=3, 5, 7)$ 元阵列及其 $M-1$ 元子阵的泄漏定位和速度估计效果对比实验,分析了3种阵列的抗干扰能力差异。实验结果表明,泄漏信号的4 kHz分量受多径干扰较小,速度估计结果稳定在1 600 m/s~1 700 m/s范围内。相较于2元和4元子阵,6元子阵的速度估计结果更稳定,抗干扰能力更强。相应地,7元阵列的定位精度和抗干扰能力也更优,干扰较小时,对不同泄漏位置的平均定位误差率小于1%,信噪比低至-15 dB时其误差率仍低于2%。而现有基于广义互相关分析的声波法在噪声条件下无法完成有效定位。该研究将阵列技术应用到管道泄漏定位,提高了定位方法的性能。

关键词: 管道泄漏; 波束形成; 线性阵列; 速度估计; 两步定位

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 two-step leakage location method for gas pipelines based on linear array

Zheng Xiaoliang¹, Wang Qiang¹, Xue Sheng²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. School of Energy and Safety Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To improve the accuracy and antijamming capability of the gas pipeline leakage location, a two-step method based on cross-spectral beamforming with exclusion of auto-spectral is proposed by using linear array. A series of tests are implemented to analyze the performance of leakage location and velocity estimation for M -element ($M=3, 5, 7$) arrays and the subarrays. The different antijamming capability among those three arrays are discussed. Experimental results show that the 4 kHz component of leakage signal is less influenced by multipath and its velocity is in the range of 1 600 m/s ~ 1 700 m/s. Compared with the 2-element and 4-element subarrays, the 6-element subarray has better velocity estimation stability and antijamming capability. Location accuracy and antijamming capability of the 7-element array are also better. When the interference is small, mean errors of location results at multiple leakage positions are less than 1% by utilizing 7-element array. Under the SNR of -15 dB, mean errors of 7-element array are remained less than 2%. Furthermore, location cannot be completed by using the existing acoustic method that is based on generalized cross correlation analysis under noise condition. This study applies the array technique on pipeline leakage location and the performance of location method is enhanced.

Keywords: pipeline leakage; beamforming; linear array; velocity estimation; two-step location

0 引言

在输气管道泄漏定位方法中,声波法以其实时性强、误报率低以及无损检测等优点得到广泛的研究与应

用^[1-3]。声波法的原理是利用管道两端的传感器采集泄漏声波信号并估计到达时差,结合传感器的间距和信号沿管道传播的速度,即可计算出泄漏位置^[4-5]。现有声波法的定位精度仍受到制约,影响因素包括:1)延时估计误差,该误差主要由背景噪声干扰引起,且估计精度进一步

收稿日期:2020-04-20 Received Date: 2020-04-20

* 基金项目:十三五国家重点研发计划“冬奥会公共安全综合风险评估技术”(2018YFF0301000)、清华大学合肥公共安全研究院院士工作站课题(2017K001)项目资助

受延时估计函数自身性能的制约;2)理论速度误差,管道环境复杂且管内气体介质处于流动状态,使用理论速度模型估计泄漏信号波速将不可避免的产生误差。为解决上述问题,Gao等^[6]研究了用于埋地输水管道泄漏噪声的互相关函数,结果表明平滑相干变换(smoothed coherence transform, SCOT)加权估计器最适合供水管道泄漏定位;Brennan等^[7]等提出用于分布式输水管道泄漏检测的时频延时估计方法,测试结果表明,使用时域和频域方法计算出的延时估计值及其方差几乎相同;Liu等^[8]建立了用于泄漏信号特征提取的降噪系统,以提高现有声波法的抗噪声干扰能力;Li等^[9]提出一种基于时频谱的定位方法,提取非频散导波模式信号的互功率谱,从而提高对管道泄漏信号的速度估计精度。

现有声波法一般基于双传感器进行延时估计和定位,因此该方法可看做基于2元线性阵列的波达时差(time difference of arrival, TDOA)泄漏声源定位方法^[10-13]。相较于基于TDOA的声源定位方法,高分辨率谱估计法^[14-16]和波束形成法^[17-19]的定位精度更高,抗干扰能力更强。高分辨率谱估计法通过求解空间信号相关矩阵来估计声源位置,理论上可实现超分辨率估计,但较多的阵元数目需求和混响干扰限制了其实际应用效果。常用的波束形成法包括自适应波束形成和常规波束形成。自适应波束形成旁瓣小且自适应能力强,然而其实际应用效果受限于对信源先验知识的要求。常规波束形成则直接以延时补偿的方式进行阵列输出加权,因此无需信源与噪声的先验知识。常规波束形成中,除自谱的互功率谱波束形成(以下简称互功率谱波束形成)可抑制不相关噪声,具有一定的抗噪声干扰能力。

综上所述,为了避免理论速度模型带来的定位误差,同时提高声波法的抗干扰能力并以此进一步提高定位精度,本文提出基于线性阵列和互功率谱波束形成的管道泄漏两步定位方法。首先基于布设于管道一端的多个传感器使用波束形成算法估计泄漏信号的波速,再结合所得速度和另一端的参考传感器使用波束形成算法反演出泄漏位置,即可完成定位。

1 管道泄漏定位原理

1.1 互功率谱波束形成原理

在阵列信号处理技术中,波束形成可用作空域滤波和波达方向估计,其实质是对阵元输出加权从而达到增强期望信号、抑制干扰信号的作用。常规波束形成通过延时补偿的方式进行阵列输出加权,当聚焦方向与实际信源方向重合时可形成最大输出,搜索输出峰值点并反演波达方向即可完成定位。以 M 元阵列为例,阵元加权求和输出可表示为:

$$B(\boldsymbol{\tau}, \omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M p_m(\omega) \cdot \exp(-j\omega\tau_m) \quad (1)$$

式中: $p_m(\omega)$ 表示阵元 m ($=1, 2, \dots, M$)所接收信号的频域形式; τ_m 为阵元 m 信号相对于参考阵元的延时, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M]^T$ 为延时向量, $\exp(-j\omega\tau_m)$ 为阵元 m 信号延时因子。对加权输出求互功率谱可得:

$$V(\boldsymbol{\tau}, \omega) = \overline{|B(\boldsymbol{\tau}, \omega)|^2} = \frac{1}{M^2} \sum_{m,n=1}^M C_{nm} \cdot \exp[j\omega(\tau_n - \tau_m)] \quad (2)$$

式中: C_{nm} 为阵元 m 和 n ($=1, 2, \dots, M$)的信号输出互功率谱,表达式为:

$$C_{nm} = \overline{p_m(\omega) \cdot p_n^*(\omega)} \quad (3)$$

当 $m=n$ 时, C_{nm} 实际构成某个阵元输出的自功率谱,去除自谱元素可有效降低不相关噪声的干扰。可得到除自谱的互功率谱波束形成输出为:

$$V'(\boldsymbol{\tau}, \omega) = \frac{1}{M^2 - M} \sum_{m \neq n} C_{nm} \cdot \exp[j\omega(\tau_n - \tau_m)] \quad (4)$$

搜索除自谱的互功率谱波束形成输出函数 $V'(\boldsymbol{\tau}, \omega)$ 最大值对应的延时向量 $\boldsymbol{\tau}$,即为实际波达方向所对应延时向量。当各传感器阵元的位置已知,延时向量 $\boldsymbol{\tau}$ 由信源的观测位置参数和信号波速决定。

1.2 基于线性阵列的两步定位原理

实际应用中,可观测位置参数由阵列构型和信源模型决定,一维线性阵列可观测阵列所在直线上信源相对某个阵元的距离。将互功率谱波束形成应用到管道泄漏定位中,即转化为基于一维线性阵列的泄漏源定位问题。图1所示为 M 元线性阵列在管道上的分布,其中阵元1位于泄漏孔左侧,阵元2~ M 位于泄漏孔右侧。

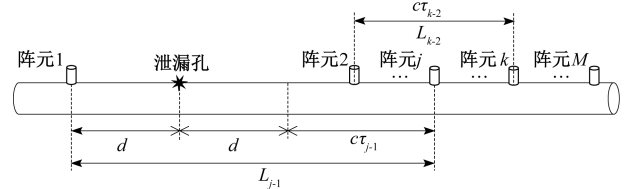


图1 M 元线性阵列的阵元分布

Fig. 1 Array element distributions of M -element linear array

对于由阵元1~ M 构成的 M 元阵列,设阵元1为参考阵元,则根据图1所示几何关系,阵元 j ($=2, 3, \dots, M$)所接收泄漏信号相对于参考阵元1的延时 τ_{j-1} 可以表示为:

$$\tau_{j-1} = \frac{L_{j-1} - 2d}{c} \quad (5)$$

式中: c 为泄漏信号沿管道传播的速度; d 为泄漏孔与参考阵元1的距离即实际泄漏位置; L_{j-1} 为阵元 j 与参考阵元1的距离。构造 M 元阵列信号的延时向量 $\boldsymbol{\tau}_M$ 为:

$$\boldsymbol{\tau}_M = [0, \tau_{2-1}, \dots, \tau_{M-1}]^T \quad (6)$$

对于由阵元2~ M 构成的 $M-1$ 元子阵,设阵元2为参考阵元,则根据图1所示几何关系,阵元 k ($=3, 4, \dots, M$)所接收泄漏信号相对于参考阵元2的延时 τ_{k-2} 可表示为:

$$\tau_{k-2} = \frac{L_{k-2}}{c} \quad (7)$$

式中: L_{k-2} 为阵元 k 与参考阵元2的距离。构造 $M-1$ 元子阵信号的延时向量 $\boldsymbol{\tau}_{M-1}$ 为:

$$\boldsymbol{\tau}_{M-1} = [0, \tau_{3-2}, \dots, \tau_{M-2}]^T \quad (8)$$

将式(6)、(8)所示加权向量 $\boldsymbol{\tau}_M$ 、 $\boldsymbol{\tau}_{M-1}$ 代入式(4)得到波束形成函数 $V'_M(\boldsymbol{\tau}_M, \omega)$ 和 $V'_{M-1}(\boldsymbol{\tau}_{M-1}, \omega)$ 。由式(5)和(7)可知,向量 $\boldsymbol{\tau}_M$ 中包含泄漏位置 d 和信号速度 c 两个变量,而向量 $\boldsymbol{\tau}_{M-1}$ 中仅有速度 c 一个变量。搜索函数 $V'_{M-1}(\boldsymbol{\tau}_{M-1}, \omega)$ 的峰值即可得到速度 c 的估计值,再将速度 c 作为已知量代入向量 $\boldsymbol{\tau}_M$ 并搜索函数 $V'_M(\boldsymbol{\tau}_M, \omega)$ 的输出峰值,得到泄漏位置 d 的估计结果即可完成管道泄漏定位。该定位方法分两步对泄漏信号速度 c 和泄漏位置 d 进行分步估计,故称为两步法。

1.3 线性阵列性能分析

最大旁瓣水平体现阵列性能,其相对于主瓣峰值的差值越大,则阵列的有效动态范围越大。较高的动态范围有利于减少旁瓣对主瓣的干扰,并增强低信噪比条件下的阵列性能。根据阵列模式和最大旁瓣水平函数的定义^[20],得到线性阵列的最大旁瓣水平函数公式如下:

$$MSL(K) = 10 \log_{10} \left[\max_{\substack{K^0 < \bar{K} < K \\ \bar{K} < K}} |W(\bar{K})|^2 / M^2 \right] \quad (9)$$

式中: $W(\bar{K})$ 为阵列模式; M 为阵元数。线性阵列构型简单,阵列模式单一,但式(9)说明可通过增加阵元数以降低最大旁瓣水平,进而对阵列性能形成有益影响。

2 管道泄漏定位实验设计

按照图1所示线性阵列在管道上的分布,搭建实验平台如图2所示。该实验平台由以下部分组成:

- 1) 气体压缩装置,包含空气压缩机、储气罐、减压阀以及球阀若干,在储气罐充满气体、空压机关闭的情况下,可向实验管道提供最高1 MPa的持续稳定压力输出;
- 2) 模拟泄漏管道,包含一根长度为6 m的DN50镀锌钢管,预留圆形泄漏孔直径为1.5 mm;
- 3) 信号采集装置,包含若干加速度传感器、采集仪和计算机,加速度传感器使用磁吸底座紧贴于管道外壁,其中传感器1位于泄漏孔左侧,传感器2~ M 位于右侧。

实验过程中,由空压机按1 MPa压力为储气罐充满气体后关闭压缩机和球阀1、2,打开球阀3、4并调节减压阀至目标压力,形成稳定泄漏后运行信号采集系统完成

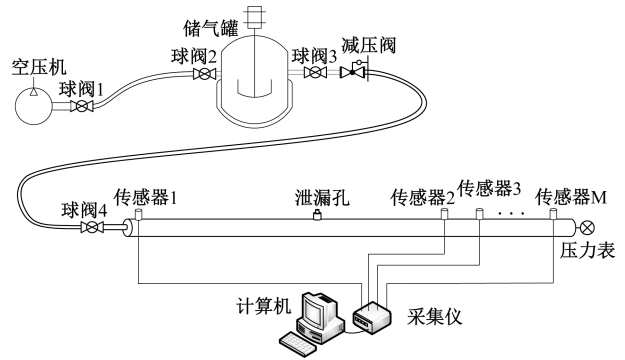


图2 管道泄漏定位实验平台

Fig. 2 Experimental platform for pipeline leakage location

一次信号采集。保持管道内压、背景噪声等条件不变,改变泄漏孔与传感器1的距离以及线性阵列阵元数等实验条件,进行对比实验。所采集数据由计算机进行分析处理并完成速度估计和泄漏定位。

3 泄漏信号速度估计

3.1 信号单一速度分量提取

提高两步法定位精度的前提,是使用 $M-1$ 元子阵对泄漏信号波速进行准确估计。由于实验室范围有限,由管内高压气体泄漏所产生的振动(声波)信号将沿多种路径传播至加速度传感器(如管壁介质和空气介质等路径),造成信号的多径传播现象。来自不同介质的多径信号包含多种速度分量,对精确的速度估计十分不利。为了对比来自不同路径信号的特征,分别在管道外壁和空气介质中采集泄漏信号。两个传感器布点的实物如图3所示,其中布点1位于管道外壁距离泄漏孔1.5 m处,布点2位于距离泄漏孔1.5 m处的支架上。图4所示为两个布点的信号频谱,图4(a)对应布点1,图4(b)对应布点2。

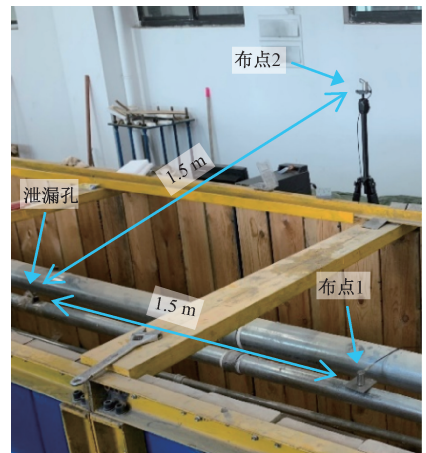


图3 多径信号对比布点实物

Fig. 3 Sensor positions for multipath signal comparison

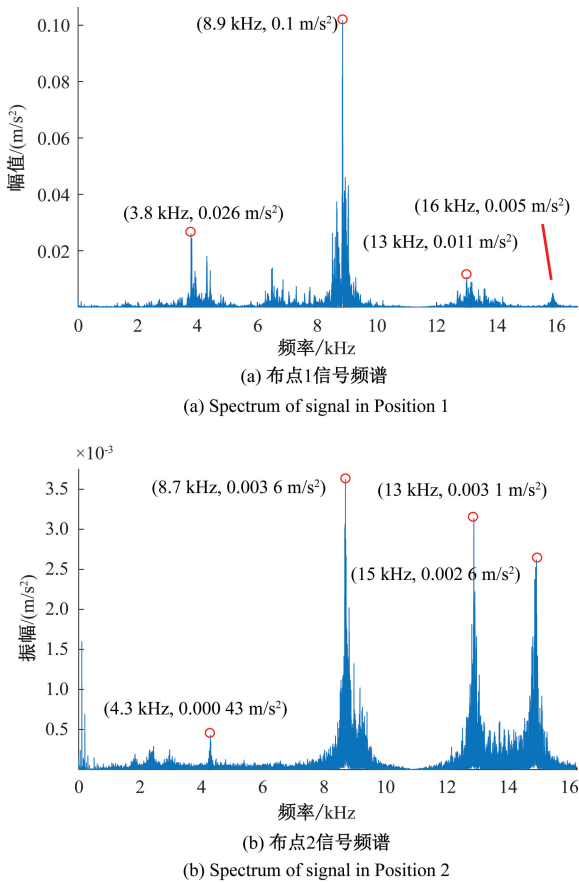


图4 不同布点信号频谱

Fig. 4 Spectrum of signals in multiple positions

由图4可知,两个布点的信号频谱在4、9、13和15 kHz附近均存在较为突出的频响,即二者信号能量在

频域上的分布具有重叠性。然而,相较于振幅较为接近的13和15 kHz附近频响,布点1信号在4 kHz附近的频响振幅为布点2信号的60倍,9 kHz附近的频响振幅也达到了28倍。考虑到布点2传感器仅能采集来自空气介质的泄漏信号,故贴于管壁的加速度传感器所采集信号的4、9 kHz分量,受来自空气介质信号的干扰相对较少,有利于泄漏信号的单一速度分量提取。

3.2 速度估计结果分析

按照图2所示实验平台布置传感器阵列,对比分析3元、5元和7元阵列的性能,即分别使用对应的2元、4元和6元子阵进行速度估计。泄漏孔与各子阵中参考传感器(传感器2)的距离为2.05 m,传感器间距0.3 m,其他条件与实验设计部分相同。表1所示为2元、4元和6元子阵对原始信号及其4、9 kHz分量的速度估计结果,每组实验重复进行5次。其中, c_1 为4 kHz分量的估计速度, c_2 为9 kHz分量的估计速度; c_3 为原始信号的估计速度。使用加速度传感器在管道径向拾取泄漏信号,则信号的主导模态为基本弯曲模态^[21]。根据基本弯曲模态的速度频散曲线可知,4 kHz分量的理论速度范围为[1 500, 2 000] m/s,9 kHz分量的理论速度范围为[2 000, 2 500] m/s。由表1可得,3种子阵的4 kHz分量估计速度 c_1 均较为稳定,且基本处于理论速度[1 500, 2 000] m/s范围内,而 c_2 和 c_3 则出现了较大幅度的波动。对比不同子阵的估计结果稳定性可知,6元子阵的 c_1 值波动最小,4元子阵稳定性次之,2元子阵相对较差。因此在本文实验条件下,提取信号的4 kHz分量并使用阵元数较多的6元子阵进行速度估计,能够降低信号多径传播的影响,并获得更为稳定的估计结果。

表1 原始信号及其4 kHz和9 kHz分量的速度估计结果

Table 1 Results of velocity estimation for original signal and its 4 kHz and 9 kHz components

m·s⁻¹

序号	2元子阵估计结果			4元子阵估计结果			6元子阵估计结果		
	c_1	c_2	c_3	c_1	c_2	c_3	c_1	c_2	c_3
1	1 600	2 100	1 500	1 650	2 150	1 700	1 680	1 300	455
2	1 445	503	490	1 650	2 100	347	1 680	2 180	2 160
3	1 585	1 990	2 210	1 690	775	340	1 675	2 180	2 100
4	1 650	1 120	355	1 660	775	340	1 675	1 185	390
5	1 590	2 210	2 210	1 655	770	350	1 675	1 205	400

为进一步分析3种子阵的抗干扰能力,对表1中序号1实验组的信号4 kHz分量添加高斯白噪声,设置信噪比为-5、-10和-15 dB。图5所示为不同信噪比下2元、4元、6元子阵的波束形成输出在速度 c 上的分布。由图5(a)~(c)可知,-5 dB信噪比下6元和4元子阵的波束形成输出峰值较为突出,2元子阵的输出分布分散,

干扰峰值较多;图5(d)中,-10 dB信噪比下2元子阵的输出峰值已被干扰峰值淹没;由图5(h)、(i)可知,-15 dB信噪比下4元子阵的输出峰值也被淹没,而6元子阵的输出峰值仅出现了较低幅度的偏移。不同信噪比下的对比结果表明,本文实验条件下6元子阵对速度估计算法的抗干扰能力具有明显的提升作用。

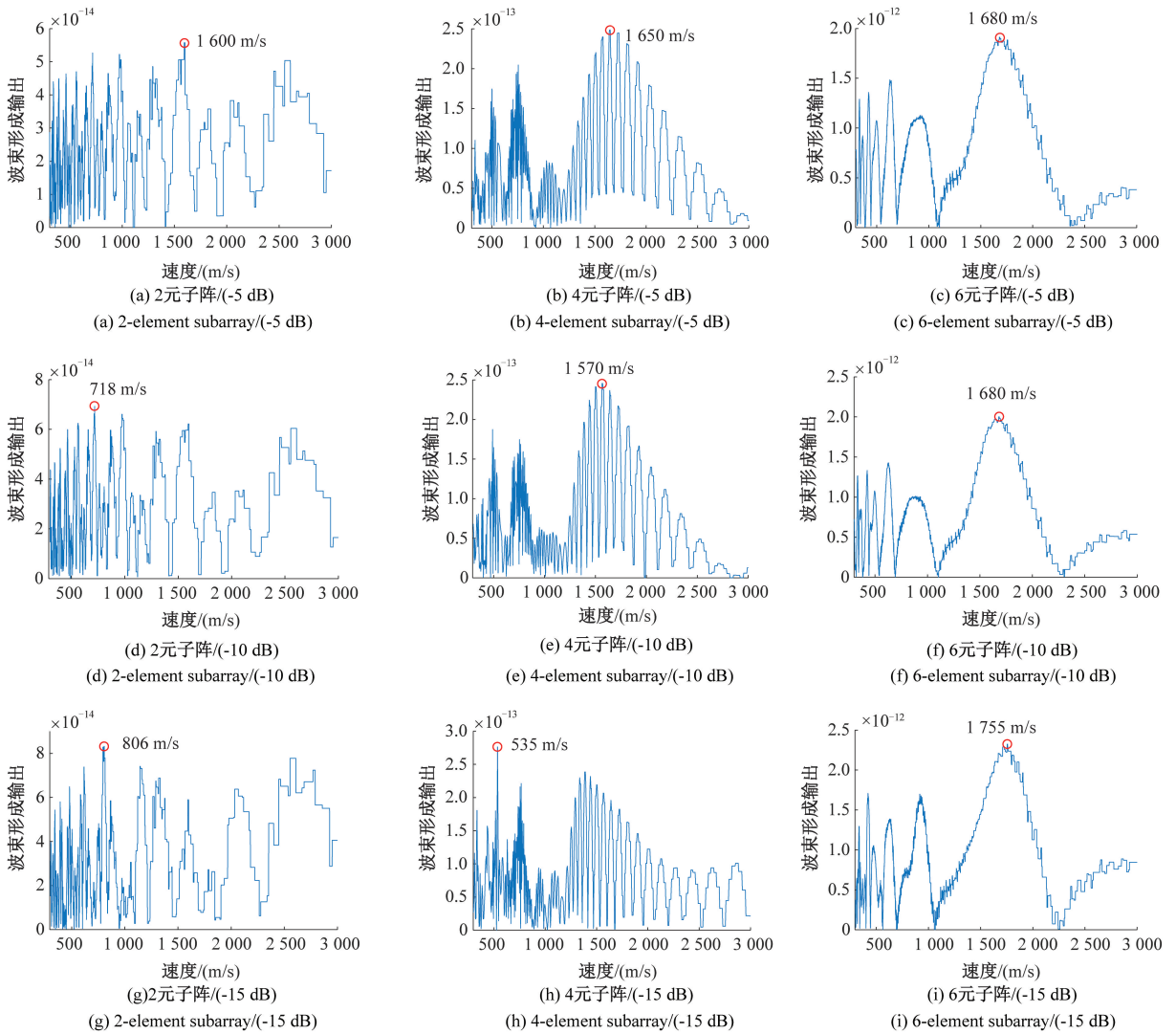


图5 不同信噪比下子阵波束形成输出的速度分布

Fig.5 Velocity distributions of beamforming output under multiple SNRs

4 管道泄漏定位

对比分析不同信噪比下3元、5元和7元阵列的泄漏定位效果。基于图5所示速度估计结果,使用各子阵所对应3元、5元和7元阵列进行相同信噪比下的管道泄漏定位。保持其他实验条件不变,设置各阵列中参考传感器(传感器1)与泄漏孔的距离为2.45 m,即实际泄漏位置 $d=2.45$ m。图6所示为-5、-10和-15 dB信噪比下,3种阵列的波束形成输出在位置 d 上的分布。如图6(a)、(d)、(g)所示,随着信噪比的降低,3元阵列的输出峰值迅速被干扰峰值淹没。如图6(b)、(e)、(h)所示,低信噪比下5元阵列的输出峰值并未被淹没,但由于图5(h)所示-15 dB信噪比下4元子阵的速度估计结果已经出现较大误差,因此图6(h)所示定位结果2.16 m

也大幅偏离了实际位置2.45 m。如图6(c)、(f)、(i)所示,7元阵列的输出峰值未受干扰,且定位误差较小。

对不同位置泄漏孔进行定位,每组实验重复3次,并添加-5、-10和-15 dB高斯白噪声。由于泄漏孔位置固定,通过改变传感器1的位置改变泄漏位置,故定位范围(图2中传感器1、2的距离)随实际泄漏位置改变。3种阵列定位结果的平均误差率(误差绝对值除以定位范围)如表2所示,其中 e_1 、 e_2 、 e_3 分别表示3元、5元、7元阵列的定位结果平均误差率。进一步对比两步法与现有基于双传感器延时估计的声波法。使用图2所示阵列中的传感器1和2采集泄漏信号,选取SCOT加权函数进行双传感器信号的广义互相关分析并得出延时估计值^[6],结合几何关系得出泄漏位置计算公式为:

$$d = \frac{L_{2-1} - c\tau_{2-1}}{2} \tag{10}$$

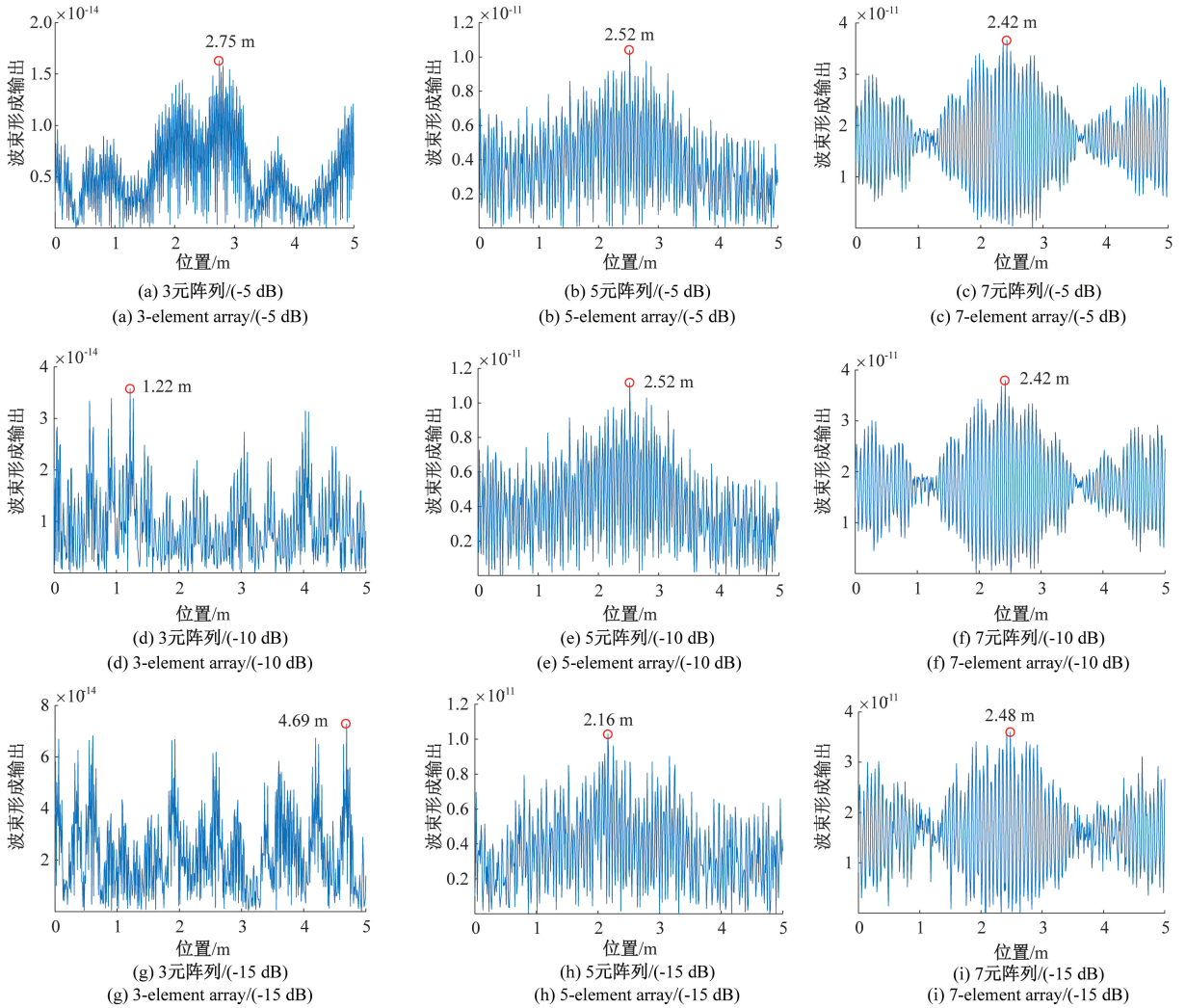


图 6 不同信噪比下阵列波束形成输出的位置分布

Fig. 6 Location distributions of beamforming output under multiple SNRs

式中： L_{2-1} 为传感器 1 和 2 的距离； c 为信号波速； τ_{2-1} 为信号延时。图 4(a) 所示管道上布点 1 的信号频谱显示 4 kHz 分量的频响峰值出现在 3.8 kHz，根据基本弯曲模态的速度频散曲线^[21]，得出其理论速度 $c = 1\ 700\ \text{m/s}$ 。现有声波法的平均定位误差率如表 2 中 e_4 所示。

由表 2 中 e_1 、 e_2 、 e_3 数据可知，随着定位范围的扩大，3 种阵列的平均定位误差率均有所下降。对于 7 元阵列，-5 dB 信噪比下其对于不同泄漏位置的平均定位误差率低于 1%，即便信噪比低至 -15 dB 时，7 元阵列的误差率仍不高于 2%。5 元阵列在相应条件下的平均定位误差率则有所增大，定位范围足够大时，-5 dB 信噪比下其误差率也保持低于 2%。3 元阵列的定位精度和抗干扰能力相对最差，信噪比低至 -10 dB 时平均误差率超过 10%，-5 dB 信噪比下其误差率仍不低于 4%。同时 e_4 数据显示，采用 SCOT 加权广义互相关分析的声波法在低信噪比条件下无法完成有效定位，定位误差率大于 10%。

表 2 不同泄漏位置的平均定位误差率

Table 2 Mean errors of location results for multiple leakage positions

泄漏位置/m	定位范围/m	信噪比 /dB	$e_1/\%$	$e_2/\%$	$e_3/\%$	$e_4/\%$
0.85	2.90	-5	9.13	3.54	0.71	>10
		-10	>10	2.67	1.22	>10
		-15	>10	>10	1.80	>10
1.25	3.30	-5	7.11	2.99	0.88	>10
		-10	>10	2.18	0.93	>10
		-15	>10	>10	1.20	>10
1.65	3.70	-5	5.72	1.40	0.63	>10
		-10	>10	3.62	0.59	>10
		-15	>10	9.01	1.38	>10
2.05	4.10	-5	6.67	1.66	0.52	>10
		-10	>10	2.91	0.51	>10
		-15	>10	6.53	0.97	>10
2.45	4.50	-5	4.15	1.07	0.49	>10
		-10	>10	1.85	0.55	>10
		-15	>10	6.10	1.56	>10

5 结 论

为提高管道泄漏定位的精度和抗干扰能力,提出一种基于互功率谱波束形成的管道泄漏线性阵列两步定位方法。先估计泄漏信号传播速度,再代入速度构造加权向量,最后搜索波束形成输出峰值并完成定位。定位实验结果表明:

1) 使用加速度传感器贴于管壁拾取径向振动信号,并提取泄漏信号的4 kHz分量,有助于降低信号多径传播的干扰;

2) 声速估计结果显示,泄漏信号的4 kHz分量传播速度稳定在[1 600, 1 700]m/s范围内,符合基本弯曲模态的速度频散特性,相较于2元和4元子阵,6元子阵的速度估计结果更稳定,且抗干扰能力更强;

3) 定位结果表明,7元阵列的定位精度和抗干扰能力更强,干扰较小时,对不同位置的泄漏定位误差率小于1%,即便当信噪比低至-15 dB,其误差率仍低于2%。

参考文献

[1] 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.

[2] 郭晨城,文玉梅,李平,等.采用EMD的管道泄漏声信号增强[J].仪器仪表学报,2015,36(6):1397-1405.

GUO CH CH, WEN Y M, LI P, et al. Enhancement of leak signals using EMD in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6): 1397-1405.

[3] 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.

[4] LIU C W, LI Y X, YAN Y K, et al. A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35: 236-246.

[5] LIU C W, LI Y X, FANG L P, et al. New leak-localization approaches for gas pipelines using acoustic waves[J]. Measurement, 2019, 134: 54-65.

[6] GAO Y, BRENNAN M J, JOSEPH P F, et al. A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 277(1-2): 133-148.

[7] BRENNAN M J, GAO Y, JOSEPH P F. On the relationship between time and frequency domain methods in time delay estimation for leak detection in water distribution pipes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304(1-2): 213-223.

[8] LIU C W, LI Y X, FANG L P, et al. Experimental study on a de-noising system for gas and oil pipelines based on an acoustic leak detection and location method[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2017, 151: 20-34.

[9] LI SH Y, WEN Y M, LI P, et al. Leak location in gas pipelines using cross-time-frequency spectrum of leakage-induced acoustic vibrations [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333: 3889-3903.

[10] 赵慎,乔纯捷,王跃科.基于多节点到达时间差的相对位姿测量系统[J].电子测量与仪器学报,2013,27(3):194-198.

ZHAO SH, QIAO CH J, WANG Y K. Relative position and attitude measurement system based on multiple TDOA [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(3): 194-198.

[11] PEREZ-LORENZO J M, VICIANA-ABAD R, RECHE-LOPEZ P, et al. Evaluation of generalized cross-correlation methods for direction of arrival estimation using two microphones in real environments[J]. Applied Acoustics, 2012, 73(8): 698-712.

[12] CHEN Z, LI ZH L, WANG SH W, et al. A microphone position calibration method based on combination of acoustic energy decay model and TDOA for distributed microphone array [J]. Applied Acoustics, 2015, 95: 13-19.

[13] ZHANG H, CHEN J D, BENESTY J. Study of nonuniform linear differential microphone arrays with the minimum-norm filter[J]. Applied Acoustics, 2015, 98: 62-69.

[14] 刘斌,栾忠权,马超,等.基于L型阵列的故障声源位置估计[J].电子测量与仪器学报,2017,31(4):617-622.

LIU B, LUAN ZH Q, MA CH, et al. Fault sound sources position estimation based on L array method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(4): 617-622.

- [15] 石屹然, 赵晓晖, 单泽彪, 等. 基于 FLOCC-ESPRIT 的极化阵列参数估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2076-2083.
SHI Y R, ZHAO X H, SHAN Z B, et al. FLOCC-ESPRIT based polarization array parameter estimation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2076-2083.
- [16] 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.
- [17] ARCONDOULIS E, LIU Y. An iterative microphone removal method for acoustic beamforming array design[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 442: 552-571.
- [18] CHEN Y, WANG F, WAN J W, et al. MASS-RAB: Robust adaptive beamforming for general-rank signal models via matched spatial spectrum processing [J]. Applied Acoustics, 2016, 111: 205-213.
- [19] EVANS D, HARTMANN M, DELFS J. Beamforming for point force surface sources in numerical data[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 458: 303-319.
- [20] 褚志刚, 杨洋, 蒋忠翰. 波束形成传声器阵列性能研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(5): 665-670.
CHU ZH G, YANG Y, JIANG ZH H. Study on the Beamforming Performance of Microphones Array [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(5): 665-670.
- [21] LI SH Y, CHENG N W, WANG P, et al. Extraction of single non-dispersive mode in leakage acoustic vibration for improving leak detection in gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 41: 77-86.

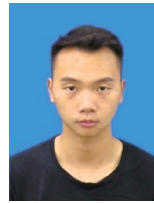
作者简介



郑晓亮, 2002 年、2005 年和 2018 年于安徽理工大学分别获得学士、硕士和博士学位, 现为安徽理工大学教授, 主要研究方向为自动化、安全监测与监控技术。

E-mail: zhengxl@ aust. edu. cn

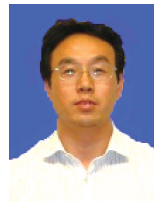
Zheng Xiaoliang received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Anhui University of Science and Technology in 2002, 2005 and 2018, respectively. He is currently a professor at Anhui University of Science and Technology. His main research interests include automation and safety monitoring & control technology.



王强 (通信作者), 2018 年于安徽理工大学获得学士学位, 现为安徽理工大学硕士研究生, 主要研究方向为自动化、安全监测与监控技术。

E-mail: 13135543032@163.com

Wang Qiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Anhui University of Science and Technology. His main research interests include automation and safety monitoring & control technology.



薛生, 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 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.