

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508374

基于联合降噪与互信息时延的埋地 PE 管成像定位*

程吉祥¹ 赵红英¹ 葛亮² 李志丹¹ 肖小汀¹

(1. 西南石油大学电气信息学院 成都 610500; 2. 西南石油大学机电工程学院 成都 610500)

摘要: 聚乙烯管道广泛用于能源输送及供水排水等关键领域, 精准探测其位置对于保障城市安全具有重要意义。针对现有管道定位技术中存在噪声敏感和时延计算不准的问题, 提出一种基于联合降噪与互信息时延的弹性波成像定位方法。首先, 搭建实验平台并采集检波器接收信号; 其次, 采用集合经验模态分解联合小波阈值算法对信号进行降噪处理; 然后, 利用互信息函数法计算信号时延, 并结合多条测线数据进行叠加成像以确定管道位置; 最后, 通过 COMSOL 仿真验证方法可行性, 并对埋深为 0.5 与 1 m 的 PE 管道进行现场测试。实验结果表明, 该方法所得管道平均定位误差分别为 0.042 和 0.085 m, 较未降噪条件下分别降低 0.058 和 0.820 m; 与互相关函数法和时域叠加法相比, 该方法在 0.5 m 埋深下平均定位误差分别降低 0.067 和 0.063 m, 在 1 m 埋深下分别降低 0.222 和 0.057 m。研究结果表明, 该方法显著提升了管道定位精度, 对复杂环境下的埋地 PE 管道探测具有重要的工程应用价值。

关键词: 埋地管道; 弹性波定位; 联合降噪; 互信息时延; 声学成像

中图分类号: TU990.3; TB53; TN911.23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.2

Imaging and location of buried PE pipes based on joint denoising and mutual information time delay

Cheng Jixiang¹ Zhao Hongying¹ Ge Liang² Li Zhidan¹ Xiao Xiaoting¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University Chengdu 610500, China)

Abstract: Polyethylene pipes are widely used in critical fields such as energy transmission and water supply and drainage. Accurate detection of their locations is of great significance for ensuring urban safety. In view of the problems of noise sensitivity and inaccurate time delay calculation in existing pipeline location technologies, this paper proposes an elastic wave imaging location method based on joint denoising and mutual information time delay. Firstly, an experimental platform is built and the signals received by the geophones are collected. Secondly, the signals are denoised by using the ensemble empirical mode decomposition combined with the wavelet threshold algorithm. Then, the time delay of the signals is calculated by the mutual information function method, and the pipeline location is determined by superimposing the data of multiple survey lines. Finally, the feasibility of the method is verified by COMSOL simulation, and field tests are conducted on PE pipes buried at depths of 0.5 and 1 m. The experimental results show that the average positioning errors of the pipelines obtained by the method in this paper are 0.042 and 0.085 m, respectively, which are reduced by 0.058 and 0.820 m compared with those without denoising. Compared with the cross-correlation function method and the time-domain superposition method, the average positioning errors of the method in this paper are reduced by 0.067 and 0.063 m at a depth of 0.5 m, and by 0.222 and 0.057 m at a depth of 1 m, respectively. The research results show that this method significantly improves the positioning accuracy of pipelines and has important engineering application value for the detection of buried PE pipes in complex environments.

Keywords: buried pipeline; elastic wave location; joint noise reduction; mutual information time delay; acoustic imaging

收稿日期: 2025-05-12 Received Date: 2025-05-12

* 基金项目: 成都市科技局技术创新研发项目(2025-YF05-00202-SN)、四川省科技计划项目(2023ZHCG0020)、四川省国际港澳台科技创新合作项目(25GJHZ0475)资助

0 引言

被誉为“城市生命线”的埋地管道遍布城市地下空间,为工业生产和居民生活提供了重要保障^[1]。近年来,聚乙烯(polyethylene, PE)塑料管因其低成本、高耐腐蚀性等优势,逐步取代传统金属管道,广泛用于能源输送及供水排水等重要领域^[2]。然而,随着使用年限增长,管道老化和破损问题日益严重,加之早期铺设的 PE 管道缺乏系统化管理,相关管线资料不完整,难以准确获取其位置,导致第三方施工误挖事故频发,这严重威胁人民生命财产安全和影响城市运行秩序^[3]。因此,精准定位埋地 PE 管道对于保障城市基础设施的安全运行具有重要意义。

埋地管道探测的核心目标是确定管线的走向、平面位置和埋深,以便于管道的施工与维护。当前主流探测方法均依赖管道材质与周围土壤的物理特性差异,例如,电磁感应法的探测精度受限于管道的导电性能及外部电磁干扰^[4],探地雷达法的定位精度则易受土壤湿度变化影响^[5]。相比之下,声学探测技术因不受 PE 管绝缘特性的限制,成为探测非金属管道的有效手段。根据声波激励与传播方式不同,声学探测技术主要分为声波激励法和弹性波法。声波激励法需向管道内部注入声信号并在地面接收回波,通过分析管道内部回波定位管道^[6],该方法对管道暴露点有较高依赖;弹性波法由地面振源激发声波,通过分析传播至管道表面并反射回地面的回波来确定管道位置^[7],因其适用范围广、局限小,已成为埋地 PE 管道探测的主流方向。

弹性波法源自地球物理领域,最初用于深达千米的地质构造勘探,随后逐步拓展至地下物体探测领域。近年来,国外研究多聚焦于波形理论与成像算法的研究。Mugleton 等^[8]提出基于低频轴对称波的远程检测方法,后续进一步明确扭转模态波的传播特性^[9],为波形选择提供理论支撑,但该研究仍局限于理论模拟,实际应用中噪声干扰导致定位精度下降。为解决成像中的噪声问题,Charamohammadi 等^[10]结合互相关函数与反射功率反投影方法,通过功率聚焦提高了信噪比,有效提升了浅层埋地目标识别能力,但计算复杂度高,对噪声和多路径反射较为敏感。Baumann 等^[11]基于反射频谱特性提出了一种非接触式深度推断方法,展示了其在远距离探测场景中的潜力,该方法简化了深度估计算法,但对频谱纯净度要求高,在噪声环境下鲁棒性不足。总体而言,国外研究通过波形研究和成像算法创新解决了基本定位问题,但仍面临噪声敏感和计算效率低的挑战。

国内研究相对更加注重复杂地质条件下的工程化实现,主要聚焦于弹性波传播特性、成像算法改进及实际场

景验证等方面。Gao 等^[12-13]分别建立了轴对称波与低频波传播模型,揭示了低频波在低信噪比环境下的传播规律,为非金属管道探测提供了理论基础,但模型假设理想化,难以完全反映复杂土壤环境下的信号畸变。为桥接理论与实践,Yan 等^[14]从仿真与实测角度出发,验证了扫频声波和脉冲波在非金属管道定位中的有效性,提升了激励信号的多样性,但回波信号衰减严重,时延识别精度受限。在成像技术方面,葛亮等^[15]提出的时域叠加法利用多测线叠加增强反射信号,实现了 PE 管二维成像定位,具有直观性强、易于实现的优点,但由于采用短脉冲信号,在土壤中易衰减导致信噪比较低。Qi 等^[16-17]先后提出的三维时域堆叠聚焦方法和反投影方法显著提升了成像清晰度,该方法逻辑上延续了时域叠加的实用性,但对噪声敏感,在复杂环境中易出现多峰值伪像。李瑾等^[18-19]基于敲击声音信号,先后采用支持向量机和优化的支持向量机,实现了墙体管道的准确探测,该方法引入机器学习提高了自动化水平,但训练样本需求大,难以直接迁移至埋地环境。综上,国内研究在方法实用性方面进展显著,但现有方法在噪声处理和时延计算准确性方面仍存在局限。因此,对回波信号进行高效处理与分析,是基于弹性波定位埋地 PE 管道的关键。

针对现有技术对噪声敏感和时延计算不准的问题,本文提出一种改进的弹性波成像定位方法。针对现场实验采样信号失真严重的问题,采用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)联合小波阈值算法对信号降噪,利用 EEMD 的自适应分解特性与小波的时频局部化能力,实现对非平稳信号的高保真降噪,显著提升反射信号质量。提出基于互信息函数的时延计算方法,通过计算信号间的统计依赖性确定时延,能够有效处理非线性、非平稳信号,进而实现埋地管道的反演成像。通过现场实验将本文所提方法分别与未降噪处理和互相关函数法、时域叠加法的定位结果进行对比分析。实验结果表明,经降噪处理后,管道定位误差显著降低,且基于互信息的时延计算方法在定位精度方面优于互相关函数法和时域叠加法,验证了本文方法在复杂环境下定位埋地 PE 管道的有效性与优势。

1 基于弹性波的埋地 PE 管道定位原理

1.1 弹性波在固体中传播

声波是由质点振动产生的机械波,在固体介质中传播时称为弹性波。自然界中的土壤由固、液、气 3 部分组成,常处于非饱和状态。为简化研究,本文将土壤和 PE 管道看作连续均匀且各向同性的线弹性体。

弹性波在土壤中传播满足 Navier 波动方程,如式(1)所示^[20]。

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mu \nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}) \quad (1)$$

式中： ρ 为介质密度； \mathbf{u} 是位移矢量； t 为时间； λ, μ 是拉梅常数； $\nabla \cdot \mathbf{u}$ 为位移的散度，衡量波的体积变化； $\nabla \times \mathbf{u}$ 为位移的旋度，可衡量波的剪切变形。

通过 Helmholtz 矢量分解^[21]，弹性波可分为无旋分量(纵波(P 波))和等容分量(横波(S 波))。P 波对应标量势函数 φ ，其波动方程和波速 v_p 参考文献[21]；S 波对应矢量势函数 ψ ，其波速 v_s 较低，主要受剪切模量影响。在埋地 PE 管定位中，P 波因传播速度快，常用于初次反射信号检测，S 波有助于分析剪切变形，但易受土壤非饱和状态影响。此外，瑞利波是沿地表传播的一种面波^[22]，其振幅随深度增加指数衰减，且易与管道反射信号叠加形成干扰，因此在实际定位计算中需对其进行识别并剔除。

当弹性波传至土壤-PE 管界面时，由于两种介质的声阻抗差异，会发生弹性波的反射。通常，PE 管的声阻抗显著低于土壤的声阻抗。为定量描述这一界面作用过程，记土壤为介质 1，PE 管道为介质 2，其声阻抗分别为 Z_1 与 Z_2 ，则反射系数 R 和透射系数 T 可表示为：

$$\begin{cases} R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \\ T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \end{cases} \quad (2)$$

当 $Z_1 > Z_2$ 时，反射系数 R 为正，表明大部分弹性波被反射，而透射系数 T 较小，意味着仅有少量弹性波能够穿透界面进入 PE 管道内部。综上，弹性波在土壤-PE 管道交界面处的反射效应显著强于透射效应，且反射系数越大，地表检波器接收到的管道反射信号强度越高。上述弹性波传播与界面作用的基础特性，为本文埋地 PE 管道弹性波成像定位方法提供了核心理论支撑。

1.2 埋地 PE 管道弹性波定位原理

弹性波定位埋地 PE 管的原理如图 1 所示，其基本工作原理为首先根据现有施工信息初步判断地下管道的走向，随后沿管道相交的方向等间距布置多条由振源和若干检波器组成的测线，如图 2 所示。通过振源激振产生声波信号，弹性波经土壤传播至地下管道，并在管道表面发生反射，传播至地表后被多路检波器接收，通过分析各检波器采集的弹性波信号相对于振源信号的时间延迟，可计算出管道在该测线下的空间位置。结合多条测线的定位信息，可实现对目标区域的埋地 PE 管的精确定位。

采用 COMSOL 建立二维仿真模型对弹性波的传播特性和定位方法说明，如图 3 所示。模型设置管道埋深

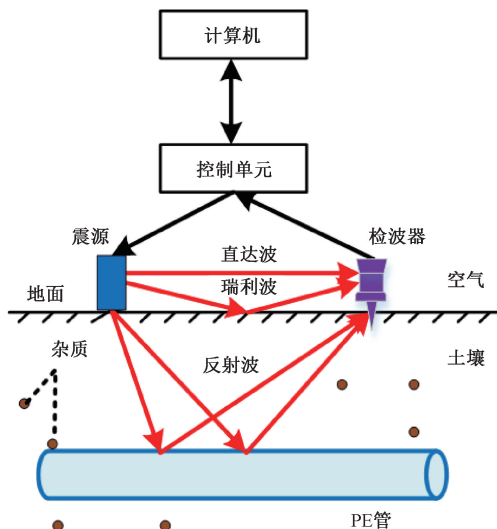


图 1 弹性波法定埋地管道原理

Fig. 1 Elastic wave legal position buried pipeline schematic diagram

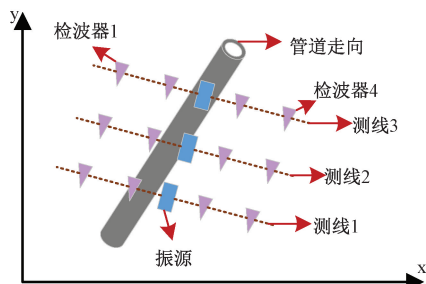


图 2 管道定位检波器布置

Fig. 2 Pipeline positioning geophone layout

为 1.5 m，4 个检波器关于振源对称，相邻检波器间距为 $l=0.4$ m。采用中心频率为 500 Hz 的雷克子波作为激励脉冲信号，持续时间为 $T=0.004$ s，信号波形如图 4 所示。定义土壤材料为紧密砂，管道材料选择常用的 PE 管道，参数如表 1 所示。

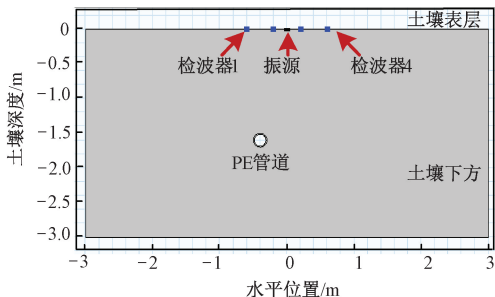


图 3 管道定位建模几何

Fig. 3 Pipeline positioning modeling geometry

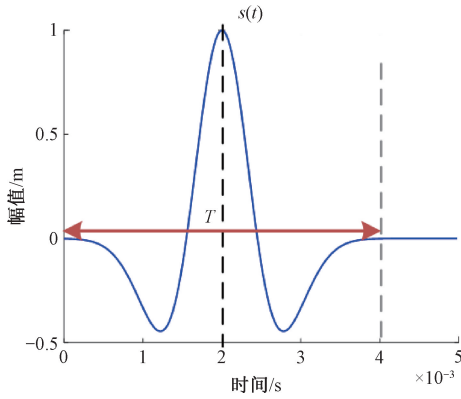


图4 激励脉冲信号波形

Fig. 4 Excitation pulse signal waveform diagram

表1 土壤与 PE 管的材料参数

Table 1 Material parameters of soil and PE pipe

材料属性	纵波波速/ ($m \cdot s^{-1}$)	横波波速/ ($m \cdot s^{-1}$)	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)
紧密砂	236	126	2 000
PE 管	2182.2	890.87	900

通过仿真得到不同时刻弹性波沿土壤 Z 方向的位移云图,如图 5 所示。由图 5(a)可知,当 $t=0.0082\text{ s}$ 时,随着传播距离的增大,P 波和 S 波逐渐完全分离,由于 $v_p > v_s$,P 波先于 S 波到达管道表面,同时瑞利波已经到达 2、3 检波器;图 5(b)中,当 $t=0.0099\text{ s}$ 时,P 波已经到达管道并在土壤-PE 管交界处产生反射纵波继续传播,而 S 波由于速度较慢还未到达;由图 5(c)可知,当 $t=0.0168\text{ s}$ 时,S 波到达管道并产生反射横波,此刻土壤中同时存在直达纵波、直达横波、瑞利波、反射纵波和反射横波,且反射纵波先于反射横波到达检波器。

分析可知,检波器依次接收的弹性波为直达波(直达纵波和直达横波)、瑞利波、反射波(反射纵波和反射横波)。由弹性波法定位原理可知,与 PE 管位置相关的主要是反射波。由于在土壤中纵波衰减速度比横波慢且先到达到检波器,因此本文采取反射纵波定位 PE 管。另外,先到达的瑞利波和直达波会对定位产生干扰,需要根据不同情况将其剔除^[23]。

设振源激振起始时刻为 0,第 k 个检波器接收到反射纵波信号的起始时间为 t_k 。由于各检波器与 PE 管距离不同,回波信号到达时间也有差异。若各检波器的反射纵波信号在时域中向左平移 t_k ,则各路反射波信号将在时间轴上对齐,只是幅值不同。

将图 3 中土壤表层以下的部分记为测量面,以振源为原点 O 建立坐标系,测线水平向右为 x 轴正方向,如图 6 所示。记测量面大小为 $H \times W$,相邻检波器间距为 l ,4 个检波器坐标为记 4 个检波器的坐标为 $(x_k, 0)$,其中 $x_k = -1.5 \cdot l + l \cdot (k - 1), k = 1, \dots, 4$,管道顶点坐标为

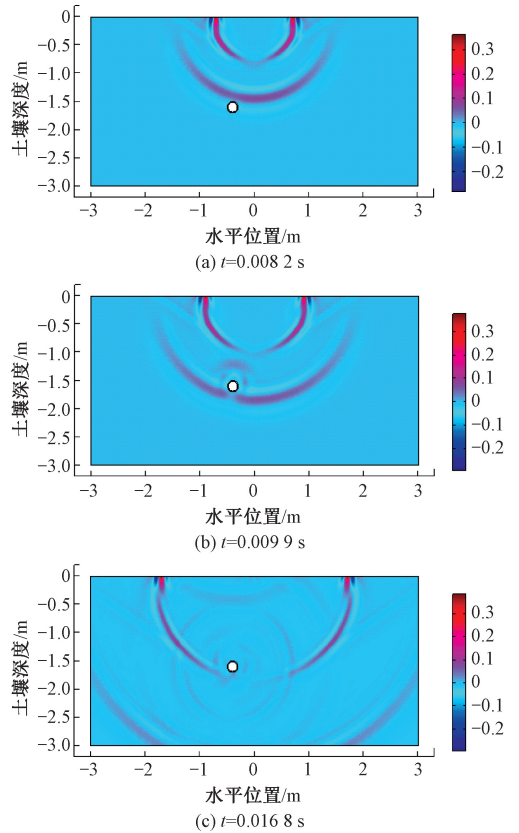


图5 不同时刻土壤域 Z 方向位移云图

Fig. 5 Z-direction displacement cloud map of soil domain at different time

(d, h)。将测量面划分为若干个正方形的网格单元,并记第 i 行第 j 列单元坐标为 A_{ij} 。假设划分的每个单元的中心点为反射点,即每个单元都可能是管道的位置。记 c_x 为反射单元中心的横坐标, c_y 为反射单元中心的纵坐标,计算公式为:

$$\begin{cases} c_x = (j - 1) \cdot dx + \frac{dx}{2} - \frac{W}{2} \\ c_y = -(i - 1) \cdot dx - \frac{dx}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: dx 为网格单元边长。弹性波从振源传播到埋地 PE 管表面,再被管道表面反射回第 k 个检波器所经历的路程可表示为:

$$S_k = \sqrt{c_x^2 + c_y^2} + \sqrt{(c_x - x_k)^2 + c_y^2} \quad (4)$$

则弹性波从振源到管道表面,经管道表面反射传至第 k 个检波器的传播时间可表示为:

$$t_k = S_k / v_p \quad (5)$$

计算各检波器反射纵波信号相对于振源的时间延迟,即反射纵波到达检波器的时间。以反射纵波到达检波器的时刻为分界点,对提取的反射波信号截取部分信号,将截取的信号按照计算的传播时间依次进行时延,然

后将平移后的信号在一定时间范围内叠加,得到该单元对应的信号叠加值。对其他反射单元重复上述步骤,得到叠加值矩阵,按照叠加值大小将其转化彩图并输出最大的叠加值对应的坐标,该坐标就是该条测线上管道位置。结合所有测量线上管道位置,得到探测区域的 PE 管道位置。

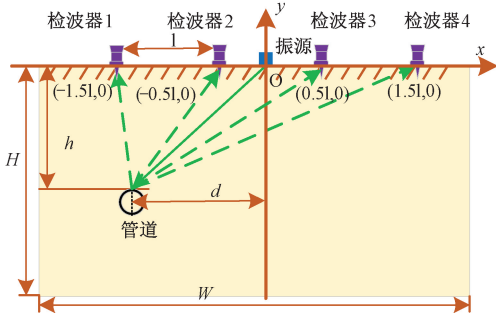


图 6 测量面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the measurement surface

2 基于 EEMD 联合小波阈值的信号降噪

在现场埋地管道探测过程中,因土壤衰减、设备自身及周边环境噪声等多种因素的共同作用导致最后检波器接收到的信号出现不同程度的失真,从而降低管道定位精度。因此,需要在提取反射波信号之前对检波器接收信号进行降噪处理,以提升后续信号分析与定位的准确性。

2.1 EEMD 联合小波阈值降噪原理

弹性波传播过程中受大量随机干扰影响,导致检波器接收信号表现为非线性且非平稳的特性。针对这类信号,常用的降噪方法主要包括小波变换^[24]和经验模态分解类^[25],以及基于这两者的改进算法。其中,小波阈值法作为一种基于小波变换的典型降噪方法,能够有效抑制高频噪声并保留信号的主要特征。但该方法的自适应性较差,降噪性能对小波基的选择及分解层数设置高度敏感。经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)作为一种自适应的信号处理方法,通过将复杂信号分解为一组固有模态函数(intrinsic mode functions, IMFs),实现信号特征提取与噪声抑制。但 EMD 在实际应用中易出现模态混叠问题,即不同尺度的信号成分混合,进而影响降噪效果。为缓解此问题,提出了集合经验模态分解方法,该方法通过向原始信号中加入不同幅度的高斯白噪声,进行多次分解并对所得结果取平均,有效减弱了模态混叠的影响^[26]。

本文将具有良好时频局部化特性的小波阈值方法与自适应的 EEMD 算法相结合^[27],并利用互相关系数筛选 IMF 分量,从而提取出信噪比较高的检波器信号,为后续的信号处理与管道定位提供可靠数据支持。

EEMD-小波阈值降噪具体步骤如下。

1) EEMD 分解。将声波信号进行 EEMD 分解,得到若干从高频到低频依次排列的 IMF 分量和残余项。(1)向原始信号 $f(t)$ 中加入强度为 ε 的高斯白噪声 $\omega_i(t)$,构造第 i 组扰动信号;(2)对每组扰动信号进行 EMD 分解,得到多个 IMF 分量;(3)为去除噪声影响,对 M 组对应的 IMF 分量求平均;(4)原始信号经分解得到若干个 IMF 分量和 1 个残余分量。

2) 区分有用信号和噪声分量。根据每个 IMF 分量与原始信号的互相关系数设定一个阈值,当 IMF 分量的互相关系数高于该阈值时,记为包含有用信息的有效分量,保留原始形态;反之,则记为包含噪声成分的无效分量,需进行降噪。对于第 i 个 IMF 分量 $IMF_i(t)$,计算其与原始信号 $f(t)$ 之间的互相关系数。

3) 对无效分量进行小波阈值降噪。(1)鉴于检波器接收信号的非平稳性与随机性,本文选用具有良好平滑性和近似对称特性的 sym6 小波基,并对信号进行 12 层小波分解,得到不同尺度的小波系数;(2)依据无偏风险估计准则自适应确定阈值,并采用软阈值法进行降噪处理。

4) 信号重构。重构经小波降噪后的 IMF 分量和有效分量,并输出降噪结果。

2.2 联合降噪结果与分析

选取在郊区采集的检波器数据,采样频率为 200 000 Hz,采样时间为 0.075 s。采样信号如图 7(a)所示。由图 7 可知,采样信号失真程度大,波形抖动明显。首先对该信号进行 EEMD 分解,在原始信号中加入强度为 0.2 的高斯白噪声,并进行 150 次集成分解,得到 13 个从低阶到高阶依次排列的 IMF 分量和 1 个残余分量 RES,如图 8 所示。然后计算每个 IMF 分量与原始信号的互相关系数,如表 2 所示。

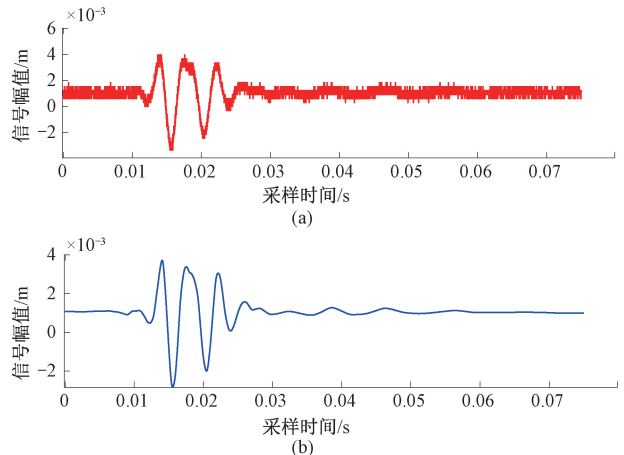


图 7 采样信号降噪前后对比

Fig. 7 Comparison chart of sampling signal before and after noise reduction

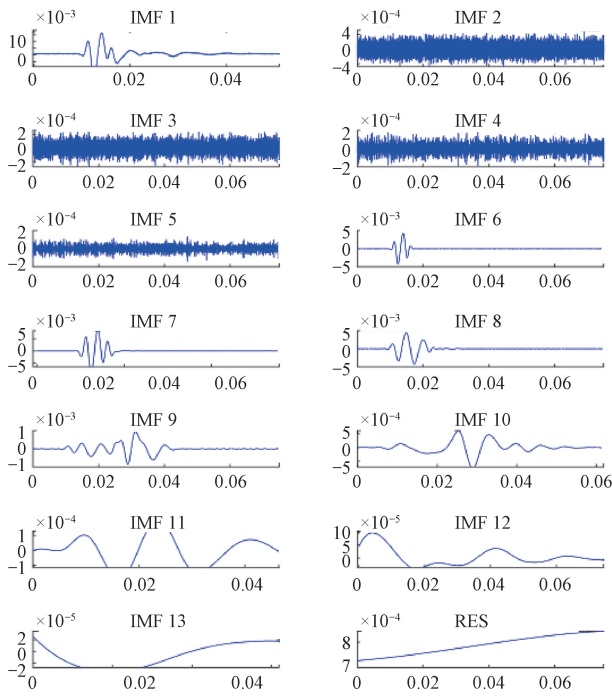


图 8 EEMD 分解结果

Fig. 8 EEMD decomposition result

表 2 各 IMF 分量互相关系数

Table 2 Autocorrelation coefficients of each IMF component

互相关系数	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10	IMF11	IMF12	IMF13	RES
R_i	1.000 0	0.056 6	0.041 9	0.030 5	0.024 3	0.872 0	0.938 7	0.634 5	0.266 7	0.119 3	0.027 1	0.003 4	0.002 6	0.002 9

记振源信号为 $x(t)$, 检波器接收信号为 $y(t)$ 。首先将连续时间信号离散为 $x(n)$ 和 $y(n)$ 并通过统计直方图数据, 估计不同时间延迟下信号间的联合概率分布 $P(x, y)$ 和边缘概率分布 $P(x)$ 、 $P(y)$ 。将这两种分布结果代入式(6)可得 $x(t)$ 和 $y(t)$ 信号间的互信息值^[29]：

$$I(x(t), y(t)) = \sum_{x \in x(t)} \sum_{y \in y(t)} P(x, y) \log \left(\frac{P(x, y)}{P(x) \cdot P(y)} \right) \quad (6)$$

为计算时间延迟, 将 $y(t)$ 在时间轴上平移 τ , 得 $y(t - \tau)$, 对于每个可能的延迟值 τ , 都计算 $x(t)$ 和 $y(t - \tau)$ 之间的互信息, 计算公式如下：

$$I(x(t), y(t - \tau)) = \sum_{x \in x(t)} \sum_{y \in y(t - \tau)} P(x, y) \log \left(\frac{P(x, y)}{P(x) \cdot P(y)} \right) \quad (7)$$

通过比较不同时延值下的互信息值, 互信息最大值对应的延迟值 τ 就是检波器接收信号相对于振源信号的时间延迟。基于互信息函数法的时延计算精度受直方图分箱数量和最大时延范围的影响。一般地, 分箱数太少会粗化概率估计, 太多会导致过拟合和估计噪声。最大时延范围决定了对信号进行平移范围的大小, 若曲线在较小范围内达到峰值, 可以减小该值, 反之, 则增大该值。

如果互相关系数的阈值设定为 0.1, 从表 2 可知, 噪声主要分布在 IMF2~IMF5、IMF11~IMF13 和 RES 中, 其余分量为有效分量。将 IMF12、IMF13 分量的剔除, 并对 IMF2~IMF5、IMF11 进行小波阈值降噪, 最后重构信号并输出滤波结果。联合算法降噪结果如图 7(b) 所示, 对比原始信号与降噪信号可知, 降噪信号波形相比原始信号更加平滑, 噪声明显减弱, 幅值略低于原始信号, 降噪前后波形基本吻合。虽然信号波形仍存在轻微振荡, 但该降噪算法能够有效去除噪声, 同时最大程度保留信号中的有效信息, 减少有用细节的损失, 故该方法可用于检波器接收信号降噪, 能够有效提高信号质量。

3 基于互信息函数法的管道反演成像

3.1 基于互信息函数计算时间延迟

互信息量化了两个信号或随机变量之间的依赖性。信号间的依赖性越强, 它们的互信息值也越大^[28]。故通过计算不同时间延迟下, 振源信号与反射信号的互信息, 并寻找最大互信息值所对应的延迟时间, 可以确定信号间的时间延迟。

本文根据弹性波特性和传播原理设置直方图分箱数量和最大时延范围分别为 100、-0.02~0.02 s。

3.2 埋地 PE 管道成像与分析

基于 1.2 节的仿真检波器数据, 对其剔除瑞利波和直达波后计算各路反射波信号与激励信号 $s(t)$ 的互信息函数, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 互信息函数在负时刻出现峰值, 这是因为反射纵波先于反射横波到达, 且二者相对于振源都是延迟信号, 故互信息函数从左往右的第 1 个峰值对应反射纵波与激励信号的互信息函数最大值, 峰值对应横坐标的绝对值即为该检波器的反射纵波相对于振源信号的时间延迟 τ_k , 也就是反射纵波到达第 k 个检波器的时间。

对于反射单元, 将第 k 路反射波信号以最大时延值 τ 为分界点, 分别向前向后截取激励信号 $s(t)$ 的持续时间 T , 得到反射纵波信号。然后将截取后的四路反射纵波信号按照式(5)计算的传播时间在时域上向左平移 t_k , 并将平移后的 4 路信号在 0~ T 内取绝对值相加, 得到该单元的叠加值, 同理计算其余反射单元的叠加值, 最终得到一个 300×600 的叠加值矩阵, 将其转化为彩图, 如图 10 所示, 可实现埋地 PE 管的二维截面成像。

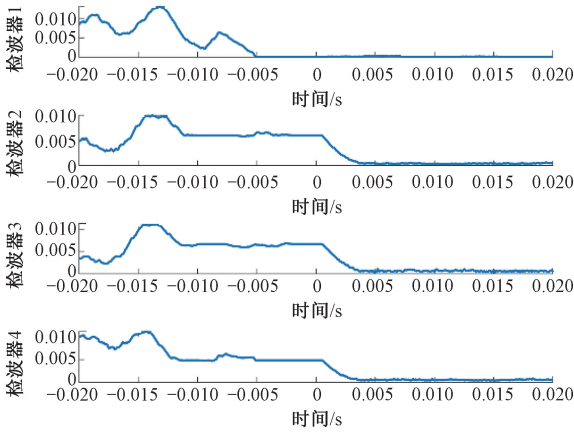


图 9 反射波信号与激励信号的互信息函数
 Fig. 9 The mutual information function of reflected wave signal and excitation signal

图 10 中实线圆圈为管道实际所在位置,虚线圆圈是本文方法定位得到的管道位置,靠近管道的网格单元颜色越亮,信号叠加值也越大,故判断管道位于最亮的单元格内。定位结果为 $(-0.335, -1.385)$,实际管道坐标为 $(-0.4, -1.5)$,记定位误差为定位管道顶点与实际管道顶点之间的距离,可知管道水平定位误差为 0.065 m,埋深误差为 0.115 m,定位误差为 0.067 m。仿真定位误差主要由网格划分的大小引起。由于网格划分不能保证管道位置位于网格单元中心,网格划分长度与管道定位误差成正比,减小单元尺寸虽可提升定位精度,但同时会增加计算复杂度。综合考虑精度与效率,后续网格单元边长统一设定为 0.01 m。

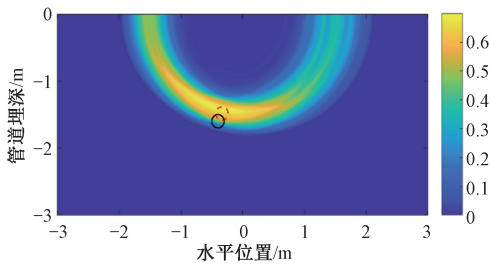


图 10 仿真实验管道成像图

Fig. 10 Acoustic imaging of the pipeline in simulation experiment

4 实验测试与分析

4.1 实验设置

该实验在郊区开展,试验场地预先埋设了直径为 0.2 m,埋深分别为 0.5 和 1 m 的 PE 管道。现场实验装置如图 11 所示,主要由负责振源信号的产生和放大的激励系统和数据采集系统组成。激励系统包括电磁激振

器、信号发生器等,数据采集系统包括纵波检波器阵列、采集卡和上位机。电磁激振器周期性地发射冲击弹性波,每次冲击间隔时间为 2 s。为初步减少瑞利波和横波的干扰,实验采用纵波检波器接收声波信号。在定位测试前测定埋深 0.5 和 1 m 的土壤纵波波速分别为 165.25 和 251.47 m/s。实验分别测得无管道、0.5 和 1 m 埋深管道的实验数据,每条测线均进行 3 次管道定位测试,通过整体移动测线获得其他测线数据。

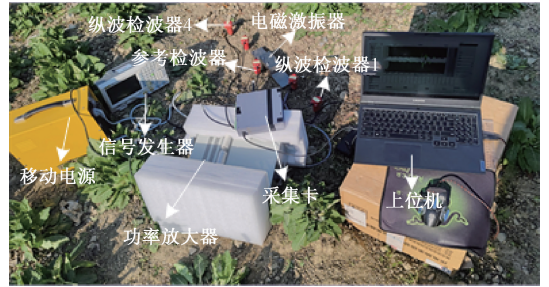


图 11 现场试验装置布置

Fig. 11 Layout of the field test setup

4.2 埋地 PE 管道定位结果

为验证本文所提 EEMD 联合小波阈值降噪算法与互信息函数法在管道定位中的有效性,针对 0.5 和 1 m 埋深的 PE 管道,分别进行多种定位方法的对比实验。首先,通过比较降噪前后互信息函数法的定位结果,评估联合降噪算法对定位精度的提升作用;其次,在对信号降噪的基础上,对比互信息函数法、互相关函数法及时域叠加法的管道定位误差,以分析不同成像定位方法的定位效果。所有对比实验均基于前述实验平台开展,定位精度以管道平均定位误差作为评价指标。

1) 不同降噪处理的管道定位结果

0.5 m 埋深管道大致走向及两条测线布置如图 12 所示,同侧检波器与振源间距分别为 0.2、0.4 m。采用 EEMD 联合小波阈值降噪算法与互信息函数法定位埋地 PE 管道,得到 0.5 m 埋深管道测线 1 首次定位成像结果如图 13 所示,PE 管水平位置在 $-0.025 \sim 0.065$ m,其埋深在 $-0.715 \sim -0.455$ m,已知两条测线管道顶点实际位置为 $(0, -0.5)$,测线 1 的最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 3 中测线 1-1,且测线 1 的平均定位误差为 0.054 m。测线 2 定位管道水平位置在 $0.005 \sim 0.025$ m,其埋深在 $-0.395 \sim -0.375$ m,其最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 3 中测线 1-2,其平均定位误差为 0.030 m。

对 0.5 m 埋深管道采集的检波器接收信号做未降噪处理的互信息函数法管道定位,算法得到测线 1 首次定位成像结果如图 14 所示,PE 管水平位置在 $-0.205 \sim -0.015$ m,其埋深在 $-0.715 \sim -0.365$ m,测线 1 的最大水

平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 3 中测线 2-1, 平均定位误差为 0.161 m。测线 2 定位管道水平位置在 -0.025 ~ -0.015 m, 其埋深在 -0.365 ~ -0.355 m, 其最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 3 中测线 2-2, 其平均定位误差为 0.038 m。

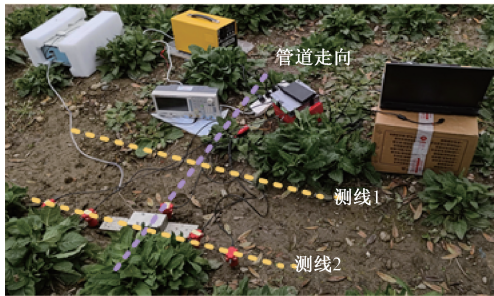


图 12 0.5 m 埋深 PE 管定位测试

Fig. 12 Localization test of a 0.5 m buried PE pipe

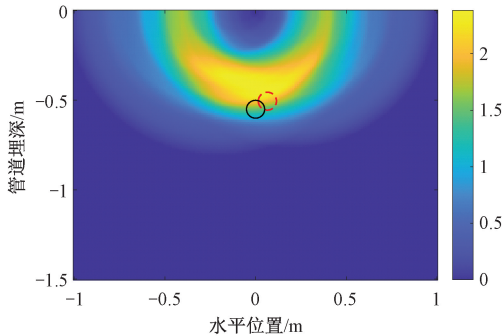


图 13 基于降噪的互信息函数法 0.5 m 埋深管道定位结果

Fig. 13 Localization result of a 0.5 m buried pipeline using the mutual information method with noise reduction

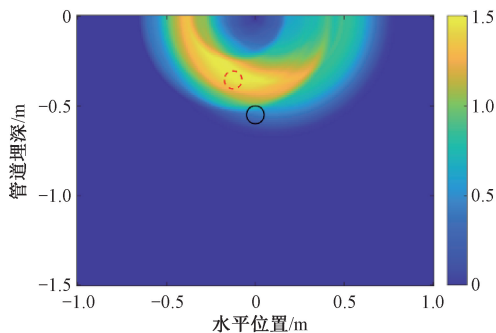


图 14 基于未降噪的互信息函数法 0.5 m 埋深管道定位结果

Fig. 14 Localization result of a 0.5 m buried pipeline using the mutual information method without denoising

埋深 1 m 的 PE 管现场管道走向及 3 条测线布置如图 15 所示, 同侧检波器与振源间距分别为 0.3、0.5 m。采用 EEMD 联合小波阈值降噪算法与互信息函数法定位埋地 PE 管道, 得到 1 m 埋深管道测线 1 首次管道定位成

表 3 不同降噪处理的 0.5 m 埋深管道定位误差
Table 3 Positioning errors of pipelines buried at a depth of 0.5 m with different noise reduction treatments (m)

管道测线	降噪+互信息		未降噪+互信息	
	测线 1-1	测线 1-2	测线 2-1	测线 2-2
最大水平误差	0.065	0.025	0.205	0.025
最大埋深误差	0.215	0.135	0.215	0.145
最大定位误差	0.071	0.041	0.218	0.460

像结果如图 16 所示, 定位得到的管道水平位置在 0.615 ~ 0.635 m, 其埋深在 -0.915 ~ -0.885 m, 测线 2 定位管道水平位置在 -0.312 ~ -0.285 m, 其埋深在 -0.875 ~ -0.845 m, 测线 3 定位管道水平位置在 0.475 ~ 0.605 m, 其埋深在 -0.845 ~ -0.785 m, 各测线的最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 4 中测线 1-1、测线 1-2 和测线 1-3, 同时计算所得测线 1、测线 2、测线 3 的平均定位误差分别为 0.060、0.094、0.100 m。

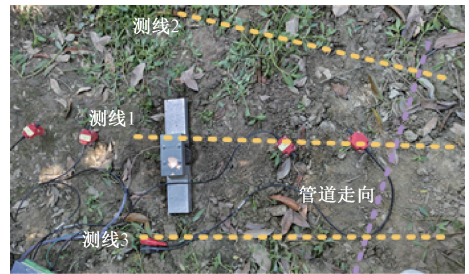


图 15 1 m 埋深 PE 管定位测试

Fig. 15 Localization test of a 1 m buried PE pipe

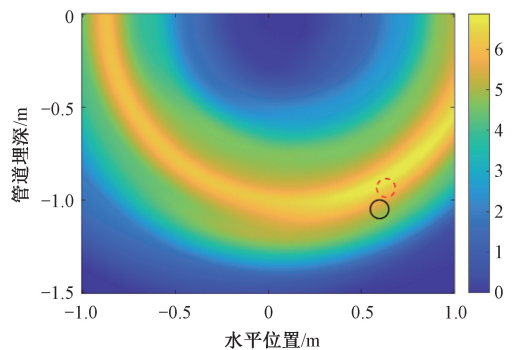


图 16 基于降噪的互信息函数法 1 m 埋深管道定位结果

Fig. 16 Localization result of a 1 m buried pipeline using the mutual information method with noise reduction

同理, 对 1 m 埋深管道采集的检波器接收信号做未降噪处理的互信息函数管道定位, 测线 1 首次定位成像结果如图 17 所示, 定位得到的管道水平位置在 0.864 ~ 0.965 m, 其埋深在 -0.105 ~ -0.005 m, 测线 2 定位管道水平位置在 -0.355 ~ -0.245 m, 其埋深在 -0.812 ~ -0.795 m, 测线 3 定位管道水平位置在 0.771 ~ 0.855 m,

其埋深在-0.214~-0.055 m,各测线的最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 4 中测线 2-1、测线 2-2 和测线 2-3,同时计算所得测线 1、测线 2、测线 3 的平均定位误差分别为 1.230、0.340、1.174 m。

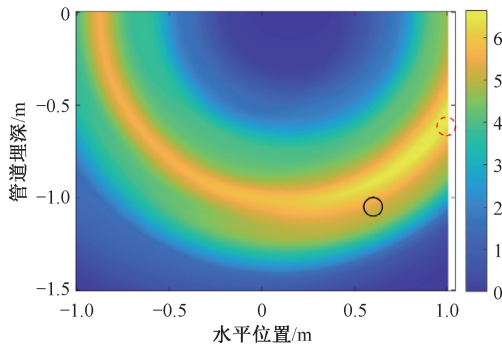


图 17 基于未降噪的互信息函数法 1m 埋深管道定位结果
Fig. 17 Localization error of a 1 m buried pipeline using the mutual information method without denoising

噪处理后选取互相关函数法和时域叠加法进行对比实验。互相关函数法 0.5 m 关于埋深管道测线 1 首次定位成像结果如图 18 所示,定位所得管道水平位置在-0.125~0.035 m,其埋深在-0.605~-0.305 m,平均定位误差为 0.081 m。测线 2 定位管道水平位置在-0.025~-0.015 m,其埋深在-0.365~-0.355 m,平均定位误差为 0.136 m,各测线的最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 5 中测线 3-1、测线 3-2。

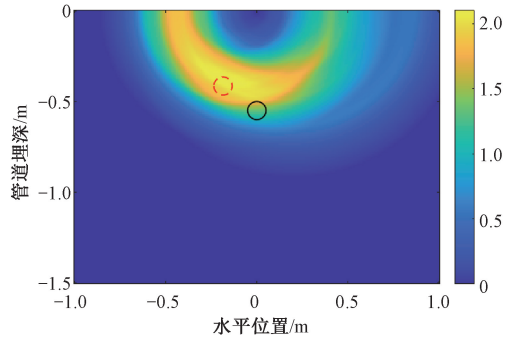


图 18 基于降噪的互相关函数法 0.5 m 埋深管道定位结果
Fig. 18 Localization result of 0.5 m buried pipeline using noise-reduced cross-correlation function method

2) 不同成像定位方法的管道定位结果

为验证本文提出的基于互信息函数的成像定位方法的有效性,利用不同降噪处理采集的实验数据,经联合降

表 4 不同降噪处理的 1 m 埋深管道定位误差

Table 4 Positioning errors of pipelines buried at a depth of 1 m with different noise reduction treatments (m)

管道测线	降噪+互信息			未降噪+互信息		
	测线 1-1	测线 1-2	测线 1-3	测线 2-1	测线 2-2	测线 2-3
管道实际位置	(0.6, -1)	(-0.4, -1)	(0.6, -1)	(0.6, -1)	(-0.4, -1)	(0.6, -1)
最大水平误差	0.035	0.115	0.125	0.365	0.045	0.255
最大埋深误差	0.115	0.155	0.215	0.995	0.205	0.945
最大定位误差	0.048	0.139	0.149	1.355	0.087	1.148

表 5 不同成像定位方法的 0.5 m 埋深管道定位误差

Table 5 Positioning errors of 0.5 m buried depth pipelines using different delay calculation methods (m)

管道测线	降噪+互信息		降噪+互相关		降噪+时域叠加	
	测线 1-1	测线 1-2	测线 3-1	测线 3-2	测线 4-1	测线 4-2
最大水平误差	0.065	0.025	0.125	0.125	0.055	0.165
最大埋深误差	0.215	0.135	0.195	0.195	0.195	0.175
最大定位误差	0.071	0.041	0.163	0.163	0.203	0.187

时域叠加法关于 0.5 m 埋深管道测线 1 首次定位成像结果如图 19 所示,定位所得管道水平位置在 0.045~0.055 m,其埋深在-0.335~-0.305 m,平均定位误差为 0.095 m。测线 2 定位管道水平位置在 0.035~0.065 m,其埋深在-0.345~-0.325 m,平均定位误差为 0.115 m,各测线的最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 5 中测线 4-1、测线 4-2。

同理,互相关函数法关于 1 m 埋深 PE 管道测线 1 的

首次定位成像结果如图 20 所示。定位得到的管道水平位置 0.815~0.995 m,其埋深在-0.612~-0.565 m,测线 2 定位管道水平位置在-0.335~-0.285 m,其埋深在-0.915~-0.845 m,测线 3 定位管道水平位置在 0.525~0.475 m,其埋深在-0.935~-0.845 m,各测线的最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 6 中测线 3-1、测线 3-2 和测线 3-3,同时计算可得测线 1、测线 2、测线 3 的平均定位误差分别为 0.442、0.105、0.375 m。

表 6 不同成像定位方法的 1 m 埋深管道定位误差

Table 6 Positioning errors of 1 m buried depth pipelines using different delay calculation methods (m)

管道测线	降噪+互信息			降噪+互相关			降噪+时域叠加		
	测线 1-1	测线 1-2	测线 1-3	测线 3-1	测线 3-2	测线 3-3	测线 4-1	测线 4-2	测线 4-3
管道实际位置	(0.6, -1)	(-0.4, -1)	(0.6, -1)	(0.6, -1)	(-0.4, -1)	(0.6, -1)	(0.6, -1)	(-0.4, -1)	(0.6, -1)
最大水平误差	0.035	0.115	0.125	0.395	0.115	0.125	0.215	0.155	0.255
最大埋深误差	0.115	0.155	0.215	0.435	0.155	0.155	0.105	0.085	0.255
最大定位误差	0.048	0.139	0.149	0.584	0.139	0.149	0.242	0.177	0.361

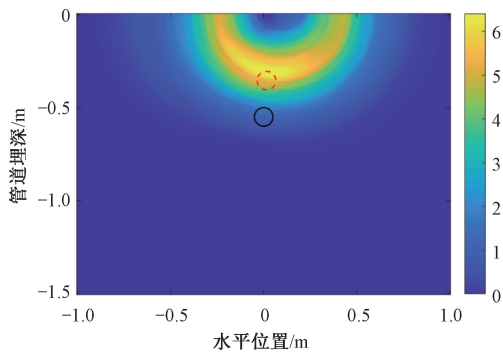


图 19 基于降噪的时域叠加法 0.5 m 埋深管道定位结果
Fig. 19 Localization result of 0.5 m buried pipeline using noise-reduced time-domain stacking method

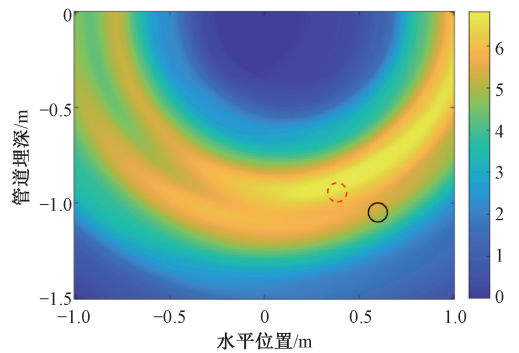


图 21 基于降噪的时域叠加法 1 m 埋深管道定位结果
Fig. 21 Localization result of a 1 m buried pipeline using noise-reduced time-domain stacking method

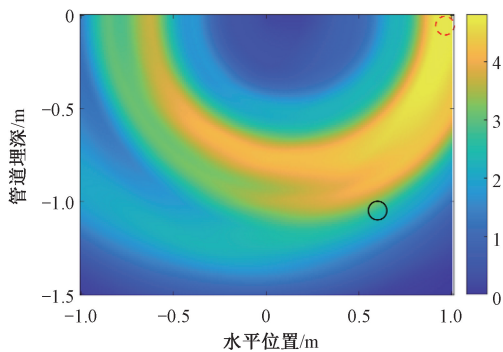


图 20 基于降噪的互相关函数法 1 m 埋深管道定位结果
Fig. 20 Localization result of a 1 m buried pipeline using the cross-correlation method with noise reduction

法实验结果比较如表 7 所示。由表 7 可知,对于埋深为 0.5 和 1 m 的管道,降噪处理后平均定位误差分别降低 0.058 和 0.830 m,表明所提出的降噪算法在提升定位精度方面具有显著效果。进一步对比 3 种成像定位方法的定位结果发现,相较于时域叠加法 and 互相关函数法,本文方法在 0.5 m 埋深下的平均定位误差分别降低 0.067 和 0.063 m,在 1 m 埋深下分别降低 0.222 和 0.057 m,这表明互信息函数在时延估计中具备更高的准确性。此外,随着埋深增加,3 种方法的平均定位误差均有所增加,说明传播距离与信号衰减会对深层管道的探测精度产生不利影响。

表 7 不同定位方法的平均定位误差

Table 7 Average positioning errors of different pipeline localization methods (m)

不同定位方法	降噪+互信息	未降噪+互信息	降噪+互相关	降噪+时域叠加
0.5 m 埋深管道	0.042	0.100	0.109	0.105
1 m 埋深管道	0.085	0.915	0.307	0.142

时域叠加法关于 1 m 埋深 PE 管道测线 1 的首次定位成像结果如图 21 所示。定位得到的管道水平位置在 0.385~0.415 m,其埋深在 -0.895~-0.755 m,测线 2 定位管道水平位置在 -0.555~-0.315 m,其埋深在 -1.085~-0.885 m,测线 3 定位管道水平位置在 0.715~0.855 m,其埋深在 -0.811~-0.745 m,各测线的最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差如表 6 中测线 4-1、测线 4-2 和测线 4-3,同时计算可得这 3 条测线的平均定位误差分别为 0.147、0.095、0.185 m。

3) 管道定位结果分析

为全面地评估不同定位方法的性能,将不同定位方

综合分析表明,本文所提成像定位方法在信噪比较低、反射波特征复杂的环境下依然能够保持较高的定位精度与稳定性。定位误差的主要来源如下:(1) 信号起始时间的确定偏差,在噪声背景较强或多路径反射明显时,激励波与反射波的起点判定存在微小延迟,造成时延估计误差;(2) 互信息函数参数(如分箱数与时延搜索范

围)设置不当造成的估计偏差。本文选取的参数基于多组仿真与实验验证结果,可在典型信噪比范围内获得稳定性能。后续研究将引入自适应起点检测算法和参数优化策略,以进一步提升复杂环境下的成像精度与算法适用性。

4.3 算法运行效率与运算复杂度分析

为进一步验证本文所提成像定位方法的工程可行性,对 3 种成像定位方法的实际运行时间与运算复杂度进行分析与比较。3 种算法均在相同计算环境下完成,并针对相同实验数据进行单条测线定位计算。

在实验运行时间方面,3 种算法均能在秒级时间内完成单条测线的定位计算,结果如表 8 所示。从计算流程上看,3 种成像定位算法的核心运算步骤有所不同。本文提出的互信息函数法通过计算信号间的联合概率分布和边缘概率分布来量化依赖性,复杂度约为 $O(N \cdot B)$,其中 N 为采样点数,等于采样时间与采样频率的比值, B 为直方图分箱数。该方法在噪声较强或信号非线性显著的情况下仍能稳定估计时延,具有更高的鲁棒性。互相关函数法通过滑动计算信号间的互相关函数获得时延,本文采用快速傅里叶变换实现,其计算复杂度约为 $O(N \cdot \log N)$,运行效率较高,但在低信噪比条件下易受噪声影响。时域叠加法需要对每个假设反射点进行多路信号移位与叠加,复杂度约为 $O(N \cdot M)$,其中 M 为检波器数量。该方法实现简单、易于并行,但随着测量网格密度的增加,计算量呈线性增长。

综上所述,本文提出的互信息时延法在抗噪性能与定位精度之间取得了良好平衡,能够在保证实时性的前提下显著提升成像质量。

表 8 不同定位算法的运行时间与计算复杂度比较

Table 8 Comparison of running time and computational complexity of different localization algorithms

成像定位方法	平均运行时间/s	时间复杂度
互信息函数法	23	$O(N \cdot B)$
互相关函数法	18	$O(N \cdot \log N)$
时域叠加法	15	$O(N \cdot M)$

5 结 论

本文提出了一种改进的弹性波成像埋地 PE 管道定位方法,采用 EEMD 与小波阈值联合算法对检波器接收信号进行降噪,并引入互信息函数法进行计算信号时延,实现了对埋深为 0.5 和 1 m 管道的有效探测。通过仿真与实验对所提方法进行验证,结果表明:利用联合降噪算法能够在保留有效信号特征的同时有效抑制噪声,显著提升管道定位精度。此外,互信息函数法在时延估计中表现出良好的抗干扰能力与鲁棒性,有效降低了管道定

位误差。同时,与传统成像定位法的对比结果表明,本文方法在秒级计算时间内即可完成定位反演,兼具较低运算复杂性与优异的抗噪性能,具有较高的工程应用价值。未来研究将结合自相关包络识别与信息熵优化策略,提升起始时间判定的准确性与互信息估计的稳定性,进一步增强本文方法在复杂环境下的鲁棒性与实用性。

参考文献

- [1] 陈思静, 胡祥云, 彭荣华. 城市地下管线探测研究进展与发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1236-1247.
CHEN S J, HU X Y, PENG R H. Review of urban underground pipeline detection [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1236-1247.
- [2] 赵东升, 杨理践, 耿浩, 等. 基于多尺度特征的管道环焊缝定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 118-129.
ZHAO D SH, YANG L J, GENG H, et al. Research on the localization method of pipeline girth weld based on multi-scale feature [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 118-129.
- [3] 蔡安安, 代小强, 李兆令, 等. 综合物探方法对城市 PE 燃气管道探测的应用研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(S1): 187-191.
CAI A A, DAI X Q, LI ZH L, et al. Application of integrated geophysical methods in the detection of urban PE gas pipelines [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2023, 45(S1): 187-191.
- [4] 曾岳梅, 贾向炜, 李英杰. 埋地 PE 管道定位探测技术综述[J]. 测绘通报, 2016(S1): 64-66, 88.
ZENG Y M, JIA X W, LI Y J. Review on locating technology for buried PE pipeline [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2016(S1): 64-66, 88.
- [5] 肖小汀, 李怡, 葛亮, 等. 埋地非金属管道雷达探测成像定位方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8): 223-233.
XIAO X T, LI Y, GE L, et al. Research on imaging and positioning method of buried non-metallic pipeline radar [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8): 223-233.
- [6] GE L, ZHANG C P, TIAN G Y, et al. Current trends and perspectives of detection and location for buried non-metallic pipelines [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(5): 134-162.
- [7] LIU Y, HABIBI D, CHAI D, et al. A comprehensive review of acoustic methods for locating underground pipelines [J]. Applied sciences, 2020, 10(3): 1031.
- [8] MUGGLETON J M, RUSTIGHI E. A novel method for

- the remote condition assessment of buried pipelines using low-frequency axisymmetric waves [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 744 (1): 012056-012056.
- [9] MUGGLETON J M, KALKOWSKI M, GAO Y, et al. A theoretical study of the fundamental torsional wave in buried pipes for pipeline condition assessment and monitoring[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 374: 155-171.
- [10] GHARAMOHAMMADI A, BEHNIA F, AMIRI R. Imaging based on correlation function for buried objects identification [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(18): 7407-7413.
- [11] BAUMANN D, HAGELTHORN E, HILDEBRAND R, et al. Buried object localization by spectral analysis of surface wave reflections[J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2024, 54(1): 045002.
- [12] GAO Y, MUGGLETON J M, LIU Y, et al. An analytical model of ground surface vibration due to axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 395: 142-159.
- [13] GAO Y, LIU Y. Theoretical and experimental investigation into structural and fluid motions at low frequencies in water distribution pipes [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 90: 126-140.
- [14] YAN B Y, TIAN J L, MENG X H, et al. Vibration characteristics and location of buried gas pipeline under the action of pulse excitation [J]. *Processes*, 2023, 11(10): 2849.
- [15] 葛亮, 王甜, 肖小汀, 等. 基于时域叠加的声学埋地 PE 管道定位新方法[J]. *天然气工业*, 2022, 42(9): 111-121.
- GE L, WANG T, XIAO X T, et al. A new acoustic positioning method for buried PE pipeline based on time-domain superposition[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(9): 111-121.
- [16] QI Y S, WANG X H, YANG L, et al. A non-excavation detection method for buried PE pipelines based on 3D time-domain stacking focusing of elastic wave reflection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 35(2): 025120.
- [17] QI Y S, WANG X H, YANG X Y, et al. Nonexcavation localization method for buried PE pipes based on elastic wave reflection imaging and the BPA method[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(11): 17987-17998.
- [18] 李瑾, 行鸿彦, 吴叶丽, 等. 基于敲击声音信号的墙体内管道探测方法[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(2): 1-6.
- LI J, XING H Y, WU Y L, et al. A knock detection method for pipelines in walls based on refined composite multi-scale dispersion entropy [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(2): 1-6.
- [19] 李瑾, 行鸿彦, 王海峰, 等. 基于精细复合多尺度散布熵的墙体内管道敲击探测方法[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(2): 25-30.
- LI J, XING H Y, WANG H F, et al. Knock detection method for wall pipes based on refined composite multiscale dispersion entropy [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(2): 25-30.
- [20] LIU Y, HABIBI D, CHAI D, et al. A numerical study of axisymmetric wave propagation in buried fluid-filled pipes for optimizing the vibro-acoustic technique when locating gas pipelines[J]. *Energies*, 2019, 12(19): 3707.
- [21] DONG H P, LAI J, LI P J. Inverse obstacle scattering for elastic waves with phased or phaseless far-field data[J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2019, 12(2): 809-838.
- [22] 支雁飞, 张献民. 地下管道的瑞雷波动力学响应规律研究 [J]. *河北工业大学学报*, 2018, 47(6): 100-106.
- ZHI Y F, ZHANG X M. Research on seismic imaging pattern of Rayleigh waves in detection of underground pipes[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2018, 47(6): 100-106.
- [23] 葛亮, 何建, 高艳, 等. 利用时域叠加的声学成像法定位埋地 PE 管道[J]. *声学学报*, 2024, 49(3): 569-576.
- GE L, HE J, GAO Y, et al. Acoustic imaging detection using time domain stacking for buried polyethylene pipelines[J]. *Acta Acustica*, 2024, 49(3): 569-576.
- [24] SUBHEDAR J, UROOJ S, MAHAJAN A. Retinal optical coherence tomography image denoising using modified soft thresholding wavelet transform [J]. *Traitement du Signal*, 2023, 40(3): 1179.
- [25] 李一博, 刘嘉玮, 芮小博, 等. 基于集合经验模态分解和小波阈值的真空泵振动信号降噪方法[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(5): 450-457.
- LI Y B, LIU J W, RUI X B, et al. De-noising based on EEMD and wavelet threshold for vacuum pump vibration signals[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(5): 450-457.
- [26] 陈真诚, 吴贤亮, 赵飞骏. EEMD 结合小波阈值的光电容肌脉搏波信号降噪[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(6): 1327-1334.
- CHEN ZH CH, WU X L, ZHAO F J. Denoising and implementation of photoplethysmography signal based on

EEMD and wavelet threshold [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 27(6): 1327-1334.

- [27] 梁阿全, 高双玲, 郑嘉祺, 等. 基于 EEMD 和小波阈值方法的爆破数据预处理 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2024, 45(3): 55-62.

LIANG A Q, GAO SH L, ZHENG J Q, et al. Preprocessing of blasting data based on EEMD and wavelet threshold method [J]. *Observation and Research of Earthquake and Geomagnetism*, 2024, 45(3): 55-62.

- [28] 王鹏, 张善从. 基于最大信息系数的时延数据相关性分析方法 [J]. *电子测量技术*, 2015, 38 (9): 112-115.

WANG P, ZHANG SH C. Method for the correlation analysis of data with time delay based on maximal information coefficient [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, 38(9): 112-115.

- [29] WANG J P, HE H S, YU Y, et al. Robust time-delay estimation for speaker localization using mutual information among multiple microphone signals [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(16): 18559-18567.

作者简介



程吉祥, 2008 年于西南交通大学获得学士学位, 2011 年于西南交通大学获得硕士学位, 2015 年于西南交通大学获得博士学位, 现为西南石油大学副教授, 主要研究方向为无损检测、地下空间探测及人工智能等。

E-mail: chengjixiang0106@126.com

Cheng Jixiang received his B. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2008, M. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2011, and Ph. D. degree from Southwest Jiaotong University in 2015, respectively. Now he is an associate professor at Southwest Petroleum University. His main research interests include non-destructive testing, underground space exploration, and artificial intelligence.



赵红英, 2023 年于西华大学获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为声学无损检测和地下空间探测。
E-mail: hongyingzhao0711@foxmail.com

Zhao Hongying received her B. Sc. degree from Xihua College in 2023. Now she is

a M. Sc. candidate at Southwest Petroleum University. Her main research interest includes acoustic detection of buried PE pipes.



葛亮 (通信作者), 2007 年于西南石油大学获得学士学位, 2010 年于西南石油大学获得硕士学位, 2017 年于四川大学获得博士学位, 现为西南石油大学教授, 主要研究方向为复杂环境下的检测技术。

E-mail: cgroad@163.com

Ge Liang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2007, M. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2010, and Ph. D. degree in from Sichuan University in 2017, respectively. Now he is a professor in Southwest Petroleum University. His main research interest includes detection technology research in complex environment.



李志丹, 2008 年于西南交通大学获得学士学位, 2010 年于西南交通大学获得硕士学位, 2015 年于西南交通大学获得博士学位, 现为西南石油大学副教授, 主要研究方向为微波无损检测和成像等。

E-mail: dan.807@163.com

Li Zhidan received her B. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2008, M. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2010, and Ph. D. degree in from Southwest Jiaotong University in 2015, respectively. Now she is an associate professor at Southwest Petroleum University. Her main research interests include non-destructive testing technology and imaging.



肖小汀, 2010 年于重庆邮电大学获得学士学位, 2013 年于华南理工大学获得硕士学位, 2016 年于法国南特大学获得博士学位, 现为西南石油大学讲师, 主要研究方向为探地雷达无损检测技术和成像算法。

E-mail: xt_xiao@foxmail.com

Xiao Xiaoting received her B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2010, M. Sc. degree from South China University of Technology in 2013, and Ph. D. degree from University of Nantes, FR, in 2016, respectively. Now she is a lecturer in Southwest Petroleum University. Her main research interests include ground penetrating radar non-destructive testing technology and imaging algorithms.