

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905795

基于改进经验小波变换及互谱相位差谱的 供水管道泄漏声振动定位方法*

李帅永,程振华,毛维培,夏传强,杨雪梅

(重庆邮电大学 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065)

摘要:针对供水管道泄漏声振动信号的信噪比较低导致用于时延估计泄漏定位误差大的问题,提出基于改进经验小波变换及互谱相位差谱的供水管道泄漏定位方法。首先采用小波包分解得到不同尺度的信号能量谱,根据小波包能量谱局部极小值的分布自适应确定频带分割区间,解决了传统经验小波变换中频谱划分问题;然后基于频带分割区间构建正交小波滤波器组对信号进行经验小波变换分解得到多个分量,根据相关系数选取有效分量,同时利用有效分量的互谱相位差谱呈水平变化的频带对有效分量信号进行带通滤波,滤除干扰噪声;最后对滤波后的信号进行互相关时延估计来确定泄漏位置。仿真及实验结果表明,该方法能够有效的实现供水管道泄漏定位,并与互相关、VMD与互谱分析相结合的泄漏定位方法相比,平均相对定位误差分别减少6.7倍和1.5倍。

关键词: 经验小波变换;供水管道;频带划分;低信噪比;泄漏定位

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

Leak location based on the improved EWT and cross-power phase difference spectrum of vibro-acoustic signal in water-supply pipelines

Li Shuaiyong, Cheng Zhenhua, Mao Weipei, Xia Chuanqiang, Yang Xuemei

(Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Networked Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The low signal-to-noise ratio of leakage vibration signal in water-supply pipelines (WSP) may result in the large leak location error. To address this problem, a leak location method based on the improved empirical wavelet transform (EWT) and cross-power phase difference spectrum is proposed. Firstly, the local minimum of wavelet packet energy spectrum is used to segment the signal spectrum. The signal energy bands of different scales are achieved through wavelet packet decomposition. The distribution of energy value is used to determine spectrum segmentation interval, which solves the spectrum division problem of EWT. Then, the leakage vibro-acoustic signal is decomposed into multiple components by EWT according to the spectrum segmentation interval. Effective components can be selected according to the correlation coefficients, and the effective components are band-pass filtered using the frequency band with horizontal variation of the cross-power phase difference spectrum of the effective components. Finally, the leakage can be determined by cross-correlation time-delay estimation of the filtered effective component signal. Compared with cross-correlation, variational mode decomposition and cross-spectrum analysis, simulation and experimental results show that the proposed method can effectively locate the leak point, and the average relative location error is reduced by 6.7 times and 1.5 times respectively.

Keywords: empirical wavelet transform; water-supply pipeline; spectrum segmentation; low signal-to-noise ratio; leak location

收稿日期:2019-11-08 Received Date:2019-11-08

* 基金项目:国家自然科学基金(61703066)、重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0536)、重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2018jszx-cyztzxX0028)资助

0 引 言

随着城市化的快速发展,供水管道的建设也随之发展,但由于供水管道的运行环境恶劣或人为破坏等原因容易导致管道泄漏,给国家和人民造成了巨大的资源浪费和经济损失。因此,开展对供水管道泄漏定位研究,对保障供水管网的正常运行有重要意义^[1]。

当前,研究者们对供水管道的泄漏检测和定位方法进行了大量的研究,自 1991 年来,基于振动检漏的方法被用于供水管道,在供水管道中,振动信号可由加速度计或水听器在疑似泄漏点的管道两端获取,近 30 年来 Fuchs 等开发的基于振动信号互相关分析的泄漏定位技术被认为是最受欢迎和最有效地技术之一^[2-6]。而由于供水管道的工作环境复杂,在传感器从供水管道拾取到的泄漏声振动信号中,包含有大量的背景噪声(外界干扰噪声、旁支管道噪声等),使信号的信噪比降低,致使时间延迟估计误差增大,从而影响泄漏定位的精度。传统的泄漏定位方法一般采用互相关算法,通过对互谱密度函数加权,以减弱低频背景噪声干扰,提高信噪比^[7-9],但是在实际中管道泄漏声振动单一非频散模态信号具有低频、窄带特性,而传感器所采集到的管道泄漏声振动信号频率成分复杂,只根据接收信号的功率谱密度函数通常不能识别出泄漏信号频带,导致供水管道的泄漏定位准确性降低^[10-12]。于是,基于变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和互谱分析的供水管道泄漏定位方法^[13]被提出,该方法虽然有效的选取了含泄漏特征的分量,但 VMD 分解对信号的去噪性能严重依赖其模态分解数、惩罚因子、保真系数及收敛条件等参数设置的合理性^[14]。肖启阳等^[15]提出了一种基于经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)及互时频的泄漏定位方法,该方法通过互信息值选取分量,进而利用互时频法计算敏感分量的时间延迟估计实现泄漏定位。EWT 分解不需要设定大量参数,对输入信号具有良好的自适应性^[16],但需要人工预设单分量分解的个数,若分解分量个数较多,则会使某些分量与源信号之间的互信息值增大,造成分量选取准确性降低;若分解分量个数较少,则单分量信号频率成分复杂,进而导致时间延迟估计误差的增大^[17]。

为了改进 EWT 方法中单分量分解个数需要人工预设的不足,针对管道泄漏声振动信号的信噪比低导致定位误差的问题,本文提出一种基于改进的经验小波变换地供水管道泄漏定位方法。首先通过小波包分解对泄漏声振动信号进行处理,得到不同尺度上的信号能量频带,根据能量值的大小对能量频带进行自适应分割,得到频带分割区间;根据频带分割区间,通过经验小波定义分割区间的正交小波滤波器组对两路管道泄漏声振动信号进行分割,得到多个调频-调幅(amplitude modulated-

frequency modulated, AM-FM)分量;利用互相关系数选取有效分量,进而对有效分量进行互谱分析,提取互谱相位差谱呈水平变化的频段进行互相关,从而减小时间延迟估计误差,提高泄漏定位的准确性。最后,通过仿真与实验联合验证该方法的有效性。

1 基于互相关时延估计的泄漏定位

如图 1 所示,基于互相关时延估计的泄漏定位方法利用声源定位原理,泄漏点产生的泄漏噪声沿供水管道两端传输,被位于管道两端的加速度传感器拾取分别形成泄漏声振动信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$, 其数学模型为:

$$x_1(t) = s(t) + n_1(t) \quad (1)$$

$$x_2(t) = \alpha s(t - \tau) + n_2(t) \quad (2)$$

式中: t 为离散时间变量; $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 为传感器拾取的管道泄漏声振动信号; $s(t)$ 为泄漏源信号; $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 为管道中存在的干扰噪声; α 为衰减因子; τ 为未知的延迟时间。两信号的互相关函数为:

$$R_{xy}(m) = E[x(t)y(t-m)] \quad (3)$$

式中: E 代表数学期望; m 为时间参数。若假定源信号与噪声之间是零均值、互不相关的,则由式(1)~(3)可得:

$$R_{xy}(m) = E[\alpha s(t)s(t-\tau-m)] = \alpha R_{ss}(m+\tau) \quad (4)$$

式中: $R_{xy}(m+\tau)$ 为自相关函数,而由于 $R_{xy}(m+\tau) \leq R(0)$, 当 $m = -\tau$ 时,互相关函数 $R_{xy}(m)$ 取得最大值,选择该最大值点的位置作为时延估计值。

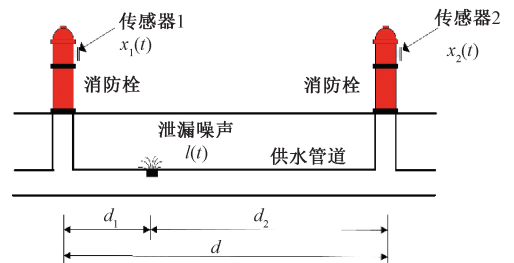


图 1 基于互相关时延估计的供水管道泄漏定位原理
Fig.1 The principle of leak location in pipelines based on cross correlation time delay estimation

对 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 进行时间延迟估计可得时延为 τ , 并结合两传感器之间的距离和泄漏声振动信号的传播速度,可得泄漏点的位置为^[7-8]:

$$d_1 = \frac{d - c\tau}{2} \quad (5)$$

式中: d_1 代表传感器 1 与泄漏点之间的距离; d 代表两传感器之间的距离。

然而通常所采集到的泄漏信号中含有大量背景噪声,使信号的信噪比降低,导致基于互相关时延估计的泄漏定位误差增大。为此,本文提出基于改进经验小波变

换及互谱相位差谱的供水管道泄漏定位方法,解决低信噪比下管道泄漏定位误差大的问题。

2 基于改进经验小波变换的供水管道泄漏定位原理

2.1 经验小波变换

经验小波变换是由 Gilles 等^[18]于 2013 年提出的一种信号处理方法,能够自适应划分信号频谱并构造小波滤波器组实现信号分解,得到不同频带的 AM-FM 分量。对于任意信号 $x(t)$,可以表示为:

$$x(t) = \sum_{k=0}^N x_k(t) \quad (6)$$

式中: $x_k(t)$ 为分解后的分量,被定义为调频-调幅信号。

经验小波变换是经验模态分解与小波分析相结合的自适应信号分解方法,具有充实的理论基础,基于信号的频谱特征构造小波滤波器组来分解信号,有效避免了经验模态分解方法产生的模态混叠现象^[19-20],其基本原理如下:

1) 定义信号各部分的分割边界 ω_n

对信号进行傅里叶变换得到信号频谱,若要得到 n 个频带,则对频谱范围 $[0, \pi]$ 划分成 n 个连续的频带段 $\Omega_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$,且 $\Omega_n = [0, \pi]$ 。

2) 经验小波定义带通滤波器组

Gilles 根据 Meyer 小波的构造思想构造经验小波,得到经验尺度函数 $\hat{\varphi}_n(\omega)$ 和经验小波函数 $\hat{\psi}_n(\omega)$,用来构造由 1 个低通滤波器组和 $n-1$ 个带通滤波器组成的小波滤波器组。

$$\hat{\varphi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_n \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_n}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_n)\right)\right], & (1-\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & \leq |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_{n+1} \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_{n+1}}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_{n+1})\right)\right], & (1-\gamma)\omega_{n+1} \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_{n+1} \\ \sin\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_n}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_n)\right)\right], & (1-\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$\gamma = \tau_n / \omega_n \quad (9)$$

$$\beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3) \quad (10)$$

$$\gamma < \min\left(\frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n}\right) \quad (11)$$

3) EWT 分解

通过传统的小波变换来定义 EWT,其中 F^{-1} 代表傅里叶逆变换, $\hat{\psi}_n(\omega)$ 和 $\hat{\phi}_1(\omega)$ 分别表示 $\psi_n(t)$ 和 $\phi_1(t)$ 的傅里叶变换, $\hat{\psi}_n(\omega)$ 和 $\hat{\phi}_1(\omega)$ 分别表示 $\psi_n(t)$ 和 $\phi_1(t)$ 的复共轭,经验小波变换的细节系数为:

$$W_x^e(n, t) = x(t), \psi_n(t) = \int x(\tau) \overline{\psi_n(\tau - t)} d\tau = F^{-1}[x(\omega) \hat{\psi}_n(\omega)] \quad (12)$$

逼近系数为:

$$W_x^e(0, t) = x(t), \phi_1(t) = \int x(\tau) \overline{\phi_1(\tau - t)} d\tau = F^{-1}[x(\omega) \hat{\phi}_1(\omega)] \quad (13)$$

因此,通过经验小波变换重构信号为:

$$x(t) = W_x^e(0, t) \phi_1(t) + \sum_n W_x^e(n, t) \psi_n(t) = F^{-1}[\hat{W}_x^e(0, \omega) \hat{\phi}_1(\omega) + \sum_{n=1}^N \hat{W}_x^e(n, \omega) \hat{\psi}_n(\omega)] \quad (14)$$

式中: $\hat{W}_x^e(0, \omega)$ 和 $\hat{W}_x^e(n, \omega)$ 分别表示 $W_x^e(0, t)$ 和 $W_x^e(n, t)$ 的傅里叶变换。

2.2 互谱相位差谱与相干函数

信号 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 的相关性在时域中由互相关函数来表述,而在频域中由互谱来表述。由维纳-辛钦定理,互谱可由互相关函数进行傅里叶变换求得:

$$S_{x_1, x_2}(f) = \alpha S_{ss}(f) e^{j2\pi f\tau} = \alpha S_{ss}(f) e^{j\theta_{x_1, x_2}(f)} \quad (15)$$

式中: $S_{ss}(f)$ 为源信号 $s(t)$ 的自谱, $\theta_{x_1, x_2}(f)$ 为两信号之间的相位差,因此在频域范围内, $\theta_{x_1, x_2}(f)$ 随频率呈线性变化,斜率为 $2\pi\tau$ 。

信号 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 的互谱为:

$$S_{x_1, x_2}(f) = X_1(f) X_2^*(f) \quad (16)$$

其中 $X_1(f)$ 与 $X_2(f)$ 分别为 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 的离散傅里叶变换系数, * 代表复共轭。由于实际数据是有限的,因此采用 Welch 平均周期图法进行互谱分析。将双边互谱 $S_{x_1, x_2}(f)$ 表示为单边互谱 $G_{x_1, x_2}(f)$, $G_{x_1, x_2}(f) = C_{x_1, x_2}(f) + jQ_{x_1, x_2}(f)$, 其中 $C_{x_1, x_2}(f)$ 为共谱密度函数, $Q_{x_1, x_2}(f)$ 为正交谱密度函数,则相位谱为:

$$\theta_{x_1, x_2}(f) = \arctan \frac{Q_{x_1, x_2}(f)}{C_{x_1, x_2}(f)} \quad (17)$$

互谱相位差谱是由两帧互谱相位谱中的相位数据相减得到,在泄漏噪声所在的频段中,两帧互谱相位谱的相位变化趋势相同,两帧互谱相位差谱中的相位差会呈水平趋势变化,因此提取互谱相位差谱中呈水平变化的频段进行定位,可以有效的降低时延误差。

相干函数是在频域中描述两信号的相关程度,其表达式为:

$$\gamma_{x_1, x_2}^2(f) = \frac{|G_{x_1, x_2}(f)|^2}{G_{x_1, x_1}(f) G_{x_2, x_2}(f)} \quad (18)$$

式中: $G_{x_1 x_1}(f)$ 与 $G_{x_2 x_2}(f)$ 分别为 Welch 平均周期图法得到信号 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 的单边自谱。若某个频段的相干函数越大, 则源信号在该频段的信噪比越高。

2.3 基于改进经验小波变换的供水管道泄漏定位算法

由于传统的经验小波变换需人工预设 AM-FM 分解的个数, 若分解的 AM-FM 分量个数较多, 各单分量信号的相关性会提高, 造成分量选取准确性降低, 若分解的 AM-FM 分量个数较少, 则单分量信号的频率成分复杂, 导致时间延迟估计误差的增大。因此, 本文提出的基于改进经验小波变换的供水管道泄漏定位方法, 流程如图 2 所示。

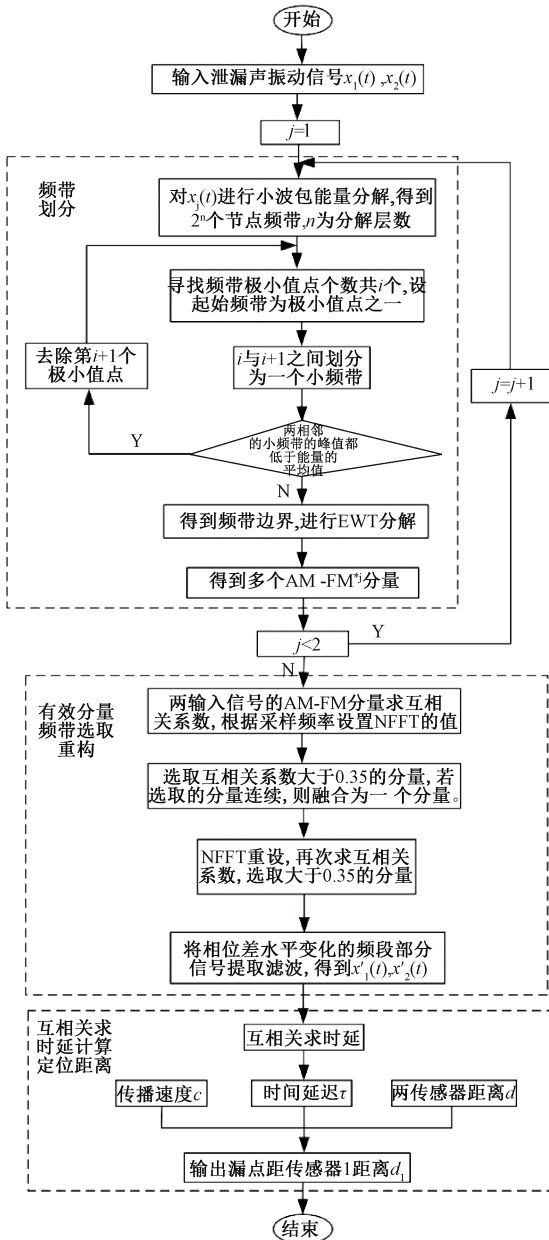


图 2 基于改进经验小波变换的泄漏定位流程
Fig.2 Leak location process based on the improved empirical wavelet transform

该方法利用小波包分解的方法得到不同尺度的信号能量频带, 根据各频带能量值的分布情况进行频带划分, 使分量的分解更加合理, 给出了选取含泄漏特征信号分量的方法, 有效地提高泄漏信号的信噪比, 进而减小时间延迟估计误差, 从而提高定位的准确性。

该算法的应用流程如下:

1) 输入流体管道泄漏声振动信号

输入两路管道泄漏声振动信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 分别进行步骤 2) ~ 4), 以 $x_1(t)$ 为例:

2) 小波包分解

首先要确定信号的分解层数 n , 即尺度数, 由式 (19) 估计确定; 分解层数大小在 J 值附近, 并且第 n 层每个小波包的频带大小要最接近采样频率的 $1/100$;

$$J = \log_2 \frac{f_s}{100} \quad (19)$$

3) 频带分割

对信号经小波包分解得到 2^n 个能量频带后进行频带段划分; 定义小波包分解第 n 层第 j 个频带上对应的能量为 $E_{n,j}$; 然后在第 n 层分解的能量频带寻找极小值点, 并设定第一个与最后一个能量频带都为极小值点^[21-23], 每两个相邻极小值之间的频段划分为一个临时频段, 然后求所有频段的平均值 \bar{E} ; 若两个相邻的临时频段的峰值都低于平均值 \bar{E} , 则进行频段融合, 否则为一个单独的频段, 最终得到所有的频带分割边界 ω_n 和频带分割段 $\Omega_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$ 。

4) 经验小波定义频带分割段的小波滤波器组

在步骤 3) 中得到确定的频带分割段 $\Omega_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$, 根据 Gilles 的重构经验小波的思想, 利用式 (7) 和 (8) 设计出由经验尺度函数构造的低通滤波器和经验小波函数构造的带通滤波器组成的小波滤波器组。

5) EWT 分解

管道泄漏声振动信号与经验小波函数 $\psi_n(t)$ 经过内积后可得经验小波变换的细节系数 $W_x^e(n, t)$, 泄漏声振动信号与经验尺度函数 $\varphi_1(t)$ 经过内积后可得经验小波变换的逼近系数 $W_x^e(0, t)$, 最终可得到分解后泄漏信号的调频 - 调幅分量为:

$$x_0(t) = W_x^e(0, t) \varphi_1(t) \quad (20)$$

$$x_k(t) = W_x^e(k, t) \psi_k(t) \quad (21)$$

对于管道泄漏声振动信号 $x_1(t)$ 被分解为: AM-FM₁¹, AM-FM₂¹, ..., AM-FM_{n1}¹;

则管道泄漏声振动信号 $x_2(t)$ 被分解为: AM-FM₁², AM-FM₂², ..., AM-FM_{n2}²。

6) 有效分量选取滤波

得到两路信号的调频 - 调幅分量后对其求互相关, 即 $x_1(t)$ 的每个调频 - 调幅分量都与 $x_2(t)$ 的每个调频 - 调

幅分量求互相关,并且此时的 NFFT (number of fast Fourier transform) 根据采样频率求取靠近采样频率值最近的 2 的指数为 k , 将 NFFT 的值设为 2^k , 它表示每次处理的分段数据长度, 从而保证分量选取的准确性, 选取互相关系数较大大于 0.35 的分量;

互相关系数用来描述两信号的相关性, 通过将互相关函数归一化得到相关系数:

$$\rho_{x_1, x_2}(m) = \frac{R_{x_1 x_2}(m)}{\sqrt{R_{x_1 x_1}(0) R_{x_2 x_2}(0)}} \quad (22)$$

其中 $|\rho_{x_1, x_2}|$ 的取值在 0 到 1 之间, 当 $\rho_{x_1, x_2} > 0$ 表示正相关; $\rho_{x_1, x_2} < 0$ 表示负相关; $\rho_{x_1, x_2} = 0$ 表示不相关。两信号的相关性一般按照 3 个等级划分: $|\rho_{x_1, x_2}| < 0.4$ 表示两信号低度相关; $0.4 \leq |\rho_{x_1, x_2}| < 0.7$ 表示显著相关; $0.7 \leq |\rho_{x_1, x_2}|$ 表示高度相关。由于信号自身存在的噪声干扰和受 NFFT 值大小的影响, 互相关系数值不会太高^[24], 取 0.35 作为互相关系数临界值。

若对于管道信号 $x_1(t)$ 选取的调频调幅分量下标和对应管道信号 $x_2(t)$ 选取的分量下标差值的绝对值小于等于 1, 即 $|n_1 - n_2| \leq 1$, 则融合为一个调频-调幅分量; 最终得到符合准则的调频-调幅分量:

对于管道信号 $x_1(t)$ 的调频-调幅分量: AM-FM₁^{x₁}, AM-FM₂^{x₁}, ..., AM-FM_m^{x₁}。

则管道信号 $x_2(t)$ 的调频-调幅分量: AM-FM₁^{x₂}, AM-FM₂^{x₂}, ..., AM-FM_m^{x₂}。

为保证功率谱曲线的平滑度, 需要选择合适的 NFFT 数值, 将得到符合准则的调频-调幅分量的最大时间延迟估计值, 换算得到采样点数, 则新 NFFT 的值不小于其 10 倍^[24]; 对两路信号的调频-调幅分量求互相关系数, 选取互相关系数值大于 0.35 的分量为有效调频调幅分量, 并求其互谱相位差谱, 将相位差水平变化部分的频段 $\omega_1 \sim \omega_2$ 进行滤波。

7) 互相关求时间延迟估计与泄漏定位

对两路信号的 $\omega_1 \sim \omega_2$ 频段分别滤波形成新的泄漏信号 $x'_1(t)$ 和 $x'_2(t)$, 然后进行互相关求得时延为 τ , 最后根据式(5)定位得到泄漏点的位置。

3 仿真信号验证分析

为验证分析本文的算法有效性, 通过仿真信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 进行研究分析。通过 MATLAB 生成采样率为 6 554 Hz 且采样点为 20 480 的随机高斯信号 $y_1(t)$, 对 $y_1(t)$ 进行带通滤波(300~400 Hz)处理来模拟供水管道泄漏声发射信号。 $y_2(t)$ 经 $y_1(t)$ 延迟 50 个采样点生成。对 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 添加信噪比为 15 dB 的白噪声, 并在 800~1 500 Hz 的频带内添加 SNR = -2 dB 的白噪声来模

拟真实供水管道低信噪比特性的泄漏信号, 最终生成的仿真信号分别为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$, 且 $x_1(t)$ 对于 $x_2(t)$ 的时间延迟为 -7.629 ms。仿真信号的时域信号和频谱如图 3 所示。

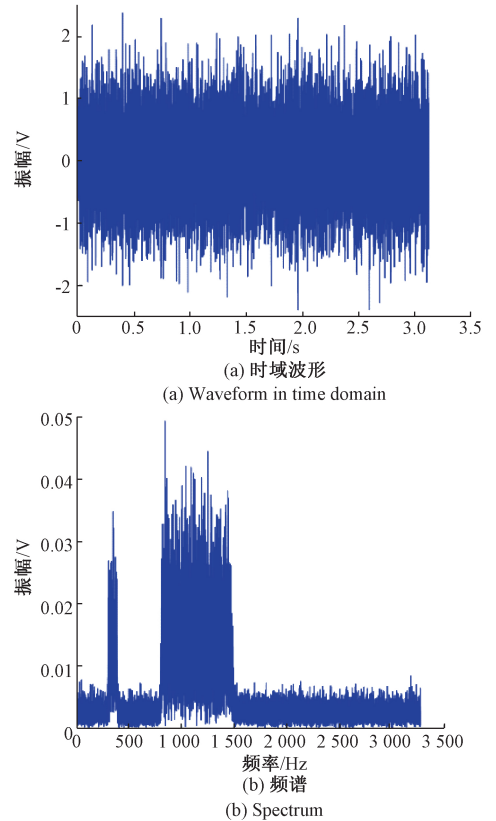


图3 仿真信号的波形及频谱

Fig.3 Waveform and spectrum of simulation signal

图 4 所示为仿针信号 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 互相关, 从图 4 中可得, 两信号的互相关系数峰值为 0.072 12, 根据相关系数准则, 两信号的相关性较小, 峰值处的横坐标代表时间延迟, 值为 -4.577 ms, 由于噪声干扰, 时间延迟的相对误差为 40%。

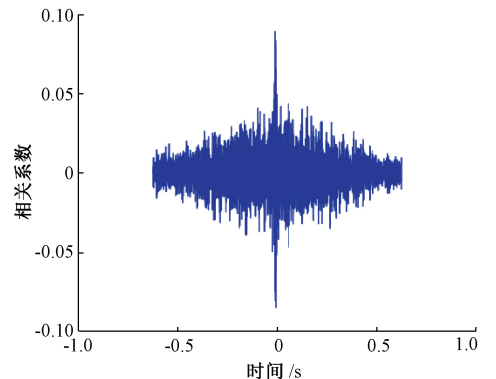


图4 互相关系数

Fig.4 Cross correlation coefficient

下面开始采用本文提出的方法对信号进行分析:

将采样率 $f_s = 6\ 554$ 带入式 (19), 可得 $J = 6$, 若 $n = 6$ 时, 第 6 层每个节点的频带段大小约为 51.2 Hz, 符合第 n 层每个节点的频带段大小约为采样率的 1/100 的要求, 因此确定信号的分解层数为 6。图 5 所示为信号经过小波包分解得到 64 个节点频带。

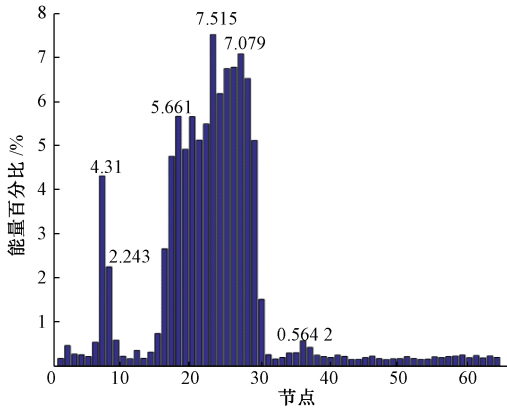


图 5 小波包分解能量谱图

Fig.5 Diagram of wavelet packet energy spectrum

经过本文提出的频带划分方法处理得到仿真信号各分量的频带边界: 0, 563.2, 665.6, 972.8, 1 075.2, 1 228.8, 1 638.4, 3 277 Hz。

图 6 所示为仿真信号对应频带边界的频谱分割。根据频带分割段, 由经验小波定义小波滤波器组, 并利用传统的小波变换构造 EWT, 可以实现信号的分解。图 7 所示为信号 $x_1(t)$ 分解后的 AM-FM 分量的时域图, 对 $x_1(t)$ 分解得到的 AM-FM 分量与 $x_2(t)$ 的分解得到的 AM-FM 分量求互相关系数, 根据本文所提出算法的 NFFT 选取准则, 此时的 NFFT 值为 4 096, 根据 AM-FM 的选取准则, 符合选取要求的分量为 AM-FM2。

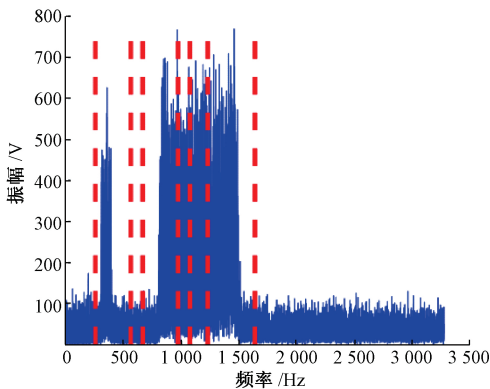


图 6 频谱分割

Fig.6 Spectrum segmentation

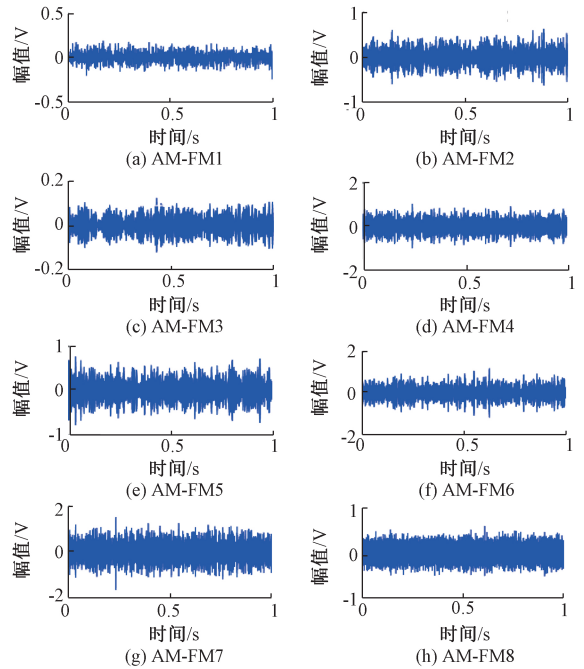


图 7 $x_1(t)$ 的 EWT 分解结果

Fig.7 EWT decomposition of $x_1(t)$

为了进一步去除干扰噪声, 提高信号的信噪比, 要对分量求互谱相位差谱, 选取相位差水平变换部分的频段滤波处理, 为保证功率谱曲线的平滑度, 则需要根据本文提出的 NFFT 变换准则降低 NFFT 的值, 如图 8 所示, 相关系数峰值为 0.853 2, 时间延迟为 -7.629 ms, 换算采样点数为 50, 因此新 NFFT 的值不低于其 10 倍, 为了更好的应用计算机计算处理, NFFT 的值应该为 2 的倍数, 因此 NFFT 设置为 512。求其相位差谱和相干函数如图 9 所示。

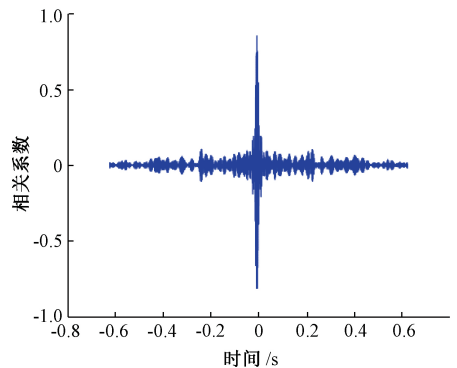


图 8 有效分量互相关系数

Fig.8 Cross correlation coefficient of effective components

选取图 9 相位差谱图中 294~409 Hz 呈水平变化的频段部分, 对两路信号的 294~409 Hz 频段进行信号滤波处理, 滤波信号的互相关函数如图 10 所示, 相关系数峰值为

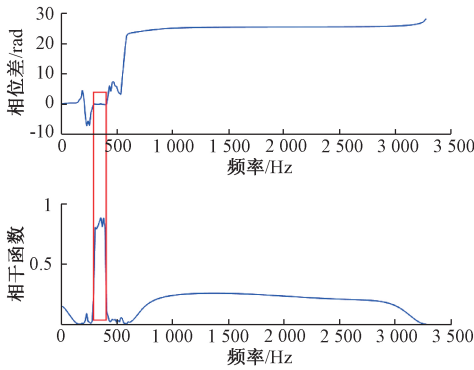


图9 有效分量相位差谱和相干函数

Fig.9 Cross-spectrum phase difference spectrum and coherence function of effective components

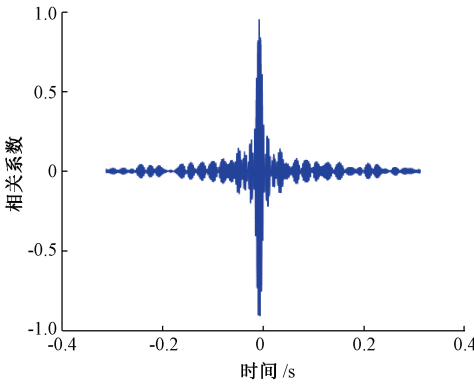


图10 滤波信号的互相关系数

Fig.10 Cross correlation coefficient of filtered signal

0.952 9, 并求其时间延迟 7.629 ms, 相对误差为 0%。

通过仿真实验表明, 该方法提取出的频带 (294 ~ 409 Hz) 包含泄漏信号所在的频带 (300 ~ 400 Hz), 并且时间延迟误差低于互相关方法的 40%。

4 供水管道泄漏定位实验分析

4.1 实验情况

在仿真试验中初步验证了改进 EWT 的供水管道泄漏定位算法的有效性, 下面通过实际信号验证该算法的可行性和优越性。本研究采用图 11 所示实验平台所采集到的数据对算法进行验证。实验平台中的管道是内径为 100 mm 的钢质管道, 管道压力为 0.2 MPa; 数据采集系统为德国 SebaKMT Correlux C-3 复合相关仪, 主要由 IEPE 加速度传感器、无线振动数据采集模块、上位机组成, 其中无线数据传输采用 433 MHz 射频模块, 上位机可控制两无线加速度传感节点进行数据同步采集, 并对传感数据进行频谱分析与存储, 为后续数据分析处理提供

数据来源。相关研究表明泄漏声振动信号能量频带主要集中在 1~2 kHz, 为此采用响应范围为 0.35~4 000 Hz 的 IEPE 压电加速度传感器^[1], 传感器安装在管道的两端, 拾取沿管壁传输的泄漏声振动信号, 通过无线方式传输给上位机。由声速经验模型可以得到泄漏声振动信号的传播速度为 1 250 m/s, 实验中设置仪器的采样频率为 6 554 Hz, 信号采样长度为 20 480 m, 开启消防栓阀门模拟供水管道泄漏状态, 产生的泄漏声振动信号向管道两端传输, 最终被位于管道两端的传感器拾取。

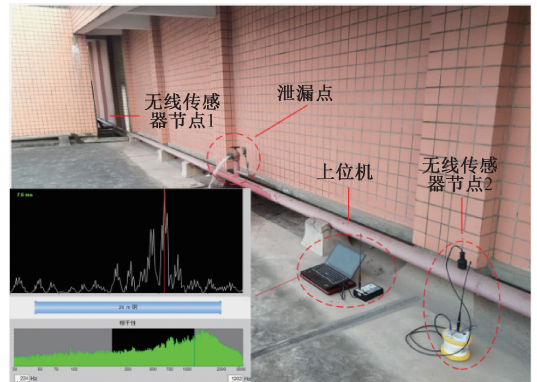


图11 实验平台

Fig.11 The experimental platform

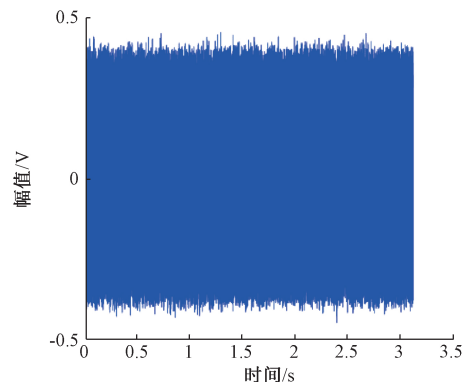
4.2 信号分析

选取一组由上述实验平台所采集到的泄漏声振动信号进行分析, 该数据的实验条件参数如表 1 所示, 设传感器 1 处采集到的信号为 $x_1(t)$, 传感器 2 处采集到的信号为 $x_2(t)$, 泄漏点距离代表泄漏点距传感器 1 的距离, 图 12 所示为信号 $x_1(t)$ 的时域波形和频谱。

表1 实验条件参数

Table 1 Experimental condition and parameters

采样率	采样长度	管道长度	泄漏点距离
6 554 Hz	20 480	16 m	8.9 m

(a) 时域波形
(a) Waveform in time domain

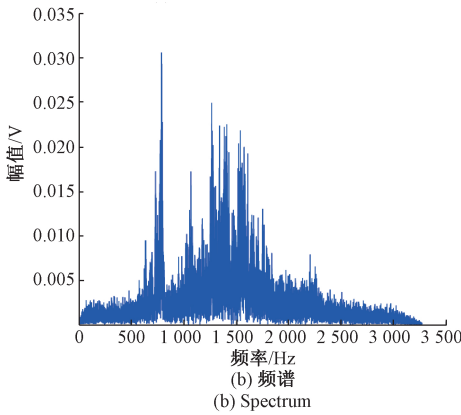


图 12 $x_1(t)$ 信号的时域波形及频谱

Fig.12 Waveform and spectrum of $x_1(t)$

图 13 所示为信号 $x_1(t)$ 与信号 $x_2(t)$ 的进行互相关得到的互相关系数图,由图 13 可得到两泄漏声振动信号的互相关系数峰值为 0.198 4,时间延迟为-0.000 305 2 ms,根据公式(10)可以求得泄漏点距离传感器 1 的距离为 8.190 75 m,则可求得该方法的定位误差为-0.709 25 m,相对定位误差为 4.43%。

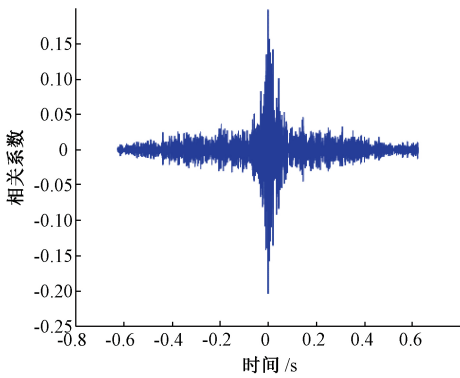


图 13 泄漏声振动信号互相关系数

Fig.13 Cross correlation coefficient of leakage acoustic vibration signal

以信号 $x_1(t)$ 为例,图 14 所示为该信号进行小波包分解的结果图,分解层数为 6,得到 64 个频带;利用本文的频带划分算法得到频带分割边界为:0,563.2,972.8,1 228.8,1 331.2,1 484.8,1 689.6,1 894.4,1 996.8,3 277 Hz。图 15 所示为信号 $x_1(t)$ 的频谱分割图。

如图 16 所示,根据频带分割频段,信号通过 EWT 分解得到 9 个 AM-FM 分量。同理可以得到 $x_2(t)$ 分解的 AM-FM 分量。

根据本文所提出算法的 NFFT 选取准则,此时的 NFFT 值为 4 096; $x_1(t)$ 的 AM-FM 分量与 $x_2(t)$ 的 AM-FM 分量求互相关系数,选取互相关系数值大于 0.35 的分量为有效分

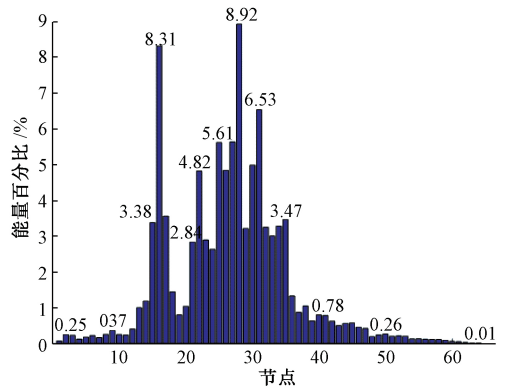


图 14 小波包分解能量谱图

Fig.14 Wavelet packet energy spectrum

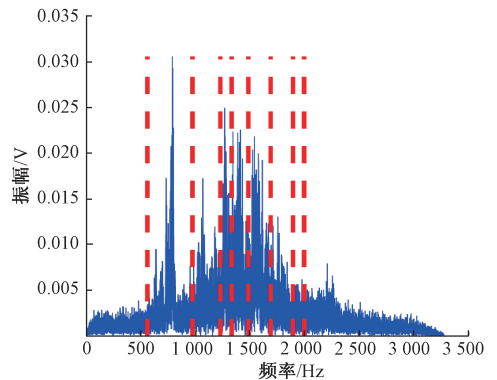


图 15 频谱分割

Fig.15 Spectrum segmentation

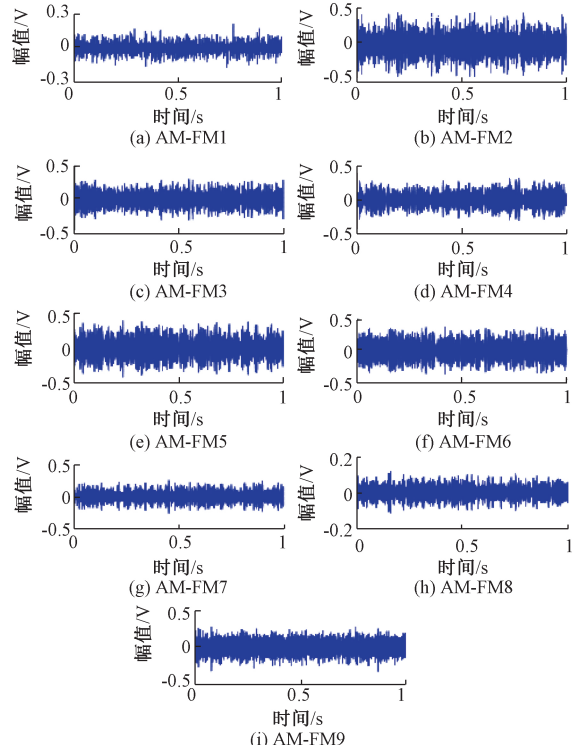
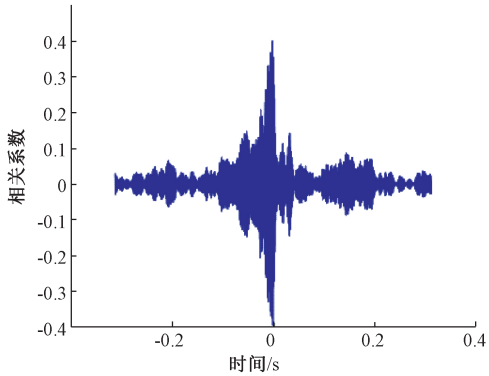


图 16 EWT 分解结果

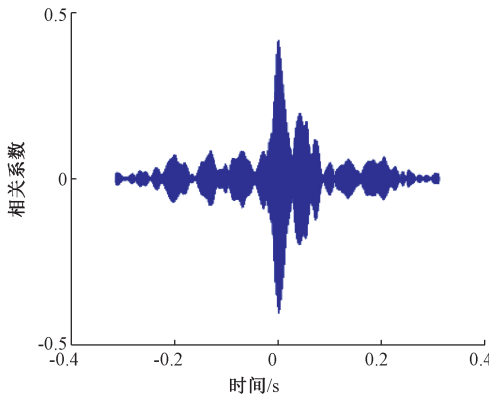
Fig.16 EWT decomposition

量;对于 $x_1(t)$, 有效分量为 $AM-FM_2^{s1}$ 和 $AM-FM_5^{s1}$, 对于 $x_2(t)$, 有效分量为 $AM-FM_2^{s2}$ 和 $AM-FM_6^{s2}$ 。

图 17 所示为对应有效分量进行互相关结果。其中, 图 17(a) 的相关系数峰值为 0.400 08, 时间延迟为 -1.831 ms, 图 17(b) 的相关系数为 0.416 3, 时间延迟为 1.831 ms, 根据本文提出的 NFFT 变换准则, 新的 NFFT 值设为 512, 图 18 所示为两信号的对应有效分量进行求互谱相位差谱及相干函数分析。



(a) $AM-FM_2^{s1}$ 与 $AM-FM_2^{s2}$ 互相关系数
(a) Cross correlation coefficient of $AM-FM_2^{s1}$ and $AM-FM_2^{s2}$



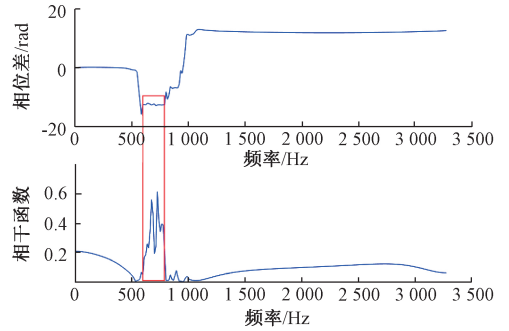
(b) $AM-FM_5^{s1}$ 与 $AM-FM_6^{s2}$ 互相关系数
(b) Cross correlation coefficient of $AM-FM_5^{s1}$ and $AM-FM_6^{s2}$

图 17 有效分量互相关系数

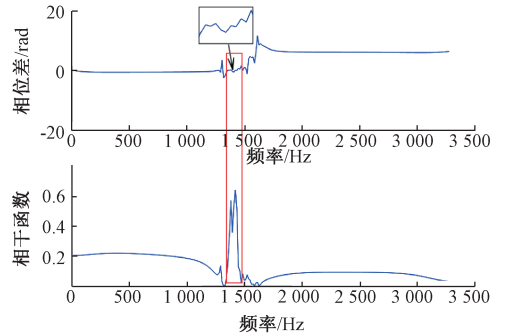
Fig.17 Cross correlation coefficient of effective components

分析图 18 可知, 相干函数值都较大, 图 18(a) 互谱相位差谱中 $601 \sim 793$ Hz 之间的相位差呈水平变化, 而图 18(b) 互谱相位差谱中的 $1344 \sim 1475$ Hz 之间的相位差变化较大, 图 18 中方框部分为其局部放大, 由于其相位差变化波动较大, 因此该频段不被选取, 选取图 18(a) 中相位差呈水平变化的频段进行滤波处理, 滤波信号的互相关函数如图 19 所示, 相关系数峰值为 0.490 9, 时间延迟为 -1.831 ms, 相对定位误差为 1.527% 。

为了充分表现本文算法的有效性, 采用 10 组数据分别通过本文算法, 互相关算法和 VMD 与互谱分析结合算法计算相对定位误差, 计算结果如表 2 所示, 算法对比结果如图 20 所示。其中, 互相关算法的平均相对定位误



(a) $AM-FM_2^{s1}$ 与 $AM-FM_2^{s2}$ 互谱相位差谱及相干函数
(a) Cross-spectrum phase difference spectrum and coherence function of $AM-FM_2^{s1}$ and $AM-FM_2^{s2}$



(a) $AM-FM_5^{s1}$ 与 $AM-FM_5^{s2}$ 互谱相位差谱及相干函数
(a) Cross-spectrum phase difference spectrum and coherence function of $AM-FM_5^{s1}$ and $AM-FM_5^{s2}$

图 18 有效分量相位差谱及相干函数

Fig.18 Cross-spectrum phase difference spectrum and coherence function of effective components

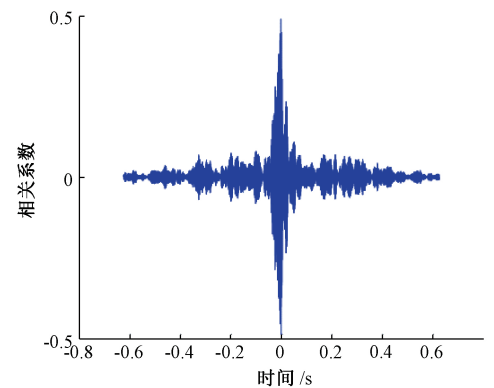


图 19 滤波信号的互相关系数

Fig.19 Cross correlation coefficient of filtered signal

差为 10.971% , 标准差为 12.36391% , VMD 与互谱分析结合算法的平均相对定位误差为 2.4493% , 标准差为 1.027136% , 本文所提出算法的平均相对定位误差为 1.6289% , 标准差为 0.364861% 。这表明在低信噪比的背景下, 改进经验小波变换的算法能够有效提取信噪比较高的分量, 从而提高定位的准确性。

表 2 不同定位方法的误差

Table 2 Errors in different location methods (%)

实验组别	相对定位误差		
	互相关算法	改进 EWT 算法	VMD 与互谱分析结合算法
1	4.433 0	1.527 0	3.911 0
2	4.433 0	1.527 0	3.911 0
3	15.160 0	1.527 0	2.048 9
4	47.340 0	1.527 0	2.048 9
5	12.470 0	2.138 0	2.139 0
6	4.433 0	1.527 0	3.911 0
7	2.630 0	2.138 0	2.139 0
8	12.470 0	2.138 0	2.139 0
9	16.030 0	1.120 0	1.123 4
10	10.310 0	1.120 0	1.123 4
平均值	10.971 0	1.628 9	2.449 3
标准差	12.363 91	0.364 861	1.027 136

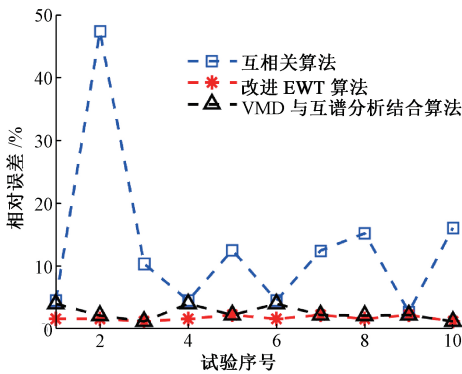


图 20 不同算法的实验结果对比

Fig.20 Comparison of experimental results of three algorithms

5 结 论

供水管道的工作环境较为复杂,由于干扰信号的影响使得传感器所采集的信号信噪比较低,导致泄漏信号特征不明显,为此,本文提出基于改进经验小波变换的供水管道泄漏声振动定位方法,并得出以下结论:

1) 经验小波变换中单分量个数不确定问题会导致泄漏信号分析缺乏可靠性,根据管道泄漏声振动信号特性,将改进的经验小波变换应用于供水管道泄漏定位,可以自适应确定信号分解的单分量个数,提取泄漏相关分量

信号,提高分量选取的准确性。

2) 通过互谱相位差谱确定滤波频带的信号,可以有效滤除噪声干扰信号,进而降低了泄漏定位的误差。但在互谱分析时的数据分段长度应为 AM-FM 分量互相关过程中最大时间延迟估计值所换算得到采样点数的 10 倍以上,否则会使功率谱曲线的不平滑,从而导致泄漏频带所在的互谱相位谱失去随频率呈线性变化的趋势。

3) 将该方法应用于供水管道泄漏定位实验,并与互相关方法和 VMD 与互谱分析相结合的方法相对比,仿真与实验结果表明,该方法的平均相对定位误差和标准差均低于互相关算法和 VMD 与互谱分析相结合的算法结果。

参考文献

[1] 杨进,文玉梅,李平.自来水铸铁管道泄漏声信号频率特征研究[J].应用声学,2006,25(1):30-37.
 YANG J, WEN Y M, LI P. Study on the frequency feature of acoustic leak signal in cast iron water distribution pipes[J]. Applied Acoustics, 2006, 25(1): 30-37.

[2] FUCHS H V, RIEHI E R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis [J]. Applied Acoustics, 1991, 33(1):1-19.

[3] HUNDAIDI O, CHU W T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes [J]. Applied Acoustics, 1998, 58(3)235-254.

[4] GAO Y, BRENNAN M J, JOSEPH P F. A comparison of time delay estimators for the detection of leak noise signals in plastic water distribution pipes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 292 (3-5) 552-570.

[5] YANG J, WEN Y, LI P. Leak location using blind system identification in water distribution pipelines, Journal of Sound and Vibration, 2008, 310 (1-2): 134-148.

[6] YANG J, WEN Y, LI P. The genetic-algorithm-enhanced blind system identification for water distribution pipeline leak detection [J]. Measurement Science Technology, 2007, 18 (7) 2178-2174.

[7] CARTER G C. Coherence and time delay estimation[J]. Proceedings of the IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1987, 75(2):236-255.

- [8] KNAPP C H, CARTER G C. The generalised correlation method for estimation of time delay [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1976, 24(4) : 320-327.
- [9] TUCKER W T, BENDAT J S, PIERSOL A G. Engineering application of correlation and spectral analysis[J]. Technometrics, 1982, 24(1) : 79-80.
- [10] 杨进,文玉梅,李平.泄漏声振动传播信道辨识及其在泄漏点定位中的应用 [J]. 振动工程学报, 2007, 20(3) : 260-267.
- YANG J, WEN Y M, LI P. Research on leak acoustic propagation channel identification and leak location for water distribution pipelines [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(3) : 260-267.
- [11] 杨丽丽,谢昊飞,李帅永,等. 气体管道泄漏声发射单—非频散模式定位[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4) : 969-976.
- YANG L L, XIE H F, LI SH Y, et al. Leak location in gas pipelines by extraction of single non-dispersive mode from leakage-induced acoustic emission signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4) : 969-976.
- [12] 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.
- [13] 李帅永,夏传强,程振华,等. 基于 VMD 和互谱分析的供水管道泄漏定位方法 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7) : 195-205.
- LI SH Y, XIA CH Q, CHENG ZH H, et al. Leak location method of water pipeline based on VMD and cross-spectrum analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7) : 195-205.
- [14] 陈剑,汤杰. 基于 POVMD 和频谱自相关分析的滚动轴承微弱故障特征提取 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4) : 13-20.
- CHEN J, TANG J. Feature extraction of rolling bearing's weak fault based on POVMD and spectrum auto-correlation analysis [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrument, 2018, 32(4) : 13-20.
- [15] 肖启阳,李健,孙洁娣. 基于 EWT 及互时频的天然气管道泄漏定位 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12) : 2735-2742.
- XIAO Q Y, LI J, SUN J D, et al. Gas pipeline leakage location based on EWT and cross time frequency spectrum[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12) : 2735-2742.
- [16] 刘春,谢皓,肖奕霖,等. EWT 算法在 ECG 信号滤波中的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11) : 1835-1842.
- LIU CH, XIE H, XIAO Y L, et al. Research on empirical wavelet transform algorithm in ECG signal filtering [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrument, 2017, 31(11) : 1835-1742.
- [17] 祝文颖,冯志鹏. 基于改进经验小波变换的行星齿轮箱故障诊断 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10) : 2193-2201.
- ZHU W Y, FENG ZH P. Fault diagnosis of planetary gearbox based on improved empirical wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10) : 2193-2201.
- [18] GILLES J. Empirical wavelet transform [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2013, 61(16) : 3999-4010.
- [19] KUMAR R, SAINI I. Empirical wavelet transforms based ECG signal compression[J]. IETE Journal of Research, 2014, 60(6) : 423-431.
- [20] 吴旭景,杜斌,叶陈. 基于 EMD 和小波分解的管道泄漏声发射源定位 [J]. 无损检测, 2015, 37(10) : 60-63.
- WU X J, DU B, YE CH. The location of acoustic emission source of pipeline leakage based on EMD and wavelet transform [J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(10) : 60-63.
- [21] 王友仁,陈伟,孙灿飞,等. 基于能量聚集度经验小波变换的齿轮箱早期微弱故障诊断 [J]. 中国机械工程, 2017, 28(12) : 1484-1490.
- WANG Y R, CHEN W, SUN C F, et al. Early weak fault diagnosis of gearboxes based on energy aggregation and EWT [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(12) : 1484-1490.

- [22] 曾祥君,张小丽,马洪江,等. 基于小波包能量谱的电网故障行波定位方法[J].高电压技术,2008, 34(11): 2311-2316.
ZENG X J, ZHANG X L, MA H J, et al. Traveling wave fault location method for power grids based on wavelet packet energy spectra [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11):2311-2316.
- [23] 赵光权,姜泽东,胡聪,等. 基于小波包能量熵和 DBN 的轴承故障诊断[J].电子测量与仪器学报,2019, 33(2):32-38.
ZHAO G Q, JIANG Z D, HU C, et al. Bearing fault diagnosis based on wavelet packet energy entropy and DBN [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrument, 2019, 33(2):32-38.
- [24] 路炜,文玉梅.供水管道泄漏定位中基于互谱的时延估计[J].仪器仪表学报,2007, 28(3):504-509.
LU W, WEN Y M. Time delay estimation based on cross power spectrum for water pipeline leakage locating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(3): 504-509.

作者简介



李帅永 (通信作者), 2010 年于信阳师范学院获得学士学位, 2014 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为信息获取与处理。

E-mail: lishuaiyong@cqupt.edu.cn

Li Shuaiyong (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Xinyang Normal University in 2010, and received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2014. He is currently an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include information acquisition and processing.



程振华, 2018 年于济南大学获学士学位, 现为重庆邮电大学自动化学院硕士研究生, 主要研究方向为信息获取与处理。

E-mail: chengzh2021@163.com

Cheng Zhenhua received his B. Sc. degree

from University of Jinan in 2018. He is currently a M. Sc. candidate in the Department of Automation at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include information acquisition and processing.