

## 激光与光电子学进展

基于多维空间数据融合算法的分布式光纤振动  
管道泄漏监测技术

刘志伟, 尚盈\*, 王晨, 赵文安, 李常

齐鲁工业大学 (山东省科学院) 激光研究所, 山东 济南 250104

**摘要** 管道运输安全是国民经济和人民生活的重要保障,管道泄漏监测成为管道运输安全中需要解决的一大难题。本文提出了一种基于分布式光纤振动传感(DVS)系统实现管道泄漏监测的多维空间数据融合算法,将传感光缆固定在管道侧面,通过DVS系统拾取管道泄漏信号,分别根据时间窗和空间分辨率对管道泄漏信号进行时空域平均,设定合适阈值完成管道泄漏监测报警。实验中对单点泄漏以及多点泄漏进行了测试,单点管道泄漏信号信噪比提升了4.5 dB,单点管道泄漏报警率最高提升了19.53%,多点管道泄漏报警率最高提升了2.29%,实现了对加压0.2 MPa管道泄漏的实时监测报警。

**关键词** 遥感与传感器; 分布式振动传感; 时空域; 管道泄漏; 数据融合

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220964

Pipeline Leakage Monitoring Technology of Distributed Optical Fiber  
Vibration Based on Multi-Dimensional Spatial Data Fusion Algorithm

Liu Zhiwei, Shang Ying\*, Wang Chen, Zhao Wenan, Li Chang

Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250104, Shandong, China

**Abstract** Pipeline transportation safety is critical for guaranteeing the national economy and people's life, and pipeline leakage monitoring is significant for achieving pipeline transportation safety. This paper proposes a multi-dimensional spatial data fusion algorithm for pipeline leakage monitoring based on a distributed optical fiber vibration sensing (DVS) system. The optical fiber sensing cable was fixed on the side of a pipeline, and the pipeline leakage signals were picked up by the DVS system. These pipeline leakage signals were averaged in the space-time domain based on the time window and spatial resolution, respectively. Finally, a suitable threshold was set to complete the pipeline leakage monitoring alarm. Single-point and multipoint pipeline leakages are tested in the experiment. The signal-to-noise ratio of the single-point pipeline leakage signal increases by 4.5 dB, maximum single-point pipeline leakage alarm rate increases by 19.53%, and maximum multipoint pipeline leakage alarm rate increases by 2.29%. Notably, real-time monitoring and alarms for pipeline leakage under a pressure of 0.2 MPa are achieved.

**Key words** remote sensing and sensors; distributed vibration sensing; space-time domain; pipeline leakage; data fusion

## 1 引言

管道运输是一种经济、高效、环保的运输方式,在城市供水系统、城市污水处理系统、石油和天然气运输系统等各个方面具有重要的作用<sup>[1-2]</sup>。由于管路老化、管壁内外腐蚀、水流冲击、管网超压等原因导致管道泄漏事故时有发生,造成了经济损失和资源浪费,对环境

也产生了巨大威胁,在管道使用期间对管道进行实时监测是确保管道安全运输的一个重要环节<sup>[3-4]</sup>。

传统的管道泄漏监测方法例如负压波监测法<sup>[5]</sup>、压力梯度监测法<sup>[6]</sup>和质量平衡监测法<sup>[7]</sup>等可以实现短距离、区域性的管道泄漏监测,但仍存在产生误报信号、定位精度较差、不适用于小范围泄漏等问题,在长距离、工作环境较为恶劣的情况下,传统的管道泄漏监

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-04-06; 录用日期: 2022-04-27; 网络首发日期: 2022-05-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62005137)、山东省高等学校青创科技支持计划(2019KJJ004)、山东省自然科学基金(ZR2019QF011)、山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2021CXGC010704)、山东省重大科技创新工程(2019JZZY010113)、济南市高校“20条”资助项目(2020GXRC010)、齐鲁工业大学科教产教融合项目(2020KJC-GH14 & 2020KJC-ZD18)

通信作者: \*sy81012607@163.com

测方法还存在诸多不足<sup>[8-9]</sup>。相较于传统的管道泄漏监测方法,分布式光纤传感器具有实时性强、灵敏度高、传感距离长、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀等特点,分布式光纤传感技术在管道泄漏监测方面已成为最具发展潜力的方法<sup>[10-14]</sup>。赵亚等<sup>[15]</sup>利用基于拉曼散射和光时域反射技术相结合的分布式光纤测温系统,对自来水管道进行泄漏监测和定位,通过监测管道附近的温度变化来识别泄漏,但通过温度变化监测管道泄漏容易受到周围环境温度变化的影响。Stajanca 等<sup>[16]</sup>利用基于瑞利散射的分布式光纤声波传感(DAS)系统对天然气管道泄漏进行监测,提出了一种基于频域 DAS 的信号管道泄漏识别和管道泄漏定位方法,将光纤螺旋缠绕在管道上,以检测管道因泄漏产生的振动,使泄漏率降至管道流量的 0.1%,但此方法仅在频域方面对信号进行处理且在长距离检测时光纤消耗量较大。左建村等<sup>[17]</sup>利用基于瑞利散射的 DAS 系统来监测天然气管道泄漏,提出了基于小波变换和经验模态分解(EMD)的泄漏检测算法和基于频域累积平均的泄漏定位算法,但这种方式对时域信号处理较为简单且信号信噪比提升不明显。吴慧娟等<sup>[18]</sup>在基于相敏光时域反射技术( $\varphi$ -OTDR)的分布式光纤振动传感(DVS)系统对输水管道进行了静水压泄漏试验,对不同压力下的不同孔径进行了测试,验证了 DVS 具有良好的响

应,但实验中只进行了静水压测试并未进行水在流动下的泄漏测试。

针对现有的管道泄漏监测技术易受环境影响且存在泄漏误报的情况,本文提出了基于 DVS 系统的多维空间数据融合算法。该算法将 DVS 系统拾取的管道沿途泄漏振动信号根据时间窗进行时域平均,再将时域平均后的振动信号根据系统空间分辨率进行空间平均,最后设定合适的阈值对管道泄漏实时报警。首先对单点管道泄漏进行了测试,单点管道泄漏信号信噪比提升了 4.5 dB,单点泄漏报警准确率最高提升了 19.53%。为验证该算法可以同时多点泄漏进行监测报警,对多泄漏点进行了测试,多点泄漏报警准确率最高提升了 2.29%。

## 2 实验原理与方法

### 2.1 系统原理

DVS 系统原理如图 1 所示。光源采用窄线宽激光器,窄线宽激光器发出探测光波,由声光调制器(AOM)将探测光波调制成线性扫频光脉冲,经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后通过环形器进入待测光纤中。探测光波在待测光纤中传输后向瑞利散射信号,然后由光电探测器(PD)进行光电转换,再由采集模块进行数据采集,最后在数据处理单元进行数据处理。

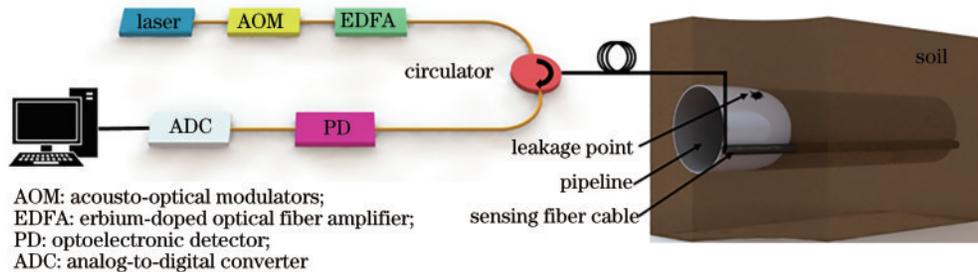


图 1 DVS 系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DVS system

当管道发生泄漏时,水在管道泄漏点涌出,引发泄漏点处的管道发生振动,泄漏点处光纤也随之产生振动,由于光弹效应,光纤的长度和折射率也发生相应的改变,引起光缆中传输光的相位变化<sup>[19]</sup>。假设光缆的长度为  $l$ ,光在光缆中引起的相位变化  $\Delta\varphi$  为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(l\Delta n_t + n_t \varepsilon l), \quad (1)$$

式中: $l$ 为光纤长度; $n_t$ 为光纤折射率; $\lambda$ 为光的中心波长; $\varepsilon$ 为光纤的应变张量。

参考在一个脉冲周期内,光纤后向瑞利散射光一维脉冲响应模型<sup>[20]</sup>,当  $t=0$  时,假设在光纤中引入一个窄线宽脉冲光,其频率为  $\nu$ ,脉宽为  $\omega$ ,在光纤输入端获得的后向瑞利散射信号振幅可表示为

$$E(t) = \sum_{m=1}^N A_m \cos[2\pi\nu(t - \tau_m)] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{\omega}\right), \quad (2)$$

式中: $A_m$ 为第  $m$  个散射点的振幅; $t$ 为散射光返回入射端的时间; $\tau_m$ 是光纤任意第  $m$  个散射点的时间延迟,其与从输入端到光纤任意第  $m$  个散射点的光纤长度  $l_m$  的关系为: $\tau_m = 2n_t l_m / c$ ,  $c$ 为真空中的光速;当  $0 \leq [(t - \tau_m) / \omega] \leq 1$  时矩形函数  $\text{rect}[(t - \tau_m) / \omega] = 1$ ,否则  $\text{rect}[(t - \tau_m) / \omega] = 0$ 。所以,可以得到任意时刻接收到的干涉光强为

$$I(t) = E \cdot E^* = \sum_{m=1}^N A_m^2 \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{\omega}\right) + \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N A_m A_n \cos \Delta\varphi_{mn} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{\omega}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_n}{\omega}\right), \quad (3)$$

式中: $A_n$ 为第  $n$  个散射点的振幅;相对相位  $\Delta\varphi_{mn} = 4\pi\nu n_t (l_m - l_n) / c$ 。光强  $I(t)$  中包含振动信号引起的相位差  $\Delta\varphi_{mn}$ ,根据光强  $I(t)$  变化,可以得到振动信号的变

化,从而可以计算出管道泄漏产生的振动信号。在本文实验中,DVS系统探测光的扫描频率为3 kHz,采样频率为100 MHz,脉冲宽度为100 ns,系统空间分辨率为10 m。

## 2.2 多维空间数据融合算法

实验中DVS系统采集 $a$ 条光强信号 $I(t)$ 构成 $\mathbf{X}$ 矩阵,每条光强信号序列中包含 $b$ 个数据,可以表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,b} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{a,1} & \cdots & x_{a,b} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对光强信号构成的 $\mathbf{X}$ 矩阵进行分组平均,每8条光强信号进行一次平均,得到平均后信号 $\mathbf{Y}$ 矩阵为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & \cdots & y_{1,b} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{e,1} & \cdots & y_{e,b} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $e$ 为平均后信号帧数且 $e = a/8$ 。对平均后信号 $\mathbf{Y}$ 矩阵进行差分,得到差分信号 $\mathbf{Z}_r$ 矩阵为

$$\mathbf{Z}_r = \mathbf{Y}_{r+1} - \mathbf{Y}_r = \begin{bmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{1,1} & \cdots & z_{1,b} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ z_{r,1} & \cdots & z_{r,b} \end{bmatrix}, r=1, 2, \dots, e-1, \quad (6)$$

式中, $r$ 为差分后信号帧数。再对差分信号 $\mathbf{Z}$ 矩阵进行能量谱统计,得到能量信号 $\mathbf{P}$ 矩阵为

$$P_j = \sqrt{(Z_1^2 + Z_2^2 + \cdots + Z_r^2)/r}, j=1, 2, 3, \dots, b, \quad (7)$$

式中, $j$ 为能量信号数据空域点数。由式(7)将能量信号 $\mathbf{P}_j$ 矩阵按时序排列起来得到能量谱 $\mathbf{N}$ 矩阵,能量谱 $\mathbf{N}$ 矩阵即为整个光缆测得的时域和空域上的能量谱信号:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & \cdots & P_{1,j} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ P_{i,1} & \cdots & P_{i,j} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $i$ 为能量谱中时域点数。泄漏点位置为 $q$ ,将泄漏点信号在能量谱 $\mathbf{N}$ 矩阵中进行提取,可以得到在 $q$ 位置泄漏点的时域 $\mathbf{N}_q$ 矩阵为

$$\mathbf{N}_q = \begin{bmatrix} P_{1,q} \\ \vdots \\ P_{k,q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

确定进行时域平均时需要的时间窗为 $k$ ,对泄漏点位置矩阵进行时域平均:

$$\mathbf{T}_q = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k P_{t,q} \quad (10)$$

根据监测系统空间分辨率设定,确定进行空间平均的信号道数,可以得到

$$\mathbf{S} = \frac{(T_{q-d} + T_{q-d-1} + \cdots + T_q + \cdots + T_{q+d-1} + T_{q+d})}{2d+1} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{S}$ 为数据融合信号; $d$ 为空间平均信号道数。

## 3 实验与分析

### 3.1 单点泄漏测试实验

管道泄漏模拟实验中,使用了一段长为20 m、直径为100 mm的PVC管道,泄漏点采用小阀门开关,管道内水流压力恒定为0.2 MPa,管道泄漏点直径为7 mm,管道泄漏处流量大约为 $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 。铠装光缆用扎带固定到PVC管道侧面,将泥土填充到管道上方,泄漏点位置将泄漏点开关露出,管道其他位置覆盖约10 cm的泥土。铠装光缆经过约56 m的传输光缆后连接到DVS系统中,光缆总长约196 m。

实验中管道和光缆布设如图2所示,管道一端连接水泵,对管道进行供水,另一端放入水箱内,使整个实验管道形成一个回路。在进行实验时水泵打开待水压达到0.2 MPa后进行实验,由泄漏点处的阀门打开或关闭模拟埋地管道是否发生泄漏。

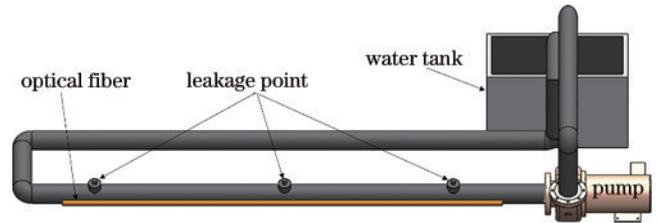


图2 管道和光缆布设示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pipeline and optical cable layout

本次管道泄漏监测实验中设置三个泄漏点,将泄漏点分别打开持续记录一段时间,系统空间分辨率为10 m,泄漏信号影响范围为10 m左右,三个泄漏点位置情况如图3所示,取泄漏信号范围的中点为泄漏点位置,泄漏点 $A_1 \sim A_3$ 分别在122、127、132 m处。

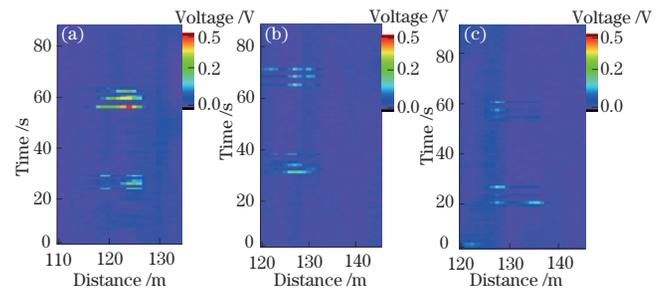


图3 泄漏点位置瀑布图。(a)泄漏点 $A_1$ ; (b)泄漏点 $A_2$ ; (c)泄漏点 $A_3$

Fig. 3 Waterfall diagram of leakage point location. (a) Leakage point  $A_1$ ; (b) leakage point  $A_2$ ; (c) leakage point  $A_3$

### 3.2 实验数据处理

实验中采集256条光强信号 $I(t)$ 序列,每道光强信号序列中包含512个数据,泄漏持续120 s。由式(8)可知在某一时刻的振动信号如图4所示,在光缆122 m处可以清晰地看到峰值存在,此位置为泄漏点位置。

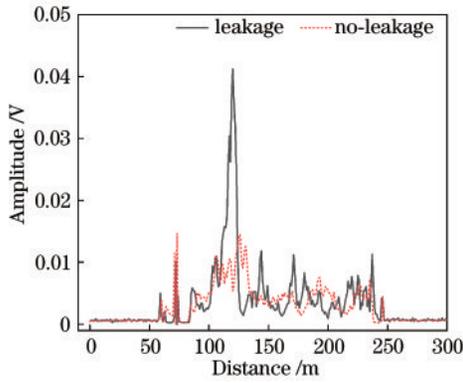


图 4 泄漏点振动曲线  
Fig. 4 Vibration curve of leakage point

由式(9)可知,在泄漏点位置 122 m 处有泄漏和无泄漏时的时域信号如图 5 所示,有泄漏信号与无泄漏信号幅值区别较大,可以区分出有泄漏与无泄漏。

确定在 122 m 泄漏点处的时间窗点数为 120,取泄漏点位置左右各 5 道数据通过式(10)和式(11)进行空

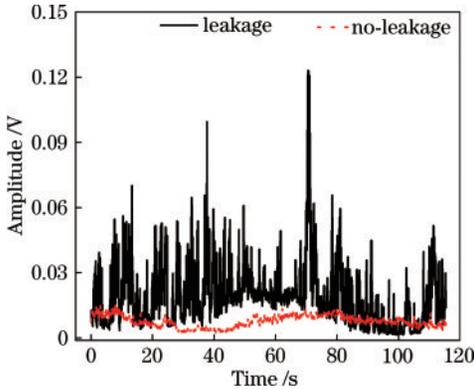


图 5 泄漏点时域信号  
Fig. 5 Time domain signal of leakage point

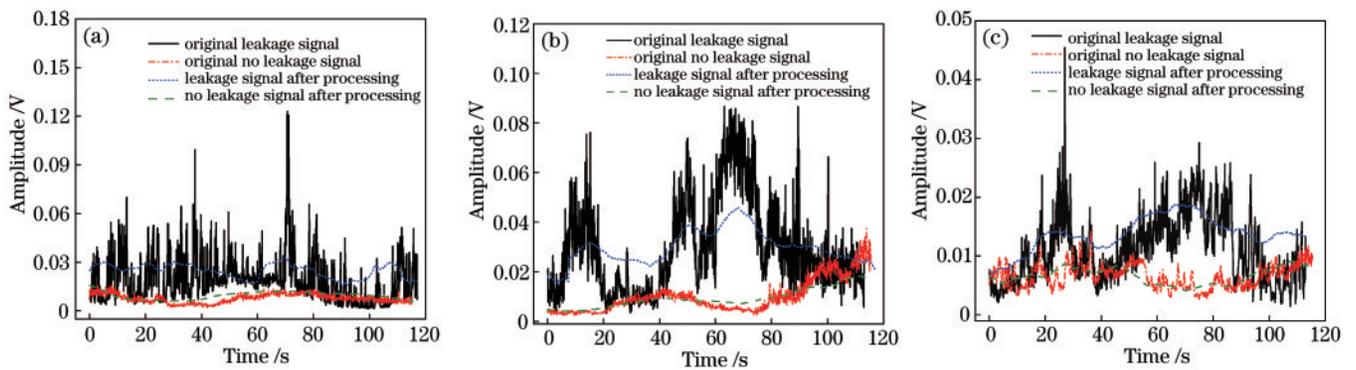


图 7 时域信号与多维空间数据融合信号。(a)泄漏点位置  $A_1$ ; (b)泄漏点位置  $A_2$ ; (c)泄漏点位置  $A_3$   
Fig. 7 Time-domain signal and multi-dimensional spatial data fusion signal. (a) Leakage point location  $A_1$ ; (b) leakage point location  $A_2$ ; (c) leakage point location  $A_3$

将各个泄漏点位置无泄漏时多维空间数据融合信号平均值作为报警阈值,当打开泄漏点时多维空间数据融合信号高于报警阈值则产生报警,泄漏点处报警情况如表 1 所示。

对时域信号进行多维空间数据融合后各个泄漏点

域平均,得到在泄漏点位置多维空间数据融合信号曲线,如图 6 所示。

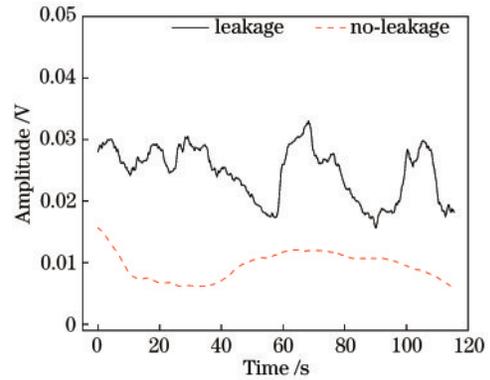


图 6 泄漏点位置多维空间数据融合信号  
Fig. 6 Multi-dimensional spatial data fusion signal at location of leakage point

为了定量描述泄漏信号,定义管道泄漏信号信噪比为

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{S_{Ave}(P_{signal})}{S_{Ave}(P_{noise})}, \quad (12)$$

式中:  $S_{Ave}()$  为求均值函数;  $P_{signal}$  为有泄漏时的能量信号;  $P_{noise}$  为无泄漏背景噪声的能量信号。根据式(12)计算,未经处理的泄漏点时域信号信噪比为 4.0 dB,经过多维空间数据融合后泄漏信号信噪比为 8.5 dB,相较于未处理信号信噪比提高了 4.5 dB。

在三个泄漏点处分别进行泄漏报警测试,泄漏点处时域信号与多维空间数据融合信号如图 7 所示。未经处理的时域信号在有泄漏与无泄漏的情况下仍存在误报,经多维空间数据融合后的有泄漏信号与无泄漏信号幅值相差明显。

的报警率均有大幅度提升,泄漏点报警率最高提升了 19.53%。在进行多维空间数据融合算法处理后数据波动范围降低,泄漏信号与无泄漏信号区分得更加明显。在未进行处理时泄漏信号波动较大,按照此标准设置阈值时,容易造成系统误报。将数据进行多维空

表 1 泄漏点报警情况

Table 1 Leakage point alarm situation

Leakage point	Threshold	Alarm rate / %
A <sub>1</sub> unprocessed data	0.007790153	89.24
A <sub>1</sub> processed data	0.009484472	100.00
A <sub>2</sub> unprocessed data	0.013282695	80.47
A <sub>2</sub> processed data	0.008830046	100.00
A <sub>3</sub> unprocessed data	0.005136026	84.83
A <sub>3</sub> processed data	0.006113201	100.00

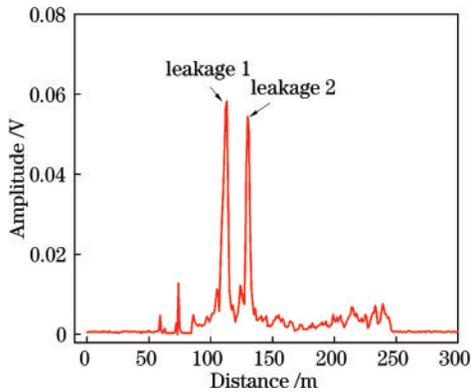


图 8 多点泄漏振动信号

Fig. 8 Multi-point leakage vibration signal

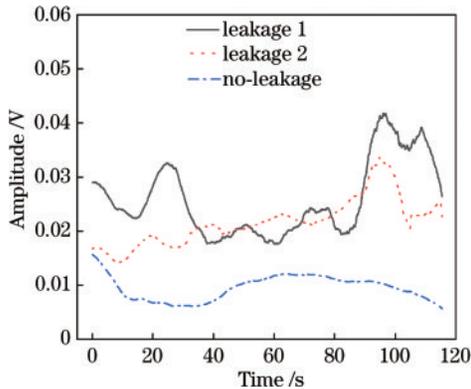


图 9 多维空间数据融合信号

Fig. 9 Multi-dimensional spatial data fusion signal

间数据融合算法处理后,泄漏信号信噪比提升,信号波动范围降低,有效地将泄漏信号与无泄漏信号进行了区分,在设置阈值后减少了系统误报。

### 3.3 多点泄漏测试实验

为验证算法可以同时监测多个泄漏信号,在管道前端距离 A<sub>3</sub> 位置 20 m 处再开一个泄漏点,两个泄漏点同样大小且都埋在土壤中,当两个泄漏点都产生泄漏后采集其振动信号如图 8 所示,泄漏点位置多维空间数据融合信号如图 9 所示。在图 8 中可以看到两个明显的峰值,分别对应两个泄漏点位置,泄漏点位置分别在 112 m 和 132 m 处。由图 9 可以看出,泄漏信号与无泄漏信号的幅值区分明显,在未进行处理时的泄漏点原始数据报警率为 97.71%,经多维空间数据融合后的多点泄漏报警率最高提升了 2.29%,所以该算法可

以同时监测多个泄漏点发生泄漏的情况。

## 4 结 论

本文算法通过对泄漏信号进行时空域平均处理,将泄漏信号和背景噪声信号进行有效的区分,将算法处理前后信号的信噪比进行对比,单点泄漏信号信噪比提升了 4.5 dB,单点管道泄漏报警率最高提升了 19.53%,多点泄漏报警率最高提升了 2.29%。实验结果表明,在管道发生泄漏时,基于 DVS 系统实现管道泄漏监测的多维空间数据融合算法可以及时准确地对泄漏点进行定位和报警。

## 参 考 文 献

- [1] Duarte D P, Nogueira R N, Bilro L B. Semi-supervised Gaussian and  $t$ -distribution hybrid mixture model for water leak detection[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(12): 125109.
- [2] Cheng W P, Fang H J, Xu G, et al. Using SCADA to detect and locate bursts in a long-distance water pipeline [J]. Water, 2018, 10(12): 1727.
- [3] 赵林, 王纪强, 李振. 光纤负压波管道泄漏监测系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0722002.  
Zhao L, Wang J Q, Li Z. Optical fiber negative pressure wave pipeline leakage monitoring system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 0722002.
- [4] 王放, 邢冀川. 一种新型智能化远距光纤预警的算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0706002.  
Wang F, Xing J C. Novel intelligent long-distance optical fiber pre-warning algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0706002.
- [5] Li J, Zheng Q, Qian Z H, et al. A novel location algorithm for pipeline leakage based on the attenuation of negative pressure wave[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 123: 309-316.
- [6] Xie S J, Duan Z R, Li J, et al. A novel magnetic force transmission eddy current array probe and its application for nondestructive testing of defects in pipeline structures[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 309: 112030.
- [7] Martins J C, Seleglim P, Jr. Assessment of the performance of acoustic and mass balance methods for leak detection in pipelines for transporting liquids[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(1): 011401.
- [8] 韩玲娟, 王强, 范昕炜, 等. 分布式光纤传感水下天然气管道泄漏的 SPE 诊断法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 052801.  
Han L J, Wang Q, Fan X W, et al. Underwater gas pipeline leakage diagnostic method by distributed optical fiber sensor based on SPE[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 052801.
- [9] Liu B X, Jiang Z, Nie W, et al. Research on leak location method of water supply pipeline based on negative pressure wave technology and VMD algorithm [J]. Measurement, 2021, 186: 110235.
- [10] 廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328001.

- Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001.
- [11] 王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1006005.  
Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1006005.
- [12] 程碧钊, 王东, 王宇, 等. 提升 R-OTDR 系统实时性能方法研究[J]. *光学技术*, 2019, 45(6): 701-706.  
Cheng B Z, Wang D, Wang Y, et al. Research on improving real-time performance of R-OTDR system[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(6): 701-706.
- [13] 王江伟, 王红义, 崔恺, 等. 光纤温度传感器在气体管道泄漏监测上的应用[J]. *光通信技术*, 2021, 45(7): 19-22.  
Wang J W, Wang H Y, Cui K, et al. Application of optical fiber temperature sensor in gas pipeline leakage monitoring[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(7): 19-22.
- [14] 王花平. 分布式光纤传感器与被测结构的界面效应影响分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 0206004.  
Wang H P. Influence of interfacial effect between distributed optical fiber sensors and monitored structures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0206004.
- [15] 赵亚, 王强, 宋俊俊, 等. 基于分布式光纤测温的水管泄漏检测与定位[J]. *激光与红外*, 2018, 48(7): 891-895.  
Zhao Y, Wang Q, Song J J, et al. Detection and location of water pipeline leakage based on distributed fiber temperature measurement[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(7): 891-895.
- [16] Stajanca P, Chruscicki S, Homann T, et al. Detection of leak-induced pipeline vibrations using fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2841.
- [17] Zuo J C, Zhang Y, Xu H X, et al. Pipeline leak detection technology based on distributed optical fiber acoustic sensing system[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 30789-30796.
- [18] Wu H J, Sun Z S, Qian Y, et al. A hydrostatic leak test for water pipeline by using distributed optical fiber vibration sensing system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9655: 965543.
- [19] Shang Y, Wang C, Ni J S, et al. Discussion on the sensitivity of optical cables based on distributed acoustic sensing[J]. *Optical Review*, 2019, 26(6): 659-663.
- [20] Wang C, Wang C, Shang Y, et al. Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry[J]. *Optics Communications*, 2015, 346: 172-177.