

基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测

王辰¹, 刘庆文^{1*}, 陈典¹, 李赫¹, 梁文博², 何祖源¹

¹上海交通大学电子工程系区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240;

²朴牛(上海)科技有限公司, 上海 200240

摘要 提出一种基于高保真分布式光纤声波传感器的油气管线泄漏在线监测技术,介绍了该型光纤声波传感器的测量原理和技术优势,利用该传感器在模拟的管道泄漏实验场中实现了对输气管道泄漏的精确监测和定位。针对现场环境复杂、背景噪声强等问题,采用小波降噪算法进一步提升了泄漏事件的检测灵敏度,实现对加压 0.05 MPa 气体泄漏的准确检测。实验结果表明,本系统在油气管道安全监测领域具有优越的性能和良好的发展前景。

关键词 光纤光学; 分布式声波传感; 泄漏检测; 小波降噪

中图分类号 TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1006005

Monitoring Pipeline Leakage Using Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensor

Wang Chen¹, Liu Qingwen^{1*}, Chen Dian¹, Li He¹, Liang Wenbo², He Zuyuan¹

¹ State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

² Puniu (Shanghai) Technology Co. Ltd., Shanghai 200240, China

Abstract This study proposes an online monitoring technology for oil and gas pipeline leakage based on a high-fidelity fiber-optic distributed acoustic sensor (HiFi-DAS) and introduces the measurement principle and technical advantages of DAS. The DAS can successfully detect and locate the leakage in a gas pipeline in a simulated field experiment. Considering the complex field environment and strong background noise, the wavelet denoising algorithm is adopted to further improve the detection sensitivity of leakage events, and gas leakage under pressure of 0.05 MPa is accurately detected in field experiments. Experimental results show that the proposed DAS system has superior performance in the field of oil and gas pipeline safety monitoring.

Key words fiber optics; distributed acoustic sensing; leakage detection; wavelet denoising

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 120.4825; 280.4991

1 引 言

管道运输作为一种有效、经济、环保的运输方式,在石油和天然气等资源的运输方面具有独特的优势,已成为国内外油气资源的主要运输手段。在管道的服役期间对管道进行监测是确保油气管道安全运输的重要环节之一。目前,监测管道是否泄漏的方案有很多,如检漏电缆法、传感光缆法、红外线法、探地雷达法等^[1]。在现有检测方法中,光纤分布式传感系统因其灵敏度高、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀性好等特点,在长距离连续传感方面具有不可替

代的优势^[2],从而引起了人们的广泛关注。基于不同原理的分布式光纤传感技术已经被应用于油气管道安全监测领域中,如:西安交通大学的 Gao 等^[3]利用光时域反射仪(OTDR)对埋地油气管道进行安全监测,可以将入侵点定位在 22.4 m 范围内;天津大学的曲志刚等^[4]研究了一种基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)光纤干涉仪的新型油气管道安全分布式光纤预警系统,可以实时检测管道沿线所发生的泄漏及其他异常事件;美国阿拉斯加 Beaufort 海上油田利用布里渊光时域分析仪(BOTDA)设备实时监测 14 km 管道沿线的温度分布曲线以判断

收稿日期: 2019-05-07; 修回日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405500)

* E-mail: liuqingwen@sjtu.edu.cn

有无泄漏发生^[5];德国 Stajanca 等^[6]利用光纤分布式声波传感器(DAS)检测气体振动,实现了对压强为 8 个大气压的管道内气体泄漏的检测。在各种基于光纤的监测技术中,基于 DAS 的管道泄漏检测技术因其具有光纤沿线动态应变的分布式定量检测特性,已成为管道泄漏的安全预警领域中最具有潜力的检测方案。

DAS 是一种基于光纤后向瑞利散射原理实现声波信号连续、分布式探测的新型传感器,当前绝大多数 DAS 系统采用相位敏感型光时域反射仪(φ -OTDR)方案,该技术被广泛应用在安全监测领域。但是在 φ -OTDR 系统中空间分辨率与传感距离二者存在矛盾关系:探测光脉冲的持续时间越短则其空间分辨率越高,但这将导致脉冲能量下降、瑞利散射光的信噪比降低、传感距离减小和测量灵敏度降低。在线放大或者中继等技术^[7-9]可以通过补偿光纤的损耗来延长传感距离,但是提高了光缆布设的复杂度。同时,基于 φ -OTDR 的 DAS 系统中存在相干衰落导致的“死区”问题,文献^[10-12]中的解决方案都存在诸如响应频率下降或空间分辨率降低等不足。

针对现有 φ -OTDR 型 DAS 系统的不足,本课题组与朴牛(上海)科技有限公司合作开发了高性能分布式光纤声波传感系统 HiFi-DAS^[13-17]。在该系统中,空间分辨率由探测光信号的扫频范围决定而与光脉冲持续时间无关,解决了传统 φ -OTDR 技术中空间分辨率与探测距离之间的矛盾,从而在达到米级高空间分辨率的同时实现长距离传感;所采用的旋转矢量平均算法^[17]可以有效去除相干衰落噪声,提高了系统的灵敏度和可靠性。将该 HiFi-DAS 系统应用于模拟的管道泄漏现场实验中,实现了对加压管道中多处泄漏位置的精准检测和定位;进一步结

合小波分析降噪算法,在加压 0.05 MPa 的条件下泄漏检测的信噪比达到 18.32 dB。

2 HiFi-DAS 系统工作原理

该 HiFi-DAS 系统原理如图 1 所示。窄线宽激光器发出的光波被光纤耦合器分为探测光和本地光,其中:探测光被声光调制器(AOM)调制形成线性扫频光脉冲,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。探测光在待测光纤中传输产生的后向瑞利散射信号与本地光发生拍频,然后由平衡光电探测器(BPD)转换成电信号,电信号被模数转换器(ADC)转换为数据流,利用匹配滤波器进行脉冲压缩,最终得到光纤上各位置处的瑞利散射光相位变化信息。

当管道破裂发生泄漏时,由于管道内外存在压力差,气体从泄漏孔处溢出时产生振动,并沿着土壤介质向四周传播,因声波的扩散、土壤中颗粒对声波的散射以及土壤介质对声波能量的吸收,泄漏产生的声波在土壤介质中传播时能量逐渐衰减。声波通过土壤介质传播到待测光缆上,导致光纤发生轴向和径向应变;同时,由于光弹性效应,光纤折射率也会发生相应改变。在上述作用机理下,光纤产生的瑞利散射光的相位发生改变,并且外界扰动的变化与瑞利散射光波的相位变化成正比,当光纤发生大小为 ϵ 的应变时,光纤上相距 L 的 A 点和 B 点产生的瑞利散射光的相位差可表示为

$$\Delta\theta_{A,B} = 2(1 + \gamma)\beta L\epsilon, \quad (1)$$

式中: γ 为有效光弹性系数; β 为传播常数。

由(1)式可知,根据瑞利散射光的相位变换,可以线性恢复出光纤的振动幅度大小,进而计算得到泄漏产生的声波信号。为了消除后向瑞利散射信号中的相干衰落噪声,利用文献^[17]中的旋转矢量相

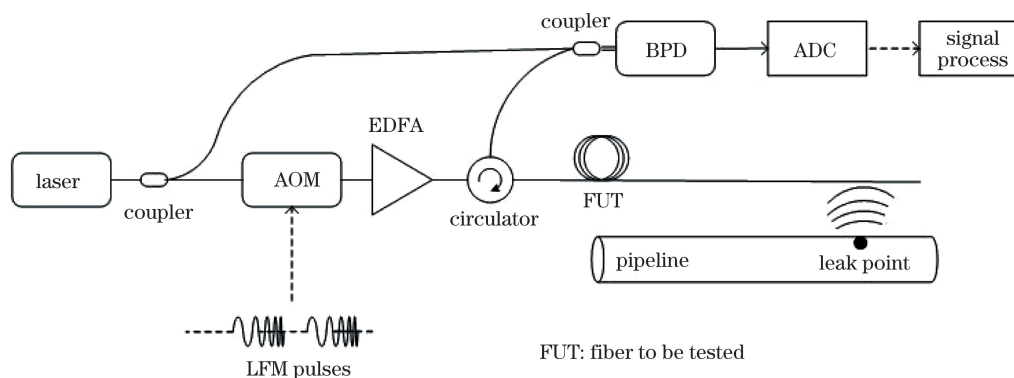


图 1 HiFi-DAS 系统原理示意图
Fig. 1 Schematic of HiFi-DAS system

加的方法,消除衰落噪声的影响。在本方案中,探测光信号的扫频范围为 100 MHz,持续时间为 $2\ \mu\text{s}$,经过匹配滤波、旋转相位平均和相位差分操作之后,DAS 系统的空间分辨率仍然保持在 4 m 的较好水平;同时,该系统的最高频率响应为 2 kHz。

3 现场模拟管道泄漏实验

3.1 单个泄漏孔的测试

在管道泄漏的现场模拟实验中,使用一根长

度为 12 m、直径为 32 mm 的金属管道,在管道的某一位置事先打一个直径为 4.2 mm 的小孔作为泄漏孔;然后将泥土填充在管道上,填充一定厚度的泥土后,将铠装光缆铺设在泥土上。在本次实验中,光缆和管道之间填充的泥土高度约为 10 cm。最后,在光缆上继续填充厚度约为 4 cm 的泥土以将光缆全部覆盖,如图 2 所示。铠装光缆经过约 950 m 的传输光缆后连接到 HiFi-DAS 解调仪。

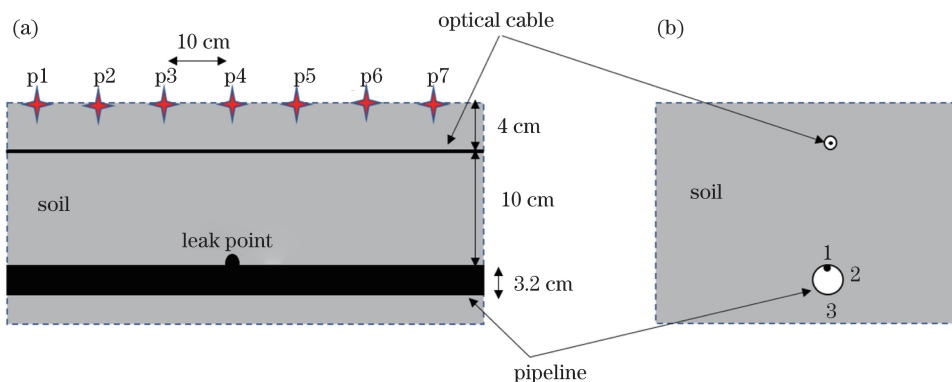


图 2 管道和光缆的正视图 and 侧视图。(a) 正视图;(b) 侧视图

Fig. 2 Front and side views of pipeline and optical cable. (a) Front view; (b) side view

埋地管道的一端密封,另一端通过传输管连接到气压罐上,通过气压罐上的阀门打开和关闭来模拟埋地管道是否有泄漏发生。当打开阀门向管道输气时,在泄漏孔处发生泄漏;当关闭阀门时,停止输气,管道无泄漏。每次实验通过改变气压罐的加压参数,向管道输送不同压强的气体,以此来模拟管道泄漏的强弱。

首先采用噪声分贝仪对泄漏信号大小进行测试,一共测试 7 个位置,如图 2(a)所示,图中的四角星为 7 个测量点的位置,间距均为 10 cm,分别标记为 p1~p7,其中,位置 p4 在泄漏孔的正上方。每个位置分别测量 10 次,然后取平均值作为该位置检测到的泄漏声波的强度。泄漏产生的声波在土壤中传播的同时还存在散射损耗和吸收损耗,因此土壤的松散程度会影响检测到的泄漏声波的大小。对管道中空气加压 0.2 MPa 时,检测到的声音强度随测试点位置的分布变化关系如图 3 所示,可见正对泄漏孔的位置处检测到的声音最大,随着距离的增加泄漏声波的强度迅速降低,该曲线的不对称性可能是实验中填充的土壤密度不均匀,泄漏点两侧土壤对声波信号的衰减系数不同导致的。根据该实验结果,单点气体泄漏产生的振动主要影响泄漏点附近约 1 m 范围内的光缆。由于

DAS 系统解调得到的振动信号实际上是其空间分辨率内光纤振动的平均值,为了准确检测只影响一小块区域内光缆的振动信号,要求 DAS 系统具有足够高的空间分辨率。本实验中采用的 HiFi-DAS 系统的空间分辨率为 4 m,优于绝大多数 10 m 空间分辨率的长距离 DAS 系统。

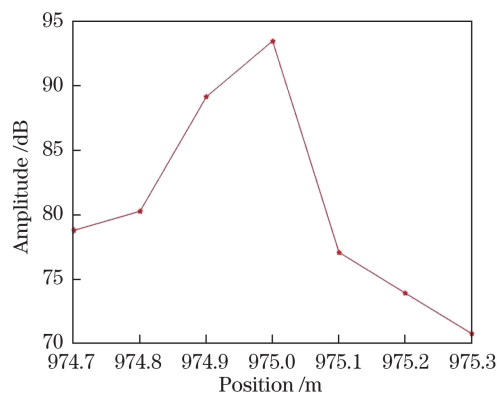


图 3 各个位置的泄漏信号的幅度

Fig. 3 Amplitude of leakage signal at each location

在本实验中,该 HiFi-DAS 系统发射啁啾探测光脉冲的时间间隔为 250 μs ,每次实验对该 HiFi-DAS 系统采集连续的 2560 组数据,解调得到 2560 组差分相位曲线。由于现场环境的影响,在信号中存在低频漂移,因此,信号首先经过截止频率为

100 Hz的高通滤波器, 移除低频成分。图4显示了加压0.2 MPa时, 高通滤波之后的2560条差分相位轨迹叠加的结果图, 在光缆的975 m处可以清晰地看到有峰值存在, 此位置就是管道泄漏的位置。统计该压强下光纤末端一段区域内的相位曲线的标准差, 同时也统计在无泄漏的条件下相同区域内的标准差, 得到的结果如图5所示, 可以清晰看到泄漏信号。

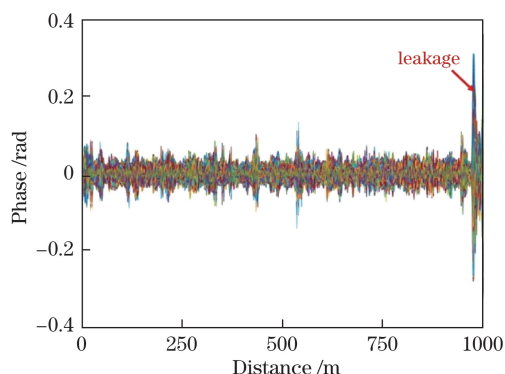


图4 加压0.2 MPa条件下解调得到的2560条差分相位轨迹

Fig. 4 2560 differential phase traces demodulated under 0.2 MPa gas pressure

3.2 多泄漏孔及泄漏孔方向的测试

为了证明系统可以同时检测到多个泄漏信号, 在管道的另一端、距第一个泄漏孔8 m处, 又打了一个同样大小的泄漏孔, 两个小孔在同一直线上, 同样埋在土中, 并测试如图2(b)所示3个不同泄漏孔方向下的光缆振动信号。位置1表示泄漏孔在光缆的正下方、泄漏孔正对光缆; 位置2为管道旋转90°、泄漏孔与地面平行; 位置3为泄漏孔指向地面、背对光缆。在加压0.2 MPa的情况下, 3个位置分别连续采集2560组数据, 并解调得到2560条相位曲线,

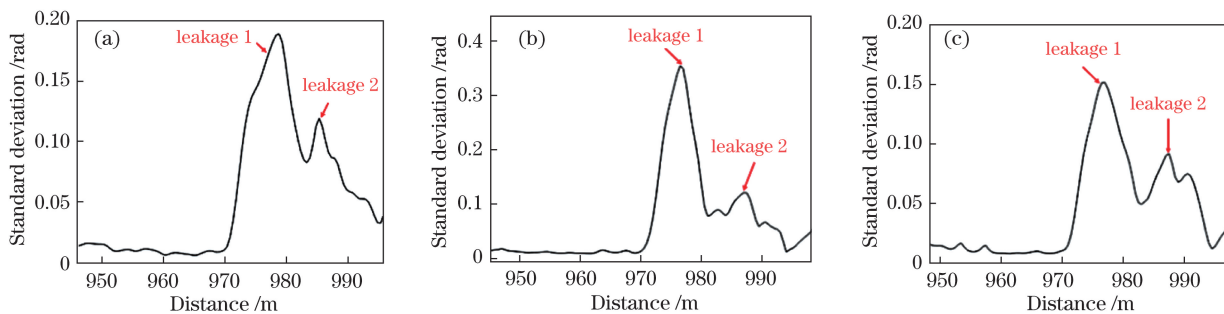


图6 泄漏孔在不同位置时的标准差曲线。(a) 位置1; (b) 位置2; (c) 位置3

Fig. 6 Standard deviation curves of leaking holes at different positions. (a) Position 1; (b) position 2; (c) position 3

3.3 灵敏度测试与小波降噪

为了进一步检测该HiFi-DAS系统的检测灵敏

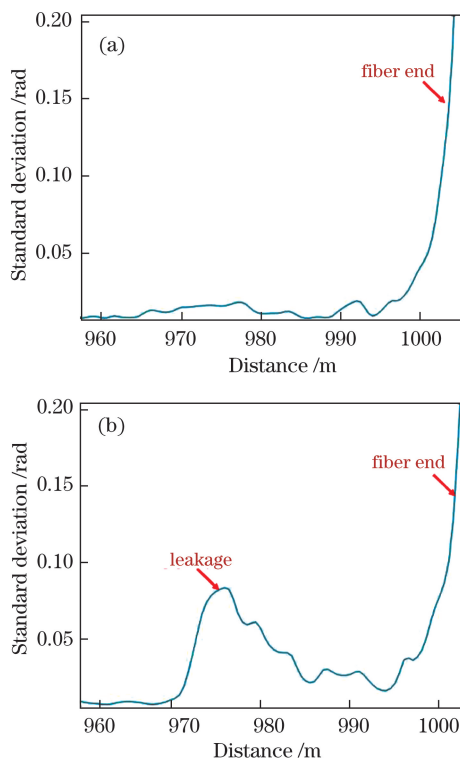


图5 不同条件下光纤末端的标准差曲线。(a) 无泄漏; (b) 加压0.2 MPa

Fig. 5 Standard deviation curves at the end of fiber under different conditions. (a) No leakage; (b) 0.2 MPa gas pressure

然后统计2560条曲线的标准差, 结果如图6(a)、(b)、(c)所示。从这3个图中都可以看到2个明显的峰值, 分别对应于2个泄漏点位置。第2个泄漏孔的峰值比较低, 原因是泄漏孔2填充的土壤较为紧实。从此实验也可以看出, 本实验中泄漏孔的方向对光缆振动幅度的影响很小, 推测原因是声波主要通过土壤传输, 且管道直径较小, 因此泄漏孔的指向基本不影响光缆振动的强度。

度, 在管道上只有1个泄漏孔时, 继续降低管道中气体的压强。图7显示了加压0.05 MPa时, 经高通滤

波后的 2560 条差分相位轨迹叠加的效果图。由于所加压强小,泄漏引起的振动比较弱,图中在 975 m 处虽有峰值存在,但是此时泄漏信号几乎被淹没在噪声中,容易造成漏检。

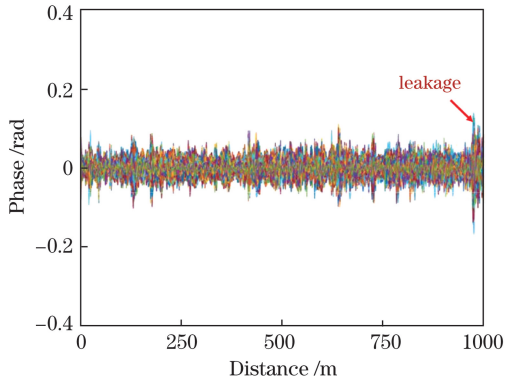


图 7 加压 0.05 MPa 条件下解调得到的 2560 条差分相位轨迹

Fig. 7 2560 differential phase traces demodulated under 0.05 MPa gas pressure

为了定量描述泄漏信号的检测灵敏度,定义泄漏信号的检测信噪比为

$$R_{SN} = 20 \times \lg \frac{S_{RMS}(V_{signal})}{S_{RMS}(V_{noise})}, \quad (2)$$

式中: $S_{RMS}(\cdot)$ 为求均方根值函数; V_{signal} 为泄漏信号; V_{noise} 是背景噪声。根据(2)式,计算得到在加压 0.05 MPa 时的泄漏信号检测信噪比仅为 3.75 dB。为了提高泄漏信号检测的信噪比,以准确确定泄漏的时间及位置,降低漏检、误检率,需要对 HiFi-DAS 解调仪输出的差分相位信号进行降噪处理。

首先对实验中的噪声分别计算功率谱和统计噪声幅值,结果如图 8(a)和图 8(b)所示。为消除现场环境影响引起的低频漂移,信号首先经过截止频率为 100 Hz 的高通滤波器,移除低频成分。由图 8(a)可见,100 Hz 以上的功率谱基本满足均匀分布,而图 8(b)显示噪声幅度服从高斯分布,因此该系统噪声属于高斯白噪声。由于白噪声的方差和幅值随着小波变换尺度的增加会逐渐减小,而信号的方差和幅值与小波变换的尺度变换无关^[18],因此,可以用小波变换技术对信号进行处理,提高信噪比。

小波降噪的原理是利用一组低通滤波器和高通滤波器对原始信号进行分解,分别得到表征信号低频分量的近似系数和表征信号高频分量的细节系数,保留高频分量,对低频分量继续分解,直到分解到一定的层次。对于含噪声的信号进行小波分解,

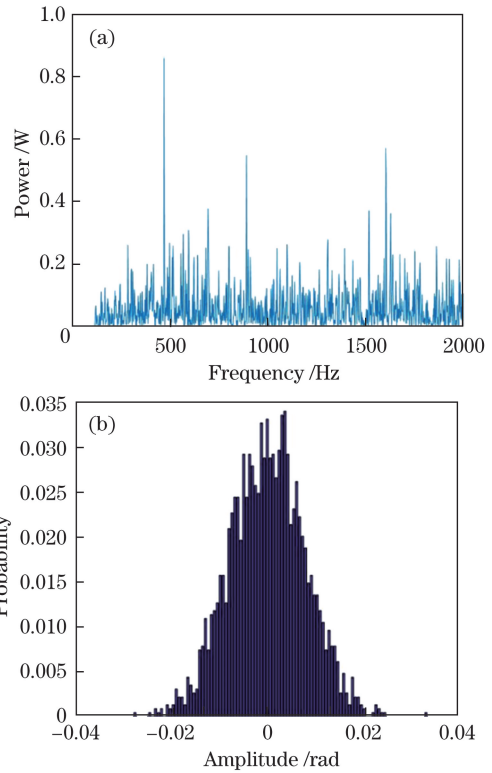


图 8 噪声统计。(a)功率谱;(b)幅值分布

Fig. 8 Noise statistics. (a) Power spectrum; (b) amplitude distribution

得到的高频系数中既有有用信号也有噪声,由于噪声的系数比较小而有用信号的小波系数较大,通过选择合适的阈值,对每分解层的高频分量进行阈值处理,去除噪声比例高的小波系数,保留由信号控制的小波系数,最后再由这些小波系数重构得到去噪后的信号。小波降噪过程可以按照以下几个步骤完成:

- 1) 选择合适的小波并确定分解层次,对原始信号进行分解;
- 2) 将小波分解得到的各个尺度下的高频系数进行阈值量化处理,从而抑制属于噪声的小波系数;
- 3) 利用最后一个分解层的低频系数和各分解层经阈值处理后的高频系数进行小波重构,得到降低噪声后的有用信号。

在本实验中,经过多次实验,采用 Haar 小波进行 6 层分解和软阈值处理的效果最好。

软阈值处理表达式为

$$\omega_{\lambda} = \begin{cases} \text{sign}(\omega)(|\omega| - \lambda), & |\omega| \geq \lambda \\ 0, & |\omega| < \lambda \end{cases}, \quad (3)$$

式中: ω 和 ω_{λ} 分别为阈值处理前后的小波系数; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数; λ 为阈值。阈值 λ 和噪声的估计值 σ 分别表示为

$$\lambda = \sigma^2 \lg M, \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{N_{\text{median}}(|w|)}{0.6745}, \quad (5)$$

式中: $N_{\text{median}}(\cdot)$ 是求中间值的函数; M 是信号长度。

图 9(a) 展示了加压 0.05 MPa 时, 通过该小波去噪方法得到的 2560 条差分相位曲线的叠加结果, 噪声得到了明显的抑制, 在 975 m 处可以清晰地观测到泄漏引起的振动信号, 此时信噪比为 18.32 dB, 比小波降噪前的信噪比提高了 14.57 dB。对每个空间位置的信号求标准差, 泄漏位置处标准差的半峰全宽表征了该 HiFi-DAS 系统的实际空间分辨率, 如图 9(b) 所示, 空间分辨率为 4 m。

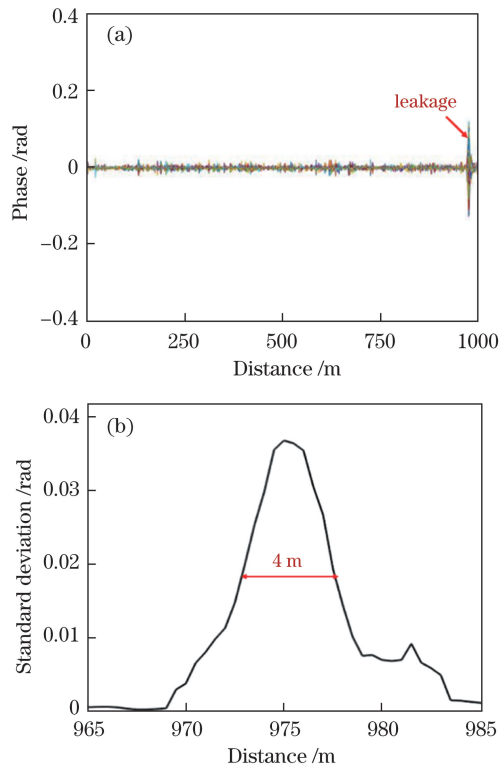


图 9 加压 0.05 MPa 时小波降噪处理后的差分相位轨迹和光纤末端标准差曲线。(a) 差分相位轨迹; (b) 光纤末端标准差曲线

Fig. 9 Differential phase trace and standard deviation curve at the end of fiber after wavelet denoising under gas pressure of 0.05 MPa. (a) Differential phase trace; (b) standard deviation at the end of fiber

4 结 论

实验表明, 利用 HiFi-DAS 系统对管道进行安全监测的方案是有效的, 可以及时准确地检测并定位出泄漏点。此外, 基于小波的信号分析方法可以有效去除环境噪声的影响, 提高信噪比, 能够更加准

确地检测与定位泄漏事件。因此, 该系统在管道泄漏监测领域中具有良好的发展前景。

参 考 文 献

- [1] Zhu L. Study on signal processing of distributed optical fiber pre-warning system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 1-2.
朱琳. 分布式光纤管道安全预警信号处理方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009: 1-2.
- [2] 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.
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.
- [3] Gao J Z, Jiang Z D, Zhao Y L, *et al.* Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(11): 633-635.
- [4] Qu Z G, Jin S J, Zhou Y. Study on the distributed optical fiber pre-warning system for the safety of oil and gas pipeline[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2006, 28(6): 640-642.
曲志刚, 靳世久, 周琰. 油气管道安全分布式光纤预警系统研究[J]. 压电与声光, 2006, 28(6): 640-642.
- [5] Tu Q C, Wei B, Zhang Z Y, *et al.* OTDR-type distributed optical fiber sensors and application of oil and gas pipelines online monitoring[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2015(3): 28-31.
涂勤昌, 韦波, 张真毅, 等. OTDR 型分布式光纤传感器在油气管道监测中的应用[J]. 管道技术与设备, 2015(3): 28-31.
- [6] 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.
- [7] Tan D J, Tian X Z, Sun W, *et al.* An oil and gas pipeline pre-warning system based on Φ -OTDR[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 91578W.
- [8] Peng F, Wu H, Jia X H, *et al.* Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [9] Ren M Q, Lu P, Chen L, *et al.* Theoretical and experimental analysis of Φ -OTDR based on polarization diversity detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(6): 697-700.
- [10] Pan Z Q, Liang K Z, Zhou J, *et al.* Interference-fading-free phase-demodulated OTDR system[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8421: 842129.
- [11] Zhou J, Pan Z Q, Ye Q, *et al.* Phase demodulation

- technology using a multi-frequency source for discrimination of interference-fading induced false alarms in a φ -OTDR system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0905003.
- 周俊, 潘政清, 叶青, 等. 基于多频率综合鉴别 φ -OTDR 系统中干涉衰落假信号的相位解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905003.
- [12] Liu Q W, Liu L, Fan X Y, *et al.* A novel optical fiber reflectometry technique with high spatial resolution and long distance[C] // Asia Communications and Photonics Conference 2014, November 11-14, 2014, Shanghai, China. Washington, DC.: OSA, 2014: AW3I.2.
- [13] Liu Q W, Fan X Y, He Z Y. Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25988-25995.
- [14] Li T J, Liu Q W, Chen D, *et al.* Improving spatial resolution of time-gated digital optical frequency domain reflectometry using diode laser sources[C] // 6th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (APOS), October 11-14, 2016, Shanghai, China. Washington, DC.: OSA, 2016: W4A.50.
- [15] Chen D, Liu Q W, He Z Y. Fading-suppressed distributed fiber-optic acoustic sensor with 0.8-m spatial resolution and $246\text{-}\mu\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ strain resolution [C] // 26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, DC.: OSA, 2018: TuE93.
- [16] Chen D, Liu Q W, He Z Y. High-fidelity distributed fiber-optic acoustic sensor with fading noise suppressed and sub-meter spatial resolution[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16138-16146.
- [17] Chen D, Liu Q W, He Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR [J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8315-8325.
- [18] Kong L J. MATLAB wavelet analysis super learning manual[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 296-303.
- 孔玲军. MATLAB 小波分析超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 296-303.