

输水管道预警与泄漏定位中 Φ -OTDR 技术 信号处理法

杨洋¹, 沙洲², 封皓², 贾志宁¹, 杨洋¹, 王冠群¹

¹承德石油高等专科学校河北省仪器仪表工程技术研究中心, 河北 承德 067000;

²天津大学测试技术及仪器国家重点实验室; 天津 300072

摘要 利用相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)分布式光纤测试系统对城市输水管道安全预警与泄漏定位方法进行的研究。通过分析所获得的时域信号、信号功率谱、信息熵、空频能量分布、高通滤波等不同特性,对输水管道进行安全预警与泄漏定位。在对上述各种信号参数进行深入分析和比较的基础上,提出利用空频能量分布这一参数进行输水管道安全预警与泄漏定位是较为有效可靠的方法。实验表明,这一方法在 2 km 的测量范围内定位的误差小于 10 m。

关键词 传感器; 分布式光纤; 相位敏感光时域反射计; 空频能量分布; 安全预警; 泄漏定位

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.040607

Signal Processing Method of Φ -OTDR Technology in Early Warning and Leakage Positioning of Water Pipelines

Yang Yang¹, Sha Zhou², Feng Hao², Jia Zhining¹, Yang Yang¹, Wang Guanqun¹

¹Hebei Provincial Instrument and Meter Engineering Technology Research Center, Chengde Petroleum College, Chengde, Hebei 067000, China;

²State Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract We use phase optical time domain reflectometer (Φ -OTDR) distributed optical fiber measurement system for safety early warning and leak location for city water pipeline. By analyzing the different characteristics of time domain signal, the signal power spectrum, information entropy, space frequency energy distribution, and high-pass filter, we conduct safety early warning and location of pipeline leak. Based on the deep analysis and comparison of the various signal parameters, the space frequency energy distribution is considered as an effective and reliable parameter used for the safety early warning and location of pipeline leak. The experimental results show that positioning error is less than 10 m within 2000 m measurement range based on the method.

Key words sensors; distributed optical fiber; phase optical time domain reflectometer; space frequency energy distribution; early warning; leakage positioning

OCIS codes 060.2370; 280.4788; 220.4840; 150.5495; 330.1880; 250.4480; 150.3040

1 引言

伴随着城市的发展与建设,城市供水管网泄漏成为全球普遍存在的一个问题^[1-2]。分布式光纤传感技术集传感与传输于一体,可以获得沿光纤分布

的连续信息,对输油气、输水管道的监测具有特殊的应用价值,故而成为国内外专家学者在管道流体泄漏检测中领域的研究热点^[3-7]。

当前,基于萨格纳克(Sagnac)干涉仪、基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪、基于相位敏感光

收稿日期: 2017-08-18; 收到修改稿日期: 2017-10-09

基金项目: 河北省科技计划资助项目(159676100D)、承德高新技术产业开发区创新基金支持项目(201421)、承德高新技术产业开发区承德科技创新创业苗圃项目(CGX2016KMP0001)

作者简介: 杨洋(1958—),男,博士,教授,主要从事光纤传感技术与检测方面的研究。E-mail: yangy1958@sohu.com

†两位作者同名同姓,前者性别为男,后者性别为女,同属一个单位。

时域反射仪(Φ -OTDR)这3类测试系统逐渐成为国内外利用分布式光纤传感技术开展管道流体泄漏检测的主体,并依托各自的技术特点快速发展。国内人员主要围绕系统结构优化、系统测试精度提升与系统应用领域拓展等积极开展工作^[8-13];国外专家学者则重点关注系统检测范围的扩大和检测效果的提升两方面^[14-19]。上述3类分布式传感技术大多用于检测输油气管道泄漏^[20-23],而本文将其用于城市地下输水主管道的泄漏检测。城市地下输水主管道大多分布在人群聚集区,相对于输油气管道,这一应用领域因易受人为及环境的干扰,复杂多变。同时相关研究还表明,输水管道的泄漏振动信号相对较弱、信号特征不明确。故通过有效方法实现对振动信号的处理与分析,将成为城市地下供水管网主干线安全预警和泄露定位的关键。

相比萨格纳克干涉仪、马赫-曾德尔干涉仪测试系统, Φ -OTDR 传感系统可以从根本上解决多点定位问题,且技术原理上不存在困难,是一种很有前景的技术,也是目前较为适用于城市输水管道的泄露与安全预警的测试系统之一^[24]。

本文借助这一测试系统,利用信号处理技术,对供水管道预警与泄露定位过程中所获得的振动信号进行分析后发现:时域信号、信号功率谱、信息熵、振动能量随空间和频率的分布(下文简称空频能量分布)、高通滤波等信号处理方式均可以实现输水管道安全预警与泄露点定位,其中利用空频能量分布这一参数进行输水管道安全预警与泄露定位是一种比较有效可靠的方法。

2 实验测试原理与实验系统的搭建

Φ -OTDR 是利用光纤中的后向瑞利散射光对光纤沿线振动信号进行传感的一种新技术^[25]。其系统原理结构框图如图1所示。

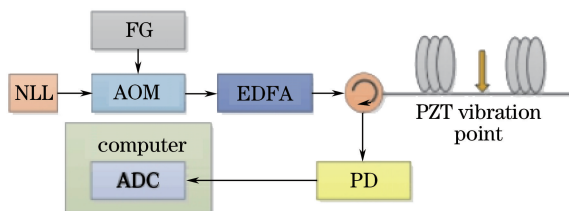


图1 Φ -OTDR 的分布式振动检测系统原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed vibration sensing system based on Φ -OTDR

利用线宽为 100 Hz 的超窄线宽激光器 (NLL) 产生 1550 nm 的强相干连续光,经过由函数发生器

(FG)驱动的 200 MHz 声光调制器(AOM)进行强度调制,形成脉冲光。后经掺铒光纤放大器(EDFA)得到峰值功率放大到约为 23 dBm 的脉冲光,将该脉冲光经过 1550 nm 环形器注入传感光纤。脉冲光在光纤内部正向传播的过程中,会由于光纤纤芯折射率的不均匀性,不断产生后向瑞利散射光。这些后向散射的脉冲光沿着光纤逆向传播,通过环形器进入 P-本征-N 型场效应管(PIN-FET)光电探测器(PD),经放大后进入数据采集卡(ADC)进行采集,并用上位机处理并分析数据。由于光纤不同位置产生的瑞利后向散射光受到该位置外界振动信号的调制(施加到该部位光纤段上的外界振动改变了局部折射率,从而导致光相位被调制),其相位信号携带了外部振动信号的信息,也同时携带了位置信息。因此可以通过对后向瑞利散射信号进行分析,获知光纤沿线不同位置处的振动情况。由于超窄线宽激光器发出的光的相干距离很长,因此在相干长度内的若干条后向散射脉冲光是相干的。从而利用干涉将脉冲光中的相位变化转换为相干光的强度变化,最终通过光电探测器对光功率进行探测,实现分布式振动传感。测试系统最大测试距离为 40 km,单一事件分辨率为 2 m,同时依据光脉冲宽度为 200 ns,设置系统理论定位精度为 20 m。系统空间采样率为 50 MSa/s,系统末端信噪比不低于 10 dB。

Φ -OTDR 光电探测器端功率迹线的表达式为^[11]

$$E(t) = \sum_{i=1}^N E_0 \cdot \exp(-2\alpha \cdot z_i) \cdot e_i \cdot \cos(\omega t + \phi_i) \cdot \text{rect}\left[\frac{2z_i - (v_g \cdot t - \omega)}{\omega}\right], \quad (1)$$

式中: E_0 为探测脉冲的初始幅值; α 为光纤衰减常数; z_i 为第 i 个散射点的位置; e_i, ϕ_i 分别为第 i 个散射点散射脉冲的幅值和相位; ω 为脉冲的空域宽度; v_g 为光在脉冲中传播的群速度; $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数。

某点光强信号为

$$I(t) = E_0^2 \cdot \left[\left(\sum_{i=m}^n e_i \cdot \cos \phi_i \right)^2 + \left(\sum_{i=m}^n e_i \cdot \sin \phi_i \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中 $m \sim n$ 为相应位置时域信号对应的光纤散射点范围。

本测试系统采用脉冲触发采集方式进行数据采集。采样频率为 50 MHz,脉冲触发频率为 1 kHz,脉宽为 200 ns。函数发生器分别给声光调制器和采集卡一个脉冲信号,光脉冲在光纤中开始传播,同时采

集卡以采样频率开始采集。每一个光脉冲在光纤中传播,在各个位置都有后向瑞利散射光形成并在脉冲宽度内发生干涉。每处的干涉信号沿光线后向传播并被光电探测器接收,再被采集卡采集,形成整段光纤空间内的空域信号。

3 不同信号处理方法比较与分析

基于 Φ -OTDR 技术的分布式管道泄漏定位与预警测试系统原理图如图 2 所示。实验在承德石油高等专科学校的花窖中进行,在花窖内埋设长为 18 m 的管道,其中一半埋于地下,一半埋于人工挖掘的一条长为 10 m、宽为 0.6 m、深为 0.5 m 的水渠。输水管道采用聚乙烯(PE)塑料管,管直径为

110 mm,在埋于地下和埋于水下的输水管道上分别打一直径为 8 mm 的泄漏孔,这两个孔距约为 8 m。18 m 的管道上铺设了一种蝶式单模光纤,光纤总长为 2 km,为防止光纤首段反射峰对测试结果的影响,在管道前端留出长度约为 70 m 光纤。实验分别以人为敲击点和水的泄露处作为探测信号的振动源点。同时,实验管道分放在水里和埋在土里两种情况,蝶式单模光纤与管道采用防水强力胶进行粘贴固定。同时为了增加胶水的粘合强度,光纤与管道粘合后放置一天再进行实验。

实验得出针对不同“位置索引”处原始时域信号的分析结果。不同的“位置索引”通过乘以系数 2.04 即可得到真实的距离。

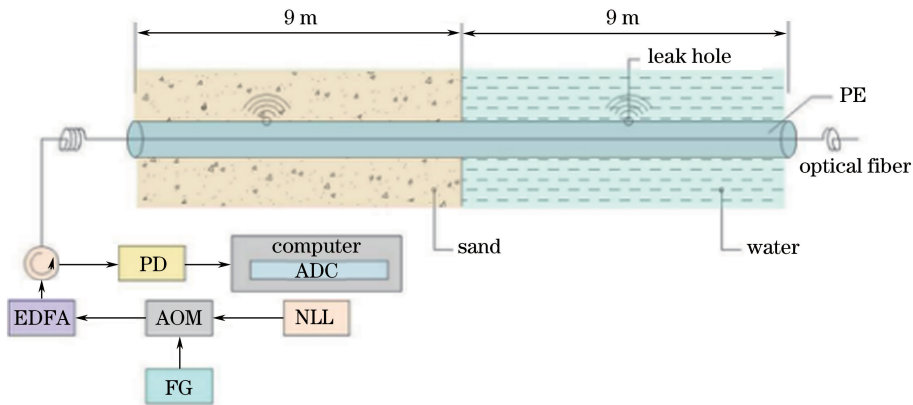


图 2 基于 Φ -OTDR 技术的管道泄漏定位与预警测试系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the pipeline leak positioning and early warning system based on Φ -OTDR

3.1 原始时域信号与原始功率谱分析

通过对原始时域信号的分析,可以得到不同位置索引处波动是否包含振动信息,从而帮助推断振动是否由外界振动导致。图 3 给出了水中敲击(水中敲击的位置与输水管道上泄露孔位置相同)形成的原始时域信号图,图右上角数字表示位置索引值,下同。实验中采用 1 kHz 的脉冲重复频率。

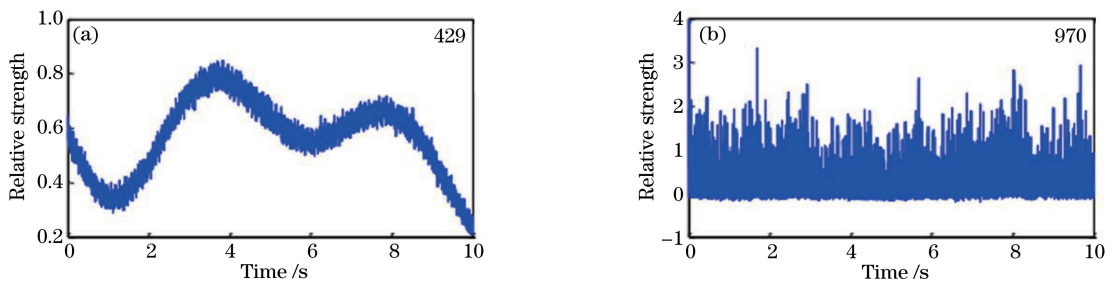


图 3 原始时域信号图。(a) 426 处原始时域信号图;(b) 970 处原始时域信号图

Fig. 3 Original time domain signals at positions (a) 426 and (b) 970

通过分析原始功率谱可以得到外界振动引起的震动能量随频率的分布情况,这一信息可以帮助得

图 3 显示,从波的形态上可以判断,位置索引 429 处的波动主要由漂移引起(温度变化、应力变化、激光器频率漂移等),并非外界振动所致。位置索引 970 处的波动包含振动信息,推断由外界振动导致。因此,利用实验测试系统对原始时域信号进行分析,可以推断振动是否由外界振动导致。

出振区信号与非振区信号的功率谱分布的差异。图 4 为水中敲击形成的原始功率谱图。429 处信号

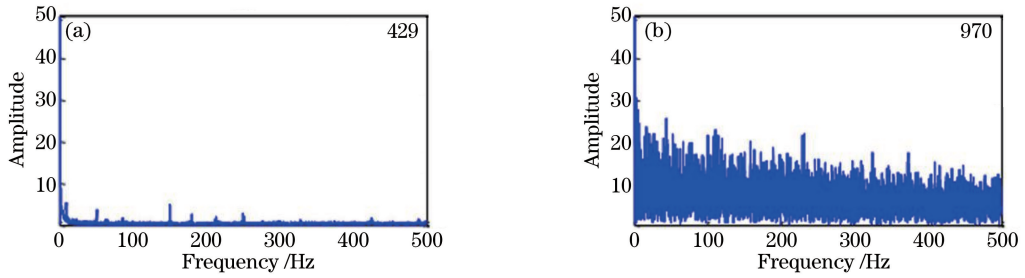


图4 原始功率谱图。(a) 429处原始功率谱图;(b) 970处原始功率谱图

Fig. 4 Power spectra of original time domain signals at positions (a) 429 and (b) 970

功率谱表现出白噪声特征。在 50, 150, 250 Hz 处存在水泵电机产生的扰动。而 970 处信号的功率谱表现为贯穿 0~500 Hz 的宽带能量分布, 因此, 可以利用功率谱来判断敲击点(预警点)、泄露点存在的位置。

3.2 近似熵与信息熵

近似熵是一种只需较少数据即可测量信号复杂性和用于统计量化的非线性动力学方法, 而信息熵

是一种用于衡量信号能量在频谱上分布的均匀程度的物理量。这两个参数均可以用来描述振动信号的大小和规律。图 5、图 6 分别给出水中敲击形成的近似熵和信息熵图。

从图 5 可以看出, 在整个测量区域近似熵分布基本重叠, 区分度很低。而从图 6 可以看出, 振动点与非振动点信息熵的分布存在显著差异。因此, 可以利用信息熵来判断预警点、泄露点的存在位置。

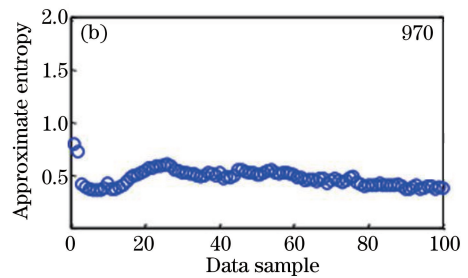
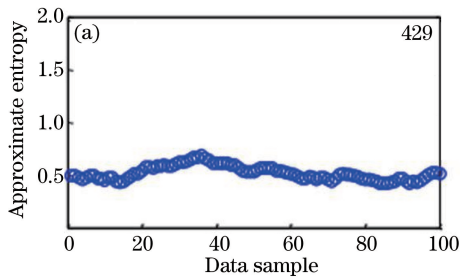


图5 近似熵图。(a) 429处近似熵图;(b) 970处近似熵图

Fig. 5 Approximate entropy distributions at positions (a) 429 and (b) 970

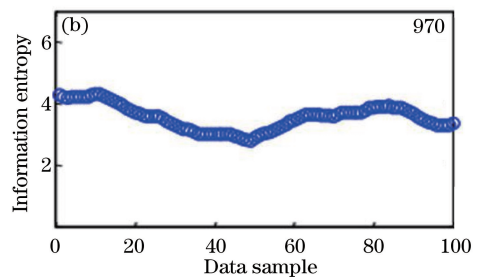
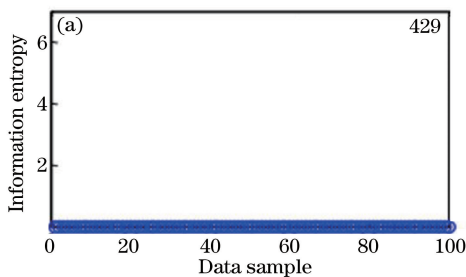


图6 信息熵图。(a) 429处信息熵图;(b) 970处信息熵图

Fig. 6 Information entropy distributions at positions (a) 429 and (b) 970

3.3 空频能量分布分析

空频能量分布图可以帮助确定泄露点的空间位置。图 7 为水中敲击时得到的空频能量分布图。

从图 7 看出, 在 964 开始之后的位置存在贯穿 0~500 Hz 的宽带能量分布, 该分布对应敲击信号的功率谱。因此完全可以通过空频能量分布确定敲击事件发生的具体位置。

3.4 滤波后信号分析

利用高通滤波的方式对原始时域信号进行处理可以得到进过滤波后的波形图, 从而可以有效分辨出噪声与敲击及泄露振动信号。图 8 为水中敲击形成的滤波后信号图。

由图 8 可见, 300 Hz 高通滤波后, 429 处全部为噪声, 970 处可以看到规律、清晰的振动波形振动信号。显然, 振区信号与非振区信号的分布存在比较

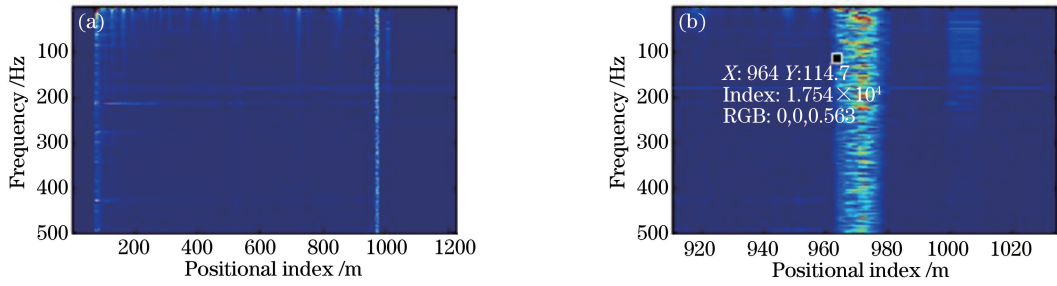


图7 空频能量分布图。(a)空频能量整体分布图;(b)空频能量局部分布图

Fig. 7 (a) Spatial frequency energy distribution; (b) spatial frequency energy distribution (in detail)

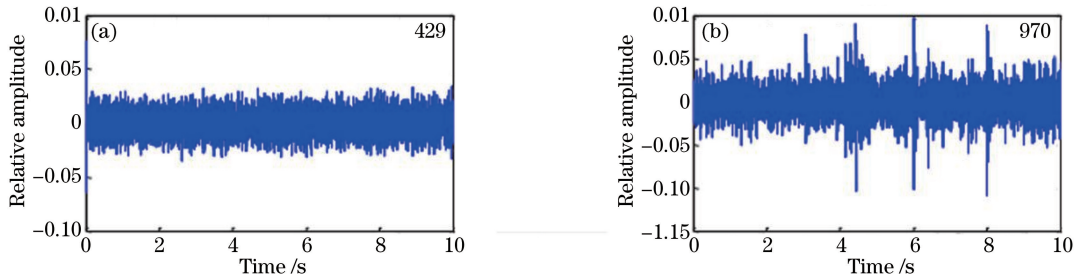


图8 高通滤波后信号图。(a) 429处滤波后信号图;(b) 970处滤波后信号图

Fig. 8 High-pass filtered signals at (a) 429 and (b) 970

明显的差异。因此完全可以通过高通滤波后信号图确定敲击事件发生的位置。

3.5 各种信号处理方法分析

通过上述实验得出,通过所获得的信号功率谱、近似熵与信息熵、空频能量分布、高通滤波、时频特性等不同方式中,除近似熵以外均可以得到泄漏点与非泄漏点不同的测试结果,因此可以认为,上述各指标都可以作为开展管道泄露预警与安全定位的手段。但深入分析后发现,时域信号尽管也能反映出振动点与非振动点的不同,但需要逐一分析每个点的时域信号,并逐一判断是否存在振动,这种方式耗时费力;信号功率谱存在相同的问题,即不能一次性反映出所有检测点的振动情况,只能进行逐点分析;利用信息熵进行预警与定位,由于信息熵的计算需要同时所有传感点进行,完成一次判别的时间通常在分钟级,因此无法实现实时监测;利用高通滤波的方式进行定位时同样存在只能逐点分析的不足。与上述各种方法相比,利用空频能量分布进行输水管道安全预警与泄露定位是一种有效并可靠的方法。这是因为这种方法具有如下优点:1)可以方便地反映出全局情况,即进行一次矩阵傅里叶变换即可获得每个传感点的振动功率谱;2)可以全面地反映出每个传感点的振动频率分布,并且借助快速傅里叶变换(FFT)可以有效降低运算时间,做到实时监测,最终用时间-频率这种方式显示出来,比较直观;3)由于受扰动区域的信号频

域能量分布趋于一致,因此可以根据空频能量分布中横轴方向的明显阶跃对信号进行判别,区分噪声引发的干扰,噪声的能量分布表现一般不具有特定区域内的一致性和集中性,因此可以在某种程度上有效避免其对信号判别的影响。

4 利用空频能量分布进行输水管道预警与泄露定位

基于空频能量分布的振动事件定位原理如图9所示。黑色的原始数据矩阵由多条时间对齐的瑞利后向散射曲线构成。其中,横轴为空间轴,代表传感位置,纵轴为时间轴,代表探测脉冲的发射时间。对该矩阵批量进行沿时间轴的快速傅里叶变换,则可

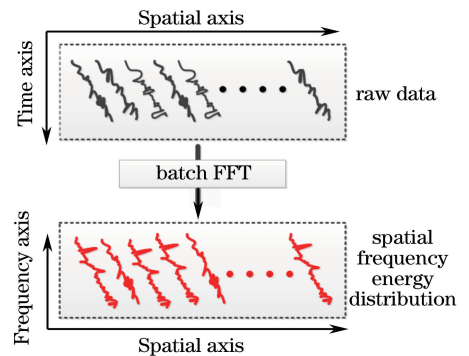


图9 空频能量分布的振动事件定位原理图

Fig. 9 Schematic diagram of the vibration location technique based on spatial-frequency energy distribution

得到反映空频能量分布的红色矩阵。该矩阵的不同列表示不同传感位置的功率谱,不同行表示不同频率成分沿光纤的能量分布。根据得到的二维能量分布,可以直观地获悉传感范围内的整体振动情况。无振动位置会表现出低水平、白噪声特性的功率谱,而受外界振动调制的位置则会呈现出特异性的功率谱。因此,通过寻找某些位置的异常功率谱或某些特定频率成分的异常空间分布则可以有效地对振动事件进行定位。另外,对能量的颜色编码可以给出直观、清晰的能量分布分析结果,有利于快速定位异常点。若进一步进行图像处理 and 机器识别,则可以实现振动事件的自动定位。

$$\mathbf{I} = (\mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \cdots \mathbf{T}_i \cdots \mathbf{T}_M)^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_i = [S_{i1} S_{i2} \cdots S_{iM}], \quad (4)$$

$$M = 2nfL/c. \quad (5)$$

式中: \mathbf{I} 代表图中的黑色矩阵,即由若干条时间对齐的瑞利散射曲线构成的原始数据矩阵; S_{ij} 为原始数据采样点;构成矩阵 \mathbf{I} 的向量 \mathbf{T}_i 则代表由 M 个采样点组成的第 i 条瑞利散射曲线; M 为每条瑞利散射曲线包含的采样点个数; f 为采样频率; L 为传感距离; n 为光纤折射率; c 为真空中的光速。对原始矩阵 \mathbf{I} 进行批量 FFT 分析后得到的红色矩阵可表示为

$$\mathbf{O} = (\mathbf{F}_1 \mathbf{F}_2 \cdots \mathbf{F}_j \cdots \mathbf{F}_N), \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_j = [A_{1j} A_{2j} \cdots A_{Nj}]^T, \quad (7)$$

$$A_{ij} = \sum_{k=0}^{N-1} S_{kj} \cdot \omega_N^{ik}, \quad (8)$$

$$\omega_N^i = \exp(-i2\pi i/N), \quad (9)$$

式中, F_i 代表时域信号 S_i 的功率谱, i 为第 i 个散射点, k 为累加指数, A_{ij} 可通过对原始数据采样点 S_{ij} 进行离散傅里叶变换(DFT)得到。

从空频能量分布的振动事件定位原理可以看出,利用空频能量分布进行输水管道预警与泄露定位的突出特点在于:空频分析通过对原始数据矩阵进行并行傅里叶变换,得到传感范围内每一个虚拟监测点的功率谱信息,由于不同种类的振动事件通常会在频率成分上表现出个性化差异,因此功率谱可以一定程度上反映出事件存在的特征,将所有监测点的功率谱构成的功率谱矩阵利用颜色编码呈现在一副图中,即可方便地反映出各点情况。当某点受到震动事件干扰时,该点信号的功率谱则由白噪声样或低频扰动样改变为与振动事件对应的特征样,从而在空频能量分布图上可以一目了然。

以下是利用蝶式单色光纤和空频能量分布图确定敲击点或泄露点空间位置的测试结果。有以下 4 点需要注意。

1) 位置索引为实际采样点,根据采样率 50 MSa/s 和光纤中折射率 $n=1.47$,可以得出一个采样周期对应的空间距离 $\Delta d = (1/f) \times (c/n)/2 = 2.04$ m。

2) 将首端反射峰上升沿起始位置标记为起点,首端反射峰上升沿起始位置为 18。因此可以得到,位置索引 p 与实际位置 X 之间的关系为: $X = (p - 18) \times 2.04$ 。

3) 实验现场是通过一个水泵将水打入输水管道内,并通过泄漏孔喷射出来,通过分布式光纤测试系统获得泄漏的振动信号的同时,输水水泵采用 50 Hz 的交流供电,水泵周期性振动产生的扰动也会通过分布式光纤感知到这个振动频率,这一情况在图 4 中的原始功率谱中可以检测到。

4) 在利用空频能量分布进行输水管道预警与泄露定位过程中,水泵的影响显然是一种干扰信号。为了减少这一干扰信号的影响,将实验所在的花窖里的水泵关掉,而采用距离现场更远的另一个花窖的水泵通过软胶管将水接到实验现场的输水管道内,这种情况下水泵干扰信号的影响基本没有了。另一方面,在水中或土中敲击管道时所得到的实验数据都可以是在不开水泵时得到的,因此可以不涉及 50 Hz 水泵的影响。

4.1 在土中对管道进行敲击点的测试结果

从能量的空频分布图可以看到,在 961 开始的位置存在宽带的能量分布。961 对应实际位置为 1924 m,为土中敲击事件的实际位置。另外,图 10(a)中所出现的两条竖线中前面的一条竖线为首段反射峰,后面一条为尾端反射峰(图 11、12 同)。

4.2 在水中管道进行敲击点的测试结果

从图 11 可以看出,在 964 开始之后的位置存在贯穿 0~500 Hz 的宽带能量分布,该分布对应于敲击信号的功率谱。可以通过空频能量分布清晰地确定敲击事件发生的位置,即该位置为 1930 m。

4.3 土中管道泄漏点的测试结果

仔细观察土中管道泄漏点的空频能量图 12 发现,从 960 处开始出现贯穿 0~500 Hz、主要集中于 0~200 Hz 的宽带能量分布,对应于土中 1921 m 处管壁泄漏产生的振动信号。

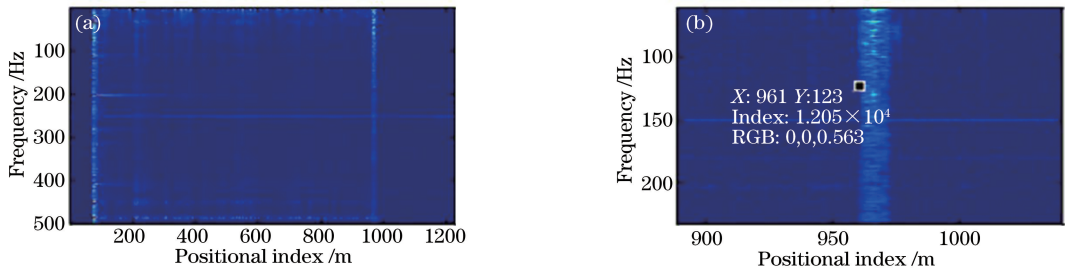


图 10 土中敲击空频能量分布图。(a)空频能量整体分布图;(b)空频能量局部分布图

Fig. 10 (a) Spatial frequency energy distribution of in-soil knocking; (b) spatial frequency energy distribution of in-soil knocking (in detail)

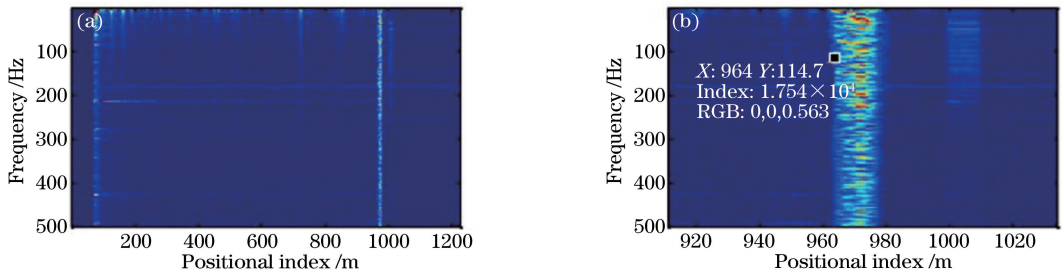


图 11 水中敲击空频能量分布图。(a)水中敲击空频能量整体分布图;(b)水中敲击空频能量局部分布图

Fig. 11 (a) Spatial frequency energy distribution of in-water knocking; (b) spatial frequency energy distribution of in-water knocking (in detail)

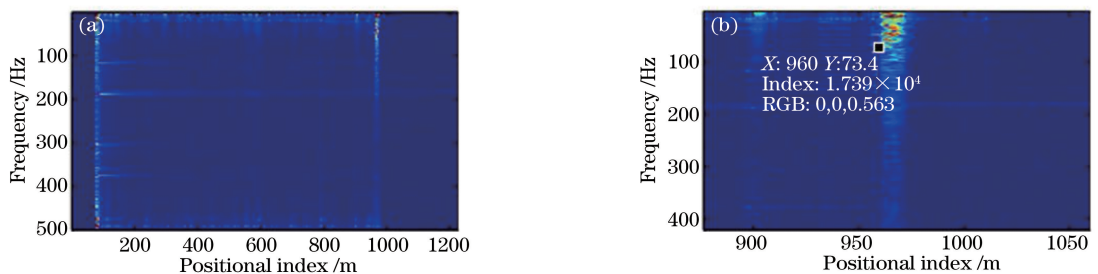


图 12 土中水泄漏空频能量分布图。(a)土中水泄漏空频能量整体分布图;(b)土中水泄漏空频能量局部分布图

Fig. 12 (a) Spatial frequency energy distribution of soil-buried water pipe leakage; (b) spatial frequency energy distribution of soil-buried water pipe leakage (in detail)

结果显示,白色蝶式单模光纤在土中、水中的泄露与敲击位置选在相同位置时,所测得的振动点位置基本一致,且根据实际测得泄漏点或敲击点实际位置,白色光纤在水中的实际位置为 1925 m,在土

中位置为 1917 m,测量结果吻合度较高,说明定位精度较高。测试结果见表 1。由表 1 可见,该测试系统在 2 km 的测试范围内,定位精度可以控制在 10 m 以内。

表 1 敲击与泄漏点位置测试结果

Table 1 Test results of knock and leak location

Serial number	Test condition	Test result /m	Actual position /m	Absolute error /m
1	Percussion in soil	1924	1917	7
2	Underwater percussion	1930	1925	5
3	Water leaking	1921	1917	4

5 结 论

1)实验结果显示,在运用 Φ -OTDR 分布式光纤

测试系统进行城市输水管道安全预警与泄露定位中,利用空频能量分布进行信号处理是一种有效并可靠的方法,这一方法最大的特点在于可以反映出

监控区域的全局情况,可获得每个传感点的振动功率谱,并且借助于FFT可以有效降低运算时间,做到实时监测。

2) 通过 Φ -OTDR分布式光纤测试系统所获得的时域信号、信号功率谱、信息熵、高通滤波等不同信号处理方式都可以用于管道泄露预警与安全定位。本文只强调了利用空频能量分布进行信号处理的优势所在,而其他方式伴随着技术发展和研究的深入,也可能成为新的有效手段。

3) 实验结果还显示,敲击信号和泄漏信号的功率谱存在差异。敲击信号的能量呈宽带分布,在整个0~500 Hz的频率响应范围内都存在能量分布,并且差异不大。而泄漏信号的频率成分主要集中在200 Hz以下,200~500 Hz内的能量较小,几乎等同于噪声水平。

4) Φ -OTDR分布式光纤测试系统伴随着窄带激光器技术的发展,定位精度越来越高,利用该测试系统,在2 km的测量范围内定位的偏差小于10 m。

参 考 文 献

- [1] Yuan Z B. Status and administrative measures for the leakage of urban drinking water network in China[J]. Municipal Administration and Technology, 2004, 6(2): 82-84.
袁志彬. 我国城市供水管网漏失率状况及其管理措施[J]. 城市管理与科技, 2004, 6(2): 82-84.
- [2] Zhang T Q, Shao Y. Monitoring and control technology and application of leakage in urban water supply pipe network [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, 9(2): 109-110.
张土乔, 邵煜. 城镇供水管网漏损监测与控制技术及应用[J]. 中国环境管理, 2017, 9(2): 109-110.
- [3] E S L. Distributed optical fiber sensing system used in well logging and pipeline leak detection[J]. OME Information, 2011, 28(12): 62-66.
鄂书林. 用于石油测井和管道运输的分布式光纤传感系统[J]. 光机电信息, 2011, 28(12): 62-66.
- [4] He C F, Hang L J, Wu B. Application of distributed optical fiber sensing technique in pipeline leak detection[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(9): 8-11.
何存富, 杭利军, 吴斌. 分布式光纤传感技术在管道泄漏检测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(9): 8-11.
- [5] Zheng Y J, Wang Z D, Yi S X. Optical fiber pre-warning system for safety of oil pipelines based on OTDR [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2008, 35(2): 45-49.
郑亚娟, 王忠东, 衣实贤. 基于OTDR技术的光纤式输油管道安全预警系统[J]. 化工自动化及仪表, 2008, 35(2): 45-49.
- [6] Mahmoud S S, Visagathilagar Y, Katsifolis J. Nuisance alarm suppression techniques for fibre-optic intrusion detection systems [C]. Third Asia Pacific Optical Sensors Conference, 2012, 8351: 83513J.
- [7] Mahmoud S S, Visagathilagar Y, Katsifolis J. Real-time distributed fiber optic sensor for security systems: Performance, event classification and nuisance mitigation [J]. Photonic Sensors, 2012, 2(3): 225-236.
- [8] Hang L J, He C F, Wu B. A new pipeline leakage detection system based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its location technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 820-824.
杭利军, 何存富, 吴斌. 一种新的直线型Sagnac光纤干涉仪管道泄漏检测系统及其定位技术[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 820-824.
- [9] Pei F J, Yang D, Liu H Y. Design and implementation of ship pipeline leakage monitor based on optical fiber interferometer[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(7): 984-990.
裴福俊, 杨东, 刘红云. 船舶管道泄漏的干涉式光纤监测仪的设计与实现[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(7): 984-990.
- [10] Li X Y, Wu H J, Peng Z P, *et al.* A novel time sequence singular spectrum analysis method for Φ -OTDR disturbance detection system [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0428001.
李小玉, 吴慧娟, 彭正谱, 等. 基于时间序列奇异谱特征的 Φ -OTDR扰动检测方法[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0428001.
- [11] Sha Z, Yang Y, Feng H, *et al.* The urban watersupply pipeline leakage monitoring technique based on phase-sensitive OTDR [J]. China Instrumentation, 2016(11):72-76.
沙洲, 杨洋, 封皓, 等. 基于 Φ -OTDR技术的城市地下供水管网主干线泄漏检测与定位[J]. 中国仪器仪表, 2016(11): 72-76.
- [12] Feng K B, Song M P, Xia Q L, *et al.* High-resolution distributed optical-fiber sensing technology based on direct-detecting coherent optical time-domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0106002.
冯凯滨, 宋牟平, 夏俏兰, 等. 基于直接检测相干光

- 时域反射计的高分辨率分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0106002.
- [13] Ye Q, Pan Z Q, Wang Z Y, *et al.* Progress of research and applications of phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0600001.
叶青, 潘政清, 王照勇, 等. 相位敏感光时域反射仪研究和应用进展 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0600001.
- [14] Martins H F, Martín-López S, Corredera P, *et al.* Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over 100 km [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8): 1510-1518.
- [15] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration [J]. Nature Communications, 2016, 7: 10870.
- [16] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085204.
- [17] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, *et al.* A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal [J]. Laser Physics, 2014, 24(11): 115106.
- [18] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, *et al.* A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse diverse frequency probe signal [J]. Laser Physics, 2015, 25(6): 065101.
- [19] Sifta R, Munster P, Sysel P, *et al.* Distributed fiber-optic sensor for detection and localization of acoustic vibrations [J]. Metrology & Measurement Systems, 2015, 22(1): 111-118.
- [20] Huang Y, Wang Q, Yang Q H, *et al.* Experimental analysis of distributed fiber optic underwater natural gas pipeline leakage detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110602.
- 黄悦, 王强, 杨其华, 等. 水下天然气管道分布式光纤泄漏检测系统实验分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110602.
- [21] Zhou Y, Jin S J, Zhang Y C, *et al.* Distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage detection and location [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 121-124.
周琰, 靳世久, 张昀超, 等. 分布式光纤管道泄漏检测和定位技术 [J]. 石油学报, 2006, 27(2): 121-124.
- [22] Wang Y, Wu R D, Dong Q, *et al.* Φ -OTDR technology for destruction alarm of gas pipeline [J]. Coal Technology, 2016, 35(2): 225-226.
王宇, 吴瑞东, 董齐, 等. 用于燃气管道破坏预警的 Φ -OTDR 技术 [J]. 煤炭技术, 2016, 35(2): 225-226.
- [23] 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.
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.
- [24] Mu L B, Wu Y F, Yao J. Study on multiple-point localization problem of distributed fiber-optic vibration-sensing systems [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(6): 42-45.
穆立波, 吴悦峰, 姚剑. 分布式光纤震动传感系统的多点定位问题研究 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29(6): 42-45.
- [25] Wang D W, Feng H, Yang Y, *et al.* Study on leakage identification method of water supply pipeline based on Φ -OTDR optical fiber sensing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 830-837.
王大伟, 封皓, 杨洋, 等. 基于 Φ -OTDR 光纤传感技术的供水管道泄漏辨识方法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 830-837.