

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2023.02.005

一种融合 Φ -OTDR和MZI的PCCP断丝 监测系统*

熊菲¹, 屈博扬⁴, 周广南², 王浩然², 张旭苹², 梁蕾², 王金³,
赵世松⁴, 张道⁴, 王峰², 张益昕^{2**}

(1. 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司, 呼和浩特市 010011; 2. 南京大学现代工程与应用科学学院, 南京 210023; 3. 北京湜沅科技有限公司, 北京 102400; 4. 南京法艾博光电科技有限公司, 南京 211135)

摘要: 设计了一种融合相位敏感型光时域反射计(Φ -OTDR)和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的预应力钢筋混凝土管(PCCP)断丝监测系统。通过引入优化的IQ解调算法, 减少了40%以上的数据运算量。实验结果证明该系统的单端测量距离不低于20 km, 频率响应不低于20 kHz, 空间定位误差在 ± 2 m以内, 具备长距离定位断丝故障和分辨振动事件特征频率的能力, 为PCCP的全生命周期在线结构健康监测提供了一种可靠的技术手段。

关键词: 预应力钢筋混凝土管(PCCP); 相位敏感型光时域反射计(Φ -OTDR); 马赫-曾德尔干涉仪(MZI); 断丝监测

中图分类号: TN818 文献标志码: A 文章编号: 1005-488X(2023)02-0133-09

A Broken Wire Detection System of PCCP Pipeline Based on Φ -OTDR and MZI

XIONG Fei, QU Boyang, ZHOU Guangnan, WANG Haoran, ZHANG Xuping, LIANG Lei,
WANG Jin, ZHAO Shisong, ZHANG Dao, WANG Feng, ZHANG Yixin

(1. Inner Mongolia Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd, Hohhot 010011, CHN; 2. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, CHN; 3. Beijing Aqua Intelligent Technology Co., Ltd, Beijing 102400, CHN; 4. Nanjing Fiber Photonics Technology Co., Ltd, Nanjing 211135, CHN)

Abstract: A broken wire detection system of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) pipeline combined with phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) and Mach-Zehnder interferometer (MZI) which reduced the amount of data computation by 40% through inducing opti-

收稿日期: 2022-11-27

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(U2001601, 62175100, 61975076); 中央高校基本科研业务费(0213-14380202); 深圳市科技创新基金(YFJGJS1.0)

作者简介: 熊菲(1986—), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为光纤通信及光纤传感;

屈博扬(1996—), 男, 主要研究方向为分布式光纤传感系统;

张益昕(1984—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为分布式光纤传感系统的机理研究与仪器化设计。

(E-mail: zyixin@nju.edu.cn)

** 通讯作者

mized in-phase quadrature (IQ) demodulation algorithm was designed. The results of the experiment showed 20 kHz frequency response and ± 2 m spatial positioning error over 20 km long fiber for single-end measurement which indicated the system could position broken wire incidents along long distance and distinguish characteristic frequencies of vibration incidents. The proposed method provided a reliable technical means for online structure health detection with full lifecycle coverage of PCCP pipeline.

Key words: prestressed concrete cylinder pipe (PCCP); phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR); Mach-Zehnder interferometer (MZI); broken wire detection

引 言

预应力钢筋混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP)将高强度钢丝、混凝土和钢板的物理力学特性结合,能承受高覆土、高工压,具有接头密封性好、耐腐蚀、运行费用低和防渗性能好等优点。因此其被广泛应用于水流引导、污水处理、热力输送、天然气分配等管线建设工程中^[1]。然而PCCP工程运行过程中经常发生渗漏、爆管事故。加拿大、南非、沙特阿拉伯等地区自使用PCCP管道以来就多次出现爆管问题^[2]。虽然在我国爆管事故尚未见诸报道,但是管道泄漏事故已多次发生^[3],具有极大的安全隐患。其中,导致PCCP爆管、泄漏的主要原因便是预应力钢丝的断裂,即PCCP断丝。

传统的管道断丝监测技术主要有有人工回声检测^[4]、电磁检测^[5-6]和水声监测三种^[7]。前两者需停水检修,且抗干扰能力差。水声监测法虽然能够进行在线测量,但是其依赖于安装在管壁上的点式声学传感器,无法连续覆盖PCCP管道全线。分布式光纤传感技术是一种将光纤同时作为传输媒介和敏感元件的传感技术,在实现非接触式测量的同时还能做到多点同时监测,并具有抗电磁干扰、耐腐蚀、损耗低、便于安装组网、能适应高温高压环境等优点,可以实现长达上百千米、高密度的温度、应变、声波等连续分布式测量^[8]。基于以上优点,分布式光纤传感技术非常适合PCCP管道断丝监测的应用。

单节PCCP管道的长度在5 m左右^[9],且PCCP断丝时会产生如图1所示的瞬态弹性波,其声波频率集中在10 kHz~20 kHz的高频段,弹性波持续时间很短,仅数十ms。因此,若要实现对PCCP的断丝监测,就要保证监测系统的空间定位不确定度 $< \pm 2.5$ m,且测频范围大于20 kHz,同时具有瞬态信

号捕获与分析能力。相位敏感型光时域反射计(Phase-sensitive optical time domain reflectometry, Φ -OTDR)和马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)是常用的分布式光纤振动传感技术。其中 Φ -OTDR的定位精度较高,即便在长距离下也能够实现m量级的高空间定位精度,但其测频范围受传感距离的限制,一般适合频率kHz以下的振动监测。MZI的定位精度低,通常在数十m量级,但其测频范围由探测器的带宽与数据采集速率共同决定^[10],可达MHz级别,特别适合宽频振动信号的测量。因此为了获得同时具备长距离、宽频响、高精度特性的分布式光纤声场传感系统,可以将 Φ -OTDR与MZI进行融合。

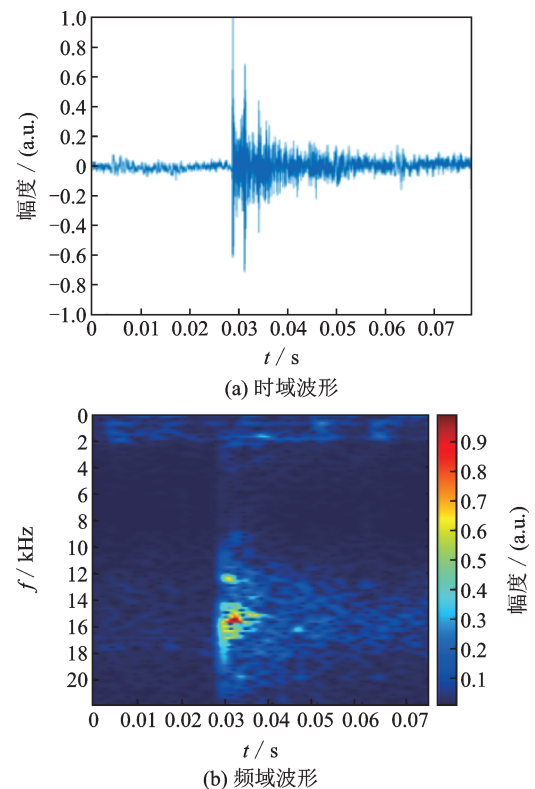


图1 断丝产生的声波信号

Fig.1 Acoustic signal of broken wire

当前已经有研究者开展了 Φ -OTDR与MZI的融合设计研究。2013年,T.Zhu等人利用高强度窄脉冲和低强度宽脉冲组成特殊的探测脉冲序列,借此将 Φ -OTDR与MZI结合,实现高频率响应的同时还能够获取振动位置信息,最大探测频率3 MHz,空间分辨率5 m。但其干涉信号解调部分运算较复杂,涉及混频信号的乘法计算,运算压力大^[11]。2017年,Y.X.Zhang等人提出了一种单端接入 Φ -OTDR和MZI结合的系统,在传感光纤的尾端设计了一个移频镜来反射光纤中传输的连续光,在6.35 km的光纤上达到了1.2 MHz的频率响应以及10 m的空间分辨率,实现了单端监测,简化了系统结构。但这种单端监测结构同样会带来后续信号处理压力巨大的问题,并且该系统分辨率无法满足PCCP单节管道断丝定位的需求^[12]。2018年,Z.Y.Zhao等人利用基于多芯光纤的空分复用技术将 Φ -OTDR与MZI融合,避免了 Φ -OTDR与MZI之间的串扰,后续数据处理过程简单,有良好的信噪比。但多芯光纤结构增加了光路的复杂性,同时也增加了系统成

本,此外该系统探测频率上限仅为12 kHz,无法满足PCCP监测过程中的高频探测需求^[13]。同时这些工作均未针对PCCP断丝监测进行参数优化,尚不能据此提供可靠的监测方案。

文章针对传统PCCP断丝监测方式定位困难、抗干扰能力差,以及 Φ -OTDR与MZI的融合系统结构复杂、计算压力大等问题,对一种融合 Φ -OTDR与MZI的PCCP断丝监测系统的实现方法进行了研究,以期同时获得长距离定位断丝故障和分辨振动事件特征频率的能力,为PCCP断丝的全生命周期在线监测提供了一种可靠的技术手段。

1 传感原理

1.1 PCCP断丝监测系统结构及原理

1.1.1 PCCP断丝监测系统结构

图2为融合 Φ -OTDR和MZI的PCCP断丝监测系统的结构图。

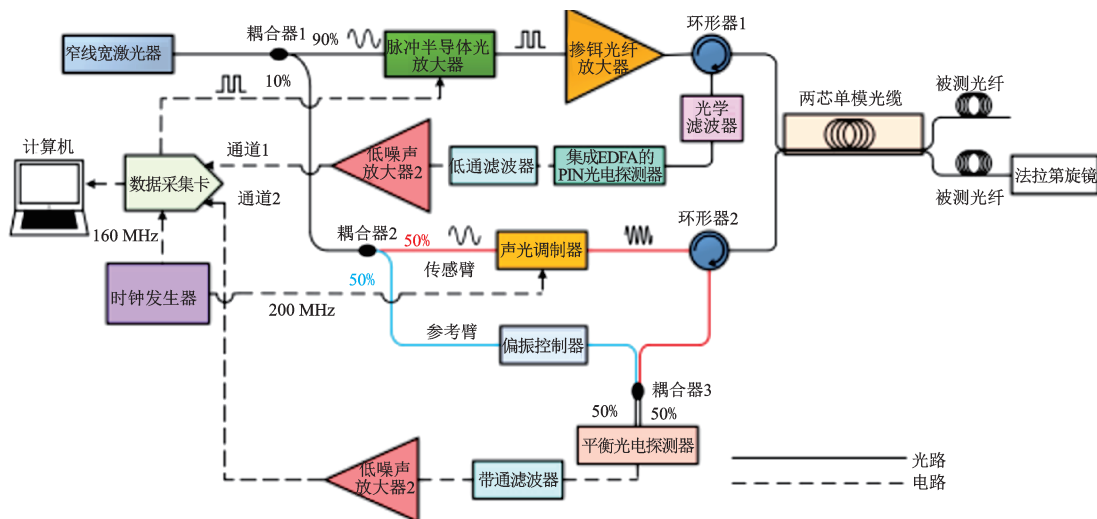


图2 融合 Φ -OTDR和MZI的PCCP断丝监测系统结构

Fig.2 Structural diagram of broken wire detection system of PCCP pipeline merged with Φ -OTDR and MZI

系统由鉴幅型 Φ -OTDR和单端接入MZI构成。中心波长为1 550 nm、线宽为3 kHz的窄线宽激光器(Narrow linewidth laser, NLL)输出光功率为10 dBm的连续光,该连续光经过90:10的耦合器1(Coupler1, OC1)被分为两路。90%的一路作为直接探测型 Φ -OTDR部分的探测光,经脉冲半导体光放大器(Pulse-semiconductor optical amplifier, PLS-SOA)调制模块后被调制成消光比大于50 dB的探测脉冲光,PLS-SOA的脉冲调制信号由数据采集卡(Date acquisition, DAQ)提供,其重复频率

和脉宽分别为2 kHz和50 ns。探测脉冲光后被掺铒光纤放大器(Erbium-doped fiber amplifier, EDFA)放大,经环形器1(Circulator1, CIR1)注入传感光纤,在光纤中产生的瑞利背向散射(Rayleigh backscattering, RBS)光再由CIR1返回,然后经光学滤波器(Optical filter, OF)抑制带外噪声光信号后被集成EDFA的PIN光电探测器接收。输出的电信号经过电学低通滤波器(Low Pass filter, LPF)、低噪声放大器(Low noise amplifier, LNA)的信号调理后,被具有160 MSa/s采样率的DAQ的通道1

(Channel1, CH1)采集。上述部分实现了鉴幅型 Φ -OTDR 的功能,用于扰动事件的定位分析^[8]。NLL 输出的被耦合器分为 10% 的一路作为干涉部分的光信号,经 50:50 的 OC2 分为两路,一路作为传感光信号进入传感臂(红色光路部分),另一路作为参考光信号进入参考臂(蓝色光路部分)。传感光经声光调制器(Acoustic optical modulator, AOM)移频 200 MHz 后通过环形器注入传感光纤,在光纤的尾端放置法拉第旋镜(Faraday rotator mirror, FRM)用于反射传感光。反射回来的传感光再次经过光纤通过 CIR2 输出,由于法拉第旋镜的作用,这一过程将补偿沿线光缆双折射的影响。该系统的传感光缆由约 21 km 的两芯单模光缆(Duplex optical fiber)和两盘约 1 km 的被测光纤(Fiber under test, FUT)组成,参考臂中插入偏振控制器(Polarization controller, PC)来降低偏振相关噪声,参考光和传感光在 2×2 的 50:50 的 OC3 处发生干涉,产生的干涉中频信号被 350 MHz 带宽的平衡光电探测器(Balanced photo detector, BPD)接收,然后经带通滤波器(Band pass filter, BPF)与 LNA2 的信号调理后,被 DAQ 的 CH2 采集。此为 MZI 部分,用于扰动事件的频率、相位分析。时钟发生器用于 DAQ、AOM 等模块间的时钟同步与驱动信号合成。

1.1.2 定位原理

对断丝事件的定位依靠鉴幅型 Φ -OTDR 实现。在该系统中, BPD 内部由两个性能一致的光电探测器组成,能够抑制光电探测中的直流偏置和共模噪声,从而提升探测结果的信噪比。对于 50:50 的耦合器,输出两端分别为瑞利散射光信号和本振参考光信号,两者电场强度 $E_S(t)$ 和 $E_R(t)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} E_S(t) &= A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \\ E_R(t) &= B \cos[(\omega_0 t + \Delta\omega)t + \varphi_1] \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $A(t)$ 为幅度随时间变化的瑞利散射信号光场强, ω_0 为探测光脉冲角频率; φ_0 为瑞利信号光的初始相位; B 为稳定的本振光场强; $\Delta\omega$ 为声光调制器引入的光信号频移; φ_1 为本振光的初始相位。若不考虑偏振对两路信号的影响,则输出的光电流信号可以表示为:

$$\begin{aligned} I(t) &\propto E_S^2(t) + E_R^2(t) + \\ &2E_S(t)E_R(t) \exp[j(-\Delta\omega t + \varphi_0 - \varphi_1)] \end{aligned} \quad (2)$$

当外部扰动作用于光纤时,会引起相应位置处的光纤长度、折射率发生变化,从而导致内部光波的相位发生变化^[14], 该处产生的 RBS 信号曲线的幅度也会发生变化。对扰动前后时刻的 RBS 曲线作

差便可实现对扰动事件的定位^[8]。

1.1.3 扰动重构原理

对断丝事件的振动信号重构,需要依靠 MZI 系统。由干涉原理可知 MZI 的传感臂和参考臂中的光波发生干涉后产生的干涉光的光强为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\Delta f t + \varphi_0) \quad (3)$$

当外部扰动作用时,干涉光的强度变化为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\Delta f t + \varphi_0 + \Delta\varphi) \quad (4)$$

其中, I_1 为传感光的光强, I_2 为参考光的光强, Δf 为 AOM 使传感臂中的光产生的频率变化, t 为时间, φ_0 为干涉系统的传感光和参考光间的初始相位差, $\Delta\varphi$ 是扰动事件作用后引起的相位变化。利用探测器接收干涉光,对探测器输出的电信号进行运算处理,最终解调出 $\Delta\varphi$, 实现外部扰动事件的重构^[12]。

1.2 IQ 解调算法的优化

MZI 的相位解调通常以正交调制(In-phase Quadrature, IQ)解调算法实现。IQ 解调构成了文中传感系统数据处理最主要的计算量。对于中心频率不为零,且带宽远小于中心频率的带通型信号,一般可以采用带通采样。设带通信号 $m(t)$ 的频率限制在 f_L 和 f_H 之间,带宽为 $B = f_H - f_L$, 如果最小采样频率 $f_s = 2f_H/m$, 且 m 为不超过 f_H/B 的最大整数,那么 $m(t)$ 可以完全由其采样值决定。带通采样理论可以降低系统所需的采样频率,能够降低系统实时处理的运算负担^[15]。在带通采样的频谱不发生混叠的前提下,通过合理设置采样率 f_s 和中频信号的中心频率 f_c , 能够大大简化 IQ 解调运算。

图 3 为 IQ 解调过程,中频信号 $i(t)$ 分别与本振 $\cos(\Delta\omega t)$ 和 $\sin(\Delta\omega t)$ 相乘,再经过低通滤波,即可得到混频后的信号 I 与 Q , 通过 I 、 Q 之间的运算即可得到解调后的信号 $A(t)$ 与相位 $\Delta\varphi$, 其中运算量最多的便是本振和中频信号的相乘运算。

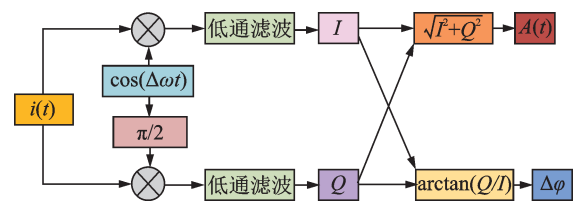


图 3 IQ 解调原理

Fig.3 Schematic of IQ demodulation

当 f_s 与 f_c 满足以下条件时,带通采样得到的频谱不会发生混叠:

$$\begin{cases} \frac{2f_c + B}{m + 1} \leq f_s \leq \frac{2f_c - B}{m} \\ f_s > 2B \end{cases} \quad (5)$$

其中, m 可以取任意正整数。由式(5)可以得到在采样频谱不会发生混叠的情况下,合理设置 f_s 和 f_c 使之满足如下关系时, IQ 解调算法可以得到优化:

$$f_s = \frac{4f_c}{2k - 1} \quad (6)$$

其中, k 可以取任意正整数。此时,一个采样周期能够采 4 个中频数据点,且相邻两点间的相位差为 $\pi/2$ 。本振的值变为:

$$L_1 = \cos(\Delta\omega t) = \cos\left(2\pi n \frac{f_c}{f_s}\right) = \cos\left(\frac{\pi}{2} n\right) \quad (7)$$

$$L_Q = \sin(\Delta\omega t) = \sin\left(2\pi n \frac{f_c}{f_s}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} n\right) \quad (8)$$

其中, $n=0, 1, 2, \dots$ 。此时本振的数值简化为一组固定的四元矩阵:

$$L_1 = (1, 0, -1, 0) \quad (9)$$

$$L_Q = (0, 1, 0, -1) \quad (10)$$

假设一个采样周期内的四个中频数据点为:

$$X = (X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (11)$$

当其与本振信号相乘时,混频后的信号可表示为:

$$I(t) = X \cdot L_1 = X_1 - X_3 \quad (12)$$

$$Q(t) = X \cdot L_Q = X_2 - X_4 \quad (13)$$

由此可将本振与中频信号的乘法运算简化为减法运算,极大地减小了数据运算量,提升了数据的处理速度。在文章的 PCCP 断丝监测系统中,取 5 m 空间分辨率内的数据点,使用配置为 AMD R5 5600H 型 CPU 以及 16 GB 3 200 MHz 内存的计算机,对总时长 90 s 的原始中频信号进行解调,对比优化前后的 IQ 解调算法,得到前者的平均运算时间为 102 ms,后者的平均运算时间为 59 ms。优化后的 IQ 解调算法的运算量比优化前减少了 42.2%。

2 实验与结果分析

2.1 断丝故障诊断

为模拟断丝产生的振动信号,在传感光纤的尾端连接压电陶瓷(Piezoelectric Ceramics, PZT),利用 PZT 模拟断丝振动信号即外部扰动事件,施加在两芯光纤和 FUT 之间,这样便于观察振动事件。图 4 为 PZT 位置示意图。传感系统连接长度约为

21 km 的两芯单模光缆,在光缆后接入 PZT,再将两盘长约 1 km 的 FUT 连接到 PZT 输出端,其中一盘 FUT 末端接入 FRM。在 10 Hz 到 20 kHz 之间选择多个特定的不同频率,最后通过采集 RBS 信号和干涉信号即可获取 PZT 模拟的振动信号位置以及频率信息。图 5 为 Φ-OTDR 和 MZI 系统未接入 PZT 时的原始波形。由 Φ-OTDR 系统原始波形图可见传感光纤长度为 22 km 左右,与图 4 中的两芯单模光缆以及 FUT 段长度相吻合。随着距离增加,信号强度逐渐减弱。MZI 系统原始波形图中纵轴为数采卡采集的二进制数据对应电压值,由图可见中频信号具有一定的正弦特性,由于采用了四倍采样率的采集模式,因此每个周期有四个采样点。Φ-OTDR 光电探测结果的幅度变化、MZI 光电探测结果的相位变化均携带了振动信息。通过 1.1、1.2 所述原理,可以从解调出有效信号。

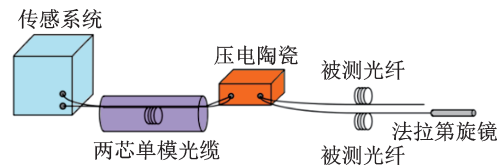
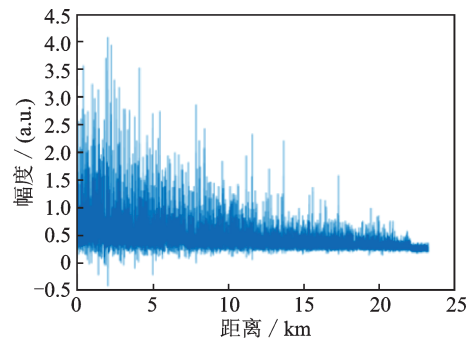
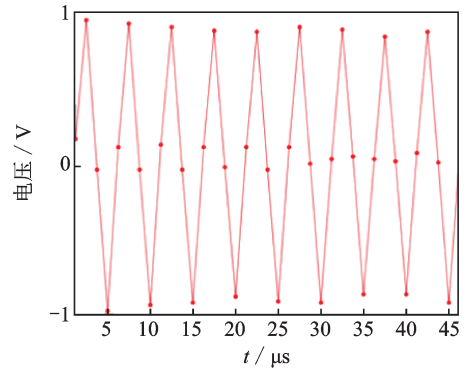


图4 PZT位置示意图

Fig.4 Schematic of the position of PZT



(a) Φ-OTDR系统原始波形图



(b) MZI系统原始波形图

图5 Φ-OTDR和MZI系统原始波形

Fig.5 Original waveform diagrams

图 6 为施加 10.1 kHz 振动时 Φ -OTDR 系统时域图、安静状态与接入 PZT 时的解调结果对比以及频谱图。由图 6(a) 的时域图可见振动位置的信号时域图由于受到 PZT 施加的振动的影响具有一定的正弦特性, 但 Φ -OTDR 系统采集的 RBS 信号较弱, 再加上脉冲光源信号的影响, 得到的信号时域图无法通过直接观察得到施加的振动信号的准确频率。

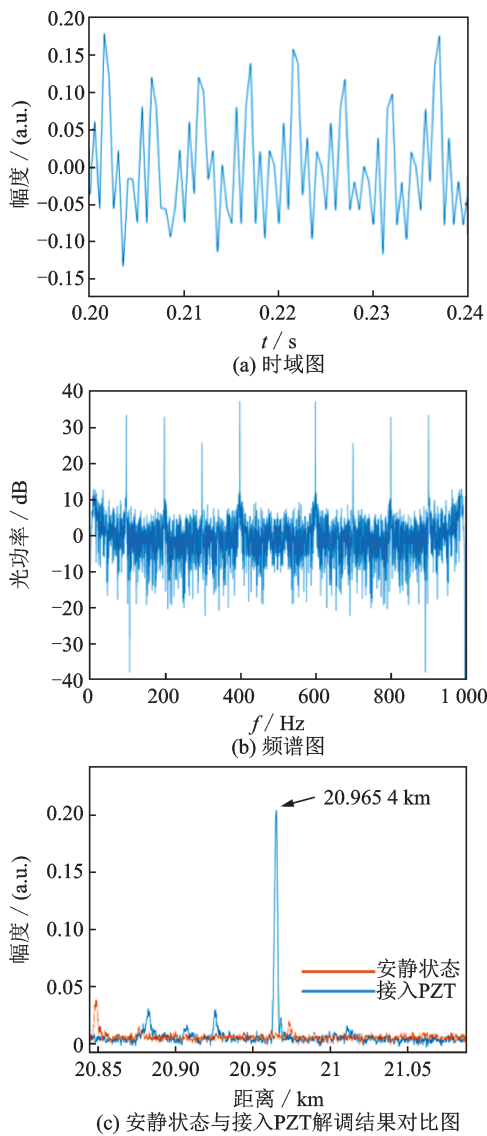


图 6 PZT 施加 10.1 kHz 振动时 Φ -OTDR 系统

Fig.6 Φ -OTDR system with applying 10.1 kHz vibration signal by PZT

对 RBS 信号滤波并进行快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 即可得到振动信号的频谱图, 如图 6(b) 所示。从频谱图中可以观察到频谱上存在 100 Hz 的主峰以及其诸次谐波。谐波的存在正是由于鉴幅型 Φ -OTDR 在振动测量时的非线性

失真带来的^[8], 而主频率成分 100 Hz 也与施加的 10.1 kHz 不符, 这是因为根据奈奎斯特采样定律, 在进行模拟/数字信号的转换过程中, 当采样频率 f_{smax} 大于信号中最高频率 f_{max} 的两倍时, 采样之后的数字信号才能完整地保留原始信号中的信息。但受制于传感光缆的长度, Φ -OTDR 系统的脉冲光频率被设置为 2 kHz, 使得频率高于 1 kHz 的振动信号发生频谱折叠, 原本的高频信号就会被采样成为低频信号。因此 Φ -OTDR 系统无法实现 PCCP 断丝监测要求的高频响应, 但可以根据系统的幅度响应结果实现对振动事件的定位。由于 RBS 信号受到外界干扰较小, 幅值变化较稳定, 但受到 PZT 振动影响的光纤段 RBS 信号会随施加的振动信号产生周期性变化, 因此将采集到的 RBS 信号求方差即可得到 Φ -OTDR 系统采集到的振动的位置信息^[16], 如图 6(c) 所示。由图可见振动位置在 20.965 4 km 处, 与两芯单模光缆长度相符合。

对于振动信号的高保真要依靠 MZI 系统。图 7 为施加 10 kHz 振动时 MZI 系统时域图以及安静状态与接入 PZT 解调结果频谱对比图。对采集到的 MZI 系统的原始信号进行滤波以及 FFT 即可得到振动信号的功率谱图^[17]。

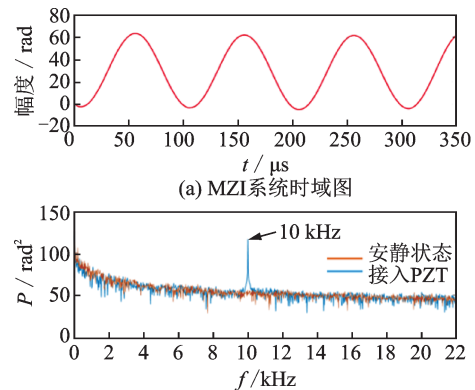


图 7 PZT 施加 10 kHz 振动时 MZI 系统

Fig.7 MZI system with applying 10 kHz vibration signal by PZT

图 8 与图 9 分别为施加 1 kHz、10 kHz 以及 20 kHz 时系统的时域图与频谱图。由图 8 中时域图可见系统对振动信号解调还原效果很好, 符合 PZT 施加的振动信号的正弦特性以及周期特征。由图 9 中频谱图可见系统能够准确获得振动信号的频率信息, 但随着施加的振动频率的提高, 频谱图上振动峰的幅值略有上升, 这是由于 PZT 本身的频响特性会影响到振动信号, 导致较高频率的振动信号对应频谱图振动峰处幅值上升。

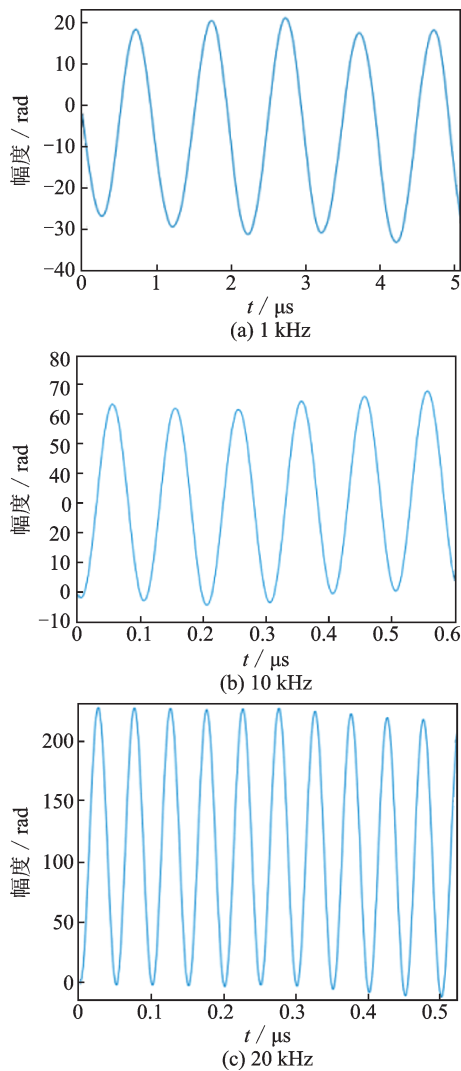


图8 不同振动频率下时域图

Fig.8 Time domain spectrum of different vibration signals

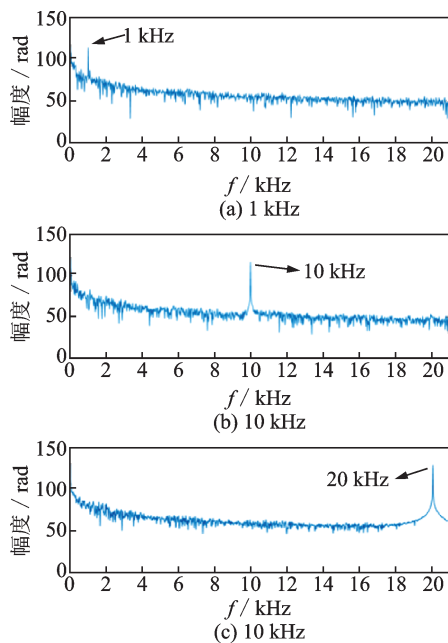


图9 不同振动频率下频谱图

Fig.9 Frequency spectrum of different vibration signals

2.2 断丝故障定位

2.2.1 断丝模拟装置

假设PCCP管道中的预应力钢丝缠绕在PCCP管芯上所受的拉应力为 σ ,其弹性模量的设计值为 E ,所以预应力钢丝缠绕在管芯上产生的应变 ϵ 为:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (14)$$

预应力钢丝因此产生的形变 ΔL 为:

$$\Delta L = \epsilon \cdot L \quad (15)$$

其中, L 为预应力钢丝的长度。预应力钢丝以螺旋状缠绕在PCCP管芯上,由于管芯的直径一般为4 m左右,相对来讲,缠绕的螺距可忽略不计,所以将预应力钢丝看作以绕圆的形式缠在管芯上,绕管芯一圈的长度为管芯的周长。此外,预应力钢丝断裂时一般为PCCP管上某一点处断裂,由于混凝土的包裹作用,不会全局产生形变,所以产生形变的预应力钢丝长度一般小于管芯的周长。假设只有1/4管芯圆周的长度产生了形变,此时:

$$L = \frac{1}{4} \pi D \quad (16)$$

其中, D 为管芯的半径。预应力钢丝所受拉力 F 的计算公式为:

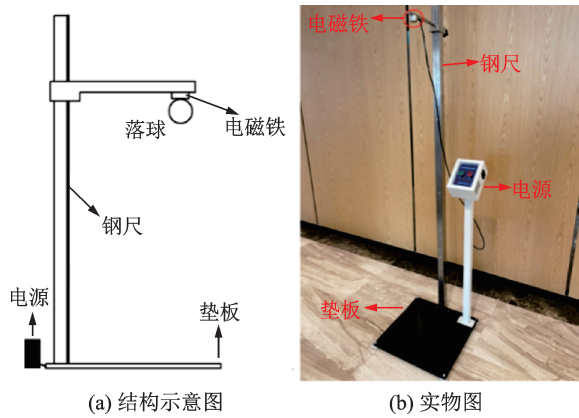
$$F = \sigma S \quad (17)$$

其中, $S = \pi r^2$ 为预应力钢丝的横截面面积, r 为预应力钢丝的半径。根据中国水利水电出版社出版的《预应力钢筒混凝土管的设计、生产、施工及数值分析》提供的数据,可以得到 $\sigma = 1100 \text{ MPa}$, $E = 193050 \text{ MPa}$, $D = 3.99943 \text{ m}$, $r = 2.5 \text{ mm}$ 。又根据能量守恒定律:

$$mgh = F\Delta L \quad (18)$$

其中, m 为落球的质量, h 为落球的高度, $g = 9.8 \text{ N/kg}$ 为重力加速度。由式(18)可计算出 $m h \approx 39.47 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 。根据以上结果即可进行 m 和 h 的取值,当 $h = 1.2 \text{ m}$ 时(人体舒适的投放高度), $m \approx 33 \text{ kg}$ 。利用如图10所示的落球装置模拟断丝故障,开展断丝故障定位实验。统一落球质量为33 g,落球的高度为1.2 m。根据上文分析,该落球过程所激发的能量仅为断丝的千分之一量级。若文中传感系统能够捕获该事件,则其应能够在现场条件下实现对PCCP断丝事件的监测。垫板的材料选择了刚度较大的不锈钢,以便于更好地产生和传导高频声发射信号。断丝故障定位实验的落球采用钢球,垫板采用1320 mm×800 mm×3 mm的不锈钢板,在反面等间隔粘贴五个首尾相接的光纤环,每个光纤环长度

为 5 m,用于模拟一节 PCCP 管(长度为 5 m),并利用环氧树脂 AB 胶固定,垫板上的螺纹孔用于配合螺柱支撑垫板,不锈钢垫板示意图如图 11 所示。



(a) 结构示意图 (b) 实物图

图 10 断丝模拟装置

Fig.10 Broken wire simulation device

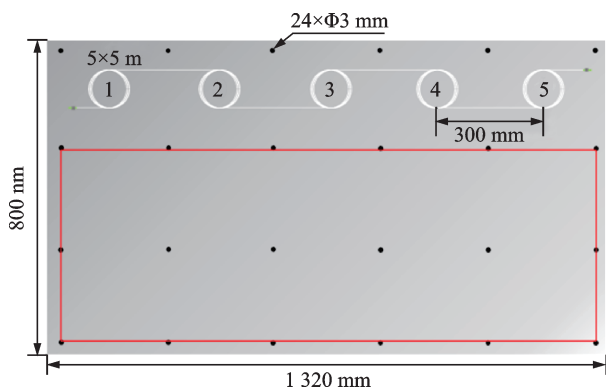


图 11 垫板上的光纤布设方式

Fig.11 Layout of the optical fiber on the plate

2.2.2 断丝故障定位实验

实验时将不锈钢垫板粘贴光纤环的一面朝下,利用落球机使同一钢球从同一高度落下,坠落至不锈钢垫板上不同位置,每个位置重复五次落球,对传感系统采集到的数据进行处理和分析。图 12 展示了某次钢球坠落产生的时域瀑布图,从图中能够明显看到落球产生的振动信号的持续时间和落球的大致位置,信号的持续时间达到了 0.9 s 左右,这是由于实验中使用钢球坠落到不锈钢垫板上模拟断丝信号,因此钢球坠落后垫板会保持一段时间的持续振动,导致信号持续时间达到 s 级。对解调后的振动信号求方差并进行归一化处理,即可得到振动信号的位置信息。图 13 为钢球坠落环 3 区域和环 5 区域的具体位置信息。由图可见,两次落球的位置分别为 21 091.35 m 和 21 099.43 m,在环 3 和环 5 的区域范围内,定位结果准确。

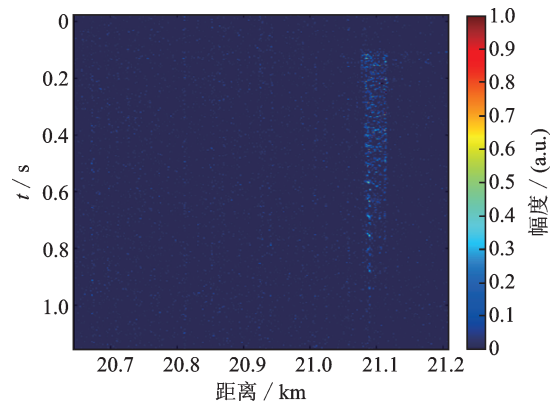
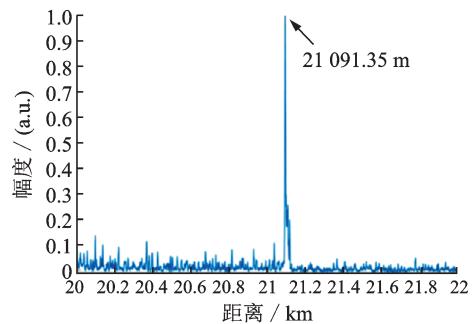
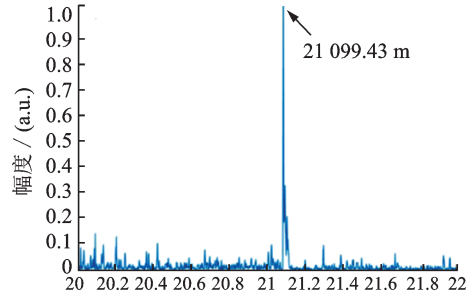


图 12 钢球坠落的时域瀑布图

Fig.12 Time domain waterfall plot during the drop of the steel sphere



(a) 环3区域



(b) 环5区域

图 13 落球的位置信息

Fig.13 Location information of the sphere drop

在环 3 和环 5 区域分别重复 5 次落球,定位结果如图 14 所示,得到的定位不确定度分别为 ± 1.5 m 和 ± 2 m,环 3 与环 5 之间距离的平均定位结果为 8.08 m,而实际环 3 与环 5 之间距离为 10 m,定位结果误差约为 2 m。取定位不确定度按照效果较差的环 5 进行评估,可以认为该系统的空间定位误差在 ± 2 m 以内,定位精度高,重复性好,能够满足 PCCP 管道断丝监测的定位要求。

在振动信号的频率超过 Φ -OTDR 系统的频率响应范围时,若有多个位置的振动信号同时作用在传感光纤上,对于单音振动的振动事件,在 Φ -OTDR 系统中,振动的实际频率与混叠的假频之间的

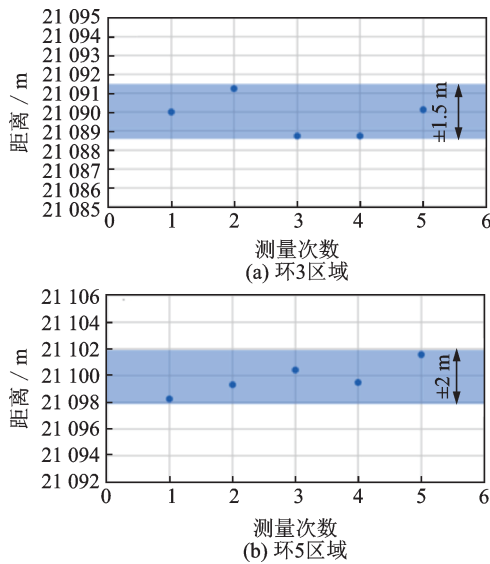


图14 五次落球的位置

Fig.14 Position of five-time sphere drops

关系可以表示为:

$$f_{\text{aliasing}} = |f_{\text{true}} - kf_s| \quad (|f_{\text{true}} - kf_s| < f_s/2) \quad (19)$$

其中, f_{aliasing} 是 Φ -OTDR 系统在带通采样情况下获得的混叠假频, f_{true} 是振动的实际频率, f_s 是探测脉冲的重复频率, k 是整数, 高频振动会翻折到 $-f_s/2$ 到 $f_s/2$ 的假频范围内, 但振动信号的位置信息不会发生改变, 因此可以通过假频与实际频率对应来确定振动位置的实际频率信息^[17]。在 MZI 系统中, 其频率响应仅受到探测带宽影响, 因此仍然能够获得多个高频振动信号的完整频谱信息, 而不会发生频谱混叠现象。

3 结 论

文章提出了一种融合 Φ -OTDR 和 MZI 的 PC-CP 断丝监测系统, 能够实现高定位精度和宽测频范围的振动测量, 且优化后的 IQ 解调方法能够极大地减小数据运算量。实验结果证明, 文章所设计系统的测量距离不低于 20 km, 频率响应不低于 20 kHz, 空间定位误差在 ± 2 m 以内, 满足 PCCP 管道断丝监测的需求, 为未来 PCCP 管道断丝监测的工程应用提供了可靠的技术手段。

参 考 文 献

[1] 张社荣. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的设计、生产、施工及数

值分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 1-10.

- [2] Essamin O, Elsahli K, Hovhanessian G. The great man made river management system: A pipe risk management system (Prms) for prestressed concrete cylinder pipe: How an expert model and monitoring extend a pipeline lifespan at lower cost [C]. Pipeline Division Specialty Congress, San Diego, California, United States, August 1-4, 2004.
- [3] 姚宣德. 北京市南水北调配套工程 PCCP 管道断丝、漏水实时监测集成系统[J]. 水利水电技术, 2016, 47(10): 67-71.
- [4] 高开绪, 高媛, 娄西国. PCCP 安全性能与断丝检测技术探讨[J]. 科学技术创新, 2020, 3: 104-106.
- [5] 齐海铭, 宋建国, 崔友国. PCCP 断丝的电磁无损检测技术研究[J]. 电气工程, 2017, 5(4): 233-241.
- [6] Mergelas B J M, Atherton D L. In-line electromagnetic inspection of PCCP [C]. Pipelines in the Constructed Environment, San Diego, California, United States, August 23-27, 1998.
- [7] 林天翔, 冯少孔, 叶冠林, 等. 大型压力输水管道泄漏监测方法的试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 136-142.
- [8] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 100-114.
- [9] 骆建军, 姚宣德. 基于 AHP 法的大口径 PCCP 管道断丝安全风险[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(3): 65-72.
- [10] 何茜. 基于 Φ -OTDR 的光纤分布式宽频振动传感技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [11] Zhu T, He Q, Xiao X, et al. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2953-2963.
- [12] Zhang Yixin, Xia Lan, Cao Chunqi, et al. A hybrid single-end-access MZI and Φ -OTDR vibration sensing system with high frequency response [J]. Optics Communications, 2017, 382: 176-181.
- [13] Zhao Z, Ming T, Liang W, et al. Distributed vibration sensor based on space-division multiplexed reflectometer and interferometer in multicore fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(24): 5764-5772.
- [14] Masoudi A, Newson T P. Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling [J]. Optics Express, 2017, 25(25): 32021.
- [15] 牛光辉, 苏鹏. 带通采样在多载波数字中频接收机中的应用[J]. 电讯技术, 2008, 1: 47-51.
- [16] Zhang Xuping, Cao Lu, Shan Yuanyuan, et al. Performance optimization for a phase-sensitive optical time-domain reflectometry based on multiscale matched filtering[J]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 56114-56122.
- [17] Shan Yuanyuan, Dong Jiayun, Zeng Jie, et al. A broadband distributed vibration sensing system assisted by a distributed feedback interferometer[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 1-10.