

基于双MZ干涉原理的光纤微振动传感器关键技术

李振威¹, 蒋思尝², 栾敬钊¹, 翟晖², 骆健恒²

(1. 国网大连供电公司, 辽宁 大连 116000; 2. 广州光束信息技术有限公司, 广州 510000)

摘要:针对市场上分布式光纤振动传感器的定位精度和灵敏度低、误报率高的问题,提出一种基于双马赫-曾德尔(MZ)干涉原理的光纤微振动传感器,介绍了该传感器的结构、相干检测技术和入侵事件模式识别技术。实验结果表明:该传感器的单次触发的探测率>99.7%,多次触发的探测率=100%,单次误报率<1%。

关键词:分布式光纤振动传感; 双马赫-曾德尔干涉; 光拍频; 相干检测

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)09-0045-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.09.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Key technology of optical fiber micro vibration sensor based on double MZ interference principle

LI Zhenwei¹, JIANG Sichang², LUAN Jingzhao¹, ZHAI Hui², LUO Jianheng²

(1. State Grid Dalian Electric Power Supply Company, Dalian Liaoning 116000, China;

2. Guangzhou beam Information Technology Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Aiming at the problems of low positioning accuracy, low sensitivity and high false alarm rate of distributed optical fiber vibration sensor in the market, this paper proposes a fiber optic micro vibration sensor based on double Mach-Zehnder (MZ) interference principle, and introduces the structure of the sensor, coherent detection technology and intrusion events pattern recognition technology. The experimental results show that the single trigger detection rate of the sensor is more than 99.7%, the multiple trigger detection rate is equal to 100%, and the single false alarm rate is less than 1%.

Key words: distributed fiber optic vibration sensing; dual Mach-Zehnder interference; optical beat frequency; coherent detection

0 引言

近年来,管道泄漏报警、电力电缆防外力入侵和周界安防等的需求逐渐增多,及时发现和定位事故点具有重要的意义。传统的安全监控方法主要有摄像监控视频识别技术、电磁类拾振器振动监控技术等,这些方法存在监控范围小、需要电源支持和抗电磁干扰能力差等缺点。

分布式光纤传感器在以上几个方面的优越性十分明显。但是,由于市场上分布式光纤振动传感器的

性能受关键技术和核心器件的限制,定位精度、灵敏度和误报率等问题无法得到很好的解决。因此,本文提出一种基于双马赫-曾德尔(MZ)干涉原理的光纤微振动传感器关键技术。

1 光纤微振动传感器结构

本文所采用的光纤微振动传感器是基于MZ干涉原理提出来的,其结构组成如图1所示。基于双MZ干涉光纤微振动传感器主机部分主要由分布式反馈(DFB)激光器、波长锁定器、波长可调谐激光器、合波器、光消偏器、光探测器、可编程相干解调芯片、数据采集模块、光谱分光器和光耦合器等组成^[1-3];上位机则由信号预处理与波形变换模块和信号处理模块组成。基于双MZ干涉原理的光纤微振动传感器的主机部分需要外接3根光纤作为传感光纤,并在传感光纤末端安装终端传感箱。

收稿日期:2020-06-29。

基金项目:国家电网有限公司科技项目(2019YF-8)资助。

作者简介:李振威(1984—),男,辽宁大连人,硕士,高级工程师,现就职于国网辽宁省电力有限公司大连供电公司信息通信分公司,担任通信工程建设技术职务。主要研究方向为电力通信技术、电力通信材料及其它相关内容,负责完成大连市科技成果3项,获大连市科技进步一等奖1项、大连市科技进步三等奖1项。



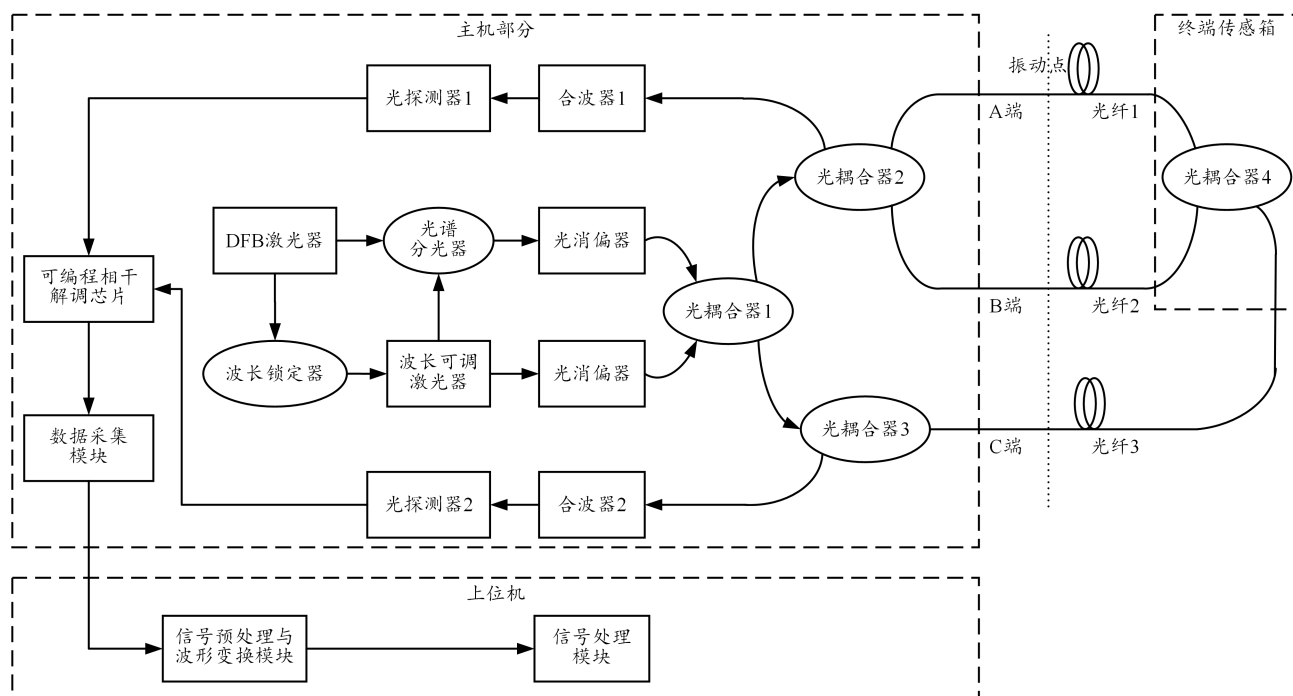


图1 光纤微振动传感器结构图

2 相干光检测技术

2.1 极小信号的检测

图1中,DFB激光器和波长可调激光器各发出1路超窄线宽、超低频率漂移的激光,2路激光在光耦合器1中混频形成微小差频混合光。混合光具有强相干性,光的相干相位解调的灵敏度是模拟解调灵敏度万分之一,它可检测差异非常小的信号;另一方面,相干信号具有周期性,再大的信号也只是跨条纹周期性翻转,有利于小的信号被发现,而大信号则不会被小信号淹没。此外,通过提高本振光的功率,可获得比直接探测时高几个数量级的增益,更适用于微弱信号的检测。

2.2 沿线噪声的滤除

由于实际环境的复杂性,系统中存在着许多因素造成的信号噪声干扰,这些噪声会对有效信号产生极大的影响。为了不影响系统的正确判断,如何滤除叠加在有效信号上的噪声就成为了重中之重。本文采用2个近似激光器(指各项性能指标相近的激光器)产生相干,微小改变激光器的波长来控制拍频波长,实现对相干噪声的精确控制,完成沿线噪声滤除^[4-6]。

通过使用极小信号相干检测技术和噪声滤除技术,系统对光缆振动入侵事件(触摸光缆、人工挖掘、机械挖掘和鼠害等)单次触发的探测率>99.7%,多次触发的探测率=100%。

3 定位技术

光纤微振动传感器采用双MZ干涉的设计方式实现入侵事件的精确定位。图1中,传感光纤A端、B端和C端均可检测到振动信号,当振动信号作用于光纤上时,由于事件发生的位置到光纤微振动传感器A端、C端探测仪的距离不同,根据探测器检测到同一信号的时间差,可精确计算出振动源的位置。

设起点和终点之间的距离为 L ,距离起点 ΔL 处的光纤上产生了振动。设传感光纤中传输光从振动源到达起点的耗时为 t_0 。

C端探测器探测到振动源振动所用的时间 t_1 为:

$$t_1 = \frac{(L - \Delta L) + L}{c/n} \quad (1)$$

其中, c 为真空中光速(3×10^8 m/s); n 为光纤折射率; ΔL 为A端与振动源的距离。

A端探测器探测到振动源振动所用的时间 t_2 为:

$$t_2 = \frac{\Delta L}{c/n} \quad (2)$$

A、C两端探测器检测到振动信号的时间差 t 为:

$$t = t_1 - t_2 \quad (3)$$

联立式(1)~式(3)可得:

$$\Delta L = L - \frac{c \times t}{2n} \quad (4)$$

由此通过探测2路光到达起点的时间差,可计算出振动源的距离 ΔL 。

4 入侵事件模式识别技术

入侵事件识别的基本原理是利用与相位变化对应的时域和频域图谱,对基于场景的入侵振动事件的波形图特征进行事件定义与分类,建立振动事件数据库,对系统进行有监督的机器学习机制下的“训练及数据采集与盲测”,培育人工智能系统对重点场景的入侵事件具备模式识别能力,提升系统的探测率,降低系统的误报率。入侵事件模式识别技术包括两部分:数据的采集与分析、特征信号值的提取。

4.1 数据的采集与分析

基于 MZ 光纤干涉原理的光纤振动传感器的数据采集模块将会以其设定的频率不间断地采集数据,并将采集的数据上传至上位机。上位机对数据进行分析处理,将原始数据进行振动算法处理后,设定入侵事件的阈值。当接收数据超出设定阈值后,上位机出现报警行为。如果接收数据小于告警阈值,则不会出现报警行为^[6-8]。

4.2 特征信号值的提取

入侵类型识别的关键环节是信号的特征提取,需将振动信号频域通过傅里叶变换(FFT),具体过程如下:

- ①通过预加重提高信号高频部分,使得 FFT 后的频谱图更加平缓;
- ②对非线性时变信号进行分帧提取短时特性,选取 N 个采样点作为一个观测单位;为了减小频谱的泄露,对时域信号进行快速 FFT 时进行加窗处理;
- ③加窗处理后的振动信号经过频域 FFT,观察其能量,不同能量代表不同类型;

④提取特征参数(波形幅度、幅度门限、持续时间和波形密度)。

实际系统经安装校验后,经训练及数据采集与盲测,建立事件数据库后单次误报率 $<1\%$ 。

5 结束语

本文研究了基于双 MZ 干涉原理的光纤微振动传感器的关键技术,实现了对振动源信号的精确分类、识别。该传感器以其定位精度高、动态响应范围大、响应频带宽、隐蔽性好、模式识别准确率高和误报率低等特点,在电力电缆、油气管道、保密通信、桥梁和重要安防领域得到了广泛的应用。

参考文献:

- [1] 余贻鑫. 智能电网实施的紧迫性和长期性[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 1-5.
- [2] 李代刚, 徐立坤, 张旭辉, 等. 基于分布式双模块电力光纤防外破监测系统研究[J]. 电力信息与通信技术, 2019(10): 20-26.
- [3] 赵奎, 肖尊定, 胡建超. 基于 Sagnac 干涉仪和 Φ -OTDR 的光缆振动预警定位系统[J]. 光通信技术, 2020, 44(6): 11-14.
- [4] BENKHEROUF A, ALLIDINA A Y. Leak Detection Methods for Gas Pipelines[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1986, 19(6): 205-210.
- [5] GRILLET A, KINET D, WITT J, et al. Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring [J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(7): 1215-1222.
- [6] 许伟国, 张亮. 数字化变电站网络通信在线故障诊断系统的设计与应用[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 121-124.
- [7] 盛洁, 唐良瑞, 郝建红. 智能配电环境感知融合网络的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 127-131.
- [8] 叶远波, 陈晓东, 项忠华, 等. 继电保护在线状态检修的应用和探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 132-138.