引用本文：袁臻东，罗钦发，李云，等. 基于双向干涉多域相关识别的海缆危害监测技术[J]. 光通信技术，2022，46(5)：103-109.

基于双向干涉多域相关识别的海缆危害监测技术

袁臻东[1]，罗钦发[1]，李 云[2]，李 康[2]，李 威[2]
（1.南部战区海军92682部队，广东；2.北京信维科技股份有限公司，北京 100085）

摘要：海底光缆敷设投资巨大，而近海区域人为导致的断缆故障频发。目前的技术手段只能在海缆被破坏后进行断点定位，而无法对海缆潜在危害事件进行实时监测、提前预警和事件定位。提出了一种双向干涉多域相关识别技术，通过海缆中已有光纤构建对外部安全侵害事件敏感的传感系统，对无事件发生、敲击光纤和拉拽光纤这3类事件进行了实验与分析。实验结果表明：该技术可有效预防海缆灾害，提高重要海缆的安全性和生存性。

关键词：海底光缆；实时监测；光纤传感；双向干涉；海缆防护
中图分类号：TN914　**文献标志码**：A　**文章编号**：1002-5561(2022)05-0103-07
DOI：10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.019　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)**：

Submarine cable hazard monitoring technology based on bidirectional interference multi domain correlation identification

YUAN Zhendong[1], LUO Qinfa[1], LI Yun[2], LI Kang[2], LI Wei[2]
(1. Southern Theater Navy 92682 Unit, Guangdong, China; 2. Beijing Shineway Technologies Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: The investment in laying submarine cables is huge, and man-made failures in offshore areas are frequent. The current technology can only locate the breakpoint after the submarine cable is damaged, but cannot carry out real-time monitoring, early warning and event location for the potential hazard events of the submarine cable. In this paper, a bidirectional interference multi-domain correlation recognition technology is proposed, and the sensor system sensitive to external security violation events is constructed through the existing optical fiber in the submarine cable. Three kinds of events, namely non-event occurrence, knocking optical fiber and pulling optical fiber, are tested and analyzed. The experimental results show that the technique can effectively prevent submarine cable disasters and improve the safety and survivability of important submarine cables.

Key words: submarine optical cable, real-time monitoring, optical fiber sensing, bidirectional interference, submarine cable protection

0 引言

光纤传感在线监测技术是20世纪70年代由美国率先提出并发展起来的新型传感监测技术，具有电磁免疫、高灵敏、大动态、高可靠、易组网和信息感知与传输一体等优势，被英、法、俄、日等军事强国高度关注。21世纪后，随着物理、材料和信息等学科的快速发展，应用于军事科技和武器装备的高性能光纤传感监测技术呈现出加速发展的趋势，已成为军事及重要设施安全监测与预警领域发展的技术标杆，特别是光纤传感监测系统采用传输光缆作为传感器，在传输光纤安全监测预警方面的应用具有显著优势[1-3]。

海底传输光缆作为海底通信及固定探测网络中信息传输的主要媒介，一旦发生故障，将带来巨大的损失。根据多年来海底光缆的损坏情况可知，其生存性问题还未得到彻底的解决。海底光缆故障中，约85%由渔船捕捞或船舶抛锚引起，6%由自然灾害（如地震）引起，9%由鱼咬或光缆自身质量引起[4]。因此，人类渔业、航运等活动是导致海底通信光缆损坏的主要原因。由于渔船捕捞作业方式繁多，其中拖网、刺网和张网作业对海底通信光缆的威胁很大，大量渔船非法拖网作业、禁航区内作业和随意抛锚的现象严重，极易造成渔网和锚链拖挂，从而损坏海底光缆；此外，近海作业渔船设备大都简陋，均未加装船舶自动识别

收稿日期：2021-11-12。

作者简介：袁臻东(1984—)，男，湖南岳阳人，大学本科，工程师，长期从事光纤通信、海底光缆通信技术研究工作。组织并参与完成南海某海区海光缆环网、海南三亚长距离无中继海光缆系统等多个项目的建设任务，多次获得荣誉。

(AIS) 系统和中国渔政船位识别系统等电子设备,无法对其进行个体识别和取证。

目前,针对海底通信光缆易遭受船锚和拖网等情况[5-6],主要以水面巡逻、雷达扫描和宣传教育等传统监测方法为主,监测的范围较小,且容易受天气和海况等自然环境的影响。因此,本文提出一种双向干涉多域相关识别技术对海底光缆进行有效的安全防护。

1 双向干涉多域相关识别技术

海缆危害实时预警监测系统作为分布式传感监测系统,不但要能够探测到外界振动信号,同时还要能够确定外界振动发生的位置。由于干涉型传感器具有积分效应,即得到的干涉信号为传感光纤沿线光波相位变化的总和,因此无法确定振动发生的具体位置。为了解决这个核心问题,本文自主研发了双向干涉多域相关识别技术,其原理图如图 1 所示。可以看出,光信号的传播路径分为 2 路:①激光器→C_1→C_2→干涉光纤 A 与干涉光纤 B→C_3→传输光纤 D→光电探测器(PD1)(即顺时针箭头方向);②激光器→C_1→传输光纤 C→C_3→干涉光纤 A 与干涉光纤 B→C_2→PD2(为逆时针箭头方向)。

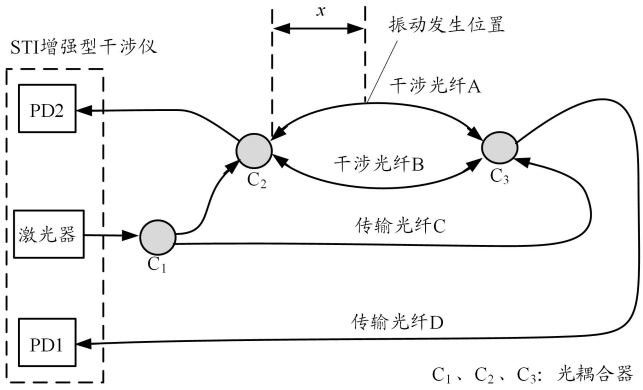


图 1 双向干涉多域相关识别技术原理图

假设当外界振动发生时,由于 4 根光纤同缆,造成干涉仪的 2 根干涉光纤和另外 2 根传输光纤的某位置几乎同时振动。2 根传输光纤不产生干涉效应,故振动对其传输信号的相位几乎没有影响;2 根干涉光纤作为 STI 增强型干涉仪的 2 个臂,几乎同时收到振动信号,但因为 2 根干涉光纤的位置和方向都有差异,所以受到振动的影响也有差异,即相位随振动的变化有差异,使得原有干涉状态随振动而变化。这种差异为监测系统提供了判断振动事件信号、精确定位事件的依据和特性。

2 实验分析

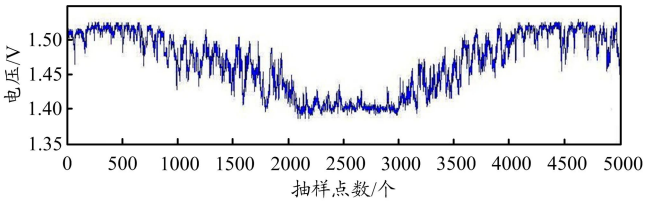
在实验研究中,产生事件信号来源的方法主要是敲击和拉拽光纤事件:敲击是对光缆扰动最简单也是最常见的方法,拉拽是海底光缆被船锚勾起的典型事件的模拟。除了这 2 类事件外,还有 1 类是无事件的情况。本文在 160 km 的光缆上对这 3 类事件进行实验。每次事件的采集时间为 1 s,信号处理时的实际抽样率为 5 kHz。

2.1 3 类事件信号的频域分析

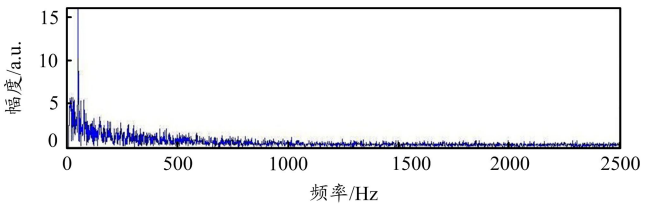
由于自然界中很少有人为产生高于 2.5 kHz 的振动信号,因此本文采用 5 kHz 的抽样频率来提取信号可以涵盖所涉及的主要信号成分,分别对 3 类事件信号的频域特征进行分析。

本文将滤除低频分量 10 Hz 以下的信号,使 3 类事件信号的特征表现明显。

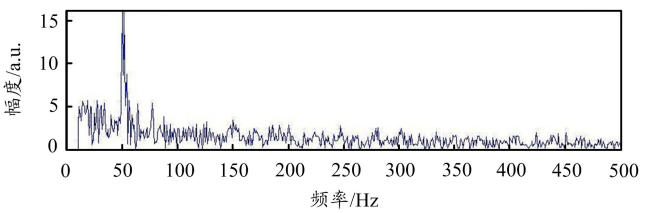
当无事件发生时的信号频谱图如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,时域原始信号在 1 s 内的峰峰值很小,大约为 0.1 V,即噪声干扰;从图 2(b)可以看出,信号大于 1 kHz 的频谱分量约为零,说明系统噪声和外界干扰主要在低频分量;从图 2(c)可以看出,频谱分量在 10~500 Hz 时,除了 50 Hz 的工频干扰外,信号分布比较均匀,大多数频谱分量都小于 2.5 a.u.。



(a) 时域原始信号



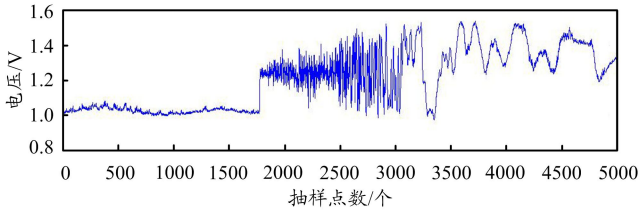
(b) 10~2500 Hz 频域信号



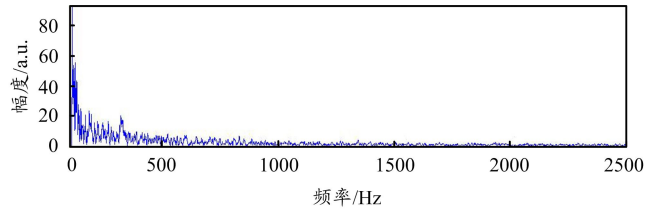
(c) 10~500 Hz 频域信号(局部放大)

图 2 无事件发生时的信号频谱图

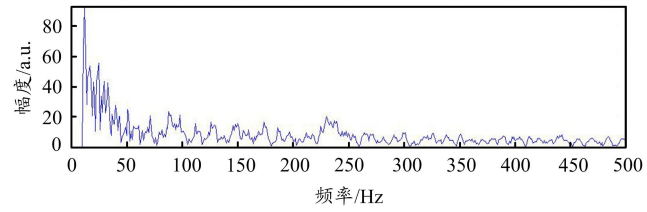
当敲击光纤事件发生时的信号频谱图如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,在敲击光纤时,时域干涉信号突然由一个低幅度的漂移跳跃到一个高幅度的高频振荡上,这时信号的峰峰值大约为 0.6 V (这个跳跃在数学上叫“第一奇异点”,通过小波变换可以确定奇异点的位置);当受到敲击后,信号的振荡有一个增大的过程,这说明光缆某些单元发生了谐振,振荡很短时间后,信号漂移渐渐变缓。从图 3(b)和图 3(c)可以看出, 敲击事件导致频域信号在 10~500 Hz 的频谱分量能量普遍增强,特别是频率在 10~250 Hz。



(a) 敲击光纤时,输出的时域干涉信号



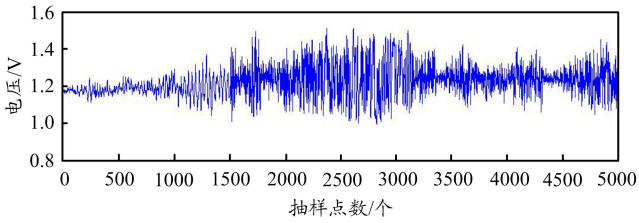
(b) 10~2500 Hz 频域信号



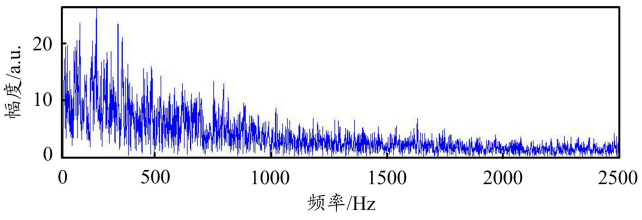
(c) 10~500 Hz 频域信号(局部放大)

图 3 敲击光纤事件发生时的信号频谱图

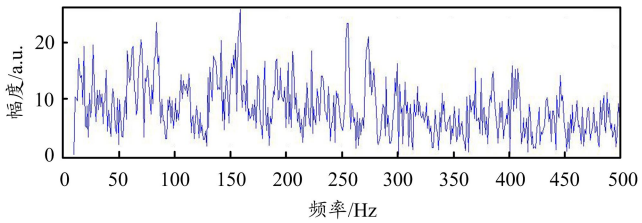
当拉拽光纤事件发生时的信号频谱图如图 4 所示。当光纤被拉拽后,其时域干涉信号是一个幅度受调制的高频载波,即在拉拽过程中,光缆内部某些部件发生谐振,引起一个高频的振荡。但是,由于光纤被拉拽时会出现一个大曲率的弯曲,这个弯曲相对较慢,导致的相位变化也较慢,因此其对内部谐振带来的振荡产生一个慢的调幅作用。在频谱上,拉拽光纤时光纤的形状与无事件形状比较相像,说明它增加的能量在各频率分量分布比较均匀。本文通过对信号进行傅里叶变换后得出 10~2500 Hz 的频域信号如图 4(b)所示,敲击和拉拽事件频率主要分布在 10~500 Hz;从图 4(c)信号局部放大图可以看出,10~500 Hz 间的信号幅度比较均匀。对比图 2~



(a) 拉拽光纤时输出的时域干涉信号



(b) 10~2500 Hz 频域信号



(c) 10~500 Hz 频域信号(局部放大)

图 4 拉拽光纤事件发生时的信号频谱图

图4 可知,相对于无事件发生,敲击、拉拽事件信号幅度升高很多。此外,敲击事件与拉拽事件的频谱区分也比较明显, 敲击事件的低频增长比高频要大得多,而拉拽事件的低频增加比较均匀。

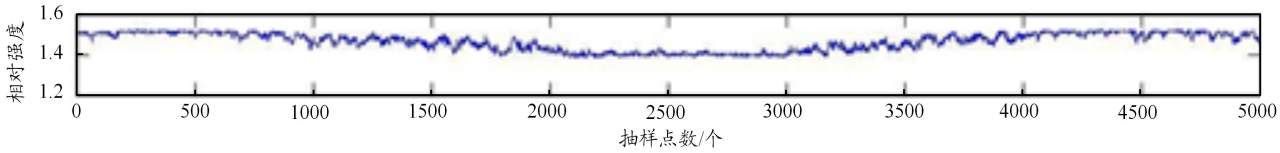
综上所述,3 类典型事件的时域和频域特征差异非常明显, 将这些特征值输入神经网络进行训练,可以实现事件的自动判断与分类。

2.2 3 类事件信号的小波域分析

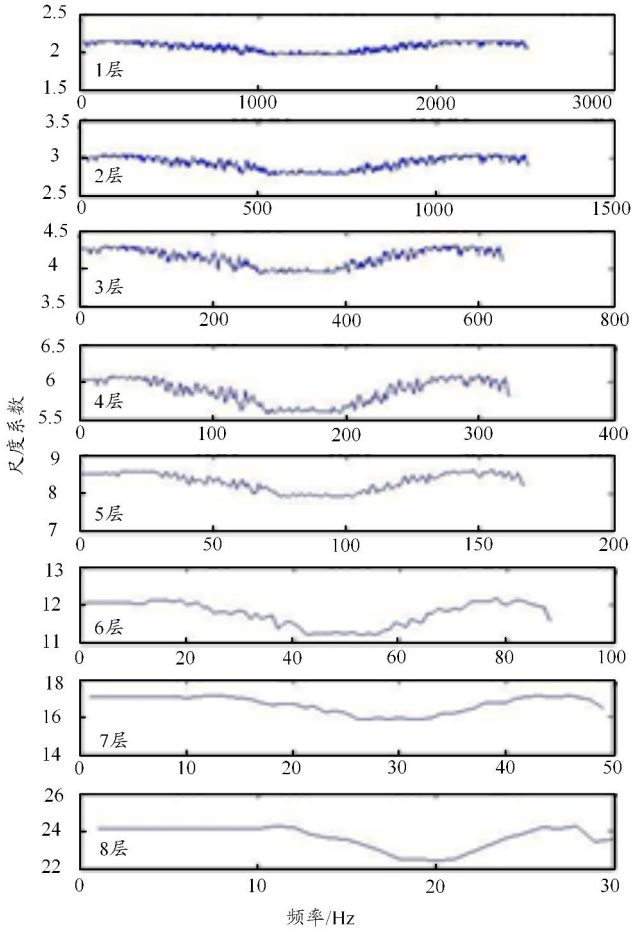
本文研究的干涉信号中,事件特征主要隐含在低频分量,在频域分析时,只能粗略地分析低频;若采用小波变换的多分辨率对干涉信号进行分析,可以在低频部分根据不同的尺度来研究信号的时频特征,且基于小波的奇异性理论,还可以确定奇异点的位置,即知道何时发生的事件,为今后整个光纤线路的定位提供了一种新思路。此外,小波域分析比直接的频谱分析更精细,它能分清特定的频带。

为了保证信号特征的一致性, 本次实验采用 db6 小波域分析对 3 类典型事件信号的样本数据进行多尺度分解。

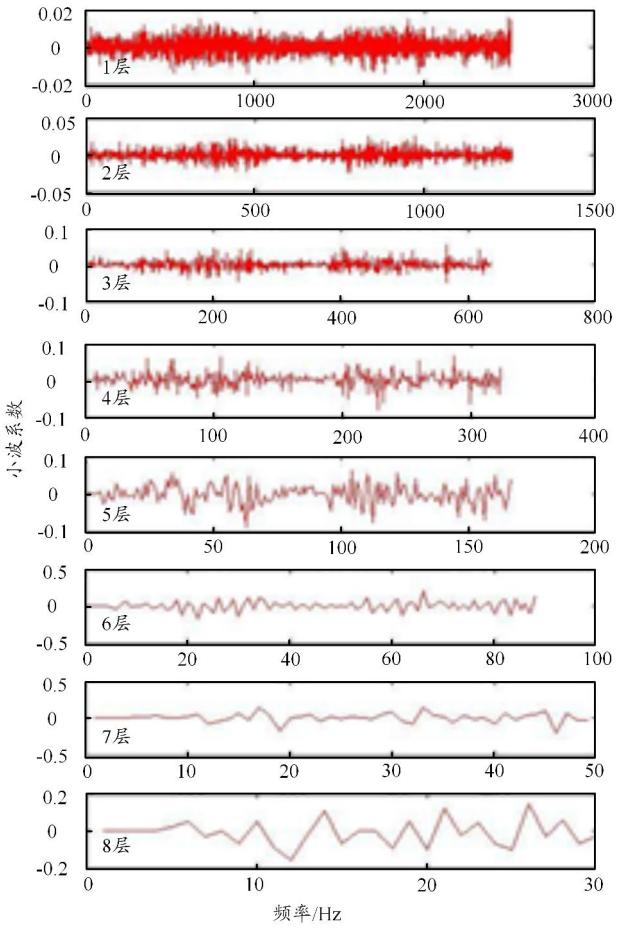
在无事件发生时,信号的多尺度分解情况如图 5 所示。其中,1~8 层表示小波分解层数。在离散序列空间进



(a) 信号抽样处理



(b) 尺度系数处理



(c) 小波系数处理

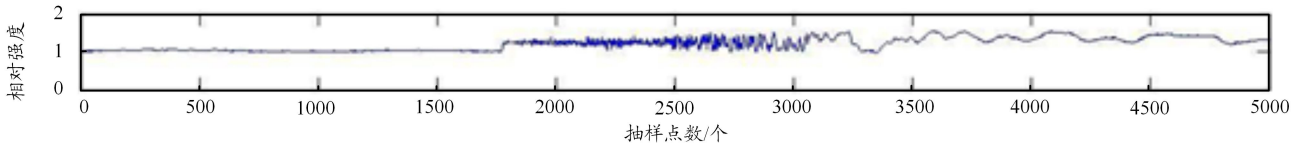
图 5 无事件发生时,信号的多尺度分解情况

行多分辨率分析,相当于用若干组带通滤波器对信号进行滤波,从而获得各频带内的信息。基于小波空间的滤波系数与小波函数有关的结论,从图 5 可以看出,在 1~5 层,小波系数都小于 0.1;在 6~8 层,小波系数有所增加。这与上节中无事件时频谱分量主要在 100 Hz 以下的结论相符。此外,低层次的小波系数反映信号的高频部分, 高层次的小波系数反映信号的低频部分,在 1~3 层小波系数比较小,7~8 层小波系数比较大,说明无事件时高频噪声很小,低频噪声很大,这与噪声源引入的噪声以低频为主的结论相符,该噪声即激光器强度和相位噪声、偏振态和温度的漂移,它们的低频分量要远远大于高频分量。

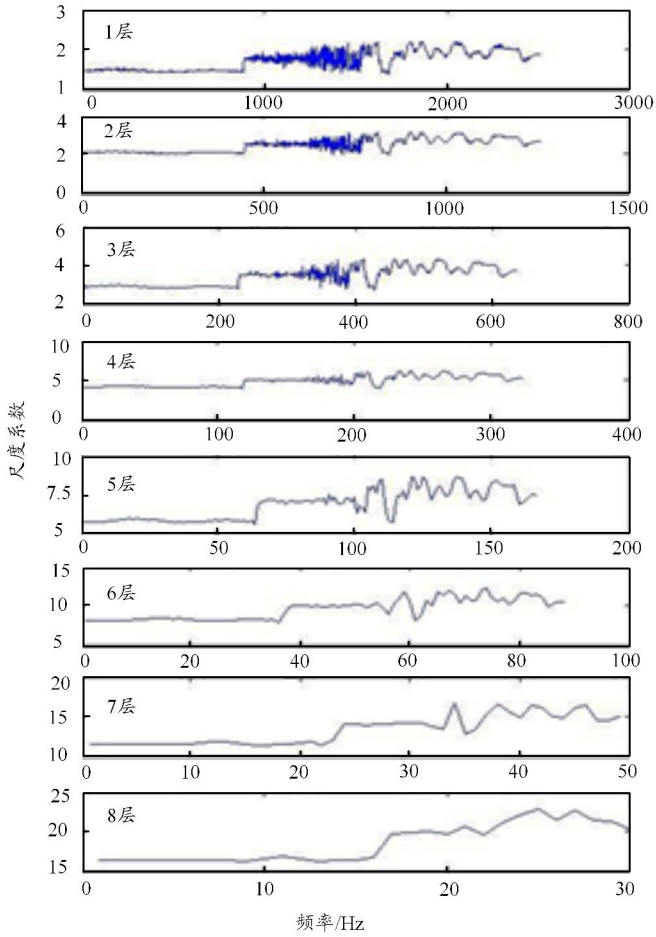
在敲击事件发生时,信号的多尺度分解敲击情况如图 6 所示。可以看出,1~4 层的小波系数较大,且非常集中, 这说明有一个强的高频分量在短时间内出现;将这 4 层信号的频率与原始信号对应,通过小波分解后发现正好是那段密密麻麻信号的高频分量。6~8 层的小波系数开始时比较平稳,后半段波动很大,说明后半段时间信号有一个比较大的低频分量,且不稳定;这 3 层信号的频率变化表明,敲击前的信号非常稳定, 低频分量小,敲击后的信号先高速振荡,然后退化成比较低频的漂移,既不稳定且低频分量较大。

根据奇异点的检测分析可知,小波变换的极大值对应函数的奇异点,随着尺度的越来越精细,小波变

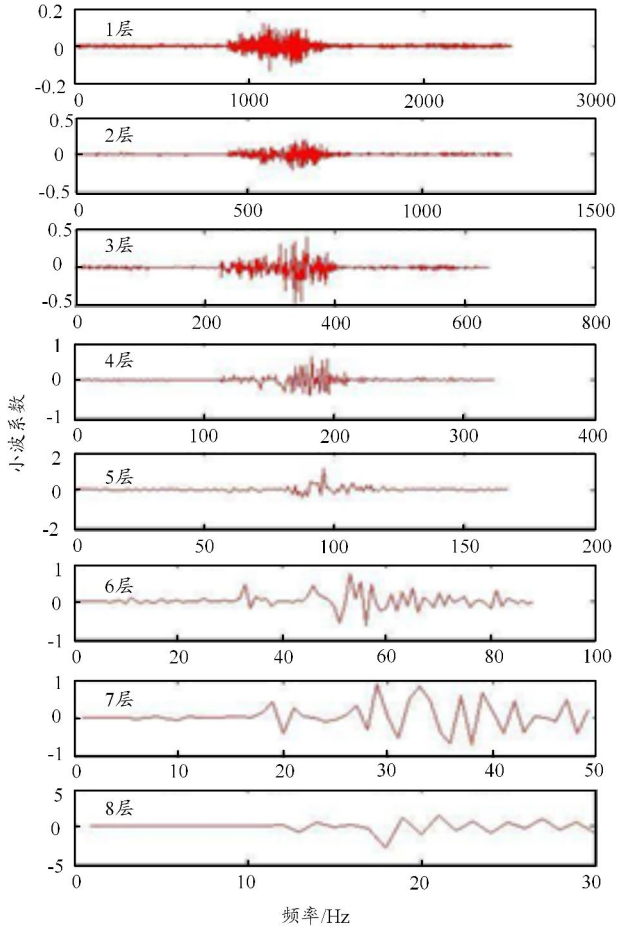
极大值将呈指数衰减。因此，从第 7 层的小波系数 换



(a) 信号抽样处理



(b) 尺度系数处理



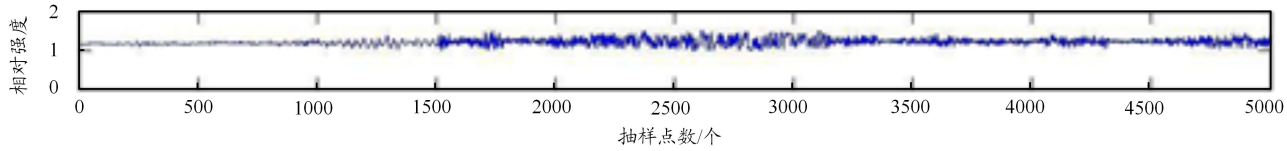
(c) 小波系数处理

图 6　敲击事件发生时,信号的多尺度分解情况

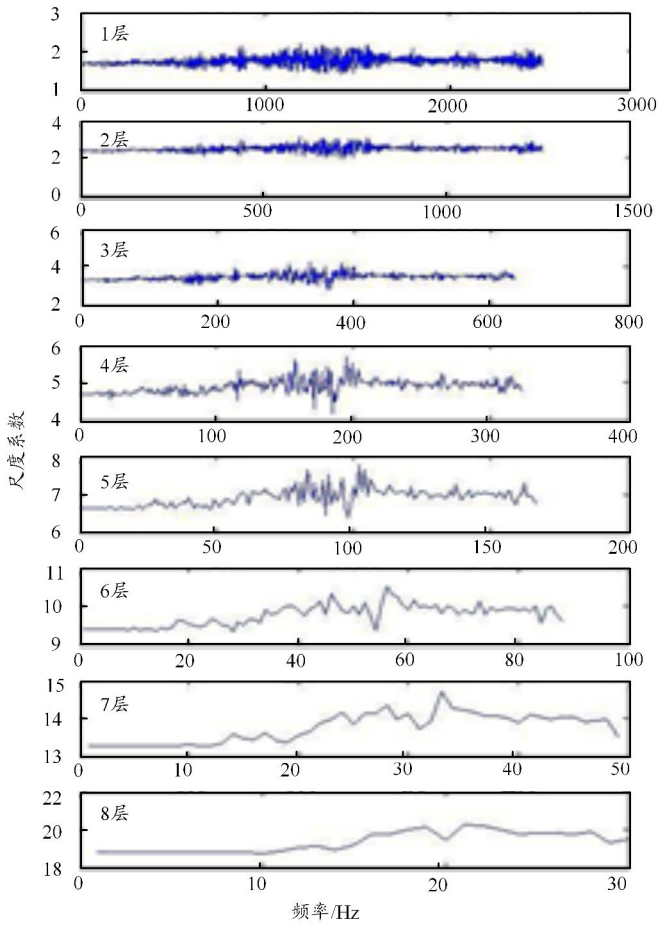
可以看出，在频率为 20 Hz 左边的位置出现一个极大值,且迅速衰减;将其对应原始信号,通过小波分解后得出在原始信号 2560 个抽样点左侧的位置出现了奇异点。

在拉拽事件发生时,信号的多尺度分解情况如图 7 所示。粗看拉拽信号与无事件信号的小波系数比较类似,但其实它们的差别非常大。拉拽事件的 1~3 层小波系数的变化范围是无事件的 10 倍左右。观察拉拽事件的 1~3 层小波系数可以看出,开始一段时间的小波系数值非常低,接近于无事件水平,实际上这时还未发生拉拽事件;当过了一段时间后,1~3 层的小波系数值突然升高，且持续时间明显长于敲击信号时的情况。实际上,当本次样本采集结束时信号未稳定下来,其低尺度的小波系数还很大，对应着高频分量也大。若要完整地评估一次拉拽信号的影响可以将拉拽事件采集样本时间的变长。将拉拽事件的 1~3 层小波系数与敲击事件的相对比,可以看出,在 2 个事件的开始段,其小波系数一样,紧接着敲击信号的高频消失,而拉拽信号的高频继续存在,并且在样本末尾再次变大。 考虑到实际采集样本情况可知,这是拉拽信号停止时,光缆中止上升时又一次受迫振动。

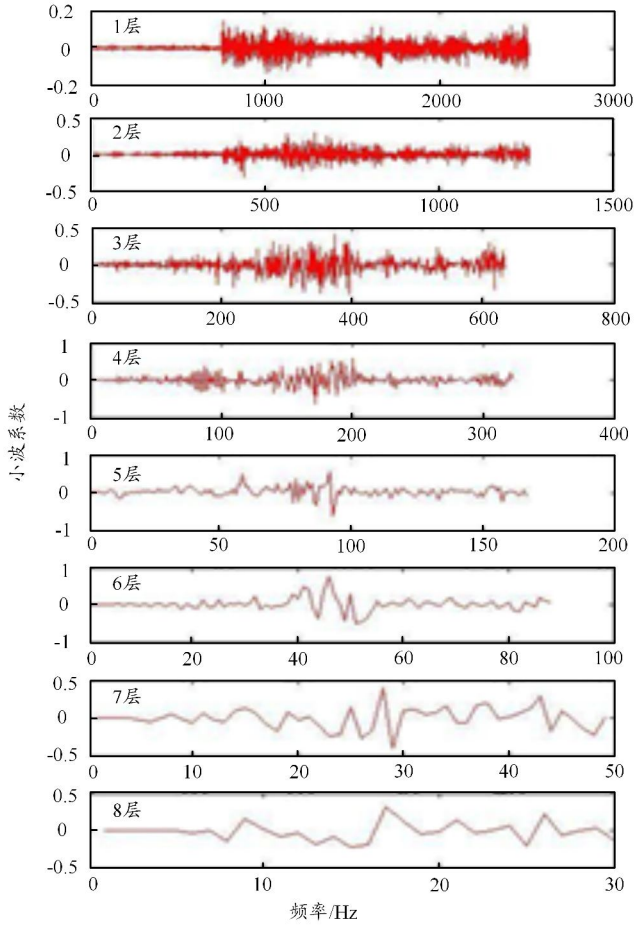
在高尺度的小波层次(信号低频部分),拉拽信号与敲击信号类似。尤其在 5、6 两层,2 类事件信号的小



(a) 信号抽样处理



(b) 尺度系数处理



(c) 小波系数处理

图 7 拉拽事件发生时,信号的多尺度分解情况

波系数值都是在信号变化最密集处变化剧烈,然后消逝。这表明在 39~156 Hz 的频谱分量内,2 类事件的能量变化比较一致, 但它们与无事件的区别是显著的。通过以上试验和分析可知,拉拽事件与其它事件的区别主要靠高频部分,即低尺度的小波部分来分辨。

各类事件的时频特征如表 1 所示,这些特征可以作为神经网络的输入向量,训练网络使其收敛出一个比较好的判断标准。通过小波域分析提取特征可以极大地减少神经网络的训练时间, 提高其训练效率,并达到极高的准确度。

由表 1 可知,在 6~7 层中,事件发生一段时间后会有一个大的波动出现,这是光缆被敲击或拉拽后的

表 1 各类事件的时频特征

事件类型	子带层数	时频特征
无事件	1~5	子带能量很小,小波系数随时间变化很小
	8	小波系数变化很剧烈
	6~7	能量较大,小波系数变化比较缓慢
敲击	1~5	子带能量很大,且集中于发生事件的那段时间
	6~8	发生事件一段时间后,小波系数变化会比较剧烈
拉拽	1~3	子带能量很大。事件刚开始时,有一个短时间大的幅值;过一段时间,有一个长时间的峰值
	6~8	发生事件一段时间后,小波系数变化比较剧烈

低频振荡所致,可以作为有无事件的判断依据;敲击和拉拽的区别可以用拉拽事件的低尺度小波系数中 2 个时间段的峰值来判别;在不同事件时各层能量的分布是不同的。本文将上述信号特征作为神经网络的输入向量进行训练,实现了实时采集、判断、定位一体化功能。

3 结束语

本文提出了一种双向干涉多域相关识别技术并做成产品,分别在实验室和实际应用场景情况下长时间做了多组敲击与拉拽实验,充分验证了该产品已具备实际的海底光缆监测能力。

本技术及产品可用于军民两用的光纤通信光缆、水下海缆、电力光电复合缆、输油输气管道、重要基地以及机场围栏的安防监测等应用领域中,特别是需要对重要设施进行实时在线安全监测的单位和机构,如水下观测网、光纤水听器阵列中的海光缆以及光电复合缆的实时监测预警。

参考文献:

[1] 张东. 浅析海底光缆的基础知识和结构[J]. 基层建设,2018(17):10–15.
[2] 仇胜美 . 海底光缆故障判定及测试方法[J]. 海洋工程,2005(3):21–23.
[3] 国家海洋局杭州海洋工程勘测设计研究中心. 亚欧海底光缆上海段路由调查报告[R]. 杭州:杭州海洋工程勘测设计研究中心,1999.
[4] 陈宇俊,解江,张泽,等. 海底光缆环境影响因素综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2018(S1):17–19.
[5] 叶银灿. 海底光缆工程发展 20 年[J]. 海洋学研究,2006(3):32–36.
[6] 陈小玲,叶银灿,李冬. 东海国际海底光缆故障原因分析研究[J]. 海洋工程,2009(4):6–10.