

基于 Sagnac 干涉仪和 Φ -OTDR 的光缆振动预警定位系统

赵奎¹, 肖尊定¹, 胡建超²

(1. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004; 2. 桂林聚联科技有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对光缆经常遭到工程施工破坏的问题, 提出了一种低成本的监测光缆线路沿线工程施工情况的振动预警定位系统, 采用多个基于单轴 Sagnac 干涉仪的振动预警模块实时监测多个光缆的振动情况, 通过相位敏感光时域反射仪 (Φ -OTDR) 模块确定振动点的位置。实验表明该系统成本低、预警效果好。

关键词: 单轴 Sagnac 干涉仪; 光开关选通; 相位敏感光时域反射仪模块; 后向瑞利散射; 选定时间窗口取样

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)06-0011-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.06.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical cable vibration early warning and positioning system based on Sagnac interferometer and Φ -OTDR

ZHAO Kui¹, XIAO Zunding¹, HU Jianchao²

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Guilin Julian Technology Co. Ltd., Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the problem that the optical cable is often damaged by engineering construction, a low-cost vibration early warning and positioning system for monitoring the engineering construction along the optical cable line is proposed. Multiple vibration early warning modules based on single axis Sagnac interferometer are used to monitor the vibration of multiple optical cables in real time, and the position of the vibration point is determined by the phase sensitive time domain reflectometer (Φ -OTDR) module. Experiments show that the system has low cost and good early warning effect.

Key words: single axis Sagnac interferometer; optical switch on; Φ -optical time-domain reflectometer module; backward Rayleigh scattering; selected time window sampling

0 引言

目前, 国内城市建设正处于高速发展期, 建设工地随处可见, 一旦光缆线路沿线附近出现工地施工, 就极有可能发生通信光缆被工程机械挖断、破坏的情况。因此, 迫切需要一种能对光缆线路沿线工程施工情况进行监测的系统, 即在光缆线路沿线的一定范围内出现工程施工时, 能够发现并向维护人员进行报告, 使光缆维护人员能及时到工程施工地点进行巡查提醒, 避免工地附近敷设的光缆因施工活动受到损坏。目前, 适合应用于光缆线路沿线工程施工活动监

测的系统有 2 种: 干涉仪型分布式光纤传感器和基于相位敏感光时域反射仪 (Φ -OTDR)^[1] 的分布式光纤传感器。干涉仪型分布式光纤传感器虽然成本较低, 但会随着监测距离的增大导致定位精度降低, 且不易实现多点定位^[2]; 而基于 Φ -OTDR 原理的分布式光纤传感器不仅具有定位精度高、传感距离长等优点, 而且能够实现多点扰动同时定位, 但是由于成本过高, 难以监测多条光缆。

因此, 本文在结合干涉仪型分布式光纤传感器和基于 Φ -OTDR 的分布式光纤传感器优势特点的基础上^[3], 提出一种低成本的光缆振动预警定位系统。

1 光缆振动预警定位系统

光缆振动预警定位系统连接结构如图 1 所示。该系统由 Φ -OTDR 模块、N 个振动预警模块、1×N 光开关模块、N 个光纤反射器、传感光缆和主控管理单元组成。

收稿日期: 2019-12-10。

作者简介: 赵奎 (1981—), 男, 学士学位, 工程师, 2005 年 7 月吉林大学毕业后加入中国电子科技集团公司第三十四研究所, 主要从事 OTDR、光缆普查及振动定位等相关技术的研究。参加 TR600、TR300 和 TR700 等手持 OTDR 仪表、TMS400 系列光缆在线监测系统以及 TK-200 系列光缆普查仪的研发工作。



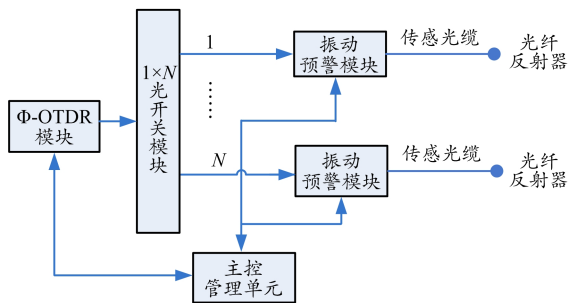


图1 光缆振动预警定位系统连接示意图

系统的工作原理如下:各个振动预警模块实时监测各自分配好的传感光缆,选取末端光反射器反射的信号,并通过数/模转换后计算这个反射信号的浮动,设定阈值判断是否有振动信号。在判定传感光缆有振动信号产生时,上传告警信号到主控管理单元。主控管理单元在接收到告警信号后判断产生振动信号模块的编号,并根据告警产生的先后时间命令光开关模块和告警的振动预警模块内的光开关进行选通,使 Φ -OTDR模块连接到产生振动告警信号的传感光纤上。主控管理单元对 Φ -OTDR模块发出测试命令, Φ -OTDR模块根据命令开始定位振动点的位置并将测试结果上传到主控管理单元,主控管理单元显示最后的测试结果(光缆的编号、振动信号的位置)。整个系统就完成了对一次对振动点的定位。

2 系统功能模块介绍

2.1 Φ -OTDR 模块

Φ -OTDR 分布式光纤振动定位模块由窄带光源、光调制器、光功率放大器、光前置放大器、喇曼放大器、光纤窄带滤波器和光接收机组成^[9]。目前,市场上常用的 Φ -OTDR模块的测试距离 ≤ 50 km,测试精度在10 m左右。工作原理是光脉冲从光纤的一端注入,用光探测器探测后向瑞利散射光。由于注入光纤中的激光线宽很窄,具有很好的相干性,因此该传感系统的输出就是脉冲宽度区域内反射回来的瑞利散射光相干涉的结果。 Φ -OTDR系统可以通过测量输入脉冲与接收到的脉冲信号之间的时间延迟得到扰动的位置^[9]。当光纤线路上的某个位置由于振动而发生扰动时,将导致该处光相位发生变化;且由于干涉作用,相位的变化将引起后向散射光光强发生变化,这些光强变化的时间将会对应于振动发生的位置。瑞利后向散射光返回到接收端被光电探测器接收。在正常情形下,激光器发出随时间变化的单一激光频率脉冲,并且没有振动,不考虑其它环境因素,即此时光相位

不随光纤长度变化,那么所有 Φ -OTDR轨迹应相同,称之为正常图;当光缆发生振动时,将在光纤中引起光相位变化,此时轨迹图在相应时间刻度处会受到影响,这一时间刻度对应着振动信号的位置,称之为事件图。用这个受影响的事件轨迹图减去前一幅正常图形成差值图,就可以非常明显地观察到振动点的位置。

在系统应用中, Φ -OTDR模块在无告警时处于待机状态。当主控管理单元接收到振动预警系统上传的告警信号时,控制光开关模块和振动预警模块中的光开关进行选通切换; Φ -OTDR模块连接到产生振动告警信号的传感光纤上,启动测试功能,找出振动点位置并把结果上报主控管理单元。

2.2 振动预警模块

振动预警模块采用单轴式结构,其结构图如图2所示。振动预警模块包括单轴 Sagnac 干涉仪^[7]、光源、光电探测器、数据处理单元及1个 1×2 光开关。这种单轴式方案结构简单,只需要1个 2×2 光纤分路器和1个 1×2 光纤分路器加上1段3~5 km的光纤延迟线即可构成单轴 Sagnac 干涉仪。预警模块振动探测距离大于3 m。

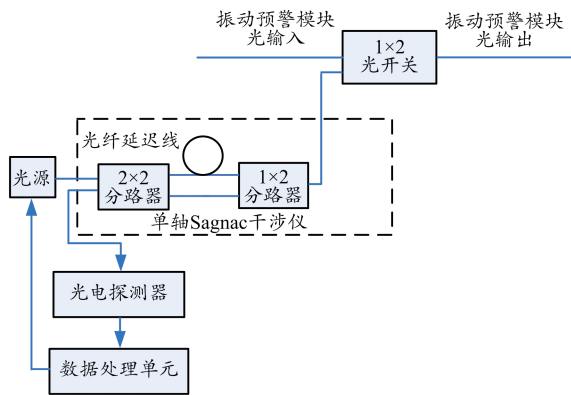


图2 振动预警模块结构示意图

振动预警模块内各单元功能如下:

◆光源采用脉冲光发射器,发出的光脉冲信号周期间隔时间为1 ms,宽度为10 μ s。

◆单轴 Sagnac 干涉仪对高频振动的响应能力强,但由于系统所应用环境对高频信号衰减很大,使得探测器感知振动的能力大幅下降;同时后向散射信号对光电探测器噪声有较大影响,探测灵敏度无法提高,难以实现探测距离光缆数米之外产生振动。因此,必须对目前常用的 Sagnac 干涉仪^[8]进行改进。改进的主要措施为:通过选取时间窗口的方法,尽可能地去除

后向散射信号,使之对光接收机噪声的贡献降到最低。

具体而言,振动预警模块采用 OTDR 技术测试光纤测试出光纤的末端位置。振动预警模块通过这个位置计算出光脉冲信号在该光纤中往返传输所需要的时间 T ,再将光源的激励方式由直流驱动改为脉冲驱动,发出的光脉冲周期间隔时间为 1 ms ,宽度为 $10\text{ }\mu\text{s}$ 。在每次发送光脉冲后光接收机等待时间 T 后才打开接收机接收信号, $10\text{ }\mu\text{s}$ 后关闭接收机。

◆光电探测器使用 PIN 探测器互阻放大器,互阻为 $2\text{ k}\Omega\sim 1\text{ M}\Omega$,5 档自动控制。本文根据第三个反射峰的高度来选择互阻,控制光电探测器的输出在 $0.1\sim 0.5\text{ V}$ 范围之内。

◆数据处理单元对接收到的信号的处理采用全数字方式。光电探测器的输出信号先通过 1 个 10 位 50 M 取样电路进行模/数变换,数据处理单元在预定的时间窗口内将有用信号选择出来,对选择出来的数据进行去基线处理、数字滤波和数字放大等运算,然后用于振动告警处理。数据处理单元对运算处理后的数据设置告警阈值,当数据超过设定的阈值时,判定传感光缆有振动信号产生,上传告警信号到主控管理单元;接收主控管理单元命令控制模块内的光开关进行选通,使 Φ -OTDR 模块连接到产生振动告警信号的传感光纤上,由 Φ -OTDR 模块对产生振动告警的位置进行定位。同时,数据处理单元可对运算后的数字信号经数/模变换后输出,使用数字电容滤波器对其进行 $10\sim 500\text{ Hz}$ 模拟信号带通滤波,信号可用于录音输出等用途。

2.3 其它模块

光缆振动预警定位系统上述主要模块还有以下 2 个模块,分别为:

◆主控管理单元主要作用是控制调配 Φ -OTDR 模块、振动预警模块、光开关模块和模块间切换,处理 Φ -OTDR 模块、振动预警模块上传的告警及结果。

◆光开关模块主要由一个 $1\times N$ 的光开关及其控制电路组成,其中 N 的取值范围是 $2\sim 64$,主要作用是实现 Φ -OTDR 模块的复用,达到把 Φ -OTDR 模块连接到多条传感光缆的目的。

3 光缆预警定位系统实验验证

为验证系统的运行效果,本文按照图 1 在野外环境中搭建实验环境,使用 1×4 光开关模块和亨通公司生产的 4 芯光缆,总理地长度为 1100 m 左右,埋设在

公路旁边 1 m 的位置,埋设深度为 50 cm 左右。然后,模仿真实遇到的光缆破坏条件,对多种振动情景(如:铁锹拍打、锄头挖掘、模拟山洪冲击、挖掘机行进、挖掘机挖土和挖掘机击打地面等振动源)进行了测试。

①在接近设备端用铁锹以 1 次/s 左右为频率多次拍打距离埋设光缆 2 m 左右的地面。监测传感光缆的振动预警模块发出告警信号,并上传至主控管理单元。振动预警模块测试数据如图 3 所示。可以看出,测试数据有明显地起伏变化,变化频率与铁锹拍打地面的动作相同,而且信噪比较大,可以清楚地分辨出拍打地面的动作。

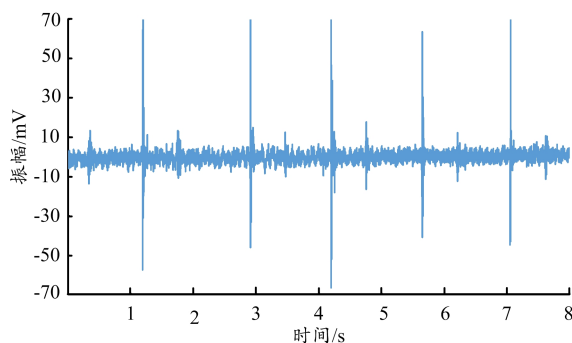


图 3 铁锹拍光缆前端地面时测得数据

②在监测光缆末端位置,用铁锹以 1 次/s 左右的频率多次拍打距离埋设光缆 3 m 左右的地面。振动预警模块测试数据如图 4 所示。可以看出,测试数据有一定的起伏变化,变化频率与铁锹拍打地面的动作相同。与图 3 相比,数据振幅随着拍打地点距离光缆变远而有所衰减,但仍然可以分辨出拍打地面的动作。

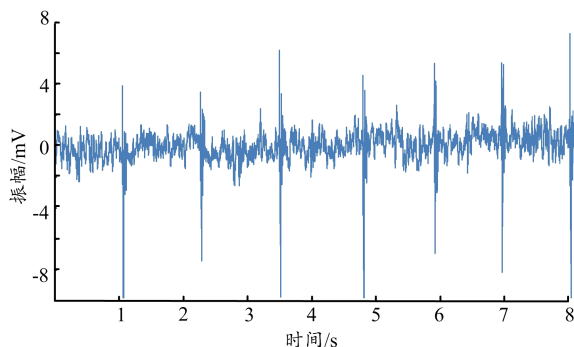


图 4 铁锹拍光缆末端地面时测得数据

③在光缆埋设附件使用挖掘机机挖掘地面,分别在距离光缆 2 m 和 4 m 处进行测试,振动预警模块测试数据分别如图 5 和图 6 所示。从图 5 可以看出,采集到的数据振幅变大的时间持续了几秒,信噪比较大,可以分辨出挖掘机的挖掘动作;从图 6 可以看出,数据振幅有衰减但仍有一定的信噪比,振动信号仍可

被预警模块接收并识别。

实验测试说明振动预警模块能实时监测光缆的振动情况,并满足了探测距离大于 3 m 的要求,能有效地监测到光缆上的振动信号。

在振动预警模块上传告警信号后,主控管理单元切换光开关,启动 Φ -OTDR 模块测试。 Φ -OTDR 模块找到了振动点的位置,测试结果如图 7 所示。可以看出,振动点在光缆前端和末端 2 种情况下 Φ -OTDR 模块的数据;横坐标是监测光缆的长度,纵坐标是有振

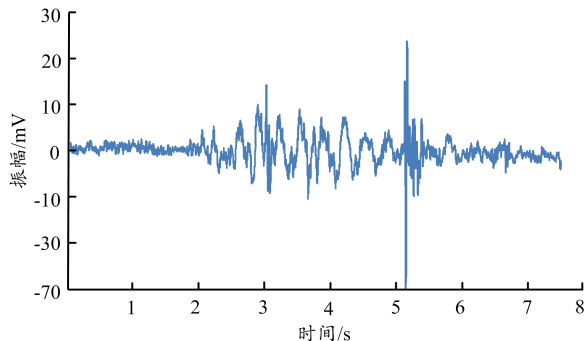


图 5 挖掘机距离光缆 2 m 处挖掘地面测得数据

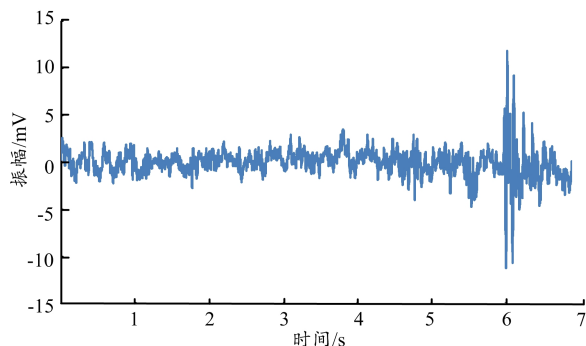


图 6 挖掘机距离光缆 4 m 处挖掘地面测得数据

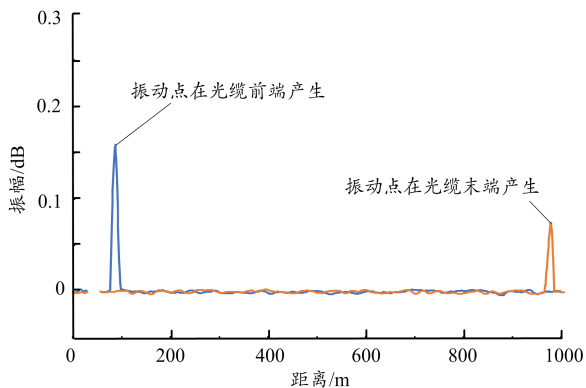


图 7 Φ -OTDR 模块振动测试周曲线

动信号时振动点的变化幅度。第一个峰的位置在 88 m 处;第二个峰的位置在 980 m 处,与实际测得振动点位置的误差均在 10 m 内。

经过几十次测试,识别精度达 95%, Φ -OTDR 模块能识别振动信号的类型;主控单元模块依据 Φ -OTDR 模块给出的告警事件类型对告警进行筛选,滤除掉因为行人踩踏、汽车经过等短时间内变化的告警,找出因为人工挖掘或者机械施工产生的告警,特别是同一位置出现几次扰动告警的告警点,给出可能存在施工的位置。通过主控单元模块的筛选特别是同一位置多次告警的确认,进一步提高了系统给出告警位置的精确度,降低了误报率。

4 结束语

本文提出一种基于 Sagnac 干涉仪和 Φ -OTDR 的光缆振动预警定位系统,采用多个基于单轴 Sagnac 干涉仪的振动预警模块,并行实时监测多个不同路由光缆的振动情况,找出告警光缆的振动点位置。实验结果表明:该系统中振动预警模块能够准确监测到光缆附近产生的振动信号, Φ -OTDR 模块能够识别振动信号的类型。该系统既兼顾了 Φ -OTDR 模块的优点,又大大降低了监测每一路光缆的成本,具有很强的实际应用意义。

参考文献:

- [1] 马福,王夏霄,魏旭毫,等. 基于 Φ -OTDR 的分布式光纤扰动传感系统研究现状[J]. 半导体光电,2018,39(1):1-5.
- [2] 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.
- [3] 孙茜. Φ -OTDR 光纤预警系统模式识别方法研究[D]. 天津:天津大学,2015.
- [4] 郭安华,张帆,杨俊杰,等. 光纤 Sagnac 环的研究现状及其应用[J]. 光电技术应用,2013,28(6):18-22.
- [5] 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):225-227.
- [6] 陈继宣,龚华平,金尚忠. 基于 Φ -OTDR 的光纤入侵传感器系统的原理及研究进展[J]. 激光杂志,2009,30(6):4-6.
- [7] 王立新,罗强,刘晓光,等. 基于 Sagnac 环的光纤围栏报警系统[J]. 光通信技术,2007,31(4):60-61.
- [8] 范彦平,巫建东,翟玉峰,等. 分布式光纤 Sagnac 定位传感技术评述[J]. 传感器与微系统,2008,27(11):8-9.

欢迎投稿,欢迎订阅,欢迎刊登广告!