

基于 DVS 的振动源与传感通道垂直距离的计算方法

郑丁¹, 朱明斯¹, 云麟¹, 张哲民², 张文举², 丁齐锋^{2*}

(1. 海南电网有限责任公司 信息通信分公司, 海口 570203; 2. 武汉康普常青软件技术股份有限公司, 武汉 430073)

摘要: 振动源与传感通道的垂直距离是光缆、电缆等线路运维人员关注的重要指标之一, 对如何进行线路安全处置具有重要指导意义, 提出一种基于分布式振动系统(DVS)的振动源与传感通道垂直距离的计算方法。通过实时采集光缆信号数据, 分析了振动波的衰减特点, 选择了合适的振动波振幅谱计算模型, 并给出了振幅谱与振动源间隔距离的分布方程, 以及垂直距离的近似计算方法。实验证明: 该算法计算出的垂直距离误差较小, 符合工程设计要求, 具有较高的实际应用价值。

关键词: 分布式光纤传感; 振动源; 传感通道; 垂直距离

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)11-0014-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Calculation method of vertical distance between vibration source and sensing channel based on DVS

ZHENG Ding¹, ZHU Mingsi¹, YUN Lin¹, ZHANG Zhemin², ZHANG Wenju², DING Qifeng^{2*}

(1. Information Communication Branch of Hainan Power Grid Co. Ltd., Haikou 570203, China;

2. Wuhan KPCQ Software Technology Limited by Share Ltd., Wuhan 430073, China)

Abstract: The vertical distance between the vibration source and the sensing channel is one of the important indicators concerned by the operators of optical cables and cables. It has important guiding significance for the safe disposal of the transmission line. A calculation method of the vertical distance between the vibration source and the sensing channel based on distributed vibration monitoring system(DVS) is proposed. Through real-time acquisition of cable signal data, the attenuation characteristics of vibration wave are analyzed, the appropriate calculation model of vibration wave amplitude spectrum is selected, and the distribution equation of the amplitude spectrum and the distance between the vibration source and the vertical distance is given, as well as the approximate calculation method of the vertical distance. Experiments show that the vertical distance error calculated by this algorithm is small, which meets the engineering design requirements and has high practical application value.

Key words: distributed optical fiber sensor; vibration source; sensing channel; vertical distance

0 引言

光纤因其无源、质轻和抗干扰强等诸多优点, 在电信业务、电力通信系统等领域的应用越来越广泛。然而, 随着城市建设步伐加快, 道路施工、地铁建设等

问题给光缆安全运行带来了新的隐患。仅在电信系统中, 一个省会城市每年因施工而引起的光缆外力破坏事故就高达数百起, 这些外破事故往往是野蛮施工所致, 导致抢修工作困难重重, 给光缆维护工作带来很大困难。

为将现有的被动抢修改为主动预防, 学者们在这方面做了大量的研究。陈晨^[1]利用马赫-曾德尔(M-Z)干涉原理, 提出了光缆振动事件识别方法, 实现了对振动事件的识别。唐超^[2]等人提出了基于梅尔频率倒普系数(MFCC)特征和支持向量数据描述(SVDD)训练的振动信号模式识别方法。王思远^[3]等人针对 M-Z 干涉仪型分布式扰动传感系统提出了基于短时频域

收稿日期: 2019-04-07。

基金项目: 海南电网公司科技项目(HNKJXM20180002)资助。

作者简介: 郑丁(1988-), 男, 海南海口人, 学士, 工程师, 海南电网有限责任公司信息通信分公司通信运维部运检二组副组长。主要研究方向是电力通信技术。负责完成的科技项目 6 项; 获海南电网科技进步三等奖 2 项、海南电网技改贡献三等奖 2 项和海南电网科技创新“金点子”奖 2 项。



* 通信作者: 丁齐锋(E-mail: 411892009@qq.com)。

扰动模式识别方法, 识别准确率达到 97% 以上。虽然, 目前关于光缆周界入侵模式识别的研究成果较多^[4-7], 但现有的这些系统都只实现了对光缆周围的施工事件进行识别, 而没有实现对施工器械与光缆之间的垂直距离的计算。传统的垂直距离计算有“三点定位法”, 但是受到“干涉衰落”这一因素的影响, 分布式振动系统(DVS)在空间上的幅度变化并不是均匀分布的, 其幅度在空间上存在较大的起伏, 在幅度小的位置, 信号解调的准确性也小, 进而影响系统工作的可靠性, 所以 DVS 中无法按照“三点定位”等传统的方法实现振动源与监测通道之间的垂直距离的计算。而施工作业器械与光缆之间的距离是光缆维护人员最为关心的指标之一, 但现有的技术无法满足这一要求。

因此, 本文提出一种基于 DVS 的振动源与传感通道垂直距离的计算方法, 实现对光缆附近作业器械与光缆之间垂直距离的实时计算。

1 基本原理

1.1 DVS

DVS 是一种利用光纤作为传感敏感元件和信号传输介质的传感系统, 可连续感知传输路径中振动动态参量的空间分布和时间变化信息, 具有灵敏度高、全程无源和多点同时定位等优点。它利用了光脉冲宽度内的后向瑞利散射光之间的干涉效应, 是一种将干涉效应和后向瑞利散射结合起来的新技术, 很好地结合了二者高灵敏度和长距离分布式测量的优势。利用 DVS 能够实现对光纤周围的外破入侵事件进行实时监控和检测, 以及快速预警。

1.2 振动源与传感通道垂直距离计算方法

垂直距离的定义如图 1 所示。在通常情况下, 振动源与光缆所在直线之间的垂直距离与光缆埋深、光缆与振动源的水平距离共同构成了直角三角形。显然, 振动源(通常为施工器械)与传感通道(通常为光缆)的垂直距离远近, 对光缆所造成的威胁大小有非

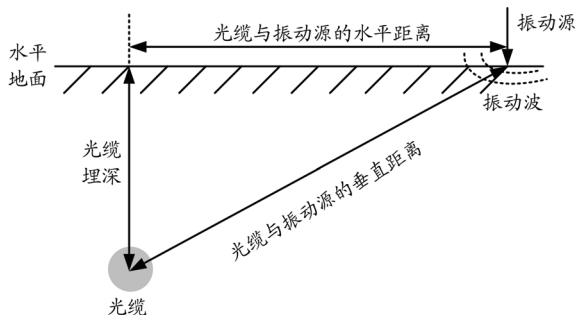


图 1 光缆与振动源的关系截面示意图

常大的差异。垂直距离 10 m 以上和垂直距离小于 1 m, 振动源对光缆的安全威胁程度截然不同, 运维人员在收到相应的光缆外破预警时所做出的反映也会不一样, 所以研究垂直距离计算算法具有重要意义。

本文通过分析振动波的衰减特点, 选择出合适的振动波振幅谱计算模型。通常, 采样点处振幅谱与振动源间隔距离的分布方程^[8]满足:

$$Am(F) = G_0 AmR(F) \exp\left(-\frac{\pi F}{Q(F)V} r\right) \quad (1)$$

其中, $Am(F)$ 为采样点处振幅谱强度, F 为振动源频率, 但在实际应用中设定为一个合适的窄频率段。 G_0 为包含几何发散、透射系数及反射系数影响在内的一个系数, r 为监测通道中每一个采样点与振动源的直线距离, V 为波传播速度, Q 为品质因子, $AmR(F)$ 为接收器响应函数。

基于上述公式, 取样点 i, j (与振动源距离分别为 r_i, r_j) 的振幅谱比满足:

$$\ln\left(\frac{Am_i(F)}{Am_j(F)}\right) = -\frac{\pi F}{Q(F)V} (r_j - r_i) + \ln\left(\frac{G_i}{G_j}\right) + \ln\left(\frac{AmR_i(F)}{AmR_j(F)}\right) \quad (2)$$

其中, G_i, G_j 是采样点 i, j 处包含几何发散、透射系数及反射系数影响在内的系数。

对于在每个采样点响应均匀的传感器来说, 有 $AmR_i(F) = AmR_j(F)$, 故有:

$$\ln\left(\frac{Am_i(F)}{Am_j(F)}\right) = -\frac{\pi F}{Q(F)V} (r_j - r_i) + \ln\left(\frac{G_i}{G_j}\right) \quad (3)$$

且对于均一介质, 有:

$$\ln\left(\frac{G_i}{G_j}\right) = \eta \ln\left(\frac{r_j^2}{r_i^2}\right) \quad (4)$$

其中, η 表示介质与振动频率和传输介质相关的散射系数。故有:

$$\ln\left(\frac{Am_i(F)}{Am_j(F)}\right) = -\frac{\pi F}{Q(F)V} (r_j - r_i) + \eta \ln\left(\frac{r_j^2}{r_i^2}\right) \approx \ln\left(\frac{E_i}{E_j}\right) \quad (5)$$

即:

$$\ln E_i - \ln E_j \approx \lambda (r_j - r_i) + 2\eta (\ln r_j - \ln r_i) \quad (6)$$

其中, $\lambda = \frac{\pi F}{Q(F)V}$ 为与传输介质、振动频率相关的吸收衰减系数, E_i, E_j 分别为该 2 点处所对应的特定频率段的振动波的强度。

在监测通道所处的介质也就是地表土层中, 吸收衰减的影响远大于散射衰减, 于是, 式(6)可以进一步简化, 为:

$$\ln E_i - \ln E_j \approx \lambda (r_j - r_i) \quad (7)$$

郑丁, 朱明斯, 云麟, 等: 基于 DVS 的振动源与传感通道垂直距离的计算方法

设监测通道与振动源之间的距离为 x , 则 $r_i = \sqrt{x^2 + (i \times del_s)^2}$, $r_j = \sqrt{x^2 + (j \times del_s)^2}$, 其中 del_s 为相邻 2 个取样点之间的距离。振动源位置与待测通道上取样点之间的各个位置参数的对应关系如图 2 所示。可以得到:

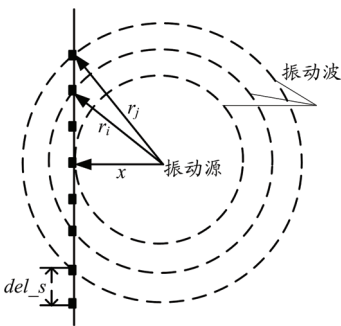


图2 振动源位置与待测通道上取样点之间的位置关系示意图

$$\ln E_i - \ln E_j \approx \lambda (\sqrt{x^2 + (j \times del_s)^2} - \sqrt{x^2 + (i \times del_s)^2}) \quad (8)$$

通过选择待测通道上不同位置处的信号, 可以得到不同的方程, 进而得到:

$$\frac{\ln E_i - \ln E_j}{\ln E_i - \ln E_{j'}} \approx \frac{\sqrt{x^2 + (j \times del_s)^2} - \sqrt{x^2 + (i \times del_s)^2}}{\sqrt{x^2 + (j' \times del_s)^2} - \sqrt{x^2 + (i' \times del_s)^2}} \quad (9)$$

其中, i', j' 分别代表 i 与 j 不同的位置。由于只有一个未知数 x , 解方程可以求得结果, 从而得到振动源与光纤之间的距离 x_0 。

但在实际求解过程中, 由于 DVS 取样点测量误差与噪声的存在, 上述方程式的精确求解几乎不可能。

因此, 定义误差函数 $Err(x)$ 为:

$$Err(x) = |(\ln E_i - \ln E_j)(\sqrt{x^2 + (j' \times del_s)^2} - \sqrt{x^2 + (i' \times del_s)^2}) - (\ln E_i - \ln E_{j'})(\sqrt{x^2 + (j \times del_s)^2} - \sqrt{x^2 + (i \times del_s)^2})| \quad (10)$$

以一定步长间隔输入 x , 计算 $Err(x)$ 的结果。如果 x_0 满足条件 $Err(x_0) < \delta$ (δ 为实际应用中能接受的误差), 则对所得 x_0 的集合 X 进行统计分析, 可得到较为鲁棒的振动源与光纤之间距离值 x_0 。相对误差曲线及有效数据的筛选结果如图 3 所示。

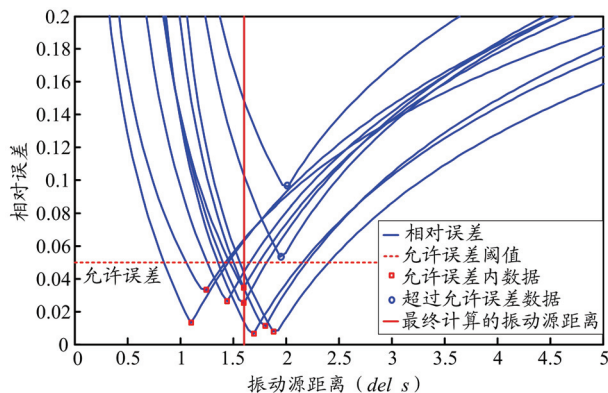


图3 相对误差曲线及有效数据的筛选结果示意图

图 3 中, 我们只选取了在允许误差内且相对误差最小的那些点(图中红框), 接着取这些点对应的横坐标求均值, 就能得出最后的垂直距离结果。

2 实证分析

2.1 实验系统架构

本文搭建了一套分布式外破监测系统, 通过实验对算法的有效性进行了相应测试。测试所用平台为一套光缆外破在线监测系统, 该系统部署在通信机房内, 与一条长度为 14 km 的光缆相连接。只需将监测系统与已铺设好的一芯冗余光纤相连接, 就可以实现整条线路的在线监测。编程实现所述垂直距离算法程序, 并将该程序部署到该监测系统中, 当系统监测到有外破入侵施工信号时, 算法程序及时将施工点与光缆的垂直距离计算出来, 并通过 4G 传输网络, 实时发送至实验人员的手持终端上。

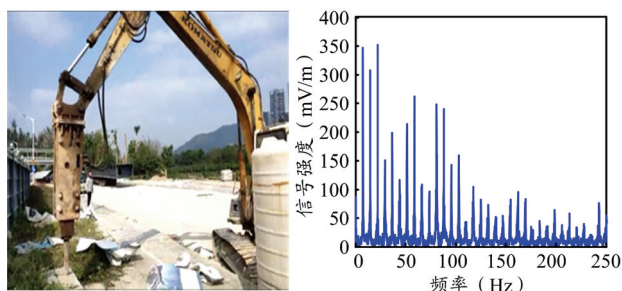
2.2 算法可行性验证

为验证算法的可行性, 我们在该条线路上随机选择了一个实验地点, 在该线路光缆皮长为 5.9 km (即实验点与机房光缆起点之间的光缆长度) 处做破碎机外破入侵实验。该处光缆埋深为 0.5 m, 在该处让破碎机分别在水平距离较小的位置 (取 1.64 m) 和距离较大的位置 (取 8.48 m) 2 处进行施工, 每次实验施工振动持续 1 min, 让 DVS 实时采集该信号, 并绘制相应的频域信号图。根据实际工程需要, 此处测得的垂直距离长度均以米为单位, 数据保留 2 位小数, 即精度达到厘米级别。

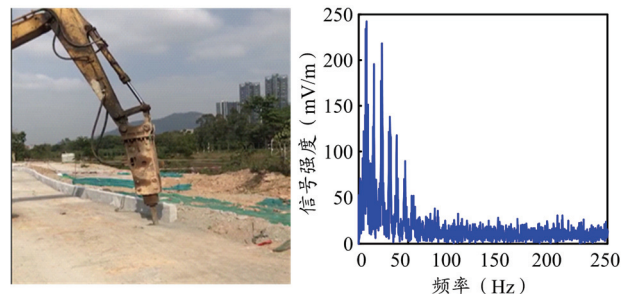
部分实验现场截图和对应的信号频谱图如图 4 和图 5 所示。图 4(a) 中, 破碎机施工地点与光缆的垂直距离为 1.72 m, 图 4(b) 为该破碎机施工时的信号频谱图; 图 5(a) 中, 破碎机施工点与光缆的垂直距离为 8.50 m, 图 5(b) 为该破碎机施工时的信号频谱图。通过对图 4(b) 和图 5(b) 进行对比分析可知: 图 4(b) 中整体信号强度比图 5(b) 中信号强度大, 图 4(b) 中 50~100 Hz 之间有强度达到 250 mV/m 的线谱, 而图 5(b) 中 50~100 Hz 之间信号强度只能达到 30 mV/m。因此, 振动源与光缆的垂直距离越近, 则信号衰减越小, 光缆受到的振动扰动越强, 光缆信号频域图显示的信号越明显。该实验证明利用信号衰减特征进行光缆与振动源垂直距离的计算具有较高的可行性。

2.3 算法可行性及精度验证

为进一步验证算法可行性, 本文对该算法进行了参数取值分析和实验验证。根据式(1), 由于实际中不



(a) 破碎机施工现场图 (b) 施工信号频谱图
图 4 垂直距离 1.72 m 处的施工现场情况与对应的信号频域图



(a) 破碎机施工现场图 (b) 施工信号频谱图
图 5 垂直距离 8.50 m 处的施工现场情况与对应的信号频域图

同频率的信号衰减不一样,所以在实际计算垂直距离时,理想情况下应使用单一频率计算,但是不同设备的振动频率会有一定的差异,单频率信号的准确性难以得到保证,因此本文在文献[8]的基础上做出了改进,选取一个较小的频率段 F 。考虑到如果所取频率过低,则容易纳入较多的噪音;但如果设置得过高,又会因有很多的施工类型达不到这一频率值,而导致无法进行计算的问题。所以,在实验时选择的频率段为 50~80 Hz。式(6)中 E 表示该段频率内的信号强度, E 的值为频率段 F 内的总体信号强度。我们将相对误差阈值设置为 5%,使得计算结果的可信度更高。将超过该相对误差阈值的数据予以剔除,低于该值的纳入计算范围;由于纳入的可能有多个值,对其取均值,即可得到最后的垂直距离。此外,在除上述光缆皮长为 5.9 km 的点之外,本文又选择了一个光缆皮长为 11 km 的点作为实验点,进行了模拟振动实验。在 2 个实验点处分别用大型机械(破碎机)和小型器械(手持风镐)各进行 3 组实验,每次实验施工振动持续 1 min。通过勾股定理计算得到实际垂直距离,同时让 DVS 实时采集该信号并计算振动源与光缆之间的垂直距离,最后对 2 种结果进行比较。实验中,我们分别对光缆附近破碎机施工、手持风镐施工等进行了垂直距离计算测试,实际垂直距离与计算结果如表 1 所示。

实验中机械与光缆之间垂直距离的实际值与通

表 1 振动源与光缆的实际垂直距离与计算结果对比表

实验点	施工机械	光缆埋深(m)	水平距离(m)	垂直距离(m)		误差	相对误差(%)
				实际值	计算值		
5.9 km	破碎机	0.5	3.21	3.25	3.60	0.35	10.77
	破碎机	0.5	8.51	8.52	9.30	0.78	9.15
	皮长	0.5	12.29	12.30	11.86	0.44	3.58
处	手持风镐	0.5	1.13	1.24	1.10	0.14	11.29
	手持风镐	0.5	3.74	3.77	4.13	0.36	9.55
	手持风镐	0.5	6.48	6.50	5.71	0.79	12.15
11 km	破碎机	0.87	3.08	3.20	3.62	0.42	13.13
	破碎机	0.87	8.51	8.55	8.23	0.32	3.74
	皮长	0.87	12.37	12.40	11.25	1.15	9.27
处	手持风镐	0.87	0.91	1.26	1.10	0.16	12.70
	手持风镐	0.87	3.62	3.72	3.87	0.15	4.03
	手持风镐	0.87	6.47	6.53	6.95	0.42	6.43

过分析信号数据衰减而计算得到的垂直距离较为接近,准确率较高。

3 结束语

为了能获得振动源与光缆之间的垂直距离,以便指导线路运维人员准确评估事故现场情况并做出有效的安全处置,本文提出了一种基于 DVS 的振动源与传感通道垂直距离的计算方法。该算法通过对 DVS 实时测量的数据进行分析 and 处理,可以实时计算出光缆路由附近施工作业器械与光缆之间的垂直距离,为光缆的安全运行提供实时预警服务,可有效提高光缆运行可靠性、安全性。该垂直距离计算结果准确度较高,具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 陈晨,周劲峰.一种基于 M-Z 干涉仪的事件识别算法[J].激光与光电子学进展,2012,49(8):85-89.
- [2] 唐超,胡挺.光纤传感系统振动信号模式识别的研究[J].光通信技术,2014,38(11):57-59.
- [3] 王思远,姜淑琴,梁生,等.M-Z 干涉仪型光纤分布式扰动传感系统模式识别方法[J].红外与激光工程,2014,43(8):2613-2618.
- [4] 孙茜,封皓,曾周末.基于图像处理的光纤预警系统模式识别[J].光学精密工程,2015,23(2):334-341.
- [5] 张俊楠,姜淑琴,梁生.基于 SVM 算法的 ϕ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统模式识别研究[J].红外与激光工程,2017,46(4):219-225.
- [6] 彭和阔,宋耀华,王翦,等.一种应用于光缆外破在线监控的模式识别方案[J].光学仪器,2018,40(2):56-61.
- [7] 王正,赵豫京,李永杰.分布式光纤监测预警系统在光缆运维中的研究与应用[J].电力信息与通信技术,2019,17(1):43-48.
- [8] 郝召兵,秦静欣,伍向阳.地震波品质因子 Q 研究进展综述[J].地球物理学进展,2009,24(2):375-381.