

基于光缆振动的井下无源定位系统的研究

文金朝¹, 刘丹蕾¹, 张超¹, 彭怀敏¹, 陈君洪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:在矿井灾变时,针对被困矿工难于被定位的问题,根据干涉原理和 φ -OTDR技术,提出一种基于光缆振动的井下无源定位的方法,以此为基础设计出井下无源定位系统。被困矿工敲击光缆引起的振动,包含了声音信息和位置信息,通过对音频数据分析可以区分出偶然性的振动和有规则的敲击振动,并对OTDR数据运算,可以获得振动的位置。试验结果表明,该系统能够还原振动声音和确定敲击位置,其定位距离的标准差在11m以内。

关键词:干涉; φ -OTDR; 光缆; 井下; 无源定位

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2018)03-0059-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.016

Study of mine passive location system based on fiber cable vibration

WEN Jinchao¹, LIU Danlei¹, ZHANG Chao¹, PENG Huaimin¹, CHEN Junhong²

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Guilin G-Link Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: When mine disaster happens, aiming at the problem that the trapped miners are difficult to be positioned, according to the interference principle and the φ -OTDR technology, a method of underground passive location based on optical cable vibration is put forward in this paper, and a passive location system which based on this method is designed. The vibration caused by the trapped miners hitting the optical cable includes sound information and location information. By analyzing the audio data, it can distinguish accidental vibration and regular knocking vibration. By computing OTDR data, it can get the location of vibration. The test results show that the system can reduce the vibration sound and determine the knocking position, and the standard deviation of the positioning distance is within 11m.

Key words: interference; φ -OTDR; optical cable; mine; passive location

0 引言

近年来,我国煤炭企业重大安全生产事故时有发生,给国家和人民带来了巨大的生命和财产损失。煤矿事故发生后,为了保证安全和避免次生事故,井下电力供应被完全切断,井下的各种通信设备无法开

启,形成井下盲区,导致井下人员分布情况不明朗,在一定程度上影响救援效果。

嵌入式技术的发展给煤矿救援技术的研究注入了新的活力。文献[1]设计了一种适合矿井救灾机器人的传感器与避障系统,使救灾机器人能够完成矿井信息的采集、遇险矿工的搜寻等工作;此外,还有利用Wi-Fi技术设计了一种便携式矿用救灾无线通信系统,可以方便快速组建井下应急救援指挥平台^[2]。但是,这些方案都只提供一种从外到内的被动搜救方

收稿日期: 2017-12-04。

基金项目: 广西区科技厅科技攻关计划项目(桂科攻 1355010-7)资助。

作者简介: 文金朝(1982-),男,硕士,工程师,主要研究方向为光通信技术、嵌入式技术。

式。如今, 光缆已经成为煤矿井下信息传输的主要媒介。本文利用干涉原理和 φ -OTDR 技术, 提出一种基于光缆振动的井下无源定位方法, 以此为基础设计出井下无源定位系统。事故发生后, 被困矿工只需要敲击附近的通信光缆, 即可确定敲击位置, 为矿工提供一种主动和外界联络呼救的新方式。

1 基于光缆振动的井下无源定位方法原理

干涉发生的条件是两束光之间的相位不同。井下无源定位方法利用振动引起的光程差来产生干涉, 通过相位解调恢复出声音信号。

φ -OTDR 与常规 OTDR 一样, 光从光纤的一端注入, 用光探测器探测后向瑞利散射光。 φ -OTDR 也是通过测量注入光脉冲与接收到的信号之间的时间延迟来得到光纤的位置信息。当光纤线路上由于入侵而发生扰动时, 相应位置光纤的折射率及长度将会发生变化, 这将导致该位置光相位的变化、扰动点后向散射的光发生干涉; 通过接收机解调, 可以检测出光强的变化; 根据从光脉冲注入光纤和干涉发生的时间差, 可以计算扰动点的位置。井下无源定位方法使用非平衡马赫-曾德尔干涉仪产生干涉, 具体光路如图 1 所示。

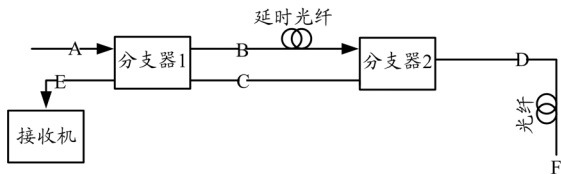


图 1 井下无源定位系统光路

从图 1 中可以看出, 光信号从 A 注入, 经过分支器分成两路, 然后分别经过延时光纤 B、C, 最后共同注入光纤 D, 到达光纤末端 F 被反射后分别经过 B、C 到达 E(接收机)。其路径 A-B-D-F-D-C-E 和 A-C-D-F-D-B-E 具有相同的光程, 满足发生干涉的条件。在稳定状态条件下, 经上述光路传输的光到达接收机时的相位相同, 不发生干涉; 但是, 如果光缆发生振动, 振动引起光纤的折射率发生改变, 进而导致光传输速度和相位差发生改变, 经光路 A-B-D-F-D-C-E 和 A-C-D-F-D-B-E 反射传输到接收机的两束光则发生干涉, 接着通过相位解调可以得到包含振动声音信息的音频信号; 最终经检测由相位差发生变化引起的光强发生改变的位置即可以确定振动位置。假设分支器

1、2 之间 B 分支的长度为 L_1 , C 分支的长度为 L_2 。在没有振动时接收机收到的瑞利后向散射信号功率为:

$$P(x) = S a_{rs} P_0 T_0 v_g e^{-2ax} f(x)/2 \quad (1)$$

其中, x 、 S 、 a_{rs} 、 P_0 、 T_0 、 v_g 、 a 和 $f(x)$ 分别代表位置、光纤散射系数、瑞利散射损耗系数、入射光功率、光脉冲宽度、光信号在光纤中的传输速率、光纤损耗系数和阶跃函数^[3-6]。在没有振动时, 接收机收到的功率随位置分布稳定。假设在时刻 t 距离分支器 2 的 L 处发生振动, 振动相位为 $\varphi(t)$, 光信号从 A 到接收机经历 4 条路径, 分别对应 $L_1+L+L+L_1$ 、 $L_1+L+L+L_2$ 、 $L_2+L+L+L_1$ 和 $L_2+L+L+L_2$, 经中间两个路径传输的光在接收机处的相位满足干涉条件, 发生干涉, 接收机解调得到的对应位置为 $L+(L_1+L_2)/2$, 该位置输出功率为:

$$P'(L') = 0.5 \times S a_{rs} P_0 T_0 v_g e^{-2aL'} f(L') \times \{1 + \cos\{\Phi([L+L_2]/v_g) - \Phi([L+L_1]/v_g)\}\} \quad (2)$$

其中, $L' = L + (L_1 + L_2)/2$ 。由于振动会持续一段时间, $x > L$ 处的输出功率也会受到振动相位的影响。

正是根据上述原理和光缆在煤矿井下的广泛铺设, 以及光缆具有一定的柔韧性在灾变时不易发生断裂的特点, 本文提出一种基于光缆振动的井下无源定位方法。井下矿工只要连续敲击身边的光缆, 在敲击点至井上处理中心的光缆未断的情况下, 本方法即可对敲击者的位置进行精确定位, 并实时播放振动声音。

2 井下无源定位系统设计

井下无源定位系统如图 2 所示, 该系统主要由激光发射机、合波器、干涉光路、波分、光电探测器、末端反射器、回波抵制器、A/D 和服务器等组成。一个激光发射机发射波长为 1550nm 连续激光通过相位解调得到

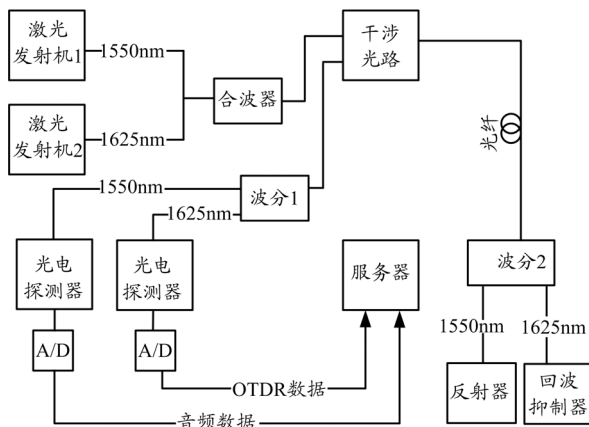


图 2 井下无源定位系统原理图

音频数据, 另一个激光发射机发射波长为 1625nm 脉冲激光作为振动定位信号, 两种波长的光经过合波器后注入到光纤中。对音频信号而言, 末端反射越强越有利于还原声音, 但对 OTDR 信号而言, 强反射不利于定位, 因此, 在末端对波长为 1550nm 光使用反射器增强其反射, 对波长为 1625nm 光使用回波抑制器抑制其反射。光信号在光纤中传输, 反射光经波分 1 分离出波长为 1550nm 和 1625nm 光, 分别经过光探测和 A/D 转换后, 可以得到振动的声音幅度和 OTDR 信号的反射强度。从理论上讲, 使用法拉第旋转反射器可以增强系统性能, 本文根据试验情况并考虑系统成本, 采用普通反射器和回波抑制器。

音频信号既可以还原振动现场的声音, 还可以作为启动分析振动定位算法的依据。还原振动现场的声音, 有助于搜救人员判断是偶然的落石还是被困人员的敲击造成了振动。被困人员有意识地敲击必然呈现出一定的规律性和连续性, 形成的振动声音幅度如图 3 所示。

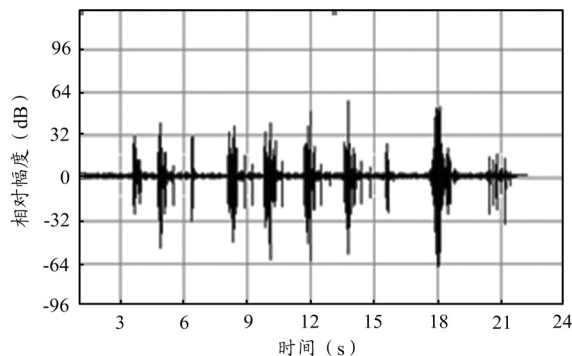


图3 振动声音的相对幅度

我们根据接收机收到并经过 A/D 转换后的定位信号, 可获得 OTDR 曲线; 通过对相邻时间收集到的 OTDR 曲线做差值, 再经过去直流归零处理, 可以得到包含明显振动信息的数据。光缆振动时, 光缆处于受力-形变-恢复的快速变化之中, 并不是每一条差值曲线都包含振动信息, 只有振动前后 OTDR 曲线的差值, 才包含了明显的振动信息。经过统计和试验, 只有两条 OTDR 曲线数据间隔在 100ms 以内, 获取到的定位曲线比较理想。

本文在一段时间内采集包含了振动信息的曲线, 其功率差如图 4 所示。图 4 中, 横轴表示光纤的长度, 与传统的 OTDR 曲线测量得到的距离相同; 纵轴表示去直流后的 OTDR 曲线偏离零轴的程度。在没有振动发生时, 曲线基本在纵轴 0 附近, 一旦受到振动, 在振

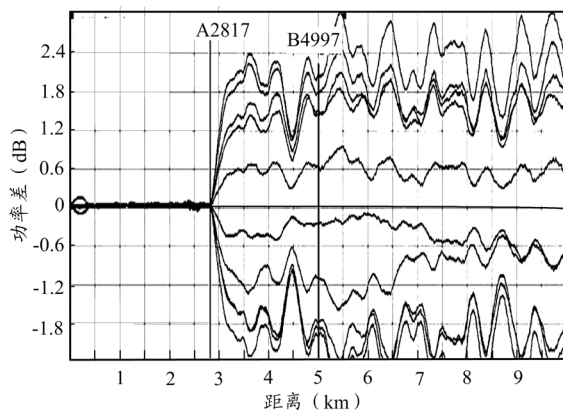


图4 振动前后 OTDR 曲线的功率差

动点以后, 就会有较大的起伏。根据曲线发生突变的位置即可确定振动点的位置。

为了获得包含振动信息的有效数据, 井下无源定位系统采用数据采集模块和算法处理模块 (服务器) 相分离的架构。数据采集模块负责控制激光器发光和信号的收集并完成初始处理; 而服务器从数据采集模块获取音频数据和 OTDR 数据。如果振动声音强度超过阈值, 那么对 OTDR 数据先进行求差, 归零去直流, 然后分析曲线上的振动位置。此外, 为了排除偶然落石等因素造成的干扰, 我们需要对一段时间内的数据进行分析, 并对提取的振动位置进行统计, 得出最终判断结果。

优化后的振动曲线如图 5 所示。通过对差值曲线取绝对值进行优化, 可以提高运算速度。

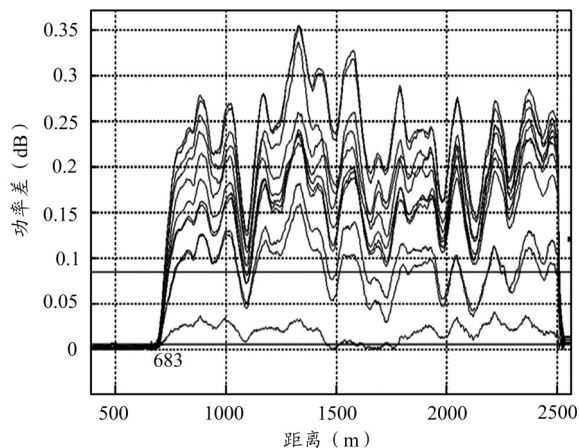


图5 优化后的功率差值曲线

3 试验结果

为了计算敲击时间与定位精度的关系, 我们进行了如下试验: 设备每 15s 产生一次定位数据, 连续敲击 150s 为一组, 一共敲击 10 组, 获得 10 个有效定位数

文金朝, 刘丹蕾, 张超, 等: 基于光缆振动的井下无源定位系统的研究

据。为了比较敲击时间对定位精度的影响, 每组内取前 5 个位置与取前 10 个位置的中位值进行比较, 最终得出定位精度与时间的关系如表 1 所示。表 1 中的 5 代表从 5 次定位数据取中位值, 10 代表从 10 次定位数据中取中位值, 标准差是对 10 次中位值的再次统计结果, 表征不同类型的中位值的离散程度; 表 2 是对另外一个位置进行敲击的试验结果。

表 1 敲击时间与精度关系-1

序号/ 标准差	5-中位值	10-中位值
1	10587	10585
2	10583	10581
3	10574	10576
4	10587	10589
5	10603	10595
6	10570	10585
7	10591	10591
8	10591	10595
9	10599	10581
10	10595	10593
标准差	10	7

表 2 敲击时间与精度关系-2

序号/ 标准差	5-中位值	10-中位值
1	10321	10321
2	10313	10313
3	10321	10325
4	10334	10325
5	10350	10325
6	10325	10342
7	10334	10325
8	10321	10329
9	10313	10325
10	10321	10327
标准差	11	7

试验结果表明, 敲击的次数越多, 系统得到的定位位置越精确。

在本系统中, 我们获取到的是光纤距离。该距离并不等同于实际光缆距离。同时由于在敷设光缆的时候每隔一定距离需要预留一部分光缆, 因此在本系统实用化部署时需要进行定标, 将光纤 OTDR 测量距离与实际地理距离结合起来, 以最终确定敲击点位置。

4 结束语

本文利用光干涉原理和 φ -OTDR 技术提出了一种基于光缆振动的井下无源定位方法, 并根据该方法设计出井下无源定位系统, 在实验室环境下, 进行了相关实验, 取得了比较理想的试验结果, 为在煤矿井下进行应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 童敏明, 陆生华, 杨礼现, 等. 矿井救灾机器人的传感与避障系统[J]. 煤炭科学与技术 2006, 34(8): 11-14.
- [2] 张军. 基于 WiFi 技术的矿井无线救灾通讯系统研究[J]. 矿业安全与环保, 2009, 36(z1): 11-13.
- [3] 谢孔利. 基于 φ -OTDR 的分布式光纤传感系统[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [4] 彭龙, 邹琪琳, 张敏, 等. 光纤周界探测技术原理及研究现状[J]. 激光杂志, 2007, 28(4): 1-3.
- [5] 范煜飞. 光缆自动监测系统的设计与测试[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
- [6] 谢孔利. 基于 OTDR 曲线的通信光纤故障诊断的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.

2018 年中国(北京)海洋信息网络技术及产业发展大会会议通知及论文征集(三)

2018 年 5 月 22-24 日 北京亦创国际会展中心

四 会议征文

会议征文主题(不局限于此):

1. 海洋通信与传感
 2. 海底科学观测、监控与环境保护
 3. 海洋空间信息安全
 4. 海洋遥感与监测
 5. 海洋大数据平台建设及应用
 6. 水下无人系统
 7. 海洋光学
 8. 国际海洋信息网络发展新动态
 9. 海洋电子信息采集技术研究及应用
- 合作期刊:

Journal of Electronic Imaging (SCI)、Journal of Applied Remote Sensing (SCI)、Optical Engineering (SCI)、Journal of Micro/Nanolithography、MEMS, and MOEMS (SCI)、红外与激光工程 (Ei)、光学精密工程

(Ei)、中国光学(Ei)、光通信技术(中文核心期刊)、中国图象图形学报、信息与控制、电光与控制、光学与光电技术、太赫兹科学与电子信息学报等。

投稿要求与出版:

- 1、请作者登陆会议投稿网站 http://www.manuscript-cnoenet.com/index_en.htm, 注册并提交论文摘要。
- 2、通过会议程序委员会专家审查的投稿被大会组委会录用。择优推荐到合作期刊(SCI、EI)、SPIE 会议文集(EI)或中文核心期刊正式发表。
- 3、第二轮摘要投稿截止时间: 2018 年 4 月 15 日, 延迟截稿时间请见网站通知, SPIE 全文投递截止时间: 2018 年 6 月 30 日。

联系方式:

联系人: 张昊翔

联系方式 022-58168870 17612230922

E-MAIL: haoxiang_zhang@csoe.org.cn