

车辆振动检测 Φ -OTDR 系统研究与信号处理

邱玉东, 秦祖军, 熊显名, 张文涛

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘要:低动态响应严重限制了相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)系统在高速公路车辆振动信号检测中的应用。理论分析了 Φ -OTDR 系统车辆振动探测原理。针对相干探测时信号解调所造成的低动态响应问题,提出了利用专用解调芯片进行模拟解调的解决方案,并进行压电陶瓷(PZT)振动模拟实验和高速公路实验。实验结果表明,基于 ADRF6850 宽带接收机芯片的模拟解调器达到了系统对精度的要求,且极大地提高了 Φ -OTDR 系统的动态响应能力,证明了高动态响应 Φ -OTDR 系统在高速公路车辆振动信息检测中有很大的应用前景。

关键词:相敏光纤传感;模拟解调;振动检测;动态响应

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)04-0033-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.04.009

Vehicle vibration detection Φ -OTDR system design and signal processing

QIU Yudong, QIN Zujun, XIONG Xianming, ZHANG Wentao

(School of electronic engineering and automation,

Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: The low dynamic response severely limits the application of phase-sensitive optical time domain reflectometer(Φ -OTDR) system in highway vehicle vibration signal detection. This paper theoretically analyses the Φ -OTDR system vehicle vibration detection principle. Aiming at the problem of low dynamic response caused by signal demodulation in coherent detection, the paper proposes a solution of analog demodulation using dedicated demodulation chip and carries out the PZT simulation experiments and highway experiments. The result shows that the analog demodulator based on the ADRF6850 wideband receiver chip achieves the system's accuracy requirements, greatly improves the dynamic response capability of Φ -OTDR system, and proves that the high dynamic response Φ -OTDR system has great application prospect in the detection of highway vehicle vibration information.

Key words: phase sensitive fiber sensing; analog demodulation; vibration detection; dynamic response

0 引言

从 1993 年 Taylor 和 Lee 首次提出相位敏感光时域反射计 (Φ -OTDR)^[1] 开始,经过 20 年的发展, Φ -OTDR 系统因其高灵敏度、超长距离和可分布式等优点已被广泛应用在石油管道安全监测、桥梁监测和特殊场所安防监控等领域^[2]。如今,高速公路安全监测是保障高速道路畅通、减少和避免交通事故的必要途

收稿日期:2017-12-14。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:61565004)资助。

作者简介:邱玉东(1993-)男,硕士研究生,主要研究方向为光纤振动传感。

径。目前高速公路上采用的视频监控或雷达测速等安全监测手段无法做到全程监控,急需像分布式 Φ -OTDR 传感系统这样的全分布式传感系统对高速公路上车速、车流量等交通信息进行全程监控。之前针对 Φ -OTDR 传感系统的研究大多集中在降噪和特征识别算法中,例如叠加平均及滑动平均算法^[3]、小波去噪算法^[4]以及直接探测、相干探测与 IQ 解调^[5]等,其大部分系统都是在实验室环境下搭建,很少考虑系统在工程应用时出现的动态响应问题。由于传感系统需要进行全程监控以及 Φ -OTDR 系统的高分辨率特性,传感

系统每次探测数据量庞大,而系统的动态响应直接影响了车辆信息获取的速度和准确度。因此,系统的动态响应与其降噪、信号特征识别一样,在高速公路车辆振动信息获取上有着至关重要的地位。

本文首先介绍 Φ -OTDR 系统车辆振动检测原理及系统结构设计;然后提出一种利用宽带接收机芯片 ADRF6850 进行模拟 IQ 解调的信号解调方案来尽可能地缩短测量时间,提高系统动态响应;最后进行多次实验,一方面验证解调板的灵敏度和解调精度,另一方面证明高动态响应 Φ -OTDR 系统在高速公路车辆振动信息获取上的应用前景。

1 系统原理和结构设计

Φ -OTDR 系统通过不断检测光纤中后向瑞利散射光信号的强度变化来判断扰动点的位置^[6]。其探测过程可以看成是一个一维光斑的生成过程,每一个时刻 t 都会有一系列散射点(半个脉冲宽度内)散射回来的脉冲光相互干涉,形成光斑,当探测脉冲从光纤的入口传播到出口时,也就完成了一次连续光斑的生成。最后光斑被探测器接收,形成时域波形。

当车辆在高速公路上行驶时,由于车辆本身的重力和向前的动力,车辆会对地面有一个冲击力。冲击力沿着路面传导到光纤上,导致光纤发生微小形变。纤芯折射率发生变化,继而影响后向散射光的相位;干涉光强度发生变化,最后改变探测到的波形曲线。将每次探测到的波形曲线与前 N 次探测到的曲线做差分并取绝对值累加处理就可以得到车辆在高速公路上的具体位置。由于车辆振动为低频信号, N 的选取决定了能否探测到车辆的具体位置。

Φ -OTDR 系统结构如图 1 所示。为获得更好的信号质量,抑制高频噪声,探测方式采用相干探测。图 1 中,NLL 为 3kHz 线宽的窄线宽激光器,功率为 30mW。激光器发出的连续光经 1:9 的分光器被分成两路,一路(百分之十)作为参考光经偏振控制器(PC)控制之后与信号光耦合,另一路通过声光调制器(AOM)被调制成脉冲光。脉冲光经由三端口环行器进入传感光纤

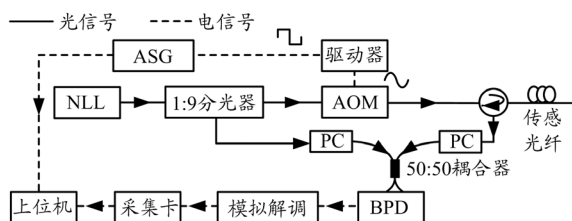


图 1 Φ -OTDR 系统结构图

中,散射回来的信号光和参考光经过 50:50 耦合器耦合后被平衡探测器(BPD)转换为交流电压信号交由解调板解调。解调完成的 IQ 两路基带信号被 100Ms/s 采集卡所接收并送入上位机进行分析处理。任意信号发生器(ASG)为驱动器和采集卡提供信号以分别进行脉冲调制和信号同步。

2 模拟 IQ 解调板设计

相干探测时信号光与参考光通过 50:50 的耦合器混合后,到达 BPD 的两个几乎完全相同的雪崩二极管上,经 BPD 中的差分电路对两路电流做差,获得交流分量输出^[5]。

相干探测之后输出电信号为中频段信号,不利于信号采集。如果利用高带宽的采集卡^[5]对信号进行采集之后再利用软件进行解调分析,会造成采集卡成本增加,最重要的是给上位机增加了计算量,降低了整个系统的动态响应。为提高 Φ -OTDR 系统的实时性,本文提出利用专用接收机芯片 ADRF6850 作为 IQ 解调芯片,设计并制作解调板。ADRF6850 内部高度集成宽带正交解调器、频率合成器和可变增益放大器(VGA)。ADRF6850 工作在 100~1000MHz 的频率范围,有较好的适用性;得益于其低于 1Hz 的频率分辨率,可以很精准地把中频信号解调到基带;芯片前端的 VGA 提供 60dB 的增益控制范围,能够比较灵活地对信号进行预处理。解调板由一块 ADRF6850 芯片、一块微型处理器 STM32f103RCT6 以及供电模块、滤波放大电路构成,整个解调器的工作流程如图 2 所示。

解调板上电

后由 MCU 通过

SPI 接口控制

ADRF6850 的初

始化,包括设置

本振频率、宽带

或窄带模式,以

及 VGA 的工作模式

和开启锁定检测。

软件初始化后

芯片内部的锁相环

PLL 模块(PLL 模块

包含压控振荡器

VCO、鉴频鉴相器

PFD 以及电荷泵 CP)

会自动根据初始

化值进行本振频率

锁定。稳定的本振

信号被分成相位

相差 90°的两路

信号分别与探测

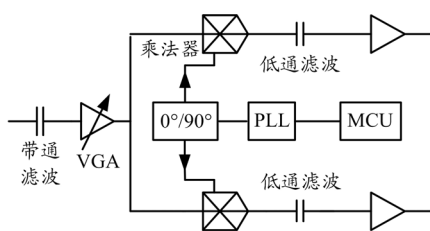


图 2 解调器工作流程示意图

及 VGA 的工作模式和开启锁定检测。软件初始化后芯片内部的锁相环 PLL 模块(PLL 模块包含压控振荡器 VCO、鉴频鉴相器 PFD 以及电荷泵 CP)会自动根据初始化值进行本振频率锁定。稳定的本振信号被分成相位相差 90°的两路信号分别与探测信号相乘,再经过低通滤波和放大后输出 I 路和 Q 路两路基带信号。解调板输入输出信号对比如图 3 所示。

图 3 中第 4 条为待解调信号,即 BPD 的输出信号,表示为:

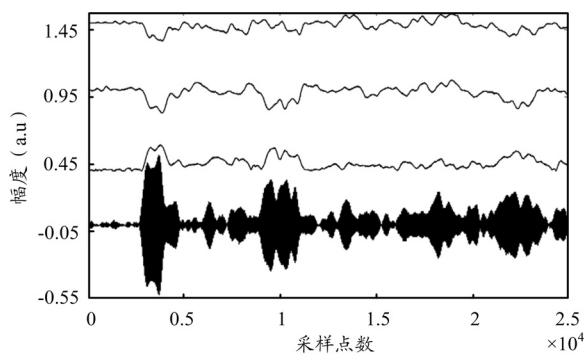


图3 解调器输入输出信号对比图

$$E(t)=4E_sE_o\cos(\Delta\omega t+(\varphi_s(t)-\varphi_o)) \quad (1)$$

第1条和第2条分别为相乘滤波之后输出的正交信号,表示为:

$$I=4E_sE_o\cos(\varphi_s(t)-\varphi_o) \quad (2)$$

$$Q=4E_sE_o\sin(\varphi_s(t)-\varphi_o) \quad (3)$$

得到两路正交信号之后就可以对两路信号进行采集和处理来反推原始交流信号的幅度和相位,即:

$$4E_sE_o=\sqrt{I^2+Q^2} \quad (4)$$

$$\varphi_s(t)-\varphi_o \propto \arctan\left(\frac{I}{Q}\right) \pm 2k\pi \quad (5)$$

其中, E_s 为信号光的场强, E_o 为参考光的场强, $\Delta\omega$ 为AOM的频移量, φ_s 和 φ_o 分别为信号光和参考光的相位。图3中第3条曲线即为解调前信号的幅度曲线,即信号的包络,可以看出,解调板能够很好地完成信号的解调。通过模拟解调得到的幅度和相位信息比用软件得到的更快,但同时也引入了一些噪声,例如芯片内部的频率噪声、电路板的热噪声等都会影响解调出的信号质量。为了测试整个解调板的性能是否能够满足系统的要求,本文搭建Φ-OTDR系统进行压电陶瓷(PZT)振动模拟实验和车辆振动检测实验。

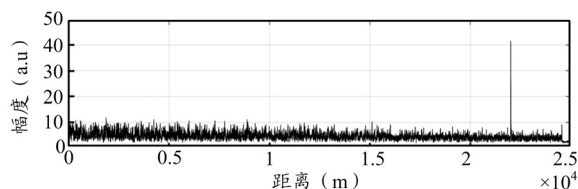
3 实验设计及分析

3.1 PZT 模拟实验结果分析

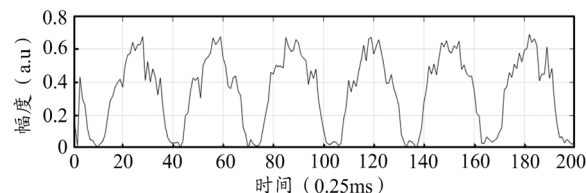
本文利用PZT光纤拉伸器进行振动模拟实验。实验时探测脉宽为100ns,探测频率为4kHz,传感光纤总长度为25km,在22.42km处加了一个PZT光纤拉伸器。为尽量隔绝外界振动,传感光纤和PZT都放置在5cm厚的泡沫箱子里。实验得到的PZT波形图如图4所示。

从图4(a)可以看出,实验中系统的信噪比可以达到16.4dB(信噪比按照 $SNR=20 \times \log\left(\frac{A_s}{A_n}\right)$ 计算,其中

A_s 为信号最大幅度, A_n 为噪声平均幅度)。图4(b)中在50ms的探测时间内出现6.5个正弦波形,与130Hz的驱动信号相对应。由于模拟解调的噪声和干涉强度与所施加振动信号成非线性关系的特性^[6],时域信号并不是非常规整的正弦信号,但加载在光纤拉伸器上的正弦振动信号基本可以被还原出来。



(a) PZT 差分波形



(b) PZT 时域波形

图4 PZT 实验波形图

3.2 公路实验结果分析

3.2.1 水泥路实验结果分析

在进行高速公路实验之前我们首先进行了短距离的公路实验来验证系统的可行性。实验时将200多米的传感光纤在水泥路边缘铺设。光脉冲频率为200kHz,脉宽为100ns,对应空间分辨率为10m。每次探测采集5000条曲线,每条曲线与相隔1000条的曲线差分并取绝对值累加处理。

图5为某一时刻处理后的波形及时域波形对比图。从图5(a)可以看出,车辆行驶到174m处时差分信号明显有一个较大的峰值。对比图5(b)和图5(c),在同一时刻,车辆经过光纤某一点(174m处)时,由于受到车辆振动的影响,174m处散射信号明显增大,且呈现一定的规律;而同一时刻没有车辆的地方(100m处),时域信号则相对较弱较平缓,有车和无车时时域信号特征对比鲜明,容易进行车辆信息的特征识别。经计算得到图5(a)中振动信号的信噪比约为12.3dB,其振动位置处信号峰值幅度并不高,且噪声平均幅度偏大。对比图4可以得出在实际应用光纤传感系统进行车辆振动检测时,信噪比并没有在实验室环境下进行模拟实验时高。信噪比降低有两个原因,一是光纤和地面的接触不良,导致振动信号传导不好;二是光纤对外界的其它扰动信号(例如高频噪音、人为走动等)也有响应,稀释了车辆振动信号。

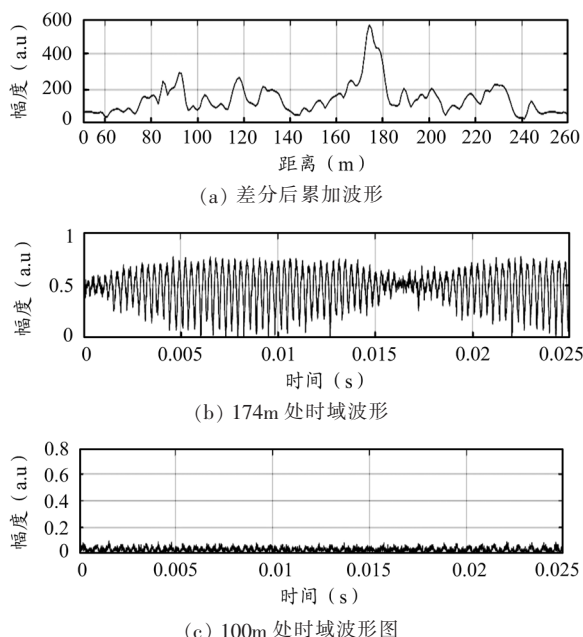


图5 某一时刻处理后波形及时域波形对比图

3.2.2 高速公路实验结果分析

高速公路实验测试所用传感光纤为预埋在高速公路隧道里的一截通信光缆(原作为视频监控用),光缆沿道路边缘掩埋,掩埋深度大约为 0.5m,总长度约为 1km。实验时脉冲频率为 40kHz,脉宽为 100ns,每次探测采集 2000 条曲线,同样做差分处理,得到的结果如图 6 所示。可以看出,当有车辆经过时,首先在 197m 处有一个比较明显的峰值(图 6(a))。19s 后又在 557m 处探测到了同样的波形(图 6(b))。通过不断提取信号的位置和出现的时间差,就可以判断车辆的车速信息。

从图 6 可知,与之前的水泥路实验一样,虽然可以看到振动点处信号的峰值,但噪声信号也比较强,计算得出图 6 信噪比较低,大约只有 7.9dB。而且测试发现在 1km 的通信光缆上,只有某几个区域可以明显地探测到车辆经过时的振动信号,其它位置的信号大多都被淹没在噪声之中。结合测试现场情况来看,

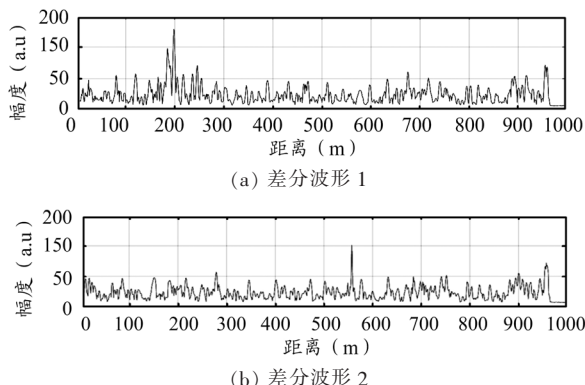


图6 高速公路实验差分图

主要是由两方面因素造成的:一方面是由于通信光缆所采用的是铠装光纤,铠装光纤在外皮里面有一层金属铠,使里面纤芯受到保护,有抗强压抗拉伸功能,但这会影响系统的灵敏度;另一方面是光缆的埋设方式,例如光缆距路面的距离、掩埋深度和不同传感位置的地质情况等都会对灵敏度有影响。实验时发现,虽然光缆与路面的掩埋距离相同,但能探测到信号的地方光缆和路面的接触非常紧密,光缆上部由水泥铺设,地质坚硬;而表现为噪声的地方大多都是用比较稀松的泥土进行掩埋,地质比较疏松,车辆振动对路面所造成的冲击力在经过稀松的泥土时会被大幅降低,进而严重影响了传感系统在那些点处的灵敏度。这也证实不同的地质情况对应的传感信号大不相同,水泥地等地质坚硬处信号表现良好,车辆经过时振动信号强度大,与图 5(b)中的信号类似,容易分辨;而一般的泥土地由于对振动吸收较大,其振动信号强度小,甚至根本探测不到,被淹没在噪声中。

4 结束语

Φ -OTDR 技术理论相对成熟,但其在道路交通上的应用相对较少。本文通过多次实验验证了分布式 Φ -OTDR 系统在高速公路车辆振动信息监测领域有一定的应用价值,并指出了实际应用时出现的问题以及问题出现的原因。同时优化了 Φ -OTDR 系统的动态响应,证明了模拟解调可以满足系统对精度的要求。本文的设计获取了车辆的振动信号,为之后的车辆振动模式识别奠定了基础,对 Φ -OTDR 系统在高速公路车辆信息检测方面的推广有重要意义。

参考文献:

- [1] TAYLOR H F, LEE C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US, 5194847 [P/OL]1993-03-16 [1993-03-16]. <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=5194847&KC=&FT=E>.
- [2] 郑元辽,刘月明. 光纤传感监测压力管道泄漏技术进展综述[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(9): 15-17, 21.
- [3] 方英兰,刘升,沈成银,等. 相位敏感 OTDR 系统的信号解调方法[J]. 量子电子学报, 2015, 32(1): 123-128.
- [4] 盛兴,邓大鹏,王晶,等. 干涉型光纤传感信号去噪方法的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2011(2): 31-35.
- [5] 贺梦婷,庞拂飞,梅烜玮,等. 基于 IQ 解调的相位敏感 OTDR 的研究[J]. 光通信技术, 2016, 40(9): 23-26.
- [6] 张旭革,张益昕,王峰,等. 相位敏感型光时域反射传感系统光学背景噪声的产生机理及其抑制方法[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 87-100.