

基于相位敏感光时域反射仪的高灵敏高频振动信号探测

王延¹, 陈真², 刘智超², 刘奂奂^{2*}, 庞拂飞²

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081; 2. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444)

摘要:为提高对外界振动信号的探测灵敏度,设计了一种基于相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)和 3D 打印传感器相结合的系统,该系统中的传感器由光纤缠绕在圆柱形弹性体组成,其圆柱形弹性体由 3D 打印的柔性材料制备。通过对 100 m 处 20 kHz 信号的探测,证明了集成弹性体的 3D 打印传感器对高频振动信号的探测具有增敏效果,解调出的信号频谱的幅度提升了 8 倍。

关键词:相敏光时域反射仪; 3D 打印; 振动探测; 光纤传感; 弹性体

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)11-0008-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.11.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Highly sensitive high-frequency vibration detection based on Φ -OTDR

WANG Yan¹, CHEN Zhen², LIU Zhichao², LIU Huanhuan^{2*}, PANG Fufei²

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang, 050081 China;

2. School of communication and information engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to improve the detection sensitivity of the external vibration signal, a system based on the combination of phase sensitive optical time domain reflectometer (Φ -OTDR) and 3D printing sensor is designed. The sensor in the system is composed of optical fiber wound in a cylindrical elastomer, which is made of 3D printing flexible material. By detecting the 20 kHz signal at 100 m, it is proved that the 3D printing sensor with integrated elastomer has the effect of enhancing sensitivity for the detection of high frequency vibration signal, and the amplitude of the demodulated signal spectrum is increased by 8 times.

Key words: Φ -phase sensitive optical time domain reflectometer; 3D printing sensor; vibration detection; fiber sensing; elastomer

0 引言

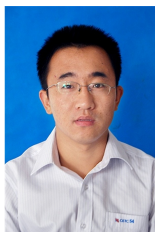
大型土木工程结构和基础设施需要对结构健康进行监测,例如高层建筑、桥梁和核电站,尤其在发生地震、爆炸和洪水等自然或人为灾难的情况下,结构健康监测(SHM)对于大型土木工程结构的安全尤为必要。事实证明,基于光时域反射仪(OTDR)的测量技术是 SHM 的有效测量技术,该技术能利用分布光纤布线来连续监测长距离内沿光纤的应变和温度变化^[1-2]。特别地,相敏光时域反射仪(Φ -OTDR)已被广泛用于

SHM 和入侵检测^[3-4]。在 Φ -OTDR 中,来自高度相干激光器的光脉冲被发射到被测光纤(FUT)中,并且光脉冲内的各个瑞利散射中心发生相干干涉,当传感器受外部干扰(例如机械振动),反射光携带了外界振动信息,因此可以通过解调,检测到瑞利散射信号来反推外界振动的变化。在 Φ -OTDR 中,振动的空间分辨率本质上由发射的脉冲宽度确定(例如 10 ns 的脉冲宽度能使最小空间分辨率达到 10 m^[4])。为了提高 Φ -OTDR 系统的灵敏度,可以通过利用人为引入的散射中心来增强弱瑞利散射反射(例如随机光纤光栅^[5]和弱光纤布喇格光栅阵列^[6]),但是由于采用的仍然是具有固有泊松比的传统二氧化硅光纤,导致光纤机械振动的应变敏感性受到限制;此外,由于亚纳秒级光脉冲生成方面的复杂性大大增加,进一步降低空间分辨率(例如小于 1 m)似乎非常困难,这使得 Φ -OTDR 对于高精度的振动探测事件定位不灵敏。

收稿日期:2020-02-17。

作者简介:王延(1985—),男,河北承德人,硕士,高级工程师,主要研究方向为传感系统应用。主要参与项目包括分布式光纤传感设备研制、相位敏感光时域反射光纤传感技术研究等。

* 通信作者:刘奂奂(E-mail: hhliu@shu.edu.cn)。



针对大型土木工程结构和基础设施检测,本文提出一种基于 Φ -OTDR 和 3D 打印传感器相结合的振动检测系统。

1 基于 3D 打印传感器制备

3D 打印技术的优势是可灵活制备具有特殊结构的传感元件。基于 3D 打印的圆柱形弹性体光纤传感器元件及实物图如图 1 所示。该传感器由圆柱形弹性体和缠绕的光纤组成,圆柱形弹性体分为顶部组件和底部组件两部分。顶部组件和底部组件的底座直径均为 30 mm,圆盘的厚度为 3 mm。顶部组件的接头是一个圆柱环,其内径为 18.95 mm,外径为 21.95 mm,高度为 3 mm。底部组件的接头也是一个圆柱环,其内径为 22 mm,外径为 25 mm,高度为 3 mm。制备圆柱形弹性体后,将弯曲不敏感的光纤片缠绕到凹槽中 25 圈,利用硅橡胶涂在缠绕的光纤上固定光纤。其中,圆柱形弹性体由 3D 打印机打印高泊松比柔性材料 ABS 树脂制成,其泊松比为 0.394(单模光纤的泊松比仅为 0.16)。相比于单模光纤,该传感器具有更大的形变,从而能实现增敏效果。

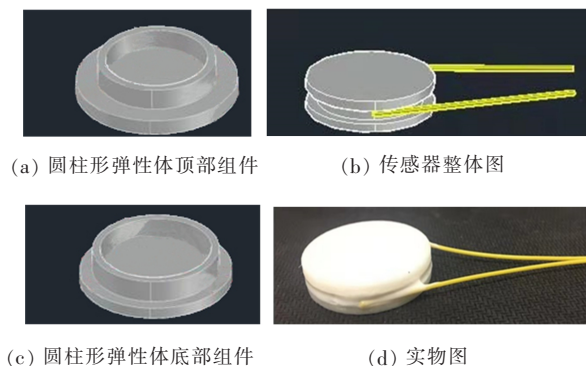


图 1 基于 3D 打印的圆柱形弹性体光纤传感器元件及实物图

2 基于 Φ -OTDR 的振动传感装置

本文设计的基于 Φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统实验装置如图 2 所示。实验中, Φ -OTDR 系统中窄线宽激光器(NLL)作为光源,通过 90:10 耦合器将连续光波分为两部分:90%用作信号光,10%用作本地参考光。声光调制器(AOM)将输入的探测光调制为脉冲光,脉冲持续时间设置为 25 ns,脉冲重复频率为 20 kHz。光信号被掺铒光纤放大器(EDFA)放大后通过环形器(CIR)发射到传感光纤中。传感光纤的末端需要弯曲,以减少任何强烈的菲涅耳反射。瑞利背散射光信号通过 50:50 耦合器干扰 10%的本地振荡器光混

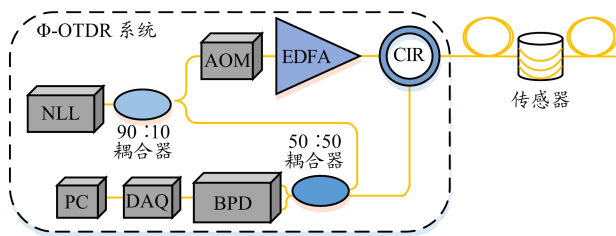


图 2 用于振动事件检测和定位的 Φ -OTDR 系统的实验装置

合,然后通过平衡光电探测器(BPD)转换为电信号。数据采集卡(DAQ)采集电信号后由计算机(PC)处理。为了模拟机械振动,本文将 3D 打印传感器放置于压电蜂鸣器上,该蜂鸣器由信号发生器激发,信号发生器产生峰峰值电压幅度为 10 V 的正弦波,该 3D 打印传感元件放置在距离环形器约 100 m 的位置。

3 基于 Φ -OTDR 分布式传感增敏的高频探测实验结果及分析

分布式光纤传感器是光纤传感器的一种典型应用,它将光纤作为传感元件和信号传输介质。

当光信号在一段长度为 l 的光纤中传播时,光信号对应的相位为:

$$\varphi = \beta \cdot l \quad (1)$$

其中, β 为光波传播常数。当外力作用于光纤上,将导致光纤长度和折射率的改变,相位改变量正比于:

$$\Delta\varphi \propto \beta \cdot \Delta l + \Delta\beta \cdot l \quad (2)$$

其中, Δl 为光纤变形后的相对长度变化; $\Delta\beta$ 为传播常数的变化,其来源包括光弹效应和纵向应变引起的光纤直径的变化。在 Φ -OTDR 探测系统中,背向瑞利散射光信号与本地信号相干,经过平衡探测处理,输出信号 P_{BPD} 可表示为:

$$P_{BPD} \propto 2E_R E_{LO} \sin(2\pi\Delta f t + \varphi(t) + \varphi_1 - \varphi_2) \quad (3)$$

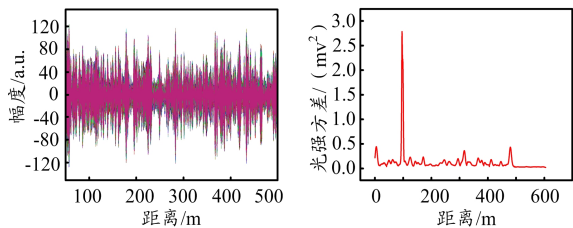
其中, E_R 和 E_{LO} 分别为背向散射信号和本地光幅度; Δf 为信号光频偏; $\varphi(t)$ 为外界振动引起的相位随时间 t 的变化, φ_1 和 φ_2 分别为信号光和本地光的初始相位。通过 I/Q 解调和相位解卷绕方法,可得:

$$\begin{cases} I = \langle P_{BPD} \cos(2\pi\Delta f t) \rangle \propto E_R E_{LO} \sin(\varphi(t)) \\ Q = \langle P_{BPD} \sin(2\pi\Delta f t) \rangle \propto E_R E_{LO} \cos(\varphi(t)) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} E_R \propto \sqrt{I^2 + Q^2} \\ \varphi(t) = \tan^{-1}(I/Q) + 2k\pi \end{cases} \quad (5)$$

其中, I, Q 分别为正交解调的同相分量和正交分量; k 为整数。通过式(5)可获得外界振动信号的幅度和相位随时间的变化。

强度解调定位振动事件如图 3 所示。图 3(a)为由



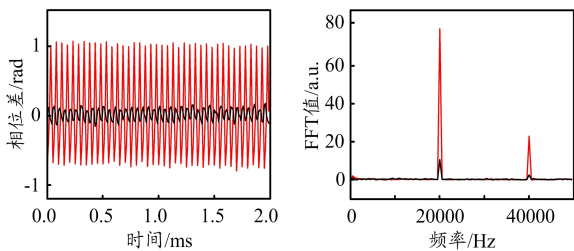
(a) 由 DAQ 采集的原始叠加信号 (b) 幅度定位

图 3 强度解调定位振动事件

DAQ 采集的 200 条信号轨迹;图 3(b)为通过 I/Q 解调^[7]获得光强方差计算以解调振动事件的位置,可以看到在约 100 m 处有一个明显的定位峰,与施加振动的位置一致。图 3 说明了采用 Φ -OTDR 技术的传感器具有振动信号定位功能。

本文在 20 kHz 频率下模拟机械振动,通过 Φ -OTDR 探测到的信号以及相应的快速傅里叶变换 (FFT) 谱如图 4 所示。其中,黑色曲线为无集成弹性体的光纤环,红色曲线为集成弹性体的 3D 打印光纤传感器。可以看出,集成弹性体的 3D 打印光纤传感器解调出的信号比无集成弹性体的光纤传感器调出的信号的幅度更大。然后,再通过 FFT 计算获得频率信息,集成弹性体的 3D 打印光纤传感器所检测信号的相位变化频率高达 20 kHz,与施加振动的频率一致,这表明了所采取的 Φ -OTDR 技术具有高频提取功能。

当一定长度的光纤缠绕在增敏的弹性体上,由于



(a) 20 kHz 频率下检测到的振动信号对比 (b) 20 kHz 频率下的相应 FFT 频谱

图 4 Φ -OTDR 探测到的信号以及相应的 FFT 谱

弹性体具有较大的泊松比,可加剧缠绕在上面的光纤环的相对长度和传播常数变化。此外,根据式(2)可知,当光信号在缠绕在弹性体的光纤中传播时,相位变化量变强。因此,这种传感器可实现增敏效果。

4 结束语

本文设计了基于 Φ -OTDR 的 3D 打印元件传感器的系统,用于解调高频振动事件,并进行了实验验证。该 3D 打印光纤传感元件由缠绕有弯曲不敏感光纤的圆柱形弹性体组成,其弹性体用于增强检测外部振动引起的应变光效应的灵敏度。实验结果表明:相较于无增敏的光纤传感器,集成弹性体的 3D 打印传感器可实现增敏效果,所检测信号的相位变化在 20 kHz 时有近 8 倍的提高。实验结果表明:基于增敏 Φ -OTDR 在土木工程结构的结构破坏监测方面具有巨大潜力。

参考文献:

- [1] HEALEY P. Instrumentation principles for optical time domain reflectometry[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1986, 19(5): 334-341.
- [2] WILD G, HINCKLEY S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(7): 1184-1193.
- [3] JUAREZ J C, MAIER E W, CHOI K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system [J]. Lightwave Technol., 2005, 23(6): 2081-2087.
- [4] HARTOG A. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [5] LU P, MIHAILOV S, COULAS D, et al. Random fiber gratings fabricated using Fs-IR laser for distributed temperature sensor application [C]//Optical Fiber Sensors, Sep. 24 -28, 2018, Lausanne, Switzerland, Lausanne: Optical Society of America, DOI: 10.1364/OFS.2018.FA2.
- [6] WANG C, SHANG Y, LIU X, et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings [J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [7] LIU H, PANG F, LV L, et al. True phase measurement of distributed vibration sensors based on heterodyne Φ -OTDR[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 1-9.