

分布式光纤振动传感技术及发展动态

朱 燕,代志勇,张晓霞,刘宏明,黄春阳
(电子科技大学光电信息学院,四川 成都 610054)

摘要:从工程结构安全监测到输油管线的维护以及地震监测,振动传感器发挥着重要作用,可以实现以往需要大量人力物力和时间的监测。而分布式光纤振动传感器具有许多优于传统振动传感器的地方,应用前景广阔,近年来成为光纤传感领域的研究热点。本文主要介绍了分布式光纤振动传感器的实现方法与相关技术,并展望了分布式振动传感技术未来的发展方向和应用领域。

关键词:光纤光学;分布式光纤振动传感;干涉;光时域反射

中图分类号:TP212.4⁺⁴ **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.003

Developments of distributed optical fiber vibration sensor

ZHU Yan, DAI Zhi-yong, ZHANG Xiao-xia, LIU Hong-ming, HUANG Chun-yang

(School of Optoelectronic Information, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Vibration sensors play an important role in many fields, such as engineering structural safety monitoring, pipeline maintenance and earthquake monitoring. It always spends many human and material resources as well as much time. The distributed optical fiber vibration sensor is superior to the traditional vibration sensor in many aspects. In recent years, it becomes a research hotspot in the field of fiber optical sensors. The distributed optical fiber vibration sensor has a good prospect. This paper introduces some related technologies of the distributed optical fiber vibration sensors. Development tendency and application fields are also predicted.

Key words: fiber optics; distributed optical fiber vibration sensor; interference; optical time domain reflectometry

1 引言

光纤传感技术^[1-3]以其无可比拟的优点在20世纪70年代迅速崛起,经过几十年的研究和发展已经广泛用于多个领域。因其耐腐蚀,抗电磁干扰等优点与传统的机电传感系统相比,更适于恶劣环境中检测信息。而分布式光纤传感技术使得沿布设路径上的光纤可全部成为敏感元件,具有实时获取整个传感区域内被测量的分布信息。将传输和传感合二为一,减少了布设敏感元件的成本。它可以精确测量沿光纤上任一点的温度^[4]、振动等信息,实现对故障点或扰动点的定位。

分布式光纤振动传感器^[5]是分布式光纤传感的一个重要分支,利用光波在光纤中传输时相位、偏振等对振动敏感的特性,连续实时地监测光纤附近的振

动,具有很好的应用前景。根据传感原理,分布式光纤振动传感技术主要可分为基于干涉原理和基于后向散射探测技术两类。本文主要从以上两个方面综述分布式振动传感器的主要实现技术和发展动态。

2 分布式干涉型传感技术

分布式干涉型光纤振动传感器是分布式振动传感器的重要解决方案,其优点是灵敏度高,响应速度快,检测和解调过程相对简单。分布式干涉型振动传感器主要有M-Z型和Sagnac型。

2.1 M-Z型干涉仪光纤振动传感器

基于Mach-Zehnder干涉仪^[6]的振动传感器的

作者简介:朱 燕(1986-),女,硕士,主要从事光纤传感和集成光电子器件方面的研究。E-mail:zhuyan86@yahoo.cn

收稿日期:2011-04-25;修订日期:2011-05-05

光路如图 1 所示,由光源,光纤,耦合器 G, H, F , 探测器 PD1 和 PD2 组成。LD 发出的光经过 3dB 耦合器后分成两束,其中一束由左向右通过 M-Z 干涉仪到达 PD2,而另一束光从右至左到达 PD1,光路设计要求在无振动信号时两束光的光程相等。

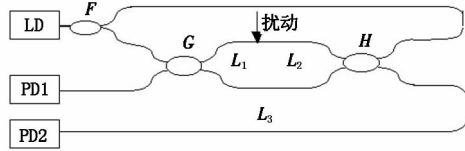


图 1 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的振动传感器的光路结构图

当外界振动信号作用于传感臂时,两臂之间产生了相位差,PD1 与 PD2 探测到的信号之间存在的时间延迟时为 τ ,假设光纤的折射率为 n ,则振动的位置:

$$L_1 = \frac{(L_1 + L_2 + L_3) - \tau \cdot c/n}{2} \quad (1)$$

从而实现了振动点的定位。

M-Z 型光纤振动传感器的优点在于灵敏度高,缺点是结构中需要一个参考光纤,环境对其影响较大,导致测量的不稳定,限制了这种传感器的应用。

2.2 Sagnac 型干涉仪光纤振动传感器

分布式 Sagnac 干涉型^[7]光纤振动传感器是光束经过耦合器形成两路相向传输的光波,经过完全相同的光路,在探测器发生干涉。在温度或振动等外界因素作用下是的两束光产生一定的相位差。假设在 P 处存在振动信号, P 到光纤环的几何中心点 O 的距离为 d ,两路光波在探测器处发生干涉时的相位差的 Taylor 展开为:

$$\Delta\varphi = \varphi(t + \Delta t) - \varphi(t) = \frac{2dn}{c} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,相位调制信号同时决定于振动位置 d 和振动信号随时间变化的乘积,所以在单 Sagnac 干涉仪中,时域解调不能得到 d 的值,为了解决这个问题,人们提出了很多技术方案,包括对解调方法的改进和光路设计方面的改进。

其中的双 Sagnac 系统^[8]能够有效地解决振动定位问题。其光路结构如图 2 所示,使用了两个 Sagnac 干涉环,扰动对应于两个环的不同位置,通过求解相应的解调信号,并对比幅度就可以解出距离信息。

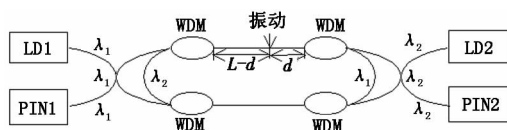


图 2 双 Sagnac 干涉环的振动传感系统光路结构图

此系统采用波分复用 WDM 来构成双 Sagnac 结构。光源 LD1 和探测器 PIN1 构成一个中心波长为 λ_1 的 Sagnac 环,而光源 LD2 和探测器 PIN2 构成一个中心波长为 λ_2 的 Sagnac 环。当振动发生时,两个环路中的相位差之比:

$$\frac{\Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_2} = \frac{d}{L-d} \Rightarrow d = L \left(1 + \frac{\Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_2} \right) \quad (3)$$

式中, L 代表传感光纤的长度,由式(3)可以提取出具体的距离信息。

采用 Sagnac 结构的光纤振动传感器与 M-Z 结构相比较最大的优点在于 Sagnac 结构中项干涉的两路信号在同一个环路中传输,避免了环境的影响。

3 基于 OTDR 的分布式传感技术

由于光纤纤芯的折射率起伏,光在其中传输时会发生瑞利散射。一旦外界有振动信号作用于光纤,将会导致振动点处的光纤折射率发生变化,那么探测到的瑞利散射光的特性(光强、偏振态、频率、相位等)也会随之变化,据此确定振动的大小,根据回波时间确定振动位置,空间分辨率由脉冲宽度决定。这就是 OTDR 技术^[9]测量振动的基本原理。

3.1 偏振光时域反射型(POTDR)振动传感器

POTDR 技术^[10]是在 OTDR 基础上发展起来的,是通过测量光纤中的后向瑞利散射来测定偏振态演化的一种技术。由于光纤中光波的偏振态对外界比较敏感,因此可以利用光偏振态来测量振动。POTDR 系统的光路结构如图 3 所示,当脉冲光入射进光纤,经起偏器起偏为偏振光,经耦合器进入待测光纤,后向瑞利散射由环形器进入偏振分束器,分成偏振态正交的两路偏振光,通过两个光电探测器检测这两路偏振态的光强变化定位振动点。

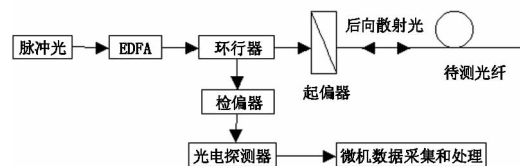


图 3 POTDR 结构示意图

当光纤振动时,光纤中特定方向的折射率会发生变化,产生感生双折射效应,从而使得入射到振动光纤中的光的偏振态发生改变,而后向瑞利散射光会保持散射点的偏振态不变,这样通过对比振动前与振动后的两偏振态的光强变化,就能分析出第一个扰动点的位置,实现分布式振动传感。但对于有多个振动点,可能会淹没在首个振动点后的偏振态

抖动中,如果要实现多点定位,POTDR 还有许多问题需要研究。光的偏振特性易受各种随机因素的影响,所以 POTDR 还需要解决的一个关键问题就是如何保持偏振态的稳定性。

3.2 布里渊光时域反射型(BOTDR)振动传感器

基于布里渊散射效应的光纤振动传感器^[11]是根据光纤应变引起的布里渊散射的斯托克斯光的频移量发生变化来实现振动测量的。光纤中的布里渊散射相对于泵浦光有一个频移量,通常称为布里渊频移,其大小由下式给出:

$$f_B = 2n\nu_a/\lambda \quad (4)$$

式中, f_B 为布里渊频移; λ 为泵浦光的波长,当 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时其典型值为 11 GHz ; n 为光纤纤芯折射率; ν_a 为声速。 n 和 ν_a 的两个因子都受温度和振动的影响,如果能够控制温度恒定不变,或者能够得知温度变化的影响,即可作为振动传感器。

在自发布里渊散射时,除了布里渊信号的频移,散射光功率也与光纤所处的环境温度和所承受的应变在一定条件下呈线性变化的关系,所以只要检测布里渊散射光的频移和布里渊散射功率,就可以实现布里渊信号的频移和散射光功率两个参量的同时测量。

BOTDR 双参量测量系统的结构如图 4 所示。

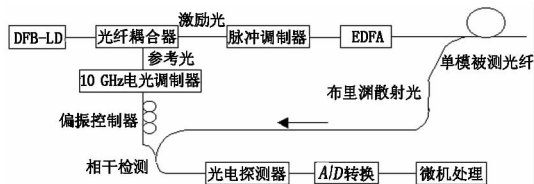


图 4 BOTDR 双参量测量系统的结构图

由于 BOTDR 接收的是自发布里渊散射光,光功率较弱,和瑞利散射光的频谱间隔只有 11 GHz 左右,所以系统采用光相干检测技术^[12],可以同时完成放大信号和提取布里渊散射光信号从而实现对振动的测量。该技术的主要难度在于 BOTDR 中微弱的布里渊散射光的检测,并且布里渊频移很小,测量频移的难度比较大。为了获得较好的信噪比,可以考虑利用受激布里渊散射来进行分布式测量。

这种技术的优点在于:光学相干检测和电外差都可以很容易实现;测量分辨率高;技术的使用性强。目前,国外已有利用 BOTDR 技术测量振动的产品出售,一般能够达到 10 m 的空间分辨率,但在我国对这一技术的研究还非常欠缺,在理论、实验以及系统性能改进等方面还有大量的工作要做。

3.3 相位敏感的光时域反射型(φ -OTDR)振动传感器

在 φ -OTDR 系统中,如果光源的线宽足够窄,相干度很高,那么从光纤的不同部分返回的散射光会发生干涉。 φ -OTDR 能够探测出传统 OTDR 系统无法察觉到的微弱信号。其系统结构如图 5 所示,窄线宽光脉冲经过耦合器进入光纤,其后向瑞利散射光由探测器检测,经采集后送入信号处理设备。

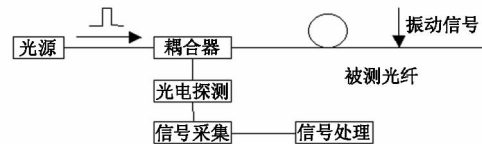


图 5 φ -OTDR 系统结构图

探测器接收到的曲线是时间-光强图。当某一时刻有振动干扰时所探测到相应位置的光强信息将与前一时刻无扰动时探测到的光强不同,而其他位置探测到的光强相同,没有产生变化,所以可以通过将当前中 φ -OTDR 后向瑞利散射信号与其前一刻的后向瑞利散射信号相减来检测由于光纤振动产生的光强差异,由时间定位振动位置。

φ -OTDR 不仅对外界微弱信号有敏锐的感知,在原理上来讲还可以实现多点定位。此系统中需要窄线宽的激光器,这是系统能够响应光相位变化的基本条件,为了尽量避免 φ -OTDR 后向散射曲线发生抖动,要求激光器具有极小的频率漂移。

4 分布式光纤振动传感器的发展方向及应用

目前的分布式振动传感器基本上是探测光纤轴向信息的一维传感器,随着探测范围和信息量的增大,二维的分布式光纤传感网络是光纤传感器发展的一个重要方向。尽管各种分布式光纤振动传感器的机理都相对成熟,但其面向实际应用还存在很多问题,包括传感器系统的成本和可靠性。

分布式光纤振动传感器可以主要用于桥梁、隧道等大型设施的安全监测,能够实时地得到断裂或破损导致的振动信号,从而判断结构损坏的情况,同时有效地给出发生损害的位置。其应用领域还包括军队、银行等的安防警戒系统,输油、气管道的自然形变或人为挖掘等破坏情况的监控,地震灾害的预警等。由于分布式光纤振动传感器是无源驱动,更适用于需要安全保密性强的领域,尤其是长距离实时测量是无论在军用还是民用领域都具有广泛的应用前景。

5 结束语

分布式光纤振动传感由于其独有的优点,有着巨大的应用价值。但是在进入市场之前还存在许多技术没有很好地解决,或者说离技术产品化还有一定的距离。比如检测信号一般比较微弱,如何处理这样的微弱信号,如何保证在各种复杂环境下保持系统的可靠性等一系列问题。如果将这些技术问题有效地解决了,此项技术必将会在实际应用中发挥巨大的作用。

参考文献:

- [1] Zhao Jianghai, Luo Minzhou, Shi Yikai, et al. Measuring technology and mechatronics automation(ICMTMA) [C]. International Conference, 2010.
- [2] Zhou Xiaojun, Gong Junjie, Liu Yongzhi, et al. Analysis of white-light interference distributed optic fiber sensor by polarized modes coupling[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5):605-608. (in Chinese)
周晓军, 龚俊杰, 刘永智, 等. 白光干涉偏振模耦合分布式光纤传感器分析[J]. 光学学报, 2004, 24(5):605-608.
- [3] Liao Yanbiao. Optic-fiber sensing technology for smart materials and structures [J]. Laser & Infrared, 1999, 29(1):14-16. (in Chinese)
廖延彪. 用于智能材料和结构的光纤传感技术[J]. 激光与红外, 1999, 29(1):14-16.
- [4] Jiang Desheng, Gao Xueqing. The method of FBG sensing for a sort of dense distributed measurment [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(10):960-962. (in Chinese)
姜德生, 高雪清. 一类密集型分布式 FBG 传感方法 [J]. 激光与红外, 2006, 36(10):960-962.
- [5] Kyoo Nam Choi, Henry F Taylor. Spectrally stable Er-fiber laser for application in phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(3):386-388.
- [6] Zhou Yan, Jin Shijiu, Zhang Yunchao, et al. Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage detection [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(8):935-938. (in Chinese)
周琰, 靳世久, 张昀超, 等. 管道泄漏检测分布式光纤传感技术研究 [J]. 光电子 · 激光, 2005, 16(8):935-938.
- [7] Liang Yijun, Liu Zhihai, Yang Jun, et al. Optical fiber Sagnac interferometric sensor for measurement of feeble vibration [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(1):118-122. (in Chinese)
梁艺军, 刘志海, 杨军, 等. 测量微振动的光纤 Sagnac 干涉传感器 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(1):118-122.
- [8] Liu Rongyuan, Wang Gang, Wang Chunlan, et al. Location algorithm of distributed fiber optic sensor based on Sagnac [J]. Optical Communication Technology, 2008, 12:51-53. (in Chinese)
柳荣远, 王刚, 王春兰, 等. 双 Sagnac 分布式光纤传感系统的定位算法研究 [J]. 光通信技术, 2008, 12:51-53.
- [9] Alberto Rossaro, Marco Schiano, et al. Spatially resolved chromatic dispersion measurement by a bidirectional OTDR technique [J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(3):475-483.
- [10] A J Rogers. P-OTDR: a technique for the measurement of field distributions [J]. Applied Optics, 1981, 20:1060-1074.
- [11] Liao Yi, Zhou Huijuan. Progresses and prospects of distributed optical fiber sensing based on Brillouin scattering [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(6):809-814. (in Chinese)
廖毅, 周会娟. 布里渊分布式光纤传感技术进展及展望 [J]. 半导体光电, 2008, 29(6):809-814.
- [12] Song Muping. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8):1110-1114. (in Chinese)
宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术 [J]. 光学学报, 2004, 24(8):1110-1114.