

基于 φ -OTDR 的分布式光纤传感技术的现状与发展

袁晓月, 谭中伟

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要:为使业内科研人员结合目前分布式光纤传感技术的现状, 进一步提高分布式光纤传感器的传感距离、空间分辨率和灵敏度, 文中对基于相位敏感光时域反射(φ -OTDR)的分布式光纤传感技术的发展和研究现状进行了梳理分析和总结, 介绍了目前光纤网络部署的光纤传感和光纤监测技术, 重点对基于 φ -OTDR 的分布式光纤传感技术前景进行探讨和展望。

关键词:分布式; 光纤传感系统; 相位敏感光时域反射; 瑞利散射

中图分类号: TN915.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)02-0023-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.02.007

Status and development of distributed optical fiber sensing technology based on φ -OTDR

YUAN Xiaoyue, TAN Zhongwei

(School of Electronic and Information Engineering,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to enable the researchers in the industry to combine the current status of distributed optical fiber sensing technology and further improve the sensing distance, spatial resolution and sensitivity of the distributed optical fiber sensor, this paper analyzed and summarized the development and research status of a distributed optical fiber sensing technology based on the phase-sensitive optical time domain reflectometry (φ -OTDR). And introduced the optical fiber sensing and optical fiber monitoring technologies deployed in optical fiber networks. It emphatically discussed the prospect of φ -OTDR distributed optical fiber sensing technology.

Key words: distributed; optical fiber sensing system; φ -OTDR; rayleigh scattering

0 引言

近年来,随着互联网技术的快速发展,基于互联网的云计算、虚拟现实、无人驾驶以及物联网等技术有着巨大的发展潜力,同时也给通信网络提出了更高的要求。光通信凭借其网络高带宽、低损耗和抗电磁干扰的优势,成为了构建高速网络的最重要的基础,目前在骨干网和城域网中已经普遍使用光纤作为传输介质。20世纪80年代,日本开始在潜艇和主干系统部署光纤网络满足宽带通信的需求。2001年光纤到

户(FTH)服务首次被提出,随着用户数量的不断增加,安装光缆数量与日俱增。为了有效保证光纤网络的维护和运行,光纤链路的检测成为业内关注的重点。

通信系统中光纤监控的基本功能旨在对光纤线路故障进行检查,并在适当的分辨率下将故障定位后进行维护。在光通信系统中,光时域反射(OTDR)技术是一项有前景的光纤监测技术,操作员可以在中心站(或通过网络远程)进行测试,而无需在客户的家中安装任何设备。本文重点介绍近年来OTDR技术的最新进展情况、OTDR技术的原理和 φ -OTDR的应用与优势。

收稿日期:2017-10-24。

基金项目:国家自然科学基金(61177012)资助。

作者简介:袁晓月(1990-),女,硕士研究生,主要研究方向为光通信与光电子器件方面。

1 分布式光纤传感技术在光网络中的应用

在本节中, 我们重点介绍 OTDR 技术在当前光接入网、骨干网和海底光缆中的应用。

1.1 OTDR 技术在光接入网的应用

现已部署的光纤线路测试系统能够支持光接入网中大量光纤线路的铺设、重新配置和维护功能^[1,2]。在光接入网的光纤监测系统中, 维护中心的运营商通过数据网络向光测试模块 (OTM) 发送命令, 告知其进行各种测试。安装在光分配框架中的 OTM 包含多种类型的光纤测量设备, 如 OTDR 单元、光纤识别光源和功率计。光纤选择器的光开关用来选择目标光纤, 光耦合器将测试光引入到目标光纤中, 在施工过程中进行 OTDR 测试, 以测量接合点的损耗和反射率, 其典型分辨率约为 20m。当故障或警报发生时, 该系统可以区分传输设备和光纤线路之间的故障, 并识别故障位置。

1.2 OTDR 技术在光骨干网的应用

光骨干网是中心站之间的重要通信线路, 典型的通信长度可达 80km。光骨干网的基本结构如图 1 所示, 与光接入网不同, 光骨干网光缆中的光纤数量较少, 仅使用一对光纤作为上/下行的传输线路。相对于光接入网而言, 光骨干网拥有相对较低的损耗和更长的通信距离。OTDR 用于铺设、发现故障和定期测试时的监测, 分辨率为几百米。当光骨干线的链路损耗超过 OTDR 的动态范围时, 需要从光骨干线的两端进行双向测量。由于光骨干线中密波分复用 (DWDM) 和疏波分复用 (CWDM) 可以传输很高的光功率, 所以需要

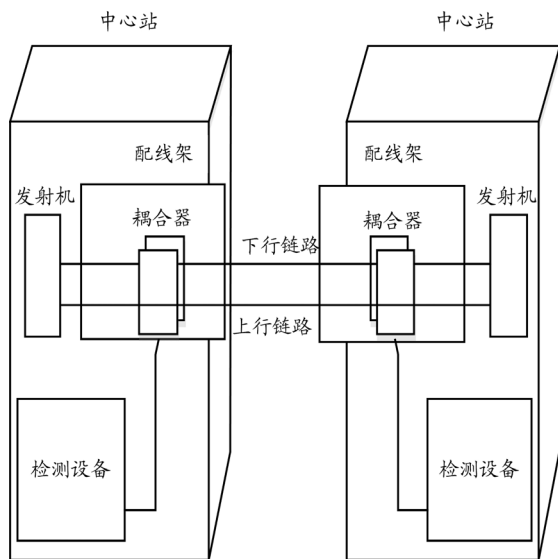


图1 光骨干网监测系统的基本结构

考虑非线性效应的影响, 例如自发喇曼散射的测量^[3]。根据传输设备的要求, 当传输系统搭建时, 也需要考虑光纤光谱衰减和色散特性, 如色散和偏振模色散 (PMD)。

1.3 OTDR 技术在海底光缆中的应用

海底光缆系统分为两类: 一类包括用于长途应用的中继系统, 其通过使用掺铒光纤放大器 (EDFA) 和馈电技术经海底光缆将信号传输数千千米; 另一类包括用于几百千米的短距离应用的无中继系统。为了监测长距离的海底光缆, 采用相干光时域反射 (C-OTDR), 通过外差检测提高接收机的灵敏度来达到量子极限, 其分辨率往往超过一千米。大致来说, 无中继系统的监控与有中继光网络基本相同。在中继系统中, EDFA 包含光隔离器和自动电平控制 (ALC) 电路, 以稳定通过放大器的通信信号的增益特性。图 2 为有中继海底光缆的基本监测结构^[4]。光隔离器可以隔离任何反向散射光, 一个耦合比 1:10 的光耦合器连接下游线路和上游线路。下游线路的第二窗口和后续窗口中产生的后向散射光会沿着上游线路传播回来, 然后在 C-OTDR 中进行监测, 监测参数包括放大器增益、光纤损耗和光纤故障定位。

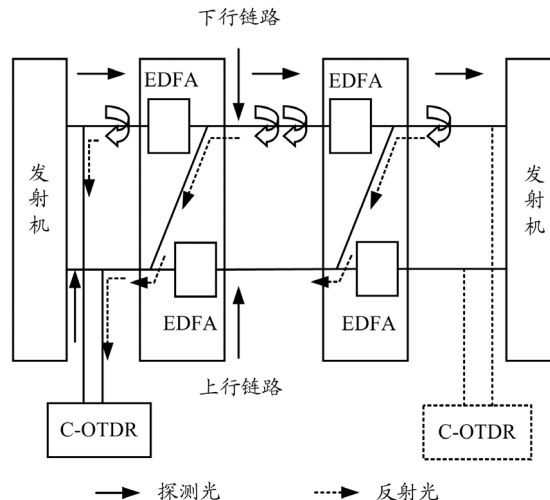


图2 海底光缆监测系统的基本结构

2 基于 φ -OTDR 的分布式光纤传感技术

φ -OTDR 是一种新型的分布式光纤传感技术^[5]。与传统的 OTDR 一样, 光脉冲从传感器光纤的一端注入, 然后由检测器接收到瑞利散射光通过信号解调获得必要的信息。不同的是, φ -OTDR 使用脉冲光强相干的窄线宽激光器, 因此该系统输出的就是脉冲宽度范围内不同散射点产生的后向散射瑞利光相互干涉的

结果, 再通过测量输入脉冲光与接收到瑞利散射信号之间的时间延迟来判断振动点的位置^[6]。当感应光纤受到外部振动的影响时, 光纤在相应位置的折射率将发生变化, 这将导致相应位置光学相位的变化。光相位的变化将最终反映在瑞利散射干涉信号的幅度信息上。因此, 最终的干扰结果将直接反映干扰点的位置, 从而可以确定外部干扰的具体位置, 其基本结构如图 3 所示。

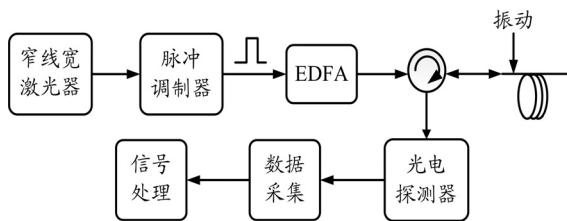


图 3 φ -OTDR 基本结构图

目前, 基于 φ -OTDR 的分布式光纤传感技术的方案很多。1993 年, 美国 TAMU 的科研人员首次提出 φ -OTDR 技术^[7], 他们发现在光纤中注入超窄线宽激光脉冲之后, 利用外界振动对后向瑞利散射光相位的调制特性可以进行振动测量。经过 20 多年的发展, φ -OTDR 技术从系统结构、数据处理和应用范围都已经取得了很大的进步。

2012 年, 中科院上海光机所梁可桢等人^[8]提出了一种基于数字相干检测和微纳滤波技术的 φ -OTDR, 通过数字相干检测技术, 解调出了瑞利信号的振幅和相位, 实现了对加载在 3.5km 传感光纤上一个位于 640~645m 处、振动频率为 200Hz 的正弦振动信号位置和频率的探测, 系统的空间分辨率为 5m。

2013 年, Hugo F. Martins 等人^[9]第一次提出了用于超声波振动测量高精度基于 φ -OTDR 的光线传感器。该传感器能够在高达 1.25km 的范围内测量高达 39.5kHz 的振动, 分辨率为 5m, 其结构如图 4 所示。

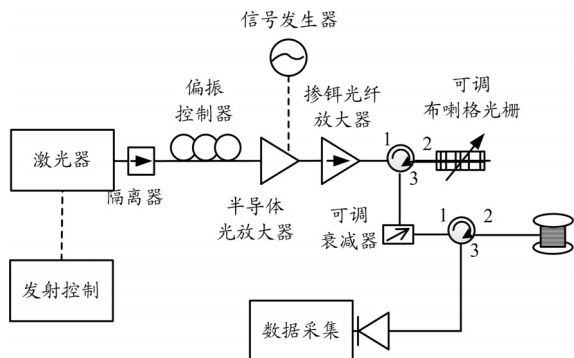


图 4 φ -OTDR 分布式超声波振动传感系统

电子科技大学的饶云江教授等人^[10]一直研究基于双向喇曼放大的超远距离的 φ -OTDR 系统, 通过喇曼放大补偿后向瑞利散射的光功率, 完成了对超长距离光纤的振动监测, 到 2014 年, 其最大传感距离已经达到 128km, 空间分辨率为 15m, 结构如图 5 所示。同年, Hugo F. Martins 等人^[11]利用一阶喇曼放大提升 φ -OTDR 性能, 实现了在振动频率达到 250Hz 和 300Hz 时, 最大传感距离分别达到 125km 和 110km, 空间分辨率为 10m。

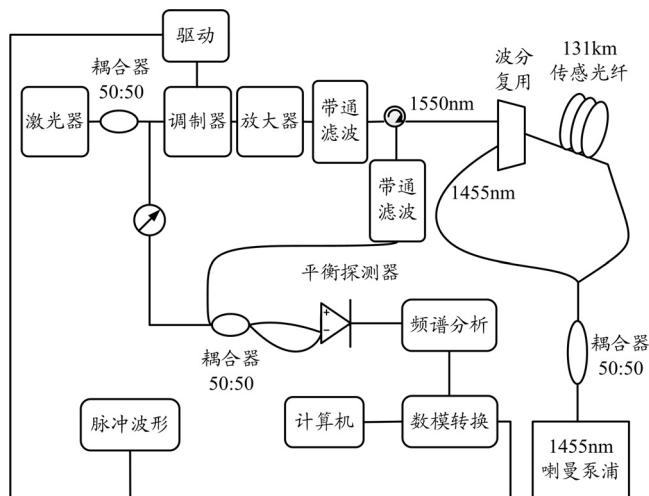


图 5 基于一阶双向喇曼放大和外差检测的 φ -OTDR

可以看出, 基于一阶双向喇曼放大和外差检测的组合, 实现了具有传感距离 ($>100\text{km}$) 和空间分辨率 ($<10\text{m}$) 的高灵敏度 φ -OTDR 系统。在传感距离、空间分辨率和灵敏度三方面实现了总体提升。

2017 年, 安徽大学俞本立教授等人^[12]通过在 φ -OTDR 系统中采用统计计算方法进行误差抑制, 他们根据时差分析提出振动分离方法, 将影响光纤的两个振动源成功分离, 目前实验成功分离的概率达到 70%。采用误差抑制的 φ -OTDR 分布式传感系统结构如图 6 所示。

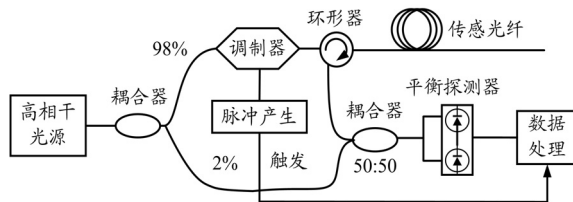
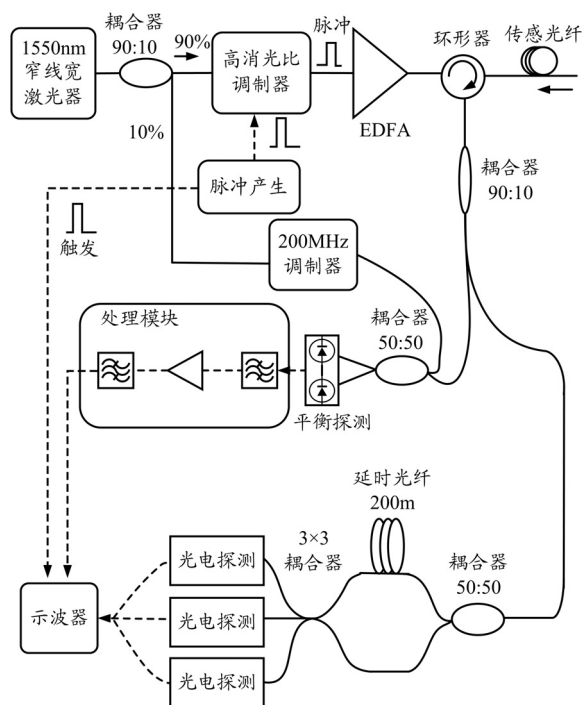


图 6 采用误差抑制的 φ -OTDR 分布式传感系统

最近, 南京大学张旭萃等人^[13]提出一种如图 7 所示的新型 φ -OTDR 系统, 该系统通过非平衡 3×3 耦合器结构, 将来自两个相邻 UWFBG 的反射光混合, 然后分为三部分进行相位解调。张旭萃等人还介绍了一种

图7 非平衡3×3解调 φ -OTDR 分布式传感系统

新型的表格查询方案来精确地解调动态应变的频率、振幅和相位。该系统能够以 $R_2=0.9986$ 的线性强度响应和 $117\text{pm}/(\text{Hz})^{1/2}$ 的光纤长度变化灵敏度重建振动。同时，在高于 56dB 的高信噪比下实现了从 50~2075Hz 的宽频率频带响应。该系统为动态应变测量提供了一个多功能的新选择，扩展了分布式光纤传感技术的潜在应用领域。

3 结束语

基于 φ -OTDR 的分布式光纤传感技术已经取得了巨大的进步，由于在长距离传感方面的优势，在周界安防等大型工程的安全监测方面起到了举足轻重的作用。 φ -OTDR 技术和其它技术相结合的方法日趋成熟，与原有的 φ -OTDR 技术相比，在灵敏度和空间分辨率方面具有很明显的优势。但是，基于 φ -OTDR 的分布式光纤传感技术对高频振动的检测仍然受到限制，在达到现存灵敏度和空间分辨率的同时，如何

提高检测振动频率范围、降低系统成本以及简化系统结构，使 φ -OTDR 技术更加稳定地投入到实际应用中，还需要进一步优化和改进。

参考文献：

- [1] ARII M, AZUMA Y, ENOMOTO Y, et al. Optical fiber network operation technologies for expanding optical access network services [J]. NTT Technical Review, 2007, 5(2): 32-38.
- [2] ENOMOTO Y, IZUMITA H, MINE K, et al. Design and performance of novel optical fiber distribution and management system with testing functions in central office [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(12): 1818-1834.
- [3] REICHMANN K C, FRIGO N J, ZHOU X. In-service OTDR limitations in CWDM systems caused by spontaneous Stokes and anti-Stokes Raman scattering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(7): 1787-1789.
- [4] FURUKAWA S, TANAKA K, KOYAMADA Y, et al. Enhanced coherent OTDR for long span optical transmission lines containing optical fiber amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(5): 540-542.
- [5] 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.
- [6] 张博. 基于 φ -OTDR 的高灵敏光纤振动传感器的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [7] TAYLOR H F, LEE C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US, 5194847[P]. 1993-03-16.
- [8] 梁可桢, 潘政清, 周俊, 等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 119-123.
- [9] HUGO F MARTINS, SONIA MARTIN-IOPEZ, PEDRO CORREDEIRA, et al. High visibility phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed sensing of ultrasonic waves [J]. Proc. SPIE, 2013, (8794): 87943F-1-87943F-4.
- [10] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 139-157.
- [11] MARTINS H F, MARTÍN LÓPEZ S, CORREDEIRA P, et al. Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer Assisted by First-order Raman Amplification for Distributed Vibration Sensing Over >100km[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8): 1510-1518.
- [12] TU G, YU B, ZHEN S, et al. Enhancement of Signal Identification and Extraction in a φ -OTDR Vibration Sensor [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 1-10.
- [13] ZHANG X, SUN Z, SHAN Y, et al. A High Performance Distributed Optical Fiber Sensor Based on φ -OTDR for Dynamic Strain Measurement [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-12.

敬告作者

为广泛构架起作者和读者之间的桥梁，本刊加入了 CNKI 中国期刊全文数据库等数据期刊网，即每期刊物出版后，我们将把同样的数据送至上述数据库或网站，使信息能以最快的速度国际化、网络化。其中稿费已包含于本刊一次性所付作者的稿费中。

为尊重作者的著作权，如果有作者不同意将出版后的文章进入上述数据库或网站，来稿时敬请注明，否则将视为同意，谢谢合作。

《光通信技术》编辑部