

文章编号: 1005-5630(2015)02-0184-05

基于瑞利散射的分布式光纤传感器的研究现状

张 昕, 申雅峰, 薛景峰

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 主要介绍了几种分布式光纤传感技术中的基于瑞利散射的光时域反射(OTDR)技术、相干光时域反射(COTDR)技术和相敏光时域反射(ϕ -OTDR)技术的基本工作原理, 并分别介绍了这三种技术的发展现状及优缺点, 提出了今后的发展方向和展望。

关键词: 分布式光纤传感器; 瑞利散射; 光时域反射技术

中图分类号: TP 212 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.02.019

Current status of distributed optical fiber sensor based on Rayleigh scattering

ZHANG Xin, SHEN Yafeng, XUE Jingfeng

(AVIC Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The basic principle of optical time domain reflectometry (OTDR) technique, coherent optical time domain reflectometry (COTDR) technique and phase sensitive optical time domain reflection (ϕ -OTDR) technology based on Rayleigh scattering are introduced. This paper respectively introduces the development status of the three technologies, summarizes their advantages and disadvantages, and puts forward the developing direction and prospect of future work.

Keywords: distributed optic fiber sensing; Rayleigh scattering; optical time domain reflectometry

引 言

分布式光纤传感技术是目前国内外研究热点, 它因具有全尺度连续性、网络智能化、长距离、大容量、低成本等特性而广泛受到关注。分布式光纤传感技术按照光纤内部信号性质不同可分为基于瑞利散射的分布式光纤传感、基于拉曼散射的分布式光纤传感和基于布里渊散射的分布式光纤传感。瑞利散射属于弹性散射, 相对于拉曼和布里渊散射有着更高的能量, 因此更容易被检测到, 目前有很多基于瑞利散射的分布式光纤传感技术方面的研究。利用瑞利散射信号的分布式光纤传感多用于通信线路的故障定位、大型结构的裂缝健康监测和重要建筑物的入侵监测等。

1 光时域反射技术

1.1 光时域反射技术基本原理

光时域反射(OTDR)技术是1976年由Barnoski博士提出, 是最早的分布式光纤传感技术^[1], 其原理

收稿日期: 2014-08-18

作者简介: 张 昕(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: zhang_2624@126.com

图如图 1 所示,光源发出的连续光经过调制器调制成窄带脉冲光,脉冲光通过环形器进入光纤,光在光纤里传播的过程中发生瑞利散射,并经环形器耦合进入探测器。由于从脉冲光发射到接收其在光纤中某一位置的瑞利散射的时间相当于光波从发射端到该位置往返传播了一次,因此可以通过测量传播时间计算该位置到发射端的距离以及该位置的峰值功率。得到的光纤沿线的瑞利散射曲线为一条指数衰减的曲线,该曲线表示出了光纤沿线的损耗分布,可用来检测光纤的断裂、弯曲等。

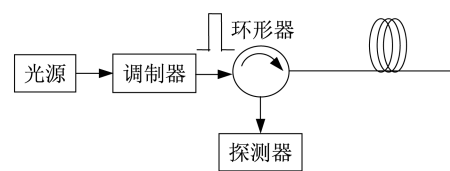


图 1 光时域反射技术原理图

Fig. 1 The principle diagram of the optical time domain reflection technology

1.2 光时域反射技术国内外发展现状

由于 OTDR 技术装置简单、测试时间短、精度高等特点,受到国外学者广泛关注^[2-4]。1980 年 Healey 等提出基于光子计数器的光时域反射仪,将光时域反射计的范围由 25 dB 提高到 40 dB,数字方法使其相关电子产品得到简化,并应用于光纤故障定位系统^[5]。2005 年由美国 Luna 公司将 SWI (swept wavelength interferometry) 技术应用到基于瑞利后向散射的温度测量系统并在上百米的光纤中获得 0.1 °C 的温度分辨率^[6]。2006 年 Luna 公司提出基于瑞利散射的超高空间分辨率的温度传感技术,用于现场测量高功率放大器模块^[7]。2007 年该公司提出了市面上的分布式光纤波长干涉法使 1 m 光纤段上的测量温度范围达到 850 °C,该技术采用单模、黄金涂层光纤^[8]。2008 年该公司提出扫描波长的分布式光纤温度测量的测长法,该方法应用于核反应器^[9]。Palmieri 等提出了一种新的分布式光纤传感器用于静态磁场矢量的测量。该传感器是基于法拉第旋转和瑞利后向散射场的极化状态的分析,该传感器测量的是磁场矢量在纤维方向上的投影,测量范围是 1.5 T,其相对精度可达 7%,空间分辨率达 3 cm^[10]。

朱涛等^[11]提出通过使用二维边缘检测方法提高信噪比和空间分辨率的相位敏感 OTDR 系统。李志金等基于 OTDR 技术建立了拉曼散射分布式光纤多点测温系统,提出循环解调方法,该系统能够抑制温漂噪声积累,其空间分辨率小于 3 m,温度分辨率约为 3 °C,时间分辨力不大于 3 min^[12]。

OTDR 技术能够连续显示整个光纤线路的损耗相对距离的变化,适用于非破坏性测量,多用于电力系统检测^[13-16]和混凝土裂缝监测^[17-19],但由于始终存在测量盲区^[20],从光纤两端测出衰减值有差别,国内该技术成熟的产品不多。

2 相干光时域反射技术

2.1 相干光时域反射技术基本原理

虽然 OTDR 技术在一定程度上能够实现对通信线路的实时检测,但是其测量范围较小,测量的光纤长度通常在 100 km 以内。为使通信线路延伸,通常使用光纤放大器如掺铒光纤放大器(EDFA)来补偿信号光的传输损耗。EDFA 对信号光进行光功率补偿的同时也会产生自发辐射放大(ASE)噪声,使背向瑞利散射信号功率无法被辨别,系统测量的信噪比大大降低。在这种情况下相干光时域反射(COTDR)技术显现出其优势。通过相干检测可以将微弱的瑞利散射信号从较强的噪声中提取出来,使传感距离大大延长,而且通过对系统结构进行设计,还使得 COTDR 可以应用于多跨超长距离的光缆线路测量。COTDR 技术原理图如图 2 所示,在 OTDR 基础上,采用高频率稳定的分布反馈激光器作为探测光源,通过调节驱动单边带调制器的微波频率综合器的频率,实现对激光频率的控制。由驱动单边带调制器输出的连续光经耦合器分成两路,一路作为本振光,另一路经电光调制器调制成脉冲光,经放大器传入光纤。

2.2 相干光时域反射技术国内外发展现状

Kurashima 等将布里渊散射光时域反射计法(BOTDR)与 COTDR 结合,用于测量光纤的应变和光损耗,在 10 km 单模光纤上,BOTDR 模式可得到 1 m 的空间分辨率,COTDR 模式可得到 0.1 dB 的低衰减

噪声^[21]。Koyamada 等利用 COTDR 技术实现了在 8 km 光纤获得 0.01 °C 的温度分辨率和 1 m 的空间分辨率^[22]。

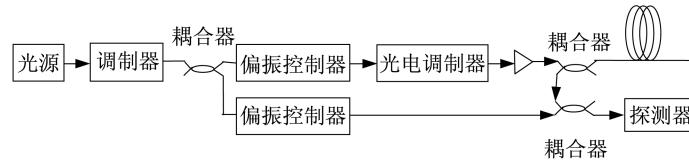


图 2 相干光时域反射技术原理图

Fig. 2 The principle diagram of the coherent optical time domain reflection technology

2010 年 Li 等研究了一个典型的相干光时域反射计系统，其中单模光纤的瑞利散射是由相干光时域反射仪采用精确的频率控制光源测量。该系统在每千米测试光纤上获得 0.01 °C 温度精度和 1 m 空间分辨率^[23]。Yang 等^[24]对基于 COTDR 的分布式温度和应变传感进行研究，对传感原理进行了分析和讨论。通过频率可精确控制的光源，对后向瑞利散射的测量值进行计算分析，可以获得由温度和应力导致的峰值变化信息。2012 年 Pan 等^[25]提出基于差分相干光时域反射计的差分检测的分布式光纤振动传感系统。张晓磊等^[26]分析了消光比、传感距离和传感光纤前后端反射等几个关键因素对相干后向瑞利散射波形的影响。2013 年任梅珍等推导了光纤中瑞利散射光的功率分布和相位分布，指出瑞利散射光功率的概率密度函数符合修正的莱斯分布，而瑞利散射光的相位分布近似为高斯分布，同时发现了不同长度光纤的瑞利散射光功率的最大值随平均值线性增加^[27]。

COTDR 与 OTDR 相比，能够在较低的探测光功率下获得更高的动态范围，并且能够避免在线检测环境通信信道的干扰，适合长距离监测，主要应用于海底光缆的监测^[28]。

3 相敏光时域反射技术

3.1 相敏光时域反射技术基本原理

相敏光时域反射技术是在光时域反射技术的基础上发展起来的，与光时域反射技术一样，光脉冲从光纤的一段注入，用探测器探测后向瑞利散射光。不同的是注入光纤中的光是强相干的，因此该传感系统的输出就是脉冲宽度区域内反射回来的瑞利散射光相干干涉的结果。相敏光时域反射技术通常用于检测入侵，如图 3 所示，当光纤沿线上有入侵事件发生，相应位置的光纤的折射率会发生改变并引起该位置光相位的变化，干涉结果也会发生改变，并且与入侵的位置相对应。

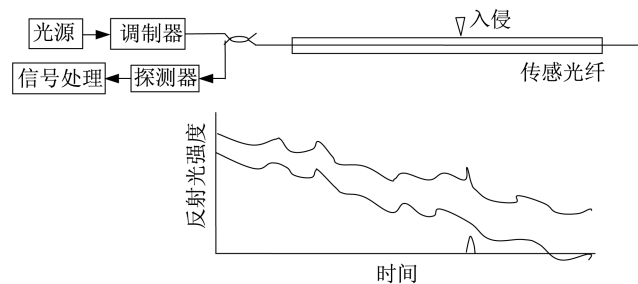


图 3 基于相敏光时域反射技术的入侵监测系统图

Fig. 3 The principle diagram of the intrusion detection system based on phase sensitive optical time domain reflection technology

3.2 相敏光时域反射技术国内外发展现状

相敏光时域反射技术由 Taylor 于 1993 年提出，该技术大大提高了分布式光纤传感的灵敏度，获得

3.3 dB 信噪比,空间分辨率为 400 m。1998 年 Shatalin 等^[29]使用半导体脉冲激光器作为光源,利用 ϕ -OTDR 监测光线中由温度变化引起的光相位变化,在 21 m 长的单模光纤上实现 0.7 m 的分辨率。2003 年,Choi 等使用全光型掺铒放大器,结合法布里-珀罗干涉形成了激光脉冲,经电光脉冲调制后用于相位敏感光时域反射计中,减少了频率漂移,使其线宽小于 3 kHz^[30],研制出一个定位精度为 1 km、定位范围为 12 km、信噪比约为 5.6 dB^[31]的防入侵监测试验系统。

谢孔利等^[32]提出基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的相敏光时域反射(ϕ -OTDR)分布式光纤传感系统,激光器的输出功率为 50 mW,线宽不大于 3 kHz,该系统只使用一级放大,降低了自发辐射噪声,有效提高信噪比至 12 dB,系统具有较高的探测灵敏度,系统定位范围为 14 km,定位精度为 50 m。

ϕ -OTDR 因其优良的综合性能成为目前最主要的入侵和振动分布式传感监测方法之一^[33-34],但其需要激光器具有极窄的线宽和较小的频率漂移,增加其成本,为满足更高的监测需求, ϕ -OTDR 今后的发展趋势应该着重于提高系统的空间分辨率,扩大监测范围,即是对激光器和数据处理方法有更高要求,

4 结 论

基于瑞利散射的 OTDR 技术由于其可连续测量且精度高等特点,受到国内外学者的广泛关注和研究,国内许多高校和研究所也对其进行研究拓展,在许多领域如电网、管道、混凝土大坝和军事防御等得到应用,尽管其发展仍不成熟,但随着激光器发展以及数据处理方法的改进,未来可能实现产品化。

参考文献:

- [1] 张旭莘. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [2] HARTOG A H. A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fiber[J]. Journal of Light-wave Technology, 1983, 1(3):498-509.
- [3] BOIARSKI A A, PILATE G, FINK T, et al. Temperature measurements in power plant equipment using distributed fiber optic sensing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(4):1771-1778.
- [4] DUBANIEWICZ T H, CHILTON J E, DOBROSKI H. Fiber optics for atmospheric mine monitoring[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(4):749-754.
- [5] HEALEY P, HENSEL P. Optical time domain reflectometry by photon counting[J]. Electronics Letters, 1980, 16(16):631-633.
- [6] GIFFORD D K, SOLLER B J, WOLFE M S, et al. Distributed fiber-optic temperature sensing using Rayleigh backscatter[C]//ECOC 2005. 31st European Conference on Optical Communication. [s. l.]: IET, 2005:511-512.
- [7] SOLLER B J, GIFFORD D K, WOLFE M S, et al. Measurement of localized heating in fiber optic component with millimeter spatial resolution[C]//Optical Fiber Communication Conference. Anaheim, CA: IEEE, 2006.
- [8] SANG A K, FROGGATT M E, GIFFORD D K, et al. One centimeter spatial resolution temperature measurements from 25 to 850 °C using Rayleigh scatter in gold coated fiber[C]//Quantum Electronics and Laser Science Conference. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2007:1-2.
- [9] SANG A K, FROGGATT M E, GIFFORD D K, et al. One centimeter spatial resolution temperature measurements in a nuclear reactor using Rayleigh scatter in optical fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(7):1375-1380.
- [10] PALMIERI L, GALTAROSSA A. Reflectometric fiber optic sensor for distributed measurement of intense magneto-static fields[C]//2011 IEEE Sensors. Limerick: IEEE, 2011:117-120.
- [11] ZHU T, XIAO X H, HE Q, et al. Enhancement of SNR and spatial resolution in ϕ -OTDR system by using Two-Dimensional edge detection method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17):2851-2856.
- [12] 李志金, 白志华, 王会波, 等. 分布式光纤传感器多点温度测量的研究[J]. 光学仪器, 2007, 29(6):8-11.
- [13] 陈芳兰. 高压电力电缆温度的数据采集和信号处理系统[D]. 西安:西安工业大学, 2010.
- [14] 毕卫红, 张燕君, 苑宝义. 基于光散射的分布式光纤温度传感器网络及其在智能电网中的应用[J]. 燕山大学学报, 2010, 34(5):377-382.
- [15] 臧革伟, 陈孝莲, 周琦. 光时域反射技术的发展现状及其在电力领域中的应用[J]. 现代科学仪器, 2013(2):20-23.
- [16] 董向阳, 王艳芹. 光纤分布式温度传感技术及其在电力关键点检测中的应用研究[J]. 华北电力技术, 2014(1):54-46.

- [17] 陈建春. 光纤传感技术在冷勒水电站大坝变形监测中的应用[J]. 水力发电, 2004, 30(11): 30-41.
- [18] 吴永红, 徐洪钟, 高培伟, 等. 混凝土高拱坝裂缝光纤监测网络构型的优化[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(6): 37-39.
- [19] 陈洁, 包腾飞. 混凝土拱坝裂缝光纤监测网络的优化[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 102-105.
- [20] 田国栋. 基于 OTDR 技术的光纤测试方法探讨[J]. 现代电子技术, 2009(19): 99-101.
- [21] KURASHIMA T, TATEDA M, HORIGUCHI T, et al. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(3): 360-362.
- [22] KOYAMADA Y, IMAHAMA M, KUBOTA K, et al. Fiber optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(9): 1142-1146.
- [23] LI Y Q, LI R W, YANG Z. Coherent OTDR for measuring distributed temperature and strain with high resolution in km-long fiber [C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China IEEE, 2010: 962-965.
- [24] YANG Z, SHI P X, LI Y Q. Research on COTDR for measuring distributed temperature and strain[C]//2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering(MACE). Hohhot: IEEE, 2011: 590-593.
- [25] PAN C, ZHU H, YU B, et al. Distributed optical fiber vibration sensing system based on differential detection of differential Coherent-OTDR[C]//Sensors. Taipei, IEEE, 2012: 1-3.
- [26] 张晓磊, 陈学义, 严冰, 等. 影响分布式光纤传感器后向瑞利散射波形的管家年因素研究[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 80-85.
- [27] 任梅珍, 徐团伟, 张发祥, 等. 单模光纤中高相干光源的瑞利散射光的统计特性[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 1-5.
- [28] 任秀云, 田兆硕, 杨敏, 等. 相干瑞利散射海水水下温度测量技术的理论研究[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 083302-1-083302-5.
- [29] SHATALIN S V, TRESCHIKOV V N, ROGERS A J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical fiber sensing[C]//Proc. SPIE, 3479, Laser Interferometry IX: Applications. San Diego, CA: SPIE, 1998: 181-191.
- [30] CHOI K N, TAYLOR H F. Spectrally stable Er-fiber laser for application in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(3): 386-389.
- [31] JUAREZ J C, MAIER E W, CHOINAM K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [32] 谢孔利, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 φ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 569-572.
- [33] 刘建霞. ϕ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080021.
- [34] 严冰, 董凤忠, 张晓磊, 等. 基于后向相干瑞利散射的分布式光纤传感在管道安实时监测中的应用研究[J]. 量子电子学报, 2013, 30(3): 341-347.

(编辑: 张 磊)