

基于偏振光时域反射技术的分布式光纤传感器

钱 铄,代志勇,张晓霞,熊 煜,崔德勇
(电子科技大学光电信息学院,四川 成都 610054)

摘要:首先介绍了偏振光时域反射技术(POTDR)的基本原理及发展现状,并重点介绍了几种典型调制效应(电光效应、Faraday效应以及弹光效应)的基本原理及其在POTDR分布式光纤传感器中的主要应用模式,以及POTDR分布式光纤传感器对现代监测系统的意义。最后,提出POTDR光纤传感器在实际应用中存在的问题与不足,并对其应用前景和发展方向进行了展望。

关键词:偏振光时域反射技术(POTDR);光纤传感器;电光效应;Faraday效应;弹光效应

中图分类号:TP212.4⁺4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.001

Distributed optic fiber sensors based on polarization-optical time domain reflectometry

QIAN Shuo, DAI Zhi-yong, ZHANG Xiao-xia, XIONG Yu, CUI De-yong

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

Abstract: The principle and advantage of polarization-optical time domain reflectometry (POTDR) are illustrated. Some typical modulation effects related to POTDR distributed optic fiber sensors are introduced, which include electro-optical effect, Faraday effect and elasto-optical effect, etc. Distributed optic fiber sensors based on POTDR plays an important role in state-of-the-art monitoring system. On the other hand, its further development faces challenges due to some technical problems. The possible future directions for the development of POTDR distributed optic fiber sensors are also analyzed.

Key words: polarization-optical time domain reflectometry (POTDR); optic fiber sensors; electro-optical effect; Faraday effect; elasto-optical effect

1 引言

入射光与介质中的微观粒子发生弹性碰撞时将引起瑞利散射,且其散射光具有频率以及在散射点的偏振方向均与入射光相同的特点,因此散射光包含了光纤散射点的偏振信息。基于这个物理规律,1980年,Rogers提出了偏振光时域反射技术(POTDR)^[1]的思想,该技术是在光时域反射计(OTDR)和偏振态调制型光纤传感器的基础上发展起来的一项新技术,其基本原理如图1所示。由激光器发出的脉冲光经过偏振器变成一束线偏振光,再把线偏振光耦合进光纤;当外界环境改变时,光纤中光的偏振态将发生变化。同时,由于光脉冲在光纤中传输时发生瑞利后向散射,因此通过探测器探测后向散

射光偏振态的变化,便可以得到光纤中偏振态变化的时间和空间分布。其中偏振器放在A,B的位置均可,若放在A处,则探测器直接检测光偏振态变化的信息;若放在B处,则探测器接收由偏振态引起的光强变化的信息。

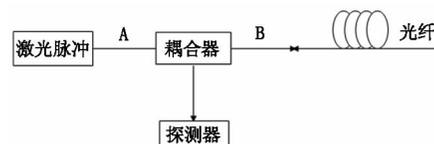


图1 POTDR基本原理

作者简介:钱 铄(1986-),女,硕士研究生,从事光纤传感器方面的研究工作,目前的研究工作主要集中在基于偏振时域反射技术的光纤振动传感器的研制。E-mail:305581469@qq.com

收稿日期:2012-04-18

同 OTDR 相比, POTDR 要求激光脉冲的相干性很强, 而且偏振态调制光纤传感器要求有较高灵敏度的检测装置。自 POTDR 技术提出后的 30 年以来, 许多研究人员根据研究的需要提出了各种 POTDR 的测量方案, 例如 Ellison 等人 1998 年提出的采用旋转波片和起偏器的偏振敏感的光时域反射技术^[2], Marc WuliPart 等人 2001 年提出的采用旋转起偏器的偏振敏感的光时域反射技术^[3], Sjatalin 和 Rogers 提出采用计算机的偏振敏感的光时域反射技术^[4]。尽管所提出的这些结构不同, 但其基本原理都是基于偏振态的光纤时域反射技术。

目前, 国内电子科技大学^[5]、北京交通大学^[6]等高校对 POTDR 的机理、信号处理方法与采集、测试准确度等方面做了一定的研究, 也取得了一定的成果。利用 POTDR 技术成功分析了光纤中双折射^[7]、拍长^[8]、偏振相关损耗^[9]后, 国外对 POTDR 的研究目前主要集中在机理和偏振模色散等领域, 并利用 POTDR 对光线的偏振模的研究变得越来越多, 也取得了一定的研究成果^[10-11], 但很少有探测方面的实际系统及具体分析报道。

2 不同调制原理的 POTDR 光纤传感器

磁场、电场、压力、振动、加速度和温度等物理量都能对在光纤中传播的光的偏振态进行调制^[12-14]。最为典型的偏振态调制效应有电光效应、Faraday 效应以及弹光效应。Rogers 最早指出了 POTDR 方法在磁场(通过 Faraday 效应)、电场(通过 Kerr 效应)、外部压力(通过弹光效应)和温度(通过弹光效应)等物理量的分布测试中的潜在应用价值^[15]。

2.1 电流传感器

在电力系统中, 由于计量和继电保护的需要, 对高压输电线路中的电流进行实时监测是必须的。与普通电流传感器相比, 光纤电流传感器的绝缘性能好, 体积小, 成本低, 并且频带宽, 响应时间短, 可同时用于测量直流、交流及脉冲大电流, 因此有望成为在高压情况下测量大电流的理想传感器。基于 POTDR 的光纤电流传感器是利用磁光材料的 Faraday 效应。在光学各向同性的透明介质中, 外加磁场可以在介质中沿磁场方向传播的线偏振光的偏振面发生旋转。

根据 Faraday 效应, 将单模光纤以半径 R 绕在高压载流线圈上, 由电流 i 所形成的频率为 w 的磁场 $H = i/(2\pi R)$, 会引起在其中的长度为 L 的光纤中线偏振光的偏振面发生偏转。通过检测偏转角度 θ 的大小, 就可得到相应的磁场值, 从而测量出产生

该磁场的电流值。在基于 Faraday 旋光效应调制的 POTDR 光纤电流传感器中, 瑞利后向散射产生的线偏振光偏振面的偏转角度 θ 可由式(1)确定:

$$\theta = 2V \int_0^L H \cdot dl \quad (1)$$

其中, V 为费尔德常数。

基于 POTDR 的光纤电流传感器的测量原理如图 2 所示^[16], 由激光器发出的光脉冲经显微物镜 1 耦合到偏振片, 变成线偏振光, 再经显微物镜 2 耦合进入单模被测光纤。单模光纤受外界磁场影响, 光纤中线偏振光的偏振态将发生改变, 同时散射光具有散射点的偏振信息。通过模消除器, 分离出后向散射光, 由聚焦物镜耦合到探测器, 再经信号处理后输出光强为:

$$I = I_0 \sin^2 \theta = I_0 \sin^2 (2VLH_0 \sin wt) \quad (2)$$

其中, I_0 是一个常数; H_0 为磁场的振幅。

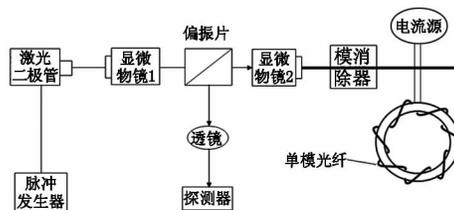


图2 POTDR 光纤电流传感器原理

基于 Faraday 效应工作的光纤电流测量系统具有结构简单、测量范围大、灵敏度高、与高压线不接触、可以实现无中断检测、输入输出间绝缘等诸多优点, 是现代电流测量研究的热点之一, 具有广泛的发展前景。现对于该类型传感器的主要问题是如何消除线形双折射、振动、环境温度等的影响, 由于这些问题的复杂性, 实用化商品仍很少见。

2.2 电压传感器

光纤电压传感器主要用于电力系统供电网电压检测, 用具有 Pockels 效应的晶体做成传感头, 利用光纤完成信号的传输并形成系统。由于光纤自身的优点, 光纤电压传感器越来越受到人们的关注。外加电场的作用引起材料折射率变化的效应, 称为电光效应, 它包括 Pockels 效应和 Kerr 效应两种。折射率变化与外加电场强度的一次方成正比时称为 Pockels 效应或线性电光效应; 折射率变化与外加电场强度的二次方成正比时称为 Kerr 效应或二次电光效应。基于 POTDR 的光纤电压传感器的基本原理是利用晶体的电光效应, 当线偏振光通过外加电场作用的电光晶体时会发生双折射, 而且双折射的两光波之间的相位差随外加电压而变化, 这样就可以通过检测相位差得出被测电场相关的信息, 从而

得到被测电压值 $U = Ed$ 。

采用电光材料作为传感器探头的 POTDR 光纤电压传感器的基本测量原理如图 3 所示。作为传感器探头的晶体具有 Pockels 效应。由激光器发出的光经偏振器变为线偏振光,然后经光纤传送到 1/4 波片,变成圆偏振光进入晶体;晶体探头由于电场的作用,其双折射特性将发生变化,使得晶体内的光束受到调制,晶体长度为 l 在外加电场方向的厚度为 d ;后向散射光经过检偏器后转换为输出光强的变化量,由光接收系统检测出被测电场的信息,从而得出电压的值。光纤 dl 段受到外界电场 $E(l)$ 作用时, dl 内两偏振模的相位差 $d\varphi = |\Delta n|dl$ 发生改变,则有:

$$E(l) - E(0) = \frac{1}{2\pi n_o^3 \gamma_c \nu_g} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (3)$$

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_c \int_0^l E(l) dl \quad (4)$$

式中, γ_c 是电光系数; λ 是光波长; n_o 是寻常光的折射率; ν_g 是光纤中的光速。

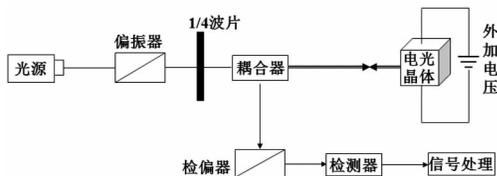


图3 POTDR 光纤电压传感器原理

与 Pockels 效应不同的是, Kerr 效应不仅可以存在于某些晶体中,还可以存在于某些液体中,因而可用于液体电场的传感,但 Kerr 效应很弱,而且外加电场与 Δn 之间不是线性关系。对于光纤电压传感器我国早些年就做了大量的研究,现在主要工作还在于信号处理、温度补偿、自然双折射补偿^[17-18]等方面。用这种传感器可用于对电力系统中因各种开关操作及事故引起的瞬态电场以及高压试验室内冲击电场的准确记录与测量,架空输电线下的空间电场和高压机器及附属装置电场分布的测量。

2.3 应力传感器

偏振态对外界扰动非常灵敏,可以检测出光纤线路是否受到微扰,所以基于 POTDR 的光纤应力传感器非常适合用于监测和保护国境、军事基地、发电站等重要场所周围的安防监测系统。当光纤线路路上某区域的温度和应变发生变化时,由于弹光效应,该区域光纤的折射率及密度将会发生变化,从而导致该区域瑞利散射光相位的变化。长度为 l 、杨氏模量为 M 的光纤 dl 段受到外界应力 $F(l)$ 作用时, dl 内两偏振模的相位差 $d\varphi = |\Delta n|dl$ 发生改变,则有:

$$F(l) - F(0) = \frac{1}{k_T \nu_g} \frac{d\varphi}{dt} \quad (5)$$

$$k_T = \frac{\pi n^3 (1 + \sigma) (p_{12} - p_{11})}{\lambda M} \quad (6)$$

式中, n 是芯层介质折射率; σ 是泊松比; p_{12} 和 p_{11} 是弹光系数; λ 自由空间波长; ν_g 是光纤中的光速。

外界应力 $F(l)$ 不仅改变光纤中原有的折射率,使两模式间的相位差发生变化,而且会导致两个偏振模式在该位置产生“模耦合”,从而改变两模式间的振幅比。折射率与模耦合共同作用将导致光纤中光束偏振态发生变化,因此偏振态的变化就包含了外界应力 $F(l)$ 的信息,利用 POTDR 求出光纤中偏振态的演化规律的变化就可以实现分布式传感。

如图 4 所示^[19],由激光器输出的光经掺铒光纤放大器(EDFA1)放大后,再经过环形器、偏振控制器和起偏器进入待测光纤。偏振控制器使掺铒光纤放大器(EDFA1)输出的偏振态与起偏器的起偏方向保持一致。光纤中任意点的后向瑞利散射光返回经过起偏器后,将偏振信息转化为光强度的变化。此微弱信号经掺铒光纤放大器(EDFA2)放大后再经耦合器分为两路:一路作为触发信号,另一路作为采集信号。当触发逻辑与设定的触发方式相吻合时,将采集结果缓存到 AD card 中;采集结束后,计算机从上面读取数据。

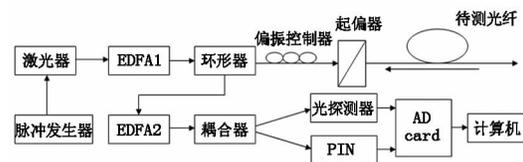


图4 POTDR 光纤应力传感器原理

目前,POTDR 在监测上主要用于测应力,对该技术的研究重点在于系统的设计、提高分辨率、灵敏度等^[20-22]。

2.4 温度传感器

利用 POTDR 是测量温度的一个很方便的方法,它同样是基于材料的弹光效应,不同的是光纤受到的应力源自于外界温度的变化,其测量系统的结构与图 4 所示的结构相同。当光纤长度 l 处的 dl 段受到外界温度 $T(l)$ 作用时, dl 段的相位差 $d\varphi = |\Delta n|dl$,则有:

$$\theta(l) - \theta(0) = \frac{1}{k_T \eta F(l) \nu_g} \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

$$k_T = \frac{\pi n^3 (1 + \sigma) (p_{12} - p_{11})}{\lambda M} \quad (8)$$

式中, n 是芯层介质折射率; σ 是泊松比; p_{12} 和 p_{11} 是

弹光系数; λ 自由空间波长; η 是温度系数; v_g 是光纤中的光速。

光纤瑞利后向散射系数取决于纤芯的材料,在常规实心玻璃光纤中,由于瑞利后向散射系数随温度变化不大,限制了测量的范围,因此该方案在实际应用中还未能得到很好的利用。

3 POTDR 光纤传感器应用现状分析

分析几种不同的调制原理可知测电压、电流的理论相对成熟;应力、振动测量精度高,目前有关的研究也比较热,多用于应变检测、海底光缆防窃听、桥梁、隧道、灾害监测与山体滑坡自然灾害监测方面将具有更广泛的应用前景;利用 POTDR 光纤传感器测量温度,由于受瑞利后向散射系数的限制,对其应用的实施和推广还存在着很多技术难点。

基于 POTDR 的分布式光纤传感技术到目前为止,存在的主要问题:

(1) 很难从测量结果中准确地分离出哪些是温度的影响,哪些是应力的影响。

(2) POTDR 光纤传感器只能探测光纤内第一个外来力施加点,对之后的外来力无法判断。

(3) POTDR 系统的偏振态对外界环境非常敏感,很难保持传输光纤中偏振态稳定性。

(4) POTDR 光纤传感器还存在其他分布式光纤传感中普遍存在的空间分辨率低、信噪比差的问题。

4 展 望

根据一家市场调查分析公司 Business Communications Company 发布的关于光纤传感器市场报告,到 2011 年底,全球光纤传感器(FOS)的产值有望从 2010 年的 2.88 亿美元增长到 3.72 亿美元。2011 年之前,整体市场保持适度增长态势,平均年复合增长率为 4.1%。可以推测,光纤传感系统成本的降低以及测量精度等指标的提高,必将促使基于 POTDR 的分布式光纤传感器的研发更加深入。

(1) POTDR 监测系统与其他的 OTDR 监测系统相结合构造监控系统,实现可同时监测光脉冲的不同物理量的变化信息,将不同信号结合,实现系统故障识别和定位,以提高传感系统对远程定位检测的准确度,从而大幅减小误判率和漏报率。

(2) 随着信号分离与处理技术的不断成熟,基于很多物理量能对 POTDR 的偏振态进行调制,利用 POTDR 来测量外界多个物理量的变化信息也是将来发展的一个方向。

(3) 光纤传感器以其特有的优势,成为目前最

好的地震监测手段。POTDR 光纤传感器又以其对外界环境变化高度敏感而著称,因此必将在以后的地震监测工作中发挥巨大作用。

参考文献:

- [1] Rogers A J. Polarization optical time domain reflectometry [J]. Electronics Letters, 1980, 16(13): 489 - 490.
- [2] Ellison J G, Siddiqui A S. A fully polarimetric optical time-domain reflectometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(2): 246 - 248.
- [3] Wuilpart M. Measurement of the spatial distribution of birefringence in optical fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8): 836 - 838.
- [4] Shatalin S V, Rogers A J. Location of high PMD sections of installed system fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(11): 3875 - 3881.
- [5] Li Jianzhong, Rao Yunjiang. Distributed fiber-optic intrusion sensor system based on POTDR [J]. Acata Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2789 - 2794. (in Chinese)
李建中, 饶云江. POTDR 分布式光纤传感及其在安防监测中的应用 [J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2789 - 2794.
- [6] Yang Shuangshou, Wu Chongqing. Research of polarization optical time domain reflectometry (POTDR) [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
杨双收, 吴重庆. 基于偏振的光时域反射技术 (POTDR) 的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [7] Galtarossa A, Palmieri L. Measurement of birefringence correlation length in long, single-mode fibers [J]. Optics Letters, 2001, 26(13): 962 - 946.
- [8] Corsi F, Galtarossa A, Palmieri L. Beat length characterization based on backscattering analysis in randomly perturbed single-mode fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(7): 1172 - 1178.
- [9] Galtarossa A, Palmieri L. Theoretical analysis of reflectometric measurements in optical fiber links affected by polarization-dependent loss [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1233 - 1241.
- [10] Galtarossa A, Palmieri L. Spatially resolved PMD measurements [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(4): 1103 - 1115.
- [11] Wuilpart M, Crunelle C. High dynamic polarization-OTDR for the PMD mapping in optical fiber links [J]. Optics Communications, 2007, 269(2): 315 - 321.
- [12] Kurosawa K, Shirakawa K, Kikuchi T. Development of optical fiber current sensors and their applications [J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Dalian, China, 2005: 1 - 6.

- [13] Li Zhengyong, Wu Chongqing. Stress distribution and induced birefringence analysis for pressure vector sensing based on single-mode fibers[J]. Optics Express, 2008, 16(6):3955 - 3960.
- [14] Rao Yunjiang, Li Jianzhong. Temperature-affection measurement of Fresnel reflection by polarization optical time domain reflectometry[C]. 19th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2008:77641 - 77641.
- [15] Rogers A J. Polarization-optical time domain reflectometry; a technique for the measurement of field distributions [J]. Applied Optics, 1981, 20(6):1060 - 1074.
- [16] Byoung Y K, Dann P. Use of polarization-optical time domain reflectometry for observation of the Faraday effect in single-mode fibers [J]. IEEE Journal Of Quantum Electronics, 1982, 18(4):455 - 456.
- [17] Li Zhiquan, Wang Zhibin. Study on optical voltage sensor based on polarization modulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(5):492 - 494. (in Chinese)
李志全, 王志斌. 一种基于偏振调制的光纤电压传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(5):492 - 494.
- [18] Wang Zhibin, Li Zhiquan. Study on an optical fiber voltage sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2004, 2:317 - 321. (in Chinese)
王志斌, 李志全. 一种光纤电压传感器的研究[J]. 传感器学报, 2004, 2:317 - 321.
- [19] Dong Xianzi, Wu Chongqing. Study of extracting information from distributed optical fiber sensing system based on P-OTDR [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(6):11 - 12. (in Chinese)
董贤子, 吴重庆. 基于 P - OTDR 分布式光纤传感器中信息提取的研究 [J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(6):11 - 12.
- [20] Dai Zhiyong, Yuan Yong. Research on monitoring system for landslides based on fiber optic strain sensing [J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2004, 2(3):52 - 53. (in Chinese)
代志勇, 袁勇. 基于光纤应力传感器的山体滑坡监测系统研究 [J]. 光学与光电技术, 2004, 2(3):52 - 53.
- [21] Wang Yunjing, Wang Anbo. Grating-assisted polarization optical time-domain reflectometry for distributed fiber-optic sensing [J]. Optics Letters, 2007, 32(4):2028 - 2030.
- [22] Li Jianzhong, Rao Yunjiang, Ran Cengling, et al. A distributed optical fiber perturbation sensor system based on combination of -OTDR and POTDR [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5):1108 - 1113. (in Chinese)
李建中, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于 - OTDR 和 POTDR 结合的分布式光纤微扰传感器 [J]. 光子学报, 2009, 38(5):1108 - 1113.