

基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术

张旭苹 张益昕* 王 峰 吕立冬 王祥传

南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093

摘要 基于瑞利散射效应的相干探测光时域反射技术(COTDR)因具有高动态范围、高灵敏度等特性,而成为超长距离连续分布式传感监测的重要手段。在介绍 COTDR 技术的原理和发展现状基础上,对 COTDR 传感系统的设计及关键技术包括抑制相干衰落噪声、提高传感速度以及多机理融合传感系统等进行了研究,并对 COTDR 在超长通信线缆链路监测、温度和应变传感等方面的应用进行了探讨。

关键词 光纤光学;连续分布式光纤传感;瑞利散射;相干探测;光时域反射计

中图分类号 TN247; TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0700002

Ultra-Long Fully Distributed Optical Fiber Sensor Based on Rayleigh Scattering Effect

Zhang Xuping Zhang Yixin Wang Feng Lü Lidong Wang Xiangchuan

Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093, China

Abstract The coherent optical time domain reflectometry (COTDR) based on Rayleigh scattering is an important technique for the monitoring of ultra-long fiber link, for its high dynamic range and sensitivity. The principle and development of COTDR is introduced. The design method and key techniques such as the coherent fading noise suppression, measurement speed enhancement and multi-functions fusion system structure are discussed. And several important applications of COTDR are given, including ultra-long communication optical fiber link monitoring and distributed temperature/strain sensing.

Key words fiber optics; fully distributed optical fiber sensor; Rayleigh scattering; coherent detection; optical time domain reflectometry

OCIS codes 060.2370; 060.2840; 290.5870

1 引 言

光纤通信凭借其传输容量大、保密性好等诸多优点,已经成为当今最主要的有线通信方式。全球光纤铺设里程已达数十亿千米。中国信息通信研究院日前发布的研究成果显示,中国有望在 2016 年赶超韩国、日本,建成世界领先的光纤主导的宽带网络。此外,为便于调度、控制和监测,输油输气管道、电力传输线路、高铁高速公路等长跨距大型基础设施均沿线铺设专用光纤线路。但由于人为因素、使用环境、光器件性能的衰变以及光缆的自然老化等原因,光缆传输系统出现故障并导致通信中断的现象频发,且故障次数随时间的推移不断增加,使得光缆线路故障率要远远大于设备故障率,超过网络不可运行时间的 90% 以上。我国每年由于光缆线路的中断所造成的直接经济损失达数十亿元,不仅对国民经济造成了巨大的损失,而且严重威胁着我国的国防安全。光纤线路的安全可靠和健康运行已成为网络建设及维护的重要目标。对光纤线路进行在线监测,及时发现和修复故障对降低损失、提高通信的可靠性具有非常重大的意义。

收稿日期: 2016-01-11; **收到修改稿日期:** 2016-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61540017、61405090、61307096、61107074)

作者简介: 张旭苹(1962—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事分布式光纤传感技术及其应用、光电信号探测与处理、光电集成传感等方面的研究。E-mail: xpzhang@nju.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zyixin@nu.edu.cn

光纤通信线路监测传统上主要使用在线光功率监测技术和光时域反射(OTDR)技术^[1]。在线光功率监测直接从光纤通信线路中分出部分光,通过监测信号光功率的变化判断通信线路的状况。该方案虽然简单实用,但它只能感知和反馈线路的运行状况,而不能精确报告线路中的微小故障事件及其对应的位置。OTDR 不仅能及时反映通信线路中的多种事件,而且还能准确判断事件的类型及事件点的位置,因此,OTDR 对光纤通信线路健康监测具有重要的作用。在 OTDR 技术基础上,人们发展了多种可用于通信光缆监测的技术,如布里渊光时域反射技术(BOTDR)^[2]、偏振光时域反射技术(POTDR)^[3]、相位光时域反射技术(Φ -OTDR)^[4-8]、相干光时域反射技术(COTDR)^[9]等。

随着光纤通信技术的进一步发展,无中继通信系统光缆距离和超长距离通信光缆的中继距离不断延长,短则数十至数百公里,长则数千上万公里。近日,加州大学圣地亚哥分校的研究人员克服了克尔效应对光纤通信传输距离的限制^[10],打破了无中继器情况下光信号传播距离的障碍。根据 Photonics 等国外专业网站对该组成果的报道,在仅使用标准放大器的情况下,使得信息在光纤中传输距离突破了 12000 km。因此,光纤通信系统需要具有高动态范围超长距离的监测技术与之相配合,就目前技术而言,只有 COTDR 能够满足上述需求。

扩大传统 COTDR 动态范围主要依靠提高探测光脉冲峰值功率和增加测量次数来实现。但是,探测光脉冲的峰值功率受到受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)、自相位调制(SMP)、四波混频(FWM)等非线性效应的制约,并不能够无限制地提高。而测量次数的增加又必定延长测量时间。另外,由于通信光缆的特殊重要性,未来需要的是实时在线监测,在这种场合下,为了避免对通信信号造成干扰,相干光时域反射仪发出的探测光脉冲峰值功率不能够过高,这必然导致其测量的动态范围受到限制。

本文在阐述 COTDR 原理和发展现状的基础上,对改进 COTDR 传感系统性能的关键技术进行研究,设计可适应超长距离通信线缆性能监测的连续分布式光纤传感系统。

2 相干光时域反射传感技术

2.1 COTDR 基本原理

当光沿光纤传播时,如果遇到不匹配的介质如裂纹、断点、接头、弯曲、端面等将会产生光的反射和散射。反射光与散射光的背向部分将返回光纤入射端,这就是 OTDR 进行传感探测的机理。为获得长探测距离,OTDR 系统通常使用线宽数十纳米的宽带光源,这样既能够获得由不同波长合成的高功率,又可以避免窄线宽高功率激光脉冲引起的非线性效应。

利用 OTDR 能在一定程度上对通信线路进行实时在线监测。但是长距离的通信线路中,通常使用光放大器如掺铒光纤放大器(EDFA)来补偿信号光的传输损耗,从而使通信线路延伸至数千甚至上万公里。当信号光进入 EDFA,它将诱导处于亚稳态的粒子产生受激辐射而跃迁到基态从而使信号光放大。然而 EDFA 对信号光进行功率放大的同时,也会产生强烈的放大自发辐射(ASE)噪声,ASE 噪声的积累会使 OTDR 测量的信噪比急剧恶化,甚至无法进行测量。而由于 OTDR 采用的是直接功率探测方式,通信线路中 EDFA 产生的 ASE 噪声功率与背向瑞利散射信号功率将无法区分,因而系统测量的信噪比会大大降低。即使采用光学滤波器对宽带的 ASE 噪声进行限制,在多个 EDFA 级联的通信线路中,ASE 噪声也会不断聚集而得到加强,从而使 OTDR 无法覆盖整条通信线路。

相比较而言,COTDR 凸显出其巨大的优势。COTDR 利用相干探测的方法把探测到的信号光功率集中到某一特定的中频,通过对该中频信号进行电学的窄带带通滤波,滤除绝大部分的噪声从而使其能监测多中继超长距离光纤通信线路。

与 OTDR 不同的是,COTDR 采用的是具有高相干性的窄线宽光源,并利用参考光对瑞利散射信号进行相干探测接收,以提高对信号的探测能力^[11],其原理如图 1 所示。激光器发出的激光经耦合器(OC₁)分成两路,一路声光调制器(AOM)调制成探测光脉冲并附加数十 MHz 的频移,经过光放大器 EDFA 放大后,再经环形器注入到测试光纤(FUT)。另一束用作参考光用于实现相干探测。扰偏器(PS)扰乱不同时刻脉冲光的偏振态,以降低相干探测时的偏振相关噪声。探测光脉冲在测试光纤中产生的背向瑞利散射信号经环形器进入一个 3 dB 耦合器(OC₂)与参考光混合,二者外差产生中频信号由平衡探测器接收。平衡探测器

对光电转换结果进行跨阻转换、输出中频电压信号,最后经滤波器、低噪声放大器(LNA)和数据采集(DAQ)后,由数字信号处理单元解调出中频信号的功率,从而得到探测曲线。

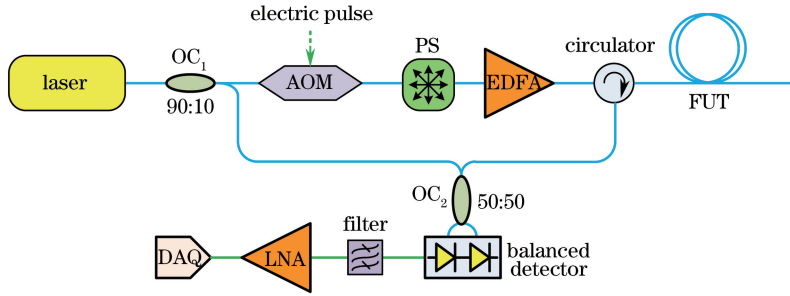


图 1 COTDR 原理图

Fig. 1 The schematic diagram of COTDR

系统测量的信噪比可表示为^[8]

$$\frac{S}{N} = \frac{2P_s P_{LO} \left(\frac{e\eta}{\hbar\omega}\right)^2}{2e i_d B + 2e P_{LO} \frac{e\eta}{\hbar\omega} B + 2e P_N \frac{e\eta}{\hbar\omega} B}, \quad (1)$$

式中 i_d 为探测器暗电流, B 为探测器带宽, P_N 为探测器的其他噪声所具有等效光功率。(1)式右边分母中的各项分别代表暗电流噪声、参考光引起的散粒噪声以及探测器的其他噪声(如热噪声等)所引起的噪声。通常情况下,参考光的功率 P_{LO} 远高于其他成分,故其引起的噪声在系统噪声中占主导,所以信噪比可简化为

$$\frac{S}{N} = \frac{2P_s P_{LO} e\eta}{2e P_{LO} B \hbar\omega} = \frac{\eta P_s}{\hbar\omega B}. \quad (2)$$

从式(2)可以看出,COTDR 信噪比仅与探测器的量子效率成正比,而与探测器中的噪声无关。与 OTDR 相比,具有以下几个优点:

1) 具有卓越的抗 ASE 噪声的性能。当对多中继超长距离光缆进行监测时,光缆中返回的光信号包含带宽数十纳米的强 ASE 噪声。如果使用传统的 OTDR, ASE 噪声必然会使探测的信噪比急剧恶化。COTDR 利用外差方法将探测光信号的功率集中在外差中频上,即使中频信号被淹没在宽频的 ASE 噪声中,只要在中频位置设置一个窄带电学滤波器,就可以滤除绝大部分的噪声。而与中频信号同频段的 ASE 噪声功率远小于总的 ASE 噪声,因此窄带滤波后信号的信噪比会得到极大的提升。

2) 理论上探测的灵敏度可以逼近探测器的量子极限,这使得 COTDR 可以测得更为微弱的瑞利散射信号,从而实现更长距离的探测。

3) OTDR 采用直接探测,其光电流强度与散射光信号的功率成正比。而 COTDR 采用相干检测,其光电流强度与散射光信号功率的平方根呈正比。这样就有效压缩了探测器输出信号的动态范围,降低了对后续信号调理电路与数据采集电路的压力。

4) OTDR 采用宽带光源,宽带光源会占据部分通信信道,因此 OTDR 几乎不能用于光通信线路的在线监测。而 COTDR 探测光采用单频窄线宽激光,仅需要占据光通信线路中某一个预留的波分复用通道,从而可避免在线监测时对通信信道的干扰。

2.2 COTDR 发展历史与现状

1982 年, Healey 等^[12]最先提出将外差(相干)探测方法用于 OTDR 系统,并实验获得了 30 km 的探测距离,这标志着 COTDR 的诞生。接着,对 COTDR 系统中的衰落噪声进行了深入的理论研究^[13-14],理论预测并在实验中观测到了衰落噪声。1984 年,正式提出了 COTDR 这个概念^[14],在实验中测量了衰落噪声引起的探测曲线的波动,并指出利用多次平均的方法可以降低衰落噪声。1987 年, King 等^[11]提出脉冲编码的方法将 COTDR 系统的动态范围提升了 10dB,奠定了 COTDR 系统的技术框架。1989 年, Blank 等^[15]成功证实了高分辨率和长测量距离探测的可行性。1990 年, Koyamada 等^[16]将掺铒光纤放大方法应用于

COTDR 系统中,得到了 33 dB 的测量动态范围,这比相同实验条件下的 OTDR 方案动态范围提升了 13 dB。后来,EDFA 发展成熟,COTDR 普遍采用 EDFA 放大探测光脉冲功率,探测光脉冲功率的提高相应地增强了背向瑞利散射信号的功率,从而大大提升系统的动态范围^[15,17-20]。

COTDR 系统的另一个重要参数是对事件的识别精度。事件识别的精度包括空间分辨率,同时也包括了对事件类型的区分能力。空间分辨率是由探测光脉冲宽度决定的,理想情况下的空间分辨率(SR)与探测光脉冲宽度成正比,即 $R_{SR} = 0.5v_g \cdot \tau_{\text{pulse}}$, v_g 为探测光在光纤中的群速度, τ_{pulse} 为探测光脉冲脉宽。但是,获得理想空间分辨率就需要探测曲线的衰落噪声降到足够低。COTDR 系统使用窄线宽的激光光源,光源的高相干性导致探测光在测试光纤瑞利散射单元里的产生光相干以及相干瑞利噪声,造成光电探测器接收到的光信号功率产生随机波动^[21]。因此,降低相干噪声是 COTDR 系统的重要研究内容。1992 年,Shimizu 等^[21-22]对相干瑞利噪声的特性进行了深入的理论研究,同时对频移平均降噪理论进行了分析。频移平均的主要思想是将不同探测光频率作用下的测量结果进行平均,因此,要求在测量过程中改变探测光的频率。同年,日本 NTT 公司的 Izumita 等^[23]通过在数据测量和平均过程中同时改变激光器输出光的频率以降低相干瑞利噪声。1997 年,又提出了同步光跳频技术,将探测曲线的波动降低到 0.05 dB^[24]。

进一步提升 COTDR 系统性能方法通常包括两个途径:1)提高探测光脉冲的峰值功率;2)增加测量次数^[25]。高功率的探测光脉冲在光纤中的非线性效应,使 COTDR 系统的动态范围很难进一步提升^[26]。因此,人们开始集中研究提升 COTDR 系统的测量效率,即快速地增加系统在单位时间内的测量次数^[27-31]。日本 NTT 公司的 Sumida 在 1995 年提出了对探测光脉冲进行频移键控调制的方法产生频率各异的脉冲序列。这样,多个不同频率的探测光脉冲信号按时序先后在测试光纤中传播,它们的背向散射/反射信号与单频本振光相干产生不同频率的时分复用(TDM)的中频信号。后续的电路同步接收和并行处理多个中频信号,使 COTDR 系统的测量效率成倍增加^[27]。但该方案采用激光器直接控制的方式调制产生频率脉冲,因而各个脉冲的频率很难精确地加以控制,将其后续电路中针对中频信号的滤波器带宽设置为 50 MHz。但是过宽的滤波器带宽又增加了带内噪声总功率,造成系统动态范围的恶化^[25]。另外,频率脉冲在一个固定的周期内按时序存在,必定在探测曲线的前端造成盲区,而且频率脉冲个数越多盲区越大。华为技术有限公司的 Liu 等^[29],根据该方案的思想,提出使用多个并行的声光调制器同时调制产生在时间上重叠的频率脉冲而且其后续电路仍采用并行处理各路中频信号的方法。该方法虽然简单,但是声光调制器组阵列庞大而且价格昂贵,因此实用价值不大。日本 NTT 公司的 Iida 等^[30]在 2010 年提出使用相位调制器来调制激光器的输出频率从而获得频率脉冲,实验中他们获得了 10 个频率脉冲。该方法充分利用了相位调制器的调频特性和声光调制器的移频作用,从而筛选出从相位调制器输出的多频光的-1 阶频率。2011 年,利用相同的方法在实验中成功实现了 40 路频率的复用^[31],但动态范围也仅仅比前者提高了 3 dB。

2007 年,南京大学光通信工程研究中心为华为技术有限公司成功研制出了国内首台相干光时域反射仪^[32],其各类性能指标均已达到国际先进水平。

3 COTDR 传感系统关键技术与系统设计

由于监测对象的复杂性和监测需求的不断提升,COTDR 系统还面临许多关键的技术难点。

3.1 相干衰落噪声的抑制

COTDR 系统中使用的光源为相干长度在几十千米甚至上百千米的高相干光源。由此光源产生的探测脉冲光在光纤中传播时,产生的瑞利散射光具有高度的相干性。由于散射光和探测光相向传播,探测光在其对应的空间分辨率长度光纤上产生的散射信号将会相干叠加在一起。若光纤不受外部扰动,光纤沿线各个瑞利散射点之间的相对位置关系相对固定,但任意两对散射点之间的相对位置关系随机变化,因此代表光纤沿线不同位置的瑞利散射光会呈现出随机的波动起伏。这种由于散射光之间的相干造成的波动被称为相干衰落噪声,它引起的波动起伏为稳定的随机起伏,不能通过简单的多次测量进行累加平均消除。显然这种噪声会极大降低 COTDR 的功率分辨率。为了克服相干衰落噪声的影响,Shimizu 等提出了光源扫描频率平均的方法。其原理是:散射点之间的相对位置关系固定不变,当光波频率改变时,两个散射点之间相对应的相位差会发生变化,因此不同频率探测光得到的探测信号会呈现出不同的随机起伏。当把这些不同频率探

测光下得到的信号进行累加平均时,便可以有效消除相干衰落噪声的影响。

采用主动频率扫描和偏振态扰动的方法进行相干衰落噪声抑制,如图 2 所示。如果不采用任何噪声抑制技术,即使经过 2^{16} 次累加平均,在 100 m 空间分辨率情况下原始散射光功率曲线的波动还达到了 0.7 dB,如图 2(a)所示。在单独使用扫频和扰偏的情况下,可以将功率曲线波动分别降低至 0.19 dB 和 0.28 dB,如图 2(b)和(c)所示。在同时采用扫频和扰偏的情况下,原始散射光功率曲线的波动被抑制到 0.07 dB,如图 2(d)所示。

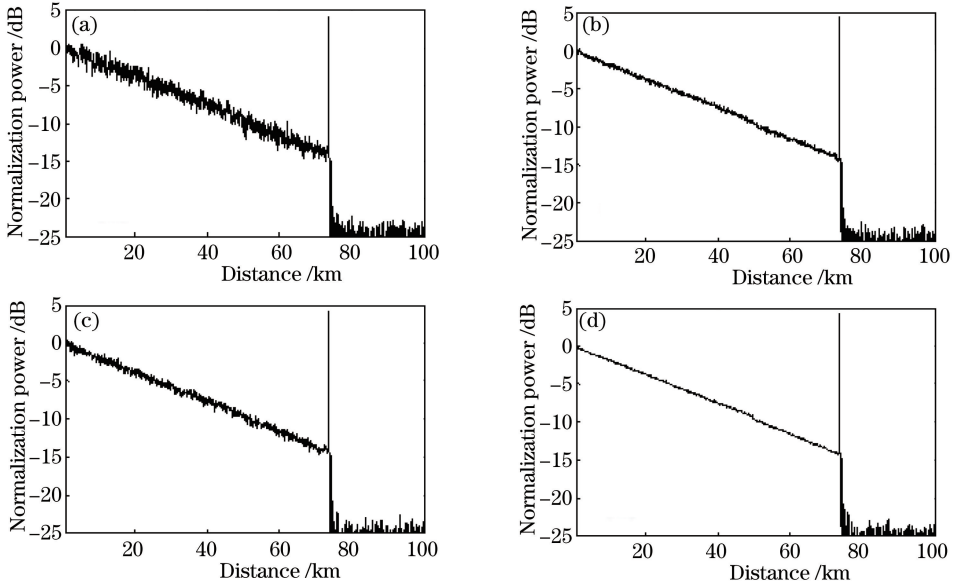


图 2 相干衰落噪声抑制效果。(a) 原始信号(0.7 dB); (b) 采用激光光源主动扫频平均的测量结果(0.19 dB); (c) 采用扰偏器抑制偏振相关噪声的结果(0.28 dB); (d) 同时采用扫频与扰偏的测量结果(0.07 dB)

Fig. 2 Suppression results of coherent fading noise. (a) Original signal (0.7 dB); (b) measurement result of light source active frequency sweep (0.19 dB); (c) polarization-relevance noise suppression result using scrambler (0.28 dB); (d) measurement result of simultaneous frequency sweep and scrambler (0.07 dB)

3.2 测量速度的提升

对于超长距离海底光缆的监测,传统 COTDR 完成一次完整测量的时间非常长。为了提高测量速度,提出了多种不同的方法,取得了较好的结果。

1) 频率脉冲法

频率脉冲法的技术是 Sumida^[27] 提出。该技术中,通过利用 FSK 技术调节激光器,使其在不同时刻输出不同频率持续时间为 τ 的探测光,如图 3 所示。

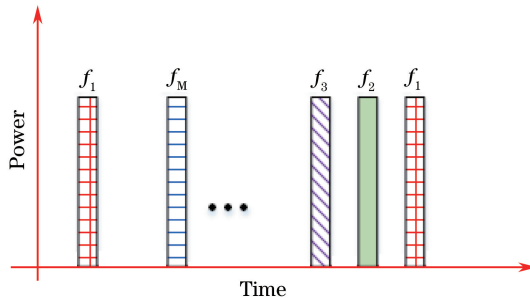


图 3 频率脉冲示意图

Fig. 3 Schematic diagram of frequency pulses

该探测光脉冲序列被注入到测试光纤,它们在测试光纤中的背向瑞利散射信号与单频参考光相干,从而产生时序的外差中频信号。并行处理这些中频信号就可以得到具有时序先后的探测曲线。最后,对这些探测曲线进行时序对齐后叠加再求平均就得到一条更加平滑、信噪比更高的探测曲线。很显然,每一个频率脉

冲对应一条 COTDR 曲线, M 个频率脉冲就相当于有 M 台 COTDR 在同时工作。因此, 该方法跟单频探测光脉冲相比, 在相同的测量时间内其工作效率可以提升近 M 倍, 即对探测曲线做相同的平均次数, 它的测量时间可减少为传统单频探测光脉冲 COTDR 系统的 $1/M$ 。但是该方法也存在光电信号处理电路结构复杂、动态范围相对较低等缺陷。

本文提出了结合时分复用技术的频分复用(FDM)相干光时域反射系统, 如图 4 所示。外腔式半导体激光器(ECLD)发出的单频激光经 90/10 的耦合器分成两束, 高功率的一路经偏振控制后注入相位调制器(PM), 另一路经声光调制器 2 移频后进入 3 dB 耦合器的一端。任意波形发生器(AWG)发出时序的射频电信号控制相位调制器, 使其输出频率随时序变化的多频光。脉冲信号发生器的同步时钟同步控制任意波形发生器和声光调制器(AOM1), 使二者协调产生频率精确编码探测光脉冲序列。探测光脉冲经扰偏器(PS)扰偏后, 通过环形器注入到测试光纤。

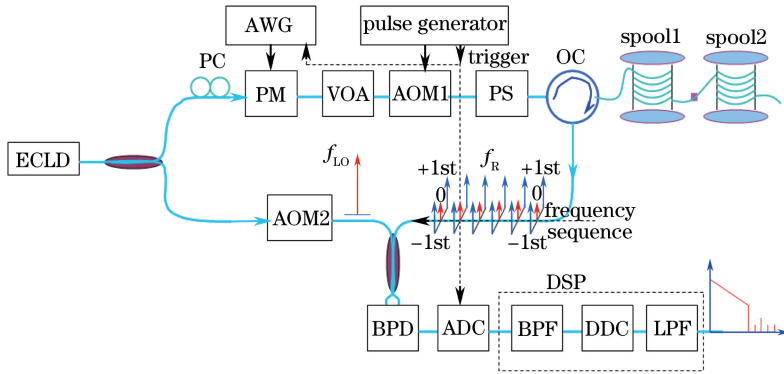


图 4 结合时分复用技术的频分复用相干光时域反射系统

Fig. 4 COTDR based on frequency division multiplexing and time division multiplexing

通过设置任意波形发生器, 实验中使用了 10 个时序的射频信号来驱动相位调制器。每个射频频率的持续时间为 $1 \mu\text{s}$, 探测光脉冲的峰值功率为 4.0 dBm , 射频频率从 28 MHz 至 46 MHz , 相邻频率的间隔为 2 MHz 。这样, 从相位调制器输出的多频光的高阶频率(± 2 阶以上)不会对探测光频率(± 1 阶频率)造成干扰。时序的 10 个射频信号驱动相位调制器产生 20 个探测频率, 这 20 个探测频率在测试光纤中的背向散射和/或反射信号与单频本振光相干产生 20 个中频。但是, 探测频率关于本振光的频率对称, 对称的探测频率与本振光相干产生相同的中频信号, 即最后获得 10 路中频信号。

图 5 显示了 10 条探测曲线经时序对齐后再叠加平均的结果。与传统的基于单频探测的相干光时域反射系统相比, 结合时分复用技术的频分复用方案前端信号功率提升了 3.0 dB , 后端的噪声功率降低了 5.0 dB 。因此, 实验结果表明与传统的基于单频探测的相干光时域反射系统相比, 结合时分复用技术的频分复用相干光时域反射系统测量的动态范围提升了 8.0 dB 。

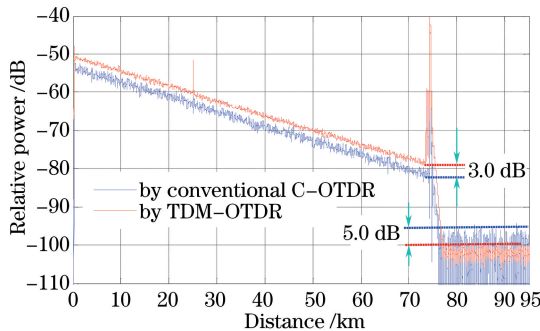


图 5 结合时分复用技术的频分复用方案与传统方案的探测曲线对比

Fig. 5 Comparison of detective curves with TDM-COTDR and conventional COTDR

2) 频分复用技术

COTDR 中的频分复用技术指的是同时利用在时序上叠加在一起的多个不同频率的探测光进行传感。

我们提出了利用三个和四个不同频率探测光进行频分复用的 COTDR 传感方案^[33-34],有效提升了测量的动态范围,并使得相干衰落噪声能以更快的速度进行收敛。

其中基于四频分复用的传感系统原理如图 6 所示。从相位调制器输出的多频探测光可以看成是四频复用的探测光。该探测光脉冲在测试光纤中的背向瑞利散射信号与单频本振光(LO)相干产生两个中频信号,这些中频信号经模数转换(ADC)、带通滤波(BPF)、数字下变频(DDC)和低通滤波(LPF)后提取出测试光纤上各个散射点的功率信息,最后对这两路中频信号叠加求算术平均可以提升测量的动态范围并快速地降低探测曲线的衰落噪声。

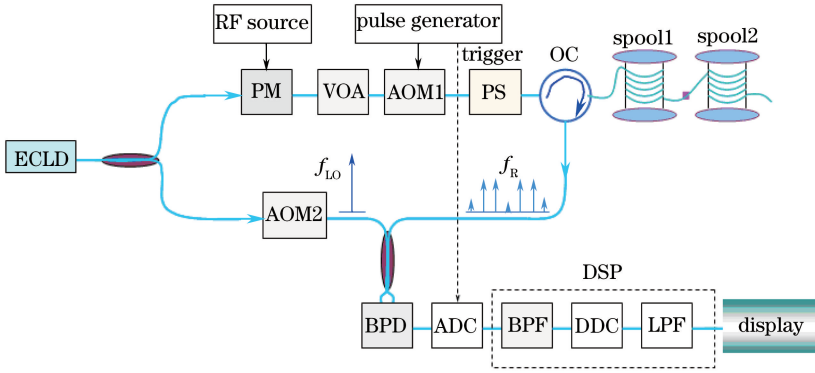


图 6 基于四频复用探测的相干光时域反射系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of COTDR based on four FDM

利用基于四频复用探测的相干光时域反射系统方案提升测量的信噪比由两部分构成:1) 四频率探测光与参考光经相干检测产生的四个拍频信号会合成为两路中频信号。由于 PM 对多频信号调制的不均匀,这一过程导致两路中频信号的功率分别为单频信号功率的 2 倍和 1.4 倍,这一过程增加了信号的功率但由于参考光功率不变,没有改变噪声功率,单程动态范围提升 1.2 dB。2) 两路中频信号叠加合成时可以进一步提高信噪比,使单程动态范围提升约 0.7 dB。

因此,从图 7 可以看出,基于四频复用探测的相干光时域反射系统方案可以将系统测量的单程动态范围提升 1.9dB。此外,这一方法相当于同时有四个频率的探测曲线进行扫频平均,如果限制与传统 COTDR 有相同的动态范围,则可以将测量速度提高约 4 倍。

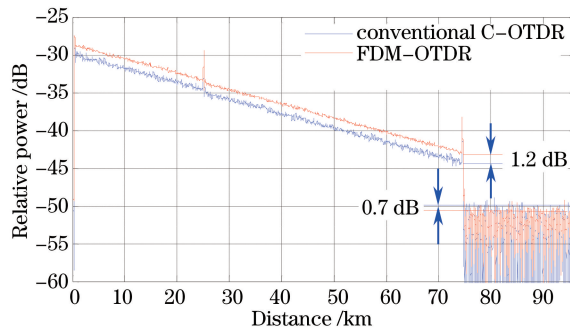


图 7 基于四频复用探测的方案与传统方案的探测曲线对比

Fig. 7 Comparison of the scheme based on four FDM and the conventional COTDR

3.3 瑞利、布里渊效应融合传感系统

通常情况之下,基于瑞利散射光信号的 COTDR 系统被认为只对散射信号的功率敏感,因此主要用于光纤链路损耗特性的无损诊断。而基于受激布里渊散射的布里渊光时域分析(BOTDA)技术可以实现对温度和应变的分布式测量。但是,传统的 BOTDA 系统是双端工作模式,这意味着当光纤链路中出现断点时,BOTDA 将不能工作,大大限制了 BOTDA 的应用场合。提出和设计了 COTDR 和 BOTDA 技术相融合的光纤传感系统,在不增加任何额外器件的情况下,能够实现 COTDR 探测和 BOTDA 探测的自由切换,图 8 为该混合系统的结构^[35]。

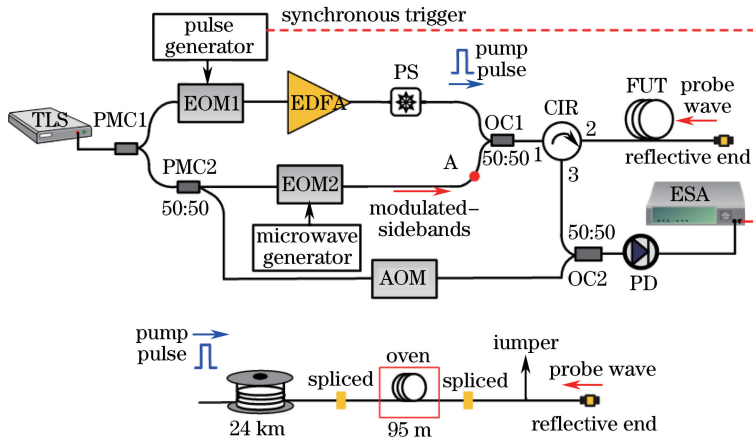


图 8 COTDR 和 BOTDA 融合分布式传感系统原理图

Fig. 8 Schematic diagram of COTDR and BOTDA distributed sensing system

该系统采用线宽为 100 kHz, 输出功率为 16 dBm 的可调激光光源(TLS)作为系统光源, 通过一个 50:50 的保偏耦合器(PMC)进行分路。上路经 EOM1 调制成抽运脉冲, 并送入 EDFA 和扰偏器分别进行功率放大和偏振态扰动。抽运脉冲通过一个 50:50 的耦合器(OC1)和环形器(CIR)后被注入到测试光纤(FUT)中。PMC1 输出的下路光再次被一个 3 dB 保偏耦合器(PMC2)分成两支路, 其中一路连续光由声光调制器(AOM)调制上移了 80 MHz, 作为后端相干探测的本振光(OLO)。另一路光被 EOM2 调制成两个探测边带(分别称为斯托克斯和反斯托克斯边带)。EOM2 工作在抑制载频模式并由一个微波信号源输出的频率 f 的电信号所控制。调制频率 f 被设置在光纤布里渊频移(BFS)附近。这两个探测边带经过 50:50 的耦合器与抽运脉冲一起被注入到测试光纤中。BOTDA 中的探测光由这两个探测边带在测试光纤远端玻璃/空气端面的菲涅耳反射提供。反射边带为连续光, 能持续地与相向而来的抽运脉冲在布里渊增益谱的范围内发

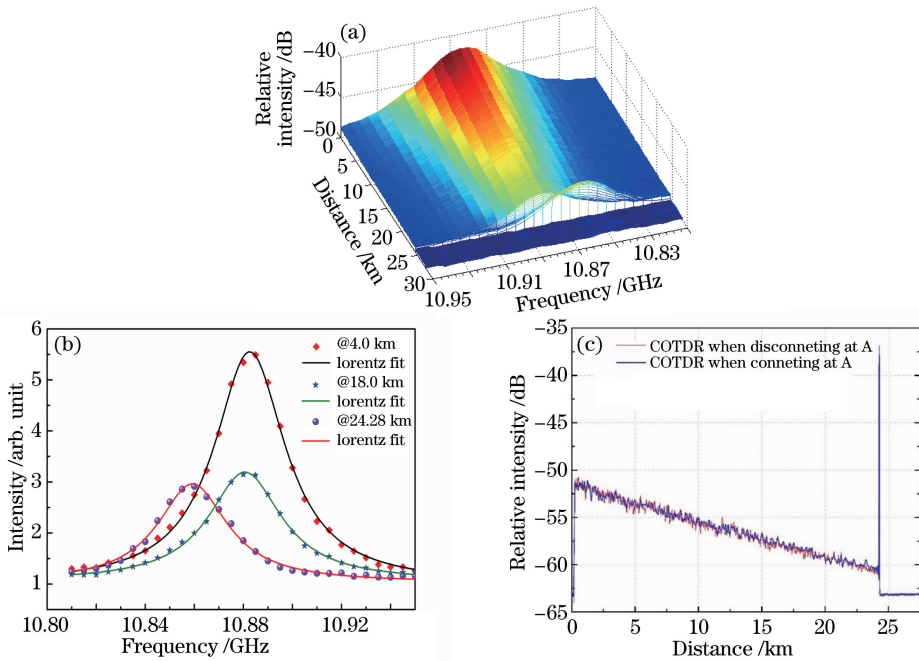


图 9 COTDR 和 BOTDA 融合分布式传感系统测试曲线。(a) 测得的三维布里渊增益谱;

(b) 测试光纤上 4.0, 18.0 和 24.28 km 处的布里渊增益谱形;(c) COTDR 模式下获得的瑞利背向散射光曲线

Fig. 9 Measurement results of COTDR and BOTDA distributed sensing system. (a) Three-dimensional gain spectrum of Brillouin scattering; (b) Brillouin scattering gain spectrum at the location of 4.0, 18.0 and 24.28 km;

(c) Rayleigh scattering obtained by COTDR

生受激布里渊作用。与抽运脉冲作用之后的探测边带透过环形器后被注入到 3 dB 耦合器(OC2)上,与本振光混合后由 12 GHz 的光电探测器(PD)进行外差相干检测。在该系统中,探测光包含有斯托克斯和反斯托克斯两个边带,分别构成增益型和损耗型 BOTDA。

实测得到的布里渊增益谱如图 9(a)所示。可以看到,95 m 段光纤的布里渊增益谱与其余光纤的增益谱相比有一明显的频移。测试光纤在 4.0,18.0,24.28 km 处的增益谱如图 9(b)所示,由于采用双边带的探测方法,这三个位置的布里渊增益谱都没有出现变形扭曲或者多峰结构,表明 BOTDA 中的非局域效应在该实验中可以忽略。对来自 95 m 加温段光纤的布里渊增益谱进行拟合计算,获得了 5 m 的空间分辨率和 1.0 °C 的温度精度。而将系统设置为 COTDR 模式时,可以同时获得 5 m 的空间分辨率和 12 dB 的动态范围,如图 9(c)所示。相干衰落噪声引起的波动小于 0.304 dB,能够准确测量光纤的损耗系数。该混合分布式传感系统不仅解决了传统 BOTDA 双端工作的问题,获得了比现有单端结构 BOTDA 更长的传感距离,且可用于光纤系统的链路损耗测量及故障点检测,在大型结构健康监测中有许多潜在的应用前景。

3.4 COTDR 系统设计与性能

所设计的 NJUC-1500 型 COTDR 传感系统的结构框图如图 10 所示。系统的主光源为外腔反馈的窄线宽激光器(ECL),该激光器的输出通过放大器(EDFA₁)做恒功率放大,以维持光源输出功率的稳定。放大后的连续光信号通过光学耦合器(OC₁)分为 90:10 的两路。其中较强的一路通过声光调制器(AOM₁)调制为探测光脉冲。另一路 10% 的连续光耦合输出作为光学本振(OLO),经过扰偏器(PS)的偏振态扰动形成外差相干探测的参考光。

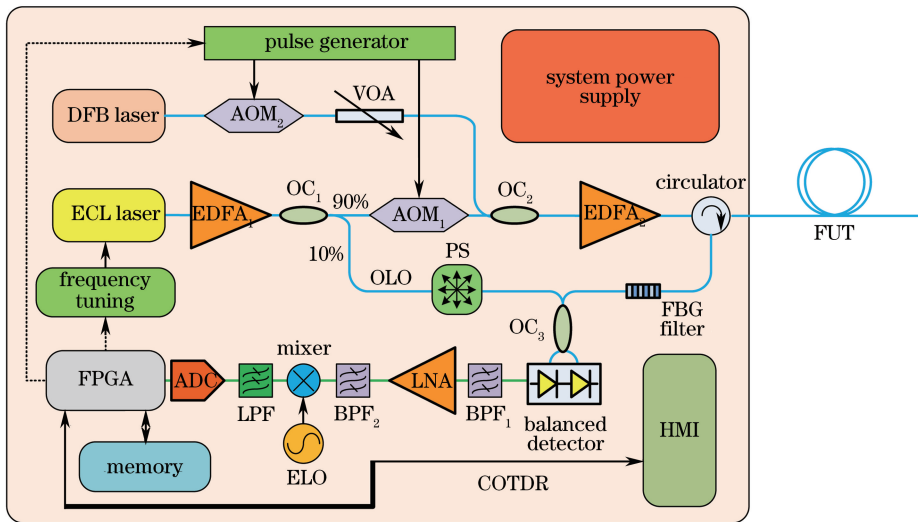


图 10 COTDR 系统结构框图

Fig. 10 Schematic diagram of COTDR system

采用分布反馈式激光器(DFB)作为辅助光源,通过声光调制器(AOM₂)和光衰减器形成与探测光脉冲在形状上互补的光脉冲信号。声光调制器 AOM₁ 和 AOM₂ 的调制信号由电脉冲发生器产生并实现时序的控制。探测光脉冲与互补光脉冲的中心频率相异,各自占据一路 DWDM 通信信道,通过波分复用的光学耦合器(OC₂)合波,送入放大器(EDFA₂)进一步提高出射光的能量。放大后的光信号通过光环形器注入待测试光纤。待测试光纤中产生的瑞利背向散射信号通过环形器返回,首先采用光学的 FBG 滤波器选出与探测光脉冲波长相对应的光信号,从而抑制由互补光脉冲、业务光信号以及光学中继器产生的宽带噪声。滤波得到的信号光与扰偏后的光学本振通过光学耦合器(OC₃)混合,送入平衡探测器进行外差相干探测。

由于声光调制器(AOM₁)的移频作用,光学本振与瑞利背向散射信号的中心频率存在 40 MHz 的差异,因此平衡探测器的有效信号输出为中心频率 40 MHz 的中频信号。该信号通过带通滤波器(BPF₁、BPF₂)和低噪声放大器(LNA)的信号调理,送入混频器。电学本振(ELO)同步送入混频器,将中频信号搬移到基带,实现对中频信号包络的解调。通过低通滤波器(LPF)抑制高频噪声与镜像后,包络信号被送入模数转换器(ADC)量化为数字信号。ADC 的量化结果在可编程逻辑阵列(FPGA)芯片内部经过数字滤波和平方检波,

就可以获得对瑞利背向散射信号的功率解调结果。由于瑞利散射信号的原始信噪比较低,单次的测量结果被存入 FPGA 控制的存储器组,进行多测量周期的累加平均,以提高系统测量性能,最高累加次数可达 2^{22} 。整套传感系统的时序控制均由 FPGA 实现,系统拥有独立的供电系统并可以通过人机接口(HMI)实现与操作人员的交互。设备总重量小于 25 kg,支持基于以太网的远程访问。该型系统在 1 km 空间分辨率条件下得到的单程动态范围达到 36 dB,可对无中继条件下长达 180 km 的光缆进行单端测试。其最短可输出的探测光脉冲宽度为 100 ns,对应的最高空间分辨率为 10 m。系统输出的瑞利背向散射信号的衰落噪声水平低于 0.07 dB,可用于微弱损耗、中继器增益波动等小信号事件的检测。在级联中继条件下,该系统的最长探测距离达到 15000 km(75 km \times 200),支持对数千乃至上万千米长度跨洋通信海缆的在线监测。

图 11 为采用光纤环路对级联中继链路进行模拟测试的结果。该测试等效链路长度达到 9000 km,单跨长度 100 km。采用的探测光脉冲宽度为 10 μ s,峰值功率为 -4 dBm。由图 11 可见,各跨的背向散射光功率实际上存在一定缓慢下降的趋势,从而降低了单跨测量的动态范围。尤其在 7000 km 以后,这种恶化趋势变得更为明显。这是由于测试中所使用的 EDFA 中继器采用恒功率放大,随着中继器 ASE 噪声的不断积累,探测光脉冲能够获得的增益逐渐降低。但是相干探测所具有的高灵敏度特性,即使在链路的末端,该型传感系统依然能够获得较好的动态范围,完全能够满足在线监测的需求。

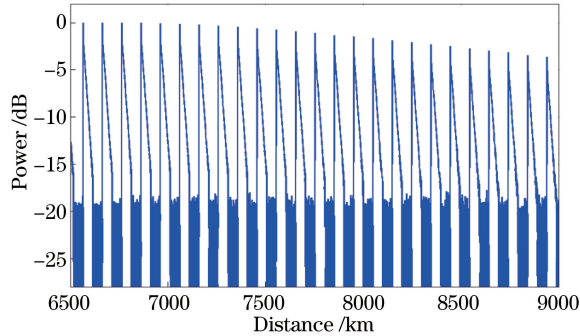


图 11 9000 km 级联中继链路环路模拟测试结果

Fig. 11 Simulation measurement result of 9000 km loop cascade relay link

NJUC-1500 型 COTDR 性能如表 1 所示。

表 1 NJUC-1500 型 COTDR 传感系统主要性能指标

Table 1 Main performance index of the NJUC-1500 COTDR

Performance	On-line mode (signal transmission)	Off-line mode (no signal transmission)
Measuring accuracy on attenuation event	≤ 0.5 dB	≤ 0.2 dB
Locating accuracy on attenuation event	≤ 5 km	≤ 0.1 km
Injection power	< 0 dBm	-7 dBm~17 dBm
Detection distance	> 15000 km	
Light source wavelength	ITU-T wavelength (1535~1565 nm) is alternative	
Probe pulse width	0.1~100 μ s (tunable by software)	
Single way dynamic range (S/N=1)	> 17 dB (Measurement condition: pulse width (10 μ s); average times (2^{16}); ASE at input end (-20 dBm))	
Measuring time	3000 km/0.75 h; 6000 km/1.5 h; 12000 km/3.0 h	
Curve smoothness	Power fluctuation of 0.5 dB can be discriminated	

4 COTDR 传感系统的应用

4.1 超长通信线缆链路监测

所设计的 COTDR 系统,除用于华为科技 12000 km 海底光缆通信系统的在线监测,还在超长通信线缆链路监测等领域得到应用,图 12 为某在建 500 km 级联中继链路实测结果。该系统自搭建后一直通信不畅,但是无法确定故障所在位置。从该系统测量获得的光信号在各级中继器后被放大情况可以清楚地看到,

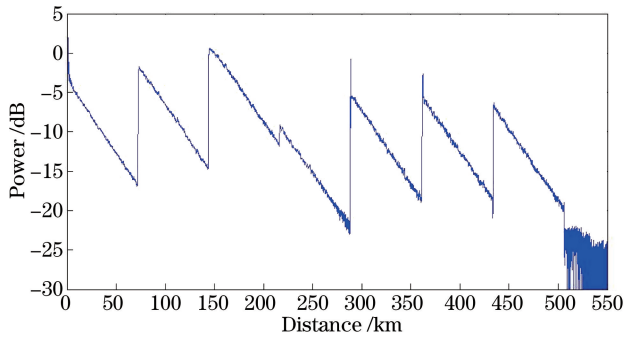


图 12 500 km 级联中继链路实测结果

Fig. 12 Actual measurement result of 500 km cascade relay link

该系统各级中继器的增益系数尚未调节平衡,该系统的测试结果可用以指导该通信系统的调试与运行维护。

图 13 为使用该系统对某运行中的 300 km 级联中继链路进行在线监测的结果。该链路单跨距为 100 km,由中继器提供增益以补偿线路衰减。测试中,通过远程控制,调节了第二跨前端中继器的增益系数,使其以 0.5 dB 为步进进行变化,获得图 13 的 4 条测试曲线。可以看到,该设备可以有效捕获这一变化过程。

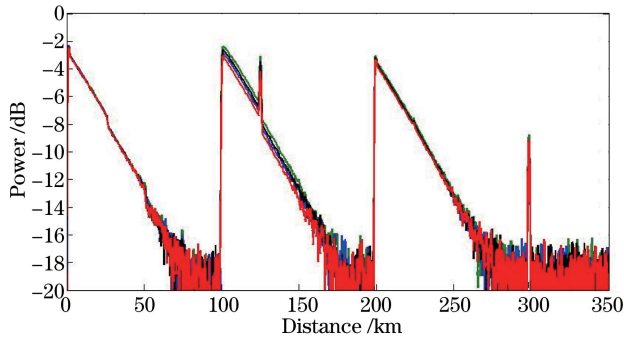


图 13 中继器增益变化测试

Fig. 13 Gain change test of repeater

对第二跨的背向散射光曲线进行局部放大,如图 14 所示。可以看到测试结果的步进大致均为 0.5 dB,其一致性非常好,与远程设置的参数一致。这一结果充分验证了该级联通信系统中所使用的中继器具有非常稳定与准确的增益效果。

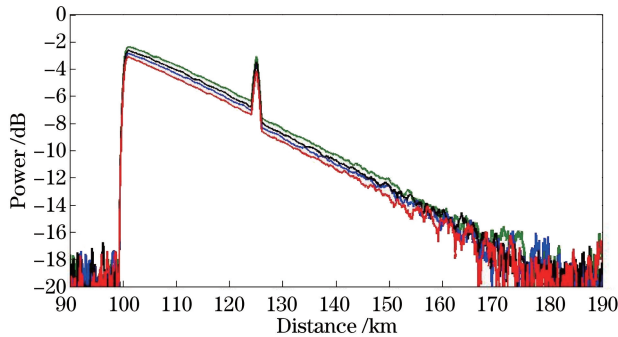


图 14 中继器增益系数调节测试结果的局部放大图

Fig. 14 Partial enlarged test view of adjusting the gain coefficient of repeater

图 15 为我国南方某海域进行的一次海底通信光缆故障排除任务。在任务中,利用该系统对海缆断点进行了精确定位,并利用定位结果引导施工船舶到达断点附近,对海缆进行了及时的打捞和维修。

4.2 温度和应变传感

2009 年, Koyamada 等^[36]研究表明, COTDR 中由于相干造成的信号波动可以看作是一种信号,它与光



图 15 基于该系统引导的一次海底通信光缆故障排除任务

Fig. 15 Submarine cable troubleshooting task based on the proposed system

纤的温度和应变的变化有着对应的关系。探测光频率改变时会改变信号波动的状态,因此可以通过改变探测光的频率来对由温度和应变变化引起的曲线变化进行补偿,使得受温度或应变变化影响位置处的信号恢复到初始的状态。利用这一方法,Koyamada 等在 8 km 长的光纤上得到了 0.01 °C 的温度分辨率。

2015 年,本课题组利用这一方法结合相位敏感光时域反射技术(Φ -OTDR)实现对光纤中温度和应变的同时传感,其系统结构如图 16 所示^[37]。具有高相干性的光源发出的光波通过电光调制器(EOM)进行移频。然后通过滤波器滤除其他边带后,再通过 EDFA 放大后进入 AOM。连续光波被 AOM 调制成探测脉冲光后通过环行器(CIR)进入光纤。光纤中在 5 km 和 7 km 位置处分别设置了一个压电陶瓷振荡器(PZT)用来对光纤施加振动和应变。返回的信号光通过雪崩光电探测器(APD)转换成电信号后,再通过信号采集装置采集,并进行后续的处理。

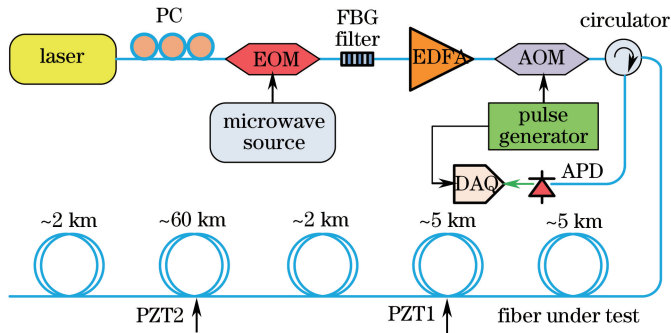


图 16 可同时进行振动和高精度应变检测的传感系统

Fig. 16 Sensing system of simultaneous vibration detection and high accuracy strain detection

上述系统中得到的信号同样为随机起伏的相干信号。由于采用了直接接收的方式,避免了偏振衰落噪声的影响。通过上述方法,Zhou 等在 9 km 长的光纤上同时实现了对 1 kHz 振动的测量和对 490 ne 的测量,应变测量分辨率达到了 10 ne。该系统还被应用于电力系统的高压输电线健康状况监控中,图 17 为该系统正在进行电缆覆冰检测实验。



图 17 该传感系统用于高压输电线电缆覆冰检测

Fig. 17 Ice coating detection of the proposed system for high voltage transmission cable

5 结束语

相干光时域反射仪 COTDR 已经成为超长距离光纤通信线路健康监测的重要设备。经过十多年的研发, COTDR 已趋于成熟, 并得到推广应用。但新技术如远泵放大及混合 Raman/EDFA 放大技术的使用, 将使光纤通信线路结构发生新的改变, 线路结构变得更加复杂, 线路结构将不再保持对称性。此外, 拉曼放大器对信号的放大是非线性的, 使得线路上事件的识别变得更复杂, 因此, 相干光时域反射系统还有待进一步改进和研发。

参 考 文 献

- 1 Chen Zhe, Qin Jiarong, Pan Hao, *et al.*. All-fiber integrated optical power monitor-controller[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1047-1052.
陈 哲, 覃家荣, 潘 昊, 等. 全光纤集成化光功率监控器[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1047-1052.
- 2 Wang F, Zhan W, Zhang X, *et al.*. Improvement of spatial resolution for BOTDR by iterative subdivision method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(23): 3663-3667.
- 3 Wang F, Wang X, Zhang X, *et al.*. Influence of optical pulse width on the perturbation detection performance of polarization-optical time domain reflectometer[J]. Applied Optics, 2012, 51(35): 8498-8504.
- 4 Zhu F, Zhang Y, Xia L, *et al.*. Improved Φ -OTDR sensing system for high-precision dynamic strain measurement based on ultra-weak fiber Bragg grating array[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(23): 4775-4780.
- 5 Zhu F, Zhang X, Xia L, *et al.*. Active compensation method for light source frequency drifting in-OTDR sensing system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(24): 2523-2526.
- 6 Wang Zhaoyong, Pan Zhengqing, Ye Qing, *et al.*. Fast pattern recognition based on frequency spectrum analysis used for intrusion alarming in optical fiber fence[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405010.
王照勇, 潘政清, 叶 青, 等. 用于光纤围栏入侵告警的频谱分析快速模式识别[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405010.
- 7 Li Qin, Zhang Chunxi, Li Lijing, *et al.*. Influence of the frequency drift of the laser on location precision of the phase-sensitivity optical time-domain reflectory[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305003.
李 琴, 张春熹, 李立京, 等. 激光器频率漂移对相位敏感光时域反射计扰动定位精度的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305003.
- 8 Zhang Yan, Lou Shuqin, Liang Sheng, *et al.*. Study of pattern recognition based on multi-characteristic parameters for Φ -OTDR distributed optical sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1105005.
张 颜, 娄淑琴, 梁 生, 等. 基于多特征参量的 Φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统模式识别研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1105005.
- 9 Zhang X, Song Y, Lu L. Time division multiplexing optical time domain reflectometry based on dual frequency probe[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(22): 2005-2008.
- 10 Temprana E, Myslivets E, Ataie V, *et al.*. Overcoming Kerr-induced capacity limit in optical fiber transmission[J]. Applied Optics, 2015, 54(6242): 1445-1448.
- 11 King J, Smith D, Richards K, *et al.*. Development of a coherent OTDR instrument[J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(4): 616-624.
- 12 Healey P, Malyon D J. OTDR in single-mode fibre at 1.5 μm using heterodyne detection[J]. Electronics Letters, 1982, 18(20): 862-863.
- 13 Healey P. Fading in heterodyne OTDR[J]. Electronics Letters, 1984, 20(1): 30-32.
- 14 Healey P. Fading rates in coherent OTDR[J]. Electronics Letters, 1984, 20(11): 443-444.
- 15 Blank L C, Spirit D M. OTDR performance enhancement through Erbium fibre amplification[J]. Electronics Letters, 1989, 25(25): 1693-1694.
- 16 Koyamada Y, Nakamoto H. High performance single mode OTDR using coherent detection and fibre amplifiers[J]. Electronics Letters, 1990, 26(9): 573-575.
- 17 Sumida M, Amemiya M, Furukawa S I, *et al.*. Fault location on optical amplifier submarine transmission systems[J]. Electronics & Communications in Japan, 1996, 79(79): 1-10.
- 18 Sato T, Horiguchi T, Koyamada Y. 1.6 μm band coherent optical time-domain reflectometry[J]. Proceeding of IMTC 1994, 1: 102-105.
- 19 Kee H H, Lees G P, Newson T P. A method of increasing the range of 1.65 μm long range OTDR system based on

- Raman amplification[J]. Qc Physics, 1997.
- 20 Sato T, Horiguchi T, Koyamada Y, *et al.*. A 1.6 μm band OTDR using a synchronous Raman fiber amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(8): 923-924.
- 21 Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y. Characteristics and reduction of coherent fading noise in Rayleigh backscattering measurement for optical fibers and components[J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(7): 982-987.
- 22 Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y. Measurement of Rayleigh backscattering in single-mode fibers based on coherent OFDR employing a DFB laser diode[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(11): 1039-1041.
- 23 Izumita H, Furukawa S I, Koyamada Y, *et al.*. Fading noise reduction in coherent OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(2): 201-203.
- 24 Izumita H, Koyamada Y, Furukawa S, *et al.*. Stochastic amplitude fluctuation in coherent OTDR and a new technique for its reduction by stimulating synchronous optical frequency hopping[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(2): 267-278.
- 25 Furukawa S, Tanaka K, Koyamada Y, *et al.*. High dynamic range coherent OTDR for fault location in optical amplifier systems[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1994, 1: 106-109.
- 26 Izumita H, Koyamada Y, Furukawa S, *et al.*. The performance limit of coherent OTDR enhanced with optical fiber amplifiers due to optical nonlinear phenomena[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(7): 1230-1238.
- 27 Sumida M. OTDR performance enhancement using a quaternary FSK modulated probe and coherent detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters 1995, 7(3): 336-338.
- 28 Sumida M. Optical time domain reflectometry using an M-ary FSK probe and coherent detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(11): 2483-2491.
- 29 Liu L, Zhang G, Feng Z. Method and device for monitoring submarine cable systems: 09821574.2[P]. 2011-08-10.
- 30 Iida H, Koshikiya Y, Ito F, *et al.*. Ultra high dynamic range coherent optical time domain reflectometry employing frequency division multiplexing[J]. Proceedings. of SPIE, 2011, 7753: 77533J-77533J-4.
- 31 Iida H, Koshikiya Y, Ito F, *et al.*. High-sensitivity coherent optical time domain reflectometry employing frequency-division multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1121-1126.
- 32 Lü Lidong. Research on frequency division multiplexing probe based coherent optical time domain reflectometry [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
吕立冬. 频分复用相干光时域反射系统研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- 33 Lu L, Song Y, Zhu F, *et al.*. Coherent optical time domain reflectometry using three frequency multiplexing probe[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(12): 1735-1739.
- 34 Lu L, Song Y, Zhang X, *et al.*. Frequency division multiplexing OTDR with fast signal processing[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2206-2209.
- 35 Zhang X, Hu J, Zhang Y. A hybrid single-end-access BOTDA and COTDR sensing system using heterodyne detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(12): 1954-1959.
- 36 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.
- 37 Zhou L, Wang F, Wang X, *et al.*. Distributed strain and vibration sensing system based on phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1884-1887.