

光学学报

长距离海缆在线监测改进型 C-OTDR 系统

张旭苹^{1,4}, 陈晓红^{1,2,4}, 梁蕾^{1,4}, 赵世松³, 何如龙⁵, 佟帅^{1,4}, 王峰^{1,4}, 邹宁睦^{1*}, 张益昕^{1,4*}

¹ 南京大学智能光传感与调控技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210093;

² 南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023;

³ 南京法艾博光电科技有限公司, 江苏 南京 211135;

⁴ 南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210023;

⁵ 海军工程大学, 湖北 武汉 430032

摘要 海底光缆承载包括互联网、语音以及跨国公司专线业务等 95% 以上的国际通信业务, 是国际信息化发展的主要载体, 对其运行状态的监测具有非常重大的意义。针对下一代海缆系统在监测损耗的同时还需要对外部侵入事件提前预警的需求, 设计一种融合 Φ -OTDR (Phase-sensitive Optical Time-Domain Reflectometry) 的 C-OTDR (Coherent Optical Time Domain Reflectometry) 海缆在线监测系统, 实现单跨距离为 127 km 的振动和损耗的同步监测。为了寻求 Φ -OTDR 和 C-OTDR 在偏振态问题上的冲突解决方案, 提出一种基于偏振分集幅度的最优选择算法。采用所提算法可以有效抑制衰落噪声对传感系统的影响, 保障对外部扰动事件的重构精度。水流冲击和锚害拖拽等测试结果表明, 本文所研制的改进型 C-OTDR 系统已经达到设计效果。

关键词 光通信; 相干探测; 相位敏感型光时域反射仪; 偏振分集; 海缆监测

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306001

Enhanced C-OTDR-Based Online Monitoring Scheme for Long-Distance Submarine Cables

Zhang Xuping^{1,4}, Chen Xiaohong^{1,2,4}, Liang Lei^{1,4}, Zhao Shisong³, He Rulong⁵,
Tong Shuai^{1,4}, Wang Feng^{1,4}, Zou Ningmu^{1*}, Zhang Yixin^{1,4*}

¹ Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

² College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

³ Nanjing Fiber Photonics Technology Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 211135, China;

⁴ College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

⁵ Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430032, China

Abstract Submarine cable communication, as an important approach of contemporary international communication, transfers more than 95% of international communication services including internet, voice, and multinational private line services. It is the main carrier of international information, and the monitoring of its operation status is of great significance. Next-generation submarine cable systems shall realize loss monitoring as well as provide early warnings of damage events. Therefore, an coherent optical time domain reflectometry submarine cable (C-OTDR) online

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-04-13; 录用日期: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(61627816, 61975076, U2001601)、江苏省重点研发计划(BE2018047)、智能电网保护和运行控制国家重点实验室资助项目、中央高校基本科研业务费专项资金(021314380173)、内蒙古自治区关键技术攻关计划(2019GG374)

通信作者: *zyixin@nju.edu.cn; **zouningmu@gmail.com

monitoring system integrated with phase-sensitive OTDR (Φ -OTDR) is designed to achieve the synchronous monitoring of vibration and loss over a 127-km span. In order to find a solution to the conflict between Φ -OTDR and C-OTDR on the polarization state problem, an optimal selection algorithm of polarization diversity amplitude is proposed. The proposed algorithm can effectively suppress the influence of fading noise on the sensing system and ensure the reconstruction accuracy of external disturbance events. Simulation tests on water flow impact and anchor damage dragging are conducted to verify the effectiveness of the enhanced C-OTDR system.

Key words optical communications; coherent detection; phase-sensitive optical time domain reflectometer; polarized cluster; submarine cable monitoring

OCIS codes 060.2370; 060.2380; 290.5825; 040.2840

1 引言

海底光缆承载着全球 95% 以上的洲际数据传输任务^[1],其既是国际互联网的骨架,也是保证全球各区域网络之间通信的主动脉。截至 2020 年底,全球海底光缆的总长度超过 120 万公里^[2],每天通信流量业务的交易额超过 10 万亿美元^[3]。海底光缆的所处环境非常复杂且恶劣,而且受到人为破坏、捕捞作业、货船抛锚、生物啃噬、自然灾害和器件老化等因素的影响,导致海底光缆出现故障并且通信中断的现象频发。据统计,光缆线路故障的发生率占网络总故障的 90% 以上,因此实时监测海底光缆的运行状态并及时预警故障十分重要。

传统光纤链路的监测设备为光时域反射仪 (Optical Time Domain Reflectometry, OTDR),其通过检测入射光在光纤中传输所产生的背向瑞利散射信号 (Rayleigh Backscattering Signal, RBS) 来实现对光纤损耗的分布式监测^[4],但在长距离的通信线路中,通常使用掺铒光纤放大器 (Erbium Doped Fiber Amplifier, 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。由于 OTDR 采用的是直接探测方式,而且 EDFA 所产生的放大自发辐射 (Spontaneous Emission Amplification, ASE) 噪声无法与 RBS 区分,因此系统的信噪比会大大降低。在多个 EDFA 级联的通信线路中,ASE 噪声会不断累积而得到加强,使得 OTDR 无法准确探测到 RBS,最终影响测量的距离。鉴于此,相干光时域反射仪 (Coherent Optical Time Domain Reflectometry, C-OTDR) 凸显出其巨大的优势^[5]。

与 OTDR 不同的是,C-OTDR 采用相干探测的方式将 RBS 光学信号转换为某一特定中频的电学信号,通过对该中频信号进行带通滤波可以抑制绝大部分的 ASE 噪声,能够使其监测多中继超长距离光纤通信线路^[5-6],因此 C-OTDR 在上世纪 90 年代开始成为海缆监测系统的主流设备之一^[7-12]。近年

来,C-OTDR 的改进主要是通过频分复用技术来提高监测通道的带宽利用效率,而且缩短了测量耗时,但仍局限在对光缆损耗的监测^[5,13-16],这会导致基于 C-OTDR 的海缆监测系统只能用于诊断与定位故障。为了确保海底光缆线路的安全稳定运行,海缆监测系统还应具备实时感测线路受扰动的能力,从而实现线路故障的预警。相位敏感型光时域反射仪 (Phase-sensitive Optical Time-Domain Reflectometry, Φ -OTDR) 具有测量距离长、灵敏度高 (纳应变) 和响应速度快 (毫秒乃至亚毫秒量级) 的优点,使其成为现阶段海缆监测领域的研究设备之一^[17]。2016 年,多位研究人员基于直接探测型的 Φ -OTDR 进行了光缆沿线落锚、挂缆、拖曳和抛锚等动态事件监测的研究^[18-21]。与直接探测方式相比,外差探测方式通过平衡探测器来消除直流偏置及共模噪声^[22-24],从而有效提升 Φ -OTDR 的信噪比和探测灵敏度。2019 年,加州理工学院的 Williams 等^[25]和加利福尼亚大学的 Lindsey 等^[26]基于外差探测型的 Φ -OTDR 对既有海缆实现了地震监测,表明 Φ -OTDR 不仅可以预防和评估地质灾害对海缆的破坏,还可以利用遍布全球的海缆进行地质灾害的预警。

由此可见,C-OTDR 和 Φ -OTDR 已分别成为监测海缆损耗与振动的主要设备之一,但仅仅依靠其中任何一个设备均无法准确且全面地评估海缆状态,为此新一代海缆监测系统应同时具备损耗与振动的监测能力,研究和研发同时兼具 C-OTDR 和 Φ -OTDR 所具备的功能的系统非常重要。本文针对新一代海缆监测系统的需求,研究融合 C-OTDR 和 Φ -OTDR 的原理和技术。尽管基于外差探测型的 Φ -OTDR 的结构与 C-OTDR 具有很大程度的相似性,但测量原理存在差异,为此在探测光源的性能需求和偏振态的控制等方面均存在很大区别。首先,为了使 Φ -OTDR 能够获得较高的监测精度,相邻的 RBS 曲线之间必须具备较高的相似性,因此需要一个频率稳定的光源,而 C-OTDR 则需要进行主

动扫频和多点数字平均来抑制相干衰落噪声,但会与 Φ -OTDR 所需的光源工作模式产生冲突。其次,对于 Φ -OTDR 而言,偏振态的改变会在检测信号中引入随时间变化的偏振分量,从而影响振动的测量精度,而 C-OTDR 中常使用扰偏器对光学本机振荡器(Optical Local Oscillator, OLO)的偏振态进行快速扰动,用来抑制由 RBS 的偏振态与 OLO 不匹配导致的偏振衰落噪声,这与 Φ -OTDR 希望偏振态高度稳定的要求矛盾。目前, Φ -OTDR 在海缆监测中的应用多采用鉴幅型解调方法,根据 RBS 的幅度信息可以快速定位振动事件。由于 RBS 的幅度变化与振动事件所引起的光纤动态应变没有明确的线性关系,因此鉴幅型解调方法通常仅能够进行定性测量,无法高保真地重构扰动事件的时频特征。鉴相型解调方法利用 RBS 的相位变化与光纤局部区域的动态应变之间的线性关系可以精准还原扰动事件,从而提升后续模式识别的准确性。由于存在相干衰落的现象,光纤某些区域中 RBS 的强度趋近于零,为此这些区域中的相位解调结果很容易出现由信噪比的急剧恶化导致频繁的误报警^[27]。

为此,本文提出一种改进型 C-OTDR 系统的实现方案,研究扫频速度对 Φ -OTDR 的振动监测精度与 C-OTDR 的振幅波动的影响,寻求 Φ -OTDR 和 C-OTDR 在偏振态问题上的冲突解决方案,尝试提出一种基于偏振分集的幅度最优选算法,以抑制相干衰落对 Φ -OTDR 鉴相的影响,从而实现在大跨距的条件下光缆全线损耗与振动的全分布式同步测量,为下一代海缆在线监测提供可靠的技术手段。

2 系统设计

2.1 测量原理

2.1.1 损耗测量原理

在 C-OTDR 中,光电探测器经过带通滤波后输出的光电流 i_{het} 可表示为^[28]

$$i_{\text{het}} = R_d \{ 2E_{\text{LO}} E_r \exp\{j[\Delta\omega t + \varphi(t) + \theta(t)]\} \} \propto A_{\text{IF}} \cos[\Delta\omega t + \varphi(t)] \cdot \cos \theta(t), \quad (1)$$

式中: R_d 为探测器的响应度; E_{LO} 和 E_r 分别为 OLO 和 RBS 的电场强度; $\Delta\omega$ 为调制器所提供的频率使两散射点间的相位差发生变化,从而使 RBS 的振幅呈现不同的随机起伏状态,再将不同频率的探测光所产生的 RBS 进行累加平均以抑制相干衰落噪声。此外, OLO 的偏振态与 RBS 不匹配,导致 (1) 式中的 $\theta(t)$ 存在振幅波动^[31], 称为偏振衰落噪声。通常使用扰偏器对探测光和 OLO 的偏振态进行快速扰动,使其偏振态随机化以降低偏振态不匹配带

从 (1) 式可以看到,相位和偏振的随机分布特性将会引起功率的随机波动,如果不加以抑制,将会引起损耗测量结果的剧烈波动,从而降低检测精度。鉴于此,在使用扰偏技术来抑制偏振衰落噪声的同时,还需要结合扫频和多点数字平均技术来抑制相干衰落噪声^[5],从而获得较大的动态范围,进而实现损耗测量。

2.1.2 振动测量原理

由外部振动引起的光纤形变如图 1 所示,将振动位置前后间隔长度为 L 的两段光纤 A 和 B 作为参考区域。当振动作用在光纤上时,由应力作用而导致光纤 A 和 B 之间产生了 ΔL 的光纤长度变化,则两个参考区域的相位差 $\Delta\varphi$ 可表示为^[22]

$$\Delta\varphi = 4\pi n \Delta L / \lambda, \quad (2)$$

式中: λ 为探测光脉冲的波长; n 为光纤的折射率。在 Φ -OTDR 中,通过一定的信号检测方法以及相应的数据处理过程,如同相/正交 (In-phase/Quadrature, I/Q) 解调^[22], 就可以提取出相位变化的信息,从而实现声场信号的重构。

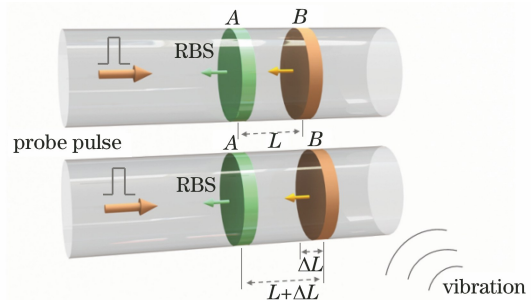


图 1 由外部振动引起的光纤形变示意图

Fig. 1 Diagram of optical fiber deformation caused by external vibration

2.2 衰落噪声对信号解调的影响及其抑制方法

传统 C-OTDR 中的光源具有高相干性,导致光纤中不同位置处的散射光发生相互干涉而出现相干叠加的高振幅区和相干相消的低振幅区,这会引引起 (1) 式中 A_{IF} 的波动,最终影响损耗的测量结果^[30-32]。为了抑制这类相干衰落噪声,可以采用频移平均的方法^[33]。频移平均法即改变探测光的频率使两散射点间的相位差发生变化,从而使 RBS 的振幅呈现不同的随机起伏状态,再将不同频率的探测光所产生的 RBS 进行累加平均以抑制相干衰落噪声。此外, OLO 的偏振态与 RBS 不匹配,导致 (1) 式中的 $\theta(t)$ 存在振幅波动^[31], 称为偏振衰落噪声。通常使用扰偏器对探测光和 OLO 的偏振态进行快速扰动,使其偏振态随机化以降低偏振态不匹配带

来的影响。考虑到频移技术和扰偏方法与 Φ -OTDR 的振动监测方式对探测光频率和偏振态稳定性需求的矛盾,本文选取合适的扫频速度和偏振分集测量方案,可以获得两个正交偏振态的损耗测量结果,再将其累加平均能够降低相干和偏振衰落噪声对损耗测量的影响。

对于 Φ -OTDR 而言,同样存在相干衰落效应。当振动事件发生在相干相消的低振幅区时,振动信号难以被检测到,此时系统将出现探测盲区,从而导致相位解调的精度降低,进而出现相位失真甚至误报警。实际上,当外部振动事件的持续时间足够长时,本文采用的扫频方式将会极大地降低光纤中某一位置一直处于盲区的概率^[34]。

对(2)式进行 I/Q 解调,鉴相结果可以表示为^[35]

$$\varphi'(t) = \arctan \left\{ \frac{\frac{E_r}{2} \sin[\varphi(t)] + \frac{E_n}{2} \sin[\varphi_n(t)]}{\frac{E_r}{2} \cos[\varphi(t)] + \frac{E_n}{2} \cos[\varphi_n(t)]} \right\}, \quad (3)$$

式中: E_n 为随机噪声的幅度; $\varphi_n(t)$ 为噪声信号的相位。A 和 B 光纤中 RBS 相位差的变化量可以表示为

$$\Delta\varphi' = \varphi'_A - \varphi'_B. \quad (4)$$

比较(2)式和(4)式可知, $\Delta\varphi$ 为期望的相位差值,而 $\Delta\varphi'$ 为实际相位解调之后获得的相位差值。由(3)式可以表明,如果随机噪声变得相对较强,则提取的相位信号不准确。由于相位解调的精度与 RBS 的信噪比呈正相关,因此必须引入规避衰落的算法,用来抑制相干衰落噪声以提高相位解调的精度。为此,本文提出了一种偏振分集幅度的最优选择算法,可以降低相干衰落对 Φ -OTDR 鉴相的影响。

2.3 改进型 C-OTDR 结构

图 2 为改进型 C-OTDR 的结构。系统使用波长为 1550.12 nm 和线宽为 3.7 kHz 的 NKT 窄线宽可调谐激光器作为光源,使用计算机所控制的可编程驱动器对光源的光频率进行调谐。计算机的配置为 Inter(R) Core(TM) i7-6820HQ @ CPU 2.7 GHz, RAM 16 G。NKT 激光器所输出的连续光被 90:10 的光耦合器(Optical Coupler, OC 1)分成两部分,其中 90% 的一路作为探测光,10% 的一路作为本振光。为了获得具有较好矩形系数的光脉冲,本文选择了频移为 200 MHz 的两个声光调制器

(Acoustic Optical Modulator, AOM), 上升沿均为 10 ns。探测光经过 AOM 1 后调制成频移为 200 MHz 的光脉冲。系统同时使用波长为 1561 nm 和线宽为 3 MHz 的分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB)作为填充光源,其输出的连续光被 AOM 2 调制成频移为 200 MHz 的另一路光脉冲。探测光一路与填充光一路所产生的脉冲光经过 OC 2 后形成互补光,再由 EDFA 进行功率放大。由于探测光路与填充光路所产生的两路光脉冲形状互补,因此在通过海缆监测系统的级联中继器后可以避免产生光浪涌,能够使峰值功率保持均匀^[36]。峰值功率的设定与光纤的非线性效应和海缆通信系统的中继器有关,二者决定了峰值功率的上限。在不影响正常业务光通信的前提下,在线和离线监测峰值功率的上限通常为 2 dBm 和 15 dBm。本文采用的是离线监测方式,因此采用的峰值功率为 11 dBm。针对海上定位的需求,100 m 距离以内的空间分辨率足以满足要求^[37],因此实验中 AOM 1 的调制脉冲采用 1 μ s 的脉宽,周期为 1 ms。AOM 1 和 AOM 2 的上升沿均为 10 ns,高于空间分辨率为 100 m 的需求。为了确保 Φ -OTDR 对外部扰动的测量精度,以及同时抑制 RBS 曲线的幅度波动,根据 Φ -OTDR 对相邻 RBS 曲线相关度的要求,以及扫频速度与调制信号脉宽和周期之间的关系^[34,36],在系统的原型设计中选取了 5 MHz/s 的扫频速度对 NKT 激光器进行连续扫频,这足以有效抑制相干衰落对损耗测量精度的影响^[38],而且不牺牲 Φ -OTDR 的扰动事件识别能力。经过 EDFA 放大后的互补光通过环形器(Circulator, CIR)的 1 端口注入待测光纤(Fiber Under Test, FUT)中,FUT 中所产生的 RBS 经过 CIR 的 2 端口返回并由 3 端口输出,再通过一个带宽为 0.8 nm 的光学滤波器(Optical Filter, OF)后以抑制无用信号和宽带 ASE 噪声。实验中,使用两段长度分别约为 70 km(FUT 1)和 1 km(FUT 2)的单模光纤首尾相连并作为传感光纤,而且在光纤的末端连接了一个柱状压电陶瓷(Piezoelectric Transducer, PZT),其表面缠绕了长约为 30 m 的光纤,用来模拟产生外界声场的振动。

经过 OF 滤波后的 RBS 信号光和本振光被偏振分集接收模块(Polarization Diversity Receiver, PDR)接收,其中本振光一路通过手动光纤偏振控制器(Fiber Polarization Controller, FPC)来实现对偏振态的调整,可以均衡 PDR 所输出的两路正交偏振

态(以下简称 P 态和 S 态)的中频信号强度,使其平均强度尽量一致。通过相干拍频可以产生 P 态和 S 态两路中频信号,再分别经过中心频率为 200 MHz 的带通滤波器(Band Pass Filter, BPF)和低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)后进一步滤波和放大,最终由数据采集(Data Acquisition, DAQ)模块采集并传输至计算机中进行数据处理,系统每 1 s

可以采集 1.25×10^9 个点。其中 BPF 的通带范围为 195~205 MHz, LNA 的增益为 27 dB, 该电学调理电路的作用主要是滤除无用的信号,同时放大光电转换所产生的微弱电信号。在此基础上,本文提出一种偏振分集幅度的最优选择算法,在 P 态和 S 态中进行实时选择,能够很好地解决相干偏振态的问题。P 态和 S 态两路中频信号的波形如图 3 所示。

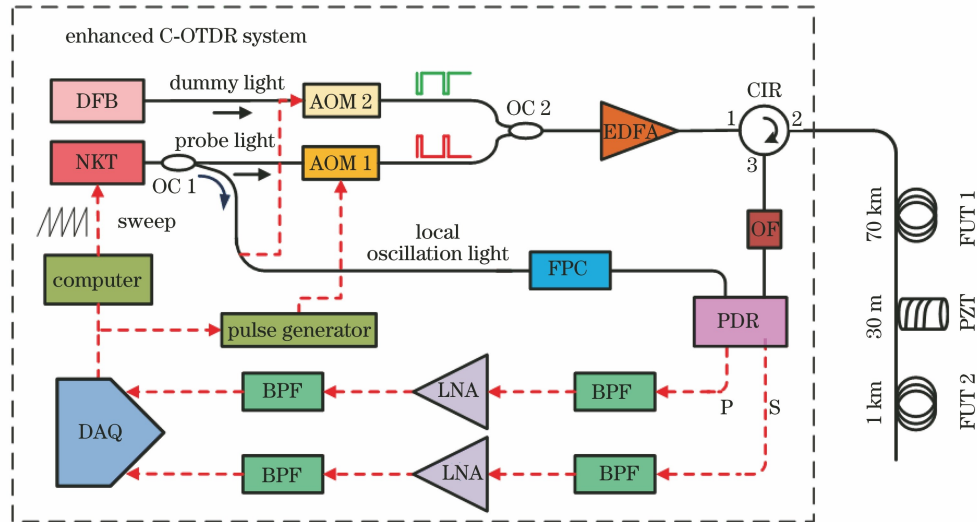


图 2 改进型 C-OTDR 结构

Fig. 2 Improved C-OTDR structure

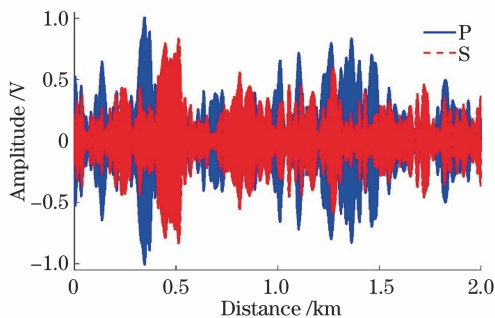


图 3 P 态和 S 态两路中频信号的波形

Fig. 3 Waveforms of intermediate frequency signals in P state and S state

从图 3 可以看到, P 态的信号强度略高于 S 态, 但差距并不明显; P 态和 S 态的信号强弱分布不一致, 因此可以通过偏振分集幅度的最优选择方案在两个偏振态中进行实时选择。

2.4 偏振分集幅度的最优选择算法

为了抑制 C-OTDR 的相干衰落噪声以及偏振衰落噪声对扰动监测相位解调的影响, 本文提出一种基于偏振分集两态幅值优选策略的相位解调算法, 即偏振分集幅度的最优选择算法, 处理步骤如下。

首先对采集到的两路中频信号(P 偏振态和 S

偏振态)分别进行 IQ 解调, 可以获得两路中频信号的幅度 (A_P 和 A_S) 以及相位 (Φ_P 和 Φ_S), 其中 A 和 Φ 均由时间行和距离列组成大小为 $m \times n$ 的矩阵, 二者中的每一行分别代表幅度和相位随距离的分布, 每一列分别代表幅度随时间的变化。一方面, 分别对 A_P 和 A_S 沿时间轴求平方和 (A_{Pt} 和 A_{St}), 再对其进行累加平均处理可以获得 C-OTDR 曲线, 从而实现损耗监测; 另一方面, 选定时域窗口 S_{TW} , 以该窗口为模板沿时间轴将两态相位解调信号分别划分为首尾相接且等宽度的 N 个区间 ($N = \lfloor m/S_{TW} \rfloor$, 其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整)。 S_{TW} 值越小, 理论上算法的优化性能越强, 但是考虑到实际扰动目标具有一定的延续性, 因此 S_{TW} 值的选取通常取决于目标探测事件的周期。记扰动位置前后的空间分辨率宽度以内, 在 S_{TW} 中最小幅值的最大值位置为 r_a 和 r_b , 比较两态幅度信号 A_P 和 A_S 在 S_{TW} 中 r_a 和 r_b 位置处的幅度总和 $A_{total} = A_{ra} + A_{rb}$ 的大小, 优选 A_{total} 值较大的偏振态数据 (记为 $O_j, j = 1, 2, \dots, N$) 并进行相位提取, 从而获得 N 个时域区间扰动位置的相位信号。最后, 将相位信号进行重构并进行相位解缠绕, 可以实现扰动监测。算法流程如图 4 所示, k 为步进变量。

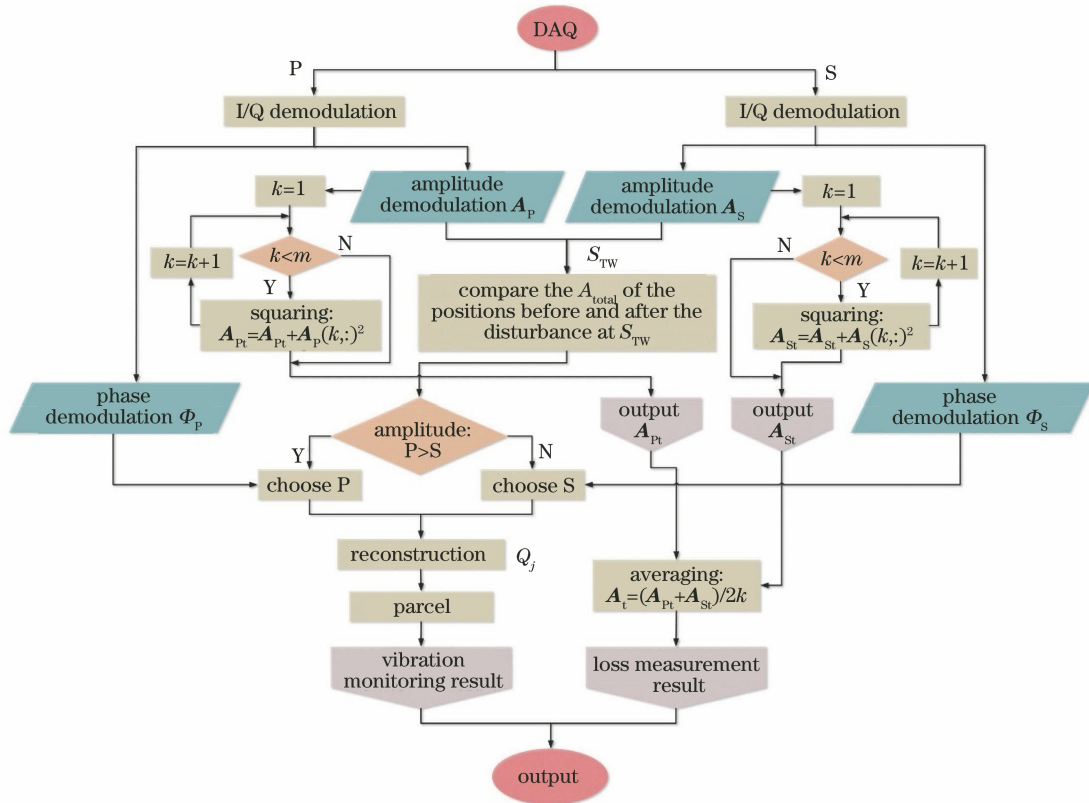


图 4 偏振分集幅度的最优选择算法的处理流程

Fig. 4 Process flow of optimal selection algorithm of polarization diversity amplitude

3 实验结果分析

3.1 损耗测试结果

图 5 为 2^{16} 条 RBS 曲线的损耗测试结果, 其中图 5(a)和图 5(b)分别为 P 偏振态和 S 偏振态各自获得的 2^{16} 条 RBS 曲线的平均结果, 图 5(c)为两态 2^{16} 条 RBS 曲线累加平均的改进结果。从图 5 可以看到, 将两态的 RBS 曲线进一步平均后, 得到的 C-OTDR 曲线更加平滑, 获得了 59.2 dB 的总动态范围, 对应的单程动态范围 (Single-Way Dynamic Range, SWDR) 为 29.6 dB; 根据最常用的 G. 654P 单模光纤 0.17 dB/km 的损耗系数可知, SWDR 所对应的最大距离可以达到 127 km^[39]; 此外, 在 71.9 km 处有一个非常明显的衰减事件, 该损耗事件的损耗值约为 4.7 dB, 此处正是人为施加的 PZT 连接损耗。

图 6 为图 5 在 30~40 km 距离之间的局部放大图, 实线为各自的拟合曲线。以标准差作为 C-OTDR 曲线波动程度的量化指标, 经过计算可得 P 态和 S 态的 C-OTDR 曲线波动分别为 ± 0.23 dB 和 ± 0.29 dB, 将两态累加平均后的 C-OTDR 曲线波动为 ± 0.07 dB。综上, 偏振分集测量方式不仅能

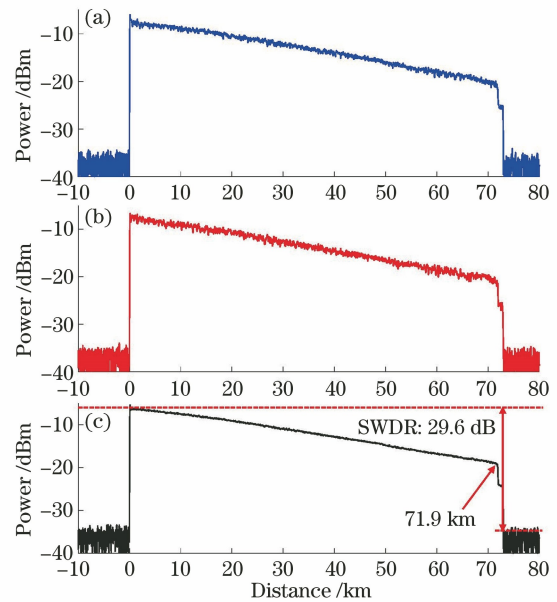


图 5 不同偏振态下 2^{16} 条曲线的损耗测试结果。

(a) P 态; (b) S 态; (c) 两态累加

Fig. 5 Loss test results of 2^{16} curves under different polarization states. (a) P state; (b) S state;

(c) two states accumulation

够获得更好的相干衰落噪声抑制效果, 还能够提高微小损耗事件的识别能力。

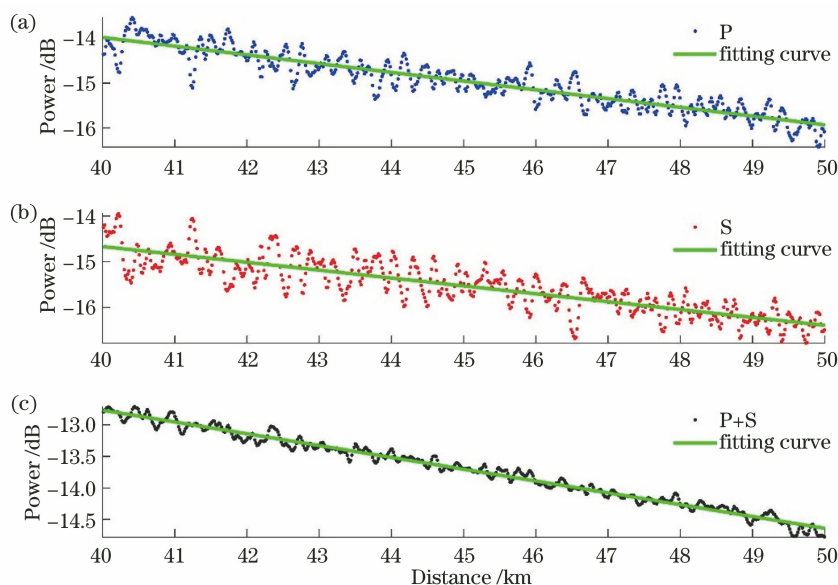


图 6 图 5 的局部放大图。(a) P 态;(b) S 态;(c) 两态累加

Fig. 6 Partial enlargement of Fig. 5. (a) P state; (b) S state; (c) two states accumulation

3.2 振动测试结果

受到捕鱼作业、船锚损害和蛙人破坏等因素的影响,海缆可能会造成损伤,基本上表现为几赫兹至几十赫兹的低频特征,如螺旋桨旋转所产生的声波^[40-42],频率约为 20~30 Hz,因此本文以 30 Hz 的频率为例,模拟类似于该频率的扰动事件。为 PZT 施加频率为 30 Hz 的正弦波,用来模拟传感光纤受到外部声场的扰动。P 偏振态下,PZT 附近的信号幅度瀑布图如图 7 所示。从图 7 可以看到,在约为 71.9 km 的距离处检测到了一个周期性的信号,并且振动区域前后的信号幅度存在显著差异,原因在于当连接 PZT 时,有一个强衰减,该现象与图 5 的损耗测试结果一致。

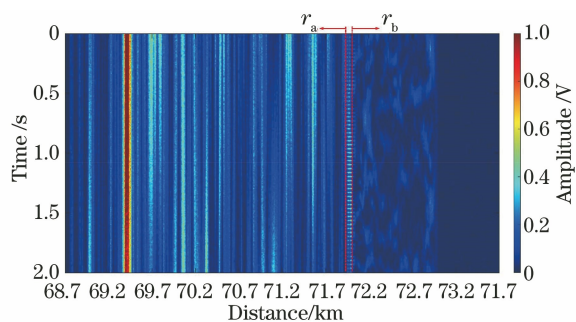


图 7 P 偏振态下 PZT 附近的信号幅度瀑布图

Fig. 7 Signal amplitude waterfall near PZT in P polarization state

经过偏振分集幅度的最优选择算法优选前后的相位提取结果如图 8 所示。为了能够凸显偏振分集幅度优选的效果,在已知施加信号频率的基础上,对

各自鉴相结果进行带通滤波。图 8(a)和图 8(b)分别为 P 偏振态和 S 偏振态各自 RBS 的重构振动信号的波形。从图 8(a)和图 8(b)可以看到,未优选之前,两态 RBS 提取的相位信号均存在多处畸变。图 8(c)为 P 偏振态和 S 偏振态 RBS 信号解调得到的幅度在 S_{TW} 时域内 r_a 和 r_b 位置处的幅度总和。从图 8(c)可以看到,考虑到海底扰动事件的低频特性^[43],这里设置时域窗口有 20 个点,即 S_{TW} 值为 0.02 s,因此两态的幅度呈现台阶状起伏而非连续变化;相比于相应的信号强度,图 8(a)和图 8(b)中的失真位置均为幅值较弱的位置。图 8(d)对应图 6(c)的幅值选择策略,在当前时域窗口内选择 A_{total} 值较大的一方进行相位提取,其中阴影域表示选择了 P 态,空白域表示选择了 S 态。从图 8(d)可以看到,随着时间的推移,其相位提取一直在两个偏振态中跳转,从而获得了图 8(e)的重建相位信号的波形。从图 8(e)可以看到,利用偏振分集的测量方式并结合本文提出的幅度最优选择算法,能够高保真地重构振动信号,并且实现了单端传感距离为 71.9 km 的振动监测。

3.3 外场试验

为了进一步验证本文系统在现场条件下实时在线监测水下通信光缆的状态并及时作出预警的能力,在某试验基地的淡水湖(自然水体)中进行测试。改进型 C-OTDR 设备置于岸边以采集数据,GYXTS 型单模双芯铠装水下通信光缆作为传感缆,将其从岸边向湖心进行布设。布缆沿线的平均

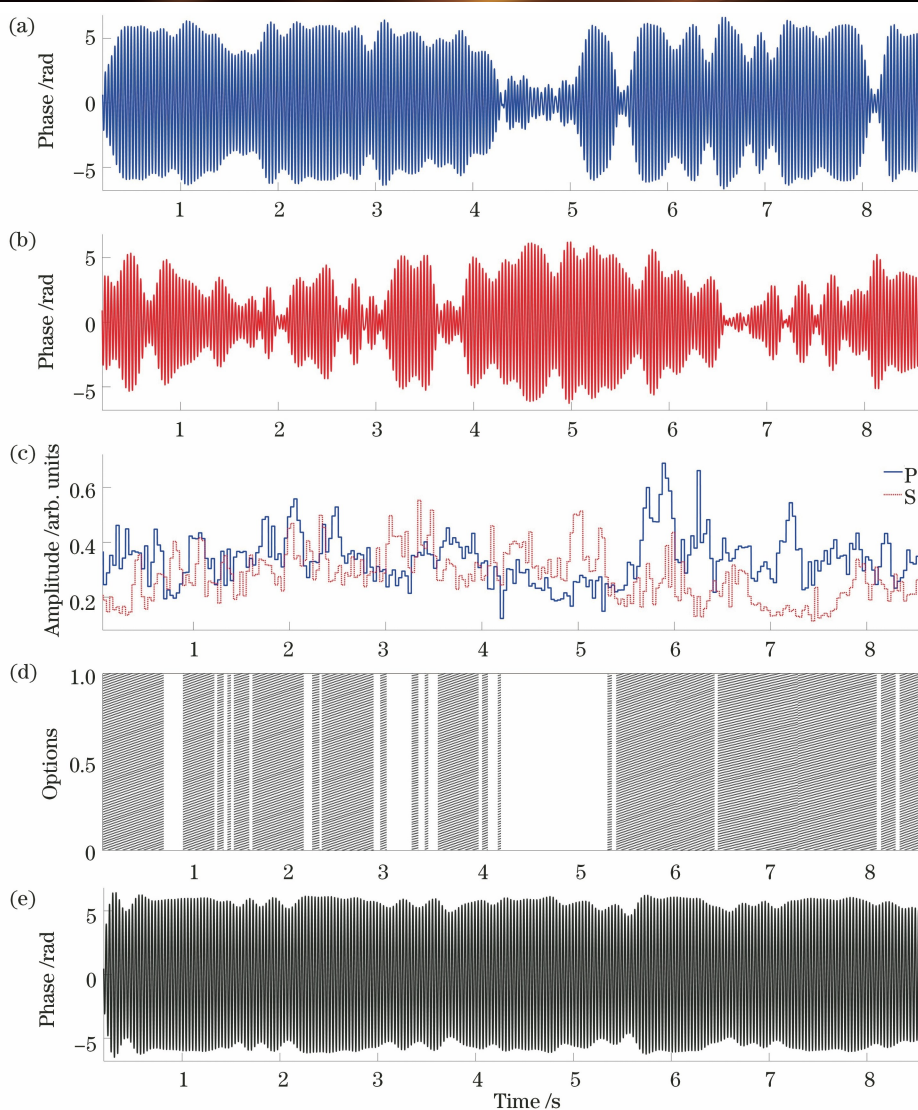


图 8 两种偏振态提取的相位信息及经过优选后的重建结果。(a) P 偏振态的相位提取结果;(b) S 偏振态的相位提取结果;(c) 扰动位置前后的幅度总和;(d) 优选结果;(e) 偏振分集幅度的最优选择算法处理后的重建信号

Fig. 8 Phase information extracted from two polarization states and reconstruction results after optimization. (a) Phase extraction result of P polarization state; (b) phase extraction result of S polarization state; (c) amplitude sum before and after perturbation position; (d) optimal result; (e) reconstructed signal after processing by optimal selection algorithm of polarization diversity amplitude

水深为 8 m, 最深处约为 12 m, 光缆总长为 400 m, 整体呈“S”型自然沉降在湖床上。布放光缆前, 使用 GPS(Global Positioning System) 和望远镜测距仪来标定 10 个点, 并在每个标定处放置一个浮标, 在与岸边直线距离为 260 m 处进行了水流冲击和锚害拖拽模拟试验。

3.3.1 水流冲击

在与岸边直线距离约为 260 m 处放置水泵, 水泵下的沉深度约为 7 m, 开启水泵进行喷水试验并观察光缆监测情况。图 9 为水泵喷水过程中经解调得到的幅度瀑布图。从图 9 可以看到, 在光缆约为

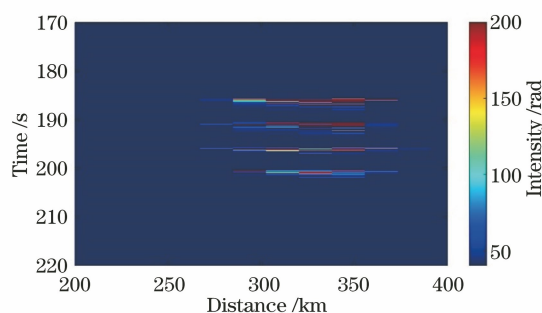


图 9 水泵喷水过程中的时空幅度瀑布图
Fig. 9 Temporal and spatial amplitude waterfall diagram of water pump spraying process

330 m 处出现了比较明显的亮条纹,覆盖区域约为 80 m,对该区域信号进行时频解析,获得的时域波形如图 10 所示。从图 10 可以看到,在 185~205 s 之间可以观察到 4 次连续的冲击信号,强度由弱到强再到弱,其峰值达到了 ± 110 rad 左右,在 10 m 的空间分辨率下,对应了 $\pm 2.4 \mu\epsilon$ (ϵ 为应变)的动态应变,单次冲击后阻尼振荡时长在数十秒,与图 9 的时间相对应,验证了改进型 C-OTDR 系统对随机扰动事件的监测性能。

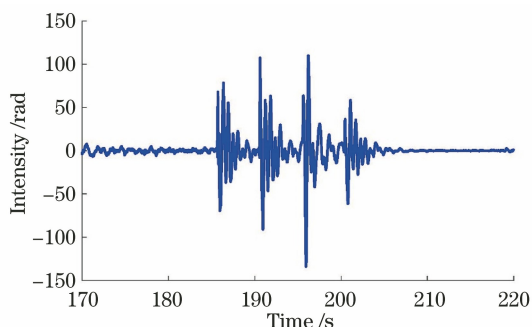


图 10 水流冲击光缆后的振动波形
Fig. 10 Vibration waveform of water impacting optical cable

3.3.2 锚害拖拽

在实验船只的尾部抛射重量为 100 kg 的铅鱼入水,使铅鱼挂住光缆来模拟锚害实验。锚害模拟测试得到的时空幅度瀑布图如图 11 所示。从图 11 可以看到,拖挂点在 240~250 m 之间,整个拖挂过程的时间约为 3 min,且随着拖拉力的增强和光缆受力范围的逐渐增加,受力范围最高达到 ± 100 m,而且期间有若干次拖拉再松弛的过程。对于单次的拖拉,呈现从拖挂点向两侧对称的 V 字线形状,与光缆某一点受拖拽逐渐扩大受力区域的这一过程相符。将在 240 m 距离处测得的振动信号沿时间轴绘制曲线,得到的波形如图 12 所示。从图 12 可以看到,拖拽所产生的振动峰的峰值达到了 ± 3000 rad,对应约为 $\pm 73.5 \mu\epsilon$ 的动态应变变化,远

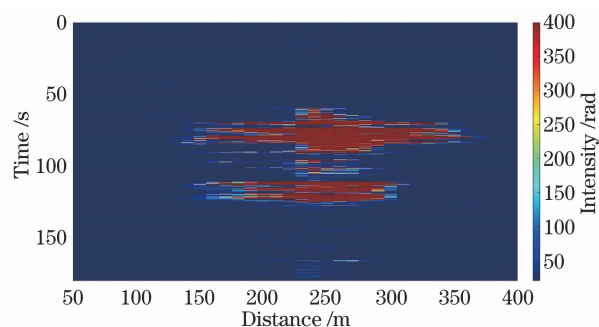


图 11 锚害模拟测试得到的时空幅度瀑布图
Fig. 11 Temporal and spatial amplitude waterfall diagram obtained from anchor damage simulation test

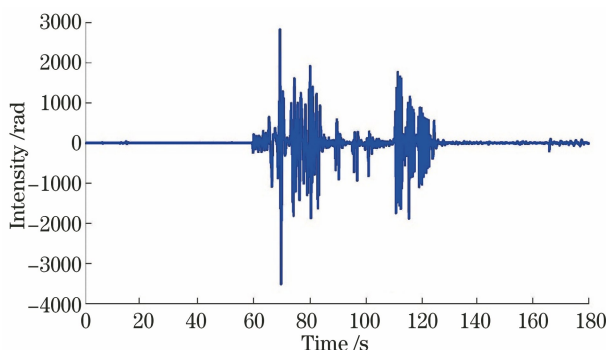


图 12 锚害模拟测得振动信号的时域波形
Fig. 12 Time domain waveform of vibration signal measured by anchor damage simulation

大于水流冲击所产生的波动。

3.4 讨论

海缆传输系统一般有上行和下行两条链路,下行的 RBS 从上行返回,反之亦然,海缆监测系统的两端协作过程如图 13 所示。对于损耗的测量,测量过程应分别覆盖两条链路,因此本文单跨损耗的测量距离为 127 km。对于外部扰动预警,只针对光缆而言,在两端握手后,只需对单跨距离的一半进行振动监测,即可覆盖整个链路。由于一端设备可以提供至少 71.9 km 的单端监测范围,因此在两端协同工作的情况下,本文单跨振动监测的覆盖距离可超

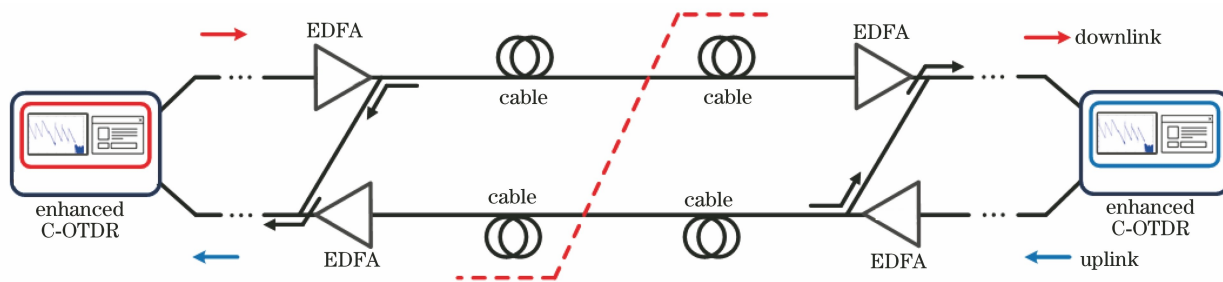


图 13 海缆监测系统的两端协作示意图
Fig. 13 Schematic of two-terminal cooperation of marine cable monitoring system

过 143.8 km。综上,本文提出的改进型 C-OTDR 系统可实现单跨覆盖 127 km 距离内振动和损耗的同步监测。在外场湖试环境中,改进型 C-OTDR 系统能够对峰值振动幅度达到 $\pm 73.5 \mu\epsilon$ 的动态应变进行实时的捕获与还原。

3.5 比较

将本文系统的性能与几个主流长距离 C-OTDR 和 Φ -OTDR 系统进行对比,对比结果如表 1 所示。从表 1 可以看到,除了文献[34],其他可用于当前海

缆监测的系统仍然只能实现损耗或者振动的单一参量测量,且部分系统借助了双向拉曼放大及混合分布式放大技术,这增加了系统的复杂性;文献[34]虽然能够实现损耗与振动的同步监测,但由于使用 OTDR 来探测,而且其传感距离仅为 70 km,已无法满足下一代多跨级联海缆监测的需求;对比可见,本文的改进型 C-OTDR 系统不仅单跨覆盖距离长,而且无需额外的放大技术,能够对故障进行预警,为新一代海缆在线监测系统提供可靠的技术手段。

表 1 长距离 C-OTDR 和 Φ -OTDR 传感系统的性能对比

Table 1 Performance comparison of long distance C-OTDR and Φ -OTDR sensing systems

No.	Year	Reference	Technology	Distance / km	Spatial resolution / m	Monitoring parameter
1	1995	Ref. [39]	C-OTDR	90.0	1000	Loss
2	2009	Ref. [10]	C-OTDR & logarithmic detection (LD)	100.0	1000	Loss
3	2014	Ref. [12]	Frequency-division-multiplexing (FDM)-COTDR	80.0	1000	Loss
4	2014	Ref. [23]	Bidirectional Raman amplification (BRA) & Φ -OTDR	131.5	8	Vibration
5	2014	Ref. [24]	Hybrid distributed amplification (HAD) & Φ -OTDR	175.0	25	Vibration
6	2016	Ref. [5]	C-OTDR	180.0	1000	Vibration
7	2016	Ref. [34]	OTDR & Φ -OTDR	70.0	10	Loss, vibration
8	2019	Ref. [21]	Direct detection(DD) Φ -OTDR	102.7	15	Vibration
9	2021	This work	C-OTDR & Φ -OTDR	127.0	100	Loss, vibration

4 结 论

本文提出一种改进型 C-OTDR 系统,该系统具备同时测量损耗和监测振动的能力。以幅度强弱作为判断依据,采用提出的偏振分集幅度的最优选择算法在 P 偏振态和 S 偏振态之间切换进行相位提取,实现对外部扰动事件的精准重构。实验结果表明,本文所设计的改进型 C-OTDR 系统具有同时测量损耗和监测扰动事件的能力,其单跨覆盖范围达到 127 km。

参 考 文 献

- [1] Nielsen W. Submarine telecoms industry report [J]. Submarine Telecoms Forum, 2017/2018, (6): 28-29.
- [2] TeleGeography. Submarine cable frequently asked questions [EB/OL]. (2021-02-01) [2021-02-15]. <https://www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions>. TeleGeography. 海底电缆常见问题 [EB/OL]. (2021-02-01) [2021-02-15]. <https://www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions>.
- [3] Winston Q. Next generation submarine network-innovative repeater technology [EB/OL]. (2020-09-

18) [2021-02-15]. <https://www.submarinenetworks.com/en/insights>.

邱文斯顿. 下一代海底网络—创新的中继器技术 [EB/OL]. (2020-09-18) [2021-02-15]. <https://www.submarinenetworks.com/en/insights>.

- [4] Fan X M, Wang Y J, Wang G L, et al. Foresight on real-time monitoring system for submarine optical fiber cables based on fiber sensing technology [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 341/342: 1089-1093.
- [5] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, et al. Ultra-long fully distributed optical fiber sensor based on Rayleigh scattering effect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0700002.
- [6] King J, Smith D, Richards K, et al. Development of a coherent OTDR instrument [J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(4): 616-624.
- [7] Zhu B, Ding T Q. On-line supervision for undersea optical fiber system and technique of coherent optical time-domain reflectometer [J]. Jiangsu Communication Technology, 2001, 17(6): 27-30.
- [8] Hicke K, Krebber K. Towards efficient real-time

张旭苹, 张益昕, 王峰, 等. 基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0700002.

King J, Smith D, Richards K, et al. Development of a coherent OTDR instrument [J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(4): 616-624.

Zhu B, Ding T Q. On-line supervision for undersea optical fiber system and technique of coherent optical time-domain reflectometer [J]. Jiangsu Communication Technology, 2001, 17(6): 27-30.

诸波, 丁铁骑. 海底光缆在线监测与相干光时域反射仪技术 [J]. 江苏通信技术, 2001, 17(6): 27-30.

Hicke K, Krebber K. Towards efficient real-time

- submarine power cable monitoring using distributed fibre optic acoustic sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 1032390.
- [9] Kui X F, Wu X Z. Application of COTDR technology in submarine cable monitoring [J]. Information & Communications, 2017, 30(8): 4-6.
隗小斐, 吴学智. COTDR 技术在海光缆监测中的应用[J]. 信息通信, 2017, 30(8): 4-6.
- [10] Feng Z Y, Qiu S F, Wei Y J, et al. Coherent OTDR used for fibre faults detection [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7634: 763416.
- [11] Otani T, Horiuchi Y, Kawazawa T, et al. Fault localization of optical WDM submarine cable networks using coherent-optical time-domain reflectometry [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(7): 1000-1002.
- [12] Toge K, Iida H, Ito F. Over 10, 000-km recirculating measurement with frequency-coded coherent OTDR [C] // 2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology, July 6-10, 2014, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE Press, 2014: 380-382.
- [13] Furukawa S, Tanaka K, Koyamada Y, et al. High dynamic range coherent OTDR for fault location in optical amplifier systems[C]//Conference Proceedings 10th Anniversary IMTC/94 Advanced Technologies in I & M 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 10-12, 1994, Hamamatsu, Japan. New York: IEEE Press, 1994: 106-109.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Lu L D, Song Y J, 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.
- [17] Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research progress of Φ -OTDR distributed optical fiber acoustic sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130005.
马皓钰, 王夏霄, 马福, 等. Φ -OTDR 型分布式光纤声波传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130005.
- [18] Dong X H. Research on the submarine optical cable disturbance monitoring system based on φ -OTDR technology [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2016(3): 32-33, 38.
董向华. 基于 φ -OTDR 技术的海缆扰动监测系统的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2016(3): 32-33, 38.
- [19] Lü A Q, Li J. On-line monitoring system of 35 kV 3-core submarine power cable based on φ -OTDR [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 273: 134-139.
- [20] Li S Q, Wu X Z, Yu B. Application research of φ -OTDR in submarine optical cable disturbance monitoring [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2018(2): 31-33, 40.
李少卿, 吴学智, 余贝. φ -OTDR 在海底光缆扰动监测中的应用研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2018(2): 31-33, 40.
- [21] Uyar F, Onat T, Unal C, et al. A direct detection fiber optic distributed acoustic sensor with a mean SNR of 7.3 dB at 102.7 km [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 19178269.
- [22] Shan Y Y. The key technology research of distributed optical fiber vibration sensor based on Φ -OTDR [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019: 42-51.
单媛媛. 基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动传感系统关键技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2019: 42-51.
- [23] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines [J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [24] Wang Z N, Zeng J J, Li J, et al. Ultra-long phase-sensitive OTDR with hybrid distributed amplification [J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5866-5869.
- [25] Williams E F, Fernández-Ruiz M R, Magalhaes R, et al. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 5778.
- [26] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing [J]. Science, 2019, 366(6469): 1103-1107.
- [27] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C] // 2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011: 12784624.
- [28] 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.
- [29] Wojcik A K. Signal statistics of phase dependent optical time domain reflectometry[D]. Texas: Texas A&M University, 2006.
- [30] 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.
- [31] Song Y, Lu L, Zhang X. A novel multi-frequency coherent OTDR for fast fading noise reduction[C]// *Optical Fiber Communication Conference & Exposition*, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 12760747.
- [32] 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.
- [33] Zabihi M, Chen Y S, Zhou T, et al. Continuous fading suppression method for Φ -OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(14): 3602-3610.
- [34] Zhang X P, Qiao W Y, Sun Z H, et al. A distributed optical fiber sensing system for synchronous vibration and loss measurement[J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, 12(5): 375-378.
- [35] Zhang X P, Wang Q, Xiong F, et al. Performance enhancement method for phase-sensitive optical time-domain reflectometer system based on suppression of fading induced false alarms[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(4): 046101.
- [36] Sumida M, Imai T, Furukawa S. Fault location on optical amplifier submarine systems[C]// *Conference Proceedings 10th Anniversary IMTC/94 Advanced Technologies in I & M*. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technolgy Conference, May 10-12, 1994, Hamamatsu, Japan. New York: IEEE Press, 1994: 110-113.
- [37] He C B, Wu X Z, Kui X F. Principle and research progress of Φ -OTDR-based disturbance monitoring technology for submarine optical cables [J]. *Communications Technology*, 2019, 52(9): 2067-2073.
何成波, 吴学智, 隗小斐. 基于 Φ -OTDR 的海光缆扰动监测技术原理及研究进展[J]. *通信技术*, 2019, 52(9): 2067-2073.
- [38] Shore K A. An introduction to distributed optical fibre sensors, by A. H. Hartog [J]. *Contemporary Physics*, 2018, 59(1): 82-83.
- [39] 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.
- [40] Liu Q, Wang Y S, Dong L, et al. Numerical analysis on vibration of marine propeller[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2016, 28: 17-23.
- [41] Zeng Z B, Ding E B, Tang D H. Ship propeller design optimization based on BP neural network and genetic algorithm [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2010, 14(Z1): 20-27.
曾志波, 丁恩宝, 唐登海. 基于 BP 神经网络和遗传算法的船舶螺旋桨优化设计[J]. *船舶力学*, 2010, 14(Z1): 20-27.
- [42] Zheng X L, Huang S, Wang C. Study of precision of steady hydrodynamic performance prediction of propeller of based on CFD [J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 36(12): 11-15.
郑小龙, 黄胜, 王超. 基于 CFD 的螺旋桨定常水动力性能预报精度研究[J]. *舰船科学技术*, 2014, 36(12): 11-15.
- [43] Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Recent progress in fiber-optic hydrophones [J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 109-122.