

文章编号 1004-924X(2023)10-1432-11

光纤传感用于海缆扰动探测的试验研究

邢炜光*, 赵赞善, 邢 锰, 甘维明, 李光炬

(中国科学院声学研究所南海研究站, 海南海口 570105)

摘要:海缆是海缆基础设施供电和通信的关键载体,海缆监测对于保障海缆基础设施安全稳定运行具有重要工程意义。针对海缆扰动监测需求开展海缆扰动探测试验研究。首先,搭建基于分布式光纤传感技术的海缆扰动探测试验系统,并接入南海深海海底观测网试验系统海缆暗光纤进行扰动探测试验,试验结果表明本系统能够有效探测铁锹拍击、车辆振动、海水冲刷及台风影响引起的海缆扰动。然后,根据海缆光纤瑞利背向散射(Rayleigh Backscattering, RBS)幅度信号特征,提出一种基于双向长短期记忆(Bidirectional Long Short-Term Memory, BiLSTM)神经网络的海缆扰动定位方法,本方法以海缆光纤RBS幅度信号的谱熵和瞬时频率作为特征参量输入,使用海缆光纤RBS幅度信号样本对本方法进行测试,结果表明本方法对海缆沿线扰动信号和非扰动信号的平均检测准确率高于99.6%。将海缆扰动探测试验系统与海缆扰动定位方法结合应用于海缆监测可有效探测海缆沿线扰动。

关键词:分布式光纤传感;海缆扰动探测试验;扰动定位方法

中图分类号: TN818;P75 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233110.1432

Experimental research on submarine cable disturbance detection with optical fiber sensing

XING Weiguang*, ZHAO Zanshan, XING Meng, GAN Weiming, LI Guangju

(Hainan Acoustics Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Haikou 570105, China)

* Corresponding author, E-mail: xwg@mail.ioa.ac.cn

Abstract: Submarine cables are key carriers of electrical power and communication signals in submarine cable infrastructure, and the monitoring of such cables is essential to ensure the safety and stable operation of submarine cable infrastructure. In this study, experimental research on the detection of submarine cable disturbances was conducted according to the requirements of submarine cable monitoring. First, a submarine cable disturbance detection experimental system based on distributed optical fiber sensing technology was built and coupled to the dark fiber of the seafloor observation network in the South China Sea. Experiments were performed, and the results indicated that submarine cable disturbances induced by spade beating, vehicles, ocean waves, and typhoons could be detected by the proposed system. Following this, a submarine cable disturbance localization method based on the bidirectional long short-term memory neural network in terms of the submarine cable Rayleigh backscattering (RBS) amplitude signal features was developed, and its input features included the spectral entropy and instantaneous frequency of the submarine cable fiber RBS amplitude signal. These submarine cable fiber RBS amplitude signal samples were used to

收稿日期:2022-11-07;修订日期:2022-12-07.

基金项目:海南省重大科技计划资助项目(No. ZDKJ2020010);海南省重点研发计划资助项目(No. ZDYF2020201)

test the detection accuracy of the proposed method, and the results indicated that the average detection accuracy of disturbance and non-disturbance signals along the submarine cable was $>99.6\%$. Thus, disturbances along submarine cables can be effectively detected with the combination of the proposed submarine cable disturbance detection experimental system and the proposed disturbance localization method.

Key words: distributed optical fiber sensing; submarine cable disturbance detection experiment; disturbance localization method

1 引 言

海底光电复合缆(简称“海缆”)是海缆基础设施供电和通信的关键媒介,在长期运行过程中面临着诸多安全威胁,主要包括船锚或渔网钩挂和拖拽、洋流冲刷及海底地形变化等因素破坏,造成海缆绝缘性能下降、短路和断路故障。南海海域某海底海缆被渔网缠绕拖拽引起钢丝铠装断裂、聚乙烯绝缘层破损进而导致绝缘击穿,事故发生后经海底路由巡查发现受损坏段海缆路由被渔网缠绕拖拽偏离原布放路由位置接近 300 m。使用海缆工程中常用的海缆电学故障测试仪 Tinsley5910 和光时域反射仪(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)对该海缆进行测试均无法准确定位故障位置,其局限性在于:(1) Tinsley5910 用于测试海缆系统的回路电阻 R_1 ,海水阻值忽略不计,则海缆绝缘故障位置 $L=R_1/R_2$ (R_2 为海缆出厂时的导体电阻系数)。当海缆绝缘层尚未完全击穿、缆沿线有多个绝缘异常点以及海缆系统接地阻值波动变化时, R_1 的实测值波动较大,此次海缆故障期间使用 Tinsley5910 测试得到的故障位置与实际故障路由位置偏差超过了 20km,故无法准确计算故障位置;(2) OTDR 故障定位的前提是海缆光纤发生严重折弯或存在断裂面。由于光纤位于海缆轴心位置,具有多层防护且具有冗长,因此当海缆受船锚或渔网钩挂拖拽使缆体弯曲或绝缘击穿时,光纤受到的影响较小,无法通过 OTDR 进行故障定位。如果没有采取有效的技术手段监测海缆故障信息,那么后期一般只能通过岸基站向海缆导体持续加载特定频率电流,施工船在海上布放搭载有 TSS350 系统探头的水下机器人下潜到海底,贴近海床沿着海缆路由搜寻故障点^[1-3],施工难度大、周期长、费用高。

基于相位敏感型光时域反射仪(Phase-sensi-

tive Optical Time Domain Reflectometer, φ -OTDR)的分布式光纤扰动传感技术较早由 Taylor 等人提出,在不改变光纤物理结构的前提下将光纤等效为一系列反射镜,光纤沿线扰动引起的光纤瑞利背向散射(Rayleigh Backscattering, RBS)变化信息经由对应反射镜反射回光纤首端,通过解调判定是否存在扰动并定位扰动位置^[4]。分布式光纤扰动传感技术具有监测距离长、灵敏度高、定位精度高等优势^[5-6],将其应用于海缆扰动监测是近些年来海缆监测领域的研究热点之一。董向华通过试验验证了基于 φ -OTDR 技术的海缆扰动监测系统可对船锚落锚和钩挂拖拽引起的海缆扰动的预警和定位^[7]。汪洋等人向有绝缘缺陷的海缆注入高压脉冲使其发生击穿,采用基于 φ -OTDR 技术的海缆振动监测系统采集绝缘击穿时的信号并进行时频分析,实现对海缆绝缘击穿振动的检测和定位^[8]。Lv A 等人将基于 φ -OTDR 的光纤振动监控系统接入 35 kV 三芯海缆光纤并开展外力振动探测实验,分析了海缆无外力入侵、船锚在海缆敷设路由附近落锚和拖行三种场景下海缆的扰动能量、幅度差异^[9]。Ali Masoudi 等人将基于 φ -OTDR 技术的分布式光纤振动传感系统接入 XLPE 海缆进行冲击和循环弯曲试验,定量计算 XLPE 海缆受冲击和循环应力作用时的应变位置及其应变水平^[10]。Nathaniel J. Lindsey 等人将分布式声波传感系统接入美国 Monterey Accelerated Research System (MARS)海底观测网海缆暗光纤,采集海缆扰动信息,研究和分析了台风期间海底沉积物迁移和潮水涌动对海缆造成的扰动规律^[11]。张旭幸等人设计了一种融合 φ -OTDR 和相干光时域反射仪的海缆在线监测系统,并有效监测到水流冲击和锚害拖拽海缆事件^[12]。

目前,国内关于较深水域(水深 >100 m)填埋海缆的扰动监测试验和应用鲜有报道。本文

将基于分布式光纤传感的扰动探测系统接入南海深海海底观测网海缆,开展海缆扰动探测试验和扰动定位方法设计研究。海缆扰动探测试验结果表明本系统能够探测近、远岸端由车辆、海浪和台风引起的扰动。通过海缆扰动和非扰动信号样本对海缆扰动定位方法进行测试,测试结果表明海缆扰动定位方法具有较高的准确率,可用于海缆监测实现外力入侵扰动的准确检测和定位。

2 海缆扰动探测试验系统

2.1 分布式光纤扰动传感原理

在基于直接探测型 φ -OTDR 的分布式光纤扰动传感结构中,光纤等效为一系列空间长度相等的反射镜。在一个脉冲宽度内,光电探测器探测距离传感光纤首端 $m\Delta L$ 处的 RBS 干涉场 E_{RBS} 可表示为^[4]:

$$E_{\text{RBS}}(m\Delta L) = E_0 \sum_{k=m}^{m+N-1} P_k r_k \exp(j(\theta_k + \varphi_k)) e^{-\alpha k \Delta L}, \quad (1)$$

其中: E_0 为入射光幅度, r_k , φ_k 和 P_k 分别第 k 个反射镜的反射率、相位和偏振。 θ_k 是第 k 个反射镜因扰动引起的相位变化, α 和 ΔL 分别是传输衰减

系数和单个反射镜的空间长度, N 为单位空间分辨率内的反射镜数量。当光纤受到外力扰动时, θ_k 将发生变化, 导致 E_{RBS} 的值也发生相应的变化, 通过分析 E_{RBS} 的变化可实现光纤沿线上的扰动探测。

2.2 海缆扰动探测系统搭建

本文搭建的海缆扰动探测试验系统基于直接探测型 φ -OTDR 结构, 超窄线宽激光源(中心波长 1 550.12 nm, 线宽 3 kHz, 输出功率约 13 dBm)输出的连续光被声光调制器(工作波长 1 530~1 565 nm, 频移 200 MHz)调制成脉冲光, 经掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大和滤波器滤波后经由光环形器进入海缆光纤, 海缆光纤的 RBS 幅度信号朝着光环形器传输, 拉曼放大器(工作波长 1 450 nm, 输出功率约 25 dBm)用于对 RBS 幅度信号进行放大, RBS 幅度信号经过光环形器后被 EDFA 放大和滤波器滤波, 再被光电探测器转换后由高速采集卡(通道位数 16 bit, 采样率设置为 10 MS/s)采集并输出到工控机进行计算。有外力扰动海缆时, 对应位置光纤的 RBS 幅度信号将受外力扰动发生变化, 通过对海缆对应位置光纤的 RBS 幅度信号进行时频分析可定性探测扰动信号。

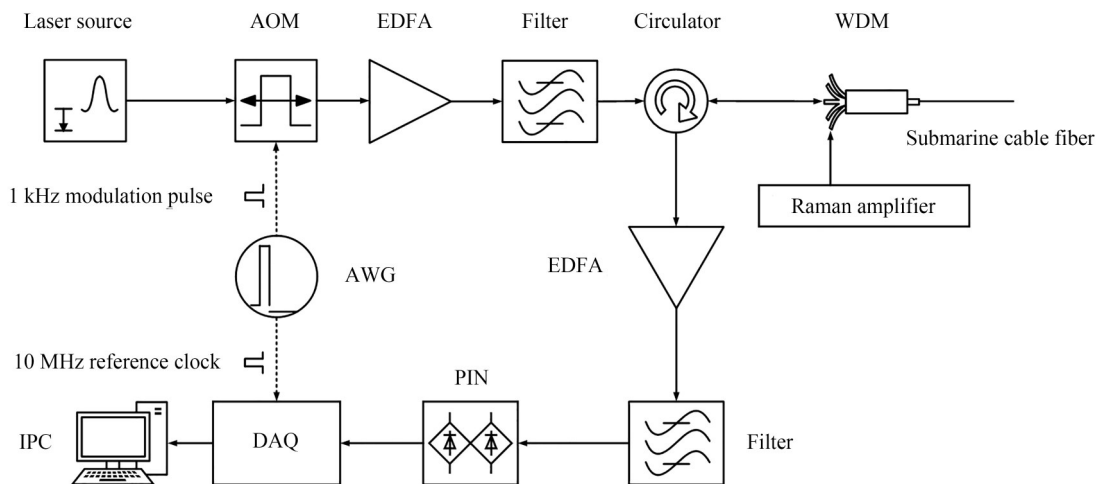


图 1 海缆扰动探测试验系统结构

Fig. 1 Submarine cable disturbance detection experimental system structure

海缆扰动探测试验研究依托南海深海海底观测网试验系统平台开展,南海深海海底观测网试验系统以海南为登陆岸基站,通过 150 km 的

海底光电复合海缆连接深海海底系列科学观测平台,用于观测海底地球物理、海底动力等数据,海缆布放最大水深 1 800 m^[13]。海缆结构(以双

铠装海缆为例)如图 2 所示,从外到内依次为外被层、钢丝铠装、聚乙烯(Polyethylene, PE)内护层、铜导体和不锈钢光纤单元,单模通信光纤位于海缆轴心位置。

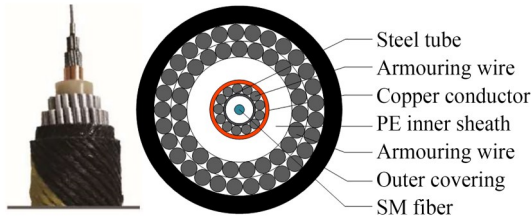


图 2 海缆结构

Fig. 2 Submarine cable structure

在海缆登陆岸基站内,将海缆扰动探测试验系统接入南海深海海底观测网试验系统海缆冗余暗光纤,在岸基站机房内搭建的试验环境如图 3 所示。由于接入对应的海缆光纤长度不超过 100 km,可设定系统模拟调制脉冲重复周期 1 kHz,根据奈奎斯特采样定理,系统的理论扰动探测频响范围为 0~500 Hz。海缆扰动探测试验过程中采用差分方法对海缆光纤 RBS 幅度信号进行处理,差分方法通过对相邻时域的海缆光纤 RBS 幅度信号帧进行差分计算,再利用阈值对差

分结果进行判断是否存在扰动,根据信号采样率和光纤有效折射率换算得到海缆扰动位置相对于岸基站的距离。



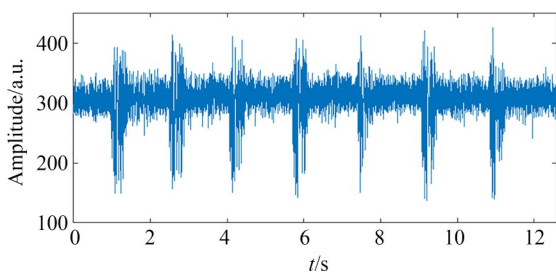
图 3 机房内搭建的试验环境

Fig. 3 Indoor experimental environment

3 海缆扰动探测试验

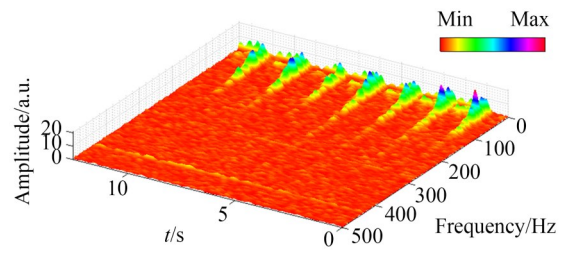
3.1 铁锹扰动

海缆登陆岸基站途经沙滩,距离岸基站约 450 m 处,海缆埋设于沙滩下约 1 m 深处。图 4 所示为试验人员手持铁锹拍击沙滩表面时系统探测到的海缆扰动时域信号和频谱,扰动频率范围约 0~175 Hz。



(a) 时域信号

(a) Disturbance time-domain signal induced by spade



(b) 频域信号

(b) Disturbance spectrum induced by spade

图 4 铁锹拍击沙面时的海缆扰动时域信号

Fig. 4 Disturbance signal of submarine cable as spade beat the beach surface

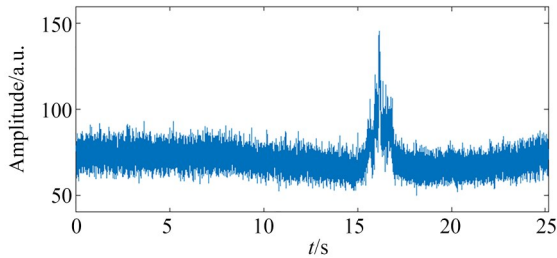
3.2 车辆扰动

海缆登陆岸基站途经公路,距离岸基站约 390 m 处,海缆位于公路下方深约 1 m 的缆道内。图 5 所示为不同车辆在不同时刻经过公路时系统探测到的海缆扰动时域信号和频谱。轿车在第

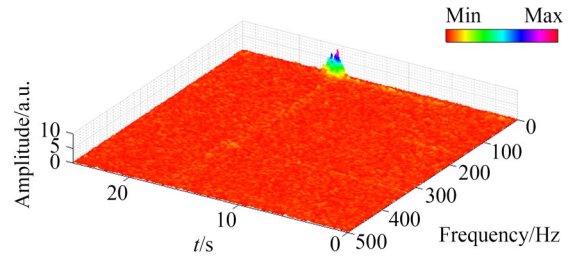
15 s 至第 17 s 经过,系统探测到的海缆扰动信号频率范围约为 0~20 Hz,最大扰动幅值约 145。环卫车在第 10 s 至第 14 s 经过,系统探测到的海缆扰动信号频率范围约为 0~40 Hz,最大扰动幅值约 260。公交车在第 3 s 至第 8 s 经过,系统探

测到的海缆扰动信号频率范围约为 0~100 Hz,

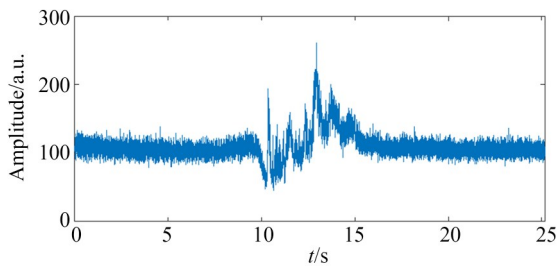
最大扰动幅值约为 500。



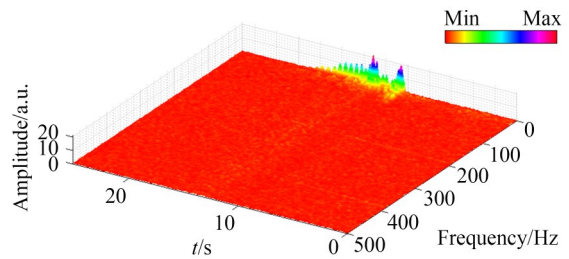
(a) 轿车引起的海缆扰动时域信号
(a) Disturbance time-domain signal induced by car



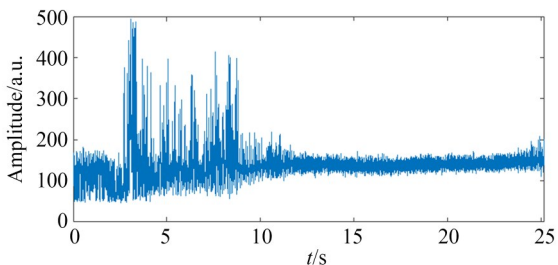
(b) 轿车引起的海缆扰动频谱
(b) Disturbance spectrum induced by car



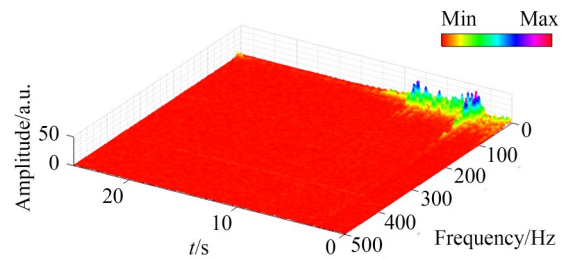
(c) 环卫车引起的海缆扰动时域信号
(c) Disturbance time-domain signal induced by sanitation truck



(d) 环卫车引起的海缆扰动频谱
(d) Disturbance spectrum induced by sanitation truck



(e) 公交车引起的海缆扰动时域信号
(e) Disturbance time-domain signal induced by bus



(f) 公交车引起的海缆扰动频谱
(f) Disturbance spectrum induced by bus

图 5 不同车辆经过引起的海缆扰动信号

Fig. 5 Disturbance signal of submarine cable induced by different vehicles

三种车辆的重量从大到小依次为公交车、环卫车、轿车,三种车辆经过时引起海缆扰动的剧烈程度从大到小依次为公交车、环卫车、轿车。此外,重量最大的公交车造成的海缆扰动频率范围最宽,环卫车次之,轿车最窄。

3.3 海水冲刷扰动

距离岸基站约 900 m 处,海缆位于沙滩和海水交界区域,此段海缆有套管保护并填埋在沙面下,随着涨潮和落潮,海浪来回冲刷进而扰动海缆。图 6 所示为系统在不同时刻探测到该位置海缆的扰动时域信号和频谱。2021 年 9 月 6 日 10:

29,海面较为平静时,海浪冲刷引起的海缆扰动频率范围约为 0~26 Hz。2021 年 10 月 13 日 12:53,受台风“圆规 KOMPASU”影响,海浪冲刷引起的海缆扰动程度比较剧烈,扰动频率范围约为 0~255 Hz。

3.4 台风影响

台风“圆规 KOMPASU”于 2021 年 10 月 12 日移入南海,13 日下午以台风级登陆海南省琼海市博鳌镇沿海。在台风“圆规 KOMPASU”影响和登陆期间,利用本文搭建的海缆扰动探测试验系统对海缆沿线扰动连续长时间观测,发现海缆

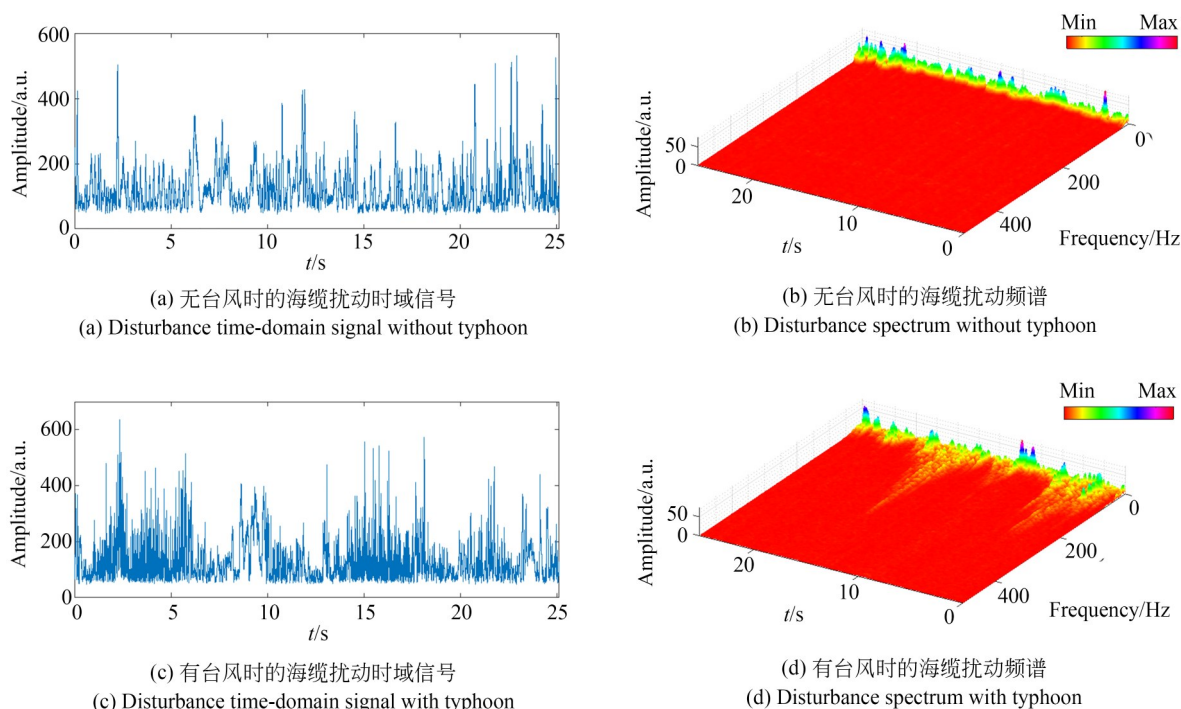


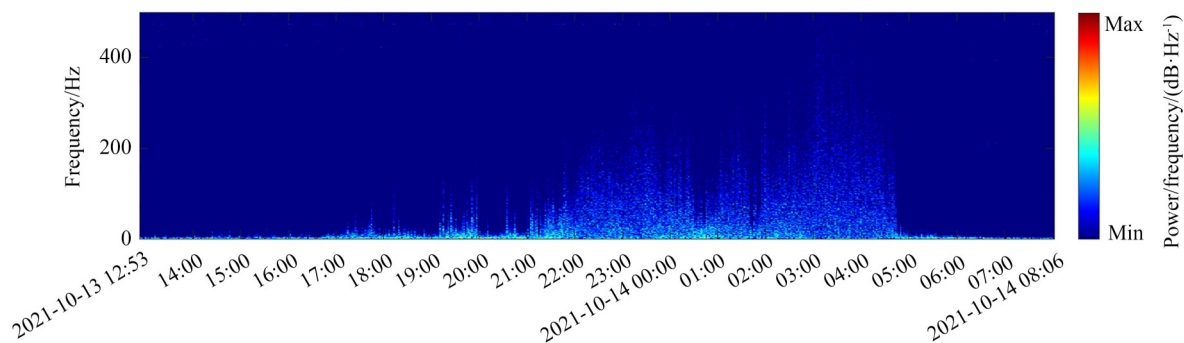
图 6 有台风和无台风时的海缆扰动信号(距离岸基站 900 m)

Fig. 6 Disturbance signal of submarine cable with and without typhoon (900 m from shore-based station)

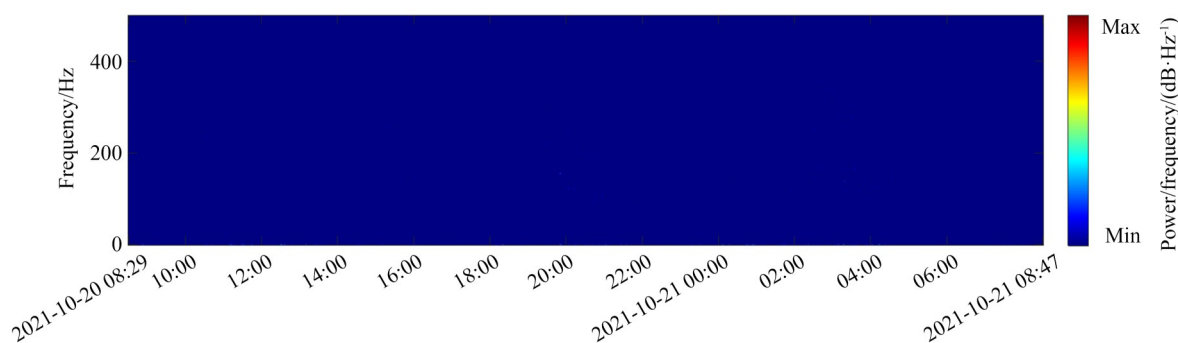
沿线出现多个明显扰动点,其中距离岸基站约 47 km(本系统实际计算为 46.94 km)的海缆扰动较为明显,对应的海平面位置处于台风“圆规 KOMPASU”七级风圈范围内,该位置海缆所处水深超过了 100 m 且具有一定填埋深度。为了对比有台风和无台风天气窗口该位置海缆的扰动差异,选取 3 个时间窗口该位置的海缆扰动监测数据进行对比,分别是 2021 年 10 月 13 日 12:53 至 2021 年 10 月 14 日 08:06(台风“圆规 KOM-

PASU”影响和登陆期)、2021 年 10 月 20 日 08:29 至 2021 年 10 月 21 日 08:47、2021 年 11 月 26 日 08:41 至 2021 年 11 月 27 日 09:53。图 7 所示为 3 个时间窗口内该位置海缆的扰动频谱,可见在台风影响下该位置的海缆扰动较为剧烈,而没有台风影响时该位置几乎无扰动。

我国地处太平洋西海岸,南海、北部湾和台湾海峡是热带气旋途经频繁海域^[14-15],海上热带气旋引起的海底浊流、沉积物流及海底滑坡等可

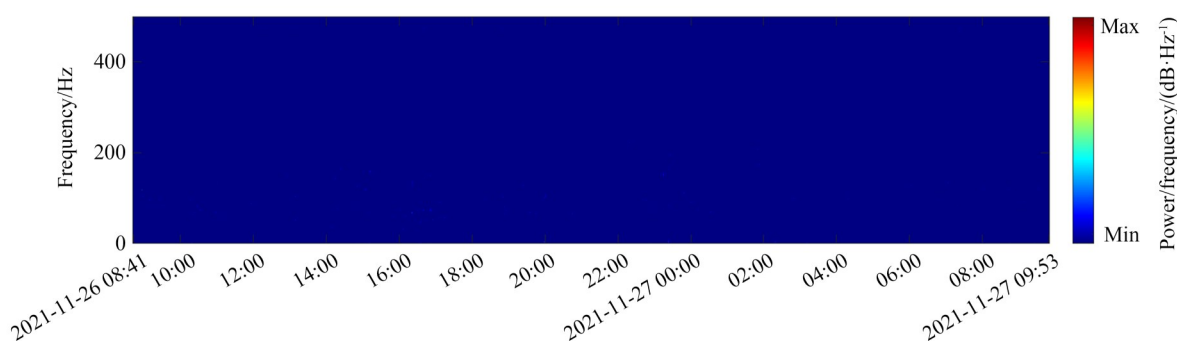


(a) 有台风时的海缆扰动频谱(2021年10月13日12:53至2021年10月14日08:06)
(a) Disturbance spectrum of submarine cable during typhoon (from 12:53, Oct 13, 2021 to 08:06, Oct 14, 2021)



(b) 无台风时的海缆扰动频谱(2021年10月20日08:29至2021年10月21日08:47)

(b) Disturbance spectrum of submarine cable without typhoon (from 08:29, Oct 20, 2021 to 08:47, Oct 21, 2021)



(c) 无台风时的海缆扰动频谱(2021年11月26日08:41至2021年11月27日09:53)

(c) Disturbance spectrum of submarine cable without typhoon (from 08:41, Nov 26, 2021 to 09:53, Nov 27, 2021)

图 7 有台风和无台风时的海缆扰动频谱(距离岸基站 47 km)

Fig. 7 Disturbance spectrum of submarine cable with and without typhoon (47 km from shore-based station)

造成海缆裸露在海床上,冲击磨损甚至损坏海缆^[16-18]。对海缆进行监测能够及时发现异常扰动位置,可为海缆路由巡检、冲埋回填等海缆运行维护作业提供有效的支撑信息。同时,将海缆扰动监测数据和船舶自动识别系统(AIS系统)数据结合,可作为海缆遭受船锚、渔网损坏的故障记录和取证的有效依据。

4 海缆扰动定位方法

海缆扰动探测试验采用光纤传感中常用的差分方法计算海缆扰动位置,虽然差分方法实现简单,但由于光纤RBS幅度信号随光纤长度增加呈指数衰减,相邻时域的海缆光纤RBS幅度信号帧差分后,差分结果对应的近岸端和远岸端的幅值分布差异较大,具体表现为近岸端有扰动时,对应差分幅值变化明显,而远岸端即使有强烈扰

动,对应差分幅值也比较小,这使得通过差分方法定位远岸端的海缆扰动位置相当困难。

基于分布式光纤传感的海缆扰动探测系统探测的光纤RBS信号多为非平稳信号,谱熵和瞬时频率分析是非平稳信号特征分析和提取的有效手段。本文在完成海缆扰动探测试验基础上,分析了扰动和非扰动海缆光纤RBS幅度信号的特征,经过对比发现扰动和非扰动海缆光纤RBS幅度信号的谱熵和瞬时频率具有明显差异。如图8所示,海缆受外力扰动时,对应位置的海缆光纤RBS幅度信号的谱熵和瞬时频率分布变化较为明显,其谱熵和瞬时频率的幅值与无扰动时相比更大,而无扰动时海缆光纤RBS幅度信号的谱熵和瞬时频率分布平坦,瞬时频率集中分布在10 Hz以下。因此,可将海缆光纤RBS幅度信号的谱熵和瞬时频率作为检测海缆是否受外力扰动的有效特征。

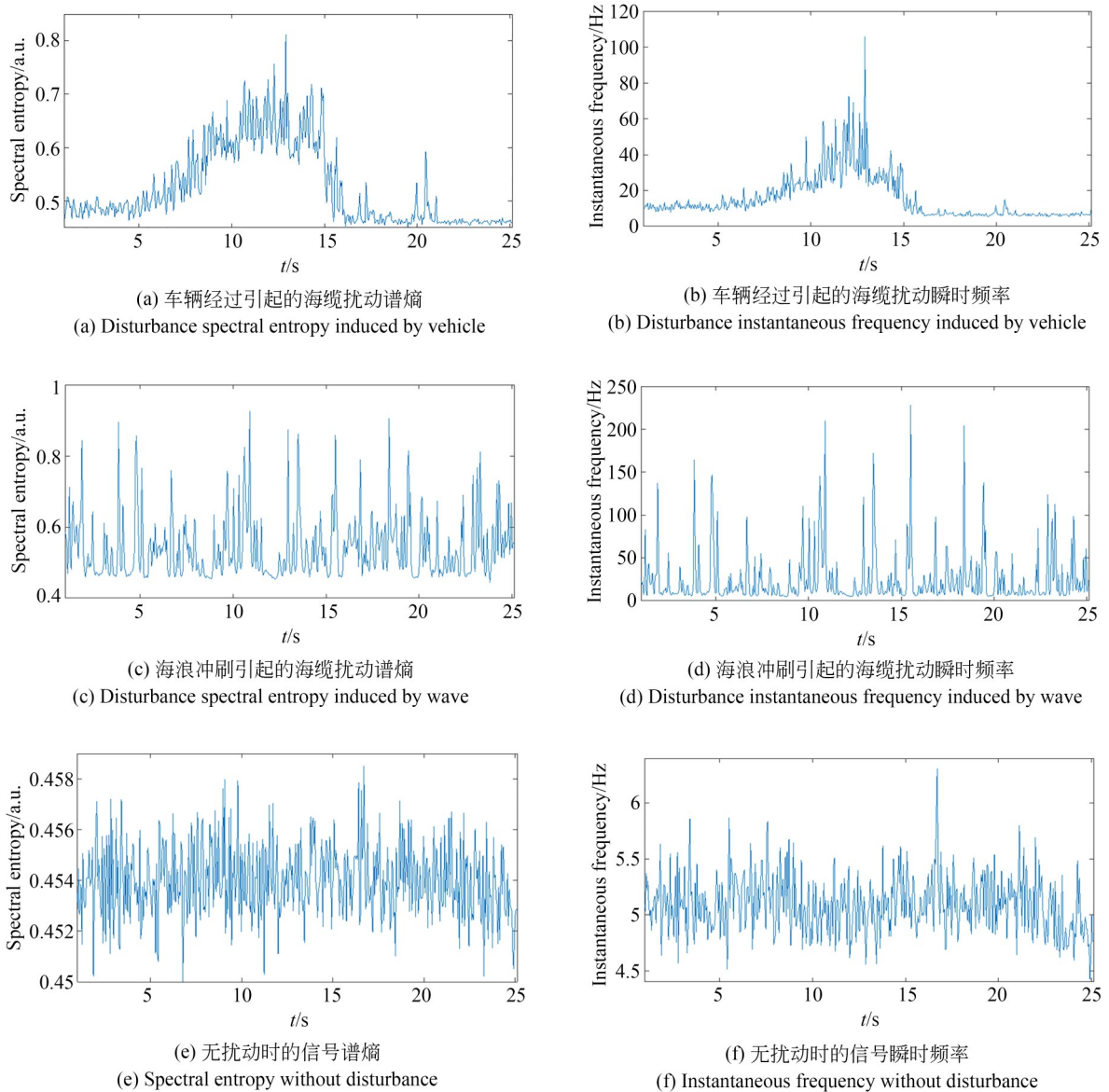


图 8 有扰动和无扰动时的谱熵和瞬时频率

Fig. 8 Spectral entropy and instantaneous frequency with and without disturbance

4.1 扰动检测神经网络设计

长短期记忆 (Long Short-Term Memory, LSTM) 网络架构可用于学习时间序列信息的时间步之间的长期相关性,是适用于对时间序列进行检测分类的循环神经网络架构^[19]。针对海缆光纤 RBS 幅度信号特征,本文提出一种以海缆光纤 RBS 幅度信号的谱熵和瞬时频率作为特征量、基于双向长短期记忆 (Bidirectional Long Short-Term Memory, BiLSTM) 神经网络的海缆扰动定位方法,用于准确检测海缆沿线有无外力扰动进而实现海缆扰动定位。

本文设计基于 BiLSTM 的扰动检测神经网络架构,如图 9 所示。特征序列输入层指定海缆光纤 RBS 幅度时域信号的谱熵和瞬时频率 2 个维度特征量。BiLSTM 层前向和后向检测时间序列,包含 100 个可用于从先前时间步获取输入序列特征的隐含单元,输出序列的最后一个元素。通过包含大小为 2 的全连接层,后跟 softmax 层和检测层指定输出扰动和非扰动 2 个分类。按照 1:1 比例分别选取 5 000 个扰动和非扰动样本对网络进行训练,所选训练样本均由海缆扰动探测试验期间获取的扰动和非扰动海缆光纤 RBS

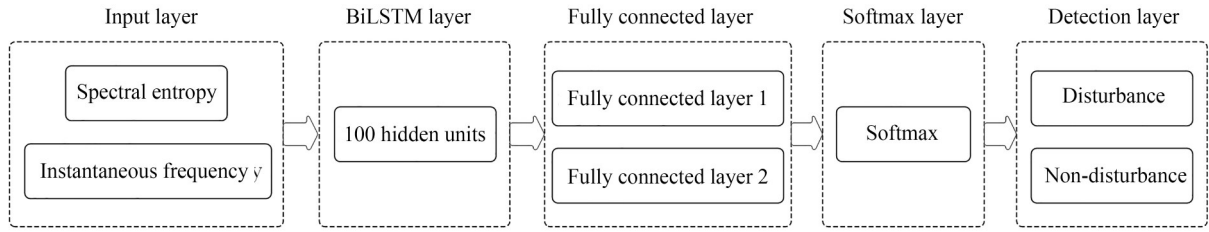


图9 基于BiLSTM的扰动和非扰动检测神经网络架构

Fig. 9 Disturbance and non-disturbance detection neural network architecture based on BiLSTM

幅度信号样本组成,单个训练样本对应的时间长度为 25 s。

4.2 基于BiLSTM网络的海缆扰动定位方法

在完成基于BiLSTM的扰动检测神经网络训练基础上,设计一种海缆扰动定位方法,用于对海缆沿线任意一点有无外力扰动进行检测从而实现海缆扰动定位,扰动定位方法计算流程如图10所示。首先对距离岸基站 D_n 处海缆光纤RBS幅度信号 $S(t)$ 进行去直流得到 $S_1(t)$,再进行滤波得到 $S_2(t)$ 。分别求取 $S_2(t)$ 的谱熵SE和瞬时频率IF,分别采用其均值和标准差进行标准化得到 SE_1 和 IF_1 ,将 SE_1 和 IF_1 串联得到2维特征向量对 $[SE_1, IF_1]$,最后将 $[SE_1, IF_1]$ 输入已训练好的BiLSTM扰动检测神经网络进行有无扰动检测并输出结果。

按照1:1比例分别挑选10 000个海缆扰动和

非扰动信号样本对本方法检测准确率进行测试,测试样本均由海缆扰动探测试验期间获取的扰动和非扰动海缆光纤RBS幅度信号组成,单个测试样本对应的时间长度为25 s。测试样本和测试结果如表1所示,选用近岸端1.0 km,6.75 km,6.96 km和远岸端45.92 km位置处的扰动样本进行扰动检测测试,扰动信号的检测准确率分别为98.9%,99.9%,100%和99.7%。选用近岸端0.2 km和远岸端45.9 km,46.0 km位置处非扰动的样本进行非扰动检测测试,非扰动信号的检测准确率分别为99.9%,99.9%和99.2%。因此,本方法对海缆近岸端和远岸端扰动信号的平均检测准确率约99.63%,对海缆近岸端和远岸端非扰动信号的平均检测准确率约99.67%,可见,本方法对海缆沿线扰动和非扰动信号的平均检测准确率高高于99.6%。

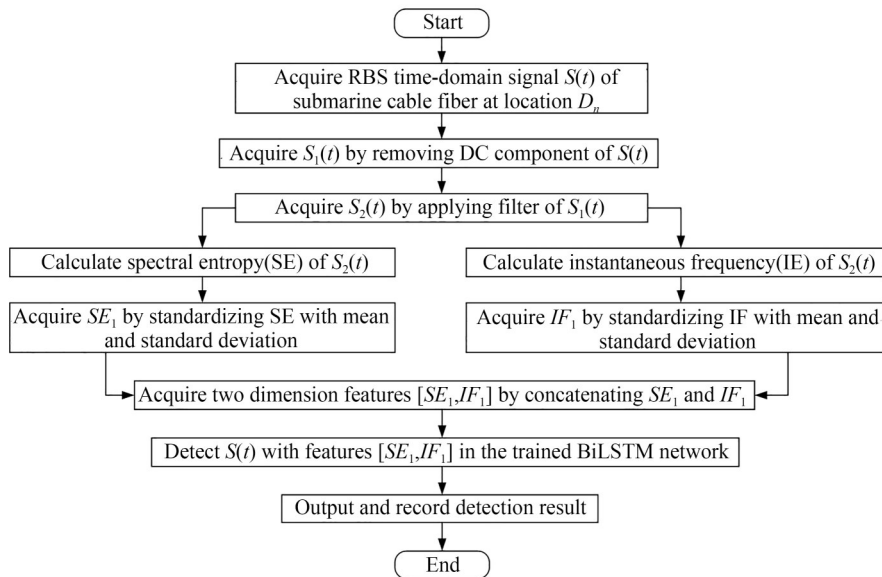


图10 基于BiLSTM网络的海缆扰动定位方法流程图

Fig. 10 Submarine cable disturbance localization method flow chart based on BiLSTM network

表 1 扰动和非扰动检测准确率测试

Tab. 1 Disturbance and non-disturbance detection accuracy test

Number of samples	Sample label	Distance offshore/km	Detection accuracy/%
2 000	disturbance	1.0	98.9
2 000	disturbance	6.75	99.9
2 000	disturbance	6.96	100
2 000	disturbance	45.92	99.7
3 300	non-disturbance	0.2	99.9
3 400	non-disturbance	45.90	99.9
3 300	non-disturbance	46.00	99.2

5 结 论

本文设计一种基于分布式光纤传感的海缆扰动探测试验系统,利用在运行的长距离埋设海缆开展扰动探测试验,验证了本系统可有效探测铁锹拍击、海水冲刷及车辆经过引起的扰动,甚至能够探测远岸端(离岸基站 47 km 处,水深超过 100 m)海缆受台风影响引起的扰动。在此基础上,针对海缆光纤 RBS 幅度

信号特征设计了一种基于 BiLSTM 神经网络的海缆扰动定位方法,选用海缆扰动探测试验期间获取的离岸基站不同距离的扰动和非扰动信号样本对本方法进行测试,结果表明本方法对海缆沿线扰动和非扰动信号的平均检测准确率高于 99.6%,可用于海缆沿线扰动的准确定位。将本文设计的海缆扰动探测试验系统和扰动定位方法结合可用于海缆外力入侵监测。

参考文献:

- [1] 高红武. TSS 350 系统在海缆探测中的应用[J]. 中国高科技, 2020(2): 65-66.
GAO H W. Application of TSS 350 system in submarine cable detection [J]. *China High and New Technology*, 2020(2): 65-66 (in Chinese)
- [2] ZHANG J L, XIANG X B, LI W J. Advances in marine intelligent electromagnetic detection system, technology, and applications: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(5): 4312-4326.
- [3] CHO G R, LEE M J, KANG H, *et al.* Evaluation of underwater cable burying ROV through sea trial at East Sea [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(2): 9658-9663.
- [4] PARK J, LEE W K, TAYLOR H F. Fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time-domain reflectometer using coherent interference of rayleigh backscattering [C]. *Proc SPIE 3555, Optical and Fiber Optic Sensor Systems*, 1998, 3555: 49-56.
- [5] 蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 分布式光纤声波传感技术研究进展[J]. 应用科学学报, 2018, 36(1): 41-58.
CAI H W, YE Q, WANG ZH Y, *et al.* Progress in research of distributed fiber acoustic sensing techniques [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2018, 36(1): 41-58. (in Chinese)
- [6] 田曼伶, 刘东辉, 曹晓敏, 等. 相位敏感光时域反射仪的信号处理方法综述[J]. 光学精密工程, 2021, 29(9): 2189-2209.
TIAN M L, LIU D H, CAO X M, *et al.* Signal processing methods of phase sensitive optical time domain reflectometer: a review [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(9): 2189-2209. (in Chinese)
- [7] 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.
DONG X H. Research on submarine cable disturbance monitoring system based on φ -OTDR technology [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2016(3): 32-33, 38. (in Chinese)
- [8] 汪洋, 李捍平, 林晓波, 等. 基于分布式光纤振动传感的海底电缆绝缘击穿故障检测[J]. 电线电缆, 2018(1): 31-34.
WANG Y, LI H P, LIN X B, *et al.* Detection of submarine power cable insulation breakdown based on distributed optical fiber vibration sensor [J]. *Elec-*

- tric Wire & Cable*, 2018(1): 31-34. (in Chinese)
- [9] LV A, 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.
- [10] MASOUDI A, PILGRIM J A, NEWSON T P, *et al.* Subsea cable condition monitoring with distributed optical fiber vibration sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1352-1358.
- [11] 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.
- [12] 张旭芊, 陈晓红, 梁蕾, 等. 长距离海缆在线监测改进型 C-OTDR 系统[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306001.
ZHANG X P, CHEN X H, LIANG L, *et al.* Improved C-OTDR system for on-line monitoring of long-distance submarine cables[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306001. (in Chinese)
- [13] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(3): 321-330.
LI F H, LU Y G, WANG H B, *et al.* Research progress and development trend of seafloor observation network[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 321-330. (in Chinese)
- [14] XIANG B, DONG X N, LI Y H. Climate change trend and causes of tropical cyclones affecting the South China Sea during the past 50 years[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, 13(11): 1-7.
- [15] 殷成团, 张金善, 熊梦婕, 等. 我国南海沿海台风及暴潮灾害趋势分析[J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(1): 35-42.
YIN CH T, ZHANG J SH, XIONG M J, *et al.* Trend analysis of typhoon and storm surge disaster on the South China Sea coast of China[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(1): 35-42. (in Chinese)
- [16] POPE E L, TALLING P J, CARTER L, *et al.* Damaging sediment density flows triggered by tropical cyclones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 458: 161-169.
- [17] GAVEY R, CARTER L, LIU J T, *et al.* Frequent sediment density flows during 2006 to 2015, triggered by competing seismic and weather events: Observations from subsea cable breaks off southern Taiwan [J]. *Marine Geology*, 2017, 384: 147-158.
- [18] ALAZRI A S. Telecommunication Traffic Through Submarine Cables: Security and Vulnerabilities[C]. 2016 11th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (IC-ITST). 5-7, 2016, Barcelona, Spain. IEEE, 2017: 372-375.
- [19] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780.

作者简介:



邢炜光(1989—),男,海南乐东人,硕士,助理研究员,2011年、2014年于南京理工大学分别获得学士学位、硕士学位,主要从事光纤传感和信号处理方面的研究。E-mail: xwg@mail.ioa.ac.cn