

## 光纤干涉式海底地震海啸监测系统的研制与布放

于 森<sup>1</sup>, 何禹潼<sup>1\*</sup>, 杨 悦<sup>2</sup>, 张崇富<sup>1</sup>, 吴崇坚<sup>3</sup>, 程立耀<sup>3</sup>, 孔 谦<sup>1</sup>

- (1. 电子科技大学中山学院 电子信息学院, 广东 中山 528402;
2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130012;
3. 珠海任驰光电科技有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘 要:** 研制了基于光纤干涉技术的海底地震海啸监测系统, 并布放在海南省万宁市的国家海洋局乌场海洋环境监测站附近海域。研制的三分量光纤干涉地震计谐振频率大约 250 Hz, 灵敏度达到 57 dB (0 dB 代表 1 rad/g), 工作频率范围 0.005~50 Hz, 最小可探测振动加速度 43.4 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ; 光纤干涉水位计测量精度达到  $\pm 1$  cm, 测量范围 0~110 m。系统自 2017 年 10 月完成布放, 已经连续工作超过 4 年, 并在长期运行过程中记录地震和实时水位数据。从 2018 年 1 月到 2021 年 12 月, 在系统运行期间, 东北亚地区发生里氏 6.0 级以上地震共计 60 余次, 其中 39 次被系统成功监测, 例如, 给出了印度尼西亚苏拉威西附近海域发生的里氏 6.8 级以上地震的详细测量结果。文中报告了与这项工作相关的规划、设计、制造、实验室测试、海上安装、观测、数据采集和分析。介绍了系统布放过程, 描述了地震计和水位计的工作原理, 给出并分析了典型的地震记录和同期的水位监测记录。

**关键词:** 光纤干涉仪; 光纤干涉水位计; 海底地震海啸监测系统; 三分量光纤干涉地震计

**中图分类号:** TP212.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220111

## Development and installation of fiber optic interferometric seafloor seismic and tsunami monitoring system

Yu Miao<sup>1</sup>, He Yutong<sup>1\*</sup>, Yang Yue<sup>2</sup>, Zhang Chongfu<sup>1</sup>, Wu Chongjian<sup>3</sup>, Cheng Liyao<sup>3</sup>, Kong Qian<sup>1</sup>

- (1. School of Electronic Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan Institute, Zhongshan 528402, China;
2. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;
3. Zhuhai Pegasus Optoelectronics Technology Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** A seafloor seismic and tsunami monitoring system based on fiber optic interferometric technology was developed and installed in the nearby waters at China's State Oceanic Administration's (SOA's) Wuchang (Hainan Province, China) monitoring site. The developed tri-component version of fiber optic interferometric seismometer had a resonance frequency of about 250 Hz, a sensitivity of 57 dB (0 dB represents 1 rad/g), with the operation frequency range of 0.005-50 Hz and the minimum detectable vibration acceleration of 43.4 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , while the fiber optic interferometric water level monitor has an accuracy of  $\pm 1$  cm, a measurement range of 0-110 m. The system had been operating well more than 4 years since October, 2017, and earthquakes as well as real-time water levels had been recorded during the long-term field trial. From January in 2018 to December in

收稿日期: 2022-02-17; 修订日期: 2022-03-11

基金项目: 广东省普通高校青年创新人才项目 (2018KQNCX332); 广东省引进领军人才计划 (00201507); 广东省教育厅创团项目 (2018 KCXTD033); 中山市社会公益科技研究项目 (2018B1021, 2020B2018); 在渝高校与中国科学院所属院所合作项目 (HZ2021014)

作者简介: 于森, 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术及其数据处理。

通讯作者: 何禹潼, 女, 讲师, 博士, 主要从事信息化管理系统方面的研究。

2021, there were over 60 earthquakes with ML6.0+ in Northeast Asia area, and 39 earthquakes were recorded by our system. As an example, the detailed measurement results about the ML6.8+ earthquake in adjacent waters of the Sulawesi, Indonesia were given. In this paper, we reported on the planning, design, fabrication, laboratory tests, sea installation, observation, data acquisition, and analysis associated with this effort. The system installation process was introduced, the working principle of the seismometer and water level monitor was described, and the typical recorded earthquake and real-time water level monitoring data were presented and analyzed.

**Key words:** fiber optic interferometer; fiber optic interferometric water level monitor; seafloor seismic and tsunami monitoring system; tri-component fiber optic interferometric seismometer

## 0 引言

我们生活的地球其实是一个名副其实的“水星”，海洋覆盖面积超过了地球表面的 70%。海洋在地球的气候变化，以及水、二氧化碳、氮气的循环过程中发挥着重要作用，给地球上各种生命的孕育提供了必要元素。另一方面，各种海洋灾害，例如海啸、风暴潮、巨浪等，也给海洋生态系统和沿海地区带来灾难性后果。随着遥感技术的不断发展，海底地震海啸监测系统已经越来越多地引起关注<sup>[1-2]</sup>。从地质构造上讲，日本岛位于欧亚板块和北美板块的交界区域，由于受到太平洋板块和菲律宾海板块的牵拉，地震活动频繁<sup>[3]</sup>。因此，日本成为受海底地震海啸影响最严重的国家，也成为建造海底地震海啸监测系统最多的国家。从 1978 年到 20 世纪 90 年代，日本气象厅 (JMA) 和日本海洋地球科学技术厅 (JAMSTEC) 建立了一系列海底地震海啸观测系统，利用伺服型加速度计或者速度计观测海底地震，以及晶体振荡型水压传感器观测水位<sup>[4]</sup>。从 1995 年到 21 世纪初，JAMSTEC 在日本周围地震带铺设了海底光缆系统，用于建造一系列在线地球科学观测网络<sup>[3,5-6]</sup>。系统包含在线海洋海底地震计 (OBS) 和海啸压力计 (PG) 两类传感器，OBS 是一种三分量加速度计，工作频带为 DC~200 Hz 或 0.05~200 Hz；PG 是一种晶体频率计数器，水位测量分辨率可达 5 mm，精度为 7 cm。每一个传感器的设计寿命都超过 10 年，并且采用铍铜合金抗压外壳，最大工作深度达到 4 km。2010 年以后，日本开发了更大规模的地震海啸观测网络。2012 年，日本国家地球科学与灾害预防研究所 (NIED) 在日本北部太平洋海岸附近建立了密集近海海底观测网络 (S-net)，用于地震和海啸监测。S-net 实时采集海底压力数据，从而能够准确快速地对海啸灾害进行预警<sup>[7-9]</sup>。2014 年，JAMSTEC

在日本青之岛东部沿海 1470~2240 m 深的海底布放了一组 PG 阵列，用于记录地震和海啸波形。阵列包含 10 个测量站点，每个站点之间相距 10 km 并形成等边三角形，站点的 PG 传感器布放在不存在沉降或上浮情况的海洋底部实现压力测量。PG 传感器使用 2 个石英晶体振荡器，可以测量最大深度为 7 km 的水压绝对值 (68.95 MPa)<sup>[10]</sup>。

除日本之外，加拿大同样在建设海底地震海啸监测方面居于领先地位，如“海王星”海底观测网络系统 (NEPTUNE)<sup>[11]</sup> 和维多利亚海底实验网络 (VENUS)<sup>[12]</sup>。2006 年，VENUS 观测系统安装在加拿大和美国之间萨利西海的 3 个主要站点，包括深度 100 m 的萨尼奇湾、深度 170~300 m 的乔治亚海湾以及弗雷泽河三角洲。2009 年，NEPTUNE 观测网络建立在柏克里湾温哥华岛的西海岸，传感器沿着卡斯卡迪亚断层布放在卡斯卡迪亚盆地深海平原和胡安德富卡岭。NEPTUNE 观测网络是全球首个深海海底大型联网观测站，总计包含 3 个观测台，5 个沿岸基站，850 km 以上的海底主干线缆，11 个仪器站点，32 个仪器平台，6 个可移动仪器平台，400 多个仪器设备，以及 2000 多个传感器。

现有系统主要使用电子类传感器检测海底地震海啸活动事件。这类传感器组成的系统对耐用性要求较高，能够满足深度达几百米的水压压力测量需求。对安装在海底的传感器进行维修保养也是非常困难的，因此传感器必须具有长期稳定性和可靠性。而且，电子类传感器需要电力供电，大多数现有系统使用光电复合线缆：电缆用于电路供电，光纤用于信号传输。除传感器之外，系统还包含许多辅助设备和器件，比如供电设备、电光和光电转换器、分路设备等。因此，系统复杂度和成本是非常高的，影响了这类系统的广泛推广与使用。

近年来,光纤传感技术凭借无源、抗电磁干扰、体积小、易组网等优势越来越多的应用于海底地震海啸监测领域<sup>[13]</sup>。基于瑞利散射的分布式声音传感技术(DAS)能够以密集空间分布和高速率测量光纤沿线的应力变化,从而探测长距离光缆沿线的声音振动,具有应用于地震海啸监测领域的巨大潜力<sup>[1]</sup>。从2017~2019年,数个陆地和海底DAS系统被成功布放在美国加州的戈德斯顿<sup>[14]</sup>、美国阿拉斯加的费尔班克斯<sup>[15]</sup>、美国加州的萨拉门托<sup>[16]</sup>、法国土伦<sup>[1]</sup>、比利时泽布吕赫<sup>[17]</sup>、以及冰岛的雷克雅尼斯<sup>[9]</sup>等地区。但是,DAS受环境干扰影响较明显,存在较大的测量误差,更适合于音频范围的振动监测,并不能够用于微弱地震波的测量。

2006年,在日本气象厅的资助下,日本电报电话公司(NTT)开发了基于光纤布拉格光栅(FBG)传感技术的地震海啸观测网络<sup>[4]</sup>。系统包含多个用于测量海底地震的加速度计和海啸探测器,安装在从伊豆半岛到四国的大约100 km海岸线附近。FBG加速度计的测量分辨率为 $10^{-2} \text{ m/s}^2$ ,测量范围 $\pm 1 \text{ g}$ ,频率响应范围5~50 Hz,FBG海啸探测器在深度为2 km时水位测量精度为5 cm。FBG传感器是光纤传感器中使用最广泛的类型,能够沿长距离光纤串联布放。然而,远距离地震信号在更低的频段内的振动加速度非常微弱,由微弱地震引起的水位变化也更加微小。现有的FBG传感技术并不能满足微弱的地震测量要求,而且还易受到环境温度和压力变化的影响,这些都妨碍了该传感器在海底地震海啸观测方面的大规模应用。

光纤干涉技术,类似于激光干涉引力波观测系统(LIGO)中采用的光学干涉技术,是目前人类所掌握的最灵敏传感技术之一,在海底地震海啸监测方面展现出巨大潜力。早在2002年,JAMSTEC就开发了基于迈克尔逊干涉仪(MI)的光纤加速度计,用于观测海底地震<sup>[18]</sup>。系统的共振频率大约200 Hz,最小可观测微震信号大约 $30 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。系统被布放在日本内浦湾,在长期运行过程中多次记录到地震事件。但是,该地震计的性能,特别是低频范围内的性能,仍有很大改进空间,并且系统缺乏水位传感器,无法实现海啸监测。

与DAS和FBG传感器相比,光纤干涉传感器具有更好的低频探测性能和更高的探测灵敏度,而这两者

对海底微震测量和精细水位观测都是至关重要的。从2014年开始,笔者团队在国家海洋局(SOA)的资助下,致力于基于光纤干涉技术的海底地震海啸观测系统的研发<sup>[19-20]</sup>。设计的三分量光纤干涉地震计灵敏度高达57 dB(0 dB对应 $1 \text{ rad/g}$ ),工作频率范围0.005~50 Hz,最小可测信号 $43.4 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[21-22]</sup>;光纤干涉水位计测量精度达到 $\pm 1 \text{ cm}$ ,测量范围为110 m<sup>[23]</sup>。据笔者所知,在现有光纤干涉传感器中,系统中的地震计拥有最优低频探测性能,水位计拥有最高测量精度。更重要的是,系统在2017年10月已经成功布放在海南省万宁市的国家海洋局乌场海洋环境监测站附近海域,已工作超过4年时间,在此期间连续实时采集地震和水位信号。文中介绍了光纤干涉海底地震海啸监测系统的安装过程,描述了地震计和水位计的工作原理,给出并分析了实时地震和水位数据实例。

## 1 系统安装

研制的光纤干涉式海底地震海啸监测系统于2017年布放在我国南海。具体地讲,从2017年10月29日到2017年11月15日,包含地震计和水位计的密封舱被布放在国家海洋局乌场海洋环境监测站西南2 km的海底,主机被安装在岸边监测站内,如图1所示,使用12 km长的12芯铠装海底光缆连接海底密封舱内的传感器和岸边主机。

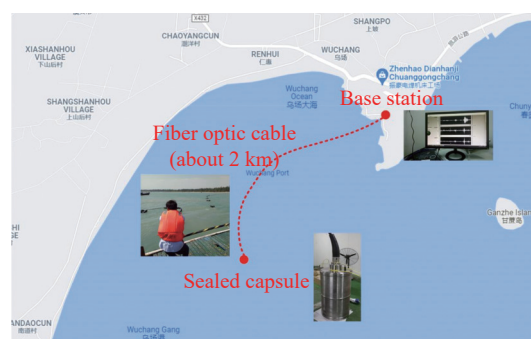


图 1 系统布放在我国南海海南岛外

Fig.1 System was installed in the South China Sea off the Hainan Island

在安装之前,光纤干涉系统的性能和密封舱的密封性能均经过严格测试,两组地震计和水位计固定在密封舱内互为备份。选取的布放海域为沙质海底,且沙层厚度超过50 cm,没有合适的基岩将密封舱固定在海底。因此,将密封舱固定在5 kg重的水泥墩上,



再沉放于海底,如图 2(a) 所示。为了避免电化学腐蚀,用于固定密封舱的紧固螺丝钉和扣环均采用钛合金材质,如图 2(b) 所示。

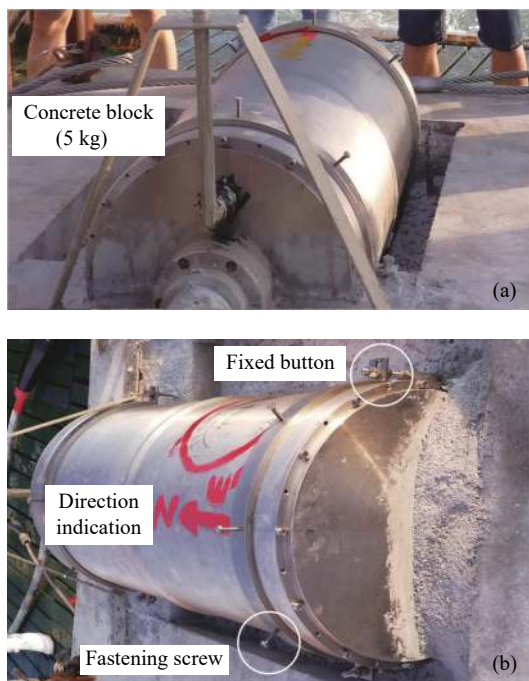


图 2 (a) 固定在水泥墩上的密封舱; (b) 密封舱表面部件

Fig.2 (a) Sealed capsule fixed on the bed of a concrete block; (b) Fastening screw and the fixed button on the sealed capsule

由于传感器在海底的工作环境远比陆地环境恶劣很多,传感器必须被密封以防止海水腐蚀。密封舱使用钛合金制造,具有抗腐蚀、强度高、轻质、长寿命等优点。钛合金的海水腐蚀速率大约为每年  $0.16\ \mu\text{m}$ ,密封舱的设计预期寿命为 25 年,对应大约  $4\ \mu\text{m}$  直径的腐蚀损失量。密封舱包含圆柱体身、顶盖、底盖、隔水板、穿仓连接器、固定海底光缆的钳位部件、以及抗弯部件,如图 3 所示。圆柱体身、顶盖和底盖用于实现密封舱的整体密封性能。隔水板在密封舱的两个内部舱体之间,用于当一个舱体被海水渗透以后,防止另外一个舱体受到影响。穿仓连接器本身具有良好的密封性能,与钳位部件、抗弯部件一起用于海底光缆与传感器的连接。另外,密封舱表面标记有红色指示箭头,如图 2(b) 所示,有利于潜水员在海底布放密封舱时保证三分量地震计具有正确的方向性。

密封舱的安装深度小于 500 m,且海底光缆长度仅为 2 km,因此在密封舱和岸边基站之间的海底光缆不需要额外的中继设备保证传输性能。为了满足浅

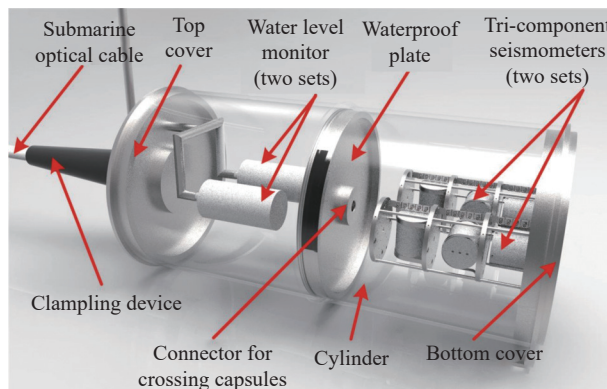


图 3 密封舱结构图

Fig.3 Diagram of the sealed capsule structure

海布放过程中的张力需求,海底光缆设计有多层保护结构,以及较好的张力和环境适应性,重要技术指标如表 1 所示。在密封舱和海底光缆布放完成之后,系统主机被安装在岸边基站内,并进行系统校准和调试工作。测量数据通过专有网络上传到 SOA 的中央服务器上。

表 1 海底光缆重要技术指标

Tab.1 Important specifications of submarine optical cable

Parameters	Values
Minimum breaking load	577 000 N
Instantaneous tensile strength normal load	403 000 N
Operating normal load	201 000 N
Permanent strength normal load	134 000 N
Minimum bending radius	0.9 m
Operating temperature	-10-50 °C
DC resistance in metallic conductors	<2.0 Ω/km

## 2 传感器的工作原理

研制的海底地震海啸监测系统是基于光纤干涉技术。具体地讲,地震计是基于迈克尔逊干涉仪,水位计是基于马赫—曾德尔干涉仪,如图 4 所示。系统包含 2 个窄线宽外腔激光器 (ECL),用来产生波长变化的连续相干光波。地震计中,激光器的波长为余弦调制;水位计中,激光器的波长为线性调制。地震计激光器发出的光波被多路选择器分为 3 个通道,然后通过光纤耦合器进入 3 路迈克尔逊干涉仪 (振动探头)。水位计激光器发出的光波直接通过光纤耦合器

进入马赫—曾德尔干涉仪(水位探头)。地震计使用相位生成载波技术(PGC)解调干涉相位,实现环境振动的测量;水位计使用线性调频和相位解调来测量实时水位。系统中的通用信号发生器产生余弦调制和线性调制的相位调制信号,处理器实现数字相位解调。具体的调制参数,以及模数转换器(ADC)采样速率和数据采集速率,如表 2 所示。

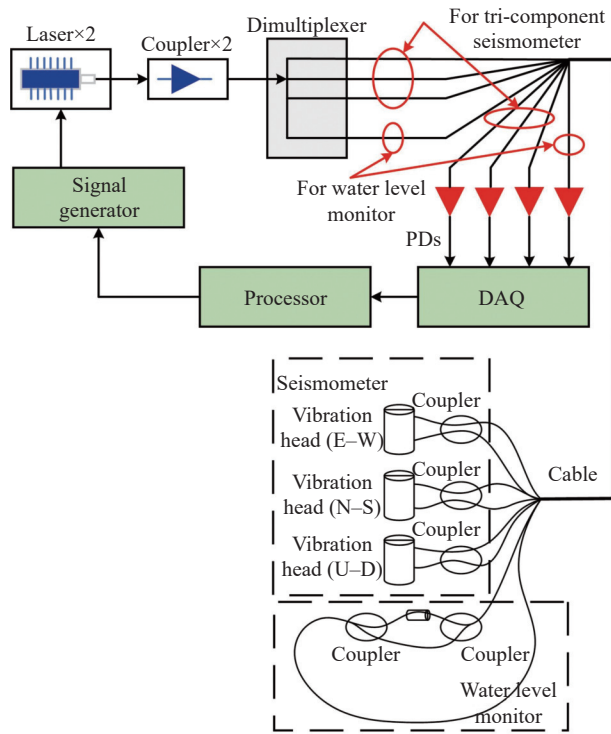


图 4 光纤干涉海底地震海啸监测系统结构图

Fig.4 System block diagram of optical fiber interferometric seafloor seismic tsunami monitoring

表 2 系统关键数字化指标

Tab.2 Key digital specifications of system

Parameters	Values
Cosine modulation frequency (seismometer)	16 kHz
ADC sampling rate (seismometer)	500 kHz
Measurements sampling rate (seismometer)	200 Sps
Linear modulation frequency (water level monitor)	10 kHz
ADC sampling rate (water level monitor)	10 MHz
Measurements sampling rate (water level monitor)	100 Sps

在三分量地震计中,连续光波与振动探头感受到环境振动的相互作用。振动探头采用由一对光纤缠

绕的顺变柱体组成的推挽结构,谐振频率大约为 250 Hz,如图 5 所示。振动探头由惯性质量块和 2 个顺变柱体组成。光纤的终端带有法拉第旋光镜,用来抑制偏振衰落现象。质量块由黄铜组成,顺变柱体由硅胶制成,光纤使用单模通信光纤<sup>[20]</sup>。三分量地震计探头柱体直径 100 mm,高 180 mm,质量块重 520 g。

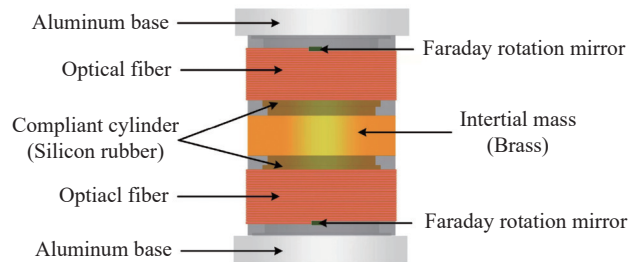


图 5 振动探头结构图

Fig.5 Vibration head structure diagram

PGC 调制常用的解调方法有两种:微分交叉相乘(DCM)解调和反正切解调。在设计的地震计中,DCM 解调用于获取干涉相位测量数据<sup>[19]</sup>。为了测试地震计性能指标,建立了包含三分量振动探头的地震计实验平台。三分量振动探头被固定在超低频震动台上,并使用 MEMS 加速度计的测试结果作为参考测量数据。测试结果表明,光纤干涉式地震计的灵敏度达到 57 dB (0 dB 代表 1 rad/g),三分量探头的灵敏度偏差小于 0.5 dB,工作频率范围 0.005~50 Hz,最低可测加速度值  $43.4 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[20-21]</sup>。

在水位计中,为了获得大量程测量范围和高测量精度,使用了基于双准直器的光纤干涉结构。水位计由 2 个耦合器、2 个光纤准直器、进水口、水软管和传感光纤组成,探头整体长度约 400 mm,外径约 200 mm,如图 6 所示。在传统的光纤干涉仪中,传感臂的光纤同时发挥着敏感单元和光信号传输的作用。然而,光纤的应变拉伸范围太小,无法实现较大的水位变化量程。为了满足水位大量程测量的需求,水位计中马赫—曾德尔干涉仪的传感臂必须有非常长的传感光纤,但这种结构会使得干涉仪非常容易受到环境干扰影响,从而导致测量精度较差。因此,研发的水位计采用双准直器替代传感光纤作为敏感单元,解决大量程测量的问题。

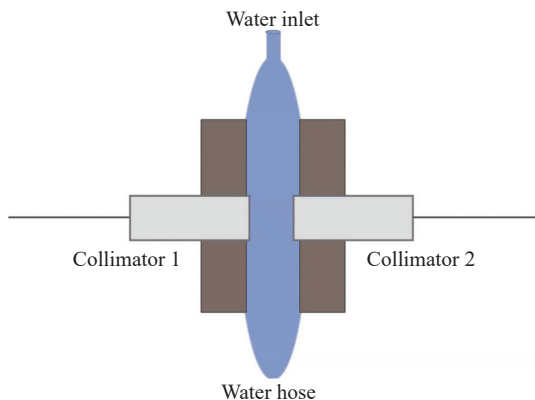


图 6 水位计探头结构图

Fig.6 Structure of water level monitor probe

水位计中,2 个准直器之间安置 1 个水软管,水软管的底部密封,另一端通过进水口连接到外部水位。水软管的内部和外部水压力是平衡的,水位变化就转换为 2 个准直器之间的距离变化,从而引起干涉臂长差的变化。

为了测试水位计的测量范围、精度和响应时间,使用高精度压力计模拟水位变化。压力计的压力变化范围是 2 MPa,精度是 0.02%。当压力变化范围是 0.10~1.07 MPa 时,对应的水位深度是 0~110 m,干涉相位与压力,也就是水位,之间的关系具有非常好的线性特性。测试结果表明,水位计测量精度达到  $\pm 1$  cm,测量范围高达 110 m,响应时间为 0.01 m<sup>[23]</sup>。

地震计和水位计的探头布放在海底,解调主机安装在岸边基站内。解调主机接收探头传输的光信号,经过光电转换、模数转换得到数字量干涉信号,进一步使用数字解调方式获得地震波加速度测量值和水位测量值,将测量数据存储在本地计算机的同时,上传至 SOA 的中央服务器。

### 3 观测结果实例

研制的光纤干涉海底地震海啸监测系统在 2017 年 10 月布放在我国南海,已经连续运行超过 4 年时间,获取了长期地震和水位观测数据。从 2018 年 1 月到目前,系统运行期间东北亚地区发生里氏 6.0 级以上地震共计 60 余次,其中 39 次被系统成功监测,剩余的地震由于台风断电、系统维修、软件更新等原因没有被记录。

以 2019 年印度尼西亚苏拉威西附近海域发生的 1 次里氏 6.8 级地震为实例,详细介绍测量数据分析

过程。这次地震发生在 2019 年 4 月 12 日东八区 19 时 40 分 49 秒,地震波传播经过整个中国南海地区,震中和基站的地表距离大约 2613 km,如图 7 所示。由于震源深度只有 10 km,震中位于上地壳区域,最有可能的地震波传播路径如图 8 所示,其中, Pg 和 Sg 分别代表直接 P 波和 S 波, Pb 和 Sb 分别代表沿康拉德界面传播的 P 波和 S 波, PmP 和 SmS 分别代表被莫霍界面反射的 P 波和 S 波, Pn 和 Sn 分别代表沿莫霍界面传播的 P 波和 S 波。需要说明的是,某次地震波的具体传播路径都有其独特性,与局部的地质结构关系密切。

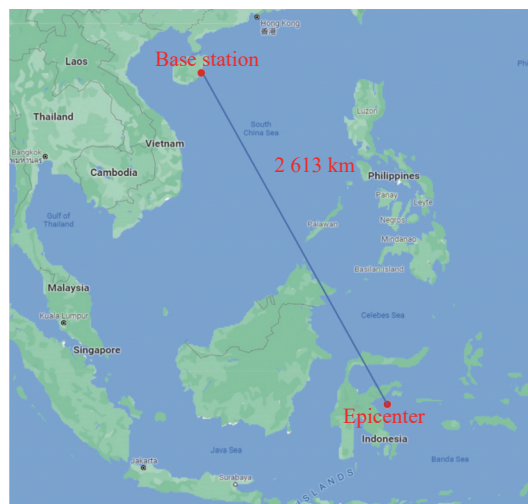


图 7 苏拉威西地震位置示意图

Fig.7 Location sketch of the Sulawesi earthquake

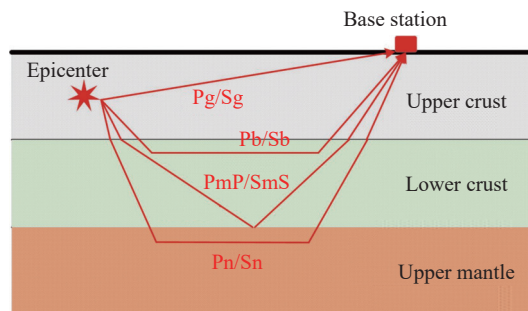


图 8 从震中到地震计地震波传输路径示意图

Fig.8 Seismic wave propagation paths from the epicenter to the seismometer

在系统布放在海底之前,地震测量数据的可靠性已经被验证。为了与我国地震观测常见的传统地震计 CTS-1 观测数据相比较,系统曾经安装在中国地震局长春净月地震台,长达 1 年的观测表明系统获取的



地震测量数据与 CTS-1 的观测结果具有很高的致性<sup>[22]</sup>。

印尼苏拉威西地震的三分量加速度测量波形如图 9 所示,所有三个分量的加速度测量值均可以观测到 Pg 波、Sg 波和 Sb 波。根据到达时间,直接 P 波和 S 波的传播速度大约分别为 3.72 km/s 和 2.20 km/s。Sg 波的最大加速度幅度分别为 0.093 g、0.018 g 和 0.165 g。在加速度测量波形中,可以看到有许多来自海底环境噪声的毛刺信号,严重限制了测量数据质量。由于密封舱布放地点与岸边仅相距几千米,海上噪声,比如鱼类和船舶活动,以及海岸噪声,比如交通和建设活动,都可以对地震波形的监测产生影响。

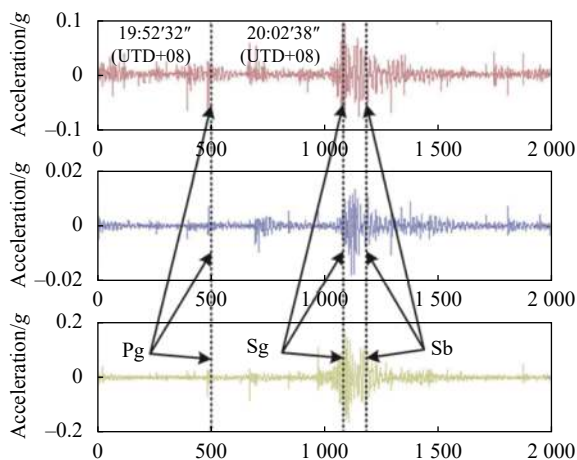


图 9 印尼苏拉威西附近海域里氏 6.8 级地震的加速度波形

Fig.9 Acceleration waveforms of the ML6.8 earthquake in the adjacent sea area of the Sulawesi, Indonesia

与此同时,系统的水位计实时记录了水位变化,地震发生前后连续 3 天(2019 年 4 月 11 日~13 日)的水位测量结果如图 10 所示。蓝色曲线代表系统的测量结果,红色曲线代表海南省博鳌监测站给出的官方海洋潮汐观测数据。虽然由于基站位于不同地理位置(相距大约 47 km),使得测量数据存在细微差异,但是水位潮汐趋势和涨落时刻一致性是很好的。在这 3 天当中,水位的变化范围分别是 1.13 m、1.30 m 和 1.13 m。3 天当中对应地震发生时的 1 h 内的详细测量数据如图 11 所示。由于地震活动并没有引发海啸事件,水位没有表现出突发性变化。地震发生当天水位曲线的变化,与其他两天对应时间段的测量数据一样,不存在间断或者明显起伏,说明在地震波来临时系统仍然可以成功获取实时水位数据。

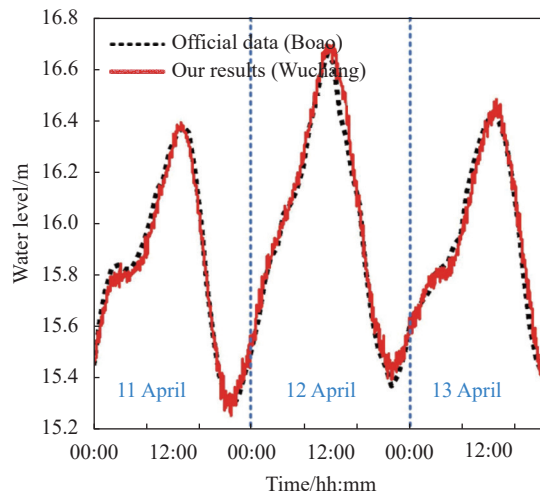


图 10 地震发生前后连续 3 天的水位测量值(2019 年 4 月 11~13 日)

Fig.10 Water level measurements of three days (April 11-13, 2019)

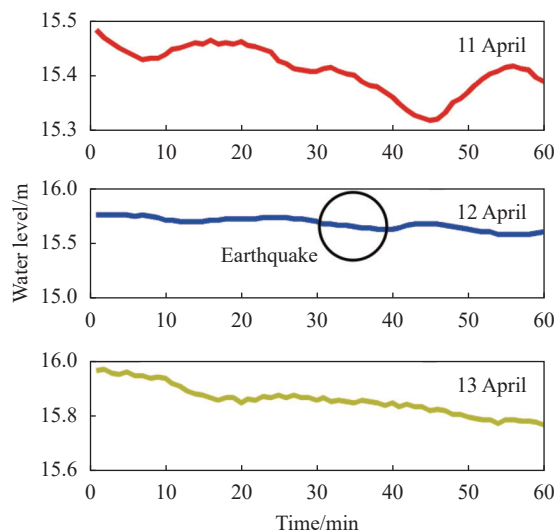


图 11 地震发生时刻 1 h 的水位测量值(苏拉威地震 19:30~20:30)

Fig.11 Water level measurements of one hour (19:30-20:30 pm during the Sulawesi earthquake)

## 4 结 论

研制的基于光纤干涉技术的海底地震海啸监测系统已经成功布放在海南省万宁市的国家海洋局乌场海洋环境监测站附近海域。文中介绍了系统的安装方式,以及传感器的工作原理。系统自 2017 年 10 月完成布放,已经连续工作超过 4 年时间,并在长期运行过程中采集现场测量数据。到目前为止,在系统运行期间东北亚地区发生里氏 6.0 级以上地震共计 60 余次,其中 39 次被系统成功监测。

系统布放海域和岸边基站地区,不可避免地存在

环境和人为噪声,海风、波浪、潮汐、航运和陆地人工活动都可能产生低频杂波并混入地震波有效信号,从而使得振动加速度和水位测量值含有毛刺信号,严重制约了测量数据质量,使得系统在观测微弱地震波方面存在不足。未来,需要详细分析海洋海底环境噪声,尽可能地抑制噪声对测量数据的不利影响,从而改善系统性能。

## 参考文献:

- [1] Sladen A, Rivet D, Ampuero J P, et al. Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5777.
- [2] Philippe J, Thomas R, Trond R, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2509.
- [3] Kawaguchi K, Hirata K, Miltada H, et al. An expandable deep seafloor monitoring system for earthquake and tsunami observation network[C]//OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37158), 2000: 1719-1722.
- [4] Fujihashi K, Aoki T, Okutsu M, et al. Development of seafloor seismic and tsunami observation system[C]//Symposium on Underwater Technology & Workshop on Scientific Use of Submarine Cables & Related Technologies. IEEE, 2007.
- [5] Momma H, Fujiwara N, Kawaguchi K, et al. Monitoring system for submarine earthquakes and deep sea environment[C]//Oceans '97. MTS/IEEE Conference Proceedings, 1997, 2: 1453-1459.
- [6] Fujiwara N, Momma H, Kawaguchi K, et al. Comprehensive deep seafloor monitoring system in JAMSTEC[C]//Proceedings of 1998 International Symposium on Underwater Technology, 1998: 383-388.
- [7] Yamamoto N, Hirata K, Aoi S, et al. Rapid estimation of tsunami source centroid location using a dense offshore observation network [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(9): 4263-4269.
- [8] Uehira K, Kanazawa T, Noguch S, et al. Ocean bottom seismic and tsunami network along the Japan trench [J]. *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, 2014, 53(6): 477-481.
- [9] Kanazawa T. Japan Trench earthquake and tsunami monitoring network of cable-linked 150 ocean bottom observatories and its impact to earth disaster science[C]//2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT), 2013: 1-5.
- [10] Fukao Y, Sandanbata O, Sugioka H, et al. Mechanism of the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, Japan [J]. *Science Advances*, 2018, 4(4): eaao0219.
- [11] Barnes C R, Best M, Zielinski A. The NEPTUNE canada regional cabled ocean observatory [J]. *Sea Technology*, 2008, 49(7): 10-14.
- [12] Proctor A A, Kennedy J, Gamroth E, et al. The ocean technology test bed-from concept to operation[C]//Oceans IEEE, 2010.
- [13] Chang T, Wang Z, Yang Y, et al. Fiber optic interferometric seismometer with phase feedback control [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6102-6122.
- [14] Yu Chunquan, Zhan Zhongwen, Lindsey N J, et al. The potential of DAS in teleseismic studies: Insights from the goldstone experiment [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1320-1328.
- [15] Lindsey N, Martin E, Dreger D, et al. Fiber-optic network observations of earthquake wavefields [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 4(23): 11792-11799.
- [16] Ajo-Franklin J, Dou S, Lindsey N, et al. Distributed acoustic sensing using dark fiber for near-surface characterization and broadband seismic event detection [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1328.
- [17] 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.
- [18] Shindo Y, Yoshikawa T, Mikada H. A large scale seismic sensing array on the seafloor with fiber optic accelerometers[C]//IEEE Sensors, 2002, 2: 1767-1770.
- [19] Chen J D, Chang T Y, Fu Q J, et al. A fiber-optic interferometric tri-component geophone for ocean floor seismic monitoring [J]. *Sensors*, 2017, 17(47): 1125-1136.
- [20] Chen J, Chang T, Yue Y, et al. Ultra-low frequency tri-component fiber optic interferometric accelerometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18: 8367-8374.
- [21] Chen J, Gao W, Chang T, et al. Method for determining the resonance frequency of a fiber optic interferometric accelerometer [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(3): 698-705.
- [22] Yang Y, Wang Z, Chang T, et al. Seismic observation and analysis based on three-component fiber optic seismometer [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 1374-1382.
- [23] Pang S, Luo Z C, Wang Z M, et al. Interferometric optical fiber water level sensing system for oceanic monitoring applications [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 0906003.