浮标基海洋观测系统研究进展

张少伟*, 杨文才, 辛永智, 王瑞星, 李晨

中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000

* 联系人, E-mail: zswsia@126.com, zhangshaowei@idsse.ac.cn

2019-04-30 收稿, 2019-07-30 修回, 2018-08-06 接受, 2019-10-08 网络版发表

国家自然科学基金(51809255)、国家重点研发计划(2018YFC0307906)和中国科学院战略性A类先导科技专项(XDA13030301)资助

摘要 面向海表和海底立体观测与探测的需求, 构建了一种新概念的浮标基海洋观测系统, 获取时间、空间同步的水文/气象/水质观测数据、海表/海底摄录数据, 并实时回传到岸基数据中心. 将浮标、海底接驳盒采用光电复合缆连接起来, 通过浮标、光电缆为海底观测系统供电; 同时, 将海底观测信息通过光电缆传输到海表浮标, 然后通过卫星通信/无线通信将水面、海底的观测数据传输到岸基, 实现了海底、海表观测数据的实时传输. 系统在通信、系留、能源等方面进行了全新的设计, 并构建了“海底观测(接驳盒)-以太网-光交换机-光电复合缆-光交换机-以太网-卫星(浮标)”的通信链路. 为实现浮标系留, 采用纤维材料设计了中性的光电复合缆, 降低了对浮标储备浮力的要求, 并适用于大深度的布放. 针对光电缆能源传输方式及海底供电要求, 采用风能/太阳光能互补方式供电, 采用直流升压/降压等方式解决系留缆直流输电问题. 为实现系统在深海的布放, 设计了专用绞车. 通过绞车依次布放海底节点、缆, 避免使用遥控水下机器人安装操作和海底湿插拔技术, 降低了系统的成本和试验的风险. 通过近海试验, 验证了整套通信链路的可靠性, 以及系统长期、稳定供电的能力, 掌握了系统的布放回收技术. 该系统满足了海表、海底实时观测与数据传输的需求, 实现了海表、海底的同步观测; 并实现了海表/海底摄录数据的实时回传, 在深远海声学、地质、地震等方面观测具有重要意义.

关键词 浮标, 接驳盒, 光电复合缆, 海洋观测, 无线通信

深海及敏感海域温、盐、海流、气象等海洋环境信息, 可为深远海气候及海洋灾害预警预报系统提供支持, 为研究水下声场环境提供有效的数据; 这些数据为分析海洋环流、内孤立波、上升流等现象创造了良好的条件. 特别是海表、水体、海底的同步观测数据, 可揭示一些特殊的海洋现象机理, 如海洋上升流的动态过程研究, 需要同步获取海表、海底、水体各个水层的温度、盐度、海流数据. 因此, 获取长期、持续的海表温、盐/海流/气象、海底海流/温、盐数据, 进行海洋模式同化、预测, 对物理海洋学科的研究具有重要意义; 敏感海域的温、盐变化特性对声学传输特性、

水下声通信研究具有重要意义.

全球海洋观测网(array for real-time geostrophic oceanography, ARGO)是由美国主导, 欧洲多国、中国等参与的全球性海洋观测项目, 以获取海洋上层温、盐剖面数据, 提高海洋气候预报为目的. ARGO浮标主要布放在公海, 覆盖海域较大. 对海岛及近海岸, 海表气象、水文观测以圆盘形浮标为主; 海底观测以海底观测网为主, 结合科学家的研究需求, 搭载相应的仪器, 开展摄像、地质、物理海洋等学科的观测.

美国Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI)研究所设计了MBARI Ocean Observatory Sys-

引用格式: 张少伟, 杨文才, 辛永智, 等. 浮标基海洋观测系统研究进展. 科学通报, 2019, 64: 2963–2973

Zhang S W, Yang W C, Xin Y Z, et al. Research progress of a mooring buoy system for sea surface and seafloor observation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2963–2973, doi: 10.1360/N972019-00370

tem(MOOS)浮标基海底观测系统^[1~3], 在3 m直径的浮标上搭载风机、太阳能板, 并通过光电复合缆为海底观测仪器供电. 水面浮标上搭载水平轴风机, 额定功率为300 W, 实际功率取决于风速的大小. 在供电方式上, 风机和太阳能电池板提供48VDC电压经直流变压后, 提供12VDC为浮标观测仪器供电, 提供375VDC为海底观测仪器供电. 该系统采用Remotely Operated Underwater Vehicle(ROV)进行湿插拔水下对接, 完成了3000 m水深的布放. 意大利研制的Cabled Underwater Module for Acquisition of Seismological Data(CUMAS)系统^[4,5], 用于实时观测海表气象、海底地质/地震的数据. 浮标体总重量为17 t, 顶部搭载了16块额定功率为100 W的太阳能板. 系统采用光电缆、锚链混合的方式进行系留, 整套系统布放在100 m水深. 美国Ocean-Works公司研制的Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System(CYCOFOS)海洋预报与观测系统^[6,7], 如图1所示, 水面为1套5 m直径的浮标, 采用柴油机供电, 为海底多个观测节点提供1 kW的功率. CYCOFOS海洋观测系统采用VSAT卫星通信, 数据传输速率达到1 Mbps, 该系统在2400 m水深开展了布放、回收.

光电复合缆作为上述浮标基海底观测系统的系留缆, 一方面需具有承载浮标系泊拉力的能力; 另一方面, 光电复合缆需利用电芯将能源从海表传输至海底, 利用光纤芯将观测信息从海底传输至海表^[8,9]. 传统的海

底光电缆为铠装缆, 敷设在海底, 属于海底静态缆; 布放后, 不会随海流影响而摆动, 设计难度相对低; 这种缆重量大, 在大深度海域需要以牺牲浮标储备浮力为代价, 同时铠装缆内部扭力大, 不适合在深远海布放、回收. 应用于浮标基海洋观测系统的光电复合缆, 布放在水中后, 长期处于悬浮状态, 属于海洋动态缆, 需要具有较高的机械强度、良好的弯曲特性、优良的水密性能, 并需具有耐腐蚀、耐磨损、良好的柔韧性等特性. 因此, 应选用高模量、低密度、高强度、耐磨性能好的耐热阻燃纤维制作该类光电复合缆.

我国目前海表、海底环境信息获取手段包括浮标、潜标等, 以及近海固定观测网、水下自主移动平台等. 我国从1965年开始研制浮标^[10], 第一个浮标诞生于1965年, 为船型结构; 1978年, 山东省科学院海洋仪器仪表研究所成功研制出我国第一个大型海洋资料浮标站——HFB-1型海洋浮标; 1979年, 中国科学院成功研制出“南浮一号”海洋环境浮标. 在“十五”期间, 国家海洋技术中心在国家高新技术发展计划资助下, 研制了3 m直径多参数海洋环境监测浮标, 该浮标采用小型圆盘标体, 达到了国际先进水平. 浮标大都布放在近海小于2000 m水深的海域, 用于海表要素测量. 中国科学院南海海洋研究所建立了南海中尺度水文海洋气象观测网, 用浮标、潜标的系泊阵列分析南海区域环流和海气相互作用^[11,12].

图1 (网络版彩色)CYCOFOS海洋预报与观测系统

Figure 1 (Color online) CYCOFOS cyprus coastal ocean forecasting and observing system

2009年, 同济大学在东海小衢山建立了中国第一个近海观测站^[13], 浙江大学从2007年开始进行通用性海底观测网接驳盒技术的研究^[14,15], 并于2010年在中国东海进行浅海海试. 2013年, 中国科学院沈阳自动化研究所在南海三亚附近建立了2 km长的示范性海底观测网^[16]. 针对东海、黄海、南海北部海域长期定点观测的需求, 中国科学院部署建设了近海海洋观测研究网络^[17], 主要包括黄海站、东海站、3个国家近海生态环境监测站(胶州湾、三亚、大亚湾); 并在永兴岛建立了西沙站, 并已获得了一年的监测数据^[18].

近海固定观测网成本高, 适用于固定区域的长期观测. 浮标以完成海表水文、气象、水质测量为主. 潜标包括声学、水文潜标等, 采用分层观测方式获取海水温度、盐度等水体信息, 具有在恶劣海况下进行长期、连续对海洋环境要素进行监测的能力, 隐蔽性好. 潜标以挂载自容式传感器为主, 通过释放装置实现回收和再布放, 布放、回收时间间隔长达数年, 在深海复杂环境影响下, 易出现丢失. 在深海海域, 目前主要以潜标观测为主, 因此采样数据有限、实时性差. 海底观测网系统在近岸开展了试验性应用, 采用岸基供电的方式, 通过接驳盒对观测仪器进行供电, 但敷设海底光电复合缆成本大, 不具备可移植性; 海底仪器的搭载、更换需要用ROV进行水下对接, 作业成本高. 现有的方式, 缺乏一种可对海表、海底在同一时刻进行全方位观测的系统; 在数据传输上, 也难以做到不同类型观测数据的实时传输.

因此, 针对海洋气象、温、盐、浪、流、水声环境信息获取的需求, 特别是温、盐、流在海表、海底长期持续观测和实时传输的要求, 研制了浮标基海洋观测系统. 将浮标、海底接驳盒通过光电复合缆连接; 将海底接驳盒作为海底锚块的同时, 亦作为海底观测平台, 定点锚系后实现深海长期、定点观测; 并通过光电复合缆、卫星通信进行实时数据传输. 这种系统相对于现有的浮标、海底观测网, 具有一定优势, 一方面具有海表/海底数据采集/实时传输的功能; 另一方面可以实现机动的布放、回收, 成本相对于海底观测网具有一定优势, 适用于敏感海域(上升流、涡流、内波)的海洋信息观测. 本文针对国内研究的浮标基海洋观测系统进行论述.

1 浮标基海洋观测系统架构

浮标基海洋观测系统如图2所示, 包括水面浮标、

海底接驳盒、系留光电复合缆三部分. 水面浮标实现海表水文、气象、水质、浪、流的观测. 海底接驳盒为海底观测节点, 根据具体需求搭载海底观测仪器, 现已搭载的仪器包括ADCP测流仪、CTD温盐深测量仪、摄像机、灯等. 光电复合缆作为浮标系留缆的同时, 兼具能源和信息传输的功能, 其中光纤是信息传输介质, 电芯是直流电能传输载体. 海底接驳盒提供多路标准端口, 接入海底观测仪器. 浮标基海底观测系统具有以下特色:

(1) 实时观测链路: 海底、海表的观测数据通过光电复合缆、北斗/铱星通信实时传输到海表及岸基站; 实现了海表、海底的同步、实时观测. 浮标端水声通信链路的搭建, 用于收集其他海底观测平台如潜标、水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)的数据, 是对现有浮标、潜标、海底观测网的观测方式、数据传输方式的补充. 构建基于浮标的区域海底观测网, 海底观测数据可通过卫星进行远程传输; 而传统海底观测网需要在海底敷设数百至数千公里的光电复合缆至岸基登陆点, 成本高, 维护维修麻烦.

(2) 海洋温、盐、海流等观测数据的采集、存储、展示等技术; 利用卫星通信, 实时调整观测仪器采样频率.

(3) 系统具有可迁移性. 现有海底观测网从岸基铺设海底光电复合缆, 一经铺设, 难以调整观测位置, 灵活性和维护性差. 浮标基海底观测系统可针对目标区域进行布放, 观测任务完成后, 将系统回收并布放在新的观测位置.

浮标基海底观测系统的控制将数据传输与通信、数据采集、能源管理等进行集成; 并构建了多种通信方式、能源供给方式(在3.1和3.2节进行论述); 并通过升压、降压技术适配不同的电压等级, 为观测仪器、光电复合缆输送能源. 通过浮标控制实现对海表气象、水质、浪、流等要素的数据采集. 通过数据传输和通信模块, 建立两种通信模式, 低速率下传输水文气象观测数据; 近距离传输视频、声学数据, 采用高带宽的无线通信. 实时获取蓄电池状态, 并监测风机输出电压电流; 结合蓄电池状态调整采集频率、通断相关仪器. 通过光端机与海底接驳盒连接, 控制接驳盒的工作状态. 在浮标端将蓄电池输出的24 V升压至400VDC, 然后经光电复合缆输送400 V直流电, 最终400 V直流电在海底端通过降压模块变为48 V/24 V/12 V, 为接驳盒供电.

图2 (网络版彩色)基于光电复合缆系留的浮标基海洋观测系统总体架构

Figure 2 (Color online) Overall architecture of mooring buoys observation system with electro-optical-mechanical cable

2 系统组成

2.1 水面浮标单元

水面浮标具备对气象、水文、水质、浪、流的观测能力,包括浮标结构、浮标通信、浮标数据采集、浮标能源,浮标结构从1.2~6 m不等。设计的浮标,如图3所示,直径为3 m,排水量3.5 t;在通信方式上,采用北斗通信、铱星通信、无线通信和水声通信;浮标端搭载的海表观测仪器包括气象观测站、水质测量仪、ADCP海流计、波浪测量仪、摄像机、TCM3电子罗盘等。

2.2 海底接驳盒观测单元

海底接驳盒观测单元如图4所示,是以接驳盒技术为基础,由接驳盒结构、接驳盒能源分配与传输、接驳盒信息管理、接驳盒监控等部分组成。海底接驳盒观测单元具有能源和信息传输、观测仪器搭载的能

力,为海底传感器、仪器舱供电;通过水密接插件完成观测仪器和接驳盒的连接,通过光电分离器完成接驳盒和光电复合缆的连接。海底接驳盒固定在框架式的栅格上,在栅格上固定摄像机、海底灯、ADCP、CTD等仪器,将各仪器通过接插件连接到接驳盒上。接驳盒的控制器及变压模块封装在耐压舱里,选用钛合金作为耐压舱材料。考虑到对大多数仪器的兼容性,使用通用串行仪器接口作为标准,采用美国SubConn的MCBH8F型8芯穿舱水密接插件。在结构设计上,将接驳盒的支架作为海底锚块进行设计,在支架下部挂载系留锚块,支架中间上部连接光电复合缆。布放时锚块和支架一起通过光电复合缆吊放入水中。

2.3 光电复合缆单元

光电复合缆(electro-optical-mechanical cable, EOM cable)用于海表浮标、海底接驳盒之间能源和信息的传输。常用的光电复合缆,是在钢丝铠装的工艺过程中

图3 (网络版彩色)水面浮标单元结构设计

Figure 3 (Color online) Mechanical design of surface buoy unit

图4 (网络版彩色)海底接驳盒观测单元结构设计

Figure 4 (Color online) Mechanical design of seafloor junction box unit

填加阻水油膏以实现缆的纵向阻水,但这种缆的扭力较大,布放、回收较为麻烦,适用于近海或较浅水深的布放、长期运行。图5为近海试验中选用的3光3电金属铠装光电复合缆,直径17.3 mm,破断载荷10 t。两端做

图5 (网络版彩色)17.3 mm直径3光3电光电复合缆

Figure 5 (Color online) Electro-optical-mechanical cable with 3-optic, 3-electro, and 17.3 mm diameter

承重接头,用于和接驳盒、浮标固定,缆和承重头通过硫化固定。对于超过数百米水深的海域,光电复合缆作为浮标的系留缆,在水中长期悬挂,需要一种大长度、高柔韧性及重量轻的光电复合缆,在设计上可选用尼龙作为承重层,替代钢丝铠装(在3.4节中论述)。

3 关键技术

3.1 能源供给技术

传统浮标采用太阳能进行供电。浮标基海洋观测系统选用太阳能电板、风能、大容量免维护蓄电池的组合方式进行供电。太阳能板的实际功率约为额定功率的10%,取决于布放海域的经纬度、太阳能光照情况。风能适用于极地、无光照情况。系统的功率越大、可搭载的观测仪器、采样频率亦越高。CYCOFOS浮标观测系统,采用柴油机进行供电,最大功率可达1000 W,这种方式需要定期补充柴油。

现阶段设计的浮标基海洋观测系统,搭载了8块额定功率为100 W的太阳能板、一台额定功率为300 W的风机。水面浮标单元采用12VDC, 24VDC的母线电压为通信、数据采集等模块供电。对于海底观测部分的供电电压,需考虑光电复合缆的电阻,视电阻大小、光电复合缆的长度选用不同的母线电压,通常有48VDC, 375VDC, 1000VDC等规格;现阶段的设计,选用375VDC为光电复合缆供电。

3.2 通信技术

系统搭载了北斗、铱星、无线、水声通信机等模

块用于通信。北斗、铱星用于远距离传输海表、海底的水文、气象、水质数据；无线通信用于近距离传输海表/海底的视频图像数据、声学数据。水声通信链路用于获取水下潜标、水下机器人的观测数据，构建水下区域观测网络。光纤通信连接水面浮标单元、海底接驳盒观测单元。海底观测信息通过光电缆传输到海表浮标，实现了海底、海表实时的观测数据传输，最终通过卫星通信、无线通信将观测数据传输到岸基。结合已搭载的观测仪器，系统在通信方面进行了全新的设计，构建了“海底观测(接驳盒)-以太网(接驳盒)-光交换机-光电复合缆-光交换机(浮标)-以太网-北斗/无线(浮标)”的通信链路。

3.3 系留技术

传统浮标采用锚链、尼龙绳、聚丙烯绳在不同水深进行系留。在浮标基海洋观测系统中，光电复合缆一方面进行能源、信息传输，另一方面进行系留，对缆的要求和锚系方式要求较高。在水深100 m以内可采用缆、锚链混合系留的方式，典型有CUMAS观测系统，布放水深为97 m。这种系留方式利用锚链承受浮标的动载荷，缆用于能源、信息传输；系统在布放和运行过程中，容易造成缆和锚链的缠绕，最终导致缆的破损和

断裂。

对大于100 m水深，典型系统有MOOS浮标基海底观测系统、CYCOFOS海洋预报与观测系统，采用单点系留的方式，海底观测节点具备锚系和观测的功能。MOOS浮标基海底观测系统选用尼龙制造的光电复合缆进行系留，布放水深达到3000 m，海底观测节点与光电缆的插拔连接过程用遥控水下机器人ROV完成。这种方式需要ROV水下定位、并采用水下湿插拔技术进行水下对接，技术难度较大；同时需要租用ROV，成本较高。

现阶段设计的浮标基海底观测系统，将缆设计为承重系留缆，承受浮标的系留力；并专门设计了液压绞车，用来布放该光电复合缆。在水面将海底观测节点与缆对接后，通过绞车依次布放海底观测节点、光电复合缆；缆布放完以后从绞车上抽出来，将缆的末端连接到浮标上，布放浮标。这种方式降低了成本，绞车也可用于其他项目。这种方式对绞车设计、系统集成与布放均有很大难度，国内尚属首次。

设计的液压绞车如图6所示。整个液压绞车单元由绞车部分、排缆器、升沉补偿器、导轮组、定向滑轮、A架滑轮、液压站、控制系统组成。液压绞车单元为上方出缆，光电复合缆经排缆器到导轮组的摆动轮

图6 (网络版彩色)用于光电复合缆布放、回收的液压绞车

Figure 6 (Color online) Hydraulic winch utilized for EOM cable launch and recovering

组,过升沉补偿器后再进入导轮组固定轮组,过出缆滑轮至A架滑轮。液压绞车单元采用液压驱动,液压泵采用恒功率控制方式,控制泵的输入功率与电机输出功率吻合,通过自适应方法调整液压单元的压力、流量,实现低压大流量、高压低流量的自动控制。液压马达通过比例溢流调速阀进行流量控制,实现对绞车速度的精确控制。

3.4 光电复合缆设计及选型

光电复合缆是浮标基海洋观测系统能长期、稳定运行的关键要素之一。和锚链不同,尼龙纤维制作的光电复合缆一方面满足系留时承载力的要求,另一方面要包覆光纤芯、电芯,制作工艺复杂。传统金属铠装缆扭力大,柔韧性不好,长期悬浮在水中,光纤随缆长期摆动,易造成疲劳磨损而失效。另一方面,金属铠装的光电复合缆重量大,对浮标的重量、中心配置有影响;特别是大深度的布放,浮标难以提供足够的储备浮力。尼龙材料制作的微重力缆在这种系统中得到了应用,尼龙缆的成缆工艺分为中心芯线层/外部承拉层、中心承拉层/外部芯线层两种;前者芯线特别是光纤的延展性不好;后者在使用性能上较好,但成缆工艺复杂,难以制造,尼龙缆与金属承重头的硫化工艺尚未解决。

系统在设计中选用了中心芯线层/外部承拉层的结构,选用了高强度纤维作为承重材料,设计了新型的四层纤维铠装的光电复合缆,直径为34 mm,破断强度达到20 t;并在国内研制、加工,掌握了该类缆的制造、生产技术。柔性光电缆(17~40 mm)与浮标(直径3 m)、海底观测节点(2 m高)的过渡连接,是该系统的一项关键技术,选用万向节连接件进行过渡连接。万向节连接件的一端通过硫化,连接到缆;另一端通过螺栓连接到浮标或海底观测节点。

3.5 布放回收技术

该系统涉及水面浮标单元、光电复合缆、海底观测节点单元的布放。布放顺序、布放方式视布放水深不同而有所不同。国外MBARI浮标基海底观测系统,选用ROV进行辅助布放,即先从母船上布放浮标,然后布放海底接驳盒观测单元,最后布放缆,并用ROV完成光电复合缆与海底接驳盒的水下连接,这种方式成本较高。

现阶段设计的系统,分近岸浅水布放和深水布放两种情况。在近岸浅水布放时,先在码头布放浮标,将

海底观测节点单元放在母船上;然后,母船拖动浮标航行到预定布放位置后,视海流情况,将母船锚定在浮标上游,开始布放海底观测节点单元。在深水布放时,需用液压绞车配合,即先将光电缆与海底观测节点单元进行连接,用绞车将海底接驳盒单元吊放到水中;用绞车布放光电复合缆;然后将缆和水面浮标连接;最后布放水面浮标,这种方式成本相对低。

3.6 多海底观测节点技术

多海底观测节点技术即以一套浮标为水面中继,为多套海底接驳盒观测节点进行供电,并回传观测数据,该技术可用于组建区域海底观测网。涉及竖直段光电缆的布放、海底水平光电缆的敷设、ROV水下湿插拔作业等技术,是后续该系统的发展目标,即以浮标为中心,构建拓扑式的小区域海底观测网。

4 系统试验

现阶段,集成了浮标单元、光电复合缆单元、海底接驳盒观测单元。整套系统样机在近海进行了多次观测实验。2017年6月,采用金属铠装光电复合缆、锚链混合系留的方式,进行了近海布放,对原理样机进行了调试。调试阶段主要以解决了海底摄录、海表摄录、气象观测、光电缆和无线近距离视频图像传输为目的,布放深度为18 m。海试主要为技术验证试验,共计15 d。岸基监控部分,主要是测试水面、水下视频的流畅与否,并通过无线通信将海表、海底视频实时传输到岸站,传输速率为3 Mbps(无线通信距离小于5 km)。海表监控信息包括:风速、风向、气温、气压、漏点;浮标姿态、GPS信息;太阳能电流、电压;海底搭载了一套摄像系统,包括摄像机、云台、灯。

整个试验阶段,无线通信设备状态良好。每天都对海底视频进行短时间的录制。2017年6月20~21日进行了声学通讯的海上试验,实现了浮标携带的声通信机、海底着陆器平台上的声通信机两者之间的数据交互,完成声学通讯试验。共实现175次通讯,每次通讯传输一组CTD数据。实现了独立海底观测节点与水面浮标基于水下声通信技术的数据传输功能。

2018年8月,对系留光电复合缆进行了研制,利用尼龙等柔性材料制了光电复合缆;并重新设计了海底观测节点,重量为3 t,具备系留3 m浮标的能力。系统在近岸20 m水深进行了布放、运行、回收,如图7所示。2018年试验持续工作了25 d。通过试验,初步验证了整

图7 (网络版彩色)2018、2019年三亚近海试验。(a) 2018年, 基于无线通信实现海底视频数据的远程传输; (b) 2018年, 回收后的系留缆出现的问题: 磨损、刮伤等。(c) 2019年, 整套系统布放、回收试验; (d) 2019年, 卫星远程数据传输界面

Figure 7 (Color online) Inshore Experiment in Sanya city during 2018 and 2019. (a) Seabed video real time transmission base on the wireless communication during 2018; (b) appearance of recovered EOM cable during experiment in 2018, such as abrasion, and scratch, so on; (c) system launch and recovery in 2019; (d) satellite remote data transmission interface during experiment in 2019

套系统数据采集、传输的功能; 初步验证了海底、海表观测数据实时回传的功能, 如图7(a)所示; 初步验证了光电复合缆长时间系留的功能。通过试验发现, 系统整体功耗较高, 需对能耗进一步优化。同时, 系统回收后发现, 光电复合缆的通信、供电性能未受到损害; 光电复合缆的表面有磨损、褶皱、刮伤等问题, 如图7(b)所示; 有大量渔网、海底生物附着在光电复合缆、海

底接驳盒观测单元上。针对缆的外护套出现的问题, 需选用硬度更高的材料, 对外护套进行重新设计。

2019年3~4月, 将改进后的光电复合缆用于系统中, 并进行了近岸20 m水深的布放, 回收后光电缆、弯曲加强件状态良好, 如图7(c)所示。试验通过北斗、铱星实时传输海表、海底观测数据, 系统布放长达1个月, 海表、海底观测及数据传输正常, 如图7(d)所示。验证

了系统的可靠性、海表/海底实时观测及数据传输的可行性。

5 结论

浮标基海洋观测系统, 兼顾了现有海面浮标观测功能的同时, 通过系留光电复合缆实现海底观测, 这在国内尚属首次。这种系统可搭载的传感器较多, 特别适用于对海底观测有实时传输、长期观测需求的应用。本文对浮标基海洋观测系统所涉及的技术进行归纳和研究, 并开展了相关试验, 得出以下结论:

(1) 构建的北斗、铱星通信链路, 可动态地调整海表、海底仪器采样观测的频率。构建的水声通信链路, 用于收集其他海底平台观测数据, 形成了动态数据流。系统初步具备构建固定基区域海洋观测的能力。

(2) 系统验证了光电复合缆的系留性能。光电复合缆在能源供给、数据传输单元的同时, 具有承载系留

拉力的能力。

(3) 构建了一种新型的浮标基海洋观测系统, 实现了海表/海底的水文/浪/流观测、视频数据的实时回传。

该系统与现有的海洋观测浮标相比, 在光电复合缆系留、布放回收技术方面, 进行了全新的设计; 并专门设计了液压绞车, 用于缆的布放、回收。整套系统具备海表、海底的观测能力, 可根据需要布放在不同的海域, 布放/回收方便。现阶段, 已掌握了系统在近岸20 m水深布放、回收技术及长期观测技术。后续进一步研究计划, 利用液压绞车布放大长度的光电复合缆, 将该套系统应用在深海1000 m及更深海域, 实现长期、持续的海表、海底实时观测; 另一方面, 拟将水听器、地震仪连接到海底观测单元上, 实现长期、持续的海底声学、地质监测; 设计多套海底观测节点, 以一套浮标为水面中继, 为多个节点进行供电, 实现区域观测组网。

参考文献

- Chaffey M, Mellinger E, Paul W. Communication and power to the seafloor: MBARI's ocean observing system mooring concept. *IEEE Oceans*, 2001, 5-8
- Chaffey M, Bird L, Erickson J, et al. MBARI's buoy based seafloor observatory design. *IEEE Oceans*, 2005, 1975-1984
- Paul W, Bentley D, Chaffey M, et al. Electrical and electro-optical mooring links for buoy based ocean observatories. In: 3rd International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. IEEE, 2003
- Iannaccone G, Guardato S, Vassallo M, et al. A new multidisciplinary marine monitoring system for the surveillance of volcanic and seismic areas. *Seism Res Lett*, 2009, 80: 203-213
- Martino P D, Guardato S, Tammara U, et al. A first GPS measurement of vertical seafloor displacement in the Campi Flegrei caldera (Italy). *J Volcan Geother Res*, 2014, 276: 145-151
- Georgiou G, Clark A M, Zodiatis G, et al. Design of a prototype Tsunami warning and early response system for Cyprus - TWERC. *IEEE Oceans*, 2010, 1-5
- Kocak D M, Painter H, Anderson G. Anode design and analysis for an undersea cabled observatory with a seawater ground. *IEEE Oceans*, 2011, 1-7
- Li X S, Cai B Y, Xie S H. Development of metal armored optical and power composite cable for 4500 m water depth ROV (in Chinese). *Opt Fib Elec Cab*, 2015, 4: 8-11 [栗雪松, 蔡炳余, 谢书鸿. 4500 m水深ROV用金属铠装光电复合缆的研制. *光纤与电缆及其应用技术*, 2015, 4: 8-11]
- Chen H. Key performance design for underwater tether optoelectrical composite cable (in Chinese). *Opt Fib Elec Cab*, 2013, 4: 20-22 [陈红. 水下系留光电复合缆的关键性能设计. *光纤与电缆及其应用技术*, 2013, 4: 20-22]
- Wang B, Li M, Liu S X, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications (in Chinese). *Chin J Sci Inst*, 2014, 35: 2401-2414 [王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势. *仪器仪表学报*, 2014, 35: 2401-2414]
- Cai S Q, Zhang W J, Wang S A. An advance in marine environment observation technology (in Chinese). *J Trop Ocean*, 2007, 26: 76-81 [蔡树群, 张文静, 王盛安. 海洋环境观测技术研究进展. *热带海洋学报*, 2007, 26: 76-81]
- Yang L, Wang D, Huang J, et al. Toward a mesoscale hydrological and marine meteorological observation network in the South China Sea. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2015, 96: 1117-1135
- Xu H P, Zhang Y W, Xu C W. Coastal seafloor observatory at Xiaoqushan in the East China Sea (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 1839-1845 [许惠平, 张艳伟, 徐昌伟. 东海海底观测小衢山试验站. *科学通报*, 2011, 56: 1839-1845]
- Lu H L, Li D J, Yang C J, et al. Design and implementation of underwater junction box prototype system for deep seafloor observatory network (in Chinese). *J Zhejiang Univ*, 2010, 44: 8-13 [卢汉良, 李德骏, 杨灿军, 等. 深海海底观测网络水下接驳盒原型系统设计与实现. *浙江大学学报*, 2010, 44: 8-13]
- Yang C, Li D, Chen Y H, et al. Design and application of a junction box for cabled ocean observatories. *Mar Technol Soc J*, 2012, 46: 50-63

- 16 Feng Y B. Research on energy supply methods and fault location technology for seafloor observatory network (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014 [冯迎宾. 海底观测网能源供给方法及故障定位技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2014]
- 17 Li J, Chen R Y, Wang S A, et al. Development of international marine observation system and construction of deep-sea station in China (in Chinese). *J Trop Oceanol*, 2012, 31: 123–133 [李健, 陈荣裕, 王盛安, 等. 国际海洋观测技术发展趋势与中国深海台站建设实践. *热带海洋学报*, 2012, 31: 123–133]
- 18 Shi R, Zeng L, Chen J, et al. Observation and numerical simulation of the marine meteorology elements and air-sea fluxes at Yongxing Island in September 2013. *Aqu Ecos Heal Manag*, 2015, 18: 394–402

Summary for “浮标基海洋观测系统研究进展”

Research progress of a mooring buoy system for sea surface and seafloor observation

Shaowei Zhang^{*}, Wencai Yang, Yongzhi Xin, Ruixing Wang & Chen Li

Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

^{*} Corresponding author, E-mail: zswsia@126.com, zhangshaowei@idsse.ac.cn

Because ocean observation of the sea surface and seafloor is in three dimensions, a new ocean observation system is established. This system synchronously collects hydrological, meteorological, and water quality information and video (seafloor and seafloor) data and can transmit this data to a shore monitoring center in a real-time mode. This system includes an ocean buoy (on the surface), seafloor junction box (on the seafloor), and electro-optical-mechanical (EOM) cable. The EOM cable, acting as a transmission medium for power and communication, connects the buoy and seafloor junction box. Power is transmitted from the buoy to the seafloor node through the EOM cable. The seafloor data is transmitted to the surface buoy via optical fiber communication. At last, the seafloor and sea surface observational data are transmitted to a shore monitoring center via satellite or wireless in real-time mode. Owing to the needs of buoy mooring, data transition, and power offering, the system is redesigned compared to traditional buoys. The communication link is constructed as follows: seafloor observation (underwater junction box)-Ethernet (underwater junction box)-optical Ethernet switch-EOM cable-optical Ethernet switch-Ethernet (buoy)-satellite (buoy). For mooring the surface buoy, a neutral buoyancy cable with optical fibers and electronic wires is designed. The load-bearing layer of the EOM cable comprises fibrous material that reduces the requirement of the buoy reserve buoyancy. Thus, the cable is neutral in seawater and can be deployed at great depth. A wind power generator and solar are combined to provide power to the buoy and seafloor node. A DC-DC boost/decrease inverter modular is utilized to adjust the voltage for power transmission via the EOM cable. To deploy the system in the deep sea, a winch is designed to launch the EOM cable and recover the EOM cable and seafloor node without a remote-operated-underwater-vehicle or wet plugging technology, which reduces the cost and the risk in sea trials. Through an offshore test, the reliability of the whole communication link and the feasibility of the launch and recovery process are verified. This system has long-term endurance and a stable power supply capabilities for sea surface and seafloor observation. Moreover, this system satisfies the requirements of real-time observation and information transmission of sea surface and seafloor. Particularly, the seafloor and surface video data can be transmitted to a shore monitoring center, which is of great significance in observation of sea acoustics, geology, and earthquakes.

ocean buoy, seafloor junction box, electro-optical-mechanical (EOM) cable, ocean observation, wireless communication

doi: [10.1360/N972019-00370](https://doi.org/10.1360/N972019-00370)