

构建海底信息网技术分析

宋德枢, 薛栋益, 仇远程

(解放军 91878 部队, 广东 湛江 524064)

摘要: 本文介绍了国内外各种海底网络的最新研究和应用情况。在现有典型网络的基本结构和技术特点基础上, 提出适时构建海底信息网以实现海底光缆网、海底警戒网和海底观测网的“三网合一”, 并针对最新相关软硬件技术进行了系统分析。

关键词: 海底信息网; 海底光缆网; 海底警戒网; 海底观测网

中图分类号: TN913.33

文献标识码: A

文章编号: 1003-4862 (2024) 01-0006-07

DOI:10.13632/j.meee.2024.01.013

Technical analysis of constructing submarine information network

Song Deshu, Xue Dongyi, Qiu Yuancheng

(No. 91878 Troops of PLA, Zhanjiang 524064, Guangdong, China)

Abstract: This paper introduces the latest research and application of various submarine networks at home and abroad. Based on the basic structure and technical characteristics of existing typical networks, this paper proposes to construct the Submarine Information Network timely to realize the "three networks in one" of the optical fiber submarine cable network, the submarine warning network and the submarine observation network, trying to systematically analyze the latest related software and hardware technology.

Keywords: submarine information network; optical fiber submarine cable network; submarine warning network; submarine observation network

0 引言

当今世界百年未有之大变局, 一个独立自主拥有广阔海域、漫长海岸线和丰富海洋自然资源的海洋大国和平崛起。在多元化的国际形势下, 海底的通信、观测和预警都面临着复杂考验。同时, 海底信息网是一项涵盖现有海底光缆网、海底警戒网和海底观测网三个网络功能的系统工程, 它具有多学科、多领域的特点, 覆盖海底全领域、全空间, 是探索海洋的一项基础性工程, 为实现海底信息一体化管理提供重要依托。三网之间互联互通, 海底光缆网是通信子网, 为海底观测网和海底警戒网提供信息传输和电源供应; 海底观测网和海底警戒网是资源子网, 为海底光缆网搭载科学仪器, 采集数据信息提供来源。

目前我国还没有较大规模的海底警戒网和海底观测网, 适时建设一个大规模、系统性的海底综合信息网, 既能维护国家安全提升国防硬实力, 又能加强民用基础设施建设提升国民经济软实力。

1 国内外海底观测网进展

1.1 海底信息网

目前海底有线网络可大致分为海底光缆网、海底警戒网和海底观测网三类。海底光缆网是指用于数据传输的海底光缆系统, 主要目的是实现海岸基站之间的通信。当前全世界有 410 多条海底光缆在使用中, 总长度超过 140 万公里, 可绕地球 35 圈。海底警戒网是指海底基于水声通信的预警探测网, 主要连接水听器(阵列), 广泛应用于水下目标的识别、定位、导航、跟踪等军事方面。冷战时期, 美国始建水声监测系统 SOSUS, 通过长达 3 万海里海底电缆连接岸基观察站, 构建较为成熟的海底预警探测网络^[1]。海底观测网是指在海底敷设网格化光电复合缆线路, 通过接驳不同科学仪器, 采集分析海底物理、化学、生

收稿日期: 2023-08-06

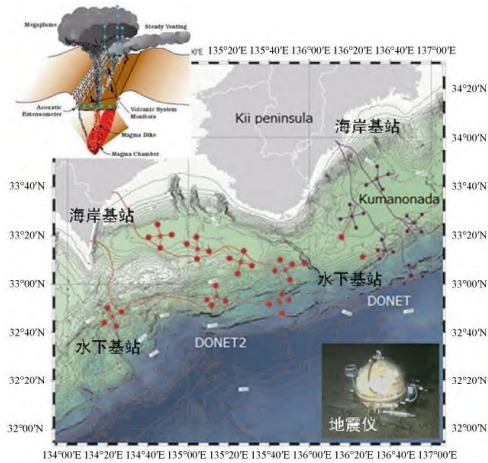
作者简介: 宋德枢(1986-), 男, 助理工程师, 研究方向: 阵列信息处理、海底光缆通信。

E-mail: songds1986@163.com

通讯作者: 仇远程(1994-), 男, 技师, 研究方向: 海底光缆维修。E-mail: 17820961734@139.com

物等参数，从而实现对特定海域海洋参量的长期实时连续测量，为海洋资源开发利用、灾害预警、科学研究等民用提供参考依据，是海底信息网建设中的核心网络。

1.2 国外海底观测网进展



(a) DONET观测网



(b) S-NET观测网

图1 日本防灾观测网

日本 2003 年提出计划建设先进实时海底区域监测网 ARENA (Advanced Real-Time Earth Monitoring Network in the Area)，但由于经费原因，2011 年建成的是地震海啸密集海底网络系统 DONET (Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis)，被誉为全球最精密的地震海啸观测网，如图 1a；2016 年在 DONET 网基础上建成 DONET2 网，同年建成海沟海底地震海啸观测网 S-NET (Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench)，是当今全世界规模最大的海底光缆网络^[2]，如图 1b。加拿大 2006 年建成金星海底试验网 VENUS (Victoria Experimental Network Under

the Sea)，是一个近岸尺度的小型单节点观测网；2009 年正式运行西北太平洋时间序列观测网 NEPTUNE (North-East Pacific Time-Series Underwater Networked Experiment)，如图 2。

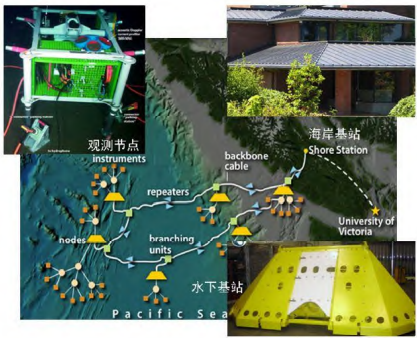
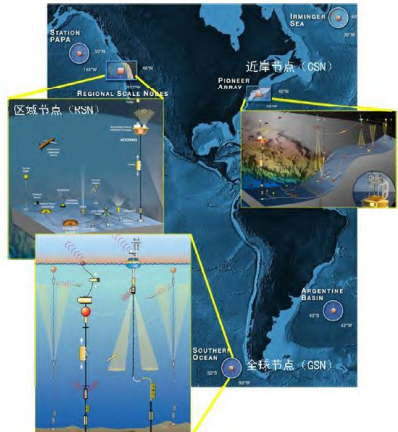
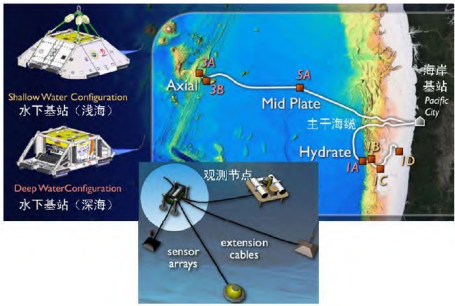


图2 加拿大NEPTUNE观测网

2009 年运行海王星海底观测网 NAPTUNE CANADA，是全球第一个大区域环形设计海底科学观测网络，采用多节点网格化设计，采样物理、化学和地质信息，观测生物演化过程^[3]。美国 2009 年开始启动蒙特雷湾加速研究系统 MARS (Monterey Accelerated Research System)；2016 年主导建成全球最先进的搭载 47 类 759 个传感器的海洋观测网，命名为大洋观测计划 OOI (Ocean Observation Initiative)^[4]，如图 3。



(a) 总体组成



(b) 区域网部分

图3 美国OOI观测网

欧洲 2004 年启动欧洲海底观测网 ESONET (European Sea Observatory NETwork) 计划, 2007 年建成 ESONET-CA 网络, 2011 年建成 ESONET-NoE 网络^[5]; 2007 年启动欧洲多学科海底观测网 EMSO (European Multidisciplinary Seafloor Observatory) 建设, 以实现多学科跨海域试验探索, 如图 4。

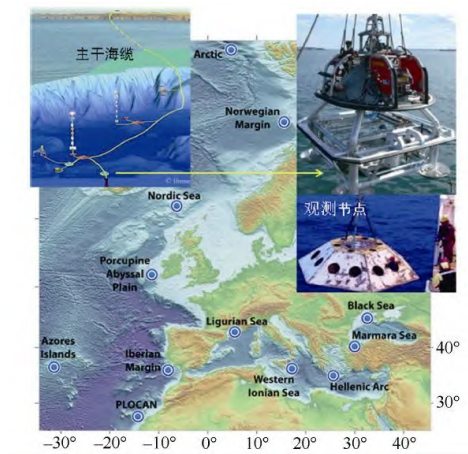


图4 欧洲EMSO观测网

2013 年启动北冰洋 FARM 系统建设, 进一步探究北极海洋生态环境系统受不同大洋环流的影响过程。台湾 2011 年正式运行妈祖观测网 MACHO (Marine Cable Hosted Observatory) 计划, 在台湾西部海域实现海底火山洋流的实时监测、地震海啸的早期预警, 如图 5。

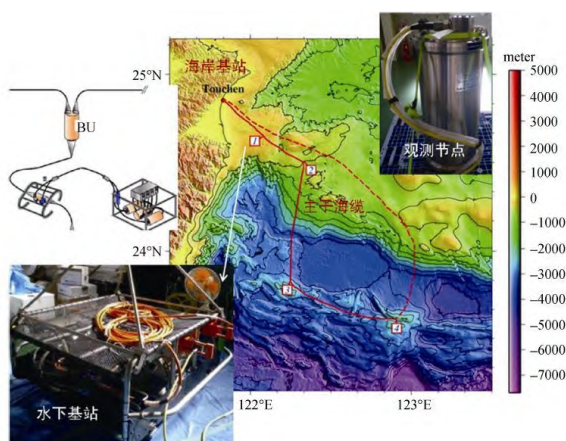


图5 台湾MACHO观测网

1.3 国内海底观测网进展

我国海底观测网络筹建起步相对较晚。2008 年 11 月, 由浙江大学自主研发的海底观测网 ZERO 试验平台室内联调成功。2009 年在东海小衢山海域, 同济大学研制的包含 1.1 千米主干光电缆、1 个水下接驳装置和 3 套观测设备组成的单节点海底观测试验站系统建成; 2011 年, 在该

系统基础上增加约 750 千米环型观测网络, 搭载多普勒声学海流仪、浊度仪等传感器测量海洋环境^[6]。2011 年, 海洋仪器仪表研究所位青岛胶州湾海域岸边测试验证了海底观测网络的组网通信能力, 该系统平台通过接驳溶解氧传感器、温盐深仪 CTD、视频摄像头等观测传感器多通道采集了大量海底原始数据^[7]。同年 4 月, 浙江大学研发的 ZERO 系统在美国 MARS 系统上成功并网试验 6 个月, 成为国内第一个应用于水下接驳盒节点的观测网^[8]。2013 年 5 月, 中国科学院在海南三亚建成首个具备扩展功能相对较为完整的海底观测示范网络系统, 由海岸基站 (可提供 10 千伏高压直流电)、2 千米主光电缆、1 个主接驳盒和 1 个次接驳盒 (20 米水深海底)、3 套观测设备 (含视频观测、海底照明、多普勒流速剖面仪 ADCP、多功能水质仪等)、1 个声学网关节点与 3 个间隔 500 至 800 米温深观测节点组成。2015 年, 同济大学十二五“863”计划规划设计建设东海浅海海底观测网。2016 年 12 月, 《“十三五”国家信息化规划》中, 国家明确在“陆海空天一体化信息网络工程”领域“推动海洋综合观测网络由水面向水下和海底延伸”, 并积极筹备计划开发海基网络设施^[9]。2017 年 6 月, 国家审批通过“东海、南海海底观测系统”重大专项工程, 将完成东海、南海海域海面至海底的实时全天候、多通道、高分辨率的连续立体观测和科学平台建设, 有助于加深对相关区域海洋环境的认识。

2 硬件关键技术

筹建海底信息网是一项复杂的系统工程, 由建筑材料、工程机械和电子通信等多领域融合而成, 目前还有部分理论空白和技术难题需要攻破。本文在对比国内外现有海底网络研究状况的基础上, 针对构建海底信息网的一些核心难题, 进一步探讨了网络建设中需要应对的重难点问题和相关技术要求, 提出了多项改进措施及解决方法。

2.1 网络拓扑结构

依据拓扑结构模型展开方式, 现存海底观测网可基本分为总线型、树型、环型等架构模式。本文建议构建的新型海底信息网采用网格状嵌套型链式结构^[10], 如图 6。贯彻“边建边用”策略, 首先建成链式环形网, 而后逐层拓展为网格状网络, 此种架构要求顶层设计和发展规划合理可靠, 系统链路可拓展性好, 才能保证运行周期不低于

25 年。

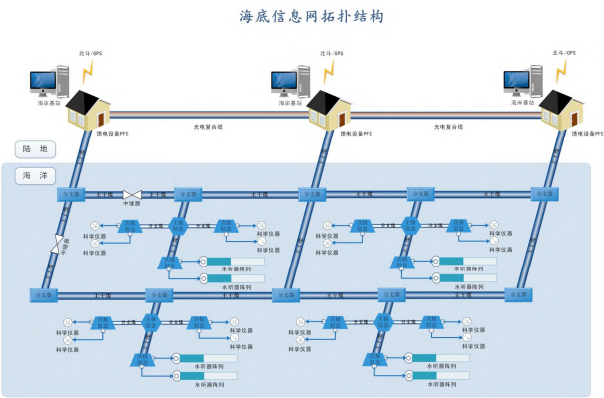


图6 网格状嵌套型链式结构

海岸远程控制基站是海底信息网的组成核心，保障整个网络系统能够长期稳定运行，由计算机群组、网络通信设备、高压输变电设备、故障监测设备等部分组成，以完成对采集信息的实时分析、处理、保存及异常处理，并为水下系统提供供电、通信、监控及授时四大功能保障。

海底信息网水下部分主要由海缆、接驳盒、科学仪器三部分组成。铠装光电复合缆作为主干路由海缆，内部主要由光纤和铜导体组成，分别负责信息传输和高压直流电力保障。接驳盒分为主接驳盒（海底主基站）和次接驳盒（观测仪器适配器 SIIM， Science Instrument Interface Module），主接驳盒是能源和信息的主要中转设备，实现采样传输海底观测数据、执行控制指令、监测状态环境等功能，可在扩展的多路分支上连接次接驳盒，通过不同科学仪器接口实现海洋现象和海洋要素的观测及测量。主干缆可通过分支器进行灵活扩展，还可通过中继器或光放大器增加通信距离。文献^[11]提出一种基于检测信息融合方式的网格化节点设定方式，由正四边形和正三角形网格单元组成，仿真结果表明：覆盖效率在观测范围宽度大于 100 km 时显著提高。

2.2 远程供电技术

构建海底信息网正常运行的基础是持续稳定的能源供应。如今单节点路由配套供电技术已趋于成熟，多节点网络的电源供应因单位长度电缆电阻限制了摄取电压的能力，而不得不采取高压电缆供电形式。顾及供电成本及能效、设备体积的同时，直流并联供电法首推其冲，而对于多节点网格状的拓扑结构，建议采用正负压交替多端供电方式。使岸基馈电设备 PFE 输出 $\pm 2\text{ kV}\sim 10\text{ kV}$ 直流电压，通过骨干网传输至各节点接驳

盒处，主接驳盒进行 DC-DC 直流转换，将几千伏的直流高压转换为几百伏中压，次接驳盒将几百伏中压转换成多种低压电源，供科学仪器使用。但同时电缆分布特性和终端负载分布一定程度上影响最大传输电能，负载变化也会带来电压不稳的缺点；与此同时电力监控管理、水下降压、错误定位隔离、中继器保护等问题随着线路长度增加面临诸多困难。通过发展小型化高压直流降压装置和研制电能管理分配设备达到提高系统整体电力保障能力和纠错能力，同时还需建立一个岸基电源监控软件，传输过程中保证实时在线监测高压直流电路。

2.3 接驳盒技术

水下接驳技术是构建海底信息网的核心技术，海底接驳盒是实现水下线路连接的专用设备，功能包括数据通信、控制指令传输、电能分配转换、接口转换、中继放大、即插即用、自监控等。研制接驳盒应着重关注以下方面：

1) 电源转换。海底复合光缆采用高压直流的供电方式，科学仪器电源基本为低压直流。通过配备 DC/DC 电能变换器，主接驳盒为次接驳盒提供扩展传输电压，实现高压到中低压的转换。一般采用欧美国家现行标准，主接驳盒将直流高压 $\pm 2\text{ kV}\sim 10\text{ kV}$ 降压为扩展传输电压 375 V，次接驳盒将扩展传输电压 375 V 降压为观测仪器常规可控电压 24 V/48 V，作为多数水下科学仪器的直流电源^[12]，见表 1。

表 1 接驳盒电气与通信特性

类 型	主接驳盒	次接驳盒	科学仪器
输入电压/V	2k~10k	375	24/48
输出电压/V	375	24/48	无
单端口输出	500~2 000	250~500	无
端口通信方式	TCP/IP 或 光以太网	TCP/IP、串 行通信	TCP/IP、串 行通信
端口通信速率 bit/s	100Mbit/s 或 1Gbit/s	10/100Mbit/s	10/100Mbit/s 或更低

2) 端口设置。岸基与主干网上接驳盒之间可实现千兆网速率光纤通信，若想增加传输距离，可在主接驳盒中增加光放大器或中继器实现，主接驳盒中光信号转换为以太网电信号，再通过交换机或路由器选择千兆或百兆的下行网络，次接驳盒可选择通信速率 10/100Mbit/s 端口，或实现串行通信。当今主流通信设备都采用以太网接口

通信,少数科学仪器仍采用 RS232/RS422/RS485 串口通信,见表 1。

3) 热能耗散。接驳盒狭小耐压腔体内封装电源转换装置不利于散热,可借助灌充绝缘散热油加缓压装置的气液混合模式提高散热效率^[13]。

4) 湿插拔。湿插拔连接器 UMC (Underwater Matable Connector) 接口技术可由远程遥控运载器 ROV (Remote Operated Vehicle) 完成科学仪器的安装维护操作,能够增加海底接驳盒的可维护性和可扩展性。

5) 故障监测与隔离。接驳盒常见电源故障分为过电压和过电流故障,根据各独立节点处故障诊断结果,控制系统自动切断该路输出并隔离终端设备,以确保接驳盒整体不受影响。从而降低局部节点处故障对整个网络系统的影响,增强系统电源可靠性。

接驳盒还可根据科学仪器不同接口实现扩展功能,例如设计相应辅助接口实现水下潜器、水声应答器等的水声通信功能。

2007 年,浙江大学开始设计建造通用型接驳盒,此后成功研制出 2 kV/10 kV 直流电压的主接驳盒与 375 V 直流电压的次接驳盒^[14],并于 2011 年成功将该款次接驳盒接入美国 MARS 观测网并网运行半年。山东省科学院海洋仪器仪表研究所研制了一款基于 MSP430 单片机的电源管理和监视系统,保证接驳盒电压恒定的同时实现实时电压远程监控^[15]。

2.4 科学仪器

现如今传感器技术被列为信息技术的三大支柱之一,水下传感器可谓种类繁多、日新月异。目前,已成功应用于海底观测的测量对象和科学仪器主要有:海水密度、海水盐度、海水温度、水下声速梯度、溶解氧、二氧化碳、甲烷、叶绿素、海流计、散射计、浊度计、水压计(水深计)、磁力仪、海底地震仪 OBS、海平面压力测量仪、声学多普勒海流剖面仪 ADCP、阴离子分析仪、激光拉曼光谱仪、水听器阵列、摄像机等。

加拿大 VENUS 试验网搭载的科学仪器有:温盐深仪 CTD、水下总溶解气体压力仪 GTD、溶解氧传感器、高清晰度视频摄像机、回波声码器、声学多普勒海流剖面仪 ADCP、海流计、浊度计、散射计、水听器、沿岸海洋动力应用雷达等。通过分析海水温度、海水盐度、海水密度、溶解氧、海平面压力测量仪、潮汐、海流和海洋

混合物的观测值,探寻海水的循环过程和交换过程;借助声学多普勒海流剖面仪 ADCP,测量海洋剪切流及紊流的实时变化;定位鱼类体内声学信标定期发出微弱的叫声信号,网络节点上水声接收器实时掌握动物活动空间和生活轨迹,探究物种迁移趋势;通过水听器阵列收集水中哺乳动物及人为声响,探寻自然声与海气相互作用的产生原理;分析窄波束主动声呐和摄像机成像图案,掌握沉积物增加比率、再悬浮、沉积物搬运和海底形态的演化过程。

美国 MARS 网络借助水下低感光像机 EITS (Eye In The Sea) 的远红外光源发现了一种寻找海底发光生物的新方法;海洋酸化试验系统 FOCE (Free Ocean Carbon Dioxide Enrichment System) 通过远程调节 CO₂ 浓度,控制水下培养皿的 PH 值,实时记录水体酸化改变对海洋生物的影响;深海激光拉曼光谱仪 DORISS (Deep-Ocean Raman In Situ Spectrometer) 完成海底水合物和海水多元素的原位监测;环境样品处理器 ESP (Environmental Sample Processor) 利用一种分子生物学技术实现海水原位观测,将非连续采样海水富集微生物后,通过分子探针技术和三明治杂交技术检测微生物 rRNA,区别古菌、细菌、藻类或无脊椎动物,有助于进行海洋生物灾害预报。

2010 年,同济大学研制的深海化学监测系统与浙江大学海底接驳盒湿插拔成功,实现了海底阴离子、甲烷、叶绿素、硝酸盐和溶解氧的化学原位监测。文献[16]通过设计激光拉曼仪器节点 (OUC Raman instrument node) 控制系统,实现对水下光谱的长期观测。

3 软件关键技术

3.1 时间同步技术

与陆基通信不同,海底通信只能由岸基设备通过卫星同步的方式进行时间校准,将标记一定精度的时间戳信息同步到海底各科学仪器,通过比对另外海底或岸基传感器的采集数据,联合研判提升时间精度。岸基主时钟可使用北斗/GPS 双模块授时技术对高稳恒温晶振 (OCXO) 进行校频实现时间同步。测量数据的有效性、准确性和可靠性依赖于统一的时间基准,也就依赖于授时的精度。一般秒级或毫秒级时间同步精度基本上能够满足大多数科学观测和测量,而像采集地震、

海啸信号需至少微秒级精度。如何提高海底信息网的时间同步技术,对于海底各类科学仪器的同步测量、综合研判以及灾害预报等具有重要意义。2020年6月,我国成功发射第55颗北斗卫星,使得北斗三号全球星座部署全面完成,授时精度进一步提高。如今分布式时间同步系统海底观测网中普遍采用精确时间同步协议PTP(Precision Time synchronization Protocol),因其具有同步精度高、组网便捷、符合IP化光网络结构等诸多优点。

2014年,浙江大学提出一种时间同步协议,将网络时间协议NTP(Network Time Protocol)和精确时间同步协议PTP两者相结合,经验证NTP同步信号精度可达300 μs,PTP同步信号精度可达2 μs^[17]。2018年,中电集团34所提出了一种基于PTP协议实现分布式时间同步策略,通过在岸基节点配置高精度时间服务器,可将亚微秒量级同步精度分配至海底各科学仪器设备^[18]。

3.2 通信组网技术

海底光缆的拓扑结构是海底信息网赖以生存的通信载体,新的信息传输技术伴随着光通信领域发展迭代更新。光传送网OTN(Optical Transport Network)利用波分复用技术WDM(Wavelength Division Multiplexing)在光层组织网络,借助光层和电层的完整体系结构,在电域继承同步数字体系SDH(Synchronous Digital Hierarchy)中的映射、复用、交叉以及嵌入式开销等概念,具有丰富的管理开销、良好的调度能力以及可靠的保护功能;在光域上继承了波分复用传输容量大、传输速率高和传输距离长等特点。拟以OTN作为组网基础,在网格状的通信链路上通过多种通信手段实现海底信息网的通信功能,在系统容量与可拓展性两个方面也有较好性能^[10]。

3.3 信息传输技术

信号在信道中传递都有传输损耗,光信号也不例外,能量随信号在光纤中传输距离成正比。海底中继器一般用于400 km以上距离的海底光缆系统,海底中继器可靠性和体积的制约使得通信只能容纳1~6对光纤,每对光纤均可承载上波和下波。

目前海缆通信系统利用密集波分复用DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)技术将单个商业海缆通信线路的通信容量提高至

数十Tb/s,并利用光分插复用分支器OADM(Optical Add Drop Multiplexer)使得不同海底主基站能占用同一光纤对容量,光纤对数不依赖于海底主基站个数。水下信道体积制约使得单个海底主基站最大通信带宽为2~10 Gb/s。海底中继器采取掺饵光纤放大器EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)技术,搭配掺饵光纤、波分复用器和泵浦激光器工作。

3.4 色散补偿技术

色散会严重限制波分复用WDM技术的效能,可尝试在光纤通信中每间隔一段距离掺入色散补偿光纤以抵消色散积累影响。实际应用中,结合总体补偿、分段补偿和单波补偿等色散补偿方法,综合实现最优色散补偿结果。总体补偿由发送端预补偿、接收端后补偿以及路由线路补偿构成,路由线路补偿以中继段为单位,含色散补偿功能的中继段插入到普通中继段中,避免相同色散系数的光纤在同一中继段中连续使用;分段补偿划分S、M、L三个波长区间各自单独进行色散补偿;单波补偿只色散补偿单独范围波长。通过可调色散补偿TDC方法对信道色散的动态调整及自动跟踪实现色散管理。针对海底信息网的WDM传输系统,文献[19]研制了一款基于布喇格光栅FBG色散补偿技术的多通道均衡色散补偿级联光纤模块。

随着光纤通信技术的快速发展,现在和不久的将来可使用的新技术^[20]见表2。

4 结语

海底信息网承担着水下通信、目标探测、水文气象信息采集等任务,是人类研究探索和开发利用海洋环境的关键技术,是军事硬实力的重要展示和组成部分,是一个国家综合实力的重要体现。国内该领域起步相对较晚,广大科研人员通过不断地尝试研究,目前基本具备了从海底信息网基础材料研究到相关接驳技术、信息传输技术、控制技术的工程应用,相关技术已达到国际先进水平。但总体规模不大,各个网络的发展也是在独立的体系中进行,无形中增加了成本。因此,“三网合一”工程势在必行、迫在眉睫,也符合我国信息化建设的总体要求。

表2 海底光缆通信技术

使用技术	技术描述及性能
------	---------

光纤技术（色散管理和补偿）	大芯径有效面积纯硅单模光纤 PSCF 或 NZDSF 通过+/-搭配色散光纤进行色散管理；相干系统非线性处理上采用发射机进行预补偿，接收机 DSP 后补偿
光发射技术	PM-RZ-BPSK、PM-QPSK 或 PM-QAM 调制，多维调制，增益频谱预均衡技术
光接收技术	相干检测
超强前向纠错技术（SFEC）	提高接收机灵敏度约 5~8dB
EDFA 光放大技术	接收机前置放大器、在线中继放大器、LD 功放和远泵前放和功放；C+L 波段技术，增益自适应技术，增强通信可靠性
分布式喇曼放大技术	发送和接收端均采用喇曼放大技术或混合采用 EDFA/Raman 放大技术
数字信号处理技术（DSP）	通过时钟恢复和色散补偿技术降低非线性干扰
脉冲（频谱）整形技术	增加频谱效率，降低频带宽度使信道间距满足符号率要求，排除信道间串扰
复用方式	TDM+WDM+PM
空分复用技术（SDM）	利用多芯光纤、多模光纤和光子晶体光纤的优势增加光纤传输容量和效率

参考文献：

- [1] 梁德鹏. 美国海军水下观测系统的现状与发展[J]. 现代兵器, 1999(9): 23-25.
- [2] Kaneda Y. The advanced ocean floor real time monitoring system for mega thrust earthquakes and tsunamis-application of DONET and DONET2 data to seismological research and disaster mitigation-[C]//Oceans 2010 MTS/IEEE Seattle. Seattle: IEEE, 2010: 1-6.
- [3] 陈绍艳, 张多, 麻常雷. 加拿大 VENUS 海底观测网[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(11): 17-19.
- [4] Cowles T, Delaney J, Orcutt J A, et al. The ocean observatories initiative: sustained ocean observing across a range of spatial scales[J]. Mar Technol Soc J, 2010, 44(6): 54-64.
- [5] Esonet-noe. Presentation[EB/OL]. (2019-03-19) <http://www.esonet-noe.org/About-ESONET>.
- [6] 许惠平, 张艳伟, 徐昌伟, 等. 东海海底观测小衢山试验站[J]. 科学通报, 2011, 56(22): 1839-1845.
- [7] 王淑, 王红霞, 孙洋. 新型海底观测网的研究[J]. 信息通信, 2015(8): 56-58.
- [8] 彭晓彤, 周怀阳, 吴邦春, 等. 美国 MARS 海底观测网络中国节点试验[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 991-996.
- [9] 王文跃, 刘泰. 助力海洋强国 我国海底观测网进入规模建设期[N]. 人民邮电报, 2018-11-15(7).
- [10] 潘威, 周学军, 周媛媛. 基于 OTN 的水下信息网传输系统规划研究[J]. 船电技术, 2016, 36(10): 75-80.
- [11] 王希晨, 周学军, 周媛媛. 基于检测信息融合的缆系海底观测网络节点部署策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(9): 1665-1671.
- [12] 杨灿军, 张锋, 陈燕虎, 等. 海底观测网接驳盒技术[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 172-179.
- [13] 陈燕虎, 杨灿军, 李德骏, 等. 海底观测网接驳盒电源散热机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 121-127.
- [14] Chen Y H, Yang C J, Li D J, et al. Development of a direct current power system for a multi-node cabled ocean observatory system[J]. J Zhejiang Univ Sci C, 2012, 13(8): 613-623.
- [15] 吴承璇, 李正宝, 吕斌, 等. 海底观测网络中能源监控及管理系统硬件设计[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(6): 49-53.
- [16] 刘晓瑞, 亓夫军, 叶旺全, 等. 海底观测网的 OUC-Raman 节点现场机控制系统[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(8): 1216-1222.
- [17] 李德骏, 汪港, 杨灿军, 等. 基于 NTP 和 IEEE1588 海底观测网时间同步系统[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(1): 1-7.
- [18] 李恩, 钟震林, 栾颖利. 海底观测网分布式时间同步策略研究[J]. 广东通信技术, 2018, 38(6): 65-69.
- [19] 王淑, 王红霞, 陈霄, 等. 基于 Optisystem 的水下信息网色散补偿研究与设计[J]. 光通信技术, 2015, 39(10): 27-29.
- [20] 原荣. 海底光缆通信系统技术进展及其断代考虑[J]. 光通信技术, 2016, 40(8): 1-3.