



专题：海洋物联网

海洋物联网关键技术研究与应用

瞿逢重¹, 来杭亮¹, 刘建章¹, 涂星滨¹, 姜园²

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 中山大学电子与信息工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 传统的海洋观测网孤立、碎片化的传感数据已经难以满足我国海洋观测领域的需求, 低成本投入、低功耗运作、互联互通的海洋物联网是海洋信息领域的主流研究方向。介绍了海洋观测网的发展历程及研究现状, 并在浙江大学摘箬山岛海底观测网络的研究基础上, 提出一种新型的海洋物联系统架构以及一系列海洋物联网关键设备与平台, 包括小型化海洋中控机、水声通信机、窄带物联网浮球、坐底式试验平台、便携式声学释放平台。未来, 海洋物联网将向着轻量级、通信方式多样化与智能化的方向发展, 并接入陆地互联网, 实现“空天地海”万物互联。

关键词: 海洋观测网; 海洋物联网; 轻量级; 智能化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021149

Research and application on key techniques of marine IoT

QU Fengzhong¹, LAI Hangliang¹, LIU Jianzhang¹, TU Xingbin¹, JIANG Yuan²

1. Ocean College of Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

2. School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Ocean observation networks with isolated and fragmented sensor data are not able to meet the demands of current ocean monitoring. Marine internet of things (IoT), which has the advantage of low investment cost, low power consumption, and interconnection is the primary research direction in the area of ocean information. An overview of the development and status of ocean observation networks was presented. A new type of marine IoT system architecture was proposed based on the Zhejiang University - Zhairuoshan Experimental Research Observatory (Z₂ERO). It features key marine IoT devices and test platforms, including scientific instrument interface module, hydroacoustic communicators, narrow-band IoT floating balls, seafloor test platforms, and portable acoustic retrievers. Future marine IoT is expected to develop toward miniaturization, intelligence, and diversity of communication methods. With the support of the terrestrial internet, the internet of everything will be achieved through an integrated space-air-ground-sea network.

Key words: ocean observation network, marine internet of things, lightweight, intelligence

收稿日期: 2021-06-10; 修回日期: 2021-07-10

通信作者: 涂星滨, xbtu@zju.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2018YFB1802303, No. 2018YFB1802300); 国家自然科学基金-浙江两化融合联合基金重点资助项目 (No. U1809211); 三亚崖州湾科技城管理局 2020 年度科技计划项目 (No. SKJC-2020-01-014SI)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB1802303, No. 2018YFB1802300), Joint Fund of National Natural Science Foundation of China and Zhejiang Province (No. U1809211), 2020 Research Program of Sanya Yazhou Bay Science and Technology City (No. SKJC-2020-01-014SI)



1 引言

海洋观测技术一直以来都是世界各国研究发展的重点，它既是数字海洋的技术支持体系，也是军事战略的重要支撑。世界各国都在积极发展现代海洋监测技术，从空中、水面、水下 3 个维度对海洋环境进行立体观测。随着我国国民经济的发展以及基于国家安全方面的考虑，海洋观测技术在我国海洋经济、海洋科学以及军事中的地位 and 作用都将愈发显著。

常见的海洋观测手段包括基于船舶的短期观测、浮标观测网^[1]、卫星遥感^[2]以及海底观测网等方法。其中，海洋观测网具备独特优势，能够在恶劣条件下进行长期观测、能够提供可靠的电源供给和数据传输、支持多种类的传感仪器接入、具备进一步扩展能力等，使得海洋观测网成为海洋观测领域主流的观测手段^[3]。传统的海洋观测网根据通信方式与布放形式，可以划分为有缆的海底观测网及无缆的水声观测网。单一的有缆海底观测网受到复杂海洋环境的限制，工程难度大、成本高、维护难，难以大范围地推广；而无缆水声观测网则面临通信速率低、距离受限、节点寿命短等问题。因此，在目前的海洋观测领域，通过单一形式的有缆或者无缆观测网难以满足我国海洋信息领域的需求，结合有缆、无缆优势，实现低成本投入、多仪器接入、低功耗运作、大数据挖掘的海洋物联网（marine internet of thing），正逐渐成为海洋观测技术的主流研究方向^[4]。

海洋物联网于 21 世纪第 2 个 10 年开始被提出，是一个集海洋监测、信息传输、数据挖掘、结果反馈等多种功能于一体的海洋信息综合网络^[5]，利用物联网相关技术，将水上及水下各类传感与监测终端互联互通，从而将海洋数据整合，实现对海洋繁杂数据的监测和系统化管理^[6]。具体来说，海洋物联网通过水上或水下传感设备采集各类海洋传感参数，通过多种通信手段将数据发送

至岸基站、数据中心或云平台，再利用数据挖掘和机器学习等技术定制化的软件，对海洋数据进行统一的管理、分析及利用^[7]。

随着我国海洋经济的蓬勃发展，作为能在海洋环境中进行实时、原位、长时间立体观测的海洋信息网络，海洋物联网将在我国海洋经济和安全、海洋科学以及国防事业中发挥极为重要的作用。在海洋经济和安全方面，海洋物联网不仅可为海洋牧场、海洋渔业等提供生态环境实时监测、为海底管线、核电站周边海域等提供状态信息实时追踪的服务，进而实现监测海域的可视、可测、可追踪，还能够对收集的数据开展深度融合智能分析，真正实现监测区域的环境可评估、风险可预警^[8]。在海洋科学研究方面，海洋物联网具备海洋大数据的获取、存储和应用的功能，进而扩展人类对海洋空间认知的维度和深度^[9]。在国防事业中，海洋物联网也将凸显其在海洋军事情报的监听与收集、港口及近岸水域的监测、水下侦察与多节点协作探测等方面的技术先进性^[10]。

本文将着重介绍海洋物联网的发展过程与研究现状，并结合舟山摘箬山岛海洋观测网的实际研究，提出一种具有通用性的海洋物联网架构，并介绍一系列海洋物联网关键仪器，最后对海洋物联网的未来发展方向提出展望和思考。

2 海洋观测网的发展与研究现状

海洋物联网由传统海洋有缆和无缆观测网络的发展演变而来。在 20 世纪中期，美国就开始对海底观测系统进行研究，早期的研究成果有美国罗格斯大学设计的长期无人环境监测（long-term ecosystem observatory, LEO）系统^[11]、伍兹霍尔研究所设计的观测（Hawaii-2 observatory, H2O）系统^[12]。2006 年，由美国与加拿大联合在北太平洋海底建设的深海长期观测网（victoria experimental network under the sea, VENUS）建成，其海底部分的核心控制设备为海洋仪器中控机

(scientific instrument interface module, SIIM)^[13]。2009年,加拿大海底观测网(northeast pacific timeseries undersea networked experiments, NEPTUNE)完成建设,拥有800 km的环形主干缆和5个海底节点^[14]。除此之外,国外较为著名的缆海底观测网络系统有:美国国家科学基金会的大洋观测计划(ocean observation initiative, OOI)和美国国家海洋与大气管理局的海洋综合观测系统(integrated ocean observing system, IOOS)^[15]、日本密集海底地震和海啸网络系统(development of dense ocean floor network system for earthquakes and tsunamis, DONET)^[16]、欧洲海底观测网(European seas observatory network,

ESONET)^[17]等。随着我国经济、科技水平的提升,国内不少单位也开展了相关的工作,如中国科学院南海海底观测网^[18]、同济大学东海海底小衢山试验站^[19]等,这些站点为海洋信息的获取和利用提供了有效的依据。国内外有缆观测网的参数对比见表1。

2014年,由浙江大学自主研发设计的浙江大学摘箬山岛海底观测网络(Zhejiang University Zhairuoshan experimental research observatory, Z₂ERO),在浙江省舟山市摘箬山岛建设完成并投入使用^[20]。整套系统由岸基站(shore station)、接驳盒(junction box)、海洋仪器中控机(SIIM)以及全长1.5 km的中继光缆组成,如图1所示。

表1 国内外有缆观测网参数对比

海底观测网	所属国家	建设时间	总缆长/km	节点数
LEO-15	美国	1997年	9.6	2
H2O	美国	1998年	1 750	2
VENUS	美国、加拿大	2006年	44	3
NEPTUNE	美国、加拿大	2009年	800	5
OOI	美国	2016年	880	7
DONET	日本	2010年	750	12
东海海底小衢山试验站	中国	2009年	1.1	3
南海海底观测网	中国	2013年	2	3

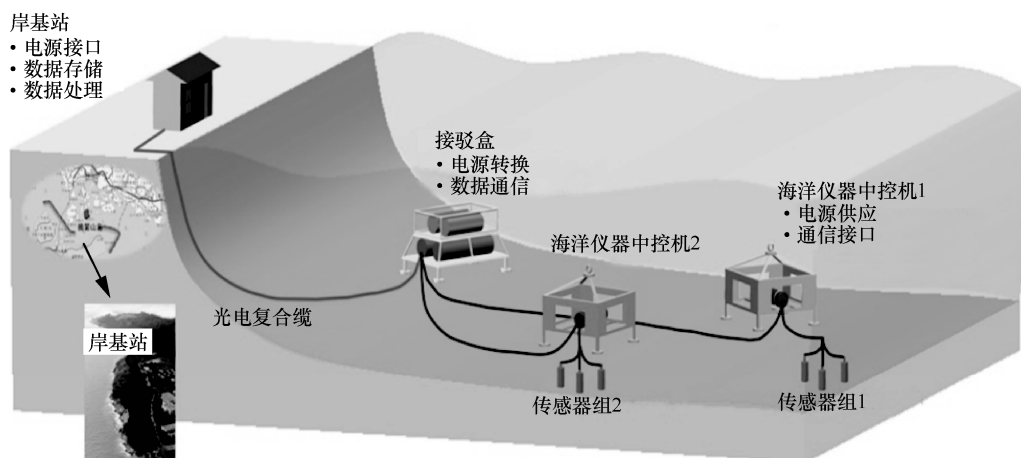


图1 浙江大学摘箬山岛海洋立体观测示范研究与试验系统(Z₂ERO)架构



Z₂ERO 采用-10 kV 高压直流供电, 由接驳盒转压为 375 V 后输入 SIIM, 再通过 SIIM 转换为 48 V、24 V、12 V 等电压后为观测仪器供电。系统配备吉比特光纤通信, 可用于高清视频和海量观测数据的实时传输。Z₂ERO 一共部署了两套 SIIM 节点, 连接了 2 组共计 14 个用于海洋观测的传感仪器。

Z₂ERO 系统于 2014 年布放。在完成 5 年稳定运行之后, 于 2019 年 3 月打捞上岸, 完成预定工作任务。

Z₂ERO 的研制和部署在我国海洋观测网的发展过程中具有重要的意义, 但同时也暴露出传统有缆观测网络的许多问题。首先, Z₂ERO 是单一的有缆观测网络, 包含两个主要观测节点, 覆盖范围较为局限。其次, 接驳盒与 SIIM 的布放与回收需要大型的作业船只和专业的操作人员, 日常维护极为不便, 在布放以及回收工作过程中耗费了大量的人力物力。单一的有缆通信模式, 以及复杂的、大型化的海洋观测接驳仪器限制了海洋观测网的发展和推广。小型化、无缆化、智能化的海洋观测仪器与平台, 以及结合多种通信方式的海洋观测网络, 具有重要的研究意义。

3 新型海洋物联网设计与实践成果

浙江大学海洋传感与网络研究所项目组在现有研究的基础上, 以舟山群岛海域为典型, 提出了一种新型海洋物联网架构, 并研发了一系列的海洋物联网关键设备。该海洋物联网的通用模型, 如图 2 所示。

该模型分为传感层、传输层、网络层、聚合层和应用层。第一层为传感层, 是新型海洋物联网的信息源, 包括海洋观测仪器、传感器、摄像头等的的数据, 可为各种海洋应用提供有价值的传感数据和识别数据。第二层为传输层, 在海洋物联网中根据应用场景及速率要求选择不同的通信技术进行数据传输, 是终端节点向上传输或接收

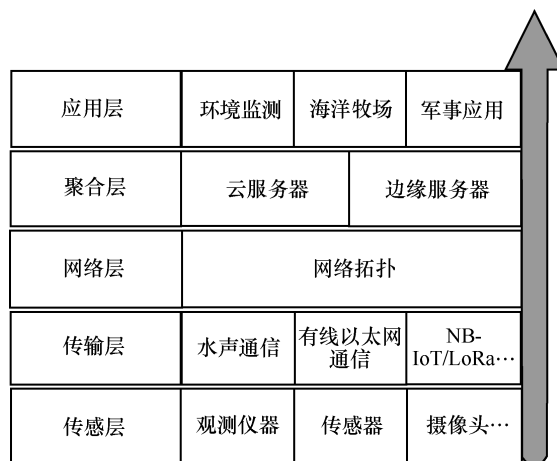


图 2 通用海洋物联网模型

信息的手段, 包括有线的以太网通信、无线的水声通信、窄带物联网通信等。第三层为网络层, 该层为构建高效的海洋物联网拓扑结构, 将传输层产生的数据传输至聚合层, 以控制海洋物联网中各节点之间或节点与岸基之间的通信, 如水声通信网络的介质访问控制 (medium access control, MAC) 等。第四层为聚合层, 该层结合边缘计算和云计算技术, 以处理海量的水下传感器和观测设备的数据。云服务器有着强大的计算能力, 能将传输层数据进行分析计算并传输至应用层; 边缘服务器可进行协同计算以降低云服务处理的数据量, 以更低的时延向终端发出更快的决策响应。第五层为应用层, 利用聚合层处理后的海洋数据, 向用户提供可视化、智能化的服务, 可应用于环境监测、海洋牧场、军事应用等多种场景^[21]。

舟山群岛海洋物联网架构如图 3 所示, 整体网络根据层次和通信方式可以分为海底有缆观测网络、水下声学观测网络与水面无线观测网络。其中, 海底有缆观测网络由多个坐底式观测平台组成, 平台通过光电复合缆与岸基站相连, 由岸基站提供供电和数据传输支持; 水下声学观测网络包括小型水声观测平台与搭载水声通信机的各类潜器 (如 AUV、ROV 等), 通过水声通信进行数据发送和接收; 水面无线观测网包括无人船、浮标和浮球, 通过电磁波进行无线通信, 通信手

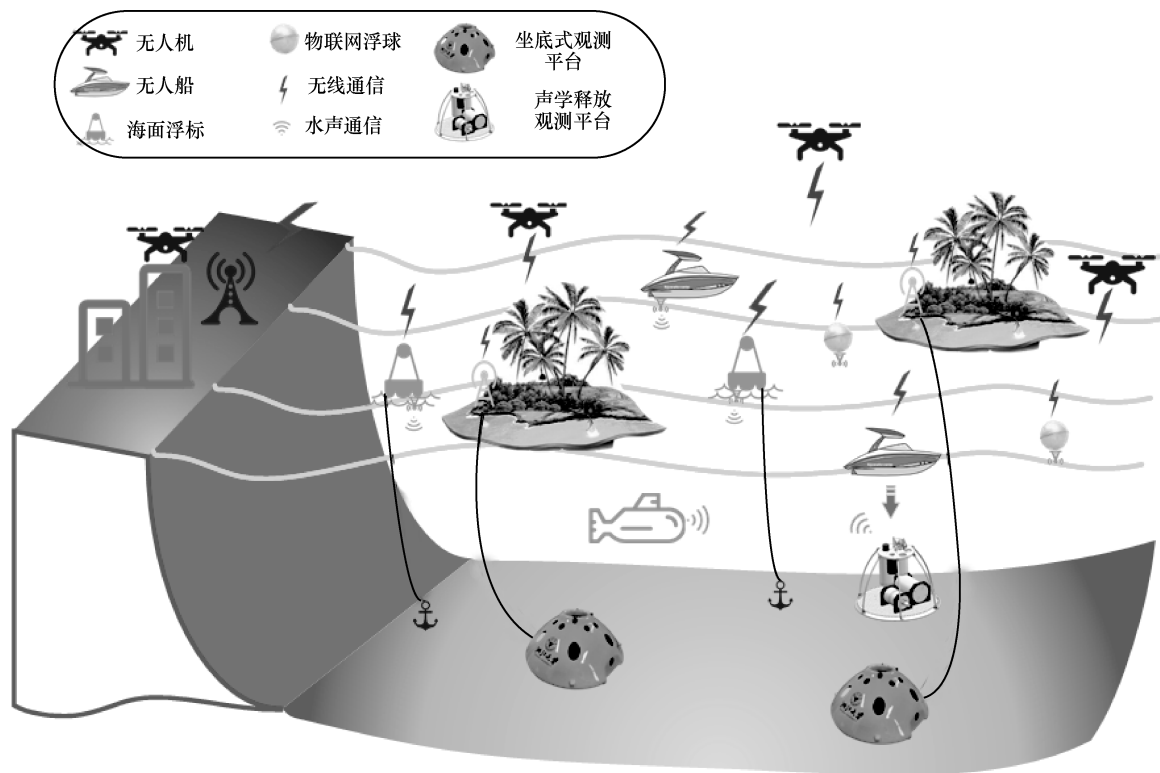


图3 舟山群岛海洋物联网架构

段包括窄带物联网 (narrowband internet of things, NB-IoT)、LoRa (long range)、4G/5G 等。无线电通信将有缆观测网与水声观测网采集的数据实时传输至岸基数据中心进行处理和存储。这一架构将有缆观测、水声通信和无线电通信技术相结合, 可实现海底、水下、水面的多层次立体化观测。同时, 小型化的海洋物联网终端设计, 在维持观测节点性能和续航时间的同时, 降低了节点的成本, 使得网络具有较强的可伸缩性, 易于部署和维护。

小型化和低功耗是海洋物联网区别于传统海洋观测网的两大特点, 必须在物联网关键设备上得以体现。本文在原有研究的基础上, 对海洋物联网关键设备进行电气和机械结构优化, 研制了一批针对海洋物联网的仪器设备与试验平台, 关键仪器包括小型化 SIIM、小型化水声通信机和窄带物联网微型浮球, 试验平台包括适用于有缆观测的坐底式观测平台和适用于无缆观测的便携式

水声释放平台。

(1) 小型化 SIIM 研制

小型化 SIIM 是海洋观测节点的核心部件, 具备电源管理、通信协议转换和自诊断功能。一般来说, 传感器布放位置离岸较远, 而网线等都不具备远距离传输的能力, 故采取单模光纤作为通信媒介, 以 TCP/IP 进行数据传输。而传感器的数据接口多为 RS232/RS485, 为能通过光纤传输, SIIM 需提供协议转化模块, 将各协议转为 TCP/IP 协议。同时 SIIM 要为传感器及内部的电路供电, 而各部件所需的电压不同, 因此需要电源模块进行转压。最后, 对于各部分传感器的供电和通信需要进行管理, 同时还要对 SIIM 内部的温/湿度、姿态等数据进行监测。因此, SIIM 整体上包括转压模块、通信协议转换模块以及核心控制板。自主研制的小型化 SIIM 如图 4 所示, 整体尺寸 120 mm×180 mm, 重量为 8 kg。单个 SIIM 对外提供 5 个接口, 接口类型包括 RS485、RS232、



Ethernet, 供电电压包括 48 V、24 V、12 V、5 V, 单接口支持 50 W 峰值功耗, 可根据搭载仪器需求调整 SIIM 内部电源模块进行适应性选配。可接入的仪器包括且不限于海底地震仪、声学多普勒流速剖面仪、温盐深仪、水下摄像头、水质传感器、水声通信机等。小型化后 SIIM 相比于上一版本的 SIIM, 在最大限度保留其原有功能的情况下, 体积缩小了 92.5%, 质量减小了 86.7%。

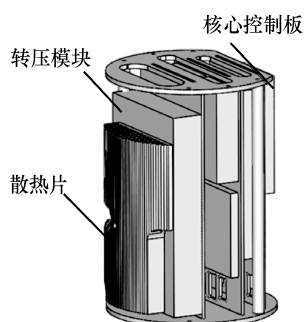


图 4 小型化海洋仪器中控机 (SIIM)

(2) 小型化水声通信机研制

由于水下电磁波传播的局限性, 声波成为了水中远距离传输更为有效的载体, 而水声通信机则是实现水下声学通信与组网的关键设备。自主研发的小型化水声通信机如图 5 所示, 工作频段为 13~18 kHz, 发射峰值功率为 50 W, 并具备休眠与唤醒能力。在休眠模式下, 整机功耗小于 30 mW。相干通信模式下, 可实现 4 kbit/s、2 kbit/s、1 kbit/s 自适应速率通信, 非相干通信模式下可实现 100 kbit/s 速率通信, 通信距离达 2.4 km, 并同时支持 63 个节点的组网通信。该水声通信机的技术指标处于国内先进水平, 能够适应海洋物联网多种场景下的应用需求。



图 5 小型化水声通信机

(3) NB-IoT 微型浮球研制

窄带物联网 (NB-IoT) 是一种新兴的低功耗物联网通信技术, 具备低功耗、广覆盖、远距离、海量接入的特点, 非常适合于河流和近海的数据传输。基于 NB-IoT 技术研制了一系列的微型浮球, 如图 6 所示。搭载温度传感器、姿态传感器与定位模块, 可以系于目标船体做跟随运动, 或随海浪做拉格朗日漂流运动, 并将采集数据实时回传至数据中心。窄带物联网微型浮球自带锂电池, 通过低功耗的器件选型、电路设计与控制策略, 可在海上连续作业 3 个月以上。

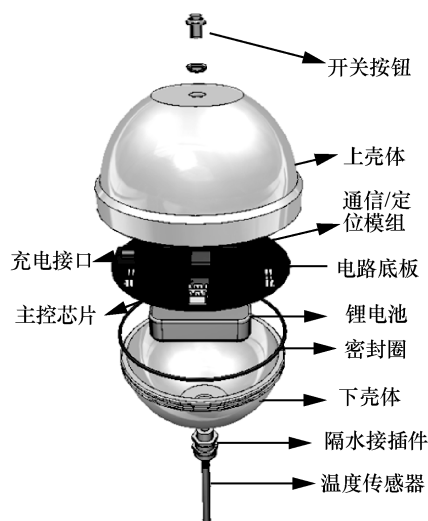


图 6 窄带物联网微型浮球

(4) 坐底式观测试验平台研制

坐底式观测平台是一种有缆的仪器试验平台, 如图 7 所示。平台直径 1.5 m, 高 0.5 m, 重 50 kg, 采用光电复合缆进行供电和数据传输, 对外提供 5 种不同类型的仪器舱, 可以搭载多种类型海燕观测仪器进行长期原位观测作业。目前, 平台内部搭载有 SIIM、盐度传感器、溶解氧传感器、水下摄像头等设备, 于 2021 年 1 月布放于舟山摘箬山岛北岙海域进行实海况试验及数据采集, 稳定工作至今。

(5) 便携式声学释放海洋观测平台研制

便携式声学释放海洋观测平台是一种无缆的仪器试验平台, 如图 8 所示。平台直径 74 cm, 高

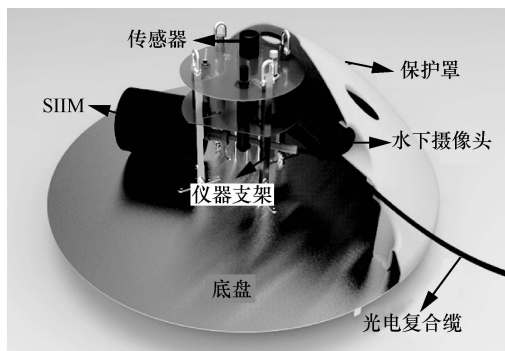


图7 坐底式观测平台

50 cm, 总重 30 kg, 搭载有 SIIM、传感器、水声通信机和声学释放结构。该平台具备声学释放回收功能, 在完成观测任务后, 可通过接收特定声学波形信号, 释放携带的浮球, 通过浮球携带的缆绳对平台进行回收, 适用于短期海洋观测试验作业。

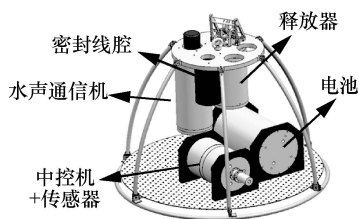


图8 便携式水声释放平台

以上所述的 3 种海洋物联网关键仪器与两种仪器试验平台, 可以从海底、水下、海面 3 个维度进行多层次的海洋观测, 并通过光缆、水声、无线电等多种方式进行数据传输, 为海洋物联网的构建提供了更多的接入方式和观测手段。

4 海洋物联网发展趋势与思考

海洋物联网是传统海洋观测技术的演进产物, 也是物联网技术在水下环境的延伸^[22]。海洋物联网可以增进人类对海洋的认识, 充分利用海洋的潜力, 更合理地进行海洋环境治理, 促进人类与海洋的和谐共处。然而, 海洋环境的复杂性极大地限制了海洋物联网的发展, 表现为海洋仪器复杂且贵重、水下通信手段受限、终端计算能

力受限等, 这些问题都亟待攻克和解决。可以预见, 海洋物联网的发展将会有以下 4 个趋势。

(1) 海洋观测节点小型化

轻量级、小型化、成熟且稳定的海洋观测设备是发展海洋物联网的基础, 材料科学的发展将产生适应海洋环境下长时间稳定工作的材料, 微电子产业的进步将进一步缩小电路体积, 提高仪器性能, 海洋设备制造产业的成熟将降低海洋仪器的造价。在这一趋势下, 有更多的海洋仪器能够用于海洋物联网, 拓宽海洋观测和开发的范围。

(2) 水下通信技术多样化

复杂多变的水声信道极大地影响了水声通信的速率、距离和稳定性, 更多用于克服这一障碍的技术手段正不断涌现, 如水下 MIMO 通信技术、水下多模态通信技术等。同时, 水下光通信、电磁通信也可在特定场景下作为声学通信的补充, 高速率、远距离的水下通信技术将应运而生。

(3) 智能终端与边缘计算的发展

人工智能及边缘计算的发展使得水下终端具备更强的数据处理能力, 大部分的任务可以在边缘侧完成处理, 从而降低数据的传输负载, 提高海洋物联网的整体性能。

(4) 组网协议标准化

海洋观测网中的观测节点种类繁多, 通信协议各异, 缺乏统一的接入标准和节点组网协议, 标准化、强兼容性的接入和组网协议, 可以实现海洋观测节点的互联互通, 使数据传输在海洋和陆地间畅通无阻。

观测设备微型化是构建新型海洋物联网的基础, 是传统海洋观测网向海洋物联网转变的第一步。在之后的研究工作中, 将结合海洋物联网发展趋势, 构建具有多样化通信手段、智能化终端计算、标准化组网协议的新型海洋物联网络。

5 结束语

本文介绍了传统海洋物联网的发展与研究现



状, 指出其存在的缺陷, 并介绍了舟山群岛海域的海洋物联网架构以及 SIIM、水声通信机、窄带物联网微型浮球、坐底式有缆观测平台、便携式无缆观测平台等关键设备。海洋物联网的发展将逐步走向观测节点小型化、通信技术多样化、计算智能化。未来, 海洋物联网将进一步发展完善, 以小型化、低成本、低功耗、智能化的节点形成大规模立体的海洋物联网, 并最终接入陆地互联网络, 实现“空天地海”万物互联的伟大愿景。

参考文献:

- [1] DORMAN C E, WINANT C D. Buoy observations of the atmosphere along the west Coast of the United States, 1981-1990[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 1001(C8): 16029-16044.
- [2] LO C P. Applied remote sensing[J]. *Geocarto International*, 1986, 1(4): 60.
- [3] 张雪薇, 韩震, 周玮辰, 等. 智慧海洋技术研究综述[J]. *遥感信息*, 2020, 35(4): 1-7.
ZHANG X W, HAN Z, ZHOU W C, et al. Survey of smart ocean technology[J]. *Remote Sensing Information*, 2020, 35(4): 1-7.
- [4] QIU T, ZHAO Z, ZHANG T, et al. Underwater Internet of Things in smart ocean: system architecture and open issues[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(7): 4297-4307.
- [5] HUO Y M, DONG X D, BEATTY S. Cellular communications in ocean waves for maritime internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9965-9979.
- [6] HU C Q, PU Y W, YANG F H, et al. Secure and efficient data collection and storage of IoT in smart ocean[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9980-9994.
- [7] YANG J C, WEN J B, WANG Y H, et al. Fog-based marine environmental information monitoring toward ocean of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(5): 4238-4247.
- [8] 李良玉, 杨林. 物联网技术在水环境监测中的研究进展[J]. *环境保护与循环经济*, 2020, 40(12): 59-64, 74.
LI L Y, YANG L. Research progress of internet of things in water environment monitoring[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2020, 40(12): 59-64, 74.
- [9] 姜涛. 基于物联网的海洋生态环境动态监测系统研究与应用[J]. *信息通信*, 2020, 33(7): 128-129.
JIANG T. Research and application of marine ecological environment dynamic monitoring system based on Internet of things[J]. *Information & Communications*, 2020, 33(7): 128-129.
- [10] 姜胜明. 海洋互联网的战略战术与挑战[J]. *电信科学*, 2018, 34(6): 2-8.
JIANG S M. Marine Internet: strategies, tactics and challenges[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(6): 2-8.
- [11] VON ALT C, DE LUCA M, GLENN S, et al. LEO-15: Monitoring and managing coastal resources [J]. *Sea Technology*, 1997, 38(8): 10-6.
- [12] PETITT R A, HARRIS D W, WOODING B, et al. The Hawaii-2 observatory[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(2): 245-253.
- [13] 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.
CHEN S Y, ZHANG D, MA C L. VENUS submarine observation network of Canada[J]. *Ocean Development and Management*, 2015, 32(11): 17-19.
- [14] 李建如, 许惠平. 加拿大“海王星”海底观测网[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(6): 656-661.
LI J R, XU H P. NEPTUNE-Canada[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(6): 656-661.
- [15] 王春谊, 李芝凤, 吴迪, 等. 美国海洋观测系统分析[J]. *海洋技术学报*, 2012.
WANG C Y, LI Z F, WU D, et al. Analysis of american ocean observing system[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2012.
- [16] KAWAGUCHI K, KANEDA Y, ARAKI E. The DONET: a real-time seafloor research infrastructure for the precise earthquake and tsunami monitoring[C]//*Proceedings of Oceans 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [17] PRIEDE I G, SOLAN M, MIENERT J, et al. ESONET - European sea floor observatory network[C]//*Proceedings of Oceans' 04MTS/ IEEE Techno-Ocean'04* (IEEE Cat. No.04CH37600). Piscataway: IEEE Press, 2004: 2155-2163.
- [18] 陈建冬, 张达, 王潇, 等. 海底观测网发展现状及趋势研究[J]. *海洋技术学报*, 2019, 38(6): 95-103.
CHEN J D, ZHANG D, WANG X, et al. Research on the state-of-the-art and trends of seafloor observatory[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2019, 38(6): 95-103.
- [19] 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.
XU H P, ZHANG Y W, XU C W, et al. Xiaoqushan experimental station for seabed observation in the East China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(22): 1839-1845.
- [20] XIE J, QU F Z, WANG Z D, et al. An introduction to Zhejiang university - Zhairuoshan experimental research observatory and retrieved data analysis[C]//*Proceedings of the 10th International Conference on Underwater Networks & Systems - WUWNET '15*. New York: ACM Press, 2015: 1-8.
- [21] QIU T, ZHAO Z, ZHANG T, et al. Underwater Internet of Things in smart ocean: system architecture and open issues[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(7): 4297-4307.

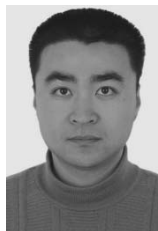
- [22] 官权升, 陈伟琦, 余华, 等. 声电协同海洋信息传输网络[J]. 电信科学, 2018, 34(6): 20-28.

GUAN Q S, CHEN W Q, YU H, et al. Acoustic-radio cooperative marine information network[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(6): 20-28.



刘建章 (1997-), 男, 浙江大学海洋学院硕士生, 主要研究方向为海洋物联网。

[作者简介]



瞿逢重 (1980-), 男, 博士, 浙江大学海洋学院教授, 主要研究方向为水声通信与网络、水声信号处理、跨介质通信。



涂星滨 (1989-), 男, 博士, 浙江大学海洋学院在站博士后, 主要研究方向为水声通信。



来杭亮 (1996-), 男, 浙江大学海洋学院硕士生, 主要研究方向为物联网、海洋观测网。



姜园 (1970-), 男, 博士, 中山大学电子与信息工程学院教授, 主要研究方向为无线通信、卫星导航与定位、通信对抗。