



专题：水下通信网络技术

水空跨域综合信息传输网络技术进展

刘勇¹, 叶璇¹, 顾明华², 陈宇¹

(1. 中国船舶集团有限公司第七二二研究所, 湖北 武汉 430205;

2. 陕西飞机工业有限责任公司, 陕西 汉中 723200)

摘要: 针对现有水下信息网络难以满足保障水下信息传输需求的现状, 分析国内外水下信息网络的发展现状, 设计具有“有缆+无线”“固定+机动”“水空跨域”等特色的水空跨域综合信息传输网络。研究水下栅格网络、海底主基站、水空跨域通信网关、水下多元信息融合等关键技术, 构建“水下信息高速公路”, 实现水下主干有缆网、无线固定网和无线移动网的深度融合, 为实现水下通信、侦测、预警、观测、导航等业务提供基础性承载网络, 大幅提升水下多元信息的快速感知与动态响应能力, 为我国海洋科学研究、海洋资源开发利用、国防安全等提供技术支撑。

关键词: 水空跨域; 综合信息传输; 信息融合

中图分类号: TN915.85

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025222

Development on water-air cross-domain integrated information transmission network technology

LIU Yong¹, YE Xuan¹, GU Minghua², CHEN Yu¹

1. 722 Research Institute, CSSC, Wuhan 430205, China

2. Shaanxi Aircraft Industry Co., Ltd., Hanzhong 723200, China

Abstract: According to the current limitations of underwater information transmission network in meeting operational requirements, domestic and international development trends in underwater information network were analyzed, a water-air domain integrated information transmission network was designed which had the advantages of cable/wireless, fixed/maneuver, water-air cross-domain. Key technologies including underwater grid network, submarine primary base station, cross-domain water-air communication gateways, and multi-source underwater information fusion were developed to construct an underwater information superhighway, the deep integration of underwater trunk cable, wireless fixed and mobile networks was realized, the bearer network for a variety of services was provided,

收稿日期: 2025-06-25; 修回日期: 2025-08-16

通信作者: 叶璇, yexuan722@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U2341201); 国家重点研发计划项目 (No.2018YFC1405800); 基础产品创新科研项目 (No.1452-0208040)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U2341201), The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFC1405800), Basic Product Innovation Research Project (No.1452-0208040)

such as underwater communication, detection, early warning, observation and navigation, rapid perception and dynamic response capabilities for multi-source underwater information were enhanced, to provide technological support for China's marine scientific research, marine resource development and utilization, and national defense security.

Key words: water-air cross-domain, integrated information transmission, information fusion

0 引言

随着海岛归属、海域分割、海洋资源等海洋权益纷争不断加剧,我国海域面临着越来越严峻的挑战与安全威胁,尤其美、日、澳等国家在我国周边海域部署了大量无人潜航器和侦测设备,加强封控和围堵,对我国维护海洋国土安全、海洋战略利益构成极大挑战。

水空跨域综合信息传输网络聚焦水下信息传输需求,以提升水下通信、预警探测、环境观测和导航定位等保障能力为目标,研究先进的水下能源、通信、感知、载体等基础技术,其中业务单元综合采用声、光、电磁等新型通信技术,构建由水下有缆网、无线固定网与无线移动网深度融合的综合信息传输网,形成高速宽带、冗余抗毁、全域覆盖、安全可靠的水下信息传输保障能力,不断提升我国海域水下信息平台体系化、网络化、信息化能力。

1 国内外发展现状

美海军2015年建成了“近海海底持续监视网”(PLUSNet)^[1],基于该网发展了部队网(FORCENet)^[2-3],海光缆信息传输网为海底主干传输网络,并承载各类探测、导航等海底固定式传感节点,实现通信指挥、水下警戒、海底观测、水下导航定位等功能的综合性水下信息网络^[4]。美国海网(Seaweb)利用水声通信链路将固定节点、移动节点和网关节点连接成网^[5],验证无人潜航器(UUV)移动节点的性能,并在“可部署自主分布式系统”(DADS)和“战场前沿分析遥感观测网络”(FRONT)中进行了应用^[6]。

美国2016年建成海洋观测系统(OOI),从早期链形拓扑扩展为环形拓扑。美国和加拿大联合设计了东北太平洋海底观测光缆传输网(NEPTUNE),其海底光缆总长度约3 000 km,直流恒压供电能量输送60 kW,信息传输达到10 Gbit/s。日本2015年建成海沟海底地震海啸观测网(S-net),缆线总长5 700 km,该网络是栅格拓扑,采用恒流供电模式,是目前规模最大的海光缆信息传输网^[7]。

20世纪90年代,我国与日本、美国合作建设了中日海底光缆通信系统,这是我国第一条海底通信光缆,波分复用、水下设备、远端供电设备等技术进步,带动了海底光缆通信系统向系统容量更大、传输距离更远的方向发展,但是这些大规模海底光缆通信系统均用于陆地或岛屿之间的通信,目前我国开展的海底观测网^[8-9]、探测预警网等试验研究,已建成小规模试验网络,但不具备水下信息传输、探测和警戒感知综合能力,同世界发达国家相比尚有差距,主要体现在:水下信息传输基础设施匮乏,覆盖范围受影响;水下传输网络化程度低,抗毁抗扰能力弱;水下传输灵活性差,网络管理能力弱。

2 水空跨域综合信息传输网络

2.1 系统架构

根据水下信息网络的应用场景与能力需求,水空跨域综合信息传输网采用“有缆+无线”“固定+机动”“水下+跨域”的信息网络融合与传输方式,利用声、光、磁、有线等多种信息传输手段,突破跨域异构网络互联、水下/水面多平台组网、水下有线/无线高速信息传输、深远海大容量



电能传送等关键核心技术，打通潜航器等水下移动网络节点与水下固定网络节点间的通信链路，实现多元异构网络间的资源共享与深度融合。水空跨域综合信息传输网络采用“两网一心”架构，水空跨域综合信息传输网络架构示意图如图1所示。由海底光缆有线网、水空跨域无线网和岸基信息处理中心构成。

海底光缆有线网将水下固定节点通过海底光缆连接到岸基网络，具有高速数据传输能力和大容量供电能力，通过声、光、电磁等无线通信链路将水下机动无线节点与海底光缆有线网连接成网络，水下通信深度从低频无线电的数百米拓展到数千米深；水空跨域无线网主要通过水声通信与水下机动无线节点通信，布设跨域网关节点实现水空跨域通信，通过卫星通信与岸基信息处理中心通信，水空跨域无线网跨域网关节点之间采用超短波通信；水空跨域无线网可机动地、应急地进行铺设，弥补海底光缆铺设覆盖不足的缺点，拓展水下信息传输覆盖范围，避免大功率电磁发射暴露问题。

2.2 海底光缆有线网

海底光缆有线网主要包括海底光缆网骨干节点设备、海底光缆网接入节点设备、岸基远供电

源、网络运行维护设备、海底光缆网管理系统、海底业务系统，海底光缆有线网如图2所示。系统采用骨干网、接入网、用户网3层组网架构，通过业务设备→接入节点→骨干节点3级结构接入干线长距传输至岸站，通过分布式无线网络延伸有缆网络的覆盖范围，通过跨域通信及无线节点“随遇接入”进一步提升系统的抗毁性与信息传输可靠性，支持水下通信、预警探测、海洋观测和导航授时等业务接入光缆有线网传输至岸站。

2.3 水空跨域无线网

水空跨域无线网主要由水面无线网、水下无线网2个子网组成，通过卫通广域网连接岸基信息处理中心，融合水声、超短波、卫星等多种手段，水空跨域无线网如图3所示。针对水下无线网存在的通信能力弱、组网规模小、异构跨域互联难的问题，设计水下无线移动接入、水下动态组网与跨域多体制通信，采用“以空促海”思想，利用水面超短波无线网提升水下水声通信节点性能。

水下无线网络采用水声通信，水面无线网以稳健的无线链路支撑水下通信与组网，并回传至岸基信息处理中心。实现水下、水面、空中等多任务源信息获取与交换，为水下协同态势感知、

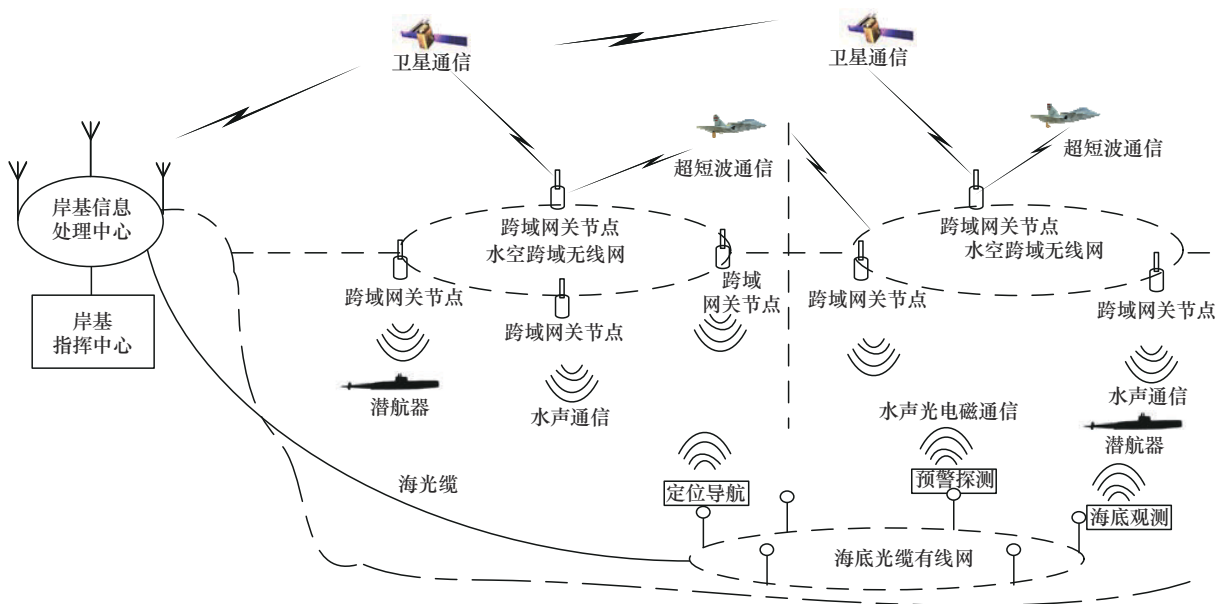


图1 水空跨域综合信息传输网络架构示意图

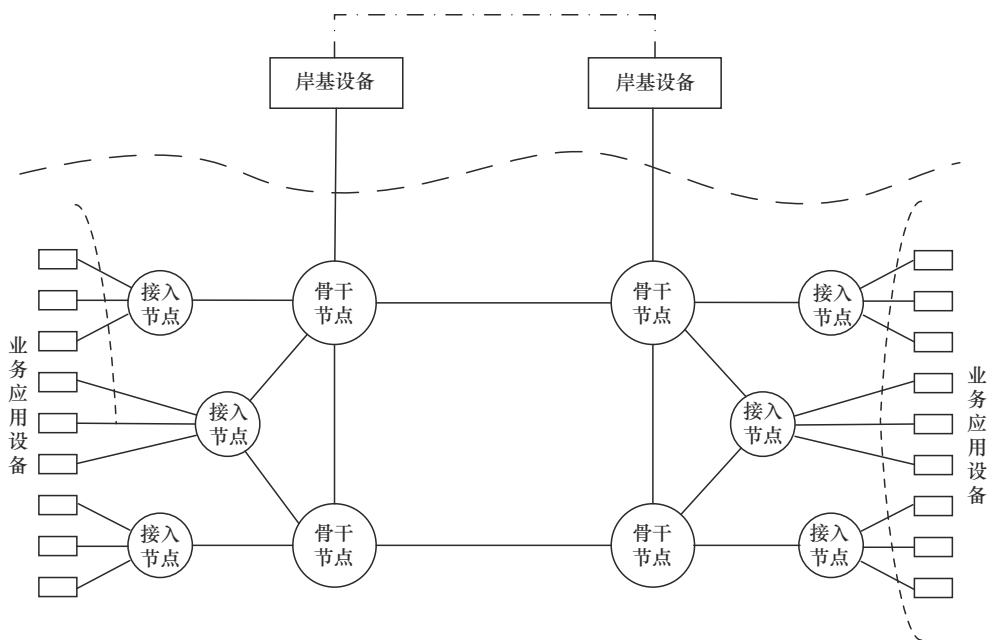


图2 海底光缆有线网

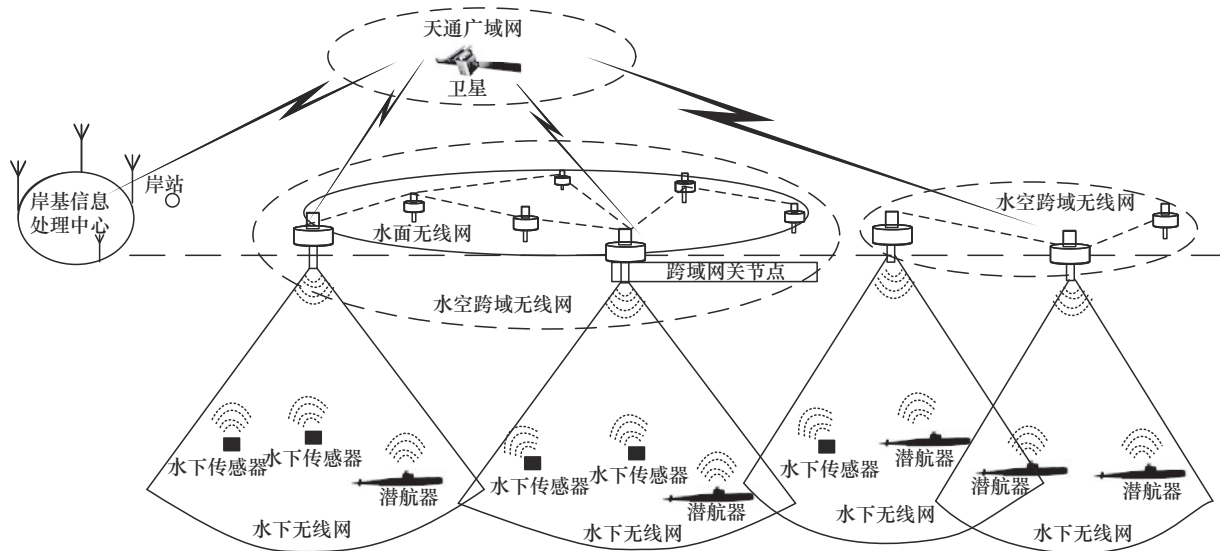


图3 水空跨域无线网

协同控制等提供信息传输基础保障。水空跨域无线网是一个跨介质、多体制异构信息交换网络，具备灵活机动、快速布防的特点，在指定任务海域，能够机动、快速地布放网络节点。

2.4 岸基信息处理

岸基信息处理主要包括中心服务器、岸基接入设备、卫星通信台站设备、海光缆岸基传输设备等组成，信息处理中心如图4所示。为充分发挥水空

跨域综合传输网的优势，信息处理中心通过融合交换与水下信息平台实现信息共享，通过中心评估软件实现水下多元信息、系统网络节点状态、水下用户数据等信息的汇总、处理和分析，为岸基指挥中心提供信息支撑，实现长期、实时对水下各类信息监测，同时支持对网络性能进行评估和优化。

2.5 系统特征

与传统的水下信息网络相比，水空跨域综合

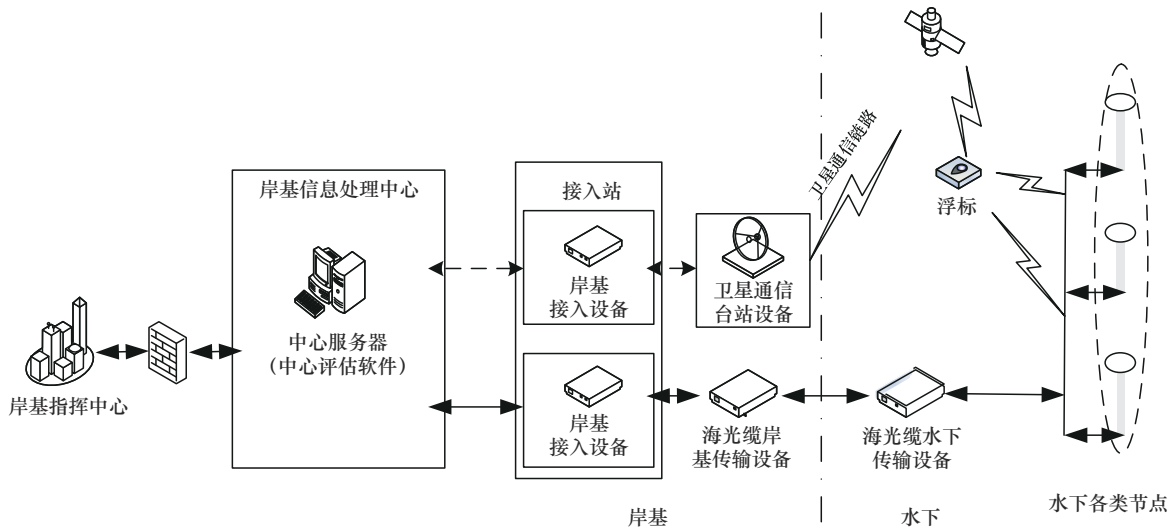


图4 信息处理中心

信息传输网络具有以下3点系统特征。

(1) 依托海底光缆构建栅格型传输网^[10]。通过岸基设备、骨干节点、接入节点、业务设备构建栅格型有缆网络，不同于传统的链形和环形网络，栅格网可提高海底光缆网络的生存性和抗毁性，即使单点出现故障，仍可通过迂回正常工作。同时，海底光缆网络可提供大带宽高速通信、大容量远程供电能源。

(2) 海底光缆采用接入网的思路，具备灵活接入能力。采用统一标准设备接口和非接触连接的思路，在接入节点提供即插即用、灵活动态组网的水下宽带接入功能，支持预警探测、海洋观测和导航授时等业务应用设备的即插即用，以提高海底光缆网络的可接入性和可扩展性。

(3) 通过可机动部署的无线通信节点构建水空跨域无线网（如无人水面艇（USV）、UUV、浮标、潜标等）。其主要特点是不依赖于固定基础设施，增加固定有缆网络的覆盖范围，快速部署，机动灵活，能够随机组建无线网络实现设备互联^[11]。

3 水空跨域综合信息传输网关键技术

3.1 水下栅格网络

海底光缆有线网采用栅格网络架构，具有抗

毁能力强的特点，水下栅格网络拓扑结构如图5所示。构建基于智能化栅格网络形态的海光缆有线网，作为水下综合信息传输的公用基础设施，实现大容量信息高速传输，大功率电能远程传送、海底综合业务灵活接入。

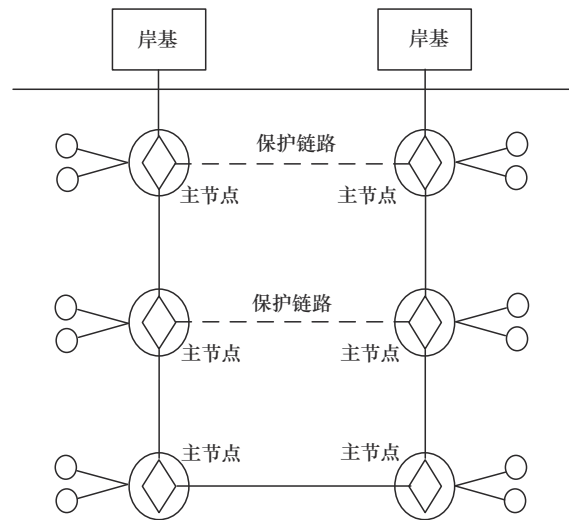


图5 水下栅格网络拓扑结构

水下栅格网络既有传统海底光缆通信网的通信功能，完成陆地到海岛、海岛和海岛之间的信息传输，又能利用水下接入设备，在海底完成水下通信系统、警戒系统、观测系统、导航系统及其他业务系统等信息的接入和海底设备供电。水

下栅格网络采用分域建设、多域互联的方式进行规划建设，最终覆盖我国主要海域，形成“水下信息高速公路”。

依据我国海域分布特点，水下栅格网络形态有岛礁登陆型、岛礁远供型和近岸沿海型 3 种，3 种水下栅格网络形态示意图如图 6 所示。

(1) 岛礁登陆型如图 6 (a) 所示。即从深海岛礁向大陆延伸。网络呈梯形长条结构，在大陆一侧布设 2 个岸基站，在深海岛礁布设另外 2 个岸基站，骨干节点分布在梯形交叉点上，形成从深海到大陆的具有一定覆盖宽度的带状区域。

(2) 岛礁远供型如图 6 (b) 所示。即从深海岛礁向远海延伸。此种类型与岛礁登陆型具有相似之处，均为梯形长条状结构。不同的是，该类型只在—端的深海岛礁上布设有岸基站。此种网

络可向外海做带状伸展布局，形成突围扩张能力。

(3) 近岸沿海型如图 6 (c) 所示。即对海岸向外 500 km 海域进行覆盖。此种网络可在沿海建立多个登陆岸基站，对近海领域形成透明感知与安全防御能力。

3.2 海底主基站技术

海底主基站是海底光缆有线网的骨干节点，具有综合接入功能，海底主基站主要由光电分离腔、电源腔、综合控制腔和海洋电极等设备组成，海底主基站组成如图 7 所示。海底主基站是有线网络的末端设备，充当有线网络与无线网络的通信接口，为满足全海域应用需求，具备为水声通信设备、其他固定和移动节点提供数据转接、能源供应的能力，同时具备对所有节点的信息进行汇总和深度处理融合能力，分腔设计提高

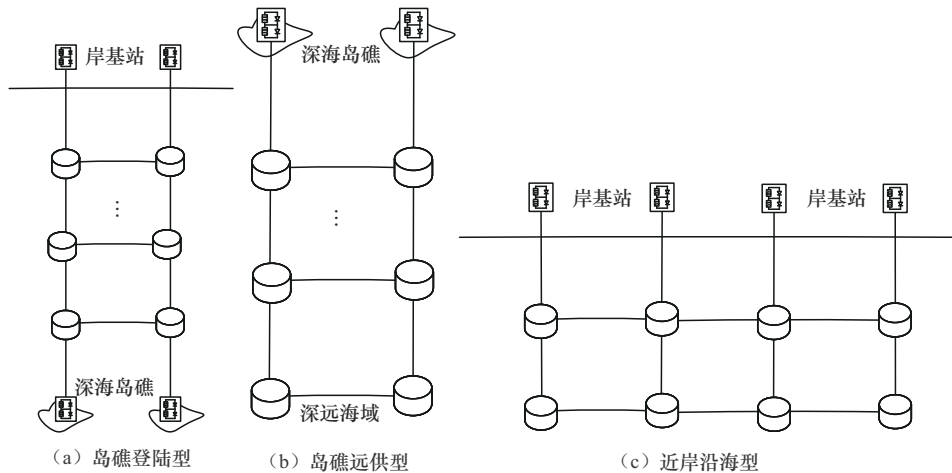


图 6 3 种水下栅格网络形态示意图

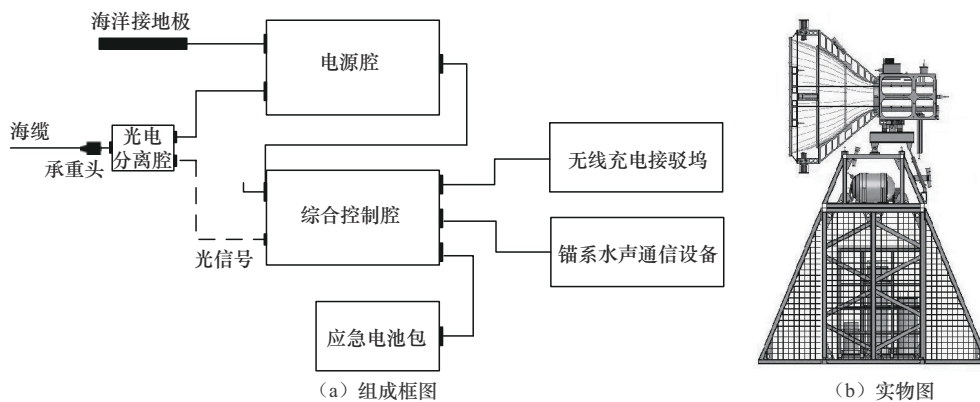


图 7 海底主基站组成



整体可靠性。海底主基站可配置的配套接入设备包括无线充电接驳坞和锚系水声通信设备。海底主基站提供对应的接入接口，为接入设备分别提供不同电压等级电能和信息通信功能^[12]。

3.3 基于浮标的水空跨域通信网节点技术

水空跨域无线网网络由网关节点浮标、普通节点浮标、水下用户终端（潜标、UUV）和岸基信息处理中心组成，水空跨域无线网网络结构如图8所示，潜标与浮标之间路由（水下无线网）是以浮标为中心的星形结构；浮标之间路由（水面无线网）采用超短波自组织按需距离向量路由协议（AODV）；浮标与岸基信息处理中心之间为一跳卫星链路（广域卫星网）。

水空跨域通信网关安装在浮标平台，浮标平台搭载水声通信设备、卫星和超短波等多种通信设备和环境感知传感器。浮标平台能灵敏地感知周围环境，为水下信息网络设备供电、综合控制、信息处理等提供稳定可靠的运载平台，同时具有浮力可控、能根据任务规划或现场情景预设，自主浮出水面或潜入水中，适应海况能力

强、姿态相对稳定等特点，可在卫星、水面船舶、水下网络通信节点之间建立通信中继，利用浮标内的天线和通信设备与其他水面、空中和空间平台实施双向通信，并通过换能器和水声通信模块完成与水下网络节点的信息数据交换，实现水下信号的跨域传输^[13-16]。网关浮标从水声、超短波、卫星通信等不同形式接收信息，彼此的信道质量、通信速率、通信协议存在较大差异，需要按照给定的水声、超短波和卫星通信协议，进行协议转换，实现数据格式兼容，以及匹配不同通信形式的通信速率。

3.4 基于自主航行UUV的无线移动节点技术

自航式UUV如图9所示，可以搭载各种通信、定位设备，当需要通信时依靠自身动力航行至水下通信节点，利用水声通信、光通信或直接接触式电通信或光通信实现与其他水下节点之间的信息互联与传输交换。在实际工作中，自航式UUV可以在水下航行状态或停止状态中利用水声通信和水下光通信手段实现与其他水下节点或是水面节点的通信，当需要执行跨域通信任务时，

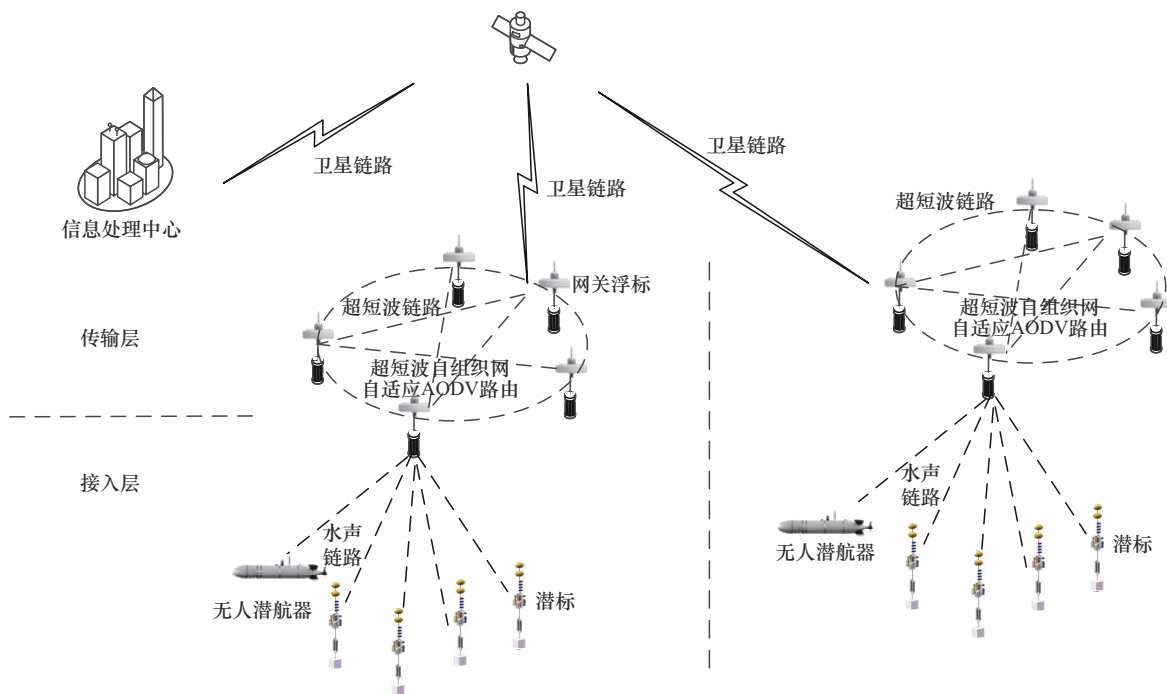


图8 水空跨域无线网网络结构

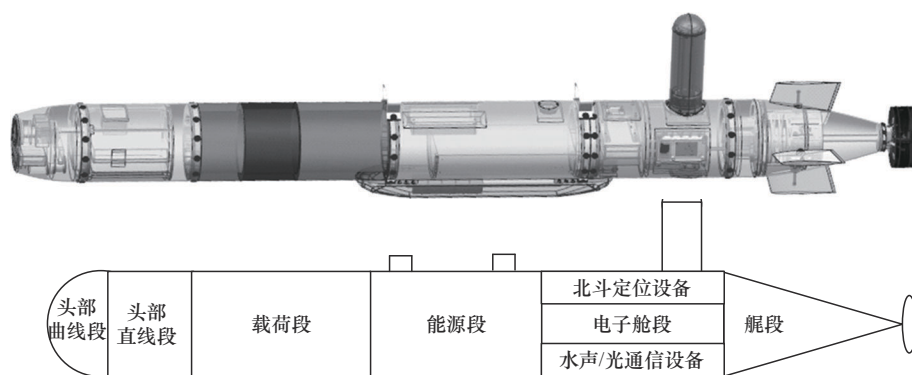


图9 自航式UUV

自航式UUV可以航行到水面或近水面状态,利用其携带的卫星通信、超短波和短波通信手段实现对水面、空中和空间的通信,同时也可以利用配备的水声通信设备为其他水下节点提供跨域中继通道。在一定深度下,还可以利用携带的低频电磁通信设备接收岸基台站发送的低频电磁信号并通过水声通信转发给其他水下节点,实现隐蔽中继通信。

3.5 水下多元信息融合技术

水空跨域综合信息传输网覆盖大范围海域,承载多种业务系统信息。多种类传感器、观测仪器、UUV等接入水下信息网,在水下接入节点进行信息交互、融合,多元数据融合。水上无线电信道与水下的声信道在信息传输能力、信息传递速度上差异很大,各类信息难以实现交互与处理,声电异构链路误码率、时延等不同,声电异构链路的信息难以直接进行交互与处理。为实现水空跨域网络信息交互与处理,水下多元信息融合可基于信息一致性表征和信息分发控制与融合处理等方面的技术。

(1) 信息统一表征。

按照水下信息传输需求,根据水下信息的应用功能,制定信息的数据元素内容、精度和编排等,信息的数据元素涵盖跨域信息涉及的要素项,合理编排数据项的排列顺序,采用面向比特的数据表征方式,能够使用少量的比特位表示丰

富的信息,从而降低对传输带宽的要求,并可统一信息表征方式,降低跨域信息交换的处理环节,提高信息交互和共享效率。

(2) 信息综合处理。

信息综合处理主要有信息优先级控制、冗余发送控制、周期发送控制、网络参与组控制和协同信息智能交互等手段。

1) 信息优先级控制:在信息排队时,需要根据信息优先级选择发送,高优先级的信息具有优先被发送的权利,在相同优先级条件下,先到的信息将被先发,低时延信息不进行优先级排队,随到随发。

2) 冗余发送控制:为了增加信息的接收概率,按指定的时间间隔多次发送(每隔一定的时间就发送一次)指定的信息。在整个冗余发送期间,信息应保持不变。而当发送平台变更信息时,应停止失效信息的冗余发送。

3) 周期发送控制:信息以特定的时间间隔,连续发送,以便提供周期更新的信息。

4) 网络参与组控制:信息中心在接收信息过程中,不一定需要收发所有类型的信息,只需处理特定类型的信息。为此,通过建立网络参与组,使信息在指定的参与组内发送。

5) 协调信息智能交互:基于功能-信息-事务关系模型的协同信息智能交互处理方法,对应信息产生、发送、接收、删除的生存周期



中, 根据信息处理所处的不同状态, 实现信息综合处理。

通过分析跨域协同信息要素, 制定跨域协同信息表征数据元素字典; 根据异构链路传输特点, 设计适配信道的可变信息结构模型; 按照协同信息的重要性, 设计信息优先级策略, 将无线/有线通信方式接入的多源异构信息进行融合处理, 支持水下通信、海底警戒、水下导航定位和海洋观测等多种使用模式, 将整个水下通信网络的拓扑结构、设备管理模块都将在岸基指挥中心平台上进行展示, 实现水下综合信息融合交互。

4 结束语

本文对系统网络架构、水空跨域网络互联、水下分布式网络、主基站高速通信与大容量供电、水下多元信息融合等关键技术开展研究, 中国船舶集团有限公司第七二二研究所依托国家重点研发计划“基于云-洋计算的深海海底观测网无线拓展观测系统研发”和相关预先研究项目, 成功完成了小规模浅海试验验证, 初步验证了相关技术的可行性, 为水空跨域综合信息传输网的发展奠定了基础, 后续将开展体系化网络研究与验证。

本文研究的水空跨域综合信息传输网络是陆地、空中信息传输网络向水下方向的延伸, 作为“水下信息高速公路”, 为水下通信、观测、导航等应用提供基础性承载网络, 可提升水下通信能力和水下多元信息的快速感知与动态响应能力, 不仅为进一步完善水下通信体系提供了研究思路, 还为我国海洋科学研究、海洋资源开发利用、国防安全等方面提供技术支撑。

参考文献:

- [1] GRUND M, FREITAG L, PREISIG J, et al. The PLUSNet underwater communications system: acoustic telemetry for undersea surveillance[C]//Proceedings of the OCEANS 2006. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1-5.
- [2] NATIONAL RESEARCH COUNCIL U.S.. FORCENet implementation strategy[M]. Washington, D.C.: National Academies Press, 2005.
- [3] 梁炎, 张佳炜. 美国海军发展网络中心作战能力的启示[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(1): 15-18, 36.
LIANG Y, ZHANG J W. An approach to the development of network-centric operations capabilities in the US navy[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(1): 15-18, 36.
- [4] 魏巍, 王增, 张伟, 等. 新一代海底光缆综合信息传输网技术发展现状[J]. 光通信技术, 2022, 46(4): 61-67.
WEI W, WANG Z, ZHANG W, et al. Development status of new generation submarine optical cable integrated information transmission network technology[J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(4): 61-67.
- [5] RICE A. Enabling undersea FORCENet with seaweb acoustic networks[J]. SSC San Diego Biennial Review, 2003:174-180.
- [6] 邱亚军, 王文双. 水下网络的发展与应用[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(5): 18-21.
QIU L J, WANG W S. Development and application of underwater network[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(5): 18-21.
- [7] 张伙带, 张金鹏, 朱本铎. 国内外海底观测网络的建设进展[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(11): 64-70.
ZHANG H D, ZHANG J P, ZHU B D. World progress of undersea observation networks[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(11): 64-70.
- [8] 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 Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 321-330.
- [9] 董向华, 刘永浩, 宋德枢, 等. 海底综合信息网及关键技术[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(4): 456-462.
DONG X H, LIU Y H, SONG D S, et al. Submarine integrated information network and key technologies[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2024, 7(4): 456-462.
- [10] 何成波, 吴学智. 基于海底光缆通信网的海底观测网拓扑应用研究[J]. 通信技术, 2019, 52(6): 1415-1421.
HE C B, WU X Z. Submarine observation topology application based on submarine optical cable communication network[J].

Communications Technology, 2019, 52(6): 1415-1421.

- [11] CUI J H, KONG J J, GERLA M, et al. The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications[J]. IEEE Network, 2006, 20(3): 12-18.
- [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.
YANG C J, ZHANG F, CHEN Y H, et al. Technologies of junction box for seafloor observation network[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 172-179.
- [13] MARN W, RICE J, FLETCHER C, et al. The evolution of radio/acoustic communication gateway buoys[C]//Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1863-1870.
- [14] 周建清, 郭中源, 贾宁, 等. 无线/水声通信浮标技术研究及其实现[J]. 应用声学, 2012, 31(6): 445-455.
ZHOU J Q, GUO Z Y, JIA N, et al. Studies and implementations of radio/acoustic communication buoy[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(6): 445-455.
- [15] 王霁远, 吕婷婷, 崔家琦, 等. 海洋跨介质通信自组网络设计与实现[J]. 移动通信, 2024, 48(11): 98-108.
WANG J Y, LYU T T, CUI J Q, et al. Design and implementation of a cross-media ad hoc network for maritime communication[J]. Mobile Communications, 2024, 48(11): 98-108.
- [16] 徐同乐, 肖玉杰, 何翼, 等. 海洋自主无人系统跨域通信组网技术发展[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(6): 683-691.
XU T L, XIAO Y J, HE Y, et al. Development of cross-domain communication networking technologies for marine autonomous unmanned system[J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(6): 683-691.

[作者简介]



刘勇 (1968-), 男, 中国船舶集团有限公司第七二二研究所研究员, 中国船舶集团有限公司首席专家, 主要研究方向为通信系统总体设计、低频通信等。



叶璇 (1987-), 女, 中国船舶集团有限公司第七二二研究所工程师, 主要研究方向为光通信网络系统设计。



顾明华 (1974-), 男, 陕西飞机工业有限责任公司研究员, 主要研究方向为电子通信系统。



陈宇 (1985-), 女, 中国船舶集团有限公司第七二二研究所高级工程师, 主要研究方向为低频电磁通信。