

【引用格式】郑浩赐, 古海玲, 马伯乐, 等. 北斗-水声网络传感数据跨域传输设计与试验[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(4): 444-449.

北斗-水声网络传感数据跨域传输设计与试验

郑浩赐^{1,2}, 古海玲^{1,2}, 马伯乐³, 童峰^{1,2,*}, 陶毅^{1,2}

- 厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门 361005;
- 导航与位置服务技术国家地方联合工程研究中心(厦门大学), 福建 厦门 361005;
- 中国人民解放军 92150 部队, 浙江 舟山 316000)

摘要 水声网络和北斗的结合为实时、原位、立体化的水下信息跨域传输提供了有效的技术手段。面向海洋环境监测应用, 设计了一个基于北斗和水声网络的水下传感数据跨域传输系统并开展海试试验。该系统由多个水下传感节点与搭载北斗终端的跨介质节点组成, 给出了系统水声网络物理层、MAC层、路由层及北斗模块接口设计。厦门港的海试试验表明: 原始海洋环境传感数据与水声-北斗跨域传输岸基接收数据完全一致, 水下网络可通率为 92.5%, 水下部分平均端到端延时为 101.43 s, 初步验证了北斗-水声网络数据跨域传输的有效性。

关键词 水声传感网络; 北斗系统; 跨域传输; 海洋环境监测

中图分类号 TP311.52 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2024)04-0444-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.04.012

Design and Experiment of Cross-Domain Transmission of Sensing Data Based on BeiDou and Underwater Acoustic Networks

ZHENG Haoci^{1,2}, GU Hailing^{1,2}, MA Bole³, TONG Feng^{1,2,*}, TAO Yi^{1,2}

(1. College of Ocean & Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Navigation and Location Service Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. No. 92150 Unit of PLA, Zhoushan 316000, China)

Abstract The integration of underwater acoustic networks and BeiDou offers an effective technical solution for real-time, in-situ, and three-dimensional cross-domain transmission of underwater information. For Marine environmental monitoring applications, a cross-domain transmission system for underwater sensing information based on BeiDou and underwater acoustic networks is designed and tested. The system comprises multiple underwater sensor nodes and a cross-media node equipped with BeiDou module. The physical layer, MAC layer, and routing layer of the underwater acoustic network system, as well as the interface design of the BeiDou module are described. The sea trial in Xiamen port demonstrates complete consistency between original marine environment sensing data and the shore-based data transmitted through underwater acoustic-BeiDou cross-domain system, with an underwater network

收稿日期: 2024-06-17

作者简介: 郑浩赐(2000-), 男, 博士生, 主要从事水声通信与组网研究。

*通信作者: 童峰(1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事水声通信研究。

基金项目: 国家重点研发计划“面向海洋环境监测的信道感知水声传感网络”(2018YFE0110000); 上海市科委科技创新行动计划“适用于典型浅海条件的高效高可靠水声通信设备”(21DZ1205502); 厦门市海洋产业项目“海域安防多平台立体信息终端的研发及产业化”(22CZB012HJ13)。

connectivity rate of 92.5% and an average end-to-end delay of 101.43 s for the underwater part, which preliminarily verifies the effectiveness of cross-domain data transmission using BeiDou-underwater acoustic network.

Key words underwater acoustic sensor network; BeiDou System; cross-domain transmission; marine environmental monitoring

0 引言

近年来,海洋科技的发展越发迅速,尤其是水声网络(Underwater Acoustic Network, UAN)在海洋水声通信领域里扮演着至关重要的角色。水声网络通过水声通信技术的构建,可实现水下信息的互联,一方面可以在水面和水下部署传感器,采集海洋水文信息,例如美国海军的 Seaweb 利用传感器节点组成了覆盖范围为 100~1 000 km 的水声传感网络(Underwater Wireless Acoustic Sensor Network, UWASN),可用于海洋数据采集、声学测距、定位和导航等功能^[1];另一方面,可以通过使用多个不同通信介质的异构网络有机合成,扩展成为空天地海一体化网络^[2]。在水声传感网络传感数据传输的方式上,由于基站建设成本高、需要供电和维护,且覆盖的范围实际非常有限,而对于海上没有信号覆盖的地方,北斗短报文通信功能解决了其数据通信的难题^[3]。

针对水声通信数据与北斗短报文的信息交互,姚铎等人研制了一种兼具卫星通信与水声通信能力的通信协调器模块,实现了水下网络数据与岸基信息数据的远距离、有效、可靠的交换^[4],但还未开展相关水下传感网络试验;李姿佳等人基于北斗短报文的通信系统,构建了 LabWindows/CVI 的上位机北斗短报文通信软件^[5],在试验方面仅进行了水下和上位机点对点的通信测试。由于海面环境时变性和随机性较大,连接水下传感网络和海面通信的设备需要搭建在一定的载体上。厦门大学的杨道宇等人设计并实现了一种浅海水声通信浮标,搭载水声通信系统可实现长时浅海水声通信数据采集、性能评估^[6]。

目前,中国科学院声学研究所、中国船舶第七一五研究所、哈尔滨工程大学、浙江大学、厦门大学等单位已经开展了不同应用场景的水声网络外场试验^[7-10],其中数传电台、天通卫星、5G 等无线传输方式被用于进行水声网络跨域信息传输。而

对于北斗短报文通信方式,赵荣阳等人提出可以依托北斗卫星通信系统,构建海洋与陆地信息之间的数据传输网络^[11];SU 等人设计并实现了一种基于北斗卫星系统和水声通信技术的水下数据采集和传输试验台^[12],在试验中也仅进行了点对点通信测试。

在实际应用中,海洋场景下无线数传技术的有效通信距离、通信质量易受到海况或者海面波浪影响,特别在恶劣海况下有效性和可靠性急速下降^[13]。而北斗短报文通信功能覆盖范围广,不受天气、地形等环境因素影响,成本较天通卫星低^[14],时效性强,可支持可靠的实时性数据信息传输^[15],因此可将其作为支撑水声传感网络数据跨域传输的重要模块。然而北斗短报文通信数据容量受限,全球短报文通信服务仅支持单次发送最长报文 40 汉字(560 bit)^[16],适用于小数据量的信息传输。

对于时间变化尺度较大的典型海洋环境参数测量,如温度、盐度等小数据量的数据,一方面,在水下可以利用水声传感网络进行数据采集与传输,进行海洋环境实时、原位、立体化的监测;另一方面,无线传输则可充分利用北斗短报文小数据量的通信功能和稳定通信的优点,从而通过水声网络和北斗的结合支撑海洋环境参数数据的跨域回传。

本文面向海洋环境监测场景的水下传感数据跨域传输,设计并实现了一种基于北斗和水声网络的水下传感信息海陆传输试验系统,在厦门港部署 5 个水声网络传感节点进行组网试验,将主节点接收到的传感数据通过北斗短报文通信功能传输至岸基的上位机处然后进行采集、分析。试验结果表明:试验网络传输连通率为 92.5%,原始传感数据与岸基上位机接收数据完全一致。

1 试验系统设计

1.1 试验系统结构概括

水声传感网络数据跨域传输试验系统主要由

水声网络、水声通信浮标、北斗终端、上位机组成，如图 1 所示。水声网络包括网络节点、传感器等硬件设计，也包括 MAC 层、网络路由层等软件协议设计。水声通信浮标为水下网络节点和北斗终端信息互联的搭载平台。北斗终端具有北斗短报文通信功能，可将水下网络数据实时回传给上位机，上位机可实时监听网络运行状态。

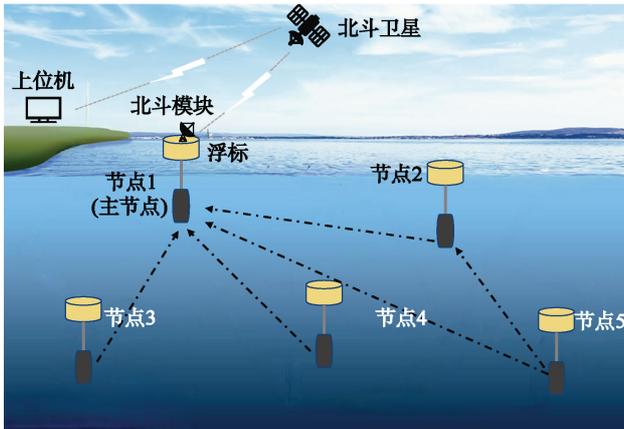


图 1 水声网络数据跨域传输系统示意图
Fig. 1 Diagram of the cross-domain transmission system of underwater acoustic network data

1.2 试验系统水声传感网络设计介绍

面向海洋环境监测应用，试验水声传感网络节点由 1 个接收数据的目的节点（主节点/跨介质节点）和 4 个感知并发送海洋环境信息的传感节点组成。每个传感节点外部均搭载 1 个温度传感器，用于测量和采集海洋环境温度信息。完成 1 次采集后，由传感节点内部的水声通信模块将温度信息调制为可在水中传输的信息波形（数据包）发送给主节点；主节点接收到信息波形（数据包）后解调出温度信息，并通过北斗短报文通信功能实时回传给岸基的上位机。

每个网络节点由海面的水声通信浮标进行固定，位于浮标下方 2 m 处左右，因此采集的传感信息为海下 2 m 处的海洋温度数据。同时，北斗终端安装在主节点的水声通信浮标上（如图 2 所示），将主节点收集到的水声传感数据由浮标处实时发送至岸基的上位机处。其中，水声网络通信浮标的设计与结构由文献[6]给出。

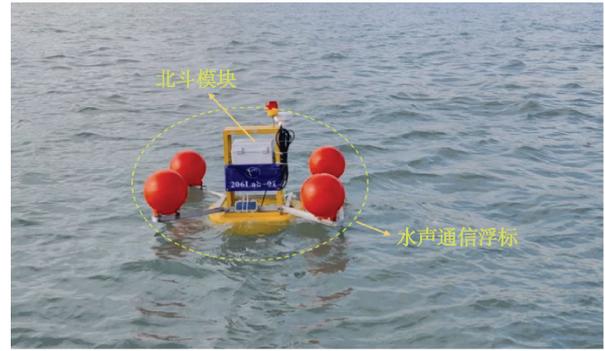


图 2 配备北斗终端和水声 modem 的主节点浮标图
Fig. 2 Master node buoy equipped with BeiDou terminal and underwater acoustic communication modem

考虑到试验水域为典型浅海海域，存在明显的时变多径干扰^[17]，试验系统采用 AMLink 水声调制解调器^[18]用作水声传感网络试验平台的物理层，该调制解调器采用扩频通信方式^[19]，换能器带宽为 13 kHz~18 kHz，试验系统物理层相关参数如表 1 所示。

表 1 水声传感网络物理层相关参数
Table 1 Related parameters of physical layer of underwater acoustic sensor network

传感网络物理层相关参数	参数值
采样率/kHz	75
信号中心频率/kHz	15.5
信号带宽/kHz	2.5
调制方式	DS-DBPSK
传输速率/bps	55.8

在水声网络协议设计方面，采用 MAC 协议中用于水声的多路访问避免碰撞（Multiple Access with Collision Avoidance for Underwater, MACA-U）协议^[20-21]和路由协议中的静态路由协议^[22]。MACA-U 协议是竞争类 MAC 协议中的一种，采用三次握手机制，当源节点 A 要发送数据给主节点 B 时，需要先给 B 发送一个 RTS 包（Request to Send），节点 B 收到 RTS 包后向 A 回复一个 CTS 包（Clear to Send），节点 A 在收到 CTS 包后就正式开始发送数据 DATA。当节点处于等待 CTS 或者等待数据阶段时又侦听到外部的 RTS/CTS 包，节点 A 会忽略这些包，依然停留在等待 CTS/等待数据状态^[23]。

1.3 试验系统数据采集

在本试验系统中，一方面利用 DSP 核心处理

器的写入 SD 卡功能, 将物理层通信记录和结果及网络各节点运行情况保存在核心处理器内嵌的 SD 卡中, 用于后续的数据处理, 即每个传感节点采集的温度信息和主节点解调出的温度信息均保存在 SD 卡中。另一方面, 主节点接收的温度数据经海面浮标的北斗终端, 实时回传至岸基的上位机, 在上位机处把接收的数据进行保存, 实验结束后与每个网络节点上的 SD 卡原始传感数据进行比对, 评

估系统数据一致性。

如图 3 所示, 水下传感信息以北斗短报文通信的方式传输至上位机, 北斗终端接口设计如下: 主节点与浮标处的北斗终端通过 RS232 串口连接, 可以将主节点解调的数据上传; 岸基处的北斗终端与上位机通过 RS232 转 USB 串口连接, 将信息回传至上位机的北斗短报文通信软件处显示。

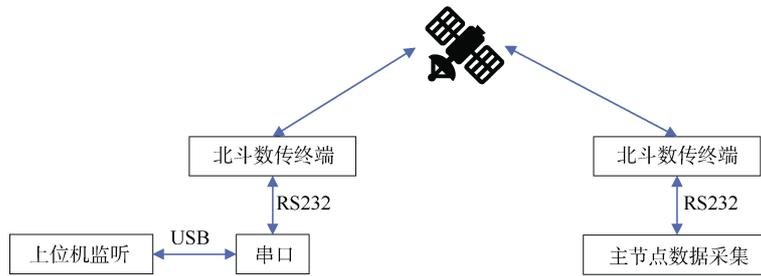


图 3 北斗短报文通信数据传输示意图

Fig. 3 Diagram of data transmission of BeiDou short-message communication

2 试验系统海试试验

2.1 海试试验

在厦门港进行组网海试试验, 试验海域平均水深 16 m, 潮汐潮差 4 m 左右。声速剖面如图 4 所示, 可以看到在 1~2 m 表层存在一个较为明显的正梯度, 16 m 以浅则存在微弱的正梯度。

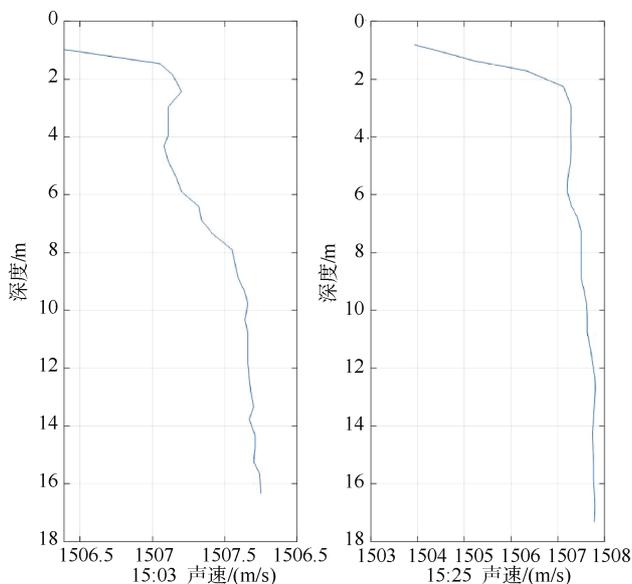


图 4 试验海域声速梯度图

Fig. 4 Sound velocity gradient diagram of sea trial area

如图 5 所示的节点标号, 本次试验系统中, 1 为主节点, 用于接收、解调信息, 具有跨介质信息传输的功能。在海试试验中采用以下路由协议: 5-1, 3-1, 2-1, 6-2-1, 符号“-”表示源节点向目的节点发送信息, 例如“5-1”表示由节点 5 发送传感信息, 由节点 1 进行接收和解调。



图 5 试验网络节点位置示意图

Fig. 5 Sea trial network node location diagram

系统 5 个试验网络节点均配备无线定位终端,

其实时位置由无线定位终端获得。在节点布放过程中，利用无线定位终端记录每个节点的布放位置，如表 2 所示。根据经纬度位置信息，测算出试验网络节点间距如表 3 所示，其中“距离 i ”表示节点 i ($i=1, 2, 3, 5, 6$) 与第 1 列各节点之间的距离。此次海试试验运行时间为 12 h。

表 2 试验网络节点参考位置坐标

Table 2 Reference position coordinates of sea trial network nodes

节点编号	纬度坐标/N	经度坐标/E
1	24°25'791"	118°5'464"
2	24°24'408"	118°5'529"
3	24°25'090"	118°6'780"
5	24°25'093"	118°4'331"
6	24°22'983"	118°7'45"

表 3 试验网络节点间距离

Table 3 Distances between sea trial network nodes

节点编号	km				
	距离 1	距离 2	距离 3	距离 5	距离 6
1	NA	2.6	2.6	2.3	5.8
2	2.6	NA	2.5	2.4	3.5
3	2.6	2.5	NA	4.1	3.5
5	2.3	2.4	4.1	NA	5.9
6	5.8	3.5	3.5	5.9	NA

2.2 海试试验结果

将各网络节点 SD 卡内的原始传感数据导出，如表 4 所示是对试验运行期间网络传感节点数据发送和接收情况的统计结果，各节点发射数据包总数为 160。

表 4 试验网络各传感节点发射数据包和主节点接收数据包总数

Table 4 Total number of data packets transmitted by each sensor node and received by main node in sea trial network

网络节点数据包情况	节点 2	节点 3	节点 5	节点 6	总数
各节点发射	42	47	39	32	160
主节点接收	38	47	38	25	148

由于试验海域为浅海，存在较强的多径效应和船舶噪声干扰，导致部分数据包无法正常解调，主节点最终接收的总数据包数为 148。网络数据连通率^[24]计算结果为 92.5%，其计算方式为主节点接收

到的数据包总数与发射数据包总数的比值。

表 5 是对试验网络运行期间网络数据一致性的统计结果。需要说明的是，这里的一致性是指上位机接收到的数据包与对应的发射数据包的信息相同的比例。从表 4 和表 5 统计结果可以看出，主节点接收到的 148 个数据包经北斗短报文通信功能回传给上位机的过程中并未出现丢包现象。将上位机接收的数据包与其对应的 148 个发射的数据包相比较，数据包信息完全一致，即一致性为 100%，表明了北斗短报文应用于海洋环境监测场景下水声传感网络数据跨域传输的可行性和稳健性。

表 5 试验网络数据一致性

Table 5 Consistency of sea trial network data

数据统计参数	上位机接收	对应节点 2 发射	对应节点 3 发射	对应节点 5 发射	对应节点 6 发射
数据包数	148	38	47	38	25
不一致数	0	0	0	0	0
一致性/%	100	100	100	100	100

图 6 为水声传感网络 3 号传感节点的海洋温度数据曲线图，其数据由传感节点 3 采集并发射，由主节点接收解调并以北斗短报文通信的方式回传至上位机获得。通过处理接收数据包信息，可计算得到其平均端到端延时为 101.43 s，包括由于距离产生的传播时延、节点发射数据的传输时延、等待产生的处理时延和排队时延^[25]。

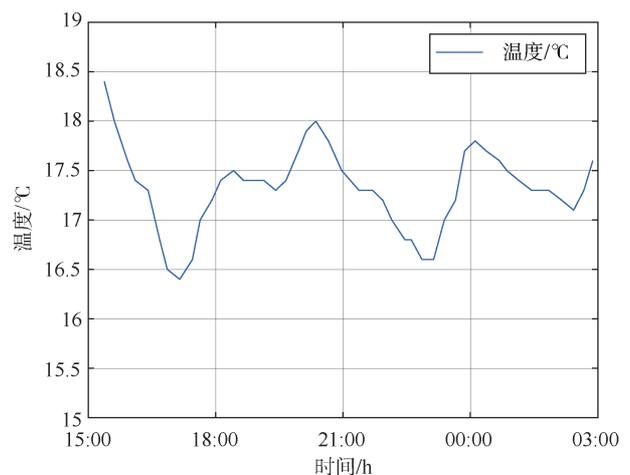


图 6 传感节点 3 的时间-温度曲线图

Fig. 6 Time-temperature graph of sensor node 3

3 结束语

本文面向海洋环境监测应用,设计并实现了一种利用北斗短报文的通信功能进行水声传感网络数据跨域传输的水声网络试验系统。该系统在物理层采用了 DS-DBPSK 的通信方式,在 MAC 层采用了常见的 MACA-U 协议,在网络层采用了静态路由协议。海试试验表明:试验系统有较好的连通性能,水声网络连通率达到 92.5%,原始传感数据与经水声网络-北斗跨域传输至岸基的接收数据完全一致。试验结果表明了北斗系统用于水声传感网络数据跨域传输的可行性和可靠性,下一步计划进一步扩展试验网络规模、增加水下传感数据类型,推进北斗-水声网络实际应用于海洋环境监测数据原位、实时、立体化跨域传输。

参考文献

- [1] RICE J, GREEN D. Underwater acoustic communications and networks for the US navy's Seaweb program[C]// 2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications. Cap Esterel: IEEE, 2008.
- [2] 陈浩, 郭佳妮, 宋姗姗, 等. 基于随机接入的空天地海一体化网络性能分析[J]. 移动通信, 2022, 46(10): 35-40, 70.
- [3] 傅必亮, 刘煜. 基于北斗和水声通信的海底水文信息传输系统设计[J]. 电子技术, 2018, 47(4): 29-31.
- [4] 姚铎, 孙山林, 李云, 等. 基于北斗/4G 水下传感器网络的通信协调器设计[J]. 数字通信世界, 2018(8): 16-17.
- [5] 李姿佳, 李伟, 邓鹏. 基于北斗短报文的水下试验数据海上快速回传技术应用[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(6): 62-65.
- [6] 杨道宇, 马伯乐, 周跃海, 等. 面向长时水声通信数据采集与评估的浮标设计与实现[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 279-284.
- [7] 乔钢, 刘淞佐, 刘奇佩. 水声通信网络协议、仿真与试验综述[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3): 151-160.
- [8] 杨健敏. 基于定向收发的水声通信网络关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [9] GAO J J, SHEN X H, ZHAO R Q, et al. A double rate localization algorithm with one anchor for multi-hop underwater acoustic networks[J]. Sensors, 2017, 17(5): s17050984.
- [10] 杨健敏, 王佳惠, 乔钢, 等. 水声通信及网络技术综述[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(1): 1-21.
- [11] 赵荣阳, 刘志先, 姜愉, 等. 基于北斗卫星通信的海洋监测系统研究[J]. 电脑与电信, 2017(5): 43-46.
- [12] SU Y S, ZUO Y P, LI Y, et al. An underwater data acquisition and transmission testbed based on BeiDou Satellite System (BDS) and underwater acoustic communication technology[C]// 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Kobe: IEEE, 2018.
- [13] 兰伟, 刘泉歌, 赵伟, 等. 基于北斗的海面浮标定位通信系统设计方法[C]// 第 13 届中国卫星导航年会. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2022.
- [14] 许仕龙, 张磊. 卫星语音通信下的北斗一代发展分析[J]. 中国集成电路, 2017, 26(12): 21-24, 55.
- [15] 高云嵩, 陈健. 基于北斗的光缆定位及故障监测系统研究[J]. 机电信息, 2023(21): 42-44.
- [16] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(4.0版)[EB/OL]. [2024-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/>.
- [17] 朱培斌, 陈文, 许肖梅. 浅海水声信道下抗多径 OCDM 通信研究[J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2022, 27(4): 370-378.
- [18] JIANG W H, TONG F, ZHOU Y H. R&D of a spread spectrum acoustic communication modem with ranging capability[C]// The 11th International Conference on Underwater Networks & Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2016.
- [19] 王小阳. 微小型 AUV 水声通信技术及其实现研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [20] 刘磊, 李宇, 张春华, 等. 水声通信网竞争式介质访问控制协议的研究[J]. 应用声学, 2014, 33(3): 202-208.
- [21] NG H H, SOH W S, MOTANI M. MACA-U: a media access protocol for underwater acoustic networks[C]// 2008 IEEE Global Telecommunications Conference. New Orleans: IEEE, 2008.
- [22] 李加彦, 王俊平. 路由器原理与路由协议算法初探[J]. 信息与电脑: 理论版, 2009(10): 56.
- [23] 童峰, 高翔. 水声通信与组网[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2020: 155-156.
- [24] 许子鹏. 水下无线传感器网络节能数据传输技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2024.
- [25] 郝帅峰, 杨道宇, 马伯乐, 等. 近海海洋环境对水声网络性能影响试验评估[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 137-145.

(责任编辑: 曹晓霖)