

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04264>

期刊网址: [www.ship-research.com](http://www.ship-research.com)

引用格式: 胡欣珏, 李麒, 刘佳仑, 等. 船舶远程驾控卫星-岸基集成网络技术研究现状及展望[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(1): 15-24.

HU X J, LI Q, LIU J L, et al. Research status and prospects of satellite-shore-based integrated network technology for remotely-controlled ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(1): 15-24 (in Chinese).

# 船舶远程驾控卫星-岸基集成网络 技术研究现状及展望



扫码阅读全文

胡欣珏<sup>1,2,3,4</sup>, 李麒<sup>1,5</sup>, 刘佳仑<sup>\*1,2,3,4</sup>, 周云龙<sup>1,5</sup>, 林楠<sup>1,5</sup>, 李诗杰<sup>1,5</sup>

1 水路交通控制全国重点实验室(武汉理工大学), 湖北 武汉 430063

2 湖北东湖实验室, 湖北 武汉 420202

3 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063

4 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063

5 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063

**摘要:** 旨在优化现有远程驾控船舶的通信架构, 以应对不同环境(如港口、深海和极地区域)下的网络连通性挑战, 解决覆盖范围、网络带宽及通信延迟需求无法完全满足的问题。首先, 系统梳理岸基通信网络技术和卫星通信网络技术的适用性和技术特点, 深入分析远程驾控船舶在不同水域环境下的无线通信需求。基于此, 提出一种基于融合多种无线系统的卫星-岸基集成网络架构的设计思路, 将卫星与岸基网络深度融合, 以期构建智能化、稳定的船舶通信系统。通过揭示具备经济性与服务质量优势的卫星-岸基集成网络架构在复杂通航环境船舶远程驾控场景中的应用潜力, 以及梳理相关关键技术及现存瓶颈问题, 期望所提出的集成通信网络架构可为远程驾控船舶在多样化通航网络条件下的通信优化提供理论参考。

**关键词:** 船舶; 通信网络; 卫星-岸基集成网络; 远程驾控通信; 通信和数据链; 网络接入管理; 通信优化

**中图分类号:** U675.7

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.04264

## 0 引言

随着全球航运业向智能化和绿色化转型, 远程驾控船舶逐渐成为一种新的解决方案。该技术的背景源于传统航运所面临的诸多挑战, 例如船员短缺、安全性要求提升以及日益迫切的节能减排需求<sup>[1]</sup>。Drewry 航运咨询公司的报告显示, 2023年全球高级海员短缺已达17年来的最高点, 已扩大至占全球海员总数的9%<sup>[2]</sup>。同时, 国际海事组织(IMO)于2023年提出了《航运温室气体减排战略》, 其目标是到2050年实现国际海运温室气体的净零排放<sup>[3]</sup>。这一系列背景要求航运业在运营模式上进行变革, 远程驾控船舶凭借其降低对传统船员需求、提升复杂水域航运安全性以及航线优化与能效管理成为解决这些问题的重要突破口<sup>[4]</sup>。

当前, 全球范围内开展了多个面向远程驾控船舶的前沿项目。2015年, 芬兰国家技术创新局

联合挪威船级社、芬兰阿尔托大学、罗尔斯·罗伊斯公司等多家单位共同启动了“高级自主海上应用”(AAWA)项目, 计划在5~8年内设计并建造出可用于远洋运输的无人船, 使其具备远程操控和自主航行的能力, 最终实现全自主航行<sup>[5]</sup>。2023年, 大连海事大学成功下水全球首艘集远程驾控、自主航行和自主操作于一体的科研及实训船, 实现了智能系统全覆盖, 并通过岸基信息支持中心实现远程操控、多视角实时监控及在监督下的自主航行<sup>[6]</sup>。2024年, 武汉理工大学等单位研发的“浙港内河002”作为国内首艘内河远程驾控智能货运船舶, 采用电力推进系统, 具备智能航行、智能机舱和集成平台系统, 能够应对复杂航道环境, 实现远程控制与自主航行, 标志着智能船舶技术在不同航运场景中的广泛实践与突破<sup>[7]</sup>。

在国际上, 船舶网络标准正逐步建立, 以加强船舶远程驾控通信技术的安全性和规范性。2017

收稿日期: 2024-11-08 修回日期: 2025-01-08 网络首发时间: 2025-02-12 11:22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4301402); 湖北省自然科学基金资助项目(2023AFB064)

作者简介: 胡欣珏, 男, 1995年生, 博士, 副研究员。研究方向: 智能船舶通信网络。E-mail: huxinjue@whut.edu.cn

刘佳仑, 男, 1987年生, 博士, 研究员。研究方向: 船舶远程驾控与测试验证。E-mail: jialunliu@whut.edu.cn

\*通信作者: 刘佳仑

年, IMO 发布了 MSC 428(98) 号决议, 将网络风险管理纳入船舶安全管理系统(SMS)<sup>[8]</sup>; 2022 年, 国际船级社协会(IACS)发布了 E26 和 E27 标准, 明确了船舶网络韧性和船载系统设备的网络韧性要求; 2024 年, 国际标准化组织(ISO)推出 ISO 18131 标准, 定义了船岸数据通信中发布-订阅架构的一般要求<sup>[9]</sup>。

在国内, 船舶网络标准化工作也在稳步推进, 逐步建立了涵盖数据交换和网络安全分级等方面的标准体系。2023 年, 中国船级社发布《船舶数字化检验数据交换技术指南》, 对船舶数字化检验的数据结构和接口标准作出了规定<sup>[10]</sup>, 2024 年, 又发布《船舶网络安全指南》, 将船舶网络安全等级分为 5 级, 并要求申请相应的网络安全标志<sup>[11]</sup>。

远程驾控船舶的核心在于可靠的连通性, 这对船舶在全球及本地水域的安全高效运营至关重要。低延迟、高带宽的通信网络不仅能够支持实时的远程操控, 还能实现“远程存在”, 使岸基操作人员能够实时感知并与船舶环境互动。为了最大限度降低风险, 该连通性方案需要满足双向、安全、可扩展和冗余的要求, 通信架构需要具备足够的链路容量, 以支持传感器数据的实时监控及远程操作指令的传输。

因此, 本文将系统分析远程驾控船舶的岸基和卫星通信技术在不同水域中的特性, 总结远程驾控整体通信架构的 3 项核心功能需求: 1) 提供全球范围内的网络覆盖与可靠接入, 确保稳定的远程链接; 2) 通过卫星链路进行数据回传, 并将其作为岸基通信的备用通道, 增强系统冗余性; 3) 支持移动端的数据处理和内容缓存, 以提高通信效率及降低延迟。基于这些需求, 本文提出一种卫星-岸基集成网络架构, 并深入探讨其中的关键技术, 以期提升远程驾控船舶在复杂环境下的通信稳定性和效率。

## 1 现有船舶网络接入技术

在复杂多变的海事环境中, 通信方式的选择直接影响船舶与岸基控制中心之间的数据传输效率及系统可靠性。现有远程驾控船舶的通信网络主要包括岸基通信网络和卫星通信网络两种接入方式, 不同网络各具适用性与技术特征, 能够满足不同作业场景的通信需求<sup>[12]</sup>。

### 1.1 岸基通信网络技术

岸基通信网络技术是指用于在船舶与岸基设施之间, 以及船舶之间建立高效数据链接的各类

无线通信手段, 提供从港口到近海通信服务。岸基通信技术包括用于智能交通系统的 802.11p 标准(IEEE 802.11p)、长期演进(LTE)/4G、毫米波通信、高频(HF)和甚高频(VHF)系统等技术。

IEEE 802.11p<sup>[13]</sup> 在船舶通信中的优势在于其支持短距离、高速率的通信, 特别是在船对船或船对岸的通信场景中, 能够显著提升数据传输速率。基于 2.4 和 5.8 GHz 频段的长距离 WiFi 通信, 可以有效地替代传统的高成本卫星通信, 尤其是适用于中短距离的海上通信。利用 IEEE 802.11n 的 WiFi 网络<sup>[14]</sup> 还可以在 5.8 GHz 频段实现长达 7 km 的通信距离, 数据速率达到 1 Mbit/s。这种长距离 WiFi 链路为船主提供了一种低成本的宽带接入方式, 并且能够支持实时的导航应用、语音/视频通信。

LTE/4G 技术<sup>[15]</sup> 为岸基通信提供了稳定的高带宽网络接入手段, 尤其适用于近海区域。爱立信与中国移动在青岛合作建设了 TD-LTE 海上覆盖试验网络<sup>[16]</sup>, 该网络运行于 2.6 GHz 频段, 覆盖离岸 30 km 范围, 提供峰值速率达到 7 Mbit/s, 实现了船舶与岸上控制中心的实时通信。此外, LTE 在船舶通信中的应用也有效解决了传统 VHF 系统带宽不足的问题, 使得船舶能够在近海环境下维持稳定的实时通信链路, 在气象信息共享、航行协作以及多船协作场景中至关重要。

毫米波通信技术可极大地提升岸基以及船对船通信的带宽和传输效率, 5G 毫米波通信技术<sup>[17]</sup> 已在多个国家的港口和海事场景中开始部署, 用于提供高达千兆比特每秒的数据传输速率。毫米波频段的短波长特性使其适合在船舶上安装大规模的天线阵列, 实现高效的波束成形技术, 从而提高信号传输效率和范围。在 5G 网络中, 毫米波能够与其他频段互补, 适应多样化的海事应用需求, 如船舶的实时视频监控和高精度定位服务。

VHF 无线电频段(30~300 MHz)<sup>[18]</sup> 长期以来在海事通信中主要用于船对船、船对岸的通信以及救援和安全系统。VHF 数据交换系统不仅支持船舶之间的信息交换, 还能通过卫星实现远程通信。尽管 VHF 通信在海事应用中得到了广泛使用, 但其带宽较低, 仅能支持窄带应用。为应对带宽和容量限制, VHF 系统逐渐向数字化转型, VHF 系统与卫星通信、低轨道卫星系统结合, 形成覆盖全球的海事通信网络。HF 无线电频段(3~30 MHz)尤其适用于远距离和超视距海事通信。在远洋的情况下, HF 无线电系统通过电离层反射保持长距离的信号覆盖, 为船舶提供与岸基设施的稳定通信链接。其中, PACTOR

协议采用了正交频分复用技术,提升了数据传输速率,还显著改善了远距离数据传输的可靠性,使船岸之间的数据交换更加高效。

根据表 1 中现有的不同岸基通信网络技术的通信范围、吞吐量和成本要求,近岸及港口水域适合采用 IEEE 802.11p, WiFi 和毫米波通信技术,这些技术提供了短距离、高速的数据传输,适用

于港口作业中的船对船及船对岸通信。对于近海水域, LTE/4G 技术以其高带宽和稳定性,支持中距离的高效通信,可确保数据传输的可靠性;对于中远海水域, VHF 以其良好的覆盖能力与可靠性,适用于导航、安全及基本通信需求, HF 无线电通过超远距离的窄带通信,可确保船舶与岸基设施保持基本的网络链接和数据传输。

表 1 现有岸基通信网络技术  
Table 1 Existing technologies for shore-based network communication

| 系统            | 频谱                                     | 带宽                         | 数据吞吐量                                                   | 通信范围                            | 成本说明                     |
|---------------|----------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 802.11p - ITS | 5.9 GHz                                | 10 MHz                     | 27 Mbit/s                                               | <1 km                           | 无流量资费<br>包含设施建设<br>维护成本  |
| WiFi          | 2.4/5/6 GHz                            | 20/40/80/160/320 MHz       | 500 Mbit/s~5 Gbit/s                                     | 通常小于100 m, 在有<br>固定服务时可达10 km   | 无流量资费/<br>包含设施建设<br>维护成本 |
| LTE/4G        | 450.0 MHz~3.7 GHz                      | 1.4~20.0 MHz               | 上传: 75 Mbit/s<br>下载: 300 Mbit/s<br>3 Gbit/s (LTE-A Pro) | 通常小于2 km, 高增益<br>定向天线可达30~50 km | 适中                       |
| 5G            | 毫米波: 24.0~43.5 GHz<br>低频段: 700/900 MHz | 3 GHz<br>30~100 MHz        | 20 Gbit/s<br>1 Gbit/s                                   | 毫米波: 1~3 km<br>低频段: 10~30 km    | 偏高                       |
| VHF           | 30~300 MHz                             | 25 kHz, 可捆绑多个<br>VHF信道提升带宽 | 船-船或船-岸最高<br>可达307 kbit/s, 卫星链路<br>最高可达240 kbit/s       | 最高可达85 km                       | 较低<br>(终端成本)             |
| HF            | 3~30 MHz                               | 最高48 kHz                   | 240 kbit/s                                              | 1 000~3 000 km                  | 较低<br>(终端成本)             |

1.2 卫星通信网络技术

在深海航行中,由于海洋环境的多变,远程驾控船舶的通信质量往往受限。卫星通信网络技术凭借其广域覆盖和高稳定性,能够在远洋、极地等无岸基信号覆盖区域,为船舶提供连续可靠的通信连接。卫星通信网络系统包括地球静止轨道(GEO)卫星系统、近地球轨道(LEO)卫星系统和大椭圆轨道(HEO)卫星系统等系统。

GEO 卫星系统可实现除两极地区的全球覆盖<sup>[19]</sup>,第 5 代 Inmarsat 系统海事 GX(Global Xpress)系统,运行在 Ka 频段,可最高提供 50 Mbit/s 下行数据速率和 5 Mbit/s 的上行数据速率,我国自主研发的天通一号提供包括语音、短信和数据在内的卫星移动通信服务,北斗卫星短报文系统提供用户和用户、地面控制中心双向短报文通信服务。下一代 GEO 高通量卫星(HTS)以及非常高通量卫星(VHTS)系统可通过使用多个点波束、极化方案、频率复用及更高带宽的馈线链路(如 Q/V 频段)来实现更高的卫星链路容量<sup>[20]</sup>。

LEO 卫星系统能够提供更低的通信延迟和更高的信号质量,截至 2024 年 10 月,Starlink 由 7 200 颗低轨卫星形成网络,能够提供的下载速率可达 400 Mbit/s,延迟约 27 ms<sup>[21]</sup>,全球星系统(Globalstar)的全双工数据速率是 9.6 kbit/s,峰值速率达到 38 kbit/s,提供全球数据和语音服务。中国星网计划建设代

号为“GW”的低轨卫星星座,共计 12 992 颗卫星,分布在距离地面 590~1 145 km 的低轨轨道,提供全球覆盖的宽带网络服务。

远程驾控船舶在北极及高纬度地区航行时,LEO 卫星系统可实现船舶在北极通信。Iridium 卫星系统<sup>[22]</sup>通过较小的天线和较低的功率提供 stronger 的信号与更高速的网络链接。此外,因 Iridium 卫星系统的低地球轨道的独特结构使卫星能在极地汇集,使得在北极航行的船舶也可进行通信。HEO 卫星系统能够长时间滞留在远地点附近,可实现对特定区域的长时间观测及通信等操作,借此同样可以实现船舶在极地通信<sup>[23]</sup>。

基于表 2 中不同卫星网络技术的通信范围、数据吞吐量特性,对于远海水域, Global Xpress, Starlink 凭借其高带宽和高数据速率,适合满足远洋船舶对高速、低延迟通信的需求,当船舶航行在我国及周边国家水域时,可利用北斗卫星短报文系统和天通一号系统。在极地水域, Iridium 以及 HEO 卫星系统凭借对极地的持续观测和覆盖,可满足远程驾控船舶在极地航行中的基本通信需求。

2 远程驾控船舶通信网络需求

在远程驾控船舶通信系统中,数据传输的核心需求集中在传感器信息的高效传递上。态势感知(SA)数据由多个传感器(如红外摄像机、激光

表 2 现有卫星通信网络技术

Table 2 Existing technologies for satellite network communication

| 系统            | 频谱                                                      | 带宽        | 数据吞吐量                               | 通信范围                   | 成本 |
|---------------|---------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------|------------------------|----|
| Global Xpress | 上行链路: 27.5~31.0 GHz<br>下行链路: 17.7~21.2 GHz              | 2.5 GHz   | 上行速率: 5 Mbit/s<br>下行速率: 50 Mbit/s   | 全球覆盖                   | 昂贵 |
| 天通一号系统        | 上行链路: 1980~2010 MHz<br>下行链路: 2170~2200 MHz              | 30.0 MHz  | 9.6 kbit/s                          | 重点覆盖中国及周边、<br>中东、非洲等地区 | 昂贵 |
| 北斗卫星短报文系统     | 上行链路: 27.5 ~31.0 GHz<br>下行链路: 17.7~21.2 GHz             | —         | 233 bit/s                           | 全球覆盖                   | 偏高 |
| Starlink      | 上行链路: 14.0~14.5 GHz<br>下行链路: 10.7~12.7 GHz              | 240.0 MHz | V1.0: 17 Gbit/s<br>V2.0: 100 Gbit/s | 全球覆盖<br>(部分区域缺乏地面站支持)  | 偏高 |
| Iridium       | 上行链路: 29.1~29.3 GHz<br>下行链路: 19.4~19.6 GHz              | 10.5 MHz  | 4.7 kbit/s                          | 全球覆盖                   | 昂贵 |
| Globalstar    | 上行链路: 1 610.0 ~1 626.5 MHz<br>下行链路: 2 483.5~2 500.0 MHz | 16.5 MHz  | 38 kbit/s                           | 全球大部分区域                | 昂贵 |

雷达(LiDAR)、雷达、光学摄像机等)共同生成,这些传感器持续监测船舶周围环境,从而为远程操作提供实时和精确的环境感知。SA 数据量大且种类多样,尤其是高清视频和三维 LiDAR 数据,其文件大小及更新频率较高,带宽需求显著。

此外,与船舶机械和发动机状态相关的传感器提供的数据及控制数据虽然数据量较小,但因其直接关系到船舶的安全性和操作可靠性,所以需要确保这些关键数据可以可靠、稳定地传输到岸基的远程驾控中心(ROC)。通常,对于超过 300 总吨的船舶需配备自动识别系统(AIS),以传输船舶的位置信息和身份数据,这些数据用于辅助船舶导航和防止碰撞,在提高船舶运行的安全性方面至关重要。此外,国际水域中航行的船舶还需配备全球海上遇险和安全系统(GMDSS)<sup>[24]</sup>,以保障海上人命安全,其主要用于传递遇险警报、搜索救援请求、海上安全信息及一般通信需求。

表3 列举了不同数据类型的传输速率需求。可见,在远程驾控船舶的通信系统中,绝大多数的数据传输需求源自 SA 数据的上传。相较而言,发送至船上的控制数据量非常有限,通常仅为每秒千比特的量级,而从船上传出的感知数据可能轻松达到每秒数兆比特。尽管 SA 数据需要较高的精度,但考虑到数据传输带宽的限制,可以通过数据降级等策略进行数据压缩处理,以减少不必要的传输负载。例如,高分辨率 3D LiDAR 文件的体积可达数百兆字节,通过在船上的预处理,将三维数据转换为二维数据并提取关键部分进行传输,可显著缩减文件的大小,压缩比可能达到 100~200 倍。这意味着在实际操作中,若所有传感器数据都传输至 ROC,其原始数据速率需求至少为

6 Mbit/s,而经过优化压缩后,可以将传输速率降低至 125 kbit/s 左右。GMDSS 的比特率要求因情况而异,但通常 10 kbit/s 就足够了。

表 3 估计传输速率需求  
Table 3 Estimated data rate requirements

| 数据类型          | 单个文件大小<br>/kB | 更新频次<br>/Hz | 压缩比特率<br>/Mbit/s |
|---------------|---------------|-------------|------------------|
| 红外线           | <400          | 1.0~10.0    | <1.000           |
| 高清视频(HD)      | <3 000        | 2.0~25.0    | 0.200~10.000     |
| 光探测与测距(LiDAR) | <200 000      | 1.0         | <2.000           |
| 控制数据          | <10           | 1.0         | 0.001~0.010      |
| 机械传感器         | <20           | <1.0        | <0.010           |
| AIS           | <400          | 0.4         | 0.100            |
| GMDSS         | <10           | 多种          | 0.010            |

在数据传输优化的基础上,传感器融合技术可以进一步减少了带宽占用。该项技术通过整合多个传感器的观测数据,以生成具有更高时空分辨率和综合感知能力的信息,减少独立传感器数据传输的带宽负载,实现对多类型 SA 数据的同步处理与协同传输。

面向上述各类数据的多元化业务特性及远程驾控船舶在不同航行作业水域的差异化网络通信环境,图 1 梳理了远程驾控船舶通信业务及网络需求特点,强调了在复杂海域中确保通信链路稳定性和数据传输效率的必要性。通信系统的设计必须具备智能化、自适应及高带宽等特性,以应对传感器数据的大量实时传输需求,同时确保低延迟的控制信号传输。在保证服务质量(QoS)的同时,通信网络需要通过数据压缩、动态资源调度与多接入技术优化成本与能效,确保在不同水域条件下实现经济高效的通信支持。



图 1 远程驾控船舶通信网络需求示意图

Fig. 1 Diagram of remotely-controlled ship communication network requirements

在图 1 中, 远程驾控船舶通信系统的核心是通过多接入(Multi-RAT)技术实现业务与网络的精准匹配, 以满足不同水域的复杂通信需求。船端业务数据分为传统业务和远程驾控业务。前者以低带宽、单向通信为主, 满足基本船舶运行需求; 后者要求高带宽、低延迟和实时性, 支持高清视频、LiDAR感知数据以及高精度动态航行数据的传输。

通信融合管理通过 Multi-RAT 策略, 满足多水域、多业务场景的通信需求。系统通过岸基网络与卫星通信的协同, 构建多层次接入架构: 港口及近海区域依托密集的 5G/LTE 基站, 提供高带宽、低延迟的传输能力, 支持高清视频、LiDAR 等实时高数据量业务; 远海及极地则利用 GEO/LEO 卫星覆盖广域, 满足低带宽、高可靠性任务(如状态监测与应急通信)的需求。基于此, 系统根据 QoS 需求动态调度, 将不同业务匹配至最适合的网络传输路径。例如, 高速业务优先通过低延迟的岸基网络完成, 低速但关键的导航数据通过 VHF, HF 或卫星链路稳定传输。

岸端数据协同通过边缘计算与数据压缩实现多源异构数据的融合与优化。在远程控制中心, 传感器数据经过本地预处理后进行实时监控和智能分析, 不仅可降低带宽需求, 还能够提高数据传输的实时性和稳定性, 从而保障船舶在不同水域环境下的可靠操控。

### 3 卫星-岸基集成网络架构

远程驾控船舶通信网络需满足高带宽、低延迟、可靠性和广覆盖的多样化需求, 以支持 SA 数据的实时传输、关键控制数据的稳定交互以及极

端环境下的通信连续性。基于此, 迫切需要一种能够应对多样化环境条件的综合通信网络架构, 以确保多源异构数据的高效、可靠传输。随着 5G 技术的进步, 未来的网络将被视为具备异构无线接入集成能力的“网络中的网络”。在此背景下, 将卫星接入网络有效整合至岸基移动网络, 尤其针对远程驾控船舶的通信网络需求, 提出了一种高度融合的“卫星-岸基一体化集成网络架构”。传统卫星通信系统的资源管理往往表现为静态且复杂, 主要集中于连通性服务, 而缺乏与岸基系统之间的统一标准, 导致卫星系统在灵活性和适应性上明显不足。当前, 卫星系统正逐步向岸基系统靠拢, 努力在特性与功能上实现深度融合, 以满足远程驾控船舶的高效通信需求。

#### 3.1 架构设计

图 2 所示为所提出的卫星-岸基集成网络架构, 展示了其关键组件及设计原则。该架构通过集成卫星通信与多种无线接入网络(例如基于 5G, 4G, WiFi 的接入网络), 实现船舶与岸基控制站及核心网络之间的高效数据传输。具体而言, 该融合网络由 GEO、非地球静止卫星(如低轨卫星)与岸基 5G 基站、4G 基站及卫星地面站共同构建, 通过 Multi-RAT 提供了广泛且可靠的通信链路。为了实现网络的智能化管理与资源的动态分配, 架构中采用了软件定义网络(SDN)<sup>[25]</sup>和网络功能虚拟化(NFV)<sup>[26]</sup>等技术, 使整个网络系统更加灵活、高效。

该融合网络模型基于现有的主流卫星通信架构, 通过卫星网关(或称远程集线器)连接不同类型的卫星, 同时通过非对称链路实现与卫星终端的高效接入。在这一简化模型中, GEO 与低 LEO

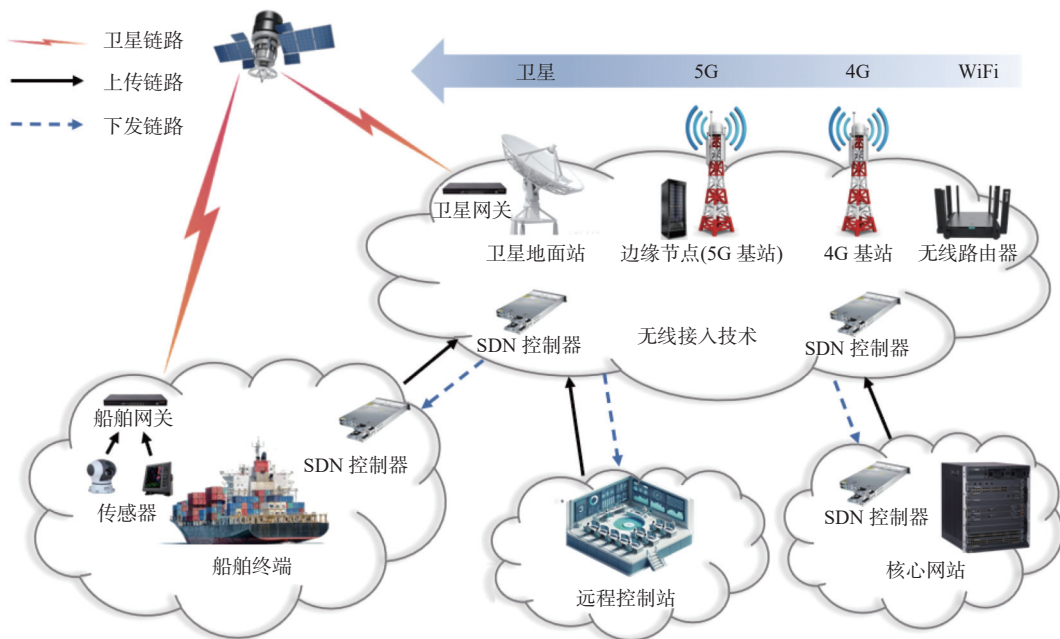


图 2 卫星-岸基集成网络架构  
Fig. 2 Satellite-shore integrated network architecture

在网络架构层面上不存在本质性差异,因此可以被无缝整合到统一的通信框架中进行数据交换。为了简化架构设计并提升系统的灵活性与扩展性,该架构未假设卫星直接提供计算资源。卫星仅负责基础数据传输,而无线接入网络(RAN)<sup>[27]</sup>和核心网络的功能则由其他组件来承担,从而使整体架构更具模块化特性。

图 2 中描述的混合通信系统不仅整合了卫星链路,还包含多种 RAT 技术<sup>[28]</sup>,例如 5G, LTE 和 WiFi,从而提升了网络的多样性及接入能力。船端采用 Multi-RAT 模式,通过 SDN 控制器借助多路径传输协议(multipath TCP, MP-TCP)和 SDN 流量调度机制实现卫星, 5G, 4G 和 WiFi 等接入方式的动态管理与切换。系统通过实时监测链路关键性能指标(如带宽、时延、丢包率等),结合 QoS 需求,动态评估和选择最优链路路径,确保远程驾控船舶数据传输的高效性和低时延响应。SDN 控制器通过集中化资源管理对目标链路资源进行动态预分配,并对流量路由进行全局优化,降低链路切换引发的时延,同时通过路径重传与错误恢复机制有效减少数据丢失,从而在 SA 数据的高带宽需求和关键控制数据的低时延、高可靠性需求之间实现精准动态适配与优化。

针对船舶在远洋、港口及复杂水域中的无缝网络衔接需求,该架构采用支持多租户环境的设计理念,实现远程控制船舶通信网络的跨区域资源整合。基于网络虚拟化和网络切片技术<sup>[29]</sup>,不同运营商可共享卫星通信链路、岸基 5G/4G 基站,以及核心网络的同一物理网络资源,为远程驾控船舶提

供端到端、高可靠的通信服务。SDN 控制器通过全局可视化能力,对网络资源进行动态调度和优化,确保在共享基础设施上的不同业务保持资源隔离与服务独立性,并提升物理网络的整体利用效率。

为进一步降低时延并提升服务效率,架构引入多接入边缘计算(MEC)技术<sup>[30]</sup>,将计算与存储能力下沉至网络边缘(如移动基站)。MEC 节点通过实时感知本地网络状态,减少传输延迟,提升 SA 和关键控制任务的处理效率。此外,卫星作为可靠回程备用链路,避免了服务交付受回程延迟的影响。在卫星-岸基混合网络中,MEC 节点作为分布式计算单元,通过数据压缩、Multi-RAT 技术和动态资源调度,满足船舶在不同水域的低延迟、高效通信需求。

3.2 关键技术研究进展

该架构通过卫星(GEO, LEO)与岸基网络(5G, 4G, WiFi)的深度融合,实现了全球无缝覆盖和稳定接入。结合 SDN, NFV 和 MEC 技术,动态优化网络资源分配,降低延迟并提高响应效率。卫星链路作为回程备用通道增强了系统冗余性,确保了在极端环境下的可靠通信。MEC 支持移动端数据处理和缓存,可进一步提升通信效率并减少延迟。网络切片和 Multi-RAT 技术增强了架构灵活性与服务定制能力,满足远程驾控船舶在多样化环境下的高效、低延迟通信需求。

在阐明架构整体优势的基础上,需要重点聚焦架构在集成异构网络接入、异构网络资源的统

一管理、架构 QoS 优化中的技术难点,分析其当前发展现状和面临的瓶颈。

1) 集成异构网络接入。近年来,5G 异构网络在提升网络容量、覆盖范围和系统可靠性方面取得重要进展,依托毫米波、Massive MIMO、小型基站和卫星通信等关键技术实现了多场景应用。

毫米波技术通过提供丰富的频谱资源满足了高带宽需求,毫米波结合 Massive MIMO,通过波束成形与高密度天线阵列,显著提升了信号覆盖能力和多用户并发性能。小型基站结合网络致密化技术<sup>[31]</sup>,通过构建多层次接入架构,优化了高用户密度场景下的频谱利用效率和 QoS,在近岸以及港口环境下表现突出。卫星通信与岸基网络深度融合,解决了偏远区域和覆盖盲区问题,并通过回程链路冗余提升了网络可靠性。

集成异构网络接入技术的进展同时也存在诸多瓶颈。毫米波技术虽提供丰富的频谱资源以满足高带宽需求,但路径损耗与信号阻塞问题限制了其在海上复杂环境下的覆盖范围和稳定性,需要进一步优化波束控制和通道建模以提升其适应性<sup>[32]</sup>。小型基站的密集部署在港口及近岸区域提升了网络容量,但随之而来的干扰问题对通信质量构成挑战,亟需高效的资源调度和干扰抑制机制确保系统稳定性及吞吐量<sup>[33]</sup>。卫星通信与地面网络的深度融合虽解决了偏远水域和盲区的覆盖问题,但跨网络协同的复杂性在资源分配与调度方面带来了技术瓶颈,特别是在远洋场景下,缺乏统一的管理框架和高效调度算法成为限制其进一步应用的主要障碍<sup>[34]</sup>。

2) 异构网络资源的统一管理。在远程驾控船舶的通信架构中,SDN<sup>[35]</sup>通过控制与转发的分离提供了灵活的网络管理能力,而 NFV<sup>[36]</sup>通过虚拟化网络功能(VNF)提高了资源利用率和网络灵活性。目前,二者的结合被认为是解决异构网络接入中资源管理、动态配置和服务优化问题的核心技术,但在实际应用中仍面临许多技术挑战。

在多源融合通信环境下,卫星与岸基网络的深度集成首先需要解决多样化资源标准与协议差异的问题,同时提升管理效率和互操作性<sup>[36]</sup>。动态航行环境下的流量快速变化对资源调度的实时性提出了更高要求,而现有调度算法在高负载场景中仍面临性能瓶颈,难以保障延迟敏感控制指令数据的传输需求<sup>[37]</sup>。随着船舶航行区域的拓展,如何设计具备高可扩展性的混合网络架构来支持跨域资源协调是关键挑战<sup>[38]</sup>。此外,NFV 的应用虽提升了网络灵活性,却也增加了潜在安全威胁,传统的网络安全防御手段在动态环境下的

适应性亟待提升<sup>[39]</sup>。

3) 架构 QoS 优化。在船舶远程驾控、智能交通等场景中,MEC 因其实时性强、灵活性高的特点,被广泛应用于任务卸载、SA 和 QoS 优化等领域<sup>[40]</sup>。

MEC 在架构中运用仍然面临多方面的技术瓶颈,在动态任务卸载与资源分配方面,由于 MEC 节点的计算与存储资源有限,高用户密度和复杂场景的港口、近海水域中任务并发处理的效率仍需优化<sup>[41]</sup>。在跨卫星、岸基通信网络协同中,不同边缘节点的实时协同计算因通信延迟和网络切换问题受到限制,难以满足远程驾控船舶实时操作的严格要求<sup>[42]</sup>。此外,在高动态海事通信场景下,如何同时满足计算密集型任务和低延迟需求对系统的扩展性以及资源利用率提出了更高要求。

## 4 发展与展望

本文探讨了远程驾控船舶的卫星-岸基集成网络架构,旨在应对海上通信的复杂需求。通过整合多种无线技术(包括卫星通信,5G, LTE 和 WiFi),实现从近岸到远洋的高效通信覆盖。在卫星-岸基集成网络架构中,SDN 与 NFV 用于实现网络资源的灵活管理与动态分配,MEC<sup>[43]</sup>用于降低延迟、提升系统响应速度,确保高可靠性和低延迟的数据传输。此外,结合不同频段的通信手段,此架构有效增强了远洋、港口等场景下的网络性能和覆盖能力,为船舶的远程控制与自主导航提供了可靠的技术支持。

未来的发展将聚焦于通信系统的智能化和融合化。首先,多源融合网络将继续整合 LEO 和新一代岸基网络(如 6G),实现广覆盖、低延迟的全球化网络接入。网络虚拟化与网络切片将进一步实现服务定制化,提升远程控制与应急通信的差异化支持能力。MEC 在未来仍将是降低时延和增强本地计算能力的核心技术,尤其是在动态复杂的海上环境中,实现实时数据处理与智能决策支持。结合人工智能技术和 6G 网络,未来的通信架构将具备自适应、智能化的资源调度和海量连接支持能力,满足远程驾控船舶日益复杂的作业需求,推动智能航运向全面自主化迈进。

### 参考文献:

[1] 王远渊,刘佳仑,马枫,等.智能船舶远程驾驶控制技术  
研究现状与趋势[J].中国舰船研究,2021,16(1):18-31.  
WANG Y Y, LIU J L, MA F, et al. Review and pro-  
spect of remote control intelligent ships[J]. Chinese  
Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 18-31 (in Chinese).

- [2] The Maritime Executive. Seafarer labor shortage reaches 17-year high reports drewry[EB/OL]. (2023-06-08) [2024-11-18]. <https://maritime-executive.com/article/seafarer-labor-shortage-reaches-17-year-high-reports-drewry>.
- [3] International Maritime Organization. 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships[EB/OL]. (2023-03-16) [2024-11-18]. <https://www.imo.org/en/Our-Work/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx>.
- [4] 严新平. 智能船舶的研究现状与发展趋势 [J]. 交通与港航, 2016, 3(1): 25–28.  
YAN X P. Research status and development trend of intelligent ships[J]. *Communication & Shipping*, 2016, 3(1): 25–28 (in Chinese).
- [5] TISSARI J, MAKKONEN H, JOKIOINEN E, et al. Remote and autonomous ships-the next steps[R]. London: Rolls-Royce Plc, 2016.
- [6] 孙丹宁. 全球首艘具有远程遥控和自主航行功能的科研及实训船下水 [EB/OL]. (2023-03-11) [2024-11-18]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2023/12/514939.shtm>.  
SUN D N. The world's first scientific research and practical training ship with remote control and autonomous navigation launched[EB/OL]. (2023-03-11) [2024-11-18]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2023/12/514939.shtm> (in Chinese).
- [7] 王绪明, 申琼珍. 武汉理工大学组织研发的国内首艘内河远程控制智能船舶顺利试航 [EB/OL]. (2024-10-16) [2024-11-18]. <https://its.whut.edu.cn/?zhongxinxinwen/1452.html>.  
WANG X M, SHEN Q Z. The first domestic inland river remote control intelligent ship organized and developed by Wuhan University of Technology successfully sails on trial[EB/OL]. (2024-10-16) [2024-11-18]. <https://its.whut.edu.cn/?zhongxinxinwen/1452.html> (in Chinese).
- [8] IMO. Maritime cyber risk management in safety management systems: MSC 428(98)[S]. London: IMO, 2017.
- [9] ISO. Ships and marine technology – general requirements for publish-subscribe architecture on ship-shore data communication: ISO 18131[S]. Geneva: ISO, 2024.
- [10] 中国船级社. 船舶数字化检验数据交换技术指南: GD 21–2023[S]. 北京: 中国船级社, 2023.  
CCS. Technical guide for digital survey data exchange of ships: GD 21–2023[S]. Beijing: CCS, 2023 (in Chinese).
- [11] 中国船级社. 船舶网络安全指南: GD 014–2024[S]. 北京: 中国船级社, 2024.  
CCS. Cyber security guidelines for ships: GD 014–2024 [S]. Beijing: CCS, 2024 (in Chinese).
- [12] 董浩, 宋亮, 化存卿, 等. 海上通信技术发展与研究综述 [J]. 电信科学, 2022, 38(5): 1–17.  
DONG H, SONG L, HUA C Q, et al. Survey of the research and development on the maritime communication technology[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(5): 1–17 (in Chinese).
- [13] VALTA M, JUTILA M, JÄMSÄ J. IEEE 802.11p and LTE as enablers of cognitive vehicle-to-infrastructure communication[C]//Proceedings of 2015 6th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. Győr: IEEE, 2015: 71–6. doi: 10.1109/CogInfoCom.2015.7390567.
- [14] AUST S. Measurement study of IEEE 802.11ah sub-1 GHz wireless channel performance[C]//Proceedings of 2024 IEEE 21st Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas: IEEE, 2024: 847–850. doi: 10.1109/CCNC51664.2024.10454693.
- [15] 金华标, 肖骁. 基于北斗短报文与 4G 的内河船舶智能终端船舶通信技术 [J]. 船海工程, 2021, 50(4): 67–71, 76.  
JIN H B, XIAO X. On ship-to-shore communication technology of inland waterway shipboard intelligent terminal based on Beidou short message and 4G[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2021, 50(4): 67–71, 76 (in Chinese).
- [16] LI X L, FENG W, WANG J, et al. Enabling 5G on the ocean: a hybrid satellite-UAV-terrestrial network solution [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(6): 116–121.
- [17] 赵敏笑. 5G 通信技术的船舶航行状态远程监测系统 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(1A): 43–45.  
ZHAO M X. Remote monitoring system for ship navigation status based on 5G communication technology[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(1A): 43–45 (in Chinese).
- [18] 汪洋, 叶挺, 李廷文, 等. 自主船舶航行系统信息空间安全: 挑战与探索 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2023, 51(2): 64–76.  
WANG Y, YE T, LI T W, et al. Cyberspace security for autonomous ship navigation system: challenges and explorations[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 51(2): 64–76 (in Chinese).
- [19] PLASS S, CLAZZER F, BEKKADAL F. Current situation and future innovations in Arctic communications [C]//Proceedings of 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference. Boston: IEEE, 2015: 1–7. doi: 10.1109/VTCFall.2015.7390883.
- [20] FENECH H, AMOS S, HIRSCH A, et al. VHTS systems: requirements and evolution[C]//Proceedings of 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation. Paris: IEEE, 2017: 2409–2412. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928175.
- [21] TELESAT. Telesat Lightspeed™ LEO network[EB/OL]. (2024-03-11) [2024-11-18]. <https://www.telesat.com/leo-satellites/>.

[22] Iridium LEO Constellation[EB/OL]. [2020-06-29] [2024-11-18]. <https://www.iridium.com/network/globalnetwork/>.

[23] COLOMBO C. Long-term evolution of highly-elliptical orbits: luni-solar perturbation effects for stability and re-entry[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2019, 6: 34.

[24] ILCEV M. New aspects for modernization global maritime distress and safety system (GMDSS)[J]. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2020, 14(4): 991–998.

[25] 封锦. 基于 SDN 技术的海上船舶现场通信网络架构设计[J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(14): 142–144.  
FENG J. Design of on-site communication network architecture for marine vessels based on SDN technology[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(14): 142–144 (in Chinese).

[26] 马文静, 张超超, 赵文豪, 等. 面向 5G 网络虚拟化技术的安全研究[J]. *信息技术与标准化*, 2024(9): 51–56.  
MA W J, ZHANG C C, ZHAO W H, et al. Security research on 5G network virtualization technologies[J]. *Information Technology & Standardization*, 2024(9): 51–56 (in Chinese).

[27] 代燕. 基于船联网的 MILK-RUN 船舶运输调度系统研究[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(22): 28–30.  
DAI Y. Research on MILK-RUN ship transportation scheduling system based on ship networking[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(22): 28–30 (in Chinese).

[28] 刘云璐, 杨光, 杨宁, 等. 面向 5G 的多网融合研究[J]. *电信科学*, 2015, 31(5): 63–67.  
LIU Y L, YANG G, YANG N, et al. Study on multi-RAT coordination in 5G[J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(5): 63–67 (in Chinese).

[29] 郑亮, 严彬. 基于 SDN/NFV 的海军虚拟军事信息网络构建方法[J]. *舰船电子工程*, 2016, 36(8): 123–126.  
ZHENG L, YAN B. Struction means in the navy virtual information network based on SDN/NFV technology[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(8): 123–126 (in Chinese).

[30] 蒋欣秀, 常俊, 李波, 等. 面向海洋节能边缘计算的任务卸载研究[J]. *计算机工程与科学*, 2022, 44(9): 1563–1573.  
XIN X X, JUN C, LI B, et al. Research on task unloading for marine energy-saving edge computing[J]. *Computer Engineering and Science*, 2022, 44(9): 1563–1573 (in Chinese).

[31] 姜俊颖. 基于 5G 通信技术的船舶网络系统设计[J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(23): 169–172.  
JIANG J Y. Design of ship network system based on 5G communication technology[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(23): 169–172 (in Chinese).

[32] ZADA M, SHAH I A, YOO H. Integration of sub-6-GHz and mm-wave bands with a large frequency ratio for future 5G MIMO applications[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 11241–11251.

[33] ALI S A, WAJID M, KUMAR A, et al. Design challenges and possible solutions for 5G SIW MIMO and phased array antennas: a review[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 88567–88594.

[34] LI X L, FENG W, WANG J, et al. Enabling 5G on the ocean: a hybrid satellite-UAV-terrestrial network solution[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(6): 116–121. doi: 10.1109/MWC.001.2000076.

[35] 陈立家, 周为, 许毅, 等. 一种基于 SDN 的多约束无人船网络传输路由算法[J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(4): 107–113.  
CHEN L J, ZHOU W, XU Y, et al. Multi-constrained unmanned surface vessel network transmission routing algorithm based on SDN[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(4): 107–113 (in both Chinese and English).

[36] ALOTAIBI A, BARNAWI A. IDSoft: a federated and softwarized intrusion detection framework for massive internet of things in 6G network[J]. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2023, 35(6): 101575.

[37] ZHANG C C, WANG X W, DONG A W, et al. Energy efficient network service deployment across multiple SDN domains[J]. *Computer Communications*, 2020, 151: 449–462.

[38] QU K G, ZHUANG W H, YE Q, et al. Dynamic flow migration for embedded services in SDN/NFV-enabled 5G core networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(4): 2394–2408.

[39] IBRAHIM A A Z, HASHIM F, NOORDIN N K, et al. Heuristic resource allocation algorithm for controller placement in multi-control 5G based on SDN/NFV architecture[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 2602–2617.

[40] SINGH J, REFAEY A, SHAMI A. Multilevel security framework for nfv based on software defined perimeter[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(5): 114–119.

[41] 包寅盛, 卓磊, 曹昊, 等. 5G MEC 大型船舶智慧引航应用[J]. *中国仪器仪表*, 2021(2): 19–21.  
BAO Y S, ZHUO L, CAO H, et al. Application of 5G MEC large ship intelligent pilotage[J]. *China Instrumentation*, 2021(2): 19–21 (in Chinese).

[42] WU Z Y, YAN D F. Deep reinforcement learning-based computation offloading for 5G vehicle-aware multi-access edge computing network[J]. *China Communications*, 2021, 18(11): 26–41.

[43] SHAH S D A, GREGORY M A, LI S, et al. SDN enhanced multi-access edge computing (MEC) for E2E mobility and QoS management[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 77459–77469.

# Research status and prospects of satellite-shore-based integrated network technology for remotely-controlled ships

HU Xinjue<sup>1,2,3,4</sup>, LI Qi<sup>1,5</sup>, LIU Jialun<sup>\*1,2,3,4</sup>, ZHOU Yunlong<sup>1,5</sup>, LIN Nan<sup>1,5</sup>, LI Shijie<sup>1,5</sup>

1 State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety (Wuhan University of Technology),  
Wuhan, 430063, China

2 East Lake Laboratory, Wuhan 420202, China

3 Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

4 National Engineering Research Center for Water Transportation Safety, Wuhan 430063, China

5 School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

**Abstract:** The purpose of this work is to optimize the communication architecture for existing remotely-controlled ships to meet the challenges of network connectivity in diverse environments (e.g., ports, deep-sea, and polar regions), aiming to address the issues of insufficient coverage, limited bandwidth, and high communication latency. First, the applicability and technical characteristics of shore-based and satellite communication networks are systematically summarized, while the diverse wireless communication requirements of remotely-controlled ships operating in different water areas are comprehensively analyzed. Based on this, a satellite-shore-based integrated network architecture that fuses multiple wireless communication systems is proposed. It aims to deeply integrate satellite and shore-based networks, thereby constructing an intelligent and stable shipboard communication system. By revealing the huge application potential of the satellite-shore-based integrated network architecture, which offers economic and service quality advantages for remotely-controlled ships in complex navigation environments, and by sorting out relevant key technologies and existing bottleneck issues, the proposed integrated communication network architecture is expected to provide a theoretical reference for optimizing the communication of remotely-controlled ships under diverse network conditions.

**Key words:** ships; telecommunication networks; satellite-shore integrated network; remotely-controlled communication; communication and data link; network access management; communication optimization

## 相关论文

[1] 赵建森, 谭智豪, 段海燕, 等. 基于奇异谱和稳健独立分量分析的星载 AIS 接收信号分离算法 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(6): 293–302. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03464>

[2] 马枫, 陈晨, 刘佳仑, 等. 船岸协同支持下的内河船舶远程驾控系统关键技术研究 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(5): 125–133. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02896>

[3] 王远渊, 刘佳仑, 马枫, 等. 智能船舶远程驾驶控制技术研究现状与趋势 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 18–31. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01939>

[4] 刘睿, 于双和, 尹广帅. 间歇通信环境下的船舶编队控制 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(2): 119–126. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01800>

[5] 武树斌, 温玉屏, 夏洋, 等. 带宽约束下舰艇编队网络的跨平台任务调度算法 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(6): 170–175. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01899>

[6] 张高明, 李维波, 华逸飞, 等. 基于 W5200 的双冗余以太网通信系统应用研究 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(1): 127–132. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.3969/j.issn.1673-3185.2018.01.019>