中国沿海海上无线宽带专网建设方案研究与探讨

Research and Discussion on Construction Plan of Wireless Broadband Private Network in China's Coastal Sea

赵先明/Zhao Xianming[1]，杨蕾/Yang Lei[2]，
喻存林/Yu Cunlin[3]，杨慧婷/Yang Huiting[2]，
窦兴林/Dou Xinglin[1]，沈浩/Shen Hao[4]
（1. 北京红山信息科技研究院有限公司，中国 北京 100176；
2. 中远海运科技股份有限公司，中国 上海 200135；
3. 陆铁港芸科技（上海）有限公司，中国 上海 201199；
4. 北京网藤科技有限公司，中国 北京 101108）
(1. Beijing Hongshan Information Technology Research Institute Co., Ltd, Beijing 100176, China;
2. COSCO SHIPPING Techology CO., Ltd, Shanghai 200135, China;
3. Lu Tiegang Yun Technology (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai 201199, China;
4. Beijing Wangteng Technology Co., Ltd, Beijing 101108, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202605012
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20261020.1050.002
网络出版日期：2026-10-20
收稿日期：2026-06-16

摘要：针对沿海海域无线传播环境复杂、航道连续覆盖难度较大以及海事监管与应急通信对网络可靠性要求较高等问题，开展沿海海上无线宽带专网建设方案研究。在分析中国沿海无线宽带专网建设必要性的基础上，提出长江口和琼州海峡无线宽带专网建设方案，并仿真验证了实验专网的性能。仿真结果表明，专网系统可满足海事监管、应急搜救等业务的宽带通信需求。研究成果为后续无线宽带专网的建设提供了有效探索和核心指导。

关键词：无线宽带；实验专网；网络仿真

Abstract: To address the challenges posed by complex radio propagation conditions in coastal waters, the difficulty of maintaining continuous wireless coverage along shipping lanes, and the stringent network reliability requirements for maritime surveillance and emergency communications, this study investigates the planning and deployment of coastal maritime wireless broadband private networks. Based on an analysis of the necessity for building China's coastal wireless broadband private network, construction plans for the Yangtze River Estuary and Qiongzhou Strait wireless broadband private networks are proposed, and the performance of the experimental private network is simulated and verified. The simulation results show that the private network system can meet the broadband communication needs of maritime supervision, search and rescue, emergency response, and other services. These research results provide useful exploration and key guidance for the future construction of wireless broadband private networks.

Keywords: wireless broadband; experimental private network; network simulation

引用格式：赵先明, 杨蕾, 喻存林, 等. 中国沿海海上无线宽带专网建设方案研究与探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(5): 91-98. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605012
Citation: Zhao X M, Yang L, Yu C L, et al. Research and discussion on construction plan of wireless broadband private network in China's coastal sea [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(5): 91-98. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605012

党的二十大报告指出："发展海洋经济，保护海洋生态环境，加快建设海洋强国。"中国政府高度重视海洋强国建设。建设海洋强国是实现中华民族伟大复兴的重大战略任务。随着无线通信与网络技术的高速发展和大规模部署，城市中人们几乎可以随时随地、不受限制地使用互联网和各种数据服务[1]。然而，中国海上通信发展滞后于陆地通信，已成为海事监管、搜救应急、航海保障、救助打捞等海上交通管理业务现代化、信息化发展的瓶颈[2]。与陆地蜂窝通信环境相比，沿海和近海无线通信在传播与组网方面存在明显差异[3]。一方面，海面开阔环境通常具有良好的

视距传播条件，但海面反射会与直射路径发生相干叠加，导致接收信号随距离出现周期性深衰落；另一方面，海面粗糙度、潮汐、波浪、大气折射率梯度及蒸发波导会导致路径损耗显著时变。对于超视距或接近无线电地平线的链路，地球曲率和绕射效应不可忽略。此外，船舶移动、横摇和纵摇会导致天线高度、方向图和多普勒频移发生变化，大型船体还会造成动态遮挡。因此，直接采用陆地蜂窝网络传播模型和固定站点规划方法，可能导致覆盖范围和边缘吞吐量预测出现偏差。在此背景下，各类新兴海上业务对海上网络通信服务提出了更高端、更多样化的需求[4–5]。这些需求不仅反映了现代海洋活动对高效、稳定通信手段的迫切需要，也彰显了科技进步对提升海洋经济活力的重要性。

在加快建设海洋强国的新征程中，探索并部署契合中国国情、兼具高速率、高可靠性、广覆盖和良好成本效益的新型沿海海上无线宽带通信网络，对于推动沿海海上无线宽带相关产业发展、提升海洋安全保障能力，具有不可替代的战略意义和实践价值[6–9]。

这一前瞻性举措不仅能满足日益复杂的海洋活动对通信质量与效率提出的高标准要求，也为构建现代化海洋产业体系奠定了坚实的技术基础。通过整合先进的卫星通信技术和地面无线网络资源，构建一体化、智能化的海上信息服务平台，极大促进海事监管、海洋运输、远洋渔业、深海勘探等领域的技术创新与产业升级，并进一步增强中国在全球海洋治理中的话语权和影响力。因此，建设并部署适合中国国情的高质量、全覆盖、低成本的新型沿海海上无线宽带专网，对加强海事监管、发展海洋领域相关产业等具有重要意义。

综上，现有研究已在海上无线信道测量、海陆空天融合网络和基站规划等方面取得进展，但仍存在以下不足：一是，海上专网工程规划往往缺乏对海面反射、地球曲率和大气折射的联合建模及本地参数校准；二是，异构网络研究多停留在概念架构层面，缺少面向安全关键业务的链路可用度与备份约束；三是，已有工程案例多以覆盖图和最大覆盖距离为主要结果，缺少与陆地基线模型、单一网络方案的系统对比和敏感性分析。

针对上述问题，本文提出一种兼顾海洋传播特性与异构接入的沿海无线宽带专网架构及覆盖优化方法。主要贡献如下：1）建立适用于沿海视距链路的海面修正传播分析框架，明确海面反射、粗糙度、无线电地平线和动态遮挡对双频链路的影响；2）设计由陆基专网、船载中继和卫星备份构成的分层异构架构，提出面向不同海事业务等级的链路选择与可靠性保障机制；3）构建覆盖、容量、时延、可靠性和成本联合优化模型，并以琼州海峡和长江口为案例，与陆地传播模型和单一陆基网络方案进行对比验证；4）从统计分位值、门限满足率和时延裕度等角度分析现网能力。

1 海洋传播特征与双频异构架构

1.1 海上网络与陆地网络的差异

与陆地蜂窝网络相比，沿海海上无线宽带网络在传播环境、终端状态和业务需求方面存在显著差异。海上链路以视距传播和海面反射为主，直射波与反射波相干叠加，容易引发深衰落；同时，海面起伏、大气折射和地球曲率会进一步影响远距离通信性能。

海上用户沿航道动态分布，船舶升沉、横摇和纵摇会引起天线高度与指向变化，增加链路维持和小区切换的难度。因此，网络规划不仅需要考虑覆盖范围，还应关注航道连续覆盖和移动接入可靠性。

此外，海事监管、视频回传和应急调度对上行速率、传输时延和业务连续性提出了更高要求。针对上述差异，海上专网需综合考虑海面传播修正、链路可用性及双频互补机制。表1总结了海上与陆地网络的主要差异及相应设计要求。

1.2 海面修正传播分析

设岸基基站与船载网关水平距离为d，发射天线和接收天线相对平均海面的高度分别为h_t和h_r，如图1所示。在局部平面海面近似下，直射路径长度和海面镜像路径长度分别为：

表1 海上无线网络与陆地蜂窝网络的主要差异

维度	陆地网络	海上网络	设计要求
传播机制	建筑物和地形散射丰富	视距与海面反射占主导	采用海面修正传播模型
用户分布	区域密集、相对稳定	沿航道移动、密度不均	按航道连续性评价
终端姿态	天线位置基本稳定	船舶升沉、横摇和纵摇	考虑动态方向图损失
远距传播	受站点密度和地形限制	受曲率、折射和波导影响	校核无线电地平线
业务特征	下行互联网业务占比高	视频上行和应急调度重要	强化上行和低时延保障

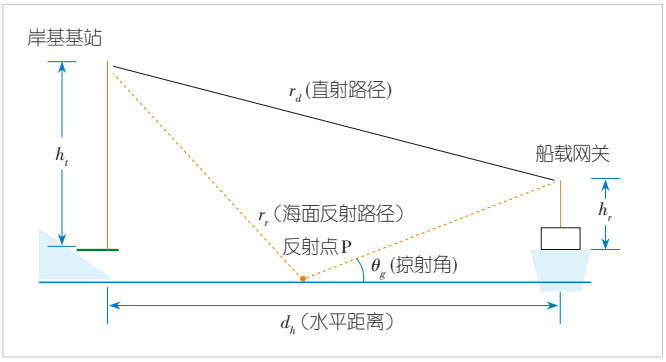


图1　海上直射–反射传播及主要环境影响示意图

$$r_d = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2},\ r_r = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2} \quad (1),$$

其中，r_d为直射路径长度，r_r为经海面镜像反射后的路径长度，d为发射端与接收端的水平距离，h_t为发射天线相对平均海面的高度，h_r为接收天线相对平均海面的高度。

直射波与反射波的路径差为$\Delta_r = r_r - r_d$，对应传播相位差为$\Delta\varphi = 2\pi\Delta r/\lambda$。考虑海面粗糙度对相干镜面反射分量的衰减，极化方式p下的有效反射系数表示为：

$$\Gamma_{(\mathrm{eff},p)} = \Gamma_p \rho_s,\quad \rho_s = \exp\left[-2((2\pi\sigma_h \sin\theta_g)/\lambda)^2\right] \quad (2),$$

其中，Γ_p为平滑海面的菲涅耳反射系数，σ_h为海面高度起伏均方根，θ_g为相对海平面的掠射角，λ为波长。进一步考虑地球曲率与大气折射，采用等效地球半径模型时，两端天线之间的无线电视距为：

$$d_h = \sqrt{(2k_e R_e h_t)} + \sqrt{(2k_e R_e h_r)} \quad (3),$$

其中，R_e为地球平均半径，k_e为等效地球半径因子。上述模型用于说明海面反射、粗糙度、地球曲率和大气折射对链路的作用机理。

1.3 双频异构接入与业务选择

如图2所示，该双频架构由700 MHz和1.4 GHz岸基小区、船载双频通信网关、专网核心网、调度服务器及业务终端组成。其中，船载网关负责采集两个频段的参考信号接收功率（RSRP）、信干噪比（SINR）、可用吞吐量和当前负载，核心网负责统一认证与会话管理。在双频架构的基础上，系统可进一步实现优先选择频段的策略。

设频段f的归一化链路指标为$\tilde{R}_f(t)$、$\tilde{Q}_f(t)$、$\tilde{P}_f(t)$，分别表示可用吞吐量、SINR和RSRP；$\tilde{H}_f(t)$表示切换与占用代价。针对业务b在频段f上的综合效用为：

$$S_f^{(b)}(t) = w_R^{(b)}\tilde{R}_f(t) + w_Q^{(b)}\tilde{Q}_f(t) + w_P^{(b)}\tilde{P}_f(t) - w_H^{(b)}\tilde{H}_f(t) \quad (4)。$$

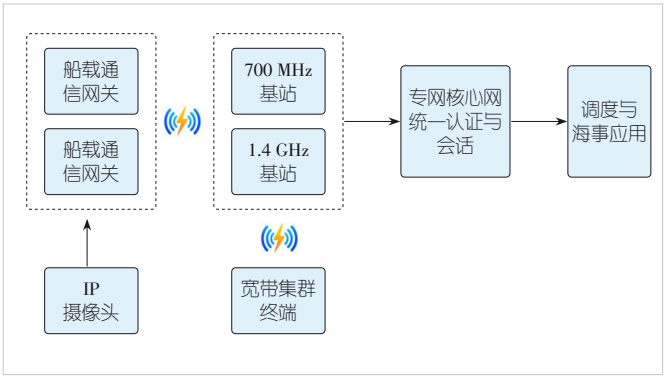


图2　琼州海峡双频异构无线宽带专网架构

系统优先选择综合效用较高的频段。为抑制频繁切换，仅当候选频段效用连续T_{hold}时间高于当前频段，且二者差值不小于滞回门限ΔS_{th}时，才执行频段切换。

2 实验专网与测试方法

2.1 组网与设备配置

琼州海峡实验专网在海口盈滨半岛盈滨雷达站和徐闻三塘角雷达站部署基站，基站通过传输专线接入核心网、调度服务器和应用系统。该实验专网的组网结构如图3所示。测试网络配备13台通信网关、14台手持终端和72路渡轮自有的IP摄像头。其中，12艘船各安装1台通信网关并接入6路摄像头，另在海事基地部署1台通信网关，具体配置如表2所示。测试内容包括互联网接入、视频、宽带集群、定位、

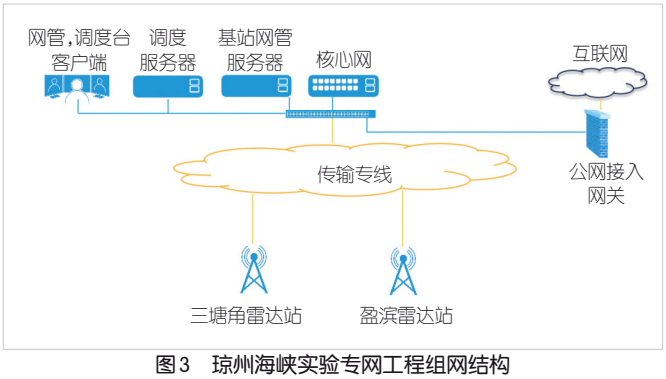


图3　琼州海峡实验专网工程组网结构

表2　实验专网的主要站点与终端配置

类别	数量/位置	用途
岸基站点	盈滨雷达站、三塘角雷达站	双岸协同覆盖琼州海峡航线
通信网关	13台	12艘渡轮各1台，海事基地1台
手持终端	14台	集群语音、视频、定位和消息
IP摄像头	72路	每艘渡轮6路720P视频接入

短消息、多媒体消息、移动性及性能指标等。

2.2 测试项目与评价指标

本次近点吞吐量测试在RSRP＞−75 dBm、SINR＞22 dB的良好信道条件下进行，满缓冲业务流可稳定持续30 s以上。在航道覆盖测试中，测试笔记本通过网线连接通信网关，沿主航道约每5 min记录一次数据，平均距离间隔小于2 km；700 MHz和1.4 GHz频段各获得15组RSRP、SINR及上下行吞吐量数据。覆盖业务门限设定为下行5 Mbit/s、上行3 Mbit/s。

为评价不同频段对海事业务基本传输需求的保障能力，定义频段f的航道业务门限满足率C_f，即在全部有效采样点中，上、下行吞吐量同时达到规定业务门限的采样点占比：

$$C_f = \frac{1}{N_f}\sum_{i=1}^{N_f} \mathbb{I}\left(R_{(\mathrm{DL},i)}^{(f)} \geqslant 5\ \mathrm{Mbit/s} \wedge R_{(\mathrm{UL},i)}^{(f)} \geqslant 3\ \mathrm{Mbit/s}\right) \times 100\% \quad (5),$$

其中，N_f为频段f的有效采样点数量，$\mathbb{I}(\cdot)$为示性函数。当第i个采样点的上下行吞吐量同时达到门限时，$\mathbb{I}(\cdot)$取1，否则取0。

除平均值外，本文进一步基于原始记录计算最小值、5%分位值和标准差，以避免仅凭平均吞吐量掩盖航道边缘性能。针对宽带集群业务，通过信令日志计算组呼建立、话权申请和单呼建立时延。功能测试包括船舶闭路电视（CCTV）回传、手持终端视频上拉/回传、调度台视频推送、组呼与全双工单呼、紧急呼叫、定位、消息以及站内/站间切换。表3列出了测试项目、样本与判据。

3 实际海域测试结果

3.1 近点吞吐量与航道门限满足率

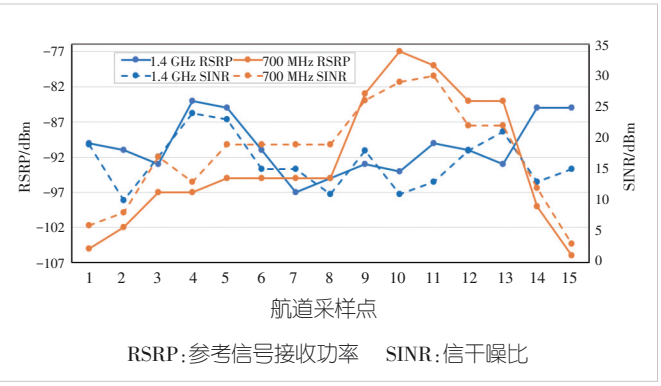
近点良好信道条件下的双频吞吐量测试结果如表4所示。1.4 GHz频段下行、上行吞吐量分别为39 Mbit/s和24 Mbit/s。700 MHz频段下行、上行吞吐量分别为100 Mbit/s和43 Mbit/s。可以看出，1.4 GHz频段上行吞吐量刚好达到24 Mbit/s验收门限，而700 MHz频段上、下行均具有更大的性能裕度。该性能差异受系统带宽、发射功率、调度策略及终端配置等多重因素影响，不能仅由工作频率高低解释。

3.2 航道信号质量与吞吐量

根据实际测试数据，我们绘制了图4和图5。如图4所示，1.4 GHz频段15个采样点的平均RSRP为−90 dBm，平均SINR为16 dB，记录范围分别为−97～−84 dBm和10～24 dB；700 MHz频段采样点的平均RSRP为−92.9 dBm，平均SINR

表4　双频近点吞吐量结果

频段	下行/（Mbit·s⁻¹）	上行/（Mbit·s⁻¹）	结论
1.4 GHz	39	24	满足31/24 Mbit/s门限
700 MHz	100	43	满足31/24 Mbit/s门限



RSRP：参考信号接收功率　SINR：信干噪比

图4　双频航道采样点的RSRP与SINR

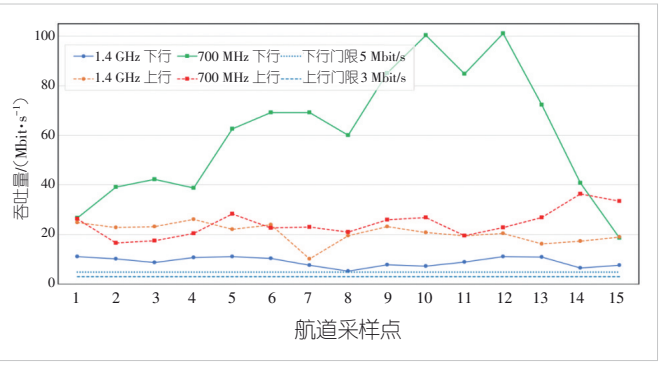


图5　双频航道采样点的上下行吞吐量及业务门限

表3　测试项目、样本与判据

类别	样本/条件	主要判据
近点吞吐量	双频各1组，良好信道，持续≥30 s	下行≥31、上行≥24 Mbit/s
航道覆盖	双频各15点，点间距<2 km	下行≥5、上行≥3 Mbit/s
视频业务	72路摄像头与手持终端	720P视频清晰、流畅
集群时延	信令日志多次记录	组呼≤300、话权≤200、单呼≤500 ms
移动性	站内和站间移动	切换流程完成、业务保持

为 17.6 dB，对应范围分别为 −106 ~ −77 dBm 和 3 ~ 30 dB。700 MHz 频段的 RSRP 波动更大，但全部采样点的 SINR 仍为正值。由于两频段的采样轨迹、网络参数和负载并非完全等效，平均 RSRP 不宜直接作为比较频段传播优劣的单因素依据。

如图 5 所示，1.4 GHz 频段下行、上行平均吞吐量分别为 9.1、20.6 Mbit/s，最小值分别为 5.2、10.3 Mbit/s；700 MHz 频段分别为 60.7、24.5 Mbit/s，最小值分别为 18.6、16.7 Mbit/s。两频段各 15 个采样点均同时满足 5/3 Mbit/s 的门限要求，航道门限满足率均为 100%。

从边缘业务能力看，1.4 GHz 下行最小值仅高于 5 Mbit/s 门限 0.2 Mbit/s，说明部分航段下行裕度较小；其上行最小值为 10.3 Mbit/s，可支持 720P 视频和一般应急图像回传。700 MHz 在当前配置下的下行 5% 分位值为 24.27 Mbit/s，显著高于业务门限，但其信号与吞吐量波动均较大，仍应通过动态链路监测避免以平均值代替边缘状态。

3.3 视频、集群与信息业务功能验证

船舶 CCTV 测试中，将摄像头分辨率设为 720P，视频经通信网关实时回传至调度台，画面清晰且流畅；手持终端视频上拉、主动回传以及调度台向用户或群组推送等功能均测试通过。测试过程记录如图 6 所示。普通智能终端可通过通信网关的 Wi-Fi 接入互联网，专网手持终端则可直接访问互联网。

在宽带集群方面，终端和调度台发起的语音组呼、终端间以及终端与调度台之间的全双工单呼、紧急呼叫均正常，语音清晰流畅；定位、短消息和多媒体消息业务均测试通过。上述结果表明，实验专网不仅满足覆盖门限要求，还能够承载海事监管所需的视频、语音和调度业务。

3.4 移动性与集群时延

移动性测试中，通信网关从小区 A 移动至小区 B，站内切换和站间切换均成功。站间切换流程包括测量报告、切换请求与确认、无线资源控制（RRC）重配置以及上下文释放。测试结果表明双岸小区之间能够维持移动接入。

如表 5 所示，3 类平均时延均明显低于验收门限。单呼建立时延记录的最大值为 249 ms，虽高于其余样本，但仍低于 500 ms 门限；组呼建立和话权申请时延的最大值分别为 70 ms 和 92 ms。图 7 和表 5 的结果表明，核心网、基站和终端集群信令链路具有较充足的时延裕度，能够支撑海上应急语音和调度操作。

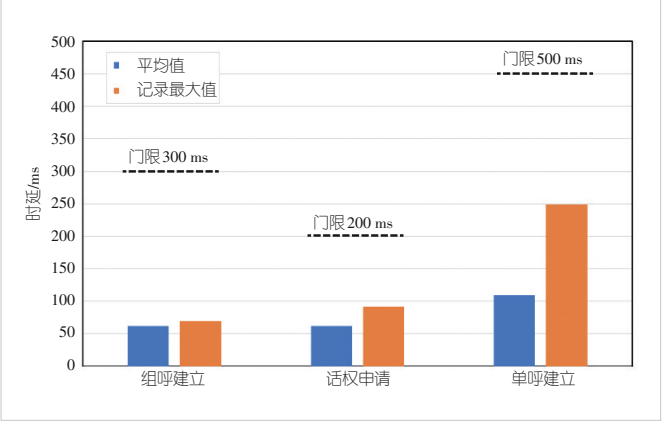


图 7　集群业务平均时延、记录最大值与验收门限



(a)CCTV 回传　(b)调度推送　(c)终端接收

图 6　视频业务测试记录

表 5　集群业务时延统计

业务	记录组数	平均时延/ms	时延范围/ms	门限/ms	平均值裕度
语音组呼建立	25	62.5	55 ~ 70	300	低于门限 79.2%
组呼话权申请	26	62.3	54 ~ 92	200	低于门限 68.9%
语音单呼建立	25	109	86 ~ 249	500	低于门限 78.2%

4 结束语

针对沿海无线宽带专网海洋特征不突出、异构网络缺少实验支撑、技术分析偏弱等问题，本文聚焦琼州海峡700 MHz/1.4 GHz双频实验专网，提出海面修正传播分析与业务感知双频接入方法，并基于实际海域测试报告中的原始记录进行验证。

测试结果如下：1）1.4 GHz和700 MHz频段的近点下行、上行吞吐量分别为39、24 Mbit/s和100、43 Mbit/s；2）两频段各15个航道采样点均满足下行5 Mbit/s、上行3 Mbit/s的门限要求，1.4 GHz和700 MHz频段的平均下行、上行吞吐量分别为9.1、20.6 Mbit/s和60.7、24.5 Mbit/s；3）720P视频、集群语音、定位、消息及站内/站间切换均测试通过；4）组呼建立、话权申请和单呼建立的平均时延分别为62.5、62.3和109 ms，均明显低于验收门限。综合测试结果表明，双频现网能够满足琼州海峡主航道的基本宽带通信与海事调度需求。

后续将开展同步记录环境参数的多季节航测，补充切换中断和视频质量指标，并在此基础上验证动态双频选择以及卫星/海上中继扩展方案。

参考文献

[1] 孙武. 无线通信技术发展前景探索 [J]. 科学大众, 2009(6): 147
[2] 陈兵, 王辰, 林新宇, 等. 福建沿海船岸无线宽带专网规划布局研究 [J]. 中国水运, 2022(8): 75-77
[3] 张洪铭，闫实，唐斌，等.海上无线通信技术：现状与挑战[J].无线电通信技术，2024，47(4)：392-401
[4] 陈曦. 海上险情应急处置中的强制救助研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016
[5] 段建丽, 林彬, 王莹, 等. 海上无线宽带网络架构研究现状及相关技术展望 [J]. 电讯技术, 2018, 58(8): 981-988. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893x.2018.08.020
[6] Yang T, Liang H, Cheng N, et al. Towards video packets store-carry-and-forward scheduling in maritime wideband communication [C]//Proceedings of 2013 Global Communications Conference. Atlanta. IEEE, 2013: 4032-4037. DOI: 10.1109/GLOCOM.2013.6831704
[7] Yang T, Liang H, Cheng N, et al. Efficient scheduling for video transmissions in maritime wireless communication networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2015, 64(9): 4215-4229. DOI: 10.1109/TVT.2014.2361120
[8] Liang Y Z, Wang L N, Qi Z Q, et al. Integrated all-light network for air, space, land, and sea [J]. ZTE communications, 2025, 23(2): 109-114. DOI: 10.12142/ZTECOM.202502012
[9] 张吉发，黄香港，赵楠. 面向6G典型场景的高能效立体覆盖技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 39-47. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501007

作 者 简 介



赵先明，北京红山信息科技研究院有限公司高级工程师；主要研究方向为新一代移动通信。



杨蕾，中远海运科技股份有限公司高级工程师；主要研究方向为海事信息化。



喻存林，陆铁港芸科技（上海）有限公司工程师；主要研究方向为通信网络工程、专网通信安全。



杨慧婷，中远海运科技股份有限公司工程师；主要研究方向为海事信息化。



窦兴林，北京红山信息科技研究院有限公司工程师；主要研究方向为专网通信安全。



沈浩，北京网藤科技有限公司工程师；主要研究方向为海事航运与信息安全。