



专题：智能通信技术

星地协同智能海洋通信网络发展展望

冯伟, 唐睿, 葛宁

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 随着国家海洋战略推进实施, 海上运输、资源开发等经济活动日趋活跃, 海洋通信需求不断增长。尽管地面蜂窝网络已进入 5G 时代, 现有海洋通信仍主要依赖海事卫星和岸基通信手段, 通信速率、通信时延和可靠性等远不能满足需求。未来 6G 网络有望实现天空地海全域覆盖, 但由于海上环境的复杂性、海事业务的异构性等挑战, 6G 海洋通信网络仍面临特殊难题。在综述海洋通信现状的基础上, 从传输效率、网络覆盖、信息服务 3 方面梳理关键技术。面向未来 6G 智能海洋通信网络发展, 展望海上环境感知智能传输、星地协同动态组网和业务驱动资源分配技术方法与研究方向。

关键词: 海洋通信网络; 6G; 环境感知; 星地协同; 信息服务

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020281

Perspectives on coordinated satellite-terrestrial intelligent maritime communication network

FENG Wei, TANG Rui, GE Ning

Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: With the implementation of national marine strategy, economic activities such as maritime transport, marine resource exploitation become increasingly important, and the demand for maritime communications keeps growing. Although the terrestrial cellular network had entered the 5G era, existing maritime communications still mainly rely on marine satellites and shore-based base stations, which are far from meeting the demand in terms of communication rate, delay and reliability. The future 6G networks are expected to offer satellite-air-ground-sea full coverage. However, due to complex maritime environments and heterogeneous marine services, the 6G maritime communication networks still face unique challenges. After summarizing the current developing status of maritime communications, related key technologies were surveyed from three aspects: transmission efficiency, network coverage, and information service. For the future development of 6G intelligent maritime communication networks, the technical methods and research directions of maritime environment-aware intelligent transmission, coordinated satellite-terrestrial dynamic networking and service-driven resource allocation were prospected.

Key words: maritime communication network, 6G, environment-aware, satellite-terrestrial coordination, information service

专题策划人: 周华春, 李丹, 董振江

收稿日期: 2020-09-10; 修回日期: 2020-10-09

通信作者: 冯伟, fengwei@tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61922049, No.61771286, No.61941104, No.61701457)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61922049, No.61771286, No.61941104, No.61701457)



1 引言

随着国家海洋战略推进实施,海洋运输、智慧渔场、海上风电、油气资源开发等海事活动迅速发展。各类作业人员以及海洋物联网设施对高速、高可靠通信业务需求不断增长^[1]。目前,海事卫星和各类岸基网络是提供海上通信业务的主要手段。但海事卫星以提供电话、传真等窄带业务为主,难以有效满足低时延、宽带通信需求。中星 16 号等高通量卫星可提高通信带宽,但依赖昂贵的动中通终端天线,应用费效比很高。各类岸基网络或通信速率受限(如 NAVTEX 系统),或覆盖能力不足(如岸基 LTE 系统),也难以提供与地面 4G、5G 等可比拟的海上信息覆盖性能,海陆数字鸿沟问题正日益凸显^[2]。

天空地海全域覆盖是未来 6G 网络的重要特征。由于单一覆盖手段的性能局限,未来海域网络或以星地协同方式构建,并借助智能化手段,克服海域复杂传播环境影响、满足大尺度异构业务需求。与传统地面网络不同,海洋通信的特殊难题在于:第一,海上气象多变、海浪动态波动,导致蒸发波导、大动态衰落等特殊效应,常常造成链路中断^[1];第二,岸基基站选址受限、海况复杂制约海上无人机应用,导致海洋通信网络基础设施建设严重受限,网络覆盖盲区难以避免^[3];第三,海上业务种类多,如作业人员需要高速多媒体业务,而油气平台遥控需要高可靠、低时延业务,如何适应异构业务特性,按需编排网络资源面临难题^[4]。

针对上述 3 个主要难题,从传输效率、网络覆盖、信息服务 3 方面梳理海洋通信网络发展现状并总结其关键技术。在此基础上,结合空天地一体化、智能化发展新趋势,展望星地协同智能海洋通信网络发展途径。从环境感知智能传输、星地协同动态组网和业务驱动资源分配 3 方面提出初步构想。

2 需求分析与发展现状

典型海洋通信需求见表 1^[5-7]。其中,安全通信包括电子导航图更新、海况通报、航行气象告警和海上安全信息广播等通用信息服务,以及紧急救援所需的多媒体业务。紧急救援业务要求低时延、高可靠、高带宽的应急通信能力。专用通信主体服务于海洋监测、石油开发等垂直行业,是提高生产效率、保证安全生产的重要环节。以安全生产视频检测为例,对通信带宽要求较高,但往往允许一定的时延。公共通信服务于乘客、船员和其他海上作业人员的信息沟通和日常娱乐活动等,包括网页浏览和视频下载等业务,对通信带宽需求高、对时延的需求从实时到数分钟不等。

表 1 主要海洋通信需求

服务类型	服务场景	典型速率	典型时延
海事安全通信	导航避障	9.6 kbit/s	低
	通知广播	1.2 kbit/s	—
	紧急救援	153.6 kbit/s(语音)	RE
		492 kbit/s(图像)	RE
		15 Mbit/s(视频)	RE
专用通信	视频监测	10 Mbit/s	低
	数据收集	6 Mbit/s	中
公共通信	文本信息	9.6 kbit/s	中
	语音电话	153.6 kbit/s	IP
	视频电话	30 Mbit/s	IP
	网页浏览	6 Mbit/s	低
	多媒体下载	>100 Mbit/s	中

注: RE 表示实时,时延为毫秒级; IP 表示接近实时的互联网连接,时延小于 1 s; 低等时延表示时延为数秒到 1 min; 中等时延表示时延为数分钟到几个小时。

现有的海洋通信网络星地相对独立发展,可大致分为天基/空基系统、岸基/岛基系统和船基/浮标基系统。下面分别综述各个系统的发展现状。

2.1 天基/空基海洋通信系统

从 1982 年至今, 海事卫星系统 (Inmarsat) 已发展至第五代, 目前三代系统仍在使用当中。海事卫星第三代系统 (Inmarsat-3) 于 1996 年投入使用, 可支持移动分组数据业务; 系统有 5 颗卫星, 每颗卫星在全球波束的基础上补充了 7 个 L 频段的宽点波束。海事卫星第四代系统 Inmarsat-4 由 3 颗卫星组成, 每颗卫星具有一个全球波束、19 个点波束和 228 个窄带波束, 可实现全球中低纬度地区的全面覆盖。Inmarsat-4 支持全球宽带区域网络业务 (BGAN), 通信峰值速率可达 492 kbit/s。第五代系统 Global Xpress 由 5 颗 Ka 波段卫星组成, 可为用户提供 50 Mbit/s 的下行服务和 5 Mbit/s 的上行服务^[8]。

海事卫星之外, 各类通信卫星也可海上为用户提供通信服务, 如我国的“天通一号”移动通信卫星可为用户提供语音、短信和低速数据服务, 峰值速率为 9.6 kbit/s。再如铱星系统可为海上用户提供 128 kbit/s 的数据服务, 而 Iridium-Next 将支持更大通信带宽。随着天基网络迅速发展, 各类高通量卫星、中低轨卫星星座也为海洋通信提供了新途径。如我国的“实践十三号”通信卫星总容量超过 20 Gbit/s, 可覆盖沿海近 200 km 区域。再如建设中的 O3b 系统、Starlink 系统、“鸿雁”与“虹云”星座等均有望为海上用户提供高效通信服务。

卫星通信的主要局限在于时延大、速率受限。各类高通量卫星往往要求终端配置高增益空中天线, 也可能成为大量低端船只有效获得宽带服务的障碍。我国拥有世界上最多的船舶, 而低端船舶占比尤其大。因此, 费效比是构建可用海洋通信网络不可忽视的问题, 仅仅依靠卫星不能全盘解决我国海洋通信问题。

比卫星更低的空基通信网络将基站搭载于无人机、热气球等高空平台, 也是满足海洋通信需求的重要手段。BLUECOM+项目是代表性应用之一, 该项目使用绳系气球作为路由器, 将岸基宽

带通信扩展至偏远海域, 通过多跳中继技术延长通信链路, 可以覆盖距离海岸约 150 km 的海域, 提供速率为 3 Mbit/s 的宽带通信服务^[9]。此外, 无人海域通信因其灵活调度优势, 也具有重要前景^[10]。空基系统由于距离用户更近, 对终端的要求极大降低, 但空基平台易受到气象条件影响, 在复杂海况、恶劣天气条件下应用挑战大。

2.2 岸基/岛基海洋通信系统

岸基通信网络主要包括以 NAVTEX、PACTOR 及 AIS 为代表的窄带无线电系统和沿岸架设蜂窝基站的宽带通信系统。NAVTEX 可为 200 海里 (370.4 km) 以内的船只提供电报服务, 气象预警以及导航数据等安全信息。PACTOR 可为离岸数千千米的船舶提供纯文本通信服务。AIS 是船舶自动认证系统, 通过获取船舶航线信息, 为海上导航、船舶避障等提供依据, 实时传输速率可达 9.6 kbit/s。

为实现近海宽带通信, 可通过沿岸高架基站将 LTE 网络扩展至近海。代表性的离岸 LTE 网络由挪威通信服务商 Tampnet 和华为联合开发。该网络可覆盖离岸 20~50 km 范围内的钻井平台和油轮等, 为用户提供上行峰值速率 1 Mbit/s 和下行峰值速率 2 Mbit/s 的语音和数据服务^[11]。此外, 中国移动和爱立信在青岛建立了 TD-LTE 海上覆盖试验网络, 可覆盖离岸 30 km 的近海区域, 上下行链路的最大吞吐量分别为 7 Mbit/s 和 2 Mbit/s^[12]。而韩国的 LTE-Maritime 项目则将岸基基站和基于海域环境设计的 LTE-Maritime 路由器联合起来, 形成基于 LTE 的单跳网络^[13]。在离岸 30 km 内的区域, 可由基站直接提供宽带服务, 下行和上行链路的平均速率分别为 6 Mbit/s 和 3 Mbit/s。在离岸 30~100 km 的区域内, 与基站直接通信的船载 LTE-Maritime 路由器为用户提供宽带服务, 下行和上行链路的平均速率分别为 3 Mbit/s 和 1 Mbit/s。

海岛也为海洋网络建设提供了重要平台。



2015年,美国无线运营商 Verizon Communications 增强了罗德岛的 LTE 网络覆盖,为岛民和附近船只提供网页浏览和文件下载服务^[14]。2016年,中国移动在距离陆地 1 400 多千米的永暑礁上架设 4G 基站,并借助卫星实现数据回传,传输速率可达 15 Mbit/s。2017年,中国电信在南沙群岛建成 4 座 4G 基站,利用水下电缆与陆地网络相连,可为永暑礁、渚碧礁和美济礁等岛礁及附近海域的船只提供通信服务^[15]。

作为传统陆地蜂窝网络的延伸,岸基/岛基网络可为近海/邻岛区域的用户提供高速、可靠的通信服务。但为了实现远距离覆盖,岸基/岛基基站多部署于山顶或高塔上,且需要电力供应和光纤回传链路等配套设施,可选基站站址往往非常有限。因此,岸基/岛基网络往往受地理条件限制,拓扑极不规则,覆盖受限,且极易出现盲区。

2.3 船基/浮标基海洋通信系统

为了弥补海上通信基础设施缺乏的不足,可利用船舶和海上各类浮标等构建移动通信节点,通过多跳组网填补覆盖盲区。新加坡的 TRITON 项目将船舶互连形成 Mesh 网络,进而通过岸基基站接入地面蜂窝网络,系统峰值速率可达 6 Mbit/s,可覆盖离岸 30 km 以内的近海区域^[16]。类似地,新加坡的 WISEPORT 项目利用 WiMAX 技术获得了覆盖半径为 15 km,接入速率为 5 Mbit/s 的船基通信网络^[17]。韩国的 MariComm 系统将船舶分为海上基站和中继节点,并由岸上

的 MariComm 服务器进行集成管理,系统可在离岸 100 km 范围内,提供超过 1 Mbit/s 的传输速率^[18]。印度类似的海域 Mesh 网络覆盖范围可达 22.6 km^[19]。由于船舶、浮标等并非为网络建设专门设置,且各自具有其特定功能,如船舶遵循预设的航线,浮标要根据检测任务部署等。这导致船基/浮标基海洋通信网络拓扑受限,易出现链路中断,给网络可靠性和时延控制带来挑战。

3 难点分析与技术途径

与常规地面网络不同,海上环境复杂多变、海上基础设施建设受限、海上业务千差万别,导致海洋通信面临特殊难题,下面分别论述。

3.1 海上环境复杂、传输效率低

海域信道传播特性示意图如图 1 所示,与陆地传播环境相比,海上散射体较为稀疏,传播路径以直射径和反射径为主,在特定位置出现的两径相位相消现象会产生明显的信道深衰落,蒸发波导路径又会极大拓展传播距离。易变的海面状况和特殊的气象条件使得海域信道状态的变化更加难以预测。船载天线的高度和角度容易随海面波动而迅速变化;而海域信道对此类天线参数极为敏感,可能造成频繁的链路中断。此外,远距离传输时需考虑地球曲率的影响。海洋通信信道测量与建模相关工作汇总见表 2,详细内容可参见参考文献[1]中的对比分析。

值得一提的是,参考文献[32]提出一种适用于海域信道的两径模型,主要包括一条直射路径与

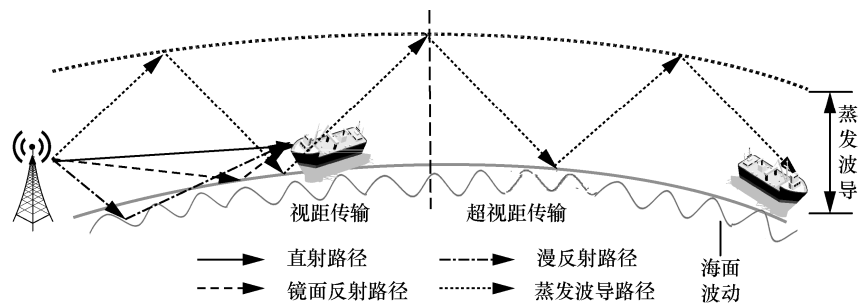


图 1 海域信道传播特性示意图

表2 海域信道测量与建模研究汇总

参考文献	场景	频率/ GHz	最大收发 距离/km	发送/接收天线 高度/m	信道 统计量	建模 角度	主要 模型
[20]	岸—船	2.1	46	10, 25, 50, 100/10	PL	考虑地球曲率	FSL
[21]	船—岸(峡湾)	2.075	45	9.5/11.2	RSL, PDP, SC	SIMO 系统	ITU-R
[22]	浮标—船	5.8	10	1.7/9.8	PL	LOS/NLOS 部分	LPL, 简化两径模型
[23]	船—船	35/94	20	5/9.7	PL, PDP, RMS-DS	引入频率因子	FSL, 修正两径模型
[24]	岸—船	2.4	2	3/4.5	PL, RSL	考虑海浪高度	FSL, 两径模型
[25]	船—岸	5.15	10	3~4/7.6, 10, 20	PL	考虑蒸发波导	FSL, 两径模型, 三径模型
[26]	船—岸	2.075	15.5	6.5/23	RSL, DFO, SRC	考虑海况	ITU-R, 多普勒效应
[27]	船—岸	5.2	12	7.4~8.2/32.9	PL, PDP	时变船载天线 高度	ITU-R, 两径模型
[28]	船—岸	1.39/4.5	40	18.5/30~55	RSL, SSF	引入环境随机性	修正两径模型
[29]	岛—岛	0.248/0.34	33.3, 48	18.5/16, 14	RSL, PL	窄带, 考虑海况	FSL, ITU-R
[30]	空—船	8	不详	760/1.22	PL, PDP	考虑海况和 传播环境	两径模型, 三径模型
[31]	空—船	5.7	10	370, 830, 1 910/7.65 370, 830, 1 910/2.1	PL, RMS, PDP	蒸发波导/ 抬升波导	FSL, 两径模型, 三径模型

注: PL: 路径损耗; RSL: 接收信号电平; PDP: 功率延迟谱; SC: 空间相关性; RMS-DS: 均方根延迟扩展; DFO: 多普勒频移; SRC: 海面反射系数; FSL: 自由空间路径损耗; LPL: 对数路径损耗。

一条反射路径; 并分析了云衰、雨衰等环境因素对电磁传播的影响。两径模型的路径损耗如下:

$$L_{2\text{-ray}} = -10 \lg \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left[2 \sin \left(\frac{2\pi H_1 H_2}{\lambda d} \right) \right]^2 \right\} \quad (1)$$

其中, λ 为载波波长, d 为发射天线与接收天线之间的距离, H_1 和 H_2 分别表示发射天线与接收天线的挂高。

在此基础上, 参考文献[33]通过近海信道测量结果证明, 当传输距离超过某个阈值时, 蒸发波导的存在将对海域信道产生显著影响; 据此提出与蒸发波导和收发天线的高度相关的三径模型。在远距离传输时, 考虑蒸发波导的三径模型可以更准确地标准信道状态, 此时路径损耗为:

$$L_{3\text{-ray}} = \begin{cases} -10 \lg \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot A^2 \right], & d < d_{\text{break}} \\ -10 \lg \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 [2(1 + \Delta)]^2 \right\}, & d > d_{\text{break}} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $d_{\text{break}} = 4H_1 H_2 / \lambda$ 为蒸发波导出现的位置, H_e

表示蒸发波导层的高度; $A = 2 \sin \left(\frac{2\pi H_1 H_2}{\lambda d} \right)$,

$$\Delta = 2 \sin \left(\frac{2\pi H_1 H_2}{\lambda d} \right) \sin \left(\frac{2\pi (H_e - H_1)(H_e - H_2)}{\lambda d} \right).$$

上述海面波动、蒸发波导等特殊海上环境因素导致海洋通信传输效率低, 可靠性差。可能的解决途径是利用复杂环境信息, 调整通信参数, 适配海洋环境。利用蒸发波导实现远距离传输是



典型应用之一。Woods 等^[34]在澳洲大陆和大堡礁间搭建了一条长达 78 km 的通信链路，工作频率为 10.6 GHz，利用蒸发波导，数据速率可达 10 Mbit/s。Iqbal 等^[35]利用仿真工具 AREPS 对马来西亚海岸的超视距通信进行了分析。结果显示：利用蒸发波导实现超视距传输的最优传输条件为 10.5 GHz 的工作频率和 4 m 的天线高度，此时通信链路最长可达 100 km。蒸发波导的高度对于超视距传输的性能具有决定性作用。波导高度主要取决于各种环境因素，包括海洋—大气温差、湿度、气压、风速和浪高等^[36-37]。目前，蒸发波导的高度可通过 Paulus-Jeske 经验模型估计获得，但其准确性受到气象条件的影响。

天线等系统参数的配置也是影响海上传输效率的重要方面。考虑到海域信道的深衰落特性，参考文献[38]提出采用垂直间隔的多天线联合处理接收信号，针对两径信道特性，通过时频协同优化对抗深衰落。为了补偿海面波动造成的天线摆动，参考文献[39]通过天线选择分集来增加链路增益，减少信号衰减。

上述研究表明，考虑到海域信道特性易受海面状况和气象条件等环境因素影响，对环境信息的全面感知有助于更为准确地预测信道状态信息。利用好环境信息，进而调整优化通信参数、适配环境特征，是进一步显著提升海上传输效率的重要技术途径。

3.2 海上设施受限，网络覆盖差

尽管卫星、高空平台、岸基/岛基基站、船载基站等都可用于构建海洋通信网络，但如参考文献[3]中的对比分析所示，不同海上基础设施平台各有其局限性。卫星通信距离远，通信速率受限、时延难以降低；高空平台受气象条件影响大，网络控制面临挑战；岸基基站站址选择受限，难以密集部署从而导致覆盖盲区；船载基站依航线移动，带来不可控的网络拓扑，通信中断难以避免。这些局限性使得协同利用不同平台、扬长避短，

成为几乎必然的选择。

星地协同网络结合了卫星、岸基网络等系统的优点，是实现全海域无缝宽带覆盖的重要途径。但目前相关研究主体面向一般场景，针对海洋场景特性的研究仍很缺乏。参考文献[40]综述了星地协同网络的发展前景和在网络层、传输层的研究方向。为提升协同服务性能，参考文献[41]分析了星地协同网络面临的技术挑战。具体针对多媒体广播服务，参考文献[42]研究了星地协同网络的优化模型，提出了相应的资源管理策略。参考文献[43]则将认知无线电技术与星地协同网络相结合，分析了星地协同网络中认知技术的应用模型和主要挑战。此外，参考文献[44]研究了在干扰约束条件下，陆地网络与卫星网络的资源共享问题，并比较了不同传输方案的性能。参考文献[45]利用地面中继节点转发卫星信号，进而提升宽带覆盖性能。以上研究表明，考虑业务特性是星地协同网络优化的重要视角，也是发挥星、地不同平台优势的重要途径。但海上用户的稀疏分布特性、部分用户遵循确定航线等，也可用于提升星地协同网络性能，这一点有待进一步研究。

在星地协同基础上，无人机也可作为海洋通信网络的移动基站和中继节点来扩大海洋通信网络的覆盖范围。由于具有部署灵活、高机动性等特点，无人机可以为海上用户提供及时的按需覆盖服务。参考文献[10]通过部署无人机以扩大星地协同海洋网络的覆盖范围；其中，无人机与卫星共享频谱，并通过岸基基站或海事卫星接入宽带网络。参考文献[46]分析了无人机作为中继节点的可靠程度，进而优化无人机的飞行高度。参考文献[47]分析无人机在物联网数据收集中的作用，通过优化资源分配策略来提高数据收集效率。参考文献[48]在海洋通信网络中启用无人机作为中继节点；并提出反馈策略对无人机进行优化。值得注意的是，无人机的尺寸、重量和功率等限制了无人机的飞行时间和通信能量^[49]。因此，无人机

应用于海洋通信网络时必须充分考虑其环境适应性,如风力条件及其载荷约束等。

3.3 海上业务繁杂,服务质量保证难

多样异构的海上信息服务及其特征如图2所示,海上业务在速率、时延、可靠性方面需求差异显著。由于海上基础设施建设困难,又难以像地面场景一样通过多个系统的叠加建设,如蜂窝系统和Wi-Fi系统、公网系统和各类专网系统等,来分别满足不同业务需求。因此,如何以一张海洋网络满足千差万别的业务需求是亟待解决的难题。

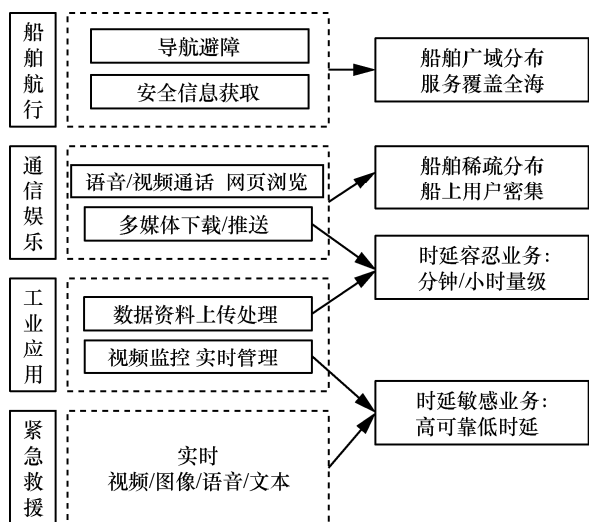


图2 多样异构的海上信息服务及其特征

为了保障航行安全,提高航行效率,船舶需要以快捷有效的方式获得实时、准确的海上交通信息,包括电子导航图、海况状态、航行气象和海上安全信息等。为此,参考文献[50]将Inmarsat卫星信号作为机会辐射源,建立了一个用于海上监控和导航的双基站被动雷达系统。为了更好地管理远海区域船舶,参考文献[51]通过星载AIS系统将海洋交通管理扩展到远海区域,并利用软件定义无线电对信息冲突情况进行处理。参考文献[52]提出一种并行结构的卫星接收机方案以应对海事业务密集区的信息冲突,保障海洋交通安全。

目前,考虑海上业务特性的研究大多集中在船舶航行安全等方面,如何利用客船乘客的局部密集、成簇随船移动的特点,满足个人通信质量需求,仍亟待进一步研究。而针对海上高可靠、低时延业务需求,如何把5G uRLLC的相关技术拓展应用到海洋网络,也有待进一步研究。

4 星地协同智能海洋通信网络

星地协同智能海洋通信网络示意图如图3所示,星地协同智能海洋通信网络综合利用卫星、高空平台、无人机、岸基/岛基/船基基站等动态智能组网,并在中央处理器实现多平台信息的协同处理。海洋环境、用户移动轨迹及服务需求特性等方面的信息通过窄带卫星、窄带广域覆盖岸基网络等收集,并上传至中央处理器进行分析处理。继而利用中央处理器和部分具有边缘处理能力的通信节点分布式、协同地优化调整星地协同策略、资源编排方式、传输参数等,实现海上环境感知智能传输、星地协同动态组网和业务驱动智能资源分配等。与常规通信方法相比,有望显著提升服务效费比。

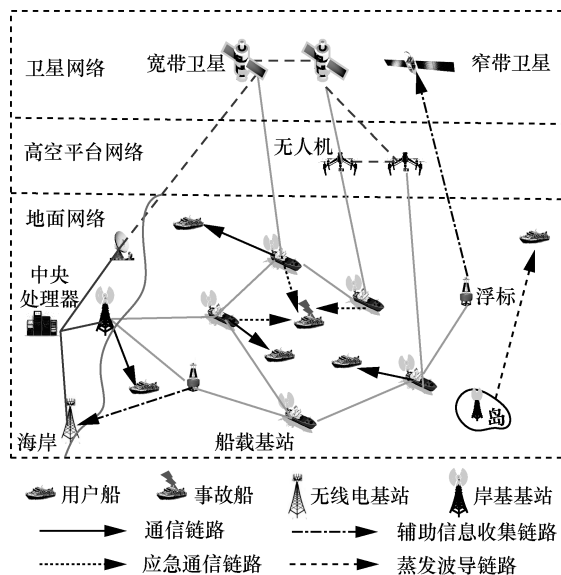


图3 星地协同智能海洋通信网络示意图



4.1 环境感知智能传输

海域信道受海上气象、海面波动等影响显著,通过引入精细化海况、天气条件等外信息,可估计或预测海洋通信的信道条件,进而相应调整天线配置、载波选择、分集方案等,匹配信道条件,最大化传输效率。这与常规通信方法相比,省去了信道估计环节,可极大降低系统开销,对于提高海上通信能效比有很大帮助。以蒸发波导为例,通过线下的精细化信道测量,可以构建时空粒度更小的修正 Paulus-Jeske 经验模型,找到环境信息与经验模型的栅格化映射关系,用以预测蒸发波导的存在性和高度等,不失时机地实现远距离高速传输。此外,海上散射体稀疏,给定环境信息后,海域信道与地理位置具有很大相关性。这使得利用历史通信数据辅助传输优化成为可能。由于海上用户大多遵循一定的航线,即不同用户的轨迹具有重复性,这使得不同用户的通信信道在确定位置、确定环境条件下具有相关性。利用这种相关性,以数据驱动方式,借助机器学习方法,可以“累积历史知识”,用于当前通信用户的参数优化。这是智能海上传输的重要研究方向,也依赖外信息/知识辅助新型传输理论方法的创新突破。

4.2 星地协同动态组网

星、地两张网在时延、速率等方面差异很大,例如 GEO 卫星的往返传输时延为几百毫秒,是地面系统的上百倍。当两张网相遇,如何取长补短、实现“1+1>2”的协同效果仍缺乏系统性研究。可利用海上用户位置可追溯、可预测的特点,如船舶通过配置 AIS 系统获取位置信息等,进而按需编排星地单元,实现动态组网。此外,星地单元应在不同尺度上构建多层次协同关系,如图 4 所示。其中图 4 (a) 为覆盖增强模式,卫星和岸基基站各自覆盖特定的局部区域,协同消除信息覆盖盲区;图 4 (b) 为距离拓展模式,卫星为远海区域的船载基站提供远程回传链路,提升系统通

信范围;卫星回传一般用于大型船只通信,大船进而为周边小船提供服务等;图 4 (c) 为业务融合模式,卫星提供广播服务,实现信息分发,地面网络提供通信服务,实现个性信息交互;图 4 (d) 为精准通信模式,卫星提供广域覆盖的信令链路,岸基/岛基基站则从信令覆盖中解放出来,通过定向波束对准特定用户,实现高速数据传输。上述协同模式如何按需组合,对应的系统性能度量如何,仍需要进一步研究。

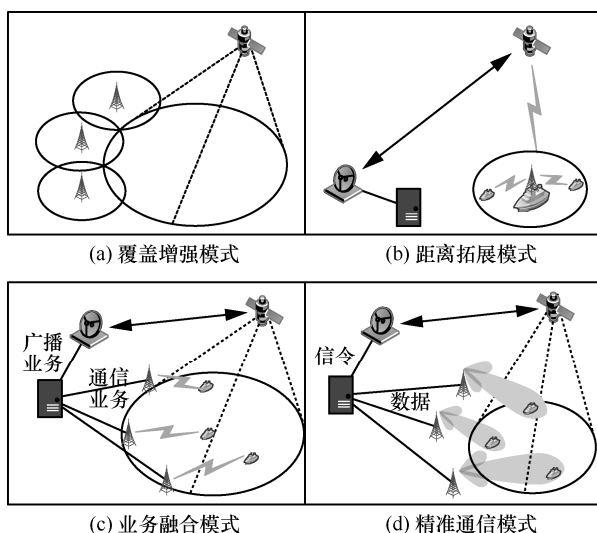


图 4 典型星地协同模式示意图

4.3 业务驱动智能资源分配

以一张海洋网络满足千差万别的海上业务需求,要求海洋通信网络具有极大的弹性。为此,需要引入软件定义网络等技术,结合上述星地协同动态组网方法,构建通信、计算、存储等资源均可灵活编排的新型网络架构。在此基础上,引入业务驱动新机制。不同用户会随时随地发起业务请求,请求的内容又千差万别。如果一有请求,网络就进行相应调整,重新编排资源,那么系统复杂度将呈指数增长,系统稳定性也会很差。业务驱动机制的难题在于如何“以慢变应万变”。为此,需要探索业务需求的大尺度模型,包括业务时空分布、业务关联性等,从中找到业务驱动网络的合适粒度,既能满足业务动态需求,又不

使网络疲于调整,这有赖于通信、计算、存储、控制等多学科交叉融合解决。

5 结束语

从海上环境复杂、传输效率低,海上设施受限、网络覆盖差,海上业务繁杂、服务质量保证难 3 个方面分析海洋通信面临的特殊难题,梳理海洋通信网络发展现状并总结其关键技术。在此基础上,结合空天地一体化、智能化发展新趋势,展望未来 6G 星地协同智能海洋通信网络发展途径。从环境感知智能传输、星地协同动态组网和业务驱动资源分配 3 方面提出初步构想。

参考文献:

- [1] WEI T, FENG W, CHEN Y, et al. Hybrid satellite-terrestrial communication networks for the maritime internet of things: key technologies, opportunities, and challenges [EB]. (2019-05-28) [2020-09-12].
- [2] SAARNISAARI H, DIXIT S, ALOUINI M, et al. A 6G white paper on connectivity for remote areas [EB]. (2020-04-30)[2020-09-12].
- [3] LI X, FENG W, WANG J, et al. Enabling 5G on the ocean: a hybrid satellite-UAV-terrestrial network solution[J]. IEEE Wireless Communications, 2020(99): 2-7.
- [4] 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.
- [5] BEKKADAL F, YANG K. Novel maritime communications technologies[C]//Proceedings of Mediterranean Microwave Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2010: 338-341.
- [6] ALLAL A, MANSOURI K, YOUSSEFI M, et al. Toward a new maritime communication system in Detroit of Gibraltar where conventional and autonomous ships will co-exist[C]//Proceedings of International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM). Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-8.
- [7] WOZNIAK J, GIERLOWKI K, HOEFT M. Broadband communication solutions for maritime ITSs: Wider and faster deployment of new e-navigation services[C]//Proceedings of 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-11.
- [8] Inmarsat. Mobile broadband for a data-hungry world [EB]. (2019-11-26)[2020-09-12].
- [9] CAMPOS R, OLIVEIRA T, CRUZ N, et al. BLUECOM+: cost-effective broadband communications at remote ocean areas[C]//Proceedings of Oceans. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [10] LI X, FENG W, CHEN Y, et al. Maritime coverage enhancement using UAVs coordinated with hybrid satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(4): 2355-2369.
- [11] 华为. 挪威: 全球首个 LTE 离岸通信服务[EB]. (2014-02-21) [2020-09-12].
Huawei. Norway: the world's first LTE offshore communication service[EB]. (2014-02-21)[2020-09-12].
- [12] 爱立信. 爱立信和中国联通宣布在青岛港打造 5G 智慧码头[EB]. (2019-02-27)[2020-09-12].
Ericsson. Ericsson and China Unicom announce to build 5G smart terminal in Qingdao Port[EB]. (2019-02-27)[2020-09-12].
- [13] JO S, SHIM W. LTE-maritime: high-speed maritime wireless communication based on LTE technology[J]. IEEE Access, 2019(7): 53172-53181.
- [14] Verizon. Verizon wireless announces 4G LTE coverage enhancements in rhode island [EB]. (2015-04-02)[2020-09-12].
- [15] China daily. Telecoms extend 4G service to Nansha islands[EB]. (2016-07-20)[2020-09-12].
- [16] ZHOU M T, HOANG V D, HARADA H, et al. TRITON: high-speed maritime wireless mesh network[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(5): 134-142.
- [17] HOANG V D, MA M, MIURA R, et al. A novel way for handover in maritime WiMAX mesh network[C]//Proceedings of 7th International Conference on ITS Telecommunications. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-4.
- [18] KIM H J, CHOI J K, YOO D S, et al. Implementation of Mari-Comm bridge for LTE-WLAN maritime heterogeneous relay network[C]//Proceedings of 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Piscataway: IEEE Press, 2015: 230-234.
- [19] RAO S N, RAI D, PARTHASARATHY V, et al. A novel solution for high speed internet over the oceans[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 906-912.
- [20] BAI Y, DU W, SHEN C. Over-the-sea radio propagation and integrated wireless networking for ocean fishery vessels[C]// Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Applications. Berlin: Springer Press, 2011: 180-190.
- [21] YANG K, ROSTE T, BEKKADAL F, et al. Long-distance propagation measurements of mobile radio channel over sea at 2 GHz[C]// Proceedings of the 74th IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [22] REYES-GUERRERO J C, BRUNO M, MARISCAL L A, et al. Buoy-to-ship experimental measurements over sea at 5.8 GHz near urban environments[C]//Proceedings of Mediterranean Microwave Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2011: 320-324.
- [23] MEHRNIA N, OZDEMIR M K. Novel maritime channel models for millimeter radiowaves[C]//Proceedings of International Conference



- on Software. Piscataway: IEEE Press, 2016: 405-410.
- [24] LEE J H, CHOI J, LEE W H, et al. Measurement and analysis on land-to-ship offshore wireless channel in 2.4 GHz[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2017, 6(2): 222-225.
- [25] LEE Y H, DONG F, MENG Y S. Near sea-surface mobile radiowave propagation at 5 GHz: measurements and modeling[J]. Radio engineering, 2014, 23(3): 824-830.
- [26] YANG K, ROSTE T, BEKKADAL F, et al. Channel characterization including path loss and Doppler effects with sea reflections for mobile radio propagation over sea at 2 GHz[C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [27] WANG W, HOERAC G, JOST T, et al. Propagation channel at 5.2 GHz in baltic sea with focus on scattering phenomena[C]//Proceedings of 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [28] DAHMAN G, COUILLARD D, GRANDMAISON M E, et al. Improved 2-ray model for overwater propagation channels: modeling the instantaneous variations in the received signal strength[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 865-868.
- [29] SIM C. The propagation of vhf and uhf radio waves over sea paths[D]. Leicester: University of Leicester, 2002.
- [30] LEI Q, RICE M. Multipath channel model for over-water aeronautical telemetry[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 735-742.
- [31] MENG S, LEE Y H. Measurements and characterizations of air-to-ground channel over sea surface at C-band with low airborne altitudes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1943-1948.
- [32] ZHAO Y, REN J, CHI X. Maritime mobile channel transmission model based on ITM[C]//Proceedings of 2nd International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation. Paris: Atlantis Press, 2013: 378-383.
- [33] LEE Y H, DONG F, MENG S. Near sea-surface mobile radiowave propagation at 5 GHz: measurements and modeling[J]. Radio engineering, 2014, 23(3): 824-830.
- [34] WOODS S, RUXTON A, HOLMES C, et al. High-capacity, long-range, over ocean microwave link using the evaporation duct[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(3): 323-330.
- [35] IQBAL A, JEOTI V. Feasibility study of radio links using evaporation duct over sea off Malaysian shores[C]//Proceedings of International Conference on Intelligent and Advanced Systems. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [36] PAULUS A. Practical application of an evaporation duct model[J]. Radio Science, 1985, 20(4): 887-896.
- [37] ZHAO X, HUANG S, FAN H. Influence of sea surface roughness on the electromagnetic wave propagation in the duct environment[C]//Proceedings of Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing. Piscataway: IEEE Press, 2010: 467-470.
- [38] RAULEFS R, WIRSING M, WANG W. Increasing long range coverage by multiple antennas for maritime broadband communications[C]//Proceedings of OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [39] CRUZ G, GUZMAN M, DE GUZMAN F, et al. Compensation of antenna misalignment using selection diversity for maritime communications[C]//Proceedings of TENCON 2018 IEEE Region 10 Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 350-355.
- [40] CHAN S. Some research directions for future integrated satellite and terrestrial networks[C]//MILCOM 2007-IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-7.
- [41] NIEPHAUS C, KRETSCHMER M, GHINEA G. QoS provisioning in converged satellite and terrestrial networks: A survey of the state-of-the-art[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2415-2441.
- [42] KARALIOPOULOS M, NARENTHIRAN K, EVANS B, et al. Satellite radio interface and radio resource management strategy for the delivery of multicast/broadcast services via an integrated satellite-terrestrial system[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(9): 108-117.
- [43] KANDEEPAN S, DE NARDIS L, DI BENEDETTO M G, et al. Cognitive satellite terrestrial radios[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [44] KOLAWOLE O Y, VUPPALA S, SELLATHURAI M, et al. On the performance of cognitive satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2017, 3(4): 668-683.
- [45] LI Z, XIAO F, WANG S, et al. Achievable rate maximization for cognitive hybrid satellite-terrestrial networks with AF-relays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 304-313.
- [46] CHEN Y, FENG W, ZHENG G. Optimum placement of UAV as relays[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 22(2): 248-251.
- [47] FENG W, WANG J, CHEN Y, et al. UAV-aided MIMO communications for 5G internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(2): 1731-1740.
- [48] BRAGA J, ALESSANDRETTI A, AGUIAR A P, et al. A feedback motion strategy applied to a UAV to work as an autonomous relay node for maritime operations[C]//Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 625-632.
- [49] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [50] STOVE G, GASHINOVA S, HRISTOV S, et al. Passive maritime surveillance using satellite communication signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 2987-2997.
- [51] HOLSTEDN S. Global maritime surveillance with satellite-based AIS[C]//Proceedings of OCEANS 2009-EUROPE.

Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-4.

- [52] JAYASIMHA S, PALADUGULA J, GADIRAJU V, et al. Satellite-based AIS receiver for dense maritime zones[C]//Proceedings of 9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 15-22.

[作者简介]



冯伟（1982-），男，博士，清华大学电子工程系副研究员，主要研究方向为海域宽带通信网络，大规模、分布式多天线系统，空天地一体化协同通信网络等。



唐睿（1996-），女，清华大学电子工程系硕士生，主要研究方向为海域宽带通信网络等。



葛宁（1971-），男，博士，清华大学电子工程系研究员，主要研究方向为面向通信系统高速信号处理的芯片设计、超宽带传输与组网技术、智能无线通信网络等。