



综述

海上通信技术的发展与研究综述

董浩¹, 宋亮², 化存卿¹, 刘玲亚³, 唐俊华¹

(1. 上海交通大学网络空间安全学院, 上海 200240;

2. 中交航信(上海)科技有限公司, 上海 200086;

3. 华东师范大学通信与电子工程学院, 上海 200241)

摘要: 随着海上活动日益频繁, 海上通信技术的发展有着重要的战略地位。但海上环境复杂多变、通信系统标准不统一等因素导致海上通信发展明显滞后。首先, 根据通信方式的不同, 将海上通信分为基于空域、陆地、海域和跨域协同 4 个主要组成部分, 从工业界和学术界两个方向概述了全球范围内海上通信的发展进程和研究现状; 然后, 针对不同系统之间的联系和区别, 分析了目前海上通信存在的主要问题; 最后, 具体阐述了新一代海上通信系统发展所面临的技术挑战, 包括海浪运动模型学习、海上信道建模、大气波导效应和微波散射效应。

关键词: 海上通信; 发展滞后; 空域; 陆地; 海域; 跨越协同

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022087

Survey of the research and development on the maritime communication technology

DONG Hao¹, SONG Liang², HUA Cunqing¹, LIU Lingya³, TANG Junhua¹

1. School of Cyber Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Zhongjiao Hangxin (Shanghai) Technology Co., Ltd., Shanghai 200086, China

3. School of Communication and Electronic Engineering, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: With the increasing frequency of maritime activities, the development of the maritime communication technology plays an important role. However, due to the complex and changeable maritime environment and the inconsistent communication system standards, the development of maritime communications has significantly lagged. Firstly, maritime communications were divided into four main components, including airspace, land, sea, and cross-domain coordination, according to the difference in communication methods. Then, the development process and research status on a global scale were summarized from the industrial and academic perspectives. Moreover, the main

收稿日期: 2021-12-09; 修回日期: 2022-05-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2018YFB1700203, No.2018YFC0309604); 国家自然科学基金资助项目 (No.61831007, No.61801295); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2019M661507); 上海自然科学基金资助项目 (No.19ZR1426400)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1700203, No.2018YFC0309604), The National Natural Science Foundation of China (No.61831007, No.61801295), The China Postdoctoral Science Foundation (No.2019M661507), The Natural Science Foundation of Shanghai (No. 19ZR1426400)



problems existing in the maritime communication were analyzed based on the connections and differences between the different systems. Finally, the technical challenges in the new generation of maritime communication systems were specifically elaborated, including the study of wave motion models learning, maritime channel modeling, atmospheric duct effects, and microwave scattering effects.

Key words: maritime communication, lagging development, airspace, land, sea, cross-domain coordination

0 引言

海洋覆盖了地球表面超过 70% 的面积, 与气候变化、经济发展、国防建设等紧密相关。近年来, 人类的海上活动日益频繁, 规模逐渐扩大, 对海上通信的要求不断提高。海上旅游业务、近海水产养殖和海上矿物勘探等经济活动迅速发展, 对多样化海上通信业务提出了新的需求^[1]; 日常的水质检测和气象传感器及钻井平台、勘测平台等海上作业所需要的数据交换, 需要可靠和稳定的海上通信技术^[2]; 海上环境复杂多变, 自然灾害和意外突发事件频繁, 需要高速、实时的通信技术应对抢险救援^[3]。因此, 建立满足需求的海上通信网络对海上经济发展、海上作业、海上安全和紧急救援等^[4]具有重要意义。

我国海洋面积约为 300 万平方千米, 大陆海岸线长 18 000 余千米, 岛屿数量达 6 000 多个, 发展海上通信能够很好地连接海域内的船只、军舰用于国防和军用场景^[5]。海上通信是海上经济必不可少的一部分。“智慧海洋”工程落实国家海上战略, 是建设海上强国的重要工程, 同时, “21 世纪海上丝绸之路”等发展战略也得到了沿线国家的积极响应, 这些都需要稳定、高效和可靠的海上通信覆盖提供强有力的技术支撑^[6]。

海上环境复杂多变、基站部署困难、通信条件恶劣等原因导致海上通信的发展明显滞后于陆地通信, 难以应对海上抢险等应用场景, 更难满足不同的业务需求^[7]。另外需要注意的是, 海上通信发展至今, 不同时期的通信标准针对的应用场景不同, 且使用的通信技术也存在很大的区别, 这导致海上通信系统存在一定程度的割裂, 互不兼

容。目前, 海上通信网络主要包括基于卫星的海上通信系统^[8]、基于海岸的海上通信系统^[9]、基于岛屿的海上通信系统^[10]等应对不同服务需求的系统, 但因为各系统较为独立, 缺乏统一的资源管理和操作协调, 整体的利用效率很低, 制约了海上通信的发展。

综上所述, 要实现海上网络系统高效运行, 对网络覆盖的范围、信息传输的实时性和可靠性提供有效的保障, 需要考虑对已有的海上通信系统进行有效的系统融合, 实现空海跨域协同传输; 同时还需要结合 5G 网络、超 5G 网络以及未来 6G 网络的研究技术, 针对目前海上通信系统存在的问题和技术瓶颈, 新一代海上通信系统需要打破目前通信系统的限制, 实现多网络协同通信、多系统的灵活有效融合, 提供全方位的通信覆盖和更高的通信速率与资源配置效率。

1 海上通信研究现状

海上通信区别于陆地通信的主要特点是覆盖范围广阔, 集合了多种通信技术为各种终端用户提供服务。在海上通信的发展过程中, 世界各国纷纷部署海岸基站和舰载无线终端, 其中包括小型浮塔和配备大功率发射机和高灵敏度接收机的大型船只, 通过窄带通信进行电报、电话和数据传输^[11]。近些年来, 各国对宽带在海上通信中的应用进行了广泛的项目研究, 包括通用分组无线业务 (general packet radio service, GPRS) 和长期演进 (long term evolution, LTE) 技术等^[12]。此外, 蜂窝网络、卫星网络和其他类型无线网络也被广泛研究用于促进海上通信的发展^[1]。根据通信方

式的不同, 本文将目前的海上通信系统分为 4 个主要组成部分: 基于空域的海上通信, 以海上卫星通信为主; 基于陆地的海上通信, 作为地面蜂窝通信的扩展, 由基于岸基的海上通信构成; 基于海域的海上通信, 包括基于岛屿、船舶、海上航空器和无人机在内的无线网络基于跨域协同的海上通信, 通过协调不同海上通信系统形成优势互补, 提高资源利用效率。海上通信系统模型如图 1 所示。基于海上通信系统的主要组成部分, 本文从工业发展现状和学术研究现状两个方面同时综述概括 4 个组成部分的研究现状, 其中, 工业发展现状主要介绍多个国家和企业目前推行和计划实施项目的情况, 而学术研究现状主要概述了目前国内外学者对海上通信新技术的研究和新方向的探索, 海上通信工业发展现状总结和海上通信学术研究现状总结分别见表 1 和表 2。

1.1 基于空域的海上通信

卫星通信的优势在于能凭借高度提供广域连接, 结合卫星间的组网实现全球覆盖。近年来低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星的快速发

展, 如 SpaceX Starlink^[13]、CloudSat^[14]、SPECISI^[15]等, 在复杂的海上通信环境中不可替代的作用。

海事卫星通信在过去 30 多年不断发展和引进新技术。海事卫星通信系统 (Inmarsat)^[16]部署在对地地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 上, 旨在为各种应用提供全球性的语音和数据通信服务, 如海上运输、紧急救援等。第一代系统 (Inmarsat-1) 主要提供模拟语音、传真和低速数据服务^[17]; 第二代系统 (Inmarsat-2) 于 1990 年投入使用, 可提供数字语音、传真和中低速数据传输服务^[18]; 第三代系统 (Inmarsat-3)^[19]于 1996 年投入使用, 可支持移动分组数据服务, 其容量是 Inmarsat-2 的 8 倍; 第四代系统 (Inmarsat-4) 由 4 颗卫星组成 (其中包括一颗备份卫星), 每颗卫星都有 1 个全局波束、19 个区域波束和大约 200 个窄点波束, 可实现 492 kbit/s 的峰值速率^[20], 能够满足卫星地面终端数量急剧增加的通信需求, 在抢险救灾中得到了广泛应用; 未来的第五代系统 (Global Xpress)^[21], 能够为全球用户提供 50 Mbit/s 的下行链路服务和 5 Mbit/s 的上行链路服务, 以

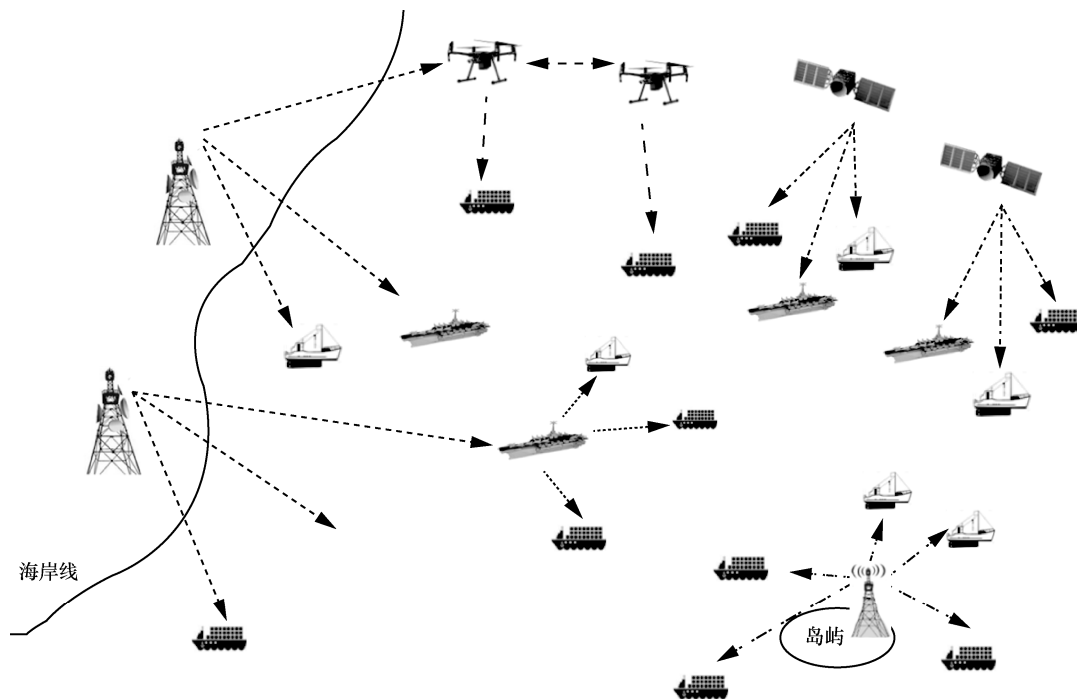


图 1 海上通信系统模型



表 1 海上通信工业发展现状总结

海上通信类型	系统	主要业务	速率	通信距离
基于空域的海上通信	Inmarsat-1	模拟语音, 传真	低速率	远距离
	Inmarsat-2	数字语音, 传真	中低速率	远距离
	Inmarsat-3	支持移动分组数据服务	中速率	远距离
	Inmarsat-4	支持突发剧增通信需求	492 kbit/s	远距离
	Iridium NEXT	为移动终端提供更多带宽和更高速率	128 kbit/s	远距离
	Global Xpress	支持全球用户高速率服务	上行 5 Mbit/s 下行 50 Mbit/s	远距离
	EchoStar-19	应急救援服务	200 Gbit/s	远距离
	天通一号	支持亚太地区互联网服务	9.6 kbit/s	远距离
	北斗卫星导航系统	定位、导航、遇险求救和通告	中速率	远距离
	实践十三号卫星	满足中国近海海域通信需求	高速率	远距离
基于陆地的海上通信	NAVTEX	提供海事安全信息直接打印服务	300 bit/s	离岸 200 n mile 以内
	PACTOR	提供纯文本电子邮件服务	10.5 kbit/s	-----
	AIS	提供船舶避碰和安全航行等服务	9.6 kbit/s	视距范围
	离岸 LTE 网络	提供海上生产通信服务	上行 1 Mbit/s 下行 2 Mbit/s	离岸 20~50 km
	TD-LTE 试用网络	提供海上应用宽带服务	7 Mbit/s	离岸 30 km
基于海域的海上通信	永暑礁—中国移动	提供附近船只通信服务	15 Mbit/s	-----
	南沙群岛—中国电信	提供附近船只通信覆盖和服务	高速率	-----
	海上移动自组织网络 (日本)	扩大海上通信覆盖范围	1.2 kbit/s	离岸 70 km
	TRITON (新加坡)	扩大海上通信覆盖范围	6 Mbit/s	离岸 27 km
	Internet.org (Facebook)	提供海上用户免费网络访问服务	低速率	视距范围
	Loon (Google)	提供紧急通信服务	10 Mbit/s	视距范围
	BLUECOM +	扩展陆基通信覆盖范围	3 Mbit/s	视距范围

支持更多样的网络通信服务。同时, 高通量卫星也正在被广泛研究, 如 EchoStar-19 的容量超过了 200 Gbit/s, 并配备了 138 个客户通信波束和 22 个网关波束, 该卫星将为北美用户提供高速互联网服务和应急救援服务。

近年来, 我国卫星系统在海上通信领域也不断取得进展。天通一号^[22]于 2016 年发射并成功进入轨道, 2018 年投入商业使用, 被称为中国版

的海事卫星。天通一号卫星移动通信系统是中国第一个移动卫星通信系统, 该系统主要覆盖亚太地区, 包括大部分太平洋和印度洋, 峰值速率为 9.6 kbit/s, 可以提供语音、短消息和低速数据服务。北斗卫星导航系统^[23]可在全球范围内提供定位、导航服务, 还具有短报文通信能力, 可以提供遇险求救和航海通告服务等。实践十三号卫星是中国首颗高轨道高通量通信卫星, 应用了 Ka

表 2 海上通信学术研究现状总结

海上通信类型	参考文献	主要内容
基于空域的海上通信	文献[25]	结合 SDN 和网络虚拟化技术, 提高卫星网络的适应能力和资源利用率
	文献[26]	使用点波束技术提高频率效率, 以及允许海上终端小型化
	文献[27]	基于时变建模提高适应动态环境能力
	文献[28]	解决了卫星网络中的用户规划和调度问题
	文献[29]	基于资源分配策略, 协调卫星和地面网络, 提高系统整理性能
	文献[30]	研究了海上目标定位问题, 提出一种新的定位算法和航线轨迹记录
基于陆地的海上通信	文献[36-37]	扩展地面蜂窝网络, 提高海上通信性能
	文献[38]	提出了海上信道估计的两径模型
	文献[39]	提出了三射线路径损耗模型
	文献[40]	以虚拟云服务, 考虑岸基通信中用户的天线选择方案
	文献[41]	提出了一种基于 LTE 技术的沿海网络架构
	文献[42]	基于大规模 MIMO, 结合预编码技术降低系统复杂度和开销
基于海域的海上通信	文献[45]	利用空间数据流, 提供智能船舶交通服务
	文献[46-49]	经典通信技术在海上通信中应用提出使用多向天线来提高船对船的通信效率
	文献[50-52]	自组织海上通信来扩大海上通信网络覆盖范围
	文献[53]	设计了一个无线多跳回程网络来提高船舶间自组织网络性能
	文献[54]	提出了导频域非正交多路访问技术, 解决导频功率污染问题
	文献[55-56]	针对海上信道探测估计问题, 根据海上特性提出了新的算法
基于跨域协同的海上通信	文献[61-68]	新型技术在海上通信的应用研究
	文献[69]	提出依靠现有的卫星和地面系统、无人机回传, 扩大海洋通信的覆盖范围
	文献[70]	针对快速宽带海事覆盖场景, 提出一种混合多层通信框架
	文献[71]	使用缓存无人机辅助的解码转发中继策略, 优化无人机部署位置
	文献[72-73]	提出融合空域和海域的海上上传方案, 优化覆盖范围
	文献[74-78]	基于混合卫星—无人机—地面网络的框架

频段多波束宽带通信系统, 其通信总容量可达 20 GB 以上, 超过了之前所有研制通信卫星容量总和, 而配有的 26 个用户点波束能够覆盖中国近 200 km 的近海海域。

随着低成本火箭技术及其他航天技术的发展, 商业卫星通信也得到了快速发展。铱星系统 (Iridium) 是 LEO 卫星通信系统, 可为使用卫星电话的用户提供语音和低速数据服务。第二代铱

星星座 Iridium NEXT 也于 2017 年开始部署, 由 66 颗活动卫星、9 颗在轨备用卫星和 6 颗地面备用卫星组成。目前, Iridium NEXT 向移动终端提供高达 128 kbit/s 的数据服务, 并且将来能够支持更大的带宽和更高的速率服务, 使移动终端的传输速率达到 1.4 Mbit/s, 大型用户终端的高速数据服务达到 30 Mbit/s^[24]。此外, O3b 卫星能够提供中轨道小卫星的通信系统已开通运行;



SpaceX、维珍银河等也正在规划由 600~700 颗低轨微小卫星组成的通信网络,为全球提供互联网接入服务。

针对空域的海上通信网络,学术界也开展了广泛的研究。文献[25]将控制、转发分离的概念和网络虚拟化的思想引入卫星通信网络,提出一种聚合软件定义网络(software defined network, SDN)控制系统的新一代网络,该网络能快速适应不同的场景,布网灵活,易于扩展,资源利用率高。为了提高卫星海上通信的传输速率、提高宽带覆盖范围,文献[26]研究使用点波束技术以提高频谱效率。面向任务需求,文献[27]提出使用时变图对空间信息网络进行建模以处理其动态性。基于数学语言描述,文献[28]将规划与调度问题描述成多约束的优化问题进行最优问题的分析。文献[29]研究了一种协调合作的卫星和地面架构,以提供实时的宽带传输网络服务,同时提出了一种基于资源的分配策略,以提高对移动性的支持并降低系统功耗与干扰。为了应对海洋面积辽阔、终端分布稀疏不均匀的海洋通信典型特征,文献[30]研究了海上目标定位问题,基于空域通信的无源雷达双基地测距,利用通信卫星以及全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)(包括 GPS、GLONAS 和 Galileo)提出一种新的定位算法,通过来自目标的反射信号与来自卫星的直接信号提取一组双基地距离测量值。

基于空域的通信系统具有覆盖范围广的特点,可以提供不同类型的数据服务。但是,目前主要的卫星系统仅支持中低速通信服务,且卫星通信的费用以及船载卫星终端的通信成本高昂,需要降低通信成本,以充分发挥卫星通信的优势,提高卫星通信的资源利用效率。

1.2 基于陆地的海上通信

作为陆地通信的延伸段,可以结合利用地面蜂窝网络、无线城域网、无线局域网等成熟的陆

地通信技术,为近海海上通信提供高容量、低成本、安全可靠的通信服务。

奈伏泰斯系统(NAVTEX)是一种在中频工作的窄带系统,数据速率为 300 bit/s,可为离岸 200 n mile 以内的船舶提供海事安全信息直接打印服务。NAVTEX 系统提供导航消息、气象警告和预报以及紧急信息,以增强海上安全,但是该系统无法提供宽带通信服务和从用户处获取实时信息。PACTOR 系统^[31]采用窄带高频通信系统,可以提供数据速率为 10.5 kbit/s 的纯文本电子邮件服务。第一代 PACTOR 系统(PACTOR-I)可提供直接打印和分组无线电服务,在后续系统中,运用了自适应调制方法和正交频分复用技术以提高频谱效率。但是该系统由于传输时延较大,仍然不能提供实时通信服务^[32]。另一个被广泛应用的海上通信系统是船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)^[33],该系统由美国主导并得到国际海事组织的推荐,系统采用自组织时分多址接入并能够传输船舶航迹信息,实现船舶避碰和安全航行。AIS 转发设备能够工作在甚高频上,实现 9.6 kbit/s 的实时数据传输速率。目前, AIS 被广泛应用于船舶监控、海上搜救、船舶避障、航海导航等实时工作场景。

随着无线通信技术的发展,宽带无线通信也被更多地运用于海上通信。全球首个离岸 LTE 网络由挪威 Tampnet 公司和华为公司联合开发^[34],该系统涵盖了离岸 20~50 km 的钻井平台、油轮以及浮动生产存储卸载设备,能提供 1 Mbit/s 上行链路和 2 Mbit/s 下行链路的语音和数据服务。同时,该系统还支持视频监控数据上传和无线中继通信服务。在国内,爱立信和中国移动合作在青岛建设了 TD-LTE 试用网络进行海事覆盖,该网络工作在 2.6 GHz 频段,覆盖离岸长达 30 km 的区域,峰值速率可达 7 Mbit/s,为海上运输和海上渔业等海上应用提供宽带服务。在海上无线传感网络应用中,电气电子工程师学会(Institute of

Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 于 2003 年制定的 IEEE 802.15.4 通信协议也能够为海岸范围内提供高速的传输服务。文献[35]针对电子导航服务的非卫星宽带海事通信技术, 对比了甚高频数据交换系统和一些无线电通信的经典扩展解决方案提供的基本服务集, 得出了现代海上通信的完全异构的 netBaltic 系统用途最广的结论, 凭借同时具有使用不同通信技术和时延容忍网络组件所提供的功能, netBaltic 系统能够访问国际海事组织定义的所有服务。

作为地面蜂窝网络扩展, 大量的学术研究工作也取得了很好的进展。文献[36]为了降低中断概率等网络性能指标, 提出了一种面向海洋通信的具有非正交多址接入的部分解码转发协作中继网络, 运用于沿海基站通信, 与传统的 CRN-NOMA (cognitive radio network-non-orthogonal multiple access) 方案相比, 该方案显著提高了海上通信的稳定性和可靠性。文献[37]研究了陆地和海上两种场景下不可靠链路分布特征, 分析了 LoRa 物理层参数配置对通信性能的影响, 通过优化扩频因子和带宽的配置改善不可靠链路性能。

对于岸基海上通信的信道研究, 文献[38]在非视距场景下对海上通信进行测量提出了两径模型, 并引入了校正系数, 在 5 GHz 频段下获得了更好的信道预测结果。此外, 考虑海上大气特殊的折射率结构, 文献[39]在视距场景下测量了近岸航道的通信情况, 提出了三射线路径损耗模型。在不同岸基通信技术的研究中, 文献[40]提出一种在沿海网络中应用蜂窝技术的框架, 深入研究了天线选择方案, 为目标用户形成虚拟服务云。文献[41]的工作提出了一种基于 LTE 技术的沿海网络架构, 支持多种海上无线服务方案, 同时采用设备到设备 (device to device, D2D) 的传输和多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 技术以支持更高效的数据传输。文献[42]研究的海事基站通信系统基于大规模多输入多输出

(massive MIMO) 技术, 通过数字与模拟预编码结合, 降低系统的实现复杂性和开销。

随着 4G、5G 及未来无线网络的发展, 基于陆地的海上通信可以为离岸用户提供宽带通信服务, 如文件下载、实时通信和视频监控数据上传。但是, 与卫星网络相比, 基于陆地的海上通信覆盖范围有限, 而覆盖范围的性能很大程度上取决于海岸基站的部署。因此扩大通信覆盖范围将是陆地通信网络拓展到深海海上通信的关键难点。

1.3 基于海域的海上通信

基于海域的海上通信主要包括基于岛屿、大型船舶、无人机和海上航空器在内的通信网络, 基于定位和承担角色的不同, 可以应用于不同场景以尽量满足复杂多变且超范围的海上通信需求。

基于岛屿部署的基站能提供高质量的通信服务, 为深海岛屿附近的海上终端提供有力的通信支持。2016 年, 中国移动在距离陆地 1 400 多千米的永暑礁上建立了 4G 基站, 其通过在岛上建立卫星地面站将信号传输到中继卫星, 通过卫星组网再传输到陆地上的地面站, 附近的船载通信设备的传输速率可达到 15 Mbit/s, 支持多样化的深海通信服务需求。2017 年, 中国电信在南沙群岛建立了 4 个 4G 基站, 通过水下电缆连接到陆地, 进一步提升了岛屿海上通信能力。作为类似陆地蜂窝网络的迁移, 基于岛屿基站的建设进一步扩大了沿海移动信号的覆盖范围, 可以支持周围的船只和渔民日益增长的业务需求, 提供高质量的通信服务。但是, 基于岛屿的海上通信更容易遭受台风等恶劣气候条件的影响; 同时, 部署成本昂贵, 需要综合考虑岛屿的位置和航线的路线; 并且由于远离陆地, 回传阶段的通信链路也必须有效优化。

基于船舶的海上通信具有灵活性高、易自组网的特点, 通常以大型船只作为中继节点, 用于扩大基于海岸以及岛屿的海上通信覆盖范围, 为更多的海上终端提供连接和通信服务。日本开发的海上移动自组织网络^[43], 通过船对船通信扩大海上通信覆



盖范围,该网络使用 27 MHz 和 40 MHz 频段,覆盖离海岸长达 70 km 的海上区域,但是,传输速率仅为 1.2 kbit/s,且只支持窄带通信服务,如短消息服务等。新加坡也已经启动了 TRITON 项目^[44],旨在开发无线网状网络来扩大海上通信的覆盖范围,在该网络中,所有船只、海上信标或浮标等终端都能充当网状节点,为附近的其他节点路由转发流量,系统的工作频道为 5.8 GHz,提供 6 Mbit/s 的宽带通信服务,可实现距离海岸线最多可到 27 km 区域的有效覆盖。陆地通信技术的进步同样也促进了海洋工业物联网的快速发展,文献[45]提出通过收集和分析来自 AIS 的大量空间数据流,采用数据驱动提高 AIS 网络中船只轨迹记录的质量,以保证智能船舶交通服务。

为了进一步提高海上通信船对船的通信效率,国内外专家学者也进行了不同的方案研究。文献[46]提出使用多向天线,文献[47]引入虚拟 MIMO 技术,文献[48]提出一种分布式自适应时隙分配方案,以及文献[49]提出一种认知增强的网格介质访问控制(medium access control, MAC)协议等。一些应用于船舶间通信的多跳与中继方案也被广泛提出,如文献[50-52],应用于自组织海上通信网络中,扩大网络覆盖范围,更好地为船舶提供通信服务。文献[53]为异构海上通信系统设计了一种无线多跳回传网络,讨论了路径选择算法以提高吞吐量和覆盖性能,并且通过不同船舶间的自组织网络来改善连接性。同时,为提高通信效率,文献[54]针对大型 MIMO 海事通信系统中的上行链路大型终端设备无授权随机接入的场景,提出了一种导频域非正交多路访问技术,解决导频功率污染问题,提高频谱利用率和降低中断概率。

基于船舶的网状或自组织海上通信网络可以为远离海岸的深海船舶和作业平台提供更大范围的覆盖和宽带通信服务。但是,其链路稳定性受海上天气条件频繁变化的限制,往往需要预先进

行信道探测估计。文献[55]为提高信道估计性能,提出了一种基于奇异值分解优化观测矩阵的快速贝叶斯匹配追踪稀疏信道估计优化算法,该算法不仅能够充分考虑海上通信的信道稀疏性,同时也能够降低信道的不确定性带来的影响。文献[56]研究了海浪对无线电传播和通信链路质量的影响,首次使用沿海和深海水域的海浪模型检查视距通信条件,为海上通信信道模型开发和数值评估提供了有效的数据参数。

无人机、无人艇等海上航空器因为其灵活性,被积极部署在海上航线提供空对海上的通信连接和业务服务,基于航空器的海上通信比基于船只的海上通信的覆盖范围更大。Facebook 在 2013 年启动了 Internet.org 项目^[57],旨在为偏远地区的用户以及海上用户提供免费的网络访问。该项目利用 55~82 km 高度的无人机作为空中基站,通过激光通信形成网络进行数据传输。Google 也于 2013 年发起了 Loon 项目^[58],为偏远地区的用户提供网络访问和紧急通信服务(2.4 GHz/5.8 GHz 频段),该项目使用海拔 20 km 的超高压气球建立通信网络,可以提供 10 Mbit/s 的通信服务。“BLUECOM+”项目同样使用热气球作为路由节点,使用多跳中继技术来扩展覆盖范围,将陆基通信扩展到偏远海上区域,该系统可以覆盖距海岸长达 150 km 的海域,提供 3 Mbit/s 的宽带通信服务^[59]。对比高吞吐量的海洋卫星,无人机等航空器也可用于对陆地沿海基站的补充,减少海洋通信基础设施部署缺乏导致的覆盖盲区,增强海上通信的覆盖率^[60]。同时,因为其灵活性,在用户数较少时可进一步提供按需服务来提高通信效率。但是,无人机和无人艇等空中基站与节点更容易受到恶劣天气的损害,因而可靠性较低。

基于海域的海上通信中,一些新型技术也广泛运用。人工智能(artificial intelligence, AI)已在许多领域取得了很好的成果,文献[61]提出一种 AI 支持的海洋物联网自主网络,采用并行网络驱

动的方法来获取 AI 训练所需要真实的数据和环境。文献[62-63]提出了专用于海上物联网(Internet of things, IoT)的海上机器类型通信(machine type communication, MTC)概念,支持更多样的海上服务业务。文献[64]展示了一种基于 SDN 的联合睡眠调度和机会传输方案,以在海事无线通信网络中的能耗和时延之间找到更好的折中方案。文献[65]提出一种新颖的海上巨型蜂窝网络,利用海上浮动塔构建了连接到地面网络的多跳视距(line of sight, LoS)链路,为海上用户提供广域无缝覆盖。文献[66]从数据编码的角度,通过数据压缩可以实现简单且廉价的数据传输,并呼吁更多的船舶采用数据压缩等方法,实现远洋通信、远航监控等功能。文献[67]提出通过智能语音识别和无线电测向提高海上通信质量。文献[68]考虑海洋环境与陆地环境的不同,海洋无线电信号受到许多因素的影响,如天气条件、蒸发管道和波浪引起的船舶摇摆,为了确保数据传输的可靠性,研究采用了易于配置且性能可预测的马尔可夫块传输码(block Markov superposition transmission, BMST),同时,采用具有空间调制(spatial modulation, SM)的物理层网络编码(physical-layer network coding, PNC)方案来提高频谱利用率。

1.4 基于跨域协同的海上通信

海上卫星通信覆盖范围广,无人机部署灵活可以实现按需通信,基于岛屿的海上通信基站技术成熟,沿海基站通信稳定,基于船只和浮塔的海上通信可以提高通信效率。每种通信方式都有各自的优势,但劣势也很明显,融合基于空域、陆地和海域 3 种通信方式,即基于跨域协同的海上通信的方式也有大量的研究工作。

基于无人机可实现按需通信的能力,无人机与其他通信系统可以紧密融合。文献[69]提出依靠现有的卫星和地面系统,利用频谱共享技术实现无人机的有效回传通信,扩大海洋通信的覆盖范

围。文献[70]研究了无人机与现有海洋通信系统的融合,考虑海洋船只分布、轨迹等具有的独特特征,针对快速宽带海事覆盖场景,利用无人机的灵活性,提出一种卫星、无人机和地面网络的混合多层通信框架。但是无人机辅助的移动中继通信系统的性能受到基站与无人机之间无线回传链路容量的限制。文献[71]考虑在海洋下行通信场景中使用缓存无人机辅助的解码转发中继策略,并优化了无人机的最佳部署位置。

基于卫星广阔的覆盖能力,文献[72]提出了融合空域和海域的海上传输方案,其中,卫星多播和海上中继合作为深海提供了无处不在的网络覆盖,同时提出了协作分组接入和功率分配算法来解决同频干扰等问题。文献[73]通过感知海上环境的变化优化了空域和海域协同通信的覆盖范围。

基于跨域协同的海上通信系统设计中,研究最广泛的是基于混合“卫星—无人机—地面网络”的框架。文献[74]考虑了近海地区的混合“卫星—无人机—地面”网络,建立了按需覆盖优化框架,在满足卫星用户所受干扰的约束条件下最大限度地提高了地面基站和无人机服务的地面用户的最低速率。而这种混合网络中,针对海上 IoT 设备稀疏分布的特点,可以使用以用户为中心的方式形成虚拟集群,灵活运用 NOMA 技术以降低相互之间的干扰^[75]。文献[76]解决了此混合网络的联合链路调度和速率适配问题,在保证服务质量(quality of service, QoS)的情况下最小化网络的总能耗。进一步参考地面接入网络中的移动边缘计算(mobile edge computing, MEC),文献[77]提出卫星和无人机为用户提供边缘计算服务和网络访问的功能,设计了一种深度增强算法优化边缘资源动态管理。同时,文献[78]针对海洋通信环境复杂、业务量离散、用户密度分布不均、海上业务设备类型不同等诸多局限性,提出了一种基于移动边缘计算的空地融合辅助的海上通信网,提高海上通信的服务质量。



2 目前海上通信系统存在的问题

目前, 5G 网络的商业化、超 5G 网络的发展以及未来 6G 网络的研究, 使得海上通信系统能够打破目前通信系统的限制, 通过多种通信方式融合、路由策略优化、组网通信系统集成研发等方式, 实现多网络协同通信、提供大范围覆盖和高速率的海上通信^[79]。在未来网络框架下, 要实现海上通信网络系统的高效运行, 对网络的覆盖范围、信息传输的实时性和可靠性提供有效的保障, 是进一步发展海上网络通信系统所面临的关键技术挑战。针对用户需求的多样性、海上恶劣的环境与复杂的信道以及目前网络覆盖范围不足等问题进行研究, 从海上通信的 4 个主要通信方式出发总结了存在的问题, 海上通信系统存在问题见表 3。

表 3 海上通信系统存在问题

海上通信系统	网络拓扑动态变化	可靠性较低	不同系统的差异性
基于空域	✓	✓	—
基于陆地	✓	✓	—
基于海域	✓	✓	—
基于跨域协同	✓	✓	✓

2.1 网络拓扑动态变化及用户需求多样化导致通信效率较低

除了浮标、海上工作平台等固定位置的终端通信需求, 海上通信业务存在分布稀疏、移动性强的特点, 这导致网络拓扑不断变化。如基于海域的海上通信, 无人机、无人艇和热气球的位置部署要按需优化, 并且根据终端的移动方向和规律, 需要动态调整, 这对快速网络重组带来严峻的挑战。而基于陆地的海上通信, 终端会根据自身位置优化选择接入网络, 使得陆地网络不断优化路由选择来应对网络拓扑结构的变化; 相较于传统岸基通信较小的覆盖范围, 卫星较大的覆盖范围能够很好地支持离岸较远的船只单位进行通

信。但是卫星网络自身拓扑的动态变化以及信道的实时变化, 带来的卫星资源调度分配非常复杂, 这导致用户在与卫星通信的过程中出现链路不稳定的状态^[80]。此外, 由于海上不同的用户往往对数据有着不同层面的需求, 传统通信的单一化配置会导致通信带宽和资源在一定程度上的浪费。同时, 基于自组网等方式建立起来的海上、陆地和跨域协同通信, 因为海上环境的变化, 也会面临动态变化的问题。而用户需求的多样化不断提升, 在有可选择网络接入条件场景下, 使得海上通信更多变, 网络拓扑结构更为复杂。

在海上通信网络中, 可以考虑通过知识驱动网络提升通信效率和提高资源利用率, 有效减少终端动态变化所带来的通信问题。此外, 还可以考虑通过一系列智能化机制, 例如, 使用软件定义网络、网络功能虚拟化、网络切片等技术, 对不同的海上环境、不同的用户需求, 根据资源条件和服务要求提供灵活的服务, 适应海上用户位置和需求的动态变化。

2.2 海上通信受限于恶劣环境及复杂信道导致通信可靠性较低

与陆地环境相比, 大量的海水蒸发使海面大气压分布不均匀。岸对船和船对船通信更容易受到海面条件和大气条件的影响, 如温度、湿度和风速等; 此外, 船载天线的高度和角度会随海浪迅速变化; 同时, 海上通信信道的衰落对天线高度和角度等参数特别敏感, 这些参数可能导致频繁的链路中断。由于这些复杂的因素, 海上通信的可靠性通常较低。

卫星通信相较于岸基通信以及船联网对船只的通信受海上环境的影响较小, 可以提高海上通信接入端的可靠性和通信效率。但是, 由于目前卫星多为定制开发、独立使用, 标准化程度低, 彼此间相互独立, 多数已在轨的应用卫星不具备星间通信链路, 无法对未来快速发展的海上通信提供保障。需要针对通信过程中卫星的选择与协同、

波束干扰以及覆盖区域等问题进行进一步研究。

2.3 海上通信受限于不同系统的差异性导致通信成本高昂及覆盖范围有限

目前的海上通信系统,同时包括海上无线通信系统、卫星通信系统、岸基通信系统、船载基站通信系统、空中基站通信系统等不同方法组成的通信系统来满足不同的需求,如海上无线通信系统通信成本低廉、卫星通信系统具有广域的覆盖范围、岸基通信网络可以实现数据高速传输。但是,目前各系统均为独立系统,无法资源共享以及协同传输,且分别拥有不同的覆盖范围,海上通信的成本高昂。

针对未来海上通信的发展,通过综合利用各种通信系统,能够保障用户实现稳定、高效、可靠、价格低廉的海上通信服务。根据不同的服务需求,考虑跨域协同,融合各种海上通信系统,进行有效的通信资源分配与用户调度来适应不同的需求。在用户端可以根据实际需求选择接入不同网络,用户还可以选择多模终端同时接入多个网络,如岸基网络与卫星网络,通过协同通信实现高速的数据传输,实现更稳定的海上通信。此外,还可以进一步考虑同频多系统融合、协作通信来提高通信资源的利用率,降低海上通信成本。

3 新一代海上通信系统发展关键技术

现阶段各种海上通信系统较为封闭,基于跨域协同的海上通信系统发展明显滞后,可以借鉴陆地网络的成熟技术,如基于卫星超帧的通信技术、基站波束成形、上行预编码等技术实现不同系统之间的有效融合。但海上网络环境复杂多变,通信系统考虑的关键技术需要明显区别于陆地通信应用环境。

3.1 海浪运动模型学习

与陆地通信环境条件不同,海上无线通信中的接收信号强度会由于海面的波动而受到干扰。

海浪会导致天线高度和通信节点(如船舶和浮标)的方向发生变化,海浪运动对海上通信的影响如图2所示,从而影响接收信号的强度。具体来说,海浪导致船和浮标(即放置在它们上面的通信天线)会出现摆动,在左右、前后不同维度上倾斜,并在海浪中上升或下降。值得注意的是,因为船之间的距离相对于天线高度较长,所以由天线高度变化引起的天线增益变化较小,而天线倾斜变化会对接收信号强度产生更大的影响。同时,卫星通信也对方向性较为敏感,要求终端天线与卫星对准,而复杂海况下浮标横纵摇摆致使海上节点天线与卫星对准困难,通信链路极不稳定,容易中断。

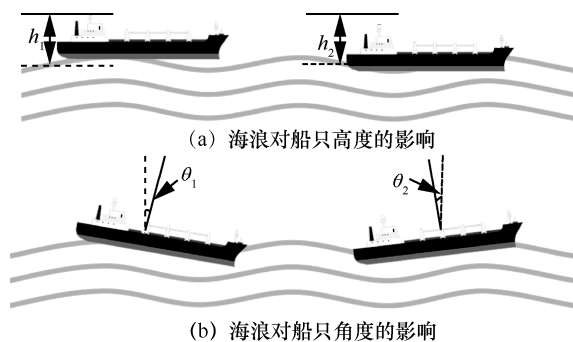


图2 海浪运动对海上通信的影响

为了最大限度地降低海浪导致海面不稳定带来的影响,需要对海浪与接收信号强度之间的关系进行详细研究,通过对海浪运动规律进行建模,研究由于天线杆倾斜造成的天线增益变化的影响。通过对海浪模型、节点运动特性、天线辐射特性等进行特征深度学习,考虑改变有效链路的持续时间、业务类型和容量的区别,以及卫星和节点的仰角等,改变通信策略,设计动态波束成形算法,优化折中浮标天线增益和波束宽度,适应海上环境,尤其是海浪运动时变的特性。

3.2 海上信道建模

在跨域协同的融合空海地通信网络中,研究的信道类型主要有两大类型:空海信道(如卫星到海面用户和海上基站的通信链路等)和海面信



道（如用于陆对船、船对船通信等）。由于海上传播环境的独特特征，如稀疏散射、海浪运动以及海面的管道效应，海上信道链路的建模在许多方面与常规地面无线信道有所不同，会对海上终端的收发器设计有重大影响，需要从建模的角度突出差异性，更切实地反映海上的通信环境^[81]。接收端和发送端距离远导致的反馈时延大，为了保证长距离通信，发射机必须适当地集中目标用户的信道状态信息（channel state information, CSI）；由于链路不匹配、高路径损耗导致信道条件较差，在海上通信中可能难以获得准确和及时的 CSI 捕获。可以利用历史统计的 CSI 来辅助优化传输方案^[82]；为了提高信道估计性能，可以利用信道的稀疏性功能将资源仅集中在信道的主要成分上，文献^[83]创造性地利用了基于位置的大规模 CSI 设计混合预编码，实现功率分配和用户调度策略。

在海上信道模型建模方面，可以进一步考虑其他因素，海上环境中用户分布稀疏，不同用户的信道条件差异很大，在这种情况下，如何保证用户调度中的公平性是一个关键挑战。而对于远程用户，除已经按照用户的方向设计波束，否则无法建立通信链接，这表明调度必须利用用户的有限信息设计，例如，从 AIS 等外部源获取的位置信息。同时，长距离传输引起的大时延表明传输协议中的反馈量应最小化，否则可能导致无法承受的传输和处理时延。鉴于此，无反馈高层技术（如网络编码）可能在海上通信中有很好的应用^[84]。而稀疏的用户分布和高度动态的拓扑对网络架构设计提出了更高的要求，如网状网络的终端可以在广泛分散的用户之间提供可靠和灵活的连接。受信道不稳定、不常规的位置出现和有限的 CSI 获取等不利因素的影响，海事网状网络中的路由设计也是重要的研究方向。

3.3 大气波导效应

大气波导效应是由空气的折射率变化引起的

一种异常传播现象。根据大气折射指数垂直梯度，大气折射可以分为多种类型，海上大气折射基本类型如图 3 所示，其中，逆温或水汽急剧减小会加大空气密度和折射率的垂直变化，造成无线电波射线的超折射传播，其电磁能量在该层大气的上下壁之间来回反射向前传播，形成好像在波导内进行传播的现象，即大气的波导效应。由于海水蒸发，与陆地环境相比，海面的大气分布不均匀，在海平面上方 0~20 m 的范围内可能会存在最常见、最容易被利用的一类大气波导，即蒸发波导。电磁传播环境易受海面条件（潮汐波等）和大气条件（温度、湿度、风速等）的影响，电磁波的异常传播会对海上环境中通信系统的性能产生重大影响^[85]，因此，准确地了解大气折射率分布，进行通信系统的性能评估和预测是新一代海上通信的重要方向。

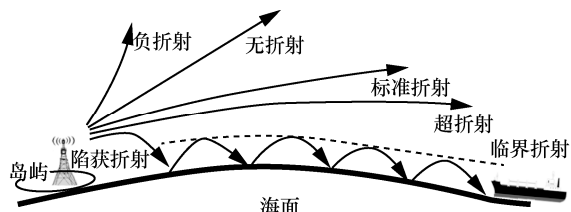


图3 海上大气折射基本类型

与信号在自由空间传播相比，大气波导层中的信号传输路径损耗更小、传输距离更远，是实现超视距（beyond-line-of-sight, b-LoS）传播的有效方法之一。目前为了更好地利用大气波导效应，提高传输效率，需要有效估计大气折射率分布。其中，杂波折射率（refractivity from clutter, RFC）^[86]技术通过使用雷达海杂波估计大气的折射率分布，该雷达杂波不需要任何其他设备，可以实现近实时检测。尽管 RFC 技术具有一定的优势，但也有一些局限性，其中最主要的是很难将海杂波和天气杂波分开，尤其在下雨天气环境中。另外，当前使用的海面归一化雷达截面模型的不确定性也会严重限制估计的精度。

3.4 微波散射效应

微波散射效应也可以实现岛屿和海上平台的超视距覆盖和通信。与大气波导效应不同的是,微波散射效应利用对流层中不均匀的大气成分,对微波信号产生前向散射而实现超视距传播。地球的大气层通常分为电离层、平流层和对流层,其中对流层是指从地表到平均海拔 10~12 km 的大气层,对流层中的湍流和非均匀介质可以使入射微波向前和向地面散射,从而实现超视距通信。微波散射通信具有通信距离长、容量大、安全性高、灵活性强的优点。因此,微波散射非常适合为环境恶劣地区(如高山、沙漠和海上)的用户提供通信服务^[87]。

由于更加频繁的大气流动,海上对流层中的散射体数量远大于地面对流层中的散射体数量。因此,海上通信中使用微波散射的传输距离被认为比地面通信中的传输距离更大。到目前为止,已经建立的使用微波频段(如 2.2 GHz 频段^[87]和 5.8 GHz 频段^[88])已经进行了海上通信的实验链接。但是,散射信道的衰落比 LoS 内的信道衰落更深,需要大功率微波天线或大型天线阵列补偿传输损耗。因此,微波散射通信仍不具有成本效益,主要用于覆盖岛屿、舰艇和钻井平台在内的数百千米的远距离海上通信。

4 结束语

近年来,随着海上业务数据量的急剧增加,人们对海上通信能力的要求日益提升。本文分析了海上通信的特点,在调研国内外海上通信研究现状的基础上,从空域、陆地、海域和跨域协同 4 个方面总结了不同海上系统之间的发展历程、服务业务和应用场景。讨论了目前海上通信存在的主要问题,即网络拓扑动态变化引起的通信效率较低、恶劣环境和信道复杂导致的通信可靠性不高,以及不同系统之间的兼容性问题。最后,针对复杂的海上通信环境,提出了 4 种新一

代海上通信系统需要解决的核心技术,希望对海上通信的发展、研究和应用有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] WEI T, FENG W, CHEN Y F, et al. Hybrid satellite-terrestrial communication networks for the maritime Internet of things: key technologies, opportunities, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 8910-8934.
- [2] WANG H, OSEN O L, LI G Y, et al. Big data and industrial Internet of things for the maritime industry in Northwestern Norway[C]//Proceedings of TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [3] YAU K L A, SYED A R, HASHIM W, et al. Maritime networking: bringing Internet to the sea[J]. IEEE Access, 2019 (7): 48236-48255.
- [4] JO S W, SHIM W S. LTE-maritime: high-speed maritime wireless communication based on LTE technology[J]. IEEE Access, 2019 (7): 53172-53181.
- [5] 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.
- [6] 夏明华, 朱又敏, 陈二虎, 等. 海洋通信的发展现状与时代挑战[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(6): 677-695.
XIA M H, ZHU Y M, CHEN E H, et al. The state of the art and challenges of marine communications[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2017, 47(6): 677-695.
- [7] BEKKADAL F, NIELSENS O. Innovative maritime communications technologies[J]. IEEE, 2010: 1-6.
- [8] AOYAGI T, SUZAKI K, SUZUKI Y, et al. Wave propagation simulations for considering the installation of the maritime mobile satellite communication antennas[C]//Proceedings of 2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2012: 346-348.
- [9] LEE S, LEE J W. An implementation of NAVTEX application on android mobile device[C]//Proceedings of 2013 International Conference on Information Science and Applications (ICISA). Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-3.
- [10] China Daily. Telecoms extend 4G service to Nansha Islands[R]. 2016.
- [11] FALCIASECCA G, VALOTTI B. Guglielmo Marconi: the pioneer of wireless communications[C]//Proceedings of 2009 European Microwave Conference (EuMC). Piscataway: IEEE Press, 2009: 544-546.
- [12] TEIXEIRA F B, OLIVEIRA T, LOPES M, et al. Tethered balloons and TV white spaces: a solution for real-time marine data



- transfer at remote ocean areas[C]//Proceedings of 2016 IEEE Third Underwater Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [13] MCDOWELL J C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX starlink constellation[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 892(2): L36.
- [14] ESA, Space Hellas (Prime Contractor). CloudSat (scenarios for integration of satellite components in future networks)[R]. 2017.
- [15] ESA, Avanti (Prime Contractor). SPECSI (Strategic Positioning of the European and Canadian Satcom Industry)[R]. 2017.
- [16] WANG J L, LIU C S. Development and application of INMARSAT satellite communication system[C]//Proceedings of 2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. Piscataway: IEEE Press, 2011: 619-621.
- [17] SPIRIDONOV V V. Inmarsat systems and services[C]//Proceedings of International Conference on Satellite Communications, ICSC'94. Piscataway: IEEE Press, 1994: 45-52.
- [18] BANKS D K, GAMBARUTO E, KRINSKY B. The inmarsat second generation communications payload[C]//Proceedings of 1989 19th European Microwave Conference. Piscataway: IEEE Press, 1989: 781-788.
- [19] KINAL G V, NAGLE J, LIPKE D W. INMARSAT integrity channels for global navigation satellite systems[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1992, 7(8): 22-25.
- [20] FRANCHI A, HOWELL A, SENGUPTA J. Broadband mobile via satellite: Inmarsat BGAN[C]//Proceedings of IEE Seminar on Broadband Satellite: The Critical Success Factors - Technology, Services and Markets (Ref. No. 2000/067). IET2000: 23/1-23/7.
- [21] HADINGER P. Inmarsat global Xpress the design, implementation, and activation of a global ka-band network[C]//Proceedings of 33rd AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibition. Reston, Virginia: AIAA, 2015: 1-8.
- [22] WEI F Y, CHEN B D, JIA R, et al. Research on maritime leapfrog emergency communication coverage technology based on satellite relay[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1087: 042064.
- [23] YE L, WANG Y F. Marine navigation services based on COMPASS(Beidou) and GPS[C]//Proceedings of 2012 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS). Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-7.
- [24] SEKIGUCHI K. Iridium contributes to "maritime safety"[C]//Proceedings of 2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean). Piscataway: IEEE Press, 2016: 90-92.
- [25] 陈晨, 谢珊珊, 张潇潇, 等. 聚合 SDN 控制的新一代空天地一体化网络架构[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(5): 450-454, 459.
- CHEN C, XIE S S, ZHANG X X, et al. A new space and terrestrial integrated network architecture aggregated SDN[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(5): 450-454, 459.
- [26] STASOLLA M, MALLORQUI J J, MARGARIT G, et al. A comparative study of operational vessel detectors for maritime surveillance using satellite-borne synthetic aperture radar[J]. Topics Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2016, 9(6): 2687-2701.
- [27] FLOCCHINI P, MANS B, SANTORO N. On the exploration of time-varying networks[J]. Theoretical Computer Science, 2013 (469): 53-68.
- [28] IACOPINO C, PALMER P, BREWER A, et al. EO constellation MPS based on ant colony optimization algorithms[C]//Proceedings of 2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Piscataway: IEEE Press, 2013: 159-164.
- [29] XIAO A L, GE N, YIN L G, et al. A voyage-based cooperative resource allocation scheme in maritime broadband access network[C]//Proceedings of 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [30] SADEGHI M, BEHNIA F, AMIRI R. Maritime target localization from bistatic range measurements in space-based passive radar[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021(70): 1-8.
- [31] RAZAK M Y A, ZAINAL N, SIDEK A R M. Performance of 8FSK base on PACTOR I protocol over AWGN channels[C]//Proceedings of 2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [32] VALČIĆ S, MRAK Z, KEZIĆ D. Comparison of new technologies for data exchange in the maritime HF frequency band[C]//Proceedings of 2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Piscataway: IEEE Press, 2013: 498-502.
- [33] CHANG S J. Development and analysis of AIS applications as an efficient tool for vessel traffic service[C]//Proceedings of Oceans &04 MTS/IEEE Techno-Ocean &04. Piscataway: IEEE Press, 2004: 2249-2253.
- [34] North Sea. Worlds first offshore LTE network[R]. 2013.
- [35] HOEFT M, GIERLOWSKI K, RAK J, et al. Non-satellite broadband maritime communications for e-navigation services[J]. IEEE Access, 2021(9): 62697-62718.
- [36] JI Y C, ZHANG X, ZHANG G A, et al. Use of NOMA for maritime communication networks with P-DF relaying channel[J]. China Communications, 2020, 17(7): 236-246.
- [37] 贾蒙, 巩峰, 陈为刚. 无线传感器网络不可靠链路特性[J]. 信息与控制, 2020, 49(5): 552-559.

- JIA M, GONG F, CHEN W G. Unreliable link characteristics of wireless sensor network[J]. *Information and Control*, 2020, 49(5): 552-559.
- [38] MEHRNIA N, OZDEMIR M K. Novel maritime channel models for millimeter radiowaves[C]//*Proceedings of 2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [39] LEE Y H, MENG Y S. Near sea-surface mobile radiowave propagation at 5 GHz: measurements and modeling[J]. *Radioengineering*, 2014, 23(3): 824-830.
- [40] XU Y L. Quality of service provisions for maritime communications based on cellular networks[J]. *IEEE Access*, 2017(5): 23881-23890.
- [41] XU Y L, JIANG S M, LIU F. A LTE-based communication architecture for coastal networks[C]//*Proceedings of the 11th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems - WUWNet & apos;16*. New York: ACM Press, 2016.
- [42] LIU C X, FENG W, WEI T, et al. Fairness-oriented hybrid precoding for massive MIMO maritime downlink systems with large-scale CSIT[J]. *China Communications*, 2018, 15(1): 52-61.
- [43] YOSHIKAWA T, KAWASAKI S, TAKASE M, et al. Development of 27 MHz/40 MHz bands maritime wireless ad-hoc networks[C]//*2010 Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 177-182.
- [44] 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.
- [45] LIU R W, NIE J T, GARG S, et al. Data-driven trajectory quality improvement for promoting intelligent vessel traffic services in 6G-enabled maritime IoT systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(7): 5374-5385.
- [46] LAARHUIS J H. MaritimeManet: Mobile ad-hoc networking at sea[C]//*2010 International WaterSide Security Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [47] ZAIDI K S, JEOTI V, AWANG A, et al. High reliability using virtual MIMO based mesh network for maritime wireless communication[C]//*2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [48] KONG P Y, WANG H G, GE Y, et al. Distributed adaptive time slot allocation for WiMAX based maritime wireless mesh networks[C]//*Proceedings of 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [49] ZHOU M T, HARADA H. Cognitive maritime wireless mesh/ad-hoc networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, 35(2): 518-526.
- [50] RAMANATHAN R, HANSEN R, BASU P, et al. Prioritized epidemic routing for opportunistic networks[C]//*Proceedings of the 1st International MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking*. New York: ACM Press, 2007: 62-66.
- [51] LINDGREN A, DORIA A, SCHELÉN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2003, 7(3): 19-20.
- [52] LIAO Y, TAN K, ZHANG Z S, et al. Estimation based erasure-coding routing in delay tolerant networks[C]//*Proceeding of the 2006 International Conference on Communications and Mobile Computing - IWCMC & apos;06*. New York: ACM Press, 2006.
- [53] DHIVVYA J P, RAO S N, SIMI S. Towards maximizing throughput and coverage of a novel heterogeneous maritime communication network[C]//*Proceedings of the 18th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM Press, 2017.
- [54] LIU Y X, ZHAO M, XIAO L M, et al. Pilot domain NOMA for grant-free massive random access in massive MIMO marine communication system[J]. *China Communications*, 2020, 17(6): 131-144.
- [55] 张颖, 姚雨丰. 基于快速贝叶斯匹配追踪优化的海上稀疏信道估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(2): 534-540.
- ZHANG Y, YAO Y F. Channel estimation algorithm of maritime sparse channel based on fast Bayesian matching pursuit optimization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 534-540.
- [56] HUO Y M, DONG X D, BEATTY S. Cellular communications in ocean waves for maritime Internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9965-9979.
- [57] BEST M L. The internet that Facebook built[J]. *Communications of the ACM*, 2014, 57(12): 21-23.
- [58] ENGEL M. Google's project loon hovers over the satellite industry[J]. *Via Satellite*, 2013, 28(8): 13.
- [59] FERREIRA H, SILVA F, SOUSA P, et al. Autonomous systems in remote areas of the ocean using BLUECOM+ communication network[C]//*Proceedings of OCEANS 2017 - Anchorage*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [60] TANG R, FENG W, CHEN Y F, et al. NOMA-based UAV communications for maritime coverage enhancement[J]. *China Communications*, 2021, 18(4): 230-243.
- [61] YANG T T, CHEN J C, ZHANG N. AI-empowered maritime Internet of things: a parallel-network-driven approach[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(5): 54-59.
- [62] XIA T T, WANG M M, ZHANG J J, et al. Maritime Internet of



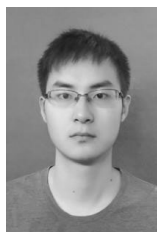
- things: challenges and solutions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 188-196.
- [63] WANG M M, ZHANG J J, YOU X H. Machine-type communication for maritime Internet of things: a design[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2550-2585.
- [64] YANG T T, KONG L Z, ZHAO N, et al. Efficient energy and delay tradeoff for vessel communications in SDN based maritime wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(6): 3800-3812.
- [65] GUAN S H, WANG J J, JIANG C X, et al. MagicNet: the maritime giant cellular network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(3): 117-123.
- [66] WAKABAYASHI N, JURDANA I. Maritime communications and remote voyage monitoring[C]//*Proceedings of 2020 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-8.
- [67] JOHN O, REIMANN M. Increasing quality of maritime communication through intelligent speech recognition and radio direction finding[C]//*Proceedings of 2020 European Navigation Conference (ENC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [68] SHI Y, ZHENG L M, LIN W C, et al. Spatial-modulated physical-layer network coding based on block Markov superposition transmission for maritime relay communications[J]. *China Communications*, 2020, 17(3): 26-35.
- [69] LI X L, FENG W, CHEN Y F, et al. Maritime coverage enhancement using UAVs coordinated with hybrid satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(4): 2355-2369.
- [70] 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.
- [71] ZHANG J, LIANG F Z, LI B, et al. Placement optimization of caching UAV-assisted mobile relay maritime communication[J]. *China Communications*, 2020, 17(8): 209-219.
- [72] FU Y Z, JIANG C A, YIN L G. Satellite multicast transmission scheme in integrated satellite-maritime networks[C]//*Proceedings of 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 988-993.
- [73] WEI T, FENG W, GE N, et al. Environment-aware coverage optimization for space-ground integrated maritime communications[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 89205-89214.
- [74] WANG Y M, FANG X R, FENG W, et al. On-demand coverage for maritime hybrid satellite-UAV-terrestrial networks[C]//*Proceedings of 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 483-488.
- [75] FANG X, FENG W, WANG Y, et al. NOMA-based hybrid satellite-UAV-terrestrial networks for beyond 5G maritime Internet of things[J]. preprint arXiv, 2021: 2104.03755.
- [76] WANG Y M, FENG W, WANG J, et al. Hybrid satellite-UAV-terrestrial networks for 6G ubiquitous coverage: a maritime communications perspective[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(11): 3475-3490.
- [77] XU F M, YANG F, ZHAO C L, et al. Deep reinforcement learning based joint edge resource management in maritime network[J]. *China Communications*, 2020, 17(5): 211-222.
- [78] PANG Y, WANG D S, WANG D D, et al. A space-air-ground integrated network assisted maritime communication network based on mobile edge computing[C]//*Proceedings of 2020 IEEE World Congress on Services*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 269-274.
- [79] SAAD W, BENNIS M, CHEN M Z. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(3): 134-142.
- [80] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 23(1): 70-109.
- [81] WANG J, ZHOU H F, LI Y, et al. Wireless channel models for maritime communications[J]. *IEEE Access*, 2018(6): 68070-68088.
- [82] WANG J, JIN S, GAO X Q, et al. Statistical eigenmode-based SDMA for two-user downlink[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(10): 5371-5383.
- [83] LIU C X, FENG W, WEI T, et al. Fairness-oriented hybrid precoding for massive MIMO maritime downlink systems with large-scale CSIT[J]. *China Communications*, 2018, 15(1): 52-61.
- [84] LI Y, WANG J, ZHANG S B, et al. Efficient coastal communications with sparse network coding[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(4): 122-128.
- [85] WANG Q, BURKHOLDER R J, YARDIM C, et al. Estimation of evaporation duct and surface-based duct parameters from a combined refractivity model[C]//*Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 879-880.
- [86] ZOLICH A, PALMA D, KANSANEN K, et al. Survey on communication and networks for autonomous marine systems[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 95(3/4): 789-813.
- [87] KABACIK P, BYNDAS A, FRACZEK W, et al. Over-the-horizon broadband maritime communications utilizing novel lightweight antennas[C]//*OCEANS 2017-Aberdeen*. IEEE, 2017: 1-5.

- [88] BEN MABROUK I, REYES-GUERRERO J C, NEDIL M. Radio-channel characterization of an over-sea communication[C]//Proceedings of 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-4.



化存卿（1976—），男，博士，上海交通大学网络空间安全学院教授，主要研究方向为B5G/6G移动通信系统安全、低轨卫星网络与Sat5G融合网络安全、工业互联网及边缘计算安全、高通量无线区块链系统及应用等。

[作者简介]



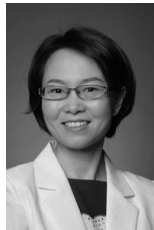
董浩（1994—），男，上海交通大学网络空间安全学院博士生，主要研究方向为低轨卫星网络与Sat5G融合网络安全。



刘玲亚（1987—），女，博士，华东师范大学通信与电子工程学院副研究员，主要研究方向为无线网络系统资源优化、智能信号处理、卫星组网通信。



宋亮（1982—），男，中交航信（上海）科技有限公司高级工程师、副总经理，主要研究方向为海上通信信息、交通应急通信及移动卫星通信。



唐俊华（1973—），女，博士，上海交通大学网络空间安全学院副教授，主要研究方向为海上通信信息、交通应急通信及移动卫星通信。