海洋通信的发展现状与时代挑战

夏明华^{1*}, 朱又敏^{1,2}, 陈二虎¹, 邢成文³, 杨婷婷⁴, 温文坤^{5*}

1. 中山大学电子与信息工程学院, 广州 510006

2. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 湛江 524088

3. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081

4. 大连海事大学航海学院, 大连 116026

5. 中国电子科技集团公司第七研究所, 广州 510310

* 通信作者. E-mail: xiamingh@mail.sysu.edu.cn, wenwenkun@outlook.com

收稿日期: 2017-01-16; 接受日期: 2017-02-15; 网络出版日期: 2017-06-09

国家自然科学基金 (批准号: 61671488) 和广东省科技发展专项资金 (批准号: 2016A050503025) 资助项目

摘要 为了保障我国“21世纪海上丝绸之路”发展战略的顺利实施和满足日趋频繁的海事活动的需要, 必须实现对相关海域的无缝、高效和可靠的通信覆盖. 本文首先概述我国海洋通信网络的发展现状; 其次, 详细分析并比较全球范围内主流海洋通信网络, 包括海上无线通信系统、海洋卫星通信系统和岸基移动通信系统; 然后, 根据我国南海岛礁众多的地理特点, 提出了一种新型的海洋通信网络架构, 并具体阐述了实施该网络架构所面临的技术挑战, 包括海洋信道建模、大气波导效应、微波散射效应, 以及统一、高效的网络资源管理机制等. 本文将为我国海洋通信政策决策人士、科研和工程人员提供一个全球视野, 以准确把握全球技术发展动态, 并积极推动我国海洋通信事业的建设与发展.

关键词 海洋通信, 海上无线通信, 卫星通信, 岸基移动通信, 海洋信道建模, 大气波导效应, 微波散射效应, 网络资源管理

1 引言

20世纪以来, 从电缆到光缆、有线到无线、从模拟到数字、从1G到5G, 陆地通信进行着日新月异的发展变革. 然而, 在浩瀚的海洋上, 由于海洋环境复杂多变、海上施工十分困难等原因, 海洋通信的发展明显滞后于陆地通信. 近年来, 随着我国海事活动日趋频繁和海洋经济迅猛发展, 研发新一代海洋通信技术与系统已经成为了学术界和工业界一个备受瞩目的焦点. 尤其是我国政府在2013年10月提出的“一带一路”发展战略 (包括“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”), 得到了沿线

引用格式: 夏明华, 朱又敏, 陈二虎, 等. 海洋通信的发展现状与时代挑战. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 677–695, doi: 10.1360/N112017-00016
Xia M H, Zhu Y M, Chen E H, et al. The state of the art and challenges of marine communications (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 677–695, doi: 10.1360/N112017-00016

图 1 (网络版彩图) 我国海洋通信系统组成

Figure 1 (Color online) The architecture of marine communications system in China

国家的积极响应. 为了保障“一带一路”发展战略的顺利实施, 必须确保“21 世纪海上丝绸之路”相关海域能够实现无缝、高效和可靠的通信覆盖.

常规的海洋通信网络主要包括海上无线通信系统、海洋卫星通信系统和基于陆地蜂窝网络的岸基移动通信系统. 由于这些通信系统的通信制式互不兼容、通信带宽高低不一、覆盖范围存在盲区、缺乏高效统一的管理机制, 常规海洋通信网络越来越难以满足我国日益增长的海洋活动需求, 成为制约海洋开发与探索向纵深发展的重大瓶颈. 因此, 必须充分调研我国海洋通信的发展现状, 了解世界先进海洋通信技术, 探索与我国海洋环境相一致的海上信道模型, 开发适合我国国情的海洋通信网络架构, 最终构建一个高速率、高可靠、全覆盖、易管理、低成本的新型海洋通信网络.

本文第 2 节介绍我国海洋通信的发展现状, 具体阐述我国海洋通信系统的通信制式、通信业务和技术特点; 第 3 节概述全球范围内主要海洋通信网络的技术特点, 探寻海洋通信的发展方向, 推动海洋通信技术的进步; 第 4 节则指出海洋通信面临的挑战, 提出一种新型的海洋通信网络架构, 具体分析了海上信道模型、大气波导效应和微波散射效应, 并探索高效的海洋通信网络资源管理机制; 最后一节总结全文, 并对海洋通信未来的发展方向提出自己的见解.

2 我国海洋通信现状

如图 1 所示, 我国广泛应用的海洋通信系统主要包括海上无线通信、海洋卫星通信和岸基移动通信, 它们共同构成一个基本实现海洋全覆盖的通信网络. 该系统能够保障近海、远海和远洋的船舶 – 海岸、船舶 – 船舶的日常通信; 在海洋运输、油气勘探开采、海洋环境监测、海洋渔业、海水养殖和海洋科考等领域, 提供了相对可靠、准确、及时和安全的通信基础设施.

海上无线通信包括最早服务于海洋的几种通信方式, 如表 1 所示. 1996 年, 根据国际海事组织 (international maritime organization, IMO) 要求, 我国交通运输部统一更新并改造各海岸电台的通信设施, 以满足“全球海上遇险与安全系统 (GMDSS)”对通信业务的需要, 其中, 奈伏泰斯系统 (NAVTEX)、中频/高频系统 (MF/HF) 和甚高频系统 (VHF) 属于 GMDSS 规范配置的无线通信系统. 1999 年 2 月 1 日, GMDSS 系统在世界各航运国家全面启用, 为了确保海上航行安全, 查找海难事故原

表 1 我国常见的海上无线通信系统

Table 1 Marine radio communications systems in China

System	Communication method	Business	Data rate	Communication distance
NAVTEX	MF (518 kHz)	NBDP	50 bps	250~400 nautical miles
MF/HF	MF/HF (1650~27500 kHz)	Voice, NBDP, DSC	—	Medium/long distance
VHF	VHF (156.0~174.0 MHz)	Voice, DSC	1.2 kbps	Visual range
AIS	VHF (156.025~162.025 MHz)	Ship identification, Monitoring	9.6 kbps	Visual range

表 2 我国使用的海洋卫星通信系统

Table 2 Satellite communications systems in China

System	Communication method	Business	Data rate	Communication distance
EPIRB	1.6 GHz or 406 MHz-EPIRB	Alarm, identification, positioning and locating	400 bps	Long distance
BeiDou system	BeiDou user equipment data interface protocol (V4.0)	Positioning, navigation and short message	19.2 kbps	Long distance
C		Store-and-forward messages, distress calls, enhanced group call, data reports and polling	—	
F	Ku-Band satellite television vehicular	Voice, fax, high speed data and video	4.8 kbps (voice), 9.6 kbps (fax, data), 64 K (ISDN data service)	
Inmarsat	(shipborne) receiver		4.8 kbps (voice),	Long distance
Mini-M	(JT/T629-2005)	Voice, fax, data	2.4 kbps (fax), 2.4 kbps (data)	
FB		Voice, fax, broadband data, video and SMS	4 kbps (voice), 3.1 kHz (audio channel G3 fax), standard IP and stream IP, 160 symbols/SMS	

因, IMO 决定增补配置通用船载自动识别系统 (AIS). 在规范海上无线通信系统的正常运行方面, 我国分别制定了《奈伏泰斯系统技术要求 (GB/T 18766-2009)》、《全球海上遇险安全系统 (GMDSS) 船用无线电通信设备技术要求 (GB 15304-94)》和《船载自动识别系统 (AIS) 技术要求 (GB/T 20068)》. 海上无线通信系统应用成本低, 使用便捷, 满足近岸、近海、远海覆盖要求. 但是, 该通信系统受气候条件和海洋环境影响较大, 通信可靠性不高, 而且系统采用窄带通信方式, 导致无法提供高速数据业务.

我国使用的海洋通信卫星系统如表 2 所示. 根据 GMDSS 规范配置的卫星通信系统包括全球卫星搜救系统 (COSPAS/SARSAT) 的卫星紧急无线电示位标 (EPIRB) 和海事卫星系统 (INMARSAT). 卫星紧急无线电示位标主要解决紧急报警、船位识别、定位和询位功能. 海事卫星系统包括多种功能系统, 其功能和业务存在较大差异. 北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 是中

表 3 海上通信系统性能比较
Table 3 Performance comparison of marine communications systems

System		Advantage	Disadvantage
Maritime wireless communications	MF/HF	Medium/long distance, free of charge	Narrow band access, low stability
	VHF	Visual range, free of charge	
Marine satellite communications		Wide area coverage, broadband access	High cost of equipment, high monthly fee
Shore-based mobile communications		Broadband access	Near shore coverage, charging by service time and amount of data

国自行研制的全球卫星导航系统. 2012 年 12 月 27 日, 北斗系统空间信号接口控制文件 1.0 版正式公布, 北斗导航业务正式对亚太地区提供无源定位、导航、授时服务. 随着北斗卫星导航系统空间部分的不断完善, 北斗终端设备成为近年来我国海上船舶可选配置, 北斗卫星导航系统特有的短报文通信功能将支持各种新型服务的开发. 海洋卫星通信系统最突出的优点是通信距离较远, 可以实现全球海洋覆盖. 因为卫星发射、空间和地面设施的运营和维护成本很高, 所以, 卫星通信的应用成本较为昂贵, 且通信带宽受限.

我国陆地公共移动通信系统发展极为迅猛, 已建成世界上规模最大的蜂窝通信系统. 作为海上无线通信和卫星通信的补充, 在近海区域, 岸基移动通信系统具有独特的通信优势. 我国 2G 移动网络基础设施完善, 信号覆盖良好, 能提供理想的语音和低速率的数据业务; 3G 网络由于基站建设停滞, 逐步被新一代网络所取代; 4G 网络技术先进、系统稳定、应用成熟, 成为现阶段主流移动通信网络, 能提供宽带、高速数据业务. 岸基移动通信的近海覆盖为港口、码头、航道管理、海水养殖、海上救助等提供了可靠的通信保障.

总体而言, 我国海洋通信技术尚处在较低层次的应用阶段, 只能基本满足海事活动的常规通信需求. 依据海事活动的区域和从事的业务种类, 尽管用户可以选择不同的通信系统, 但是, 各种系统的性能优势和劣势均十分明显, 如表 3 所示. 最突出的问题是没有一种通信方式, 可以实现稳定的全海洋覆盖、传输距离不受限制、确保流畅的宽带接入、较低的设备成本和使用资费. 而且, 现有各种通信系统之间相互孤立, 缺乏统一的协调管理机制, 不能保障整个海洋通信系统合理、高效地运行.

3 全球海洋通信网络

近年来, 在传统海洋通信系统的基础上, 一些国家或国际组织推出了许多演进的海上无线通信系统, 新的卫星通信系统在不断投入运行. 各国科研人员还将各种陆地通信的最新技术延伸至海洋环境, 并提出了集成海洋通信网络的概念. 新设计的海洋通信系统采用了许多新的理论和技术, 力争满足日益增长的海洋业务需求, 并推动海洋活动质量的提升.

图 2 描述了一个典型的全球海洋通信网络. 靠近海岸的船舶/浮标与地面专用基站或者蜂窝基站通过海上无线链路相连; 远离海岸的船舶/浮标通过卫星链路与海洋通信卫星相连; 最后, 卫星和基站通过网络操作控制中心形成一个有效的海洋通信网络. 另外, 船舶之间除了利用网络资源间接通信外, 在一定的范围内也可以通过无线链路直接通信.

图 2 (网络版彩图) 典型的全球海洋通信网络

Figure 2 (Color online) A typical global marine communications network

3.1 海上无线通信系统

海上无线通信系统能提供中远距离通信覆盖, 被广泛应用于海上无线通信. 世界上典型的海上无线通信有中频 (MF) NAVTEX、高频 (HF) PACTOR 系统、甚高频 (VHF) Telenor 系统和船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 等.

NAVTEX 系统是一个中频海事安全信息直印服务系统¹⁾, 为离岸 370 km 距离以内的海上用户直接打印气象预警信息、紧急海事通告、导航数据等. NAVTEX 系统采用 FSK 调制方案, 主要利用 518 kHz 频段来广播英文信息, 而其他语言的 NAVTEX 系统工作在 490 kHz 频段. NAVTEX 系统使用了简单直接的窄带直印服务方式, 成本较低, 得到了较为广泛的应用, 但无法提供其他业务信息也不能获取用户的即时信息.

PACTOR 系统也采用 FSK 调制方案的高频系统, 它允许用户采用时分双工的方式接收与发送电子邮件形式的数字信息. 2010 年, 国际电信联盟无线电通信组 (ITU-R) 提出了 3 个用于海上通信的高频无线电系统和数据传输协议^[1], 3 个系统均采用正交频分复用技术以提高频谱效率, 其中最重要的系统是 PACTOR-3, 系统典型的覆盖范围在 4000~40000 km, 实现 9.6 kbps 和 14.4 kbps 数据传输速率. PACTOR 系统的最新版本 PACTOR-4 采用自适应信道均衡、信道编码和信源压缩技术, 在 PACTOR-3 相同的功率与带宽下, 实现其两倍的数据传输速率. 基于该协议的另外一个重要系统是 IPBC (Internet protocol for boat communications), IPBC 系统覆盖近海范围 (40~250 海里) 时使用较低频段 (4~8 MHz), 超过 200 海里的远海区域使用较高频段 (8~26 MHz). 遗憾的是, 以上两大系统数据延时均较大, 无法传输实时业务.

Telenor 系统工作在甚高频段, 为挪威及其国际水域上的船舶提供数字无线电业务. 系统基站分布在距离海岸线 70 海里的挪威沿海地区, 甚至建设在大多数的北海挪威石油设施之上. 在 2008 年和 2009 年, ITU-R 相继发布了两项新协议 “ITU-R M.1842” 和 “ITU-R M.1842-1”, 着重描述了甚高频海洋移动业务 18 个增补信道的数据和电子邮件交换系统及其设备特征. 其中, ITU-R M.1842-1 是 ITU-R M.1842 的扩展版本, 尤其是在 2 或 4 个连续甚高频信道上, ITU-R M.1842-1 增加了两个多载波系统, 因此, ITU-R M.1842-1 描述了 4 个推荐系统. 具体而言, 在 ITU-R M.1842-1 协议中, 第一个系

1) NAVTEX (Navigational Telex). 2012. <http://www.pcnavtex.com>.

统包含 1 个 25 kHz 信道, 根据海洋环境的不同, 采用 $\pi/4$ 差分正交相移键控 ($\pi/4$ -DQPSK) 或者 $\pi/8$ 差分 8 相移键控 ($\pi/8$ -D8PSK) 调制方式, 支持 28.8 kbps 或 43.2 kbps 数据速率, 多址访问采用载波侦听时分多址 (CSTDMA) 方式. 第二个系统采用高斯最小频移键控 (GMSK) 调制方式, 支持时分多址 (TDMA) 方式的 21.1 kbps 数据速率. 其他两个系统集成不同数量海洋甚高频信道, 采用 16 进制正交幅度调制 (16-QAM), 接入方式还是 CSTDMA, 分别支持 153.6 kbps 或 307.2 kbps 数据速率.

另一个值得关注的海洋通信系统是 AIS^[2]. 该系统由美国主导并得到国际海事组织的推荐, 其最新版本是 2010 年发布的 ITU-R M1371-4^[3]. 系统采用 GMSK 调制方式, 信道带宽为 25 kHz, 通过自组织时分多址接入 (SOTDMA) 并传输船舶航迹信息, 实现船舶避碰和安全航行. SOTDMA 信息可重复传送, 为用户提供实时监控画面. AIS 转发设备能够工作在甚高频信道 161.975 MHz 和 162.025 MHz 上, 而且两个独立的 TDMA 接收机能够同时接收两个独立信道的信息. AIS 远海区域信道带宽为 25 kHz, 近海区域信道带宽为 12.5 kHz 或 25 kHz, 能实现 9.6 kbps 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.

近年来, NAVTEX 系统和船舶自动识别系统已广泛应用于我国海洋通信领域. 海上无线通信网络适合海上通信环境, 既有覆盖中远距离的中高频系统, 也有覆盖近距离的甚高频系统, 完全兼容 GMDSS. 在克服海洋环境对传输信道的影响方面, 常采用跳频技术来改善数字高频系统传输的可靠性. 但是, 海上无线通信系统的数据传输速率相对较低, 而且随着通信距离的增大, 数据速率越来越低; 其次, 它的通信距离受限, 无法实现全球海域的通信覆盖.

3.2 海洋卫星通信系统

由于无线电波传播特性不稳定、海上信道环境复杂多变、传输距离受限等因素, 海上无线电通信网络无法为任意海域的用户提供满意的通信服务. 相反, 卫星通信能实现对全球“无缝隙”覆盖, 卫星通信在海洋通信中拥有不可替代的地位. 在世界范围内, 典型的海洋卫星通信系统包括海事卫星系统 (INMARSAT)、铱星系统 (Iridium)、北斗卫星导航系统 (BeiDou) 和我国近期发射的“天通一号”卫星移动通信系统等.

海事卫星系统是国际海事组织 (IMO) 建设的、兼容全球海上遇险与安全系统 (GMDSS) 的唯一海洋卫星通信系统, 其系统稳定性高达 99.99%. 作为全球移动卫星通信网络的领跑者, 在过去 30 多年里, 国际海事组织不断引进新的技术并服务社会, 推出多种海事卫星系统, 包括 Inmarsat-A, -B, -C, -D/-D+, -E, -M, Mini-M 等, 它们提供的通信服务速率最低为 9.6 kbps, 最高速率达到 128 kbps. 2007 年, 国际海事组织发射 Inmarsat-4 卫星群, 提出了 BGAN (broadband global area network) 概念, 提供共享信道、包交换服务和 IP 流服务, 峰值速率分别为 432 kbps 和 256 kbps. BGAN 最大的特点是可全球覆盖 (除极地海域外). 2014 年底, 国际海事组织建成新一代广覆盖无线宽带卫星网络系统, 该系统被称为海事 GX 系统 (inmarsat global Xpress), 由三颗 Inmarsat-5 卫星群组成, 实现完全的全球覆盖并大幅提高通信速率. GX 系统优势主要表现在, 工作在频率资源丰富的 Ka 频段, 用户终端天线尺寸为 60 cm 时, 可提供 50 Mbps 下行数据速率和 5 Mbps 的上行数据速率; 而用户终端天线尺寸为 20 cm 时, 可提供 10 Mbps 下行数据速率.

近地轨道卫星系统是在轨运行的另一类卫星系统, 同样适用于海洋卫星通信领域. 铱星系统使用 66 颗互联的近地轨道卫星实现了全球覆盖, 它的数据速率为 4.7 kbps, 因为卫星轨道高度较低, 所以一个数据包传输来回时间仅需 1.8 s. 最近, 铱星系统正在考虑搭建新一代的卫星网络 “Iridium NEXT”

以期将数据速率提升至 L 波段的 1.5 Mbps 或 Ka 波段的 8 Mbps²⁾。全球星系统 (Globalstar) 是另一个使用近地轨道卫星的系统, 它的全双工数据速率是 9.6 kbps, 峰值速率达到 38 kbps。此外, 还有欧洲数字视频广播卫星网络 (DVB-RCS) 同样支持海上通信业务^[4]。

我国的北斗卫星导航系统也可在全球范围内全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠的定位、导航、授时服务, 并且还具有短报文通信能力。在 2014 年 11 月, 国际海事组织海上安全委员会正式将中国北斗系统纳入全球无线电导航系统。截止 2016 年 2 月, 北斗系统由 16 颗卫星构成, 已覆盖亚太地区, 计划 2020 年左右全部 35 颗卫星在轨运行, 实现全球覆盖。北斗系统作为一个成熟的导航系统, 不但能为海上船舶提供定位导航服务, 而且其短报文通信功能可以提供遇险求救、航海通告等服务。

2016 年 8 月 6 日, 中国“天通一号”卫星移动通信系统的 01 星成功发射, 该系统将与地面移动通信系统共同构成移动通信网络, 为中国及周边地区, 以及太平洋、印度洋大部分海域的用户提供全天候、全天时、稳定可靠移动通信服务, 支持语音、短信息和数据业务。“天通一号”卫星的技术指标与性能达到国际第三代卫星移动通信水平。

相对于海上无线通信系统, 海洋卫星通信系统最大的优点就是覆盖范围广, 最大的缺点就是成本极高, 而且, 海事卫星网络还有其他诸如信息安全等问题^[5]。

3.3 岸基移动通信系统

由于陆地通信网络具有安全、稳定、容量大、速度快、价格低廉、技术成熟等特点, 将蜂窝网、无线城域网 (WMAN)、无线局域网 (WLAN) 等成熟的网络技术应用于岸基近海海洋通信也是一个很好的组网选择。

TRITON (TRI-media telematic oceanographic network) 工程^[6]就试图利用全球微波互联接入 (WiMAX) 即 WMAN^[7] 构成高速、低成本的海洋通信网络。该网络可以利用 WiMAX 较宽的带宽给船舶提供视频服务, 并且能实时传输导航数据。

WiMAX 网络可以自组织运行并支持多跳中继, 实现较远的传输距离, 同时采用基于媒体接入控制的 TDMA 模式, 能更有效地利用信道带宽。因此, 相较于其他陆地通信网络, WiMAX 具有传输距离更远、宽带接入速率更快等与海洋通信环境相适应的特点, 更加适合于拓展到海洋应用。另外, 除了海岸之外, 工程人员如果选择特定的海岛或者岩礁上放置蜂窝基站, 那么, 蜂窝网的覆盖范围得到进一步扩展, 成为 WiMAX 海洋通信网络的一种有力补充。

类似于蜂窝网的利用, 2.4 G 频段的无线局域网 (WLAN) 也可用于近海海洋环境^[8], 运用多跳中继构建类似于 WiMAX 网络的通信网络。为了使 WLAN 更适合海洋环境, 必须采用高增益定向天线等提高传输距离的技术^[9]。在海洋无线传感网络应用中, 电气和电子工程师协会 (institute of electrical and electronics engineers, IEEE) 于 2003 年制定的 IEEE 802.15.4 这一类范围更短的通信协议也能发挥它的作用。但是, 由于海洋中传感器的间隔相对地面更远, 需要更多的信号增强技术来支撑无线传感网络的有效工作。

在岸基海洋通信应用中, 包括 WiMAX、WLAN 等在内的陆地通信网络, 最大的不足就是覆盖的沿岸海域范围太小, 因此, 将陆地通信网络拓展到近海海洋的关键难点是如何提高其覆盖范围。

2) Iridium-NEXT[EB/OL]. 2016. <http://www.iridium.com>.

图 3 (网络版彩图) 集成海洋通信系统

Figure 3 (Color online) An integrated marine communications system

3.4 集成海洋通信系统

由于每一种海洋通信系统都有其独特的优势, 例如, 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, 陆地通信网络可以实现数据高速传输, 因此, 在任何海域, 通过综合利用各种通信系统, 保障用户实现性能稳定、高效、可靠, 且价格低廉的通信服务, 永远是海洋通信追求的目标. 为了综合以上 3 种网络的各自优点, 文献 [10] 提出了一种集成海洋通信系统, 系统模型如图 3 所示. 该系统联合部署了 3 种通信网络, 使得海上船舶可以根据实际需求自由选择不同的通信网络, 实现了 3 种网络资源的综合利用, 一方面使得海洋通信卫星的数量降低, 从而减少通信成本; 另一方面, 用户可以根据自己的位置和实际需求, 实时选择合适自己的通信链路, 实现相对高速、稳定、低价的海上通信.

4 新一代海洋通信技术面临的挑战

现阶段我国海洋通信技术与世界海洋通信技术强国, 例如, 美国、挪威等, 存在较大的差距. 首先, 尽管在海上无线通信领域都能采用中频、高频和甚高频通信方式, 实现点对点、点对多点的常规海上通信, 完成语音、DSC、NBDP、船舶识别和监控等业务信息传输, 通信距离可以涵盖近距离和中远距离, 但是, 我国海上无线通信的通信技术更新不足、通信可靠性受海洋环境影响较大, 不能满足高速数据业务的需求, 在远距离通信时表现得尤为突出, 明显存在通信覆盖盲区. 其次, 在海洋卫星通信领域, 我国海洋卫星通信网络正在逐步完善, 虽然可供选择的通信卫星较多, 既有国际海事组织的海事卫星系统和各国共享的近地轨道卫星系统, 又有我国自主开发的北斗卫星导航系统和“天通一号”卫星移动通信系统, 可以实现海上各类通信业务的需求. 但是, 卫星系统资源还是不能满足高速增长的海上业务的要求, 尤其是卫星通信的高成本成为大多数海上用户难以面对的现实; 不断更新的宽带卫星通信系统还让一些用户无所适从. 第三, 在海上移动通信领域, 尽管基础设施完备的 4G 公共移动通信网络为我国近海海上用户的高速数据业务提供便利, 但是, 海洋覆盖永远是岸基移动通信亟待克服的困

图 4 (网络版彩图) 新型海洋通信网络构架

Figure 4 (Color online) A novel architecture of marine communications network

难,无线城域网、无线局域网的海洋利用,在我国起步较晚且应用不足,导致成效甚微.最后,我国海洋通信技术与世界先进海洋通信技术的差异还表现在缺乏统一、高效的网络管理机制.为了摆脱各种通信系统独立运行的局面,避免让普通用户去选择通信方式,必须建立集成通信网络,协调各通信系统资源,让不同区域、不同业务、不同要求的用户自由选择通信网路,最终让用户体验到稳定、高效、低廉的海上通信服务.

新一代海洋通信的目标就是寻求一种接入网络,以确保信号无缝覆盖、数据业务高速传输、用户体验满意,适应海洋环境变化,辅以无线通信网络和卫星通信网络,并具有完善的网络管理机制.为实现新一代海洋通信的目标,我们首先提出一个新型的海洋通信网络架构,然后分析海洋环境下的信道模型,最后提出优化高效的海洋网络资源管理机制.

4.1 新型海洋通信网络架构

2013 年 10 月,以我国与东南亚国家联盟(以下简称东盟)建立战略伙伴关系十周年为起点,为进一步深化我国与东盟的合作,习总书记提出了“21 世纪海上丝绸之路”的战略构想.同时,这一战略合作伙伴并不仅局限于东盟,而是以点带线,以线带面,增进我国与周边国家和地区的交往,串起连通东盟、南亚、西亚、北非、欧洲等各大经济板块的市场链,发展面向南海、太平洋和印度洋的战略合作经济带,以亚、欧、非经济贸易一体化为发展的长期目标.由于海洋从来就是各国经贸文化交流的天然纽带,共建“21 世纪海上丝绸之路”,是在全球政治、贸易格局不断变化的形势下,中国连接世界的新型贸易之路,其核心价值是通道价值和战略安全.“21 世纪海上丝绸之路”的开辟和拓展无疑将大大增强中国的战略安全.规划建设“21 世纪海上丝绸之路”的主要内容之一,就是建立和完善基础设施的互联互通,尤其是构筑海上互联互通的通信网络.南海是中国建设海上丝绸之路的中心枢纽,因此,必须保证对我国南海海域及相关海路(例如南华水道)实现无缝、可靠、高效的无线通信网络覆盖.

针对我国南海岛礁众多的地理特点,图 4 显示了一个新型的海洋通信网络架构.图中船舶 1 和 2 组成远海舰船编队,船舶与陆地地面控制中心之间的通信依托陆地移动通信网络,以 5G 通信技术建立一条新的远海通信链路,通信业务主要通过新一代地面通信技术来完成,辅助传统的海上无线通信网络和卫星通信网络,满足新时期海洋通信的需求.具体而言,远海通信链路的远端是船舶 1 和 2,链路线途中经过岛礁 1~3,所有岛礁上建设有永久基础通信设施.首先,岛礁 3 是距离船舶 1 和 2 最近的

岛屿, 它既可以为附近海域的过往舰船提供通信服务, 也可以与临近的岛礁 2 上的通信设施相连; 其次, 岛礁 2 与岛礁 1 的距离较远, 为了建立可以通信的无线链路, 采用人为增加中继节点互联岛礁 1 与岛礁 2. 这个中继节点既可以是固定的海上浮台, 也可以设置平流层飞艇^[11]作为可移动的灵活中继节点; 作为备选方案, 应急时还可以投放无人船在相应位置作为中继节点. 最后, 岛礁 1 距离陆地最近, 在陆地基站覆盖范围之内, 直接与岸上的地面控制中心相联系. 至此, 一个通过多跳协作中继的通信链路建设完成.

在图 4 所示的通信网络架构下, 海上所有用户之间的通信, 同样可以采用传统的海上无线通信网络和海洋卫星通信网络. 但是, 与现有海洋通信网络不同的是, 该架构提出采用陆地移动通信新技术, 通过岛礁或者海上浮台、飞艇、无人船等中继节点建立新的高速宽带链路. 该方案尤其适用于岛礁丰富的海域, 例如南中国海等.

目前, 第五代陆地移动通信技术 (5G) 正在试运行阶段, 有关国家或国际组织都在投入大量资源研发 5G 网络, 与前几代陆地移动通信技术相似, 5G 将成为未来信息基础设施的重要组成部分. 在充分认识海洋信道环境和海洋通信需求的基础上, 5G 的相关技术同样可以应用于海洋通信, 例如, 5G 关键技术中的大规模天线阵列技术和毫米波技术, 就可以用来解决扩大海洋通信的覆盖范围和提高系统容量等难题. 具体而言, 大规模天线阵列技术是一种在通信系统的发射和接收双方, 都配置数十甚至上百副天线的一种无线通信技术. 通过精心设计的各种发射、接收处理技术, 大规模天线阵列技术可以充分利用空间自由度以获得显著的空间分集、空间复用或者波束成型增益, 从而显著提高无线系统的覆盖范围或者系统容量等. 尤其是在海洋通信中, 可以通过在岛礁或者海上浮台上设置高塔来部署大规模天线阵列, 特别有利于该技术的工程实施. 另外, 由于毫米波技术可以提供丰富的频谱资源, 已经广泛应用于卫星通信或者平流层通信当中, 它可以显著提高海洋无线通信技术的覆盖范围. 加之毫米波频段干扰源少, 电磁频谱干净, 信道稳定可靠; 而且, 毫米波传播具有良好的方向性. 大量试验结果表明, 尽管毫米波受大气吸收和降雨衰落的影响严重, 导致单跳通信距离较短, 但是, 利用多跳协作传输的毫米波中继通信是可行的^[12].

通过综合利用卫星、岛礁、海上浮台、无人船、平流层飞艇等中继节点, 可以多重保证舰船开展海洋活动所需通信链路的高效性与可靠性. 只有建立这样一个无缝覆盖的海洋通信网络, 越来越频繁的海事活动才会更加安全、可靠和高效. 相应地, 我国提出的“21 世纪海上丝绸之路”战略才能更深入地推进, 更好地造福世界人民.

4.2 海洋通信信道模型

搭建任何一条通信链路之前, 预测并建立信道模型是至关重要的一环. 由于海上湿度、气压、风速、波浪等不可预测的因素导致海上信道模型的建立十分困难, 海洋信道建模成为设计海洋通信系统最大的挑战. 本小节首先概述文献中已经报道过的典型的海洋信道模型; 然后, 根据海洋环境与陆地环境的不同, 分别介绍大气波导效应和微波散射效应在超视距海洋通信当中的应用.

4.2.1 典型的海洋信道模型

文献 [13] 指出, 空对地通信理想几何信道模型^[14]假设地面是光滑的并且考虑了地球曲率, 因此适用于海洋信道环境. 该信道模型如图 5 所示: 假设发送端 (陆地基站、飞行器、船舶) 和接收端 (船舶) 之间的信号路径由一条直射波和一条反射波组成. 文献仿真分析了接收信号强度与发送功率、波长、通信距离、飞行器/天线高度等因素之间的关系. 但是, 该文献只对通用的空对地信道模型进行仿

图 5 (网络版彩图) 两路径理想几何信道模型

Figure 5 (Color online) Ideal two-ray geometric channel model

真分析, 并没有考虑实际海洋特有的环境, 如湿度、气压、风速、波浪等, 对传输信道造成的影响。

文献 [15] 考虑海上环境的折射、散射和反射路径影响, 假设海平面为不规则地形, 将陆地移动通信的 Longley-Rice 模型^[16] (也称作 irregular terrain model (ITM) 模型) 的参数进行修改后应用于海洋通信。Longley-Rice 模型基于电磁波理论, 利用路径的几何不规则性和对流层的衍射来预测传输路径损耗, 输入参数包括工作频率、收发距离、天线高度、极化特性、表面折射率、介电常数、气候特征等参数, 它的工作频率范围为 20 MHz~40 GHz, 收发距离范围为 1~2000 km。为了将 Longley-Rice 模型应用于海洋环境, 文献 [15] 在设置了与海洋环境相匹配的参数之后, 分别仿真得到海上通信传输损耗与通信距离的关系, 以及传输损耗与通信频率及天线高度的关系。结果表明, 随着通信频率的提高, 损耗越来越严重。因此, 在实际应用中, 为了兼顾抗干扰能力等其他性能指标, 应选择合适的通信频率。另外, 随着天线高度的增加, 传输损耗减小, 但天线足够高的时候, 传输损耗保持不变。其作者还指出, 其他陆地信道模型, 例如 Okumura 模型^[17]、Hata 模型^[18]、Lee 模型^[19] 等也可以类似地进行修改以达到适用于海洋通信的目的。尽管文献 [15] 做了适应海洋环境的参数设定, 但是 Longley-Rice 模型只考虑了直射路径, 而未能考虑海平面的反射路径。

文献 [20] 在文献 [15] 的基础上增加了图 5 所示的理想几何信道模型的反射路径, 同时还考虑到了海上气候 (例如雾、雨衰等) 带来的影响, 提出了改进型 ITM 模型。该文献的仿真结果表明改进型 ITM 模型与实测数据吻合度较高, 即提高了海洋信道传输损耗预测的准确性, 而且通信距离更远, 更适合对海洋通信进行信道建模。

文献 [21] 基于挪威海的实际信道测量数据, 考虑了船舶运动引起的 Doppler 效应, 这是其最大的研究特色。该文献的测量场景中, 船舶 (接收天线) 移动速度约为 15 m/s, Doppler 分辨率为 4 Hz, 最大巡航距离为 15.5 km。作者将实测数据与多个陆地信道模型进行对比分析, 最后发现与 ITU-R P.1546-2 模型^[22] 吻合较好。

文献 [23] 展示了 5 GHz 频率下的海洋视距通信的实验结果, 实验的接收天线放置在移动速率可忽略的船舶上, 且海洋气候环境良好。该文献作者将实验结果与图 5 所示的理想几何信道模型进行对比之后, 发现了明显的偏差, 且偏差随着通信距离的增大而增大, 因此推断可能除了直射路径和反射路径之外还存在第三条路径。其作者认为由于海水的蒸发, 海平面上方存在一层折射率不均匀的水汽层, 所以第三条路径便是折射路径, 基于此, 作者进一步提出了图 6 所示的三路径传输模型。随后, 其作者考虑了收发天线的高度和水汽层的高度并作近似处理, 得到了与实验数据相符合的海洋信道模型。尽

图 6 (网络版彩图) 三路径海洋信道模型
Figure 6 (Color online) Ideal three-ray marine channel model

图 7 (网络版彩图) 海洋电磁波 4 类传播方式
Figure 7 (Color online) Four propagation modes of marine electromagnetic waves

管该文献没有考虑 Doppler 效应和海洋气候等复杂环境, 但提出的三路径模型可能对研究人员今后对海洋信道建模具有重大意义.

以上信道模型适用于海岸到船舶、船舶之间以及无人机等飞行器到船舶间的通信, 并不包括卫星与船舶间的通信. 当前少有文献专门讨论卫星到船舶间的信道模型, 但是, 与卫星到地面终端的链路相似, 由于卫星链路的整体距离远大于海面上空影响通信质量的部分, 因而对卫星链路的分析主要集中于大气层. 因此, 卫星到地面终端的信道模型也基本适用于卫星到船舶的信道建模.

4.2.2 大气波导效应在海洋通信中的应用

由于海洋环境湿度、气压、风速、波浪等气候因素会随海面高度变化而变化, 海面上空的大气折射率也会发生相应改变, 当折射率的改变满足一定的条件时便形成了大气波导. 文献 [24] 定义了修正折射率: $M = (n - 1) \times 10^6 + 157 \times h$, 其中, n 是大气折射指数, h 是离海平面的高度 (km). 如图 7 所示, 电磁波根据修正折射率变化率 ($\partial M/\partial h$) 的不同, 有不同的传播路线, 例如, 在 $\partial M/\partial h \leq 0$ 的区域, 电磁呈波跳跃式前进, 这就是所谓的大气波导层, 电磁波在该层的传输方式如图 7 所示. 进一步, 该文献根据形成机理和折射率 - 高度关系图将大气波导分为 4 类: 蒸发波导、含基础层的表面波导、表面波导和悬空波导. 其中蒸发波导是由海水的大量蒸发, 在海平面上方 0~20 m 左右的范围内形成的波导层, 是最常见、最常利用的一类大气波导, 图 8 中的大气波导即蒸发波导.

从图 8 可以看到, 信号被“束缚”在大气波导层中, 因此相比于自由空间的信号, 大气波导层中的信号传输路径损耗更小、传输距离更远, 能实现超视距 (beyond-line-of-sight, B-LOS) 传播. 然而, 目

图 8 (网络版彩图) 电磁波的大气波导传输

Figure 8 (Color online) Atmospheric duct effect of marine electromagnetic waves

前的研究工作主要集中在大气波导在雷达领域的应用^[25,26],而大气波导在海洋通信领域的应用较少^[27,28].

文献[29]的作者及其团队在澳大利亚大陆和 78 km 远外的一个暗礁之间搭建了一条试验微波链路,这条链路工作频率为 10.6 GHz,提供了 10 MB/s 的数据速率,首次利用大气波导实现了高容量、远距离的超视距海洋通信.该文献进一步利用仿真工具 AREPS (advanced refractive effects prediction system) 分析了大气波导通信的最优频率和最优天线高度并得出结论:工作频率 10.5 GHz、天线高度 4 m 最适合于利用蒸发波导实现超视距海洋通信.

为了解决现有海洋通信网络的诸多问题,大气波导效应是海洋通信研究中一个有效的突破点.当前基于大气波导效应的有关海洋通信的研究仍处于起步阶段,需要借助其在雷达应用中已取得的成果来帮助利用大气波导效应,以推动海洋通信的进一步发展.

4.2.3 微波散射在海洋通信中的应用

微波散射是另外一种可以实现超视距通信的技术手段.它是利用对流层中的不均匀大气成分,对微波信号产生前向散射而实现超视距传播的无线通信方式.大气层中的对流层(地球表面至 8~12 km 高空)存在大量不断变化的湍流团,在电波的照射下湍流团向四周散射电波,当电波波长与湍流团尺寸相当时,主要辐射方向在前方,其中一部分能量转向地面.微波散射工作原理如图 9 所示:发射机以一定的仰角发射微波信号到对流层中,随后大量信号成分被散射体向前散射(也有少量的折射、反射成分)至接收机,完成一跳超视距传播.微波散射单跳跨距约几十至几百公里,传输速率可达 34 Mbps 以上,传输时延几毫秒;信道不受雷电、极光、磁暴和太阳黑子等恶劣自然环境的影响.

文献[30]指出,微波散射通信具有抗核爆能力强、通信容量大、信息保密性好、通信距离较远、机动灵活等突出优点;但是,微波散射信道传输损耗很大,而且信号衰落现象较为严重.为了补偿信道传输损耗必须加大发射功率,或者采用大规模天线阵列和高灵敏度接收机,甚至还需要采用分集接收技术.这使得微波散射通信成本较高,主要用于军事,民用较少.文献[31]则从通信机制、传输损耗、衰落特性、各特征的统计特性等角度对微波散射作了较为全面、系统的研究与总结.其中提出的全球适用性对流层散射传输损耗统计预测方法形成了国际无线电咨询委员会(international radio consultative committee, CCIR) 617-1 建议^[32].

目前,微波散射主要用于陆地上的远距离通信^[33,34],但文献[35]指出,海洋上空对流层的散射体更为丰富,进而使得前向散射信号更集中;对流层高度更高,使得极限通信距离更大.理论上,海洋微波散射通信距离更远、容量更大,海洋通信利用微波散射的性能大大优于陆地通信.而且,相较于其他海洋通信方式,散射通信的信道环境优于 MF/HF 无线通信,传输距离大于 VHF 无线通信,运营成本低于卫星通信,散射通信设备部署机动灵活,既可以是固定站(岛礁或浮台)部署还可以是移动站(船

图 9 (网络版彩图) 微波散射原理图

Figure 9 (Color online) Principles of microwave scattering

载) 部署. 因此, 微波散射更加适合于远距离海洋通信, 尤其适用于建立陆地与岛礁之间、岛礁与岛礁之间以及岛礁与浮台之间数百公里的通信联系.

4.3 海洋通信网络资源管理机制

网络资源管理是海洋通信的另一个不可忽视的挑战. 实现统一、高效的海洋通信网络不仅仅在于如何开发通信系统, 也在于如何管理它们, 即如何组建一个高效的海洋通信网络. 文献 [36] 提出了应用于海港、海滨、海洋 3 个场景的 NANET 网络 (nautical ad-hoc network). 在海港区域, NANET 通过建立蜂窝基站利用现有的陆地通信网络进行覆盖. 在海滨, 如果船舶位于蜂窝基站的覆盖范围之内, 则与基站直接通信; 当某一船舶在陆地通信网络覆盖之外, 则位于基站范围内的船舶或浮标 (如果有) 将作为中继节点实现协作通信. 在离岸较远的海洋区域, 前述与蜂窝基站间的直接链路以及中继链路都失效的情况下, 海上无线网络及时运作起来以提供通信链路.

TRITON 工程在引入 WiMAX 到海洋通信的同时, 还提出一种高带宽的集成网络结构 [37], 如图 10 所示. 在 TRITON 网络中, WiMAX 无线技术是其核心, 被用在相邻船舶、灯塔、浮标之间形成多跳海洋通信网络, 其中任意一个节点都可根据所在的地理位置和海洋环境切换工作频率. 而当节点分布密度较小不能通过 WiMAX 形成多跳网络的时候, 相应节点则切换至卫星网络. 通过这样一种节点自主切换方案, TRITON 网络能够在很大程度上提高海洋通信的服务质量.

文献 [38] 指出, 当船舶间通信时, 如果利用 VANET 网络 (vehicular ad-hoc network) [39], 而非蜂窝网络和卫星网络, 可以大大提高通信效率. 为了系统地描述整个海洋通信框架, 文献 [38] 提出了由 VANET 网络、蜂窝网、卫星网络组成的 IMCS 通信系统 (integrated maritime communication system). 在该系统中, 相近的所有船舶首先接入 VANET 网络, 然后连接蜂窝网络, 而只有在蜂窝网络失效的情况下才与卫星通信. 同时, 作者提出 IMSS 服务系统 (integrated maritime service system), 以综合利用 VANET 网络、蜂窝网络和卫星网络给海上用户提供定位、导航、遇险求救、语音、气象预报等多样化服务.

国内外海上宽带通信系统资源优化分配研究尚处起步阶段, 相关参考文献较少. Lin 等 [40] 研究了基于 WiMAX 技术的船-船通信, 进行了常用路由算法与 DTN 路由算法的性能对比; 文献 [41] 提出了基于船舶相遇概率理论模型的传输性能分析; 文献 [42] 基于现有 AIS 系统获得船舶移动数据, 预测船-船相遇模型. 然而上述工作的船-船通信都是在各自通信范围内. Yang 和 Shen 等将 delay-tolerant

图 10 (网络版彩图) 集成 TRITON 网络结构

Figure 10 (Color online) Network architecture of integrated TRITON

networking (DTN) 延迟容忍网络技术^[43]、WiMAX 技术、绿色通信技术应用到海上宽带网络实践中, 采用存储-携带-转发的方式支持间歇性连通、延迟大、误码率高的海上通信环境, 并围绕海上宽带数据传输中资源优化分配及调度问题展开了一定的研究工作^[44~46]. 除了上述文献讨论了海洋通信网络的管理方法之外, 还有其他文献, 例如文献^[47, 48]的研究人员也分别提出了各自的管理方法, 实际应用时应根据不同的需求采用合适的集成网络. 尽管目前已经存在多种多样各具特色的集成网络, 但是开发更加高效的集成海洋通信网络依然是今后的研究重点之一.

在 21 世纪, 信息时代下包括海洋通信在内的任何一种技术不再是孤立的, 而是全球信息一体化中的一环. 为了充分利用分散的各种软件、硬件和服务, 美国国防部提出“全球信息栅格 (global information grid, GIG)”的概念以服务于军事^[49]. GIG 是“全球互连的端到端的信息能力及相关过程和人员的集合, 能够根据战斗人员、决策人员和支援人员的要求来收集、处理、存储、分发和管理信息”^[50], 允许用户在任何地点、任何时间获取任何数据. 目前 GIG 理论和实践还处于发展初期阶段, 但是必须清醒地认识到 GIG 在未来不可估量的作用. 同时注意到, 信息技术和信息资源都具有较强的军民通用性^[51], 开发海洋通信技术完全可以在 GIG 大背景下, 协调各领域技术与资源, 提高整体的海洋活动质量.

5 总结与展望

海上无线通信、卫星通信和岸基移动通信共同构成最基本的海洋通信网络, 实现语音、数据和多媒体信息传输, 提供电子海图显示、全球海上遇险与安全信息发布、定位导航、船舶自动识别和交通信息广播等海上安全服务业务. 海上无线电通信网络的成本较低, 但覆盖范围有限; 海洋卫星通信网络能够提供全球覆盖, 但价格昂贵且通信速率低; 蜂窝网拓展到海洋应用能提供高速率、低价格的通信服务, 但覆盖范围又非常小. 如何从信道分析和网络管理的角度或者创新使用其他技术手段解决这一矛盾, 建设覆盖范围广、通信速率高、价格低廉的海洋通信网络是该领域工作者所要面临的重大课题. 本文第 1 节指出新时期海洋通信的目标, 阐述现代海洋通信研究的主要内容. 第 2 节分析总结国内现有的 3 种主要海洋通信系统, 比较各种系统的优缺点. 第 3 节介绍当今世界先进的海洋通信系统, 引入集成海洋通信理念. 在第 4 节, 首先比较国内外海洋通信的差异; 然后, 在 5G 陆地通信技术背景

下, 提出了一种适合南中国海的海洋通信网络架构; 接着, 综述国内外海洋通信信道模型相关文献; 最后, 探讨切实可行的海洋通信网络资源管理机制. 为了快速开发和部署新一代海洋通信系统, 充分利用 5G 陆地移动通信中的较为成熟的研究成果, 例如, 大规模天线技术、毫米波技术等, 并结合海洋通信的环境特征, 将是一条行之有效的技术途径. 本文有助于设计一个无缝覆盖、高效可靠、宽带高速、成本合理的新型海洋通信网络, 这是完善“21 世纪海上丝绸之路”基础设施并实现我国深蓝战略的必经之路.

参考文献

- 1 ITU-R. Characteristics of HF radio equipment for the exchange of digital data and electronic mail in the maritime mobile service. M.1798-1. 2010. <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1798-1-201004-I/en>
- 2 Chang S J. Development and analysis of AIS applications as an efficient tool for vessel traffic service. In: Proceedings of IEEE TECHNO-OCEAN'2004, Kobe, 2004. 4: 2249–2253
- 3 ITU-R. Technical characteristics for a universal shipborne automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band. M.1371-4. 2010. <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1371-4-201004-S/en>
- 4 Gayraud T, Bertaux L, Berthou P. A NS-2 simulation model of DVB-S2/RCS satellite network. In: Proceedings of the 15th Ka Band Conference, Cagliari, 2009. 1
- 5 Bekkadal F, Yang K. Novel maritime communications technologies. In: Proceedings of IEEE Mediterranean Microwave Symposium (MMS'2010), Kolkata, 2010. 338–341
- 6 Zhou M T, Hoang V D, Harada H, et al. TRITON: high-speed maritime wireless mesh network. IEEE Wirel Commun, 2013, 20: 134–142
- 7 IEEE. IEEE Standard for local and metropolitan area networks-part 16: air interface for fixed broadband wireless access systems. 802.16-2004. <http://grouper.ieee.org/groups/802/16/milestones/active/milestones.16-2004.html>
- 8 Moffatt C D. High-Data-Rate, Line-of-Site network radio for mobile maritime communications (using Harris WetNet technology). In: Proceedings of IEEE MTS-OCEANS, Washington, 2005. 1–8
- 9 IEEE. Local and metropolitan area networks-specific requirements part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 10: mesh networking. 802.11s-2011. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11s-2011.html>
- 10 Du W, Zheng X M, Bai Y, et al. Integrated wireless networking architecture for maritime communications. In: Proceedings of IEEE 11th ACIS International Conference on Software Engineering Artificial Intelligence Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD'2010), London, 2010. 134–138
- 11 Zhao D, Liu D X, Sun K W, et al. Research status, technical difficulties and development trend of stratospheric airship. Acta Aeronaut ET Astronaut Sin, 2016, 37: 45–56 [赵达, 刘东旭, 孙康文, 等. 平流层飞艇研制现状、技术难点及发展趋势. 航空学报, 2016, 37: 45–56]
- 12 Rappaport T S, MacCartney G R, Samimi M K, et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. IEEE Trans Commun, 2015, 63: 3029–3056
- 13 Zheng B, Ren Q, Liu Y J, et al. Simulation of two V/UHF air-to-ground communication channel models. In: Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM'2007), Shanghai, 2007. 1083–1086
- 14 Zhou C D, Wang Y K, Yang E H. Antenna and Electric Wave. Xi'an: Xi'an Electronic Technology University Press, 1994. 290–302 [周朝栋, 王元坤, 杨恩辉. 天线与电波. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994. 290–302]
- 15 Mo H, Chen B, Shen C. Radio propagation prediction model for maritime mobile communication. In: Proceedings of IET International Conference on Wireless Communications and Applications (ICWCA'2012), Kuala Lumpur, 2012. 1–5
- 16 Longley A G, Rice P L. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain: a Computer Method-1968. NTIA Technical Report ERL 79-ITS 67. <https://www.its.bldrdoc.gov/publications/2784.aspx>
- 17 Okumura Y, Ohmori E, Kawano T, et al. Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. Rev Electron Commun Lab, 1968, 16: 825–873
- 18 Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE Trans Veh Tech, 1980, 29: 317–325

- 19 Lee W C Y. A new propagation path-loss prediction model for military mobile access. In: Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM'1985), Boston, 1985. 2: 359-368
- 20 Zhao Y W, Chi X, Ren J. Maritime mobile channel transmission model based on ITM. Appl Electron Tech, 2014, 40: 106-108 [赵雨薇, 迟迅, 任佳. 基于 ITM 模型的海上移动信道传输模型. 电子技术应用, 2014, 40: 106-108]
- 21 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. In: Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP'2010), Suzhou, 2010. 1-6
- 22 ITU-R. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. P.1546-2. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.546-2-200508-S/en>
- 23 Meng Y S, Dong F, Lee Y H. Near sea-surface mobile radiowave propagation at 5 GHz: measurements and modeling. Radio Eng, 2014, 23: 824-830
- 24 Bean B R, Dutton E J. Radio Meteorology. New York: Dover Publications, 1966. 435
- 25 Yao Z Y, Zhao B L, Li W B, et al. The analysis on characteristics of atmospheric duct and its effects on the propagation of electromagnetic wave. Acta Meteor Sin, 2000, 58: 605-616 [姚展予, 赵柏林, 李万彪, 等. 大气波导特征分析及其对电磁波传播的影响. 气象学报, 2000, 58: 605-616]
- 26 Li J, Li X M, Wei X J. Study on principle and application of radar in atmospheric duct. Ship Demonstration, 2001, (3): 44-47 [李健, 李兴民, 魏晓峰. 雷达大气波导现象的原理及应用研究. 舰船论证参考, 2001, (3): 44-47]
- 27 Woods G S, Ruxton A, Huddleston-Holmes C, et al. High-capacity, long-range, over ocean microwave link using the evaporation duct. IEEE J Ocean Eng, 2009, 34: 323-330
- 28 Iqbal A, Jeoti V. Feasibility study of radio links using evaporation duct over sea off Malaysian shores. In: Proceedings of 2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems, Toronto, 2010. 1-5
- 29 Patterson W L. Advanced refractive effects prediction system (AREPS). In: Proceedings of IEEE Radar Conference, Boston, 2007. 891-895
- 30 Li Y F. Analysis of mechanism and characteristics for troposphere scattered propagation. Space Electron Tech, 2010, 7: 1-4 [李引凡. 对流层散射传播机制与特性分析. 空间电子技术, 2010, 7: 1-4]
- 31 Zhang M G. Troposphere Scattered Propagation. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 8-16 [张明高. 对流层散射传播. 北京: 电子工业出版社, 2004. 8-16]
- 32 CCIR Recommendations. Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio relay systems. Recommendation 617-1, 1992, RPN Series: 237-245. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.617/en>
- 33 Monsen P. Adaptive equalization of the slow fading channel. IEEE Trans Commun, 1974, 22: 1064-1075
- 34 Wang F. The application of MIMO-OFDM system in troposcatter communication. In: Proceedings of IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT'2008), Nanjing, 2008. 4: 1957-1959
- 35 Wang X C, Qin J C. Tropo-scatter communications application cross the sea. Radio Commun Tech, 2008, 34: 62-64 [王晓春, 秦建存. 散射通信海上应用研究. 无线电通信技术, 2008, 34: 62-64]
- 36 Kim Y B, Kim J H, Wang Y P, et al. Application scenarios of nautical ad-hoc network for maritime communications. In: Proceedings of IEEE Biloxi Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges, New York, 2009. 1-4
- 37 Pathmasuntharam J S, Jurianto J, Kong P Y, et al. High speed maritime ship-to-ship/shore mesh networks. In: Proceedings of the 7th International Conference on ITS Telecommunications, Thailand, 2007. 1-6
- 38 Du W, Zheng X M, Bai Y, et al. Integrated wireless networking architecture for maritime communications. In: Proceedings of IEEE 11th ACIS International Conference on Software Engineering Artificial Intelligence Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD'2010), London, 2010. 134-138
- 39 Jorgenson M, Reichelt C, Johnson T. Operation of the dynamic TDMA subnet relay system with HF bearers. In: Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM'2005), Atlantic City, 2005. 338-343
- 40 Lin H M, Ge Y, Pang A C, et al. Performance study on delay tolerant networks in maritime communication environments. In: Proceedings of IEEE Oceans, Sydney, 2010. 1-6
- 41 Qin S, Feng G, Qin W, et al. Performance modeling of data transmission in maritime delay-tolerant-networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'2013), Shanghai, 2013. 1109-1114
- 42 Kolios P, Lambrinos L. Optimising file delivery in a maritime environment through inter-vessel connectivity predictions. In: Proceedings of IEEE 8th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and

- Communications (WiMob), Washington, 2012. 777–783
- 43 Burleigh S, Hooke A, Torgerson L, et al. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet. *IEEE Commun Mag*, 2003, 41: 128–136
- 44 Yang T T, Shen X M. *Maritime Wideband Communication Networks: Video Transmission Scheduling*. Berlin: Springer, 2014. 15–31
- 45 Yang T T, Zheng Z M, Liang H, et al. Green energy and content aware data transmission in maritime wireless communication network. *IEEE Trans Intell Transport Syst*, 2015, 16: 751–762
- 46 Yang T T, Liang H, Cheng N, et al. Efficient scheduling for video transmission in maritime wireless communication network. *IEEE Trans Veh Tech*, 2015, 64: 4215–4229
- 47 Laarhuis J. Distributed maritime surveillance system. WO, EP 2355451 A1. 2011
- 48 Kidston D, Labbe I. A service oriented framework for policy-based management of maritime mobile networks. In: *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM'2006)*, Washington, 2006. 1–7
- 49 Albuquerque M, Ayyagari A, Dorsett M A, et al. Global information grid (GIG) edge network interface architecture. In: *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM'2007)*, Florida, 2007. 1–7
- 50 Davidson S A, Wang M C, Mohan S, et al. GIG end-to-end policy based network management: a new approach to large-scale distributed automation. In: *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM'2011)*, Maryland, 2011. 2011–2018
- 51 Elmasry G, Fournier J, Amouris G, et al. Aligning the tactical gig server hierarchy with haipе dynamic discovery protocol. In: *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM'2013)*, California, 2013. 231–236

The state of the art and challenges of marine communications

Minghua XIA^{1*}, Youmin ZHU^{1,2}, Erhu CHEN¹, Chengwen XING³,
Tingting YANG⁴ & Wenkun WEN^{5*}

1. *School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;*
2. *School of Electronics and Information Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;*
3. *School of Information and Electronics, Beijing University of Technology, Beijing 100081, China;*
4. *Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*
5. *The 7th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guangzhou 510310, China*

* Corresponding author. E-mail: xiamingh@mail.sysu.edu.cn, wenwenkun@outlook.com

Abstract To implement the Maritime Silk Road in the 21st century and to meet the demands of increasing maritime activity, a seamless, effective, and reliable communications coverage of relevant sea areas is necessary. In this review, we first outline state of the art marine communications networks in China and then analyze and compare several major marine communications networks, including marine radio communications, satellite communications, and shore-based mobile communications networks. Next, based on the geometric characteristics of numerous islands and reefs, a novel system architecture of marine communications networks is proposed, and the main technical challenges precluding its implementation are described, including channel modeling of marine communications, atmospheric duct effect, microwave scattering effect, and unified and effective network resource management. This work will benefit policy makers, scientific researchers, and engineers, by providing a global overview and enabling them to grasp the trends in marine communications, and thus is likely to promote the construction and development of marine communications in China.

Keywords marine communications, marine radio communications, satellite communications, shore-based mobile communications, channel modeling of marine communications, atmospheric duct effect, microwave scattering effect, network resource management

Minghua XIA obtained his Ph.D. degree in telecommunications and information systems from Sun Yat-sen University, Guangzhou, China, in 2007. In 2015, he became a professor at the same university. His research interests are in the general area of 5G wireless communications and marine communications.

Chengwen XING received his B.E. degree from Xidian University, Xi'an, China, in 2005, and his Ph.D. degree from the University of Hong Kong, Hong Kong, in 2010. Since September 2010, he has been with the School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, China, where he is currently an associate professor. His current research interests include statistical signal processing, convex optimization, multivariate statistics, combinatorial optimization, massive MIMO systems, and high frequency band communication systems.

Tingting YANG received her B.S. and Ph.D. degrees from Dalian Maritime University, China, in 2004 and 2010, respectively. She is currently an associate professor at the Navigation College of Dalian Maritime University, Dalian, China. Her research interests are in the areas of maritime wide-band communication networks, DTN networks, and green wireless communication.

Wenkun WEN obtained his Ph.D. degree in telecommunications and information systems from Sun Yat-sen University, Guangzhou, China, in 2007. He is now with the Guangzhou Communications Research Institute, Guangzhou, China. His research interests include system architecture of 5G wireless communications, massive MIMO, signal processing for multi-carrier systems, and cooperative communication systems.