

面向“三全”信息覆盖的新型海洋信息网络

段瑞洋¹, 王景璟¹, 杜军¹, 王云龙^{1,2}, 沈渊¹, 任勇¹

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 国家数字交换系统工程技术中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 对海洋信息网络及其涉及的信息获取、传输和融合进行了研究, 综述了海洋信息网络的发展、研究现状及存在的不足, 并提出了一种新型海洋信息网络架构作为探索, 所提架构能够实现全天时、全天候、全海域的“三全”信息覆盖。阐述了该网络的组成、体系架构和技术架构, 指出了该网络中需要研究的科学问题、关键技术和潜在应用, 为我国海洋信息网络的发展提供了新的研究思路。

关键词: 新型海洋信息网络; 全天时; 全天候; 全海域; 信息覆盖

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019051

New marine information network for realizing all-coverage over sea

DUAN Ruiyang¹, WANG Jingjing¹, DU Jun¹, WANG Yunlong^{1,2}, SHEN Yuan¹, REN Yong¹

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

2. National Digital Switching System Engineering and Technological Research and Department Center, Zhengzhou 450002, China

Abstract: The marine information network and the involved information acquisition, transmission and integration were studied. Firstly, the developments, the research works and shortages of the marine information network were summarized. Then a new network architecture was proposed, which could achieve all-time, all-weather and all-sea area information coverage. The composition, system structure and technical architecture were stated in detail. Moreover, the key scientific issues, key technologies and application prospects of the information network were pointed out. The aim was to provide new research strategies for the development of marine information networks in China.

Key words: new marine information network, all-time, all-weather, all-sea area, information coverage

1 引言

海洋信息网络是人类用于认知海洋、开发海洋和经略海洋的信息网络, 包括海洋信息的获取、传输、融合应用等。海洋信息的获取是指通过声、光、电、磁、热等物理手段来获取海洋或者海洋目标的信息; 海洋信息的传输是指通过海上通信、水下的水声通信、光通信等技术将获取到的信息传输到海上或陆地上的信息处理中心; 海洋信息的融合应用是指利用各种先进的信号处理技术、数据库技

术、数据挖掘和分析技术来对海洋信息进行处理, 以获得各类海洋或海洋目标资料, 并指导相关应用。

现阶段国内外在发展海洋各项关键技术的同时, 海洋信息的获取、传输、融合应用等已经由分立的子系统向多网融合互联的信息体系发展。然而, 目前尚未出现比较成熟的海洋信息网络, 这为我国“走向海洋”战略的实施带来了极大的挑战。为了应对这些挑战, 在综述现有海洋信息网络相关研究和深度分析未来海洋信息网络发展趋势的基础上, 本文提出了一种新型海洋信息网络架构, 弥

收稿日期: 2018-12-31; 修回日期: 2019-03-23

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (No.218M640130); 国家自然科学基金资助项目 (No.91338203)

Foundation Items: China Postdoctoral Science Foundation Project (No.2018M640130), The National Natural Science Foundation of China (No.91338203)

补了现有海洋信息空间网络的不足,实现了对海洋全天时、全天候、全海域的“三全”信息覆盖。

2 海洋信息网络发展及研究现状

2.1 海洋信息获取

2.1.1 海上信息获取

目前,海上信息获取的主要手段包括海洋卫星、海上巡逻机、科考船等。

海洋卫星主要用于海洋监视、海洋水色监测、海洋动力环境监测等^[1-2]。海洋监视主要通过可见光成像仪、红外成像仪、合成孔径雷达等光学或电磁探测技术实现,具有海浪观测、海面目标探测追踪、海洋污染监测等功能。海洋水色监测利用海洋水色成像仪获取监测海洋表层可见光及红外辐射信息,实现反演海水叶绿素浓度、悬浮泥沙、有机物含量等信息^[3]。海洋动力环境监测主要借助微波辐射计、微波散射计、雷达高度计等微波遥感器实现,其中,微波辐射计被动接收海水自然微波辐射,获取辐射强度和极化特性,并反演海水表面温度、风向风速、盐度等信息^[4];微波散射计主动向海面发出电磁波并接收海洋表面散射波,实现反演海水表面风速和风向信息;雷达高度计向海水表面发送微波脉冲信号,通过测量其双程传输时间确定海面高度,通过信号波形反演海面波动。我国的海洋卫星主要包括海洋一号(HY-1)、海洋二号(HY-2)和海洋三号(HY-3)这3个系列^[5],其中,HY-1系列卫星主要用于海洋水色环境信息获取,载荷包括海洋水色扫描仪和海岸带成像仪;HY-2系列卫星主要用于海洋动力环境信息获取,载荷包括微波散射计、微波辐射计、雷达高度计等;HY-3系列卫星主要用于海洋监视监测,载荷为多极化多模式合成孔径雷达。此外,我国首颗1 m分辨率C频段多极化合成孔径雷达卫星“高分三号”和首颗地球同步轨道遥感卫星“高分四号”也能用于海洋信息获取。

海上巡逻机的主要用途包括海面目标搜索、海上救援、反潜探测等^[6],主要信息获取手段包括雷达探测、光学探测、磁探测等。雷达探测通过机载雷达实现^[7],用于水面舰艇探测和监视、空中导航和气象监测。光学探测主要通过微光夜视仪和红外线探测仪实现,其中,微光探测仪主要在夜间目标搜索中使用;红外线探测仪可以获取水下潜艇等目标辐射的红外线,主要用于反潜和舰艇侦查。磁探测通过磁异探测仪实现,可以探测到潜艇等金属装

备引起的磁场变化,主要用于反潜探测。

科考船一般都配有完善的信息采集和探测系统及船上实验室,可用于海洋物理、海洋化学、海洋生物、海洋地质、海洋气象等海洋信息的采集和分析^[8],常用探测设备包括拖网、温盐深仪、测深仪、多普勒流速剖面仪、超短基线定位系统、测波仪、船载微波辐射计、船载气象站等。较为著名的科考船包括英国的“发现”系列科考船、德国的“太阳”系列科考船等。我国也是世界上第一批建造科学考察船的国家之一,已先后设计并建造“科学”系列、“东方红”系列、“向阳红”系列等多个系列和型号的科学考察船^[9]。

2.1.2 水下信息获取

水下信息获取主要通过声、光、电磁等手段对水下目标进行探测、观察和识别。声波被认为是最适合在水下进行长距离信息获取和传输的手段,但是由于海水的声学环境非常复杂,声信号的传播路径不稳定,研究者们同时也致力于探索非声探测手段,其中较为成熟的是磁探测技术和光探测技术。

声学手段是目前最为成熟的技术手段,研究的主要内容包括声信号的获取和处理,其中,光纤水听器 and 矢量水听器是水声研究领域最具有代表性的两大技术。光纤水听器具有很强的抗电磁干扰能力,常用于海底阵、拖曳阵等声学探测系统中。目前,英国国防装备及支援局、美国海军研究实验室以及日本和意大利的防务系统都在研究开发光纤水听器的相关系统。矢量水听器最早由Nehorai等^[10]在1956年提出并演示,后来美国与前苏联同时开展了相关研究工作。矢量水听器可以同步/共点测量声压标量和质点振速矢量,切实改善声呐系统的声学性能,因此也是当前水声传感器研究的热点之一^[11]。声学水下探测分为主动探测和被动探测这2种工作方式。主动探测多用于检测安静型水下目标和各种水雷,但在浅海环境下易受到干扰,提高主动探测在浅海环境下的稳定性是近年来的研究重点^[12]。被动探测隐蔽性高,是对各类水下目标进行探测的重要手段^[13],但当水声传播使声源信号发生畸变时,被动检测方法可能会失效。水声信号处理主要研究阵列信号处理、模基信号处理、多基地探测等。此外,目前的研究注重多传感器、多特征信息的融合应用,如何获取更丰富的目标特征信息,并对信息进行融合是水声探测的一个重要研究方向^[14]。

水下视觉测量是对探测目标进行精确测量的常用方法^[15],但是由于电磁波在水中的严重衰减,

水下视觉测量的距离一般比较近。水下视觉测量的重点是减小电磁波在水中的快速衰减对成像质量的限制,目前,在实际中得到应用且达到较好效果的成像技术包括激光扫描法、距离选通法、条纹管水下激光三维成像、偏振光水下成像等。此外,一些先进的识别技术,如距离编码、极化滤波、图像提取等也将进一步在水下成像系统中得到应用。

水下磁探测技术是各种非声探测中发展较早、技术较成熟的一种探测方法。大多数水下军事目标由于自身选材的原因极易受到磁化,当处于水下环境时,这些军事目标会表现出与地球磁场截然不同的磁场特性,因此可以被探测出来。水下磁探测技术主要用于寻找水下沉船、水雷等磁性物体,常用的高灵敏度水下磁探仪对于水下常规动力潜艇的探测距离可以达到 350~400 m,对核潜艇则可以达到 600~800 m。目前,水下磁探测技术是在浅海地区最为可靠有效的探测技术^[16]。

2.2 海洋信息传输

2.2.1 海上通信

海上通信主要包括海上无线通信、海洋卫星通信和岸基移动通信。海上无线通信主要采用中/高频通信和甚高频通信,在我国主要用于奈伏泰斯系统(NAVTEX, navigational telex)^[17-18]和船舶自动识别系统(AIS, automatic identification system)^[19]。海洋卫星通信主要依靠海事卫星系统^[20](INMARSAT, international maritime satellite communication system),我国的北斗卫星导航系统也能提供短分组通信服务^[21]。岸基移动通信系统主要由近海岸的陆地蜂窝网基站与船只用户构成,我国近海岸、海岛及海上漂浮平台上布置了大量的 2G/3G/4G 基站,为近海船只用户提供通信即数据服务。随着 5G 技术的发展,未来的岸基移动通信系统不仅能为近海船只用户提供稳定可靠的通信服务,而且还能为智慧港口、智慧码头建设等提供有力的技术支撑。

目前,海洋通信主要的研究思路是将陆地通信网络中较为成熟的技术,如 LTE (long term evolution)、WiMAX (worldwide interoperability for microwave access)、WLAN (wireless local area network) 等应用到海洋场景中进行海洋通信系统设计^[22-30]。在这些工作中,比较有代表性的是 TRITON (TRI-media telematic oceanographic network) 项目^[22],该项目将无线城域网移植于海上,主要利用 WiMAX 技术,基于

IEEE 802.16 协议开发一种高速、低成本的海上通信系统。除此之外,很多研究者考虑将海上蒸发波导通信^[31-35]、散射通信^[36-39]、流星余迹通信^[40-42]等技术应用于海上电磁波通信,以实现超视距传输。还有不少工作将自组织网络技术^[43-48]、多天线技术^[49-53]和延迟容忍技术^[54-59]应用到海上通信系统中,在不同程度上都取得了很好的系统性能表现。

2.2.2 水声通信

由于海水对电磁波的吸收严重,水声通信成为了解决水下长距离通信的重要手段。然而,水声信道是迄今为止最复杂的无线通信信道之一,固有的窄带、高噪、强多途、时空频变、时延等给水声通信技术设计带来了极大的挑战^[60]。水声通信系统在国外的发展要远早于中国,具有代表性的有美国海军研究办公室和空间与海战系统司令部发起的可部署分布自主系统^[61]和“SeaWeb”计划^[62-64]、欧洲防卫局水下网络的顽健声学通信项目^[65-66]。我国水声通信系统研究起步较晚,但在国家“863”计划、国家自然科学基金等支持下,在通信算法、通信机研制、网络协议仿真、组网应用试验、协议规范制定等方面取得了一定的成绩,比较有代表性的是国家“863”计划海洋技术领域“水声通信网络节点及组网关键技术”重点项目,该项目研制了基于多进制数字相位调制、多进制频移键控、正交频分复用等不同制式的水声通信系统,并开展了海上试验^[67-68]。

近些年,水声通信网络的相关研究主要集中在水声协议和软硬件实现上^[69]。水声通信物理层核心技术包括信道模型设计、单载波相移键控、多进制频移键控、正交频分复用技术、判决反馈均衡技术、时间反转镜技术、稀疏信道估计与均衡技术、宽带多普勒补偿技术等^[70-71]。水声通信链路层关键技术分为多址技术和差错控制技术。目前,研究的多址技术包括频分多址、时分多址、码分多址、载波侦听多路访问、避免冲突多路访问等^[72-75]。对于差错控制,主要研究技术为前向差错修正和自动重传请求^[76-78]。水声通信网络层主要解决数据分组如何从发送端到达接收端的路径规划,以及流量控制、拥塞控制等问题。目前的研究除了 VBF (vector-based forwarding proto)、FBR (focused beam routing)、REBAR (reliable and energy balanced routing algorithm) 等典型的路由算法及其改进算法^[79-81]外,一些跨层路由策略和基于强化学习的路由算法也相继被提出^[82-84]。而水声通信系统的硬件模块设计也极

为关键，硬件模块设计主要研究声呐垂直接收阵、收发合置换能器、功率放大器、前置滤波器、多路接收机、处理器、信号处理机、电源管理等模块设计^[85-87]。

2.2.3 水下光通信

水下光通信采用光作为信息传输的载体，通过水下信道进行信息传输。通常认为，光波由于水体的吸收和散射，在水下传输时会有较大损耗，但是研究表明，波长为 470~540 nm 的蓝绿激光在水下的衰减非常小，因此水下光通信现有研究工作主要集中在蓝绿激光波段。此外，水下光通信研究还集中在调制技术、发射机和接收机的设计等方面。水下光通信系统常采用的调制技术包括 OOK (on-off-keying) 调制^[88-90]、脉冲位置调制技术^[91-93]、脉宽调制^[94]等。除上述强度调制方案外，相干调制方案也在很多水下光通信系统中被应用，典型的相干调制技术包括相移键控、正交幅度调制及正交频分复用等技术^[95-97]。

2.3 海洋大数据信息融合应用

当前，海洋数据来源不同，格式多样，为了充分利用不同设备采集的海洋数据，应当对所采集的数据进行融合处理。目前，针对海洋数据融合处理的应用主要集中在卫星方面。

为提升对海洋的监控能力，我国相继发射了多颗海洋系列卫星，用于对海洋水色、海洋动力环境等方面的监测。通过融合已发射的海洋卫星及其他遥感卫星数据，海洋卫星数据的应用广度和深度得到进一步提升。例如，在海洋环境保护方面，通过融合相应卫星数据，制作了我国邻近海域赤潮、溢油等业务化监测；在海洋预报减灾方面，通过融合不同卫星数据，切实提高了海温预报的精度和实效性；在海洋资源开发方面，通过融合不同卫星数据，为全国海洋渔业生产提供了实时海况分析、鱼情预报等服务。

另外，由于海洋观测手段的不断完善，海洋数据量呈爆炸性增长，海洋数据融合处理已经进入大数据时代。鉴于海洋大数据的重要性，国内在陆续构建一些海洋大数据平台。2016年，作为“海洋科技城”的山东省青岛市提出要打造国际化海洋大数据中心。同年11月，浙江省舟山市启动海洋大数据中心建设。广东省同样在积极构建海洋大数据综合应用平台，在2018年1月举行的广东海洋大数据峰会上，一些海洋大数据综合平台应用相继亮相。此外，清华大学正在筹建海洋大数据平台，该平台将运用大数据、云计算、人工智能等应用。

2.4 现有海洋信息网络面临的挑战

尽管我国在海洋信息的获取、传输、融合应用等分立系统已经取得了很多成果，但现有的海洋信息网络仍存在时间、空间和载荷这3个方面的短板，并且存在信息覆盖不全、信息获取不足、互联互通不畅、信息应用水平差等问题，如现有的空天网络易受云层遮挡，且不能探测水下目标。究其原因，是因为缺乏完善的信息体系，无法进行全天时、全天候、全海域的实时信息覆盖，在中远海尤其在水下，缺乏常驻平台，因而缺乏信息的实时获取及传输能力。本文提出了一种新型海洋信息网络作为技术探索，该网络架构能够弥补现有海洋信息网络的不足，实现全天时、全天候、全海域的“三全”覆盖。

3 新型海洋信息网络

3.1 新型海洋信息网络组成

本文提出的新型海洋信息网络架构如图1所示。

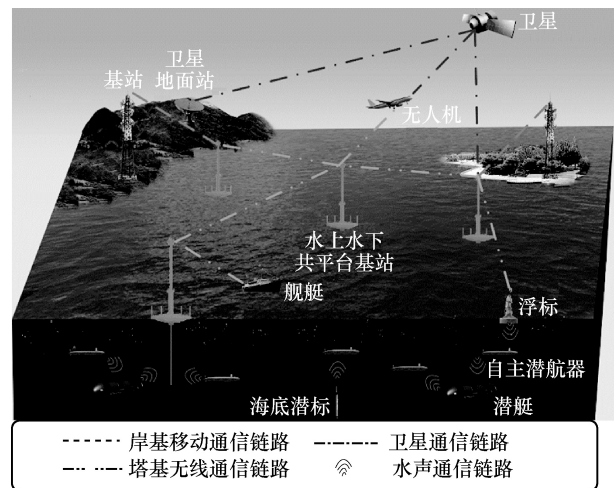


图1 新型海洋信息网络架构

如图1所示，本文提出在现有海洋信息网络的基础上，补充“两静三动”5类新型节点——水上水下共平台基站、海底潜标、舰艇、无人机和自主潜航器，构成海域立体大蜂窝新架构，组成岸、海、空、天、潜的一体化新体系，实现全天时、全天候、全海域的“三全”信息覆盖。与现有海洋信息网络相比，新型海洋信息网络主要增加了水上水下共平台基站和自主潜航器。水上水下共平台基站呈蜂窝状分布，基站间距为100 km，相比于陆地蜂窝网基站，水上水下共平台基站覆盖范围更大，因此可称为大蜂窝架构。水上水下共平台基站搭载雷达、声呐、无线通信设备、水声通

信设备等载荷,使其既是水上通信网基站,又是水下通信网基站。自主潜航器分布在共平台基站覆盖范围内,按照一定的路径规划在相邻的基站间巡航,搭载声呐、水声通信设备等载荷,使其既是水下探测前端,又是重要的水声通信节点。水上水下共平台基站和自主潜航器都具有长期存在易补充的优势,能够将信息覆盖推广到中远海及水下。海底潜标、水面舰艇和空中无人机也是新型海洋信息网络重要骨干节点,可搭载声、光、电、磁、热等多种传感器设备作为载荷,可以进一步扩大海上信息覆盖范围。本文提出的新型海洋信息网络具有多样化信息融合处理方式,如无人潜航器(AUV, autonomous underwater vehicle)、海底潜标等组成的信息探测系统在获取到信息后,可以分别通过水上/水下通信网将信息传输到水上水下共平台基站,水上水下共平台基站上搭载具备一定能力的信息处理平台,既可以将信息在本地处理,也可以将信息通过无线通信系统回传到陆地上进行融合处理。因此,本文提出的新型海洋信息网络能够实现海洋信息探测、传输和融合的无缝结合,可以在任何时间、任何气候条件下,实现近海及中远海、水上及水下的全面信息覆盖,即全天时、全天候、全海域的“三全”信息覆盖。

3.2 新型海洋信息网络体系架构

本文提出的海洋信息网络架构是新型的信息体系架构,本质上是网络的网络、系统的系统,涉及2个网络和4个系统。2个网络分别是通信网和探测网,4个系统分别是水上通信系统、水下通信系统、水上探测系统和水下探测系统,具体如图2所示。

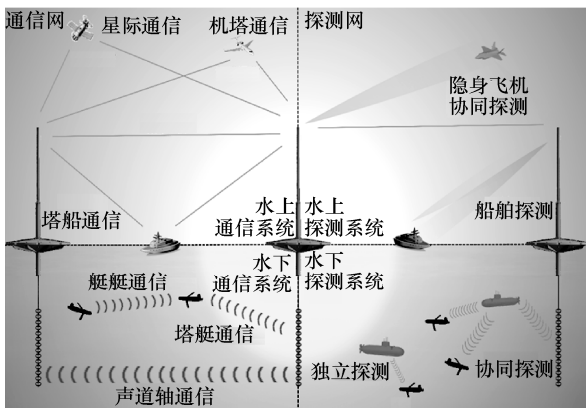


图2 新型海洋信息网络体系架构

具体而言,水上水下共平台基站、无人机与水面舰艇构成水上通信系统;水上水下平台基站、自主潜航器构成水下通信系统;水上水下共平台基站与水

上通信网构成水上探测系统;水上水下共平台基站、自主潜航器、海底潜标与水下通信网构成水下探测系统。通过水上水下共平台基站将2个网络和4个系统形成信息体系,实现探测通信平台一体,水上水下相辅相成,系统之间通过协调实现体系效能的倍增。

新型海洋信息网络由主体塔网、移动增强节点(水下增强节点)和管理网组成。主体塔网是指固定的岛基站和海上漂浮塔基站,这些固定节点是保证主体需求所必需的,拥有较强的通信能力、探测能力和能源保障能力,能够抵抗恶劣天气及环境。无人机、舰船、无人潜航器等作为移动增强节点,可以增加网络的覆盖范围并提高网络的带宽,也具有一定的探测能力。由于通信探测共平台的特性,新型海洋信息网络中的很多节点既是骨干网节点,也是接入网节点,支持现有各种不同的移动通信终端接入。同时,新型海洋信息网络可与现有的和未来的地面网络和天基网络互联互通,如图3所示。

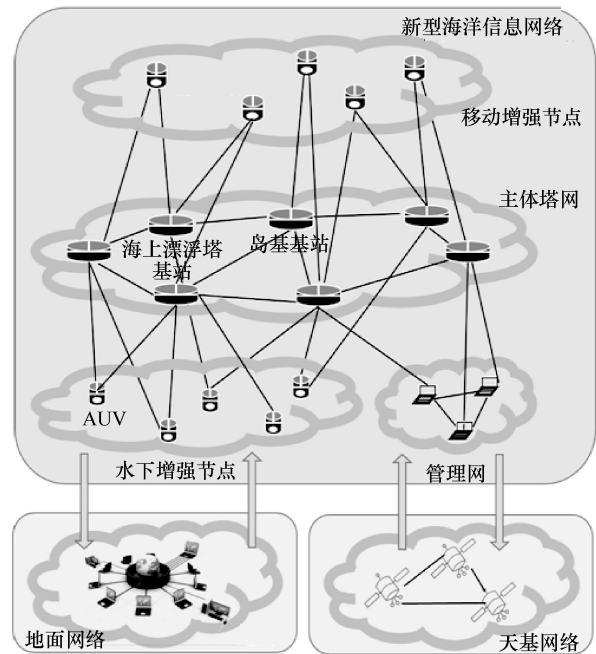


图3 新型海洋信息网络

在图3中,新型海洋信息网络与地面网络、天基网络及体系内节点之间以标准的网间、网内协议实现互联,通过标准的用户接口来提供服务。新型海洋信息网络的接口架构如图4所示,接口及其描述如表1所示。

3.3 新型海洋信息网络技术架构

采用软件定义的理念,从技术上可以将新型海洋信息网络划分为感知传输层、功能服务层和应用系

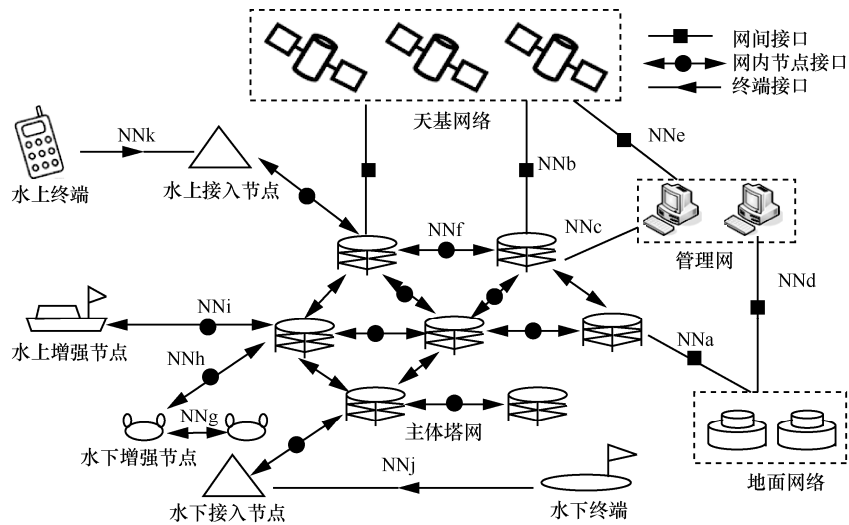


图 4 新型海洋信息网络接口架构

表 1 新型海洋信息网络接口及其描述

接口类型	接口名称	接口描述	传输方式
网间接口	NNa	主体塔网与地面网之间互联接口	海底光缆
	NNb	主体塔网与天基网之间互联接口	微波
	NNc	管理网与主体塔网之间互联接口	海底光缆
	NNd	管理网与地面网之间互联接口	光缆
	NNe	管理网与天基网之间互联接口	微波
网内节点接口	NNf	主体塔网中塔塔之间互联接口	UHF/C/X 波段
	NNg	水下增强节点（如无人潜航器）之间互联接口	水声
	NNh	水下增强节点（如无人潜航器）与主体塔网之间互联接口	水声
终端接口	NNi	水上增强节点（如飞机、舰船）与主体塔网之间互联接口	C 波段
	NNj	水下终端与接入节点之间互联接口，通过水下接入节点连接	水声
	NNk	水上终端与接入节点之间互联接口，通过水上接入节点连接	微波

统层这 3 层，具体技术架构如图 5 所示。通过南向接口统筹新型海洋信息网络信息体系资源形成资源池，支撑体系化的应用服务；通过北向应用服务接口，提供网络通信、目标探测、导航定位等各类应用服务。

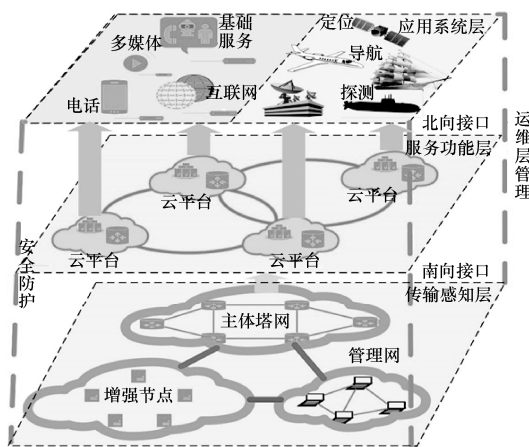


图 5 新型海洋信息网络技术架构

4 新型海洋信息网络中的科学问题

尽管本文提出的新型海洋信息网络已有许多现有的组网标准和研究工作作为支撑，但是还有很多待解决的问题，这些问题可以归纳为如下 4 类。

4.1 平台与载荷的定性定量关系

在新型海洋信息网络中，平台与载荷是影响网络效能的根本要素。平台与载荷影响“三全”信息覆盖的定性定量关系问题、态势与任务的定量刻画及其与网络资源之间的动态匹配问题是其中的关键问题。挖掘探测平台、资源及探测目标的异构异质复杂性导致资源管理的多样化与随机性，对多源协同探测网络的拓扑结构随需适应性及网络探测能力可调配性的要求，分析动态网络资源与协议体系对网络功能组成与划分的支撑作用及其对应关系是研究的关键点。

4.2 高效协同和系统探测能力相互制约关系

系统资源与任务的高效匹配、映射和面向任务的多源探测设备之间的高效协同是网络探测中的关键问题。如何在保证探测能力的前提下减小系统开销、如何在资源受限的情况下通过协同提高系统探测能力是新型海洋信息网络研究的关键点。

4.3 影响通信网络容量界的因素及其定量关系

广域稀布阵下的无线多跳传输容量极限和安全性、公平性等多种因素对网络性能的影响及其与通信速率的折中是网络信息传输中的关键问题。面向多跳分集传输的传输控制协议, 保证数据传输的高可靠性和低时延, 设计综合考虑网络性能、公平性等因素的路由选择算法是研究的关键点。

4.4 业务需求影响时空相关融合的作用原理

面向业务需求的大时空尺度下多源异质异构数据融合原理与方法及不同业务影响数据相关融合度的作用原理是网络融合应用中的关键问题。发展高效的数据挖掘分析方法、研究面向业务需求的多源异质异构数据融合方法是研究的关键点。

5 新型海洋信息网络关键技术

为了支撑新型海洋信息网络的应用, 需要对多种关键技术展开研究, 如多基地雷达探测与跟踪、海上蒸发波导通信、水上水下共平台网络协议、任务随需的海洋大数据信息融合及群体智能等。

5.1 多基地雷达探测与跟踪

海面环境中, 各岛基/塔基雷达平台之间无线通信很难长期保证稳定。在带宽、误码率、时延等无线通信指标非理想条件下, 需要研究多基地雷达协同检测技术, 分析检测性能对通信条件、信噪比、处理时间等因素的需求。此外, 水上探测系统的一大关键目标是检测超高速飞行器, 但是其具有明显的高速、高机动特点, 容易导致单一雷达观测点迹缺失。多基地雷达能够以大空间角跨度观测同一目标, 但是需要研究不同雷达之间的数据融合技术, 实现目标点迹有效补盲和无间断跟踪。

5.2 海上蒸发波导通信

受海洋环境限制, 海上往往需要实现超远距离通信, 甚至超视距通信, 因此能否有效利用海面蒸发波导实现多频段低仰角掠海超视距传输技术、提高链路可靠性成为水上通信与组网的关键技术之一。

5.3 水上水下共平台网络协议

水上水下共平台基站既是水上基站又是水下基站, 由于其融合了水上通信系统和水下通信系统, 因此现有的网络协议如互联网/物联网协议不再适用, 需要研究新的网络层协议来提高水上水下通信效率。

5.4 任务随需的海洋大数据信息融合

新型海洋信息网络将产生海量数据, 为了提高海洋大数据信息融合应用水平, 需要研究适用的数据库技术、数据挖掘技术及数据融合技术, 实现多任务条件下数据智能化处理和融合。

5.5 群体智能

无人潜航器之间的协作有利于提高信息获取及传输效率, 但是现阶段无人潜航器之间协作效率低, 需要研究新的群体智能技术实现无人潜航器之间的深度协作, 如智能化路径设计、协同定位等。

6 海洋信息网络应用前景

本文提出的新型海洋信息网络有广阔的应用前景, 具体地, 在构建近海防御、海洋交通运输安全管理、海洋自然资源管理和环境保护、海上应急救援、海洋科学考察等方面均可发挥重要的技术支撑和保障作用。

6.1 近海防御

现阶段我国近海海域空间存在着信息覆盖范围有限、信息感知能力不足、多源信息融合手段欠缺、目标检测追踪能力差等问题, 尤其对隐身飞机、静音潜艇等重点目标缺乏有效的探测手段。本文提出的海洋信息网络能够与现有的网络融合, 构成岸、海、空、天、潜多空间融合, 声、光、电、磁、热多种探测手段一体, 主被动探测手段协同的海域监测体系, 能够大大提升我国近海防御能力。

6.2 海洋交通运输安全管理

现阶段我国海运发展存在发展标准体系不健全、监测监管手段不到位、重大突发事件应急保障能力不完善等问题。本文提出的海洋信息网络能够进行智能环境感知, 并通过船只信息互联获取航行数据, 利用大数据分析技术能够实现智能规划、智能调控和智能管理, 从而提升海洋交通运输安全管理水平。

6.3 海洋自然资源管理和环境保护

传统的海上资源勘探技术如海上地震技术、海

上电磁勘探技术、海上化学勘探技术等由于在信息接收和监测上存在困难,都很难在深远海资源勘探取得令人满意的效果,且传统的海洋环境监测手段存在发现时间晚、实时监测能力不足的问题。本文提出的海洋信息网络能够通过水上/水下传感器网络、无人自主潜航器等采集水下的各种海洋物理、化学数据,并从中分析得到有用的勘探数据,从而可以指导海洋资源勘探及开发,并对海洋环境进行实时监测,提升海洋环境保护水平。

6.4 海上应急救援

现阶段我国海上应急救援系统还不完善,存在发现时间晚、险情评估不准确等问题,本文提出的海洋信息网络既能够通过各类传感器设备主动发现险情,也可以通过水上/水下通信网络及时接收险情信息,并在发现险情后及时进行评估,并指导应急救援工作,从而能够极大提升海上应急救援工作水平。

6.5 海洋科学考察

蓝色经济需要海洋科技引领支撑,而海洋科技创新以海洋认知为前提。海洋认知能力的提升又依赖于海洋调查、观测、勘探的能力和水平。目前,我国海洋综合探测与研究主要依赖海洋科考船,但科考船存在着船舶和调查装备使用缺乏统筹安排、船舶更新易出现重复建设等问题,新型海洋信息网络的部署和应用将在极大程度上弥补科考船的劣势。在新型海洋信息网络中的某些节点设立观测站,可以对海域的水文信息、生物信息、环境信息等各种科学研究所需要的数据进行全天候的监测并且将数据定时回传,极大地方便了对于海域的科学研究,节省了船舶出行的成本。同时,科考船上进行的科研以船舶为平台,所能使用的设备和探测范围有限,而海洋信息网络覆盖了岸、海、空、天、潜。依托于新型海洋信息网络,可以扩大科考范围,增大数据采集频率,使海洋科学的研究更加全面、深入。

7 结束语

海洋信息网络涉及海洋信息获取、传输、融合应用等多个环节,且各环节越来越以一种综合的方式呈现。本文从信息获取、传输、融合应用等角度综述了海洋信息网络的发展及研究现状,并在深度分析未来海洋信息网络发展趋势的基础上,提出了一种新型海洋信息网络。本文提出的新型海洋信息

网络在原有信息网络的基础上补充了“两静三动”5类节点,构成海域立体大蜂窝新架构,组成岸、海、空、天、潜一体化新体系,实现全天时、全天候、全海域暨“三全”信息覆盖。随后,本文对该新型海洋信息网络的体系架构、科学问题、关键技术、应用前景进行了详细介绍。本文提出的新型海洋信息网络是海洋信息体系研究方面的重要探索性工作,希望能够启发更多的科技工作者投入海洋信息网络研究中来,从而推动形成海洋信息网络的新架构、新标准。

参考文献:

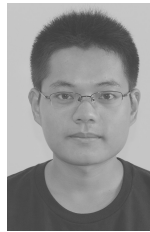
- [1] 陈双,刘韬. 国外海洋卫星发展综述[J]. 国际太空, 2014(7):29-36.
CHEN S, LIU T. A review of the development of foreign marine satellite[J]. Space International, 2014(7):29-36.
- [2] 林明森,张有广,袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望[J]. 海洋学报, 2015, 37(1):1-10.
LIN M S, ZHANG Y G, YUAN X Z. The development course and trend of ocean remote sensing satellite[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(1):1-10.
- [3] GAO H, ZHAO H, SHEN C. Progress in ocean color remote sensing of chinese marginal seas[J]. International Journal of Ecology, 2017, 6(2):82-92.
- [4] 蒋兴伟,林明森,宋涛. 海洋二号卫星主被动微波遥感探测技术研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(7):4-11.
JIANG X W, LIN M S, SONG Q. Active and passive microwave remote sensing technology of the HY-2A ocean satellite mission[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(7):4-11.
- [5] 贾永君,林明森,张有广. 自主海洋卫星遥感技术进展与发展方向[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 21-25.
JIA Y J, LIN M S, ZHANG Y G. Progress and development orientation of independent oceanic satellite remote sensing technology in China[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3): 21-25.
- [6] 蒋博文,滕达,孙利平等. 世界海洋国家海上巡逻机主要机型及其搜索设备概述[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(3):39-47.
JIANG B W, TENG D, SUN L P, et al. Overview of main types of marine patrol aircraft and equipment in maritime countries[J]. Ocean Development and Management, 2014, 31(3):39-47.
- [7] 郑连洋,马建毅. 反潜巡逻机未来发展趋势预测[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(4):12-15.
ZHENG L Z, MA J Y. Development trend prediction of anti submarine patrol aircraft[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(4):12-15.
- [8] 刘松,左文镛,隋智享. 国外海洋科考船现状及总体设计技术发展方向[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(S1):8-14.
LIU S, ZUO W Q, SUI Z X. The present situation and development trends about design of research ships overseas[J]. Ship Science & Technology, 2014, 36(S1):8-14.
- [9] 吴刚. 海洋综合科考船的船型特征及发展综述[J]. 船舶, 2017, 28(a01):7-15.
WU G. Overview on development and features of oceanographic multidisciplinary research vessel[J]. Ship & Boat, 2017, 28(a01):7-15.
- [10] NEHORAI A, PALDI E. Acoustic vector-sensor array processing[J]. IEEE Transactions on signal processing, 1994, 42(9): 2481-2491.

- [11] LEMON S G. Towed-array history, 1917-2003[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(2): 365-373.
- [12] 徐文, 鄢社锋, 季飞, 等. 海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述[J]. *中国科学:信息科学*, 2016, 46(8):1053.
XU W, YAN S F, JI F, et al. Marine information gathering, transmission, processing, and fusion: current status and future trends[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2016, 46(8):1053.
- [13] LI Q H, LI M, YANG X T. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: theoretical analysis[J]. *Acta Acustica*, 2008, 33: 193-196.
- [14] HAYES M P, GOUGH P T. Synthetic aperture sonar: a review of current status[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, 34(3): 207-224.
- [15] JAFFE J S, MOORE K D, MCLEAN J, et al. Underwater optical imaging: status and prospects[J]. *Oceanography*, 2001, 14(3): 66-76.
- [16] 周衡. 无线传感器网络的水下磁探测研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
ZHOU H. Research on underwater magnetic detection based on WSN[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [17] IMO. NAVTEX manual[M]. 2012 ed. London: International Maritime Organization, 2012.
- [18] IMO. GMDSS manual[M]. 2015 ed. London: International Maritime Organization, 2015.
- [19] 国际电工委员. 海上航行和通信设备与系统-B 级船载自动识别系统 (AIS): IEC 62287-1[Z]. 日内瓦: 国际电工委员会, 2017.
IEC. Maritime navigation and communications equipment and systems- Class B shipborne automatic identification system(AIS): IEC 62287-1[Z]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017.
- [20] ILČEV S D. Inmarsat GEO GMSC system[J]. *Global Mobile Satellite Communications Applications*, 2018: 1-100.
- [21] 颜晓星, 车明, 高小娟. 基于北斗卫星的可靠远程通信系统设计[J]. *计算机工程*, 2017, 43(3):62-68.
YAN X X, CHE M, GAO X J. Design of reliable remote communication system based on Beidou satellite [J]. *Computer Engineering*, 2017, 43(3) :62-68.
- [22] 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.
- [23] DU W, ZHENG X M, BAI Y, et al. Integrated wireless networking architecture for maritime communications[C]// *ACIS International Conference on Software Engineering Artificial Intelligence Networking and Parallel/Distributed Computing*. IEEE, 2010: 134-138.
- [24] MU L, KUMAR R, PRINZ A. An integrated wireless communication architecture for maritime sector[C]//*International Workshop on Multiple Access Communications*. Springer, 2011: 193-205.
- [25] KIM H J, CHOI J K, YOO D S, et al. Implementation of MariComm bridge for LTE-WLAN maritime heterogeneous relay network[C]// *International Conference on Advanced Communication Technology*. IEEE, 2015: 230-234.
- [26] CAMPOS R, OLIVEIRA T, CRUZ N, et al. Bluecom+: cost-effective broadband communications at remote ocean areas[C]//*OCEANS 2016*. IEEE, 2016: 1-6.
- [27] MANOUFALI M, ALSHAER H, KONG P Y, et al. Technologies and networks supporting maritime wireless mesh communications[C]//*Wireless and Mobile Networking Conference*. IEEE, 2013: 1-8.
- [28] CHO K, KANG C G, YUN C. Transmission rate control of ASO-TDMA in multi-hop maritime communication network[C]// *International Conference on ICT Convergence*. IEEE, 2012: 85-86.
- [29] CHOI M S, JEONG M A, JEON S M, et al. Ship to shore maritime communication for e-Navigation using IEEE 802.16 e[C]// *International Conference on ICT Convergence*. IEEE, 2013: 759-762.
- [30] 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]// *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. IEEE, 2017: 625-632.
- [31] ANDERSON K D. 94-GHz propagation in the evaporation duct[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, 38(5): 746-753.
- [32] SHI Y, YANG K, YANG Y, et al. A new evaporation duct climatology over the South China Sea[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29(5): 764-778.
- [33] ZHAO X, HUANG S, FAN H. Influence of sea surface roughness on the electromagnetic wave propagation in the duct environment[C]// *IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing*. IEEE, 2010: 467-470.
- [34] PAN Y, MA Y, YANG K, et al. Modeling evaporation duct propagation above the rough sea surface with the aid of the parabolic equation and ray optics methods[C]//*Automation Congress*, 2008. IEEE, 2008: 1-5.
- [35] ZHANG Q, YANG K, SHI Y, et al. Oceanic propagation measurement in the northern part of the South China Sea[C]//*OCEANS 2016*. IEEE, 2016: 1-4.
- [36] 鞠茂光, 刘增基. 利用散射通信构建岸海信息传输系统[J]. *电讯技术*, 2013, 53(3):240-243.
JU M G, LIU Z J. Research on sea-shore information transfer system by troposcatter communication[J]. *Telecommunication Engineering*, 2013, 53(3):240-243.
- [37] 郝英川, 甘启光, 贾梦媛. 散射通信在岛屿中的应用及传播特性分析[J]. *无线电通信技术*, 2014, 40(2):20-22.
HAO Y C, GAN Q G, JIA M Y. Application and propagation characteristics analysis of troposcatter communication on islands[J]. *Radio Communications Technology*, 2014, 40(2): 20-22.
- [38] 曹诚, 鞠茂光, 朱华进. 海岛散射通信应用研究[J]. *通信技术*, 2010, 43(12):152-154.
CAO C, JU M G, ZHU H J. Application of troposcatter communication in island[J]. *Communications Technology*, 2010, 43(12):152-154.
- [39] 段有为. 散射通信在海洋石油开采中的应用研究[J]. *无线电通信技术*, 2007, 33(3):51-53.
DUAN Y W. Application research of troposcatter communication in ocean petroleum exploitation[J]. *Radio Communications Technology*, 2007, 33(3):51-53.
- [40] SULIMOV A I, KARPOV A V. Analysis and simulation of channel non reciprocity in meteor-burst communications[J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2017, 65(4): 2009-2019.
- [41] 周延年, 叶松, 郑君杰, 等. 利用流星余迹通信系统传输海洋数据设计[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(8): 486-489.
ZHOU Y N, YE S, ZHENG J J, et al. Discussion on transmitting ocean data by meteor burst communication system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(8): 486-489.
- [42] 张波, 樊锐轶. 流星通信在海洋信息传输系统中的优势[J]. *信息通信*, 2016(4):212-213.
ZHANG B, FAN R Y. Advantages of meteor burst communication in ocean data transmitting systems[J]. *Information & Communications*, 2016(4):212-213.

- [43] KIM Y B, KIM J H, WANG Y P, et al. Application scenarios of nautical ad-hoc network for maritime communications[C]//OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. IEEE, 2009: 1-4.
- [44] ZHOU M T, HARADA H. Cognitive maritime wireless mesh/Ad Hoc networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(2): 518-526.
- [45] YOSHIKAWA T, KAWASAKI S, TAKASE M, et al. Development of 27 MHz/40 MHz bands maritime wireless ad-hoc networks[C]// International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). IEEE, 2010: 177-182.
- [46] YUN C, LIM Y. ASO-TDMA: ad-hoc self-organizing TDMA protocol for shipborne ad-hoc networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 2012(1): 320.
- [47] HUI B, JEON K H, CHANG K H, et al. Design of radio transmission technologies for VHF band ship ad-hoc network[C]// International Conference on ICT Convergence. IEEE, 2011: 626-629.
- [48] MUN S M, SON J Y, JO W R, et al. An implementation of AIS-based Ad hoc routing (AAR) protocol for maritime data communication networks[C]//International Conference on Natural Computation (ICNC). IEEE, 2012: 1007-1010.
- [49] MROUEH L, KESSAB A, MARTINS P, et al. Radio resource dimensioning in a centralized Ad-Hoc maritime MIMO LTE network[C]//Sarnoff Symposium. IEEE, 2015: 128-133.
- [50] DUAN R Y, WANG J J, ZHANG H M, et al. Touch the sea: energy efficient relay design for maritime multi-hop multicast systems[C]//Global Communications Conference. IEEE, 2018: 1-6.
- [51] WEI T, FENG W, GE N, et al. Optimized time-shifted pilots for maritime massive MIMO communication systems[C]//Wireless and Optical Communication Conference. IEEE, 2017: 1-5.
- [52] YANG T, CUI Z Q, WANG R, et al. A multi-vessels cooperation scheduling for networked maritime fog-ran architecture leveraging SDN[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2017: 1-13.
- [53] XU Y. Quality of service provisions for maritime communications based on cellular networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 23881-23890.
- [54] IN H M, GE Y, PANG A C, et al. Performance study on delay tolerant networks in maritime communication environments[C]//OCEANS 2010 IEEE-Sydney. IEEE, 2010: 1-6.
- [55] KOLIOS P, LAMBRINOS L. Optimising file delivery in a maritime environment through inter-vessel connectivity predictions[C]// International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. IEEE, 2012: 777-783.
- [56] QIN S, FENG G, QIN W, et al. Performance modeling of data transmission in maritime delay-tolerant-networks[C]//Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2013: 1109-1114.
- [57] LAMBRINOS L, DJOUVAS C, CHRYSOSTOMOU C. Applying delay tolerant networking routing algorithms in maritime communications[C]// International Symposium and Workshops on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. IEEE, 2013: 1-6.
- [58] YANG T, LIANG H, CHENG N, et al. Efficient scheduling for video transmissions in maritime wireless communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(9): 4215-4229.
- [59] YANG T, ZHENG Z, LIANG H, et al. Green energy and content-aware data transmissions in maritime wireless communication networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 751-762.
- [60] QU F, WANG Z, YANG L, et al. A journey toward modeling and resolving doppler in underwater acoustic communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(2): 49-55.
- [61] 刘忠, 刘志坤, 罗亚松. 水下自组织网络及军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [62] LIU Z, LIU Z K, LUO Y S. Underwater self-organizing network and military applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [63] RICE J. SeaWeb acoustic communication and navigation networks[C]//The International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. 2005: 18-25.
- [64] RICE J A. US navy SeaWeb development[C]//Proceedings of the Second Workshop on Underwater networks. ACM, 2007: 3-4.
- [65] RICE J, CREBER B, FLETCHER C, et al. Evolution of SeaWeb underwater acoustic networking[C]//OCEANS. IEEE, 2000: 2007-2017.
- [66] CASARI P, KALWA J, ZORZI M, et al. Security via underwater acoustic networks: the concept and results of the RACUN project[C]// JNIC 2015. Servicio de Publicaciones, 2015: 51-58.
- [67] KALWA J. The RACUN-project: robust acoustic communications in underwater networks: an overview[C]//OCEANS. IEEE, 2011: 1-6.
- [68] 朱敏. 水声通信网络节点及组网关键技术[J]. 中国科技成果, 2015(5):20-21.
- [69] ZHU M. Underwater acoustic communication network nodes and key technologies of networking[J]. China Science and Technology Achievements, 2015(5):20-21.
- [70] 郭忠文, 罗汉江, 洪锋,等. 水下无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2010,47(3): 377-389.
- [71] GUO Z W, LUO H J, HONG F, et al. Current progress and research issues in underwater sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010,47(3): 377-389.
- [72] JIANG S. On reliable data transfer in underwater acoustic networks: a survey from networking perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1036-1055.
- [73] DOOSTI-AREF A, EBRAHIMZADEH A. Adaptive relay selection and power allocation for OFDM cooperative underwater acoustic systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 17(1): 1-15.
- [74] NADERI M, PÄTZOLD M, HICHERI R, et al. A geometry-based underwater acoustic channel model allowing for sloped ocean bottom conditions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(4): 2394-2408.
- [75] YANG T C. Spatially multiplexed CDMA multiuser underwater acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(1): 217-231.
- [76] GEETHU K S, BABU A V. Improving energy efficiency performance of ALOHA based underwater acoustic sensor networks[C]//Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics. IEEE, 2016: 277-282.
- [77] ZHANG R, CHENG X, CHENG X, et al. Interference-free graph based TDMA protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 67(5): 4008-4019.
- [78] ZHAO Q, LAMBERT A, BENSON C R. FS-MACA: a future scheduling mac protocol in underwater acoustic networks[C]//Proceedings of the International Conference on Underwater Networks & Systems. ACM, 2014: 3.
- [79] RATNAM Y V, RAO V M, RAO B P. Optimum error control code for underwater acoustic communication[C]//Innovations in Electronics and Communication Engineering. Springer, 2018: 371-377.

- [77] CUI Y, QING J, GUAN Q, et al. Stochastically optimized fountain-based transmissions over underwater acoustic channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 2108-2112.
- [78] GOYAL N, DAVE M, VERMA A K. Adaptive error control technique for cluster-based underwater wireless sensor networks[C]//International Conference on Wireless Intelligent and Distributed Environment for Communication. Springer, 2018: 269-280.
- [79] COUTINHO R W L, BOUKERCHE A, VIEIRA L F M, et al. Design guidelines for opportunistic routing in underwater networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(2): 40-48.
- [80] LI Y, JIN Z, SU Y, et al. An environment-friendly multipath routing protocol for underwater acoustic sensor network[J]. Journal of Sensors, 2017, (2): 24-22.
- [81] CHEN J, WU X, CHEN G. REBAR: a reliable and energy balanced routing algorithm for UWSNs[C]// International Conference on Grid and Cooperative Computing. IEEE, 2008: 349-355.
- [82] SHASHAJ A, PETROCCHIA R, PETRIOLI C. Energy efficient interference-aware routing and scheduling in underwater sensor networks[C]// Oceans. IEEE, 2015: 1-8.
- [83] SUN N, HAN G, WU T, et al. A reliable and energy efficient VBF-improved cross-layer protocol for underwater acoustic sensor network[C]// International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness. IEEE, 2015: 44-49.
- [84] TIAN SI H, YUNSI F. An adaptive routing protocol based on connectivity prediction for underwater disruption tolerant networks[C]//IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2014:65-71.
- [85] ANGUITA D, BRIZZOLARA D, PARODI G. Optical wireless communication for underwater wireless sensor networks: Hardware modules and circuits design and implementation[C]//Oceans 2010. IEEE, 2010: 1-8.
- [86] CARIO G, CASAVOLA A, LUPIA M, et al. SeaModem: A low-cost underwater acoustic modem for shallow water communication[C]//OCEANS. IEEE, 2015: 1-6.
- [87] SENDRA S, LLORET J, JIMENEZ J M, et al. Underwater acoustic modems[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(11): 4063-4071.
- [88] JARUWATANADILOK S. Underwater wireless optical communication channel modeling and performance evaluation using vector radiative transfer theory[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(9): 1620-1627.
- [89] AKHOUNDI F, SALEHI J A, TASHAKORI A. Cellular underwater wireless optical CDMA network: performance analysis and implementation concepts[J]. IEEE Transaction Communications, 2015, 63(3):882-891.
- [90] SHEN C, GUO Y, OUBEI H M, et al. 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate[J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25502-25509.
- [91] ANGUITA D, BRIZZOLARA D, PARODI G. VHDL modeling of PHY and MAC layer modules for underwater optical wireless communication[C]//European Conference on Circuits and Systems for Communications. IEEE, 2010: 185-188.
- [92] TANG S, DONG Y, ZHANG X. Receiver design for underwater wireless optical communication link based on APD[C]// International ICST Conference on Communications and Networking in China. IEEE, 2012: 301-305.
- [93] SWATHI P, PRINCE S. Designing issues in design of underwater wireless optical communication system[C]// International Conference on Communications and Signal Processing. IEEE, 2014: 1440-1445.
- [94] KHALIGHI M A, UYSAL M. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2014, 16(4): 2231-2258.
- [95] OUBEI H M, DURAN J R, JANJUA B, et al. 4.8 Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23302-23309.
- [96] WU T C, CHI Y C, WANG H Y, et al. Blue laser diode enables underwater communication at 12.4 Gbps[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40480.
- [97] XU J, SONG Y, YU X, et al. Underwater wireless transmission of high-speed QAM-OFDM signals using a compact red-light laser[J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8097-8109.

[作者简介]



段瑞洋 (1994-)，男，江苏徐州人，清华大学博士生，主要研究方向为海洋通信、网络资源优化。



王景璟 (1990-)，男，辽宁大连人，清华大学博士生，主要研究方向为海洋通信、复杂网络协同和优化理论。



杜军 (1988-)，女，河北邢台人，博士，清华大学在站博士后，主要研究方向为空间信息网络资源协同与优化理论、信息传播理论、网络经济学理论及应用等。

王云龙 (1990-)，男，云南曲靖人，国家数字交换系统工程技术研究中心博士生，主要研究方向为阵列信号处理、无线网络定位。

沈渊 (1982-)，男，上海人，博士，清华大学副教授，主要研究方向为定位与导航、协作型网络与生物物理。

任勇 (1963-)，男，黑龙江哈尔滨人，博士，清华大学教授，主要研究方向为复杂系统理论与方法及其在通信网络与电子系统中的应用。