



专题：海洋互联网

声电协同海洋信息传输网络

官权升, 陈伟琦, 余华, 陈芳炯, 季飞

(华南理工大学电子与信息学院, 广东 广州 510641)

摘要: 海洋信息的传输需要穿越水—空气界面, 在信息传输网络架构上需要水声网络和无线网络的高效融合。然而, 水声链路性能远远落后于水上无线电链路, 成为制约海洋信息传输网络性能的瓶颈。提出声电协同海洋信息传输网络的新思路, 通过声、电链路的协同协作, 提高网络的性能。通过 3 个应用场景展示声电协同的优势后, 进一步讨论了声电协同海洋信息传输网络的架构与协议以及面临的技术挑战。声电协同不仅是实现空、海一体化网络融合的有效方法, 也是实现海洋网络通信、计算和存储融合的重要方法。

关键词: 海洋信息网络; 无线网络; 水声网络; 声电协同; 网络架构

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018196

Acoustic-radio cooperative marine information network

GUAN Quansheng, CHEN Weiqi, YU Hua, CHEN Fangjiong, JI Fei

School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

Abstract: The transmissions of ocean information have to cross the water-air interface. In this case, the information transmission network architecture requires the efficient integration of the underwater acoustic network and the radio network. However, the performance of the underwater acoustic link lags far behind the radio link, and becomes a bottleneck that restricts the performance of marine information networks. An acoustic-radio cooperative marine information network was proposed, which exploited the cooperation of acoustic and radio links to improve network performance. After demonstrating the advantages of acoustic-radio cooperation through three application scenarios, the network architecture and protocols, as well as the challenges for the acoustic-radio cooperative maritime information network were discussed. Acoustic-radio cooperation was not only an effective method for realizing the integration of air-water networks, but also an important method for realizing the integration of network communications, computing, and storage in marine information networks.

Key words: marine information network, wireless radio network, underwater acoustic network, acoustic-radio cooperation, network architecture

收稿日期: 2018-05-01; 修回日期: 2018-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61431005, No.61671208, No.U1701265, No.61771202); 广东省自然科学基金重大基础研究培育项目 (No.2016A030308006); 广州珠江科技新星计划基金资助项目 (No.201610010043)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61431005, No.61671208, No.U1701265, No.61771202), Natural Science Foundation of Guangdong Province of China (No.2016A030308006), Pearl River S&T Nova Program of Guangzhou (No.201610010043)

1 引言

海洋面积占地球表面积 70% 以上。人类目前已探索的海洋区域只有 5%，还有 95% 的广阔海域是未知的，人类对海底蕴含的丰富资源和能量更是利用甚少。海洋信息网络是人类关心海洋、认识海洋、经略海洋的重要技术手段之一。以物联网等为代表的新型信息网络技术正在试图连接陆地上的所有物体，却难以覆盖广阔的海域，特别是水下的世界。

海洋的传感数据是人类认识海洋的重要信息，比如海洋动力、生态、地质、气象等环境信息。海洋信息一般通过生物、化学等传感机制获取，这些传感器一般部署在水下。传感器中的海洋信息再传到陆地监控中心或海面作业平台。海洋勘探、海洋数据采集、环境监测、公共安全服务等海洋应用均依赖于海洋信息的可靠高效传输^[1]。

海洋信息传输需要经历水和空气两种介质，由水下节点（包括水下传感器节点、水下巡航器等）、水面中继节点（包括船只和浮标）、空中节点（包括卫星和无人机）等组成一个海洋信息传输网络，如图 1 所示。水下传感器先将获取的传

感数据传送到水面节点，再通过水面节点传送到陆地监控中心或海面作业平台。水下的节点之间可以采用海底光缆、线缆、光波、电磁波或声波的方式通信；水面上的节点之间一般采用无线电电磁波通信。

海面上无线电通信已有多种成熟通信系统^[2]。全球海上遇险与安全系统（GMDSS）的中频（MF）、高频（HF）、甚高频（VHF）通信系统可提供中远距离通信覆盖。现有的船舶自动识别系统（automatic identification system, AIS）还允许船舶之间自组网。海事卫星系统（InmarSat）等可以提供除两极外的全球海域的无缝覆盖。在近海，包括商用移动通信网络在内的岸基移动通信系统可以提供高速、低成本的通信方式。利用电磁波在海面蒸汽波导层的超折射传播，还能实现更远距离、更高速率的海洋通信^[3-4]。空中无人机或平流层飞艇的中继可以实现动态的无线网络通信^[5]。

海洋信息传输的难点在于水下^[6-10]。早期的水下信息传输主要采用海底光缆和线缆的有线传输方式。但很显然，由于需要在深水固定布设，有线传输方式的工程难度大、成本高、维护难。电

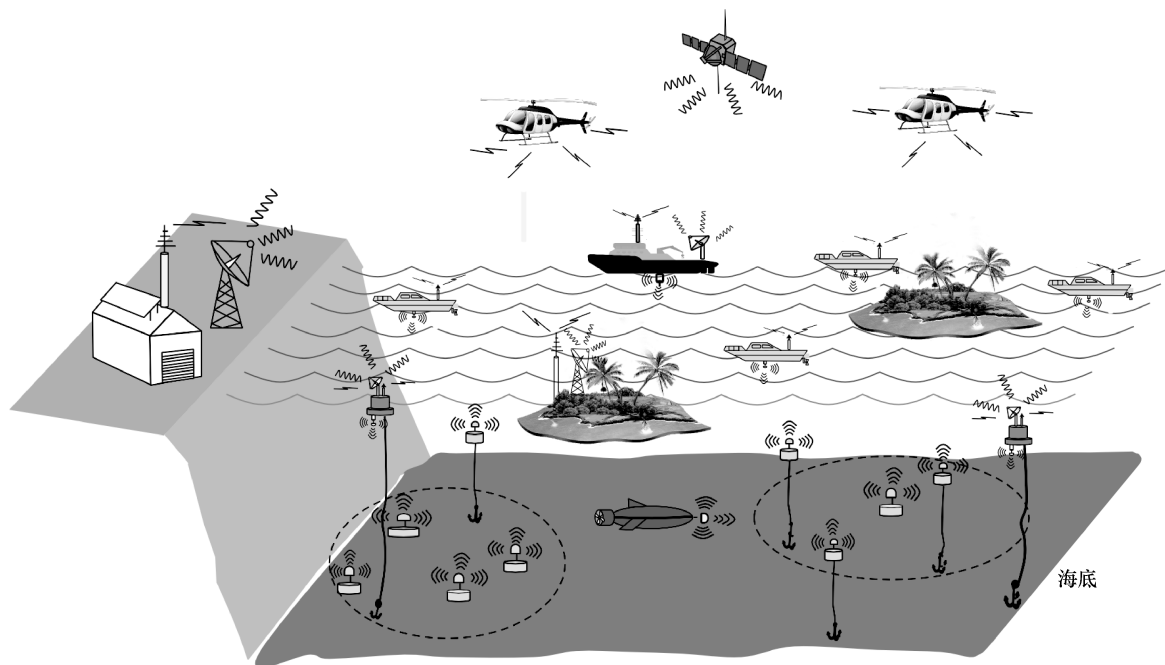


图 1 海洋信息传输网络示意



磁波在水中有不同于空气中的传播特性，海水对电磁波能量的吸收作用很强，只能使用长波、甚长波、超长波通信，但需要大功率发射机和巨大的天线，显然不适用于浮标、传感器和水下移动节点。光通信也是一种水下传输方式。虽然海水对蓝绿光吸收最少，但由于光在水中的散射、衰减等影响，水下蓝绿激光通信也只能达到数百米的通信距离。声波是在水中能远距离传输的唯一载体，称为水声通信。随着水声通信技术的发展，用水声无线连接代替专用线缆连接成为水下监测网的趋势。

无论是光波还是声波，都无法实现跨越水、空两种介质的远距离传输。因此，海洋信息的传输依赖于在水下以水声通信为主要通信方式组成的水声网络以及在水上以电磁波无线通信为主的无线网络。海洋信息传输网络已经形成了水声网络与无线网络混合的网络系统^[11]。这种声（即水声）电（即无线电）混合网络极大地方便了海洋信息的实时传输。例如，在水下部署潜标可以测量温度、盐度、洋流等数据，以往只能依靠海洋综合科学考察船每年从海中回收一次潜标获取和分析数据。声电混合网络的部署可以实现潜标数据的实时传输，提高海洋气候和环境预报的精度，为海洋环境和全球气候研究提供重要技术支撑。

2 声电协同海洋信息传输网络

海洋信息网络是一个由水声链路和无线电链路混合组成的异构网络，可以实现海洋信息的跨区域传输。当前的研究一般将无线网络和水声网络分成两部分独立展开。然而，这两个网络共同传输相同的海洋信息。

注意到，声电混合海洋信息传输网络中，部署在水下的水声链路和水面的无线电链路质量差别较大。水声信道较复杂，具有低带宽、长传播时延、高误码率等特性^[12-13]。复杂水声信道的高

误码率导致频繁的数据分组丢失和连接中断。与无线电链路相比，水声链路的可用带宽极低、丢失分组率高、传输时延长。一般认为水声链路的时延比无线电链路大 5 个数量级，而传输速率低 3 个数量级，水声链路的能效（传输 1 bit 所需要的能耗）也比无线电链路高 3 个数量级，见表 1。水声载波的长传播时延又进一步降低了极有限带宽水声信道的利用率。水下节点一般采用电池供电，并且电池的更换非常困难，因此水下节点也是能量资源受限的系统。

表 1 LinkQuest 水声通信节点和华为微基站的能效比较^[11]

对比项	LinkQuest UWM2000	Huawei RRU3802C
速率/(kbit·s ⁻¹)	1.4	1 792
范围/m	1 000	>1 200
功率/W	6	5
能效/(J·(bit·km) ⁻¹)	4.3×10 ⁻³	2.3×10 ⁻⁶

从表 1 可以看出，由水声链路组成的水下网络成为制约声电混合海洋信息传输网络性能的瓶颈。受限于水下复杂的生态环境，很难大幅度提升水声链路性能。同时注意到，在大多数的应用场景中，水声和无线电链路较大的性能差异，导致了水下水声网络和水面上无线网络严重的性能失配：水声链路较为拥堵，而无线电链路则较为空闲。

利用无线电链路相对多余的空闲链路资源，实现水声链路和无线电链路的协同协作，是克服性能失配、提高海洋信息传输网络性能的一个新思路。声电协同提升海洋信息传输网络性能的原理就像图 2 所示的新木桶理论^[14]。直立的木桶容量由最短的木板决定，但如果以适当的角度倾斜，不需要改变木板的物理局限也可显著提升木桶容量。水声链路是海洋信息传输网络的短板，声电协同可类比于木桶的倾斜。在无法大幅度提高水声链路性能（即提升短板）的情况下，声电协同是一个提高网络容量的解决方案。

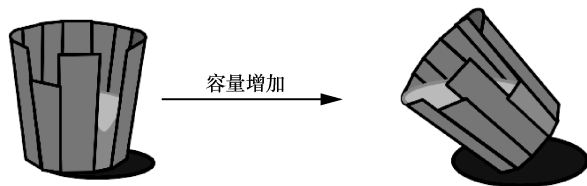


图2 新木桶理论示意

声电协同不但是海洋信息传输网络性能提升的需要,也是声电混合异构网络组网架构的要求。海洋信息传输网络的数据传输一般需要跨越水、空气两种介质,涉及声、电两种通信链路。海洋信息传输网络的实际应用要求声、电两种通信链路协同协作,深度融合。

3 声电协同海洋信息传输网络的应用与挑战

声电协同主要考虑水声和无线电资源的置换,特别是将相对冗余的无线电资源用来辅助水下网络的组网和数据传输。本节通过3个声电协同的应用场景,阐述声电协同海洋信息传输网络性能提升的原理,并讨论实现声电协同海洋信息传输网络的架构与协议。

3.1 声电协同应用场景

(1) 水面声电协同机会路由

机会路由是提高链路不可靠网络的吞吐量的有效途径,利用信道的广播特性,通过允许多个中继节点参与接收和转发数据分组,提高端到端的吞吐量^[15]。但是,机会路由需要大量的控制信令进行候选转发节点集选择、机会转发协调等。控制信令的交换消耗了不可忽略的带宽资源,进一步降低了本来就有限的水声信道可用带宽。水面声电协同路由^[16]的思路是:通过水面节点的无线网络分担水声网络的机会路由信令,最大程度降低水声网络的信令开销,提高水声链路的带宽利用率。

声电协同机会路由在水面上部署多个浮标节点,如图3所示。浮标节点具备水声和无线电接口。水下传感器节点首先通过水声链路将传感数据分组广播给所有水面节点,以提高水面节点接

收数据分组的成功率。多个水面节点形成一个空间机会接收分集,提高了水声链路的传输可靠性。转发的机会存在于多个成功接收数据分组的水面节点,而且每个水面节点接收数据分组的成功率均不同,接收成功的节点才有机会参与数据分组转发。同时,多个水面节点转发相同的数据分组副本会造成带宽资源的浪费。处于最佳数据回传位置(比如最靠近监控中心)的水面节点的转发可以加快数据分组的投递,节省信道带宽资源以及降低端到端时延。水面节点通过无线网络交换控制信令,选取最佳的水面转发节点,并协调转发过程。由于水上无线网络承担了水下水声网络大部分的路由开销,水下节点只需要发送数据分组,最大程度利用了水声信道有限的带宽资源,从而提高海洋信息传输网络的性能。

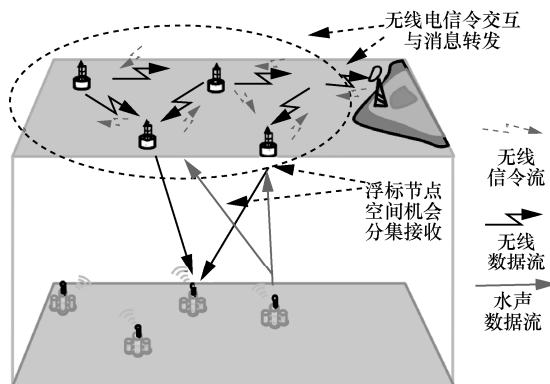


图3 水面声电协同机会路由

(2) 声电异构路径数据传输

海洋信息传输网络拥有的水声和无线电异构链路给数据传输提供了多种路径选择。如图4所示,水下节点的数据可以通过水声链路(如路径1),也可以借助无线网络的协助,通过水面节点(如路径2)或移动空基、天基节点(如路径3)多跳转发。

声、电链路各有其特点。水声链路时延长、带宽低、误比特率高;船舶与无人机之间的无线电链路由于其高度机动,具备连接间断特性;卫星天基无线电链路代价较高,也同样具有长时延

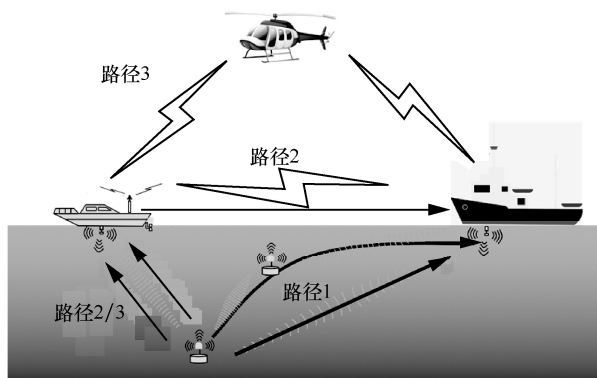


图4 声电异构数据传输路径

的特点。水下节点可以根据其数据特点以及所处网络的特点,选择不同的路径传输数据。水上船舶、无人机无线电链路可用于图像、短视频等大数据量的集中传输;水声链路可用于低频周期性环境传感数据的传输;卫星链路则可用于紧急可靠指令的传输。海底两个远程开发平台之间通信时,发送端和接收端可以通过多跳声电链路进行协同通信,将数据先由水声链路发送到水面,由无线电信道进行中继传输,然后再由水声链路发送到另一个水下开发平台。特别地,两个水下潜艇避免长距离水声通信,利用短距离的水声、无线电异构链路交换消息,可以降低被敌方发现的概率。

(3) 自主水下航行器声电协同数据收集

水下传感器网络还可以利用自主水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 的移动性及其声电多模协作,提高数据收集效率。如图 5 所示,水底部署了多个水下传感器。这些传感器可以直接将传感的数据发送到水面节点进行转发,进而回传到控制中心。但是,水下传感器与水面节点之间的水声链路距离较长,数据直接发送到水面将消耗较大的水声通信机能量。水下传感器节点的部署成本较高,为其更换电池的成本也较高。直接使用长距离水声链路降低了水下传感器节点的使用寿命。而水下 AUV 节点则可以自动回收补充能源。在水下传感器网络中引入水下 AUV,在 AUV 节点移动靠近传感器节点后,通

过 AUV 与传感器节点之间短距离的水声链路, AUV 可以高速率、高可靠性和低能耗地收集传感器的数据。之后, AUV 可以移动靠近水面节点或上浮到水面,将收集到的数据通过无线电模块回传到控制中心。这种 AUV 收集数据的方式虽然消耗了 AUV 的大量能量,却节省了难以部署的水下传感器的能耗,延长了水下传感器网络的生命周期,同时提高了数据收集的可靠性^[17]。

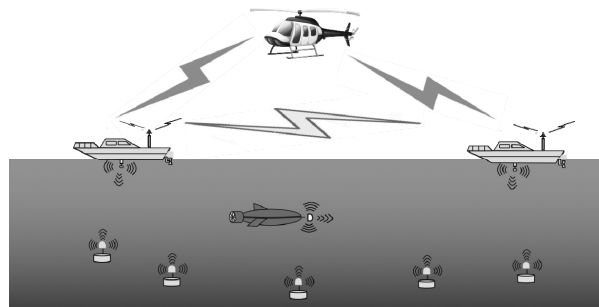


图5 AUV 声电协同数据收集

3.2 声电协同海洋信息网络架构与协议

海洋信息传输网络主要由水下传感器、移动 AUV、水面船只、浮标、波浪滑翔器、水上卫星、无人机等组网节点组成 (如图 1 所示), 包含多种水声和无线电链路, 具备异构的、动态的端到端数据传输路径。面对这样复杂的海洋信息传输网络, 应该思考更加有效的协议架构来组织和管理, 而不是直接应用传统的 TCP/IP 分层协议架构。

目前已经存在很多针对互联网架构反向工程的优化理论。在优化理论框架下, 网络设计被看成一个网络效用最大化问题。协议分层则对应于网络效用最大化问题分解后的子问题。不同分层协议的本地迭代达到子问题的优化, 同时达到全局的优化目标。这样, 协议分层被看成网络效用全局优化问题的异步、分布式计算解决方案。网络效用最大化理论可以帮助理解和设计声电协同海洋信息传输网络架构^[18]。特别地, 网络架构设计需要考虑声、电资源的有限性和可交换性。在声电协作框架下, 网络的分层和协议设计需要考虑哪些声电资源可以置换、如何置换以及置换多

少资源。如图 6 所示,木桶倾斜角的不同决定了木桶的容量,可类比于当声电资源置换不够或者置换过度时,海洋信息传输网络的容量都未能得到最大化。网络效用最大化理论有助于构建最优声电资源置换。

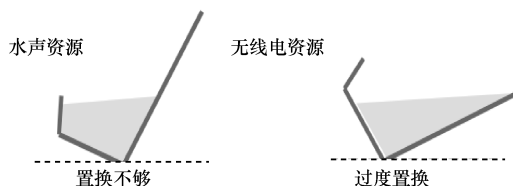


图 6 声电资源置换程度影响网络容量

为了提高网络服务质量能力,应用层需要为网络提供准确的服务质量要求,以便海洋信息传输网络可以高效利用声电资源,比如,提供业务分类或端到端时延要求,使得网络应用成为网络控制的一部分^[19-20]。

在传输层,声电协同海洋信息网络需要新的拥塞控制和可靠控制机制。无线电和水声信道差异较大,特别是水声信道,其带宽更小、时延更大。端到端的反馈信息本身就占用网络带宽资源,还会加剧信道的竞争,降低带宽利用率。为提高网络性能,需要压缩反馈,甚至取消反馈机制。这又产生了新问题,即造成了端到端拥塞控制和可靠控制的失效。造成这种问题的根源是拥塞控制和可靠控制高度耦合,且均依赖于端到端反馈的有效性和准确性。为应对这个问题,声电协同网络首先应当解耦拥塞控制和可靠控制^[21-22]。另外,较大的往返时间(round-trip time, RTT),无论对于端到端的拥塞控制还是可靠控制,都是极大的挑战。声电协同海洋信息网络需要摒弃传统网络依赖端到端反馈的可靠控制和拥塞控制方法,采用逐跳或者逐域的控制方法,对无线电子网络和水声子网络分别采用不同的控制方法^[23-24]。

网络层是实现声电协同的关键。声电协同是连接水上无线电子网和水下水声子网的桥梁。无线网络和水声网络可能使用了不同的链路级地

址编码方式。这就需要在网络层进行地址的管理和转换,消除对复杂网关以及网关管理的需要,以便数据在不同子网进行多跳转发。特别是当海洋信息传输网络需要接入互联网时,网络层的地址需要支持基于 IP 的通信。注意到,水声信道的带宽较低,IP 的地址和分组头很大,这些开销降低了带宽利用率。利用 IETF 6LoWPAN^[25]技术压缩声电协同的网络地址是一个重要技术方向。数据的传输路径由网络层的路由功能确定,从第 3.1 节的声电协同场景可以看出,传输路径的选择在很大程度上决定了端到端的性能。海洋信息网络的数据传输路径由异构的动态声电链路组成。声电协同路由不仅要确定路径的链路各使用何种信道,还要确定何时使用这些信道。另外,广阔的海洋很难做到网络的强连接覆盖,网络层路由尤其需要支持移动节点存储—携带—转发式的延迟容忍(delay tolerant)和中断容忍(disruption tolerant)路由。

对声、电链路的管理是实现声电协同的基础。链路层/物理层对声、电信道信息的准确感知不仅可以提高链路的性能,也是高层协议的决策基础。海洋环境较为复杂,不管是水上还是水下。环境要素对信道状态也有相当大的影响。如水下的温度、深度、压强、生物密度、洋流等,水上的空气湿度、气候等,都会影响信号的衰减和多径效应。复杂的环境要素也给声电协同链路管理带来了挑战。

4 海洋信息传输网络的现状与趋势

海洋开发与海洋环境监测的巨大需求,驱动着人类对海洋的持续探索。早在 20 世纪 50 年代,美国针对苏联潜艇的声音监测系统(SOSUS),在美国本土东、西两侧的大西洋和太平洋深水中建立起一系列水听器阵,通过专用缆线相互链接,并最终与岸基网络连接,电缆长度达 30 000 海里(55 560 km)。苏联也建设过类似系统。以 SOSUS



系统为基础,美国空海作战系统中心于20世纪90年代研发了综合水下监视系统(integrated undersea surveillance system, IUSS)^[26],采用了光纤传输技术。IUSS不仅能够有效探测沿海活动的核动力潜艇和安静型常规潜艇,也为编队指挥提供准确的威胁位置信息,给美海军各种反潜战平台提供了所需的反潜信息。这个庞大的水声警戒网在战略反潜中起了很重要的作用。

随着水声通信技术的发展,用水声无线连接代替光缆、线缆连接成为海洋监测网的趋势。美国1993年提出的自主海洋采样网(autonomous ocean sampling network, ASON)^[27]首次提到水声网的概念。美国国家海洋学研究伙伴计划随后实施了一项用于水声通信、水下网络传输及海军其他使命的遥测前沿观测网(front-resolving observational network with telemetry, FRONT),并在1998年提出用于支撑FRONT的称为海网(Seaweb)的水下声网的概念^[28]。历经12年的Seaweb是美国海军实验性远程声纳和海洋网络计划中的重要部分,是目前比较成功的水声网络概念。从1998年开始,Seaweb每隔一两年做一次实验,在2005年的实验中已实现固定节点和移动节点的混合组网,并已实现媒介接入控制、路由等组网功能。在Seaweb基础上,2005年美国海军研究室和国防部先进研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)联合提出PLUSNet(persistent littoral undersea surveillance network)计划^[29]。该计划打算利用10年的时间,建设一个覆盖美国近海水下无线持续监测网络。以水下潜/浮标为固定节点、水下无人平台为活动节点构建网络,在实现监测的同时为巡航导弹、潜艇提供导航,并通过水面无线网络与指挥系统连接。欧洲也推出类似的ACME计划^[30]。

国内在海洋监测、水声组网方面起步较晚,“十一五”期间开展了海底长期观测网络关键技术

的研究。2009年4月,同济大学等科研单位在上海附近海域进行了海底观测组网技术的实验,并且建立了中国第一个用专用线缆连接的海底综合观测实验与示范系统。2016年底,中国科学院实现了潜标数据的实时传输。在水面上放置了一个数据实时传输的浮体,它与潜标通过无线和有线两种方式连接。潜标将数据传输给浮体,浮体发射到卫星,然后再反馈回陆地实验室。

从以上海洋观测网的实践看出,海洋信息无线实时传输的关键是实现跨水—空气界面的信息交换。海面上的无线通信手段较为丰富,无论是VHF通信、船舶自动识别系统还是海事卫星系统,几乎都基于电磁波的无线网络。为此,利用无线电波实现穿越水—空气界面通信是一个低成本方案^[31-32]。激光通信是另外一个可选方案^[33]。然而,无论是电磁波还是激光,都无法在水下实现长距离通信。

海洋信息的获取和传输不可避免要求水声网络和水上无线网络的融合,而不是简单地通过水面网节点连接水上和水下两个独立的网络。虽然海洋信息传输网络已被注意到是一个声、电链路混合的网络,但事实上,水上无线网络和水声网络的研究工作还在独立开展。具备水声和无线电通信接口的水—空气界面网关是连接水上无线网络和水声网络的重要桥梁。美国国防部先进研究计划局也关注到了这个问题,于2015年发布了“下一代水下通信系统(Next Generation Undersea Communications)”的研究计划征集^[34],其中水下—水面接口与网关是其重点方向之一。本文提出的声电协同将是水下—水面网关融合水上无线网络和水声网络的重要方法。声电协同也将是实现海洋信息网络通信、计算和存储融合的重要方法。

5 结束语

万物互联向水下、海洋延伸是信息网络的发展

趋势。本文针对海洋信息传输网络的应用和技术挑战,提出了声电协同的技术框架,克服了水声链路对网络性能提升的限制。本文还深入讨论了声电协同海洋信息传输网络的架构和协议。未来,海洋信息传输网络还进一步与陆上网络互联互通,接入互联网^[35]。随着海洋开发的发展,陆上信息网络向海洋、水下延伸是必然趋势,将形成空、天、地、海一体化的万物互联未来网络架构^[36]。

参考文献:

- [1] 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, LIN S F, JI F, et al. A review of researches on the acquisition, transmission, processing and integration of oceanic information[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016, 46(8): 1053.
- [2] 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(6).
XIA M H, ZHU Y M, CHEN E H, et al. The status quo of the development of marine communications and the challenges of the times[J]. Scientia Sinica Informationis, 2017(6).
- [3] DINC E, AKAN O B. Beyond-line-of-sight communications with ducting layer[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(10): 37-43.
- [4] ZAIDI K S, JEOTI V, DRIEBERG M. Fading characteristics in evaporation duct: fade margin for a wireless link in the south china sea[J]. IEEE Access, 2018(6): 11038-11045.
- [5] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [6] SOZER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal on Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.
- [7] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 33(3): 257-279.
- [8] 许肖梅. 水声通信与水声网络的发展与应用[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 811-816.
XU X M. Development and applications of underwater acoustic communication and networks[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(6): 811-816.
- [9] 郑君杰, 阮鲲, 李延宾, 等. 水声通信网络问题研究[J]. 电信科学, 2009, 25(10): 63-66.
ZHENG J J, RUAN K, LI Y B, et al. Research of underwater acoustic communication network[J]. Telecommunications Science, 2009, 25(10): 63-66.
- [10] 张曦, 闫涛, 王红卫, 等. 基于交叉传输的水声通信网络 MAC 协议[J]. 电信科学, 2013, 29(4): 106-111.
ZHANG X, YAN T, WANG H W, et al. A MAC protocol based on interleaving transmission for underwater acoustic network[J]. Telecommunications Science, 2013, 29(4): 106-111.
- [11] LIU Y, CHEN F J, JI F, et al. A new amphibious network infrastructure with hybrid acoustic and radio links[Z]. 2013.
- [12] CHEN Y, JI F, GUAN Q. Adaptive RTO for handshaking-based mac protocols in underwater acoustic networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2018.
- [13] STOJANOVIC M, PREISIG J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1): 84-89.
- [14] GORBAN A N, POKIDYSHEVA L I, SMIRNOVA E V. Law of the minimum paradoxes[J]. Bull Math Biol, 2011, 73(9): 2013-2044.
- [15] CHAKCHOUK N. A survey on opportunistic routing in wireless communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2214-2241.
- [16] LIU M, JI F, GUAN Q, et al. On-surface wireless-assisted opportunistic routing for underwater sensor networks[Z]. 2016.
- [17] LIU Z, GUAN Q, CHEN F, et al. Outage probability analysis for unmanned underwater vehicle based relaying[C]//The 11th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems, October 24-26, 2016, Shanghai, China. New York: ACM Press, 2016.
- [18] CHIANG M, LOW S H, CALDERBANK A R, et al. Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architectures[J]. Proceedings of the IEEE, 2007(95): 255-312.
- [19] GUO M, JIANG S, GUAN Q. QoS provisioning performance of IntServ, DiffServ and DQS with multi-class self-similar traffic[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2013, 24(6): 600-614.
- [20] GUO M, GUAN Q, JIANG S, et al. A differentiated queueing service based admission control policy for wireless multimedia[C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 10-14, 2014, Sydney, NSW, Australia. Piscataway: IEEE Press, 2014.
- [21] CAI Y, JIANG S, GUAN Q, et al. Decoupling congestion control from TCP for multi-hop wireless networks (semi-TCP): an implementation study[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013(149): 1-140.
- [22] CHEN W, GUAN Q, JIANG S, et al. Joint qos provisioning and congestion control for multi-hop wireless networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2016(19): 1-11.
- [23] CHEN W, YU H, GUAN Q, et al. Reliable and opportunistic transmissions for underwater acoustic networks[J]. IEEE Network, 2018, PP(99): 1-6.
- [24] GUO B, MAO H, JIANG S, et al. Domain-by-domain implementation of semi-TCP in all-optical networks[Z]. 2014.
- [25] KUSHALNAGAR N, MONTENEGRO G, SCHUMACHER C. IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs): overview, assumptions, problem statement, and goals: RFC4919[S]. 2007.
- [26] Integrated undersea surveillance system (IUSS)[Z]. 2010.
- [27] CURTIN T B, BELLINGHAM J G. Progress toward autono-



- mous ocean sampling networks[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2009, 56(3-5): 62-67.
- [28] RICE J, GREEN D. Underwater acoustic communications and networks for the us navy's seaweb program[C]//Second International Conference on Sensor Technologies and Applications, August 25-31, 2008, Cap Esterel, France. Piscataway: IEEE Press, 2008: 715-722.
- [29] GRUND M, FREITAG L, PREISIG J, et al. The PLUSNet underwater communications system: acoustic telemetry for undersea surveillance[C]//Oceans, Sept 18-21, 2006, Boston, MA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1-5.
- [30] ACAR G, ADAMS A E. ACMENet: an underwater acoustic sensor network protocol for real-time environmental monitoring in coastal areas[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2006, 153(4): 365-380.
- [31] PALMER J, YUEN N, ORE J P, et al. On air-to-water radio communication between UAVs and water sensor networks[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 26-30, 2015, Seattle, WA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 5311-5317.
- [32] HATTAB G, ELTARHUNI M, ALALI M, et al. An underwater wireless sensor network with realistic radio frequency path loss model[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013(7): 188-192.
- [33] 贺岩, 周田华, 陈卫标, 等. 水下与空中平台蓝绿激光通信关键技术研究[J]. 科技资讯, 2016, 14(1): 176-176.
- HE Y, ZHOU T H, CHEN W B, et al. Headline: key technology research of laser communication between underwater and airborne platform[J]. Science & Technology Information, 2016, 14(1): 176-176.
- [34] Defense Advanced Research Projects Agency. Request for information-next generation undersea communications[Z]. 1989.
- [35] JIANG S M, CHEN H. A possible development of marine internet: a large scale cooperative heterogeneous wireless network (extended version)[J]. Journal of Communication & Computer, 2015, 12(4): 199-211.
- [36] 李贺武, 吴茜, 徐恪, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J].

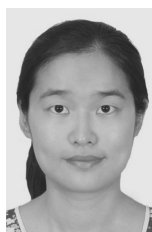
科技导报, 2016, 34(14): 95-106.

LI H W, WU Q, XU K, et al. Research progress and trend of the integrated network of heaven and earth[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 95-106.

[作者简介]



官权升 (1985-), 男, 博士, 华南理工大学电子与信息学院教授, 主要研究方向为无线网络、水声网络、声电协作网络等。



陈伟琦 (1986-), 女, 华南理工大学电子与信息学院博士生, 主要研究方向为多跳水声网络技术。



余华 (1973-), 男, 博士, 华南理工大学电子与信息学院教授, 主要研究方向为无线通信与水声通信。

陈芳炯 (1975-), 男, 博士, 华南理工大学电子与信息学院教授, 主要研究方向为信号探测与估计、阵列信号处理和无线通信。

季飞 (1970-), 女, 博士, 华南理工大学电子与信息学院教授, 主要研究方向为无线通信与网络、水声通信与网络。