

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2023.01.009

文章编号:1672-3767(2023)01-0079-12

# 海洋物联网水面及水下多模通信技术研究进展

罗汉江,卜凡峰,王京龙,杨玉婷

(山东科技大学 计算机科学与工程学院,山东 青岛 266590)

**摘要:**海洋物联网水面及水下多模通信借助通信技术的多样性和灵活性,实现高效可靠的数据传输,引起了研究者的广泛关注。该技术旨在利用水声、无线电、光学等多种无线通信技术的互补性,并融合软件定义技术、强化学习、深度学习等人工智能技术,以提供高效、可定制、智能化的自适应网络。本研究首先讨论了海洋物联网水面及水下多种无线通信及融合技术;然后,重点针对海空跨介质多模通信技术及水下多模通信技术的研究进展作了系统的综述;最后,针对海洋物联网水面及水下多模通信技术的未来发展进行探讨与展望。

**关键词:**海洋物联网;水面及水下网络;多模通信技术;海空跨介质通信;研究进展

**中图分类号:**TP393

**文献标志码:**A

## Research progress of surface and underwater multimodal communication technology of marine internet of things

LUO Hanjiang, BU Fanfeng, WANG Jinglong, YANG Yuting

(College of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** With the diversity and flexibility of communications, the surface and underwater multimodal communication technology of the marine internet of things can achieve reliable and efficient data transmission, which has attracted the attention of researchers. By using the complementarity of different wireless communication technologies, such as acoustic, radio and optical waves, and by integrating artificial intelligence technologies, such as software definition technology, reinforcement learning, and deep learning, this technology helps to provide high-efficient, customizable, intelligent, and adaptive networks. This paper first discusses the surface and underwater wireless communication and fusion technologies of marine internet of things. Then, it reviews the research progress focusing on the air-water cross-boundary and underwater multimodal communications systematically. Finally, it explores and predicts the future development directions of surface and underwater multimodal communication technologies of marine internet of things.

**Key words:** marine internet of things; surface and underwater network; multimodal communication technology; air-water crossboundary communication; research progress

随着我国海洋强国战略的推进及智慧海洋的快速建设,海洋物联网技术受到了广泛关注。海洋物联网的发展必然要融合 6G、软件定义技术、强化学习、深度学习等人工智能技术,构建“空天地海”多维度一体化网络,推动具有全域感知及泛在连接、高带宽、低延时、高速可靠数据传输的新型海洋物联网的研究与应用<sup>[1-3]</sup>。然而,由于水-气通信介质的差异、恶劣海洋环境的影响,导致在建立陆基站、机载节点(即卫星、飞机和无人机)和水下传感器节点之间的网络连接时,存在海空跨介质通信信道复杂度高、水下网络传输效率低

**收稿日期:**2021-09-07

**基金项目:**国家自然科学基金项目(62072287);山东省自然科学基金项目(ZR2020MF059)

**作者简介:**罗汉江(1968—),男,山东淄博人,教授,博士,主要从事人工智能、智慧海洋、工业互联网、多智能体强化学习、无人机及机器人集群智能协同等研究。

等问题<sup>[4-5]</sup>。

为了解决上述问题,研究者提出多模通信的概念。海洋物联网多模通信是指在通信设备上集成两个或多个物理层技术,包括基于不同的物理层技术(如声学 and 光学)或基于相同物理层技术的不同表现(如工作在不同且互不干扰频段上的多个声学系统中)<sup>[6]</sup>,以解决海空跨介质通信和 underwater 高速网络构建等问题。海洋多模通信网络体系结构由水面和水下两个部分组成,如图 1 所示。其中,水下传感器由锚定节点和移动节点组成,节点之间采用声波和光波的混合通信进行水下传感数据的收集和转发;水面节点和机载节点充当水下数据接收器,通过声或光通信接收水下数据,然后使用无线电通信转发至陆基站进行数据处理和分析。然而,上述无线通信技术在单独应用时各有优缺点。例如,无线电通信能够提供广泛的海洋表面网络覆盖,但高频无线电波在海水中传播时会遭受严重衰减,限制了其在水下的通信距离<sup>[3]</sup>;水下声通信(underwater acoustic communication, UAC)作为水下无线通信的补充技术,既能以数百 bps 的数据速率传输数公里,也能以数十 kbps 的数据速率传输数百米<sup>[7]</sup>,但受限于水下声波的传播速度和频率,UAC 存在时延高、能量消耗大等缺陷<sup>[8]</sup>。为了弥补 UAC 的不足,近年来提出的低能耗、高带宽、高速率的水下无线光通信(underwater wireless optical communication, UWOC)技术受到广泛关注<sup>[9-10]</sup>。然而,UWOC 通信距离短,且易受海洋浊度和光对准的影响,导致其在鲁棒性方面远不如 UAC<sup>[11-13]</sup>。

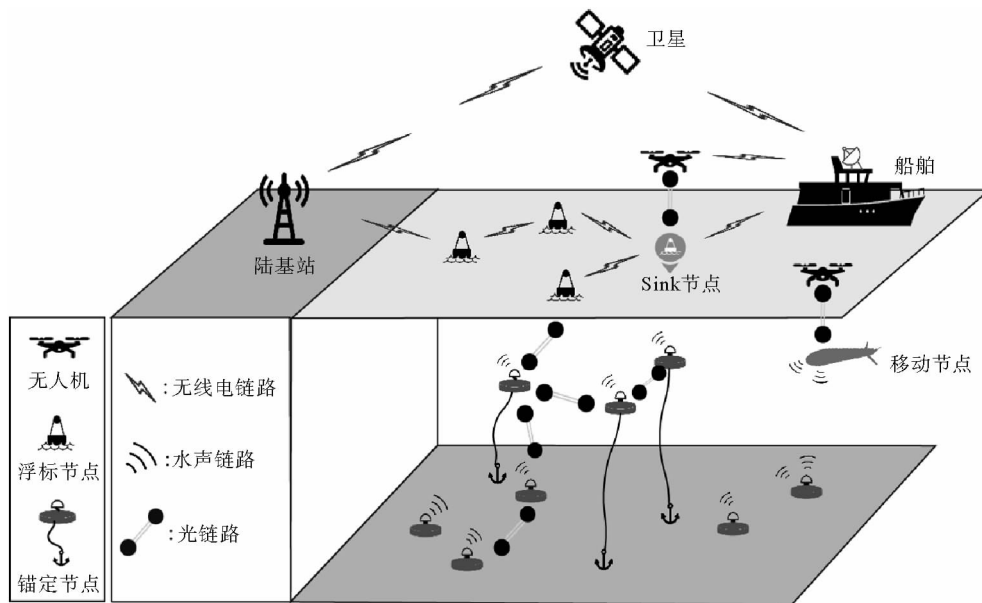


图 1 海洋多模通信网络体系结构

Fig. 1 Marine multimodal communication network architecture

正是由于多种通信技术的性能差异,促进了多模通信的发展。因此,如何融合多种无线通信技术,实现优势互补,构建高效的海空跨介质通信和 underwater 无线传感器网络成为海洋物联网多模通信研究的重点。然而,海空跨介质多模通信虽然能够有效地实现水面与水下网络的互联互通,但仍存在以下问题:①通过配有多个收发器接口的浮标建立中继点可以实现海空跨介质通信,但存在水面与水下网络效率不均衡、信道模型复杂等问题<sup>[14-15]</sup>;②海上中继节点目标明显,面临安全隐患,并且额外的跳数增加了端到端延迟,亟需更加灵活、安全、高效的跨介质通信技术<sup>[16]</sup>。此外,随着水下应用对网络性能要求的提升,水下多模通信在构建可靠、节能、高速网络时存在以下问题:①多频段声波信号能够实现中低速网络数据传输,但存在噪声干扰和能量消耗大等问题,如何根据信道状态和应用需求动态调整通信模态是声波多模通信面临的主要问题<sup>[17]</sup>;②为建立高速水下网络,UWOC 亟需克服光对准严格和通信距离有限等问题<sup>[18-19]</sup>。因此,开发可靠、高效的水面及水下多模通信技术对推动构建新型海洋网络具有重要作用。

## 1 多模通信技术基础

为推动构建新型海洋物联网,水面及水下高效网络连接需要结合多种无线通信技术。但海洋传感器在节点类型、产品型号、数字编码方式以及物理结构上的差异,导致多模通信需要更复杂的逻辑和系统来支持多模融合。本节首先介绍各种海洋无线通信技术,进而阐述多模通信网络融合技术。

### 1.1 海洋无线通信技术

1) 无线电通信。无线电波通过电磁波携带数据信息,在空气介质中具有良好的传输表现,是目前海面节点与陆基站、机载节点之间通信的主要技术<sup>[15]</sup>。但电磁波在导体中的穿透深度与其频率直接相关,频率越高,衰减越大,导致电磁波在具有导电性质的海水中传输时造成严重衰减,传播距离受到严重限制<sup>[3, 20]</sup>。尽管远距离水下无线通信可使用无线电通信技术,但需要使用大功率巨型天线<sup>[21]</sup>。

2) 水声通信。UAC通过声波携带数据信息,传播距离在数百米到数十公里之间,是目前水下无线传感器网络应用最广泛的通信技术<sup>[22]</sup>。此外,UAC通信距离与带宽和通信频率成反比,通信速率与通信频率成正比,使得通过不同UAC频率的组合搭配,可以满足不同应用的网络需求<sup>[23]</sup>。例如,低频远距离低速率传输和低频近距离高速率通信。然而,UAC信道会随着时间、空间和频率的变化而变化,具有严重的多径效应和多普勒频移,导致其存在带宽低、时延高、功耗大等问题<sup>[20]</sup>。

3) 水下无线光通信。UWOC以光波作为信息载体进行通信,具有高带宽、低时延、低能耗等特点,能够满足水下实时视频传输和跨水-气介质直接通信等需求<sup>[24]</sup>。通信光源主要包括激光二极管(laser diode, LD)和发光二极管(light-emitting diode, LED),普遍采用低损耗、低时延、高穿透性的蓝绿光波段(波长在450~550 nm)<sup>[25]</sup>。其他如红色垂直腔面发射激光器,可在6 m范围内达到10 GB/s的数据传输速率<sup>[26]</sup>。然而,UWOC易受环境光噪声、光对准、湍流及障碍物等因素的影响,通信稳定性较差。此外,由于水中杂质对光子具有吸收和散射效应,使得UWOC通信距离有限<sup>[27]</sup>。

4) 磁感应通信。磁感应通信因具有高传播速率、安全、经济高效等优点,近年来备受关注<sup>[28]</sup>。磁感应技术使用两个有线线圈进行信息交换,可以穿透水与空气介质层,实现海空跨介质通信<sup>[29]</sup>。但因磁场衰减和涡流损耗程度与通信传输距离呈正相关,水下磁感应通信距离较短。磁感应通信受环境噪音影响较小,但需要固定的天线布置,目前在水下应用还处于起步阶段,相关理论有待进一步完善<sup>[30]</sup>。

表1总结了海洋物联网多种无线通信技术特征。从表1可以看出,多种无线通信技术各有其优缺点,但在通信时延、速率、距离、功耗等方面具有互补性。比如,在海面部署无线通信网络,可结合海面无线电通信和水声通信,实现海空跨介质通信;在水下部署无线通信网络,可结合水声通信的长距离、低速率和光通信(或磁感应通信)的短距离、高速率,实现低功耗、高效通信。因此,可根据具体应用需求,将多种通信技术互补集成,提高海洋无线网络通信性能。

表1 海洋物联网无线通信技术特征

Table 1 Characteristics of wireless communication technology of marine internet of things

通信种类	传播速度/(m/s)	数据速率/bps	通信距离/m	发射功率/mW
海面无线电通信	$3.0 \times 10^8$	1 k~100 k+	10~1 k+	—
水声通信	$1.5 \times 10^3$	1 k~100 k+	100~10 k+	1 000~10 000+
水下无线光通信	$3.3 \times 10^7$	1 M~1 G+	10~100+	10~1 000+
磁感应通信	$3.3 \times 10^7$	8 k~1 M+	1~100	1~100+

### 1.2 多模通信网络融合技术

传统的海洋物联网存在网络架构封闭、不灵活等缺点,要实现海洋物联网多模通信的高速可靠传输,需要多种技术的融合支撑,主要技术如下。

1) JANUS通信标准。由于声、光、电通信设备标准不同,多模通信受转发处理硬件和数字编码技术不

兼容的限制,导致异质网络之间通信困难<sup>[31]</sup>。为了推动不同通信设备之间的互操作性,NATO 的研究人员制定了首个水下通信国际标准,即 JANUS 通信标准<sup>[32]</sup>,使用 FH-BFSK 物理层编码方案。JANUS 被用于水下网络节点之间的首次通信、发现和参数交换,然后采用更高速率的其他调制方案,实现更高的数据速率。文献[33]在水下实验了 JANUS 通信过程,通过部署由 4 个水下设备组成的网络,并使用 JANUS 进行初始接触和参数协商,然后切换到专有通信方案。

2) 跨层优化。多模通信需要实现多种通信技术的融合,而每种通信技术在数据速率、传输距离、传播速度以及发射功率不同,导致在传输层拥塞窗口大小、网络层路径选择、数据链路层调整链路状态和物理层的发射功率存在差异。跨层优化将传统分层网络中的几层或者多层进行联合优化,通过网络层之间的信息交互、网络资源的合理分配及网络效能的最大发挥,为多模通信提供了方法基础<sup>[34-35]</sup>。文献[36]提出一种基于多频段水声传感器网络噪声感知 MAC(multiple access control)协议,通过跨层优化,利用物理信道质量调整声波频率以抵抗环境噪声干扰。文献[37]提出一种声光混合路由协议,通过联合优化物理层和网络层,根据传输能耗和时延选择最佳声光通信技术,实现自适应路由。

3) 软件定义网络。跨层优化实现多模通信需要专有的路由算法支持,其可编程性和扩展性较差。软件定义网络(software defined network,SDN)的结构如图 2 所示,其核心是将硬件(数据平面)和软件(控制平面)分离,由软件驱动数据分组转发和网络控制,网络节点根据具体应用需求对数据报文进行重新计算和操作<sup>[1,38]</sup>。通过调制解调器控制系统集中管理,多模通信设备只需要区分其传感器,不需要合并不同的调制解调器。通过结合网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)和软件定义的调制解调器(software defined modem, SDM),使用基于 SDN 的无线网络架构可实现网络资源最优化配比,发挥声光电设备的优势<sup>[39-40]</sup>。文献[41]将 SDN 引入水下通信系统中,为 SDN 水下应用和发展提供了理论支撑。

海洋物联网将传感器部署在海面、海中和海底,通过构建海洋无线立体观测网络,为海洋环境观测、灾害预警、资源探测、军事安全等提供实时准确的观测信息<sup>[42]</sup>。然而,由于水面水下通信介质的差异、复杂的海洋环境、水下信号的衰减以及多样的应用需求,对水面水下网络的互联互通以及水下高速网络的构建提出新的挑战。下面主要从海空跨介质多模通信和水下多模通信,阐述如何结合多模通信技术,发挥声光电技术优势,实现可靠、高速的海洋物联网。

## 2 海空跨介质多模通信技术应用

海空跨介质技术作为连接水下传感器网络和水面无线网络的关键技术,对构建水面水下一体化网络具有重要意义。由于受到海空不同的传输介质以及海洋环境的影响,如何实现跨越水-气界面的可靠通信一直是学术界的研究热点。下面分别对基于中继的跨介质通信和无中继的跨介质通信进行说明。

### 2.1 基于中继的跨介质通信

由于声波在水下传播时具有衰减小、传播距离远等特点,因此声波是水下无线通信的首选媒介。但声波从水下传播到水面时,会被反射而无法穿过水-气界面。水上无线通信领域普遍采用基于无线电的射频(radio-frequency, RF)通信,而海水作为一种导体,对无线电波具有天然的电磁屏蔽作用,无线电波在射入水中会迅速衰减而无法满通信需求<sup>[43]</sup>。

为了解决跨水-气界面通信难的问题,一种可行方案是在海面上部署漂浮的中继节点(比如浮标),配备多种发射和接收设备,用于水面和水下传感器网络之间的数据转发任务。例如,同时为中继节点配备 UAC 和 RF 两种模式通信系统,利用声学收发器与水下传感网络交换信息,通过无线电收发器与陆上的基站进行

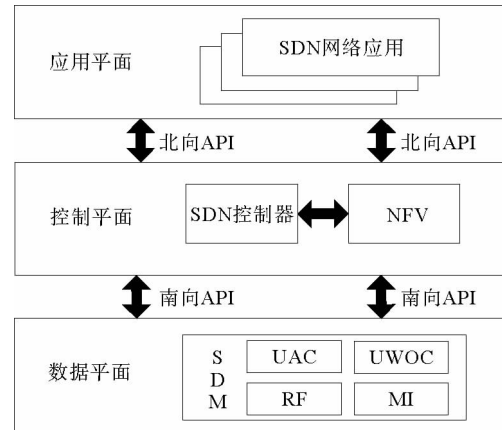


图 2 软件定义网络结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of software-defined network architecture

通信<sup>[44]</sup>。海空跨介质通信方面的研究主要集中在海面部署网关的应用场景,没有充分挖掘水面、水下的声电协同数据传输的潜力。2012年,ORourke等<sup>[45]</sup>提出基于深度调整的水下多模通信方案,每个节点均配备水下声学、海面射频调制解调器以及深度调整系统。传感器节点根据需要发送的数据量权衡网络的能量成本和数据延迟,进而确定是否浮出水面搭建RF链路。然而,节点的升降会导致网络延迟的增加。为充分挖掘海面部署网络与水下平行网络的声电协同数据传输潜力,2019年,Luo等<sup>[14]</sup>提出在海面部署大量浮标节点构建海面网络,然后结合应用的服务质量(quality of service, QoS)要求,利用UAC-RF信道互补的优势来提高网络可靠性和吞吐量,根据数据包对可靠性和时延的要求,自适应地选择声电组合方式转发数据。

以上协议虽然实现了高效的浮标中继跨介质通信,但缺乏对不同通信介质下的信道模型分析。2020年,Li等<sup>[15]</sup>在RF-UWOC多模海空跨介质通信模型中,提出端到端信噪比的累积分布函数和概率密度函数。实验结果表明,RF链路的衰落和由气泡、水温引起的UWOC紊乱是影响系统性能的主要因素。为了克服光链路不稳定问题,2021年,Li等<sup>[46]</sup>提出一种基于硅光电倍增管阵列的多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)方案,以减少海洋光学湍流的影响,并放宽对准要求。另外,RF在连接海面与基站时容易受到障碍物(如海浪、船只等)的影响,2021年,Agheli等<sup>[47]</sup>提出使用自由空间光(free-space optical, FSO)通信作为UWOC和RF之间的中继通信技术,提供无遮挡视距通信,通过对信道模型的分析,得到端到端中断概率和平均误码率。

基于中继的跨介质通信实现较为简单,只需要为中继节点配备多模的通信设备。但其缺点也十分明显:一方面,浮标需要预先部署在海面,并且需要考虑水下节点位置,再选择合适的部署位置;另一方面,在安全性要求较高的场景中,例如军事行动,浮标位置的暴露将成为安全隐患。

## 2.2 无中继的跨介质通信

基于中继的通信方式虽然在一定程度上可以解决跨越水-气界面的通信问题,但受限于中继的固定位置和预先大规模节点部署,难以实现灵活、高效的数据传输。无中继的跨介质通信借助海上无人机与水下节点建立直接通信链路,能够极大地提高海空跨介质通信的灵活性。1972年,Wait等<sup>[21]</sup>通过水下传感器发射无线电波穿过水-气界面到达水上的基站。由于射频信号在水中会呈现指数级衰减,需要使用极低频(extremely low frequency, ELF)降低信号的衰减,同时需要巨型天线和较大发射功率才能实现与水上基站的通信,能量消耗巨大,不适合能量受限的水下传感网。2005年Blackmon等<sup>[48]</sup>提出的声光混合通信和2018年Tonolini等<sup>[49]</sup>提出的声学-射频通信(translational acoustic radio frequency communication, TARF),通过在水下发送声波(以压力波的形式传播),压力波传播到水面造成水面的扰动,水上的接收端发射光束或射频检测水面的扰动。该技术虽然实现了无中继的跨介质通信,但通过声波产生的水面扰动通常只是微米级别,导致接收端在距离海面非常近的情况下才能检测到海面微小的改变,同时需要保持发射端和接收端严格对准,使得该技术的实用性受到限制。

光学通信利用蓝绿光在水和空气中的衰减特性:既可以由水下向上穿过海水,经过空气折射,被部署在空中的光电二极管检测到,实现上行链路;又可以根据光路可逆的原理,将收发器对调,实现下行链路<sup>[50]</sup>。对于复杂的海洋环境,尤其是存在海洋湍流和海面波动的情况下,基于LD的通信要求收发器之间严格对准,且扰动限制了其实际应用。而基于可见光(visible light communication, VLC)的漫射通信,因其宽松的对准要求及抵消海面波动的能力<sup>[16]</sup>,成为在海空跨介质通信中具有应用前景的技术。

表2对比了海空跨介质通信中主要技术的数据速率、通信距离及特点。相比而言,VLC因其良好的环境抗扰动能力和较高的数据速率对满足未来实时视频传输具有实际意义。2019年,Sun等<sup>[16]</sup>验证了在波浪影响下跨水-气的可见光漫射通信可行性,通过使用非归零开关键控调制方案,在16 mm波高和5 cm偏移的情况下仍能达到11 Mbps的数据速率以及79 cm<sup>2</sup>的覆盖范围。2021年,Lin等<sup>[51]</sup>对水下自主式机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)和无人机之间的VLC跨介质通信覆盖率作了进一步研究。研究表明,有波浪的海面可能有助于水对空通信过程,尤其是在通信链路没有完全对齐的情况下,其部分原因是波面增强了可见光通信的随机空间调制效应,降低了光收发器之间的严格对准要求。

表 2 海空跨介质通信方式对比  
Table 2 Comparison of air/water cross-boundary communication modes

跨介质类型	通信方式	数据速率/bps	通信距离/m	特点
基于中继的	UAC-RF <sup>[45]</sup>	—	100~32 k	需要固定的中继节点,缺乏机动性
	RF-UWOC <sup>[15]</sup>	—	—	高速通信,缺乏机动性
	UWOC-FSO-RF <sup>[47]</sup>	—	—	高速通信,移动中继节点
无中继的	ELF <sup>[21]</sup>	1~10	10+	需要使用大功率巨型天线
	Acousto-Optic <sup>[48]</sup>	—	—	严格对齐
	LDs <sup>[50]</sup>	5.5 G	26	超高速,严格对齐
	TARF <sup>[49]</sup>	400	1	严格对齐
	VLC <sup>[16]</sup>	30.2~111.4 M	0.9	速度快,覆盖范围可调,不需要严格对准

### 3 水下多模通信技术应用

随着海洋应用的多样化,水下无线传感器网络将不同类型和不同时效性要求如海洋入侵监测、海洋成分分析等的水下数据汇集到海面节点,然而水下网络拓扑的频繁变动、节点的能量限制以及高速网络的需求,导致水下网络研究愈加困难。本节将从水下声波多模和声光多模两个角度阐述如何利用多模通信技术提高水下网络性能。

#### 3.1 水下声波多模通信网络

水下声波多模通信是指在一个节点上配备并协调多种不同频段的声学调制解调器,进而针对时变的信道环境和繁杂的应用数据适时做出选择和调整,实现稳定、高效的网络服务<sup>[52]</sup>。针对恶劣的海洋环境和受限的节点能量,如何根据环境条件和网络需求,结合可用的声波技术构建高效、节能的网络连接是水下声波多模网络面临的主要问题。2013年,Pescosolid 等<sup>[36]</sup>针对水声传感器网络覆盖范围内存在的噪声干扰,提出一种基于多频段水声的传感器网络噪声感知 MAC 协议,当某个节点的噪声水平超过预定阈值时,则增大声波频率以提高通信链路信噪比。然而,由于 UAC 通信过程中较高的能量消耗,导致部分水下传感器节点过早衰亡。为平衡节点能耗,提高水下网络的生命周期,2018年,Diamant 等<sup>[7]</sup>提出一种公平和吞吐量最优的水下多模路由协议。根据节点的数据转发能力和中继节点剩余数据包的队列长度,调整转发到中继节点的比特数,最后选择可使用的 UAC 链路转发数据。实验结果表明,通过网络负载均衡,可以提高网络吞吐量和生命周期。面对繁杂的网络需求,以上协议缺乏对应用 QoS 的考虑,2020年,Zhao 等<sup>[17]</sup>提出一种基于声波多模的多级传输策略,以水下应用数据的信息价值(values of information, VoI)、网络链路负载、节点能量状态和传输效率作为优化目标,协调高、中、低三档声波频率,实现不同数据的差异化传输。

节点智能化有助于进一步提高水下网络的环境适应能力,而强化学习是一种通过与环境交互学习的人工智能方法,它将网络决策问题模拟成马尔可夫决策过程,通过环境奖励值调整网络决策过程<sup>[53-55]</sup>。2019年,Basagni 等<sup>[56]</sup>提出一种声波多模水下路由协议 MARLIN-Q,该协议使用强化学习算法,根据数据包的 QoS 类别,选择最佳的声学调制解调器和下一跳节点。MARLIN-Q 路由协议通过考虑声学信道质量、数据包传输和传播延迟的代价函数,减少数据传输延迟和分组丢失。不同于使用 Q 表储存环境状态和最佳动作策略之间的枚举映射关系,深度强化学习使用深度神经网络实现端到端的拟合 Q 值,以提高训练速度和学习性能<sup>[57-58]</sup>。2020年,Ye 等<sup>[59]</sup>提出基于深度强化学习的 MAC 层协议,通过延时奖励函数获得更新值函数。实验表明,该协议在异构网络 and 同构网络中均具有较好的性能表现。

以上分布式路由协议对水下移动自组织网具有良好的适应性,但缺乏对网络资源的实时全面掌握,无法提供全局最优性能<sup>[60]</sup>。2016年,Akyildiz 等<sup>[41]</sup>提出将 SDN 应用到水下网络,阐述了 SDN 在水下网络应用的设计和优势,通过 NFV 技术并利用全局视图实现集中优化控制,进而实现最大网络吞吐量和全局最优节能路由。然而,如何具体发挥 SDN 集中式路由方案的优势、平衡网络流量缺乏进一步讨论。2021年,Ruby

等<sup>[60]</sup>提出一种基于 SDN 的水下多模通信网络能量感知路由,通过避免网络争用实现最大化并行数据传输,提升了网络在能量效率、生存周期和公平性等方面的性能。

### 3.2 水下声光多模通信网络

UAC 固有的时延高、能耗大等缺陷导致其在某些水下网络场景中(如水下实时视频传输等)应用受限。UWOC 的低能耗和高带宽弥补了 UAC 的不足,但在通信过程中易受环境影响,导致通信链路不稳定甚至中断。为解决 UWOC 链路搭建问题,2012 年, Hu 等<sup>[61]</sup>提出基于簇的声光混合的网络路由协议,簇头节点通过声波信号发现并协调簇内和簇间节点并建立可靠的光链路。该协议假设节点具有全向光通信能力,但其光通信的调整细节需要进一步研究。2019 年, Wang 等<sup>[18]</sup>提出一种基于能量有效竞争的媒体访问控制协议,该协议首先执行声学握手协议以获得收发器节点的位置信息,从而确保信道空闲,否则将执行延迟访问,并等待下一个时隙再次争夺信道;然后,执行光学握手协议以检测信道条件是否满足光传输,同时执行光束对准;最后,节点使用光通信传输数据。使用 UWOC 进行数据传输可提高网络吞吐量,但相比于声链路需要更多的中继次数,增加了端到端连接失败的概率。2021 年, Shen 等<sup>[37]</sup>根据能耗和时延重新规划了声光混合通信,在数据量较小、转发能耗允许的情况下选择更高通信范围的 UAC 转发数据。实验结果表明,在网络节点较为稀疏时可以提供更高的网络连通率。

受 UWOC 通信距离的限制,声光多模网络的逐跳数据传输仅在小规模密集部署的网络中表现良好。为了在大规模水下网络中发挥声光多模优势,2014 年, Han 等<sup>[62]</sup>提出一种声光混合的移动收集方案。AUV 通过 UAC 进行远程调整和控制到达访问节点的方位和距离,途中进行低带宽 UAC 数据传输,在到达 UWOC 通信范围时切换到高速光通信。该方案需要 AUV 遍历完所有待收集节点后,再将数据发送到汇聚节点,导致较高的数据收集延迟。2017 年, Gjanci 等<sup>[63]</sup>针对应用数据的不同价值,提出一种最大化 VoI 的声光混合 AUV 数据收集方案。水下节点通过 UAC 将数据的重要程度发送到 AUV, AUV 根据确定访问节点的数据类型,选择最优 VoI 节点访问,然后 AUV 定期浮出水面,将数据信息通过 RF 传输到海面汇集节点。然而,在 AUV 移动速度和能量消耗的限制下,单 AUV 数据采集已经无法满足低时延和低功耗要求。2021 年, Han 等<sup>[64]</sup>提出多 AUV 的数据收集方案,采用改进的合约算法对 AUV 进行任务分配,然后通过计算节点和 AUV 之间的接触概率来确定 AUV 的访问顺序,最后通过强化学习规划路径,实现了低时延和低能耗的信息收集。为了提供更加灵活的实时视频流数据传输,2021 年, Wang 等<sup>[19]</sup>通过部署多个 AUV 构建水下光链路,以实现端到端实时视频传输。首先, UAC 根据 UWOC 的通信距离和波束宽度选择并调整 AUV 的部署位置,然后在 AUV 能耗、时延的约束下规划 AUV 路径。

表 3 总结了水下多模通信协议研究成果。在水下网络中,声波多模通信可满足水下网络通信需求,但在时延、带宽和能耗的限制下,难以满足日益丰富的海洋应用需求;声光多模通信具有高速性、短程性和健壮性等特点,在小规模网络中表现良好。在大型水下网络中,通过移动节点辅助收集数据在发挥声光多模优势和提高网络生命周期上表现出色,特别是多 AUV 协作数据采集。

## 4 海洋多模网络研究展望

在海洋环境中实现多模融合通信是一项富有挑战性的工作,未来海洋多模通信网络在以下几个方面值得开展进一步研究。

1) 研究高效的多模网络选择机制。UAC 的优势是长距离通信,但在数据速率、时延、能耗等方面存在缺陷。UWOC 作为一种互补技术具有极低的时延和方向性,通信距离可达数百米,但对环境依赖性较强,如水质或其他干扰会导致视距内失准。使用宽波束光可以降低对准要求,但无法兼顾通信距离、数据速率和误码率。多模网络可以带来网络性能的提升,但不同通信技术在适应场景、参数设计以及可提供的服务上存在差异,对多模网络技术的选择提出了挑战。为解决以上问题,一方面需要针对不同的网络场景,考虑通信距离、能量消耗、环境噪音等因素的影响,选择最优的多模组合方式,解决不同海域异构网络节点部署、通信等问题;另一方面,需要更细粒度网络选择方案来提高网络服务性能。

表3 水下多模通信协议研究成果

Table 3 Research achievements of underwater multimodal communication protocol

多模类型	协议名称	方法	年份
声波多模	NAMAC <sup>[36]</sup>	使用噪声 PSD 感知环境的 MAC 协议	2013
	OMR <sup>[7]</sup>	平衡网络流量,提高路由公平性	2018
	MAERLIN-Q <sup>[56]</sup>	使用强化学习,提高环境适应能力	2019
	EMTS <sup>[17]</sup>	根据 VoI 和链路负载平衡网络流量	2020
	Energy-Aware <sup>[60]</sup>	基于 SDN 的集中式路由协议	2021
声光多模	MURAO <sup>[61]</sup>	基于声光混合的分簇路由协议	2012
	Optical-Acoustic Hybrid <sup>[62]</sup>	AUV 声光混合数据收集	2014
	GAAP <sup>[63]</sup>	根据 VoI 规划 AUV 路径	2017
	OA-CMAC <sup>[18]</sup>	基于能量有效竞争的 MAC 协议	2019
	CRPOA <sup>[37]</sup>	通过能耗和距离优化声光联合通信	2021
	Multi-AUV Collaborative <sup>[64]</sup>	多 AUV 任务分配和路径规划	2021
	Real-time Video Transmission <sup>[19]</sup>	多 AUV 构建实时视频传输光链路	2021

2) 研究环境自适应多模切换机制。在声光混合多模网络中,由于 UWOC 在水下通信中涉及节点移动以及视线干扰等状况,面临光通信链路不可用的情况。海洋多模网络应自适应、无缝平滑地从一种通信方式转换到另一种通信方式,并且切换速度需要足够快,以迅速应对环境干扰导致的通信质量下降问题。另外,频繁的网络切换将带来额外的能量消耗,因此应研究高效的网络切换算法,并避免不必要的多模网络切换。

3) 完善海洋网络通信信道。受不规则的海浪、湍流、水质以及气泡的影响,通信过程中经常遇到网络拓扑结构变化、信道不稳定等状况<sup>[65]</sup>。目前海洋网络信道建模通常利用简化模型或通过水箱等模拟海洋环境进行实验验证,而这些模型与实际的海洋环境相差较大。此外,面对海空跨介质通信,网络处于两种不同的通信介质中,需要考虑不同介质下的信道特征和影响通信的关键因素。因此,研究建立精准的海洋运动模型和信道模型对海洋物联网水面及水下网络多模通信研究和实际部署应用极其重要。

4) 融合人工智能新技术,推动海洋多模通信网络研究与发展。基于 SDN 海洋多模网络可以针对不同应用需求提供资源按需管控,实现网络资源的充分调配和多模设备的优势互补。而在实际应用时,由于信道特征的时变性和控制信号的延迟,导致数据转发流规则的更新不及时,会降低网络性能。部署多个控制器可以缓解这一现象,但控制器放置位置的适应性将不可避免地影响业务性能<sup>[66]</sup>。预测信道变化,提前预知并更新本地流表,可以降低控制器对动态网络拓扑的响应时间<sup>[67]</sup>,其性能取决于预测算法的准确性。人工智能算法可以提高预测精度,但往往需要足够可信的网络训练数据以及庞大的算力。因此,开发轻量级的、高效的人工智能算法可以促进海洋多模通信网络的发展。

海洋物联网水面及水下多模融合通信技术充分利用多种通信方式的互补性,并融合软件定义技术、强化学习、深度学习等人工智能技术,在提升海洋物联网网络性能及应用方面获得了较快发展。但目前仍然存在诸多问题,如应用场景存在局限性、算法协议缺乏海洋环境实验验证、海空跨介质光通信易受海面波浪影响、水上及水下协同数据传输等,亟需进一步探索研究。海洋物联网水面及水下多模融合通信技术仍处于发展阶段,作为构建“空天地海”一体化网络的重要组成部分,未来具有良好的发展前景。

参考文献:

[1] 黄韬,刘江,汪硕,等.未来网络技术与发展趋势综述[J].通信学报,2021,42(1):130-150.  
 HUANG Tao,LIU Jiang,WANG Shuo,et al.Survey of the future network technology and trend[J].Journal on Communications,2021,42(1):130-150.  
 [2] 段瑞洋,王景璟,杜军,等.面向“三全”信息覆盖的新型海洋信息网络[J].通信学报,2019,40(4):10-20.



- DUAN Ruiyang, WANG Jingjing, DU Jun, et al. New marine information network for realizing all-coverage over sea[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(4):10-20.
- [3] 赵亚军, 郝光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(8):963-987.  
ZHAO Yajun, YU Guanghui, XU Hanqing. 6G mobile communication networks: Vision, challenges, and key technologies [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2019, 49(8):963-987.
- [4] 栾宁, 熊轲, 张煜, 等. 6G: 典型应用、关键技术与面临挑战[J]. *物联网学报*, 2022, 6(1):29-43.  
LUAN Ning, XIONG Ke, ZHANG Yu, et al. 6G: Typical applications, key technologies and challenges[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2022, 6(1):29-43.
- [5] LUO H, WANG J, BU F, et al. Recent progress of air/water cross-boundary communications for underwater sensor networks: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(9):8360-8382.
- [6] CAMPAGNARO F, FRANCESCO R, CASARI P, et al. Multimodal underwater networks: Recent advances and a look ahead[C/OL]// *Proceedings of the International Conference on Underwater Networks & Systems*. Halifax, Nov. 6-8, 2017. DOI:10.1145/3148675.3152759.
- [7] DIAMANT R, CASARI P, CAMPAGNARO F, et al. Fair and throughput-optimal routing in multimodal underwater networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3):1738-1754.
- [8] 王辉. 三维水下传感器网络覆盖优化控制算法研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2019.  
WANG Hui. Research on 3D underwater sensor networks coverage optimal control algorithm[D]. Ningbo: Ningbo University, 2019.
- [9] SUN X, KANG C H, KONG M, et al. A review on practical considerations and solutions in underwater wireless optical communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2):421-431.
- [10] XU J. Underwater wireless optical communication: Why, what, and how? [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10):38-47.
- [11] 闫博文. 面向水下无线光通信网络的路由方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
YAN Bowen. Research on routing approach for underwater optical wireless communication networks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [12] ZENG Z, FU S, ZHANG H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1):204-238.
- [13] LUO H J, XU Z Y, WANG J L, et al. Reinforcement learning-based adaptive switching scheme for hybrid optical-acoustic AUV mobile network[J/OL]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022. DOI:10.1155/2022/9471698.
- [14] LUO H, XIE X, HAN G, et al. Multimodal acoustic-RF adaptive routing protocols for underwater wireless sensor networks [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:134954-134967.
- [15] LI S, YANG L, DA COSTA D B, et al. Performance analysis of mixed RF-UWOC dual-hop transmission systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(11):14043-14048.
- [16] SUN X, KONG M, SHEN C, et al. On the realization of across wavy water-air-interface diffuse-line-of-sight communication based on an ultraviolet emitter[J]. *Optics Express*, 2019, 27(14):19635-19649.
- [17] ZHAO Z, LIU C F, QU W Y, et al. An energy efficiency multi-level transmission strategy based on underwater multimodal communication in UWSNs[C/OL]// *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications*. Toronto, Jul. 6-9, 2020. DOI:10.1109/INFOCOM41043.2020.9155381.
- [18] WANG J, SHEN J, SHI W, et al. A novel energy-efficient contention-based MAC protocol used for OA-UWSN[J/OL]. *Sensors*, 2019, 19(1):183. DOI:10.3390/s19010183.
- [19] WANG X, LUO H J, YANG Y T, et al. Underwater real-time video transmission via optical channels with swarms of AUVs[C]// *27th International Conference on Parallel and Distributed Systems*. New York: IEEE, 2021:859-866.
- [20] 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.  
GUO Zhongwen, LUO Hanjiang, HONG Feng, et al. Current progress and research issues in underwater sensor networks [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47(3):377-389.
- [21] WAIT J R. Project sanguine[J]. *Science*, 1972, 178(4058):272-275.
- [22] 吕雪. 水下无线组网的关键算法及水声调制解调装置研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.  
LÜ Xue. Research on key algorithms and underwater acoustic modem for underwater wireless sensor networks[D]. Wu-

- han; Wuhan University of Technology, 2019.
- [23] STOJANOVIC M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2007, 11(4): 34-43.
- [24] 郭银景, 徐锋, 屈衍玺, 等. 水下可见光通信关键技术综述[J]. 光通信研究, 2020, 218(2): 1-6.  
GUO Yinjing, XU Feng, QU Yanxi, et al. A survey of key technologies of underwater visible light communication[J]. Study on Optical Communications, 2020, 218(2): 1-6.
- [25] 迟楠, 陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 6-17.  
CHI Nan, CHEN Hui. Progress and prospect of high-speed visible light communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(3): 6-17.
- [26] HUANG X H, LI C Y, LU H H, et al. 6-m/10-Gbps underwater wireless red-light laser transmission system[J/OL]. Optical Engineering, 2018, 57(6). DOI: 10.1117/1.OE.57.6.066110.
- [27] 张雨凡, 李鑫, 吕伟超, 等. 水下无线光通信链路构成与性能优化进展[J]. 光电工程, 2020, 47(9): 3-13.  
ZHANG Yufan, LI Xin, LÜ Weichao, et al. Link structure of underwater wireless optical communication and progress on performance optimization[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(9): 3-13.
- [28] LI Y, WANG S, JIN C, et al. A survey of underwater magnetic induction communications: Fundamental issues, recent advances, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2466-2487.
- [29] 张歆, 童昱泽, 田志颖, 等. 基于中继传输的海-空跨界磁感应通信覆盖范围与可用带宽分析[J]. 物理学报, 2020, 69(24): 305-312.  
ZHANG Xin, TONG Yuze, TIAN Zhiying, et al. Coverage and transmission bandwidth analyses of undersea-to-air magnetic induction communication with relay transmission[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(24): 305-312.
- [30] PAL A, KANT K. NFMI: Near field magnetic induction based communication[J/OL]. Computer Networks, 2020, 181. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107458.
- [31] LUO H, WU K, RUBY R, et al. Simulation and experimentation platforms for underwater acoustic sensor networks: Advancements and challenges[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2017, 50(2): 1-44.
- [32] POTTER J R, ALVES J, GREEN D, et al. The JANUS underwater communications standard[C/OL]// 2014 Underwater Communications and Networking (UComms). Sestri Levante, Sep. 3-5, 2014. DOI: 10.1109/UComms.2014.7017134.
- [33] PETROCCIA R, CARIO G, LUPIA M, et al. First in-field experiments with a “bilingual” underwater acoustic modem supporting the JANUS standard[C/OL]// OCEANS 2015. Genova, May 18-21, 2015. DOI: 10.1145/3148675.3152759.
- [34] POMPILI D, AKYILDIZ I F. A multimedia cross-layer protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(9): 2924-2933.
- [35] 丁盟格. 异构水声传感网时间同步与路由机制研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.  
DING Mengge. Research on time synchronization and routing mechanism for heterogeneous underwater acoustic sensors networks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [36] PESCOSOLIDO L, PETRIOLI C, PICARI L. A multi-band noise-aware MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[C/OL]// 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Lyon, Oct. 7-9, 2013: 513-520. DOI: 10.1109/WiMOB.2013.6673407.
- [37] SHEN Z, YIN H, JING L, et al. A cooperative routing protocol based on q-learning for underwater optical-acoustic hybrid wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(1): 1041-1050.
- [38] LIU J, WANG J, SONG S, et al. MMNET: A multi-modal network architecture for underwater networking[J]. Electronics, 2020, 9(12): 1-18.
- [39] LUO H J, LIU C, LIANG Y Q. A SDN-based testbed for underwater sensor networks[C/OL]// Proceedings of the ACM Turing Celebration Conference. New York: Association for Computing Machinery, 2019. DOI: 10.1145/3321408.3321410.
- [40] LUO H, WU K, RUBY R, et al. Software-defined architectures and technologies for underwater wireless sensor network: A survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2018, 20(4): 2855-2888.
- [41] AKYILDIZ I F, WANG P, LIN S C. SoftWater: Software-defined networking for next-generation underwater communication systems[J]. Ad Hoc Networks, 2016, 46(1): 1-11.
- [42] 瞿逢重, 朱杭亮, 刘建章, 等. 海洋物联网关键技术研究与应用[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 25-33.

- QU Fengzhong, LAI Hangliang, LIU Jianzhang, et al. Research and application on key techniques of marine IoT[J]. *Telecommunications Science*, 2021, 37(7): 25-33.
- [43] 于海涛. 水声传感器网络路由协议的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.  
YU Haitao. Research on routing protocol for underwater acoustic sensor networks[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [44] RHODES M, WOLFE D, HYLAND B. Underwater communications system comprising relay transceiver[Z]. Google Patents, 2011.
- [45] OROURKE M, BASHA E, DETWEILER C. Multi-modal communications in underwater sensor networks using depth adjustment[C/OL]// 7th ACM International Conference on Underwater Networks and Systems. Los Angeles, Nov. 5-6, 2012. DOI: 10.1145/2398936.2398976.
- [46] LI J, YE D, FU K, et al. Single-photon detection for MIMO underwater wireless optical communication enabled by arrayed LEDs and SiPMs[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 25922-25944.
- [47] AGHELI P, BEYRANVAND H, EMADI M J. UAV-assisted underwater sensor networks using RF and optical wireless links[J/OL]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2021.3114163.
- [48] BLACKMON F A. Laser-based acousto-optic uplink communications technique[J/OL]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 118(1). DOI: 10.1121/1.1999372.
- [49] TONOLINI F, ADIB F. Networking across boundaries: enabling wireless communication through the water-air interface[C/OL]// Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM Press, 2018: 117-131. DOI: 10.1145/3230543.3230580.
- [50] CHEN Y, KONG M, ALI T, et al. 26 m/5.5 Gbps air-water optical wireless communication based on an OFDM-modulated 520-nm laser diode[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14760-14765.
- [51] LIN T, HUANG N, GONG C, et al. Preliminary characterization of coverage for water-to-air visible light communication through wavy water surface[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(1): 1-13.
- [52] SIGNORI A, CAMPAGNARO F, STEINMETZ F, et al. Data gathering from a multimodal dense underwater acoustic sensor network deployed in shallow fresh water scenarios[J]. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2019, 8(4): 1-28.
- [53] HU T, FEI Y. QELAR: A machine-learning-based adaptive routing protocol for energy-efficient and lifetime-extended underwater sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(6): 796-809.
- [54] 孙长银, 穆朝絮. 多智能体深度强化学习的若干关键科学问题[J]. *自动化学报*, 2020, 46(7): 1301-1312.  
SUN Changyin, MU Chaoxu. Important scientific problems of multi-agent deep reinforcement learning[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(7): 1301-1312.
- [55] LI X, HU X, ZHANG R, et al. Routing protocol design for underwater optical wireless sensor networks: A multiagent reinforcement learning approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9805-9818.
- [56] BASAGNI S, DI VALERIO V, GJANCI P, et al. MARLIN-Q: Multi-modal communications for reliable and low-latency underwater data delivery[J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 82: 134-145.
- [57] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. *物联网学报*, 2020, 4(3): 3-19.  
SHEN Xuemin, CHENG Nan, ZHOU Haibo, et al. Space-air-ground integrated networks: Review and prospect[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(3): 3-19.
- [58] 陈星延. 移动互联网的内容缓存与边缘计算关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.  
CHEN Xingyan. Research on key technologies of content caching and edge computing in mobile Internet[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [59] YE X, YU Y, FU L. Deep reinforcement learning based MAC protocol for underwater acoustic networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2020, 21(5): 1625-1638.
- [60] RUBY R, ZHONG S, ELHALAWANY B M, et al. SDN-enabled energy-aware routing in underwater multi-modal communication networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2021, 29(3): 965-978.
- [61] HU T S, FEI Y S. MURAO: A multi-level routing protocol for acoustic-optical hybrid underwater wireless sensor networks[C/OL]// Proceedings of the 9th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). New York: IEEE, 2012: 218-226. DOI: 10.1109/SECON.2012.6275781.

- [62] HAN S, NOH Y, LIANG R, et al. Evaluation of underwater optical-acoustic hybrid network[J]. China Communications, 2014, 11(5): 49-59.
- [63] GJANCI P, PETRIOLI C, BASAGNI S, et al. Path finding for maximum value of information in multi-modal underwater wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 17(2): 404-418.
- [64] HAN G, GONG A, WANG H, et al. Multi-AUV collaborative data collection algorithm based on q-learning in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 9294-9305.
- [65] 纪平. 基于单信标的海洋物联网节点定位算法研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.  
JI Ping. Research on node localization algorithm of ocean Internet of things based on single beacon[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2021.
- [66] LUO H J, LIU C, LUO Y, et al. SDMA: A SDN-based architecture of multi-modal AUVs network[C/OL]// Proceedings of the ACM Turing Celebration Conference. New York: ACM, 2020. DOI: 10.1145/3393527.3393558.
- [67] BAO K, MATYJAS J D, HU F, et al. Intelligent software-defined mesh networks with link-failure adaptive traffic balancing[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2018, 4(2): 266-276.

(责任编辑: 傅 游)