

水下无线传感器网络通信技术研究现状及趋势*

刘千里 吴 晖

(海军装备部驻武汉地区第五军事代表室 武汉 430205)

摘 要 随着海洋资源的开发和信息化,水下无线传感器网络(UWSN)已在防灾、分布式战术监视、海底勘探、地震监测、环境监测等领域广泛应用。通信技术是水下无线传感器网络的基础和关键部分。但是,与陆地环境相比,海洋环境复杂多变,在这种环境下的通信非常困难。因此,对水下通信方法和网络技术进行了深入的讨论和回顾,例如水声通信、水下光通信、路由和媒体访问控制(MAC)协议以及水下多模态网络进行了回顾和分类。最后讨论了水下高可靠性通信技术的实现,并对未来发展趋势进行了展望。

关键词 水下无线传感器网络;多模式通信;声学通信;光学通信;水下路由协议;水下 MAC 协议

中图分类号 TN923

DOI:10. 3969/j. issn. 1672-9730. 2022. 09. 005

Research Status and Trend of Underwater Wireless Sensor Network Communication Technology

LIU Qianli WU Hui

(The Fifth Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Wuhan, Wuhan 430205)

Abstract With the development and informationization of marine resources, underwater wireless sensor network (UWSN) has been widely used in disaster prevention, distributed tactical surveillance, seabed exploration, seismic monitoring, environmental monitoring and other fields. Communication technology is the foundation and key part of underwater wireless sensor network. However, compared with the land environment, the marine environment is complex and changeable, and communication in this environment is very difficult. Therefore, underwater communication methods and network technologies such as underwater acoustic communication, underwater optical communication, routing and media access control (MAC) protocols and underwater multimodal networks are reviewed and classified. Finally, the realization of underwater high reliability communication technology is discussed, and the future development trend is forecasted.

Key Words underwater wireless sensor network, multi-mode communication, acoustic communication, optical communication, underwater routing protocol, underwater MAC protocol

Class Number TN923

1 引言

海洋地质勘探、石油开采和环境监测需要稳定的水下网络。同时,海洋自然灾害预警系统也促进了海洋信息化的发展。实现高可靠性水下网络的基础是能够实现高速、低误码率(BER)、长通信半径和低功耗的水下点对点通信系统。已经提出了多种水下环境通信方法:水下声通信(UAC)、水下光通信(UOC)、电磁通信、引力波通信、量子通信和

磁场通信。然而,实际上只有 UOC 和 UAC 可以应用于水下环境^[1-2],其余通信方法仍处于实验室验证阶段。UAC 是目前水下环境应用最成熟的通信方式。声波在低频大功率下可以传播数千公里,是实现水下远距离通信的唯一手段。然而,UAC 虽然具有可以实现远距离通信的优势,但也存在很多缺陷。例如,它的传输延迟很长、带宽资源极其稀缺等。此外,水下环境的多样性和复杂性所产生的噪声对 UAC 产生了显著干扰,水下节点的移动性导

* 收稿日期:2022年3月11日,修回日期:2022年4月22日

作者简介:刘千里,男,工程师,研究方向:声纳信号处理,计算机网络。吴晖,男,高级工程师,研究方向:通信系统总体。

致了多普勒效应。海底边界、水域边界和海洋中不同的地理环境造成多径效应,这对高质量的水下通信提出了重大挑战。

这些通信技术从根本上决定了水下传感器网络的稳定性和可靠性。当然,还有其他因素影响水下传感器网络的可靠性,如网络层的路由协议和MAC协议。本文主要研究分析了影响水下网络可靠性的因素,包括通信技术和网络技术;对水下通信技术及其发展现状进行了全面的梳理。介绍了水下多模态网络的性能优势,并对水下多模态网络的未来发展提出了看法。机器学习用于水下数据传输也进行了讨论。讨论了AUV辅助数据传输网络,作为一种特殊的水下数据传输形式,分析了它的优点和组网中存在的问题;未来水下数据传输(通信和联网)所面临的挑战和有待解决的问题,并提出了一些可行的解决方案和对未来研究的展望。

2 水声通信

目前,调制技术制约着UAC的发展。早期的模拟调制数字声音处理(DSP)和当前的正交频分复用(OFDM)调制技术都是从陆基通信系统中派生出来的。这些技术理论上可以应用于水下通信系统。随着水下通信调制技术的发展,水下通信变得更加可靠。然而,水声信道被认为是最不妥协的信道环境之一,其复杂性和可变性为可靠的信息传输提出了不可克服的挑战。

2.1 信道模型

信道模型的建立极大地促进了UAC的理论研究,并直接影响了其质量。水声信道具有时变和多样性,不同水环境下的信道模型也不同。水声信道模型包括几个重要的模型:声频路径衰减模型、噪声模型、多径模型和多普勒模型。虽然建立多径和多普勒效应模型是可行的,但解决UAC的高误码率问题仍然是一个难题。借助调制技术,可以显著提高抗信道衰减和抗噪声技术。然而,对于多普勒和多径效应,需要采用扩频技术、均衡技术和同步技术等调制以外的方法或算法来提高通信性能。

2.2 多径效应、多普勒效应、正交频分复用技术的研究

由于不同路径的信号到达接收机的时间不同,在相位误差的情况下,信号的叠加会导致接收到的信号变形或严重衰落,最终导致误码,严重影响数据的可靠传输。目前有许多方法可以消除多径的影响,例如提高接收机测距精度和时域均衡的方

法,以及利用OFDM调制的方法。为了提高测距精度和时域均衡,需要定位和时间同步技术。然而,水下网络的动态拓扑结构使它在这个环境中很难实现精确定位和时间同步^[3]。OFDM调制是解决水下多径效应的最有效手段,可以提高水下数据传输速率。结合媒体访问控制(MAC)和安全机制,可以实现一个理想的水声网络^[4]。虽然OFDM在解决多径效应方面表现出优越的性能,但受到多普勒效应的严重影响。OFDM仍然是平衡水下信道和环境特性的最有效的通信调制技术。提高OFDM技术在水下通信中的效率的研究仍在进行中。

目前UAC中最成熟和流行的技术是OFDM,这主要是因为OFDM可以实现高速的数据传输,并且在声波低传播速率下具有天然的抗多径能力。尽管OFDM系统对多普勒效应很敏感,但近年来提出的匹配滤波器(MF)、零力(ZF)和最小均方误差(MMSE)均衡器等均衡技术可以弥补这一缺陷。通过对OFDM编码、ICI和FRFT、FFT解调性能的研究,使水下通信OFDM系统更加完善,提高了水下数据传输的可靠性。

3 水下网络

3.1 水下路由

路由协议是通信网络的底层协议,是实现网络分组中继过程的重要手段。由于水下网络的建设 and 应用还处于起步阶段,能够实现实验的水下网络还不多。水下路由协议的设计比陆上路由协议复杂。陆上网络的拓扑结构为二维平面,水下网络的拓扑结构为三维。此外,水下路由始终是动态的,而陆上路由始终是静态的。同时,水下路由还面临着节点移动、能量消耗等挑战。

3.1.1 基于位置的路由协议

在早期的水下路由研究中,将网络中节点位置信息的存在与否作为主要特征将水下路由协议划分为两种不同类型。基于位置的典型是基于矢量转发(VBF)协议,非基于位置的典型是基于深度的路由(DBR)协议。VBF协议的目的是利用每个节点的已知位置信息建立一个从源节点到汇聚节点的有效数据链路。虽然该协议在动态三维水下网络中具有较高的适应性,但仍需要考虑节点能量消耗和稀疏网络等重要问题。为了解决这两个问题,Jornet等提出了逐跳(hop-by-hop,HH)VBF协议^[5],Nicolaou等提出了聚焦波束路由(Focused Beam Routing, FBR)^[6]协议。HH-VBF解决了稀疏网络中VBF的性能问题。

3.1.2 非基于位置的路由协议

水下环境中第一个非位置信息路由协议是由Yan等^[7]提出的DBR协议。由于该协议只使用深度作为数据转发的标准,深度较浅的节点会过度参与数据转发,从而消耗更多的能量,更快地失效。H2-DBR协议和随后提出的节能DBR(EEDBR)协议解决了上述问题,大大提高了DBR协议的性能。2014年,Wahid等开发了基于物理距离和剩余能量的可靠节能路由协议(R-ERP2R) DBR协议^[8]。它将DBR协议中的深度计算替换为源节点与相邻节点之间的物理距离计算。该算法适应性强,适用于水下传感器网络的聚类。

3.1.3 基于能量的路由协议

2018年,Majid和Ahmad提出了可靠、节能的压力路由协议(RE-PBR)^[8]和改进的VBF协议。RE-PBR协议引入了剩余能量、链路质量指标(LQI)值和信噪比等参数。首次将链路质量值添加到中继路由决策算法中。仿真实验表明,与EEDBR和DBR相比,该算法的端到端时延和网络生存期均有显著提高。与原来的VBF协议相比,改进后的VBF协议考虑了剩余能量,采用动态虚拟流水线的方法来提高VBF的性能。为了进一步提高水下网络的生存时间,Nouman等提出了一种基于DBR的增强能量收集DBR协议(EH-DBR),该协议利用数据包收集声波通信频段的能量,对节点进行充电。许多研究都考虑了水下节点的能量消耗问题,这也表明节点的能量消耗问题在水下通信网络领域是一个基本问题。

3.1.4 基于VH的路由协议

信息空洞(VH)问题是影响水下网络性能的重要问题,也是路由协议开发人员面临的主要挑战。在文献[9]中,第一个提出了完整的无状态机会路由协议(SORP)。它采用被动参与的方法,在路由过程中本地检测网络拓扑不同区域的漏洞和捕获节点。它还采用了一种新的方案,实现了可根据候选转发节点的局部密度和位置进行调整和替换的自适应转发区域,从而提高了能量效率和可靠性。Nadeem等提出了两种处理VH的协议:干扰感知路由协议(Intar)和可靠的干扰感知路由协议(RE-Intar)。RE-Intar协议与Intar协议的不同之处在于,深度信息被添加到原来的HOLLE中。该协议能有效地解决信息空洞问题,在网络性能上有一定提高。

3.1.5 基于机器学习的路由协议

机器学习是当前的研究热点,学习算法与水下

通信网络兼容。将机器学习方法应用于水下网络已成为解决水下网络关键问题的重要手段。由于传统的陆上路由协议不能适应水下环境,水下网络中非智能路由协议的性能往往不理想。Obaida等提出了一种基于Q-learning的高效均衡的能耗数据采集路由协议QL-EEBDG^[10]。该协议是基于强化学习的,其目的是平衡网络中一些聚集节点的能量消耗,使一个节点不会因为过度使用而迅速死亡,从而造成网络中断或网络覆盖范围的大规模降低。强化学习存在一个严重的缺陷,称为维度危机。基于上述强化学习所带来的问题,Su等提出了一种基于深度Q-learning(DQN)的能量与延迟感知路由协议DQELR^[11]。深度强化学习是强化学习和深度神经网络的结合。深度神经网络可以实现高维信息的特征提取,可以很好地克服强化学习的维数危机。此外,Nadeem等也利用强化学习,利用相邻节点技术QLEBDG-AND来避免路由协议中空洞节点的出现。将机器学习方法应用于水下路由,提供网络中的每个节点具有一定的智能决策能力,是一种有效的水下路由解决方案,也是目前研究的热点。

3.2 媒体访问控制协议

媒体访问控制(Medium Access Control, MAC)协议是网络访问的关键技术,多年来对水声传感网络的MAC协议进行了有益的研究。这些研究可以根据其所涉及的渠道获取策略分为资源分配策略、资源竞争策略和混合策略。

资源分配型MAC协议主要分为三种类型:频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)和码分多址(CDMA)。资源竞争MAC协议主要分为不受控包协议、单受控包协议和握手协议。混合MAC协议集成了多种竞争机制和多种接入技术,如FDMA、TDMA、CDMA等,具有更好的性能。近年来,混合MAC协议迅速成为一个研究热点。现有的研究主要涉及TDMA和CDMA协议、TDMA和竞争协议、CDMA和竞争协议的结合协议。

3.3 水下多模态网络

对水下网络的研究表明,仅采用一种通信方式来建立高速、可靠的水下网络是不可行的。基于不同通信方式的多模态水下网络(MDUNs)是未来最有可能的网络形式。目前对水下多态网络的定义还不明确。Roece提出了一种基于MDUNs的路由协议,MDUN是一种使用三个不同频段的水下网络。假设UAC的三个频率是相互不干扰的。Roece采用高、中、低频UAC组合,形成六节点网络。高、中频

水听器可以传输高速和中速近程数据。低频水声可以传播很长的距离。所有节点都可以配置不同频段的UAC调制器,网络中两个相邻节点之间可能存在多条链路。文献[12]提出了另一种MDUN模型。模型中采用了UOC、UAC和电磁波三种通信方式。整个网络框架由汇聚节点、水下数据源节点和数据卸载辅助AUV组成。汇聚节点位于水面,用于采集水下数据。通过锚链将水下节点固定在水下检测区域,生成视频信息。AUV用于水下数据卸载。水下机器人与水下节点同时具有UAC和UOC能力,同时具有无线电磁波通信能力。水下节点通过UAC向AUV发送控制信息,确定AUV节点访问路径。AUV在访问节点时,通过UOC卸载节点数据包,然后浮出水面,通过电磁波通信将数据包发送给汇聚节点。

上述两个网络模型代表了两种典型的多模态水下网络:非AUV辅助和AUV辅助的多态网络。采用多介质通信技术的水下网络具有更强的多态性。它的网络形式具有代表性、高速、短距离,长距离和低速通信技术相结合的多模网络,与单模网络相比,可以提高网络的时延、吞吐量、鲁棒性等,保证数据的可靠传输。网络架构的优越性有时可以大大提高网络的性能。对于海洋网络而言,单纯的水声网络可以保证足够的覆盖,但无法实现大数据传输。纯UOC网络可以实现大数据传输,但不能保证足够的海洋覆盖。多模态水下网络或异构水下网络是较为有利的网络模型。

4 自主水下航行器辅助的水下无线传感器网络

在上一节中,提到了使用AUV协助数据卸载的多模态网络模型。AUV按照一定的算法访问网络中卸载信息的数据源节点,实现大数据量的数据传输。这种网络下AUV访问路径的算法成为影响网络性能的关键因素。

水下传感器网络中加入AUV无疑提高了数据传输的可靠性。当网络中存在AUV时,AUV的数量、访问路径、能耗等因素都会影响网络数据的传输。目前,关于AUV辅助的水下网络的研究还很少。在文献[13]中,研究了多态网络环境下AUV的路径规划,提出了一种启发式决策算法—贪婪自适应AUV寻径(GAAP)。GAAP使AUV能够最大化网络的信息价值,能够适应网络中发生的突发事件。该算法使水下机器人能够将网络数据传输到理论最大值的80%以上。GAAP在单个AUV的路

径规划方面取得了良好的效果,但当网络中AUV数量增加时,节点访问重复问题影响了算法,极大地影响了网络性能。Petrika等对水下机器人路径规划的研究表明,水下机器人路径决策方法是未来水下网络的重要组成部分。AUV辅助通信方式具有传统通信方式无法比拟的大规模数据传输优势。

在基于AUV的水下多状态网络或异构网络中,需要解决AUV的多路径决策算法、AUV能耗优化以及智能路径算法等问题。AUV路径规划问题本质上是一个路径问题;但是,它不同于路由。该路由算法尚未应用于水下机器人的路径决策,这使得该问题成为一个新的研究课题。在未来,水下网络将不可避免地包括AUV。水下机器人寻径技术的研究可以提高水下网络数据传输的可靠性。未来,水下网络协议栈中的AUV路径决策协议将成为重要的研究方向。

5 水下通信网络面临的挑战

在海洋环境中实现可靠的数据传输是一个非常困难的挑战。下面的章节中基于现有研究阶段,讨论了所面临的挑战和开放性问题、水下数据传输的理论和方法。

5.1 通信

5.1.1 水声通信问题与挑战

UAC用于水下通信的优点是可以实现长距离通信,但在传输速率、时延、误码率等方面存在严重缺陷。信道衰落和多径效应是影响UAC的重要因素。在目前的UAC研究中,采用均衡技术可以有效地处理信道衰落问题,但需要建立可靠的信道模型。在处理多径效应方面,OFDM技术表现出更好的性能,但需要辅助均衡技术来校正多普勒频移。为解决通信速率低的问题,采用MIMO-OFDM技术提高带宽利用率,采用多天天线技术提高通信速率。近年来,UAC技术已经取得了长足的进步,但仍面临许多挑战。首先,由于水下环境的多样性和复杂性,使得水声信道的建模困难且非通用性强,需要一种可靠的水声信道估计算法。其次,UAC的高延迟特性是最难以解决的问题。目前还没有有效的方法来降低UAC的时延,也没有相关的研究。第三,UAC的安全性是未来水声网络应用的关键问题。安全的认证机制、可靠的编码技术和精确的定位技术将影响到UAC的安全性和可靠性。

5.1.2 光通信的问题与挑战

UOC相对于UAC的两个主要优势是极高的传输速率和毫秒延迟,但UOC所允许的短通信距离

是其发展的主要障碍。UOC节点由于使用光作为通信介质,容易暴露收发机的位置,使得秘密通信难以实现。此外,点对点UOC系统需要高度精确的校准技术,但通信节点经常无法在水下环境中保持稳定的位置。当系统运行稳定时,节点的能耗会增加,这就降低了它们的寿命,严重影响了数据传输的效率和稳定性。点对点通信方式依赖于激光发射单元,激光发射单元消耗大量能源,对环境水质依赖性很大。为了解决这一问题,提出了一种采用散射光源的水下通信系统。但由于散射光源的光强散射,导致数据传输距离、信道噪声、速率、误码率降低,在特定场景下无法替代点对点通信系统的应用。因此,UOC制度也应该多元化。多UOC系统的综合利用和组网可能是未来的一个重要课题。

5.2 网络

水下网络的实现是应用水下通信技术的最终目标,构建海洋网络的重要性不言而喻。在网络层面上,水下路由是水下网络中的一个重要问题,近年来得到了更多的研究。与传统的陆地路由相比,水下路由引入了更多的问题和挑战。一般来说,地面网络的拓扑结构不涉及高度问题。在这样的网络中,路由算法只需在二维平面上考虑和设计,网络中节点之间的连接是稳定的。而在水下环境中,网络拓扑构成了三维结构。首先,这大大增加了网络路由算法的复杂性;其次,节点位置受海洋的影响而发生显著变化。节点间通信连接的不稳定性和节点能量的限制是路由算法设计中的重要挑战;此外,MAC协议问题也存在类似的路由问题。

近年来随着机器学习的普及,许多学者提出了基于机器学习的水下路由算法、水下信道估计方法和均衡算法。基于机器学习的算法可以有效地处理水下节点的移动、信息空洞VH和节点能量消耗等问题。与贪心算法相比,这些算法的效果会带来更可靠的性能。智能算法经常需要大量的数据训练和强大的计算能力,这无疑会给网络带来更多的开销。UAC系统可以实现高覆盖但通信速率很低,而UOC系统可以实现高通信速率但区域覆盖很低。UOC和UAC相结合的MUDN形式可以保证覆盖范围,实现本地高速数据传输,但仍然存在影响延迟和吞吐量的网络瓶颈。水下机器人在水下网络中进行辅助数据传输可以显著改善这些瓶颈。网络结构的改变虽然会带来性能的提高,但也会带来一些问题,如AUV的路径规划问题、水声光学系统的资源分配问题等。

6 结语

通过对水下通信技术和网络的研究,可以得出结论,未来的海洋数据传输在采用合理的部署拓扑技术后,将涉及到不同通信技术的多模态和异构特性。网络中的节点资源和区域资源存在差异。此外,区域间的传播率和质量也会有明显的差异。在海洋通信中,没有一种通信技术、网络结构或协议能够完全适应所有的应用环境,因此,多样性将是未来海洋通信网络的显著特征。此外,传统的非智能算法在多变的海洋环境方面存在明显的不足。基于人工智能的网络协议算法将在未来的海洋网络中发挥重要作用。

参考文献

- [1] Z. Zeng, S. Fu, H. Zhang, Y. Dong, J. Cheng. A survey of underwater optical wireless communications [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19 (1): 204-238.
- [2] S. Jiang. On reliable data transfer in underwater acoustic networks: a survey from networking perspective [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2018, 20 (2): 1036-1055.
- [3] S. Jiang. State-of-the-art medium access control (mac) protocols for underwater acoustic networks: a survey based on a mac reference mode [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2018, 21 (1): 96-131.
- [4] S. Jiang. On securing underwater acoustic networks: a survey [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2019, 21 (1): 729-752.
- [5] N. Nicolaou, A. See, P. Xie. Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks [C]// in Proceedings Oceans 2007 Europe International Conference, 2007: 1-6.
- [6] J. M. Jornet, M. Stojanovic, M. Zorzi. Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks [J]. Underwater Networks, 2008, 25 (2): 75-82.
- [7] H. Yan, Z. J. Shi, J. Cui. DBR: depth-based routing for underwater sensor networks [C]// in Proceedings 7th International IFIP-TC6 Networking Conference, 2008: 72-86.
- [8] A. Khasawneh, M. S. B. A. Lati, O. Kaiwartya. A reliable energy-efficient pressure-based routing protocol for underwater wireless sensor network [J]. Wireless Networks, 2018, 24 (6): 2061-2075.
- [9] S. M. Ghoreyshi, A. Shahrabi, T. Boutaleb. A stateless opportunistic routing protocol for underwater sensor networks

(下转第28页)

了改变,评价等级由初始的“优”变为“良”。分析模糊关系矩阵可知,专家权重因子的影响效果主要集中在各指标隶属度的优、良两个评价等级。如对指标 U_{11} 为例,修正后隶属度由“优”变为“良”。同时,需要注意控制特殊权重专家的数量,既要避免出现少数特殊权重专家影响整体评价结果,又要充分发挥特殊权重专家的有效影响,使评价结果更为客观。

5 结语

笔者在分析作战指挥控制能力构成的基础上,综合运用AHP和改进FCE法构建作战指挥控制能力评估模型,并结合实例进行了分析。结果表明:该方法能够将评估过程中的主观因素进行定量处理,并能根据各名专家的情况设置权重因子,改进专家评分确定指标隶属度的方法,得到修正后的模糊关系矩阵,使评价结果能够充分反映专家的整体意见倾向,为作战指挥控制能力评估提供了新思路。在确定专家权重因子时,如何把握权威专家所占比例和确定权重因子大小还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 任连生. 基于信息系统的体系作战能力概论[M].北京:军事科学出版社, 2010: 112-115.
- [2] 蒋启泽, 蒋鹏. 一种基于信息系统的指挥控制能力评估的方法[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(9): 35-37.
- [3] 赵彬, 黄志坚, 朱启明, 等. 基于AHP-FCE法的指挥控制能力系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(5): 104-107.
- [4] 杨诚, 刘泽平. 基于信息系统的体系作战指挥控制能力评估研究[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(3): 1087-1091.
- [5] 马亚龙, 邵秋峰, 孙明, 等. 评估理论和方法及其军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [6] 夏文军. 军队指挥学教程[M]. 北京: 军事科学出版社, 2012: 110-141.
- [7] 吴朝全. 作战指挥学[M]. 北京: 解放军出版社, 2011: 113-114.
- [8] 李宁, 陈晖. 基于灰色层次分析法的作战指挥效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(5): 22-26.
- [9] 张发明. 综合评价基础方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [10] 雷宁, 曹继平, 王赛, 等. 基于AHP和模糊综合评价法的装备维修保障效能评估[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 76-79.
- [11] 孙永林, 阮永贵, 肖虎, 等. 基于模糊评判的ESM系统作战效能评估[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(8): 134-136.
- [12] 王清华, 周义兴. 基于ANP的战略投送基地物资投送保障能力模糊评价[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(12): 73-76.

(上接第24页)

- [J]. Wireless Communications Mobile Computing, 2018, 36(7): 282-290.
- [10] O. A. Karim, N. Javaid, A. Shera, et al. QLearning based energy balanced routing in underwater sensor networks[J]. EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2018, 5(17): 124-130.
- [11] N. Javaid, U. Shakeel, A. Ahmad, et al. DRADS: depth and reliability aware delay sensitive cooperative routing for underwater wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2019, 25(3): 777-789.
- [12] S. Han, Y. Noh, U. Lee, M. Gerla. Optical-acoustic hybrid network toward real-time video streaming for mobile underwater sensors [J]. Ad Hoc Networks, 2019, 83(5): 1-7.
- [13] P. Gjanci, C. Petrioli, S. Basagni, et al. Path finding for maximum value of information in multi-modal underwater wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(4): 404-418.