



专题：水下通信网络技术

支持水下UUV集群的水声网络MAC协议研究进展

赵瑞琴^{1,2,3}, 杨若涵^{1,3}

- (1. 西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072;
2. 海洋声学信息感知工业和信息化部重点实验室 (西北工业大学), 陕西 西安 710072;
3. 西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘 要: 随着无人水下潜航器 (unmanned underwater vehicle, UUV) 在水下作业、目标探测等领域的广泛应用, 支持水下UUV集群的水声通信网络组网技术正成为水下信息获取领域的研究热点。媒体接入控制 (media access control, MAC) 协议作为协调节点间数据传输、优化网络性能的核心技术, 对提升水声通信网络效能具有重要作用。系统梳理了国内外支持UUV集群的水声网络MAC协议的研究进展, 涵盖从经典协议架构到近年来集群化适配方案的最新成果。基于信道接入机制与应用场景两大维度对现有MAC协议展开深入分析, 总结各类方法的技术特点与适用条件, 并在此基础上对未来面向UUV集群的水声网络MAC协议发展趋势进行展望, 旨在为UUV集群水声网络MAC协议的创新设计与工程应用提供参考与借鉴。

关键词: 无人水下潜航器; 媒体接入控制; 接入机制; 应用场景

中图分类号: TN929.3; TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025228

Research progress on underwater acoustic network MAC protocols supporting UUV

ZHAO Ruiqin^{1,2,3}, YANG Ruohan^{1,3}

1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
2. Key Laboratory of Ocean Acoustic Information Sensing, Ministry of Industry and Information Technology (Northwestern Polytechnical University), Xi'an 710072, China
3. Shenzhen Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Shenzhen 518057, China

Abstract: With the expanding application of unmanned underwater vehicle (UUV) in underwater operations and target detection, underwater acoustic communication networking technologies designed to support UUV clusters have been widely investigated as a key field in underwater information acquisition. MAC protocols, which serve as core

收稿日期: 2025-07-15; 修回日期: 2025-10-10

通信作者: 赵瑞琴, rqzhao@nwpu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.52471368, No.62071385, No.62031021); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目 (No.2025A1515011131)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.52471368, No.62071385, No.62031021), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No.2025A1515011131)



technologies for coordinating data transmission among nodes and optimizing network performance, play an important role in improving the efficiency of underwater acoustic communication network. A systematic review of the research progress on MAC protocols for acoustic networks supporting UUV clusters was conducted, covering developments from classical protocol architectures to recent cluster-oriented adaptation schemes. Existing MAC protocols were analyzed in depth based on two dimensions: channel access mechanisms and application scenarios. The technical characteristics and applicable conditions of various methods were summarized, and future development trends of UUV cluster-oriented underwater acoustic network MAC protocols were prospected. This review aims to provide references and insights for the innovative design and engineering application of UUV cluster underwater acoustic network MAC protocols.

Key words: UUV, MAC, access mechanism, application scenarios

0 引言

随着全球海洋科学研究的不断深入,海洋作为地球上规模最大的生态系统、关键气候调节器以及蕴藏丰富未开发资源的重要空间,其重要性日益凸显。因此,实现对海洋资源的有效探测、检测和管理已成为海洋科学研究的重要目标之一。在此背景下,水下无人潜航器(unmanned underwater vehicle, UUV)被广泛应用于水下环境监测、海洋学数据采集、海上结构缺陷检测、辅助导航、战术监视和目标跟踪^[1]等任务中。鉴于单一UUV难以独立完成综合性或大规模的海洋作业任务,UUV集群系统的研究逐渐成为该领域的关键方向。通过合理设计UUV集群的控制算法、构建高效通信网络并优化移动路径规划,UUV集群能够基于有效的局部感知信息,协同完成复杂的全局性任务目标,如维持编队结构、减少碰撞等。UUV集群通常集成于水下声学网络(underwater acoustic network, UAN)(简称水声网络)中,借助声信号实现节点间的数据交互,并与固定传感器节点协同工作。该系统能够实时或准实时地采集温度、盐度、流速、深度及生物活动等多维环境数据,从而支持海洋资源勘探、深海基础设施检查以及特定军事应用等复杂任务的实施^[2]。经典UAN的拓扑如结构图1所示。

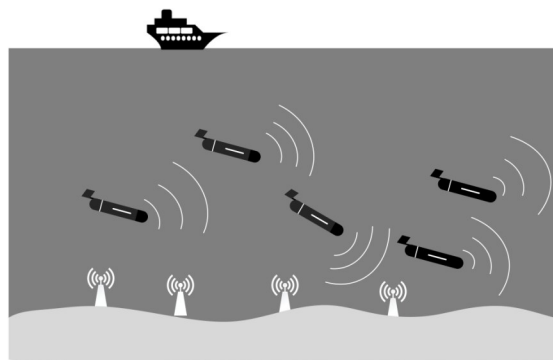


图1 经典UAN的拓扑结构

UUV编队作为一种基于网络的控制系统,需要节点间周期性地交换状态信息,以维持编队结构并动态感知网络中节点的接入和离开,从而有效支持各类水下作业任务。媒体接入控制(media access control, MAC)协议作为更高层的网络技术,决定了网络中节点如何接入信道,从而协调节点间的数据传输,降低数据冲突的概率和数据重复传输的次数,达到提升网络通信效率、减少节点通信的相互干扰的效果。因此,针对UUV集群的具体应用场景,设计能够有效提升网络通信性能、抑制节点间干扰的水声网络MAC协议,已成为当前研究的热点之一。

近年来,研究者们已提出多种创新MAC协议设计方案,以应对UUV集群在水声通信环境中面临的特殊挑战。本文将从信道接入机制和应用场景两个维度,系统梳理和评述现有面向UUV集群的水声网络MAC协议研究进展,并对未来

研究方向进行展望,旨在为该领域的协议设计提供理论支撑。

1 水下UUV集群网络MAC协议所面临的挑战

UAN与陆地无线电网络在物理传播环境与节点动态特性上存在显著差异,具体体现在UAN的节点易受水流影响而产生移动、信号传播时延高及传播损耗大等^[3]。由于UUV集群在执行编队控制、协同作业等任务时具有特殊的通信需求,支持UUV集群的UAN所面临的挑战较一般传感器网络更为复杂。因此,本节将重点分析UUV集群的独特特征给水声网络MAC协议设计带来的挑战。

1.1 海洋环境复杂导致信道质量差

首先,多障碍物、噪声干扰明显、多径效应严重的复杂水下环境使水声信道的可用带宽十分有限,利用有限带宽实现高质量、高效率的数据传输已成为水声网络MAC协议亟待解决的问题。其次,受海洋深度、洋流、温度等物理因素影响,水声网络通信中存在明显的多普勒频移现象,使得水声信道表现出显著的时变性和不可靠性。对于在水下高速相对运动的UUV集群而言,多普勒频移则更为严重,影响信号的检测和同步性能。因此,在设计支持UUV集群的水声网络MAC协议时,必须考虑非理想的水声信道对节点间数据信息交换质量的影响。

1.2 集群机动性强引发网络拓扑动态变化

UUV具有自主导航和任务驱动能力,集群编队会根据任务需求频繁、快速地进行巡航,导致UUV集群网络拓扑呈现高度动态变化。相比之下,普通水下传感器节点通常部署完成后位置是相对固定的,或随洋流有缓慢、有限的移动,拓扑变化相对稳定。传统基于静态或准静态拓扑假设的水声网络MAC协议往往难以直接适用于高动态的UUV集群网络。因此,UUV集群的动态特性对MAC协议设计提出了更高的鲁棒性与拓

扑自适应要求,协议需要快速感知邻居变化与链路状态,并动态调整信道接入策略,否则将可能引发严重的接入冲突与通信资源浪费。

1.3 能耗约束UUV集群的性能

UUV节点主要依赖电池供电,需要同时承担计算、数据处理、通信和水下巡航等多种任务,能耗压力显著。电池续航能力直接决定了整个网络的生存周期,而在深海或远海等部署环境,UUV往往难以进行充电和及时更换电池。因此,设计适用于UUV集群的网络协议时,不可避免地需要考虑UUV节点的能耗问题。协议不仅需要优化复杂的信道管理或频繁的控制交互所带来的能耗,还应充分利用UUV强大的数据处理能力,实现更为智能、更为复杂的协议逻辑,以在复杂通信任务与有限能源之间取得平衡。

1.4 时空不确定性导致数据包易发生碰撞

水声中声链路的传播速度约为1 500 m/s,是无线电链路的传播速度的 5×10^{-6} 倍,这意味着声学链路的传播时延比无线电链路长 2×10^5 倍^[4]。这种高时延特性给水声网络MAC协议设计带来了独特的“时空不确定性”问题。“时空不确定性”是指在协议设计中,预计不会发生碰撞的数据包可能因传播时延在实际接收时发生碰撞,而预计可能冲突的数据包反而因错时接收而不发生碰撞。对于网络拓扑动态变化的UUV集群而言,时空不确定性导致的数据包碰撞问题尤为突出,严重影响网络通信质量。因此,在设计支持UUV集群的水声网络MAC协议时,有效避免时空不确定性导致的数据包碰撞,也是研究的关键课题之一。

2 支持UUV集群的水声网络MAC协议

2.1 按信道接入机制分类

根据信道分配策略的差异,现有的水声网络MAC协议可分为竞争类、分配类以及混合类^[5]3类。水声网络MAC协议分类如图2所示。

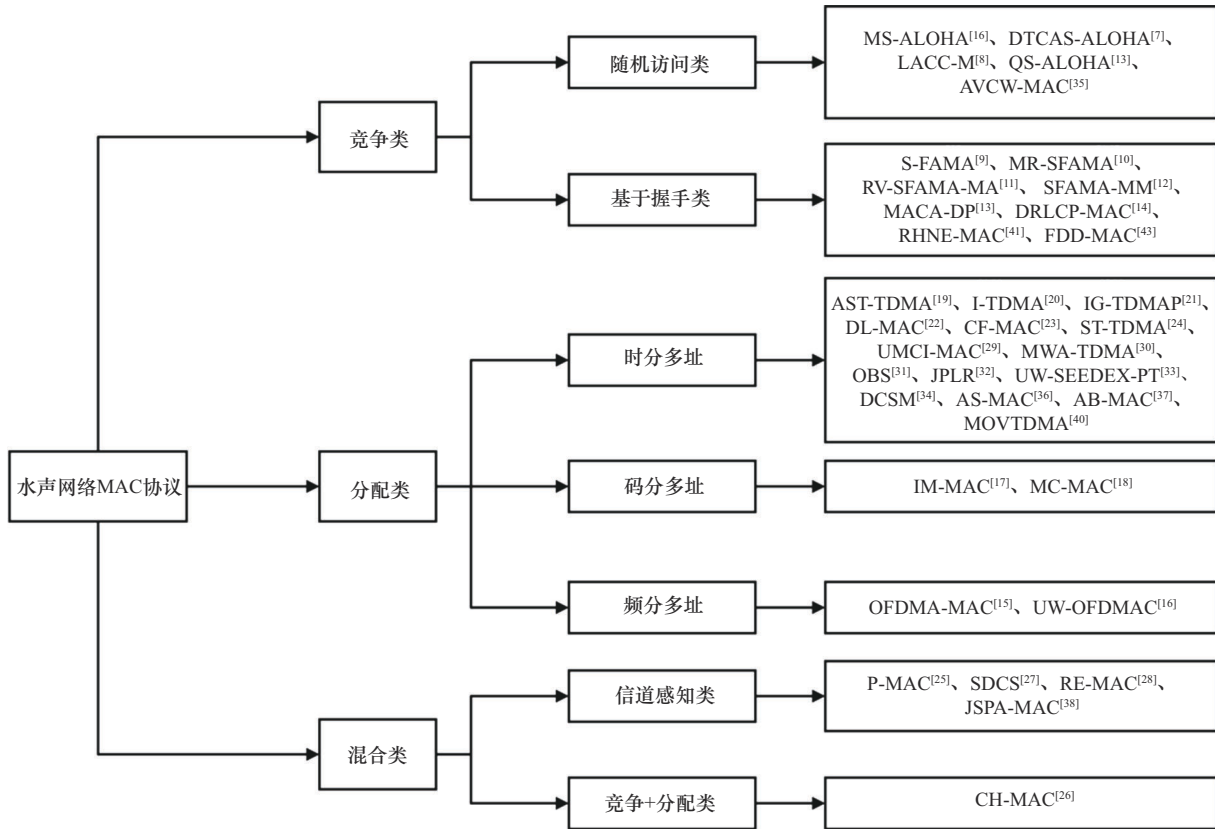


图2 水声网络MAC协议分类

2.1.1 竞争类 MAC 协议

在竞争类 MAC 协议中，节点通过竞争的方式获取共享信道的使用权。一旦某节点成功占用信道，即可利用信道的全部带宽进行数据传输。然而，在高流量负载的网络中，节点之间因竞争信道发生冲突的概率大大增加，容易引发数据包碰撞，并导致信道利用率下降。因此，竞争类 MAC 协议多用于节点分布稀疏、负载较轻的网络环境。目前，应用于 UUV 集群水声网络的竞争类 MAC 协议主要包括随机访问接入协议与基于握手的接入协议，它们依托竞争机制实现多节点间公平而有效的信道接入与数据交换。

(1) 随机访问接入协议

采用随机访问接入协议时，节点一旦有数据待发送就会立即启动传输，而不会考虑当前信道是否空闲。这种接入方式允许多个节点在缺乏协调机制的情况下随机共享信道，但也容易导致节

点间传输冲突。为了减少节点间的冲突，该类协议引入了载波监听机制，即节点在数据发送前监测信道状况，并根据信道忙闲状态动态调整传输计划，如 ALOHA 协议、载波侦听多址接入（carrier sense multiple access, CSMA）及其在改进型载波侦听多址接入/冲突避免（CSMA/CA）协议（应用于 IEEE 802.11 标准）。然而，这类协议在网络负载量较大时，也面临冲突概率增加的问题，为此，许多学者提出了针对这类协议的优化方案。例如，针对纯 ALOHA 和时隙 ALOHA 因随机等待 ACK 包确认而出现的资源浪费问题，文献[6]提出了一种基于后退机制的时隙 ALOHA 协议。该协议在发送前将数据暂存于缓冲区，并随机选择合适的时间进行重传，而非由节点直接重传，以达到在避免碰撞的同时提高数据传输速率的目的。为了解决水声网络高传播时延引起的时空不确定性问题，文献[7]在 S-ALOHA 协议的

基础上设计了 DTCAS-ALOHA 协议, 可根据传播时延调整数据包发送时刻, 但提前获取网络中所有节点的传播时延会增大通信开销。文献[8]基于 CSMA/CA 技术提出了一种能根据负载自适应调整传输模式的 LACC-M 协议, 用以满足在单跳移动水声传感器网络 (underwater acoustic sensor network, UASN) 场景下 UUV 节点巡航收集静态节点生成数据的高吞吐量、低时延需求, 显著提升了网络性能。

总体而言, 现有面向水声网络的随机访问类 MAC 协议主要通过载波侦听和合理的重传机制减少数据包碰撞, 以应对复杂海洋环境下低质量水声信道对通信质量的挑战。同时, 合适的退避机制设计也有助于提升通信效率, 减少时空不确定性对网络性能的影响。

(2) 基于握手的接入协议

相比随机访问接入协议, 基于握手的 MAC 接入协议在数据包传输前通过控制包交换预留信道, 从而避免数据传输阶段发生冲突, 更适用于网络拓扑动态变化的 UUV 集群网络。为应对水声通信网络的特殊挑战, 有学者提出了 S-FAMA 协议^[9], 通过时隙分配机制消除了对过长控制数据包的需求, 从而实现节能目标。不过, 为实现无碰撞传输, S-FAMA 协议的时隙长度必须足够长, 以保证所有邻居节点都能接收到控制包, 这限制了网络的吞吐量并增大了端到端传播时延。为了提升网络性能, 文献[10]基于 S-FAMA 提出了 MR-SFAMA 协议, 允许接收节点在一次握手过程中接收多个数据包, 这大大节省了节点交换控制包的时间, 显著提升了网络性能, 但其通信质量受退避算法的影响较大。在此基础上, 文献[11]结合 ACK 调度算法和 RTS-VBF 算法, 提出了一种支持动态调度的多接收 MAC 协议 RV-SFAMA-MA。该协议可根据实际网络拓扑动态调整每个发送节点的优先级, 缓解暴露终端问题, 提升信道资源的利用率。此外, 针对多跳 UAN,

还有研究者提出了一种新型的多接收机制——SFAMA-MM 协议^[12], 通过调度 ACK 包的传输, 解决了 MR-SFAMA 中未处理的由 ACK 包引发的暴露终端问题。尽管基于握手的 MAC 接入协议通过信道预留有效避免了数据包碰撞, 但延长了交换控制数据包造成的等待时间, 因此不适用于高流量负载的网络环境, 且普遍存在传播时延大、信道利用率低等问题。此外, 经典 MACA 协议通过信道预约机制在一定程度上缓解了隐藏终端问题, 但其较长的退避时延不利于 UAN 节点间的实时通信。文献[13]为提出了 MACA-DP 协议, 在 MACA 协议的基础上引入动态时延退避机制, 并且设计 RTS 多接收机制, 使接收节点基于优先级对接收到的 RTS 进行排序, 从而提升网络效率, 缓解多跳网络中关键节点的拥塞问题。

近年来, 定向通信技术备受关注。将定向通信技术引入水声通信网络中即可实现空间复用, 从而有效抑制同频干扰、提高解码率和降低误码率。文献[14]基于矢量水听器的定向接收特性提出了 DRLCP-MAC 协议, 发送节点和接收节点通过握手建立定向接收的通信链路, 其他节点则根据方向角信息判断是否参与信道竞争。该机制显著缓解了水声信道传播时延长引起的时空不确定性所带来的问题, 有效避免数据包碰撞, 提升网络整体性能。

研究表明, 现有面向 UAN 的竞争类 MAC 协议主要是通过已有数据信息调整发送机制, 以实现时延优化和碰撞避免等水声通信网络常见问题。例如, 根据节点传播时延调整发送时刻^[7]、根据当前网络负载调整传输模式^[8]、根据实时网络拓扑调整节点发送优先级^[11]等。然而, 这类协议大多假设网络拓扑相对稳定, 难以适应 UUV 集群高机动性所带来的动态变化。因此, 单一的竞争类 MAC 协议无法完全满足 UUV 集群移动网络的通信需求。



2.1.2 分配类 MAC 协议

分配类 MAC 协议是一种无冲突、无竞争的协议，其信道资源按照一定规则分配给各个节点，从而避免了竞争和冲突。根据信道资源分配域的不同，分为时分多址（time division multiple access, TDMA）、码分多址（code division multiple access, CDMA）、频分多址（frequency division multiple access, FDMA）和空分多址（space division multiple access, SDMA）协议。

基于 FDMA 的协议将频谱划分为不同频带并分配给不同的节点，使多个节点可以同时进行数据传输。然而，由于水声信道可用频带较窄，且存在明显的频带选择性衰落问题，FDMA 协议在水声通信网络中并不常用。有研究基于正交频分多址（orthogonal frequency division multiple access, OFDMA）技术提出了水声网络 MAC 协议，例如，文献[15]利用声学信道的多路径特性构建并行独立的声学子信道，再根据节点的工作状态分配子信道，从而缓解了水声网络中的隐藏/暴露终端问题；文献[16]提出了 UW-OFDMAC 协议，采用分布式算法设定最佳发射功率和 OFDMA 参数，在抑制干扰的同时提升信道利用率并降低能耗。

由于 CDMA 技术可以为每个潜在干扰节点分配不同的正交扩频码，因此不同节点可以同时发送数据包，有效解决了 UAN 高传播时延带来的低信道利用率问题。不过，将有限的正交码集分配给需要发送数据的节点、发射机的功率控制问题都是基于 CDMA 的 MAC 协议所面临的挑战。文献[17]考虑了码序的多样性，利用干扰管理技术解决联合码分配和功率控制问题；文献[18]综合考虑了移动水下自组网和 MC-CDMA 的特性，提出了一种基于 MC-CDMA 的 MAC 协议（MC-MAC），该协议采用自适应节点聚类算法区分节点的优先级，并利用自适应优化算法解决基于聚类结果的涉及扩频码长度、数量、子载波范围和

传输功率的联合分配问题，以实现有限水下通信资源的有效利用，从而提升网络吞吐量，减小端到端时延，提高网络可靠性。

在高流量负载网络中，基于 TDMA 的 MAC 协议通常优于随机接入类协议。然而，传统 TDMA 协议时隙长度固定且较长，导致连续发送数据包之间的时间间隔较大，难以满足 UUV 集群的实时通信需求。为了适应 UUV 集群网络的动态拓扑，文献[19]提出的 AST-TDMA 协议可以根据实时传播时延自适应调整时隙长度，从而提高信道利用率。文献[20]则通过数据分组交叉传输的方式提升信道利用率，同时引入拓扑扩展机制提升系统的可扩展性，并采用周期性时间同步的方法增强协议适应性。

为进一步提升信道利用率并减少通信时延，空间复用 TDMA 技术成为学者设计水声网络 MAC 协议的一大方向。文献[21]针对移动型网络拓扑下的三维场景，提出了新型的 IG-TDMA 协议。该协议引入灵活的空间复用机制，允许不同节点在有效的干扰管理下同时传输数据包，并基于构建的无干扰图提出了两种实现方式，分别是可以实现最佳空间复用但计算复杂度较高的最佳 IG-TDMA 协议和计算复杂度较低的启发式 IG-TDMA 协议，有效提升了网络吞吐量。文献[13]提出了一种适用于移动网络场景下的 MR-TDMA 协议。该协议基于接收端时分复用机制，通过簇头节点动态计算移动节点的传播时延和发送时刻，克服了发送端时分复用因节点间最大传播时延变化而出现的效率低下问题，从而有效提升了数据传输效率。为应对 UAN 的时空不确定性和暴露/隐藏终端等问题，文献[22]基于深度分层设计提出了 DL-MAC 协议，该协议通过多层结构和分布式聚类方法，根据网络中节点的优先级调度时隙。与此同时，DL-MAC 协议还引入了休眠机制，减少节点在无传输任务时的能耗，提高网络性能。针对稀疏高负载和多跳 UASN，文

献[23]提出了一种碰撞避免式MAC协议CF-MAC, 该协议通过系统调度给同一碰撞域内的节点分配不同的时隙, 以避免碰撞, 并让不同碰撞域的节点可以同时传输数据, 以提升信道利用率。此外, 还根据网络拓扑对该协议进行了优化, 以减少不必要的时隙分配, 从而进一步提升网络性能。为提升网络的灵活性, 文献[24]在利用水声高时延特性的 Super-TDMA 协议基础上, 提出了改进分布式 p -Schedules 算法, 并且根据网络拓扑特点简化调度运算, 解决了一般 TDMA 协议时隙调度算法计算量过大的问题。

相关研究表明, 受水声信道固有的频带限制, 基于 FDMA 的协议在 UUV 集群的水声网络中并不常用。与此同时, CDMA 的扩频操作会占用有限的水声信道可用频带, 降低数据传输效率。此外, CDMA 依赖扩频码的正交性区分用户, 但水声信道中距离接收端较近的节点信号强度远高于远距离节点, 导致远距离节点信号被淹没^[20], 这也称为“远近效应”, 限制了 CDMA 在 UUV 集群网络中的应用。相比之下, 基于 TDMA 的水声网络 MAC 协议在复杂水声信道中支持 UUV 集群稳定通信方面具有显著优势, 但其严格的时间同步要求也限制了这类协议在实际场景中的应用。

2.1.3 混合类 MAC 协议

竞争类 MAC 协议在低负荷条件下能灵活应对变化、高效使用信道, 但其效能会随网络流量的上升而降低。分配类 MAC 协议借助信道预留机制, 可有效防止碰撞, 保障传输稳定, 但也部分降低了资源利用率。鉴于两者各有利弊, 混合类 MAC 协议融合双方优势应运而生。混合类 MAC 协议在低负载时, 展现出竞争协议的高效与灵活; 在高负载时, 则引入非竞争机制, 通过信道管理减少冲突, 确保资源同步高效分配, 进而在动态网络中提供均衡性能与高度适应力。常见的混合类 MAC 协议设计思路包括信道感知策

略和竞争与非竞争机制 (如 TDMA 与 CSMA) 的直接融合。此类协议旨在覆盖多样化的网络配置, 同时满足各类场景对高资源利用率和低冲突的双重要求。例如, P-MAC 协议基于虚拟距离定期监测水下环境信息, 从而自适应调整数据传输策略^[25], 以更好地适应 UAN 的实时通信需求。为缓解 IEEE 802.15.4 在高负载环境下面临的高能耗和低吞吐量问题, 文献[26]提出了基于 CSMA 和 TDMA 混合设计的 CH-MAC 协议, 并配套开发了一种拥塞控制算法, 在缓解信道拥塞的同时提高整体网络性能。文献[27]提出的 SDCS 框架能够根据网络状态与应用需求, 在 3 种不同的 MAC 协议下进行动态自主切换, 从而实现了在特定场景下快速找到并选择优化给定指标的 MAC 协议, 同时有效控制网络开销, 延长节点寿命。RE-MAC 协议^[28]利用基于 NDP 的信道接入机制, 支持高效视频流传输和同步, 缓解了多媒体数据在 UAN 中传输的困难, 并引入休眠机制进一步减小节点能耗, 提升系统可扩展性。

2.2 按应用场景分类

研究发现, 近年来面向 UUV 集群的水声网络 MAC 协议设计, 呈现场景驱动的显著趋势。针对差异化应用需求, 如时延敏感型监测、高吞吐量数据传输或能效优先任务, 研究通常将网络资源分配问题建模为一个多目标约束优化模型。该方法通过定义与场景需求紧密相关的特定性能指标 (如时延、吞吐量或能耗) 作为目标函数, 并采用改进的优化算法进行求解, 从而获得针对特定业务场景的最优或近似最优的资源分配方案, 最终实现网络性能的定向提升。

2.2.1 低时延要求场景

以需要信息快速传输的灾害预警场景为例, UUV 编队需要用尽可能短的时延将感知到的海底洋流等信息传回陆地基站。基于这种业务场景需求, 许多学者提出了以最小化端到端时延为优化目标的水声网络 MAC 协议, 以在尽可能短的时



间内完成集群自组网和重要数据传输。

为降低水下集群通信中的端到端时延和信号抖动,文献[29]提出了一种基于TDMA策略的UMCI-MAC协议。该协议通过主节点动态分配时隙以避免数据包冲突,并且采用轻量化控制消息设计,提高了网络能效,从而为集群协同作业提供了低时延、低抖动的通信保障。然而,其设计主要面向小规模网络,扩展性有限。

为应对移动UAN的非对称传播时延问题,文献[30]提出了MWA-TDMA协议。在移动节点发送数据之前,该协议通过选择算法选取临时主节点,主节点根据移动节点之间的不同传播时延和运动误差制定调度方案,其余节点则按主节点分配的传输计划向主节点发送数据包。这种方式在一定程度上缓解了移动节点和水面指挥船之间的长传播时延导致的数据传输不及时问题,并且降低了数据包碰撞率,从而提升网络吞吐量。

文献[31]提出了一种融合蚁群算法和广播边递归计算的启发式最优调度算法。该算法通过动态优化广播序列和时隙分配,有效缩短了集群之间交换状态信息的通信周期。同时,引入动态包时长调整补偿节点的移动误差,并采用重传策略,以应对不理想水声信道中的高丢包率。其设计为密集移动UUV集群网络提供了理论最优的广播调度方案。然而,该研究未考虑算法复杂度可能带来的节点能耗挑战。

文献[32]开发了一种集中式跨层协议,将物理层的功率控制、MAC层的链路调度和网络层的路由选择的联合优化表述为混合整数线性规划问题,并提出了基于ABC算法的启发式解决方案DIABC算法,从而实现端到端时延的全局优化。该协议基于移动性网络拓扑,使每个节点在特定区域内以随机速率进行移动。不过,该协议也存在集中式架构的固有缺陷,即高度依赖控制节点进行全局调度,当网络规模扩大时,控制节点的计算和通信开销将成为一大挑战。

文献[33]提出了一种适用于分布式UASN的并行传输MAC协议UW-SEED-PT。该协议以基于TDMA的UW-SEED-PT协议为依据,根据邻居节点的状态和接收节点的状态确定每个时隙的干扰节点并计算发送概率。此外,为避免不必要的能耗,协议引入了睡眠机制,允许节点在无法接收或发送的时隙进入睡眠状态。由于传播时延较长,协议进一步提出了并行传输机制,允许互不干扰的两个节点对在同一个时隙并行传输,实现空间复用。然而,协议在仿真时仅考虑节点位置始终相对静止的情况,发送节点只能向一个固定的接收节点发送数据包,可扩展性较差。

为适应灵活多变的UUV集群网络拓扑,文献[34]提出了分布式信道感知MAC(DCSM)协议。该协议在数据包中添加一个简短的时隙使用表,使每个节点都能与周围的节点共享其通信状态并感知信道信息。基于该时隙使用表,进一步设计了一种自适应传输调度算法,可以利用感知到的信息预测未来传输结果并选择最佳的时隙。该算法在提升并行传输的机会的同时避免碰撞,且能快速收敛。DCSM协议克服了以往空间复用TDMA技术所需要的时间同步要求,并可以根据感知到的流量对本地负载进行自适应调整,以适应不同的网络场景。不过,该协议未考虑能效问题,当网络中节点数量增加时,计算复杂度也随之剧增,可能给UUV节点造成较大负担。

文献[35]在基于时隙的ALOHA协议基础上引入虚拟载波监听和随机后退机制,提出了一种适用于水下环境的竞争窗口(contention window, CW)MAC(CW-MAC)协议。为进一步解决在大型网络中CW-MAC协议无法保证竞争节点访问信道的公平性问题,该研究还提出了一种可自适应调整节点CW的AFCW-MAC协议,该协议能够根据每个节点到中心节点的传播时延动态配置窗口参数。该协议仅考虑网络拓扑不变的情况,无法适应时刻变化的水下UUV集群高度动

态网络拓扑。

文献[36]指出, 现有基于 TDMA 的 MAC 协议大多假设数据流为单向, 忽略了实际场景中双向数据流传输所引发的端到端时延问题。为此, 该文提出一种基于 TDMA 的低时延自适应调度 MAC (AS-MAC) 协议。该协议通过分析调度序列和数据流的关系, 揭示调度序列和数据流方向的一致性对时延的影响, 进而构建时隙长度和数据包时延模型来解析不同数据流的端到端时延特性。在此基础上, 通过改进蚁群算法, 设计了能够自适应为当前数据流提供最小端到端时延的调度序列与时隙分配算法。受限于集中式架构和能耗问题, 该协议在大规模网络和长期部署场景中扩展性较差。

文献[37]创新性地将时隙长度与节点传输顺序建模为一个联合优化问题, 提出适用于全联通网络拓扑下的 AB-MAC 协议。该协议通过改进遗传算法求解联合优化问题, 实现在避免数据包碰撞的同时最小化平均帧长度。此外, 文献[37]中还提出了一种自适应调度机制, 以进一步提升协议效率和鲁棒性, 所有节点可以根据接收到的控制包和普通包中的信息自适应地调整其传输时间, 从而保证网络在低质量水声信道中也具有较高的通信性能与鲁棒性。

通过对现有以最小化端到端时延为优化目标的支持 UUV 集群的水声网络 MAC 协议的研究可发现, 基于节点间传播时延进行调度决策已成为实现低时延通信的主要途径, 具体表现为基于 TDMA 的时隙分配策略、自适应调整退避时延设计等方法。然而, 此类方案大多依赖于集中式网络架构, 且复杂的分配算法也会增加节点的额外能耗, 不适用于大规模网络。

2.2.2 高吞吐量数据传输场景

在需要大规模开展海洋环境协同监测的场景下, UUV 集群需要将采集到的大量海洋环境信息传输至海面基站, 其中可能包含大量图像和影像

数据。在此类场景中, UUV 集群需要利用有限的水声信道条件保证网络整体吞吐量的最大化。

文献[38]聚焦于跨层优化技术, 通过联合优化节点的时隙调度和功率分配, 实现水声 UUV 集群网络吞吐量 (network throughput, NT) 的最大化。该文提出了一种基于交替优化的集中式算法, 虽然可以实现最佳的 NT 性能, 但算法复杂度较高, 难以适用于大规模或动态变化的网络。基于此, 进一步提出了一种基于 MLMF Stackelberg 博弈的分布式算法, 通过区分节点角色并设计效用函数, 在系统性能和复杂度之间取得了更好的平衡。然而, 该方法假设节点静止和理想时间同步, 未考虑实际环境中节点可能随水流移动和同步误差对算法性能的影响, 且未考虑节点访问信道的公平性和负载均衡问题。

随着人工智能技术的发展, 越来越多的机器学习方法被应用于水声网络 MAC 协议的设计中。文献[39]提出了一种适用于水声通信网络的、基于多玩家多臂老虎机 (MP-MAB) 的分布式调制自适应框架。在该框架下, 每个节点运行一个本地 MAB 智能体, 根据自身信道条件选择最优调制方式, 并利用全局实时吞吐量作为学习反馈, 以达到最大化网络吞吐量的目的。由于 MAB 算法本身具有计算复杂度低和内存需求小的特点, 该设计契合了水下节点资源受限的特性, 具有较强的可扩展性和较高的鲁棒性。然而, 由于从汇聚节点到各节点的奖励反馈需经多跳广播, 存在显著时延, 该框架在大型网络或高动态网络下并不适用。针对动态网络的实时通信需求, 文献[13]提出了一种基于 S-ALOHA 和 TDMA 协议的 QS-ALOHA 协议, 利用强化学习算法实现对时隙的动态调度, 充分利用实时网络拓扑信息为节点分配合适的发送时隙, 从而提升网络吞吐量。

文献[40]提出了一种基于多目标优化算法的定向接收 TDMA (MOVTDMA) 协议, 利用矢量水听器 (vector hydrophone, VHP) 的波束成



形能力增强信号、抑制干扰,提高空间复用效率。同时,将时隙调度与VHP转向角联合优化问题建模为多目标优化问题,以最大化吞吐量和广义信噪比,并采用NSGA-II算法求解。由于采用集中式算法,该协议在大型网络或动态网络拓扑中表现可能欠佳,且仿真实验采用网格拓扑结构,未验证协议在随机分布或稀疏网络中的普适性。

基于纳什均衡的随机握手思想,文献[41]提出了以减少多节点访问冲突并提升网络吞吐量为目标的RHNE-MAC协议。该协议在请求发送阶段可根据节点数量动态调整节点请求信道访问的概率,从而最小化多节点接入冲突概率。在获取各节点的状态信息和网络的传播延迟信息后,主节点将为各节点安排数据传输时序,以实现握手周期结束以后进行无碰撞的数据传输。仿真结果表明,RHNE-MAC协议能够有效提高网络吞吐量,并在一定程度上降低端到端时延。

研究表明,现有支持UUV集群的水声网络MAC协议设计中,实现网络最大化吞吐量的主要技术路线有引入博弈论框架、智能体强化学习、转向角控制以及调整信道访问概率等,但这些设计也存在计算复杂度较高、控制开销导致能效失衡、无法适应高动态拓扑等问题。

2.2.3 能效优先场景

UUV集群在深海执行科考和环境监测等任务时,其能源完全依赖电池供应。通信模块所需要的能耗在整体能耗中占比较大,因此降低通信能耗对延长UUV集群网络的整体寿命至关重要。近年来,许多学者致力于研究以减小通信过程中的能耗为优化目标的水声网络MAC协议。

文献[42]指出,UASN中节点的能耗受传输距离影响显著,正确选择中继节点可以有效节约能耗,延长节点寿命。基于此,该文提出一种适用于UASN的中继节点选择和功率分配的新策略,通过动态更新节点偏好列表实现稳定匹配,

并在保障网络寿命最大化的前提下,采用Dinkelbach方法提升能效,从而延长网络运行时间并提高整体效率。不过,该方案仅考虑静态节点和单跳中继场景,不适用于动态网络拓扑和部署在深水区的UASN。

此外,定向通信技术也是节约能耗、提高空间复用率的一大方法,但往往也存在邻居发现不完整、暴露/隐藏终端等问题。文献[43]基于全双工通信和定向通信技术,提出了一种结合矢量水听器和多模换能器协作的MAC框架,并引入一种高效的邻居发现算法。基于该框架,文献[43]还设计了一种名为FDD-MAC的协议作为基准方案。得益于定向通信技术,FDD-MAC协议实现了高效的空间复用,从而有效降低端到端时延,而定向技术也有助于减少能耗,提升网络能效。

在能效优先的应用场景下,UUV集群需要在能源约束的条件下完成高效协同通信和数据传输。现有的水声网络MAC协议通过引入休眠唤醒机制、功率控制以及定向通信等技术显著降低了节点能耗,提升了网络寿命。然而,在实际应用中,节能机制会造成一定程度上的性能损失,如休眠机制导致的数据传输时延、功率控制算法影响节点通信距离等,值得未来进一步探究更优解。

3 总结与展望

为更直观地评估和比较各协议的性能,从吞吐量、时延、能效、可扩展性、时间同步要求、多跳传输支持、信道利用率及可靠性等方面,对上述MAC协议进行对比分析。支持UUV集群的水声网络MAC协议性能比较见表1。

具体而言,吞吐量和端到端时延能够反映MAC协议在低质量水声信道下的传输性能,是评估MAC协议应对复杂海洋环境中信道质量波动能力的重要指标;能效则体现MAC协议的节能设计水平,对能源受限的水下UUV集群实现

表1 支持UUV集群的水声网络MAC协议性能比较

协议	吞吐量	时延	能效	可扩展性	时间同步需求	多跳传输支持	信道利用率	可靠性	移动性支持
ALOHA	较低	较高	较差	较差	否	否	较低	一般	否
S-ALOHA	较低	较高	较差	较差	是	否	较低	较好	否
DTCAS-ALOHA ^[7]	较高	较高	较差	较差	否	否	较低	较好	否
LACC-M ^[8]	较高	较低	较好	较差	否	否	高	较好	是
S-FAMA ^[9]	较低	较高	较好	较好	是	否	低	—	是
MR-SFAMA ^[10]	高	较低	较好	好	是	否	较高	一般	有限支持
RV-SFAMA-MA ^[11]	较高	—	较好	好	—	否	高	较好	有限支持
SFAMA-MM ^[12]	高	较低	较好	较好	是	是	较高	较好	否
MACA-DP ^[13]	较高	较低	—	较好	是	是	较高	一般	否
DRLCP-MAC ^[14]	较高	较低	较好	一般	是	是	较高	较好	有限支持
OFDMA-MAC ^[15]	较高	较低	好	一般	是	否	高	一般	否
UW-OFDMAC ^[16]	较高	较低	好	一般	是	是	高	一般	有限支持
IM-MAC ^[17]	较高	较低	好	一般	否	是	较高	好	否
MC-MAC ^[18]	高	较低	较好	一般	否	是	高	较好	是
AST-TDMA ^[19]	高	较低	好	较好	否	否	高	好	是
I-TDMA ^[20]	较高	较低	好	好	是	是	高	较好	否
IG-TDMA ^[21]	较高	—	—	一般	是	否	较高	—	有限支持
MR-TDMA ^[13]	较高	—	—	一般	是	是	较高	—	是
DL-MAC ^[22]	较高	—	较好	较好	是	是	一般	好	否
CF-MAC ^[23]	较高	—	好	一般	是	是	高	好	否
ST-TDMA ^[24]	较高	较低	较好	较好	是	是	较高	—	有限支持
P-MAC ^[25]	—	较低	—	较好	是	否	高	好	否
CH-MAC ^[26]	较高	较低	好	一般	是	否	较高	好	否
SDCS ^[27]	较高	较低	好	一般	否	否	较高	好	否
RE-MAC ^[28]	高	较低	好	较好	是	是	较高	较好	有限支持
UMCI-MAC ^[29]	一般	较低	好	差	否	否	一般	好	有限支持
MWA-TDMA ^[30]	较高	较低	—	一般	是	否	一般	好	是
OBS ^[31]	高	较低	—	较好	是	否	高	好	是
JPLR ^[32]	—	低	较好	一般	是	否	较高	好	是
UW-SEEDX-PT ^[33]	较高	—	好	一般	是	是	较高	较好	否
DCSM ^[34]	高	较低	—	—	否	是	高	较好	是
AVCW-MAC ^[35]	较高	较低	—	—	否	否	较高	较好	否
AS-MAC ^[36]	—	较低	—	一般	是	否	较高	好	有限支持
AB-MAC ^[37]	较高	低	—	一般	是	否	较高	好	是
JSPA-MAC ^[38]	高	—	好	较好	是	否	较高	好	否
MP-MAB ^[39]	高	—	好	好	否	是	较高	好	有限支持
QS-ALOHA ^[13]	较高	—	—	较好	是	是	较高	—	有限支持
MOVTDMA ^[40]	较高	—	—	好	是	否	较高	好	否
RHNE-MAC ^[41]	高	较低	—	好	是	否	较高	好	否
EERS ^[42]	—	—	好	较好	是	否	一般	较好	否
FDD-MAC ^[43]	好	较低	好	一般	否	是	高	好	否



高效协同作业尤为重要；可扩展性反映网络在规模扩大、任务复杂度增加、环境动态性增强时，是否仍能保持高效稳定运行，这对于可能随时有节点加入和离开，以及需要完成多样化业务扩展的UUV集群至关重要；由于水声信号传播时延远大于无线电信号，时间同步需求和多跳传输支持直接决定了MAC协议在动态水声环境中的实用性和效能，是评估水声网络MAC协议是否适用于UUV集群的重要指标；信道利用率反映了MAC协议对有限水声信道资源的调度能力；可靠性则代表了MAC协议应对数据传输过程中的丢包和碰撞率高挑战的能力，提高信道可靠性的协议设计在复杂水下环境中具有更广泛的实战应用。此外，针对UUV集群特殊的移动性特征，表1增设了对协议“移动性支持”的评估：标注为“否”表示协议仅适用于静态网络，在动态拓扑中性能显著下降；“是”表示协议支持移动性网络；“有限支持”则代表协议在一定的条件下可以适用于动态网络拓扑，比如虽不适用高速移动场景，但可通过特殊的协议设计适应低速移动场景。

通过对现有协议的梳理，不难发现，为应对UUV集群水下声学网络面临的各类挑战，已有研究提出了多种解决思路。总体而言，为解决UUV集群的移动性问题，提出了预测UUV节点运动轨迹和分布式动态调度等方案；为缓解水声信道长时延带来的影响，采用了空间复用和根据节点优先级排序等方法提升网络通信效率；在增加协议可靠性、降低节点冲突概率方面，提出了改进分配类算法、划分干扰区域、分层设计等方案，有效解决了隐藏/暴露终端的问题；为了提升协议的能效，引入了多种休眠唤醒机制、自适应功率控制等方法，显著降低节点能耗，延长网络寿命。此外，大部分优秀的MAC协议设计在解决UUV集群网络固有问题的基础上，实现了对网络性能的提升，为UUV集群水声网络的发展提供新的思路和发展方向。

目前，支持UUV集群的水声网络MAC协议的研究已取得了初步进展。基于已有研究成果，对未来面向UUV集群的水声网络MAC协议提出以下建议和展望。

（1）发展轻量级分布式水声网络MAC协议架构

当前支持水下UUV集群的水声网络MAC协议多基于集中式网络拓扑设计。由于水声信道受海洋环境影响显著，时变效应明显，此类由中心节点基于历史链路信息进行调度的策略存在固有局限。主要表现在：一方面，中心节点所依据的链路状态信息因长传输时延易发生时效衰减，导致决策偏离最优解；另一方面，中心节点单点故障将引发全网失效，加剧动态拓扑下的网络脆弱性。此外，在维护成本高昂和能源有限的水下UUV集群中设置一个计算开销过大的中心节点不具备现实的应用参考价值。因此，未来可推动轻量级分布式MAC协议的发展，通过局部决策和自主协同机制，提高协议对水声环境的动态性及任务多样性的适应能力。

（2）增强协议在动态网络环境中的鲁棒性

部分现有性能优秀的水声网络MAC协议是基于静态网络拓扑或固定节点调度的应用场景设计，此类协议依赖精确的状态信息和时间同步来保障网络的可靠性。然而，即使节点不自主移动，水下洋流仍会带动节点出现小范围的漂移，使得节点间的位置信息难以实时精确同步。因此，未来水声网络MAC协议设计需要提高对节点位置信息更新不及时和时间同步精度的容忍度，使协议在动态网络环境下也能保持较高性能和鲁棒性，从而为应用日益广泛的水下UUV集群提供高效的调度决策支持。

（3）引入低功耗及休眠唤醒等节能设计

从整体网络架构的角度来看，MAC协议通过信道接入实现节点间的信道资源共享。尽管现有研究在吞吐量提升与时延控制方面取得了

突破性进展,但部分高复杂度算法会导致协议能效低下。同时,UUV平台固有的能源约束,使高能耗协议缺乏实际部署的可行性。未来协议设计需要将能耗优化作为核心维度之一,重点探索低功耗电路设计、动态功率控制与智能休眠唤醒协同策略,构建性能与能效双全的平衡方案。

(4) 利用水声信道固有特性提升协议性能

水声信道的时空不确定性主要源于高传播时延与显著多径效应。在拓扑动态变化的UUV集群场景下,时空不确定性易引发节点间数据包碰撞,降低网络性能。然而,这些特性若能被合理利用,反而有助于网络性能的提升,例如动态拓扑结合长时延特性可增强协议空间复用潜力。未来面向UUV集群的MAC协议设计可以利用水声信道的固有特性,在考虑数据包碰撞容忍的同时提出更为有效的集群调度机制,从而最大化信道利用率。

参考文献:

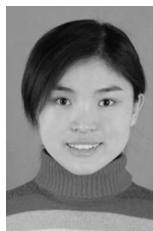
- [1] XIONG S J, ZHANG H T, ZHU X H, et al. Key technology and experimental research of underwater acoustic networks[C]//Proceedings of the 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [2] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 257-279.
- [3] YUNUS F, ARIFFIN S H S, ZAHEDI Y. A survey of existing medium access control (MAC) for underwater wireless sensor network (UWSN)[C]//Proceedings of the 2010 Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation. Piscataway: IEEE Press, 2010: 544-549.
- [4] CHAO C M, WANG Y Z. A multiple rendezvous multichannel MAC protocol for underwater sensor networks[C]//Proceedings of the 2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [5] CHEN K Y, MA M D, CHENG E, et al. A survey on MAC protocols for underwater wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(3): 1433-1447.
- [6] BADAWY M, KHATER E, TOLBA M, et al. A new technique for underwater wireless sensor network: modified-slotted-ALOHA protocol[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing and Technologies (3ICT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [7] 刘磊, 李宇, 张春华, 等. 延迟容忍及冲突避免的水声网络 S-Aloha 协议[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(3): 513-519.
LIU L, LI Y, ZHANG C H, et al. Delay tolerant and collision avoidance S-Aloha protocol for underwater acoustic networks[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(3): 513-519.
- [8] ZHANG Y Y, CHEN H F, XU W. A load-adaptive CSMA/CA MAC protocol for mobile underwater acoustic sensor networks[C]//Proceedings of the 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [9] MOLINS M, STOJANOVIC M. Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks[C]//Proceedings of the OCEANS 2006-Asia Pacific. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1-7.
- [10] WEN L. MR-SFAMA: a novel MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [11] WU Z Y, LIU M Q, ZHANG S L. RV-SFAMA-MA: RTS-VBF algorithm used in a slotted-based MAC protocol for underwater acoustic networks with an acknowledgement scheduling algorithm[C]//Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference (CCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 5714-5720.
- [12] HUANG W K, LIU M Q, ZHANG S L. SFAMA-MM: a slotted FAMA based MAC protocol for multi-hop underwater acoustic networks with a multiple reception mechanism[C]//Proceedings of the 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 7315-7321.
- [13] 董言. 分布式水声通信网络 MAC 协议研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
DONG Y. Research on MAC protocol of distributed underwater acoustic communication networks[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [14] 郑茂醇, 韩笑, 葛威, 等. 定向接收低冲突率水声网络媒体接入控制协议[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(3): 925-933.
ZHENG M C, HAN X, GE W, et al. Directional reception low collision probability MAC protocol for underwater acoustic networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(3): 925-933.
- [15] KHALIL I M, GADALLAH Y, HAYAJNEH M, et al. An adap-



- tive OFDMA-based MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8782-8805.
- [16] BOUABDALLAH F, BOUTABA R. A distributed OFDMA medium access control for underwater acoustic sensors networks[C]// *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [17] TAN H P, O' SULLIVAN C, SEAH W K G. Interference management for medium access control in CDMA underwater acoustic sensor networks[C]// *Proceedings of the VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2008: 2116-2120.
- [18] GUO J N, SONG S S, LIU J, et al. An MC-CDMA-based MAC protocol for efficient concurrent communication in mobile underwater acoustic networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2024, 23(12): 12428-12443.
- [19] BURROWES G E, BROWN J, KHAN J Y. Adaptive space time - time division multiple access (AST-TDMA) protocol for an underwater swarm of AUV's[C]// *Proceedings of the 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-10.
- [20] 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, 117.
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, 117.
- [21] ZHANG R Q, CHENG X L, CHENG X, et al. Interference-free graph based TDMA protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 4008-4019.
- [22] ALFOUZAN F, SHAHRABI A, GHOREYSHI S M, et al. An energy-conserving depth-based layering MAC protocol for underwater sensor networks[C]// *Proceedings of the 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [23] HAN G J, WANG X J, SUN N, et al. A Collision-free MAC protocol based on quorum system for underwater acoustic sensor networks[C]// *Proceedings of the 2020 16th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 671-676.
- [24] 曾祥文. 基于时隙调度的水声通信网络 MAC 协议研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
ZENG X W. Research on underwater acoustic communication network MAC protocol based on slot scheduling[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [25] NAMGUNG J I, SHIN S Y, YUN N Y, et al. Adaptive GTS allocation scheme based on IEEE 802.15.4 for underwater acoustic sensor networks[C]// *Proceedings of the 2010 IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 297-301.
- [26] PRIYA B, MANOHAR S S. CH-MAC: congestion control hybrid MAC for wireless sensor network[C]// *Proceedings of the 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [27] DI VALERIO V, PRESTI F L, PETRIOLI C, et al. A self-adaptive protocol stack for underwater wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the OCEANS 2016-Shanghai*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-8.
- [28] GAZI F, AHMED N, MISRA S. RE-MAC: a hybrid MAC protocol for underwater multimedia communication system[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(1): 840-847.
- [29] CENTELLES D, SORIANO A, MARTÍ J V, et al. Underwater multirobot cooperative intervention MAC protocol[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 60867-60876.
- [30] WANG S F, GUO Y Z, YAN L, et al. Wait-time aware TDMA MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[C]// *Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 3161-3166.
- [31] QIU T Y, LI Y P, FENG X S. Optimal broadcast scheduling algorithm for a multi-AUV acoustic communication network[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2023, 31(5): 2058-2069.
- [32] YUAN Y F, ZHUO X X, LIU M Y, et al. A centralized cross-layer protocol for joint power control, link scheduling, and routing in UWSNs[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(7): 12823-12833.
- [33] FU Z, WANG Y, CHEN F J, et al. A parallel-transmission enhanced random time slot MAC protocol for UASNs[C]// *Proceedings of the 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [34] QIU T Y, LI Y P, FENG X S. Distributed channel sensing MAC protocol for multi-UUV underwater acoustic network[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(9): 16119-16133.
- [35] GUO Y A, OBAIDAT M S, GUO J, et al. Adaptive varying contention window MAC protocol based on underwater acoustic propagation delay[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(13): 15019-15031.
- [36] GUO J N, SONG S S, LIU J, et al. AS-MAC: an adaptive scheduling MAC protocol for reducing the end-to-end delay in

- AUV-assisted underwater acoustic networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(2): 1197-1211.
- [37] LIU M Y, ZHUO X X, YUAN Y F, et al. Adaptive scheduling MAC protocol in underwater acoustic broadcast communications for AUV formation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(8): 6887-6901.
- [38] JIN X C, LIU Z X, MA K. Joint slot scheduling and power allocation for throughput maximization of clustered UASNs[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(19): 17085-17095.
- [39] BUSACCA F, GALLUCCIO L, PALAZZO S, et al. A distributed multi-armed bandit approach for modulation adaptation in underwater networks[C]//Proceedings of the 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-6.
- [40] LI Z R, GE W, YIN J W, et al. A multiobjective optimization algorithm-based directional reception TDMA protocol for underwater acoustic networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(16): 26755-26769.
- [41] DONG W, YANG Q L, CHEN Y X, et al. RHNE-MAC: random handshake MAC protocol based on Nash equilibrium for underwater wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 21090-21098.
- [42] XU H Y, YE F, SU H, et al. Energy-efficient relay selection and power allocation optimization for lifetime maximization in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(11): 20854-20869.
- [43] LIU Q P, QIAO G, MAZHAR S, et al. A full-duplex directional MAC framework for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(14): 14647-14661.

[作者简介]



赵瑞琴 (1981—), 女, 博士, 西北工业大学航海学院副教授、博士生导师, 西北工业大学深圳研究院研究员, 主要研究方向为海洋信息网络、水声通信组网技术等。



杨若涵 (2002—), 女, 西北工业大学航海学院硕士生, 西北工业大学深圳研究院科研助理, 主要研究方向为水声通信网络多址接入协议。