面向水下 AUV 辅助数据收集的动态窗口调度与协作预约 MAC 协议

叶方[1,2]，张开越[1,2]，卓志敏[3]，李一兵[1,2]

（1.哈尔滨工程大学信息与通信工程学院，黑龙江 哈尔滨 150001；
2.黑龙江省智能感知与群智计算创新研究中心（国际合作），黑龙江 哈尔滨 150001；3.北京电子工程总体研究所，北京 100854）

摘要：自主水下航行器（AUV）辅助网络在高负载下易发生接入冲突与链路中断，严重影响数据收集效率。为最大化数据收集效率与信道利用率，提出了一种基于动态窗口调度与协作预约 MAC 协议（DWS-CR-MAC）。首先，设计基于碰撞模型的自适应竞争窗口机制，动态调整最优窗口以缓解无先验拓扑信息时的接入碰撞；其次，提出基于链路剩余生存时间（RLL）的动态调度与剪枝策略，利用 AUV 运动模型剔除不稳定链路；最后，构建基于邻居监听的协作恢复机制，通过捎带请求实现冲突节点的免随机竞争补充接入。仿真结果表明，所提协议能够有效缓解高负载下的接入冲突与链路中断问题，提高平均网络吞吐量和数据包交付率，降低控制开销占比和平均能耗。

关键词：水下无线传感器网络；自主水下航行器；介质访问控制；动态窗口调度；协作预约
中图分类号：TP309
文献标志码：A
doi：10.11959/j.issn.1000–436x.TXXB260123

Dynamic window scheduling and collaborative reservation MAC protocol for AUV-assisted underwater data collection

Ye Fang[1,2], Zhang Kaiyue[1,2], Zhuo Zhimin[3], Li Yibing[1,2]

1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China
2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory (International Cooperation) of Intelligent Perception and Swarm Intelligence Computing, Harbin 150001, China
3. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China

Abstract: Autonomous underwater vehicle (AUV)-assisted networks were prone to access collisions and link interruptions under high loads, which seriously affected data collection efficiency. To maximize data collection efficiency and channel utilization, a MAC protocol based on dynamic window scheduling and collaborative reservation, named DWS-CR-MAC, was proposed. Firstly, an adaptive contention window mechanism based on a collision model was designed, and the optimal window was dynamically adjusted to mitigate access collisions without prior topology information. Secondly, a dynamic scheduling and pruning strategy based on remaining link lifetime (RLL) was proposed, and unstable links were eliminated using the AUV mobility model. Finally, a cooperative recovery mechanism based on neighbor overhearing was constructed, and supplementary access for collided nodes without random contention was achieved by piggybacking requests. Simulation results show that the proposed protocol effectively mitigates access collisions and link interruptions under high loads, improves average network throughput and packet delivery ratio, and reduces control overhead ratio and average energy consumption.

Key words: underwater wireless sensor network, autonomous underwater vehicle, medium access control, dynamic window scheduling, cooperative reservation

收稿日期：2026–03–16；**修回日期：**2026–06–10
通信作者：李一兵，liyibing0920@126.com
基金项目：黑龙江省优秀青年基金资助项目（No.YQ2024F017）
Foundation Item：The Excellent Youth Foundation of Heilongjiang Province (No.YQ2024F017)

0　引言

水下无线传感器网络（underwater wireless sensor network, UWSN）是深海长期环境监测、海洋生物行为观察等任务的核心基础设施[1]。在这些应用场景中，传感器节点需记录并积压海量原始观测数据，呈现出高负载、非实时和时延可容忍的特征[2]。然而，在处理此类大规模观测数据时，传统的水下网络面临着严峻的传输挑战：一方面，声信号在远距离传输中受频率相关衰减制约，且高负载并发极易引发严重的信道碰撞与重传开销；另一方面，在高负载数据传输场景中，多跳中继模式会使靠近汇聚节点的节点因转发负担过重而迅速耗尽能量，产生“能量空洞”效应，严重限制了监测系统的生存周期[3]。针对上述问题，自主水下航行器（autonomous underwater vehicle, AUV）辅助数据收集已成为缓解远距离传输损耗和多跳能量不均的重要方案[4]。凭借其灵活性高、部署成本低和功能多样的优势，AUV能够深入复杂海域，将原本的长距离高损耗水声通信转化为短距离高可靠链路，同时能有效缓解多跳转发带来的能量不均问题[5]。在长期监测和周期性数据回收任务中，AUV按预设航迹巡航，经过传感器节点附近时收集缓存数据，从而减少多跳中继依赖，降低中继节点负载和能耗，确保高负载、非实时和时延可容忍的数据采集任务能够可靠执行。

在上述AUV辅助数据收集架构下，介质访问控制（medium access control, MAC）协议在接入调度与资源分配方面仍面临一系列挑战。AUV的持续移动使通信覆盖范围内的节点集合和竞争负载动态变化，若MAC协议无法根据实时负载调整接入策略，则固定竞争机制极易导致高负载区域的握手冲突、信道拥塞和时隙资源浪费[6]。此外，AUV位置变化会改变节点间传播时延和传输调度关系，固定传输调度顺序难以及时适应动态拓扑，易造成接收端冲突和信道利用率下降[7-8]。由于AUV与传感器节点之间的链路连接时间有限，如何在有限通信窗口内优化接入竞争与传输时序，提升高负载下的数据收集量，仍是当前研究的难点。

1　相关工作

1.1　现有工作

目前，在水下MAC协议研究方面，研究人员已提出多种改进方案。经典预约式协议（如时隙FAMA协议[9]和水下多址接入碰撞避免MAC协议[10]）均基于发送请求（request to send, RTS）与允许发送（clear to send, CTS）的握手机制进行信道预约，以缓解水声长传播时延和隐藏终端引起的碰撞问题。然而，该类协议在节点密集或高负载下，多RTS并发易导致控制帧碰撞、频繁退避和信道空闲增加。

为提高多节点竞争场景下的接入效率，部分研究进一步对握手机制进行优化。文献[11]提出了空间公平MAC协议，通过延迟CTS响应并设置RTS竞争周期，使接收端能够在一个竞争周期内收集多个RTS，从而缓解传统先到先服务机制的空间不公平问题。文献[12]提出了传播时延感知机会调度协议，利用传播时延信息进行机会性调度，提高移动水声网络中的时空复用效率。文献[13]提出了基于RTS竞争的时隙FAMA协议，在RTS中引入竞争编号，使多个RTS并发时能够选出获胜节点继续完成握手，减少多RTS冲突后全部退避造成的时隙浪费。文献[14]提出了空间公平与低冲突率MAC协议，通过竞争窗口空间公平调整和延迟DATA发送机制，缓解邻居控制包与数据包之间的冲突。文献[15]提出了多接收时隙FAMA协议，允许接收节点在单个握手周期内处理多个RTS，并通过CTS广播多个发送节点的调度结果，从而减少重复握手开销。文献[16]提出了改进型握手低时延协议，在CTS帧中引入节点优先级字段，使多个待发送邻居节点能够在一次握手后按优先级连续发送数据，从而减少重复握手带来的接入等待。上述方法在一定程度上提升了多RTS竞争和多节点调度场景下的信道利用率。然而，其竞争窗口、排序规则或优先级队列多依赖局部状态、规则拓扑或经验参数，对节点数量动态变化的适应性不足，尚未面向AUV动态覆盖与历史接入负载进行自适应窗口计算，难以适应节点密度快速变化的场景。

为减少控制开销，部分研究利用邻居监听、控制信息复用和调度信息捎带等机制，降低对独立控制帧的依赖并增强调度鲁棒性。文献[17]提出了基于规则与感知的MAC协议，通过被动监听信道规则来感知邻居状态，在减少控制报文交互的同时支持并发传输。文献[18]提出了动态高负载自适应MAC协议，将下一帧信道预约信息合并到当前数

据帧，使节点能够在数据生成前完成预约，从而减少高负载下频繁信道预约带来的等待时延。文献[19]提出了自适应广播调度MAC协议，在普通数据包中携带下一发送节点、下一控制节点和帧结束时间等调度辅助信息，使节点在控制包丢失时仍可依据已接收的数据包调整发送时刻，从而提高低质量水声信道下的调度鲁棒性和传输连续性。该类研究表明，邻居监听和数据包携带轻量级控制信息有助于降低独立控制帧依赖，但现有方法主要服务于并发调度或广播调度连续性，尚未针对RTS碰撞后的失联节点预约恢复进行设计，难以充分利用已成功接入节点的协作能力。

针对AUV辅助数据收集场景，部分学者进一步从轮询、图着色、动态退避、排序调度和轨迹调度等角度进行优化。文献[20]提出了水下轮询（underwater polling, UW-POLLING）协议，通过移动汇聚节点逐个查询传感器状态，能够避免数据阶段竞争冲突，但节点数量较多时轮询周期较长，易增加数据收集的等待时间。文献[21]提出了奇偶分组图着色MAC协议，利用预广播的AUV路径进行分组和图着色，为节点分配无冲突时隙，但对先验拓扑信息和路径信息依赖性较强。文献[22]提出了动态退避自适应MAC（dynamic backoff adaptive MAC, DBA-MAC）协议，根据传播时延和网络负载动态调节退避参数，以适应网络环境变化。文献[23]提出了自适应调度MAC协议，面向AUV辅助水声网络中的动态双向数据流，联合优化调度顺序和时隙长度，以降低端到端时延。该方法说明，AUV接入位置变化会影响数据流方向和调度效率，但其重点在于双向流时延优化，缺少对AUV移动导致链路中断风险的调度规避，易造成传输失败和调度资源浪费。

部分研究开始针对数据收集中的负载动态性和AUV移动轨迹适应问题展开研究。文献[24]提出了动态切换传输MAC协议，依据网络负载状态切换传输模式，并结合节点数量设置退避窗口，以提升高负载下的吞吐性能，但其优化重点仍在于负载驱动的模式选择和退避控制，对AUV移动导致的链路中断问题考虑不足。文献[25]提出了基于动态轨迹的自适应调度方法，通过实时状态感知规划AUV轨迹，并依据数据上传优先级安排节点发送顺序，体现了轨迹与数据调度联合优化的思想。然而，该方法主要针对轨迹规划和数据上传优先级，对高负载竞争阶段的RTS碰撞恢复以及长时数据传输中的链路剪枝考虑不足，难以保障动态链路下的数据完整传输。

综上所述，现有研究已在握手优化、负载自适应、邻居监听、排序调度和AUV动态数据收集方面取得进展，但在高负载AUV辅助数据收集场景下仍存在以下不足：①现有竞争窗口设计多依赖固定参数、局部状态或经验退避，缺乏面向未知节点密度和目标接入成功率的自适应窗口计算机制；②现有排序调度和动态调度方法主要关注接入时延、时隙利用或数据上传优先级，对节点积压数据导致的长时传输约束考虑不足，难以避免AUV移动造成的链路中断；③已有邻居监听或数据捎带机制多服务于并发调度或调度鲁棒性增强，尚未充分用于RTS碰撞后的低开销预约恢复。因此，有必要研究面向高负载AUV辅助数据收集场景下的高效MAC协议，以降低接入冲突和链路中断影响，提升数据收集效率和信道利用率。

1.2 本文工作

针对上述挑战，本文提出了一种动态窗口调度与协作预约MAC（dynamic window scheduling and collaborative reservation MAC, DWS-CR-MAC）协议，旨在实现AUV移动场景下接入效率与可靠性的优化。本文的主要贡献如下。

（1）针对高负载下AUV缺乏先验拓扑信息、竞争窗口设置不当易导致RTS碰撞的问题，提出了一种基于碰撞模型的自适应竞争窗口调整机制。该机制首先面向RTS竞争过程建立了基于三维空间的碰撞概率模型，然后推导出满足目标接入成功率要求的最小竞争窗口，并据此动态调整AUV当前覆盖范围内的竞争窗口大小，从而降低AUV驶入未知区域时因竞争窗口过大或过小造成的RTS碰撞和接入等待开销。

（2）针对拓扑高动态变化导致长时大数据包传输失败的问题，设计了一种基于链路剩余生存时间（remaining link lifetime, RLL）的动态调度与剪枝策略。该策略通过建立AUV与传感器节点的相对运动几何模型，估计当前通信链路的剩余可用时长，并结合数据传输完成时间判断链路是否满足完整传输条件，在调度阶段剔除即将断连的节点，优先调度链路状态稳定的节点，从而降低AUV移动

导致的传输中断和数据丢包，保障数据收集的连续性与完整性。

（3）针对握手失败造成的信道空闲浪费问题，提出了一种基于邻居监听的协作恢复机制。该机制利用水声信道的广播特性，使邻居节点能够识别未被 AUV 纳入调度的节点请求，并根据监听结果选择距离较远且具有补充调度价值的失联节点，在数据帧中捎带其请求信息以触发 AUV 的补充调度，在不需要额外控制信令交互的前提下，实现碰撞节点的低开销接入恢复，提高高负载下的节点接入率和时隙利用率。

2　系统模型

2.1　网络架构与假设

本文构建的 UWSN 架构旨在支持对水下监测区域的数据收集任务，该架构由一个作为移动汇聚节点的 AUV 与若干静态部署的水下传感器节点构成。如图 1 所示，系统包含 N 个随机分布在三维水下区域的传感器节点，节点集合记为 $\mathcal{S}=\{s_1,s_2,\cdots,s_N\}$。每个节点均被分配了唯一的地址，其固定的三维位置坐标记为 $P_i=(x_i,y_i,z_i)$。考虑到现有水下定位与导航技术已较为成熟，本文默认网络中的传感器节点与 AUV 均能够通过预设部署信息或实时定位机制获取自身位置信息[26]。同时，由于复杂海洋环境下的 AUV 路径规划本身属于相对独立且具有较高复杂度的研究问题[27-28]，本文不对其展开进一步讨论，而是将 AUV 设置为以恒定巡航速度 v_{auv} 沿预设轨迹航行，并周期性地执行传感器数据收集任务。此外，所有节点的水声通信调制解调器均工作于半双工模式，共享同一水声信道，且 AUV 与传感器节点具有相同的最大通信半径 R_c。

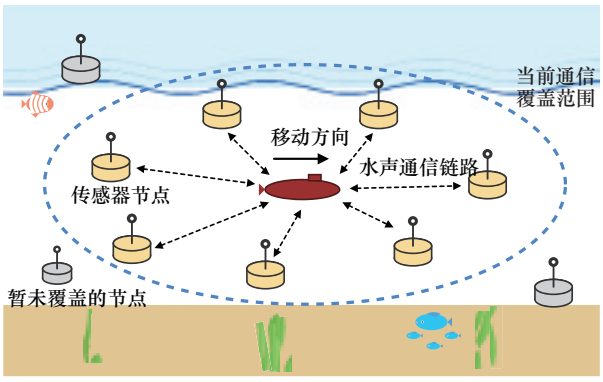


图 1　系统架构

2.2　水声信道与传播模型

水下声信号在传播过程中会受到路径损耗的影响，该损耗主要由扩展和吸收损耗构成。根据文献[29]的传播模型对信道衰减进行建模，在给定信号频率 f_c 和传播距离 l 时，信道衰减 $A(l,f_c)$ 可表示为：

$$A(l,f_c)=A_0 l^k a(f_c)^l \tag{1}$$

其中，A_0 为归一化常数，k 为描述传播几何的扩展因子，$a(f_c)$ 为与频率相关的吸收系数。根据 Thorp 模型[30]，吸收系数 $a(f_c)$ 可表示为：

$$10\lg a(f_c)=\frac{0.11 f_c^2}{1+f_c^2}+\frac{44 f_c^2}{4\,100+f_c^2}+2.75\times 10^{-4} f_c^2+0.003 \tag{2}$$

水下环境噪声采用 Wenz 模型[31]进行描述，其主要由湍流噪声 $N_t(f_c)$、航运噪声 $N_s(f_c)$、波浪噪声 $N_w(f_c)$ 和热噪声 $N_{\text{th}}(f_c)$ 组成，可写为：

$$N(f_c)=N_t(f_c)+N_s(f_c)+N_w(f_c)+N_{\text{th}}(f_c) \tag{3}$$

在给定发射功率 P_t 和接收机带宽 Δf 时，接收端信噪比（signal-to-noise ratio, SNR）可表示为：

$$\text{SNR}(l,f_c)=\frac{P_t}{A(l,f_c)N(f_c)\Delta f} \tag{4}$$

若采用二进制相移键控调制，则长度为 L 比特的分组错误率（packet error rate, PER）可由误比特率近似得到。

$$P_{\text{PER}}=1-\left[1-Q\left(\sqrt{2\,\text{SNR}(l,f_c)}\right)\right]^L \tag{5}$$

2.3　AUV 运动几何模型

AUV 在数据收集过程中持续移动，其与静态传感器节点之间的通信距离不断变化，导致通信链路可能在数据传输过程中发生中断。为描述 AUV 移动对链路稳定性的影响，本文参考移动自组织网络中链路稳定性评估与链路失效时间预测的相关思想[32-33]，结合节点间的相对位置、相对速度和最大通信半径对 RLL 进行估计。设 t 时刻 AUV 的位置为 P_{auv}，速度矢量为 v_{auv}，节点 s_i 的位置为 P_i。两者间的相对位置矢量为：

$$\Delta P=P_i-P_{\text{auv}} \tag{6}$$

当经过时间 Δt 后，若两者间距等于 R_c，则链路进入断开临界状态，可表示为：

$$\|\Delta P-v_{\text{auv}}\Delta t\|^2=R_c^2 \tag{7}$$

对式(7)展开整理，可得关于Δt的一元二次方程。

$$|v_{\text{auv}}|^2\Delta t^2-2(\Delta P\cdot v_{\text{auv}})\Delta t+(|\Delta P|^2-R_c^2)=0 \quad (8)$$

求解式(8)得到的正实根即RLL，为后续即将失效链路对应的节点剪枝判决提供依据。

3　DWS-CR-MAC协议

由引言和相关工作分析可知，AUV辅助数据收集场景下的MAC协议仍需解决3个关键问题：一是现有非自适应竞争窗口设置难以适应AUV移动造成的节点密度动态变化，导致接入预约阶段碰撞率居高不下；二是多数调度策略未充分考虑AUV与节点的相对移动性，易为即将中断的链路分配传输资源，引发数据传输失败并降低数据交付的可靠性；三是RTS由于碰撞冲突丢失会造成预约失败，若仍依赖重新竞争恢复，将增加控制开销并带来二次碰撞风险。

针对上述问题，本文提出了一种DWS-CR-MAC协议。该协议将通信周期划分为信标广播与竞争接入、数据调度和数据传输3个阶段。首先，在信标广播与竞争接入阶段，设计了基于三维空间碰撞概率模型的自适应竞争窗口优化机制。AUV根据当前通信范围内的节点数量估计结果，计算满足目标接入成功率的竞争窗口，并通过信标帧广播给候选节点，从而降低预约阶段的RTS碰撞概率。其次，在数据调度阶段，构建了一种基于RLL的动态调度与剪枝策略，优先为稳定链路分配时隙，避免资源浪费于即将中断的链路。最后，在数据传输阶段，设计了一种基于邻居监听与数据捎带的协作恢复机制，允许节点在传输数据时附带未被调度邻居的请求信息，由AUV触发重新调度，从而在几乎不增加信令开销的前提下提升接入成功率和信道利用率。

3.1　帧结构设计

为支撑动态负载接入控制、长时传输链路判定和握手失败恢复，本节对帧结构进行了扩展，增加了竞争窗口长度、节点位置、载荷大小、授权列表、拒绝列表和援救节点等字段，以支持竞争窗口调整、链路状态判定和协作恢复调度。上述字段分别服务于自适应竞争窗口计算、基于RLL的调度剪枝和基于邻居监听的协作恢复。DWS-CR-MAC协议定义了Beacon帧、RTS帧、CTS帧和DATA帧4种类型的帧格式，其具体结构如图2所示。各类帧除了包含帧类型、源地址与目的地址等公共字段外，还对特定功能设计了专用字段。

Beacon帧由AUV在每轮通信周期起始阶段广播发送，用于唤醒节点并发起竞争。其中，位置信息字段携带AUV当前坐标；竞争窗口长度字段携带由AUV计算得到的竞争窗口长度T_{cw}^*。接收到Beacon帧的传感器节点，在区间$[0,T_{\text{cw}}^*]$内随机生成本地竞争退避时间，并在退避结束后发送RTS帧以发起接入请求。与采用固定竞争窗口的方法相比，本文根据活跃节点数量的估计结果确定竞争窗口时长，使节点密集区域的RTS发送更加分散，并避免节点较少时产生过长的等待时间。

RTS帧由传感器节点发送，旨在申请信道资源并辅助AUV完成链路评估。其中，位置信息字段携带传感器自身的实时坐标，AUV利用该位置信息计算RLL，作为调度剪枝判决的核心依据；载荷大小字段表示节点请求发送数据帧的数量，为AUV后续数据调度提供依据。

CTS帧由AUV在竞争阶段结束后发送，作为全网调度指令载体，指导节点有序传输与协作恢复。其结构包含授权调度和拒绝调度列表两部分。其中，授权调度列表由授权节点数量字段和授权信息集合$\mathcal{L}_{\text{grant}}$构成，$\mathcal{L}_{\text{grant}}$由若干组授权节点地址和

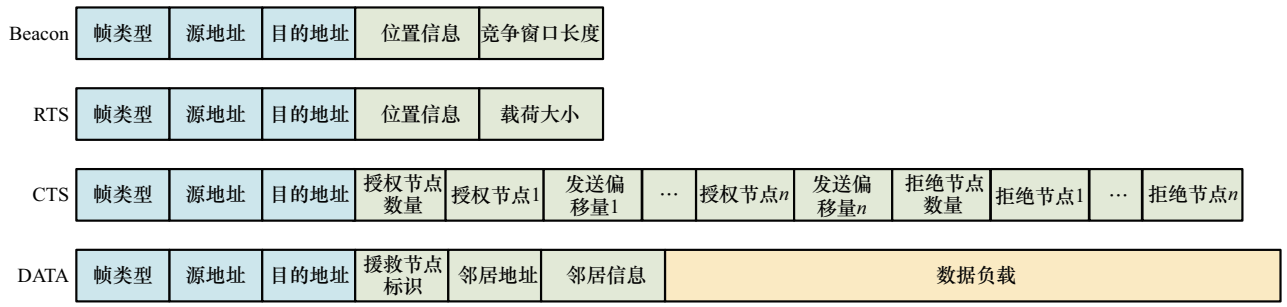


图2　4种类型帧结构

发送偏移量 W_k 二元组组成，用于指示被调度节点按序发送数据。W_k 由AUV在完成竞争结果判定和链路剪枝后计算得到，用于控制授权节点DATA帧的发送时刻，与Beacon帧中用于RTS随机竞争的竞争窗口时长分别作用于数据调度和竞争接入阶段。拒绝调度列表由拒绝节点数量字段和拒绝节点集合 $\mathcal{L}_{\text{reject}}$ 构成，其中 $\mathcal{L}_{\text{reject}}$ 仅包含本轮被拒绝节点的地址，用于记录虽成功竞争但不符合数据发送条件的节点。

DATA帧由传感器节点发送，用于承载业务数据，并在需要时附带协作恢复信息。其中，援救节点标识字段用于指示当前DATA帧是否携带协作恢复信息。当发送节点侦听到邻居节点请求失败且满足协作恢复条件时，在DATA帧头中填充该邻居节点的信息。若当前不存在协作恢复需求，则不附加上述字段。

因此，DWS-CR-MAC协议的控制开销主要由公共控制字段、帧头功能扩展字段和CTS调度列表字段构成，其增量随本轮接入节点数和协作恢复触发情况变化。

3.2　基于碰撞模型的自适应竞争窗口调整机制

3.2.1　基于三维空间的碰撞概率模型分析

在AUV广播信标发起握手竞争阶段，通信范围内的传感器节点需在竞争窗口内随机退避后发送RTS帧以申请信道资源。针对高并发接入场景下的信道冲突问题，本节建立了基于三维空间的碰撞概率模型，分析竞争窗口大小对传输可靠性的影响。

假设当前时刻处于AUV通信覆盖范围内的活跃节点数量为 $\tilde{n}$。对于任意一个正在发送RTS的目标节点，其余 $\tilde{n}-1$ 个节点均可视为潜在干扰节点。假设各节点的RTS发送时刻在 $[0,T_{\text{cw}}]$ 内独立均匀分布，RTS报文的传输时长为 τ_{rts}，水声传播速度为 c。在水声网络中，RTS是否在AUV端发生冲突不仅取决于节点的发送时刻差，还与节点到AUV的传播距离差有关[34-35]。设目标节点和潜在干扰节点的发送时刻分别为 t 和 t'，到AUV的距离分别为 r 和 r'，则二者RTS在AUV端发生冲突的条件为：

$$\left| t-t'+\frac{r-r'}{c} \right| < \tau_{\text{rts}} \tag{9}$$

由此可知，潜在干扰节点只有在式(10)所示区间发送RTS，才可能与目标RTS在AUV端发生冲突。

$$t+\frac{r-r'}{c}-\tau_{\text{rts}} < t' < t+\frac{r-r'}{c}+\tau_{\text{rts}} \tag{10}$$

由于潜在干扰节点的实际发送时刻 t' 只能位于竞争窗口 $[0,T_{\text{cw}}]$ 内，因此有效冲突时间长度应为式(10)所示区间与竞争窗口的交集长度，可表示为：

$$L(r,t,r')=\left[\min\left(T_{\text{cw}},t+\frac{r-r'}{c}+\tau_{\text{rts}}\right)-\max\left(0,t+\frac{r-r'}{c}-\tau_{\text{rts}}\right)\right]^{+} \tag{11}$$

其中，$[x]^{+}=\max(x,0)$。假设活跃节点均匀分布在以AUV为球心、半径为 R_c 的三维球形通信覆盖范围内，则节点到AUV的距离 r 的概率密度函数为：

$$f_R(r)=\frac{3r^2}{R_c^3},0\leqslant r\leqslant R_c \tag{12}$$

由于潜在干扰节点的发送时刻在 $[0,T_{\text{cw}}]$ 内均匀分布，因此对于给定目标RTS，任意一个潜在干扰节点与其发生冲突的平均概率为：

$$p_c(r,t,T_{\text{cw}})=\int_0^{R_c}\frac{L(r,t,r')}{T_{\text{cw}}}f_R(r')\mathrm{d}r' \tag{13}$$

进一步，对目标节点的空间位置和发送时刻进行平均，可得考虑三维空间后的RTS成功接入概率为：

$$P_{\text{succ}}^{\text{3D}}=\int_0^{R_c}\int_0^{T_{\text{cw}}}\left[1-p_c(r,t,T_{\text{cw}})\right]^{\tilde{n}-1}\frac{1}{T_{\text{cw}}}f_R(r)\mathrm{d}t\mathrm{d}r \tag{14}$$

式(14)表明，节点空间位置会通过传播时延差异影响RTS到达AUV的时刻，进而改变接入阶段的冲突概率。为了便于后续自适应竞争窗口的工程实现，进一步给出式(14)所示的低复杂度近似形式。当节点到AUV的传播距离相差较小时，有：

$$\frac{r-r'}{c}\approx 0 \tag{15}$$

此时，式(10)退化为：

$$|t-t'|<\tau_{\text{rts}} \tag{16}$$

当 $T_{\text{cw}}\gg\tau_{\text{rts}}$ 时，目标RTS位于竞争窗口边界附近的概率较小，边界截断对平均冲突时间长度的影响可以忽略。因此，式(11)可以近似表示为：

$$L(r,t,r')=2\tau_{\text{rts}} \tag{17}$$

将式(17)代入式(13)，可得：

$$p_c(r,t,T_{\text{cw}})\approx\int_0^{R_c}\frac{2\tau_{\text{rts}}}{T_{\text{cw}}}f_R(r')\mathrm{d}r' \tag{18}$$

概率密度函数满足：

$$\int_0^{R_c} f_R(r')\mathrm{d}r' = 1 \tag{19}$$

因此，单个干扰节点造成冲突的概率可近似为：

$$p_c \approx \frac{2\tau_{\mathrm{rts}}}{T_{\mathrm{cw}}} \tag{20}$$

当 $T_{\mathrm{cw}} \gg \tau_{\mathrm{rts}}$ 时，利用 $(1-x)^m \approx \mathrm{e}^{-mx}$，式(14)可进一步近似表示为：

$$P_{\mathrm{succ}} \approx \left(1-\frac{2\tau_{\mathrm{rts}}}{T_{\mathrm{cw}}}\right)^{\tilde{n}-1} \approx \mathrm{e}^{-\frac{2(\tilde{n}-1)\tau_{\mathrm{rts}}}{T_{\mathrm{cw}}}} \tag{21}$$

3.2.2　自适应竞争窗口调整机制

后续计算采用式(21)所示的闭式近似，可以避免三维空间积分模型带来的较高计算复杂度，因此更适用于 AUV 自适应竞争窗口调整。为了保障系统的可靠性，设定目标接入成功率阈值为 P_{th}。由式(21)可推导出满足可靠性约束所需的最小竞争窗口长度 T_{cw}^* 为：

$$T_{\mathrm{cw}}^* = -\frac{2(\tilde{n}-1)\tau_{\mathrm{rts}}}{\ln(P_{\mathrm{th}})} \tag{22}$$

如图 3 所示，在实际水下巡航场景中，AUV 与传感器节点间的相对运动导致通信覆盖范围内的节点集合呈动态变化特征：一方面，将已完成传输或位置落后的节点移出通信覆盖范围；另一方面，沿途新的传感器节点不断加入竞争序列。为了保障动态网络接入公平性并提高信道利用率，AUV 需根据实时网络负载动态计算 T_{cw}^* 并通过 Beacon 帧广播给传感器节点。

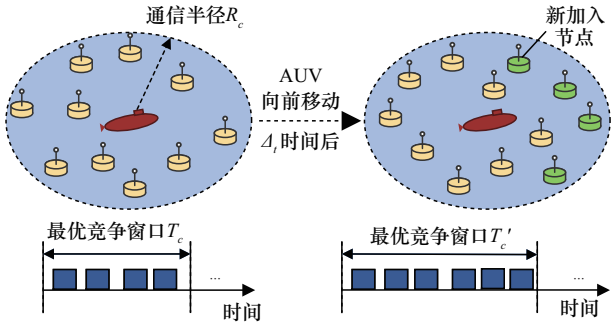


图3　基于动态负载感知的竞争窗口自适应调整

首先，AUV 会维护一张节点拓扑表 $\mathcal{T}$。在巡航时刻 t，每当 AUV 收到来自传感器节点 s_i 的控制报文或数据包时，会解析并提取其中携带的节点地址和位置坐标，并对拓扑表 $\mathcal{T}$ 进行更新。基于此拓扑信息，AUV 利用自身坐标 P_{auv} 与传感器节点位置 P_i 计算相对距离，从而筛选出当前时刻 t 位于通信半径 R_c 内的活跃节点集合 $\mathcal{N}_{\mathrm{active}}(t)$。

$$\mathcal{N}_{\mathrm{active}}(t) = \{ s_i \in T \,|\, \| P_{\mathrm{auv}} - P_i \| \leqslant R_c \} \tag{23}$$

考虑到在网络部署初期或节点分布稀疏区域，$\mathcal{N}_{\mathrm{active}}(t)$ 可能过小，为避免竞争窗口计算失效，设最小预估节点数量常数为 $m_{\min}$，则节点数量估值为：

$$\tilde{n} = \max(|\mathcal{N}_{\mathrm{active}}(t)|, m_{\min}) \tag{24}$$

将节点数量估值 $\tilde{n}$ 代入式(22)，可得到适配于当前网络负载及可靠性阈值的竞争窗口长度 T_{cw}^*。通过该机制，AUV 能够随巡航位置的变化动态调整接入策略，在节点密集区域增大竞争窗口以降低碰撞概率，在节点稀疏区域减小竞争窗口以减少时延。

3.3　基于 RLL 的动态调度与剪枝策略

如图 4 所示，在实际水下巡航场景中，AUV 与传感器节点间的相对运动导致通信覆盖范围内的节点集合呈动态变化特征。为在有限通信窗口内最大化数据收集效率，减少因链路意外中断引发的无效传输与能量损耗，DWS-CR-MAC 协议设计了一种基于 RLL 的动态调度与剪枝策略。首先，在信标广播与竞争接入阶段，竞争窗口时长 T_{cw}^* 用于分散节点的 RTS 发送时刻，降低高负载下控制帧集中碰撞的概率，并为后续调度形成待调度节点集合 $\mathcal{Q}_{\mathrm{wait}}$。随后，AUV 根据各接入节点的 RLL 和待传数据量对该集合进行排序与剪枝，剔除预计无法在链路中断前完成传输的节点。对于经剪枝后保留的授权节点，AUV 进一步计算其发送偏移量 W_k，用于确定各节点 DATA 帧的发送时刻，使不同节点的数据帧能够错开发送，从而避免在 AUV 端发生数据冲突。由此，DWS-CR-MAC 协议将随机竞争接入与集中数据调度相结合，在降低预约碰撞的同时减少无效传输和数据冲突。

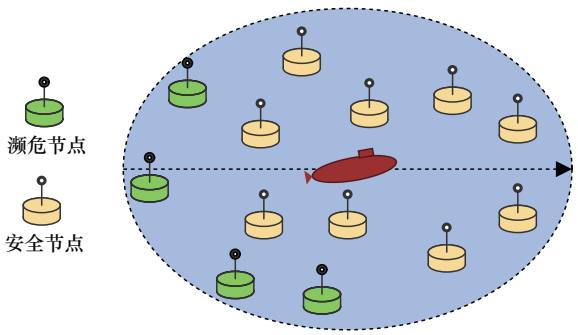


图4　AUV 动态巡航下的链路状态

在信标广播与竞争接入阶段结束后，AUV获得了成功接入节点集合，并将其存入 $\mathcal{Q}_{\text{wait}}$。基于2.3节构建的AUV运动几何模型，AUV计算 $\mathcal{Q}_{\text{wait}}$ 中每个节点的RLL，并记为 $T_{\text{RLL}}^{s_k}$。在此基础上，为了优先服务即将脱离通信覆盖范围的节点，AUV对请求节点按 $T_{\text{RLL}}^{s_k}$ 由小到大进行排序，生成候选调度序列 $\mathcal{L}_{\text{candidate}}$，可表示为：

$$\mathcal{L}_{\text{candidate}} = \{ s_1, s_2, \cdots, s_M \mid \forall m < n, T_{\text{RLL}}^{s_m} \leqslant T_{\text{RLL}}^{s_n} \} \quad (25)$$

其中，M表示待调度节点的总数，s_m和s_n分别表示候选序列中第m个和第n个被服务的节点索引。假设候选节点 s_k 在完整接收到CTS帧后立即发送DATA帧，则AUV对该节点DATA帧的最早开始接收时刻可表示为：

$$t_{\text{earliest}}^{s_k} = t_{\text{now}} + \tau_{\text{cts}} + 2T_{s_k} \quad (26)$$

其中，t_{now}为调度算法启动时刻，τ_{cts}为CTS控制帧的传输时长，T_{s_k} 为节点 s_k 与AUV间的传播时延。为避免与前序节点的传输发生冲突，节点的DATA帧在AUV端的实际开始接收时刻 $t_{\text{start}}^{s_k}$ 还需受信道忙碌状态约束。定义 t_{busy} 为信道被上一节点占用的结束时刻，T_{guard} 为保护间隔。对于候选调度序列中的第一个节点，此前尚无已授权节点占用信道，因此初始化 $t_{\text{busy}} = t_{\text{now}} + \tau_{\text{cts}}$，则 $t_{\text{start}}^{s_k}$ 可表示为：

$$t_{\text{start}}^{s_k} = \max\left(t_{\text{earliest}}^{s_k}, t_{\text{busy}} + T_{\text{guard}}\right) \quad (27)$$

进一步，根据节点请求的数据量，推导该节点DATA帧的预计完成传输时刻 $t_{\text{end}}^{s_k}$ 为：

$$t_{\text{end}}^{s_k} = t_{\text{start}}^{s_k} + \tau_{\text{data}}^{s_k} \quad (28)$$

其中，$\tau_{\text{data}}^{s_k}$ 为节点 s_k 传输DATA帧所需的持续时间。为了保证数据传输的完整性，本文设计了链路剪枝判决机制。若预计完成传输时刻超出了 $T_{\text{RLL}}^{s_k}$，即满足：

$$t_{\text{end}}^{s_k} > t_{\text{now}} + T_{\text{RLL}}^{s_k} \quad (29)$$

则判定该链路在传输过程中将发生中断。此时，算法将节点 s_k 从候选调度序列中剔除，并将其加入 $\mathcal{L}_{\text{reject}}$。反之，若链路状态满足传输要求，则将节点 s_k 加入 $\mathcal{L}_{\text{grant}}$，并更新 $t_{\text{busy}} = t_{\text{end}}^{s_k}$。对于被授权节点 s_k，其数据发送的偏移量 W_k 可表示为：

$$W_k = t_{\text{start}}^{s_k} - t_{\text{earliest}}^{s_k} \quad (30)$$

最终，AUV将携带 W_k 信息的 $\mathcal{L}_{\text{grant}}$ 和 $\mathcal{L}_{\text{reject}}$ 的调度结果封装于CTS帧并广播。通过该机制，本文能够指导邻居节点避免对失效链路进行盲目的协作恢复，从而在保障数据收集连续性的同时降低网络能耗与无效信令开销。

3.4　基于邻居监听的协作恢复机制

尽管自适应竞争窗口机制能够动态调节接入压力，但在高负载突发流量场景下，RTS控制帧仍存在因碰撞而丢失的风险，这将导致信道预约失效与通信资源浪费。针对这一问题，本文利用水声通信的广播特性与节点分布的空间相关性，设计了一种基于邻居监听的协作恢复机制。该机制旨在通过邻居节点对丢失请求的感知与捎带，实现信道预约过程的快速修复。

具体来说，当传感器节点 s_i 向AUV发送RTS接入请求时，受并发接入干扰影响，AUV可能无法正确解调该RTS帧。然而，位于节点 s_i 通信覆盖范围内的邻居节点 s_j，仍可能成功接收并正确解调该RTS帧。此时，节点 s_j 将 s_i 的请求信息存入本地候选监听集合 $\mathcal{L}_{\text{monitor}}^{j}$，该集合定义为：

$$\mathcal{L}_{\text{monitor}}^{j} = \{ s_i \mid R_j(\text{RTS}_i) = 1 \} \quad (31)$$

其中，$R_j(\text{RTS}_i) = 1$ 表示节点 s_j 成功解调了来自节点 s_i 的RTS帧。AUV完成调度并广播CTS帧后，节点将解析其中携带的 $\mathcal{L}_{\text{grant}}$ 与 $\mathcal{L}_{\text{reject}}$。随后，邻居节点 s_j 计算 $\mathcal{L}_{\text{monitor}}^{j}$ 与AUV全局调度列表的差集，识别预失联节点集合 $\mathcal{L}_{\text{lost}}^{j}$。

$$\mathcal{L}_{\text{lost}}^{j} = \{ s_i \mid s_i \in \mathcal{L}_{\text{monitor}}^{j} \,\&\, s_i \notin (\mathcal{L}_{\text{grant}} \cup \mathcal{L}_{\text{reject}}) \} \quad (32)$$

基于此，协作恢复的触发条件定义为 $\mathcal{L}_{\text{lost}}^{j} \neq \varnothing$。若满足该条件，则存在已发出RTS接入请求但未被AUV成功识别的节点。由于DATA帧头中的可扩展字段有限，本文设定每个协作节点在一次数据传输中最多捎带一个失联节点的预约信息。同时，一个失联节点只要被任意协作节点捎带一次，即可被AUV重新纳入候选调度序列。因此，协作恢复对象选择的目标是提高不同失联节点被恢复的比例。

在有限捎带机会下，若多个协作节点选择同一失联节点，或集中选择局部区域内的少数失联节点，则重复捎带不会增加有效恢复节点数，反而会降低捎带机会的利用效率。为此，本文采用本地分散化协作恢复对象选择策略。节点 s_j 优先选择本地候选集合中距离自身最远的失联节点作为协作恢复对象。该类节点位于当前协作节点可恢复集合的局部边缘位置，优先捎带该类节点有助于使不同协作

节点的恢复对象趋于分散，降低局部重复恢复概率，提高平均恢复比例。因此，节点s_j仅从$\mathcal{L}_{\text{lost}}^{j}$中选择与自身距离最远的失联节点$s_{\text{target}}$进行协作恢复。

$$s_{\text{target}} = \underset{s_i \in \mathcal{L}_{\text{lost}}^{j}}{\arg\max} \| P_j - P_i \| \tag{33}$$

确定协作对象后，节点s_j将s_{target}的地址及其请求数据量封装至自身DATA帧的可扩展头部。若该DATA帧被AUV成功接收，AUV可解析出被遗漏的预约请求，并将s_{target}加入后续调度等待序列，使其不需要再次经历RTS随机竞争即可获得补充调度机会。此时，捎带机制的附加开销仅来自DATA帧头中的少量扩展字段，却能够减少失联节点下一轮重新竞争所需的RTS控制帧、退避等待和潜在二次碰撞，从而提高控制信令利用率。若捎带失败，如协作节点DATA帧未被AUV成功接收，或失联节点未被任何授权邻居选中，则该失联节点仍在下一轮竞争阶段重新发起接入请求。在该情况下，本文协议不会额外生成独立控制帧，失败捎带仅带来有限的帧头扩展和本地监听集合维护开销，不会改变原有竞争流程。对于多个协作节点重复捎带同一失联节点的情况，AUV仅保留一次有效预约信息，并丢弃重复请求。由此，协作恢复机制在成功时可降低重复竞争开销，在失败时也不会引入额外握手过程，从而在高负载下兼顾恢复概率和控制开销。

3.5 复杂度分析

设网络中传感器节点总数量为N，单次通信周期内AUV通信覆盖范围内的活跃节点数量为M，每个传感器节点的邻居监听集合长度为K。由于AUV与传感器节点的算法流程不同，以下分别对两端的算法复杂度进行分析。

AUV的算法复杂度主要包含最优竞争窗口时长的计算及基于RLL的时隙调度。由3.2节可知，计算最优竞争窗口时长的复杂度为$O(1)$。由3.3节可知，计算M个节点RLL的复杂度为$O(M)$，对候选调度序列$\mathcal{L}_{\text{candidate}}$进行基于RLL升序排列的复杂度为$O(M\lg M)$，遍历序列进行剪枝判决与发送偏移量计算的复杂度为$O(M)$。因此，AUV端算法在单次通信周期内的整体复杂度为$O(M\lg M + M)$。

传感器节点的算法复杂度主要包含接入竞争与协作恢复机制。接入竞争阶段生成随机退避时间的复杂度为$O(1)$。由3.4节可知，协作恢复机制中计算本地监听集合与AUV全局调度列表差集的算法复杂度为$O(KM)$，在预约失联节点集合中执行本地分散化选择策略的复杂度为$O(K)$。因此，传感器节点端算法的整体复杂度为$O(KM + K)$。

考虑到实际场景中$K \ll N$且$M \ll N$，该协议在两端的计算开销均处于较低水平，满足水下资源受限节点的实时处理需求。

4 仿真结果与分析

4.1 仿真场景与参数设置

为验证DWS-CR-MAC协议的性能，本文基于NS-3构建了水下AUV移动数据收集仿真环境。网络拓扑由一个执行巡航任务的AUV节点和若干随机分布的水下传感器节点构成。其中，AUV节点作为移动数据汇聚中心，按照预设巡航轨迹在监测区域内执行数据收集任务；传感器节点则固定部署于三维水域空间内，负责环境数据采集与上传。仿真开始后，各传感器节点的业务数据到达过程服从泊松分布，并按设定的数据生成速率产生待发送数据，随后在侦听到AUV的Beacon信标后尝试接入网络。每轮仿真持续一个预设巡航周期，实验中不考虑重传机制，其余仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

仿真参数	参数值
网络大小/m	1 000×1 000×800
传感器节点数量	30~70
AUV移动速度/(m·s^{-1})	1~5
数据生成速率/(bit·s^{-1})	30~70
数据传输速率/(kbit·s^{-1})	4
数据包长度/B	128
RTS长度/B	10
最大通信半径/m	500
载波频率/kHz	30
通信带宽/kHz	4
最大传输包数	3
最小预估节点数量	5
Beacon帧广播周期/s	50
发送功率/W	2
接收功率/W	0.1

为评估DWS-CR-MAC协议的性能，本文选取UW-POLLING[20]、DBA-MAC[22]和ART-MAC作为

对比协议。其中，UW-POLLING代表传统的轮询式调度方法，DBA-MAC属于基于时空复用的按需分配协议，ART-MAC则是包含自适应竞争窗口计算和基于RLL排序机制的对比协议。考虑到DBA-MAC协议在原始设计中未充分顾及AUV移动引起的链路中断问题，本文对其调度过程作了适应性调整，即在数据调度阶段优先安排距离AUV较远的节点进行传输，尽量降低通信边缘节点因AUV驶离而导致的传输失败。本文主要从平均网络吞吐量、数据包交付率、控制开销占比和平均能耗4个方面对各协议进行分析。在默认情况下，传感器节点数量设为50，AUV移动速度设为2 m/s，数据生成速率设为50 bit/s。在此基础上，分别改变传感器节点数量、AUV移动速度和数据生成速率，对4种协议进行200轮蒙特卡罗重复仿真，并取平均结果进行分析。

4.2　基于三维空间的碰撞概率模型验证

为验证基于三维空间的碰撞概率模型的适用性，本节采用的仿真场景与后续协议性能验证场景不同，因此对网络范围等参数进行相应调整。具体而言，在仿真区域中心设置一个接收节点，其余发送节点随机均匀分布在该中心节点的通信覆盖范围内，从而保证所有发送节点均处于中心节点的一跳通信覆盖范围内。RTS长度为10 B，在数据传输速率为4 kbit/s的条件下，其传输时长为0.02 s。

图5展示了在不同节点数量和竞争窗口大小条件下，RTS成功接入概率的理论计算结果与仿真统计结果的对比。整体来看，RTS成功接入概率随传感器节点数量增加而降低，随竞争窗口增大而提高。这是因为传感器节点数量增加会提高RTS在AUV端重叠到达的概率，而较大的竞争窗口能够分散节点RTS发送时刻，降低集中碰撞风险。因此，在AUV覆盖节点数量动态变化的场景中，竞争窗口需要根据节点密度进行自适应调整，以保证预约阶段的接入可靠性。三维积分理论值与三维随机仿真值基本一致，表明建立的三维空间碰撞概率模型能够较好地刻画节点随机分布、传播距离差异和RTS发送时刻共同作用下的碰撞过程。与仅考虑时间竞争的模型不同，三维模型进一步考虑了节点到AUV的传播距离差，使不同节点即使在相近时刻发送RTS，也可能由于传播时延差异而在AUV端错开到达；反之，发送时刻不同的RTS也可能因传播时延补偿而发生重叠。因此，三维模型更符合AUV辅助水声网络中三维空间部署和长传播时延并存的接入特征。相比之下，闭式近似值整体略低于三维积分理论值和三维随机仿真值，这是因为该近似形式忽略了节点间的传播时延差异，并在$T_{cw} \gg \tau_{rts}$条件下忽略了竞争窗口边界效应，因此计算结果有所偏差。该闭式近似表达式计算复杂度较低，适用于后续AUV自适应竞争窗口调整。在后续仿真中，DWS-CR-MAC协议将目标接入成功率阈值P_{th}统一设置为85%。

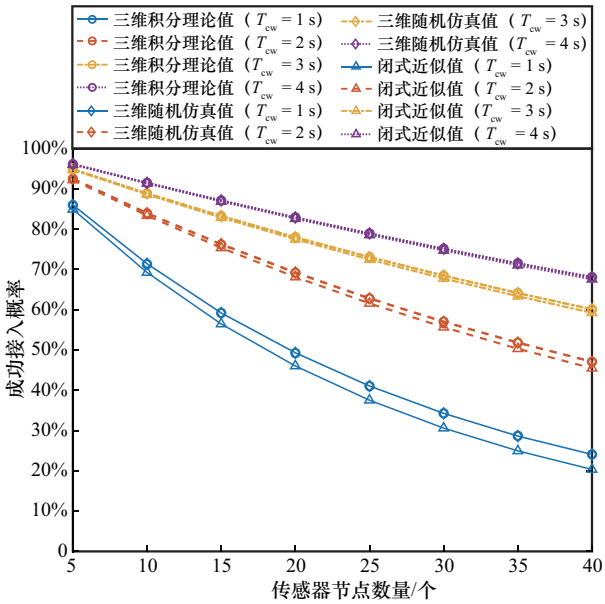


图5　不同竞争窗口下RTS成功接入概率的理论分析与仿真对比

4.3　不同协作恢复对象选择策略对比

为验证协作恢复对象选择策略对失联节点恢复性能的影响，本文在三维随机拓扑场景下分别设置节点数量为10、20和30个进行仿真。中心节点通信半径为500 m，协作距离阈值为500 m，设置失联节点比例为15%。在每轮仿真中，失联节点数量按照节点总数与失联比例确定，其余节点作为潜在协作节点。每个协作节点最多捎带一个失联节点的预约信息，当协作节点与失联节点之间的距离不超过协作距离阈值时，认为该失联节点具备被协作恢复的条件。一个失联节点只要被任意协作节点捎带一次，即认为恢复成功。对比策略包括最近选择、随机选择和本地分散化选择，其中本地分散化选择策略对应于在本地候选集合中选择距离当前

协作节点最远的失联节点。

图6给出了不同协作恢复对象选择策略下失联节点的平均恢复比例。在节点数量为10、20和30个的条件下，本地分散化选择策略的平均恢复比例分别为0.950、0.987和0.986，均高于最近选择和随机选择策略。最近选择策略容易使相邻协作节点集中选择同一局部区域内的失联节点，造成重复捎带；随机选择策略虽然能在一定程度上缓解选择集中，但未利用失联与协作节点之间的空间关系，恢复结果存在随机波动。本地分散化选择策略优先选择本地候选集合边缘处的失联节点，使不同协作节点的恢复对象在空间上更分散，降低多个协作节点重复恢复同一失联节点的概率，从而提高单位捎带机会能够覆盖的失联节点数量。仿真结果表明，该策略能够在不同节点数量下保持较高的平均恢复比例，验证了其用于协作恢复对象选择的合理性。

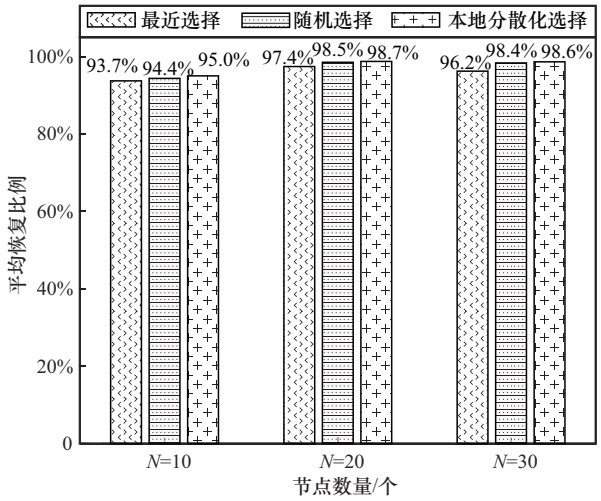


图6　不同协作恢复对象选择策略下失联节点的平均恢复比例对比

4.4　DWS-CR-MAC协议性能评估

图7(a)为平均网络吞吐量随传感器节点数量变化的仿真结果。随着传感器节点数量增加，4种协议的平均网络吞吐量均呈上升趋势，其中DWS-CR-MAC协议始终保持最高吞吐量。这主要是因为该协议通过自适应竞争窗口降低节点密集条件下的RTS集中碰撞，并利用协作恢复机制补偿因RTS冲突未被AUV识别的接入请求，从而提高高负载条件下的有效接入节点数量。该设计使新增业务负载能够更多转化为有效数据传输，而不是消耗在重复竞争和失败预约过程中。ART-MAC协议虽然利用自适应竞争窗口改善了接入过程，但缺少协作恢复机制，部分首次预约失败的节点仍需等待下一轮重新竞争，因此平均网络吞吐量低于DWS-CR-MAC协议。DBA-MAC和UW-POLLING协议在传感器节点数量增加后分别受到竞争协调开销和轮询周期增长的限制，单位时间内可完成的数据传输量相对较低。

图7(b)展示了数据包交付率随传感器节点数量变化的仿真结果。可以看出，DWS-CR-MAC协议始终具有最高的数据包交付率，这主要得益于基于RLL的动态调度与链路剪枝策略能够有效剔除易中断链路，减少了中途丢包。UW-POLLING协议得益于其轮询机制，整体数据包交付率保持在较高区间，但该协议呈先降后升的波动。这主要是传感器节点数量增多导致轮询队列也随之增加，位于调度尾部的节点丢包加剧；当传感器节点数量进一步增多时，部分边缘节点未进入有效传输过程，成功进入轮询队列的节点更可能完成数据的传输，使数据包交付率提升。ART-MAC协议虽然也考虑了基于RLL的调度排序，但未进一步剔除高风险链路，因此可靠性低于DWS-CR-MAC协议。DBA-MAC协议的数据包交付率最低，因为该协议仅依据传输距离进行调度，未考虑AUV移动引起的链路中断，因而更容易出现传输失败的情况。

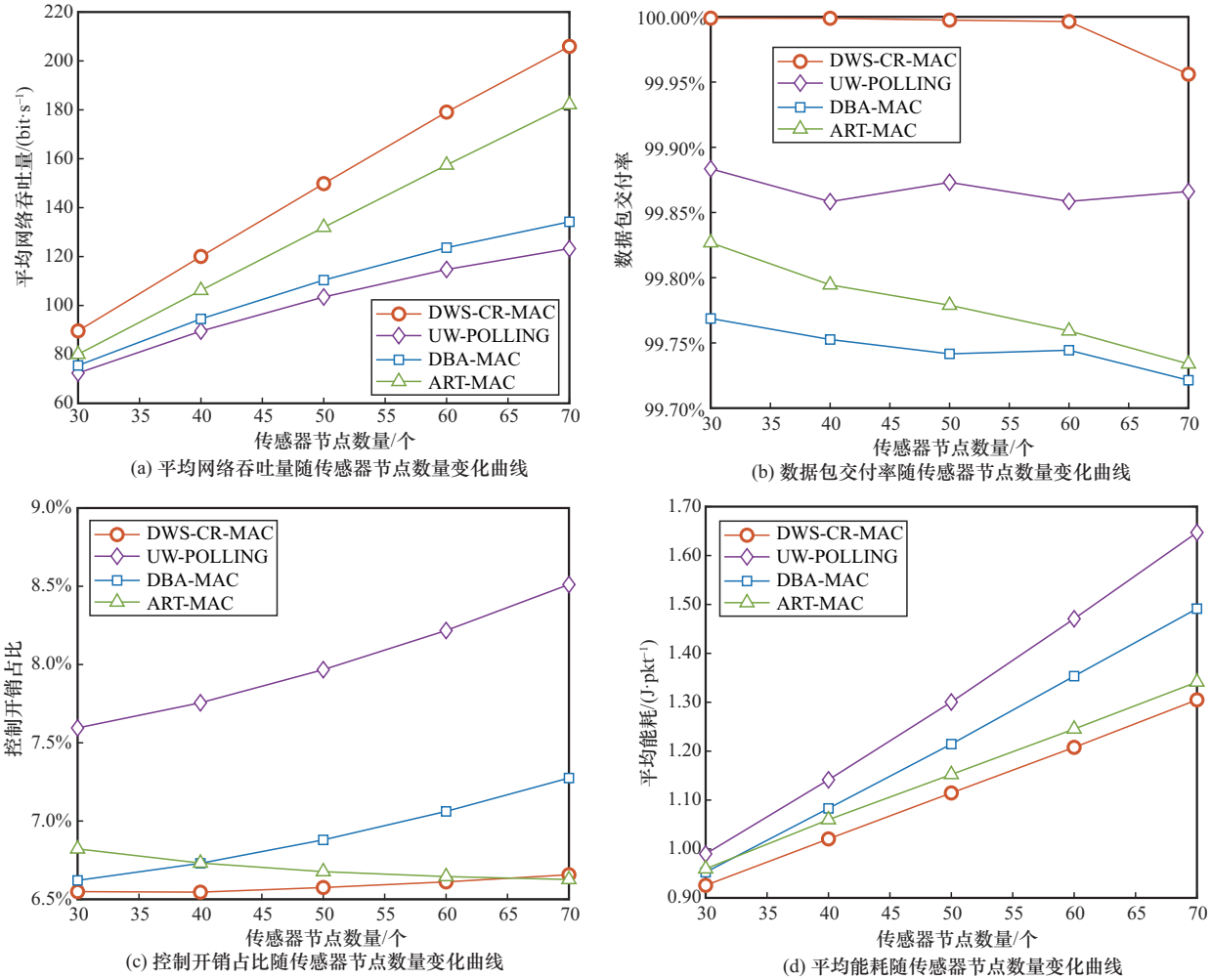
图7(c)为控制开销占比随传感器节点数量变化的仿真结果。随着传感器节点数量增加，DWS-CR-MAC协议的控制开销占比整体处于较低水平，并略有上升趋势。这是因为传感器节点数量增加后，网络中的接入竞争和预约需求随之增加，协作恢复过程中需要维护和补充的预约信息也相应增多，因此控制开销占比会略有上升。但由于该协议能够利用后续数据传输过程补充预约信息，减少额外控制帧交互，并降低高负载条件下控制帧的无效竞争，因此其控制开销占比增长幅度较小。ART-MAC协议的控制开销占比随传感器节点数量增加略有下降，这是因为节点规模增大后，其自适应竞争窗口能够根据网络负载调整竞争过程，降低控制帧冲突带来的额外开销，同时数据传输规模增加也在一定程度上稀释了控制帧所占比例。UW-POLLING协议由于需要对节点进行逐一轮询，传感器节点数量增加后轮询控制信令明显增多，因此其控制开销占比始终最高，并呈明显上升趋势。DBA-MAC协议则随着节点规模扩大，需要更多握手与

协调过程维持接入，且节点竞争增强会带来更多控制交互，因此控制开销占比也呈上升趋势。

图 7(d)展示了平均能耗随传感器节点数量变化的仿真结果。结果表明，随着传感器节点数量增加，4 种协议的平均能耗均有所上升，但 DWS-CR-MAC 协议始终保持最低能耗。这是因为该协议能够通过协作恢复和链路剪枝减少无效接入与失效传输，使节点能量更多用于有效数据上传。相比之下，ART-MAC 协议虽然可通过竞争窗口调整和 RLL 排序降低部分低效传输，但由于缺少协作恢复和剪枝机制，其节能效果差于 DWS-CR-MAC 协议。UW-POLLING 和 DBA-MAC 协议的平均能耗相对较高，一方面，二者控制帧交互较多，传感器节点数量增加会带来更多侦听与握手能耗；另一方面，其对无效传输的抑制能力有限，因此在高密度场景下能耗进一步增加。

图 8(a)展示了平均网络吞吐量随 AUV 移动速度变化的仿真结果。随着 AUV 移动速度的增加，4 种协议的平均网络吞吐量均呈现下降趋势，这是因为 AUV 移动速度的增加缩短了其与传感器节点间的有效通信窗口，导致单个巡航周期内可用于通信的时间随之减少。其中，DWS-CR-MAC 协议始终保持最高吞吐量，这主要得益于其较高的接入效率。一方面，自适应竞争窗口能够根据竞争状态调节接入强度，减少高动态场景下的冲突；另一方面，协作预约机制能够提高预约成功率，减少因首次接入失败造成的传输机会浪费。

图 8(b)展示了数据包交付率随 AUV 移动速度变化的仿真结果。随着 AUV 移动速度的增加，各协议的数据包交付率整体下降，这是因为链路可持续时间缩短，部分节点在完成预约或数据传输前可能已接近通信边缘，导致链路中断概率增加。DWS-CR-MAC 协议始终保持较高数据包交付率，说明其基于 RLL 的动态调度与链路剪枝策略能够



(a) 平均网络吞吐量随传感器节点数量变化曲线

(b) 数据包交付率随传感器节点数量变化曲线

(c) 控制开销占比随传感器节点数量变化曲线

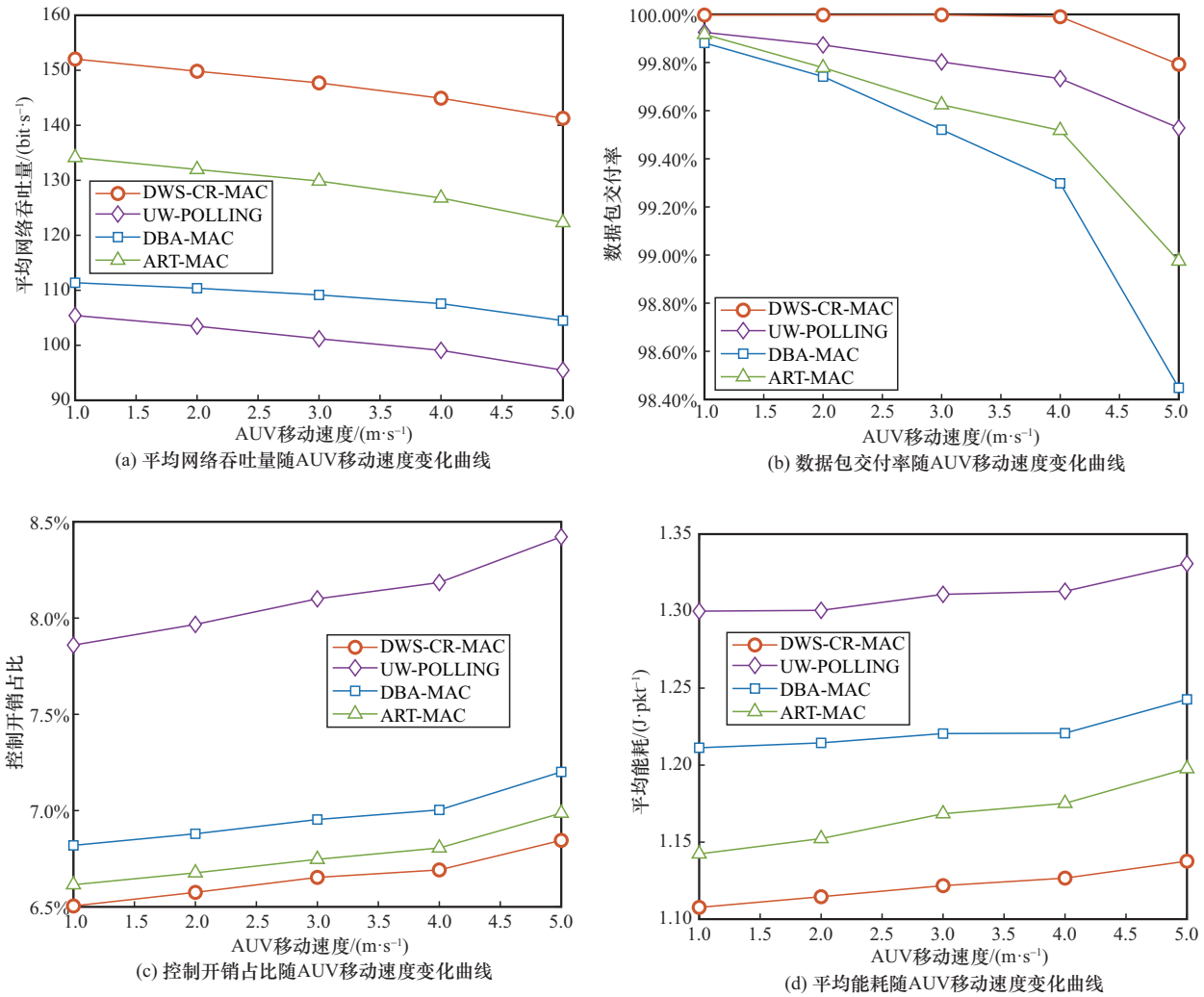
(d) 平均能耗随传感器节点数量变化曲线

图 7　4 种协议在不同传感器节点数量条件下的性能比较

优先保留稳定链路，减少高动态条件下的中途丢包。

图 8(c)为控制开销占比随 AUV 移动速度变化的仿真结果。随着 AUV 移动速度的增加，所有协议的控制开销占比均有所上升，其中 DWS-CR-MAC 协议的控制开销占比最低。AUV 移动速度的提升加剧了拓扑切换频率，导致传统的握手交互极易因位置快速变动而失效，引发频繁的信令开销。本文协议通过协作恢复机制利用数据帧捎带预约信息，减少重复 RTS 竞争和额外握手开销，尽管 DATA 帧头增加少量捎带字段，整体控制开销占比仍较低。即使在高 AUV 移动速度场景下，该机制也能通过邻居节点的协助快速修复竞争失败的节点，避免了盲目重传控制帧带来的信令开销，确保了协议在高动态环境下的轻量化。

图 8(d)展示了平均能耗随 AUV 移动速度变化的仿真结果。随着 AUV 移动速度的增加，4 种协议的平均能耗略有升高。这是因为 AUV 高速移动会缩短节点与其之间的有效通信窗口，一方面使链路更容易在数据传输完成前中断，增加无效数据发送带来的能耗；另一方面也会提高控制报文交互失败的概率，使节点在竞争、侦听和握手过程中消耗更多能量。DWS-CR-MAC 协议的平均能耗始终最低。其原因在于，该协议利用基于 RLL 的动态调度与链路剪枝机制，能够提前剔除高风险链路，减少边缘节点在即将断连条件下的无效发送；同时，协作恢复机制通过数据帧捎带预约信息，降低了握手失败后的重复竞争和额外控制开销。ART-MAC 协议虽引入了自适应竞争窗口和 RLL 排序机制，但由于缺少进一步的链路剪枝与协作恢复机制，其节能效果仍弱于 DWS-CR-MAC 协议。DBA-MAC 和 UW-POLLING 协议则分别由于无效数据传输较



(a) 平均网络吞吐量随AUV移动速度变化曲线

(b) 数据包交付率随AUV移动速度变化曲线

(c) 控制开销占比随AUV移动速度变化曲线

(d) 平均能耗随AUV移动速度变化曲线

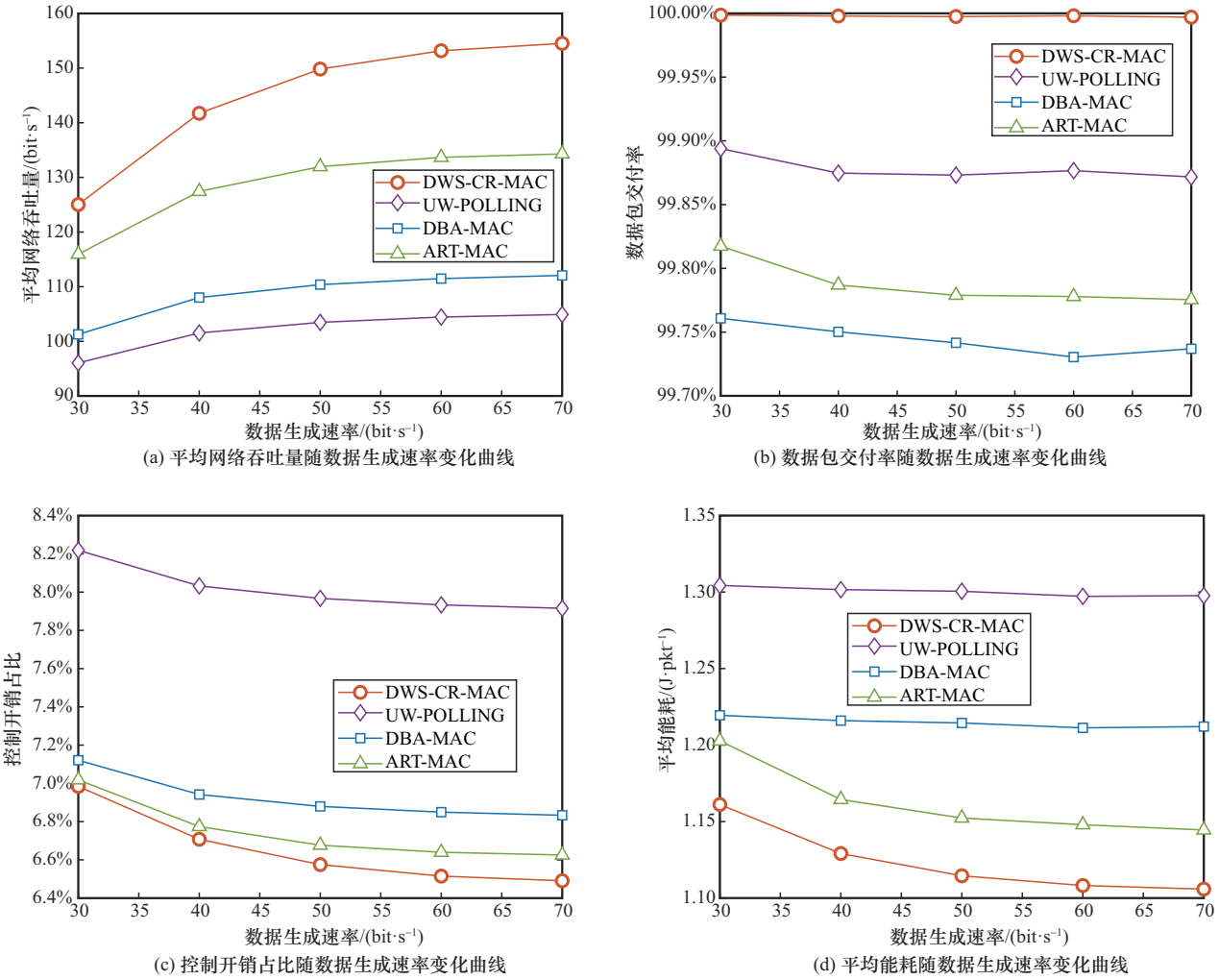
图 8　4 种协议在不同 AUV 移动速度条件下的性能比较

多和控制开销较大，表现出更高的平均能耗。

图9(a)为平均网络吞吐量随数据生成速率变化的仿真结果。随着数据生成速率由30 bit/s增加至70 bit/s，4种协议的平均网络吞吐量均随之增大，但增长幅度逐渐减缓，其中DWS-CR-MAC协议始终保持最优性能。这主要得益于其自适应竞争窗口调整机制和协作请求恢复机制：前者能够根据业务负载变化调节竞争窗口，提高节点接入效率；后者则能够补偿因冲突丢失的RTS请求，从而提高信道利用率。ART-MAC协议虽然也能够通过自适应竞争窗口改善竞争过程，但由于缺少协作请求恢复机制，其平均网络吞吐量仍低于DWS-CR-MAC协议。然而，DBA-MAC和UW-POLLING协议受限于接入与握手效率，平均网络吞吐量整体较低。随着数据生成速率继续增加，曲线逐渐趋于平缓，这主要是由于仿真中设置了节点单次最大传输包数，有限的单次传输窗口限制了平均网络吞吐量的进一步提升。

图9(b)展示了数据包交付率随数据生成速率变化的仿真结果。可以看出，DWS-CR-MAC协议的数据包交付率始终最高，且整体较为稳定。这主要是因为其能够结合RLL调度与链路剪枝，减少高负载条件下的失效传输。ART-MAC协议虽然也利用RLL进行排序，但未进一步进行链路剪枝，因此数据包交付率低于DWS-CR-MAC协议。UW-POLLING和DBA-MAC协议的数据包交付率均略有下降，这是由于二者缺乏链路寿命预测，部分处于通信边缘或调度末端的节点仍尝试发送数据，从而增加了传输失败概率。

图9(c)为控制开销占比随数据生成速率变化的仿真结果。在所有协议中，DWS-CR-MAC协议的控制开销占比始终最低。这主要得益于协作恢复机制与数据帧捎带策略在高负载条件下能够减少额外



(a) 平均网络吞吐量随数据生成速率变化曲线

(b) 数据包交付率随数据生成速率变化曲线

(c) 控制开销占比随数据生成速率变化曲线

(d) 平均能耗随数据生成速率变化曲线

图9　4种协议在不同数据生成速率条件下的性能比较

控制信令。ART-MAC 协议虽然可以通过自适应竞争窗口减少控制帧冲突，但仍依赖常规预约与调度过程，因此控制开销占比次于 DWS-CR-MAC。UW-POLLING 和 DBA-MAC 协议的控制开销占比也随负载增加而下降，但由于每轮传输仍需较完整的信令交互，其整体开销仍然较高。

图 9(d)展示了平均能耗随数据生成速率变化的仿真结果。结果表明，DWS-CR-MAC 协议的平均能耗最低，且随数据生成速率增加而下降。这主要是因为该协议能够通过链路剪枝减少失效传输，并通过提高信令利用率降低侦听与接入过程中的额外能耗。ART-MAC 协议虽可借助自适应竞争窗口和 RLL 排序降低部分低效传输，但由于缺少协作恢复和链路剪枝，其节能效果仍弱于 DWS-CR-MAC 协议。而 DBA-MAC 与 UW-POLLING 协议在负载升高时仍存在较多无效接入与控制交互，因此平均能耗相对较高。

5 结束语

本文提出了一种基于动态窗口调度与协作预约的 DWS-CR-MAC 协议，旨在解决 AUV 辅助水下网络的高负载数据收集问题。该协议通过自适应调整竞争窗口与 RLL 动态调度，缓解了信道拥塞并保障了链路稳定性；同时，利用协作恢复机制降低了握手失败的开销。仿真结果表明，在缺乏先验拓扑信息的高负载数据收集场景下，本文协议在平均网络吞吐量、数据包交付率和平均能耗等方面均优于 ART-MAC、UW-POLLING 和 DBA-MAC 协议，能够在提高数据收集效率和改善传输稳定性的同时，以较低的控制开销提升网络整体数据收集性能与信道利用率。对于大范围水域场景，多跳转发与 AUV 收集相结合有望进一步缩短部分节点的等待时间，并改善大范围场景下的数据回传效率，但同时也会引入路由选择、跨层协同、路径维护及额外竞争控制等问题。后续工作将面向更加开放和复杂的应用场景，进一步研究多跳传输与 AUV 移动收集相结合的协同数据收集机制，以提升本文协议在复杂环境下的适应能力与综合传输性能。

参考文献：

[1] Yan J, Guan X P, Yang X, et al. A survey on integration design of localization, communication, and control for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(6): 6300-6324.

[2] Weng Y, Chun S, Sekimori Y, et al. Reinforcement learning-based tracking control of autonomous underwater vehicles for seafloor platform data collection[J]. Ocean Engineering, 2025, 328: 121047.

[3] Al-Bzoor M, Al-assem E, Alawneh L, et al. Autonomous underwater vehicles support for enhanced performance in the Internet of underwater things[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2021, 32(3): e4225.

[4] Cheng M Y, Guan Q S, Ji F, et al. Dynamic-detection-based trajectory planning for autonomous underwater vehicle to collect data from underwater sensors[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(15): 13168-13178.

[5] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 27-44.
Song B W, Pan G, Zhang L C, et al. Development trend and key technologies of autonomous underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 27-44.

[6] Guqhaiman A A, Akanbi O, Aljaedi A, et al. A survey on MAC protocol approaches for underwater wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3): 3916-3932.

[7] He H Y, Du J, Jiang C X, et al. Spatial-temporal resource utilization for partially connected multi-AUV broadcast scheduling[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(5): 1321-1325.

[8] 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.

[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] Ng H H, Soh W S, Motani M. MACA-U: a media access protocol for underwater acoustic networks[C]//Proceedings of the IEEE GLOBECOM 2008-2008 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-5.

[11] Liao W H, Huang C C. SF-MAC: a spatially fair MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(6): 1686-1694.

[12] Noh Y, Lee U, Han S, et al. DOTS: a propagation delay-aware opportunistic MAC protocol for mobile underwater networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(4): 766-782.

[13] Qian L F, Zhang S L, Liu M Q. A slotted floor acquisition multiple access based MAC protocol for underwater acoustic networks with RTS competition[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2015, 16(3): 217-226.

[14] Zheng M C, Ge W, Han X, et al. A spatially fair and low conflict medium access control protocol for underwater acoustic networks[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(4): 802.

[15] 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.

[16] Ma Y J, Wu H K, Dan F, et al. A handshake-based low delay MAC protocol in hybrid topology for urban lake monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(21): 21342-21354.

[17] 李冲, 杜秀娟, 王丽娟, 等. 基于规则与感知的水声网络 MAC 协议[J]. 通信学报, 2022, 43(2): 65-75.

Li C, Du X J, Wang L J, et al. Rule and perception based MAC protocol for UAN[J]. Journal on Communications, 2022, 43(2): 65-75.

[18] Mei H D, Wang H Y, Shen X H, et al. An adaptive MAC protocol for underwater acoustic sensor networks with dynamic-high load[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(6): 9059-9072.

[19] 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.

[20] Signori A, Campagnaro F, Zordan D, et al. Underwater acoustic sensors data collection in the robotic vessels as-a-service project[C]//Proceedings of the OCEANS 2019-Marseille. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-9.

[21] Jiang J F, Tian W X, Han G J, et al. A medium access control protocol based on parity group-graph coloring for underwater AUV-aided data collection[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(4): 5967-5979.

[22] 陈奕霏, 高山, 王桐, 等. 面向水下移动汇聚节点的媒体接入控制协议研究[J]. 应用科技, 2024, 51(4): 114-121.
Chen Y F, Gao S, Wang T, et al. Research of MAC protocol for underwater mobile convergence nodes[J]. Applied Science and Technology, 2024, 51(4): 114-121.

[23] 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.

[24] Shi C, Huang Z J, Li H P, et al. Dynamic switching of transmission modes hydroacoustic communication MAC protocols[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 31511.

[25] Cao W N, Chen K Y, Xiao L, et al. Dynamic trajectory-based adaptive scheduling scheme for AUV-assisted data collection in UASNs[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(16): 31816-31829.

[26] 张伟, 王乃新, 魏世琳, 等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289-297.
Zhang W, Wang N X, Wei S L, et al. Overview of unmanned underwater vehicle swarm development status and key technologies[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(2): 289-297.

[27] 李广强, 董文超, 朱大庆, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的AUV三维路径规划[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(7): 2170-2182.
Li G Q, Dong W C, Zhu D Q, et al. 3D path planning for AUV based on improved whale optimization algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(7): 2170-2182.

[28] He Z Y, Sun Q, Li Y B, et al. AUV path planning method for data collection in underwater wireless sensor network[J]. Ocean Engineering, 2026, 350: 124247.

[29] 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.

[30] He Y, Han G J, Tang Z K, et al. State prediction-based data collection algorithm in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(4): 2830-2842.

[31] Zhang Z K, Xu J, Xie G W, et al. Environment- and energy-aware AUV-assisted data collection for the Internet of underwater things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(15): 26406-26418.

[32] Kok G X, Chow C O, Xu Y H, et al. Sensor-free route stability metric for mobile ad hoc networks[J]. Computer Networks, 2016, 100: 166-178.

[33] Patel S, Pathak H. A mathematical framework for link failure time estimation in MANETs[J]. Engineering Science and Technology, An International Journal, 2022, 25: 100984.

[34] Wang Y, Ji F, Guan Q S. Impact and analysis of spatial correlation on slotted based MAC in UANs[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.

[35] Chen W Q, Guan Q S, Yu H, et al. Medium access control under space-time coupling in underwater acoustic networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 12398-12409.

[作者简介]



叶方（1980– ），女，博士，哈尔滨工程大学教授，主要研究方向为无线传感器网络、通信资源分配和智能决策。



张开越（2002– ），男，哈尔滨工程大学硕士生，主要研究方向为水下传感器网络。



卓志敏（1982– ），男，博士，北京电子工程总体研究所研究员，主要研究方向为体系总体和信号处理技术。



李一兵（1967– ），男，博士，哈尔滨工程大学教授，主要研究方向为通信信号处理、导航信号处理、图像信号处理和信息融合技术。