

基于位置信息和能量均衡的声电协同网络 AODV

卫浓钰^{1,2}, 江子龙^{1,2}, 陈芳炯^{1,2}

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广东 广州 510641; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 不同于陆地物联网应用, 海洋物联网应用往往需要解决水面网络与水下网络之间的信息交互问题, 合理的路由方案是解决上述问题的关键。因此, 提出了一种基于位置信息和能量均衡的声电协同网络自组织按需距离向量路由协议 (AR-AODV, ad hoc on-demand distance vector for acoustic-radio integrated network), 旨在引导信息流更多地通过水面无线电链路进行转发, 从而减轻水下通信网的负担, 提升网络的整体性能。在该协议中, 浮标节点的转发优先级高于水下节点。当源节点需要发送数据时, 它进入路由发现阶段, 节点以自身的位置和能量信息作为启发式信息, 用于计算转发概率并广播路由请求 (RREQ, route request) 报文进行寻路。当目的节点收到 RREQ 报文时, 发送 RREP 报文进行信息素更新, 依据信息素的大小选择最优的路径。与 AODV 相比, AR-AODV 在传输成功率、传输时延、吞吐量、能量转化率、寻路包转发次数方面的性能有显著提升。

关键词: 海洋物联网; 跨域通信; 路由协议; 位置信息; 能量均衡

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00325

AODV protocol for acoustic-radio integrated network based on location information and energy balance

WEI Nongyu^{1,2}, JIANG Zilong^{1,2}, CHEN Fangjiong^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510641, China

Abstract: Different from terrestrial internet of things (IoT) applications, marine IoT applications need to solve the problem of information interaction between surface network and underwater network. The key to solve this problem is to design a proper routing scheme. An ad hoc on-demand distance vector for acoustic-radio integrated network (AR-AODV) was proposed based on location information and energy balance. The protocol enables surface radio links to forward more information data, so as to reduce the burden of underwater communication network and improve the overall performance. In the proposed protocol, the forwarding priority of the buoy nodes was higher than that of the underwater nodes. When the source node needs to send data, it enters the route discovery phase, i.e., the node uses its position and energy information as the heuristic information to calculate the forwarding probability and broadcast route request (RREQ) packets. When the destination node receives an RREQ packet, it sent an RREP packet to update the pheromone and select the optimal path based on the pheromone. Compared with AODV protocol, AR-AODV protocol has significantly improved the performance in terms of transmission success rate, transmission delay, throughput, energy conversion rate and routing packet forwarding times.

Key words: marine IoT, cross-domain communication, routing protocol, location information, energy balance

收稿日期: 2022-06-22; 修回日期: 2022-12-29

通信作者: 陈芳炯, eefjchen@scut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62192711)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62192711)

0 引言

海洋是渔业、海上运输、近海工业等人类活动的重要场所^[1], 高质量的通信服务是海洋探索的重要保证。众所周知, 物联网可以连接各种设备和网络, 随时随地提供高效安全的通信服务^[2]。而水下物联网的提出, 为水下环境的高效探索提供了一种解决方案, 使水下设备与陆地设备连接起来成为可能^[3]。随着海洋探测应用场景的丰富, 其对海洋信息传输的要求越来越高。现代海洋网络也不再局限于水面或水下, 海洋物联网已经成为未来研究的前沿热点。

海空一体化网络 (AOIN, air-ocean integrated network) 被认为是构建智能海洋的关键技术^[4]。实际上, 许多海洋的重要信息需要从水下场景中采集或者需要水下设备协同工作^[5], 例如, 海啸、海洋污染等监测数据需要从深海传输, 海洋科学探索和水下资源开采则需要水下机器人协同跟踪监测等。实现水面网络与水下网络的互通互连将大大提升海洋物联网的传输效率。近年来, 研究者们对跨域通信场景的关注持续上升, 并提出了一些解决方案^[6-9], 使用浮标进行信号转换, 连接水下声学网络与水面无线电网络的通信跨域传输方案目前应用最为广泛。

水声通信是目前水下中远距离无线通信中唯一可用的传输技术^[10], 但水声通信本身具有大时延、低带宽、高误码率等弊端, 传统水声通信系统的性能很难获得提升。注意到水声通信子网与水面无线电子网之间的巨大性能差异, 利用水面无线电链路提升水下声学网络通信性能的声电协同网络^[11-12], 是一种有意义的跨域传输应用。

声电协同网络可被看作一种异构的移动自组织网络 (MANET, mobile ad hoc network), 网络中的各个节点具备自我管理的能力, 即自配置、自修复、自优化和自保护能力^[13]。移动自组织网络更适合当前无人水面飞行器和自主水下机器人居多的大规模动态水下通信场景。现有的自组织网络路由协议大部分只针对空中无线场景, 缺乏水下环境的适配而不适合在水下环境中使用。但按需路由协议不会产生大量的路由开销, 可以考虑将其应用于水下网络。文献[14]证明了自组织按需距离向量路由协议 (AODV, ad hoc on-demand distance vector) 在声电协同网络中可以发挥性能优势, 优先选择无线电链路进行信息传输, 提升网络的传输性能。

本文基于声电协同网络架构, 提出了一种基于

位置信息和能量均衡的声电协同网络 AODV (AR-AODV, ad hoc on-demand distance vector for acoustic-radio integrated network)。在该协议中, 浮标节点的优先级高于水下节点。当进入路由建立阶段, 节点在广播路由请求 (RREQ, route request) 报文时采取概率转发机制, 结合节点的能量和位置信息, 将其作为启发式信息计算转发概率, 当找到目的节点后, 节点单播路由回复 (RREP, route reply) 报文进行信息素更新, 记录并选择最优转发路径。仿真结果表明, 与 AODV 相比, AR-AODV 在声电协同网络上能快速选择最优的无线路径辅助水下数据的传输, 避免大量的水下寻路信令的开销, 显著提升网络性能。

1 相关工作

水下无线传感器网络 (UWSN, underwater wireless sensor network) 一般由水下环境中感知数据的自主节点组成, 并分布在水下三维立体空间中^[15]。水下传感器将感知到的数据传递给水面汇聚节点, 实现海洋网络覆盖。目前的水下路由协议主要是在水下传感器节点与水面汇聚节点之间建立一条多跳路径^[16]。

水下路由协议大多采用泛洪技术, 因为其需要的网络信息很少, 便于在水下实现。例如, 基于深度的路由 (DBR, depth based routing) 协议^[17]不需要节点完整的地理位置信息, 只需要配置深度传感器即可获得节点的深度信息。路由决策依赖于传感器节点的深度值, 最优的数据转发节点是深度差最大的节点。基于深度的能量效率路由 (EEDBR, energy-efficient depth-based routing) 协议^[18]和轻量级的基于深度的路由 (LDBR, light-weight depth-based routing) 协议^[19]同时考虑了深度和剩余能量参数来选择最优的转发节点, 可以减少能量消耗, 提高网络寿命。基于矢量转发 (VBF, vector-based forwarding) 的路由协议^[20]通过定位传感器节点可以获取位置信息, 在路由管道的预控制半径内, 沿着路由向向量选取节点作为转发器。但 VBF 路由协议对路由管道过于敏感, 多跳矢量转发 (HH-VBF, hop-by-hop vector-based forwarding) 路由协议^[21]的特点是每个中间转发节点都重新建立一条到接收器的路由管道。

基于集群的路由协议的工作原理是将传感器节点聚集成集群, 并选出一个簇头, 负责收集网络中所有节点的数据并计算资源和更新路由表^[22]。例

如，用于三维水声传感器网络的联合聚类与路由协议（JCRP, joint clustering and routing protocol）^[23]，根据剩余能量和邻居连通性的加权代价选择簇头节点，当一个簇头在每一个单独的级别上被选出时，这些簇头会发现相邻簇的簇头，形成一条通往水面汇聚节点的地理路由。

但这些现有的水下路由协议几乎只考虑了水下节点到水面汇聚节点的水下多跳传输路径，无法将水上资源和水下资源进行统筹规划，不能合理利用水上无线网络中的空闲资源来解决水下传输的困境。

而在跨域传输的路由协议方面，现有的研究进展较少。锚节点辅助的基于集群的路由协议（ANCRP, anchor nodes assisted cluster-based routing protocol）^[24]将网络空间划分为多个小的立方体，形成集群。然后，每个立方体分配一个锚节点作为簇头。源节点可以将感知到的数据发送到其指定的簇头，簇头将感知到的数据发送给下一跳簇头，并持续这个过程，直到表面汇聚节点利用声波介质从其尾部集群收集信息，后通过射频通信介质转发至陆上监测中心。

Luo 等^[25]使用一种电缆连通水下声通信机与水面无线发射机的浮标节点，兼具地面无线和水下通信信道的优点，选择端到端的数据包时延和可靠性这两个重要标准将数据包分为 4 类，并据此设计了 4 种路由方案。在选择中继节点时，该方案还考虑了路由信道质量、中继节点的剩余能量水平以及到汇聚节点的最大跳数。然后，针对网格和随机部署场景对算法进行了广泛的评估。Liu 等^[26]介绍了一种跨水气界面的机会路由策略，采用机会路由与喷泉码结合的传输方式，大大提升了传输成功率。但是该策略仅考虑了水下信息向水面的单向传输，没有考虑水下节点无法与水面浮标直接通信的情况。文献[27]介绍了一种基于矢量的跨域混合路由（VBCM, vector-based cross media routing）策略，实现了利用水面无线电链路降低传输时延。文献[14]利用跨域的信息传输方式，证明了声电协同网络架构可以利用水面无线网络提升水下声学网络的传输性能，并且证明了以 AODV 为代表的反应式路由比以优化链路状态路由（OLSR, optimized link state routing）协议为代表的主动路由更适用于跨域声电协同网络。

总的来说，海洋信息的高效传输需要水面网络

与水下网络间的协同配合。而基于跨域的路由问题研究还处于初期阶段，具有较大的科研价值与应用前景。

2 系统模型

声电协同网络是一种海洋信息跨域传输的异构网络，以海面为分界线，分为水下声学网络和水上无线网络，如图 1 所示。网络包含水上节点、水面浮标节点、水下节点，以及空气和海水两种不同的通信介质。水上节点具备无线网络设备，节点之间采用无线电传输。水面浮标节点具备无线电和水声两种网络设备，同时具备无线电磁波通信和声波通信的能力，其负责海洋信息传输异构网络中的跨域传输和中继转换。水下节点具备水声网络设备，节点之间采用声波传输。3 种节点构造如图 2 所示。

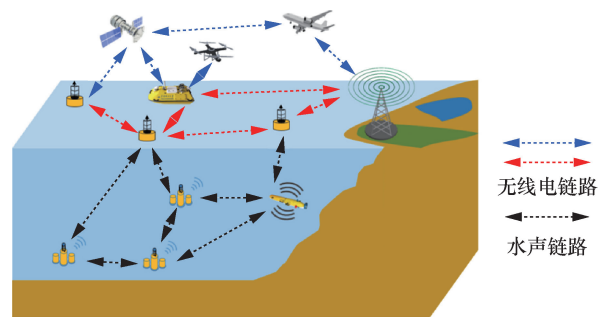


图 1 声电协同网络结构



图 2 3种节点构造

声电协同网络可被看作跨域通信领域中的多跳自组织网络。该跨域通信链路主要包括以下两种信息传输方式。

1) 当水下节点和水上节点跨水面通信时，需要借助水面浮标节点的中继功能进行转换，实现水下声学网络和水上无线网络的信息交互。

2) 当水下节点之间有通信需求时，为了减少水下设备的能量损耗，提高链路稳定性和可靠性，可以借助水面浮标节点的中继功能，实现将水下声学链路的负担转移至水上无线电链路。

为了实现位置信息的交互，期望所有节点都配

有定位设备,可以识别当前所处的位置信息并转换成相应的三维坐标。

3 基于位置信息和能量均衡的 AR-AODV

通信网络中的一般路由问题可以理解为建立和使用路由表来指导数据流量的问题,最终实现依据一些网络中的度量标准来最大化网络性能^[28]。对于网络中的每个节点,希望可以依据本地路由表来选择最佳传输链路,以将传入数据定向到其目标节点。

蚁群优化(ACO, ant colony optimization)的来源是真实蚁群在蚁巢和食物源之间寻找最短路径的行为。基于蚁群算法改进的无线自组织网络协议,一般发送多个控制报文(即蚂蚁)进行寻路,控制报文越多,在状态良好的链路上沉积的信息素越多,算法收敛越快,最终选择出一条符合特定度量标准的链路^[29-30]。但是在水下环境中,期望尽可能减少控制报文的转发数量,因此蚁群算法的多只蚂蚁迭代优化思想在水下场景并不具有应用意义。但是蚁群算法的信息素相关概念仍然具有可借鉴价值。

AODV 使用距离向量作为路由的衡量标准,依据最小跳数建立路由路径。但在声电协同网络中,最小跳数已经不再适合作为衡量标准,而需要一种新的衡量方式,同时希望引入节点转发概率减少水下控制报文的转发数量,因此,可以在 AODV 中有选择地借鉴蚁群算法的信息素相关概念来衡量链路状态,在状态转移概率模型和信息素更新模型中,加入能量和位置的启发式信息,以此期待在声电协同网络中充分发挥浮标节点的优势,优先选择水上无线电链路,同时参与转发的节点根据链路状态计算转发概率,可以减少水下节点的控制报文的转发数量,起到有效缓解水下链路拥堵的作用。

3.1 改进的状态转移概率模型

能量是设计路由协议时需要重点考虑的因素,特别是在水下声学网络中。为了减少水下寻路包的收发和水下声学链路跳数,考虑选用能量和位置信息来衡量链路状态。在 AODV 中, RREQ 报文通常被用于广播,即不指定下一跳地址,在发送节点通信范围内的节点都可以收到该报文。所以在状态转移概率模型中,当前节点是否转发应取决于上一跳与其自身间的链路状态,当前中继节点 i 在转发

RREQ 报文时的转发概率 p_{ij} 为

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{2 \arctan \left(\frac{[\tau(s, i-1)]^\alpha [\eta(i-1, i)]^\beta}{\tau(s, i)} \right)}{\pi}, & j \in \text{allowed } d_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\tau(s, i)$ 为网络中源节点 s 到节点 i 的信息素浓度, $\eta(i-1, i)$ 为从节点 i 到上一跳节点 $i-1$ 的启发式信息。allowed d_i 为在节点 i 的可通信距离范围内的节点,若节点 j 不在节点 i 的通信范围内,则收到的概率为 0。 α 和 β 分别为信息启发因子和期望启发因子,分别控制了信息素浓度和启发式信息对概率影响的重要程度。式(1)采用反正切函数进行归一化得到转发概率。

$$\eta(i-1, i) = \frac{a\mu(i-1, i) + b\sigma_i}{H_k} \quad (2)$$

其中, $\eta(i-1, i)$ 为根据位置信息计算出的距离矢量启发信息; σ_i 为根据节点能量信息计算出的能量启发信息; a 和 b 是常数,分别为距离矢量启发信息和能量启发信息的权重参数; H_k 为该路由路径的跳数。为了在声电协同网络中充分发挥浮标节点的无线电链路优势,浮标节点的权重参数 a 和 b 应大于水下节点的权重参数 a 和 b 。

$$\mu(i-1, i) = \frac{d}{R} \quad (3)$$

其中, R 为节点的可传输范围半径, d 为中继节点与上一跳节点之间的距离,此时 $0 \leq \mu(i-1, i) \leq 1$ 。

$$\sigma_i = \frac{E_{\text{current}}}{E_{\text{initial}}} \quad (4)$$

其中, E_{current} 为节点当前剩余能量, E_{initial} 为节点初始能量,此时 $0 \leq \sigma_i \leq 1$ 。

3.2 改进的信息素更新模型

当已经找到目的节点时,需要在返回路程中增加相应的信息素,以便在后续通信进程中,可以更优先选择链路状态良好的路径,即让更多的数据包选择水上链路,减少水下声学链路跳数和水下节点能量消耗。在 RREP 报文中,信息素浓度将更新为

$$\tau(s, i) = (1 - \rho)\tau(s, i-1) + \Delta\tau(i-1, i) \quad (5)$$

其中, ρ 为信息素挥发因子, $\rho \in [0.1, 0.99]$; $(1 - \rho)$

为信息素残留因子； $\Delta\tau(i-1,i)$ 为从上一跳节点 $i-1$ 到节点 i 需要增加的信息素浓度，其中

$$\Delta\tau(i-1,i) = \begin{cases} \frac{a\mu(i-1,i) + b\sigma_i}{H_k}, & j \in \text{allowed } d_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

3.3 AR-AODV

AODV 是一种被动路由协议，使用距离向量标准选择下一跳节点，只有节点有数据需要发送时，才会请求路由建立。AODV 有 3 个基本的控制报文：路由请求 (RREQ)、路由回复 (RREP) 和路由错误 (RRER, route error)。同时，在 AODV 中节点会发送 HELLO 报文用以维护邻居信息。

AR-AODV 需要将 AODV 中 RREQ 和 RREP 报文的帧格式进行修改，具体修改格式如图 3、图 4 所示。在 RREQ 报文中，新增加了节点类型用于区分水下节点和浮标节点，位置信息用于计算距离矢量启发信息，另增加字段用于储存路径列表信息素含量。在 RREP 报文中，同样新增加了节点类型用于区分水下节点和浮标节点，另增加字段用于储存信息素增量以及路径列表信息素含量。在 NS-3 中，RREP 报文和 HELLO 报文有相同的帧格式。

AODV 的路由发现机制是通过 RREQ 和 RREP 报文实现的。AODV 会定期发送 HELLO 消息用来

建立邻居路由表。当源节点有数据需要传输但无到目的节点的有效路径时，就需要发送 RREQ 报文进行寻路，每一个收到的中间节点在记录信息后进行广播，直到找到目的节点或者找到到目的节点的有效路径，就返回 RREP 报文更新路由表项。

但是该寻路过程中，存在大量的 RREQ 报文交互，在能源资源宝贵的水下环境中，这是非常不利的。因此，为了减少能源消耗，改进的路由协议需要在寻路过程中尽可能减少 RREQ 报文的广播次数。同时该路由协议也需要一个新的度量标准，不再以最小跳数为优先，而是可以优先选择水上链路来进行信息传输。

AODV、AR-AODV 寻路示意图分别如图 5、图 6 所示，其中黑色节点为水下节点，绿色节点为水面浮标节点，蓝色箭头表示 RREQ 的转发链路，橙色箭头表示 RREP 的转发链路。A 为源节点，E 为目的节点。当 A 节点想要给 E 节点发送数据但并无到 E 节点的有效路由时，就进入路由查找阶段。A 节点产生一个 RREQ 报文并广播出去，整个网络采用泛洪机制转发 RREQ 分组，直到找到目的节点。泛洪转发机制很容易造成广播风暴，导致网络拥堵，严重时甚至会导致网络瘫痪。且当水下跳数更少时，E 节点会选择 A-C-E 这条转发路径并回复 RREP 报文。

| | | | | | | | |
|--|---|---|---|-----------------------------|---|-----------------|-------------------|
| 类型字段 (type) | J | R | G | D | U | 保留字段 (reserved) | 跳数计数器 (hop count) |
| 路由请求识别码 (RREQ ID) | | | | | | | |
| 目的节点地址 (destination IP address) | | | | | | | |
| 目的节点序列号 (destination sequence number) | | | | | | | |
| 源节点地址 (originator IP address) | | | | | | | |
| 源节点序列号 (originator sequence number) | | | | | | | |
| 节点类型 (node and interface flag) | | | | 位置信息 (location information) | | | |
| 路径列表信息素含量 (pheromone content of path list) | | | | | | | |

图 3 RREQ 报文帧格式

| | | | | | |
|--|---|---|-----------------------------|--------------------|-------------------|
| 类型字段 (type) | R | A | 保留字段 (reserved) | 前缀长度 (prefix size) | 跳数计数器 (hop count) |
| 目的节点地址 (destination IP address) | | | | | |
| 目的节点序列号 (destination sequence number) | | | | | |
| 源节点地址 (originator IP address) | | | | | |
| 生存时间 (lifetime) | | | | | |
| 节点类型 (node and interface flag) | | | 信息素增量 (pheromone increment) | | |
| 路径列表信息素含量 (pheromone content of path list) | | | | | |

图 4 RREP 报文帧格式

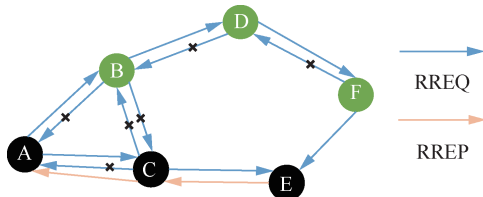


图5 AODV 寻路示意图

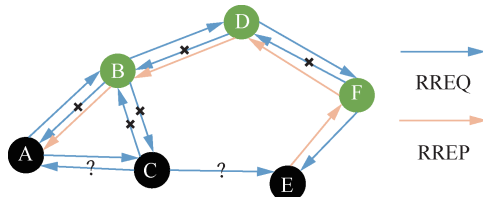


图6 AR-AODV 寻路示意图

而在 AR-AODV 中, 由于 C 为水下节点, 链路状态较差, 根据启发信息计算出的转发概率也会较小, 因此会在一定程度上减少 RREQ 报文的转发, 且当目的节点收到 RREQ 报文后, 会根据信息素选择出一条包含浮标节点的链路, 此时 E 节点会选择 A-B-D-F-E 这条转发路径并回复 RREP 报文。

因此, AR-AODV 流程如图 7 所示, 具体步骤如下。

步骤 1 源节点需要发送数据, 若路由表中不存在目的节点转发路径, 则广播 RREQ 报文。

步骤 2 中继节点接收到 RREQ 报文, 检查自身是否为目的节点或者是否有到目的节点的有效路由, 如果是, 转到步骤 3; 否则, 判断是否为浮标节点并选定 a 和 b 根据式(1)计算转移概率, 根据概率广播新的 RREQ 报文。

步骤 3 目的节点收到 RREQ 报文或中继节点已找到到目的节点的有效路由, 根据式(5)计算需要更新的信息素, 写入 RREP 报文然后发送。

步骤 4 中继节点在规定时间内收到目的节点传回的 RREP 报文, 进行信息素更新, 根据式(5)计算需要更新的信息素, 写入 RREP 报文然后继续单播。

步骤 5 源节点在规定时间内收到目的节点传回的 RREP 报文, 进行信息素更新, 并更新到目的节点的本地路由表, 直接发送数据包给下一跳节

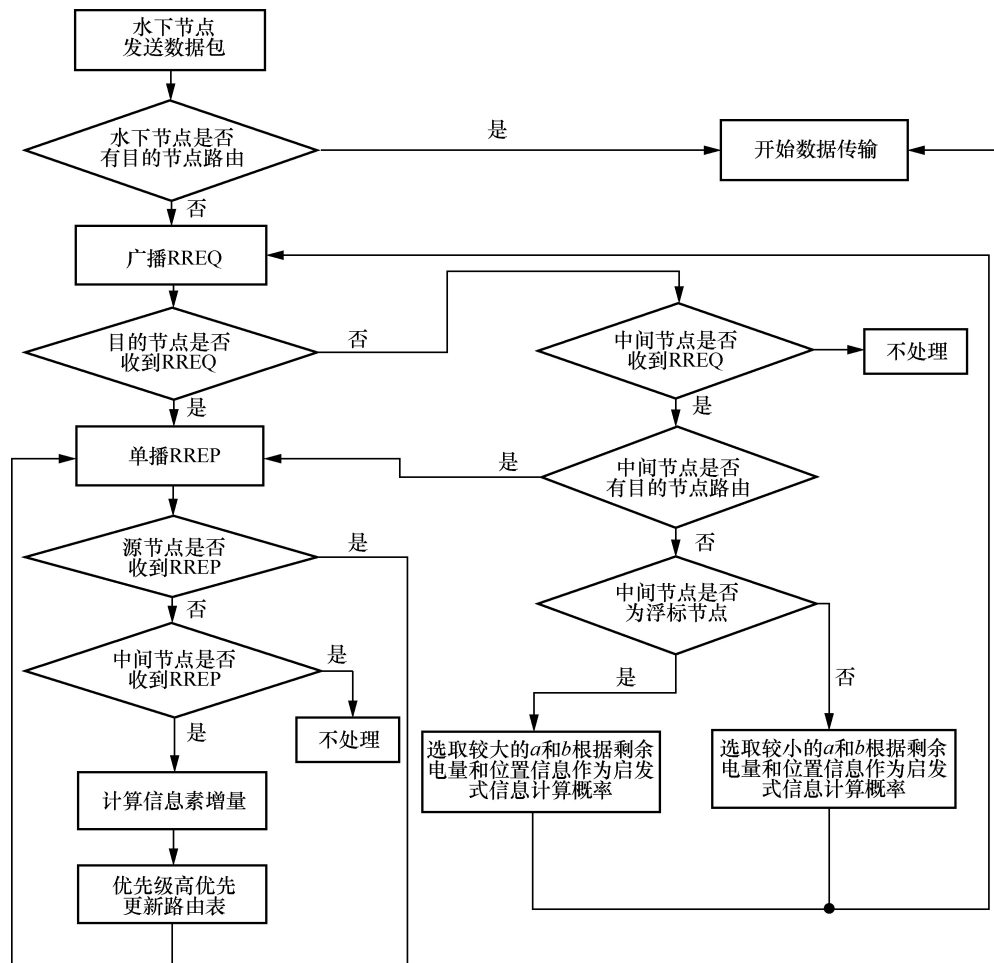


图7 AR-AODV 流程

点，开始数据传输。

通过引入蚁群算法的信息素相关概念，将计算能量和位置信息得到的信息素浓度作为新的度量标准，在概率转发的过程中，可以减少某些链路状态差的节点之间的信令交互，达到减少能量消耗的目的，同时加重了无线浮标节点的权重，导致在寻路过程中可以优先选择无线电链路，减少水下声学链路的跳数。

4 实验仿真与分析

4.1 仿真环境以及参数设置

本项研究采用 NS-3 网络仿真平台，版本为 NS 3.28。网络仿真区域为 $10\text{ km} \times 5\text{ km} \times 0.5\text{ km}$ ，水下节点在水深 0.5 km 的海底区域随机分布，水面浮标节点在海面上均匀分布。仿真参数设置见表 1。本次实验选取 AODV^[31]和 OLSR 协议^[32]作为对照。实验模拟了水下环境中仅一对节点通信的场景，其余水下节点和浮标节点扮演中继转发的角色。在仿真中，本文对比了在不同浮标节点下的传输成功率、传输时延、吞吐量、能量转化率、寻路包转发次数。

表 1 仿真参数设置

| 参数 | 取值 |
|----------------------------------|-----------------|
| 水下节点个数 | 20、30 |
| 浮标节点个数 | 8 |
| 水声网络设备传输距离/km | 2 |
| 无线网络设备传输距离/km | 5 |
| 节点能量/J | 10 000 |
| 数据包长度/byte | 200 |
| 数据包发送间隔/s | 5 |
| 水声通信调制方式 | FSK |
| 水声信道中心频率/kHz | 20 |
| 水声信道带宽/kHz | 10 |
| 水声信道数据速率/(kbit·s ⁻¹) | 4.8 |
| 水声信道传播模型 | Thorp |
| 水下声速/(m·s ⁻¹) | 1 500 |
| 无线电传播速度/(m·s ⁻¹) | 3×10^8 |
| 无线电调制方式 | OFDM |
| α 、 β 、 ρ | 0.5、2、0.5 |
| 浮标节点权重参数 a_1 、 b_1 | 1、1 |
| 水下节点权重参数 a_2 、 b_2 | 0.5、0.5 |

4.2 传输成功率

传输成功率是目的节点接收到的数据包数量与源节点发送的数据包数量之比，成功率越高，表示该网络性能越好，不同节点数量的传输成功率对比如图 8

所示。在前 100 s，路由协议需要发送寻路包建立传输路径，AR-AODV 普遍比 AODV 约快一倍地建立起稳定的路由链路，所以更早开始传输数据包。随着仿真时间的延长，网络状态逐渐稳定，导致传输成功率也稳定在一定范围内，AR-AODV 比 AODV 提前稳定 300 s 左右。由于采用能量和位置信息建立起一条更加稳固的传输链路，AR-AODV 的传输成功率也会比 AODV 高，在 20 个水下节点和 30 个水下节点的情况下分别提高约 7.08 % 和 17.09 %。同时水下节点增多，导致水声网络变得更拥堵，链路中传递的数据包更容易发生碰撞，所以传输成功率会相应变低。而 OLSR 协议作为主动路由协议的代表，需要建立并维护全局路由表，该过程需要大量的信令开销。而在水声网络中，信令碰撞导致传输成功率极低，最高传输成功率仅有 14.00 %。由此可见，主动路由协议不能适应水声网络恶劣的通信环境。

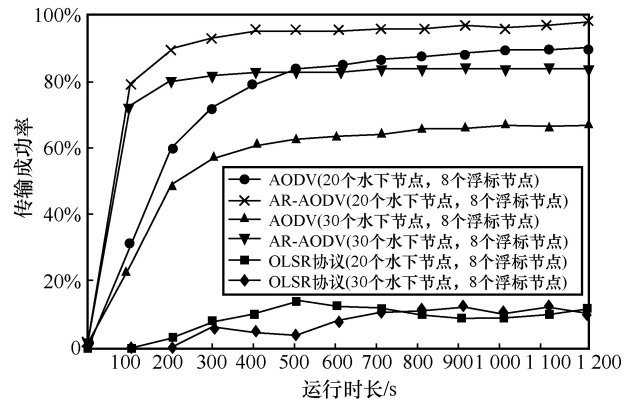


图 8 不同节点数量的传输成功率对比

4.3 传输时延

传输时延在水声通信中是不可忽略的因素。不同节点数量的传输时延对比如图 9 所示。由于水下声波传输速度较慢，所以传输时延主要来自水声链路。而 AR-AODV 由于采用加大浮标节点的信息素权重的方法，可以选择出一条低时延链路，使水下节点更快找到水面浮标节点，减少水下传输的距离和跳数，从而减少传输时延。在早期的运行时间内，节点需要发送数据包时没有找到有效路由路径，此时数据包需要被存储在队列中，因此排队等候造成的时延会导致平均时延上升。与此同时，节点之间需要发送一些控制报文以实现维护邻居节点等目标，水下节点变多，会造成节点需要接收的控制报文和数据包增多，碰撞重传会导致水下时延上升。随着仿真时间的延长，通信环境逐渐稳定，时延也趋向稳定。AR-AODV 在 20 个水下节点和 30 个水下节点的情况下，时延分别减少

约 27.64%和 43.76%。可以看出，在水下节点越多的拥堵环境中，时延的提升效果越明显。OLSR 协议由于传输成功的数据包数量有限，因此统计的时延会随着仿真时间变化呈现不稳定的特性。

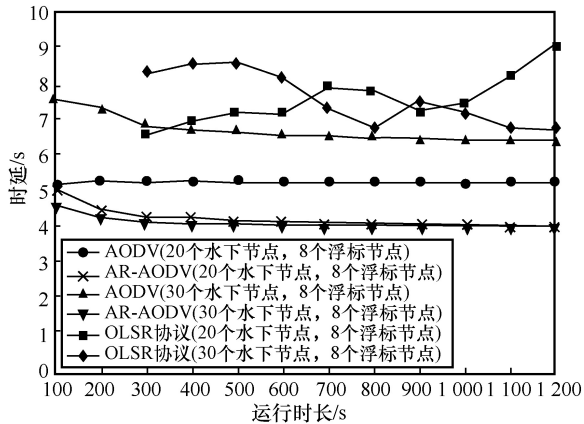


图9 不同节点数量的传输时延对比

4.4 吞吐量

吞吐量为单位时间内传输的比特数，不同节点数量的吞吐量对比如图 10 所示，可以看出，在同种网络结构中，AR-AODV 可以有效提升网络吞吐量。AR-AODV 在 20 个水下节点和 30 个水下节点的情况下，吞吐量相较于 AODV 分别增加了约 7.87 % 和 22.67 %。这是由于它可以更快建立起一条有效路径，该路径可以有效减少数据包的碰撞。在前 200 s，由于 AR-AODV 和 AODV 会发送寻路包寻找一个有效的路径，在建立路径之前无法传输数据包，导致前期的网络吞吐量较低，随着运行时间的延长，网络吞吐量维持在一个稳定水平。OLSR 协议的网络吞吐量一直保持在较低的水平，同时前期信令碰撞导致无法快速建立起有效路由表项，200 s 前的吞吐量几乎为 0。

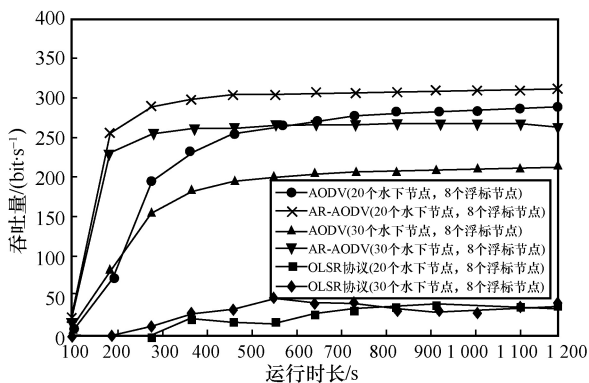


图10 不同节点数量的吞吐量对比

4.5 能量转化率

水下节点更换电池不易，所以能量消耗是水声网络中一个重要的衡量指标。能量转化率为单位焦

耳能够成功传输的比特数。不同节点数量的能量转化率对比如图 11 所示，可以看出，虽然增加 RREQ、RREP、HELLO 报文的字段用以传输位置信息和信息素，会导致部分能量消耗，但由于选择出的水上无线电链路具有短时延和低损耗的特点，最终 AR-AODV 能量转化率较高。而 AODV 及 OLSR 协议的能效转化率表现较差。能量消耗与节点数量有关，节点数量越多，能量消耗越大，能效转化率越低。

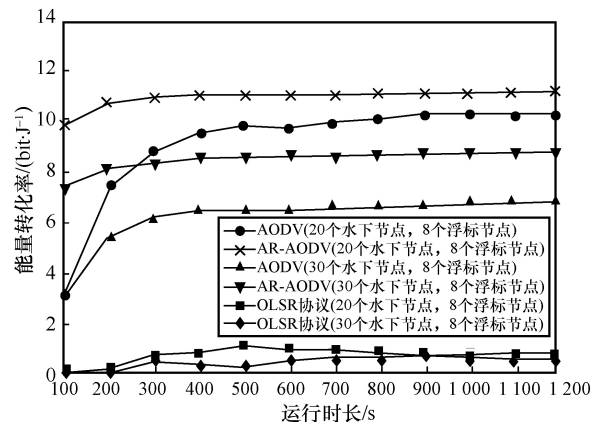


图11 不同节点数量的能量转化率对比

4.6 寻路包转发次数

AR-AODV 可以根据能量和位置信息计算得出的信息素，依据计算的概率转发 RREQ 寻路包，这样可以相应减少 RREQ 寻路包的转发次数。不同节点数量的寻路包转发次数对比如图 12 所示，对比了前 400 s 网络中 RREQ 寻路包的总转发次数，AR-AODV 的转发次数平均比 AODV 的转发次数减少约 44.74%。当网络中的水下节点越多时，效果越好，这是因为越多的水下节点由于较低的权重导致较低的转发概率，最终可以有效减少水下节点 RREQ 寻路包的转发次数。

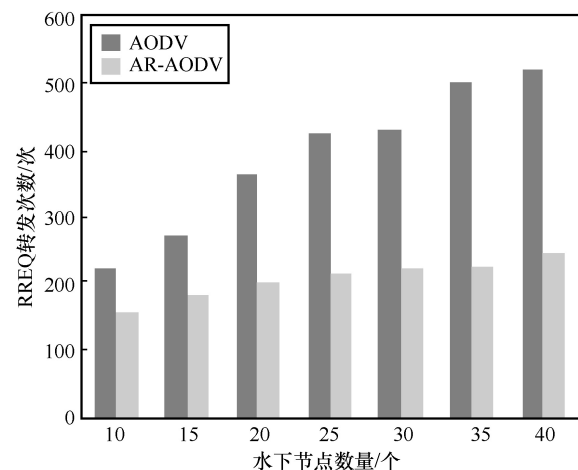


图12 不同节点数量的寻路包转发次数对比

5 结束语

本文分析了现有跨域传输方案及其相关的路由协议, 跨域传输还处于起步阶段, 有极高的科研价值和广阔的应用前景。在声电协同网络的框架中, 提出了一种基于位置信息和能量均衡的声电协同网络 AODV。该算法对水面浮标节点和水下节点定义不同的状态转移概率模型和信息素更新模型, 保证了在寻路过程中能有效减少水下数据包的收发, 减少水下声学链路的跳数, 最大限度地选择水上无线电链路。仿真结果表明, 与原有方案相比, AR-AODV 在传输成功率、传输时延、吞吐量、能量转化率、寻路包转发次数等方面的性能有显著提升。后续将扩展网络模型, 增加水上节点, 在更加复杂的声电协同网络架构上研究更适合的跨域传输路由协议。

参考文献:

- [1] JIANG S M. Networking in oceans[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 54(1): 1-33.
- [2] 余文科, 程媛, 李芳, 等. 物联网技术发展分析与建议[J]. *物联网学报*, 2020, 4(4): 105-109.
YU W K, CHENG Y, LI F, et al. Analysis and suggestions on the development of IoT technology[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(4): 105-109.
- [3] DOMINGO M C. An overview of the internet of underwater things[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, 35(6): 1879-1890.
- [4] ZHOU J J, SU Z, XU Q C, et al. Cooperative content offloading scheme in air-ocean integrated networks[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2021, 14(5): 3388-3404.
- [5] ZOLICH A, PALMA D, KANSANEN K, et al. Survey on communication and networks for autonomous marine systems[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 95(3/4): 789-813.
- [6] LIN K Q, HAO T, ZHENG W A, et al. Analysis of LoRa link quality for underwater wireless sensor networks: a semi-empirical study[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 120-122.
- [7] TONOLINI F, ADIB F. Networking across boundaries: enabling wireless communication through the water-air interface[C]//*Proceedings of SIGCOMM'18: Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. New York: ACM Press, 2018: 117-131.
- [8] ENHOS K, DEMIRORS E, UNAL D, et al. Software-defined visible light networking for bi-directional wireless communication across the air-water interface[C]//*Proceedings of 2021 18th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-9.
- [9] VASILJEVIĆ A, NAĐ Đ, MIŠKOVIĆ N. Autonomous surface vehicles as positioning and communications satellites for the marine operational environment—step toward internet of underwater things[C]//*Proceedings of 2018 IEEE 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [10] LUO J H, CHEN Y P, WU M, et al. A survey of routing protocols for underwater wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(1): 137-160.
- [11] 官权升, 陈伟琦, 余华, 等. 声电协同海洋信息传输网络[J]. *电信科学*, 2018, 34(6): 20-28.
GUAN Q S, CHEN W Q, YU H, et al. Acoustic-radio cooperative marine information network[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(6): 20-28.
- [12] CHEN F J, JIANG Z L, JI F, et al. Radio-acoustic integrated network for ocean information transmission: framework and enabling technologies[J]. *China Communications*, 2021, 18(9): 62-70.
- [13] HALLER S, KARNOUSKOS S, SCHROTH C. The internet of things in an enterprise context[C]//*Future Internet symposium*. Heidelberg: Springer, 2008: 14-28.
- [14] 江子龙, 王焱, 钟雪峰, 等. 基于 NS-3 的声电协同网络实现及路由性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(6): 2014-2023.
JIANG Z L, WANG Y, ZHONG X F, et al. Implementation and routing performance analysis based on network simulator-3 for coordinate radio-acoustic network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(6): 2014-2023.
- [15] AKYILDIZ I F. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 257-279.
- [16] KHAN H, HASSAN S A, JUNG H. On underwater wireless sensor networks routing protocols: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(18): 10371-10386.
- [17] YAN H, SHI Z J, CUI J H. DBR: depth-based routing for underwater sensor networks[M]//*NETWORKING 2008 Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet*. Heidelberg: Springer, 2008: 72-86.
- [18] WAHID A, LEE S, JEONG H J, et al. EEDBR: energy-efficient depth-based routing protocol for underwater wireless sensor networks[C]//*Advanced Computer Science and Information Technology*. [S.l.:s.n.], 2011: 223-234.
- [19] GUL S, JOKHIO S H, JOKHIO I A. Light-weight depth-based routing for underwater wireless sensor network[C]//*Proceedings of 2018 International Conference on Advancements in Computational Sciences (ICACS)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [20] XIE P, CUI J H, LAO L. VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks[C]//*Proceedings of International Conference on Research in Networking*. Heidelberg: Springer, 2006: 1216-1221.
- [21] NICOLAOU N, SEE A, XIE P, et al. Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks[C]//*Proceedings of OCEANS 2007 - Europe*. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-6.
- [22] JOHNSON D R, RHYMEND UTHARIARAJ V. Routing protocols for underwater wireless sensor networks[C]//*Proceedings of 2018 10th International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 261-268.
- [23] DHONGDI S, BHANDARI A, SINGH J, et al. Joint clustering and routing protocol for 3-D underwater acoustic sensor network[C]//*Proceedings of 2018 10th International Conference on Ubi-*

- quitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway: IEEE Press, 2018: 415-420.
- [24] KARIM S, SHAIKH F K, AURANGZEB K, et al. Anchor nodes assisted cluster-based routing protocol for reliable data transfer in underwater wireless sensor networks[J]. IEEE Access, 2021(9): 36730-36747.
- [25] LUO H J, XIE X M, HAN G J, et al. Multimodal acoustic-RF adaptive routing protocols for underwater wireless sensor networks[J]. IEEE Access, 2019(7): 134954-134967.
- [26] LIU M M, JI F, GUAN Q S, et al. On-surface wireless-assisted opportunistic routing for underwater sensor networks[C]//Proceedings of WUWNet'16: Proceedings of the 11th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems. [S.l.:s.n.], 2016: 1-5.
- [27] DING J N, WANG C H, JIANG M Q, et al. Cross media routing and clustering algorithm for autonomous marine systems[C]//Proceedings of 2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems. Piscataway: IEEE Press, 2021: 289-296.
- [28] DORIGO M, DI CARO G. Ant colony optimization: a new meta-heuristic[C]//Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406). Piscataway: IEEE Press, 1999, 2: 1470-1477.
- [29] 郁瀚. 基于信任管理机制和蚁群算法的 Ad Hoc 安全路由研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
YU H. Research on Ad Hoc secure routing based on trust management mechanism and ant colony algorithm[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [30] DUCATELLE F, DI CARO G, GAMBARDILLA L M. Using ant agents to combine reactive and proactive strategies for routing in mobile Ad Hoc networks[J]. International Journal of Computational Intelligence and Applications, 2005, 5(2): 169-184.
- [31] PERKINS C, BELDING-ROYER E, DAS S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing[R]. RFC Editor, 2003.
- [32] JACQUET P, MUHLETHALER P, CLAUSEN T, et al. Optimized link

state routing protocol for Ad Hoc networks[C]//Proceedings of IEEE International Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century. Piscataway: IEEE Press, 2001: 62-68.

[作者简介]



卫浓钰（1997- ），女，华南理工大学电子与信息学院硕士生，主要研究方向为水声网络、声电协同网络路由等。



江子龙（1991- ），男，华南理工大学电子与信息学院博士生，主要研究方向为无线网络、声电协同网络路由等。



陈芳炯（1975- ），男，博士，华南理工大学电子与信息学院教授，主要研究方向为无线通信及组网技术，具体包括信道估计与均衡、新型调制技术，声电协同组网等。