

# 基于异常检测和 AUV 辅助的水下传感器网络可靠节能路由协议

李冲<sup>1</sup>, 杜秀娟<sup>1,2</sup>, 王丽娟<sup>1</sup>, 田晓静<sup>1</sup>, 王志刚<sup>3</sup>

(1. 青海师范大学计算机学院青海省物联网重点实验室, 青海 西宁 810008;

2. 藏语智能信息处理及应用国家重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 华北科技学院计算机学院, 河北 廊坊 065201)

**摘要:** 近年来, 自治式潜水器 (AUV) 的快速发展, 极大地扩展了水下传感器网络 (UWSN) 的应用。针对在移动场景下那些邻居节点少或与邻居节点的距离远的异常节点在传输数据时容易失败的问题, 在改进局部群因子 (LOF) 检测算法的基础上提出一种基于异常检测和 AUV 辅助的可靠节能路由 (RERA) 协议。RERA 协议提出了适用于 UWSN 的异常节点筛选机制, 筛选出的异常节点只转发时延敏感数据, 对于时延不敏感的数据使用 AUV 辅助传输。此外, 优化了遗传算法, 设计了高效的 AUV 路径规划算法。同时, 为了避免无序的数据传输导致的冲突, 引入一种 AUV 辅助传输调度规则。仿真实验验证了优化遗传算法的性能和 AUV 的辅助性能, 并与现有的协议进行了比较。结果表明, RERA 协议在 AUV 覆盖率、AUV 航行时间、数据交付率、能耗等方面均表现出较优的性能。

**关键词:** 水下传感器网络; 路由协议; 自治式潜水器; 异常节点; 路径规划

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025004

## Reliable energy-efficient routing protocol based on anomalous detection and AUV-aid for underwater sensor networks

LI Chong<sup>1</sup>, DU Xiujuan<sup>1,2</sup>, WANG Lijuan<sup>1</sup>, TIAN Xiaojing<sup>1</sup>, WANG Zhigang<sup>3</sup>

1. College of Computer, Qinghai Provincial Key Laboratory of IoT, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

2. The State Key Laboratory of Tibetan Intelligent Information Processing and Application, Xining 810008, China

3. School of Computer Science, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China

**Abstract:** In recent years, the rapid development of autonomous underwater vehicle (AUV) has greatly expanded the applications of underwater sensor network (UWSN). In view of the problem that data transmission of abnormal nodes with few or far neighbors in mobile underwater scenarios was prone to fail, a reliable energy-efficient routing (RERA) protocol based on an improved local outlier factor (LOF) detection and AUV-aided was proposed for UWSN. In the RERA protocol, an anomalous node screening mechanism was designed for UWSN. The screened anomalous nodes only forward delay-sensitive data, and delay-insensitive data was transported with the assist of AUV. In addition, the genetic algorithm was further improved and an efficient AUV path planning algorithm was designed. Meanwhile, to avoid the collision caused by disordered data transmission, an AUV-aid transmission scheduling rule was introduced. Simulation results show that, compared with existing AUV-based protocols, the RERA protocol exhibits better performance in terms of AUV coverage, AUV sailing time, data delivery rate, and energy consumption.

**Keywords:** underwater sensor network, routing protocol, autonomous underwater vehicle, anomalous node, path planning

收稿日期: 2024-09-23; 修回日期: 2025-01-02

通信作者: 杜秀娟, dxj@qhnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61962052); 青海省自然科学基金资助项目 (No.2024-ZJ-929)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61962052), The Natural Science Foundation of Qinghai Province (No.2024-ZJ-929)

## 0 引言

水下传感器网络 (UWSN, underwater sensor network) 脱胎于无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network)。然而, 与 WSN 相比, UWSN 往往部署在环境复杂的水下三维区域中。由于水对电磁波的吸收作用极为显著, 导致电磁波在水中传播时衰减严重, 而且这种衰减与电磁波频率成正比, 因此 UWSN 一般采用声波作为传输媒介<sup>[1-5]</sup>。然而, 受水下环境的复杂性和特殊性影响, 水声信道的使用, 使得 UWSN 在设计与应用上面临着诸多独特的挑战<sup>[6-8]</sup>。水对声波信号的吸收作用, 降低了水声信号的强度, 增加了信号传输的损耗, 造成 UWSN 误码率高、传播损耗严重的挑战<sup>[9-10]</sup>。声波的使用也带来了更长的传播时延<sup>[11-12]</sup>。此外, 水下环境本身具有高度动态性, UWSN 中的节点随水的流动发生位移会导致拓扑发生改变<sup>[13-15]</sup>。近年来, 自治式潜水器 (AUV, autonomous underwater vehicle) 得到了快速发展, 设备性能逐年提升, 因其行动的灵活性和能量供应的便捷性, AUV 被广泛地应用在 UWSN 的协议设计中。AUV 在扩展了 UWSN 应用的同时, 也带来了更高的拓扑动态性<sup>[16-18]</sup>。随着 AUV 技术的不断成熟, 研究人员逐渐开始把 AUV 引入 UWSN 路由协议设计中<sup>[19-20]</sup>。

Ilyas 等<sup>[21]</sup>提出了一种 AUV 辅助的高效数据收集 (AEDG) 协议。AEDG 协议中, 使用 AUV 从网关节点收集数据。为了均衡网络能耗, AEDG 协议基于最短路径树 (SPT, shortest path tree) 算法设计了一种网关轮换算法。Han 等<sup>[22]</sup>设计了一种基于 AUV 位置预测的 (ALP) 数据采集方案。在 ALP 数据采集方案中, AUV 会沿着预定的轨迹航行并采集传感器节点的数据。为了克服“热区”问题, 提出了一种周期性调整轨迹的数学模型。为了保证节点和 AUV 之间的有效通信, 提出了一种基于可靠时间的通信机制。Chaaf 等<sup>[23]</sup>设计了基于中继的多 AUV 空洞预防和修复 (ReVOHPR) 协议。ReVOHPR 协议为了降低能耗设计了一种节点动态睡眠调度算法。此外, 还提出了一种基于虚拟图的路由算法, 以达到空洞预防和修复的目标。

局部离群因子 (LOF, local outlier factor) 检测算法能够简单直观地量化每个点的异常程度, 对各种密度变化和节点分布情况都具有好的适应性, 是离群点检测领域中的重要算法<sup>[24]</sup>。此外, LOF

检测算法对于相对稀疏的区域中的异常点有较高的敏感性, 这对于节点部署稀疏的 UWSN 而言是十分契合的。在此背景下, 本文基于 AUV 在 UWSN 中的应用优势和挑战, 提出一种基于异常检测和 AUV 辅助的可靠节能路由 (RERA) 协议。RERA 协议的创新之处如下。

1) 基于 UWSN 的特性, 对 LOF 检测算法进行了改进, 并在改进 LOF 检测算法基础上设计了 UWSN 的异常节点筛选机制。需要说明的是, RERA 协议的异常节点并不是网络中的攻击节点, 不会对其他节点通信造成安全威胁, 其“异常”主要体现在其邻居节点少或与邻居节点的距离远, 在节点移动的情况下很可能导致异常节点传输失败问题。为解决异常节点的这一挑战, 引入 AUV 辅助传输成为一种有效的解决途径。为了保障 RERA 协议的交付性能, 异常节点除参与转发时延敏感数据外, 不参与转发时延不敏感数据, 时延不敏感数据在异常节点处需要借助 AUV 进行辅助传输。这种机制既保障了转发时延敏感数据的端到端时延, 又有效降低了处理非时延敏感数据时普通节点的能耗。

2) 为了提升 AUV 对网络区域中节点的覆盖率, 将 UWSN 区域均匀地划分为若干子区域, AUV 在子区域间航行并辅助节点进行数据传输。AUV 在一次辅助传输过程中, 经过所有区域且只经过一次。本文在改进遗传算法的基础上设计了高效的 AUV 路径规划算法, 并提出了 AUV 辅助传输调度规则。此外, 为了提升 AUV 的工作效率, 在一次航行中, 若 2 个 AUV 的轨迹出现重合, 轨迹重合的 AUV 会重新规划各自未经过区域的航行路径。

3) 针对 UWSN 拓扑动态性高、能量受限的挑战, 提出了 RERA 协议。RERA 协议中, AUV 只负责游离节点、异常节点的非时延敏感数据和少量普通节点的数据辅助传输, 多数普通节点的数据传输和时延敏感的数据传输, 则遵循路由算法 (纯路由模式) 逐跳传输。纯路由模式中, 算法根据综合评价因子和拓扑改变因子为候选节点计算转发因子, 并选择具有最大转发因子的候选节点作为下一跳节点进行数据转发, 完成路由过程。AUV 辅助传输有效地提升了协议的交付性能、降低了传感器节点的能耗。

## 1 异常节点检测

RERA 协议中, 异常节点是指那些邻居节点数量远低于其邻居节点的邻居数量, 且与邻居节点的距离较远的节点。由于节点移动等原因, 异常节点数据传输失败概率较大, 因此, 除特殊情况外(传输时延敏感数据), 异常节点通常不参与数据转发, 异常节点的非时延敏感的数据通常需要使用 AUV 进行辅助传输。因此, 如何精准、高效地检测 UWSN 中异常节点是本节的主要研究内容。

### 1.1 改进的 LOF 检测算法

本节基于 UWSN 的特性改进了传统 LOF 检测算法中的局部密度计算方法。改进的局部密度计算方法如下。

#### 1.1.1 $k$ 距离和 $k$ 距离邻域

定义在  $\text{Node}_i$  的  $N$  个邻居节点中, 第  $k$  个最近的邻居节点  $\text{Node}_p$  到  $\text{Node}_i$  的距离为  $\text{Node}_i$  的  $k$  距离  $d_k(i)$ , 如式(1)所示。

$$d_k(i) = d(i, p) \quad (1)$$

在此基础上, 定义  $K$  为  $\text{Node}_i$  的  $k$  距离内节点的集合, 即  $k$  距离邻域。  $K$  满足式(2)。

$$K = \{o | d(i, o) \leq d_k(i)\} \quad (2)$$

其中,  $\text{Node}_p$  为  $\text{Node}_i$  的第  $k$  个最近的邻居节点,  $d(i, p)$  表示  $\text{Node}_i$  和  $\text{Node}_p$  之间的欧氏距离。  $\text{Node}_i$  的  $k$  距离内, 包含  $k$  个邻居节点  $\text{Node}_o$  使得  $d(i, o) \leq d(i, p)$ , 即  $k$  距离内节点的集合  $K$  中至少包含  $k$  个元素。

#### 1.1.2 $k$ 可达距离

在算法中,  $\text{Node}_o$  相对于  $\text{Node}_i$  的可达距离可以表示为  $\text{Node}_i$  的  $k$  距离和  $\text{Node}_o$  到  $\text{Node}_i$  的距离中的较大者, 如式(3)所示。

$$\text{reach}_k(o, i) = \max\{d_k(i), d(o, i)\} \quad (3)$$

与数据的异常点检测不同的是, 在 UWSN 中, 由于采用相同的通信半径, 2 个节点之间只存在互为邻居或互相均不为邻居 2 种情况, 节点不关注超出其传输范围的节点, 只计算其传输范围内节点的局部异常因子。

#### 1.1.3 局部可达密度

LOF 检测算法中, 通过为节点计算局部可达密度  $\text{lrd}_k(i)$ , 来反映该节点周边的密度情况。局部可

达密度为  $k$  距离邻域内的所有节点的平均  $k$  可达距离的倒数, 如式(4)所示。

$$\text{lrd}_k(i) = \frac{1}{\sum_{o \in K} \text{reach}_k(o, i)} = \frac{|K|}{\sum_{o \in K} \text{reach}_k(o, i)} \quad (4)$$

节点的  $\text{lrd}_k(i)$  越大, 该节点是异常点的可能性越小。然而在 UWSN 中, 水下传感器节点具有移动性且对邻居节点尤其是超出传输半径的(二跳邻居)节点的位置感知是滞后的, 因此, 对于 UWSN 而言, 基于二跳邻居节点来计算一跳邻居的局部可达密度时误差较大, 仅使用  $k$  可达距离计算节点的局部密度可能无法全面地反映节点的邻居情况。本节对局部可达密度计算式进行了改进, 改进后的局部密度如式(5)所示。

$$\text{lrd}(i) = \frac{1}{1 + e^{-N_i}} + \frac{|K|}{\sum_{o \in K} d_k(o, i)} \quad (5)$$

其中,  $N_i$  表示  $\text{Node}_i$  的邻居节点个数,  $N_i$  越大,  $\text{lrd}(i)$  越大;  $|K|$  为  $k$  邻域内节点的个数;  $\sum_{o \in K} d_k(o, i)$  为  $k$  邻域节点的可达距离之和, 其值越小, 相同邻居密度下, 邻居节点到  $\text{Node}_i$  的平均距离越小,  $\text{lrd}(i)$  越大, 邻居节点在数据传输时移动出  $\text{Node}_i$  传输范围的可能越小,  $\text{Node}_i$  是异常节点的概率越小。

#### 1.1.4 离群因子

基于改进的局部密度计算节点离群因子。节点的离群因子定义为邻居节点的局部密度的平均值与节点的局部密度的比值, 如式(6)所示。

$$\text{LOF}_k(i) = \frac{\sum_{o=1}^{|K|} \text{lrd}(o)}{\text{lrd}(i)} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知, 节点的邻居数量越小, 节点间的平均距离越大, 则节点的局部密度越小, 离群因子越大, 该节点成为异常节点的概率越高。

## 1.2 异常节点筛选机制

由于 UWSN 中传感器节点会随着水的流动发生位移, 异常节点会随着时间的推移而成为普通节点, 普通节点也可能成为异常节点, 因此, 异常节点的动态筛选尤为重要。本节基于改进的 LOF 检

测算法设计了异常节点筛选机制。在设计的筛选机制中,当节点及其所有一跳邻居完成一个周期内的Hello报文转发后节点的离群因子重新被计算。Hello周期是指从Sink泛洪Hello报文开始至最大层级节点完成该Hello报文转发的过程。异常节点筛选机制如算法1所示。

#### 算法1 异常节点筛选机制

//网络部署完成后,所有节点已计算得到自身的离群因子。

步骤1 在一次Hello周期内,Node<sub>i</sub>收到来自邻居节点的Hello报文,则按照邻居更新算法更新邻居表。

步骤2 在节点完成Hello报文转发后,Node<sub>i</sub>根据邻居表信息重新计算其自身的局部密度lrd(*i*)和一跳邻居节点局部密度lrd(*j*),进而得到新的自身离群因子LOF(*i*)。

步骤3 Node<sub>i</sub>在收到任意一帧报文(除Hello报文)后,若在一个往返时延(RTT)内再未收到其他报文,与步骤2相似,Node<sub>i</sub>计算自身离群因子LOF(*i*)。

步骤4 若LOF(*i*) > ζ, Node<sub>i</sub>即异常节点,Node<sub>i</sub>生成一帧异常节点标识(ANF)字段被置为1的Hello报文,并向下层节点泛洪Hello报文,通报自身节点异常情况。该Hello报文不进行转发。

步骤5 若LOF(*i*) ≤ ζ, Node<sub>i</sub>即普通节点。

现有的UWSN路由协议中异常节点检测主要是从安全角度进行考虑,通过综合节点的能量、距离、数据传输情况等各种因素为节点计算信任值或危害性等方法来监测对网络中的其他节点有危害性或攻击性的恶意节点。与之不同的是,本文主要从节能和协议交付性能的角度出发,将相对邻居密度较小且平均距离较大的节点作为异常节点。与恶意节点不同,这些异常节点并不会对网络中的其他节点带来危害,但面临着随着节点的移动无法找到下一跳节点的问题。针对异常节点面临的挑战,AUV的辅助传输成为一个有效的解决途径。

## 2 AUV路径规划

考虑到AUV具有的高灵活性和便捷的能量供应等应用优势,研究人员不断尝试引入AUV来辅助UWSN中的水下节点进行数据传输。如何在最

短的时间内使AUV最全面地覆盖UWSN中的节点,是基于AUV辅助路由协议的一个研究领域,也是本节的研究内容<sup>[25]</sup>。本节提出了一种基于优化遗传算法(IGA)的AUV路径规划算法。AUV路径规划算法将UWSN的网络区域划分为 $n^2$ 个区域且 $n \geq 4$ ,AUV在区域的中心点位置与该区域内的节点进行通信,如图1所示。

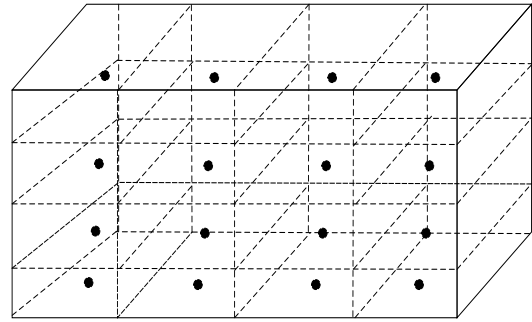


图1 UWSN子区域划分

AUV按照一定的轨迹在区域内航行,一次航行轨迹内,AUV应途经所有区域中心点一次且仅一次。此时可以将AUV在 $n^2$ 个区域内航行的问题等价于求图的最短哈密顿回路问题,即旅行商问题(TSP, traveling salesman problem)。将UWSN的网络区域看作一个带权重的完全无向图 $G=(V,E)$ , $V=\{v_1, v_2, \dots, v_{n^2}\}$ 为顶点(区域中心点)的集合, $E$ 是连接2个顶点的边,顶点间的距离作为边的权重,具体地,使用归一化的距离表示边的权重,如式(7)所示。

$$E_{ij} = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (7)$$

其中, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 分别表示所部署水域立方体的长、宽与深。图1中区域中心节点为虚拟节点,为便于区域中心节点位置的计算,使用图2所示的坐标系计算各区域中心节点的位置,区域中心点位置 $v_i$ 如式(8)所示。

$$v_i(x_i, y_i, z_i) = \begin{cases} x_i = \frac{(2i-1)X}{2n} \\ y_i = \frac{(2i-1)Y}{2n} \\ z_i = \frac{(2i-1)Z}{2n} \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

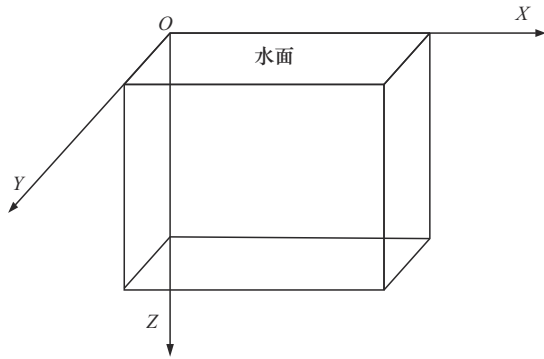


图2 区域中心点坐标计算所用坐标系

在UWSN中AUV路径规划时，若划分的区域过大（区域中心点较少），AUV的运行轨迹可能无法覆盖到所有的传感器节点，相反，划分的区域过小（区域中心点较多），会使得路径规划的复杂度急剧增加。在解决TSP时，传统遍历算法的时间复杂度约为 $O(N!)$ ，会随着顶点数量的增加而显著增加。因此，本节首先优化了遗传算法（GA），并基于IGA设计了AUV路径规划算法。图3为基于IGA的AUV路径规划算法。

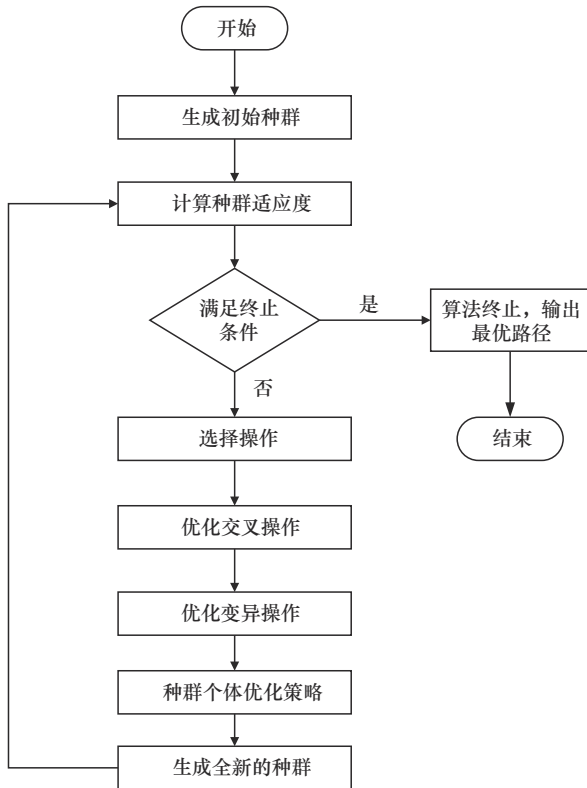


图3 基于IGA的AUV路径规划算法

1) 生成初始种群

在基于IGA的求解过程中，采用实数编码方

式，将网络中的区域中心点 $v_i$ 作为IGA中的染色体。初始种群 $Pop_0$ 中包含 $m$ 个个体 $I_m$ ，每个个体 $I_m$ 是所有染色体 $v_i$ 的一组随机组合。

$$Pop_0 = \{I_1, I_2, \dots, I_m\} \quad (9)$$

$$I_m = \left\{ \text{Random permutation} \left( v_1 \cdots v_{n^2} \right) \right\} \quad (10)$$

如图4所示，在基于IGA的AUV路径规划算法中，染色体为区域中心点，个体为所有区域中心点的一种排序，即路径序列。种群为 $m$ 组路径序列的集合。算法通过不断地迭代、优化种群个体，最终得到最优个体，即所求最优AUV运行轨迹。

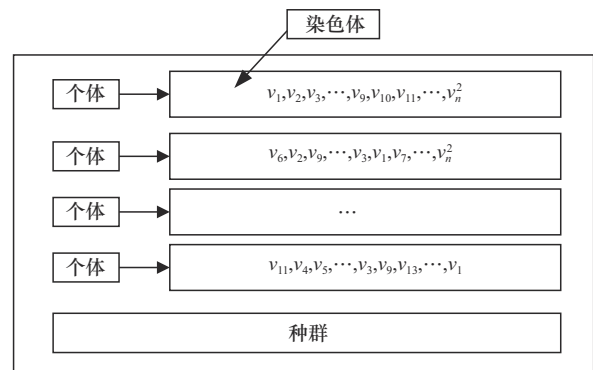


图4 IGA种群、个体、染色体示意

2) 计算种群适应度

适应度函数也称为评价函数，用于评价个体（路径序列）的优劣程度，一般情况下，适应度越高该个体被选择的概率越高。在UWSN的AUV路径规划中，AUV完成一次数据收集的时间越短，协议的工作效率则越高。路径的长短与AUV完成数据采集所用时间成正比，算法更倾向于选择距离较短的路径作为AUV的运行轨迹。因此，路径序列的适应度函数为

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{\left( \sum_{i=1}^{n^2} (E_{ij}) \right)}}, j = i + 1 \quad (11)$$

其中， $s$ 为种群中的一个特定个体， $\sum_{i=1}^{n^2} (E_{ij})$ 表示该个体的路径序列的长度。由式(11)可知，路径的长度越小，该路径序列的适应度值越高，被选择的概率越高。

3) 选择操作

基于IGA的AUV路径规划算法中选择的过程是用来选取种群中的部分优秀个体作为父代，

通过遗传或交叉配对的方式产生下一代个体。选择操作一般建立在个体适应度值的基础上,采用轮盘赌策略计算每个个体被选择的概率。轮盘赌策略的主要思想是适应度值越好的节点被选择的概率越高,因此,轮盘赌策略会根据每个个体的适应度值占种群中所有个体适应度值的比例来计算个体被选择的概率  $P_s$ ,如式(12)所示,并以此概率随机选择种群中的个体用于构建下一代个体。因此,该方法也被称为适应度比例法。

$$P_s = \frac{f(s)}{\sum_{s=1}^m f(s)} \quad (12)$$

轮盘赌策略在选择个体前不需要对种群中的个体进行排序,根据个体的选择区间即可,如表 1 所示。在轮盘赌策略中选择个体的数量即旋转轮盘的次数。轮盘旋转定义为随机生成一个在区间  $[0,1]$  的数字,该数字处于哪一个选择区间,该区间对应的个体即被选择成为父代个体。

表 1 轮盘赌策略个体选择区间

个体	适应度	选择概率	选择区间
$I_1$	$f(1)$	$P_1$	$[0,P_1]$
$I_2$	$f(2)$	$P_2$	$(P_1,P_1+P_2]$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$I_m$	$f(m)$	$P_m$	$(\dots,1]$

#### 4) 优化交叉操作

在自然界生物进化过程中起核心作用的是生物遗传基因的重组。交叉操作是算法中一项重要的操作,用于模拟遗传基因的重组过程,通过将 2 个或多个父代个体的基因信息进行交叉组合,生成新的后代个体。交叉操作有助于保留优秀个体的特征并引入新的变化,增加种群的多样性。交叉操作存在多种重组方式,调和重组是常用的一种交叉选择策略。调和重组是指下一代个体中的染色体按照一定的算法在 2 个父代个体中产生。传统的调和重组如式(13)所示。

$$v_i = v_{\text{father}_1} + \phi(v_{\text{father}_1} - v_{\text{father}_2}) \quad (13)$$

其中,  $v_{\text{father}_1}$  表示第一个父代对应的  $i$  位置上的染色体,  $v_{\text{father}_2}$  表示第二个父代对应的  $i$  位置上的染

色体。 $\phi$  为比例因子,取值范围为  $\phi \in [-0.25,1.25]$ 。每个染色体计算时,  $\phi$  的值在其取值范围内随机生成。因在 TSP 中,每个点只经过一次。因此,当新产生的染色体与已有的染色体重合时,则重新计算。传统的调和重组算法中,当 2 个父代之间染色体的排序差别较小时,下一代个体重组染色体改变的幅度较小,这不利于新的路径的搜索,使得算法容易陷入局部最优。针对此问题,对式(13)进行改进,改进后如式(14)所示。

$$v_i = \begin{cases} \left( \left[ v_{\text{father}_1} + \phi(v_{\text{father}_1} - v_{\text{father}_2}) \right] + \mathfrak{R} \right) \equiv \\ (n^2 + 1), v_i > 0 \\ 1, \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\mathfrak{R}$  为随机整数值,取值范围为  $\mathfrak{R} \in [0,n]$ 。由式(14)可知,改进后的调和重组公式的值域为  $[0,n^2]$ 。由于区域中心点的标号从 1 开始,因此,当模为 0 时,  $v_i$  的取值为 1。改进后的算法使得父代之间染色体的排序差别较小时,其下一代个体的染色体改变的幅度显著增加,扩大了算法的搜索空间。

#### 5) 优化变异操作

变异操作是指种群中的个体进行小的随机变化以创建突变的下一代个体。变异模拟了自然界中基因的突变现象,使得遗传算法的多样性显著增加,为遗传算法带来了更广阔的搜索空间。本节采用多点变异的方法,即从个体中选取多个染色体进行变异。IGA 的变异操作规则如规则 1 所示。

##### 规则 1 变异操作规则

条件 1 随机生成个体变异概率  $IP_i \in (0,1)$ 。由于自然界中变异属于小概率事件,因此,当  $IP_i \leq \varpi$  时,该个体发生变异。

条件 2 当满足条件 1 时,从个体中随机选取 3 组染色体  $(v_i, v_{i+1}), (v_j, v_{j+1}), (v_k, v_{k+1})$ ,  $i, j, k$  满足  $2 < i + 1 < j, j + 1 < k, k + 1 < n^2$ 。

条件 3 3 组染色体  $(v_i, v_{i+1}), (v_j, v_{j+1}), (v_k, v_{k+1})$ , 平移 3 次交换位置得到新的序列  $(v_k, v_{k+1}), (v_i, v_{i+1}), (v_j, v_{j+1})$ 。

条件 4 循环种群中的所有个体,按照条件 1~条件 3 进行变异操作。

6) 设置终止条件

终止条件是 IGA 终止迭代的必要条件。本节设置 IGA 迭代终止条件如终止条件 1 所示。

终止条件 1 IGA 迭代终止条件

条件 1 IGA 迭代次数达到预定义的最大迭代次数  $\sigma$ 。

条件 2 连续  $\psi$  代中, 种群之间最优个体无明显的优化 (最优个体适应度值  $|f(t+1) - f(t)| < \zeta$  或者个体中的染色体排序无明显改变)。

当 IGA 满足终止条件时, 迭代终止。此时所得到的适应度最佳的个体既是最优解, 也是所求 AUV 的最优运行轨迹。

7) 种群个体优化策略

传统 GA 基于原有种群个体生成全新的种群个体, 这使得算法容易丢失全局最优解。当变异率较大或交叉重组变化幅度较大时, 算法更加倾向于引入随机性, 增加了全局搜索的可能性, 但这也使得算法在搜索空间中跳跃太远, 容易错过最优解。此外, 当种群中的个体过度地集中在某些最优个体时, 会使得算法容易陷入局部最优解。因此, 在传统 GA 的基础上增加了种群个体优化策略, 以改进 GA 算法全局最优解易丢失和陷入局部最优的问题。IGA 算法种群个体优化策略设计步骤如下。

步骤 1 IGA 算法生成初始种群  $Pop(t), t = 0$ 。

步骤 2 计算种群  $Pop(t)$  中个体的适应度。

步骤 3 判断是否满足终止条件。若满足, 停止迭代; 否则, 继续执行步骤 4。

步骤 4 基于现有的种群进行 IGA 的选择、交叉、变异操作生成  $\lambda$  个新个体。

步骤 5 计算新生成个体的适应度。

步骤 6 在  $\lambda + m$  个个体中选择最优的  $\kappa$  个个体和随机的  $m - \kappa$  个较差的个体组成新的下一代种群  $Pop(t + 1)$ , 令  $t = t + 1$ 。继续执行步骤 3。

在步骤 6 中选取最优的  $\kappa$  个个体是为了保留每代中最优的部分个体。随机选取  $m - \kappa$  个较差的个体是为了防止算法总是从某些相对集中的最优个体中进行选择、交叉和变异操作而陷入局部最优解的问题。

8) AUV 轨迹及辅助传输

经过 IGA 的迭代, 最终得到的经过所有区域的最优路径, 即 AUV 的路径运行轨迹。当网络中

只存在一个 AUV 时, AUV 按照本次规划所得的运行轨迹航行并辅助传感器节点进行数据传输, AUV 按照运行轨迹完成一次航行后, 在下次航行前会重新计算新的运行轨迹。当网络中存在多个 AUV 辅助传输时, 若 2 个及以上 AUV 处于相邻的区域且下一目标区域相同时, AUV 会以当前所在区域为起点, 将未经历的区域组成新的网络区域重新规划运行轨迹。新网络区域可以表示为

$$G_n = \{V_n, E_n\}, V_n = \{v_i | v_i \in V \& v_i \notin V_o\} \quad (15)$$

其中,  $V_n$  表示 AUV 新网络区域中心点的集合,  $V_o$  为 AUV 已经过的网络区域中心点的集合,  $G_n$  为新网络区域的完全无向图,  $E_n$  为  $V_n$  中顶点之间的边。

AUV 在航行至每一个区域中心点时, 主动向该区域内的传感器节点广播发送辅助查询报文 (AEM, auxiliary enquiry message), 如图 5 所示。收到 AEM 的传感器节点, 根据自身需求向 AUV 回复辅助传输报文 (ATM, auxiliary transmission message), 如图 6 所示。若在停留时间 (RT, residence time) 内未收到 ATM, AUV 则按照规划路径前往下一区域。RT 如式(16)所示。若收到传感器节点的 ATM, AUV 则等待全部节点完成数据传输后继续前往下一区域。

Type	AID	C_Area	N_Area
报文类型	发送者ID	发送者所处的区域	下一区域

图 5 AEM 格式

Type	SID	RID	C_Area	N_Area	AF	WT	Load
头部字段							负载字段

图 6 ATM 格式

$$RT = RTT + \varsigma \quad (16)$$

其中, RTT 为一个报文的往返时延,  $\varsigma$  为随机时间, 取值范围为  $\varsigma \in \left[0, \frac{RTT}{2}\right]$ 。

AEM 用于 AUV 向区域内的节点查询辅助传输信息。图 5 中, Type 表示该报文的类型, AID 为发送该报文的 AUV 的 ID, C\_Area 用于标识发送该报文的 AUV 所处的区域, N\_Area 表示发送该报文的 AUV 预期到达的下一区域。收到 AEM 报文的 AUV 会将 N\_Area 与自身预期到达的下一区域相对比, 若预期相同, 收到 AEM 的 AUV 会重新规划航行路

径并向发送AEM的AUV回复ATM, ATM的AF字段置为1, N\_Area为新规划路径的下一区域。当传感器节点收到AEM后, 会根据自身是否需要AUV辅助传输自行决定是否回复ATM。

图6给出了ATM格式。ATM用于传感器节点向区域内的AUV通告辅助传输信息或相邻区域内的AUV通告路径重复信息。SID为发送该报文的节点的ID。RID为接收该报文的AUV的ID。AF用于标识发送ATM报文的节点是否为AUV。当AF=1时, 发送节点为AUV, ATM用于通告相邻区域内的AUV路径发生重复, 收到该报文的AUV会重新规划运行轨迹, 且规划后的下一区域应与N\_Area字段不同。当AF=0时, 发送节点为传感器节点, ATM用于向区域内的AUV通告辅助传输信息, 收到该报文的AUV, 会根据WT字段调度节点传输数据。WT用于记录发送节点需传输的数据在发送节点已等待发送的时间。该字段用于AUV计算节点调度的优先级, 如式(17)所示。AUV路径规划及调度规则见规则2。

$$Or(i) = \frac{WT(i)}{T} \quad (17)$$

其中,  $WT(i)$ 为Node<sub>i</sub>需传输的数据在Node<sub>i</sub>处已等待的时间,  $T$ 为一个给定的最大等待时长。节点的等待时长越大, 该节点传输调度的优先级越高。

#### 规则2 AUV路径规划及调度规则

条件1 所有AUV均从最靠近Sink节点的区域出发, 并最终回到该区域。

条件2 AUV按照路径规划算法各自计算自身最优航行路径。

条件3 AUV向区域内的节点和邻域内的AUV广播发送AEM。

条件4 收到AEM的AUV判断AEM的N\_Area字段, 是否与自身的下一目标区域相同。若相同, AUV会以当前所在区域为起点, 将未经过的区域组成新的网络区域按照路径规划算法重新规划航行路径, 并回复ATM; 否则, 丢弃该报文。

条件5 收到AEM的传感器节点, 会根据自身是否需要AUV辅助传输自行决定是否回复ATM。

条件6 AUV收到ATM。若报文发送节点为AUV, 则接收ATM的AUV重新规划运行轨迹。若报文发送节点为传感器节点, AUV根据报文中WT字段计算该节点的传输优先级 $Or(i)$ 。

条件7 在RT结束后, AUV根据节点的优先级依次广播发送传输调度报文(TDM, transmit dispatch message)调度节点传输数据, 直至所有节点数据传输完成。TDM格式如图7所示。

Type	SID	C_Area	RTF	TID	Load
头部字段					未传输成功的数据包的编号

图7 TDM格式

条件8 传感器节点收到TDM, 若RTF为0且TID等于接收节点, 该节点开始传输数据。若RTF为1, 且TID等于接收节点, 该节点按照负载中的信息, 重传未接收的数据。

条件9 待所有节点的数据接收完成后, AUV按照规划路径前往下一区域, 并执行条件3~条件8。

TDM用于AUV向区域内的传感器节点通告传输调度信息。当更高优先级的传感器节点完成数据传输后, AUV会向次高优先级的传感器节点发送TDM。该报文既向上一数据传输节点确认AUV完成数据接收, 又调度下一节点开始数据传输。RTF为数据重传标志, 若未成功接收所有的数据, RTF被置为“1”, 即需要节点重传未被成功接收的数据包。若成功接收所有的数据, RTF被置为0。TID为允许传输数据的传感器节点的ID。当所有传感器节点完成数据传输后, AUV会发送一个TID为“0”的TDM, 并前往下一区域。

## 3 网络路由算法

### 3.1 网络初始化

RERA协议中由Sink节点周期性泛洪Hello报文, 节点通过收到的Hello消息获得邻居信息和自己的层级, Hello报文格式如图8所示。其中, Type用于标识报文类型, 报文类型如表2所示。SID和Level为发送Hello报文的节点ID和层级。ANF字段用于标识发送节点是否为异常节点。Load为Hello报文的负载字段, 该字段记录发送节点的信息及其一跳上层邻居节点信息。收到Hello报文的节点将Hello消息的发送节点作为一跳邻居存入邻居信息表。随后, 节点更新Hello报文头部字段为自身信息, 并将自己的一跳上层邻居信息写入Hello报文的负载字段后转发该Hello报文。如此, Hello报文逐跳转发。因此, 网络中凡是与Sink节点存在连通的所有水下节点都能获得各自的层级信

息、一跳邻居和二跳邻居节点的信息。层级及邻居更新算法如算法 2 所示。

Type	SID	Level	ANF	Load
头部字段				负载字段

图 8 Hello 报文格式

表 2	报文类型	报文类型
Type		报文类型
000		Hello 报文
001		AEM
010		ATM
011		TDM
100		数据包

**算法 2** 层级及邻居更新算法

**输入** Node<sub>i</sub> 收到来自 Node<sub>j</sub> 的报文 (Hello 报文或数据包)

**输出** 网络中的节点获得层级和邻居信息表

**条件 1** 若 Node<sub>i</sub> 未获得层级或  $L_i > L_j + 1$ , 则设置 Node<sub>i</sub> 的层级  $L_i = L_j + 1$ 。Node<sub>i</sub> 将 Node<sub>j</sub> 写入邻居表作为一跳上层节点。若该报文为 Hello 报文, 则将报文负载字段中的 Node<sub>j</sub> 的一跳邻居作为 Node<sub>i</sub> 的二跳邻居写入邻居表。随后, 更新 Hello 报文头部字段, 并将 Node<sub>i</sub> 自身及一跳邻居信息写入负载字段后转发该报文。若为数据包, 则丢弃该数据包。

**条件 2** 若 Node<sub>i</sub> 的层级满足  $L_i = L_j + 1$ 。Node<sub>i</sub> 更新邻居表内 Node<sub>j</sub> 的信息。随后, 参照条件 1 转发或丢弃该报文。

**条件 3** 若 Node<sub>i</sub> 的层级满足  $L_i = L_j$ 。Node<sub>i</sub> 更新邻居表内 Node<sub>j</sub> 的信息后, 丢弃该报文。

**条件 4** 若 Node<sub>i</sub> 的层级满足  $L_i = L_j - 1$ 。若该报文为 Hello 报文, 丢弃该报文。若为数据包且接收节点为 Node<sub>i</sub>, 参照路由算法转发该报文; 否则, 丢弃该报文。

**条件 5** 若 Node<sub>i</sub> 的层级满足  $L_i < L_j - 1$ , 直接丢弃报文。

**条件 6** Sink 节点周期性广播 Hello 报文。

表 3 给出了 RERA 协议邻居信息表的结构。邻居信息表中仅记载一跳同层邻居、一跳上层邻居、二跳邻居的节点信息。在邻居信息表中, ID、Level、RE 和 POS 分别表示该邻居节点的 ID、层

级、剩余能量和当前位置信息。MID 字段表示到达该邻居节点需经过的中间节点, 当该邻居为一跳邻居节点时, MID 与 ID 字段相同。当该邻居为二跳邻居节点时, MID 字段记录的是到达该二跳邻居所需经过的一跳邻居节点的 ID。

表 3 RERA 协议邻居信息表的结构

ID	Level	MID	RE	POS
5	1	9	$E_5$	$(X_5, Y_5, Y_5)$
9	2	9	$E_9$	$(X_9, Y_9, Y_9)$
10	3	10	$E_{10}$	$(X_{10}, Y_{10}, Y_{10})$
15	3	15	$E_{15}$	$(X_{15}, Y_{15}, Y_{15})$

表 2 给出了 RERA 协议中使用到的报文类型。Hello 报文用于更新节点层级与邻居信息表, AEM、ATM 和 TDM 用于 AUV 调度节点进行数据传输, 数据包用于传输传感器节点采集的数据给 Sink 节点。

由算法 2 可知, 获得层级的节点至少存在一条到达 Sink 的转发路径。然而, 在网络中节点移动数量较小时, 网络中的部分节点可能因不存在邻居节点而无法获得层级或者获取层级后因节点的移动性移出邻居传输范围造成层级超时。RERA 协议将这些始终未获得层级或获取层级后层级超时且未获得新的层级的节点, 称为游离节点。游离节点不存在邻居, 当游离节点完成数据采集后需要 AUV 辅助完成数据传输。

**3.2 路由过程**

RERA 协议中, 采用 AUV 辅助传输和纯路由模式混合的机制。UWSN 中的传感器节点均具有数据采集和收发功能, 在节点移动数量较小时, 网络中的部分节点由于无法获得层级而成为游离节点, 这些节点在完成数据采集后无法找到可用下一跳节点进行数据转发, 此时, 需要使用 AUV 来辅助这些游离节点进行数据转发。随着节点移动数量的增加, 网络中的游离节点逐渐减少, 但仍存在一些相对密度较低的异常节点, 这些异常节点在传输时延不敏感数据时也需要 AUV 辅助传输。对于多数普通节点和时延敏感数据而言, 则采用纯路由模式。在纯路由模式中, 源节点完成数据采集后, 综合考虑节点剩余能量、邻居密度、跳距和拓扑改变因子为其所有候选节点计算候选转发因子 (CFF), 如

式(18)所示,源节点选择具有最大转发因子的候选节点作为下一跳转发节点进行数据转发,数据接收节点类似地继续转发数据,经过逐层单播转发,直至到达 Sink 节点完成路由过程。RERA 协议路由过程如图 9 所示。

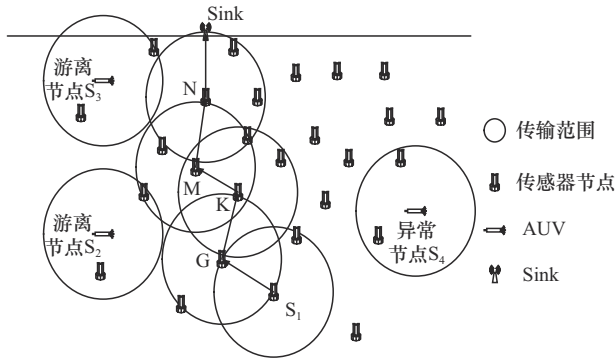


图 9 RERA 协议路由过程

图 10 为 RERA 协议中数据包的格式。其中, SID、Level、RE 和 POS 为发送节点的 ID、层级、剩余能量和位置。RID 为接收节点的 ID。DS 为数据时延敏感标记。当数据对时延敏感时,该标志被置为 1,时延敏感的数据应尽快完成数据传输,即使节点为异常节点也不需要等待 AUV 的辅助传输,按照纯路由模式选择下一跳转发节点完成路由。PN 表示本次传输的数据包的编号。PS 为传输的数据被切分的数据包的数量。

Type	SID	RID	Level	DS	PN	PS	RE	POS	Load
头部字段									DATA

图 10 RERA 协议中数据包的格式

$$CFF_i(j) = TC(t_j)\theta(j) \quad (18)$$

$$TC(t_j) = \left( 1 - \frac{|\text{Density}(t_j) - \text{Density}(t-1,j)|}{\max\{\text{Density}(t_j), \text{Density}(t-1,j)\}} \right) \quad (19)$$

$$\theta(j) = \frac{\text{Density}(j)}{\max\{\text{Density}(j)\}} + \frac{E(j)}{\max\{E(j)\}} + \left( 1 - \frac{\text{Dis}(ij)}{R} \right) \quad (20)$$

其中,  $TC(j)$  为拓扑改变因子,即  $t$  时刻与  $t-1$  时刻相比,候选节点  $\text{Node}_j$  的邻居密度变化情况。由式(19)可知,节点的邻居密度变化越小,拓扑改

变就越小,  $TC(j)$  越大,  $CFF(j)$  也相对越大,算法更倾向于选择拓扑改变较小的候选节点作为下一跳转发节点。 $\theta(j)$  为综合评价因子,是节点的邻居密度、剩余能量和跳距的综合评价价值。 $\text{Density}(j)$  为候选  $\text{Node}_j$  的邻居密度。 $E(j)$  为候选节点  $\text{Node}_j$  的剩余能量。 $\text{Dis}(ij)$  表示  $\text{Node}_i$  与其候选节点  $\text{Node}_j$  的跳距。由式(20)可知,候选节点的邻居密度越大、剩余能量越多、跳距越小,综合评价因子越高。综合式(18)~式(20)可知,算法倾向于选择节点的邻居密度大、剩余能量多、跳距小且拓扑改变小的节点作为下一跳转发节点。

如图 9 所示,节点  $S_1$  采集数据后,为其所有上层邻居计算 CFF,并选择具有最大 CFF 的节点 G 作为下一跳转发节点,节点 G 选择节点 K 作为下一跳转发节点,同样的,转发节点依次逐层选择节点 M、N 作为转发节点,最终到达节点 Sink,完成路由过程。此外,当网络中的游离节点  $S_2$ 、 $S_3$  和异常节点  $S_4$  完成数据采集后,会等待 AUV 到达节点所在区域辅助节点完成数据转发,AUV 辅助传输规则见规则 3。RERA 路由寻路算法如算法 3 所示。RERA 协议流程如图 11 所示。

### 规则 3 AUV 辅助传输规则

条件 1 若节点为游离节点且有数据需要传输,当收到 AEM 时,节点向发送 AEM 的 AUV 回复 ATM,等待 AUV 调度数据传输。

条件 2 若节点为异常节点且传输的数据为非时延敏感数据,当收到 AEM 时,节点向发送报文的 AUV 回复 ATM,等待 AUV 调度数据传输。

条件 3 若普通节点满足  $E(i) < \text{avg}\{E(j)\}$  &  $\text{Density}(i) < \text{avg}\{\text{Density}(j)\}$  |  $TC(i) < \iota$  且传输的数据为非时延敏感数据,节点等待 AUV 辅助传输。其中,  $E(i)$  表示  $\text{Node}_i$  的剩余能量,  $\text{avg}\{E(j)\}$  表示  $\text{Node}_i$  的上层邻居的平均剩余能量,  $\text{Density}(i)$  表示  $\text{Node}_i$  的邻居密度,  $\text{avg}\{\text{Density}(j)\}$  表示  $\text{Node}_i$  的邻居节点的平均邻居密度,  $TC(i)$  为  $\text{Node}_i$  的拓扑改变因子。

### 算法 3 RERA 路由寻路算法

输入 源节点  $\text{Node}_s$  采集到数据

输出 Sink 接收到数据

步骤 1 若  $\text{Node}_s$  满足规则,则等待 AUV 到达

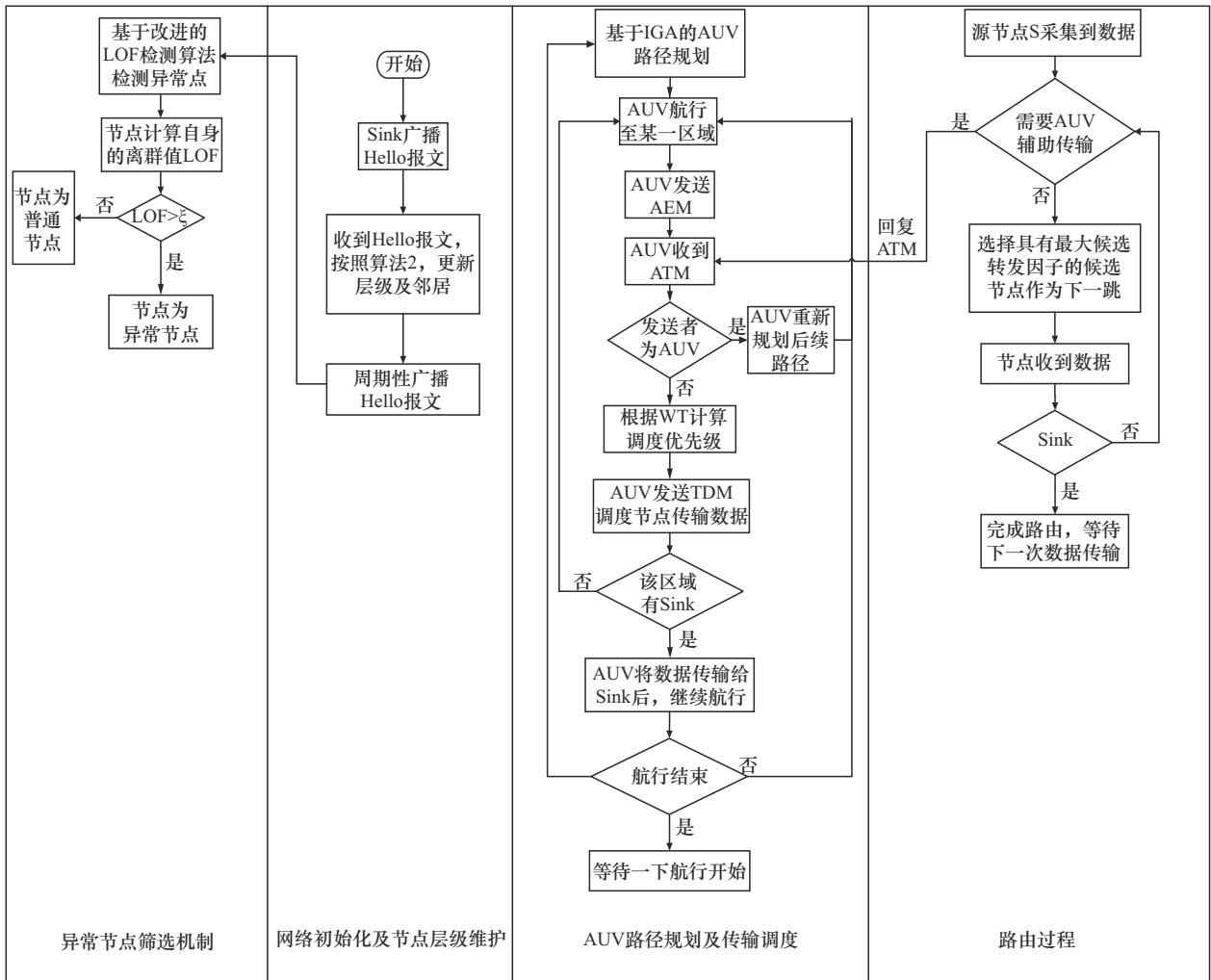


图11 RERA协议流程

该区域后，由 AUV 调度  $Node_s$  完成数据传输。AUV 调度规则见规则 2。

步骤 2 若  $Node_s$  不符合规则，则  $Node_s$  采用纯路由模式转发数据， $Node_s$  为其候选节点计算 CFF，选择具有最大候选转发因子  $\max\{CFF\}$  的  $Node_i$  作为下一跳节点，转发数据。

步骤 3 若  $Node_i$  为 Sink 节点， $Node_i$  接收数据，结束本次路由。否则，继续执行如下过程。

步骤 4  $Node_i$  参照步骤 1 和步骤 2 等待 AUV 辅助传输或选择具有最大候选转发因子的  $Node_j$  作为下一跳节点，转发数据。

步骤 5 循环执行步骤 3 和步骤 4，直至数据到达 Sink 节点完成路由过程。

### 4 仿真实验

本节首先测试了 IGA、蚁群算法 (ACO)、GA

和海洋捕食者算法 (MPA) 等在 AUV 路径规划中的性能。其次，对 RERA 协议中 AUV 节点覆盖率进行了测试，并将 RERA 协议的 AUV 航行时间与基于 AUV 辅助的能量有效的路由协议 (AEC) [26]、ALP 等协议进行了对比。随后，对 RERA 协议在不同移动速度和节点移动数量下的数据交付率和端到端时延进行了仿真实验。最后，围绕数据交付率、能耗和端到端时延等协议性能指标将 RERA 与 AEC、ALP、基于深度和距离的分层路由协议 (DDLRL) 及基于增强型割草机模式的 AUV 路径规划算法 (ELMPP) [27] 进行了仿真对比验证。

#### 4.1 仿真环境与性能参数

本节详细介绍仿真实验中所用的参数，并对 AUV 路径规划性能指标进行定义描述。

##### 4.1.1 仿真环境部署

本节给出了仿真实验中使用的主要参数。水下

传感器节点被随机部署在固定大小的三维水下仿真区域内。仿真区域内的传感器节点（不包含 Sink 节点）会随着水流按照 0~3 m/s 的移动速度在仿真区域内发生随机方向的位移。仿真区域内存在 2 个 AUV 以恒定移动速度沿着一定的轨迹自主航行，AUV 的通信范围与水下节点相同。此外，AUV 还具有水下节点的数据采集、收发功能。仿真环境的详细参数如表 4 所示。

表 4 仿真环境的详细参数

仿真参数	默认值
接收功率/W	0.75
发送功率/W	2
初始能量/J	5 000
MAC 协议	Aloha
仿真区域/km	1×1×1
通信半径/m	400
节点部署拓扑	完全随机部署
移动速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0~3
节点数量/个	20~100
AUV 数量/个	2
种群大小	100
交叉概率	0.9
变异概率	0.2

#### 4.1.2 性能指标

本节对 RERA 协议中 AUV 路径规划的性能指标（AUV 航行时间和节点覆盖率）进行了定义描述。指标定义如下。

##### 1) AUV 航行时间

AUV 航行时间指一次数据辅助传输过程中，AUV 从节点 Sink 所在区域的中心点出发途经所有区域中心点并回到起始点将采集的数据传输至节点 Sink 所用时间。

##### 2) 节点覆盖率

节点覆盖率是指在一次数据辅助传输过程中，AUV 通信范围覆盖的水下节点的数量与仿真区域中节点总数量的比值，如式(21)所示。

$$NCR = \frac{Node_{AUV}}{Node_{total}} \quad (21)$$

其中，Node<sub>AUV</sub> 为一次数据辅助传输过程中 AUV

通信范围覆盖的水下节点的数量，Node<sub>total</sub> 为仿真区域中节点的总数量。

#### 4.2 算法性能对比

本节通过 MATLAB 将 ACO、GA、MPA 和 IGA 在解决 AUV 路径规划问题时，在平均 AUV 轨迹距离、平均收敛迭代次数和平均运行时间等方面的性能进行了对比，如表 5 所示。

表 5 ACO、GA、MPA 和 IGA 求解 AUV 路径规划问题的性能对比

算法	平均 AUV 轨迹距离/km	平均收敛迭代次数/次	平均运行时间/s
ACO	5.11	110	6.72
GA	4.92	127	0.19
MPA	5.25	140	1.403
IGA	4.86	51	0.33

整体而言，IGA 表现最佳。IGA 在平均 AUV 轨迹距离和平均收敛迭代次数具有更显著的优势，MPA 具有最短运行时间。相比而言，IGA 生成的轨迹平均长度最短，且在迭代过程中能更快地找到全局最优解，这对于 UWSN 中的 AUV 轨迹规划而言是十分重要的。4 种算法的收敛曲线如图 12 所示，其中，纵轴的最小距离为 300 次实验的平均值。4 种算法规划的 AUV 轨迹如图 13 所示。

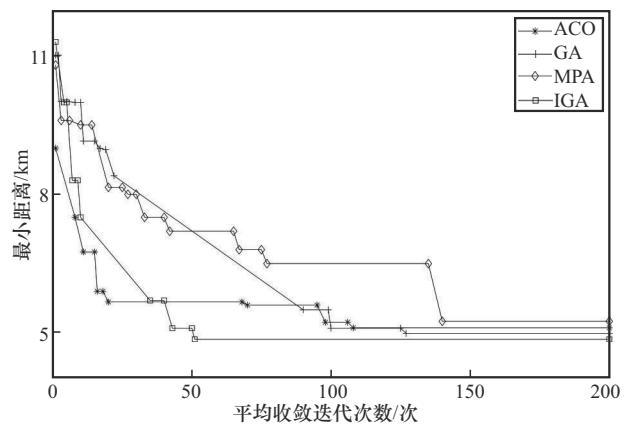


图 12 4 种算法的收敛曲线

在 RERA 协议中，AUV 航行路径建立的时间复杂度与路径规划算法相关，本文所对比的 IGA、GA、MPA 和 ACO 等启发式算法的时间复杂度为  $O(nt)$ ，其中， $n$  为种群大小， $t$  为算法迭代次数。在种群大小相同的情况下，根据表 5 所示测试结果，可以得到

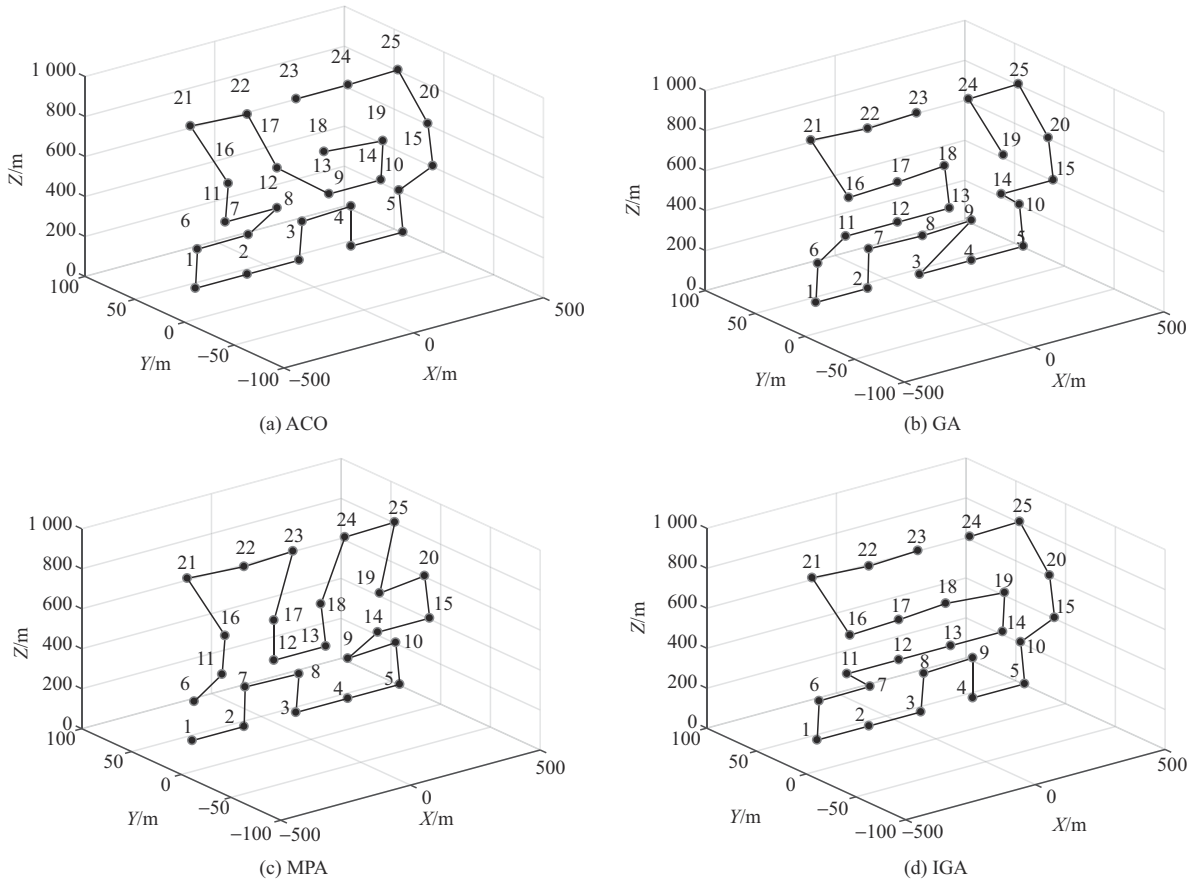


图 13 4种算法规划的AUV轨迹

$$O(nt_{IGA}) < O(nt_{ACO}) < O(nt_{GA}) < O(nt_{MPA}) \quad (22)$$

由式(22)可知, 本文所提出的IGA具有最小的时间复杂度。

综合图 12 和图 13 可知, 与 ACO、GA 及 MPA 相比, IGA 在求解 AUV 运行路径轨迹中具有更优异的性能。IGA 收敛速度及最小轨迹距离均为最优, 且规划所得的路径轨迹更接近最短路径轨迹。

### 4.3 AUV 路径规划性能

本节使用 NS3 仿真实验平台, 对 RERA 协议在不同节点移动数量和移动速度下, AUV 对网络中传感器节点的覆盖率进行了测试, 并将 RERA、AEC 和 ALP 等协议的 AUV 航行时间进行了对比验证。

图 14 给出了 AUV 节点覆盖率随节点移动速度和节点移动数量变化趋势。由图 14 可知, AUV 对网络中节点覆盖率随着移动速度的增加呈现小范围的降低趋势。这是由于随着节点移动速度增加, 节点在各区域之间的活动更频繁, 处于 AUV 通信范围的节点移出所在区域和 AUV 通信

范围的概率也随之增加。当节点为静止状态时, 覆盖率为 99.5%~100%; 当节点移动速度为 1 m/s 时, AUV 对节点的覆盖率为 99%~99.7%; 当节点移动速度为 2 m/s 时, AUV 对节点的覆盖率为 98.4%~99.2%; 当节点移动速度达到 3 m/s 时, AUV 对节点的覆盖率为 98%~99.1%。此外, 节点移动数量对节点覆盖率的影响并不显著, 随着节点移动数量的变化无明显的增长或降低趋势。

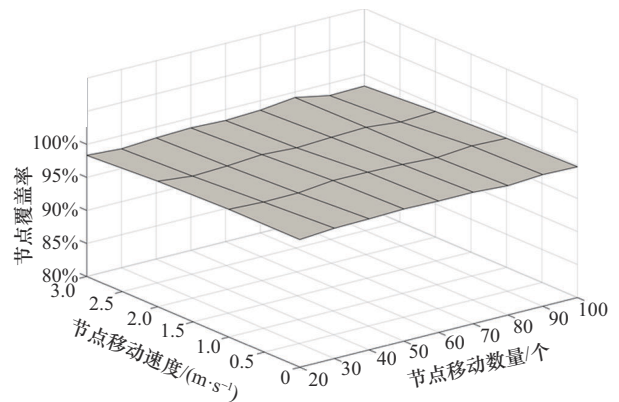


图 14 AUV 节点覆盖率随节点移动速度和节点移动数量变化趋势

图 15 给出了 300 次仿真实验中 RERA、AEC 和 ALP 协议的 AUV 航行时间对比。由图 15 可知, RERA 协议中, AUV 完成一次数据辅助传输的航行时间为 240~245 s; AEC 协议中, AUV 完成一次数据辅助传输的航行时间为 230~330 s; ALP 协议中, AUV 完成一次数据辅助传输的航行时间为 220~350 s。结合图 14 和图 15 可知, RERA 协议在保持较小且稳定的 AUV 航行时间的同时, 兼具了较高的节点覆盖率, 能够高效地完成数据辅助传输任务。综合而言, RERA 协议在 AUV 路径规划问题中展现出稳定性、高效性和良好的节点覆盖性能。

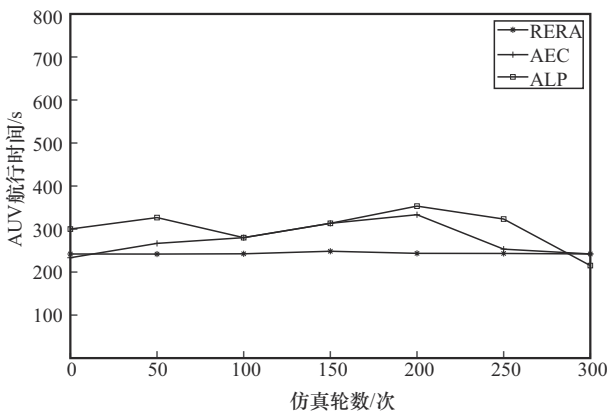


图 15 RERA、AEC 和 ALP 协议的 AUV 航行时间对比

#### 4.4 AUV 对协议的性能影响

本节对 RERA 协议在采用 AUV 辅助传输和纯路由模式时, 不同节点移动速度和节点移动数量下的数据交付率和端到端时延进行了对比实验和分析。

图 16 显示了 RERA 协议数据交付率性能对比。由图 16 可知, 使用 AUV 进行辅助传输的 RERA 协议与纯路由模式相比具有更高的数据交付性能。随着节点移动数量的增加, RERA 协议数据交付率呈现增长趋势, 并趋于平稳。在节点移动数量较低时, 基于 AUV 辅助的 RERA 协议表现出更好的交付性能, 这是由于在节点移动数量较低时, 网络中存在较多的游离节点和异常节点, 源节点在执行路由算法时可能无法找到下一跳节点, 因此, 使用纯路由的 RERA 协议数据交付率较低。但相对地, 纯路由模式的 RERA 协议端到端时延也较低。使用 AUV 辅助传输时, 游离节点和异常节点可以将数据传输至 AUV, 由 AUV 将数据中转至节点 Sink, 从而提升了 RERA 协议在低节点移动数量时的数据交付率, 但也带来了更高的端到端时延, 如图 17

所示。随着节点移动速度的增加, RERA 协议的交付性能整体呈现降低趋势。随着节点移动数量的增加, 当节点处于静止状态时, 数据交付率基本稳定在 95% 以上; 当节点移动速度为 1 m/s 时, 基本保持在 90% 以上; 当节点移动速度达到 3 m/s 时, 保持在 80% 以上。

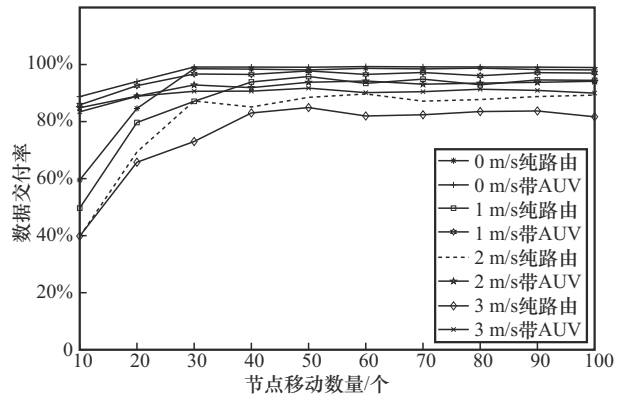


图 16 RERA 协议数据交付率性能对比

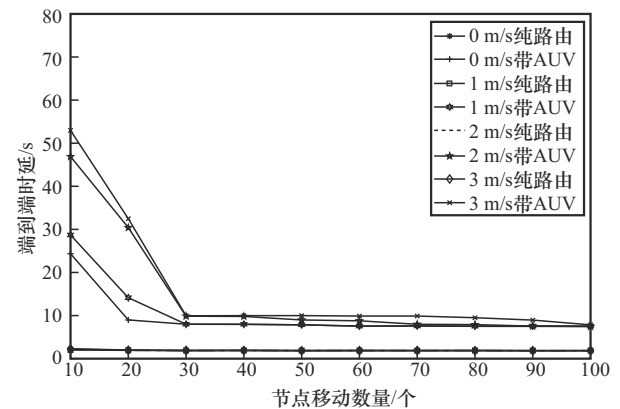


图 17 RERA 协议端到端时延对比

由图 17 可知, 随着节点移动数量的增加, RERA 协议的端到端时延呈现降低趋势。基于 AUV 辅助的端到端时延呈现降低趋势, 这是由于随着节点移动数量的增加, 游离节点和异常节点呈现减少趋势, RERA 协议更倾向于采用节点之间的数据转发(纯路由模式)完成路由过程, 而不是使用 AUV 进行辅助传输。纯路由模式下的 RERA 协议在节点移动数量较低时, 可能需要经过更长的路径转发数据, 因此, 端到端时延相对于节点移动数量高时较大。此外, 当网络中的节点数目增加到一定量时, 总体而言, 协议端到端时延呈现平稳趋势。

#### 4.5 其他协议性能对比

本节综合评估了 RERA 协议在不同节点移动数

量下的数据交付率、平均能耗和端到端时延等性能指标，并通过与 ALP、AEC、ELMPP 和 DDLR 等协议的对比，进一步分析了 RERA 协议的优势与不足。实验结果如图 18~图 20 所示。

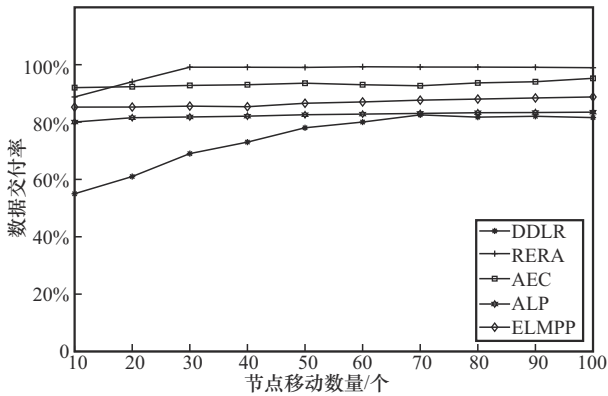


图 18 5 种协议的数据交付率随节点移动数量的变化趋势

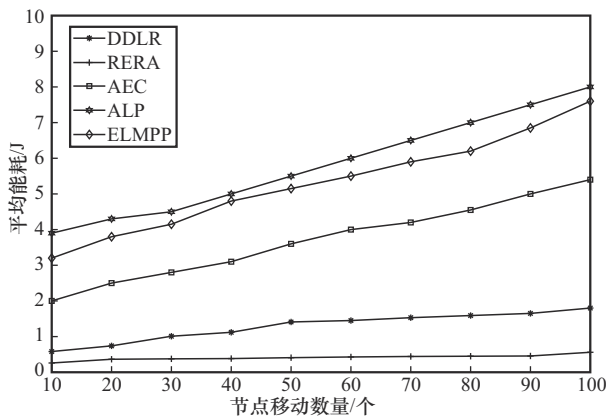


图 19 5 种协议节点的平均能耗

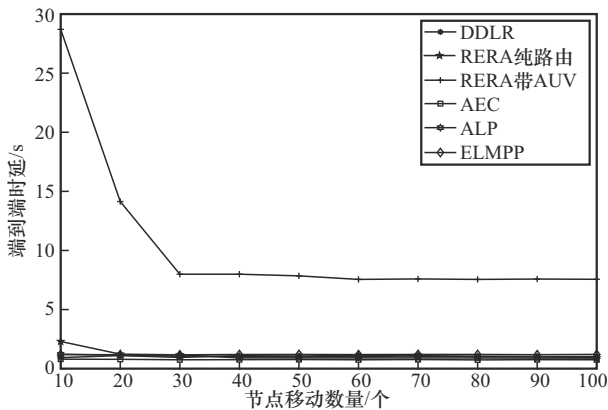


图 20 5 种协议的端到端时延随节点移动数量的变化趋势

数据交付率是评估路由协议性能的一个重要指标。数据交付率的高低直接影响所设计协议的优劣性。图 18 给出了 5 种协议的数据交付率随节点移动

数量的变化趋势。RERA 协议中既使用 AUV 进行辅助传输，也进行纯路由模式的数据传输，在节点移动数量较低时，纯路由模式可供选择的转发路径较少，过多的数据转发易使得网络中的部分节点的能耗过大而失效，因此，数据交付率也相对较低。AEC、ALP 等协议数据仅在簇内节点间转发，直至到达簇头节点后，使用 AUV 向簇头节点采集需要转发的数据，因此，相比而言其数据交付率更稳定。随着节点移动数量的增加，RERA 协议数据交付率基本保持在 96%~98%。AEC、ALP、ELMPP 和 DDLR 协议分别达到了 95%、83%、86% 和 80%。由此可以得出 RERA 协议在数据交付率上表现出较好的性能。

除数据交付率外，能耗也是衡量协议性能的一个重要指标。一般而言，能耗越低，则网络生存周期越长。图 19 对比了 5 种协议节点的平均能耗。由图 19 可知，随着节点移动数量的增加，节点的平均能耗呈现上升趋势。在上述协议中，ALP 和 AEC 协议为分簇路由，需要频繁地使用消息报文来同步节点间的信息以选择或维护簇头节点，这在造成更多冲突的同时也带来了更多的能耗。ELMPP、DDLRL 和 RERA 协议均需要使用 Hello 报文来建立通信链路。不同的是，DDLRL 协议需要使用更多的控制报文以同步节点位置信息，这增加了节点的能耗。ELMPP 协议采用源节点-中继节点-AUV 的两跳传输模式，然而频繁的中继节点选择也为协议带来了较多的能耗。RERA 协议综合考虑剩余能量、跳距及节点移动数量等因素为候选节点计算转发因子，这使得协议在能量均衡的同时更倾向于选择跳距较短的节点进行数据转发。与 DDLRL 和 ELMPP 不同，RERA 协议在转发数据时，不需要使用额外的控制报文，这进一步降低了协议的能耗。因此，从能耗的角度来看，RERA 协议表现出较优越的性能。

端到端时延对于时延敏感型网络或数据而言也是一个重要指标。图 20 给出了 5 种协议的端到端时延随节点移动数量的变化趋势。由图 20 可知，AEC、ALP、DDLRL、ELMPP 等协议的端到端时延基本等于传播时延。对于 RERA 协议而言，时延敏感型数据基本采用纯路由模式，即通过传感器节点之间的转发最终到达 Sink 节点，此模式下端到端时延基本等于传播时延。对于网络中的游离节点和

异常节点而言, RERA 协议使用 AUV 辅助传输的方案, 基于 AUV 辅助传输的方案端到端时延则显著高于纯路由模式, 这主要是由 AUV 移动速度远小于声波传播速度造成的。

## 5 结束语

本文针对 UWSN 面临的拓扑动态性高、能量受限等挑战, 提出了一种 AUV 辅助的水下传感器网络可靠节能路由。RERA 协议中, 在改进 LOF 检测算法基础上设计了一种异常节点筛选机制。此外, RERA 协议将 UWSN 的网络区域均匀地划分为若干子区域, 使得 AUV 路径规划问题转换为 TSP, 并基于优化遗传算法设计了 AUV 路径规划算法。同时, 为了避免无序的数据传输导致的冲突, 建立了 AUV 辅助传输调度规则。RERA 协议中, AUV 只负责游离节点、异常节点的非时延敏感数据和少量普通节点的数据辅助传输, 多数普通节点和时延敏感的数据传输, 则遵循路由算法进行转发。仿真结果表明, RERA 协议在 AUV 覆盖率、AUV 航行时间、数据交付率、能耗等方面均表现出较好的性能。

## 参考文献:

- [1] ZHAO Z, LIU C F, GUANG X Y, et al. MLRS-RL: an energy-efficient multilevel routing strategy based on reinforcement learning in multimodal UWSN[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(13): 11708-11723
- [2] ZHENG L Y, LIU M Q, ZHANG S L, et al. A novel sensor scheduling algorithm based on deep reinforcement learning for bearing-only target tracking in UWSN[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(4): 1077-1079.
- [3] GOU Y, ZHANG T, YANG T T, et al. A deep MARL-based power-management strategy for improving the fair reuse of UWSN[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(7): 6507-6522.
- [4] VAHABI S, DANESHVAR A, ESLAMINEJAD M, et al. CBDS2R: a cluster-based depth source selection routing for underwater wireless sensor Network[J]. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 2023, 9: 468-476.
- [5] SHOYON I I, SHIN S. Survey on multi-path routing protocols of underwater wireless sensor networks: advancement and applications[J]. *Electronics*, 2022, 11(21): 3467-3506.
- [6] DEMIM F, BOUGUESSA R, ROUIGUEB A, et al. A systematic overview of underwater wireless sensor networks: applications, challenge and research perspectives[J]. *Journal of Computer Science Research*, 2023, 5(2): 52-77.
- [7] LI C, DU X J, WANG L J. IATLR: improved ACO and TOPSIS-based layering routing protocol for underwater acoustic networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(3): 3262-3269.
- [8] TIAN X J, DU X J, WANG L J, et al. LSLPR: a layering and source-location-privacy-based routing protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(19): 23676-23691.
- [9] FANG Z R, WANG J J, JIANG C X, et al. Average peak age of information in underwater information collection with sleep-scheduling[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(9): 10132-10136.
- [10] SHI Z G, PENG T, ZHANG L H, et al. An efficient cooperative routing with ML based energy efficiency model for distributed underwater WSN electricity meter warning system[J]. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 2023, 24(4): 1031-1040.
- [11] HAQUE K F, KABIR K H, ABDELGAWAD A. Advancement of routing protocols and applications of underwater wireless sensor network (UWSN): a survey[J]. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2020, 9(2): 19-49.
- [12] 杜秀娟, 苏毅珊. 水下传感器网络研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016. DU X J, SU Y S. *Research on underwater sensor networks*[M]. Beijing: Science Publishing House, 2016.
- [13] COUTINHO R W L, BOUKERCHE A, LOUREIRO A A F. Underwater networks for ocean monitoring: a new challenge for topology control and opportunistic routing[C]//*Mission-Oriented Sensor Networks and Systems: Art and Science*. Berlin: Springer, 2019: 571-601.
- [14] 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. Rule and perception based MAC protocol for UAN[J]. *Journal of Communications*, 2022, 43(2): 65-75.
- [15] COUTINHO R W L, BOUKERCHE A, VIEIRA L F M, et al. Underwater wireless sensor networks: a new challenge for topology control-based systems[J]. *ACM Computing Surveys*, 2018, 51(1): 1-36.
- [16] KUMARI S, MISHRA P K, ANAND V. Coverage and connectivity aware deployment scheme for autonomous underwater vehicles in underwater wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2023, 132(2): 909-931.
- [17] SALAMI A F, ADEDOKUN E A, AL-TURJMAN F, et al. Explorative analysis of AUV-aided cluster-based routing protocols for Internet of intelligent underwater sensors[C]//*Drones in Smart-Cities*. Amsterdam: Elsevier, 2020: 143-187.
- [18] ZHUO X X, LIU M Y, WEI Y, et al. AUV-aided energy-efficient data collection in underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 10010-10022.
- [19] AGHELI P, BEYRANVAND H, EMADI M J. UAV-assisted underwater sensor networks using RF and optical wireless links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(22): 7070-7082.
- [20] HAO K, DING Y Y, LI C, et al. An energy-efficient routing void repair method based on an autonomous underwater vehicle for UWSN[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 5502-5511.
- [21] ILYAS N, ALGHAMDI T A, FAROOQ M N, et al. AEDG: AUV-aided efficient data gathering routing protocol for underwater wireless sensor networks[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 52: 568-575.
- [22] HAN G J, LONG X H, ZHU C, et al. An AUV location prediction-based data collection scheme for underwater wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 6037-6049.
- [23] CHAAF A, MUTHANNA M S A, MUTHANNA A, et al. Energy-efficient relay-based void hole prevention and repair in clustered multi-AUV underwater wireless sensor network[J]. *Security and Communication Networks*, 2021, 2021: 1-20.
- [24] BREUNIG M M, KRIEGEL H P, NG R T, et al. LOF: identifying density-based local outliers[C]//*Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. New York: ACM Press, 2000: 93-104.
- [25] MIRJALILI S M. Evolutionary algorithms and neural networks -

theory and applications[M]. Berlin: Springer, 2018 .

- [26] KHAN M T R, AHMED S H, KIM D. AUV-aided energy-efficient clustering in the Internet of underwater things[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2019, 3(4): 1132-1141.
- [27] NAM H. Data-gathering protocol-based AUV path-planning for long-duration cooperation in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(21): 8902-8912.

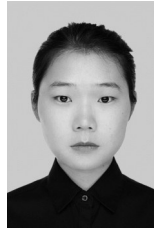
[作者简介]



李冲 (1990-), 男, 河北邯郸人, 青海师范大学博士生, 主要研究方向为无线网络与安全等。



杜秀娟 (1970-), 女, 河北石家庄人, 博士, 青海师范大学教授, 主要研究方向为无线网络与安全、物联网技术等。



王丽娟 (1992-), 女, 河北石家庄人, 博士, 青海师范大学讲师, 主要研究方向为无线网络与安全等。



田晓静 (1994-), 女, 山西晋中人, 青海师范大学博士生, 主要研究方向为无线网络。



王志刚 (1993-), 男, 河北张家口人, 博士, 华北科技学院讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、智能优化算法等。