

基于改进鲸鱼优化算法的水声传感器 网络分簇路由方法

邢光林, 胡露蓉*

(中南民族大学 计算机科学学院, 武汉 430074)

摘要 针对水声传感器网络(UASN)能耗效率问题,提出了一种基于改进鲸鱼优化算法的水声传感器网络分簇路由方法.该方法能够有效平衡UASN中传感器节点的能量消耗,从而延长网络生命周期.同时能够根据簇头剩余能量等因素动态调整簇大小,平衡簇头负载.仿真结果表明:该方法相对其他典型能耗优化方法,能够有效降低整体网络能耗,延长网络生存时间.

关键词 水声传感器网络;鲸鱼优化算法;分簇路由

中图分类号 TP393 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2025)02-0213-07

doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20250210

An improved whale optimization algorithm-based method for clustering and routing in underwater acoustic sensor network

XING Guanglin, HU Lurong*

(College of Computer Science, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

Abstract A clustered routing method for underwater acoustic sensor networks (UASNs) based on an improved whale optimization method (UCWOM) is proposed to address the problem of energy efficiency in UASNs. The method can effectively balance the energy consumption of sensor nodes in a UASN, thus extending the network lifecycle. It is also able to dynamically adjust the cluster size and balance the cluster head load according to the remaining energy of the cluster head and other factors. Simulation results show that the method can effectively reduce the overall network energy consumption and extend the network survival time compared to other typical energy consumption optimization methods.

Keywords underwater acoustic sensor network; whale optimistic algorithm; clustering

水声传感器网络被广泛用于水下环境中信息的感知和获取.UASN一般由水声传感器节点组成,按照一定规则或随机形式部署在水下特定区域,传感器节点将收集到的信息以特定路由方式,传输到水面汇聚节点(Sink节点),再由Sink节点将数据信息传输至水面舰船、飞行器为目的,完成水下信息的获取和传输工作.鉴于UASN中的水声传感器基本借助于自身所带的电池等能源实施作业,而能源的补充和更换具有较大难度,因此,如何提升UASN的能耗效率,延长网络生命周期,成为绿色UASN研

究领域的一项重要课题.

1 国内外研究现状

研究表明,采用分簇方式能够有效降低UASN能耗,因此分簇路由方法近年来被国内外学者广泛关注.HEINZELMAN等^[1]提出一种自适应分层的分簇方法(LEACH),通过节点轮流担任簇头来降低能耗.YOUNIS等^[2]对LEACH进行了改进,提出一种混合节能分布分簇方法(HEED),考虑了簇头密度和剩余能

收稿日期 2023-01-02 *通信作者 胡露蓉,研究方向:水声传感器网络,E-mail:hulurongmail@163.com

作者简介 邢光林(1972-),男,副教授,博士,研究方向:移动计算与分布式系统、信息安全,E-mail:glxing@scuec.edu.cn

基金项目 中南民族大学研究生创新基金资助项目(3212021syxjj153)

量.LI等^[3]提出一种节能的非均匀分簇方法(EEUC),该方法通过缩小靠近Sink节点的簇大小来解决簇头能量消耗不平衡的问题.SELVI等^[4]提出一种不均等分簇方法(UCAPN)用于无线传感器WSNs(Wireless Sensor Networks)中,通过将传感器节点划分为不同大小的簇,来平衡节点能耗.KHAN等^[5]提出了多层聚类节能方案,该方案首先对整个网络进行分层,根据贝叶斯概率和剩余能量选择合适的CHs,每个CH根据适应度值选择合适的下一跳.HOU等^[6]提出一种不均等分层分簇方法(EULC).该方法根据深度将网络划分为不均匀层次,有效缓解了“热点”问题,提升了网络能耗效能.LIN等^[7]提出了一种基于博弈论的节能聚类算法,该算法采用双簇头策略,降低了簇头的能量开销并提出了一种簇头能量平衡的非合作博弈模型.ZHANG等^[8]提出一种基于高效的聚类算法和环域通信路由的有效拓扑控制模型路由优化方法,找出最佳簇数以及簇数的拓扑聚类策略.HUANG等^[9]提出了一种改进的K-means聚类算法,采用肘关节法,在分簇阶段设置距离阈值.XING等^[10]提出一种基于博弈论的UASN聚类方案(GTC).在CH选举阶段,每个节点根据纳什均衡做出利益最大化决策,同时将网络区域划分非均匀扇区,使得CH能耗分布更加均匀.AHMED等^[11]提出一种基于冗余控制的分簇方法(cDDBR),在簇头将数据转发到下一层之前,通过删除冗余数据来降低能耗.WANG等^[12]提出一种基于蜂群算法的分簇方法,利用K-means算法建立初始分簇,并利用蜂群算法来选择簇头.BASKARAN等^[13]提出一种基于萤火虫算法的能耗优化方法用于解决WSNs的分簇问题.DANESHVAR等^[14]提出了一种基于灰狼优化算法的WSN路由方法,该方法预测实际网络中节点可能的能量消耗,结合节点剩余能量构造自适应值函数,然后根据基于灰狼优化算法的多次迭代选择簇头.SAHOO等^[15]提出了一种基于PSO的簇头选择优化方法,综合考虑节点剩余能量、距离、节点度、能耗率、平均能量5个影响因素,得到最佳簇头选择结果.

在UASN中,靠近Sink的节点会更频繁地充当数据传输中继,因而会由于传输信息量过多而造成能耗过多,速度过快,能耗不平衡会影响整个网络的生命周期.鉴于此,本文借鉴传统鲸鱼优化算法(WOA)^[16-17]思想并对其进行改进,提出一种基于改进的鲸鱼优化算法的UASN非均匀分簇路由方法UCWOM(Unequal Clustering Whale Optimization Method).该方法首先将簇头的选取建模为一个NP难问题,

使用收敛因子非线性变化的原理构建适应值函数以选取最佳簇头集合,分簇时充分考虑非簇头节点与簇头节点距离、节点剩余能量及簇头与基站距离等因素,从而达到均衡能耗、延长网络生命周期的目的.

2 系统模型

2.1 网络模型

本文所研究的UASN网络结构如图1所示.水声传感器节点随机部署在三维立方体中,汇聚节点(Sink)部署在立方体网络区域上表面中间位置.假设UASN具有以下特征:

- (1)传感器节点均为静态状态且位置信息可知,且所有节点被赋予唯一ID,初始能量相同;
- (2)所有传感器节点可根据通信距离调整传输功率;
- (3)Sink节点能量不受限制;
- (4)节点间通信链路可靠,节点可根据接收信号强度计算与发射节点的距离.

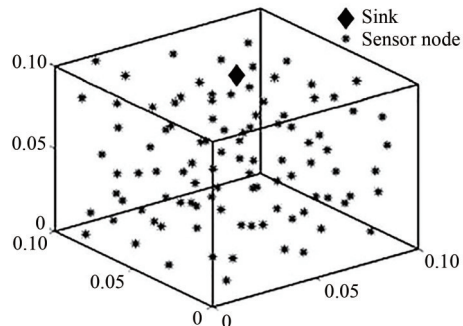


图1 三维水声传感器网络模型图

Fig. 1 Three-dimensional hydroacoustic sensor network model diagram

2.2 能耗模型

水声传感器节点发送数据包的能量消耗可表示为^[18]:

$$E_{\text{sent}}(l, d) = P_0 \cdot A(d) \cdot T, \quad (1)$$

式中, P_0 为节点接收功率, T 为发送 l 比特数据所需时间, $A(d)$ 为与距离有关的功率衰减系数,可表示为:

$$A(d) = d^k c^d, \quad (2)$$

k 为能量扩散因子, c 为功率衰减系数,可表示为:

$$c = 10^{\partial(F)/10}, \quad (3)$$

其中 F 是声信号频率, $\partial(F)$ 是声信号吸收系数,可表示为:

$$\partial(F) = \frac{0.11F^2}{1 + F^2} + \frac{44F^2}{4100 + F^2} + \frac{2.75F^2}{10000} + 0.003, \quad (4)$$

水声传感器节点接收和融合 l bit数据的能耗可分别表示为:

$$E_{\text{received}}(l) = l \cdot E_1, \quad (5)$$

$$E_{\text{integrated}}(l) = l \cdot E_2, \quad (6)$$

其中 E_1 和 E_2 分别为接收和融合 1 bit 数据所消耗的能量.

3 UCWOM

3.1 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法 (Whale Optimization Algorithm, WOA) 是模仿座头鲸的捕食行为而提出的一种启发式优化算法. 在 WOA 中, 每只座头鲸的位置代表一个可行解, 全局的最优解即为猎物的位置, 通过逐步迭代的方式得到算法的最优解. 具体来说, 包括包围猎物、螺旋狩猎和随机搜索三个部分.

- (1) 包围猎物: 设猎物所处的位置为 $X_{(t)}^*$, 则包围猎物的模型可表示如下

$$X_{(t+1)}^* = X_{(t)}^* - A \cdot |C \cdot X_{(t)}^* - X_{(t)}|, \quad (7)$$

$$A = a(2 \cdot \text{rand} - 1), \quad (8)$$

$$C = 2 \cdot \text{rand}, \quad (9)$$

其中, $X_{(t)}$ 为当前鲸鱼位置, t 为迭代次数, rand 为 0 到 1 的随机数, a 是随着迭代次数逐渐减小的值, 且满足 $a = 2 - 2t/t_{\max}$. A 为 $[-2, 2]$ 内的随机数, C 是 $[0, 2]$ 内的随机数.

- (2) 螺旋狩猎: 该过程模型如下

$$X_{(t+1)} = D_p \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_{(t)}^*, \quad (10)$$

$$D_p = |X_{(t)} - X_{(t)}^*|, \quad (11)$$

其中, b 是螺旋常数, l 为 $[0, 1]$ 内随机数.

在实际过程中以上两步往往同时进行, 引入概率 p_i 来更新鲸鱼位置:

$$X_{(t+1)} = \begin{cases} X_{(t)}^* - A \cdot |C \cdot X_{(t)}^* - X_{(t)}| & p < p_i \\ D_p \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_{(t)}^* & p \geq p_i \end{cases}. \quad (12)$$

(3) 随机搜索: 在 WOA 中, 随着迭代次数的增加, 鲸鱼个体的搜索范围将会逐步变小, 容易陷入局部寻优的困境. 因此需要一种机制能使其跳出局部最优并加强全局搜索能力. 为此可根据鲸鱼随机游走的行为特点, 采用随机更新猎物位置的方式进行全局随机搜索. 其模型如下

$$X_{(t+1)} = X_{\text{rand}(t)} - A \cdot |C \cdot X_{\text{rand}(t)} - X_{(t)}|, \quad (13)$$

式中: $X_{\text{rand}(t)}$ 为种群中随机选择的鲸鱼个体位置, 当 $|A| > 1$ 时, 鲸鱼个体执行随机搜索猎物行为; 当 $|A| \leq 1$ 时, 执行收缩包围猎物行为.

3.2 基于 UCWOM 的网络分簇

3.2.1 初始化候选簇头

根据 WOA 理论, 设 UASN 中有 m 个簇头 (也称为 1 个代理), 并在所设置的范围内选取 m 个水声传感器节点, 同时实行 N 次选拔, 选出 N 个代理, 每个代理对应一种初始分簇方法, 即 N 种初始分簇方法.

3.2.2 构建适应度函数

在 UASN 中, 簇头节点除完成与非簇头节点相同的作用外, 还需对本簇中所有非簇头节点的数据进行接收、融合及转发, 所以簇头节点的能量消耗要大于非簇头节点. 为使得整个网络中节点能量消耗更均匀, 避免局部网络瘫痪, 需要在每一轮中合理选择簇头集合, 因此本文引入四个适应度函数计算指标 $f_{1,2,3,4}$, 将簇头选择描述为以下四个目标的优化问题:

- (1) 目标函数 f_1 表示节点之间的密集程度.

$$f_1 = \frac{\hat{f}_1}{\sum_{j=1}^m \text{Neighbour}(\text{CH}_j)}, \quad (14)$$

式中, 分母表示本代理的各个簇头在给定阈值半径 R_0 内的非簇头邻居节点的总个数. 分子 \hat{f}_1 为历史最优代理的各个簇头在给定阈值半径范围 R_0 内的非簇头邻居节点总个数.

- (2) 目标函数 f_2 表示本代理中的各簇头节点到 Sink 节点的距离之和与历史最优代理中的簇头节点到 Sink 节点之间的距离之和的比值, 可表示为

$$f_2 = \frac{\sum_{j=1}^m d(\text{CH}_j, \text{sink})}{\hat{f}_2}, \quad (15)$$

式中, $d(\text{CH}_j, \text{sink})$ 表示簇头节点 j 到 Sink 节点之间的距离, \hat{f}_2 表示历史最优代理中的所有簇头节点到 Sink 节点之间的距离之和.

- (3) 目标函数 f_3 表示簇头的剩余能量函数.

$$f_3 = \frac{\hat{f}_3}{\sum_{j=1}^m E_{\text{cur}}(\text{CH}_j)}, \quad (16)$$

式中, $E_{\text{cur}}(\text{CH}_j)$ 表示本代理中簇头 j 的当前剩余能量, \hat{f}_3 表示历史最优代理中所有簇头节点剩余能量之和.

- (4) 目标函数 f_4 表示本代理中簇头节点之间分布的密集程度.

$$f_4 = \frac{\hat{f}_4}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m d(\text{CH}_i, \text{CH}_j)}, \quad (17)$$

式中, $d(\text{CH}_i, \text{CH}_j)$ 表示簇头节点 i 与簇头节点 j 之间的距离. \hat{f}_4 表示历史最优代理中各簇头节点之间的距离之和.

综上, 可以得到适应度函数 Fitness 如下式所示:

$$\text{Fitness} = \alpha f_1 + \beta f_2 + \delta f_3 + \varepsilon f_4, \quad (18)$$

其中 $\alpha, \beta, \delta, \varepsilon$ 为分别是 f_1, f_2, f_3, f_4 的权重系数,其和为1,因而可将选取簇头的问题转化为NP难问题,当适应度函数Fitness取最小值时,为该问题的最优值.

3.2.3 位置映射

UASN中,节点随机分布于网络各区域.在鲸鱼算法运行的过程中,会存在计算出的目标位置并无实际的传感器节点位置与其对应的情况,因此需要将更新的节点位置和实际节点位置做位置映射.本方法通过对节点计算其欧式距离,选择欧式距离最近点做其位置映射下位置,公式如下:

$$P(X_p) = \{X_n | \min [d(X_p, X_n)], 1 \leq n \leq N\}, \quad (19)$$

其中 X_p 为迭代后候选簇头位置; X_n 为实际监测区域内节点位置; $d(X_p, X_n)$ 为实际节点与候选节点的距离.

3.2.4 入簇方式

簇头节点在给定半径内广播消息宣布自己当选,在接收到簇头选举成功的消息后,每个非簇头节点选择较近的簇头入簇.由于适应度函数的针对性设计,使得鲸鱼优化算法得到的最优解中的各个簇头在实际空间中是分布较为均匀的,因此在实验结果中并不会出现部分簇内节点过多,部分簇内节点过少的情况.分簇完成后,簇内节点将数据传输给簇头节点,簇内节点数据信息经簇头路由至Sink节点,各簇头数据信息直接传输给Sink节点.

4 仿真结果及分析

4.1 鲸鱼优化算法模型

为了验证及评估基于鲸鱼优化算法的水声传感器网络分簇路由算法(UCWOM)的方案性能,使用MATLAB 2017 b将UCWOM方法与LEACH、cDBR、EULC和GTC方法进行比较.

选用100个模拟节点,随机分布在网络区域大小为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 立方体区域,仿真参数如表1所示:

4.2 比选指标与评价结果

4.2.1 网络节点生存周期

网络节点生存期是分簇路由性能的一个重要指标,网络生存周期定义为网络开始工作时间到所有传感器节点死亡时间.

本次仿真实验,节点初始能量 E_0 控制在0.5 J,观察并记录4种不同方法可以运行的最大仿真轮数,结果如表2所示.表2中列出了5种方法在不同比例

表1 仿真实验参数

Tab. 1 Simulation parameters

实验参数	数值
网络区域大小	100 m × 100 m × 100 m
节点数量	100
Sink节点位置	(50, 50, 100)
数据包长度	2000 bits
广播包长度	200 bits
节点初始能量 E_0	0.5 J
P_0	3 mW
f	10 kHz
E_1	50 nJ/bit
E_2	5 nJ/bit
η	0.5

表2 不同比例节点死亡时的仿真轮数

Tab. 2 Simulation round numbers when nodes die at different scales

	First	30%	50%	90%(LT)
LEACH	484	592	660	952
cDBR	616	863	945	1298
EULC	690	863	1050	1412
GTC	812	965	1125	1864
UCWOM	500	1180	1365	2894

节点死亡时的仿真轮数,结果显示UCWOM方法首个死亡节点出现的仿真轮数比其他方法早,在其余阶段:30%比例节点死亡时的仿真轮数分别比GTC、EULC、cDBR、LEACH方法晚122%、137%、137%、199%;50%比例节点死亡时的仿真轮数分别比GTC、EULC、cDBR、LEACH方法晚121%、130%、144%、207%;90%比例节点死亡时的仿真轮数分别比GTC、EULC、cDBR、LEACH方法晚155%、205%、223%、304%;但由于鲸鱼优化算法收敛性强,随仿真轮数的增加,不同比例死亡节点出现的轮数大于其他4种方法,表明UCWOM方法随仿真轮数增长优势越强.

图2显示了5种不同分簇方法存活节点数随仿真时间的变化曲线,结果表明:在第600轮前,5种方法存活节点数均为100;在第600-1000轮,LEACH方法存活节点数快速下降且在1000轮时存活节点数下降为0,cDBR和EULC方法存活节点数下降速率快,而GTC和UCWOM方法存活节点数下降速率缓慢;在第1000-1600轮,cDBR、EULC、GTC方法存活节点数快速减少,且分别在1300、1400、1600轮时存活节点数减少为0;在第1600轮后,只有UCWOM方法存活节点数不为0;在1200轮后进行相同仿真时间的存活节点数纵向对比,UCWOM方法存活节点数高于其他4种方法.由于UCWOM方法引入了改进的WOA方法,优化了簇头选举方案,并且引入了4个适应值函

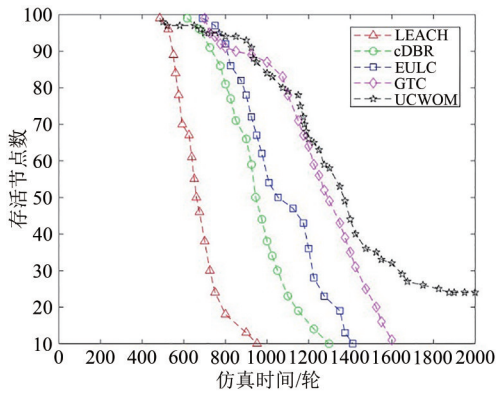


图2 网络中存活节点数量随仿真时间的变化图

Fig. 2 Plot of the number of surviving nodes in the network with simulation time

数,减少了重选簇头带来的通信能耗,同时考虑了节点之间的密集程度、簇头节点到Sink节点之间的距离、簇头的剩余能量及簇头节点之间分布的密集程度,因此UCWOM方法相较于其他4种方法,具有更长的网络生存周期。

4.2.2 网络能量利用效率

网络能量利用效率体现在系统消耗单位能量时可传输数据包大小,代表了系统对能量资源利用效率,网络能量利用总效率与采用方法节能效率有关,方法节能效率越高,系统网络能量利用总效率越大。

实验分2种不同思路,来对比各方法网络能量利用效率:

(1)实验开始前,对不同方法给定相同节点初始平均能量,实验进行中,在相同轮数时分别记录各方法节点剩余能量平均值,节点剩余能量平均值越高,节能效率越高,表明在相同初始能量下,网络运行时间越长,方法越优;

(2)在仿真实验仿真轮数相同时,对比不同方法单轮网络所消耗能量,平均消耗能量越小,节能效率越高,表明在相同初始能量下,网络运行时间越长,该分簇方法越优。

图3显示了5种分簇方法对应节点剩余能量平均值随仿真时间变化情况,曲线斜率反应平均剩余能量下降速率,曲线斜率越大则下降速率越大,节点剩余能量平均值下降越快;由图可看出,LEACH方法曲线斜率最大,即节点剩余能量平均值以最高速率下降,且在仿真到第1000轮时节点能量耗尽;cDBR、EULC和GTC方法情况与其类似,消耗完所有能量仿真时间较晚,分别为1300轮、1400轮和1600轮,但在相同轮数时3种方法的节点剩余平均能量均大于LEACH方法;而UCWOM方法曲线斜率最小,节

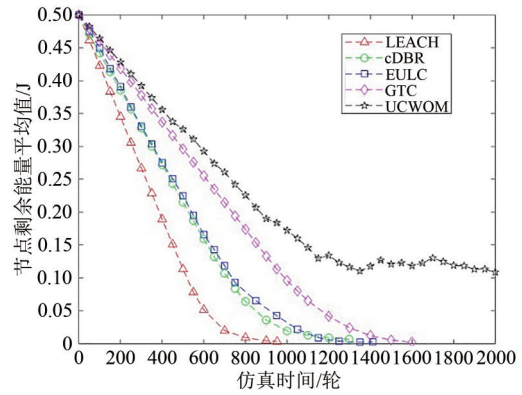


图3 节点剩余能量平均值随仿真时间的变化图

Fig. 3 Plot of average residual energy of nodes with simulation time

点平均剩余能量下降速率最小,当仿真时间到1400轮时,节点剩余能量平均值更稳定且下降缓慢,能量利用率达到峰值;在仿真轮数相同时,UCWOM方法节点平均剩余能量值均高于其他4种方法。

图4显示了5种方法单轮能量消耗随仿真时间变化情况,其中LEACH方法在仿真时间25轮时,达到本次仿真实验单轮能量消耗最高值,且该方法能量消耗曲线波动最大,单轮能量消耗十分不稳定;cDBR和EULC方法与LEACH方法相比,单轮能量消耗下降,能量消耗曲线波动幅度缩小,单轮能量消耗稳定性增强;GTC方法采用博弈论设计激励机制选取簇头,同时将网络区域划分非均匀扇区,使得CH能耗分布更加均匀,降低了每轮能耗.而UCWOM方法单轮能量消耗值最低,能量消耗曲线上波动幅度小,单轮能量消耗更加稳定而均衡。

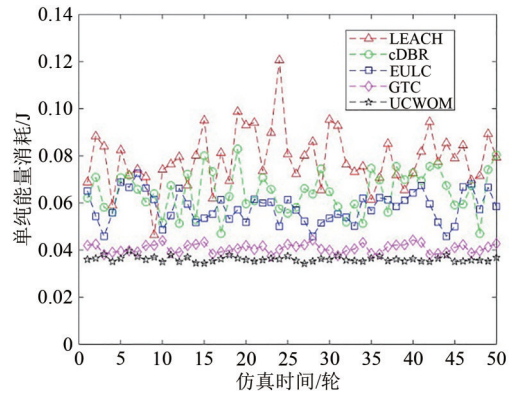


图4 能量消耗随仿真轮数的变化图

Fig. 4 Plot of energy consumption of a single wheel with simulation time

这是由于UCWOM方法考虑了节点能量、节点间距离与通信代价,选择合理簇头组合并通过候选簇头集合来提高簇头利用率,故而增加了网络能量利用效率.仿真实验结果显示,UCWOM分簇方法对比其余三种方法网络能量利用率最高,在相同初始能量下,该方法网络运行时间最长。

4.2.3 网络吞吐量

网络吞吐量指在一定时间内接收数据包总数,代表着网络采集数据能力,是衡量不同方法传输数据能力重要评判标准.在本次实验中采用 LEACH、cDBR、EULC、GTC、UCWOM 五种方法,在不丢帧情况下,测试能够接收数据包最大总数量,并对比相同仿真时间时,不同方法数据接收包大小,具体仿真实验结果如图 5 所示.

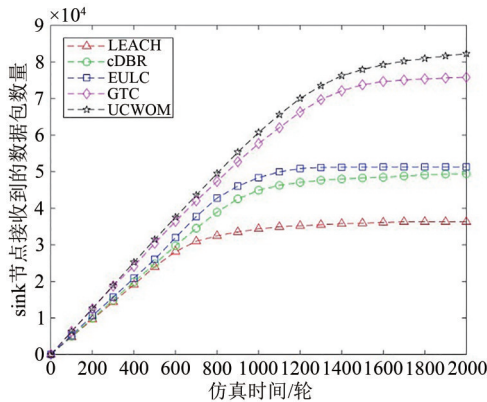


图 5 sink 节点接收到的数据包数量随仿真时间的变化图

Fig. 5 Graph of the number of packets received by sink node with simulation time

图 5 显示了 Sink 节点接收到的数据包数量随仿真时间的变化情况,从图中可以看出,UCWOM 方法在相同仿真时间内 Sink 节点接收数据包数量最多,且仿真时间在 900 轮后,GTC 和 UCWOM 方法接收数据包数量增长速率加快,但 UCWOM 比 GTC 方法接收到的数据包数量更多,这是由于 UCWOM 方法能量利用率更高,网络具有更长的寿命,因此与其他方法相比,UCWOM 方法在网络协议中具有更多数量的活动节点,基站接收到的数据也更多,吞吐量也更高,在任意时间内都保持着较高网络吞吐量.

5 结语

针对水声传感器网络生命周期短的问题,本文提出一种基于鲸鱼优化算法的水声传感器网络分簇路由方法.在簇头选择时考虑节点的剩余能量和距离约束,构建适应值函数,并考虑了簇头对簇间传输的影响,对节点进行分簇,这使得簇头选择结果更加合理;将 UCWOM 方法与 LEACH、cDBR、EULC 和 GTC 分簇方法进行比较,仿真结果表明,UCWOM 方法随着仿真轮数增长,在网络节点的生存周期、网络能量的利用效率、网络吞吐量和周期稳定性方面均优于其他方法.由于本文中的分簇算法为集中式算

法,簇头节点直接与 Sink 节点通信,对于较大规模的网络通信,能耗将会大量增加,因此在接下来的工作中,将进行簇间多跳通信方式协议的研究,同时因传感器节点部署在水下,易受环境影响,导致网络拓扑发生变化,而本文只考虑了能量消耗对网络的影响,没有考虑节点位置实时变化的情况.因此将 UCWOM 应用到节点实时移动的水声传感器网络能耗优化领域也将是下一步研究方向.

参考文献

- [1] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [2] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.
- [3] LI C, YE M, CHEN G, et al. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks [C]// *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference*. Washington: IEEE, 2005: 596-604.
- [4] SELVI G, MANOHARAN R. Unequal clustering algorithm for WSN to prolong the network lifetime (UCAPN) [C]// *International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*. Bangkok: IEEE, 2013: 456-461.
- [5] KHAN W, WANG H, ANWAR M, et al. A multi-layer cluster based energy efficient routing scheme for UWSNs [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 77398-77410.
- [6] HOU R, HE L, HU S, et al. Energy-balanced unequal layering clustering in underwater acoustic sensor networks [J]. *IEEE Access*, 2018, 6(1): 39685-39691.
- [7] LIN D, WANG Q. An energy-efficient clustering algorithm combined game theory and dual-cluster-head mechanism for WSNs [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 49894-49905.
- [8] ZHANG W, HAN G, FENG Y, et al. IRPL: An energy efficient routing protocol for wireless sensor networks [J]. *Journal of Systems Architecture*, 2017, 75: 35-49.
- [9] HUANG M, ZHANG K, ZENG Z, et al. An AUV-assisted data gathering scheme based on clustering and matrix completion for smart ocean [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9904-9918.
- [10] XING G, CHENG Y, HOU R, et al. Game theory-based clustering scheme for energy balancing in underwater acoustic sensor networks [J]. *IEEE Internet of Things*

- Journal, 2021, 8(11) :9005-9013.
- [11] AHMAD I. Clustering depth based routing for underwater wireless sensor networks [C]// 2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Crans-Montana: IEEE, 2016: 506-515.
- [12] WANG Z, DING H, LI B, et al. An energy efficient routing protocol based on improved artificial bee colony algorithm for wireless sensor networks [J]. IEEE Access, 2020, 8: 133577-133596.
- [13] BASKARAN M, SADAGOPAN C. Synchronous firefly algorithm for cluster head selection in WSN [J]. The Scientific World Journal, 2015 (1): 1-7.
- [14] DANESHVAR S, MOHAJER P, MAZINANI S. Energy-efficient routing in WSN: A centralized cluster-based approach via grey wolf optimizer[J]. IEEE Access, 2019, 7: 170019-170031.
- [15] SAHOO B, AMGOTH T, PANDEY H. Particle swarm optimization based energy efficient clustering and sink mobility in heterogeneous wireless sensor network [J]. Ad Hoc Networks, 2020, 106: 102237.
- [16] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95(5): 51-67.
- [17] 于俊洋, 高宁杰, 李涵. 基于非线性收敛因子和局部扰动的鲸鱼算法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(10): 6.
- [18] SOZER E, STOJANOVIC M, PROAKIS J. Underwater acoustic networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.

(责编&校对 姚春娜)