

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211326

基于改进正余弦优化算法的 UWSN 节能路由

卞媛 林海涛 宋跃才
(海军工程大学电子工程学院 武汉 430000)

摘要: 针对水下无线传感器网络节点更换困难、能量有限的特点,提出了一种基于改进正余弦算法的节能路由。在簇的形成过程中,利用改进的正弦余弦优化算法来选举簇头,综合能量、节点密度、通信距离三方面因素并讨论相应权重,为簇头选择设计了更加合理的适应度函数。簇内单跳传输,簇间传输时则采用多跳传输,通过限制深度、能量及转发区域选择合适的下一跳,将采集的信息传递给水面。经网络仿真验证,在相同条件下,该算法较传统 LEACH 算法和 KACO、DUCISCA 算法,将正常工作时间延长了 69.10%、24.78%、14.94%,能够有效均衡网络能耗,延长网络寿命,提高数据传输率。

关键词: 水下无线传感器网络;节能算法;正余弦优化算法;分簇路由

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Energy-efficient routing protocol based on the improved sine cosine algorithm for UWSN

Bian Yuan Lin Haitao Song Yuecai
(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430000, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of node replacement and limited energy of underwater wireless sensor network, the paper proposes an energy-efficient routing protocol based on improved sine cosine algorithm. In the process of cluster formation, it uses the improved sine cosine optimization algorithm to select the cluster head, considering the three factors of energy, node density and communication distance, and discusses the corresponding weights, then designs a more reasonable fitness function for cluster head selection. Single-hop transmission within the cluster, between the clusters used multi-hop transmission. The algorithm transmits the collected information to water surface by limiting the depth, energy and forwarding area to select the appropriate next hop. The network simulation results show that under same conditions, the work hours increases by 69.10%, 24.78% and 14.94% compared with the traditional LEACH algorithm, the KACO and DUCISCA algorithm, which can effectively balance network energy consumption, prolong network life, and improve data transmission rate.

Keywords: underwater wireless sensor network; energy-efficient algorithm; sine cosine optimization algorithm; clustering routing protocol

0 引言

随着技术的不断进步,水下无线传感器网络 (underwater wireless sensor network, UWSN) 在资源勘探、水文监测、气象预警等中发挥重要作用^[1-3], UWSN 的相关研究也开始得到了广泛关注。其中水下路由算法是实现 UWSN 数据传输和网络连接的关键技术之一^[4]。由于传感器节点携带的能量有限,而部署环境的特殊性,使得节点更换或充电困难,因此 UWSN 的生存周期受到节点能量限制^[5-6]。

分簇路由可以缩短节点发送数据的距离以及发送数据的长度^[7],减少数据包碰撞次数,从而降低每个节点的能耗,是一种有效改善网络寿命的方法^[8]。根据簇头选举的方式可以将分簇算法分为随机选举和非随机选举两大类^[9],随机分簇会导致簇头分布不均匀^[10-11],节点能耗差异大,从而影响网络性能。

本文主要研究水下无线传感器网络中非随机选举簇头的分簇路由算法,主要解决合理选举簇头以及如何优化簇间传输方式等问题,目标是提高路由算法的效率、延长网络的寿命。文献[12]提出一种基于位置信息的路由算法,但

收稿日期:2022-09-08

水下环境中难以获取所有节点实时位置;文献[13]和[14]提出一种动态分层的水下传感器网络分簇路由算法,将网络自上而下划分为多层,但仅适用于大规模网络;王建平^[15]等研究了三维 UWSN 节点固定的分簇路由算法,但限制了节点的部署方式,适应场景少;文献[16]提出基于改进灰狼优化的 UWSN 分簇路由算法,但适应度函数的权重因子选取过于简单;文献[17]针对 UWSN 能耗不均衡问题,提出了一种多跳非均匀分簇路由算法。在成簇阶段候选簇头需要收到当选信息才能决定是否成为簇头,而普通节点需要等到簇头当选信息才能决定是否加入该簇或者就近加入一个簇;一旦网络规模较大则此算法的收敛速度会很慢,簇的建立时间过长。文献[18]提出了一种基于能量和距离的带门限水下动态分簇路由算法,未考虑深度、节点密度等因素。此外,现有分簇路由算法多集中研究簇头选取和集群构建,对簇间路由的研究较少^[19]。

针对上述问题,本文提出了一种分簇节能路由算法。结合能量、密度以及距离因素,利用改进的正余弦优化算法来合理的选举簇头。此外,对簇间传输进行优化,从能量、深度、角度多角度出发来选择合适的下一跳,将采集的信息依次传递至水面汇聚节点。

1 模型描述

1.1 网络模型

文中涉及的水下无线传感器网络由水下若干个随机部署的节点和水面汇聚节点组成,同时有以下假设:

- 1) 水下节点初始能量一样,水面汇聚节点(sink)可以补充能量;
- 2) 所有节点一旦部署后位置不再移动,不考虑洋流影响;
- 3) 每个节点具有唯一的标识号(ID)且都具备收发数据的能力;
- 4) 节点可根据实际传输距离调整发射功率。

1.2 能耗模型

对于簇头节点,将能耗视为 3 部分:接收成员节点数据所消耗的能量 E_r 、处理及整合数据时消耗的能量 E_a 、将数据转发出去所消耗的能量 E_s 。

假设有 N 个节点, K 个簇,定义 E_{ch} 为簇头的能耗,假设节点发送和接收数据所需的最小能量为 e_r ,融合数据时的能量为 e_a ,数据包长度为 l bit。则簇头接收成员节点数据所消耗的能量用下式计算:

$$E_r = l \cdot e_r \quad (1)$$

簇头处理成员节点数据所消耗的能量用下式计算:

$$E_a = l \cdot e_a \quad (2)$$

水下无线传感器网络中节点采用水声通信的方式,根据文献[20],通信能耗衰减模型可以表示为:

$$A(d, f) = A_0 d^k \alpha(f)^d \quad (3)$$

其中, A_0 为单位归一化常数, d 为传输距离, f 为信

号频率, k 为扩频因子,在水声通信中球形扩展时 $k = 2$,圆柱形扩展时取 1; $\alpha(f)$ 为衰减因子,可用下式表示:

$$\alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4 \cdot 100 + f^2} + \frac{2.75f^2}{10^4} + 0.003 \quad (4)$$

当 $\alpha(f)$ 的单位是 dB/km 时(f 的单位是 kHz),可表示为:

$$10 \log \alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4 \cdot 100 + f^2} + \frac{2.75f^2}{10^4} + 0.003 \quad (5)$$

根据之前的假设,节点接收和发送数据的最小能量一样。因此,簇头将数据转发给下一跳或汇聚节点消耗的能量可以表示为:

$$E_s = l \cdot e_r \cdot A(d_{ch}, f) \quad (6)$$

其中, d_{ch} 表示簇头到下一跳或者汇聚节点的距离。

故单个簇头的能耗可用式(7)来计算:

$$E_{ch} = l \cdot e_r + l \cdot e_a + l \cdot e_r \cdot A(d_{ch}, f) \quad (7)$$

对于簇内的成员节点,主要的能耗包括两部分:采集数据的能耗 E_c 和将数据发送给簇头节点的能耗 E_t 。

定义 E_{cm} 为成员节点的能耗,假设节点采集数据的功率为 e_c ,则成员节点采集数据的能耗可以用下式计算:

$$E_c = l \cdot e_c \quad (8)$$

类似上面所讨论的,成员节点将数据发送给簇头的能耗可以表示为:

$$E_t = l \cdot e_r \cdot A(d_{cm}, f) \quad (9)$$

其中, d_{cm} 表示成员节点到簇头的距离。

故单个成员节点的能耗可用式(10)计算:

$$E_{cm} = l \cdot e_c + l \cdot e_r \cdot A(d_{cm}, f) \quad (10)$$

单个簇的能耗为:

$$E = E_{ch} + \left(\frac{N}{K} - 1\right) E_{cm} = l[e_r + e_a + e_r \cdot A(d_{ch}, f)] + l\left(\frac{N}{K} - 1\right)[e_c + e_r \cdot A(d_{cm}, f)] \quad (11)$$

因此,网络总能耗等于:

$$E_{total} = K E_{ch} + (N - K) E_{cm} = lK[e_r + e_a + e_r \cdot A(d_{ch}, f)] + l(N - K)[e_c + e_r \cdot A(d_{cm}, f)] \quad (12)$$

2 正余弦优化算法

2.1 初始的正余弦优化算法

作为群智能优化算法的一种,正弦余弦算法(sine cosine algorithm, SCA)是 2016 年由 Mirjalili^[21]提出的一种新型仿自然优化算法,通过创建多个随机候选解,利用正弦余弦函数的数学性质来平衡算法在搜索过程中的全局探索和局部开发能力。该算法具有结构简单、参数少、易于实现的特点。

具体算法描述如下^[22]:假设种群规模为 M ,即包含 M 个个体,每个个体的维度为 D ,那么,个体 i 在第 j 维的空

间位置表示为 $X_{ij}, i \in \{1, 2, \dots, M\}, j \in \{1, 2, \dots, D\}$ 。首先,在解空间内随机产生 M 个个体的初始位置,对应种群规模的大小。然后,计算每个个体的适应度值,并记录当前最优个体位置。最后,循环至满足终止条件,输出最优解。在每次迭代中,个体位置的更新表达式为:

$$X_{ij}(t+1) = \begin{cases} X_{ij}(t) + r_1 \sin r_2 | r_3 P_j(t) - X_{ij}(t) |, & r_4 < 0.5 \\ X_{ij}(t) + r_1 \cos r_2 | r_3 P_j(t) - X_{ij}(t) |, & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

其中, $X_{ij}(t)$ 为个体 i 在第 t 次迭代时的位置在第 j 维的分量; $P_j(t)$ 为第 t 次迭代种群当前最优个体在第 j 维的分量; $r_2 \in [0, 2\pi], r_3 \in [0, 2]$ 和 $r_4 \in [0, 1]$ 为 3 个随机参数;此外 r_1 为控制参数,主要控制正余弦函数的振幅,随着迭代次数的增加从递减到 0,通过下式来自适应调整

$$r_1 = a \left(1 - \frac{t}{T} \right) \quad (14)$$

其中, a 为常数,一般取 2; t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数。

2.2 改进的正余弦优化算法

由于原始的正余弦优化算法存在优化精度低、容易陷入局部极值、收敛速度慢等问题。为了提高标准 SCA 的收敛精度和加快收敛速度,受粒子群优化算法启发,在个体位置更新方程式中引入惯性权重 ω , 得到改进的个体位置更新公式如下:

$$X_{ij}(t+1) = \begin{cases} \omega X_{ij}(t) + r_1 \sin r_2 | r_3 P_j(t) - X_{ij}(t) |, & r_4 < 0.5 \\ \omega X_{ij}(t) + r_1 \cos r_2 | r_3 P_j(t) - X_{ij}(t) |, & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

较大的惯性权重有利于全局搜索,而局部搜索需要较小的惯性权重。为平衡全局探索与局部开发的能力,提出一种改进的正余弦优化算法(improved sine cosine algorithm, ISCA),其惯性权重可以动态调整,随着迭代次数的增加而线性减小。

$$\omega(t) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times \frac{t}{T} \quad (16)$$

其中, ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为惯性权重的最大、最小值。

3 算法设计

在本文中水下传感器节点以簇的方式传输数据,成员节点采集数据后发送给簇头,簇头整合接收的数据后再转发。科学的选举簇头方法以及合理的组建簇结构有利于缩短节点数据传输的距离,降低通信开销,减少能量消耗,从而延长网络寿命。本小节主要讨论如何有效选举簇头,并改进簇间传输时下一跳的选择方法,从而提升网络性能。

3.1 初始化

在 $L \times L \times L$ 水域中部署若干节点后,对网络进行初始化。由于水下节点是随机抛洒的,因此利用水下无人飞行器 UUV 辅助定位收集节点信息并将其传输给水面汇聚节点。为了节约能量,所有分簇算法由 sink 节点完成,然后

将分簇结果、sink 节点位置告知所有节点。节点广播 HELLO 包,包括自身 ID、能量、深度等信息,附近节点根据接收信号强度判断彼此间距离,并记录在邻居节点列表中。

假设网络中传感器节点总数为 N , 每轮选举 K 个簇头,水面汇聚节点根据当前所有节点的剩余能量,从所有节点中选择能量大于网络平均剩余能量的作为簇头候选集合。

$$A = \{E(i); E(i) > E_{\text{avg}} | \forall i, 1 \leq i \leq N\} \quad (17)$$

$$\text{其中, } E_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N}。$$

然后从集合 A 中随机选取 K 个节点构成一个个体,经过 m 次选取以后,得到 m 个个体,每个个体代表一种初始簇头节点集,即 m 种簇头选举方案。个体的维度 D 与簇头数目 K 相等,通过适应度函数来评价解的质量,选取最大迭代次数后的最优个体,即最佳的簇头选取方案。

3.2 簇头选举

为了合理选取簇头,本文综合密度因子、能量因子以及距离因子 3 方面来设计适应度函数。

1) 密度因子

邻近节点可以通过信息交互感知邻居节点,利用接收信号强度计算彼此间距离,每个节点维护一个邻居节点表,包括 ID、深度、能量、距离。为了避免远离其他节点的孤立节点成为簇头,将节点密度作为簇头选举的一个评价标准。用 M 来描述节点密度,即与节点相邻的节点数占节点总数的比例,以此来衡量节点密度。节点密度越大,说明此节点在整个网络中的位置越均匀。对 M 的定义如下:

$$M = \frac{N_{\text{neig}}}{N} \quad (18)$$

其中, N_{neig} 为邻居节点数, N 为节点总数。

2) 能量因子

由于簇头节点需要接收并处理成员节点发送来的数据,所以能量消耗要大于成员节点,因此将节点能量作为一个指标。假设簇头节点初始能量为,当前能量为,用剩余能量比来描述此时的节点能量状态,其定义如下

$$S = \frac{E_{\text{curr}}}{E_{\text{init}}} \times 100\% \quad (19)$$

当 $30\% \leq S \leq 60\%$, 节点状态良好,可以作为簇头;当 $S \geq 60\%$, 节点状态优秀,作为优先考虑的选择。

3) 距离因子

由于簇内成员节点相互独立,且直接与簇头通信。因此,选取与簇内所有成员节点通信距离总和最小的簇头有助于降低簇内通信能耗,延长网络生命周期。设簇内成员节点与簇头通信距离的总和为,其定义如下:

$$D = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-K-1} d_{cm-ij} \quad (20)$$

其中, d_{cm-ij} 表示第 i 个簇中第 j 个成员节点与簇头的

通信距离。

综合以上 3 方面,定义适应度函数为:

$$F = \lambda_1 M + \lambda_2 S + \lambda_3 \frac{1}{D} \quad (21)$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为权重,且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$

通过 ISCA 求解适应度函数的最优解,得到每轮最佳簇头选举方案,具体流程如图 1 所示。

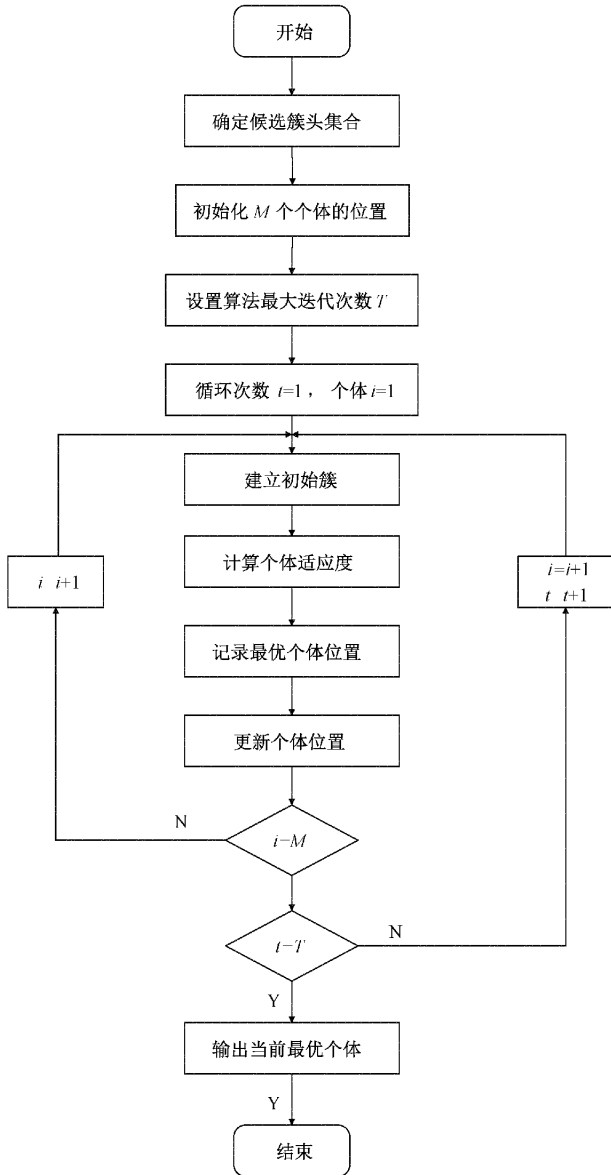


图 1 簇头选举流程

3.3 簇的建立

簇头选举完成后, sink 节点广播一短消息,包括选举出来的簇头节点的 ID、位置、深度等告知所有节点。节点计算到水面汇聚节点的距离以及到最近簇头的距离,若一跳内距离 sink 节点更近则直接将消息传输给水面 sink 节点,否则加入距离最近的簇。

将前面讨论的改进后的正弦余弦优化算法,映射到

UWSN 分簇路由算法中,步骤如下:

- 1) 初始化网络,定义网络节点总数为 N ,簇头数目 K ,适应度函数;
- 2) 汇聚节点筛选能量大于网络平均剩余能量的节点作为候选簇头集合;初始化个体位置,计算个体适应度,多次迭代后记录最优个体位置,即得到最优簇头选举方案,最优个体的维度对应簇头位置;
- 3) 节点加入距离自己最近的一个簇头所在的簇,构成初始网络;
- 4) 簇头间多跳传输将消息发送给水面汇聚节点。

图 2 是某轮分簇完成后的示意图。

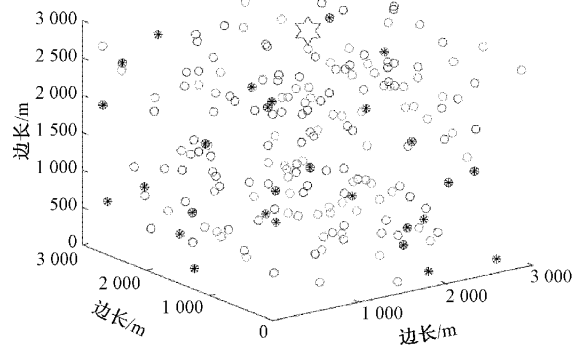


图 2 分簇示意图

3.4 簇间传输

如图 3 所示,簇内各成员节点以单跳方式与其所在簇的簇头进行通信,簇头节点融合成员节点信息后,簇间采用多跳的方式传输,选择其他簇头作为下一跳,逐跳将数据发送给水面汇聚节点。

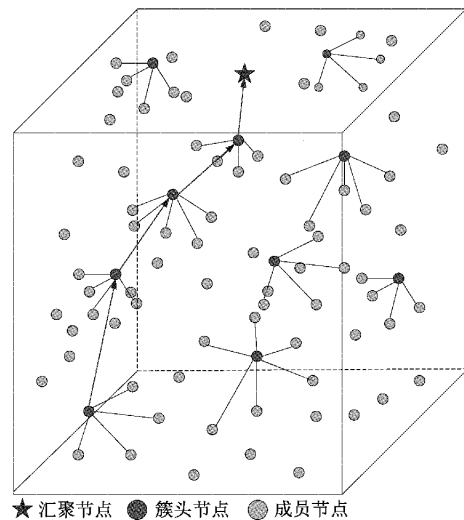


图 3 簇间传输示意图

当分簇完成后,需对簇间路由进行设计。簇头节点向外广播寻路信息,其中包括节点位置、深度、能量。广播半径内的受到寻路消息的其他簇头根据接收信号强度计算与源簇头的距离,并根据自身能量和深度以及距离判断是否

成为下一跳。此阶段主要为了找到各簇头往 sink 节点传输数据时能耗最小的路径,尽可能地节约能量,从而延长网络生存时间。

假设簇头 a 将数据转发给簇头 $b、c、d$, 共经过 n 跳后将数据发送到水面汇聚节点, E_{a-b} 表示簇头 a 到 b 的能耗, 利用式(3), 则簇头 a 到 sink 节点的传输损耗 E_{a-s} 可以表示为:

$$E_{a-s} = E_{a-b} + E_{b-c} + \dots + E_{n-s} = lP_0A(d_{a-b}, f) + lP_0A(d_{b-c}, f) + \dots + lP_0A(d_{n-s}, f) = lP_0[A(d_{a-b}, f) + A(d_{b-c}, f) + \dots + A(d_{n-s}, f)] = lP_0A_0[d_{a-b}^\alpha(f)^{d_{a-b}} + d_{b-c}^\alpha(f)^{d_{b-c}} + \dots + d_{n-s}^\alpha(f)^{d_{n-s}}] \quad (22)$$

根据上述分析可知, 簇头能量消耗与传输距离正相关。因此, 簇间传输的最优路径就是要找到簇头多跳距离之和最短的路径。

此外, 在寻路过程中选择下一跳节点时若仅仅只考虑距离最近, 可能存在后续转发节点距离汇聚节点远或者不存在后续转发节点, 从而陷入路由空洞, 如图 4 所示。

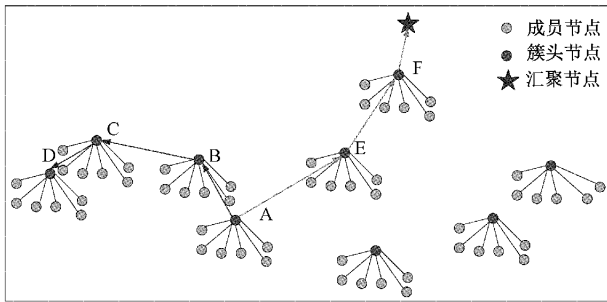


图 4 簇间传输存在的问题

当节点 A 需要发送数据给水面汇聚节点时, 节点 B 距离节点 A 最近, 若 A 将数据转发给 B, 接下来数据会沿着 B、C、D 传输, 当消息达到 D 后由于找不到合适的下一跳, 导致数据包丢失。因此在簇间传输中, 选择下一跳时除了距离以外应限制转发区域。

如图 5 所示, 假设节点到汇聚节点的仰角为 α , 节点到下一跳的仰角为 β , 为避免上述情况, 保证转发节点朝汇聚节点方向传输, 规定 $0 \leq \alpha - \beta \leq \frac{\pi}{2}$ 。

当限制转发角度后, 在图 4 中, 尽管 A 到 E 的距离不是最近的, 但为保证数据传输始终沿着汇聚节点方向, A 将选择 E 作为下一跳。

因此, 簇间传输时, 收到源簇头广播的簇头, 需满足下列条件才能作为下一跳: 首先只有深度比源簇头节点浅的才有转发资格, 其次需在限定的转发区域内, 最后根据自身剩余能量判断是否可以承担转发任务。

4 实验结果与分析

4.1 参数设置

为了验证所提算法的综合性能, 采用 MATLAB 进行

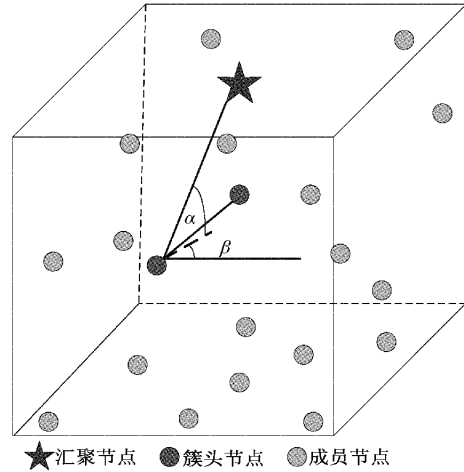


图 5 转发角度

仿真。主要从网络生存时间、剩余能量、传输至基站的数据量, 这 3 个指标来评价算法性能。设计水下无线传感器网络的相关参数如表 1 所示。

表 1 参数设置

仿真参数	
节点分布区域/m	3 000×3 000×3 000
传感器个数	200
通信半径/m	500
信号频率/kHz	10
初始能量/J	0.5
仿真轮数	5 000
发射和接收功率/nW	5
数据采集功率/mW	3
处理数据功率/mW	0.5
数据包长度/bit	4 000

4.2 权重因子的确定

为衡量 3.2 节中能量、节点密度以及距离因素对选举簇头的影响, 下面讨论权重因子的取值。由于文中所提出的算法侧重于能量使用效率, 故将 能量因子的权重设置在 0.5 及以上。

由表 2 可知, 能量、节点密度以及距离因素的取值不同, 整个网络的寿命也不一样, 因此可以通过调节权重因子有效延长网络生存时间。当 λ_i 取值为 0.2、0.7、0.1 时, 第一个死亡节点出现的时间最晚, 且网络维持正常工作时间最长, 因此网络的生存时间最长。

4.3 评价指标

为了衡量节能路由算法在网络运行中的实际效率, 采用网络生存时间、网络剩余能量、数据包投递率 3 个指标对算法进行评价。

1) 网络生存时间

网络生存时间长短可以有效评估路由算法的性能, 当

表 2 权重因子的取值对网络的影响

λ_1	λ_2	λ_3	第一个死亡节点 出现时间/轮	50%节点 死亡/轮	80%节点 死亡/轮
0.4	0.5	0.1	960	1 680	2 288
0.3	0.5	0.2	993	1 806	2 522
0.2	0.5	0.3	937	1 585	2 209
0.1	0.5	0.4	983	1 690	2 404
0.3	0.6	0.1	1 055	1 822	2 575
0.2	0.6	0.2	1 006	1 740	2 529
0.1	0.6	0.3	998	1 698	2 520
0.2	0.7	0.1	1 148	1 881	2 900
0.1	0.7	0.2	1 107	1 859	2 570
0.1	0.8	0.1	1 135	1 820	2 613

网络中存在死亡节点则说明网络不再完整,当大部分节点失效则网络无法维持原有功能。因此,节点死亡时间可以从侧面反映网络生存时间。第一个死亡节点出现的时间越晚、绝大部分节点正常工作的时间越长,网络寿命越长,相应的,路由算法的性能越好。

由图 6、7 可知,本文所提出的路由算法第一个死亡节点出现时间在 1 148 轮,当算法运行 5 000 轮以后仍有存活节点。同等情况下,传统的低功耗自适应分簇算法(low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)^[23] 第一个死亡节点出现在 335 轮,文献[24]所提基于 K 均值和蚁群优化的路由算法(K-means and ant colony optimization-based routing, KACO)的第一个死亡节点出现在 626 轮,文献[25]提出的基于改进正弦余弦算法的分布式非均匀聚类路由算法(distributed unequal clustering routing protocol based on the improved sine cosine algorithm)的第一个死亡节点出现在 934 轮。

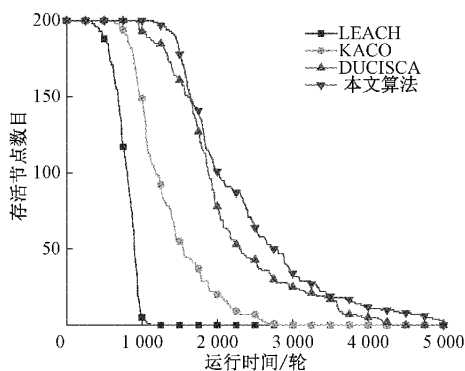


图 6 网络存活节点随时间的变化

此外,当网络中 80%节点死亡则认为网络无法维持正常功能。对比可知,本文中提出的节能路由算法相较于 LEACH 算法,将正常工作时间延长了 69.10%;相较于 KACO 算法,将正常工作时间延长了 24.78%;相较于 DUCISCA 算法,将正常工作时间延长了 14.94%,充分证

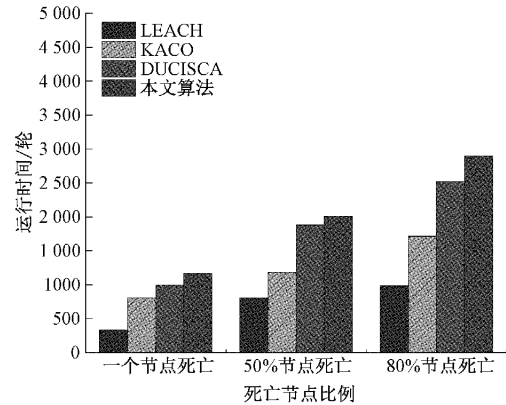


图 7 死亡节点

明了本文算法可以优先延长网络生存周期。

2) 网络剩余能量

支撑网络功能正常运转的基础是水下节点自身携带的电池,作为影响网络性能至关重要的因素,网络剩余能量也是一个评价指标。

图 8 显示了随着运行轮数增加网络剩余能量的变化。从图中可以发现,传统的 LEACH 算法能量衰减十分明显,KACO 算法、DUCISCA 算法以及本文所提出的路由算法能量消耗的趋势大致相同,都比较缓慢。但本文算法在实验中始终略优于其他算法。

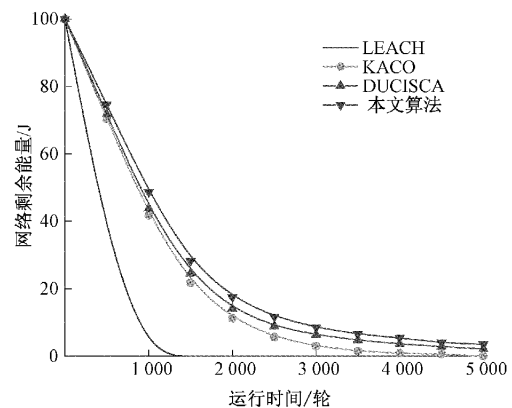


图 8 网络剩余能量

出现上述结果的原因是 LEACH 算法以随机的方式选取簇头,能量消耗快,因此节点死亡速度快。KACO 算法在簇头选择时考虑了节点通信距离、深度和能量的影响,但未考虑节点分布密度以及如何避开孤立节点;DUCISCA 算法在簇头选举时综合考虑了深度、能量、通信距离、节点分布,但设计其算法的适应度函数时权重设置过于简单;KACO 和 DUCISCA 算法簇头设置的不合理使得传输开销增大,能量消耗过快。而本文所提算法对权重因子进行了讨论对其中能量因素有所偏重,使得适应度函数的设计更加合理,同时除上述因素外还额外考虑了簇间传输时的方向问题,力求路径最短,降低全路径能耗。

3) 数据包投递率

用于采集数据的水下传感器节点会将获取的信息传回水面汇聚节点,最终交付给水面汇聚节点或基站进行分析处理。因此,能够顺利传输至水面的数据量可以很好的反映路由的效率,使用数据包投递率作为一个重要指标来衡量路由算法有效性。

根据图 9 可知,本文所提算法传输到水面的数据包投递率略高于 DUCISCA 算法,明显高于 KACO 算法和 LEACH 算法。出现上述现象的原因是传统 LEACH 算法节点死亡速度过快,路由过程中可能因为找不到下一跳而丢包,因此数据包投递率低。由于 KACO 算法对下一跳的选取没考虑节点密度的问题,随着时间的变化,可能出现路由空洞,致使传输数据包无法被送达。本文算法与 DUCISCA 算法有类似之处,但对适应度函数的设计做了改进,因此本文算法的数据投递率稍优于 DUCISCA 算法。综合来看,本文算法提高了数据传输效率,证明了其优越性。

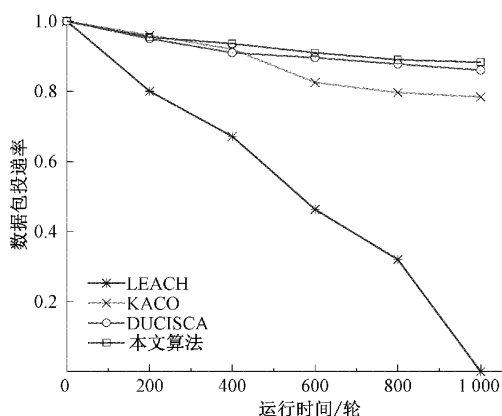


图 9 数据包投递率

5 结 论

本文在水下三维无线传感器网络背景下,提出了一种基于改进正余弦算法的节能路由算法。该算法在选择簇头时综合考虑能量、节点密度、通信距离对成簇的影响,利用改进的正余弦优化算法选择合适的簇头方案,并通过实验为各因素调整了合适的权重设计合理的适应度函数。在簇间多跳传输时,除了深度和节点剩余能量之外还利用角度限制了转发区域,进一步提高传输效率,节约网络能耗。仿真结果表明,同等情况下本文算法可以提高数据传输效率,提升能量利用率,有效延长网络生存周期。但本文仅对均匀分簇的情况进行了讨论,具有一定的局限性,日后应对此进一步研究。

参考文献

[1] MALIK R K, RAI G. A review on architecture, issues, challenges and applications in underwater wireless sensor network[J]. South Asia Management

Association, 2018, 2(6):850-854.

- [2] 肖欣招,魏峰. 无线传感器网络能量改进路由算法研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10):183-187.
- [3] JIANG S. On securing underwater acoustic networks: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1):729-752.
- [4] 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.
- [5] LU Y, HE R, CHEN X, et al. Energy-efficient depth-based opportunistic routing with Q-learning for underwater wireless sensor networks [J]. Sensors, 2020, 20(4):1025, Doi: 10.3390/s20041025.
- [6] TARIQ M, AYAZ M, SUBHAN F, et al. Energy efficient and link reliable routing (ELR) scheme for underwater sensor networks [J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2021(2):1-19.
- [7] 赵亮,兰智高,熊志利. 基于 LEACH 的无线传感器网络簇首选取改进算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12):86-93.
- [8] 周远林,陶洋,李正阳,等. 基于演化博弈的无线传感器网络节能分簇路由算法[J]. 传感技术学报, 2020, 33(3):436-442.
- [9] GHERBI C, ALIOUAT Z, BENMOHAMMED M. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks[J]. Sensor Review, 2017, 37(1): 12-25.
- [10] 李登,徐东明. 无线传感器网络 LEACH 算法的改进[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(7): 1852-1857, DOI:10.16208/j.issn1000-7024.2020.07.009.
- [11] 徐洪敏. 基于 SEP 协议改进的最优稳定选举算法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2):28-33.
- [12] 洪昌建,吴伟杰,唐平鹏. 动态分层的水下传感器网络分簇路由算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1291-1297.
- [13] MUKHERJEE, SANKAR, BISWAS G P. Location estimation based routing for mobile adhoc network[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2018, 35(2): 1209-1224.
- [14] SONG X, SUN W, ZHANG Q. A dynamic hierarchical clustering data gathering algorithm based on multiple criteria decision making for 3D underwater sensor networks [J]. Complexity, 2020: 1-14, DOI: 10.1155/2020/8.835103.
- [15] 王建平,左现刚,胡孟杰,等. 固定节点 3D 网格部署的水下传感器网络分簇路由算法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(5):84-89.
- [16] 蒋华,蔡玮,王鑫,等. 基于改进灰狼优化的 UWSNs

- 分簇路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(6): 46-50, 56, DOI: 10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2020.06.009.
- [17] WANG M, CHEN Y, SUN X, et al. Node energy consumption balanced multi-hop transmission for underwater acoustic sensor networks based on clustering algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8: 191231-191241, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032019.
- [18] 梁平元, 李杰, 彭娇, 等. 基于协作MIMO的UWSN三维动态分簇路由算法研究[J]. 计算机科学, 2019, 46(S1): 336-342, 361.
- [19] 李正阳, 陶洋, 周远林, 等. 基于能量获取的能耗均衡多跳分簇路由协议[J]. 计算机科学, 2020, 47(S2): 296-302.
- [20] STEFANOV A, STOJANOVIC M. Design and performance analysis of underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(10): 2012-2021.
- [21] MIRJALILI S. SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 96: 120-133, DOI: 10.1016/j.knsys.2015.12.022.
- [22] 徐松金, 龙文. 求解高维优化问题的改进正弦余弦算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(9): 2574-2577.
- [23] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2002, IEEE, DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982.
- [24] BAI Q CH, JIN CH X. A K-means and ant colony optimization-based routing in underwater sensor networks[J]. Mobile Information Systems, 2022, 1-12, DOI: 10.1155/2022/4465339.
- [25] FANG Z, WENHAO W. A distributed unequal clustering routing protocol based on the improved sine cosine algorithm for WSN [J]. Journal of Sensors, 2022, 1-13, DOI: 10.1155/2022/7382098.

作者简介

卞媛, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络路由算法。

E-mail: 2365728070@qq.com

林海涛, 博士, 副教授, 主要研究方向为信息网络管理与规划。

E-mail: figure2015@163.com

宋跃才, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络定位技术。

E-mail: 1049514135@qq.com