

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2024.02.005

基于蚁群算法的水下传感器网络生存期 延长策略研究

管张均

(上海海事大学信息工程学院, 上海 201306)

摘要: 随着海洋强国战略的推进和实施, 水下传感器网络广泛应用于海洋资源探测、污染监测、辅助导航和 underwater 军事侦察等领域, 具有十分重要的意义。由于水下传感器所携电池充电或更换困难, 如何减小传输能耗、在传感器能量受限的情况下提升网络生存期是亟须解决的关键问题之一。据此, 提出了一种动态蚁群路由算法, 考虑了每次传输后的节点剩余能量, 作为路径优化的条件之一, 基于蚁群算法在每次传输中选择最优路径, 并在每次传输完成后更新路由表, 让更多的节点参与信息传输, 以提高节点的利用率。仿真结果表明: 动态蚁群路由算法同时兼顾了能耗平衡和最小传输能耗, 大大提高了网络生存期。分析结果对水下传感器网络的路由协议设计有一定的参考意义。

关键词: 水下传感器网络; 动态蚁群路由; 网络生存期; 传输损耗; 剩余能量

中图分类号: TN929.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2024) 02-0036-07

中国广阔的海域蕴藏着丰富的石油、天然气和矿产资源, 其产生的经济效益在国民经济建设中占有重要地位。为了开发我国海洋资源, 保护我国领海的完整性, 建设海洋强国, 必须大力发展海洋科技, 加快核心技术研发。在众多海洋技术中, 如何实现高效畅通的水下无线通信是一道世界性难题。光、电磁波在陆地上都可以作为有效传递信息的载体, 但在水下, 传播距离最远只能达数百米。与之相比, 声波在水中的衰减远小于电磁波, 是最适合长距离水下通信的传输形式^[1-5]。然而, 水声通信的传播速度较慢, 只有不到 2 000 m/s, 而电磁波的传播速度接近光速。这就导致了水声通信的延迟较大, 难以满足一些实时性要求较高的应用场景。而且, 水声通信的信道容量较小。由于水声通信的带宽有限, 只能承载较低的数据速率, 这也限制了水声通信在高速率传输场景中的应用。此外, 水声通

信还受到多径效应和噪声的干扰。多径效应会导致信号的衰落和失真, 使得接收端难以正确解码信息。噪声则会导致信号的信噪比下降, 进一步影响通信质量。因此, 为了克服通信距离的限制, 扩大水声通信的应用范围^[6-8], 有必要为水下的各种应用, 例如海洋监测、保护、开发和科学研究, 部署水下传感器网络。该网络由大量集传感、数据采集、处理、通信和自组网能力于一体的水下节点组成, 水下传感器采集的数据通过多跳转发传输到水面或陆地监测节点。但是, 水下传感器网络由于其应用环境的特殊性, 要考虑海水盐度、压力、洋流运动、海洋生物、声波衰减等对传感器网络的影响, 使得水下传感器网络的设计比陆地无线传感器网络更难。

国外对水下传感器网络的研究已有 20 多年的历史, 其中 Seaweb 是最早和具有代表性的研究之一^[9]。Seaweb 是典型的水下传感器网络, 通过水声

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 上海市教育委员会科研创新计划项目自然科学重大项目 (2021-01-07-00-10-E00121)

作者简介: 管张均 (1981—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水声通信系统及雷达信号处理。

E-mail: guan_zhangjun@126.com

链路连接固定节点、移动节点和网关。经过多年的研究, 随机网络初始化、节点测距定位、实时信道估计和自适应调制等技术已经在 Seaweb 中获得应用。

水下传感器网络可以解决远距离节点之间的数据传输问题, 主要研究内容包括媒体访问控制 (Media Access Control, MAC) 协议、路由协议、同步与定位技术等。其中, 路由协议应根据网络拓扑结构、数据产生时间、数据流向和节点放置的灵活性来综合考虑^[10-11]。

水下传感器网络中的各节点主要是靠自身所携带的电池供电, 而电池所携带的能量有限, 且网络的工作环境决定了无法为其充电或者更换电池, 因此, 能耗问题是水下传感器网络必须考虑的问题之一。WANG M H 等^[12]提出了一种新的能量消耗平衡协议, 命名为基于动态聚类 K 均值的简化平衡能量自适应路由, 它可以通过平衡水下传感器节点的能耗和避免能量空洞来优化水声网络的生存期。YU W J 等^[13]为多跳水下传感器网络提出了一种改进的能量优化聚类算法 (Energy Optimization Clustering Algorithm, EOCA)。实验结果表明, 所提出的 EOCA 方案不仅可以提升网络的生存期, 还可以保持良好的通信和组网性能, 包括包传输率、能耗效率和网络覆盖范围。BOUABDALLAH F 等^[14]提出了一种平衡的路由策略及相关的部署模式, 该模式精确指定每个可能的下一跳的负载权重, 从而在所有水下传感器节点之间实现公平的能耗。因此, 能量空洞问题得以解决, 网络生存期也相应提高。HE W^[15]提出了一种基于 K 均值的高效节能算法, 以解决当前无线传感器网络节点能量约束、网络周期短、吞吐量低的问题。仿真结果表明, 与其他协议相比, 该算法在降低节点能耗、提升网络生存期、提高网络吞吐量等方面具有明显优势。FENG W 等^[16]研究了用于无线传感器网络中关键事件报告的联合节能调度和安全路由算法, 设计了一种下行链路的能量优先的多点中继选择机制来选择骨干节点广播消息, 仿真结果表明该方法的节能和安全性能均优于已有文献。ZHOU Y 等^[17]提出了一种联合优化链路层网络流量和物理层传输功率的跨层设计方法, 将优化问题转换为一个约束最小二乘问题, 并得到了该问题

在每个节点上最佳网络流量的解析解, 优化了网络生存期。YILDIZ H U 等^[18]提出了整数线性规划 (Integer Linear Programming, ILP) 的优化框架, 通过传输功率和数据包大小的联合优化来最大化网络生存期。管张均等^[19]给出了无线体域网中网络生存期的两种定义, 综合考虑节点剩余能量和信道状态信息后给出了最优中继选择策略, 有效提高了网络生存期。孙桂芝等^[20]采用基于位置和能耗的混合传输机制, 提出了一种能量高效的路由算法, 不仅能使节点的能耗最小化, 而且能均衡各节点的能量消耗, 可有效延长网络生存期。

上述提升水下传感器网络生存期的优化算法大多未将每次传输后节点的剩余能量纳入算法之中, 本文从文献[19]得到启发, 结合经典的蚁群算法, 提出了一种动态蚁群路由算法, 考虑了每次传输后的节点剩余能量, 作为路径优化的条件之一, 并在每次传输完成后更新路由表, 让更多的节点参与信息传输, 以提高节点的利用率。同时, 基于蚁群算法在每次传输中选择最优路径, 目标为在节点能量受限的前提下, 提高整个网络的传输次数, 即网络生存期。

1 系统模型

水下传感器网络场景如图 1 所示。多个节点放置在同一个水域中, 包括 3 个源节点、若干中继节点和 1 个目的节点。源节点发送与其相连的传感器采集到的信息, 中继节点仅具有转发功能, 目的节点是信息传输的终点。在某个时隙, 源节点将其采集到的信息发出, 经过多个节点转发, 到达目的节点。网络的拓扑结构如图 2 所示。

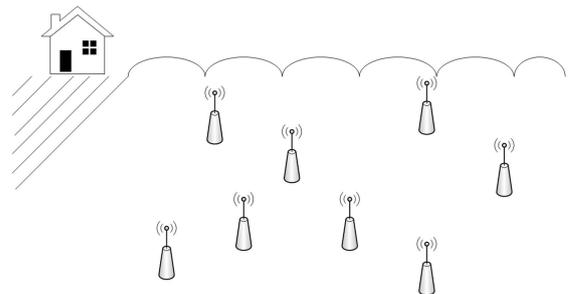


图 1 系统模型示意图

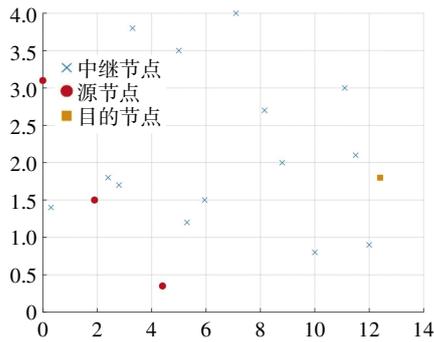


图2 节点位置示意图

2 算法设计

图2中任意两个节点之间声信号的传播损耗 TL 可以表示如下。

$$TL = k \cdot 10 \lg d + d \lg \alpha(f) \quad (1)$$

式中, TL 是距声源 1 m 处的声强与距离为 d 处的声强的比值, 单位为 dB; d 为传输距离, 单位为 m; k 是一个常数, 在不同的条件下有不同的取值。本文设定的水域为浅海, 需考虑海底吸收, 故 k 取值为 1.5; $\alpha(f)$ 是吸收系数, 通常采用 Thorp 公式计算^[21]。

$$10 \lg \alpha(f) = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 0.11 f^2 + 0.002 \quad (2)$$

式中, f 是信号频率, 单位为 kHz。当最小接收功率相同时, 可以用代价函数 L 来表示发射信号的能量损耗, 表达式如下。

$$L = d^{1.5} \cdot \alpha(f)^{d/10} \quad (3)$$

假定信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 检测阈值下的最大传输距离为 5 km。3 个源节点轮流发送信息, 不考虑目的节点的能耗, 当任一源节点的信息无法到达目的节点时, 网络停止工作。此时, 成功传输的总次数定义为网络的生存期。因此, 网络“死亡”是由于某些中继节点的能量耗尽引起的。假设中继节点的初始能量为 E_m , 源节点的初始能量为 $E_s = 1.5 E_m$, 以防源节点的能量先于中继节点耗尽。

20 世纪 90 年代初, 意大利科学家 Marco Dorigo 等受蚂蚁觅食行为的启发, 提出了一种应用于组合优化问题的启发式搜索算法, 称之为“蚁群算法”, 在解决离散组合优化方面具有良好的性能。蚁群算法是一种用来寻找优化路径的概率型算法, 蚁群在不同的环境下, 会在其经过的路径上释放一

种可以称之为“信息素”的物质, 蚁群内的蚂蚁对“信息素”具有感知能力, 它们会沿着“信息素”浓度较高路径行走, 而每只路过的蚂蚁都会在路上留下“信息素”, 整个蚁群就会沿着最短路径到达食物源了。蚁群算法被应用于金融、电力、通信、水利、交通、建筑等领域。该算法最初用来解决旅行商问题, 但是经过多年发展, 已经逐渐渗透到其他领域中。蚁群算法应用广泛, 如指派问题、Job-shop 调度问题、车辆路径问题、图着色问题和网络路由问题等。

传统的多跳路由通常采用静态路由算法, 在传输前设计出一条能耗最优的路径, 随后的每一次信息传输都沿着这条路径进行。静态路由算法消耗的是固定节点的能量, 而其他节点处于空闲状态, 极大限制了网络的生存期, 也造成了资源的浪费。

为了让更多节点参与源节点信息的传输, 提升网络生存期, 本文提出了一种动态蚁群路由算法, 在平衡节点能耗的前提下优化传输路径的能耗。在传输信息的过程中, 节点的剩余能量信息附加在消息的末尾。基于每个节点的剩余能量, 使用蚁群算法在目的节点获得一条新的路由。每次传输后都会更新路由表, 将新的路由规则从目的节点反馈到中继节点和源节点, 让更多节点有机会被使用。

蚁群算法的转移概率可以表示如下^[22]。

$$P_{ij}^n = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{S \notin A} \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta}, & j \notin A \\ 0, & j \in A \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_{ij}^n 是第 n 只蚂蚁从节点 i 到节点 j 的转移概率; τ_{ij} 是节点 i 到节点 j 的信息素浓度; η_{ij} 是节点 i 到节点 j 的启发式信息; α 和 β 分别是信息素浓度和启发式信息的权重; A 是禁忌表。

信息素浓度更新公式如下。

$$\tau_{ij} = \begin{cases} 0, & d_{ij} > 5000 \text{ 或 } L_{ij} > E_i \\ 1, & \text{其余情况} \end{cases} \quad (5)$$

当节点 i 到节点 j 的距离大于 5 km 或节点 i 到节点 j 的传输能耗大于节点 i 的剩余能量时, 信息素浓度设置为 0, 否则设置为 1。

节点间的启发式信息定义为节点 i 剩余能量与

中继节点初始能量的比值。

$$\eta_{ij} = \frac{E_i}{E_m} \quad (6)$$

式(6)将节点剩余能量纳入蚁群算法中，在优化整体传输能耗的同时兼顾了能耗平衡。当源节点准备传输信息时，蚂蚁从该源节点开始，根据传输概率选择下一个节点。如果蚂蚁能够到达目的节点，则信息素浓度的部分更新如下。

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^n \quad (7)$$

$$\Delta\tau_{ij}^n = \begin{cases} \frac{Z}{F_{ij}}, & \text{蚂蚁 } n \text{ 从节点 } i \text{ 到达节点 } j \\ 0, & \text{未有蚂蚁经过该条路径} \end{cases} \quad (8)$$

$$F_{ij} = \frac{L_{ij}}{E_i} \quad (9)$$

$$F_n = \sum F_{ij} \quad (10)$$

式中， Z 是一个常数，表示信息素增加的速度，如果节点位于第 n 只蚂蚁行走的路径上，则信息素浓度增加； F_{ij} 表示节点 i 到节点 j 传输所需能量与节点 i 剩余能量的比值，这是蚁群算法的优化目标； F_n 是第 n 只蚂蚁路径上所有 F_{ij} 的总和。

如果蚂蚁最终无法到达目的节点，则判定蚂蚁已“走丢”，并且不会执行信息素浓度的部分更新。把 m 只蚂蚁组成一个小组，当所有蚂蚁完成路径搜索时，如果至少有一只蚂蚁没有迷路并成功到达目的节点，则信息素浓度的全局更新如下所示。

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^{\text{best}} \quad (11)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{\text{best}} = \begin{cases} \frac{Q}{F_n^{\text{best}}}, & \text{最佳路径} \\ 0, & \text{其余路径} \end{cases} \quad (12)$$

式中， F_n^{best} 表示所有蚂蚁 F_n 的最小值，此时该蚂蚁所走的路径被认为是最佳路径，并且该路径的信息素浓度将会增加； Q 是一个常数，表示信息素浓度增加的速度。如果所有蚂蚁都“走丢”，则不会执行信息素浓度的全局更新。上述过程执行 p 次迭代，将最后一次迭代作为最终结果，即最优路径，此时使用以下公式更新最优路径上节点的剩余能量。

$$E_i = \begin{cases} E_i - L_{ij}, & \text{最佳路径} \\ E_i, & \text{其余路径} \end{cases} \quad (13)$$

如果在最后一次迭代中没有蚂蚁到达目标节点，则视为终止，传输总次数即为网络的生存期。

流程图如图3所示。

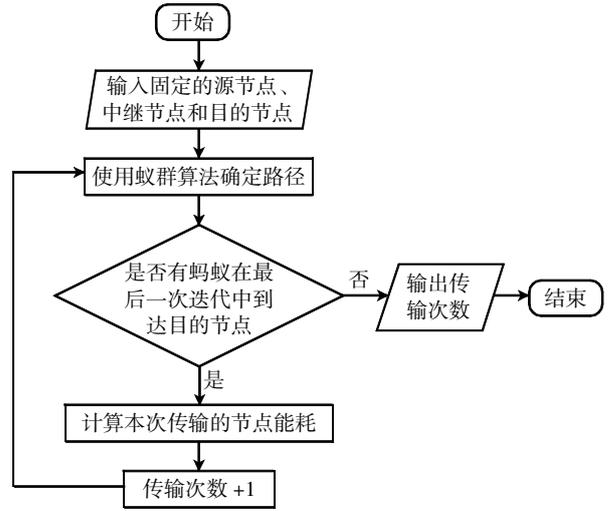


图3 动态蚁群路由算法流程图

3 仿真结果与分析

本文的仿真场景设置为：在某个水域中有3个源节点，岸边有一个目的节点，二者之间随机布放15个节点作为中继节点，中继节点的初始能量为8000 kJ，只有距离小于5 km的两节点之间才能直接传输。仿真中使用的参数值如表1所示。

图4为动态蚁群算法的传输路径图，横纵坐标表示各节点的相对平面位置坐标（图6、图8相同），图5为网络终止时的剩余能量图。

表1 仿真参数值

参数	数值
α	2
β	1
ρ	0.1
Z	0.001
Q	0.03

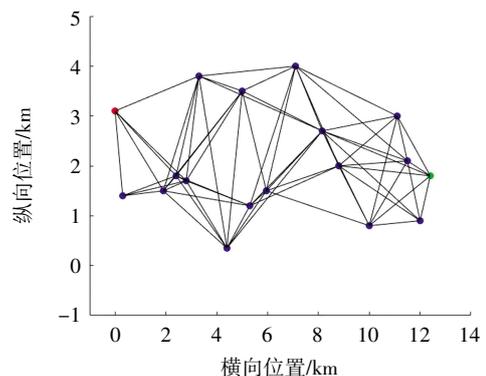


图4 动态蚁群算法路由图

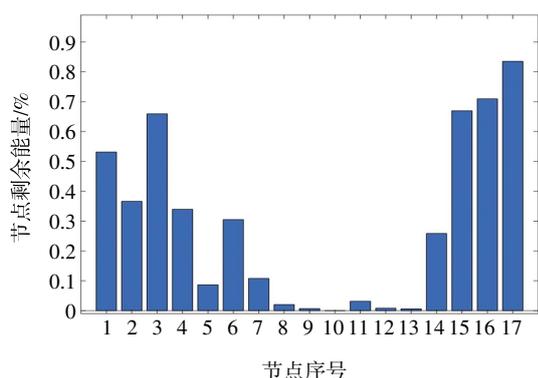


图5 动态蚁群算法节点剩余能量图

从图4可以看出,传输路径经过了大部分的节点,说明动态蚁群算法相比静态算法提高了节点的利用率。从图5可以看出,尽管一些节点剩有较多能量(例如节点17,因为其到目的节点的距离太近,传输期间通过该节点的次数较少),但是动态蚁群算法平衡了节点间的能耗,总体上没有太多的能量浪费。

本文还仿真了动态随机路由算法作为对比,动态随机路由就是在每次传输时随机规划一个新的路由表。图6为动态随机路由的传输路径图,图7为网络终止时的剩余能量图。

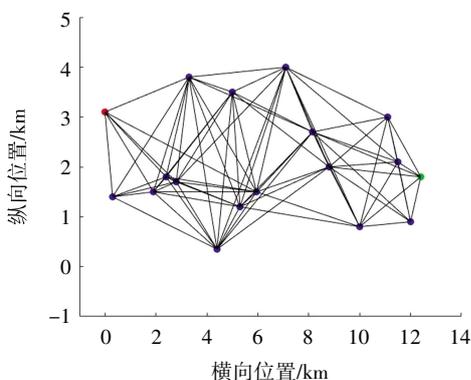


图6 动态随机算法路由图

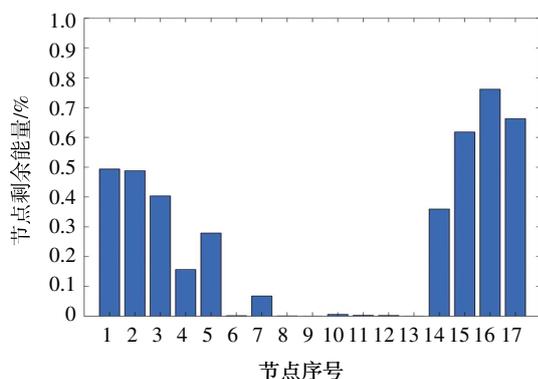


图7 动态随机算法节点剩余能量图

图6的仿真结果与图4相似,信息传输经过了大部分节点,图7中各节点的剩余能量甚至比图5中更少。然而,它的缺点是没有优化传输中的能耗,每次传输都会消耗较多的能量,所以网络生存期较短,这从后面的仿真图中可以看出。

此外,本文还对静态蚁群算法进行了仿真^[23]。图8为静态蚁群算法的传输路径图,图9为网络终止时的剩余能量图。

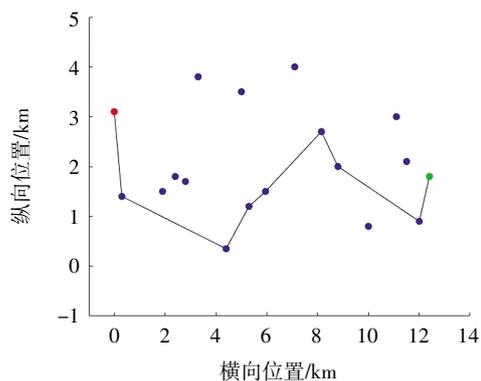


图8 静态蚁群算法路由图

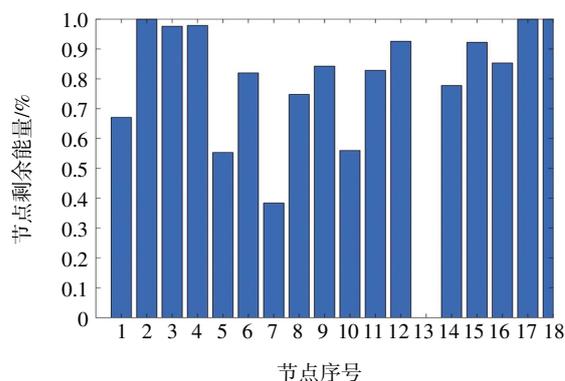


图9 静态蚁群算法节点剩余能量图

从图8可以看出,静态蚁群算法每次信息传输都经过固定的传输路线,因此路径上节点的能量被快速消耗,其余节点的利用率较低。从图9可以看出,静态蚁群路由的总剩余能量大于动态蚁群路由和动态随机路由,只使用了少数节点。由于第13节点的能量耗尽,系统很快就停止了工作。

不同路由算法的传输次数与中继节点初始能量的关系曲线如图10所示。从图10可以看出,随着初始能量的增加,3种路由算法的传输次数均相应增加,并且几乎线性增长。此外,可以明显看出,动态蚁群算法要远远优于另两种路由算法。

图11对网络终止时每次传输的平均能耗和每次传输平均浪费的能量进行了分析。

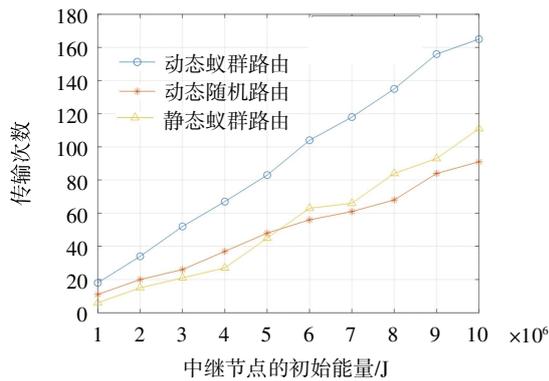


图 10 传输次数与初始能量的关系曲线

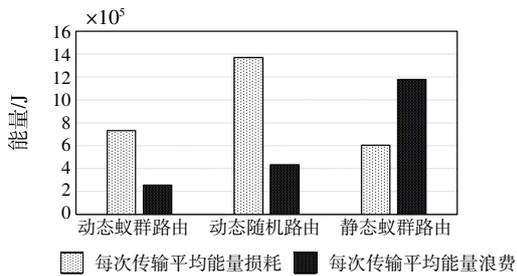


图 11 每传输耗能和废能柱状图

从图 11 可以看出, 动态随机算法每次传输的平均能耗最大, 动态蚁群算法每次传输的平均能耗略高于静态蚁群算法, 说明其在优化的过程中虽然考虑了节点的剩余能量, 不是单纯地优化每次的传

输能耗, 但是其每次传输的平均能耗相比静态蚁群这种单目标优化算法高出不多, 而且其每次传输平均浪费的能量远低于静态蚁群算法, 这充分验证了其能耗均衡的思想。

4 结 论

本文提出了一种动态蚁群路由算法来实现水下传感器网络信息传输的能耗均衡和路径能耗优化。该方案考虑了每次传输后的节点剩余能量, 作为路径优化的条件之一, 根据蚁群算法确定最优传输路径; 同时在每次传输后更新路由表, 让更多的节点参与信息传输, 以提高节点的利用率。仿真结果表明, 本文算法的网络生存期要优于动态随机算法和静态蚁群算法。然而, 路由表更新需要提前获取所有节点的剩余能量信息, 这降低了传输效率。在后续工作中, 我们将尝试让每个节点获取其周围节点的剩余能量信息, 以提高传输效率, 并考虑端到端的包传输率和协议开销, 来优化算法性能; 另外, 当条件具备时, 还要开展真实水下环境实验来验证算法性能。

参考文献:

- [1] ZHOU Y H, TONG F. Exploiting spatial-temporal joint sparsity for underwater acoustic multiple-input-multiple-output communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2021, 46(1): 352-369.
- [2] MANGIONE S, GALIOTO G E, CROCE D, et al. A channel-aware adaptive modem for underwater acoustic communications[J]. IEEE Access, 2021, 9: 76340-76353.
- [3] LIU L J, REN H, ZHAO H, et al. An adaptive multi-mode underwater acoustic communication system using OSDM and direct sequence spread spectrum modulation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 56277-56291.
- [4] GUO Z, SONG A J, TOWLIAT M, et al. Lake experimentation of in-band full-duplex underwater acoustic communications with a receiving array[J]. IEEE Access, 2023, 11: 20741-20754.
- [5] ZHANG J, YANG G, HAN G J, et al. Space/frequency-division-based full-duplex data transmission method for multihop underwater acoustic communication networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(2): 1654-1665.
- [6] ZHU J Y, CHEN Y G, SUN X, et al. ECRKQ: Machine learning-based energy-efficient clustering and cooperative routing for mobile underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Access, 2021, 9: 70843-70855.
- [7] MEI H D, WANG H Y, SHEN X H, et al. An efficient distributed MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(4): 4267-4284.
- [8] MANDAL P. MAC protocol for two-tier underwater wireless networks with distance-dependent propagation delay variation[J]. IEEE Access, 2023, 11: 5653-5667.
- [9] RICE J, CREBER B, FLETCHER C, et al. Evolution of seabed underwater acoustic networking[C]//Proc of OCEANS 2000 MTS. Providence: IEEE Press, 2000: 2007-2017.

- [10] ZHANG Y, ZHANG Z M, CHEN L, et al. Reinforcement learning-based opportunistic routing protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(3): 2756–2770.
- [11] 石磊, 孙连海. 水下传感网基于立方体网格的簇路由[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(8): 95–99.
- [12] WANG M H, CHEN Y G, 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.
- [13] YU W J, CHEN Y G, WAN L, et al. An energy optimization clustering scheme for multi-hop underwater acoustic cooperative sensor networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 89171–89184.
- [14] BOUABDALLAH F, ZIDI C, BOUTABA R. Joint routing and energy management in underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2017, 14(2): 456–471.
- [15] HE W. Energy-saving algorithm and simulation of wireless sensor networks based on clustering routing protocol[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 172505–172514.
- [16] FENG W, WANG F, XU D, et al. Joint energy-saving scheduling and secure routing for critical event reporting in wireless sensor networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 53281–53292.
- [17] ZHOU Y, YANG H Y, HU Y H, et al. Cross-layer network lifetime maximization in underwater wireless sensor networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(1): 220–231.
- [18] YILDIZ H U, GUNGOR V C, TAVLI B. Packet size optimization for lifetime maximization in underwater acoustic sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(2): 719–729.
- [19] 管张均, 顾肖凌. 基于生存期优化的无线体域网中继选择研究[J]. *计算机工程*, 2018, 44(12): 145–149.
- [20] 孙桂芝, 谢玉鹏, 祁红岩, 等. 延长网络生存期的水声传感器网络路由算法[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2014, 24(4): 410–412, 434.
- [21] LUCANI D E, STOJANOVIC M, MEDARD M. On the relationship between transmission power and capacity of an underwater acoustic communication channel[C]//OCEANS 2008-MTS. Kobe: IEEE Press, 2008: 1–6.
- [22] TANG Y Y, CHEN Y G, YU W J, et al. Coordinated anti-collision transmission with parity grouping for multi-hop underwater acoustic cooperative networks[C]//International Conference on Signal Processing-Communications and Computing. Xiamen: IEEE Press, 2018: 1–5.
- [23] 汤煜荧. 水声多跳协作通信网络路由协议研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.

Research on Survival Extension Strategy for Underwater Sensor Network Based on Ant Colony Algorithm

GUAN Zhangjun

(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: With the advancement and implementation of the ocean power strategies, underwater sensor networks have been widely used in the fields of marine resource detection, pollution monitoring, auxiliary navigation and underwater military reconnaissance, which are of great significance. Due to the difficulty in charging or replacing the batteries carried by the underwater sensors, how to reduce the transmission energy consumption and improve the lifetime of networks under the condition of limited sensor energy is one of the key issues that needs to be solved urgently. Accordingly, a dynamic ant colony routing algorithm is proposed, which considers the node residual energy after each transmission as one of the conditions for path optimization, the optimal path is selected in each transmission based on ant colony algorithm. Meanwhile the routing table is updated afterwards, so as to involve more nodes in the transmission and improve the node utilization. The simulation results show that, the dynamic ant colony routing algorithm takes into account both energy consumption balance and minimum energy consumption at the same time, which greatly improves the network lifetime. The analysis results have certain reference significance for the design of routing protocol of underwater sensor network.

Key words: underwater sensor network; dynamic ant colony routing; network lifetime; propagation loss; residual energy