

基于复合 AUVs 的水声传感网拓扑优化机制

何明^{1a,2}, 刘方鑫^{1a†}, 时耀华^{1a}, 郑翔^{1b}, 周欢³

(1. 解放军理工大学 a. 指挥信息系统学院, b. 通信工程学院, 南京 210007; 2. 解放军第61研究所, 北京 100071; 3. 同济大学 职业技术教育学院, 上海 200092)

摘要: 为提高网络拓扑的健壮性和自适应性, 基于拓扑重构思想提出基于复合自主式水下航行器的水声传感网拓扑智能优化机制来提高网络的连通性; 进一步, 在发现水声传感网拓扑结构形成的内在规律的基础上, 提出三角淡化关键节点网络拓扑优化方法, 该方法有助于提高网络抗毁再生能力. 最后通过仿真实验对比分析验证了所提出机制的有效性, 实验结果表明, 在牺牲约 8.5% 覆盖度的条件下, 抗毁性能提高约 50%.

关键词: 水声传感网; 复合自主式水下航行器; 拓扑优化

中图分类号: TP29

文献标志码: A

Mechanism of topology optimization for underwater acoustic sensor networks based on double-AUVs

HE Ming^{1a,2}, LIU Fang-xin^{1a†}, SHI Yao-hua^{1a}, ZHENG Xiang^{1b}, ZHOU Huan³

(1a. College of Command Information Systems, 1b. Institute of Communications Engineering, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China; 2. The 61th Research Institute of PLA, Beijing 100071, China; 3. Institute of Vocational Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to optimize the connectivity of underwater acoustic sensor networks(UASNs) and to improve the robustness and adaptability of the network topology based on double-autonomous underwater vehicles(AUVs), a topology optimization mechanism of UASNs is formulated by taking the advantage of the topology optimization idea. After the inherent law of UASNs topology formation being found, the method for optimizing network topology is proposed, which eliminates those key nodes by using the triangle principle and can improve the survivability of network regeneration. The simulation results show that the mechanism can improve survivability of the network effectively about 50% with the network coverage loss 8.5%.

Keywords: underwater acoustic sensor networks(UASNs); double-autonomous underwater vehicles(DOUBLE-AUVs); topology optimization

0 引言

水声传感网(UASNs)在海洋环境监测、船舶辅助导航和海洋信息采集等领域具有广泛的应用前景^[1]. 由于在海洋复杂环境中水下通信的时延长、带宽低、信号易衰减和多径效应等因素, 严重影响了传感器节点之间的通信质量和 UASNs 的拓扑可靠性^[2]. 考虑到水声传感网通信方式的特殊性和海洋环境的复杂性, 前人在优化策略方面的研究成果并不完全适用于 UASNs. Jafri 等^[3]对 UASNs 的传输通信协议

进行了优化设计, 但网络中存在关键节点, 而且没有优化网络的生存周期; 文献[4]采用受鱼群启发的水声传感器节点部署算法优化了水声传感网拓扑覆盖度; 文献[5]采用粒子群算法实现了对水声传感器节点的优化布设. 以上3种算法虽然将传感器节点分布密度与目标事件分布密度进行了较好匹配, 但仅能使网络覆盖度达到近似最优效果, 在网络连通性和抗毁性方面仍存在以下不足:

1) 在整个水声传感网生命周期内无法避免关键

收稿日期: 2016-01-24; 修回日期: 2016-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61301159, 61303267); 江苏省自然科学基金项目(BK20140065, BK20150721, BK20161469); 江苏省工程技术研究中心项目(BM2014391); 中国博士后基金项目(2015M582786, 2016T91017).

作者简介: 何明(1978—), 男, 教授, 从事水声传感网、社会公共安全等研究; 刘方鑫(1992—), 男, 硕士生, 从事水声传感网、时空数据挖掘的研究.

†通信作者. E-mail: paper_review@126.com

节点的存在, 而且该问题没有得到有效解决;

- 2) 不能确保传感器节点在水下都处于连通状态;
- 3) 复杂海洋环境存在“通信阴影区域”, 会造成连通信号的丢失或失真.

本文针对“通信阴影区域”对UASNs性能的影响

响^[6](如图1所示), 引入Double-AUVs节点, 并对其进行拓展定义, 采用拓扑重构思想提出基于复合自主式水下航行器的水声传感网拓扑智能优化机制(简称TO-DA). 仿真实验数据表明, 该优化机制对于连通性修复速度和全局优化后的水声传感网, 在连通性、覆盖度和抗毁性等方面均优于现有研究成果.

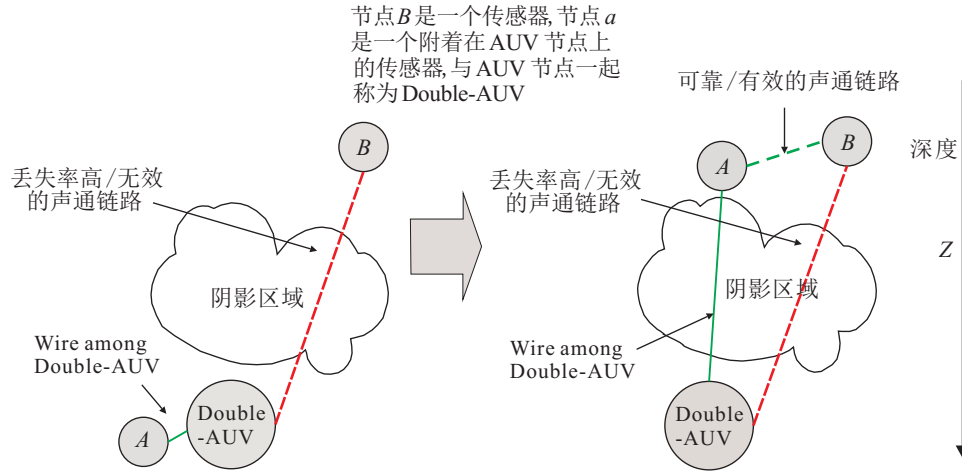


图1 海洋环境阴影区域的存在及应对

1 网络模型及问题描述

1.1 网络模型

在水下的监测区域中进行节点部署, 部署情况如下:

- 1) m 个待监测的事件随机非均匀地分布在监测区域 D 中, 表示为

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}, t_i \in D, i = 1, 2, \dots, m;$$

- 2) n 个水声传感器构成 UASNs, 实施对待监测事件进行覆盖, 传感器节点集为

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\};$$

- 3) k 个复合自主式水下航行器节点构成的集合可表示为

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\},$$

其中复合自主式水下航行器节点还包含了与其相连的传感器节点集合 B , 表示为

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}.$$

水下传感器和复合自主式水下航行器均选用全向布尔感知模型, r^c 、 r^s 和 r_a^c 、 r_a^s 分别代表传感器和复合自主水下航行器节点通信和监测范围.

定义1(邻域拓扑) 传感器节点 s_i 的直接相连的邻居节点所构成的局部网络拓扑用 $\Phi(s_i) = G(A(s_i), E(s_i))$ 表示, $A(s_i)$ 为 s_i 邻域内的节点集合, $E(s_i)$ 为 s_i 邻域内的链路集合.

节点 s_i 被断开连接但网络拓扑仍然处于连通状态的充分条件是 $\Phi(s_i)$ 处于连通状态.

定义2(网络移动能耗) 水声传感网内节点移动能量消耗之和用下式表述:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{\forall d} |C_i \times d_i|, \quad (1)$$

其中 $|d_i|$ 、 C_i 分别表示节点 s_i 在 x, y, z 所构成的空间上任意方向移动的单位距离和能量消耗, 因此 $\text{dis}_i = \sum_{\forall d} |d_i|$ 表示 s_i 在三维空间的位移之和.

传感器节点分为普通节点、边缘化节点以及关键节点^[7].

定义3(普通节点) 除边缘化节点外的非关键节点称为普通节点.

定义4(边缘化节点) 指功能/重要程度上的边缘化, 移除传感器节点既不会造成连通分支增加, 也不会形成新的关键节点的节点称为边缘化节点.

定义5(关键节点) 在水声传感网中移除该传感器节点, 使得 UASNs 的连通分支数目增加的节点称为关键节点.

假设1 水声传感网节点系统中均包含定位模块, 能获取本身和相连节点的位置信息, 通过节点间彼此交互可以得到与其相连节点的 $A(s_i)$.

假设2 复合 AUVs 能直接与水面基站通信, 获取其他复合 AUVs 的相关信息.

假设3 处于任务执行的过程中, 复合 AUVs 能量为 $+\infty$, 并且信息的感知、收发和位置的移动所产生的能耗均忽略不计.

假设4 $K \ll N$, 鉴于复合 AUVs 成本较高, 数

量应远小于传感器数量.

假设 5 $r^s < r_a^s, r^c < r_a^c$.

假设 6 复合 AUVs 在进行拓扑优化的过程中不会有新的失效发生.

假设 7 在水声传感网连通时, 水声传感器与复合 AUVs 之间、水声传感器之间的通信均无数据丢失情况发生^[5,8-10].

1.2 相关判定方法

1.2.1 计算节点的邻域拓扑

根据 1.1 节中的假设 1, 传感器节点 s_i 可获取本身和其邻域内传感器节点的位置信息, 从而得出相应的邻域拓扑 $\Phi(s_i) = G(\Lambda(s_i), E(s_i))$. 如图 2 所示, 传感器节点 s_7 知晓节点 s_6, s_8, s_9 的位置信息, 节点 s_6 知道节点 s_2, s_5, s_7 的位置, 即可知链路 $e_{7,8}(s_7, s_8)$ 和 $e_{7,9}(s_7, s_9)$ 的长度及其夹角, 设为 α ; 再根据余弦定理、正弦定理即可计算出链路 $e_{7,8}(s_7, s_8)$ 和 $e_{8,9}(s_8, s_9)$ 之间的夹角, 设为 β ; 最后, 显然可知链路 $e_{7,9}(s_7, s_9)$ 与 $e_{8,9}(s_8, s_9)$ 之间的夹角, 设为 γ ; 同时, 可计算得到 s_8, s_9 之间的距离, 从而通过下式可判断出 s_8, s_9 之间是否有通信链路存在:

$$\begin{cases} \text{dis}(s_8, s_9) = \\ \sqrt{\text{len}(e_{7,8})^2 + \text{len}(e_{7,9})^2 - 2 \text{len}(e_{7,8}) \text{len}(e_{7,9}) \cos \alpha}; \\ \text{dis}(s_8, s_9) \leq r^c, \text{ state : connected}; \\ \text{dis}(s_8, s_9) > r^c, \text{ state : disconnected}. \end{cases} \quad (2)$$

因此, s_7 可获知其 $\Phi(s_7)$.

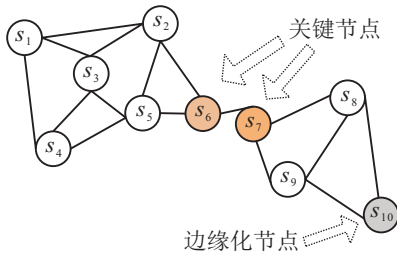


图 2 水声传感网部分节点示例图

1.2.2 传感器节点分类的判定

实际网络的不均匀特点反映在网络模型中, 存在关键节点和非关键节点^[7,11-12]. 根据需要对非关键节点进行细化, 又可以分为普通节点和边缘化节点. 根据 1.2.1 节中的示例, 可知 s_i 的 $\Phi(s_i)$ 和其各节点 (包含在 s_i 邻域内) 可达矩阵.

下述伪代码中第 1~第 12 行的循环是得到一个临时的判定集合 $P(s_i)$, 用以与 $\Lambda(s_i) = \{s_j | d(s_j, s_i) \leq r^c, j = 1, 2, \dots, n\}$ 进行对比; 第 13~第 17 行是比较集合 $P(s_i)$ 和 $\Lambda(s_i)$, 用以判定节点是非关键节点还是关键节点; 第 18~第 26 行是判断节点, 用以判断是边缘化节点还是普通节点.

下面给出节点类别判定算法伪代码:

input: matrix(s_i) and $\Lambda(s_i)$

output: the category of node s_i

1. $P(s_i) = \emptyset$
2. While($\Lambda(s_i)$ not all marked)
 - {
 - $A_{i,j} \leftarrow$ the element of matrix(s_i);
 - /* matrix(s_i) is the reachable matrix of the node s_i^* /
 - 3. if $A_{i,j} == 1$ then
 - 4. put s_j into $P(s_i)$;
 - /* put node s_i added to set $P(s_i)$ */
 - 5. mark s_j ;
 - /* the node s_j is marked */
 - 6. for each $A_{k,l}$ in matrix (s_k)
 - 7. {
 - 8. if $A_{k,l} == 1$ then
 - 9. put s_l into $P(s_i)$;
 - /* put node s_l added to set $P(s_i)$ */
 - 10. mark s_l ;
 - /* the node s_l is marked */
 - 11. }
 - 12. }
13. if $P(s_i) \neq \Lambda(s_i)$ then
14. put s_i into NoKey_Set;
- /* NoKey_Set is the set contain normal nodes and edge nodes */
15. else
16. s_i is marked as a key node;
17. put s_i into Key_Set;
- /* Key_Set is the set of key nodes */
18. if $s_i \in$ NoKey_Set then
19. $s_m \leftarrow$ the node of $\Phi(s_i)$
20. remove s_i from $\Phi(s_m)$
21. update matrix() and $\Lambda()$ by s_m
22. matrix(s_m) and $\Lambda(s_m)$ do 1-17
23. if $s_m \in$ Key_Set then
24. s_i is marked as a normal node;
- /* the edge node won't generate a new key node */
25. else
26. s_i is marked as an edge node.

1.3 目标描述

海洋复杂环境导致 UASNs 拓扑变化频繁, 致使网络性能下降^[13-14]. 为提高网络拓扑性能, 延长网络寿命, 下面给出基于复合 AUVs 的网络拓扑优化机制, 以达到恢复 UASNs 连通性, 消除关键节点, 提高网络抗毁性能的目的.

2 TO-DA 优化机制详细阐述

基于以下因素考虑, 提出复合 AUVs:

1) 水声传感器能量有限, 复杂海洋环境下为维持网络拓扑连通性使拓扑演化频繁, 导致传感器能量大量缩短, 无法维持长时间水下监测任务;

2) 复杂海洋环境中存在屏蔽声波通信的区域, 水声传感器节点间的通信信号衰减剧烈或信噪比大, 无法维持稳定通信^[15].

3) AUVs 节点相对于普通传感器节点造价高, 为使其效用最大, 应让它可以在水下尽可能多地执行信息采集、监测等工作.

本文引入的复合 AUVs 是对普通 AUVs 的改进, 每个 AUVs 携带一个水声传感器, 并且以一根实线使其连接, 实线的存在可以直接跨过一些屏蔽声波通信的区域. 复合 AUVs 对探测区域内传感器节点进行监测的同时统计失效节点信息, 发生节点 s_j 失效时, 用下式计算 s_j 邻居集合 $A(s_j)$ 中所有节点的中心位置 L_{center} :

$$L_{center} = \frac{\sum_{s_j \in A(s_f)} L_j}{N_{neigh}(s_f)}; \quad (3)$$

然后, b_f 向 $A(s_i)$ 移动进行修复, 将 b_i 的状态置为忙碌. 这样, 可延长 UASNs 的寿命, 避免 UASNs 传感器节点移动造成目标监测区域信息采集的真空期. 式 (3) 中: L_j 为 s_f 邻居集合 $A(s_f)$ 中 s_j 的位置, $N_{neigh}(s_f)$ 为 s_f 邻居节点数.

在此基础上, 若发现 UASNs 中出现不连通位置, 则进行如下操作.

1) 不连通位置上的节点不属于集合 B 时, 操作过程如下.

Step 1 根据假设 1, 节点 b_i 知道自身位置信息和邻域内节点位置信息, 可计算得到邻域拓扑 $\Phi(b_i)$, 将整个拓扑网络分割成小拓扑网络, 失效节点为 s_i , 判断出失效节点属于拓扑网络 i .

Step 2 在拓扑网络 i 中, 通过上文提到的判断关键节点和边缘化节点的方法确定 b_i 是关键节点或边缘化节点, 再通过其中提到的判定不连通位置的方法, 找到不连通的位置 (失效节点 s_j).

Step 2.1: 如果 b_i 是边缘化节点, 则复合 AUVs 节点 A_i 发起修复请求 Request 消息给 b_i , Request 消息上

携带不连通位置信息, b_i 收到 Request 消息后, 回复应答修复请求 Response 消息, 计算出 b_i 修复的时间

$$T_{repair} = T_{comput} \cdot D + \frac{\sum_{i=1}^D l_i}{v}. \quad (4)$$

其中: D 为节点 b_i 移动所需步数, T_{comput} 为节点 b_i 需要移动的方向计算耗时, v 为 b_i 的移动速度, l_i 为 b_i 第 i 次移动步长, $\sum_{i=1}^D l_i$ 为 b_i 移动的距离.

Step 2.2: 如果 b_i 是关键节点, 则在拓扑网络 i 中进行相对于整个拓扑网络的局部拓扑重构, 将 b_i 变成边缘化节点后, 跳转到 Step 2.1, 操作如下:

Step 2.2.1: 关键节点 b_i 发送 Find 消息.

在 b_i 为关键节点的拓扑网络 i 中, b_i 向拓扑网络 i 中除自身外所有节点发送 Find ($b_i, L_i, hops, Links$) 消息. 该消息中携带了 4 个关键信息参数, 分别对应着关键传感器节点的标识号、关键传感器节点目前所处的位置、搜索到当前剩余的跳数 (消息发起节点 b_i 进行初始值设置) 以及与关键传感器节点 b_i 相连节点的序号等信息, Find 逐跳递减, 发送至 $hops \leq 0$ 时, 消息停止转发.

Step 2.2.2: 边缘化节点 s_j 进行 Find 消息处理.

处于网络拓扑 i 内的边缘化节点 s_j 收到 Find ($b_i, L_i, hops, Links$) 消息, 根据 b_i 位置信息 L_j 和自身位置 L_j , 计算出关键传感器节点 b_i 和边缘化节点 s_j 两者之间相距的空间间距 $d(b_i, s_j)$. 然后, 根据 $C' = k \cdot d(b_i, s_j) \cdot |C_i|$ 计算出如果边缘节点 s_j 要移动前往关键节点 b_i 处所需要的能量消耗. 其中: k 表示调控系数, 对 s_j 由自身所处位置运动到 b_i 位置过程中携带能量的剩余状况进行控制; $|C_i|$ 表示 s_j 运动至 b_i 进行单位空间间距的移动所需消耗的能量; $d(b_i, s_j)$ 为两个传感器节点之间的空间间距估算. 若 $C' > Energy(s_j)$, 表明 s_j 自身的能源不足以支撑其运动到 b_i 的位置并执行相应操作, 则不接收 Find 消息, 直接进行 Find 消息转发的操作; 若 $C' \leq Energy(s_j)$, 则检索消息列表之前收到过的同样的 Find 消息, 执行 Find 消息转发的操作, 否则节点发送 Answer ($s_j, L_j, sLink$) 消息给 b_i , 包括边缘化节点 ID、位置、与边缘化节点 s_j 相连节点序号, 通过 $sLink$ 中信息更改 s_j 节点自身信息.

Step 2.2.3: 关键节点 b_i 处理 Answer 消息.

关键节点 b_i 收到边缘化节点回复 Answer 消息后, 向拓扑网 i 中除自身所有节点发送 Restructure ($b_i, new_key, hops$) 广播消息, 包括自身的序号、新关键节点序号、搜索到当前剩余的跳数等信息, Restructure 逐跳递减, 发送至 $hops \leq 0$ 时, 消息停止转发. 当拓扑网络 i 中节点接收到 Restructure 消息后, 将 b_i 与自身

相连节点序号相比较. 如果一致, 则表明该节点与关键节点相连, 根据 new_key 更改自身相连节点序号, 同时, 给关键节点 b_i 回复携带自身序号的 $\text{Run}(\text{num})$ 消息, 表明已更改关键节点; 如果不一致, 则表明该节点不与关键节点相连, 转发 Restructure 消息.

Step 2.2.4: 关键节点 b_i 处理 Run 消息.

关键节点 b_i 收到 Run 消息后, 将 Run 消息携带的传感器序号与自身相连的传感器序号进行比较. 如果

相连的所有传感器都回复了 Run 消息后, 则关键节点根据 $\text{Answer}(s_j, L_j, s\text{Link})$ 消息中携带的 $s\text{Link}$ 信息更改相连节点, 发送 Move 消息给 s_j , 同时, 根据 L_j 信息向 s_j 移动.

Step 2.2.5: 边缘化节点 s_j 处理 Move 消息.

边缘节点 s_j 接到 Move 消息后, 根据接收到的 $\text{Find}(b_i, L_i, \text{hops}, \text{Links})$ 中 L_i 信息, s_j 向关键节点移动, b_i 向修复节点移动, 如图 3 所示.

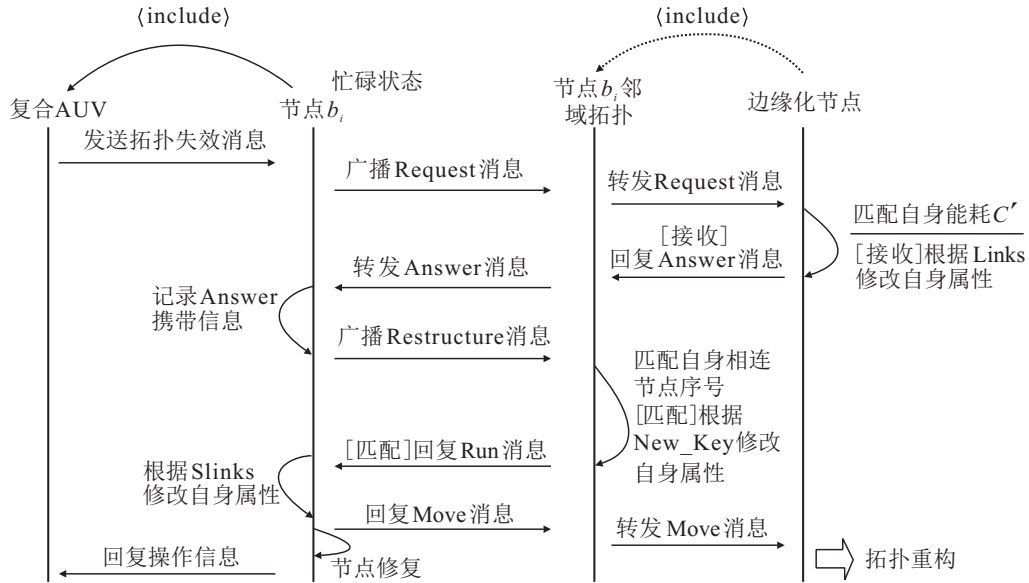


图 3 重构节点选择过程示意图

Step 3 对覆盖范围进行填补, 具体操作如下:

修复节点移动后, 无法影响水声传感网的网络拓扑连通性, 但是可能会影响水声传感网中传感器节点对需要监测事件的覆盖, 所以应在水声传感网拓扑不发生改变的前提下, 对属于 $\Lambda(s_{\text{repair}})$ 集合内的节点的位置执行适当的调整. 设定最优距离 d_{opt} , 当 $d_{\text{opt}} = 1.78 r^s$ 且 $r^c > 1.78 r^s$ 时, 传感器节点间距为 d_{opt} , 既能保证连通性又能使覆盖达到最优^[15].

修复节点原邻域内节点位置调整, 填补修复节点移走遗留覆盖空白, 防止网络覆盖度降低.

2) 不连通位置上的节点属于集合 B 时, 可直接通过复合 AUVs 对修复的 UASNs 连通性进行优化操作, 过程如下.

Step 1 由于复合 AUVs 在将传感器 b_i 派遣出去时已经将得到的位置和路径记录下来, 此处只需要通过实线将传感器 b_i 收回, 进行能耗补充或者清理.

Step 2 传感器 b_i 通过记录在 AUV 节点 A_i 上的位置和路径重新派遣回原位置.

Step 3 b_i 回到原位置并与邻居节点连通后向复合 AUV 节点 A_i 传递确认信息.

频繁的修复操作会导致网络整体寿命下降、信

息采集真空期等后果. 为提高网络性能, 在修复完毕后开始进行关键节点的淡化操作. 由定义 5 可知, 如果将边缘化节点移除, 是不会造成网络中连通分支数目增加的, 同样也不会促使新的关键传感器节点的形成. 所以, 选出最优的优化节点后, 由假设 1 可得知在水声传感网的连通分支内其余传感器节点信息, 因此, 可随机地选择距离关键传感器节点跳数最少的边缘节点通过三角形机理重新构建领域拓扑.

由于三角通信结构的稳定性, 淡化关键节点至少需要 3 个节点数的考虑以及水声传感器能量有限的考虑. 引入三角形机理的概念, 至少选取 1 个关键节点邻域内的可连接邻居节点与关键节点建立连接, 在淡化关键节点后重新建立邻域拓扑. 虽然对边缘化节点的移除会造成覆盖度上的损失, 但是在网络拓扑抗毁性能上所带来的优化大于覆盖度上的损失.

3 实验仿真及结果分析

实验用 Monte Carlo 对基于复合 AUVs 的 UASNs 优化机制多次进行仿真, 通过仿真实验获取的实验数据利用 Matlab 进行图形化分析. 设置实验环境为: 水下监测区域范围是 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$, 其中 50 个需要监测事件在该环境中不均匀地随机分布, 根据传感器的监测半径和通信半径设置的 UASNs 包含 25

个传感器以监测事件, 在 UASNs 中加入 5 个复合 AUVs^[6].

表 1 实验参数^[16-17]

符号	描述	取值
r^s / m	传感器感知半径	40
r^c / m	传感器通信半径	60
$V_t / (m/s)$	水下声传播速度	1500
$v / (m/s)$	传感器节点移动速度	3
e / J	传感器节点初始能量	30
Q / m	扰动幅度	18
l_{step} / m	人工鱼最大移动步长	15
l_{max} / m	修复节点最大移动步长	15
Interval / min	优化周期计时器	60

各方向单位能耗 $C_x, C_{-x}, C_y, C_{-y}, C_z, C_{-z}$ 分别设置为 $C_x = C_{-y} = 5 \times 10^{-2} J, C_{-x} = C_y = 2 \times 10^{-2} J, C_{-x} = C_y = 2 \times 10^{-2} J, C_{-z} = 1 \times 10^{-2} J$.

实验 1 连通性修复对比分析. 当网络拓扑出现失效节点时, 连通节点个数急剧下降. 图 4 是两种算法与本文提出的优化机制执行后节点连通个数随时间的变化曲线. 粒子算法的曲线较为平稳, 其原因在于该算法选取的是局部最优; 鱼群优化算法的曲线波动较大, 原因在于该算法优化时选取传感器节点进行移动的数目较多. 执行以上两种算法后的连通节点最终个数都逊于本文提出的优化机制的执行效果. 本文提出的优化机制在其执行的过程出现传感器节点连通数目的变动起伏较大, 其原因是在进行节点修复的过程中, 同时对关键的传感器节点进行了重要性淡化的操作, 从而导致曲线的变动起伏较大. 在其进行淡化操作过程中一方面加快覆盖全局的节点速度, 一方面边缘化节点在移动时出现不可避免的连通性能下降, 但在非常短暂的时间就可以达到全局的修复优化; 相较于其他算法的局部最优, 本文提出的优化机制的最终执行结果优于其他两种算法的执行结果.

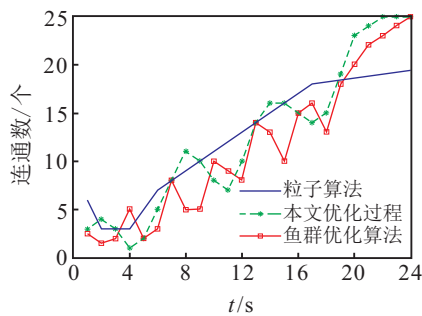


图 4 连通性修复变化曲线

实验 2 覆盖度和抗毁性能分析. 图 5 左边纵坐标及深色线标示的是复合 AUVs 算法与粒子算法对比覆盖度随时间的变化, 右边纵坐标及浅色线标示的是本文算法与粒子算法对比生命周期随时间的变化, 复合 AUVs 算法随着时间的推移生命周期较局部最

优理论的粒子算法可以得到有效提高. 将生命周期和覆盖度曲线放在一张图中, 是为了对比本文与粒子算法优化过程的变化情况. 所选取的对比算法是应用较为广泛且技术较为成熟的粒子算法进行实验对比, 以此来突出复合 AUVs 算法优势的全面性和完备性. 从图 5 可以看出, 随着时间的推移, 执行该优化机制后的抗毁性能远超前于执行粒子算法后的效果; 通过统计分析可得出, 虽然在优化过程中牺牲了约 8.5% 的覆盖度, 但抗毁性能却提高了约 50%.

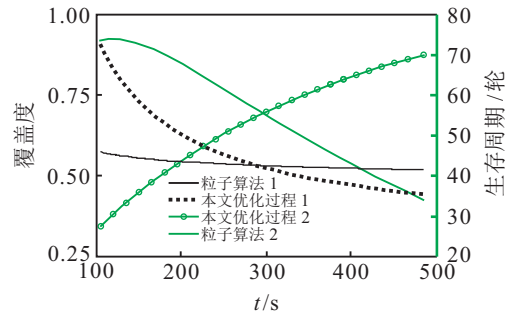
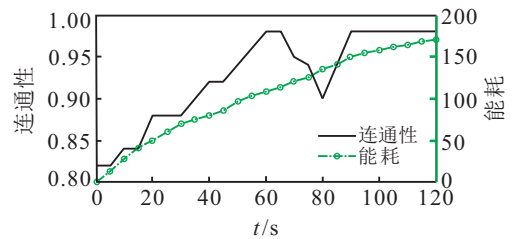


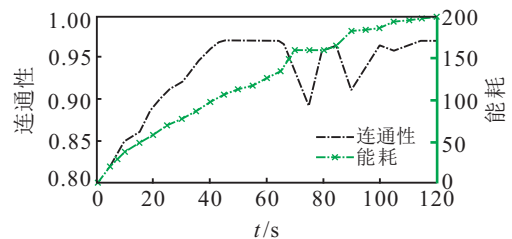
图 5 覆盖度与抗毁性对比曲线

实验 3 优化过程结束后网络整体性能分析.

图 6 显示的是实验网络连通性和网络整体耗能情况.



(a) 本文优化过程能耗和连通性对比



(b) 鱼群优化过程能耗和连通性对比

图 6 网络连通性和能耗对比曲线

连通性优化阶段进行移动的节点较多, 描述耗能的线条斜率较大. 整个 UASNs 网络中节点耗能于 110s 左右逐渐趋于平稳, 停止增长, 该现象说明对比算法优化过程执行完毕. 图 6 中表示网络连通性的深色曲线变化呈上升趋势并较快达到峰值, 但曲线迅速下降至 0.85~0.9 之间, 当时间进入 80~90s 的范围内时, 曲线返回峰值并一直处于在该水平. 该现象的出现是因为处于 60s 左右时本文提出的优化机制执行完毕, 连通性得到了优化, 但在随后进行的淡化关键节点操作过程中, 由于边缘化节点移动向目标节点的位置, 需要离开其原有的位置, 从而会导致出现不可避免的

网络连通性能下降,但随着淡化操作的完成, UASNs 的网络拓扑的连通性可以迅速得到恢复。

从上述 3 个实验可发现,随着时间变化, UASNs 节点的自修复和拓扑重构会使得传感器节点的密集程度增加。

4 结 论

针对 UASNs 频繁拓扑失效导致网络寿命降低和连通性能下降问题,本文从网络拓扑角度进行研究,综合考虑了网络连通性、抗毁性、能耗和覆盖度等方面,提出了 TO-DA 优化机制。该机制有助于网络关键节点的优化,增强在不确定海洋环境中的抗毁再生性能。所得到的研究成果在执行长时间水下任务的应用场景,具有一定的理论研究价值和推广前景。

参考文献(References)

- [1] Erol-Kantarci M, Mouftah H T, Oktug S. A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 48(12): 152-158.
- [2] Mi Zhi-chao, Zhou Jian-jiang. A multi-object optimization routing algorithm with constraint for wireless sensor networks[J]. *J of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering*, 2008, 26(3): 239-243.
- [3] Jafri M R, Ahmed S, Javaid N, et al. AMCTD: Adaptive mobility of courier nodes in threshold-optimized DBR protocol for underwater wireless sensor networks[C]. *The 8th Int Conf on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications*. Compiegne, 2013: 93-99.
- [4] Xia N, Wang Chang-sheng, Zheng Rong, et al. Fish swarm inspired underwater sensor deployment[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 295-302.
- [5] Manjula R B, Manvi S S. Coverage optimization based sensor deployment by using PSO for anti-submarine detection in UWASNs[C]. *Ocean Electronics. IEEE*, 2013: 15-22.
- [6] Nguyen S T, Cayirci E, Yan L, et al. A shadow zone aware routing protocol for acoustic underwater sensor networks[J]. *Communications Letters IEEE*, 2009, 13(5): 366-368.
- [7] Park B S. Neural network-based tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles with model uncertainties[J]. *J of Dynamic Systems Measurement & Control*, 2014, 137(2): 121-128.
- [8] Bhavya R, Nithya N. Efficient hierarchical route allocation for underwater sensor network[J]. *Int J of Emerging Science and Engineering(IJESE)* February, 2014, 2(4): 2319.
- [9] Parul Pandey, Dario Pompili. Region of feasibility of interference alignment in underwater sensor networks[J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 2014, 39(1): 189-202.
- [10] Najeeb F, Khan Z A, Qasim U, et al. A new advanced energy efficient routing protocol for UWSNs[J]. *J of Basic and Applied Scientific Research*, 2014, 4(2): 43-53.
- [11] 夏娜, 王诗良, 郑榕, 等. 基于骨架提取的水下传感器网络刚性定位判别研究[J]. *计算机学报*, 2015, 38(3): 589-601.
(Xia N, Wang S L, Zheng R, et al. Study on localizability in underwater sensor networks based on skeleton extraction and rigidity theory[J]. *Chinese J of Computers*, 2015, 38(3): 589-601.)
- [12] Jian Shen, Haowen Tan, Jin Wang, et al. A novel routing protocol providing good transmission reliability in underwater sensor networks[J]. *J of Internet Technology*, 2015, 16(1): 171-178.
- [13] Coutinho R W L, Boukerche A, Vieira L F M, et al. A novel void node recovery paradigm for long-term underwater sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 34(C): 144-156.
- [14] Andrea Caiti, Knut Grythe, Jens M Hovem, et al. Linking acoustic communications and network performance: Integration and experimentation of an underwater acoustic network[J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 2013, 38(4): 758-771.
- [15] 何明, 梁文辉, 陈秋丽, 等. 水下移动无线传感器网络拓扑愈合与优化[J]. *控制与决策*, 2015, 30(2): 251-255.
(He M, Liang W H, Chen Q L, et al. Topology self-healing algorithm of mobile underwater wireless sensor networks[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(2): 251-255.)
- [16] Han G, Zhang C, Shu L, et al. Impacts of deployment strategies on localization performance in underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2015, 62(3): 1725-1733.
- [17] Javaid N, Jafri M R, Ahmed S, et al. Delay-sensitive routing schemes for underwater acoustic sensor networks[J]. *Int J of Distributed Sensor Networks*, 2015: 24(1): 1-13.

(责任编辑: 曹洪武)