

# 基于拓扑重构的水下移动无线传感器网络拓扑优化

何明<sup>1,2</sup>, 梁文辉<sup>1,3</sup>, 陈秋丽<sup>1</sup>, 陈希亮<sup>1</sup>, 陈剑<sup>1</sup>

(1. 解放军理工大学 指挥信息系统学院, 江苏 南京 210007;

2. 解放军第61研究所, 北京 100071; 3. 解放军61345部队, 陕西 西安 710004)

**摘要:** 针对水下移动无线传感器网络 (MUWSN, mobile underwater wireless sensor networks) 拓扑随洋流动态演化对其网络性能会产生很大影响, 提出了一种基于拓扑重构的水下移动无线传感器网络拓扑优化方法, 首先通过模拟鱼群行为对传感器节点位置进行调整, 优化网络覆盖度; 其次, 利用冗余节点修复网络中不连通位置, 消除关键节点, 优化网络连通性, 最后, 通过仿真对比实验验证了该方法的合理性和有效性。实验结果表明, 所提算法能在较低能耗下, 保证网络覆盖度长期维持在97%左右, 连通率达到89%以上。

**关键词:** 水下移动无线传感器网络; 拓扑优化; 自主式水下航行器

中图分类号: TP393

文献标识码: A

## Optimization method through topology reconfiguration for mobile underwater wireless sensor networks

HE Ming<sup>1,2</sup>, LIANG Wen-hui<sup>1,3</sup>, CHEN Qiu-li<sup>1</sup>, CHEN Xi-liang<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>

(1. College of Command Information System, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China;

2. The 61th Research Institute of PLA, Beijing 100071, China; 3. 61345 Armies, PLA, Xi'an 710004, China)

**Abstract:** The topology of mobile underwater wireless sensor networks (MUWSN) evolves dynamically with ocean currents, which will have great impact on network performance. To solve this problem, a topology optimization method for MUWSNs is proposed based on topology reconfiguration. Firstly, the proposed method optimizes the coverage rate of MUWSNs by adjusting the location of sensor nodes through simulating fish behaviors. Secondly, to optimize the connectivity of MUWSNs, the proposed method repairs disconnected positions and eliminates key nodes in MUWSN through using redundant nodes. Finally, simulation results verify the rationality and validity of the proposed method. Experimental results show that the algorithm can guarantee the network coverage is maintained at about 97%, connectivity rate above 89%, with lower energy consumption.

**Key words:** mobile underwater wireless sensor networks; topology optimization; autonomous underwater vehicle

## 1 引言

水下传感器节点易受洋流、水下生物触动等外力影响发生位置迁移, 导致水下移动无线传感器网络拓扑变化频繁, 从而影响了网络性能<sup>[1,2]</sup>。合理高效的拓扑优化方法能够增强网络拓扑可靠性和抗毁性, 是提高 MUWSN 网络性能的有效手段<sup>[3]</sup>, 以

使其能够胜任水下军事目标监视、海洋数据收集、水质监测、海底矿产资源探测等重要任务<sup>[4]</sup>。

目前, 针对传统的地面传感器网络优化研究已有一些成果, 付华等在文献[5]中提出了一种量子遗传算法, 用于解决地面传感网中感知节点分布优化问题; Azrina 等<sup>[6]</sup>通过一种分布式拓扑控制技术从传感器电池能量方面考虑, 对无线传感器网络能耗

收稿日期: 2014-07-21; 修回日期: 2015-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61301159); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20140065); 江苏省工程技术研究中心基金资助项目 (BM2014391)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61301159); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20140065); Engineering Research Center of Jiangsu Province (BM2014391)

进行了优化；王雪等<sup>[7]</sup>考虑了节点移动性，提出了一种并行粒子群优化方法；米志超等<sup>[8]</sup>提出了一种地面无线传感器网络多目标优化路由选择算法。考虑到水下移动无线传感器网络所处水下复杂环境及声通信方式的特殊性，以上优化方法在 MUWSN 中并不适用。文献[9]针对水下无线传感器网络从协议设计方面进行了优化，但网络拓扑抗毁性未得到提高，网络中存在牵一发而动全身的关键节点。除此之外，还有一些研究成果将群体智能仿生算法应用于生成较优的 MUWSN 网络拓扑，文献[10]采用鱼群启发的水下传感器节点部署算法生成了覆盖度较优的水下传感器网络拓扑；文献[11]采用粒子群算法实现了对水下传感器节点的优化布置。以上 2 种算法均使网络覆盖度达到了近似最优，但存在 2 点不足：并不能保证所有传感器节点均连通；

无法避免关键节点的存在。所谓关键节点，是指该节点所有单跳邻居属于  $k(k \geq 2)$  个不连通子集，这  $k$  个子集仅由该节点连接<sup>[12]</sup>。

本文面向水下非均匀覆盖的 MUWSN，提出了一种基于拓扑重构的水下移动无线传感器网络拓扑优化方法，共分为 2 个阶段。第 1 阶段，在文献[10]节点部署算法的启发下，采用人工鱼群算法重新调整传感器节点位置，优化 MUWSN 网络覆盖度；第 2 阶段，利用冗余节点修复网络中不连通位置以恢复全网连通性，消除关键节点提升网络抗毁性，弥补第 1 阶段鱼群优化的不足。最后通过仿真实验，验证了该拓扑优化方法的有效性。

## 2 网络模型及问题描述

### 2.1 网络模型

对于面向水下非均匀覆盖需求的 MUWSN，传感器节点布设位置的选择不是均匀覆盖监测区域，而是覆盖目标事件，并且使传感器分布密度与目标事件分布密度尽可能匹配。

目标监测区域  $D$  中不均匀分布  $M$  个需监测的目标事件，目标事件集为  $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_m\}$ ， $e_i \in D, i = 1, 2, \dots, m$ ； $N$  个水下传感器构成的 MUWSN 实施对目标事件的感知监测，传感器节点集为  $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$ ， $r^s$  和  $r^c$  分别表示传感器节点最大感知半径和通信半径。

**定义 1 覆盖度。**目标监测区域内所有传感器节点所覆盖的事件数与监测区域内事件总数的比值。

**定义 2 节点度数。**传感器节点  $s_i$  是某条链路

$link_i$  的端点，则称  $s_i$  和  $link_i$  互为关联，与节点  $s_i$  关联的链路数称为  $s_i$  的度数，简称为度。

**定义 3 邻域拓扑。**传感器节点  $s_i$  的单跳邻居节点构成的网络拓扑，用  $\Phi(s_i) = G(A(s_i), E(s_i))$  表示，其中， $A(s_i)$  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。

由于重力、洋流等因素的存在，传感器节点在各方向移动单位距离产生的能耗有所差别。为与实际情况相符，定义传感器节点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴正、反方向移动单位距离能耗分别为  $\vec{C}_x, \vec{C}_{-x}, \vec{C}_y, \vec{C}_{-y}, \vec{C}_z, \vec{C}_{-z}$ ，可由矢量计算得到传感器节点  $s_i$  在任意方向上的移动单位距离能耗  $\vec{C}_i$ 。

**定义 4 网络移动能耗。**全网传感器节点自主移动消耗的总能量，用式(1)表示

$$\vec{C} = \sum_{i=1}^n \sum_{\forall d} |\vec{C}_i \times \vec{d}_i| \quad (1)$$

其中， $|\vec{d}_i|$  表示优化过程中节点  $s_i$  在某个方向上的移动距离； $dis_i$  表示  $s_i$  移动的总距离，即  $s_i$  在所有方向上移动距离的数值和， $dis_i = \sum_{\forall d} |\vec{d}_i|$ 。

为便于模型分析和求解，在符合实际应用场景，确保可实现性的前提下给出如下假设。

假设水下传感器节点具备辅助定位系统，能够知道自身位置及邻居节点位置，并通过信息交互获取所有邻居节点各自的邻居集合  $A(s_i)$ 。

### 2.2 问题描述

由于洋流等复杂环境因素造成 MUWSN 拓扑动态演化，逐渐降低了 MUWSN 网络性能。为通过优化网络拓扑以提高 MUWSN 性能，提出基于拓扑重构的水下移动无线传感器网络拓扑优化方法，以达到如下优化目标。

**目标 1** 调整 MUWSN 中传感器节点位置优化网络覆盖度。

**目标 2** 修复 MUWSN 拓扑不连通位置恢复网络连通性。

**目标 3** 消除 MUWSN 中关键节点以提高网络抗毁性。

## 3 问题描述和模型定义

图 1 所示为拓扑优化流程。整个拓扑优化过程主要分为 2 步：第 1 步，鱼群启发的 MUWSN 覆盖度优化；第 2 步，基于冗余节点修复的 MUWSN 连通性优化。

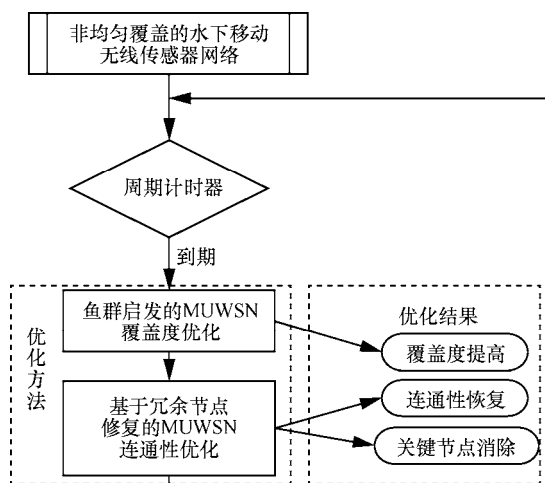


图1 拓扑优化流程

### 3.1 鱼群启发的 MUWSN 覆盖度优化

在鱼群启发的 MUWSN 覆盖度优化过程中,将传感器节点当作人工鱼,目标监测区域内的事件当作食物,传感器节点趋向于事件的过程相当于人工鱼寻找食物的过程,传感器节点模拟鱼群觅食、追尾和群聚行为,完成位置调整。人工鱼感知范围要大于通信范围,设置为  $visual$  (以人工鱼本身为球心,  $r^s$  为半径的球体范围),最大移动步长为  $l_{step}$ ,  $\vec{L}_i$  表示人工鱼  $s_i$  的当前位置,迭代次数为  $MaxIter$ 。

**定义 5 适应度。**对于目标监测区域中某传感器  $s_i$  来说,其适应度为以  $r^s$  为半径的球体范围内所覆盖的目标事件数,表示为

$$N_{sensor}(s_i) = |\{e_j \mid d(s_i, e_j) \leq r^s, j = 1, 2, \dots, m\}| \quad (2)$$

**定义 6 覆盖重数。**覆盖目标事件  $e_j$  的传感器个数,称为  $e_j$  的覆盖重数,表示为

$$K_{e_j} = \sum_{i=1}^n J(d(s_i, e_j) \leq r^s) \quad (3)$$

其中,  $J(\cdot)$  表示指示函数,当括号内条件成立时为 1,否则为 0。

**定义 7 拥挤度因子。**目标监测区域中某个位置附近允许的拥挤程度,称为该处的拥挤度因子,传感器  $s_i$  处拥挤度因子表示为

$$\delta(s_i) = \bar{K}_{deg} N_{sensor}(s_i) \quad (4)$$

其中,常数  $\bar{K}_{deg}$  为单个事件期望的覆盖重数,  $N_{sensor}(s_i)$  表示  $s_i$  覆盖范围内的事件数。

$N_{neigh}(s_i)$  表示  $s_i$  邻域内传感器节点数;

$N_{near}(s_i)$  表示  $s_i$  感知范围内传感器节点数。

鱼群启发的 MUWSN 覆盖度优化过程如下。

**Step 1**  $N_{sensor}(s_i) = 0$ , 分 3 种情况。

1)  $N_{neigh}(s_i) = 0$ , 执行觅食: 在人工鱼感知范围  $visual$  内,随机选择向任意方向移动不超过  $l_{step}$  的步长,新位置表示为

$$\vec{L}_i' = \vec{L}_i + \text{rand}(l_{step}) \frac{\vec{L}_i' - \vec{L}_i}{|\vec{L}_i' - \vec{L}_i|} \quad (5)$$

$\text{rand}(l_{step})$  表示 0 到最大步长  $l_{step}$  间的随机数。

若移动到  $\vec{L}_i'$  处  $N_{sensor}(s_i)$  增大,则觅食成功;否则觅食失败。

2)  $N_{neigh}(s_i) > 0$ , 进行追尾: 找出最优邻居节点  $s_b$ , 即  $s_b = \arg \max_{s_j \in A(s_i)} \{N_{sensor}(s_j)\}$ , 若  $N_{sensor}(s_b) > N_{sensor}(s_i)$  且  $N_{near}(s_b) < \delta(s_b)$ , 证明  $s_b$  覆盖事件数多于  $s_i$ , 且  $s_b$  处并不拥挤,则  $s_i$  向  $s_b$  处移动一步,执行

$$\vec{L}_i' = \vec{L}_i + \text{rand}(l_{step}) \frac{\vec{L}_b - \vec{L}_i}{|\vec{L}_b - \vec{L}_i|} \quad (6)$$

若移动到  $\vec{L}_i'$  处  $N_{sensor}(s_i)$  增大,则追尾成功;否则追尾失败。

3)  $N_{neigh}(s_i) > 1$ , 进行聚群: 用式(7)确定邻居节点中心  $s_c$  的位置

$$\vec{L}_c = \frac{\sum_{s_j \in A(s_i)} \vec{L}_j}{N_{neigh}(s_i)} \quad (7)$$

分别用式(8)和式(9)计算出中心位置  $s_c$  处的  $N_{sensor}(s_c)$  和  $N_{near}(s_c)$

$$N_{sensor}(s_c) = \frac{\sum_{s_j \in A(s_i)} N_{sensor}(s_j)}{N_{neigh}(s_i)} \quad (8)$$

$$N_{near}(s_c) = \frac{\sum_{s_j \in A(s_i)} N_{near}(s_j)}{N_{neigh}(s_i)} \quad (9)$$

若  $N_{sensor}(s_c) > N_{sensor}(s_i)$  且  $N_{near}(s_c) < \delta(s_c)$ , 证明  $s_c$  处事件数多于  $s_i$  所覆盖事件,且  $s_c$  处并不拥挤,则  $s_i$  向  $s_c$  处移动一步,执行

$$\vec{L}_i' = \vec{L}_i + \text{rand}(l_{step}) \frac{\vec{L}_c - \vec{L}_i}{|\vec{L}_c - \vec{L}_i|} \quad (10)$$

若移动到  $\vec{L}_i'$  处  $N_{sensor}(s_i)$  增大,则聚群成功;否

则聚群失败。

**Step 2**  $N_{\text{sensor}}(s_i) > 0$ ,  $s_i$  移动至所覆盖事件的中心位置, 然后按 Step 1 执行。

目标区域内每个传感器节点均按上述步骤执行, 共迭代  $MaxIter$  轮, MUWSN 覆盖度优化过程结束。

在此过程中, 每个节点都具备自控能力, 按照算法规则获取全局最优值。要求节点每次随机移动的步长不超过自身的感知范围, 保证觅食时不跳过任何一个事件, 且追尾和群聚时两点之间不会过分拥挤。

### 3.2 基于冗余节点修复的 MUWSN 连通性优化

将 MUWSN 中传感器节点分为 3 类: 关键节点、冗余节点、普通节点。关键节点是指将其移除会造成自身邻域拓扑出现连通分支的节点; 冗余节点是指将其移除不会造成自身邻域拓扑出现连通分支, 且不会形成新的关键节点; 除上述 2 种节点外的传感器节点均视为普通节点。

鱼群启发的 MUWSN 覆盖度优化完成后, 虽然网络覆盖度得到了优化, 但网络中可能存在不连通的位置及关键节点。利用网络中的冗余节点对不连通位置及关键节点进行修复, 使 MUWSN 连通性得到优化。

#### 3.2.1 计算节点邻域拓扑

由假设可知, 节点  $s_i$  知道自身位置信息和邻域内节点位置信息, 可计算得邻域拓扑  $\Phi(s_i) = G(A(s_i), E(s_i))$ 。以图 2 为例, 节点  $s_8$  知道节点  $s_9$ 、 $s_{10}$  的位置, 即可知链路  $e(s_8, s_9)$  和  $e(s_8, s_{10})$  的长度以及两条链路间的夹角, 再根据余弦定理、正弦定理即可计算出链路  $e(s_8, s_9)$  和  $e(s_9, s_{10})$  之间的夹角以及链路  $e(s_8, s_{10})$  和  $e(s_9, s_{10})$  之间的夹角, 并能够计算出  $s_9$  和  $s_{10}$  之间的距离, 进而判断出  $s_9$  和  $s_{10}$  是否存在链路。这样,  $s_8$  通过计算就能得到其邻域拓扑  $\Phi(s_8)$ 。

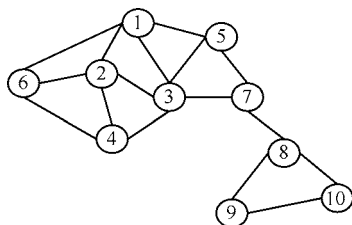
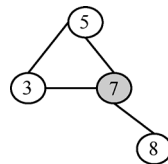


图2 网络拓扑示例

#### 3.2.2 判定关键节点和冗余节点

节点的邻域拓扑连通是保证该节点被移除后

网络拓扑仍然连通的充分条件。通过计算得到节点  $s_i$  的邻域拓扑  $\Phi(s_i)$ , 根据  $\Phi(s_i)$  可列出邻域内节点的可达矩阵, 如图 3 所示。可达矩阵形式化描述了邻域拓扑内各节点间的可达关系。



(a)  $s_7$  的邻域拓扑

$$A_7 = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_3 & S_5 & S_8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_3 \\ S_5 \\ S_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(b)  $s_7$  邻域内节点可达矩阵

图3  $s_7$  的邻域拓扑及邻域内节点可达矩阵

$A(s_i) = \{s_j | d(s_j, s_i) \leq r^c, j = 1, 2, \dots, n\}$  为节点  $s_i$  邻居节点集合, 建立临时集合  $T(s_i) = \emptyset$ , 根据  $s_i$  邻域内节点可达矩阵, 首先将矩阵中  $a_{ij} = 1$  对应的节点  $s_j$  加入集合  $T(s_i)$  中, 然后查看集合  $T(s_i)$  中所有节点  $s_k$  在可达矩阵中的  $a_{kj}$  值, 将  $a_{kj} = 1$  对应的节点  $s_j$  加入集合  $T(s_i)$ 。比较集合  $T(s_i)$  和  $A(s_i)$ , 若  $T(s_i) = A(s_i)$ , 则证明移除  $s_i$  其邻域拓扑仍连通,  $s_i$  不是关键节点, 继续对其进行冗余节点判定; 若  $T(s_i) \neq A(s_i)$ , 则证明节点  $s_i$  为关键节点, 对其进行标记。例如如图 3 中, 节点  $s_7$  的邻居节点集合为  $A(s_7) = \{s_3, s_5, s_8\}$ , 而  $T(s_7) = \{s_3, s_5\}$ ,  $T(s_7) \neq A(s_7)$ , 节点  $s_3$  和节点  $s_5$  属于一个连通分支, 而节点  $s_8$  为孤立节点, 因此, 节点  $s_7$  被判定为关键节点,  $s_7$  失效导致网络出现拓扑分割的概率较大。

在判定出  $s_i$  不是关键节点后, 再对其进行冗余节点判定。节点  $s_j$  为  $s_i$  的邻居节点, 其邻域拓扑为  $\Phi(s_j)$ , 将  $s_i$  从  $\Phi(s_j)$  中删除, 然后按判定关键节点的方法判定  $s_j$  是否为关键节点, 若是, 则证明移除  $s_i$  会生成新的关键节点, 因此  $s_i$  不是冗余节点; 否则,  $s_i$  为冗余节点, 对其进行标记。

#### 3.2.3 判定不连通位置

文献[13]提出一种水下传感器网络定位方法, 并通过海上实验对其有效性进行了验证, 这里采用该方法来判定网络中的不连通位置, 利用自主式水下航行器对监测区域进行巡视, 搜集传感器节点位置信息, 并通过计算来定位网络中的不连通位置。

#### 3.2.4 修复节点选择

从冗余节点中选取修复节点, 用于修复网络中不连通位置以及消除关键节点。修复节点选择过程如图 4 所示。

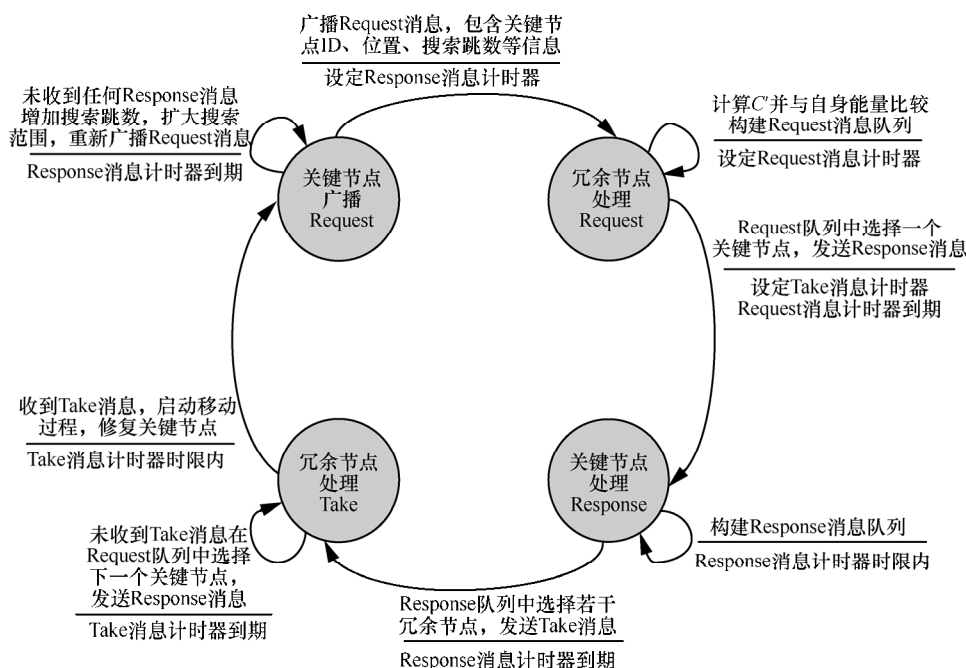


图4 修复节点选择过程示意

## 1) 发起修复请求 Request 消息

由关键节点  $s_i$  广播  $\text{Request}(s_i, L_i, \text{hops})$  消息, 包含关键节点 ID、位置、搜索跳数等信息, hops 为跳数计数器, 初始值由  $s_i$  设定,  $\text{Request}(s_i, L_i, \text{hops})$  消息每发送跳, hops 减 1, 直到 hops 变为 0,  $\text{Request}(s_i, L_i, \text{hops})$  消息不再被传递。

## 2) 冗余节点处理 Request 请求

搜索跳数内的冗余节点  $s_j$  收到  $\text{Request}(s_i, L_i, \text{hops})$  消息, 根据  $s_i$  位置信息  $L_i$  和自身位置  $L_j$ , 计算出  $s_i$  和  $s_j$  之间的距离  $d(s_i, s_j)$ , 再计算出  $C' = kd(s_i, s_j) \left| \overrightarrow{C_i} \right|$ , 其中,  $\left| \overrightarrow{C_i} \right|$  为  $s_j$  到  $s_i$  方向上移动单位距离能耗值,  $d(s_i, s_j) \left| \overrightarrow{C_i} \right|$  为移动能耗估算,  $k$  为调整系数, 用于控制冗余节点  $s_j$  移动至  $s_i$  处时剩余的能量。  $s_j$  比较  $C'$  与当前自身能量值, 若  $C'$  大于当前自身能量, 说明  $s_j$  没有足够能量移动至  $s_i$  处, 或即使移动至  $s_i$  处也无法继续正常工作, 则不保存  $\text{Request}(s_i, L_i, \text{hops})$  消息并将其转发; 若  $C'$  小于当前自身能量, 则查看消息列表是否之前收到过相同  $\text{Request}(s_i, L_i, \text{hops})$  消息, 若收到过则将其转发, 否则将其加入消息列表并转发, 直到 hops 减为 0, 丢弃该消息。

冗余节点  $s_j$  需要建立 Request 消息队列, 并设定 Request 消息计时器。Request 队列按照  $s_j$  到各

关键节点的距离由短到长构建。距离越短, 冗余节点到达关键节点的时间就越短, 相应完成局部拓扑修复的时间也就短, 用式(11)计算冗余节点  $s_j$  完成局部拓扑修复所需的时间

$$T_{\text{repair}} = T_{\text{comput}} D + \frac{\sum_{i=1}^D l_i}{v} \quad (11)$$

其中,  $D$  为冗余节点  $s_j$  移动总步数;  $T_{\text{comput}}$  为每次  $s_j$  计算移动方向耗费的时间;  $v$  为  $s_j$  移动速度;  $l_i$  为  $s_j$  第  $i$  次移动的步长;  $\sum_{i=1}^D l_i$  则表示  $s_j$  移动的总路程。

Request 消息计时器到期时从消息队列中选择一个 Request 消息, 向其发起者  $s_i$  回复  $\text{Response}(s_i, s_j, L_j)$  消息, 包含关键节点 ID、冗余节点 ID 以及冗余节点位置信息。

## 3) 关键节点处理 Response 消息

关键节点综合考虑冗余节点自身能量、移动距离及覆盖范围利用率构建 Response 队列, 并从队列中选择若干冗余节点, 向其发送 Take 消息。

关键节点在发送完 Request 消息后就设定了 Response 消息计时器, 如果计时器时间内关键节点未收到任何冗余节点返回的 Response 消息, 则扩大搜索范围, 增大 hops 初始值, 重新广播 Request 消息。

#### 4) 冗余节点处理 Take 消息

冗余节点在发送 Response 消息的同时便设定了 Take 消息计时器, 在计时器时间内冗余节点收到了 Take 消息, 则被选定作为发送该 Take 消息的关键节点的修复节点, 并启动移动过程。若计时器到期仍未收到 Take 消息, 则在 Request 消息队列中选择下一个关键节点, 发送 Response 消息, 并启动 Take 消息计时器。

用于修复不连通位置的修复节点选择过程与上述过程类似, 只是由发现该不连通位置的自主式水下航行器发起修复请求 Request, 并与冗余节点进行消息交互。

#### 3.2.5 虚拟力导向下修复节点移动

下面的描述中将网络不连通位置和关键节点位置统称为目标位置。当修复节点选定后, 开始向目标位置移动, 假设节点在此移动过程中受 4 种虚拟力作用: 目标位置的引力、邻居节点间的斥力、障碍物的斥力、随机扰力。

目标位置会对修复节点产生基于胡克定律的引力, 吸引修复节点向其移动; 单跳邻居节点间会产生基于库仑定律的斥力; 为避免移动过程出现碰撞, 修复节点移动路线上的障碍物会对其产生基于库仑定律的斥力; 随机扰力为调整算子, 用于避免修复节点陷入运动陷阱, 处于长期停止或往复运动的状态。假设目标位置为  $o$ , 修复节点为  $s_j$ , 各虚拟力分别表示为

$$\overrightarrow{F_a(o, s_j)} = -k_a \overrightarrow{d(o, s_j)} \quad (12)$$

$$\overrightarrow{F_r(s_i, s_j)} = \begin{cases} \frac{k_r m_i m_j}{d(s_i, s_j)^2}, & 0 < d(s_i, s_j) < r^c \\ 0, & d(s_i, s_j) \geq r^c \end{cases} \quad (13)$$

$$\overrightarrow{F_o(s_i, s_j)} = \begin{cases} \frac{k_o m_i m_j}{d(s_i, s_j)^2}, & 0 < d(s_i, s_j) < r^c \\ 0, & d(s_i, s_j) \geq r^c \end{cases} \quad (14)$$

$$\overrightarrow{F_w(s_j)} = \text{rand}(0, Q) \text{rand}(0, 360) \quad (15)$$

其中,  $k_a$ 、 $k_r$ 、 $k_o$  是比例系数;  $m_i$ 、 $m_j$  表示传感器节点质量,  $m_i = m_j$ ;  $\overrightarrow{d(o, s_j)}$  表示修复节点与目标位置间的欧式距离,  $\overrightarrow{d(s_i, s_j)}$  表示两节点间的欧式距离;  $Q$  为随机扰力的扰动幅度。

修复节点所受合力用式(16)表示, 当合力为 0

或与上一次合力方向相反时, 节点不移动, 若连续  $k_w$  次不移动, 则发生一次随机扰动, 随机产生移动步长和方向。

$$\overrightarrow{F} = \begin{cases} \sum_{s_j \in A(s_i)} \overrightarrow{F_r(s_i, s_j)} + \sum_{s_j \in \Delta(s_i)} \overrightarrow{F_o(s_i, s_j)} + \overrightarrow{F_a(o, s_j)} \\ \overrightarrow{F_w(s_j)}, & k_w = 3 \end{cases} \quad (16)$$

修复节点移动方程式为

$$P(t + \Delta t) = l \frac{\overrightarrow{F}}{|\overrightarrow{F}|} + P(t) \quad (17)$$

其中,  $P(t)$  为  $t$  时刻修复节点位置坐标,  $P(t + \Delta t)$  为经过  $\Delta t$  修复节点位置坐标,  $\overrightarrow{F}/|\overrightarrow{F}|$  为修复节点移动方向的单位向量,  $l$  为修复节点移动步长, 虚拟力导向下单位最大移动步长设为  $l_{\max}$ , 则  $l \leq l_{\max}$ 。修复节点在虚拟力导向下不断运动, 直到进入目标位置的通信范围, 完成局部拓扑修复任务。

对  $k_a$ 、 $k_r$ 、 $k_o$ 、 $l_{\max}$  等几个重要参数的选取进行说明:  $k_a$  为目标位置的引力系数, 为保证修复节点在较短时间内移动到目标位置通信范围内,  $k_a$  的值应设为 3 个比例系数中最大的; 而  $k_r$  和  $k_o$  分别表示单跳邻居节点间的斥力和障碍物的斥力, 障碍物仍为传感器节点, 为使修复节点能成功避开障碍物, 因此设置  $k_o > k_r$ 。修复节点单步最大移动步长  $l_{\max}$  的设置与人工鱼最大移动步长  $l_{\text{step}}$  的设置类似, 若设置过小, 会使移动次数增加, 从而导致能耗增加, 若设置过大, 会造成节点在移动过程中来回震荡, 由于都是传感器节点的移动, 为便于在整个优化方法中的统一, 设置  $l_{\max} = l_{\text{step}}$ 。

#### 3.2.6 覆盖范围填补

修复节点移走后虽然对网络拓扑连通性没有影响, 但可能会导致个别事件无法被覆盖, 影响网络覆盖度, 为填补修复节点移走后可能遗留的覆盖空白, 在保证网络拓扑不变的前提下, 基于虚拟力对修复节点原邻居节点位置进行微调。这个过程中原邻居节点受 2 种虚拟力作用: 基于胡克定律的修复节点原位置的引力、基于库仑定律的邻居节点间的作用力 (可能是引力也可能是斥力, 因节点距离大小而定)。设定最优距离  $d_{\text{opt}}$ , 当  $d_{\text{opt}} = 1.78r^s$  且  $r^c > 1.78r^s$  时, 传感器节点间距为  $d_{\text{opt}}$  既能保证连通性又能使覆盖达到最优<sup>[14]</sup>。2 种虚拟力表示为

$$\overrightarrow{F_b(o', s_i)} = -k_b \overrightarrow{d(o', s_i)} \quad (18)$$

$$\overrightarrow{F_c(s_i, s_j)} = \begin{cases} \frac{k_c m_i m_j}{d(s_i, s_j)^2}, & 0 < d(s_i, s_j) < d_{\text{opt}} \\ -\frac{k_c m_i m_j}{d(s_i, s_j)^2}, & d_{\text{opt}} < d(s_i, s_j) \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $k_b$ 、 $k_c$  是比例系数, 为使修复节点原邻域内节点向原修复节点位置移动, 应设置  $k_b$  大于  $k_c$ 。由于此过程中节点移动范围较小, 所以将  $k_b$ 、 $k_c$  设置为较小的量级。所受合力表示为

$$\overrightarrow{F_i} = \overrightarrow{F_b(o', s_i)} + \sum_{s_j \in \Lambda(s_i)} \overrightarrow{F_c(s_i, s_j)} \quad (20)$$

修复节点原邻域内节点在合力作用下进行位置调整, 填补修复节点移走后留下的覆盖空白, 防止网络覆盖度降低。

#### 4 实验仿真及结果分析

对基于拓扑重构的水下移动无线传感器网络拓扑优化方法, 采用 Monte Carlo 方法串行执行网络覆盖度优化、网络连通性恢复、网络抗毁性提高 3 步操作, 进行 100 轮仿真实验, 利用 Matlab 仿真工具对实验数据进行分析。实验环境设置如下: 400 m×400 m×400 m 的水下监测区域, 不均匀部署 50 个目标事件, 由 20 个传感器构成的 MUWSN 对目标事件实施监测, 在 MUWSN 中加入 5 个自主式水下航行器, 传感器和目标事件受洋流模型<sup>[15]</sup>影响产生位置变化, 表 1 为实验参数设置, 每隔 1 h 触发 1 次优化。比例系数  $k_a$ 、 $k_r$ 、 $k_o$ 、 $k_b$ 、 $k_c$  分别设置为  $10^6$ 、 $10^2$ 、 $10^4$ 、 $10^4$ 、 $10^2$ , 各方向单位能耗  $\overrightarrow{C_x}$ 、 $\overrightarrow{C_{-x}}$ 、 $\overrightarrow{C_y}$ 、 $\overrightarrow{C_{-y}}$ 、 $\overrightarrow{C_z}$ 、 $\overrightarrow{C_{-z}}$  分别设置为  $\overrightarrow{C_x} = \overrightarrow{C_{-x}} = 5 \times 10^{-2}$  J,  $\overrightarrow{C_y} = \overrightarrow{C_{-y}} = 2 \times 10^{-2}$  J,  $\overrightarrow{C_z} = \overrightarrow{C_{-z}} = 8 \times 10^{-2}$  J,  $\overrightarrow{C_{-z}} = 1 \times 10^{-2}$  J。

表 1 实验参数设置

符号	描述	取值
$r^s$	传感器感知半径	40 m
$r^c$	传感器通信半径	60 m
$V_t$	水下声传播速度	1 500 m/s
$v$	传感器节点移动速度	3 m/s
$e$	传感器节点初始能量	30 J
$Q$	扰动幅度	18 m
$l_{\text{step}}$	人工鱼最大移动步长	15 m
$l_{\text{max}}$	修复节点最大移动步长	15 m
Interval	优化周期计时器	60 min

现与文献[11]分别进行 3 组对比实验: 实验 1, 覆盖度优化对比实验; 实验 2, 覆盖度优化后的出现关键节点的情况对比; 实验 3, 连通性恢复情况对比; 实验 4, 对整个基于拓扑重构的 MUWSN 优化方法完成后网络性能进行分析。

实验 1 覆盖度优化分析对比。图 5 为执行优化算法后, 覆盖度随时间逐渐增加的变化曲线。实线是采用本文鱼群启发优化算法后的效果, 虚线是文献[11]采用粒子群算法优化部署后的效果。可以看出, 文献[11]优化后的覆盖度最终数值要稍逊于本文算法。这是因为本文采用的鱼群算法全局搜索能力强, 能够求得全局极值。但两者都能达到近似最优, 保证覆盖度在 95% 以上, 且文献[11]能够较早地达到覆盖度最优。这是因为文献[11]采用的粒子群优化算法获取局部最优值较快, 能够较早收敛。

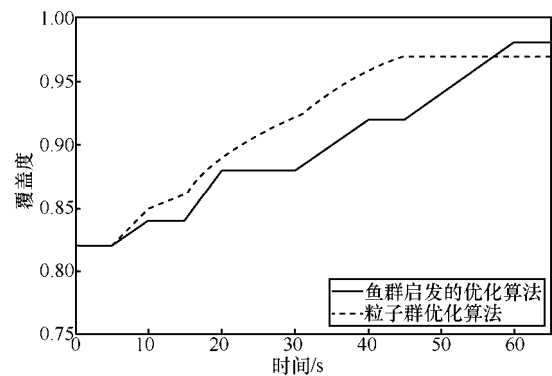


图 5 优化过程中覆盖度曲线变化

实验 2 覆盖度优化后的出现关键节点的情况对比。设置实验情景如下: 事件数由 50 逐渐增长至 70, 分别设置 20 个、25 个、30 个传感器节点数。在这 3 种情景下进行本文鱼群启发的 MUWSN 覆盖度优化及文献[11]粒子群优化部署, 统计 100 轮实验中存在关键节点的实验次数, 如图 6 所示。可以看出, 随着事件数目的增多, 存在关键节点的实验次数大幅减少, 这是由于在 2 种覆盖度优化算法执行的过程中, 传感器总是向着事件密度高的地方移动, 在稀疏的地方增布事件后, 事件分布密度较之前更加均匀, 相应的传感器节点部署也更加均匀。但因粒子群算法容易陷入局部最优, 如图中多次深度拐点所示, 故整体结果差于鱼群启发优化算法。

另外, 图 6 中显示, 传感器节点设为 25 个时, 整体效果最优。这是因为在事件数目不变时, 传感器节点数目较少难以均匀覆盖, 增加过多又因为事件分布密度的不均匀, 导致相应传感器节点部署也

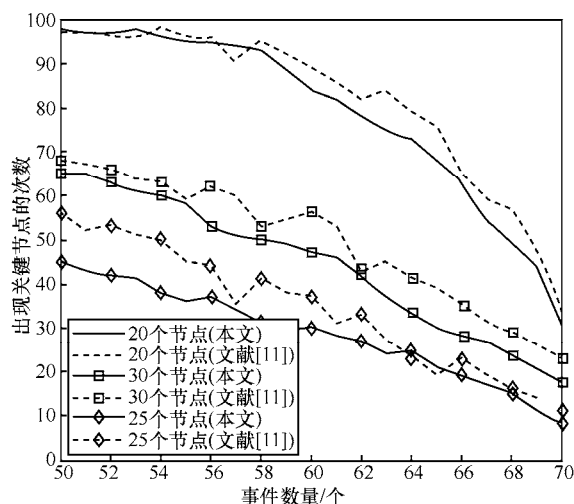


图6 存在关键节点情况的实验次数统计

不均匀，仍然容易出现关键节点。

**实验3 连通性恢复情况对比。**首先验证本文提出的基于冗余节点修复的MUWSN连通性优化。设置事件数50，传感器节点数20，用冗余节点对覆盖度优化后的网络连通性进行修复，在100次重复实验中网络连通性均得到了恢复，图7为随机抽取的4次实验连通性恢复曲线。

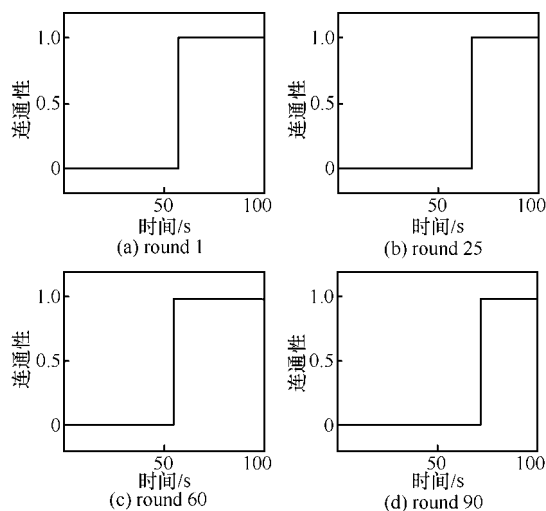


图7 随机抽取的实验轮次连通性恢复曲线

图8给出500 s的时间内2种连通性优化算法的实验结果变化曲线。

文献[11]在上述实验背景下，另设置了8个AUV自移动节点，当出现不连通情况时，采用自移动节点进行修补。图8(a)中可以明显看出，除了修补初始化时耗费近40 s的时间外，其他情况都只耗费10 s左右的时间，很快实现连通性的愈合。但由于文献[11]没有对关键节点进行消除，网络抗

毁性较弱，容易出现不连通情况，甚至在AUV修复之后，受洋流影响出现位置偏差，导致网络断开，需要再次修复，如在240 s左右图线所示。而本文算法虽然在初始修复时耗时较长（100次重复实验中平均耗费55 s左右），但由于消除了关键节点，提升了网络抗毁性，在水下洋流及各类生物的影响下不易出现网络断开现象<sup>[16]</sup>。图8(b)中给出了基于冗余节点修复的MUWSN在500 s内未出现网络不连通情况。因此，在500 s的实验过程中，文献[11]优化后的网络连通率为 $372/500=74\%$ ，而本文算法优化后网络的连通率为 $445/500=89\%$ 。且实验时间越长，本文优化算法的优势愈加明显，具有较好的扩展性。

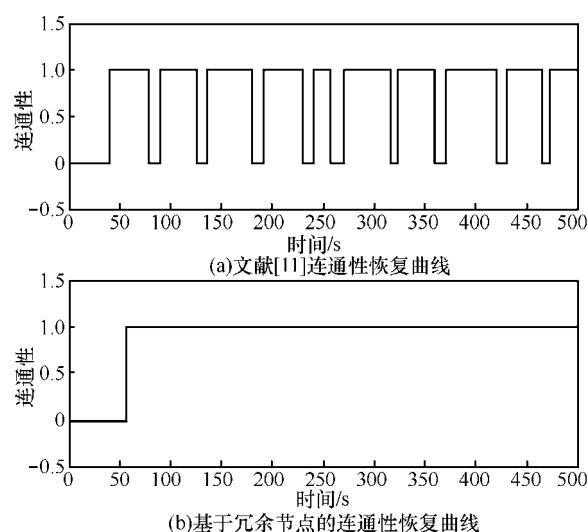
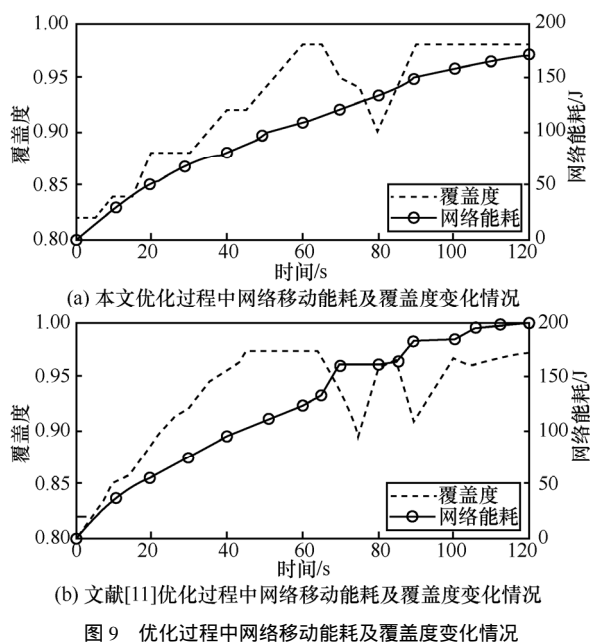


图8 连通性恢复变化曲线

**实验4 基于拓扑重构的MUWSN优化方法执行完毕，分析MUWSN网络性能。**

图9(a)给出优化过程中MUWSN覆盖度及网络移动能耗变化情况，可以看出，覆盖度曲线从执行优化方法开始即呈上升趋势，60 s附近达到峰值，接着在短时间内下降到了0.9以下，到85 s附近又回到了峰值处，并在之后保持在了该值处，这是由于60 s附近时鱼群启发的覆盖度优化过程已经运行完毕，MUWSN覆盖度得到了优化，但在随后进行的连通性优化过程中，由于修复节点离开原有位置向失效位置移动，其原覆盖范围出现了部分覆盖空白，从而使MUWSN网络覆盖度稍有下降，但随着修复节点原邻域内节点对其覆盖范围进行填补，网络覆盖度立刻得到了恢复。





对于网络能耗来说,在鱼群启发的覆盖度优化阶段,由于进行移动的传感器数量很多,因此网络移动能耗曲线斜率较大;而在连通性优化过程中,只有少数修复节点及其领域内节点进行移动,而且这些领域内节点的移动幅度较小,因此在这个过程中网络移动能耗较小,曲线斜率明显降低。整个网络移动能耗在110 s附近逐渐停止增长,表明优化方法执行完毕。

图9(b)给出文献[11]优化过程中MUWSN覆盖度及网络能耗变化情况,可以看出,覆盖度曲线在45 s附近即达到峰值,但覆盖度稍弱于本文算法,这部分已经在实验1做相关讨论。接着在65 s时进行连通性恢复。可以看出在连通性恢复过程中,覆盖度值有所下降,这是由于AUV节点离开原有位置向失效位置移动。同时,AUV节点耗能大,使得网络能耗有明显的上升趋势。且由于网络抗毁性较弱,需多次进行连通性修复,累计能耗增加较快,出现多个波峰。整个网络能耗达到200 J后仍有增长趋势,表明网络对连通性的持续修复。

## 5 结束语

优化问题是水下移动无线传感器网络领域的一个研究热点,本文从网络拓扑角度出发,提出了一种基于拓扑重构的水下移动无线传感器网络优化方法,其目的是为解决拓扑受洋流等环境因素影响动态演化使网络性能逐渐降低这一问题。该方法不仅通过模拟鱼群行为调整传感器节点位置,优化了网络覆盖度,还利用冗余节点修复了网络中不连

通位置,消除了关键节点,优化了网络连通性。仿真实验表明,相对于仅采用人工鱼群算法或粒子群算法进行优化的情况,本文所提方法在优化了网络覆盖度的同时还保证了全网连通性,并增强了网络抗毁性,使网络性能得到了提高。

## 参考文献:

- [1] CAO J B, DOU J F, SHUNLE D. Design and development of heterogeneous underwater sensor networks[A]. Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), 2013 IEEE Ninth International Conference on[C]. 2013. 425-430.
- [2] HEIDEMANN J, STOJANOVIC M, ZORZI M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2012, (370):158-175.
- [3] 何明, 梁文辉, 陈国华等. 水下移动无线传感器网络拓扑[J]. 控制与决策, 2013, 28(12): 1761-1770.
- HE M, LIANG W H, CHEN G H, *et al.* Topology of mobile underwater wireless sensor networks[J]. Control and Decision, 2013, 28(12): 1761-1770.
- [4] MOUFTAH EROL K, OKTUG S. A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Commun Surv Tutor, 2011, 13(3):487-502.
- [5] 付华, 韩爽. 基于新量子遗传算法的无线传感器网络感知节点的分布优化[J]. 传感技术学报, 2008, 21(7):1259-1263.
- FU H, HAN S. Optimal sensor node distribution based on the new quantum genetic algorithm[J]. Journal of Sensor and Actuators, 2008, 21(7): 1259-1263.
- [6] AZIZ A A, AHMET Y S, *et al.* A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1):121-144.
- [7] 王雪, 王晟, 马俊杰. 无线传感网络移动节点位置并行微粒群优化方法[J]. 计算机学报, 2007, 30(4):563-568.
- WANG X, WANG S, MA J J. Parallel particle swarm optimization based mobile sensor node deployment in wireless sensor networks[J]. Journal of Computers, 2007, 30(4): 563-568.
- [8] 米志超, 周建江. 带约束的多目标优化的无线传感器网络路由算法[J]. 应用科学学报, 2008, 26(3):239-243.
- MI Z C, ZHOU J J. A multi-object optimization routing algorithm with constraint for wireless sensor networks[J]. Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 2008, 26(3): 239-243.
- [9] 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[A]. 2013 Eighth International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications. Compiegne[C]. 2013.93-99.
- [10] 夏娜, 王长生, 郑榕等. 鱼群启发的水下传感器节点布置[J]. 自动化学报, 2012, 38(2):295-302.

XIA N, WANG C S, ZHENG R, *et al.* Fish swarm inspired underwater sensor deployment[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(2): 295-302.

- [11] MANJULA R B, SUNILKUMAR MANVI S. Coverage optimization based sensor deployment by using PSO for anti-submarine detection in UWASNs[C]. Ocean Electronics (SYMPOL), 2013.15-22.

- [12] 刘军, 于耕, 张慧鹏. 基于节点控制的空间信息网络拓扑重构算法[J]. 电子学报, 2011, 39(8): 1837-1844.

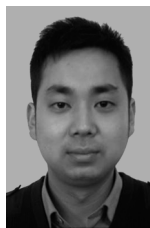
LIU J, YU G, ZHANG H P. A topology reconfiguration algorithm through node position control for space information networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(8): 1837-1844.

- [13] LUO H J, GUO Z W, DONG W, *et al.* LDB: localization with directional beacons for sparse 3D underwater acoustic sensor network[J]. Journal of Networks, 2010, 5(1): 28-38.

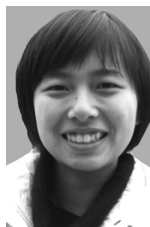
- [14] ALAM S N, HAAS Z. Coverage and connectivity in three-dimensional networks[A]. The 12th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'06)[C]. Los Angeles, CA, 2006.

- [15] PAPARELLA C A, LFM VIEIRA, *et al.* The meandering current mobility model and its impact on underwater mobile sensor networks[A]. Proc of INFOCOM 2008[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2008.221-229.

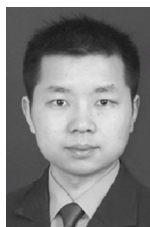
- [16] SHEN J, TAN H W, WANG J, *et al.* A novel routing protocol providing good transmission reliability in underwater sensor networks[J]. Journal of Internet Technology, 2015, 16(1): 171-178.



梁文辉 (1986-), 男, 甘肃平凉人, 解放军理工大学硕士生, 主要研究方向为水声传感器网络。

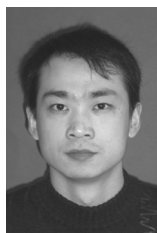


陈秋丽 (1990-), 女, 湖北宜城人, 解放军理工大学硕士生, 主要研究方向为水声传感器网络。

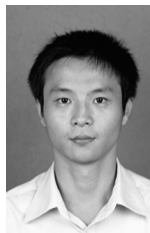


陈希亮 (1985-), 男, 湖北十堰人, 解放军理工大学讲师, 主要研究方向为建模与仿真。

#### 作者简介：



何明 (1978-), 男, 新疆石河子人, 博士, 解放军理工大学副教授, 主要研究方向为物联网、水声传感网、无线传感网可靠性。



陈剑 (1980-), 男, 江西萍乡人, 博士, 解放军理工大学讲师, 主要研究方向为移动互联网、移动自组织网络、无线局域网、无线网状网等。