

# 网络分层的水下传感器网络覆盖保持路由算法

蒋 鹏, 王兴民

(杭州电子科技大学自动化学院, 浙江杭州, 310018)

**摘 要:** 在以监测为目的的水下传感器网络中, 较好的网络覆盖率和连通率是完成监测任务的重要保证. 以改善覆盖效果为目标的水下覆盖保持路由算法 NCPR 算法相对比 LEACH-Coverage-U 算法有效的延长了网络覆盖时间, 但是该算法连通性表现较差, 同时存在靠近 SINK 节点的簇首由于需要转发大量数据而过早死亡的问题. 本文提出一种分布式的网络不均匀分层的覆盖保持路由 (Network Unevenly Layered Coverage Preserving Routing, NULCPR) 算法, 由 SINK 节点开始逐层向下建立网络, 同时每层网络节点通信半径也随层号增加而逐渐增大. 每层网络独立运行 NCPR 算法以使该层节点成簇, 并通过簇首向上建立连通链路以保证网络连通. 仿真结果表明, 与 NCPR 算法相比, NULCPR 算法提高了网络连通率以及覆盖率, 并且降低了网络能耗, 证明了该算法的有效性.

**关键词:** 水下传感器网络; 覆盖保持路由; 网络分层

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2016)05-1240-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.05.033

## Network Layered Coverage Preserving Routing Algorithm for Underwater Sensor Networks

JIANG Peng, WANG Xing-min

(College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** In the underwater sensor networks for underwater environment monitoring application, a network with sufficiently high coverage and connectivity rate is the guarantee of accomplishing the monitoring task. The NCPR algorithm, which is a underwater coverage preserving routing algorithm and oriented to improve the coverage performance, can effectively prolong the coverage time of the networks compared to the LEACH-Coverage-U algorithm. However, the connectivity performance of NCPR is defective, and in the algorithm there exist such a problem that the cluster heads close to the SINK node may die faster than other nodes because of the frequently forwarding of data. In this paper, we propose a distributed network unevenly layered coverage preserving routing algorithm (NULCPR) to improve the performance of NCPR. The network is established from SINK layer by layer, and the communication range of nodes increase with the layer departures from SINK. Each layer executes the NCPR algorithm independently to cluster the nodes in this layer, and the cluster node is used to establish a connective link to maintain the connectivity of the networks. The simulation results show that comparing with NCPR, NULCPR improves the connectivity and coverage rate of the networks, and makes the energy efficiency better.

**Key words:** underwater sensor network; coverage preserving routing; network layering

### 1 引言

水下传感器网络 (Underwater Sensor Networks, UWSNs) 是由具有声学通信与计算能力的传感器节点构成的水下监测网络系统, 可应用于水环境监测、资源勘测、辅助导航和战术监视等领域<sup>[1,2]</sup>, 目前 UWSNs 已引起了各国政府和研究机构的关注, 成为当前研究热点之一. UWSNs 的研究主要涉及水下通信技术、网络协议、覆盖控制、定位跟踪、时间同步<sup>[3-5]</sup>等方面. 其中, 网络覆盖控制作为一项基础性工作, 直接影响到网络对

目标的覆盖效果, 网络生存时间以及传感器管理等各种服务质量. 因此, 如何设计覆盖控制方法是一个关键问题.

根据关注阶段的不同, 可将现有水下传感器网络覆盖控制方法分为如何部署传感器节点和节点部署完成后如何设计相关协议以保持网络覆盖. 其中, 如何部署传感节点是指通过人工或者节点自组织的方式移动节点到某个具体位置, 最终形成具有一定特性的网络拓扑结构<sup>[6-9]</sup>. 针对网络覆盖保持, 多是通过设计某种

路由算法或者节点调度策略以延长网络覆盖时间. 在陆地传感器网络的路由算法中, 已经有一些相关研究<sup>[10-15]</sup>, 如 Meng 等人<sup>[13]</sup> 设计了一个选取最小工作节点保证网络覆盖质量和网络连通性的调度控制算法. Fan 等人<sup>[14]</sup> 设计了基于容忍覆盖区域的节点调度算法, 以缓解在传统节点调度算法中出现的边界区域节点过早死亡问题. 但是在水下传感器网络路由算法设计中, 大都以“能量”为度量选举簇首或者根据水下特性设计分簇算法, 未将“覆盖”作为考虑因素, 忽略了簇首因能量耗尽对监测区域覆盖效果的影响, 网络运行期间很难保证网络覆盖率. Jiang 等人<sup>[19]</sup> 在研究陆地传感器网络覆盖保持路由算法的基础上针对水下传感器网络提出一种覆盖保持路由算法 NCPR 算法. 相对比 LEACH-Coverage-U<sup>[18]</sup> 算法, 该算法提高了网络覆盖率, 延长了网络生命周期. 但是该算法在使用时有局限性: 当节点通信半径受限时, 该算法网络连通性表现较差, 同时存在靠近 SINK 节点的簇首由于需要转发大量的数据而过早死亡的问题. 针对上述问题, 本文提出一种分布式网络不均匀分层的覆盖保持路由算法 (Network Unevenly Layered Coverage Preserving Routing, NULCPR), 空间上从 SINK 节点开始向外逐级建立网络, 构建一个逻辑上以 SINK 节点为根向下的树形拓扑结构. 节点离 SINK 越远, 则在这个树形拓扑结构中所处的层级也越靠下. 每层独立运行 NCPR 算法完成簇首选举, 每层簇首与上层的节点建立连通链路以保证网络连通. 同时每层节点的通信半径随着网络层数的增加而逐渐增大. 这样使得靠近 SINK 节点的区域节点通信半径小, 簇密度大, 距离 SINK 节点较远的区域, 节点通信半径大, 簇密度小, 通过这样的方式均衡网络能耗, 延长网络生存时间. 仿真结果表明, 与 NCPR 算法相比, NULCPR 算法提高了网络连通率以及网络覆盖率, 并且降低了网络能耗.

## 2 相关模型与定义

### 2.1 网络模型

假设所有传感器节点随机均匀的部署在水下监测区域内, SINK 节点随机部署在监测区域水面上, 节点一入水就抛锚固定自身的位置. 节点之间使用声学方式通信. SINK 节点和地面监测站之间采用无线电波通信. 同时网络还存在以下假设:

(1) 节点采用布尔感知模型, 即若任意节点  $i$  的感知半径为  $R_s$ , 则节点  $i$  的感知区域是以该节点所在位置为圆心、 $R_s$  为半径的球体;

(2) 除 SINK 节点外所有节点都是同构的, 具备数据融合的功能且每个节点都有唯一的标识 (ID);

(3) 节点可调节其发射功率.

### 2.2 能耗模型

本文采用以声波为媒介的水下传感器网络数据通信能耗模型<sup>[20]</sup>, 首先给出水下声信号衰减模型  $A(d)$ :

$$A(d) = d^\lambda \alpha^d \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为能量扩散因子 (圆柱形扩散为 1, 实际情况为 1.5, 球形扩散为 2), 参数  $\alpha = 10^{a(f)/10}$ , 由吸收系数<sup>[13]</sup>  $\alpha(f)$  决定,  $f$  为载波频率, 单位为 kHz, 吸收系数的单位为 dB/m.

$$10 \log \alpha(f) = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f} + 2.75 * 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (2)$$

节点消耗的能量为:

$$E = E_{send} + E_{rec} + E_{intg} \quad (3)$$

$$E_{send} = l P_0 A(d), E_{rec} = l P_r, E_{intg} = l E_{da} \quad (4)$$

其中,  $E_{send}$  为发送数据能耗,  $E_{rec}$  为接收数据能耗,  $E_{intg}$  为数据融合能耗,  $d$  为发送节点与目标节点之间的距离,  $P_r$  是常数, 表示节点接受 1bit 数据消耗的能量,  $l$  表示数据包大小.  $P_0$  为节点可以接收到单位数据包需要的最小功率<sup>[21]</sup>.

### 2.3 覆盖冗余度 (CR)

节点  $i$  的覆盖冗余度定义为它的一跳通信范围内节点 ( $neighbour(i)$ ) 的感知区域与该节点感知区域重叠部分的体积占其感知区域体积的比值. 表示为:

$$\gamma(i) = \frac{\text{volume}(\left(\bigcup_{i \in neighbour(i)} a_j\right) \cap a_i)}{\text{volume}(a_i)} \quad (5)$$

其中,  $a_i$  表示节点  $i$  的感知区域. 计算如下式所示:

$$\gamma(i) = 1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{2 \left[ \frac{2}{3} \pi \left(R_s^3 - \frac{d_u^3}{8}\right) - \frac{\pi d_u}{2} \left(R_s^2 - \frac{d_u^2}{4}\right) \right]}{\frac{4}{3} \pi R_s^3}\right) \quad (6)$$

其中,  $n$  为节点  $i$  邻居节点个数,  $R_s$  为节点感知半径.  $d_u$  为邻居节点  $l$  与节点  $i$  之间的距离.

## 3 问题描述与算法描述

### 3.1 问题描述

基于分簇的传感器网络中, 当簇首以单跳或者多跳的通信方式将数据传输到 SINK 节点时, 由于簇首转发大量数据而负载过重, 容易过早耗尽能量而死亡, 这将导致提前出现覆盖盲区. 针对该问题, Jiang 等人<sup>[19]</sup> 在 Tsai 等人<sup>[18]</sup> 的基础上针对水下传感器网络提出一种覆盖保持路由算法 NCPR, 文中首先定义了三维空间中节点的覆盖冗余度, 该指标表征了节点的感知区域被邻居节点覆盖的程度, 覆盖冗余越大的节点死亡后对网络覆盖率的影响越小, 然后文章提出一种覆盖保持

路由算法,主要步骤归纳如下:

### (1) 初始化阶段

网络初始时,每个节点根据其与邻居节点的距离计算 CR,与邻居节点的距离可通过 RSSI 或者 TOA 方式获得,然后每个节点根据 CR 设定自身等待时间

$$T_i = (1 - r(i)) + \text{rand}(0, a) \quad (7)$$

其中,  $a$  为一随机数. 由式(7)可以看出, CR 大的节点将率先声明为簇首,同时其他节点加入距离自身最近的簇首以减少通信能耗,然后进入稳定工作阶段.

### (2) 稳定工作阶段

初始化阶段结束后,簇首为簇内成员分配各自的 TDMA 时隙,簇内成员在各自分配的时隙内以单跳的方式将采集到的数据发送至簇首,簇首对数据进行融合处理后将数据发送至 SINK 节点. 当一轮数据传输工作完成后,若未出现死亡节点,则继续以上一轮选举的簇首进行数据传输. 如出现死亡节点则重新选举簇首.

相比于 LEACH-Coverage-U<sup>[18]</sup> 算法,该算法降低了网络能耗,提高了网络覆盖率,延长了网络生命周期. 但是当节点通信半径受限时,该算法网络连通性较差,簇与簇之间,以及簇与 SINK 节点之间有可能不能连通,导致局部网络中断,严重时,整个网络都将中断. 同时由于靠近 SINK 节点的节点要转发大量的数据,很容易过早死亡. 这同样会造成网路中断导致网络寿命缩短.

针对上述问题,本文提出一种分布式的网络不均匀分层的覆盖保持路由算法,空间上从 SINK 节点开始向外逐级建立网络,构建一个逻辑上以 SINK 节点为根向下的树形拓扑结构. 节点离 SINK 越远,则在这个树形拓扑结构中所处的层级也越靠下. 每层独立运行 NCPR 算法完成该层簇首选举,然后簇首与上层网络节点建立连通链路维持层与层之间的连通. 同时每层节点的通信半径随着网络层数的增加而增大. 这样使得靠近 SINK 节点的区域节点通信半径小,簇密度大,距离 SINK 节点较远的区域,节点通信半径大,簇密度小. 通过这样的方式均衡网络能耗,延长网络生存时间.

## 3.2 算法描述

NULCPR 算法分为两个阶段,网络建立阶段和稳定工作阶段. 初始时,所有节点层号设置为总节点数加一.

### (1) 网络建立阶段

(a) SINK 节点以最大广播半径 ( $max\_br$ ) 广播消息(节点号,所属层号),如节点能够接收到消息,说明该节点在 SINK 节点的一跳通信范围内,那么该节点将 SINK 节点设置为自身的簇首节点,同时设置自身层号为 1 ( $node(i).level = 1$ ),广播半径 ( $node(i).br$ ) 为  $initial\_range$  (初始半径,仿真时设定),如图 1(a) 所示. 设置完成后,进行下一步.

(b) 步骤(a)中设置完成的节点  $i$  以广播半径广

播消息,接收到该消息的节点  $j$ ,检查自身层号,若大于节点  $i$  的层号,即 ( $node(j).level > node(i).level$ ),则将自身所属层号设置为  $node(i).level + 1$ ,广播半径以及所属层半径 ( $range(node(j).level)$ ) 大小设置为  $node(i).br$ . 等待一段时间后,新一层网络的节点选择完成,然后该层的节点开始运行 NCPR 算法进行簇首选举,簇首选举完成后(如图 1(b) 所示),该层所有节点更新广播半径为  $node(j).br = range(node(j).level) + initial\_range$ ,接着进行下一步,簇首向上建立连通链路.

(c) 步骤(b)中选出的簇首节点  $k$  以广播半径广播消息,接收到消息的节点,检查自身的层号,若层号等于  $node(k).level - 1$ ,则应答此消息. 簇首节点接收到反馈信息后,选择其中覆盖冗余度值最大的节点作为下跳节点(称该节点为连通节点),如图 1(c) 所示. 若没有任何消息返回,并且此时  $node(k).br < max\_br$ ,则簇首以半径  $max\_br$  重新广播消息. 若依然没有节点信息返回,则说明该簇首是孤立的,那么该簇首通知簇内节点恢复离散状态并且不再参与簇首的选举,接着恢复离散状态的节点重新运行 NCPR 算法,选举出新的簇首,并重新向上选择连通节点. 该层所有簇首完成连通节点选择后,跳至步骤(b)开始下层节点的选取直到网络中所有节点完成调整. 不同的是,在步骤(b)中完成该层簇首选举后将节点  $j$  广播半径更新为  $node(j).br = \min(range(node(j).level) + range(node(j).level - 1), max\_br)$ .

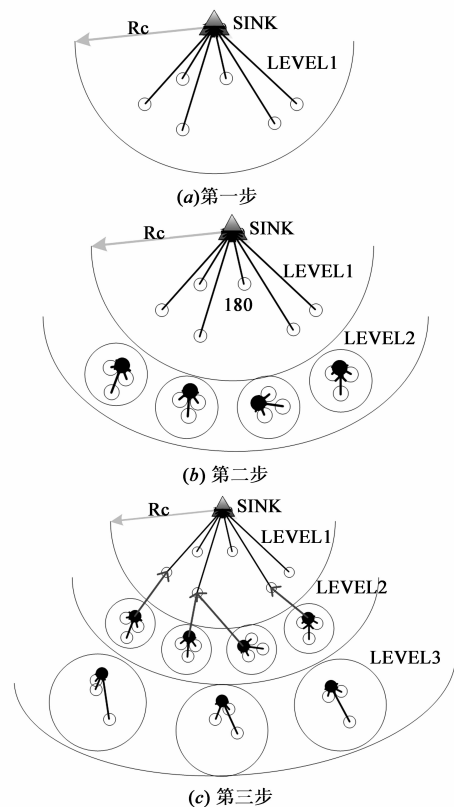


图1 网络建立示意图

## (2) 稳定工作阶段

网络建立阶段结束后,节点开始进入稳定工作阶段.当节点能量值低于阈值  $E_0$ ,说明该节点死亡,这时进入网络重建阶段,根据死亡节点类型分为四种情况处理:

(a) 如死亡的节点是普通簇内节点,邻居节点将该节点从邻居链表中删除并且簇首节点将该节点从簇内集合中删除.

(b) 如果死亡节点是簇首节点并且不是连通节点,则其簇内节点恢复离散状态,加入距离自己最近的簇首,若一跳通信范围内没有簇首,则运行 NCPR 算法选择簇首,并执行网络建立阶段步骤(c)向上建立连通链路.

(c) 如果死亡的节点是连通节点且为簇内节点,则首先执行稳定工作阶段中步骤(a),然后通知以该节点为下跳节点的簇首节点重新选择下跳节点.

(d) 如死亡的节点是连通节点且为簇首节点,则首先按照死亡节点是普通簇首节点处理,然后按照死亡节点是连通节点处理.

## 4 算法复杂度分析

在这一小节,我们从时间复杂度和消息复杂度两个方面对本文算法进行复杂度分析,相关符号说明如表 1 所示.

表 1 相关符号说明

| 参数          | 符号表示             |
|-------------|------------------|
| 监测区域水深(m)   | $depth$          |
| 声音传播速度(m/s) | $v$              |
| 最大广播半径(m)   | $max\_br$        |
| 初始广播半径(m)   | $initial\_range$ |
| 总节点数目(个)    | $total\_node$    |
| 总簇头数目(个)    | $total\_cluster$ |

### 4.1 时间复杂度分析

因为 NULCPR 算法是从上往下逐层建立网络,所以网络建立完成时间取决于每层网络建立所需要时间和网络总层数.

每层网络的建立主要由以下几步组成:

(1) 确定属于该层网络的节点,这最长需要时间  $max\_br/v$ .

(2) 节点等待时间,为确保该层网络中所有节点都确认完毕,时间设置为  $max\_br/v$ .

(3) 节点确认并等待一段时间后,开始运行 NCPR 算法进行该层网络成簇.节点首先广播自身信息,节

点根据接收到的信息选择出簇首,并广播信息申请加入.簇首节点接收申请加入信息后发送应答消息.这一过程需要三次通信.因此最多需要时间  $max\_br/v * 3$ .

(4) 每层网络成簇后,由簇首向上建立连通链路.这同样需要三次通信,最多需要时间  $max\_br/v * 3$ .因此每层网络建立最多需要时间  $(max\_br/v + max\_br/v + max\_br/v * 3 + max\_br/v * 3) = max\_br/v * 8$ .网络中总层数最多为  $depth/max\_br - 1 + max\_br/initial\_range$ ,若我们取  $initial\_range = 1/m * max\_br$ ,那么网络总层数最多为  $depth/max\_br - 1 + m$ .因此,完成整个网络建设最多需要时间  $(depth/max\_br - 1 + m) * (max\_br/v * 8) = 8 * (depth/v - max\_br/v + m * max\_br/v)$ ,复杂度为  $O((depth + (m - 1)max\_br)/v)$ .

### 4.2 消息复杂度分析

由于发送消息能耗远远大于接收消息能耗.因此,这里只讨论发送消息的复杂度.

在 NULCPR 算法中,消息发送主要涉及三个部分.

(1) 上层网络节点发送消息已确定下层网络节点.该部分整个网络需要发送  $total\_node$  个消息.

(2) 每层网络节点运行 NCPR 算法,使得本层网络成簇.因为节点间需要三次通信,因此总共需要发送消息数  $total\_node * 3$ .

(3) 由每层簇首向上建立连通链路,这需要发送消息数  $total\_cluster + total\_node + total\_cluster + total\_cluster = total\_node + total\_cluster * 3$ .因此建立网络总的发送数目为  $total\_node + total\_node * 3 + total\_node + total\_cluster * 4$ ,而  $total\_cluster < total\_node$ ,因此发送消息数目小于  $total\_node * 8$ ,复杂度为  $O(total\_node)$ .

## 5 仿真算例与性能分析

### 5.1 仿真场景以及参数设置

为了分析 NULCPR 算法的有效性.对 NULCPR 算法以及 NCPR 算法的网络剩余能量,网络覆盖率,网络连通率等指标进行仿真对比和分析.覆盖率和连通率定义如下.

覆盖率:处于活跃状态的节点的感知区域与监测区域体积的比值.

连通率:至少拥有一条到 SINK 节点的链路的节点数与网络总节点数的比值.

仿真时,将 200 个传感器节点随机部署在  $100m * 100m * 100m$  的水下三维监测区域  $M$  中,SINK 节点随机放置在水面某一点.同时为计算网络覆盖率,将区域  $M$  划分为  $100 * 100 * 100$  个立方格,每个立方格的大小为  $1m * 1m * 1m$ ,仿真结果是 100 次实验的平均值,其他参数如表 2 所示.

表 2 仿真参数

| 参数                       | 取值          |
|--------------------------|-------------|
| 节点初始能量( $E_{init}$ )     | 10j         |
| 节点感知半径( $R_s$ )          | 15m         |
| 数据融合能耗( $E_{da}$ )       | 8nj/bit     |
| 数据包长度( $L$ )             | 1000bit     |
| 数据接收能耗( $P_r$ )          | 2nj/bit     |
| 能量扩散因子                   | 1.5         |
| 载波频率( $f$ )              | 15kHz       |
| 节点能量阈值( $E_{th}$ )       | $10^{-3}$ J |
| 融合效率                     | 0.95        |
| 初始半径( $initial\_range$ ) | 10m         |

## 5.2 仿真算例

我们首先在节点最大通信半径受限的情况下,对

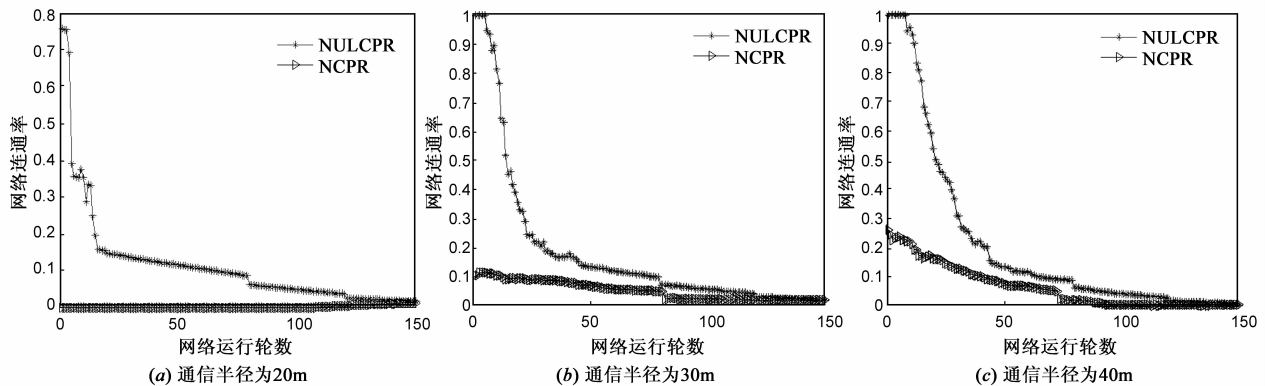


图2 网络连通率对比图

因为在 NCPR 算法中假设簇首始终可与 SINK 节点通信,因此,为了对比 NCPR 与 NULCPR 算法的网络能耗与网络覆盖率,我们同样假设簇首始终可与 SINK 节点连通,初始节点通信半径设为 30m.

图 3 是 NCPR 算法和 NULCPR 算法的网络剩余能量对比图.图 4 为 NULCPR 算法和 NCPR 算法的网络存活节点数对比图.从图 3 可以看出,NCPR 算法和 NULCPR 算法的网络剩余能量均随网络的运行而逐渐降低,但是 NULCPR 算法的剩余能量始终高于 NCPR 算法.这是因为在 NULCPR 算法中,节点通信半径随着距离 SINK 节点越来越远而逐渐增大.这样距离 SINK 节点较远的区域中节点通信半径大,簇密度小,距离 SINK 节点近的区域簇密度大,节点通信半径小,但是节点需要转发的数据包大.通过这样的方式,减少了网络能耗.在 NCPR 算法中,由于簇半径比较大,因此簇首和簇边缘的节点较容易死亡,导致簇更新频繁,造成网络能量消耗过快,从图 4 中也可以看出这点.

图 5 是 NULCPR 算法和 NCPR 算法的网络覆盖率

随网络运行轮数变化对比图.从图中可以看出,NULCPR 算法和 NCPR 算法的网络覆盖率均随网络运行轮数的增加而减小,但是在网络运行的中间阶段,NULCPR 算法的网络覆盖率要好于 NCPR 算法.这主要是因为 NULCPR 算法中节点死亡速度较慢,网络中存活节点数目较多,因而网络覆盖率较好,从图 4 中我们可以看出这点.图 6 为 NULCPR 算法和 NCPR 算法的网络覆盖率随死亡节点数变化对比图.从图中可以看出,当死亡相同的节点数时,NCPR 算法的网络覆盖率要高于 NULCPR 算法.这是因为在 NULCPR 算法中,每层独立的运行 NCPR 算法,这时每层选出的簇首相对于在整个网络中运行 NCPR 算法选择簇首来说是局部最优,当网络中死亡相同的节点数时,对 NULCPR 算法的网络覆盖率的影响要大于对 NCPR 算法网络覆盖率的影响.因此,在死亡相同节点数下,NCPR 算法的网络覆盖率要优于 NULCPR 算法.

图 2 是最大节点通信半径分别为 20m,30m,40m 时,NCPR 算法和 NULCPR 算法的网络连通率的对比图.从图中可以看出,NCPR 算法和 NULCPR 算法的网络连通率均随网络运行轮数的增加而减小,但是在不同的节点通信半径下 NCPR 算法的网络连通率始终处于一个较低的位置,并且当节点通信半径为 20m 时,网络处于完全断开的状态.这是因为在 NCPR 算法中,簇首的分布具有随机性,在节点通信半径受限的情况下,当簇首之间的距离小于节点通信半径时,簇与簇可以连通,而当簇首之间距离大于节点通信半径时,则簇与簇断开,造成网络中断.在 NULCPR 算法中,网络建立时,每层节点成簇后,由簇首向上建立连通链路保证网络连通,当节点死亡后,根据死亡节点的类型采用不同的方式重新建立连通链路以维持网络的连通,因而 NULCPR 算法的网络连通率高于 NCPR 算法.

图 5 是 NULCPR 算法和 NCPR 算法的网络覆盖率

## 6 总结

在以监测为目的的水下传感器网络中,较高的网

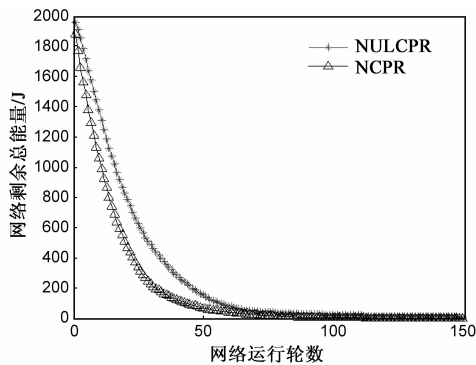


图3 网络剩余能量对比图

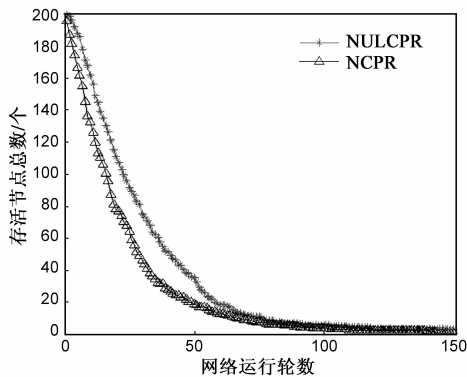


图4 网络存活节点数目对比图

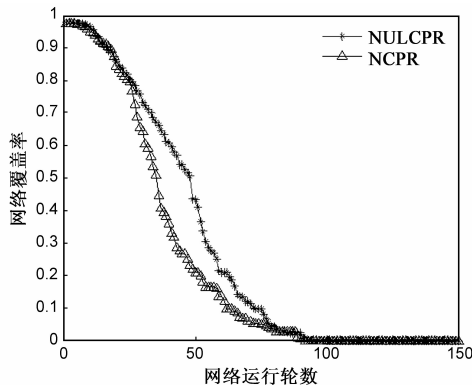


图5 网络覆盖率随网络运行轮数对比图

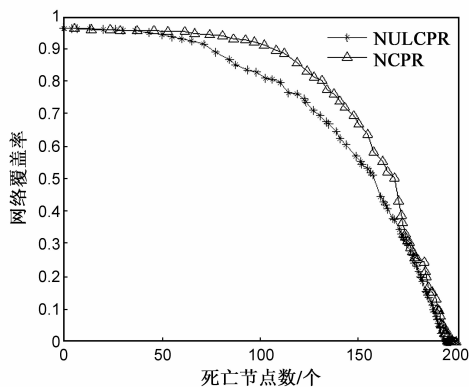


图6 网络覆盖率随死亡节点数变化对比图

网络覆盖率和网络连通率是完成监测任务的重要保证. 本文在水下传感器网络覆盖保持路由算法 NCPR 算法

的基础上提出一种网络不均匀分层的覆盖保持路由算法 (NULCPR), 由 SINK 节点开始逐层建立网络, 每一层节点的通信半径随着网络层数的增加而增加, 每层网络独立的运行 NCPR 算法使该层节点成簇, 并由簇首向上建立连通链路以保证网络连通. 仿真结果表明, 与 NCPR 算法相比, NULCPR 算法提高了网络连通率以及网络覆盖率, 并且降低了网络能耗.

#### 参考文献

- [1] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges [J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 257 - 279.
- [2] 郭忠文, 罗汉江, 洪锋, 等. 水下无线传感器网络的研究进展 [J]. *计算机研究与发展*, 2010, 47(3): 377 - 389.  
Guo Zhongwen, Luo Hanjiang, Hong Feng, et al. Current progress and research issues in underwater sensor networks [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47(3): 377 - 389. (in Chinese)
- [3] 洪锋, 张玉亮, 杨博真, 等. 水下传感器网络时间同步技术综述 [J]. *电子学报*, 2013, 41(5): 960 - 965.  
Hong Feng, Zhang Yuliang, Yang Bozhen, et al. Review on time synchronization techniques in underwater acoustic sensor networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(5): 960 - 965. (in Chinese)
- [4] Guerra F, Casari P, Zorzi M. World Ocean Simulation System (WOSS): a simulation tool for underwater networks with realistic propagation modeling [A]. *Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Underwater Networks* [C]. New York: ACM, 2009. 1 - 4, 8.
- [5] Tan H P, Diamant R, Seah W K G, et al. A survey of techniques and challenges in underwater localization [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(14): 1663 - 1676.
- [6] Pompili D, Melodia T, Akyildiz I F. Deployment analysis in underwater acoustic wireless sensor networks [A]. *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks* [C]. New York: ACM, 2006. 48 - 55.
- [7] Akkaya K, Newell A. Self-deployment of sensors for maximized coverage in underwater acoustic sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2009, 32(7): 1233 - 1244.
- [8] 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 Na, Wang Changsheng, Zheng Rong, et al. Fish swarm inspired underwater sensor deployment [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 295 - 302. (in Chinese)
- [9] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces [A]. *Proceedings of the 22th Annual Joint Conference* [C]. San Francisco, CA: IEEE, 2003: 1293 - 1303.

- [10] Hwang S F, Su Y Y, Lin Y Y, et al. A cluster-based coverage-preserved node scheduling scheme in wireless sensor networks [A]. Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems-Workshops [C]. San Jose, CA: IEEE, 2006. 1 - 7.
- [11] Chamam A, Pierre S. On the planning of wireless sensor networks; Energy-efficient clustering under the joint routing and coverage constraint [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(8): 1077 - 1086.
- [12] Soro S, Heinzelman W B. Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(5): 955 - 972.
- [13] 孟凡治, 王换招, 何晖. 基于联合感知模型的无线传感器网络连通性覆盖协议 [J]. 电子学报, 2011, 39(4): 772 - 779.  
Meng Fanzhi, Wang Huanzhao, He Hui. Connected coverage protocol using cooperative sensing model for wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 772 - 779. (in Chinese)
- [14] 凡高娟, 王汝传, 黄海平, 等. 基于容忍覆盖区域的无线传感器网络节点调度算法 [J]. 电子学报, 2011, 39(1): 89 - 94.  
Fan Gaojuan, Wang Ruchuan, Huang Haiping, et al. Tolerable coverage area based node scheduling algorithm in wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 89 - 94. (in Chinese)
- [15] Mao Y, Gong H, Liu M, et al. Energy efficient and location-independent QoS protocol for wireless sensor networks [J]. Computer Research and Development, 2006, 43(6): 1019 - 1026.
- [16] Liu C, Wu K, Xiao Y, et al. Random coverage with guaranteed connectivity: joint scheduling for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(6): 562 - 575.
- [17] 王换招, 孟凡治, 李增智. 高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议 [J]. 软件学报, 2010, 21(12): 3124 - 3137.  
Wang Huanzhao, Meng Fanzhi, Li Zengzhi. Energy efficient coverage conserving protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2010, 21(12): 3124 - 3137. (in Chinese)
- [18] Tsai Y R. Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1240 - 1245.
- [19] 蒋鹏, 阮斌峰. 基于分簇的水下传感器网络覆盖保持路由算法 [J]. 电子学报, 2013, 41(10): 2067 - 2073.  
Jiang Peng, Ruan Bin Feng. Cluster-based coverage preserving routing algorithm for underwater sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(10): 2067 - 2073. (in Chinese)
- [20] Liu G, Wei C. A new multi-path routing protocol based on cluster for underwater acoustic sensor networks [A]. Proceedings of the 2011 International Conference on Multimedia Technology [C]. Hangzhou: IEEE, 2011. 91 - 94.
- [21] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater acoustic networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72 - 83.

#### 作者简介



蒋鹏 男, 1975 年生于浙江衢州. 杭州电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统及其应用、智能仪表.  
E-mail: pjiang@hdu.edu.cn



王兴民 男, 1989 年生于甘肃景泰. 杭州电子科技大学硕士研究生, 研究方向为无线传感器网络.