

## 一种基于能耗均衡的分区节点部署算法

牛玉刚<sup>1</sup>, 杜国杰<sup>1</sup>, 贾廷纲<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学 化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237; 2. 上海电气集团股份有限公司 自动化事业部, 上海 200070)

**摘要:** 鉴于能耗问题是无线传感器网络研究的重要问题, 首先建立一种非均匀部署网络拓扑模型, 该模型中越靠近 sink 的区域节点部署越密集, 节点通信距离越小; 然后针对节点初始随机部署情况, 提出一种基于节点能耗均衡的分区节点重部署算法, 该算法利用分区域的节点移动, 减少节点移动距离, 降低移动能耗, 提高算法收敛速度; 最后通过仿真表明, 所提出的算法可以用较少数量的节点覆盖监测区域, 保证网络中各节点能量均衡消耗, 提高网络生存周期。

**关键词:** 能耗均衡; 最大化覆盖; 节点重部署; 生命周期

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

## A partition node deployment algorithm based on energy-balancing

NIU Yu-gang<sup>1</sup>, DU Guo-jie<sup>1</sup>, JIA Ting-gang<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Advanced Control and Optimization for Chemical Process of Ministry of Education, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China; 2. Automation Division, Shanghai Electric Group Co. Ltd., Shanghai 200070, China. Correspondent: DU Guo-jie, E-mail: 13918169411@163.com)

**Abstract:** Energy consumption is one of important issues in wireless sensor networks (WSNs). A non-uniform network topology model is firstly constructed, in which the nodes near the sink are deployed densely and have shorter communication distance. And then, for the random initial deployment, an energy-balancing based partition node re-deployment algorithm is proposed. By moving nodes within the intersected region, the proposed algorithm can reduce the distance of node displacement, lower the energy consumption, and raise the convergence speed. The experimental results show that the proposed algorithm can realize the better covering of the monitoring area with less number of nodes, attain the balancing of energy consumption, and raise the network lifetime.

**Keywords:** energy-balancing; maximum coverage; node deployment; lifetime

## 0 引言

近年来, 无线传感器网络 (WSNs) 在环境监测、工业控制、健康医疗等领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>, 其中节点覆盖问题是无线传感器网络的主要问题之一<sup>[2-3]</sup>. 节点能否有效覆盖监测区域主要取决于节点传感范围和部署计划. 由于使用节点数目过多会增加网络的成本, 研究和设计合理的节点部署计划变得十分重要. 近年来, 许多学者针对该问题展开了深入研究<sup>[4-10]</sup>. Dhillon 等<sup>[4]</sup>研究了一种近似网格的区域部署问题, 采用贪婪迭代算法, 使每一轮迭代中节点被放置在覆盖最少的网格内. 文献 [5] 提出了 DT-Score 部署方法, 利用基于轮廓的部署消除边界和障碍附近的覆盖漏洞,

在未覆盖区域应用基于德劳内三角的部署方法部署节点, 从而最大限度地覆盖给定区域. 文献 [6] 提出了一种自适应节点部署算法, 以最少的传感器节点最大化覆盖范围, 同时最小化节点总移动距离. 文献 [7] 利用免疫节点部署算法移动节点, 将网络的覆盖最大化, 同时使节点移动所消耗的能量最小化. 然而, 上述研究工作为实现网络覆盖的同时, 并没有考虑节点的能耗均衡问题.

如何合理部署节点、平衡网络能耗、延长网络的生命周期是节点部署时需要考虑的问题. 文献 [8] 提出了一种菱形的部署方法, 采用轮换休眠机制, 在保证覆盖范围和连通性的同时, 尽可能提升网络生命周

收稿日期: 2015-04-15; 修回日期: 2015-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273073, 61374107, 61304044).

作者简介: 牛玉刚(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事随机系统、网络拥塞控制等研究; 杜国杰(1990—), 男, 硕士生, 从事无线传感器网络拥塞控制的研究.

期. Halder等<sup>[9]</sup>设计了一个节点密度函数(PDF). 虽然文献[8-9]的方法可以均衡网络能耗, 但二者都没有考虑最大化覆盖问题, 且文献[8]以节点初始冗余部署为基础, 文献[9]基于概率密度部署, 两者所用节点数目较多. 文献[10]通过引入节点等效感知半径, 提出了集中式非均匀节点部署算法, 但假设各节点仅发送其监视方格的感知消息, 在实际应用中, 节点是将感知范围内的信息全部发送.

本文通过综合考虑网络覆盖和能耗问题, 提出一种分区域节点重部署算法. 首先建立一种节点非均匀部署的网络拓扑模型, 将网络中节点划分为不同的层级, 离sink节点越近的层级节点部署得越密集, 以避免“能量空洞”问题; 然后通过分析能耗均衡条件, 提出了一种分区域的节点重部署算法, 该算法将监测区域分区, 利用区域间虚拟力<sup>[11]</sup>使节点在相邻区域间进行移动, 各个区域节点数目达到平衡后, 再对每个区域内的节点进行移动, 通过分区域移动, 减小了节点移动距离, 从而降低移动能耗, 而且多个区域同时进行移动, 加快了算法收敛速度; 最后通过仿真表明, 所提出算法可以用较少数量的节点覆盖监测区域, 保证网络中各节点能量均衡消耗, 提高网络生存周期.

## 1 WSN非均匀部署模型

WSNs是一种应用型网络, 用来监测目标信息, 因此怎样有效地覆盖整个目标区域是最基本的问题. 覆盖问题的分类方式有多种, 根据网络监测目标和对象类型分类, 可以分为区域覆盖、点覆盖和栅栏覆盖<sup>[10]</sup>. 例如, 在没有覆盖漏洞的最大化区域覆盖模型<sup>[6]</sup>中, 各节点感知半径为 $R_s$ , 各节点间的距离均为 $\sqrt{3}R_s$ , 因此是一个节点均匀部署模型. 然而, 无线传感网络的多跳传输方式导致均匀部署模型中更容易发生“能量空洞”现象, 因此, 为了延长网络生存周期, 在节点部署时应考虑网络中各节点能量消耗问题.

本文考虑通过调整节点间通信距离均衡网络中各节点的能量消耗. 假设无线传感器网络监测区域是一个半径为 $D$ 的圆形区域, 只有一个sink节点且位于区域中心位置. 节点通过逐跳传输的方式与sink节点进行通信, 每个节点仅向其下游一跳内的节点发送信息, 包括自身感知信息和转发上游节点发送来的信息. 将监测区域分为多个虚拟的同心圆环, 越靠近sink节点的层级, 环间距越小, 网络拓扑模型如图1所示. 节点在每一层上均匀分布, 节点间通信距离即为层与层之间距离, 层与层之间的距离关系根据节点的能耗均衡条件进行推导. 图1每一层上的节点数目与层号有关(层数的6倍), 这样保证了最大化覆盖范围的同时所用节点数目更少, 同时使越靠近sink的节点通信距

离越小, 从而实现各节点能耗的均衡.

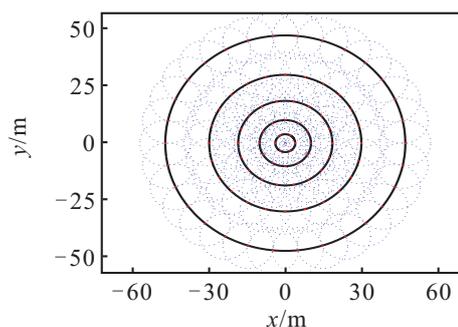


图1 考虑能耗均衡的网络拓扑结构

为了方便后面的研究, 假设:

- 1) 初始时 $N$ 个同构传感器节点随机部署在监测区域内, 每个节点具有固定的ID编号, 所有节点能够获得自身和全局位置信息.
- 2) 节点的感知半径 $R_s$ 与通信半径 $R_c$ 在工作过程中保持不变, 且 $R_c \geq 2R_s$ , 以保证网络连通性.
- 3) 网络工作方式为周期性采集监测区域信息, 每个周期内每个节点产生的数据包数量为1个.

## 2 基于能耗均衡的分区域节点重部署算法

为了将节点按图1所示的非均匀拓扑结构重新部署, 以均衡网络的能耗, 本文提出一种分区域节点重部署算法. 下面首先分析为保证整个网络达到能耗均衡, 图1模型中各虚拟圆环间距离应满足的条件.

### 2.1 实现能耗均衡的条件

传感器节点的能量消耗包括数据感知和处理能耗、通信能耗、移动能耗等, 为了便于分析, 假设网络节点能耗模型如下:

- 1) 节点发送一个数据包消耗的能量 $e_1$ 与实际通信距离 $d$ 的平方成正比<sup>[12]</sup>, 即 $e_1 = kd^2$ , 其中 $k$ 为比例系数.
- 2) 节点移动单位距离消耗的能量为 $e_0$ , 接收一个数据包消耗的能量为 $e_2$ ,  $e_0$ 和 $e_2$ 均为常量. 不计节点感知数据的能耗.
- 3) 节点每个工作周期进行一次数据发送, 所有节点产生的数据包通过逐跳通信的方式发送给sink节点.

对于图1所示的网络拓扑模型, 将以sink为中心的各虚拟同心圆环由内而外依次标为 $Cor_1, Cor_2, \dots, Cor_i, \dots$ , 共 $N$ 层, 节点在每一层上均匀分布, 各层节点数与层号成正比,  $N(i) = 6i$ . 由于越靠近sink的节点在数据发送时所需转发的数据包越多, 能耗越大, 为了平衡能耗, 应使越靠近sink节点的环间距越小, 缩短内层节点的通信距离.

**定理1** 当环间距离 $d(i)$ 满足

$$d(i) = \begin{cases} \sqrt{3}R_s, & i = N; \\ \sqrt{\frac{6R_s^2 i}{(N+i)(N-i+1)} - \frac{e_2(N+i+1)(N-i)}{k(N+i)(N-i+1)}}, & 1 \leq i < N \end{cases} \quad (1)$$

时,在最大化覆盖的基础上,整个网络达到能耗均衡.

**证明** 在每个工作周期中,节点需要转发的数据包包括自身产生的以及上层节点发送的数据包,每一层接收到的数据包为

$$\text{Rec}(i) = 6 \times \frac{(N+i+1)(N-i)}{2}, \quad (2)$$

所需发送数据包总数为

$$\begin{aligned} \text{Sum}(i) &= \text{Rec}(i) + 6i = \\ &6 \times \frac{(N+i)(N-i+1)}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

由每一层节点数目  $N(i)$ , 可得第  $i$  层每个节点平均要发送的数据包数量为

$$\text{TXD}(i) = \frac{\text{Sum}(i)}{N(i)} = \frac{N^2 + N - i^2 + i}{2i}. \quad (4)$$

由层与层之间通信距离  $d(i)$  可知,第  $i$  层平均每个节点的通信能耗为

$$\bar{E}(i) = e_1(i)\text{TXD}(i) + e_2 \frac{\text{Rec}(i)}{N(i)}. \quad (5)$$

由文献[7]可知,为了使网络达到覆盖最大化,最外层的环间距离  $d(N)$  应为  $\sqrt{3}R_s$ , 即  $d(N) = \sqrt{3}R_s$ .

在不考虑其他能耗的基础上,当最外层节点与最内层节点的通信能耗相同,即  $\bar{E}(i) = \bar{E}(N)$  时,整个网络达到能耗均衡,此时有

$$\begin{aligned} kd(i)^2 \frac{N^2 + N - i^2 + i}{2i} + \\ \frac{e_2(N+i+1)(N-i)}{2i} = kd(N)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

将  $d(N) = \sqrt{3}R_s$  代入式(6),可得

$$d(i) = \sqrt{\frac{6R_s^2 i}{(N+i)(N-i+1)} - \frac{e_2(N+i+1)(N-i)}{k(N+i)(N-i+1)}}, \quad i = 1, 2, \dots. \quad (7)$$

定理1得证.  $\square$

由于外环节点间距离会随着层数增加而逐渐增大,为保证各环上节点间的连通性,外环节点间距离需满足如下条件:

$$\sqrt{2\left(1 - \cos \frac{\pi}{3N}\right)} \sum_{i=1}^N d(i) \leq 2R_s. \quad (8)$$

事实上,各个虚拟圆环半径为

$$R(i) = \sum_{k=1}^i d(k). \quad (9)$$

由于各环上节点均匀分布,根据余弦定理,各环上节点间距离表示为

$$d_r(i) = \sqrt{R(i)^2 + R(i)^2 - 2R(i)R(i) \cos \frac{\pi}{3i}}. \quad (10)$$

当最外环节点间距离满足  $d_r(N) \leq 2R_s$ , 即式(8)时,各环上的节点之间可以保证是连通的.

## 2.2 分区域节点重部署算法

本文提出的分区域节点重部署算法将整个监测区域均等划分为6个扇形区域,在进行区域间移动时,节点仅允许在相邻的区域间移动,避免消耗过多的能量.按工作先后次序,本算法可分为两个阶段,第1阶段是节点在相邻区域间移动,第2阶段是节点在每个区域内,从最靠近 sink 的节点开始,由内而外向环上的目标位置移动.算法第1阶段移动完成后接着执行算法第2阶段.

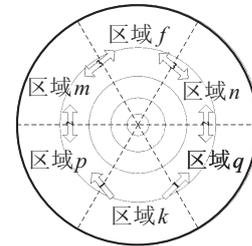


图2 节点区域间移动示意图

节点区域间移动时,首先根据节点总数计算各区域平均节点数.然后从节点数量最多的区域开始,向两侧区域同时进行移动,最终使每个区域内的节点数量相同.节点区域间移动完成后,每个区域内的节点数达到均衡,接着执行第2阶段移动,在每个区域内,使节点移动到每一环上相应位置.假设节点目标位置以  $x$  轴正半轴为起点,每一环上均匀分布.分别计算节点到 sink 节点和目标位置的距离,每一轮都选取移动距离最小的节点,由内而外地依次移动,最终所有节点移动到目标位置后完成部署.

本算法采用分区域移动,并且由 sink 节点进行位置计算,因此,在算法执行过程中,节点区域间移动双向同时进行,3次迭代之后即可完成;节点区域内移动是由内而外每一层进行移动,迭代次数由层数决定,6个区域同时进行,使得每一轮迭代所需的时间大大减小.综合以上两点可知,算法收敛速度快.同时, sink 节点统计全局位置信息,各节点统一进行移动,减小了节点移动距离,算法的能耗较小.

## 2.3 算法步骤

算法流程如图3所示,算法的执行过程由 sink 节点完成. Sink 节点将目标位置信息发送给每个节点,节点收到 sink 节点发来的信息后沿最短路径直线移

动到目标位置。

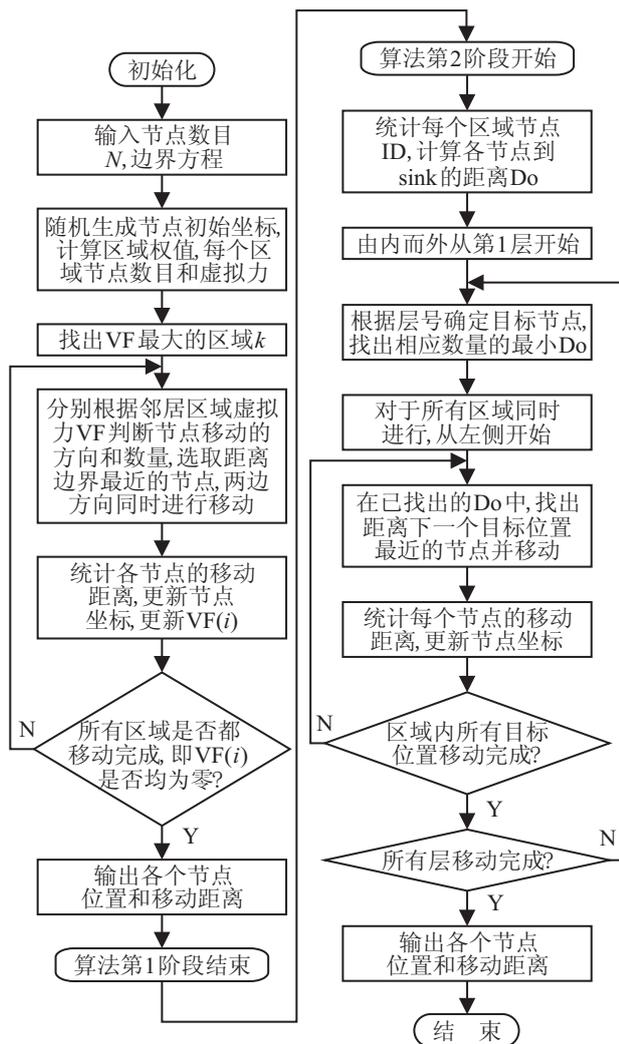


图 3 分区域节点重部署算法流程

算法步骤如下。

### Part I 区域间移动。

Step 1: 计算节点总数目  $N$ , 设置每个区域权值  $weight = N/6$ 。

Step 2: 计算每个区域内实际节点数目  $A(j)$ , 计算虚拟力  $VF(j) = A(j) - weight$ , 找出虚拟力最大的区域  $k$ 。

Step 3: 根据相邻区域虚拟力判断区域  $k$  内节点移动方向及数量:

Step 3.1: 若区域  $p$ 、 $q$  的虚拟力同为引力或同为斥力, 则区域  $k$  内  $VF(k)$  个节点向两边区域  $p$ 、 $q$  移动, 两边区域分别移动的节点数量与各自区域虚拟力大小成正比; 否则, 区域  $k$  内节点先向虚拟力为引力的区域移动, 直至该区域虚拟力不小于零或区域  $k$  虚拟力为零时停止, 并记录移动节点数目, 更新  $VF(j)$ , 此时若  $VF(k)$  仍大于 0, 则重复  $VF(p)$  和  $VF(q)$  同号的情况。

Step 3.2: 计算节点  $i$  到相应边界的距离  $D(i)$ , 分

别选取其中最小的相应数量的节点进行移动, 每个节点移动距离为  $DM(i) = D(i) + \varepsilon$ , 同时更新节点坐标  $(X(i), Y(i))$ , 更新  $VF(j)$ 。

Step 4: 分别根据区域  $p$ 、 $q$  的虚拟力  $VF(p)$ 、 $VF(q)$  判断节点移动方向和数量:

Step 4.1: 若  $VF(p)$  ( $VF(q)$ )  $\geq 0$ , 虚拟力为斥力, 则区域  $p$  (区域  $q$ ) 内的节点向下一个相邻区域  $m$  (区域  $n$ ) 移动; 若  $VF(p)$  (或  $VF(q)$ )  $\leq 0$ , 虚拟力为引力, 则相邻区域  $m$  (或区域  $n$ ) 内的节点向区域  $p$  (区域  $q$ ) 移动。

Step 4.2: 计算需要移动的区域节点  $i$  到相应边界距离  $D(i)$ , 选取距离最小的  $|VF(p)|$  ( $|VF(q)|$ ) 个节点, 每个节点移动距离为  $DM(i) = D(i) + \varepsilon$ , 同时更新节点坐标  $(X(i), Y(i))$ , 更新  $VF(j)$ 。

Step 5: 根据区域  $m$  和  $n$  的虚拟力判断节点移动方向和数量:

Step 5.1: 若  $VF(m)$  ( $VF(n)$ )  $\geq 0$ , 虚拟力为斥力, 则区域  $m$  (区域  $n$ ) 内的节点向区域  $f$  移动; 若  $VF(m)$  (或  $VF(n)$ )  $\leq 0$ , 虚拟力为引力, 则区域  $f$  内的节点向区域  $m$  (区域  $n$ ) 移动。

Step 5.2: 计算需要移动的区域节点  $i$  到相应边界距离  $D(i)$ , 选取距离最小的  $|VF(m)|$  ( $|VF(n)|$ ) 个节点, 每个节点移动距离为  $DM(i) = D(i) + \varepsilon$ , 同时更新节点坐标  $(X(i), Y(i))$ , 更新  $VF(j)$ 。

### Part II 区域内移动。

Step 1: 统计每个区域内的节点 ID, 计算每个区域内目标位置坐标  $(X_{op}, Y_{op})$ , 计算每个区域内所有节点到 sink 节点的距离  $DO(i)$ 。

Step 2: 由内而外从第 1 层开始,  $n = 1$ 。

Step 2.1: 对每一个区域, 设  $a = 1$ 。

Step 2.1.1: 对于第  $Cor_n$  层, 确定区域  $a$  中  $n$  个目标位置坐标, 找出距离 sink 最近的  $n$  个节点。对于每个目标位置, 从已找出的  $n$  个节点中找出距离目标位置最近的节点, 将节点移动到对应目标位置, 每个节点移动距离为

$$DM(i) =$$

$$DM(i) + \sqrt{(X(i) - X_{op})^2 + (Y(i) - Y_{op})^2},$$

同时在  $DO(i)$  中除去相应节点 ID 的元素。

Step 2.1.2: 更新节点坐标  $(X(i), Y(i))$ , 同时令  $a = a + 1$ 。

Step 2.1.3: 若  $a > 6$ , 则进行下一步, 否则转至 Step 2.1.1。

Step 2.2: 令  $n = n + 1$ 。若  $n$  大于实际层数, 则进行下一步, 否则转至 Step 2.1。

Step 3: 输出节点更新坐标  $(X_{final}, Y_{final})$ , 统计

每个节点的移动距离, 输出节点移动总距离  $DS = \sum(DM(i))$ .

### 3 实验分析

分别从节点移动距离、剩余能量和生命周期方面对比分析本文与文献[10]模型和算法的效果. 实验参数配置如表1所示.

表1 仿真参数设置

环境参数	设置值	环境参数	设置值
区域半径/m	58	初始能量/J	1000
节点数量	90	接收能耗/J	0.0001
通信半径/m	20	发送能耗比例系数 $k$	0.0001
感知半径/m	10	移动单位距离能耗/J	5

初始时, 在监测区域内随机部署90个传感器节点, sink节点位于区域中心位置, 整个区域划分为5个同心能耗圆环  $Cor_1$ 、 $Cor_2$ 、 $Cor_3$ 、 $Cor_4$ 、 $Cor_5$ , 每一层节点数目依次为6、12、18、24、30, 根据式(1)计算出每一层圆环的半径. 将监测区域划分为6块, 每个区域的权值  $weight = N/6 = 15$ . 本文重部署算法过程如图4所示. 图4中同心圆环外虚线代表监测区域, 内部虚线代表节点感知范围.

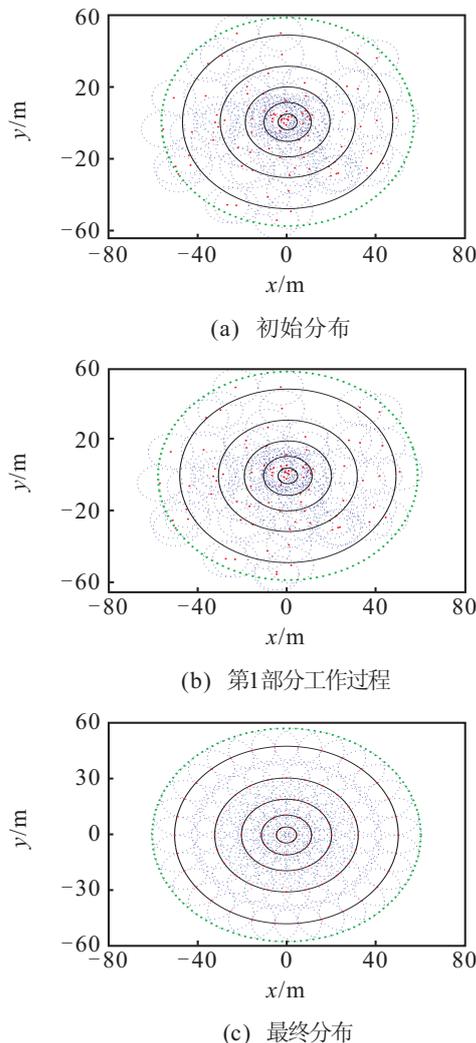


图4 本文重部署算法工作过程

图4(a)为初始分布, 同心圆环表示计算得到的能耗环, 但节点初始分布不满足能耗均衡的条件, 因此接下来需要进行节点重部署, 使节点均匀分布在环上. 首先根据区域间虚拟力进行节点在区域间的移动, 移动完成后各个区域内节点数量相同. 图4(b)为算法第1部分工作过程. 区域间移动完成后, 节点只需在各自区域内完成移动, 减小了全局移动距离. 为使各个节点移动到相应区域内的目标位置, 达到覆盖最大和能耗均衡的目标, 需要将节点由内而外以最近的节点移动到相应目标. 在由sink节点计算出移动目标后, 节点沿直线移动, 最小化移动距离, 减小节点移动消耗的能量. 当所有节点都移动到目标位置后, 最终的节点分布如图4(c)所示.

将本文分区节点重部署算法与文献[10]算法进行比较, 节点移动距离随时间变化曲线如图5所示. 由图5可见, 在前10次循环, 本文算法的节点移动距离增长速度略快于文献[10]算法, 但在10次循环之后, 移动距离的变化基本近似. 但是, 本文算法由于多个区域同时进行移动, 算法收敛得更快, 因此在15次循环之后节点便完成了最终部署; 文献[10]算法需要30次循环. 另外, 本文算法经过sink节点计算最终目标位置, 节点只需沿直线移动最短距离, 节点移动总距离也小于文献[10]算法, 能够实现以更小的能量消耗完成节点部署.

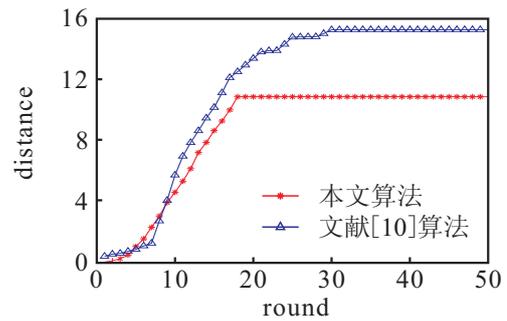


图5 节点平均移动距离随时间变化

将本文的网络拓扑模型与文献[10]进行对比, 以验证不同拓扑结构的工作情况, 考察网络的生命周期. 以网络中第1个节点死亡时间为根据, 图6展示了不同网络拓扑中节点的剩余能量比.

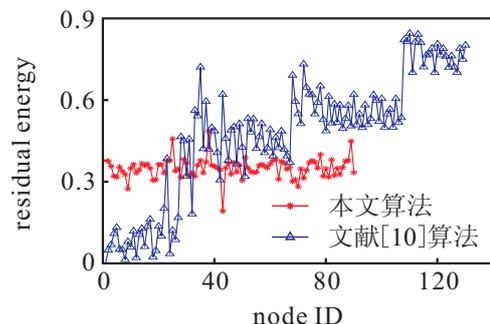


图6 节点剩余能量比

由图6可见,当文献[10]算法模型第1个节点死亡时,越靠近内环的节点剩余能量越少,表明当不存在像素感知机制时,文献[10]提出的能耗均衡条件不可实现,网络中仍会出现“能量空洞”问题.本文提出的网络拓扑模型很好地均衡了网络的能耗,网络中所有节点剩余能量大致处于均衡的状态,有效地延长了网络的生存周期,表明了该算法和模型的可行性效果.另外,图6也反映了网络所用节点数量的不同,在分区重部署算法中,网络节点个数远少于文献[10]算法,网络部署成本更低.随着监测区域增加和网络规模扩大,这种差异将会更加明显.

#### 4 结 论

针对无线传感器网络中的最大化覆盖和能耗均衡问题,本文提出了一种分区域重部署算法,将能耗均衡问题结合最大化覆盖方法,不考虑节点像素感知机制,建立了新的网络拓扑模型.仿真实验表明,通过分区域节点移动,不仅减少了节点移动距离,降低能耗,而且加快了算法收敛的速度.所建立的新的网络拓扑模型不仅有效延长了网络的生存周期,而且覆盖同样的监测区域所用的节点数量更少,大大降低了网络成本.

#### 参考文献(References)

- [1] Funde S K, Gujar A D. A survey on privacy preserving techniques in WSN[J]. *Int J of Computer Applications*, 2014, 86(1): 18-20.
- [2] 傅质馨,徐志良,黄成,等.无线传感器网络节点部署问题研究[J]. *传感器与微系统*, 2008, 27(3): 116-120.  
(Fu Z X, Xu Z L, Huang C, et al. Survey on sensor deployment problem in wireless sensor networks[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, 27(3): 116-120.)
- [3] Liu L, Xia F, Wang Z, et al. Deployment issues in wireless sensor networks[M]. *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*. Berlin: Springer Heidelberg, 2005: 239-248.
- [4] Dhillon S S, Chakrabarty K. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks[M]. New Orleans: IEEE, 2003, 3: 1609-1614.
- [5] Wu C H, Lee K C, Chung Y C. A delaunay triangulation based method for wireless sensor network deployment[J]. *Computer Communications*, 2007, 30(14): 2744-2752.
- [6] Ma M, Yang Y. Adaptive triangular deployment algorithm for unattended mobile sensor networks[J]. *IEEE Trans on Computers*, 2007, 56(7): 946-947.
- [7] Abo-Zahhad M, Ahmed S M, Sabor N, et al. Coverage maximization in mobile wireless sensor networks utilizing immune node deployment algorithm[C]. *IEEE 27th Canadian Conf on Electrical and Computer Engineering(CCECE)*. Toronto: IEEE, 2014: 1-6.
- [8] Gupta N, Wazid M, Sharma S, et al. Coverage life time improvement in wireless sensor networks by novel deployment technique[C]. *Int Conf on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology(ICECCN)*. Tirunelveli: IEEE, 2013: 293-297.
- [9] Halder S, DasBit S. Design of a probability density function targeting energy-efficient node deployment in wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Network and Service Management*, 2014, 99: 1-16.
- [10] 贾杰.无线传感器网络覆盖控制与节点部署技术[M].沈阳:东北大学出版社,2013:72-91.  
(Jia J. Coverage control and node deployment technologies in wireless sensor networks[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2013: 72-91.)
- [11] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]. *The 22nd Annual Joint Conf of the IEEE Computer and Communications*. San Francisco: IEEE, 2003, 2: 1293-1303.
- [12] 孙利民.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005:7-9.  
(Sun L M. Wireless sensor networks[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 7-9.)

(责任编辑:郑晓蕾)