

文章编号: 1001-0920(2016)06-1099-06

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2015.0536

## 无线传感器网络拓扑三级分簇优化算法

罗小元<sup>1</sup>, 李昊<sup>1</sup>, 王金然<sup>2</sup>, 关新平<sup>3</sup>

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 北京市工贸技师学院  
轻工分院, 北京 100079; 3. 上海交通大学 电信学院, 上海 200240)

**摘要:** 针对大规模分布式传感器网络提出一种拓扑三级分簇结构优化算法. 通过引入传感器休眠模式, 并考虑到分簇数目较多的情况, 对多个簇头节点采用生成最小刚性图的方法进行拓扑优化, 以实现传感器网络整体能量均衡, 使传感器网络具有较好的连通性和鲁棒性. 仿真实验表明, 与已有相关算法相比, 采用所提出的算法可使网络延缓出现节点死亡现象, 有利于实现网络负载均衡, 并且网络中节点整体存活时间较长, 从而延长网络的生命周期.

**关键词:** 无线传感器网络; 拓扑优化; 最小刚性图; 分簇

中图分类号: TP273

文献标志码: A

### A three-layer hierarchical architecture for topology optimization clustering of wireless sensor networks

LUO Xiao-yuan<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, WANG Jin-ran<sup>2</sup>, GUAN Xin-ping<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Branch of Light Industry, Beijing Industry and Trade Technicians College, Beijing 100079, China; 3. School of Electronic and Electric Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: LUO Xiao-yuan, E-mail: xyluo@ysu.edu.cn)

**Abstract:** A three-layer architecture with network clustering topology optimization for large-scale distributed wireless sensor networks is presented. By using the sensor sleep-scheduling scheme and considering many more clustering numbers, an optimal algorithm for multiple cluster heads based on minimally rigid graph is proposed. It is shown that the optimized clustering network can achieve balanced energy consumption while keeping good connectivity and robustness for the network. Simulation results show that, by adopting the proposed algorithm, the node death phenomenon can appear later than adopting some other related algorithms. It is more advantageous to realize the network load balancing as a whole. And by adopting the proposed algorithm, nodes in the network can survive longer, which shows that the proposed algorithm can prolong the network lifetime.

**Keywords:** wireless sensor network; topology optimization; minimally rigid graph; clustering

## 0 引言

随着人们对无线电子产品需求的日益增加及其广泛应用, 无线传感器网络 (WSNs) 得到了飞速的发展. 由于网络的生存时间是由各个节点寿命共同决定的, 为了防止出现某个节点因负载过重而过早死亡的现象, 需要对网络的负载进行拓扑优化. 近年来, 人们提出了许多拓扑算法<sup>[1]</sup>, 例如将能量消耗作为参考要素来决定传输路径<sup>[2]</sup>, 引入休眠模式保证传感器的高效利用<sup>[3]</sup>, 以及根据剩余能量对节点分簇<sup>[4]</sup>等.

分簇结构拓扑是无线传感器网络中一种常见的拓扑结构, 人们提出了很多相关的无线传感器网络的

拓扑控制算法. Heinzelman 等<sup>[5]</sup>提出了 LEACH 算法, 通过给定一个基于循环轮组的头节点选择的计算阈值  $T$ , 保证了网络中的传感器节点被选为头节点具有相同的可能性. 然而, 簇头节点在接收与传输数据的过程中会产生大量能耗, 影响负载的均衡性. Youssef 等<sup>[6]</sup>提出了 KOCA 算法, 该算法是一种重叠分簇算法, 适合于均匀分布的无线传感器节点, 每个节点成为簇头节点具有相同的可能性, 但是算法未考虑节点剩余能量, 在实际应用中存在一定的不足. Younis 等<sup>[7]</sup>提出的 HEED 算法实现了簇头节点的均匀分布, 提高了生成簇的速度, 通过引入节点剩余能量作为选择

收稿日期: 2015-04-29; 修回日期: 2015-11-10.

基金项目: 河北省自然科学基金项目(2012203119).

作者简介: 罗小元(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事拓扑优化、多智能体协调控制、无线传感网络等研究; 李昊(1989—), 男, 硕士生, 从事无线传感器网络拓扑优化算法的研究.

头节点的参量,使得簇头节点更适合进行数据的聚合与传输.然而该算法在生成簇的过程中可能会产生某些节点未加入任何簇的情况.Chen等<sup>[8]</sup>提出的 RCHMESHR-S 算法,是一种基于 LEACH 的含有睡眠模式的 4 层分簇式结构算法,在选取簇头时考虑了节点的剩余能量,并用分级的方式对传感器头节点进行替换更新,通过引入睡眠模式,减少了不必要的能量损耗.然而该算法未考虑到大规模分布式无线传感器网络中生成簇较多时簇头的通信方式.

本文提出一种基于最小刚性图的 3 层分簇结构无线传感器网络拓扑控制算法 (THCMRG).该算法有利于延长网络生命周期,并保证各个簇之间通信的连通性、鲁棒性以及负载的均衡性.

## 1 基础知识与问题描述

### 1.1 图论基础

传感器网络的拓扑结构通常用图来描述.本节将介绍所用到的一些基本图论知识.

考虑一个由  $N$  个节点组成的无线传感器网络,其拓扑用无向图  $G(\nu, E)$  表示.其中:顶点数集  $\nu = \{1, 2, \dots, N\}$  表示传感器节点,边集  $E = \{(i, j) \in \nu \times \nu : i \neq j\}$  表示传感器节点之间的通信链路.顶点是由随机部署的传感器节点的位置  $p_i \in R^n$  决定的.对于任意节点  $i, j \in \nu$ ,若满足  $\|p_i - p_j\| \leq R_c$ ,  $R_c$  为节点的传输范围,则节点  $j$  是节点  $i$  的通信邻居.

如果在保证各边长度不变的情况下,一个图不会发生形变,则这个图称为刚性图,否则称为可变形图.如果刚性图删除任意一条边都会导致此图变成可变形图,则称此图为最小刚性图,如图 1 所示.

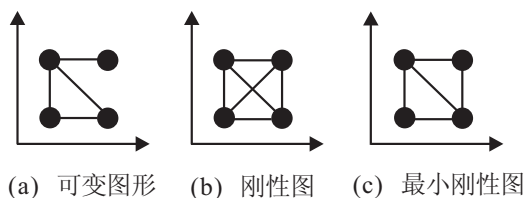


图 1 可变形图、刚性图和最小刚性图示意

最小刚性图中每个顶点至少要有两条邻接边<sup>[9]</sup>,因此,最小刚性图同时具有较小的通信复杂度和较强的鲁棒性.以最小刚性图结构建立的通信拓扑可以实现负载的均衡性,减少链路能量消耗,并延长网络寿命.

刚性图可用刚度矩阵代数描述,由文献 [10] 可知刚度矩阵具有如下性质:

**引理 1** 如果刚度矩阵  $\bar{M}$  存在  $2N - 3$  行元素构成的子矩阵满足

$$\text{rank}(\bar{M}) = 2N - 3, \quad (1)$$

则由这  $2N - 3$  行对应的边和  $N$  个顶点构成的图是最小刚性图.

此外,本文还需用到如下刚性图的替换引理<sup>[11]</sup>:

**引理 2** 如果已知刚性图  $G(\nu, \varepsilon)$  的一个子图  $G'(\nu', \varepsilon')$  可由任意其他刚性图子图  $G''(\nu'', \varepsilon'')$  替代,则得到的图仍是刚性的.

### 1.2 样本选择与能耗模型

#### 1.2.1 基于相关性的样本选择模型

研究表明,通过计算传感器数据相关性,使有相关度的传感器进入休眠状态,是一种用于降低传感器网络能耗的重要方法<sup>[12]</sup>.通过  $T_{ij}$  计算节点  $i$  与节点  $j$  的数据相关性,  $T_{ij}$  的取值范围为  $(-1, 1)$ .越接近  $-1$  或  $1$ ,传感器相关度越高.矩阵内元素  $T_{ij}$  的计算公式为

$$T_{ij} = \frac{(D_i - E[D_i]) \times (D_j - E[D_j])^T}{N \times \sqrt{\text{Var}(D_i)} \times \sqrt{\text{Var}(D_j)}}. \quad (2)$$

其中:  $D_i$  为节点  $i$  的传输数据,  $D_j$  为节点  $j$  的传输数据,  $N$  为传感器数目,  $\text{Var}(\cdot)$  表示计算方差,  $E[\cdot]$  表示计算数据平均值.

#### 1.2.2 能量消耗模型

本文采用一个无线传感器网络低能无线电研究中常用的能量耗散模型

$$E_{Tx}(k, d_{\text{StoD}}) = kE_{\text{elec}} + \begin{cases} k \times \varepsilon_{fs} \times d_{\text{StoD}}^2, & d_{\text{StoD}} < d_0; \\ k \times \varepsilon_{mp} \times d_{\text{StoD}}^{\alpha}, & d_{\text{StoD}} \geq d_0. \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $E_{Tx}(k, d_{\text{StoD}})$  为传输过程中的能量消耗,  $k$  为数据包的比特数,  $d_{\text{StoD}}$  为传输距离,  $E_{\text{elec}}$  为发送设备和接收设备单位能耗,  $\varepsilon_{fs}$  和  $\varepsilon_{mp}$  分别表示空闲和衰减模型.接收过程中能量消耗的计算方程表示为

$$E_{Rx}(k) = kE_{\text{elec}}, \quad (4)$$

其中  $E_{Rx}(k)$  表示接收过程中的能量消耗.

## 2 THCMRG 算法

本文提出一种 3 层分级的 THCMRG 拓扑算法.首先依据给定簇头选择阈值生成随机簇,在每个簇内再根据剩余能量生成  $M$  个子簇,选取子簇簇头能量最高的节点作为整个簇的簇头节点.该结构包含节点 Node、子簇簇头节点 (SCH)、簇头 (CH) 三级结构,如图 2 所示.

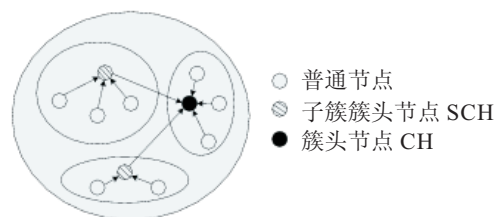


图 2 三级分簇式结构

三级结构中由节点从环节中收集信息并传递对应的子簇头节点 SCH,再由 SCH 节点汇聚传输信

息给簇头节点CH, 最后多个CH间生成最小刚性图, 按照最小刚性图的链路进行通信, 可以使得网络整体负载更均衡.

THCMRG算法由初始簇的生成、子簇的生成、最小刚性图的生成以及含有睡眠模式的稳定阶段这4个阶段组成.

## 2.1 初始簇的生成

在初始簇的建立阶段, 首先广播消息给所有传感器节点, 给每个节点在 $0 \sim 1$ 之间随机赋值, 再将对应值与设置阈值 $Th(u)$ 比较, 小于阈值的节点作为随机的簇头节点; 然后由选定的簇头节点向非簇头节点广播一个包含头节点ID的信息, 非簇头节点通过接收信号强度选择对应头节点, 发送加入信息, 并加入不同的分簇, 建立初始簇.

**程序1** 初始簇的生成.

```

1)  $C \leftarrow \phi, CH \leftarrow \phi,$ 
2)  $RXSS \leftarrow \phi,$  // 存储接收到
3) for all  $u \in v$  do
4)  $RN(u) \leftarrow RN[0 : 1]$  // 选择 $0 \sim 1$ 之间的随机数
5) if  $RN(u) < Th(u),$  then
6)  $C \leftarrow C \cup \{u\}$ 
7)  $CH(u) \leftarrow CH(u) \cup \{u\}$  // 根据设定阈值选择头节点
8) end if
9) end for
10) for all  $v \in N(CH)$  do
11)  $RXSS(v) \leftarrow RXSS(v) \cup SSI(CH)$ 
12) for all  $SSI(w), SSI(x) \in RXSS(v)$  do
13) if  $SSI(w) > SSI(x),$  then
14)  $CH(v) \leftarrow CH(v) \cup \{w\}$ 
15) else
16)  $CH(v) \leftarrow CH(v) \cup \{x\}$ 
17) end if
18) end for
19) end for

```

由于簇头选择过程中对各节点赋值是随机的, 初始分簇算法保证了网络中的传感器节点被选为头节点具有相同的可能性, 同时使网络分簇更均衡.

## 2.2 子簇的生成阶段

在子簇的生成阶段, 每个初始簇内生成 $M$ 个子簇. 根据节点缓冲容量决定子簇头的个数<sup>[13]</sup>, 这样可以避免过多的数据包被存储在同一节点中, 从而实现减少丢包率并且避免单个节点能量的过度损耗. 在簇内, 能量高的 $M$ 个节点被选为子簇簇头SCH, 以保证SCH有足够的能量用于收集和传递数据信息.

SCH中能量最高的节点被选为整个簇的簇头节点CH. 簇内期望的SCH数目 $M$ 计算公式<sup>[8]</sup>为

$$M = \left\lceil \frac{Cn_s}{SCn_s} \right\rceil, \quad (5)$$

$$SCn_s = \frac{D_{\text{packet}}}{N_{\text{buffer}}}. \quad (6)$$

其中:  $Cn_s$ 为整个簇内的节点数,  $SCn_s$ 为子簇内的节点数,  $N_{\text{buffer}}$ 为无线传感器节点的数据包缓冲数,  $D_{\text{packet}}$ 为一定时间内给定的数据包数.

通过式(5)和(6), 由簇头广播信息, 选出 $M$ 个SCH节点和CH节点, 再由每个SCH广播信息给簇内节点, 根据接收信号强度生成各个子簇. 子簇内节点收集信息并传递给SCH, 再由各SCH将信息汇聚并传递给CH.

**程序2** 子簇的生成.

```

1) 将簇内节点能量按照升序排列
2) 选择其中能量较高的节点作为SCH, 其中能量最高的点作为CH
3) for all  $v \in N(SCH)$  do
4)  $RXSS(v) \leftarrow RXSS(v) \cup \{SSI(SCH)\}$ 
5) for all  $SSI(w), SSI(x) \in RXSS(v)$  do
6) if  $SSI(w) > SSI(x),$  then
7)  $CH(v) \leftarrow CH(v) \cup \{w\}$ 
8) else
9)  $CH(v) \leftarrow CH(v) \cup \{x\}$ 
10) end if
11) end for
12) end for

```

子簇生成阶段将簇内能量按升序排列, 选择能量最高的 $M$ 个节点作为SCH, 可以有效地避免簇头节点能量因负荷过重而导致能量迅速消耗的现象, 保证了网络负载的均衡性.

## 2.3 最小刚性图的生成阶段

针对大规模分布式无线传感器网络, 对生成的多个簇的簇头节点CH采用生成最小刚性图的方法进行优化拓扑, 可以实现簇头节点都是2-连通的, 即簇间通信是2-连通的. 当CH节点因能量损耗而需要更换时, 并不需要重新对所有的CH重新生成最小刚性图, 只需在被更换的CH节点所在的簇内, 选择新的CH节点接替原头节点, 与原头节点的邻居进行通信, 就可以保证所生成的整体拓扑链路图仍是最小刚性的. 对于多个CH应用刚度矩阵, 生成最小刚性图算法<sup>[10]</sup>如下.

**算法1** 最小刚性图的生成.

```

1) 建立簇头节点的刚度矩阵  $\tilde{M}_i$ 
2) 初始化  $M_i,$  令  $M_i = \tilde{M}_i(1)$ 

```

3) for  $j = 1 : |\varepsilon|$  // 其中  $|\varepsilon|$  为簇头节点所形成的通信链路边数

4) if  $\text{rank}(M_i) \leq 2(|N_i| + 1) - 3$ , then

5)

$$M_i = \begin{bmatrix} M_i \\ \bar{M}_i(j+1, :) \end{bmatrix}$$

6) if  $M_i$  是满秩, then

7) 将此行对应的边记录到集合  $|\varepsilon|$  中

8) end if

9) end if

10) end for

11) for  $u = \{N, i\}$

12) for  $v = \{N_i, i, u \neq v\}$

13) if  $(u, v) \notin \varepsilon'$ , then

14) 删除所有在  $\varepsilon'_q (q \in i \cup N_i)$  中记录的  $(u, v)$

15) end if

16) end for

17) end for

**注 1** 由文献 [10] 和算法 1 可知, 最小刚性图生成算法是分布式的. 由算法 1 的第 3) 步可知, 第  $i$  个簇头节点  $\text{CH}_i$  运行该算法的循环次数不多于  $|\varepsilon|$  次, 故算法 1 的复杂度是线性阶  $O(n)$  的. 因此, 引入基于最小刚性图的拓扑优化机制不会大幅增加网络的计算复杂度.

## 2.4 稳定阶段

在稳定阶段, 数据传输是基于子簇成员接收到的 TDMA 时序表的, 这样既可以避免数据包的冲突, 又可以使得能量利用更高. 通过接收所有节点数据信息, 计算子簇成员节点与子簇簇头节点 SCH 之间的数据相关性. 假设相关度绝对值趋近于 1, 并且子簇成员与子簇头的距离很小, 则子簇成员节点进入休眠状态. 引入变量  $r$  表示当前循环圈数,  $\alpha$  表示传输的轮数, 如果  $r \bmod \alpha = 1$ , 则子簇成员恢复成活跃节点, 否则子簇成员节点进入休眠状态. 稳定阶段子簇成员节点从环境中收集数据传递给子簇头节点 SCH, SCH 接收子簇内数据并传递给簇头节点 CH, 多个 CH 节点再生成最小刚性图. CH 从子簇头 SCH 节点接收数据并按生成的最小刚性图链路进行数据传输. 程序如下.

**程序 3** 稳定阶段

1) if  $u$  被安排用于传输数据, then

2) 传输并聚合数据;

3) else

4) 转换到休眠模式;

5) end if

## 3 THCMRG 算法分析

本节针对 THCMRG 算法的一些特性进行理论分析与证明. 由网络中各个簇头节点 CH 经过 THCMRG 算法优化后得到的拓扑图  $G'(v', \varepsilon')$  具有以下性质.

**性质 1** 网络中各个簇之间通信都是 2-连通的.

**证明** 根据本文算法, 各簇头节点组成的拓扑图是一个最小刚性图, 而最小刚性图是属于刚性图的<sup>[10]</sup>, 由 1.2 节中刚性图的性质可知, 刚性图是连通的且每个顶点至少有两边邻接的边<sup>[9]</sup>. 从而可知, 刚性图至少是 2-连通的. 因此, 采用 THCMRG 算法所生成的网络中, 簇头节点间都是 2-连通的, 即各个簇间的通信都是 2-连通的.  $\square$

**性质 2** 网络中各簇之间通信链路拓扑具有稀疏性.

**证明** 由引理 1 可知, 簇头节点通过最小刚性图生成程序所形成的最小刚性拓扑具有  $2N - 3$  条边, 因此, 所形成网络的边数与簇头节点数呈线性关系. 由稀疏性的定义<sup>[14]</sup>可知, 簇头节点形成的拓扑具有稀疏性, 即网络中各簇间通信链路拓扑具有稀疏性.  $\square$

**性质 3** 通过 THCMRG 算法形成的簇间通信拓扑链路网络不存在瓶颈节点.

**证明** 瓶颈节点定义为: 拓扑中某个节点及其相邻的边去除之后, 剩下的拓扑将变成不连通, 这样的节点就被称为瓶颈节点<sup>[15]</sup>. 假设按照 THCMRG 算法所生成的拓扑中存在瓶颈节点, 则至少需要有 2 个子图是通过该瓶颈节点相连接的, 并且, 这些子图可以在不改变任何边的长度的情况下围绕该瓶颈节点运动. 这与最小刚性图的定义相矛盾. 因此, 本算法簇头节点拓扑链路图中不会出现瓶颈节点.  $\square$

**性质 4** 在 THCMRG 算法形成的簇头节点网络中, 采用分级分簇方式对失效节点替换, 只需要进行局部调整, 不必重新对整体网络进行拓扑优化.

**证明** 假设新生成的网络不是最小刚性的, 当某簇头节点失效引入簇内子簇簇头节点进行替换, 并与原簇头节点通信邻居重新构成网络时, 新生成的子图中顶点和链路边数都不发生变化, 由引理 1 可知, 新生成的子图仍是最小刚性的. 因此, 此替换过程是由新的刚性子图替换原刚性子图, 可知假设与引理 2 相矛盾, 假设不成立. 因此, 新生成的网络拓扑仍是最小刚性的.  $\square$

## 4 仿真实验

本节用 Matlab 软件进行仿真实验来验证本文的 THCMRG 算法的有效性. 参照文献 [8] 中所给的参数, 在  $160 \times 160 \text{ m}^2$  的范围内分别对随机分布传感器网络进行实验. 假定无线传感器节点传输范围不限, 传输

初始能量为0.5J,  $E_{elec}$  为50nJ,  $\epsilon_{fs}$  为10pj/(bit·m<sup>2</sup>),  $\epsilon_{mp}$  为0.0013pj/(bit·m<sup>4</sup>), 而基站能量通过太阳能供给, 不影响网络生命周期, 可以不考虑基站的能量消耗。

在仿真实验中, 利用RCHMESHR-S算法<sup>[8]</sup>、THCXTC算法<sup>[10]</sup>、THCMRG算法对各簇头节点优化生成拓扑图, 如图3所示。其中THCXTC为基于经典XTC拓扑算法的三级分簇算法。图3中: 实心圆点表示根据剩余能量选出的整体网络中各簇头节点CH, 空心圆点则表示余下的簇内节点, 节点间连线表示依据拓扑生成的通讯链路。

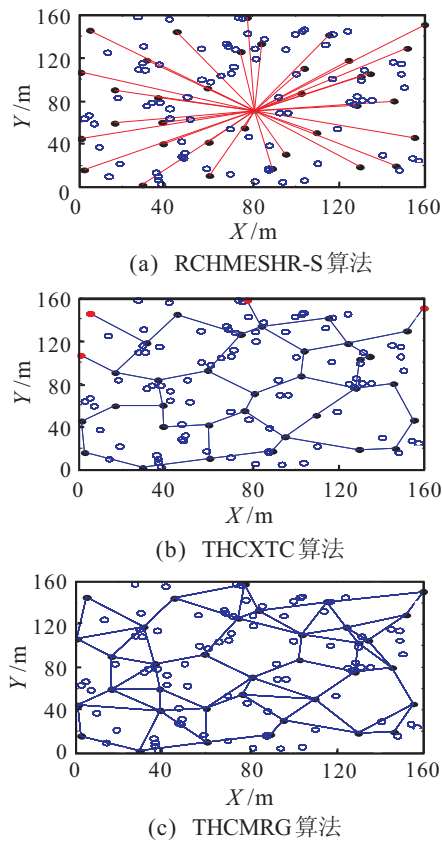


图3 不同算法下通讯拓扑链路图

由图3中的比较可以发现: RCHMESHR-S算法中, 直接将高能簇头节点数据传输给簇头节点中能量最高的点, 当生成簇较多时, 会加剧簇头节点能量消耗; 采用经典THCXTC拓扑方法对簇头节点优化时, 链路的传输距离及链路的连通性有了较好的改善, 但网络中存在一些簇头节点仅有一个邻居节点, 如果出现干扰或损耗, 则导致通信链路中断, 影响簇间通信; 而采用THCMRG算法生成的拓扑网络, 每个簇头节点至少有两条链路与其相连, 可知拓扑网络中簇与簇之间是2-连通的, 当网络中的某一或者某些链路断裂时, 仍可以保证整个网络簇与簇间的通信是连通的。因此, 相比较而言, 本文所提出的算法具有较好的连通性和鲁棒性。

网络中开始出现节点死亡现象是判断网络性能

的重要指标之一。仿真验证了当随机分布120个与300个传感器节点时, 应用不同拓扑方法优化网络, 当网络中出现死亡节点时, 记录循环数如图4所示。

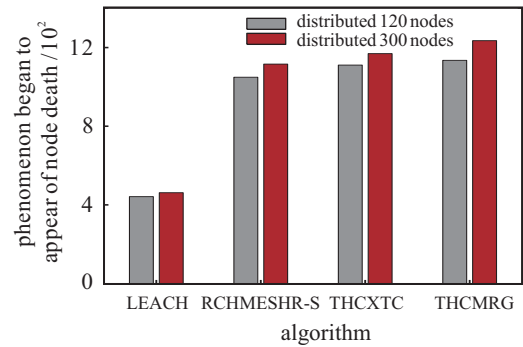
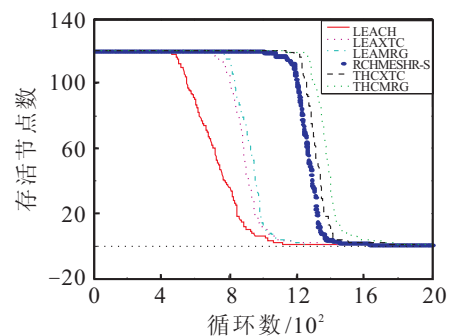


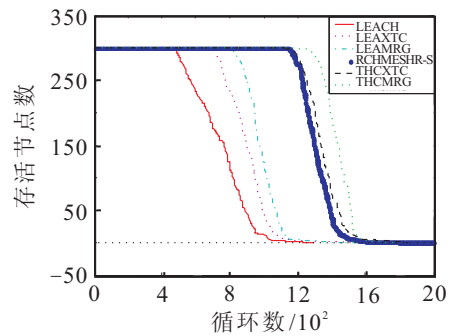
图4 算法第1个节点死亡时的循环数

由图4可知, 在部署120节点场景下, 采用THCMRG算法与LEACH算法、RCHMESHR-S算法、THCXTC算法相比, 出现节点死亡现象时间分别延缓了156.7%、8.2%、2.16%。同样, 在部署节点为300的场景下, 节点死亡现象时间分别延缓了167.3%、10.7%、5.6%。可见部署节点较多的情况下, THCMRG算法的优势更加明显。由此可知, THCMRG算法因节点死亡而对网络整体性能开始出现影响的时间更晚一些, 因而网络通信传输更加稳定。

在不同场景下对多种拓扑算法进行仿真对比, 记录随着无线传感器网络的运行, 随循环数增加, 网络中存活节点数的变化如图5所示。



(a) 120个传感器节点



(b) 300个传感器节点

图5 网络中节点状态

由图5中算法比较可知, 随着网络的运行, 相比经典LEACH算法, 基于最小刚性图拓扑的LEAMRG

算法优化后,节点能耗更加均衡;但与引入分级分簇优化的 THCMRG 算法相比,THCMRG 算法有效地延缓了网络节点出现死亡的现象,可见分级分簇方法与休眠模式的结合,能较好地延长网络的生命周期.由 LEAXTC 与 LEAMRG 算法以及同样基于分级分簇拓扑方式的 THCMRG 算法与 THCXTC 算法比较可知,采用最小刚性图拓扑方法,不仅可以保证网络簇间通信的连通性、鲁棒性,同时 THCMRG 算法中节点整体坚持的循环时间更长,表明本文算法可以更好地延长网络的生命周期.并且 THCMRG 算法中节点开始出现能量耗尽的现象更晚,表明网络更稳定.由图 5 中曲线斜率可知,使用 THCMRG 算法,当出现节点死亡后网络中其他节点能量也迅速耗尽,可见网络中节点能量的负载更加均衡.

## 5 结 论

本文提出了一种基于最小刚性图的三级分簇式拓扑算法.采用基于节点剩余能量的三级分簇式结构,避免了头节点因负荷过重而导致过早死亡的现象;同时针对大规模分布式无线传感器网络中分簇较多的情况,对多个簇头节点采用生成最小刚性图的方法进行拓扑优化,既可以延长网络的生命周期,又可以保证簇头间都是 2-连通的,即簇与簇之间的通信都是 2-连通的,优化了簇间通信能力,保证了簇间通信的稳定性.同时,考虑到网络中传感器节点的能量消耗,簇头节点的动态选择与拓扑结构变换问题,在网络中簇头节点替换过程中采用簇内局部调整的方式,可以避免网络整体拓扑重造成造成的能量消耗,有利于延长网络的生命周期.

由实验研究可知,采用 THCMRG 算法,针对大规模无线传感器网络分簇数目较多时,基于最小刚性图原理对多个簇头进行拓扑优化,可使负载更加均衡,簇与簇之间有较好的连通性和鲁棒性,同时采用三级分簇结构并引入休眠模式,减少了不必要的能量消耗,延长了网络的生命周期.

## 参考文献(References)

- [1] Aziz A A, Sekercioglu Y A, Fitzpatrick P, et al. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks[J]. *Communications Surveys & Tutorials of IEEE*, 2013, 15(1): 121-144.
- [2] Rizvi S, Qureshi H K, Ali Khayam S, et al. A1: An energy efficient topology control algorithm for connected area coverage in wireless sensor networks[J]. *J of Network and Computer Applications*, 2012, 35(2): 597-605.
- [3] Zhou W, Mou J, Wang T, et al. Target-synchronization of the distributed wireless sensor networks under the same sleeping-awaking method[J]. *J of the Franklin Institute*, 2012, 349(6): 2004-2018.
- [4] Liao Y, Qi H, Li W. Load-balanced clustering algorithm with distributed self-organization for wireless sensor networks[J]. *Sensors J of IEEE*, 2013, 13(5): 1498-1506.
- [5] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks[C]. *Proc of the 33rd Hawaii Int Conf on System Sciences*. Hawaii, 2000: 1-10.
- [6] Youssef M, Youssef A, Younis M. Overlapping multihop clustering for wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2009, 20(12): 1844-1856.
- [7] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.
- [8] Chen Y L, Shih Y N, Lin J S. A four-layers hierarchical clustering topology architecture with sleep mode in a wireless sensor network[C]. *The 7th Int Conf on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems(CISIS)*. Taicang: IEEE, 2013: 335-339.
- [9] Luo X Y, Li S B, Guan X P. Automatic generation of min-weighted persistent formations[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(8): 3104-3114.
- [10] Luo X Y, Yan Y L, Guan X P. Topology control based on optimally rigid graph in wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2013, 57(4): 1037-1047.
- [11] Luo X Y, Li S B, Guan X P. Automatic generation of minimally persistent formation using rigidity matrix[C]. *Proc of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Xi'an, 2009: 1198-1203.
- [12] Gedik B, Liu L, Yu P S. ASAP: An adaptive sampling approach to data collection in sensor networks[J]. *IEEE Trans on Parallel & Distributed Systems*, 2008, 18(12): 1766-1783.
- [13] Lee E, Park S, Yu F, et al. Data gathering mechanism with local sink in geographic routing for wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Consumer Electronics*, 2010, 56(3): 1433-1441.
- [14] Huang J, Zhang T, Metaxas D. Learning with structured sparsity[J]. *J of Machine Learning Research*, 2011, 12(7): 3371-3412.
- [15] Razzaq A, Sjodin P, Hidell M. Minimizing bottleneck nodes of a substrate in virtual network embedding[C]. *2011 Int Conf on the Network of the Future(NOF)*. Paris: IEEE, 2011: 35-40.