

## 基于区域划分的 WSN 非均匀多跳分簇路由算法

胡 源, 牛玉刚<sup>†</sup>, 邹媛媛

(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)

**摘要:** 延长网络生存周期是 WSN 的核心问题之一. 为均衡网络能耗, 有效延长网络生存周期, 提出一种保证区域能耗均衡的非均匀多跳分簇路由算法. 通过对监测区域的等间距环形划分和等夹角扇形划分, 得到同环簇大小相等、不同环簇大小由外到里依次递减的非均匀分簇方案, 保证网络能耗效率最优. 在簇头选取阶段, 通过与距离相关的通信代价评价函数在每个子区域选择最合适的节点作为簇头, 减少网络局部能耗. 仿真结果表明了所提出算法的有效性.

**关键词:** 区域划分; 能耗均衡; 非均匀分簇; 多跳传输

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

### A zone-based unequal multi-hop clustering algorithm in WSNs

HU Yuan, NIU Yu-gang<sup>†</sup>, ZOU Yuan-yuan

(Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Process of Ministry of Education, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** Energy efficiency is a major concern in wireless sensor networks. A zone-based unequal multi-hop clustering (ZMC) algorithm is proposed in this paper to balance the energy consumption and prolong the network lifetime of the network. By dividing the network into equal-distant rings and equal-angle sectors, the optimal cluster formation is obtained. In the cluster head selection phase, a distance-based communication cost function is designed for electing proper cluster heads. As a result, the local and global energy efficiency is achieved. Simulation results show the good performance of the algorithm for prolonging the network lifetime.

**Keywords:** zone division; energy balancing; unequal clustering; multi-hop communication

## 0 引言

随着微机电技术、传感器技术和无线通信技术的发展, 无线传感器网络 (WSN) 在工农业生产、环境监测、战场监控、抢险救灾、智能医疗、智能交通和科研等领域的应用越来越广泛. WSN 是由大量部署在监测区域内的节点和少数基站组成的无线、多跳自组织网络. 由于网络中的节点由电池供电, 且节点的能量难以得到有效补充, 减少能耗、延长网络生存时间是无线传感器网络研究的核心问题之一<sup>[1-2]</sup>.

WSN 中节点采集的数据通过单跳或多跳传输发送到基站. 在单跳网络中, 节点直接将数据发送给远端的基站会消耗大量能量, 减少了网络的生存时间<sup>[2]</sup>. 同时, 远离基站的节点比靠近基站的节点消耗更多的能量而过早死亡, 无法保证网络对监测区域的全覆盖. 当网络规模很大或基站远离监测区域时,

离基站较远的节点因自身通信能力受限而无法与基站直接通信, 需要通过多跳的方式将数据发送给基站. 在多跳传输的情形下, 传感器节点既作为源节点采集数据, 又作为路由节点转发数据, 靠近基站的节点因承担大量数据转发任务而过早死亡, 在基站附近形成“能量空洞”, 破坏了网络的连通性, 使网络过早失效<sup>[3]</sup>. 因此, 在减少网络能耗的同时, 均衡网络能耗也是提高网络 QoS (quality of service) 性能、延长网络生存时间的必然要求.

分簇能有效减少能耗、延长网络生存周期<sup>[4]</sup>. 在簇型网络中, 存在两种角色的传感器节点: 成员节点 (CM) 和簇头节点 (CH). CM 节点将收集的数据发送到 CH, CH 将收集到的数据压缩之后发送到基站. 分簇协议具有易于扩展的特性, 适合于大规模的网络, 能提高网络的能量和带宽利用率, 是 WSN 的研究热

收稿日期: 2016-05-10; 修回日期: 2016-11-24.

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

作者简介: 胡源 (1988—), 男, 博士生, 从事无线传感器网络分簇协议的研究; 牛玉刚 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事随机系统、网络拥塞控制、网络控制系统、无线传感器网络、智能电网等研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: acniuyg@ecust.edu.cn

点之一. CH的选取是分簇协议的重点. 节点担任CH的次数、节点的剩余能量和节点的位置是最常被用到的CH选取指标. LEACH协议在选取CH时,通过轮询的方式保证在一个周期内节点只担任一轮的簇头,均衡了网络能耗<sup>[5]</sup>. HEED协议选取CH时考虑了节点的剩余能量、通信代价和网络中CH的分布,避免能量少的节点过早死亡,延长了网络生存周期<sup>[6]</sup>. EBLP协议选择能量多的节点作为CH,通过控制CM个数来平衡网络能耗<sup>[7]</sup>.

为了减轻多跳传输中的“能量空洞问题”,相关学者提出了多种非均匀多跳分簇协议. UCR协议通过设置一个与节点到基站距离成正比的CH竞争半径来调整CH的分布,让靠近基站的CH有更多的能量来承担数据转发任务<sup>[8]</sup>. 文献[9]中的DAR协议根据节点到基站跳数和网络负载决定是否通过比自身跳数小的节点将数据转发到基站,从而平衡网络不同区域的能耗. 文献[10]设计了与节点剩余能量、节点分布密度和节点成为CH次数相关的综合指标选择CH,保证节点密集和离基站较近的区域簇内成员个数较少. EBCAG协议将每个节点到基站的最短跳数定义为节点的梯度,选择剩余能量多的节点作为CH,并根据CH的梯度确定簇半径的大小和簇间数据传输路径<sup>[11]</sup>. 文献[12]提出了一种采用多指标来均衡节点能耗的分簇多跳路由协议EBCRP,在CH选取和簇间传输阶段综合考虑节点剩余能量和到基站的距离,保证靠近基站的CH能分配更多的时隙来转发下游CH的数据.

WSN中均衡网络能耗的最优分簇问题是一个NP难问题<sup>[13]</sup>. 为此,一些智能算法被应用到分簇过程中求取近似最优解. 文献[14]提出了一种基于遗传算法的负载均衡分簇协议,该算法通过设置与节点负载相关的适应度函数,通过选择、交叉、变异运算选择合适的节点作为簇头来均衡网络能耗. 文献[15-16]将模糊逻辑引入非均匀分簇的过程中,提出了EAUCF和DUCF分簇算法. EAUCF算法通过设置与到基站距离和节点剩余能量相关的模糊变量,设置模糊规则确定候选簇头的半径. DUCF算法通过建立一个以节点剩余能量、连通度和到基站的距离为输入,以成簇的概率和簇的大小为输出的模糊控制系统来选择CH、控制簇半径的大小、均衡网络能耗. 文献[17]提出的分簇算法EBLeach-C将基于SOM和PSO的聚类方法作用于CH的选取过程中,利用能量和拓扑信息来均衡网络能耗.

本文提出一种基于区域划分多跳分簇算法ZMC

(zone-based multi-hop clustering),将监测区域按照到基站的距离进行等距离划分,在每个环形区域内划分个数相同的簇,保证簇的大小随着CH到基站距离的减小而减小,并计算出整个网络能耗最少时的簇个数,均衡了网络不同区域的能耗. 在簇间传输的过程中,通过选择同一扇形区域的节点作为下跳转发节点来控制转发跳数、均衡簇间能耗,延长了网络的生存周期. 仿真结果表明了所提出算法的有效性.

## 1 网络模型

本文假设共有 $N$ 个节点随机分布在半径为 $R$ 的圆形区域内,基站位于圆心处,基站的通信半径和能耗不受限制,节点的初始能量为 $E_0$ . 节点配置有GPS装置,其位置是已知的,且根据与目的节点的距离来调节发射功率的大小. 同时,假设网络的链路是对称的,两个节点之间相互进行通信所需的能耗相同,通过相关协议网络中所有的节点已经分配了ID号并实现了全局的时间同步. 由于数据处理的能耗远远小于数据传输的能耗,本文忽略数据压缩的能耗,采用文献[5]中的能耗模型,即节点发送 $l$ 比特数据到距离为 $d$ 的下跳节点消耗的能量为

$$E_T(l, d) = \begin{cases} l \times E_{\text{elec}} + l \times \varepsilon_{\text{fs}} \times d^2, & d \leq d_0; \\ l \times E_{\text{elec}} + l \times \varepsilon_{\text{mp}} \times d^4, & d > d_0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $E_{\text{elec}}$ 为节点发送1比特数据节点内电路的能耗; $\varepsilon_{\text{fs}}$ 和 $\varepsilon_{\text{mp}}$ 为信号放大功率;距离阈值 $d_0 = \sqrt{\varepsilon_{\text{fs}}/\varepsilon_{\text{mp}}}$ ,当发送距离小于 $d_0$ 时,功率放大模型采用自由空间信道模型,否则采用多路信道衰减模型. 节点接收 $l$ 比特数据的能耗为

$$E_R(l) = l \times E_{\text{elec}}. \quad (2)$$

## 2 ZMC分簇算法

本文提出的ZMC分簇算法包含5个步骤:将整个网络进行环形区域的划分、确定每个环形区域内的最优簇个数、簇的划分、簇头的选取、簇间传输路由的确定.

### 2.1 网络环形区域的划分

为避免能耗空洞问题,本文提出的算法根据节点到基站的距离将节点进行以下划分:

1) 当节点到基站的距离 $d$ 满足以下条件时:

$$d < d_{\text{th}} = \alpha \sqrt{\varepsilon_{\text{fs}}/E_{\text{elec}}}, \quad (3)$$

节点和基站直接通信,节点到基站的转发跳数 $H = 1$ ,其中 $\alpha$ 为调节系数. 对于单个节点,当 $\alpha = 1$ 时节点直接和基站通信能耗更少,但会导致负载较重的内环节点转发外环CH数据时与基站的通信距离较远,不利于均衡整个网络的能耗. 通过仿真发现,当 $\alpha = 0.5$

时ZMC算法能有效延长网络生存时间.

2) 对不满足1)的节点, 以 $\Delta d$ 为层间距对其进行分层, 外层的节点通过内层节点与基站通信. 网络划分如图1所示.

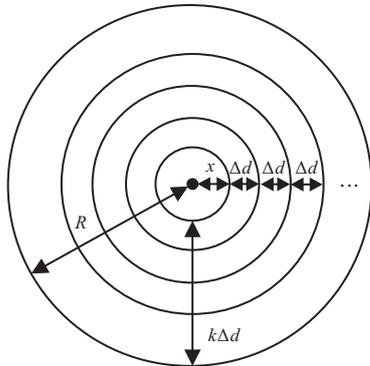


图1 网络划分

图1中, 环间距 $\Delta d$ 的大小根据节点的通信半径的大小、初始能量和具体应用的实时性要求人为设置. 用 $\lceil u \rceil$ 表示比 $u$ 大的最小整数, 则节点到基站的跳数与其到基站距离 $d$ 的关系为

$$H = \left\lceil \frac{d - d_{th}}{\Delta d} \right\rceil. \quad (4)$$

网络中节点的最大转发跳数为

$$H_{max} = \left\lceil \frac{R - d_{th}}{\Delta d} \right\rceil + 1. \quad (5)$$

第 $i$ 层环形区域的节点个数为

$$N_i = \begin{cases} \frac{Nd_{th}^2}{R^2}, & i = 1; \\ \frac{N\Delta d[2d_{th} + (2i - 3)\Delta d]}{R^2}, & 2 \leq i \leq H_{max}. \end{cases} \quad (6)$$

## 2.2 环形区域簇个数的确定

第 $i$ 层环形区域的总初始能量为

$$E_i = E_0 \cdot N_i. \quad (7)$$

假设第2层到第 $H_{max}$ 层每层簇个数为 $K_{CH}$ , 则第 $i$  ( $2 \leq i \leq H_{max}$ )层环形区域每个簇内成员个数为

$$m_i = \lceil N_i / K_{CH} \rceil. \quad (8)$$

第 $i$  ( $2 \leq i \leq H_{max}$ )层环形区域簇半径可近似为

$$R_i = \sqrt{\frac{\Delta d(2d_{th} + (2i - 3)\Delta d)}{K_{CH}}}. \quad (9)$$

在理想能耗均衡的情况下, 网络内所有的节点同时死亡. 每一轮数据采集周期内第 $i$  ( $2 \leq i \leq H_{max}$ )层环形区域的簇内传输总能耗的期望为

$$E[C_i^{intra}] = (N_i - K_{CH})l(2E_{elec} + \varepsilon_{fs} \cdot R_i^2/2). \quad (10)$$

将式(6)、(8)和(9)代入(10)中, 令 $\Omega_i = \Delta d[2d_{th} + (2i - 3)\Delta d]$ , 可得

$$E[C_i^{intra}] = \left( \frac{2NE_{elec}\Omega_i}{R^2} - \frac{\Omega_i\varepsilon_{fs}}{2} + \frac{N\varepsilon_{fs}\Omega_i^2}{2R^2K_{CH}} - 2E_{elec}K_{CH} \right)l. \quad (11)$$

当 $i = 1$ 时, 环内的节点将发送到的数据直接发送给基站, 将基站作为一个特殊的簇头, 最内环的簇内传输总能耗的期望为

$$E[C_1^{intra}] = \frac{Nld_{th}^2}{R^2} \cdot (E_{elec} + \varepsilon_{fs} \cdot \frac{d_{th}^2}{2}). \quad (12)$$

整个网络簇内传输的总能耗为

$$E[C_{total}^{intra}] = \sum_{i=1}^{H_{max}} E[C_i^{intra}]. \quad (13)$$

将式(5)、(11)和(12)代入(13)中, 化简得到

$$E[C_{total}^{intra}] = c_1 + \frac{c_2}{K_{CH}} + c_3K_{CH}. \quad (14)$$

其中

$$c_1 =$$

$$E[C_1^{intra}] + \left( \frac{2NlE_{elec}}{R^2} - \frac{\varepsilon_{fs}l}{2} \right) \cdot (H_{max} - 1)^2 \Delta d^2,$$

$$c_2 =$$

$$\frac{Nl\varepsilon_{fs}}{2R^2} \left[ 4(H_{max} - 1)\Delta d^2 d_{th}^2 + 4(H_{max} - 1)^2 \Delta d^3 d_{th} + \frac{(2H_{max} + 1)(3H_{max}^2 - 3H_{max} + 6)\Delta d^4}{2} - 4\Delta d^4 \right],$$

$$c_3 = -2lE_{elec}(H_{max} - 1),$$

均为与 $K_{CH}$ 无关的常数.

为均衡簇内能耗, CH的理想位置是处在环内的中心带上, 此时相邻环CH的距离满足

$$d_{inter}^i = d_{inter}^{i-1} = \Delta d, \quad i = 1, 2, \dots, H_{max}. \quad (15)$$

环内的簇间传输能耗包括接收相邻外层CH数据的能耗和转发数据给相邻内层CH的能耗, 第 $i$ 层CH需要接收的转发数据量为

$$l_i^{receive} = (H_{max} - i)K_{CH}lE_{elec}. \quad (16)$$

第 $i$ 层CH需要接收的转发数据量为

$$l_i^{receive} = \begin{cases} (H_{max} - i + 1)K_{CH}lE_{elec}, & i \neq 1; \\ (H_{max} - 1)K_{CH}lE_{elec}, & i = 1. \end{cases} \quad (17)$$

第2层CH数据通过第1层成员节点转发给BS. 第2层CH节点到第1层转发节点的距离服从均匀分布 $U\left[\frac{\Delta d}{2}, \frac{\Delta d}{2} + d_{th}\right]$ , 其平方的期望值为

$$E[d_{1-2}^2] = \frac{3\Delta d^2 + 6\Delta dd_{th} + 4d_{th}^2}{12}. \quad (18)$$

第2层簇间传输的总能耗的期望为

$$E[C_2^{inter}] = (2H_{max} - 3)K_{CH}lE_{elec} + (H_{max} - 1)K_{CH}l\varepsilon_{fs}E[d_{1-2}^2]. \quad (19)$$

内环节点将外层数据转发给基站的能耗期望为

$$E[C_1^{\text{inter}}] = K_{\text{CH}}l(H_{\text{max}} - 1)\left(2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} \cdot \frac{d_{\text{th}}^2}{2}\right). \quad (20)$$

第 $i(3 \leq i \leq H_{\text{max}})$ 层簇间传输的能耗为

$$E[C_i^{\text{inter}}] = (2H_{\text{max}} - 2i + 1)K_{\text{CH}}lE_{\text{elec}} + (H_{\text{max}} - i + 1)K_{\text{CH}}l\varepsilon_{\text{fs}} \cdot \Delta d^2. \quad (21)$$

整个网络簇间传输的总能耗为

$$E[C_{\text{Total}}^{\text{inter}}] = \sum_{i=1}^{H_{\text{max}}} E[C_i^{\text{inter}}]. \quad (22)$$

将式(20)和(21)代入(22)中,化简得

$$E[C_{\text{Total}}^{\text{inter}}] = c_4 K_{\text{CH}}. \quad (23)$$

其中

$$c_4 = (H_{\text{max}} - 1)l\varepsilon_{\text{fs}} \cdot \frac{(6H_{\text{max}} - 9)\Delta d^2 + 6\Delta d d_{\text{th}} + 10d_{\text{th}}^2}{12} + (H_{\text{max}}^2 - 1)lE_{\text{elec}}$$

为与 $K_{\text{CH}}$ 无关的常数.

整个网络采集一轮的数据总能耗为

$$E[C_{\text{Total}}] = E[C_{\text{Total}}^{\text{intra}}] + E[C_{\text{Total}}^{\text{inter}}] = c_1 + \frac{c_2}{K_{\text{CH}}} + (c_3 + c_4)K_{\text{CH}}. \quad (24)$$

由式(24)可知,在 $(0, +\infty)$ 内, $E[C_{\text{Total}}]$ 是关于 $K_{\text{CH}}$ 的一个先减后增的函数,对 $E[C_{\text{Total}}]$ 求关于 $K_{\text{CH}}$ 的导数可得到使网络能耗最少的簇个数 $K_{\text{CH}}^{\text{opt}}$ .由于 $K_{\text{CH}}$ 为整数,在选取参数时,每层簇个数的最佳划分为 $K_{\text{CH}}^* = \lceil K_{\text{CH}}^{\text{opt}} \rceil$ .

### 2.3 簇的划分

当节点布置到监测区域后,基站在监测区域内广播“Hello-MSG”信息,节点根据接收到的信息计算自身到基站的距离.之后,每个节点在通信范围内广播“Handshake-MSG”信息,节点根据接收到的“Handshake-MSG”信息确定邻居节点的个数、距离和能量信息.

每层环形区域(内环除外)被经过基站夹角为 $\theta$ 的虚线等分成 $K_{\text{CH}}^*$ 份,每一等分区域代表一个簇区域 $\alpha_i(i = 1, 2, \dots, K_{\text{CH}}^*)$ ,夹角 $\theta$ 为

$$\theta = \frac{2\pi}{K_{\text{CH}}^*}. \quad (25)$$

每个节点根据自身的位置信息,可以确定处在哪一环和哪个扇形区域内,确定属于哪一个簇,分簇示意图如图2所示.

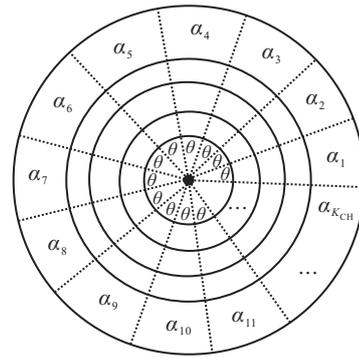


图2 环形区域分簇示意图

### 2.4 簇头选取

选取CH时应选择剩余能量多的节点,且应保证簇内数据传输总能耗少.本文提出的ZMC协议设计与节点剩余能量和簇内通信能耗相关的通信代价函数作为选择CH的依据,有

$$\text{COST}_i = \Psi_i \sum_{j \in \text{CH}_i} d_{ij}^2. \quad (26)$$

其中: $\text{CH}_i$ 为节点 $i$ 所在簇的节点集合; $d_{ij}$ 为节点 $i$ 和 $j$ 之间的距离; $\Psi$ 为调节系数,其值由节点自身剩余能量和簇内邻居节点剩余能量共同决定,即

$$\Psi_i = \begin{cases} 1, & E_{\text{re}}^i \geq E_{\text{aver}}^i; \\ \frac{E_{\text{re}}^i - E_{\text{min}}^i}{E_{\text{max}}^i - E_{\text{min}}^i}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (27)$$

这里: $E_{\text{re}}^i$ 为节点 $i$ 的剩余能量, $E_{\text{aver}}^i$ 为节点 $i$ 所在簇内节点的平均剩余能量, $E_{\text{max}}^i$ 和 $E_{\text{min}}^i$ 分别为节点 $i$ 所在簇内节点剩余能量的最大值和最小值.簇内所有节点根据式(26)计算自身通信代价并广播给簇内其他节点,通信代价最小的节点被选取为CH,其他节点作为CM向CH发送数据.

### 2.5 簇间传输

在簇间传输阶段,外层CH将数据发送给与该CH处在相同扇形区域的内层簇CH,在外层CH和基站之间建立最短路径.第二层CH将数据发送给内层节点时,选择与该CH处在相同扇形区域且剩余能量最多的节点作为下跳转发节点.内层节点将融合的数据直接发送给基站.

在簇建立过程中,成簇的一些控制信息通过CSMA/CD协议进行广播.簇建立之后,CH通过TDMA协议给每个CM分配时隙,成员节点在非分配时隙处于休眠状态以节省能量.为避免簇间通信信道的干扰,相邻簇通过CDMA协议进行信道配置.由于内环的节点直接和基站进行通信,其每一轮的大部分时隙将被分配用于簇间数据转发.

### 3 仿真分析

本文在 Matlab 平台对 LEACH、UCR 和本文的 ZMC 算法进行仿真, 以网络中 10% 的节点死亡时间 (TND) 和首个节点死亡时间 (FND) 作为网络生存周期的衡量指标, 在网络生存周期和区域能耗均衡性方面进行比较, 具体的仿真参数如表 1 所示. 表 1 中: LEACH 协议中的参数  $p = 0.1$ , UCR 协议中的参数  $TD_{max} = d_{th}$ ,  $R_0 = 60$ ,  $c = 0.3$ .

表 1 仿真参数设置

参数	取值
网络覆盖区域半径 $R/m$	200
网络节点个数 $N$	200
节点通信半径 $R_s/m$	200
数据包长度 $l/bit$	4000
节点初始能量 $E_0/J$	2
节点发送/接收电路能耗 $E_{elec}/(nJ/bit)$	50
自由空间模型节点放大器增益 $\epsilon_{fs}/(pJ/bit/m^2)$	10
多路径衰减模型节点放大器增益 $\epsilon_{mp}/(pJ/bit/m^4)$	0.0013
网络分区环间隔 $\Delta d/m$	30/40/50/60

#### 3.1 参数的选取

根据不同的环间距设置, 通过计算可以得到网络中节点到基站的最大跳数值  $H_{max}$ 、相应的每环最优簇个数  $K_{CH}^*$  和夹角  $\theta$ , 如表 2 所示.

表 2 分簇参数的确定

$\Delta d$	参数		
	$H_{max}$	$K_{CH}^*$	$\theta$
30	7	16	$\pi/8$
40	6	12	$\pi/6$
50	5	8	$\pi/4$
60	4	8	$\pi/4$

由于网络覆盖半径与阈值和网络分区间隔  $\Delta d$  之间不一定存在均等分割的关系, 可能导致最外环的环间距过小, 最外环的簇过小, 不利于网络生存周期的延长. 选择不同的环间距  $\Delta d$  时, 网络的生存周期指标 TND 如图 3 所示. 由图 3 可见, 当环间距  $\Delta d = 40$  时, 网络的生存时间最长.

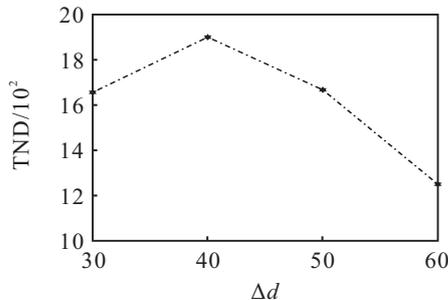
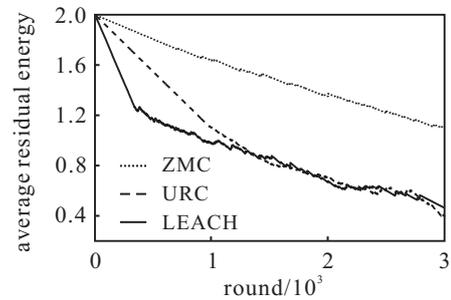


图 3 环间距取不同值时的网络生存时间

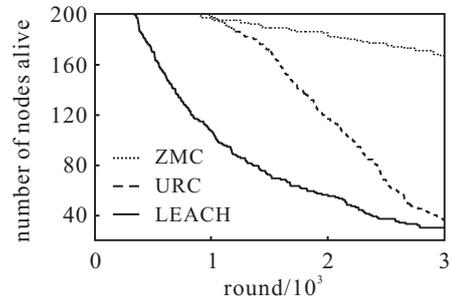
#### 3.2 网络生存周期

与 LEACH 和 UCR 相比, 本文提出的 ZMC 算法能有效延长网络的生存时间. 由图 4(a) 可见, 应用本

文 ZMC 算法时存活节点的平均剩余能量最多. 由图 4(b) 可见, 相比 LEACH, ZMC 算法的节点存活数更多. 这表明, 在网络规模较大时, 采用多跳传输比采用单跳传输能提高网络能耗效率. 相比于 UCR 算法, ZMC 算法的 TND 时间比 UCR 算法的 TND 时间延长了近 62%, 但是 ZMC 算法的 FND 时间比 UCR 算法 FND 时间提前了 27%. ZMC 算法以均衡区域间能耗为目标将网络划分为非均匀的簇. UCR 算法在考虑区域通过非均匀分簇均衡不同区域的能耗的同时, 通过选择能量多的节点作为 CH, 避免剩余能量少的节点过早死亡, 延长了网络的 FND 时间. 延长网络的 FND 时间是以较高的网络能耗速率为代价的, 因此, 延长局部个别节点的生存时间和提高整个网络的能耗效率、延长整个网络的生存时间需要综合考虑.



(a) 存活节点的平均剩余能量



(b) 存活节点的个数

图 4 ZMC 与其他算法的生存周期比较

图 5 显示了在网络每轮数据采集周期内 CH 总个数变化情况. 本文中, 节点的位置信息已知, ZMC 算法先将监测区域划分为固定的子区域, 在每个子区域内选择通信代价最小的节点作为簇头. 因此, CH 的个数是固定的 (60 个). UCR 中以节点之间的相对位置信息 (节点间的距离) 来设置 CH 竞争半径, 保证 CH 分布相对均匀, 其 CH 的个数是不固定的. 在 LEACH 中, CH 以一定的概率随机选取, 随着网络中存活节点总个数的减少, CH 的个数随之减少. 由于使用了节点的位置信息, ZMC 算法选择的 CH 分布得更加均匀, 这也是本文算法优于 UCR 和 LEACH 算法的一个重要原因.

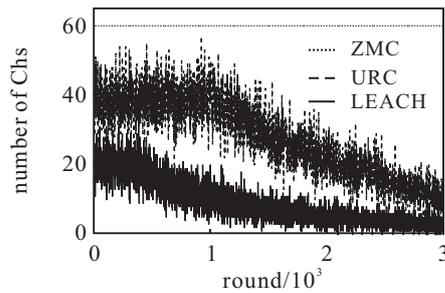


图5 簇头节点的个数

## 4 结 论

本文在已知节点的位置信息的前提下,提出了基于区域划分的非均匀多跳分簇算法,将整个监测区域按照到基站的距离进行等距离划分,得到使网络总能耗最少时最优分簇方案.对每个环形区域均等划分为若干个子区域,然后在每个子区域内选择通信代价最小的一个节点作为CH.在簇间通信阶段,通过选择同一扇形区域内的下跳节点保证了源节点与基站的通信距离最短,从而节省了网络的能量,延长了网络的生存周期.

### 参考文献(References)

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Liu A F, Zhang P H, Chen Z G. Theoretical analysis of the lifetime and energy hole in cluster based wireless sensor networks[J]. J of Parallel and Distributed Computing, 2011, 71(10): 1327-1355.
- [3] Liu A F, Wu X Y, Chen Z G, et al. Research on the energy hole problem based on unequal cluster-radius for wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2010, 33(3): 302-321.
- [4] Afsar M M, Tayarani-N M H. Clustering in sensor networks: A literature survey[J]. J of Network and Computer Applications, 2014, 46: 198-226.
- [5] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [6] 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.
- [7] 何延杰, 李腊元, 邢明彦. WSN中一种能量均衡的分簇路由协议的设计[J]. 传感技术学报, 2009, 22(10): 1510-1514.  
(He Y J, Li L Y, Xing M Y. Design of an energy balanced cluster-head routing protocol for WSN[J]. Chinese J of Sensors and Actuators, 2009, 22(10): 1510-1514.)
- [8] Chen G, Li C, Ye M, et al. An unequal cluster-based routing protocol in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2009, 15(2): 193-207.
- [9] Bi Y, Li N, Sun L. DAR: An energy-balanced data gathering scheme for wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(14): 2812-2825.
- [10] Liao Y, Qi H, Li W. Load-balanced clustering algorithm with distributed self-organization for wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors J, 2013, 13(5): 1498-1506.
- [11] Liu T, Li Q, Liang P. An energy-balancing clustering approach for gradient-based routing in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2012, 35(17): 2150-2161.
- [12] 李建洲, 王海涛, 陶安. 一种能耗均衡的WSN分簇路由协议[J]. 传感技术学报, 2013, 26(3): 396-401.  
(Li J Z, Wang H T, Tao A. An energy balanced clustering routing protocol for WSN[J]. Chinese J of Sensors and Actuators, 2013, 26(3): 396-401.)
- [13] Low C P, Fang C, Ng J M, et al. Efficient load-balanced clustering algorithms for wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(4): 750-759.
- [14] Kuila P, Gupta S K, Jana P K. A novel evolutionary approach for load balanced clustering problem for wireless sensor networks[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2013, 12: 48-56.
- [15] Bagci H, Yazici A. An energy aware fuzzy approach to unequal clustering in wireless sensor networks[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(4): 1741-1749.
- [16] Baranidharan B, Santhi B. DUCF: Distributed load balancing unequal clustering in wireless sensor networks using fuzzy approach[J]. Applied Soft Computing, 2016, 40: 495-506.
- [17] 闫效莺, 程国建, 孙涛. 一种能耗均衡的WSN分簇路由算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(14): 79-81.  
(Yan X Y, Chen G J, Sun T. WSN clustering routing algorithm of energy consumption balance [J]. Computer Engineering, 2012, 38(14): 79-81.)

(责任编辑: 郑晓蕾)