

## 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法\*

卿利<sup>+</sup>, 朱清新, 王明文

(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 610054)

### A Distributed Energy-Efficient Clustering Algorithm for Heterogeneous Wireless Sensor Networks

QING Li<sup>+</sup>, ZHU Qing-Xin, WANG Ming-Wen

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

+ Corresponding author: E-mail: qingli\_new@163.com, <http://www.uestc.edu.cn>

Qing L, Zhu QX, Wang MW. A distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006,17(3):481-489. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/481.htm>

**Abstract:** In order to prolong the network lifetime, energy-efficient protocols should be designed to adapt the characteristic of wireless sensor networks. Clustering Algorithm is a kind of key technique used to reduce energy consumption, which can increase network scalability and lifetime. This paper studies the performance of clustering algorithm in saving energy for heterogeneous wireless sensor networks. A new distributed energy-efficient clustering scheme for heterogeneous wireless sensor networks is proposed and evaluated. In the new clustering scheme, cluster-heads are elected by a probability based on the ratio between residual energy of node and the average energy of network. The high initial and residual energy nodes will have more chances to be the cluster-heads than the low energy nodes. Simulational results show that the clustering scheme provides longer lifetime and higher throughput than the current important clustering protocols in heterogeneous environments.

**Key words:** wireless sensor network; clustering algorithm; heterogeneous environment; energy-efficient

**摘要:** 为了延长网络的生存时间,需要设计能量有效的协议,以适应传感器网络的特点.成簇算法是传感器网络中减少能量消耗的一种关键技术,它能够增强网络的扩展性和延长网络的生存时间.研究了异构传感器网络中成簇算法在节省能量方面的性能,提出一种适应异构无线传感器网络的分布式能量有效的成簇方案.此方案基于节点剩余能量与网络节点的平均能量的比例来选举簇头节点.较高初始能量和剩余能量的节点比低能量节点拥有更多的机会成为簇头节点,从而使网络能量均匀消耗,延长网络的生存时间.模拟实验结果显示,与现有的重要成簇方案相比,新的成簇算法在异构网络下提供了更长的网络生存时间和更大的网络有效吞吐量.

**关键词:** 无线传感器网络;成簇算法;异构环境;能量有效

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近年来,随着无线通信、微机电系统(micro-electro-mechanism system)和传感器等硬件技术的发展,使得布置具有无线通信和板载信号处理能力的微型低能量传感器成为可能.无线传感器网络在环境监测、办公室智能化、战场监视以及交通流量监测等许多方面显示出越来越大的作用<sup>[1]</sup>.传感器节点有着严格的能量限制,而且一

\* Received 2005-05-29; Accepted 2005-09-06

次性的布置使得节点难以进行能量的补充,这些因素决定了传感器的生存时间是有限的.现有的自组织无线网络(Ad Hoc wireless networks)的协议难以适合传感器网络的需要.为了延长网络的生存时间,需要设计能量有效的协议,以适应传感器网络的特点.

将传感器节点组织成簇的形式可以有效地减少网络的能量消耗.许多能量有效的路由协议都是在簇结构的基础上进行设计的<sup>[2,3]</sup>.成簇技术也可以用于执行数据融合,数据融合将传感器感测的大量数据组合成少量有意义的信息集合<sup>[4,5]</sup>.在达到应用规定的充分数据率的条件下,传输的消息越少节省的能量就越多.在簇结构下,算法只在一个簇范围内执行而不需要等待控制消息传遍整个网络.在大型网络中,这一特点使得局部化算法比在整个全局结构中执行的中心化算法具有更好的扩展性和鲁棒性.同时,成簇技术对于消息广播和数据查询也非常有效,簇头(cluster-head)节点可以在簇内协助广播消息和搜集用户感兴趣的数据<sup>[6,7]</sup>.

传感器节点可以根据感测能力、计算能力、通信能力和能量等分为不同的种类.异构传感器网络(heterogeneous sensor networks)是指由多种不同类型的传感器节点构成的网络;反之,由相同类型传感器节点组成的网络称为同构传感器网络(homogeneous sensor networks)<sup>[8]</sup>.异构网络中,能量的异构特征是普遍存在的,因为不同类型的传感器节点配置不同的初始能量.即使是同种类型节点构成的传感器网络,为了延长网络寿命,而在原有节点的基础上布置新的传感器节点,新加入的传感器节点将拥有比老的节点更多的能量<sup>[9]</sup>.另一方面,由于无线通信中暂时链路失败或者区域的地形特点等随机事件的影响,每个节点不可能均等地使用其能量,传感器网络也会呈现一种能量异构的特点.本文将研究在这种能量异构的传感器网络下的成簇算法性能,并仍然称这种具有能量异构特征的网络为异构网络.

本文提出一种适合异构网络的新的分布式能量有效成簇算法 DEEC(distributed energy-efficient clustering algorithm).通过所有节点轮流成为簇头节点达到均匀消耗能量的目的,而选举簇头节点的概率与节点当前剩余的能量直接相关.每个节点成为簇头节点的轮数根据其初始能量和剩余能量的差别而不相同,即簇头轮转周期(rotating epoch to be cluster-head)适应节点的能量变化.具有较高初始能量和剩余能量的节点比低能量节点有更多的机会成为簇头节点.DEEC 通过采用这种考虑异构节点配置的成簇算法来延长网络的生存时间,特别是网络的稳定周期.模拟结果显示,DEEC 能获得比 LEACH<sup>[10]</sup>和 SEP<sup>[9]</sup>等主要成簇算法更长的生存时间和吞吐量.

本文第 1 节简要回顾无线传感器网络成簇算法研究的相关工作.第 2 节描述异构网络模型和节点成簇问题.第 3 节给出 DEEC 算法的细节并讨论如何选择算法的参数.第 4 节通过模拟实验研究 DEEC 算法性能,并与现有的主要算法相比较.第 5 节进行总结并提出今后的研究方向.

## 1 相关工作

当前提出了许多分布式成簇算法.根据算法所适应的传感器网络是同构网络还是异构网络,可以将这些成簇算法分为两类,即同构成簇算法和异构成簇算法.由于能量配置和网络演化的复杂性,要设计一种适合异构网络的能量有效的成簇算法是非常困难的.

当前大多数的成簇算法都是同构类型的,其中包括 LEACH<sup>[10]</sup>,PEGASIS<sup>[11]</sup>,HEED<sup>[12]</sup>等.LEACH 采用所有节点周期性的轮流担任簇头节点的办法来达到使得所有节点均匀消耗能量的目的.LEACH 是一种分布式的协议,每一个节点通过一个概率来决定自己是否成为簇头节点,并保证每轮有相当数量的簇头节点.PEGASIS 则将节点组织成链的形式,链的形成由每一个节点或者基站计算得到,因此需要知道网络拓扑的全局知识.HEED 也是一种完全分布式的成簇算法,它随机选择簇头节点,选举概率与该节点的剩余能量直接相关.但是,HEED 只适合同构网络环境.在异构网络中,HEED 可能使低能量的节点比高能量节点拥有更大的概率成为簇头节点.但在异构网络下,以上算法难以充分利用能量异构特点,低能量节点将早于高能量节点而死掉.不同于上述成簇算法,本文提出的 DEEC 算法是为异构网络而设计的.它借鉴了 LEACH 的簇头轮转思想,同时让簇头节点的选举与节点剩余能量直接相关,避免了同构成簇算法所遇到的问题.DEEC 还保留了分布式算法的优点,不需要中心机构在网络操作过程中提供全局信息.

许多研究者注意到了设计适合异构网络的成簇算法的重要性.文献[7]对局部化的层次成簇方法进行了讨

论,建议采用节点的剩余能量来决定簇头的选举,但没有提供实现方案.文献[10]提出一种根据节点剩余能量选举簇头的算法,缺点在于每个节点需要知道当前网络的总能量,而难以分布式实现.SEP<sup>[9]</sup>则是针对二级异构网络设计的,即网络中只有两种不同初始能量的节点.但是在多级异构网络下,节点的初始能量在一定范围内随机确定,使得 SEP 并不适合这种异构环境.本文提出的 DEEC 算法针对一般性的多级异构网络设计,通过以节点平均能量的估计值作为参考值,并根据剩余能量与参考值的比值自适应地调整簇头轮转周期,从而达到所有节点几乎同时死掉的目的,比以往的方法具有更强的可操作性.

近几年提出了许多 LEACH 的改进算法,其中包括 M-LEACH<sup>[13]</sup>,EECS<sup>[14]</sup>,LEACH-B<sup>[15]</sup>等,在不同方面改进了 LEACH 算法的性能.文献[16]研究了多跳簇结构网络,并使用一种随机成簇方案来组织传感器节点.文献[17]在图论的理论框架下提出无线网络的成簇问题.文献[18]则关注于成簇算法的消息有效性.以上对成簇算法的研究都没有考虑到异构网络中节点能量差异对算法的影响.

## 2 异构网络模型

本节中将介绍协议采用的网络模型.我们考虑两种异构无线传感器网络,即二级异构网络和多级异构网络.本文讨论了当前的几种主要成簇算法,包括 LEACH 和 SEP 等,并将 SEP 算法扩展到多级异构网络情形.

### 2.1 基本假设

假定  $N$  个传感器节点均匀地散布在一个  $M \times M$  的正方形区域内,节点总有数据传回到基站,基站远离监测区域并用于接入到有线网络或者蜂窝无线网络.这样的传感器网络可以用于军事目标的追踪和远程环境的监测.网络节点组织成簇结构的形式,簇头执行数据的融合功能以减少簇内节点产生数据的冗余信息,并负责将集中后的数据传输到基站.为了避免网络拓扑结构频繁改变,与文献[10]一样,我们假定节点是微移动或者静止不动的(如图 1 所示).

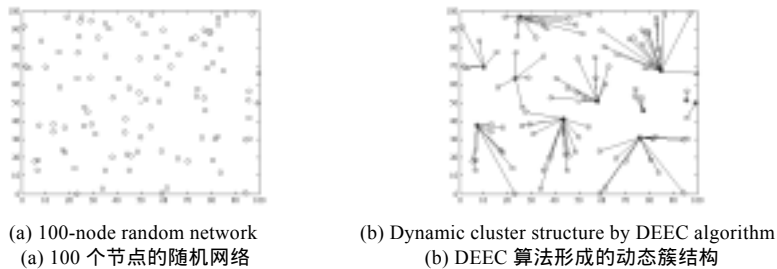


Fig.1

图 1

LEACH 假设所有节点配置相同的初始能量,即所适应的传感器网络为同构网络,并将网络的操作时间分成许多时隙,称为轮(round).为了在所有网络节点中平衡负载,LEACH 在每一轮中选举大约  $p_{opt}N$  个簇头节点,其中  $p_{opt}$  为优化簇头比例.每一个节点  $s_i$  由下面的概率门限来决定是否成为簇头节点:

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{p_{opt}}{r \bmod \frac{1}{p_{opt}}}, & \text{if } s_i \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $r$  为当前的轮数,  $G$  为在最近  $(r \bmod (1/p_{opt}))$  轮中没有成为簇头的节点集合.从而每个节点都有机会轮流成为消耗能量较多的簇头节点.

### 2.2 二级异构网络

在二级异构传感器网络中,仅包含高级节点(advanced node)和普通节点(normal node)两种具有不同初始能

量的传感器节点. 设  $E_0$  表示正常节点的初始能量,  $\lambda$  表示高级节点所占的比例,  $\alpha$  表示高级节点初始能量超过正常节点初始能量的倍数. 在总的  $N$  个节点中有  $\lambda N$  个高级节点的初始能量为  $E_0(1+\alpha)$ , 剩下的  $(1-\lambda)N$  个正常节点的初始能量为  $E_0$ . 那么, 二级异构网络总的初始能量为

$$E_{total} = N(1-\lambda)E_0 + N\lambda E_0(1+\alpha) = NE_0(1+\alpha\lambda) \quad (2)$$

因此, 异构网络的总能量比同构网络的总能量  $NE_0$  多  $\alpha\lambda$  倍, 也就是说, 异构网络多了  $\alpha\lambda$  个虚拟的节点.

SEP<sup>[9]</sup> 协议是为这种二级异构网络而设计的. SEP 为高级节点和正常节点分别设置不同的加权概率:

$$p_{adv} = \frac{p_{opt}}{1+\alpha\lambda}, p_{nrm} = \frac{p_{opt}(1+\alpha)}{(1+\alpha\lambda)} \quad (3)$$

替代式(1)中的  $p_{opt}$  便得到概率门限. 于是, 高级节点成为簇头的轮数要小于普通节点, 使得高级节点作为簇头的机会大于普通节点成为簇头的机会. 高级节点将与正常节点在几乎相同的时间死掉, 从而延长了网络的稳定时间.

### 2.3 多级异构网络

在多级异构网络中, 节点的初始能量在闭区间  $[E_0, E_0(1+\alpha_{max})]$  内随机分布, 其中  $E_0$  为能量下界, 而  $\alpha_{max}$  决定节点的最大初始能量值. 在网络运行开始时, 每个节点  $s_i$  配置的初始能量为  $E_0(1+\alpha_i)$ , 其中  $\alpha_i$  为多于  $E_0$  的能量倍数. 因此, 多级异构网络总的初始能量等于

$$E_{total} = \sum_{i=1}^N E_0(1+\alpha_i) = E_0 \left( N + \sum_{i=1}^N \alpha_i \right) \quad (4)$$

与在二级异构网络一样, 多级异构网络成下的簇算法应该考虑节点初始能量的差异. 我们很容易将 SEP 协议扩展到多级异构网络环境中, 对每个节点  $s_i$  按照其初始能量的不同取不同的加权概率:

$$p(s_i) = \frac{p_{opt} N(1+\alpha_i)}{N + \sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (5)$$

替代式(1)中的  $p_{opt}$  便得到多级异构网络下的概率门限, 仍然称这种多级异构网络的成簇算法为 SEP.

本文还将比较的另一种异构网络下的成簇方案是文献[10]提出的 LEACH 改进算法, 每个节点  $s_i$  使用下面的概率来决定自己是否成为簇头节点:

$$P(s_i) = \min \left\{ \frac{E_i(r)}{E_{total}(r)}, k, 1 \right\} \quad (6)$$

其中,  $E_i(r)$  为节点  $s_i$  在第  $r$  轮的剩余能量,  $E_{total}(r) = \sum_{i=1}^N E_i(r)$  为当前网络的总能量. 显然, 每个节点为了由式(6)计算选举概率, 必须知道网络的全局信息  $E_{total}(r)$ . 如果没有路由协议的支持, 要实现该异构协议是不现实的. 我们称这种协议为 LEACH-E. 本文第 4 节将通过模拟实验考察其性能, 并与我们提出的 DEEC 算法进行比较.

## 3 DEEC 成簇协议

在这一节中, 给出设计 DEEC 成簇协议的细节. 由于要执行数据融合和中继消息等额外的功能, 簇头节点将比普通节点消耗更多的能量. 为了防止部分节点由于过分的能量开销而提早死掉, 所有节点应该轮流成为簇头. 显然, 具有较高剩余能量的节点应该获得比低能量节点更大的机会成为簇头节点. DEEC 使用节点的剩余能量水平来决定簇头节点的选举, 使簇头的选举适应能量的变化.

### 3.1 基于剩余能量的簇头选举算法

设  $p_{opt}$  表示优化簇头比例,  $n_i$  表示节点  $s_i$  的簇头轮转周期. LEACH 协议保证每一个节点  $s_i (i=1, 2, \dots, N)$  至少每  $n_i = 1/p_{opt}$  轮成为一次簇头<sup>[10]</sup>. 我们基于节点  $s_i$  在第  $r$  轮的剩余能量  $E_i(r)$  来选取其簇头轮转周期  $n_i$ . 设  $p_i$  为节点  $s_i$  的簇头轮转周期  $n_i$  的倒数,  $p_i$  可以看成是节点  $s_i$  在  $n_i$  轮中选举为簇头的平均概率. 当节点在每一个选举周

期内的能量都一样时,取  $p_i=p_{opt}$  可以保证所有节点在几乎相同的时间死掉.如果节点具有不同的剩余能量,高能量节点的平均选举概率  $p_i$  应该比低能量节点的大,才能使网络均匀地消耗能量以延长网络的生存时间.设  $\bar{E}(r)$  表示网络在第  $r$  轮的平均能量,即有

$$\bar{E}(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(r) \quad (7)$$

为了由式(7)计算  $\bar{E}(r)$ ,每个节点必须知道网络中所有节点当前的总能量,实现起来将非常困难.本节后面部分将给出估计平均能量  $\bar{E}(r)$  的方法.以平均能量  $\bar{E}(r)$  作为参考能量与节点的剩余能量作比较,得到

$$p_i = p_{opt} \left[ 1 - \frac{\bar{E}(r) - E_i(r)}{\bar{E}(r)} \right] = p_{opt} \frac{E_i(r)}{\bar{E}(r)} \quad (8)$$

式(8)表示当节点的剩余能量比平均能量大时,该节点的平均选举概率  $p_i$  将比  $p_{opt}$  增加相应比例的值;当节点的剩余能量比平均能量要小时,节点的平均选举概率将比  $p_{opt}$  减少相应比例的值.同时,式(8)可以保证传感器网络每轮的平均簇头数为

$$\sum_{i=1}^N p_i = \sum_{i=1}^N p_{opt} \frac{E_i(r)}{\bar{E}(r)} = p_{opt} \sum_{i=1}^N \frac{E_i(r)}{\bar{E}(r)} = N p_{opt} \quad (9)$$

而  $N p_{opt}$  即为网络的理论优化簇头数.在式(1)中,用  $p_i$  替代  $p_{opt}$ ,便得到每个节点  $s_i$  在每轮用于决定自己是否成为簇头节点的门限:

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{p_i}{1 - p_i \left( r \bmod \frac{1}{p_i} \right)}, & \text{if } s_i \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

注意到,式(11)中模  $1/p_i$  即为节点成为簇头的周期  $n_i$ ,按照节点的剩余能量来决定  $p_i$  时,也就相应地对具有不同剩余能量的节点  $s_i$  选取了不同的成为簇头节点的周期  $n_i$ :

$$n_i = \frac{1}{p_i} = \frac{\bar{E}(r)}{p_{opt} E_i(r)} = n_{opt} \frac{\bar{E}(r)}{E_i(r)} \quad (11)$$

其中,  $n_{opt}=1/p_{opt}$  表示节点成为簇头的参考周期.式(10)表示:节点的剩余能量与平均能量相比越大,该节点成为簇头的周期就减小相应比例;反之亦然.从而使高能量节点更多地成为簇头,以达到所有节点几乎同时耗尽能量的目的.

### 3.2 处理异构节点

平均概率  $p_i$  决定了节点  $s_i$  的簇头轮转周期  $n_i$  和门限  $T(s_i)$ .由式(8)可知,  $p_{opt}$  为  $p_i$  的参考值,  $p_i$  围绕着  $p_{opt}$  进行变化.在同构网络下,所有的节点具有相同的初始能量,因此节点均使用相同的值  $p_{opt}$  作为  $p_i$  的参考点,每个节点的簇头轮转周期的参考值均为  $1/p_{opt}$ .当网络是异构的时候,节点应该根据初始能量的不同而使用不同的参考值.在二级异构网络中,选择式(3)给出的加权概率作为节点的参考值,替代式(8)的  $p_{opt}$  得到

$$p_i = \begin{cases} \frac{p_{opt} E_i(r)}{(1 + \alpha \lambda) \bar{E}(r)}, & \text{if } s_i \text{ is the normal node} \\ \frac{p_{opt} (1 + \alpha) E_i(r)}{(1 + \alpha \lambda) \bar{E}(r)}, & \text{if } s_i \text{ is the advanced node} \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),便可得到用于簇头选举的概率门限  $T(s_i)$ .因此,门限  $T(s_i)$  与节点的初始能量和剩余能量直接相关.

容易将该模型推广到多级异构网络情形.用式(5)所示的加权概率替代式(8)中的  $p_{opt}$ ,得到

$$p_i = \frac{p_{opt} N(1 + \alpha_i) E_i(r)}{\left( N + \sum_{i=1}^N \alpha_i \right) \bar{E}(r)} \quad (13)$$

由式(5)和式(13)可知,  $I_i = \left( N + \sum_{i=1}^N \alpha_i \right) / p_{opt} N(1 + \alpha_i)$  表示节点  $s_i$  的基本轮转周期,我们称其为参考周期.初始能量不同,相应的  $I_i$  就不同.注意到  $n_i = 1/p_i$ ,式(13)表示:根据剩余能量的变化,每个节点的轮转周期  $n_i$  围绕其参考周期  $I_i$  进行波动.如果  $E_i(r) > \bar{E}(r)$ ,就有  $n_i < I_i$ ;反之亦然.这意味着具有高初始能量和剩余能量的节点将比低能量节点有更多的机会成为簇头节点,从而使网络的能量在演化过程中得到均匀的分布.

### 3.3 估计网络的平均能量

由式(8)可知,计算  $p_i$  需要每个节点都知道网络的平均能量  $\bar{E}(r)$ ,实现起来非常困难.注意到平均能量  $\bar{E}(r)$  仅仅是用于作为每个节点剩余能量的参考值,使用估计值并不会影响算法的性能.如果知道网络的生存时间,我们就能够近似估计网络每轮的平均能量.

首先估计网络的生存时间.设  $R$  表示总网络生存时间的总轮数,  $E_{total}$  表示网络的初始总能量.假设在理想情况下,网络在每一轮所消耗的能量  $E_{round}$  是一样的,以使所有的节点在几乎相同的时间死掉.于是我们可以由下式得到网络生存时间的估计值:

$$R = \frac{E_{total}}{E_{round}} \quad (14)$$

在传输  $l$  比特消息经过距离为  $d$  的过程中,无线电路消耗的能量可以由下式决定<sup>[10]</sup>:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs} d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp} d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $E_{elec}$  表示运行传输电路或者接收电路时每比特数据所消耗的能量,  $\epsilon_{fs} d^2$  和  $\epsilon_{mp} d^4$  为放大器消耗的能量.

假定  $N$  个传感器节点均匀地分布在一个  $M \times M$  的区域内.为简化起见,假定基站位于该区域的中间,基站的任意放置不会对分析结果造成本质的影响.每个簇的成员节点在每一轮中向簇头节点发送  $L$  比特的消息.于是网络在一轮中消耗的能量总和为

$$E_{round} = L(2NE_{elec} + NE_{DA} + k\epsilon_{mp} d_{toBS}^4 + N\epsilon_{fs} d_{toCH}^2) \quad (16)$$

其中,  $k$  为簇头数,  $E_{DA}$  为簇头执行数据融合的代价,  $d_{toBS}$  为簇头到基站的平均距离,  $d_{toCH}$  为簇内成员节点到簇头节点的平均距离.假设节点均匀分布,可以得到<sup>[10,13]</sup>:

$$d_{toCH} = \frac{M}{\sqrt{2\pi k}}, d_{toBS} = 0.765 \frac{M}{2} \quad (17)$$

在式(16)中,对  $E_{round}$  关于  $k$  求偏导数,并令该偏导数为 0,则最优的簇头数为

$$k_{opt} = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}} \frac{M}{d_{toBS}^2}} \quad (18)$$

将式(17)和式(18)代入式(16)中,就得到网络在每一轮消耗的能量总数  $E_{round}$ .注意到,网络的总能量  $E_{total}$  已知,于是就可以通过式(14)计算网络的生存时间的估计值  $R$ .

假设每个节点均匀消耗能量,也就是说,每个节点在每轮中消耗相同的能量.于是第  $r$  轮网络每个节点的平均能量为

$$\bar{E}(r) = \frac{1}{N} E_{total} \left( 1 - \frac{r}{R} \right) \quad (19)$$

在表 1 所示的网络参数配置下,图 2 给出二级异构网络下生存时间随  $\alpha$  和  $\lambda$  变化的情况.参数  $\alpha$  和  $\lambda$  决定了网络的总能量,从而决定了网络的生存时间.图 2 表明,当  $\alpha$  和  $\lambda$  不同时,网络的生存时间也不一样.在本文后面的实验中,考虑到随机因素的影响,所有节点并不会在同一时间死掉,将式(19)中的  $R$  取为生存时间估计值的 1.5 倍.

在网络运行开始时,所有节点需要知道网络的总能量和生存时间.在 DEEC 协议中,这两个参数都由基站预

先通过前面提出的算法计算得到,并广播给所有节点.当每个节点新一轮的选举周期到来时,节点使用这些信息由式(19)和式(13)计算其平均概率  $p_i$ .然后将  $p_i$  代入式(11)得到概率门限值  $T(s_i)$ ,节点将使用该门限来决定是否成为簇头节点.

Table 1 Parameters used in simulations

表 1 实验参数

Parameter	Value	Parameter	Value
$E_{elec}$	5nJ/bit	$E_{DA}$	5nJ/bit/message
$\epsilon_{fs}$	10pJ/bit/m <sup>2</sup>	$d_0$	70m
$\epsilon_{mp}$	0.0013pJ/bit/m <sup>4</sup>	Message size	4 000bits

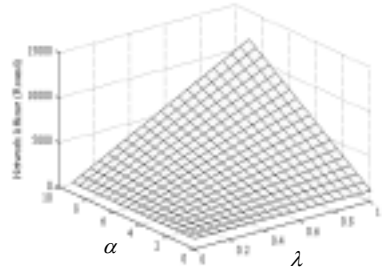


Fig.2 Estimate of network lifetime

图 2 网络生存时间的估计值

### 4 模拟实验结果

在本节中,我们通过 MATLAB 下的模拟实验来考察 DEEC 协议的性能.考虑 100 个节点的无线传感器网络,所有节点随机地分布在一个 100m×100m 的正方形区域内.不失一般性,假定基站位于区域的中心.为了与其他协议进行比较,忽略由信号碰撞和无线信道干扰等随机因素带来的影响.在实验中使用的参数见表 1.我们将比较 DEEC 与 LEACH,SEP 和 LEACH-E 等协议的性能,在多级异构网络下,则使用 LEACH 和 SEP 在多级异构网络的扩展协议.考虑下面几种情况下协议的性能.

在二级异构网络下,改变高级节点占总节点数的比例  $\lambda$  和多于普通节点的能量倍数  $\alpha$ ,观察几种成簇协议的性能.图 3 给出当  $\lambda$  从 0.1 增加到 0.9 和  $\alpha$  从 0.5 增加到 5 时,从开始到第 1 个节点死掉所经过的轮数,即稳定周期.我们发现,LEACH 并没有很好地利用由  $\alpha$  和  $\lambda$  改变所增加的能量,LEACH 的稳定周期在整个过程中几乎保持不变,这表明 LEACH 不是一种适合异构网络的成簇协议,它没有考虑到节点的能量差异,而将所有节点平等看待.由于在所有的情况下给普通节点配置了相同的初始能量,因此在 LEACH 协议下无区别地对待,使普通节点都在几乎相同的时间死掉.对于 SEP 协议,我们得到与文献[9]相似的结果,稳定周期比 LEACH 增加了大约 25%.尽管 LEACH-E 由于需要每个节点知道网络中其他所有节点的剩余能量而不易实现,但它在二级异构网络下的性能的确很好.图 3 表明,LEACH-E 的稳定周期比 SEP 获得了大约 10%的提高.这是因为 LEACH-E 是一种考虑能量状态的协议,它根据节点的剩余能量来选举簇头.DEEC 与 LEACH-E 一样也是一种考虑能量的协议,并表现出比其他协议更好的性能.特别是当  $\alpha$  变动时,DEEC 的稳定周期比 LEACH-E 提高了近 20%.

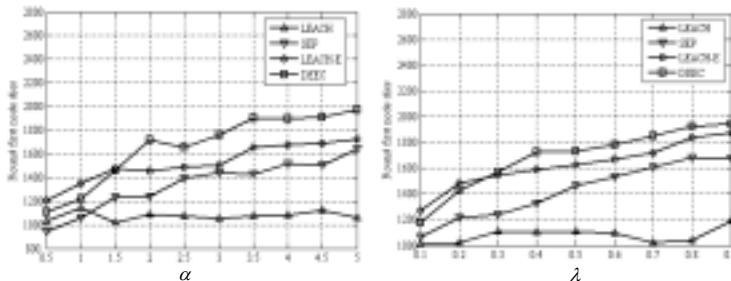


Fig.3 Round first node dies when  $\lambda$  and  $\alpha$  are varying

图 3 当  $\lambda$  和  $\alpha$  变化时协议的稳定周期

我们也给出当 10%的节点死掉时协议所经过的轮数.在 10%的节点死掉以前,网络可以向基站传回高质量和高可靠的数据.图 4 表明,相比于其他协议,DEEC 可以获得更长的稳定周期.注意到,DEEC 的稳定周期随着  $\alpha$  和  $\lambda$  变化所增加的速率比起 LEACH-E 和 SEP 要高很多.

对于多级异构网络,让节点的初始能量在  $[E_0, 4E_0]$  间随机分布.为了防止由于随机性造成的总能量不同带来

的影响,让所有实验下网络的初始总能都相同,SEP 使用异构网络下的推广协议,即对每个节点选用式(10)给出的加权概率  $p(s_i)$ .图 5(a)给出 LEACH,SEP,LEACH-E 和 DEEC 协议操作时剩余生存节点随时间演化的结果.我们发现,与二级异构网络一样,LEACH 协议不能很好地利用异构节点带来的额外能量,其稳定周期很短,节点按照固定的速率死掉.SEP 协议由于对具有不同初始能量的节点区别对待,从而获得了比 LEACH 更长的稳定周期和更多的有效数据量.与 SEP 不同,LEACH-E 和 DEEC 协议同时考虑了节点的初始能量和剩余能量的差异.实验结果显示,LEACH-E 和 DEEC 比 SEP 增加了近 15%的稳定周期长度.尽管 DEEC 协议与 LEACH-E 的生存节点数的演化非常近似,但 DEEC 却能传输更高的有效数据量,这表明 DEEC 比 LEACH-E 更有效.

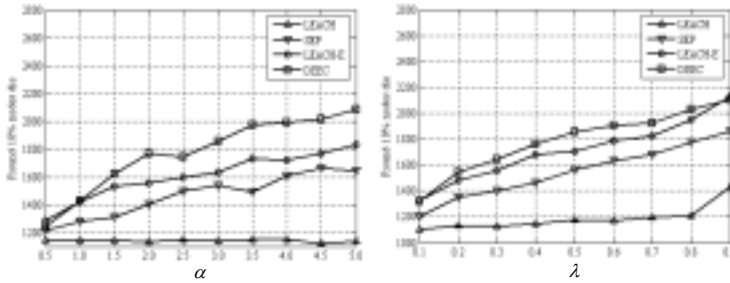
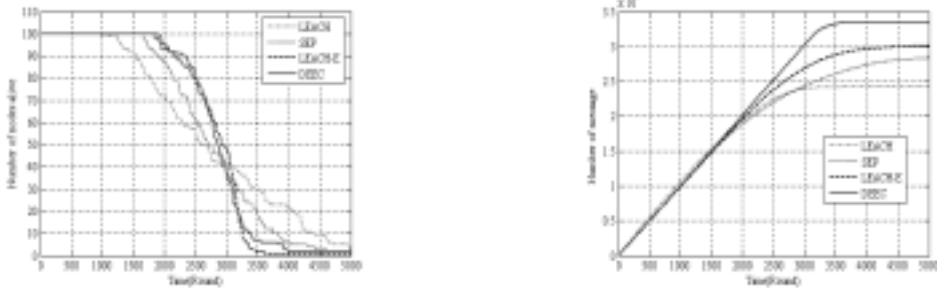


Fig.4 Round 10% nodes die when  $\lambda$  and  $\alpha$  are varying  
图 4 当  $\lambda$ 和 $\alpha$ 变化时 10%的节点死掉的轮数



(a) Number of nodes alive over time  
(a) 生存节点数量随时间变化  
(b) Number of message received in base station over time  
(b) 基站接收到的消息数量随时间的变化

Fig.5 Performance of LEACH, SEP, LEACH-E and DEEC under multi-level heterogeneous networks  
图 5 LEACH,SEP,LEACH-E 和 DEEC 在多级异构网络下的性能

### 5 结 论

提出一种适合异构无线传感器网络的能量有效的成簇协议,称为 DEEC.在 DEEC 协议中,每一个节点基于其初始能量和剩余能量独立地选择自己为簇头节点.DEEC 协议使用网络的平均能量作为参考能量,给出网络生存时间的估计算法,并由此估计网络的平均能量,从而使 DEEC 不需要每个节点都知道网络的全局能量信息.实验表明,DEEC 与 LEACH 和 SEP 协议相比具有更好的性能,而且 DEEC 对异构网络环境具有自适应的特点.

在今后的工作中,我们将考虑把 DEEC 协议在 NS-2<sup>[19]</sup>平台下实现,并实现事件驱动模拟环境.在 LEACH 和 SEP 等协议中都假定节点随时有数据传送,当网络为事件驱动时,节点在事件发生时将保持睡眠状态.因此,即使所有节点初始能量相同,网络都表现出异构网络的特点.直观上看,作为考虑了节点的初始能量和剩余能量的差异的协议,DEEC 在这种网络中仍然具有良好的性能,实验结果的比较将是需要进一步考虑的工作.

### References:

[1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002,40(8): 102-114.



- [2] Krishna P, Vaidya NH, Chatterjee M, Pradhan D. A cluster-based approach for routing in dynamic networks. Proc. of the ACM SIGCOMM'97, 1997,27(2):49-65.
- [3] McDonald B, Znati T. Design and performance of a distributed dynamic clustering algorithm for ad-hoc networks. In: Jacobs A, ed. Proc. of the Annual Simulation Symp. New York: IEEE Press, 2001. 27-35.
- [4] Mhatre V, Rosenberg C, Kofman D, Mazumdar R, Shroff N. Design of surveillance sensor grids with a lifetime constraint. In: Karl H, Willig A, Wolisz A, eds. Proc. of the EWSN 2004. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 263-275.
- [5] Heinzelman WR, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proc. of the HICSS 2000. 2000. 3005-3014.
- [6] Ni SY, Tseng YC, Chen YS, Sheu JP. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. In: Kodesh H, ed. Proc. of the ACM/IEEE MobiCom'99. New York: ACM Press, 1999. 151-162.
- [7] Estrin D, Govindan R, Heidemann J, Kumar S. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. In: Kodesh H, ed. Proc. of the ACM/IEEE MobiCom'99. New York: ACM Press, 1999. 263-270.
- [8] Duarte-Melo EJ, Liu M. Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks. In: Wang CH, Lee Y, eds. Proc. of the GLOBECOM 2002. New York: IEEE Press, 2002. 21-25.
- [9] Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. In: Proc. of the Int'l Workshop on SANPA 2004. 2004.
- [10] Heinzelman WR, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660-670.
- [11] Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems. In: Williamson DA, ed. Proc. of the IEEE Aerospace Conf. Vol 3, New York: IEEE Press, 2002. 1125-1130.
- [12] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004,3(4):660-669.
- [13] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation. Ad Hoc Network Journal, 2004,2(1):45-63.
- [14] Ye M, Li C, Chen G, Wu J. EECS: An energy efficient cluster scheme in wireless sensor networks. In: Dahlberg T, Oliver R, Sen A, Xue GL, eds. Proc. of the IEEE IPCCC 2005. New York: IEEE Press, 2005. 535-540.
- [15] Depedri A, Zanella A, Verdone R. An energy efficient protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of the AINS 2003. Menlo Park, 2003. 1-6.
- [16] Bandyopadhyay S, Coyle EJ. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. In: Mitchell K, ed. Proc. of the INFOCOM 2003. Vol 3, New York: IEEE Press, 2003. 1713-1723.
- [17] Banerjee S, Khuller S. A clustering scheme for hierarchical control in multi-hop wireless networks. In: Bauer F, Cavendish D, eds. Proc. of the INFOCOM 2001. Vol 2, New York: IEEE Press, 2001. 1028-1037.
- [18] Krishnan R, Starobinski D. Message-Efficient self-organization of wireless sensor networks. In: Yanikomeroğlu H, ed. Proc. of the IEEE WCNC 2003. Vol 3, New York: IEEE Press, 2003. 1603-1608.
- [19] UCN/LBL/VINT, Network simulator-NS2. 1995. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



卿利(1973 - ),男,四川内江人,博士生,主要研究领域为网络流量管理,传感器网络,网络安全.



王明文(1973 - ),男,博士生,主要研究领域为网络安全,Web 服务,传感器网络.



朱清新(1954 - ),男,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形与视觉,信息安全技术,最优控制与仿真,信息安全.