

# 基于时间片的无线传感器网络拓扑控制

熊书明<sup>1</sup> 王良民<sup>1,2</sup> 王新胜<sup>1</sup> 詹永照<sup>1</sup>

(江苏大学计算机科学与通信工程学院 镇江 212013)<sup>1</sup> (东南大学计算机科学与工程学院 南京 210018)<sup>2</sup>

**摘要** LEACH 通过分簇算法与功率控制两种拓扑控制方法有效地降低了无线传感器网络的能耗,延长了网络寿命。然而,在具备能量意识的 PowerTOSSIM 仿真实验中发现,LEACH 往往在网络整体能量较多的情形下会出现少量结点过早死亡的现象。提出了基于能量意识的簇头选举方法和簇内基于时间片的动态活动结点(Active Node)负责机制,实现了网内各结点的能量负载均衡,通过大量仿真实验及相关工作的分析与比较,说明该方法有效克服了 LEACH 因簇规模大小不同而导致的结点能耗不均匀现象,从而延长了网络寿命。

**关键词** 无线传感器网络,时间片,能量有效性,拓扑控制,分簇

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Topology Control Based on Time Slots in Wireless Sensor Networks

XIONG Shu-ming<sup>1</sup> WANG Liang-min<sup>1,2</sup> WANG Xin-sheng<sup>1</sup> ZHAN Yong-zhao<sup>1</sup>

(School of Computer Science & Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)<sup>1</sup>

(School of Computer Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)<sup>2</sup>

**Abstract** LEACH efficiently lowers energy consumption and prolongs lifetime of wireless sensor networks by using clustering algorithm and power control mechanism. However, in PowerTOSSIM simulation experiments with energy-aware it is found that there are a few nodes which die prematurely, but the total energy of the networks is still much. An energy-aware based cluster-head selecting approach and intra-cluster Active Node responsibility mechanism based on time slots were proposed. Through a large amount of simulation experiments and the analysis and comparison of the related work, it demonstrates that the approach is effective for overcoming non-uniform energy consumption in nodes which is due to different cluster sizes in LEACH, thereby extending the lifetime of the network.

**Keywords** Wireless sensor networks, Time-slot, Energy efficiency, Topology control, Clustering

## 1 引言

无线传感器网络(WSN; Wireless Sensor Networks)作为一种新的信息获取方式和处理模式备受关注,它不依赖于固定的基础设施,具有快速展开、抗毁性强等特点,应用十分广泛<sup>[1-3]</sup>。大量具有弱计算能力和通信带宽的传感器结点以对等的形式高密度,高冗余地分布在敌后或者环境恶劣的地区,以电池供应能源的方式自组织地工作,因为环境的恶劣往往导致结点的能量无法得到补充,这使得降低结点能源损耗、延长网络寿命成为无线传感器网络设计的关键目标<sup>[4,5]</sup>。

拓扑控制是节省网络能耗的重要手段之一<sup>[6]</sup>,这种控制方法主要分为功率控制和分簇/休眠两种方式。功率控制可以通过调整结点的通信半径来减少无线信号发送的功率以节能<sup>[7-12]</sup>;分簇/休眠的方式选出簇头来融合簇内感知数据<sup>[13-17]</sup>,通过减少需要传输的数据来降低全网的通信次数以

降低能耗,延长网络寿命。LEACH<sup>[13]</sup>是一种具有代表性的拓扑控制算法,集成了这两种拓扑控制方式在节能上的功用。它分布式成簇,簇头承担数据融合和数据转发的功能,簇内结点在无感知信息时关闭通信模块以降低能耗;簇内结点可以通过通信信号的能量感知选择需要耗能最小的簇头,并通过功率控制选择最节能的发射功率;此外,它通过随机轮转选择簇头,在各结点间分摊能量负载,从而最大化了每个结点的寿命。

然而,在 TinyOS 系统支持的 TOSSIM 仿真器中加入了能量意识功能后<sup>[18]</sup>,我们发现在具备能量意识的仿真实验中 LEACH 往往在网络整体能量较多的情形下会出现少量结点过早死亡的现象,从而大大降低了网络寿命。详细分析后认为,虽然 LEACH 通过在一个周期内保证每个结点参与且仅参与一次簇头来实现全网的能耗均衡,但是其簇头产生数目的随机性和所产生簇头在区域内分布的随机性无法保证网络

到稿日期:2008-07-15 返修日期:2008-10-06 本文受国家自然科学基金资助项目(60703115),国家博士后科学基金资助项目(20070420955),江苏省自然科学基金资助项目(BK2007560),江苏省博士后科学基金(0702003B),江苏大学高级人才科研启动经费(07JDC080)资助。

熊书明(1974-),男,博士生,研究方向为无线传感器网络及其安全问题,E-mail: xsm@ujs.edu.cn;王良民(1977-),男,博士后,研究方向为安全无线传感器网络、容忍入侵理论与方法等;王新胜(1972-),男,博士生,研究方向为无线传感器网络等;詹永照(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为分布式计算和无线网络。

结点能耗均衡的理想假设,这种能耗不均匀的实际情形以不可忽略的概率让少量结点过早地死亡。为此,提出了基于能量意识<sup>[19,20]</sup>的簇头选举方法及簇内基于时间片的动态活动结点(Active Node)负责机制,尽量避免能量低的结点当选为簇头,并在簇内实现能耗负载轮值,有效地避免了个别结点耗能过多的现象,并与文献<sup>[15,21]</sup>等基于 LEACH 相同网络模型中提出的拓扑控制算法进行了仿真实验比较。本文第 2 节介绍了网络模型,第 3 节分析了 LEACH 存在的问题,然后在第 4 节提出了自己的改进方法,在第 5 节通过仿真实验将本文算法与 LEACH 以及相关工作进行了比较,最后给出了本文的结论。

## 2 网络模型

网络模型采用 WSN 的典型设置<sup>[8,15,21]</sup>, $N$  个具备弱通信能力、计算能力且能量有限的同构的结点随机均匀分布在一个正方形区域  $A$  内;结点部署后不再移动,在无人工干预的情况下自组织地生成对等网络,网络中存在一个唯一的基站,部署在区域  $A$  以外的某位置。该传感器网络具有如下性质:

- 1) 每轮中结点的能量消耗不一致;
- 2) 结点不需要知道其具体位置信息;
- 3) 网络中维持一个弱同步时钟<sup>[22,23]</sup>;
- 4) 所有的传感器以固定速率感知周围环境,这样一来总是有数据要发送给终端用户;
- 5) 网络寿命指从网络启动到第一个结点死亡的时间。

在这 5 个属性中,属性 1) 指出网络中结点能耗不一致,要求算法最大限度保证系统能耗要均摊到各结点;属性 2) 指出不需要结点定位信息,从而在结点个数增加时,能够保证网络的伸缩性和可扩展性,不会对网络寿命造成大的负面影响;属性 3) 在网络中提供了一个同步的时钟,结点可以在事先约定的情况异地同步进行相关操作。此外,本文的网络模型采用了与 LEACH 算法相同的假设。

在通信方式上,使用对称的通信信道模型和自由空间模型(free space),在距离阈值  $d_0$  ( $d_0$  是常数,与具体的应用环境有关)之内发送方发送放大器消耗的能量与发送结点到接收结点的距离的平方成正比。我们使用下面的式<sup>[13]</sup>计算发送方发送数据消耗的能量:

$$E_{Tx}(L, d) = E_{elec} * L + \epsilon_{amp} * L * d^2 \quad (1)$$

接收方接收部件产生的耗能式为:

$$E_{Rx}(L, d) = E_{elec} * L \quad (2)$$

$L$  是数据帧的长度,  $E_{elec}$  是发送器和接收器无线信号电路消耗的能量,  $\epsilon_{amp}$  是发送放大器电路消耗的能量。根据式(1)可知,信道传输的能量损失为  $O(d^2)$ ,  $d$  为结点间距离,故应该尽量减少发送距离和收发的次数。

## 3 LEACH 协议分析

LEACH 是自组织、适应性分簇协议,利用随机轮转在网络结点间均匀分配能量负载。簇头分配时槽,通过 TDMA 和簇内成员通信,不在自己时槽的成员结点关闭无线信号,节约能量,簇头使用局部数据融合来压缩待传输的数据,进一步减少网络能耗。但是我们认为该算法中簇头数目及簇头分布的随机性会导致簇的规模不同,不同规模使得网络结点的能耗不均,从而导致部分结点早死亡。

### 3.1 簇头个数不合理

LEACH 生成的簇头个数具有随机性,这种个数的随机性以不可忽略的概率导致簇头个数过多或者过少的情形。LEACH 每轮中选出的簇头数服从二项分布,设簇头比例为  $p = k/N$ ,某轮中选出的簇头个数为  $X$ ,则式(3)成立。

$$P\{X=k\} = \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k} \quad (3)$$

根据式(3),图 1 显示了当  $N=100$ ,最优簇头数目  $k=5$ ,即  $p=0.05$  时  $X$  的概率分布,图中簇头个数取最优值  $k=5$  的概率只有 0.18002。簇头过少的情形,如产生的簇头小于 3 的概率为 0.1183,簇头的数量决定了簇的规模,即有 0.1183 概率使得簇规模过大,这样,簇头结点收集了所有结点信息后才进行融合并转发融合后的数据,在一个轮周期内有效地减少了簇头的转发次数但可能降低了信息服务的质量;产生簇头大于 7 的概率为 0.128,这种簇规模过小的情形使得簇内数据的融合效果不明显,从而簇头与基站通信的频率较高,在全网范围内增加了簇头与基站总体通信耗费,缩短了网络使用寿命。

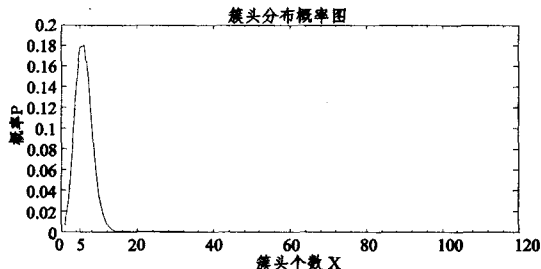


图 1 簇头个数概率分布图

### 3.2 簇头分布不均匀

LEACH 生成的簇头在分布上是随机的,这种分布的随机性也会导致簇内各簇规模大小不同,如图 2 所示,分析认为这种不一致性使得 LEACH 算法的有效性的两个前提条件难以得到保障。

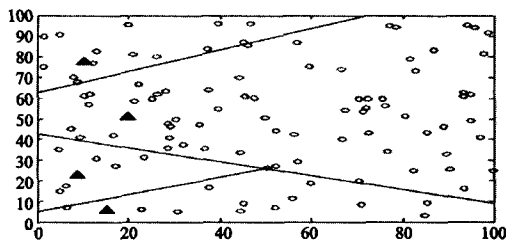


图 2 LEACH 簇分布示意图

LEACH 有效运行的前提条件是:①成簇初期,所有结点当前能量一样多;②簇形成后,消耗大致相同的能量。在网络布置初期第一个工作周期内,首轮选举簇头时,条件①可以得到满足;但是当簇内规模不一时,条件②得不到保证。因为网络模型的假设 4) 认为结点按照相同的速率传输数据,这样簇规模的大小决定了簇头的工作量将大大不同,如前所述,LEACH 随机产生簇头的方式会使得簇规模大小相差较大,不同簇内的簇头消耗的能量有显著差别,同时,在同一个簇内,结点到簇头的距离差别很大,从而通信功率差别较大,也会导致能耗的较大差别。这样,在此后每轮选举的时候,成簇算法很可能会选中上一轮中能量消耗较多的结点继续担任簇

头,这无疑又加速了该结点的死亡。

综上所述,LEACH 通过期望每个工作周期中所有结点有且仅有一次机会成为簇头,虽然在一定程度上实现负载均衡,但由于簇头分布及数目的随机性,依然存在个别簇头过早死亡从而降低网络寿命的现象,为避免这种现象的出现,必须尽量选用剩余能量较多的结点充当簇头,必须尽量减小当值簇头的能耗。

#### 4 基于时间片低功耗分簇算法的实现

针对 LEACH 簇头分布及数目的随机性所导致的问题,在成簇阶段考虑结点剩余能量,提出了能量意识的簇头产生方法,尽量让剩余能量多的结点担任簇头;在簇的维持阶段,采用基于分时复用思想簇内轮值活动结点(Active Nodes),使用活动结点分摊结点能耗,降低簇头能耗,这样增加簇的轮内寿命,在整个网络生命期内减少生成簇的次数,从而在全网范围内减小能耗,延长网络寿命。

##### 4.1 能量意识的簇头选举方法

成簇过程分为两个环节,首先是簇头选举,然后是剩余结点根据和簇头的交互信息,选择加入合适的簇头。大量对等结点如何分布式地选出簇头,是关键问题。LEACH 提供了一个有效的分布式算法,但其未能考虑簇规模的随机性导致结点剩余能量的不同,每个结点剩余能量完全相同的假设会导致能量很低的结点以不可忽略的概率当选簇头,从而过早死亡。为此,在簇头选举阶段引入能量因素。

设定阈值函数  $T(i)$ :

$$T(i) = \begin{cases} \frac{p}{1-p[r \bmod (1/p)]} \cdot \frac{1}{\lambda} & i \in G \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

其中参数  $p$  为预设的簇头结点占总结点数的比例, $r$  为簇头选举的当前轮数, $i$  是当前结点的 ID, $G$  是到该轮为止尚未当选簇头的结点集合, $\lambda$  为结点剩余能量决定的门槛自适应调整参数,其值由式(5)给出:

$$\lambda = \frac{E_{i\_init}}{E_{i\_current}} \quad (5)$$

其中, $E_{i\_init}$  为结点的初始能量, $E_{i\_current}$  为结点的当前能量。

考虑到比例因子不应随结点能量的降低而很快趋近于 0,也不能下降得很慢,否则体现不出能量因素。我们仿真了  $\frac{1}{\lambda}, \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \frac{1}{\ln \lambda}$  等几种情况,在设置的网络参数下,经过对结果的大量分析比较选用  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$  比例因子。

簇头产生阶段,每个结点分布式地决定自身在当前轮中是否成为簇头,结点产生一个 0~1 之间的随机数,然后根据式(4)求出阈值  $T(i)$ ,如果这个随机数小于阈值  $T(i)$ ,则该结点成为簇头。由此式(4)可看出,随着轮数的增加门槛值  $T(i)$  逐渐增大,且剩余结点中能量多的结点当选簇头的概率较大。

簇形成阶段,簇头通过非持续 CSMA MAC 协议,使用同样的能量发出簇头通知消息给其余结点,在这个阶段,非簇头结点打开接收器,收听通知消息,然后根据收到的通知消息信号的强弱决定这一轮加入哪个簇。非簇头结点会收到许多通知消息,以通知消息信号最强的那个簇头所在簇为自己选中的簇,这也是最近邻居聚类法则,具有有效避免簇间干扰的作

用。当结点决定加入某个簇后,必须通知簇头结点它属于哪个簇,根据对称通信信道的假设,该结点可以根据信号的能量意识选择可以通信的最小功率发射回复消息给簇头,也用非持续 CDMA MAC 协议把这个反馈消息发回给簇头,表示加入这个簇。

##### 4.2 基于时间片的簇内能耗轮值方法

在 LEACH 中,给定一个轮周期,第一轮选出若干个结点当簇头,一个周期后,重新选举簇头重新成簇,考虑到成簇代价太大,因此应该尽量延长轮周期;然而,由于簇头所耗能量远远大于普通结点,轮周期过长会导致轮内簇头结点过早死亡,为此,提出在簇内制定信息调度机制,让各结点轮流负责。

簇头结点接收到所有想加入该簇的结点反馈消息,基于簇中结点的数量,簇头结点建立 TDMA 调度,集中式地决定每个成员轮流充当活动结点(Active Nodes),让活动结点承担簇头的任务。调度过程中要用到 3 个关于时间的参数  $S_B, S_A$  与  $T_{round}$ ,其中, $S_B$  是一个网络参数,取值至少为帧长除以信道速率; $S_A$  是簇的参数,表示簇内某结点担任 Active 结点的持续时间,其值为  $S_B$  乘以簇内成员数(簇内总结点数-1);轮的时间  $T_{round}$  是预先确定值,簇内某结点在一轮中,可以根据  $T_{round}/S_B$  的值确定担任几次 Active 结点,这样所有结点担任的次数相差不超过 1。

簇形成后,当选的簇头根据簇内结点的个数  $N$ ,该轮中一级时槽  $S_A$  应该是二级时槽  $S_B$  和  $N$  的积的倍数,每个结点只在其规定的时槽  $S_B$  内传输信息到 Active 结点,从而各个传感结点通过 TDMA 来避免信道竞争冲突,在各个时槽  $S_A$  簇内所有结点依次当选为 Active 结点,算法操作的时序如图 3 所示。算法实现时,可以不进行二级时槽  $S_B$  的分配,而是在  $N$  个  $S_A$  时槽后,由当前 Active 结点将领导地位随机迁移到  $N$  个成员之一,自己降格为簇内成员,由新的 Active 结点进行下一个  $S_A$  时槽的工作。每次以概率  $P=1/N_{current}$  进行领导地位的转让,其中  $N_{current}$  为簇内当前尚未担任 Active 结点的结点个数,这个值可以包含在联络控制帧中。

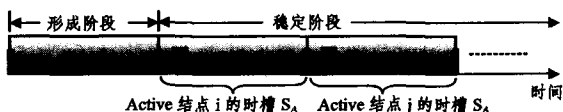


图 3 基于时间片的分簇操作时序

簇生成后进入稳定工作阶段,簇头按照预先确定的二级时槽  $S_B$  间隔,根据当前簇内结点的个数  $N$ ,可以确定一级时槽  $S_A$  的间隔,再根据预定的每轮持续时间  $T_{round}$  可以确定当前簇中一级时槽  $S_A$  的个数  $N_A$ ,假设  $S_A$  内 Active 结点耗能为  $E_{SA}$  (通信能耗,不考虑计算能耗),则在 LEACH 中该簇簇头耗能为  $N_A * E_{SA}$ 。而在本实现中,能耗近似平均分摊到簇内每个结点,更准确地说,其中, $N_A \bmod N$  个结点每个耗能为  $[1+(N_A/N)] * E_{SA}$ ,  $(N - N_A \bmod N)$  个结点每个耗能为  $[N_A/(N+1)] * E_{SA}$ 。可见,该算法在簇内将能量消耗近似分摊到簇内结点上,簇内各结点能耗大致均匀,避免了簇头单个承担太多的转发任务和过早死亡。

##### 4.3 数据传输服务

簇内时间片信息建立后,可以进行数据传输。假设结点总是有数据要发送,在其分配的时槽内向 Active 结点发送信

息,因为距离较短,只需要较少的能量,在其余时槽内关闭无线信号,减少能耗。Active 结点工作期间必须一直打开无线信号以接收成员消息,接受到所有数据后,进行信号融合处理功能,压缩数据成单一信号后传送到基站,由于距离较远,Active 结点能耗很大。本轮规定的时间一到,启动下一轮的簇头选举和簇生成工作。

## 5 仿真实验分析与相关工作比较

### 5.1 参数设置和评价指标

本文考虑能耗均匀性、能量有效性、网络寿命和系统死亡速度及基站移动对性能的影响等作为性能评价标准,在仿真实验中与相关工作进行了比较。

在仿真平台的选择上,目前存在的 WSN 仿真方法可以分为两类,一类是程序代码模拟器,例如,TOSSIM,Avrora 和 TOSSF 等;另一类是协议仿真软件,例如对 NS-2 和 OPNET 进行扩展的仿真方法。由于 WSN 是高度应用相关的、且跨层设计实现网络服务功能,因此,程序代码模拟器比 NS-2 等分层协议仿真软件更适合无线传感器网络的仿真,选用 TOSSIM。TOSSIM 是现在最为流行的无线传感器网络仿真模拟器,由加州大学伯克利分校、Intel 研究中心和哈佛大学联合开发,内嵌在 TinyOS 操作系统中,它能够对单个结点的操作提供高精度模拟,可以准确地模拟应用程序在结点上的行为。因为成本和部署传感器网络的困难性,必须在部署之前获得应用的能量使用状况,TOSSIM 以前没有能量意识,在本仿真中使用加入了能量意识的 PowerTOSSIM 来进行仿真,从而能够较精确地获得应用消耗的能量值。

仿真过程如下:

- 1) 仿真启动,仿真程序从 main.exe 开始,设置仿真场景,加入能量参数;
- 2) 仿真初始化,初始化全局任务队列,完成系统初始化设置;
- 3) 事件队列处理循环,实现相应功能;
- 4) 仿真结束阶段。

实验中用到的参数见表 1,100 个结点的均匀随机分布网络如图 4 所示,基站放置在离最近结点 50m 处,位置为 (50m, 150m),图中未给出,根据表 1 的参数能算出二级时槽  $S_B$  的值( $L/C_{bw}$ )为 3.2ms,在结点能量降到 0.002J 及以下时,算法认为该结点死亡。

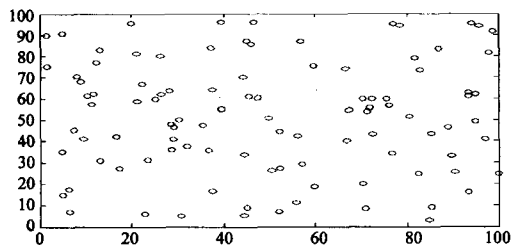


图 4 100 个结点的随机网络

表 1 模拟中使用的参数列表

参数	值
网络大小	(100m×100m)
基站位置	(50m,150m)
结点个数	100
无线收发电路能耗 $E_{elec}$	50nJ/bit

发送放大器能耗 $E_{amp}$	100pJ/bit/m <sup>2</sup>
初始能量 $E_{i\_init}$	0.5J
数据帧大小 $L$	400Bytes
广播帧大小 $B_F$	40Bytes
距离阈值 $d_0$	300m
数据融合能耗 $E_{fusion}$	5nJ/b
一轮持续的时间 $T_{round}$	18s
信道带宽 $C_{bw}$	1Mbps
二级时槽 $S_B$	3.2ms

仿真实验中,实现了 LEACH, HEED<sup>[15]</sup>, DCHS<sup>[21]</sup> 和我们的基于时间片低功耗算法(TimeSlot-Based),对性能进行比较,主要分析、评价基于时间片低功耗算法的如下几个衡量标准:

- 1) 能量消耗均匀性;
- 2) 网络寿命,第一个结点的死亡时间;
- 3) 系统死亡速度,指的是从第一个结点死亡到所有结点死亡的时间;
- 4) 能量有效性;
- 5) 网络消耗的能量与基站接收帧个数之间的关系。

### 5.2 实验结果及相关工作比较

图 5 是经过 600 轮仿真后的结点能量消耗分布图,可以看到 LEACH 中耗能小于 10% 和大于 90% 的结点数分别占 20% 和 30% 左右,而处于其它能量消耗段的结点数都不大于 10%,这说明存在一部分结点过度使用能量,这部分结点会率先死亡,尽管 LEACH 初衷是通过随机轮转来平衡能耗,但效果不理想。

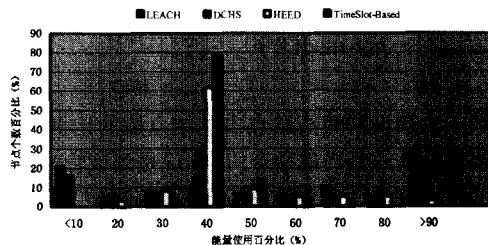


图 5 结点能耗比例分布图

本文 TimeSlot-Based 协议主要通过平衡簇内结点的能耗,使得大部分结点消耗近似相同的能量,由图 5 可见,与 LEACH, DCHS 和 HEED 相比性能有较大提高,仿真结果基本和预期性能吻合,能量分布比较紧凑,耗能 40% 左右的结点几乎占到总数的 80%,同时,耗能 40%, 50% 和 60% 范围内的结点占到总数的 95% 左右,从而解决了 LEACH 协议中因簇头个数不合理和分布不均匀而导致能耗不均匀的问题。

图 6 是根据图 4 的结点分布仿真得到活结点数量与网络工作时间(轮数)之间的关系,可以看到,与 LEACH 和 DCHS 相比,本文算法可以大幅提高网络寿命,这是因为在簇内各结点均匀分担了能量消耗,同时,在簇头选择时结合了结点的当前能量,能量多的结点优先当选为簇头,使得各结点同步消耗能量,延长了第一个结点的死亡时间,与 LEACH 和 DCHS 相比寿命分别提高了 40% 和 30%,比 HEED 稍稍延长了网络寿命。

图 6 同时描述了网络的死亡速度,由图中看到从第一个结点死亡开始,本文算法集中在最后 80 轮内,结点全部死亡,优于 LEACH, DCHS 和 HEED 的死亡速度,说明算法对结点的能量使用很均匀,网络整体上能够提供优质服务。

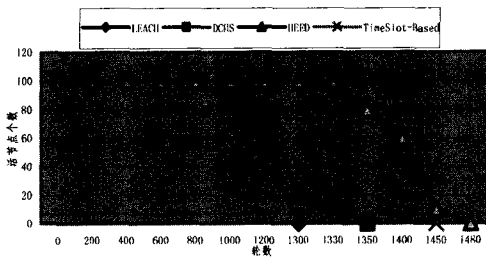


图6 网络存活结点

最后,考虑基站移动情况下各协议的性能比较。图7给出基站从(50,50)延y轴方向移动到(50,300)过程中基站接收到各协议中结点每单位能量发送的包的个数,由图可见,当基站在网络中心位置时(50,50),TimeSlot-Based算法的性能都优于其它几种协议,比LEACH大约提高35%,这种趋势一直保持到基站到达位置(50,300)。

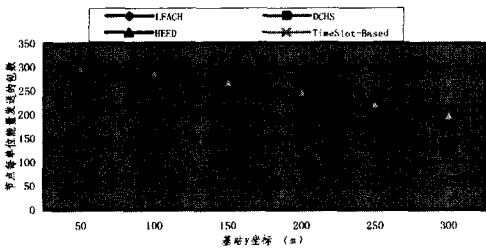


图7 结点单位能量的帧个数与基站位置变化的关系

**结束语** 本文基于对LEACH协议的分析研究,针对LEACH协议中存在簇头分布不均以及全网能量消耗不均等问题,提出了一种基于时间片的拓扑分簇控制协议,协议根据结点当前剩余能量自适应地竞选簇头,簇内通过时间片使得成员结点依次担任Active结点来实现能耗均匀,本文算法具有如下特点:

- 1)大大推迟第一个结点的死亡时间,能够延长网络寿命。
- 2)增加拓扑的稳定性,有很好的容错性,在结点死亡初期一段时间内可以保证服务质量。
- 3)簇头分布式选举,簇内Active结点集中式产生,既保证伸缩性,又兼顾运行效率和可靠性。

采用基于能量意识的PowerTOSSIM仿真器进行仿真,实验证明,本文算法提高了能量使用效率,延长了网络寿命,同时结点集中在最后80轮内全部死亡,使得运用本算法的无线传感器网络监测结果更加准确。我们将在下一步工作中考虑成簇时邻结点信息和结点的覆盖半径,从而使簇的分布趋于合理、均匀,将协议适用到大规模传感器网络中。

### 参考文献

[1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Trans. on Communications, 2002, 40(8):102-114

[2] Pottie G J, Kaiser W J. Wireless integrated network sensors[J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5):51-58

[3] Estrin D, Girod L, Pottie G, et al. Instrumenting the world with wireless sensor networks[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing

(ICASSP '01). Salt Lake City, Utah, USA, May 2001, 4:2033-2036

[4] 孙利民,李建中,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005

[5] 任丰原,黄海宁,林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报,2003,14(7):1282-1291

[6] 王方伟,张运凯,丁振国,等. 无线自组网的拓扑控制策略研究进展[J]. 计算机科学,2007,34(10):70-73

[7] Sang G K, Xiang Z, Satish B. Optimal transmission power in self-sustainable sensor networks for pipeline monitoring[C]// Proc. of the 3rd IEEE Conf. on Automation Science and Engineering. Scottsdale, AZ, USA, Sept. 2007

[8] Er M J, Liao J, Lin J. Fuzzy neural networks-based quality prediction system for sintering process [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2000, 8(3):314-324

[9] Akhmetov D F, Dote Y, Ovaska S J. Fuzzy neural network with general parameter adaptation for modeling of nonlinear time-series[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2001, 12(1):148-152

[10] Wang Z X, Hao T Z, Chen Z Q, et al. Predicting nonlinear network traffic using fuzzy neural network [A]// ICICS-PCM [C]. Singapore, December 2003:1697-1701

[11] Prabhakar B, Uysal B E. Energy-efficient transmission over a wireless link via lazy packet scheduling[C]// Proceedings of the IEEE INFOCOM. Anchorage, Alaska, 2001:386-394

[12] Ramanathan R, Rosales H R. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment[C]// Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '00). Tel Aviv, Israel, March 2000, 2:404-413

[13] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. Hawaii, USA; IEEE Computer Society, Jan. 2000:3005-3014

[14] Ming Y, Kin K L, Aniket M. A dynamic clustering and energy efficient routing technique for sensor networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2007, 6(8):3069-3079

[15] 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):660-669

[16] Chan H, Perrig A. ACE: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation[C]// Proc. of the 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks. LNCS 2920. Berlin: Springer-Verlag, 2004:154-171

[17] Fang Q, Zhao F, Guibas L J. Lightweight sensing and communication protocols for target enumeration and aggregation[C]// Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. ACM Press, 2003:165-176

[18] Levis P, Lee N, et al. TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications[C]// SenSys'03. November Los Angeles, California, USA, 2003:126-137

[19] 卿利,朱清新,王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法[J]. 软件学报,2006,17(3):481-489

[20] 刘昕,王全玉,金旭亮. 基于能量感知的数据汇聚和路由协议

- [21] Handy M J, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C] // Proc. of the 4th IEEE Conf. on Mobile and Wireless Communications Networks. Stockholm: IEEE Communications Society, 2002: 368-372
- 
- (上接第 34 页)
- [4] 姜瑛, 辛国茂, 单锦辉, 等. 一种 Web 服务的测试数据自动生成方法[J]. 计算机学报, 2005, 28(4): 568 - 577
- [5] Frantzen L, Tretmans J, Vries R D. Towards Model-based Testing of Web Services [C] // International Workshop on Web Services - Modeling and Testing - WS-MaTe. 2006: 67-82
- [6] Keum C, Kang S, Ko I Y, et al. Generating test cases for web services using extended finite state machine[C] // Proc. of IFIP TestCom. 2006: 103-117
- [7] Wang Y Y, Rutherford M J, Carzaniga A, et al. Automating Experimentation on Distributed Testbeds[C] // Proceedings of the 20th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2005). 2005
- [8] Grundy J, Hosking J, Li L, et al. Performance Engineering of Service Compositions [C] // Proc. of the 2006 International Workshop on Service-oriented Software Engineering. ACM Press, 2006: 26-32
- [9] Bertolino A, Angelis G D, Polini A. A QoS Test-bed Generator for Web Services[C] // Proc. of ICWE 2007. Springer, 2007
- [10] Martin E, Basu S, Xie T. Automated Testing and Response Analysis of Web Services[C] // 2007 IEEE International Conference on Web Services (ICWS 2007). 2007
- [11] Tsai W T, Wei X, Chen Y. A Robust Testing Framework for Verifying Web Services by Completeness and Consistency Analysis[C] // IEEE International Workshop on Service-Oriented System Engineering (SOSE). Beijing, October 2005: 151-158
- [12] Tsai W T, Paul R, Cao Z, et al. Verification of Web Services Using an Enhanced UDDI Server[C] // Proc. of IEEE WORDS. 2003: 131-138
- [13] Tsai W T, Paul R, Yu L, et al. Scenario-based web service testing with distributed agents. IEICE Transaction on Information and System, 2003, E86-D (10): 2130-2144
- [14] Heckel R, Mariani L. Automatic conformance testing of web services[C] // Proc. Fundamental Approaches to Software Engineering (FASE 05). 2005: 34 -48
- [15] Bertolino A, Frantzen L, Polini A, et al. Audition of web services for testing conformance to open specified protocols[C] // Architecting Systems with Trustworthy Components. Springer-Verlag, 2006
- [16] Paradkar A M, Sinha A, Williams C, et al. Automated Functional Conformance Test Generation for Semantic Web Services[C] // IEEE International Conference on Web Services (ICWS 2007). 2007: 110-117
- [17] Delgado N, Gates A, Roach S. A taxonomy and catalog of runtime software-fault monitoring tools [J]. IEEE Trans. Software Engineering, 2004, 30(12): 859-872
- [22] 肖琳, 程利娟, 王福豹. 一种低功耗无线传感器网络时间同步算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 126-130
- [23] Dong S K, Seung Y L, Kwang H W, et al. Time-synchronized forwarding protocol for remote control of home appliances based on wireless sensor Network[J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1427-1433
- [18] Mahbub K, Spanoudakis G. A framework for requirements monitoring of service-based systems[C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Service Oriented Computing. 2004: 84-93
- [19] Spanoudakis G, Mahbub K. Non Intrusive Monitoring of Service Based Systems[J]. International Journal of Cooperative Information Systems, 2006, 15(3): 325-358
- [20] Barbon F, Traverso P, Pistore M, et al. Run-time monitoring of instances and classes of Web service compositions[C] // IEEE International Conference on Web Services (ICWS'06). 2006: 63-71
- [21] ActiveBPEL. The Open Source BPEL Engine. <http://www.activebpel.org>
- [22] Lazovik A, Aiello M, Papazoglou M. Associating assertions with business processes and monitoring their execution[C] // Proceedings of the Conference on Service-oriented Computing (ICSOC-04). ACM Press, 2004: 94-104
- [23] Baresi L, Ghezzi C, Guinea S. Smart monitors for composed services[C] // Int. Conf. on Service-oriented Computing (ICSOC-04). ACM Press, Nov. 2004: 193-202
- [24] Baresi L, Guinea S. Towards dynamic monitoring of WS-BPEL processes[C] // Proc. of the 3rd International Conference on Service-oriented Computing (ICSOC'05). 2005: 269-282
- [25] Moser O, Rosenberg F, Dustdar S. Non-intrusive monitoring and service adaptation for WS-BPEL [C] // Proceeding of the 17th International Conference on World Wide Web. 2008: 815-824
- [26] Raimondi F, Skene J, Emmerich W. Efficient online monitoring of Web-service SLAs[C] // Proceedings of ACM SIGSOFT/FSE 2008. Atlanta, USA, 2008
- [27] Bertolino A, Angelis G D, Elbaum S, et al. Scaling up SLA Monitoring in Pervasive Environment [C] // Proceedings of Int. Workshop on the Engineering of Software Services for Pervasive Environment (ESSPE 2007) at ESEC/FSE. 2007
- [28] Skene J, Skene A, Crampton J, et al. The monitorability of service-level agreements for application-service provision[C] // Proceedings of WOSP 2007. Buenos Aires, 2007: 3-14
- [29] Erradi A, Maheshwari P, Tosic V. WS-Policy based Monitoring of Composite Web Services[C] // Fifth European Conference on Web Services (ECOWS'07). 2007: 99-108
- [30] Ludwig H, Dan A, Kearney R. Cremona: An architecture and library for creation and monitoring of WS-agreements[C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Service-oriented Computing (ICSOC 2004). New York, USA, ACM, 2004: 65-74
- [31] Curbera F, Duftler M J, Khalaf R, et al. Colombo: lightweight middleware for service-oriented computing [J]. IBM Syst. J, 2005, 44(4): 799-820