

一种聚类区域自适应调整的 WSN 能耗均衡分簇算法*

黄加异, 程良伦

(广东工业大学 计算机学院, 广州 510006)

摘要: 详细分析 LEACH 协议, 针对 LEACH 协议随机产生簇头导致网络中出现局部区域簇头分布不均、簇的规模不一、整个网络能耗不均衡、网络寿命缩短等问题, 提出了一种聚类区域自适应调整的 WSN 能耗均衡分簇算法。在算法的选举簇头阶段, 将节点剩余能量、备选簇头与邻居簇头的间距相结合作为判据参数; 在成簇阶段, 将节点预加入的簇头到基站的距离考虑在内, 比较多个数据流向, 采用节能最优路径策略。仿真结果表明, 该协议能够有效均衡网络各节点能耗, 显著延长了网络生存时间。

关键词: 聚类区域; 自适应调整; 无线传感器网络; 能耗均衡; 分簇算法

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)11-4276-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.11.070

Balanced energy clustering algorithm of WSN which cluster region were adjusted adaptively

HUANG Jia-yi, CHENG Liang-lun

(Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on the analysis of the LEACH protocol, this paper proposed an adaptive adjustment of cluster region WSN balanced energy clustering algorithm to the problems of LEACH protocol, caused uneven distribution of the cluster head of the local area network, cluster sizes and the energy consumption of the entire network were not balanced, and then shortened the network's life. In the stage election of cluster, it considered the residual energy of head nodes and the distance between the pre-selected cluster-head and neighbor cluster-head as the criterion parameters. In the stage of joining-cluster, it considered the distance between the pre-join cluster-head and the base station, compared multiple data flows, and chose the optimal path of energy-saving. The simulation results show that the algorithm can balance the network's energy effectively, and prolong the network lifetime significantly.

Key words: cluster region; adaptive adjustment; WSN; balanced energy; clustering algorithm

0 引言

无线传感器网络^[1] (wireless sensor network, WSN) 是由传感器节点临时组成的一种自组织、自管理的网络, 其目的是感知、采集、处理和传输网络覆盖区域内感知对象的监测信息。

传感器节点通常是一个微型的嵌入式系统, 自身携带电池为其供电, 电池能量有限, 且不利于更换, 限制了能源的补充。若节点的能量耗尽, 则易引起网络拓扑结构的变化, 导致网络分割, 甚至使整个网络过早地瘫痪。因此, 节省传感器节点的能量, 均衡网络节点能耗, 能够延长网络生命的周期, 成为了无线传感器网络中一个关键的技术。在无线传感网络中, 节点的绝大部分能量消耗在无线通信模块中, 而分簇路由协议是有效节省无线通信能耗的一种重要手段, 因此, 研究无线传感网络分簇路由算法具有重要的意义。

Heinzelman 等人^[2] 最早提出一种低功耗自适应集簇分层型协议 (low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH), 其基本思想是: 以随机的方式选择簇头, 将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中, 从而达到降低能量消耗、提高网络生存时间的目的。

目前, 现有的分簇路由协议大多借鉴了 LEACH 协议的思想。文献[3]提出引入簇成员数门限和合并极小簇的方法避免极大簇和极小簇同时存在改进算法; 文献[4]提出 LEACH-ECHC 算法, 设定能量最小阈值来选择不一样的簇头选举范围; 文献[5]提出 LEACH-M, 采用多跳的方式传输数据; 文献[6]提出助理簇头的概念, 动态决定是否需要在簇内产生助理簇头, 并在需要产生助理簇头的簇内选择合适的节点; 文献[7]提出一种 LEACH-RA 簇头改进算法, 根据所处簇的半径自适应选举簇头。

但是, LEACH 协议仍然存在着一些不足之处未被改进, 本文详细分析 LEACH 协议的不足之处, 并提出改进算法, 主要在簇头选举阶段和成簇阶段进行改进。

1 LEACH 协议介绍

LEACH 协议的基本思想是以不断循环的方式随机选举簇头节点 (cluster head, CH), 将整个传感器网络分为多个簇, 每个簇拥有一个簇头节点和多个非簇头节点 (cluster member, CM), 以“轮 (round)”的概念来定义簇的重构周期。每轮分簇的建立和数据传输的稳定两个阶段。每个簇以单跳的方式

收稿日期: 2012-03-16; 修回日期: 2012-04-30 基金项目: 广东省省部产学研资助项目 (2010B090400211)

作者简介: 黄加异 (1987-), 男, 广东河源人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络 (heyuanhuangjiayi@foxmail.com); 程良伦 (1965-), 男, 广东广州人, 教授, 博导, 主要研究方向为无线传感器网络、物理信息融合系统、网络控制与系统集成、网络与信息化控制。

与基站(BS)进行数据传输,如图 1 所示为 LEACH 拓扑结构。

在簇的建立阶段主要包括簇头选举和形成簇的任务。首先得选举簇头,定义一个最小阈值 $T(n)$,每个传感器节点产生一个 $0 \sim 1$ 的随机数与 $T(n)$ 进行比较, $T(n)$ 的计算公式为

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times (r \times \text{mod}(\frac{1}{P}))} & \forall n \in G \\ 0 & \forall n \notin G \end{cases}$$

其中: n 为节点标号, P 是簇头在所有节点所占的比例, r 为当前的轮数, mod 为求模运算符, G 为过去 $1/P$ 轮没有被选择为簇头的集合。

当节点产生的随机数小于 $T(n)$ 时,则该节点就被选为簇头,簇头选举的任务完成。当簇头被选举成功后,簇头以广播的方式向所有非簇头节点发送消息告知自己成为簇头,非簇头节点根据接收到的信号强度值(RSSI)来决定从属哪个簇,并向簇头发送申请加入消息。簇头收到请求后将节点加入自身的路由表,为每个节点设定一个 TDMA 时间表,并发送给所有簇内节点。

2 LEACH 协议优缺点分析

2.1 LEACH 协议优点分析

LEACH 协议使用随机选举簇头的方式,避免了簇头节点能耗过高,相对于一般的平面路由协议和静态聚类算法,能够在一定程度上均衡整个网络的能量负载,采用数据融合方法来有效减少通信量,进而延长网络的生命周期。

2.2 LEACH 协议缺点分析

簇头选举问题包括:

a) LEACH 算法簇头的选择存在着极大的随机性,容易出现簇头分布不均,或者簇头间的远近不一,导致每个簇中的节点数目分布不均匀,而且容易出现极大密度簇和极小密度簇的现象,导致聚类区域间负载不均,簇与簇之间负载不均的现象。

b) LEACH 算法没有综合考虑节点的剩余能量值和簇头节点分布的密度值,极易出现剩余能量不足的节点被选为簇头,导致节点过早死亡,整个网络拓扑不断变化。

这两种现象严重导致网络能耗不均衡,最终影响网络的生存时间。

簇形成问题。LEACH 算法中非簇头节点只根据接收到簇头的 RSSI 值来选择簇头,决定从属哪个簇,但是没有考虑到加入簇头跟基站之间的距离,容易出现传输路径冗长。如图 2 所示,若仅仅依赖 RSSI 值来判断加入的哪个簇,则节点 CM1 将会选择加入簇头为 CH1 的簇,然而数据流向将通过路径 2 传输到 BS。很明显,相比于路径 1,路径 2 的数据流向增加了不必要的传输距离,从而增加了数据传输功耗,一定程度上浪费了整个网络的能量。

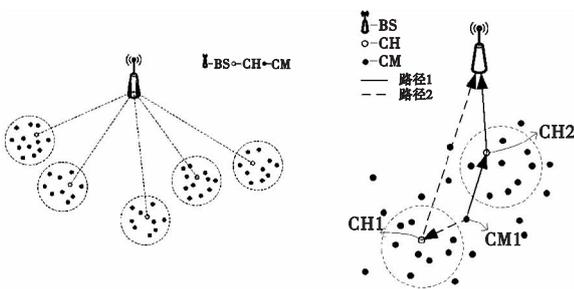


图1 LEACH协议拓扑结构图

图2 路径选择

3 改进算法描述

通过上述对 LEACH 协议的分析,改进算法主要针对簇的建立阶段中簇头的选举和簇的形成中存在的问题进行改进,目的在于自适应调整聚类区域,使负载均匀分布到各个簇。

在选举簇头阶段,分为簇头初始化选举、簇内簇头选举和全网簇头选举三种方式相结合,自动调整聚类区域。其中簇头初始化选举在整个网络生命周期只出现一次,即第一轮选举簇头;簇头选举综合考虑随机概率、节点的剩余能量和邻居簇头的距离,将节点剩余能量和相邻簇头的距离纳入选举簇头的评判依据。

在成簇阶段,不仅仅依靠信号强度值 RSSI 作为加入哪个簇的判据参数,而是将 RSSI 与最短数据流路径相结合来选择从属的簇。

对于节点和网络模型,首先对算法作如下前提假设:

- a) 传感器节点的初始能量相同;
- b) 节点无线发射功率可计算、可控,即可以调整通信距离和发射功率间的相互对应关系;
- c) 传感器节点随机部署,位置固定,节点具有唯一的网络中标号;
- d) 节点数据可进行聚合处理。

信道是对称的,即从节点 A 发送到节点 B 所消耗的能量等于从节点 B 发送到节点 A 消耗的能量。

3.1 算法能量分析

无线传感网络节点发送数据包长度为 l bit 的数据所消耗的能量 $E_{Tx}(l, d)$ 与通信距离 d 存在如下关系:

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} l \times E_{elec} + l \times \epsilon_{mp} \times d^4 & d > d_0 \\ l \times E_{elec} + l \times \epsilon_{fs} \times d^2 & d < d_0 \end{cases}$$

节点接收 l bit 数据的能耗为

$$E_{Rx}(l) = l \times E_{elec}$$

其中: E_{elec} 为电路能耗; d 为收发节点间的距离; ϵ_{mp} 和 ϵ_{fs} 为放大器能量比例系数,其值根据 d 确定;若 $d > d_0$ 采用多路径模式(d^4),否则采用自由空间模式(d^2)。

3.2 簇头选举阶段

a) 簇头初始化选举。在网络初次使用选举簇头时,即第一轮选举簇头,采用 LEACH 算法随机选举簇头。

b) 簇内簇头选举。从第二轮簇头选举开始,计算阈值 $T(n)$ 时,将节点剩余能量值和相邻簇头的间距参与计算,并根据不一样的节点布局 and 不同的实施环境设定参数权重,改进的公式为

$$T(n) = \begin{cases} \lambda \left(\frac{P}{1 - P \times (r \times \text{mod}(\frac{1}{P}))} \right) + & E_{n(\text{current})} > E_{\min}, \forall n \in G \\ (1 - \lambda) \left(\frac{d_n - d_1}{d_2 - d_n} \right) \frac{E_{n(\text{current})}}{E_{n(\text{init})}} & \\ 0 & E_{n(\text{current})} < E_{\min}, \forall n \notin G \end{cases}$$

其中: $0 > \lambda > 1$ 为参数权重,根据实际应用环境选择不一样的权重参数; d_n 为簇内备选节点 n 到 BS 的距离; d_1, d_2 分别为本簇最近两簇头到 BS 的距离, $d_1 < d_2$; $E_{n(\text{current})}$ 为节点 n 当前的剩余能量值; $E_{n(\text{init})}$ 为节点 n 的最初状态能量值;其他参数定义与 LEACH 算法相同。

E_{\min} 为一轮中簇头所需要消耗的能量值,用于确保备选簇头至少能完成一轮任务:

$$E_{\min} = Nk(E_{Tx}(l, d) + E_{Rx}(l))$$

其中: N 为簇中成员总数, K 为每个簇成员的数据帧数。

当节点剩余能量越多, 即 $\frac{E_{n(\text{current})}}{E_{n(\text{init})}}$ 越大, 则被选举为新簇头的概率就越大, 可以避免剩余能量较少的节点承担簇头次数过多, 导致负载过重, 节点过早死亡。

$$\frac{d_{n(\text{cm}2)} - d_1}{d_2 - d_{n(\text{cm}2)}} < \frac{d_{n(\text{cm}1)} - d_1}{d_2 - d_{n(\text{cm}1)}}$$

当 $\frac{d_n - d_1}{d_2 - d_n}$ 越趋近于 1, 节点 n 被选为新簇头的可能性越大,

同时也表明簇头分布越均匀, 通过此方式自适应调整聚类区域, 如图 3(a) 所示。因此, 簇内非簇头节点 CM1 成为新簇头的可能性大于 CM2, 从图 3(b) 可以看出, 若 CM1 成为簇头组成的新簇, 与 CM2 为簇头的新簇相比, 整个网络的簇分布更加均匀, 因此能自适应调整聚类的区域, 从而可以避免出现极大簇极小簇现象和簇间覆盖现象。

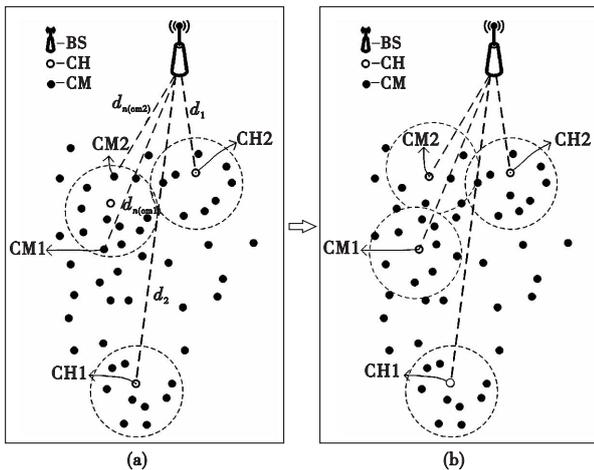


图3 聚类区域自适应调整

c) 全网簇头选举。当某个簇能耗过快, 平均剩余能量过低, 容易导致区域块能耗不均, 当簇内的平均剩余能量值小于节点初始能量值的 13% 时, 即

$$\bar{E} = \frac{\sum_{n=1}^N E_{n(\text{current})}}{N} < E_{n(\text{init})} \times 13\%$$

则采取全网选举簇头, 在整个网络大范围内重新组网。此时, 簇头选举式为

$$T(n) = \begin{cases} \left(\frac{P}{1 - P \times (r \times \text{mod}(\frac{1}{P}))} \right) \frac{E_{n(\text{current})}}{E_{n(\text{init})}} & E_{n(\text{current})} > E_{\min}, \forall n \in G \\ 0 & E_{n(\text{current})} < E_{\min}, \forall n \notin G \end{cases}$$

式中: 参数含义与簇内簇头选举定义相同。

3.3 成簇阶段改进

簇头选举完成后, 簇头向全网广播自己成为簇头的消息, 其中这一消息中包含有唯一标志该簇头的 ID、发射信号功率强度值 (RSSI) 信息, 非簇头节点根据接收到的 RSSI 值, 通过自动转换计算出离簇头节点的距离, 初步选择三个离自身最近的簇头作为预选簇头, 同时考虑每个预选簇头与 BS 的距离, 选择数据传输能耗最小的流向。

如图 4 所示, CM1 根据 RSSI 选择三个最近的备选簇头 CH1、CH2、CH3; 然后计算各个路径的传输 l bit 数据包的总能耗式为

$$W_n = E_{\text{CM1-Tx}}(l, d_{\text{CM1-CH}_n}) + E_{\text{CH}_n\text{-Rx}}(l) + E_{\text{CH}_n\text{-Tx}}(l, d_{\text{CH}_n\text{-BS}})$$

其中: $n = \{1, 2, 3\}$, $d_{\text{CM1-CH}_n}$ 为 CM1 到备选簇头的距离; $d_{\text{CH}_n\text{-BS}}$

为备选簇头到 BS 的距离。

$$d_{\text{CM1-CH}_1} < d_{\text{CM1-CH}_2} < d_{\text{CM1-CH}_3}$$

然后比较 W_1 、 W_2 、 W_3 , 选择最小功耗 $\min\{W_1, W_2, W_3\}$ 的路径。虽然通过 RSSI 可以计算出, 但还需要进行路径功耗的比较才可以决定 CM1 申请加入哪一个簇头。

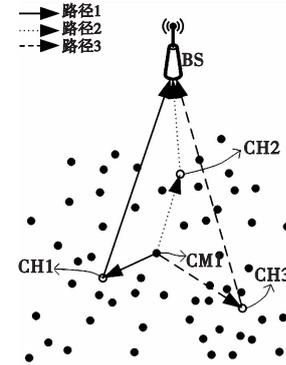


图4 最小能耗路径选择

决定加入的簇头后, 非簇头节点向簇头发送申请加入消息, 此消息中包含簇头 ID 和节点 ID, 若簇头同意加入该簇, 则发送赞同消息, 否则发送决绝消息, 该节点向耗能路径次小的簇头发出申请消息。

4 仿真实验与分析

本文采用 MATLAB 软件对算法进行仿真, 比较 LEACH 路由协议、参考文献[7]提出的 LEACH-RA 路由协议和本文改进算法的性能。节点随机分布在大小为 $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 的网络监测区域中, 基站位于坐标为 (75, 200) 的位置, 其他参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
节点初始能量/J	1.5
总节点数(N)/个	100
电路能耗(E_{elec})/nJ/bit	20
权重值(λ)	0.65
自由空间放大倍数(ϵ_f)/pJ/(bit · m ⁻²)	8
多路径衰减放大倍数(ϵ_{mp})/pJ/(bit · m ⁻²)	0.03
每帧数据长度(l)/bit	3200
簇头数目比例/%	5

4.1 负载均衡度分析

分析算法的负载均衡度, 图 5 所示为三种算法成簇后的节点分布图, 如表 1 中给出的参数, 在监测区域内随机分布 100 个节点, 其中簇头数目占 5%, 即簇头总数 5 个。从图 5 中可以看出, 网络应用 LEACH 协议簇头负载非常不均匀, 严重出现极小极大簇现象, 而后两种算法分布较均匀, 其中本文改进算法具有更好的负载均衡效果。

图 6 为负载均衡指数拟合曲线图, 反映出网络中节点成簇负载均衡度。可以看出, LEACH 与 LEACH-RA 算法均衡指数波动较大, 不能达到较稳定的状态。这是由于每轮选举簇头都是随机选举, 簇头随机分布不均, 导致网络负载不均; 相反, 改进算法不断调整聚类区域, 使得簇头能够尽量均匀, 从而使得簇头负载均衡, 如虚线曲线反映改进算法能够使网络负载更加均衡, 并以较快的速度达到负载均衡度稳定的状态。

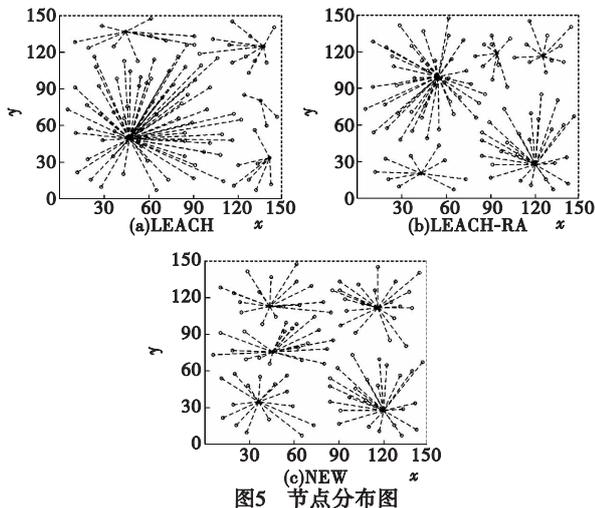


图5 节点分布图

4.2 节点生存时间

分析网络中节点生存时间。由图 7 可得 LEACH 和 LEACH-RA 算法分别在第 240 s 和 300 s 时开始出现节点死亡,而 LEACH-NEW 是在 350 s 时才开始出现节点死亡,与 LEACH 算法和 LEACH-RA 算法相比分别推迟了 46% 和 17%,这说明 LEACH-NEW 有效延长了节点的生存时间,表明在同样的时间里,节点能耗更低。

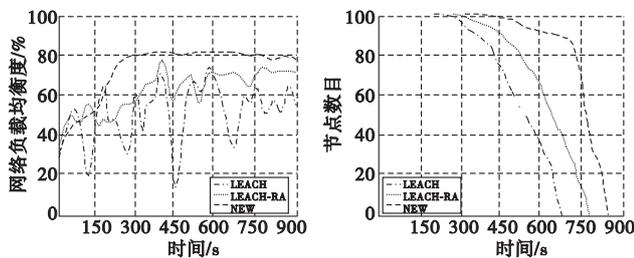


图6 网络负载均衡曲线

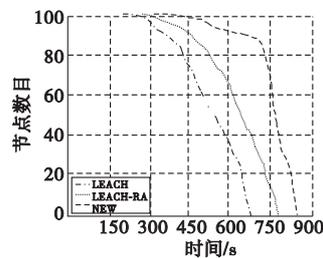


图7 网络生存时间

从图 7 中可以看到本文算法 NEW 曲线在前期比较平缓,而在后期斜率较大,表明后期大量节点同时死亡,反映出节点能耗均衡。从图 7 中还可以得到 LEACH 和 LEACH-RA 算法分别第 675 s 和 780 s 时全部节点死亡,而本文算法是在 835 s 时才开始出现节点死亡,从而有效延长了网络的生存时间。

4.3 网络能量分析

分析网络总能耗,网络随机分布 100 个节点,每个节点初始能量为 1.5 J,则网络总能量为 150 J。由图 8 可以看出 LEACH 和 LEACH-RA 分别在 675 s 和 780 s 耗尽网络全部能量,而本文算法在 835 s 耗尽网络能量。从图 8 中还可以看到,本文算法曲线更加平缓,这是由于能耗更加均衡,节点均匀放电。因此可以反映出改进算法对整个网络能量利用率更高,能有效地延长网络的生存周期。

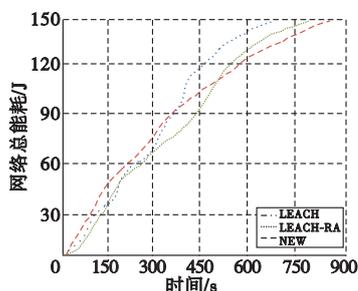


图8 网络能耗分析

5 结束语

本文在 LEACH 算法的基础上提出了一种聚类区域自适应分布的 WSN 能耗均衡分簇算法,主要在簇头选举阶段和成簇阶段作了改进。在簇头选举时将节点剩余能量值和邻居簇头的间距参与阈值计算,目的是使簇头在区域内均匀分布簇头,自适应调整聚类区域;成簇阶段,非簇头节点申请加入簇时,不仅考虑接收到的 RSSI 值,同时考虑预加入簇头到 BS 间的距离,选择总能量消耗最小的数据流路径。

通过仿真结果表明,对比 LEACH 算法和 LEACH-RA 算法,改进算法能够调整聚类区域,更加均匀分簇,有效避免了极大簇和极小簇的现象,同时能够达到能耗均衡的最终目的。

参考文献:

- [1] 张品,姜亚光,陈磊. 基于加权优化选择两级簇头的 WSN 路由协议[J]. 传感技术学报,2011,24(3):447-451.
- [2] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKKISHNAN H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//Proc of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Washington DC:IEEE Computer Society,2000.
- [3] 吕涛,朱清新,张路桥. 一种基于 LEACH 协议的改进算法. 电子学报,2011,39(6):1405-1409.
- [4] 廖明华,张华,王东. 基于 LEACH 协议的簇头选举改进算法[J]. 计算机工程,2011,37(7):112-115.
- [5] 李岩,张曦煌,李彦中. 基于 LEACH 协议的簇头多跳(LEACH-M)算法[J]. 计算机工程与设计,2007,28(17):4157-4160.
- [6] 龙际珍,陈沅涛,邓冬梅,等. 基于 LEACH 协议的助理簇头分簇算法[J]. 计算机工程,2011,37(7):103-105.
- [7] 胡星华,路坚. 固定簇的 LEACH 半径自适应簇头改进算法[J]. 传感技术学报,2011,24(1):79-82.
- [8] BUYANJARGAL O, KWON Y. An energy efficient clustering algorithm for event-driven wireless sensor networks [C]//Proc of the 5th IEEE International Joint Conference on INC, IMS and IDC. Washington DC:IEEE Computer Society,2009:1758-1763.
- [9] 张震,闫连山,潘炜,等. 基于 LEACH 和 PEGASIS 的簇头成链可靠路由协议研究[J]. 传感技术学报,2010,23(8):1173-1178.
- [10] 张强,卢潇,崔晓臣. 基于能量高效的无线传感器网络 LEACH 协议改进[J]. 计算机工程与设计,2011,32(2):427-433.
- [11] 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.
- [12] 王林,赵绍英. 无线传感器网络 LEACH 路由协议的研究与改进[J]. 计算机工程与应用,2012,48(2):80-82.
- [13] 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.
- [14] 袁柳生,程良伦. 基于博弈论的无线传感器网络非均匀分簇路由算法[J]. 计算机应用研究,2009,26(5):1865-1867.
- [15] BOUABDALLAH F, BOUABDALLAH N, BOUTABA R. On balancing energy consumption in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology,2009,58(6):2909-2924.