

# 一种基于树均匀分簇的 WSNs 节能路由协议<sup>\*</sup>

邓仲芬, 石为人, 黄河, 何筱  
(重庆大学 自动化学院, 重庆 400030)

**摘 要:** 针对无线传感器网络 (WSNs) 典型分簇 LEACH 算法簇首分布不均和簇首与基站一跳通信能耗大的问题, 提出一种基于树均匀分簇的节能路由协议 (EUCR)。基于节点接收信号强度与自身剩余能量的乘积及网络连通度选取簇首, 计算簇首间的合理距离, 使网络均匀分簇; 基于跳数与簇首当前剩余能量构造簇间优化路由树。在 OMNeT++ 中对 EUCR 进行仿真对比分析。仿真结果表明: 与 LEACH 相比, EUCR 协议簇首分布更均匀, 提高了簇的负载平衡程度, 节省了节点能量, 延长了网络生命周期。

**关键词:** 无线传感器网络; LEACH; 均匀分簇; 节能; 负载平衡

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-9787(2011)05-0047-04

## An energy-efficient uniform tree-clustering routing protocol for WSNs<sup>\*</sup>

DENG Zhong-fen, SHI Wei-ren, HUANG He, HE Xiao  
(School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract** LEACH, as a traditional routing protocol in wireless sensor networks has some disadvantages including uneven distribution of cluster heads and great energy consumption to communicate with base station in one hop. According to these disadvantages, an energy-efficient uniform tree-clustering routing (EUCR) protocol is proposed. In EUCR, a cluster head is selected based on the product of received signal strength by node and its remained energy and network connectivity. Calculation of suitable distance between cluster heads made even cluster distribution in network. Optimizing routing tree of cluster heads is established based on hop numbers and its remained energy. EUCR is simulated in OMNeT++. The results show that compared with LEACH, EUCR makes cluster distribution more even, enhances the degree of load balancing, saves energy and prolongs the lifetime of network.

**Key words** wireless sensor networks (WSNs); LEACH; uniform clustering; energy-efficient; load balancing

### 0 引 言

无线传感器网络 (wireless sensor networks WSNs) 是由大量具有无线通信与计算能力的传感器节点构成的、能根据环境自主完成指定任务的自组织网络系统<sup>[1]</sup>。WSNs 因其应用场合不同而有多种不同的路由协议, 典型的有 Gossiping SPN<sup>[2]</sup>, DD<sup>[3]</sup> 等平面路由; LEACH<sup>[4]</sup>, PEGASIS<sup>[5]</sup>, TEEN<sup>[6]</sup> 等分层路由。典型路由有其优缺点, 节能性都不佳。基于典型路由改进的路由算法甚多: 通过找出 LEACH 负载不均衡原因提出的 LB-LEACH 协议<sup>[7]</sup>; 针对 WSNs 多跳路由能耗不均提出的 EER 节能路由模型<sup>[8]</sup>; 针对 LEACH 簇内通信能耗不均与簇覆盖区域重叠问题提出的 LEACH-UD 算法<sup>[9]</sup>; 高效节能 CCR 协议<sup>[10]</sup>, 在簇内采用链

式数据聚合与传输方式。

本文从节能、分簇均匀性及能量与负载均衡出发, 提出一种新的 WSNs 路由协议。它确保了网络最优簇首数目与簇首均匀分布; 簇内与簇间两级优化路由由树结构减少了能耗。

### 1 网络模型

#### 1.1 具体的网络模型

节点随机散布于某正方形区域, 基站唯一且固定在区域外的某个位置; 节点由电池供电, 部署后位置不变; 所有节点具有相同结构和数据融合的功能, 有唯一 ID 号; 节点无线发射功率可调控; 节点能以单跳或多跳方式与基站通信, 且链路对称。

收稿日期: 2010-09-03

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项基金资助项目 (2009ZX07528-003); 重庆市重大科技专项基金资助项目 (CSTC, 2008AB6115)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

## 1.2 模型中网络连通度的定义

W SN s拓扑结构可用  $G(V, E)$  表示。设  $r$  为节点最大通信半径, 对给定节点  $a, b \in G(V)$ ,  $L(a, b)$  或  $L(b, a)$  表示节点  $a, b$  之间的无线传输链路。当  $a, b$  为邻居节点时,  $|L(a, b)| \leq r$ ; 否则,  $|L(a, b)| > r$ 。  $R(b, a)$  表示  $a, b$  之间的传输对应关系, 称为节点  $a, b$  之间的相关度。当  $a, b$  为邻居节点, 即  $|L(a, b)| \leq r$  时, 其相关度值  $|R(b, a)| = 1$ ; 当  $|L(a, b)| > r$  时, 表示  $a, b$  之间的通信需经  $s-1$  个中间节点转发才能互相到达, 其相关度值  $|R(b, a)| = s$ 。网络连通度 ( $s_0$ ) 是指节点邻居节点 (即节点相关度值  $|R(b, a)| = 1$ ) 的数目。

## 2 算法描述

### 2.1 最优簇首数量的确定

W SN s中节省能量是设计路由的首要因素。可根据使网络能量消耗达到最小的原则求取网络最优簇首数量<sup>[11]</sup>。设  $N$  为网络节点数,  $K$  为簇个数,  $E_{\text{elec}}$  为射频电路能耗,  $d_{\text{tCH}}$  为簇成员到簇首的距离,  $d_{\text{toBS}}$  为簇首到基站的距离,  $\epsilon_{\text{fs}}, \epsilon_{\text{mp}}$  分别为自由空间与多路径衰减模型功率放大的能耗参数,  $E_{\text{DF}}$  为单位融合能耗,  $I$  为数据包大小。

簇首能耗

$$E_{\text{CH}} = (N K - 1) E_{\text{elec}} I + (N K) E_{\text{DF}} I + (E_{\text{elec}} I + \epsilon_{\text{mp}} I E[d_{\text{toBS}}^4])$$

簇成员能耗

$$E_{\text{nonCH}} = E_{\text{elec}} I + \epsilon_{\text{fs}} I E[d_{\text{tCH}}^2]$$

网络总能耗

$$E_{\text{total}} \approx 2N E_{\text{elec}} I + N E_{\text{DF}} I + N \epsilon_{\text{fs}} A^2 / 2K\pi + K \epsilon_{\text{mp}} I_{\text{BS}}^4 I$$

其中,  $A^2$  为网络正方形区域面积,  $L_{\text{BS}}$  为常量, 表示基站到该区域中心的距离。

对  $E_{\text{total}}$  求  $K$  的导数并使之为零, 求得  $K_{\text{Opt}}$  使  $E_{\text{total}}$  最小

$$K_{\text{Opt}} = \sqrt{N \epsilon_{\text{fs}} A^2 / 2\pi \epsilon_{\text{mp}} I_{\text{BS}}^4} = \sqrt{N / 2\pi} \sqrt{\epsilon_{\text{fs}} / \epsilon_{\text{mp}}} A / L_{\text{BS}}^2$$

$K_{\text{Opt}}$  的计算由基站完成, 且每 20 轮 (即 1 个周期) 计算一次, 因为网络运行中会不断有节点因能量耗尽而死亡。

求得  $K_{\text{Opt}}$  后, 为使分簇覆盖整个节点区域, 要求簇平均半径  $R \geq R_0$ ,  $R_0 = \sqrt{A^2 / K_{\text{Opt}} \pi}$ 。设相邻簇首间距为  $D$ , 其值应在  $2R_0$  的某个邻域内

$$D \in [2R_0(1 - \mu), 2R_0(1 + \mu)] \quad (1)$$

其中,  $\mu \in (0, 0.5)$ 。

### 2.2 每个周期的首轮成簇

每周首轮成簇阶段, 基站重新计算  $K_{\text{Opt}}$ , 广播“竞选簇首”消息。节点根据接收信号强度与自身剩余能量的乘积  $M$  及网络连通度决定是否参加竞选, 参加竞选的节点向基站发送“参与竞选簇首”消息, 成为候选簇首。在竞选簇首过程中, 若候选簇首  $H_i$  获胜, 便向周围广播“成为簇首”消

息, 在该簇首通信半径范围内的其他候选簇首接收到来自  $H_i$  的“成为簇首”消息后, 放弃候选簇首的身份, 退出竞争, 恢复成普通节点。这保证了每个簇的簇首唯一性, 且能使网络簇首分布比较均匀。算法要求相邻簇首间距满足式 (1), 假如  $H_i$  成为簇首, 则其相邻簇首必分布在以  $H_i$  为圆心,  $D$  为半径的环形区域, 如此下去直至最后, 将产生所有簇首, 且各簇首之间的距离合理, 簇首分布更加均匀, 整个网络达到均匀分簇的目的, 如图 1 所示。每周首轮成簇后, 簇的数量与分布区域保持不变, 直至下个周期到来才重新分簇, 这节省了每轮都进行簇重构的开销。

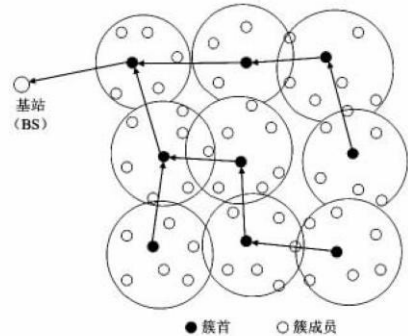


图 1 均匀分簇

Fig 1 Uniform clustering

每周首轮均匀成簇的算法流程如下所述:

1) 基站计算出  $K_{\text{Opt}}$  并广播“竞选簇首”消息, 节点根据  $M$  与网络连通度决定是否参加簇首的竞选,  $M$  值大于阈值  $M_0$  的节点向基站发送“参与竞选簇首”的消息, 产生  $m$  个候选簇首。

2) 基站收到  $m$  个候选簇首的消息后, 选择  $M$  值最大的候选簇首成为第一个簇首, 并向其发送“任命簇首”消息, 其余  $K_{\text{Opt}} - 1$  个簇首则根据  $D$  的限制从候选簇首中产生。

3) 簇首产生后, 以半径  $R$  广播“邀请加入簇”消息。

4) 若非簇首节点只收到一个簇首的邀请信息, 则向该簇首发送“请求加入簇”消息; 若非簇首节点收到 2 个或多个簇首的邀请信息, 则优先加入网络连通度较低的簇首所在的簇, 并向该簇首发送“请求加入簇”消息。

5) 簇首收到非簇首节点的“请求加入簇”消息后, 向其发送“允许加入”消息, 并保存该节点的各种信息。

6) 非簇首节点收到“允许加入”消息后, 表示加入簇成功, 成为簇成员。

7) 簇首给簇成员分配 TDMA 时隙。

8) 整个网络进入稳定数据传输阶段。

每周首轮数据传输阶段, 簇成员将数据直接发给簇首。

### 2.3 每个周期非首轮簇首的选择

每周非首轮的簇首确定后, 构造簇内路由树, 使离簇首较远的节点以多跳方式传送数据, 节省能量。由于每周首轮均匀成簇时, 所有成员在簇首的通信范围内, 因此, 当簇首更换为簇边缘节点时, 其他成员最多经过两跳可到达簇

首, 如图 2(b) 所示。每周非首轮簇首选择的算法流程如下所述:

- 1) 网络上一轮快结束时, 簇成员将自身信息发给上轮簇首, 上轮簇首选择簇内剩余能量最大的节点为下一轮簇首, 并将自身和簇成员信息转交给该簇首, 再恢复为簇成员。
- 2) 新簇首向簇内成员广播“新簇首”消息, 消息包含到新簇首的跳数 (初始为 0) 及其 ID 号与当前剩余能量。
- 3) 簇成员收到消息后将跳数加 1 并保存, 然后将消息中的 ID 号与剩余能量值改为自身 ID 与能量值, 继续转发该消息, 直至遍历所有成员。
- 4) 簇首给簇成员分配 TDM A 时隙, 网络进入数据传输阶段。

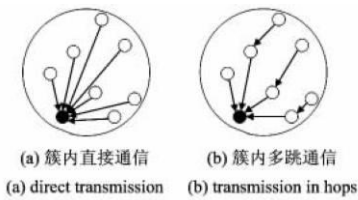


图 2 两种簇内传输方式

Fig 2 Two ways of transmission in a cluster

2.4 簇间优化路由树的构造

每轮簇首选定和成簇后, 基站向簇首发送“竞选根簇首”消息, 各簇首回复包含 ID 号和当前剩余能量的消息, 基站选择  $M$  值最大的簇首为根簇首, 并发送“任命根簇首”消息。

根簇首向相邻簇首广播消息, 消息包含到根簇首的跳数 (初值为 0)、根簇首 ID 号及其当前剩余能量。收到消息的簇首将其中的跳数加 1 并保存, 然后将消息中的父节点 ID 号与剩余能量修改为自身 ID 号与剩余能量, 向其相邻簇首继续转发此消息, 直至遍历所有簇首。此过程中, 若簇首收到多个消息, 则比较当前接收消息与已保存消息中跳数的大小, 有 3 种情况: 1) 若当前跳数小于原来跳数, 则保存当前接收的消息, 删除原来的消息。2) 两者跳数相等, 则比较当前消息与原来消息中剩余能量的大小。如果当前剩余能量大于原来的剩余能量, 则保存当前消息, 删除原来的消息; 否则, 丢弃当前消息。3) 当前跳数大于原来的跳数, 则丢弃当前消息。图 3 表示一个簇间优化路由树的具体构造过程, 其中, 节点 1 为根簇首。

2.5 数据传输阶段

簇内路由由树上, 转发节点将接收数据与自身采集数据融合后发给簇首。

簇首融合成员与自身数据后, 按 2.4 节算法构造的簇间优化路由树进行数据转发, 直至根簇首。

3 仿真实验与对比分析

本文采用 OMNeT++ 对 EUCR 进行仿真, 并与 LEACH

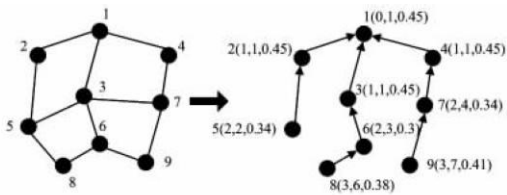


图 3 簇间优化路由树的构造算法

Fig 3 Architecture algorithm of optimizing routing tree between cluster heads

进行对比、分析。仿真的网络环境参数如表 1 所示。

表 1 仿真的网络环境参数表

Tab 1 Parameters of network in simulation

仿真参数	数值
节点分布区域 ( $m^2$ )	$100 \times 100$
节点总数 (个)	100
节点的初始能量 (J)	0.5
数据包长度 (字节)	200

图 4 为 EUCR 与 LEACH 协议在各指标上的对比情况。从图 4(a), (b) 可看出: EUCR 协议的网络生命周期明显比 LEACH 协议长。在 EUCR 协议下, 网络第一个节点死亡时间为 952 轮, 全部节点死亡时间为 2900 轮, LEACH 协议对应的 2 个时间分别为 706 轮和 1625 轮。图 4(b) 中, 在相同死亡节点百分比下, EUCR 协议网络的运行时间长于 LEACH 算法。该算法节省了节点能量, 均衡了网络能耗, 使网络能量均匀分布且高效利用, 从而延长了网络寿命。

图 4(c) 对比了 2 种协议的总剩余能量。网络运行相同时间 1000 轮时, EUCR 全网总剩余能量为 42J 左右, LEACH 为 27.5J 左右, 这体现了 EUCR 的节能性, 且 LEACH 算法的网络剩余能量随时间变化的下降速度比 EUCR 协议的下降速度快, 主要原因为 LEACH 簇首分布不均且簇成员数量不平衡导致部分节点能量消耗过快而影响了整个网络的能量水平, EUCR 协议对网络进行均匀分簇和能耗均衡改善了这一问题。

图 4(d) 对比了 2 种算法簇的负载平衡程度, 反映了 2 种协议分簇的均匀性。在相同网络初始簇首数量下, LEACH 协议的 LBF 值为 0.03 左右, 且随时间推移其值有减小的趋势, 原因为 LEACH 算法分簇的不均匀性, 且随节点的不断死亡, 其簇首分布与簇的规模更不均匀, 从而使簇的负载平衡程度下降。EUCR 协议对网络均匀分簇使每个簇的成员数量基本一致, 较好地平衡了各簇的负载, 且不断计算网络最优簇首数量, 使簇首比例一直保持较佳值, 故其 LBF 值大得多, 为 0.1 左右, 且随时间的变化基本保持水平状态。

4 结束语

针对典型分簇路由协议不足提出的 EUCR 协议能有效节省能量, 均衡负载及网络能量分布, 延长网络的生命周

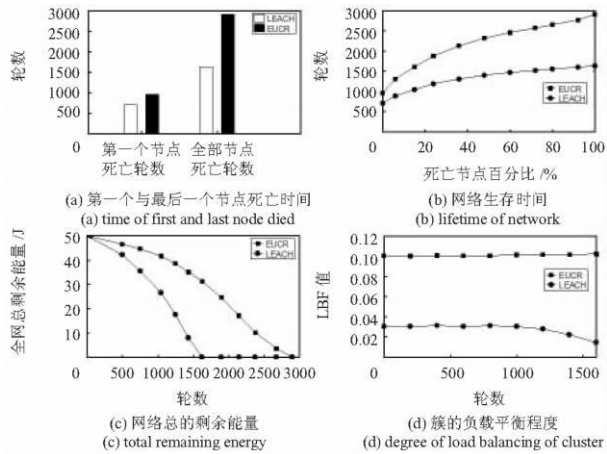


图 4 EUCR 与 LEACH 的对比

Fig 4 Comparison of EUCR and LEACH

期,体现了 WSNs 路由设计的重要思想之一,即节能性。随着 WSNs 的广泛应用,对其要求越来越多,例如:服务质量 (QoS)、安全性等。

参考文献:

[1] 王 殊, 阎毓杰, 胡富平, 等. 无线传感器网络的理论与应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007

[2] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks[C]// Proc of the 5th ACM /IEEE MobCom' 99, Seattle, USA, 1999 174- 185

[3] Intanagonwatt C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]// Proc of the 6th ACM /IEEE MobCom' 00, Boston, USA, 2000 56- 67

[4] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// IEEE Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Washington: IEEE Computer Society, 2000: 175- 187

[5] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASUS: Power-efficient gathering in sensor information systems[C]// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, 2002 1125- 1130

[6] Manjeshwar A, Agrawal D. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, New York: ACM Press, 2001: 304- 309.

[7] 张华忠, 刘志杰, 于鹏程. WSNs 中负载均衡的 LEACH 通信协议研究 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(18): 4403- 4406

[8] 马 震, 刘 云, 沈 波. 用于无线传感器网络的节能路由模型与仿真 [J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(5): 43- 47

[9] 王志刚, 李腊元, 李春林. 一种新的无线传感器网络均匀分簇路由协议 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(31): 81- 84.

[10] 潘志芳, 章 勇, 刘大伟. 一种链式分簇的无线传感器网络路由协议 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28(6): 10- 12

[11] 何延杰, 李腊元, 邢明彦. WSNs 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

作者简介:

邓仲芬 (1987- ), 女, 湖南新宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络。

(上接第 46 页)

值。图 5 所示的波形和公式 (6) 可作为微发电机设计的重要依据。

5 结 论

设计了尺寸为  $\Phi 7\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的单定子、单转子结构微发电机。使用传统的磁路分析法得到了微发电机空载气隙磁密的计算公式。使用磁场数值得到了微发电机磁场的主要参数值和空载感应电动势波形。在不同气隙厚度下, 对由磁路分析和数值仿真得到的气隙磁密结果进行比较, 其误差小于 2.32%; 在气隙厚度为  $200\mu\text{m}$  时, 空载感应电动势最大值的计算结果与仿真结果误差小于 2.57%。结果证明: 磁路分析方法可以用于微发电机磁场分析, 为设计提供指导。由仿真得到的磁场参数可以用于微发电机的设计和分析。

参考文献:

[1] Amold D. Review of microscale magnetic power generation [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2007, 43(11): 3940- 3951.

[2] Holmes A. Axial flux permanent magnet machines for micropower

generation [J]. Journal of Micro-ElectroMechanical Systems, 2005, 14(1): 54- 62

[3] DAS S. Microfabricated high-speed axial flux multiwatt permanent magnet generators—Part I: Modeling [J]. Journal of Micro-ElectroMechanical System, 2006, 15(5): 1330- 1350.

[4] Amold D. Microfabricated high speed axial flux multiwatt permanent magnet generators—Part II: Design, fabrication and testing [J]. Journal of Micro-ElectroMechanical System, 2006, 15(5): 1351- 1363

[5] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

[6] 王秀和. 永磁电机 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[7] 杜志明. 盘式低速永磁同步电动机的电磁场分析 [D]. 天津: 天津大学, 2007.

[8] 戴文进, 徐龙权. 电机学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

作者简介:

孙韶春 (1984- ), 男, 河北张家口人, 博士研究生, 主要从事微机电系统和测试技术的研究。