

一种能量均衡的无线传感器网络分簇算法*

龚本灿^{1,2}, 李腊元², 蒋廷耀¹, 汪祥莉²

(1. 三峡大学 电气信息学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 武汉理工大学 计算机学院, 武汉 430063)

摘 要: 为了延长网络的生存时间,提出了一种能量均衡的无线传感器网络分簇算法(EBCA),该算法优先选择
剩余能量较多的节点作为簇首,以平衡节点的能量消耗。仿真实验结果表明:无论同构网还是异构网,该算法都
能显著地推迟网络第一个节点的死亡时间,其性能明显优于 LEACH 算法。

关键词: 无线传感器网络; 能量均衡; 分簇算法

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2008) 11-3424-02

Energy-balanceable clustering algorithm for wireless sensor networks

GONG Ben-can^{1,2}, LI La-yuan², JIANG Ting-yao¹, WANG Xiang-li²

(1. College of Electrical Engineering & Information Technology, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China; 2. College of
Computer Science & Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: This paper presented an energy-balanceable clustering algorithm(EBCA) for wireless sensor networks to prolong
the network lifetime. It preferentially chose those nodes with more energy as the cluster heads to balance energy dissipation in
the nodes. Simulation results show that the proposed algorithm obviously postpones the death time of the first node for homoge-
neous and heterogeneous wireless sensor networks, and performs much better than LEACH algorithm.

Key words: wireless sensor networks; energy-balanceable; clustering algorithm

无线传感器网络采用自组织方式,具有快速展开、抗毁性
强等特点,广泛应用于军事侦察、环境监测、医疗监护、空间探
索、灾难抢险等领域。传感器节点有严格的能量限制,且难以
进行能量补充,如何合理地利用网络能量是设计传感器网络所
面临的首要问题。将传感器节点组织成簇的形式可以有效地
减少能量消耗。许多高效的路由算法^[1~5]都是在簇结构的基
础上进行设计的,如 LEACH^[1]、LEACH_C^[2]、PEGASIS^[3]等。

LEACH 算法中,所有节点轮流担任簇首以达到平衡节点
能量消耗的目的。网络的工作周期被分为若干轮,每轮由初始
化和数据传输两个阶段组成。在初始化阶段,每个节点产生
一个随机数,并根据当前轮数计算出一个阈值,如果随机数小
于阈值,则该节点成为簇首,普通节点加入与之最近的簇。由
于簇首的选择是随机的,每轮选出的簇首数量相差很大,无法
做到最优。LEACH_C 算法是集中式的簇首产生算法。每轮开
始时各个节点把自身位置和当前能量报告给基站,能量高于平
均值的节点成为候选簇首;然后采用模拟退火算法从候选节点
中选出数量合适且位置最优的节点成为簇首;最后,基站把分
簇结果广播给每个节点。LEACH_C 算法每轮选出的簇首数量
稳定且分布均匀,因此,其性能优于 LEACH 算法,但它需要网
络的全局信息,可扩展性差。PEGASIS 算法按照距离最短的原
则,通过贪婪算法将所有的节点组织成链状,并随机选择一个
节点作为簇首,链两端数据沿链传输到簇首,并在传输过程中
进行融合,最后由簇首将数据发送给基站。由于每个节点都以
最小功率发送数据,它比 LEACH 和 LEACH_C 更能延长网络

的生存期,但 PEGASIS 需要全局的地理位置信息,并且数据沿
一条链传输,具有很大的时延。本文提出的算法根据节点的剩
余能量选取簇首,节点的剩余能量越高,当选为簇首的几率越
大,很好地平衡了节点的能量,延长了网络的生存时间。

1 系统模型

1.1 网络模型

N 个传感器节点随机均匀地分布在一个正方形区域内,并
且具有如下性质: a) 所有传感器节点部署后不再移动,基站惟
一旦位置固定; b) 所有节点具有相似的通信和处理能力,没有
安装 GPS,无法知道其具体位置; c) 所有节点都具备数据融合
功能; d) 节点的能量不能补充,节点可以根据它与接收者的距
离远近,自由调整发射功率以节省能量。

1.2 无线通信模型

本文采用与文献[2] 相同的无线通信模型。发送方传输 k
bit 的数据到距离为 d 的接收方所消耗的能量为

$$E_t(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_s d^2 & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp} d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: E_{elec} 表示发射电路消耗的能量; ϵ_s 和 ϵ_{mp} 为功率放大器所
消耗的能量; d_0 为常量。

节点接收 k bit 的数据所消耗的能量为

$$E_r(k) = kE_{elec} \quad (2)$$

将 m 个长度为 k 的数据包融合所消耗的能量为

收稿日期: 2007-11-05; 修回日期: 2008-01-04 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672137); 教育部博士点基金资助项目
(20060497015)

作者简介: 龚本灿(1970-), 男, 湖北监利人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络与路由算法(gonbc@ sina. com); 李腊元
(1946-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为高性能网络技术及通信协议; 蒋廷耀(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为计算机网络及信息安全;
汪祥莉(1978-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络与路由算法。

$$E_f(m, k) = mkE_{\text{fusion}} \quad (3)$$

其中: E_{fusion} 表示融合 1 bit 的数据所消耗的能量。

2 EBCA 及分析

与 LEACH 算法一致, EBCA 同样按轮运行。每轮分为簇生成(T_{cluster})和数据传输(T_{data})两个阶段, 为了保证网络的有效工作时间, 算法设置 $T_{\text{data}} \gg T_{\text{cluster}}$, 并且每轮运行 $T_{\text{cluster}} + T_{\text{data}}$ 后自动触发, 重新选择簇首。EBCA 以节点的剩余能量作为选择簇首的依据, 只有剩余能量不小于网络平均能量的节点才能竞争簇首。一个节点成为簇首的门限值按式(4) 计算:

$$T_{\text{head}} = P_{\text{init}} \times E_{\text{residual}} / \bar{E} \quad (4)$$

其中: P_{init} 为剩余能量高于网络平均能量的节点成为簇首的概率; E_{residual} 为当前节点的剩余能量; $\bar{E}$ 为网络平均能量。节点部署完毕后, 由基站发送广播信号, 启动所有传感器节点运行, 广播包中包含 P_{init} 和 $\bar{E}$ 的初始值, P_{init} 固定不变, 随着网络的运行, $\bar{E}$ 将逐渐变小, 如何动态计算 $\bar{E}$ 一种方法是: 所有节点在全网范围内广播其剩余能量, 每个节点收到其他节点的能量值后计算网络的平均能量。这种方法将带来很大的控制开销和网络延迟。由于网络分布均匀, 可用簇内节点的平均能量来估算。EBCA 簇生成算法的伪代码如下:

```
1 BS Broadcasts BS_msg(  $P_{\text{init}}$ ,  $\bar{E}$  )
2 If round = 1
3   Receive( BS_msg from BS for each node)
4 End if
5  $T_{\text{head}} = P_{\text{init}} \times E_{\text{residual}} / \bar{E}$ 
6 If  $E_{\text{residual}} \geq \bar{E}$  and random( 0, 1) <  $T_{\text{head}}$ 
7   Node. state = head
8   Broadcast( Head_Msg( ID) )
9 End if
10 On receiving Head_Msg from cluster head j for node i
11 If  $d(i, j) < \text{min\_distance}$  and Node. state = common
12    $\text{min\_distance} = d(i, j)$ 
13   Node. head = j
14 End if
15 On expiring for the timer1 of cluster head election
16 If Node. state = common
17   Send( Join_msg( ID, Node. head) )
18 Else
19   Receive( Join_msg from common nodes)
20 End if
21 On expiring for the timer2 of cluster member join
22 Broadcast( TDMA_msg to every cluster member)
```

以上代码中, 1 ~4 表示节点接收基站的初始化广播消息; 5 ~9 表示节点计算成为簇首的门限值, 如果节点的剩余能量大于或等于平均能量且随机数小于门限值, 则该节点当选为簇首, 并用设定的功率向全网广播其成为簇首的消息; 10 ~14 表示当一个普通节点收到簇首公告消息后, 根据接收信号的强度计算它与簇首的距离, 并保留与之最近的簇首号; 15 ~20 表示簇首选举的时间到期后, 每个普通节点向簇首发送加入簇的消息, 每个簇首则接收簇成员的加入; 21、22 表示簇成员加入后, 簇首给每个簇成员分配 TDMA 时隙。

簇生成结束后, 节点进入数据采集阶段, 每个成员节点在给定的时隙内采集数据, 并根据自己与簇首的距离调整发射功率, 将数据发送给簇首, 其他时间则关闭收发电路, 以节省能量; 簇首将数据融合后直接发送给基站。为了降低簇生成开销, 每轮需连续采集若干帧后(实验设为 20) 才转入下一轮。在一轮结束前, 每个簇成员采用捎带方式向簇首报告其剩余能量, 簇首计算簇内节点的平均剩余能量 $\bar{E}$ 并将其值广播给每

个成员节点。在 EBCA 中, 基站发送了一个 BS_msg, 每个簇首发送了一个 Head_Msg、一个 TDMA 时隙分配消息和一个平均剩余能量消息, 每个簇成员发送了一个 Join_msg, 因此, 其控制开销为 $O(N)$ 。其中: N 为网络节点数。

3 仿真实验

为了验证本文算法的有效性, 采用 MATLAB 编程, 将 EBCA 与 LEACH 两种算法进行了对比实验。实验中各项参数设置如表 1 所示。

表 1 实验参数列表			
参数	值	参数	值
网络范围	100 ×100	E_{fusion}	5 nJ/bit/signal
基站位置	(50, 175)	帧长	4 000 bit
节点数 N	100	广播包大小	200 bit
d_0	87 m	每轮采集的帧数	20 frames/round
E_{elec}	50 nJ/bit	同构网初始能量	2 J
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²	异构网初始能量	1 ~3 J
ϵ_{mp}	0.001 3 pJ/bit/m ⁴		

实验网络分同构网和异构网两类。同构网中所有节点的初始能量为 2 J, 异构网中所有节点的初始能量随机分布在 1 ~3 J。实验结果如图 1、2 所示。

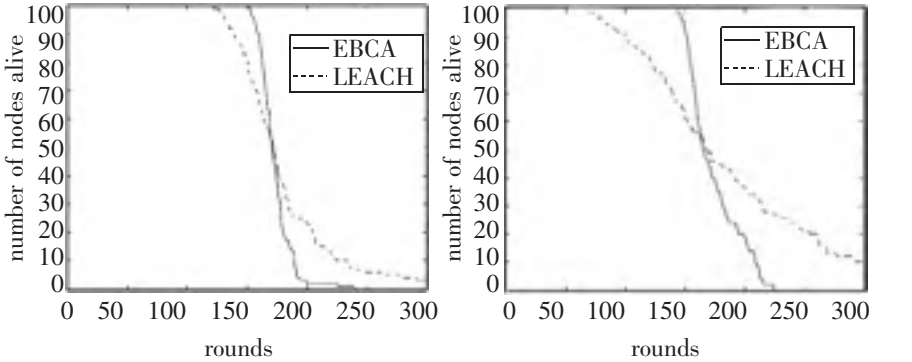


图 1 同构网中每轮存活节点的数量

图 2 异构网中每轮存活节点的数量

图 1、2 表明: 无论同构网还是异构网, EBCA 中第一个节点的死亡时间都晚于 LEACH, 并且所有节点的死亡时间更加集中, 说明 EBCA 的性能更优, 能量消耗更加均衡。由于传感器网络中节点的死亡会带来传感空洞, 造成网络质量的下降, 通常用第一个节点的死亡时间来判断分簇算法的性能。两种算法中第一个节点的死亡时间如表 2 所示。

表 2 第一个节点的死亡时间			
网络类型	LEACH /轮	EBCA /轮	性能提高率 /%
同构网	121	152	25. 6
异构网	68	142	108. 8

从表 2 可以看出: 对异构网而言, EBCA 的性能提高更多。为了进一步验证 EBCA 能量消耗的均衡性, 本文对节点剩余能量的差异程度进行了对比实验, 实验结果如图 3、4 所示。

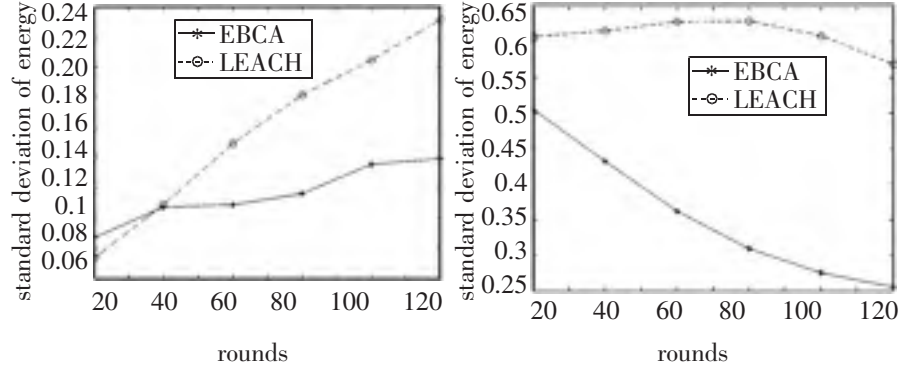


图 3 同构网中节点剩余能量的标准差

图 4 异构网中节点剩余能量的标准差

从图 3、4 可以看出, 对同构网, EBCA 中所有节点的能量标准差相对稳定; 而 LEACH 中能量标准差随着网络运行时间的延长而线性增长。这是因为 LEACH 算法中, 虽然所有节点轮流作为簇首, 但由于簇首按概率产生, 每轮 (下转第 3429 页)

```
int main( int argc, char* * argv)
{
    sqlite3* db;
    int rc;
    char* err_msg;
    ...
    rc = sqlite3_open( argv[ 1] , &db) ;
    if( rc! = SQLITE_OK) {
        fprintf( stderr, " Can't open database: %s\n" ,
            sqlite3_errmsg( db) );
        exit( EXIT_FAILURE) ;}
    ...
    sqlite3_close ( db);
    exit ( EXIT_SUCCESS);}
```

4 系统应用实例

在上述理论的基础上,笔者开发了一套机电设备远程监控系统,对广东某机电设备公司一条生产线上的设备进行远程动态监控。这些设备被抽象成 device 对象和与光电开关、传感器等输入/输出硬件数量相当的 analog input 对象、analog output 对象、binary input 对象、binary output 对象。实现的服务有:对象访问服务中的 ReadProperty(读属性)、ReadPropertyMultiple(读多个属性)、WriteProperty(写属性)、WritePropertyMultiple(写多个属性)服务;事件与报警服务中的 ConfirmedCOVNotification(证实 COV 通告)和 ConfirmedEventNotification(证实事件通告)服务;远程设备管理服务中的 Who-has 和 I-have 服务以及 Who-is 和 I-am 服务。

MS/TP 现场总线网络采用全主节点配置方案,嵌入式 Web 服务器本身也是一个主节点,网络中的每一个节点都可以主动发送数据。主节点地址编号为 1 ~10,采用总线型拓扑结构,在逻辑上形成令牌环网络。设置 RS-485 总线的波特率为 19 200,八位数据位,一个起始位和停止位,无奇偶校验位。

远程用户通过浏览器登入系统的时候需要通过身份认证,首次登录系统的用户需要先注册,不同用户的权限不同。授权用户在远程通过 Web 浏览器登录本系统,切换到设备监控页面就可以看到生产线上所有设备的运行状况,用户所有的操作都将以日志的方式保存在数据库 LOG 表中,方便日后分析和故障诊断使用。系统以一定的频率读取设备对象的当前值,动态更新用户浏览器页面上的值。设备监控页面如图 8 所示。



图 8 设备远程监控页面

5 结束语

基于 BACnet 对象的机电设备远程监控系统是笔者将 BACnet 标准运用在机电装备行业的一次创新。它最大限度地屏蔽了设备的具体实现细节,具有成本低、实现简单、通用性强、协议开放和易于扩展等优点。用户只需在此基础上作一些小改动,就可以将它运用于其他领域设备监控。因此,它有着极为广阔的应用前景,这不但为不同设备在同一个平台下实现远程监控提供了可能,而且对促进 BACnet 标准在我国的推广和应用有着深远的影响。

参考文献:

[1] NSI/ASHRAE. Standard 135—2001, BACnet: a data communication protocol for building automation and control networks[S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers Inc, 2001.

[2] ISO. 16484-5, Building automation and control systems -part 5 data communication protocol[S]. 2003.

[3] 董春桥. 智能楼宇 BACnet 原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 56.

[4] 徐英卓. 基于 B/S 的远程钻井事故诊断专家系统研究[J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(6) : 107-109.

[5] 杨素英, 李丹, 仲崇权, 等. 基于 Web server 下的嵌入式系统应用研究[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2002(5) : 2-7.

[6] 王辛辛, 陈云, 闫如忠, 等. 基于 Web 的机电设备远程监控系统的实现[J]. 计算机工程, 2005, 31(2) : 231-234.

[7] FONG A C M, HUI S C. An intelligent online machine fault diagnosis system[J]. Computing & Control Engineering Journal, 2001, 12(5) : 217-223.

[8] 刘泉, 任平. 基于 uC/OS- 的 MS/TP 协议模块实现[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(11) : 51-53.

[9] LABROSSE J J. 嵌入式实时操作系统 uC/OS- [M]. 邵贝贝, 译. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 89.

[10] 王田苗. 嵌入式系统设计与实例开发—基于 ARM 微处理器与 uC/OS- 实时操作系统[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 10.

(上接第 3425 页)产生的簇首数量并不稳定。实验发现最多时一轮产生的簇首数量高达 10 个,而最少时只有 1 个。当某一轮簇首较少时,簇内成员数必然增加,从而使簇首消耗更多的能量。对异构网,由于网络节点的初始能量不同,EBCA 中能量标准差开始时较大,但随着网络的运行,其值逐渐减小,而 LEACH 的能量标准差始终较大。这是因为 EBCA 优先选取剩余能量较多的节点作为簇首,而 LEACH 中所有节点轮流作为簇首。以上实验结果说明: EBCA 能很好地均衡节点的能量消耗,从而延长网络寿命。

4 结束语

无线传感器网络是一个能量受限系统,能量问题是算法设计时需要考虑的首要因素。本文提出了一种新颖的分布式无线传感器网络分簇算法,算法中节点根据其剩余能量的大小来竞争簇首,普通节点则加入与之最近的簇,并在簇内实行数据融合。为了节省开销,簇生成的时间要远小于数据采集的时间。实验表明: EBCA 算法中节点的能量消耗更加均衡,网络寿命更长,特别是在能量异构的环境下,网络生存时间是

LEACH 算法的两倍以上。

参考文献:

[1] EINZELMAN 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. Maui: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.

[2] EINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISAN H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Networking, 2002, 1(4) : 660-670.

[3] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems[C] //Proc of the IEEE Aerospace Conf. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002: 1125-1130.

[4] 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.

[5] 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.