

# 基于分层模型的无线传感器网络分簇路由算法

李 雷,付东阳

(南京邮电大学 自动化学院,江苏 南京 210003)

**摘 要:**无线传感器网络(WSN)与传统无线网络相比,网络节点在电源能量、计算与处理能力、通信带宽等方面都十分有限。延长网络的生命时间成为无线传感器网络的一个关键问题。文中提出了一种新的高效节能的分簇路由协议 ULCR (Unequal Level-based Clustering Routing Algorithm)。该算法根据节点的剩余能量及节点所在层次来竞争簇头,同时使用候选节点的竞争范围来构造大小不均等的簇。簇间采用多跳方式转发数据,可以有效避免簇头能量消耗不均衡的问题。仿真结果显示,与 LEACH 和 EEUC 两种协议相比,ULCR 协议可有效延长网络生命时间。

**关键词:**无线传感器网络;分簇;多跳通信;网络生命时间

**中图分类号:**TP301.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2010)01-0135-04

## Clustering Protocol Algorithm of Wireless Sensor Networks Based on Level Model

LI Lei, FU Dong-yang

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Wireless sensor networks have been widely used in a variety of applications. However, sensor nodes have many limited capacities in terms of battery power, computation, data process and communication bandwidth, compared with the traditional wireless networks. In this network, it is important to prolong the network lifetime as soon as possible. Propose an energy-efficient cluster-based routing protocol ULCR (Unequal Level-based Clustering Routing Algorithm). It consists of a cluster head selection algorithm based on its level and energy, and uses competition range to construct clusters of unequal sizes. Consider multi hop data transmission for inter-cluster communication, which can avoid imbalanced energy-dissipated among cluster heads. The simulation results demonstrate that proposed clustering approach is more effective in prolonging the network lifetime compared with EEUC, LEACH.

**Key words:** wireless sensor networks; clustering; multi-hop communication; network lifetime

### 0 引 言

WSN<sup>[1]</sup>是一种新型的无基础设施的无线网络,能够协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息,并对其进行处理,通过无线通信方式把信息传送到信息汇聚点。由于 WSN 不需要固定的网络支持,具有扩展性好、抗毁性强等特点,可广泛用于军事侦察、环境监测、医疗监护、农业养殖等领域<sup>[2]</sup>。分簇算法是目前最有效的 WSN 路由协议。通过约定的协议,在整个网络覆盖范围内选举出一定数量的节点作为簇头,从而将网络划分为簇,簇头管理簇内的普通节

点,簇头通过信息的交互完成全网拓扑的构建。

目前已出现大量的分簇路由协议<sup>[3]</sup>,从不同的角度来延长传感器网络的寿命。而 LEACH(low-energy adaptive clustering hierarchy)协议<sup>[4]</sup>是最早提出的分簇路由协议。它的基本思想是:通过等概率的随机循环选择簇头,将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点,从而达到降低网络能量耗费、延长网络生命时间的目的。

LEACH协议只考虑了单跳模型,不适合大型 WSN 网络。文献[5]提出 M-LEACH(multi-hop variant of LEACH,多跳 LEACH 算法)。簇内的节点不再是以单跳的方式传输数据到簇头,而是通过簇内其他节点转发。文献[6]提出 EEUC(energy-efficient unequal clustering 能量高效的非均等分簇)算法。它利用非均匀的竞争半径,使得靠近汇聚点的簇的成员数目相对较小,从而簇头能够节约能量以供数据转发使用,达到均衡簇头能量消耗的目的。此外,在簇头选择

收稿日期:2009-04-23;修回日期:2009-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(10371106,10471114);江苏省高校自然科学基金项目(04KJB110097,08KJB520023);南京邮电大学攀登计划项目(NY207064)

作者简介:李 雷(1958-),男,安徽砀山人,博士,教授,研究方向为智能信号处理、非线性分析与计算智能。

其他节点时,不仅考虑候选节点相对汇聚点的位置,还应考虑候选节点的剩余能量。不同于 LEACH, EEUC 簇头通过局部竞争的方式产生,同时簇头间进行多跳数据转发。

文中提出了一种新的不均匀的层次型分簇路由算法,通过降低控制开销,延长网络的生命时间。

## 1 算法描述

### 1.1 系统能量模型

文中采用如下的传感器模型: $N$  个传感器节点随机均匀分布在一个正方形区域内,可以做以下假设:

(1) 在区域外很远的一个固定位置有唯一的基站(Base Station, BS);

(2) 所有节点拥有各自的 ID 号,且地位平等,同时有足够的计算能力来支持信号处理和计算路由;

(3) 节点可根据接收信号的强度来判断基站相对自己的远近;

(4) 无线发射功率可控,即节点可以根据距离来调整发射功率的大小。

采用一个简化的硬件能量消耗模型<sup>[7]</sup>。传感器节点发送和接收  $l$  bit 信息,距离为  $d$  时,所消耗的能量分别为:

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_T(l) = E_{R-elec}(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

在式(1)中,如果接收、发送器之间的距离小于临界值  $d_0$ ,则使用自由空间模型;如果大于临界值  $d_0$ ,则使用多路径模型。

在式(2)中,  $E_{elec}$  是发射电路和接收电路所消耗的能量,它取决于电路的数字编码、调制和滤波等因素,在这个模型中发射与接收电路两者相同。此外,每个簇头负责接收成员节点的信息,并对其进行数据融合处理后发送到基站。

### 1.2 ULCR 算法详述

算法的核心思想是根据节点的剩余能量和所在的层次来选举出最佳的簇头。假设把网络划分为  $n$  层,基站位于区域的中心。网络的最大区域半径为  $R_0$ 。通过公式(3) 基站可以计算出每层的上层边界  $UB$  和下层边界  $LB$ 。基站可以向网络广播一个“hello” 报文,此报文即包含网络中各层的上下边界。用  $P_i^k$  来表示位于第  $k$  层的第  $i$  个节点。

$$UB_i = \sum_{j=0}^i U_j \quad LB_i = \sum_{k=0}^{i-1} U_k$$

$$U_i = \frac{i}{n} R_0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中  $UB_i$  是第  $i$  层的上层边界长度,  $LB_i$  是第  $i$  层的下层边界长度。 $U_i$  是第  $i$  层的上下边界之间长度。定义基站到网络边界的距离为  $U_0$ 。

每个节点接收到“hello” 报文后,根据接收信号的强度计算出大约与基站相距多远,如果它的距离位于  $LB_i$  与  $UB_i$  之间,则此节点位于第  $i$  层。

#### 1.2.1 簇头选举及簇形成算法

假设簇头节点可以根据非簇头节点的剩余能量计算出簇内的平均能量及最大剩余能量,并将此信息嵌入到转发报文里面,最终发往基站。由此基站可以计算出网络每一层的平均能量及最大剩余能量。在每一轮的簇的建立阶段,基站将包含各层能量值的信息包发送给网络各个节点。如果节点的剩余能量大于网络的平均能量,则此节点当选为此轮的候选簇头节点。然后这些候选节点利用公式(4) 设置一个时间定时发送 ADV 广播报文。假设这些报文的广播半径是  $R_0$ 。

$$P_{i-T_{wait}}^k = T \times t_0 \quad (4)$$

$t_0$  是节点等待开始广播报文的最短时间。

$T$  的定义如下:

$$T = \omega_1[f(E)] + \omega_2[g(k)] + \omega_3[h(d)] \quad (5)$$

其中  $f$  是一个能量函数:

$$f(E) = \frac{\max E_k - P_i^k \cdot E}{\max E_k} \quad (6)$$

$\max E_k$  是第  $k$  层的最大能量,  $P_i^k \cdot E$  是位于第  $k$  层的第  $i$  个节点的剩余能量。

$g$  是一个层次函数:

$$g(k) = \frac{k_{\max} - k}{k_{\max}} \quad (7)$$

$k_{\max}$  是网络的最大层数。

$h$  函数定义如下:

$$h(d) = \frac{d_{\max} - d}{d_{\max}} \quad (8)$$

$$d_{\max} = \frac{UB_k + LB_k}{2}$$

$d_{\max}$  是节点所在层中间的边界长度,  $d$  是节点到此中间边界的距离,  $UB_k$  是第  $k$  层的上层边界长度,  $LB_k$  是第  $k$  层的下层边界长度。

通过式(6) 和式(8) 即可确定同一层候选节点发送报文的顺序。式(7) 确定不同层次发送报文的顺序。目标是只有处于同一层的候选节点发送完报文后,下一层的候选节点才允许发送。

经过  $P_{i-T_{wait}}^k$  个单位时间后,候选节点通过式(9) 计算出自己的竞争半径。假设节点  $P_i$  最后当选为簇头,则在它的竞争范围里不能再有另外一个簇头。即

$P_i$  通过 ADV 广播报文宣告自己当选为簇头,位于同一层的其它候选节点接收到此报文后,如果它在节点  $P_i$  的竞争半径区域内,则它将立即放弃竞争机会,反之将继续参与竞争。

此广播报文包含节点标识符  $P_{ID}$ , 候选节点的竞争半径  $P_R$ , 候选节点到基站的距离  $P_{dist\_to\_BS}$ 。

$$P_{i,R}^k = \frac{UB_k - LB_k}{2} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

非簇头节点根据接收到的 ADV 广播报文的信号强度,选择距自己最近的簇头,然后加入这个簇。最终网络中形成的大小不均等的簇,其中基站坐落于区域的外围,而靠近基站的簇的规模相对较小,这样簇头可以为簇间多跳转发节省能量,即解决传感器网络中存在的热点问题。

簇内通信采用的是和 LEACH 协议一样的算法,文中不再详述。

1.2.2 簇间的多跳路由通信

在分簇路由协议中,簇头主要负责数据融合和将融合后的数据转发到基站。文中对于簇头间的通信,采用多跳数据传输。位于第  $k$  层的簇头从上层( $k-i, i=1, 2, \dots, n$ ) 中选出一个簇头作为自己的下一跳。这个被选为下一跳的簇头节点称为中继节点。假设选择  $P_j$  作为  $P_i$  的中继节点,则必须满足以下三个条件:

- (1)  $P_j$  到基站的距离小于  $P_i$  到基站的距离;
- (2)  $P_j$  到  $P_i$  距离小于到  $P_i$  基站的距离;
- (3)  $P_j$  与  $P_i$  相比位于更低的层次。

如果簇头节点  $P_i$  不能找到任何一个簇头节点作为它的下一跳,则它直接将数据发送到基站。

2 仿真结果分析

为了验证算法的有效性,利用 NS2 网络仿真工具<sup>[8]</sup>对算法进行仿真,并结合 MATLAB 建立数学模型。仿真参数见表 1。首先由图 1 知网络最大区域半径  $R_0$  为 100 时,网络的生命时间最长。把此时的  $R_0$  作为一个固定的参数值进行下面的仿真。

表 1 NS2 仿真环境主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
网络区域	200m×200m	$d_0$	87m
基站位置	(150,285)	数据包尺寸	4000bits
$N$	200	层数 $n$	3
初始能量	2J	$\omega_1$	0.2
$E_{elec}$	50nJ/bit	$\omega_2$	0.6
$\epsilon_{fs}$	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>	$\omega_3$	0.2
$\epsilon_{mp}$	0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>	$t_0$	0.008s

(1)网络中的簇头分布。

由 ULCR 协议生成的簇分布合理,簇头数量少,簇与簇之间的覆盖区域交叠少。实验中用簇头之间的最小距离来做为簇头分布均衡的衡量标准,同时对 LEACH,EEUC 以及文中提出的 ULCR 算法进行仿真比较。

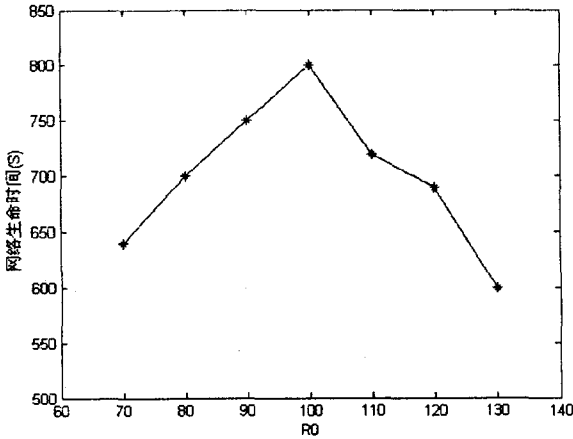


图 1 不同  $R_0$  下的网络生命时间

图 2 显示了在 ULCR 和 EEUC 协议中,簇头分布均匀,性能均优于 LEACH 协议。这是由于在 LEACH 协议中,簇头的选择算法是随机选择,没有根据节点的剩余能量以及位置等因素进行优化选择,所以极易造成簇头分布不均匀。

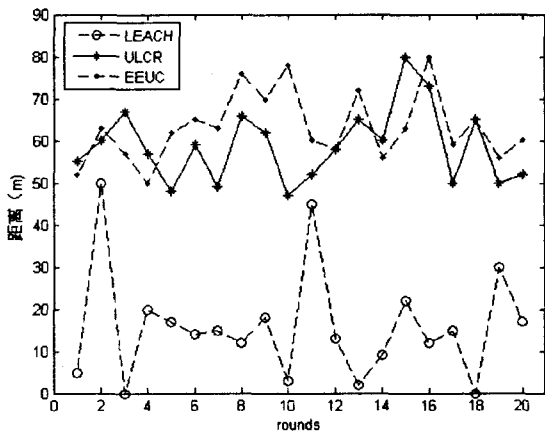


图 2 簇头间的距离

(2)簇头的能量消耗。

由于簇头消耗的能量占网络消耗的最主要部分,因此需比较三种协议所生成的簇头在一轮中所消耗的能量之和。实验中随机选取 20 轮。

图 3 显示了在 ULCR, LEACH, EEUC 三个协议中簇头能量消耗。ULCR 和 EEUC 远低于 LEACH。因为在 LEACH 协议中,簇头采用单跳通信将数据发往基站,同时由于簇头数目不稳定,导致簇头能耗消耗增大。而 ULCR 和 EEUC 均采用多跳通信,节省了很多能量。

(3)簇建立阶段的能量消耗。

仅考虑簇建立阶段所消耗的能量,而不考虑簇稳定阶段消耗的能量。

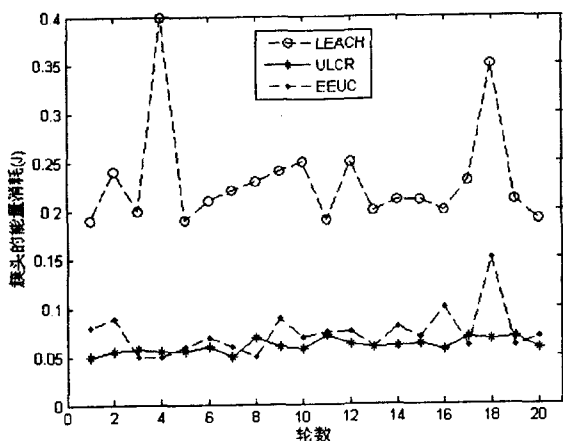


图3 簇头能量消耗

图4显示EEUC所消耗的能量大于LEACH与ULCR。在ULCR中为候选节点设置一个等待时间,使它们按照次序发送广播报文。通过这个广播报文,同时完成簇的建立以及簇间通信。但是在EEUC中,这两部的完成需要很多额外的控制报文,因此需要消耗更多的能量。LEACH协议的这个过程花费的开销也很低。

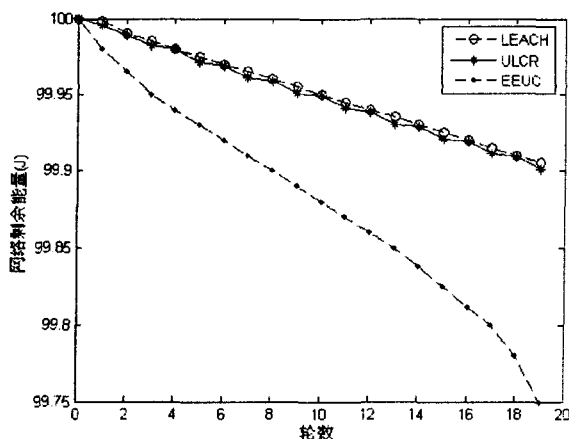


图4 网络能量消耗

#### (4) 网络生命时间。

最后,通过第一个节点和最后一个节点的死亡时间间隔来评价三个协议的网络生命时间。

图5显示相对于LEACH和EEUC协议,ULCR通过较低的控制开销和簇间多跳通信,有效地延长了网络生命时间。

### 3 结束语

文中提出了一种非均匀的层次型分簇路由协议

ULCR,协议中候选节点根据各自的等待时间按照一定的次序发送广播报文来竞争簇头,簇头选出后普通节点根据最近的簇头加入簇,为了进一步减少能量消耗和维持节点能量均衡,远离基站的簇头通过多跳的方式经过其他簇头将收集的数据传送到基站。实验证明,相对于LEACH和EEUC两种协议,ULCR协议可有效延长节点和网络的生命时间,维持节点能量的均衡性。

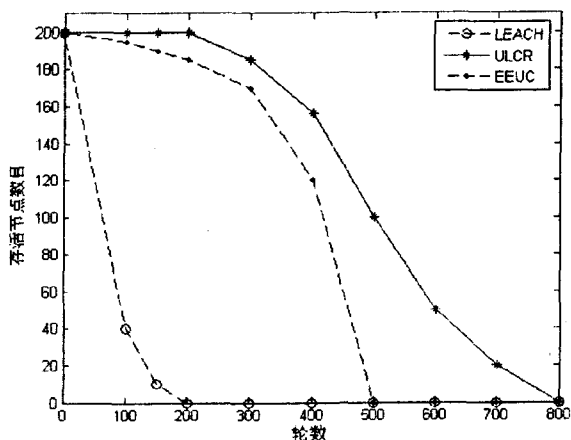


图5 网络存活节点数

#### 参考文献:

- [1] 储昭助,胡艳军.无线传感器网络技术[J].计算机技术与发展,2006,16(4):64-66.
- [2] Sun L M, Li J Z, Chen Y, et al. Wireless Sensor Networks [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [3] 杨菊英,吕光宏.无线传感器网络分层路由协议研究[J].计算机技术与发展,2008,18(6):115-118.
- [4] Fan Yiming, Yu Jianjun. The Communication Protocol for Wireless Sensor Network about LEACH[C]//Proceedings of 2007 International Conference on Computation Intelligence and Security Workshops. Mexico: [s. n.], 2007: 550-553.
- [5] Bandyopadhyay S, Coyle J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks [C]//Proceedings of INFOCOM 2003. San Francisco: [s. n.], 2003: 1713-1723.
- [6] 李成法,陈贵海.一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J].计算机学报,2007,30(1):88-91.
- [7] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks [C]//Proceedings of the 33rd International Conference on System Sciences (HICSS'00). Hawaii: [s. n.], 2000.
- [8] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.