

# An Optimal Mechanism for the Cluster-Heads Selection of LEACH Protocol in Wireless Sensor Networks\*

Xuhui Chen<sup>1,2</sup>, Zhiming Yang<sup>2</sup>, Peiqiang Yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Key Lab of the Internet of Things Application Technology, Xiamen University of Technology, Xiamen

<sup>2</sup>College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou

Email: Xhchen84@gmail.com

Received: May 2<sup>nd</sup>, 2012; revised: Jun. 16<sup>th</sup>, 2012; accepted: Jun. 27<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** The energy issues of low energy adaptive clustering hierarchical protocol (LEACH) was analyzed for wireless sensor networks (WSN), a way for the cluster-heads selection was proposed, and using the residual energy of sensors and network weighting coefficients to adjust the threshold. This scheme can make the high energy sensors be elected the cluster-heads, and the whole network energy can be distributed to each sensor node to balance the network load effectively. In this basis, an optimal cluster-heads selection mechanism can be further shown. According to simulation results, the algorithm performance is improved and further extends the network lifetime.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks; LEACH Protocol; Optimal Cluster-Heads; Network Lifetime

## 无线传感器网络 LEACH 协议簇首优化选择机制\*

陈旭辉<sup>1,2</sup>, 杨志明<sup>2</sup>, 余培强<sup>2</sup>

<sup>1</sup>厦门理工学院福建省高校物联网应用技术重点实验室, 厦门

<sup>2</sup>兰州理工大学计算机与通信学院, 兰州

Email: Xhchen84@gmail.com

收稿日期: 2012 年 5 月 2 日; 修回日期: 2012 年 6 月 16 日; 录用日期: 2012 年 6 月 27 日

**摘要:** 对无线传感器网络分簇路由 LEACH 算法能耗问题进行了分析, 提出了簇首选择方法, 并通过传感器节点剩余能量和网络加权系数重新设定阈值, 使剩余能量较大的传感器节点被选作簇首节点, 将网络内的能量平均分配到每个传感器节点上, 有效地平衡网络负载, 在此基础上, 给出了优化簇首选择方法, 仿真结果表明算法的性能得到了较好的改善, 延长了网络的生命周期。

**关键词:** 无线传感器网络; LEACH 协议; 优化簇首; 网络生命周期

### 1. 引言

随着传感器技术、嵌入式技术、自动控制以及低功耗无线技术的发展, 生产具备感应、无线通信以及信息处理能力的微型无线传感器已成为可能。这些廉价的、低功耗的传感器节点共同组织成无线传感器网络(WSN)。通过节点间的相互协作、将其监测和感应

的多种环境信息(如温度、湿度等)传送到基站进行处理。无线传感器网络具有广泛的应用场景。可以应用在国防军事、救灾、环境监测、医疗卫生等各个领域。由于其巨大的应用价值, WSN 已经引起了各国军事部门、工业界和学术机构的极大关注, 并纷纷展开该领域的研究工作。目前由微型传感器节点组成的无线传感器网络已经发展成一个重要的计算机平台<sup>[1,2]</sup>。

在无线传感器网络体系结构中, 网络层的路由由技术对 WSN 的性能好坏有着重要影响。最主要的原因

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61065007); 人社部留学人员科技项目(0814GS005); 甘肃省高校科研业务费项目; 厦门理工学院科研资助项目。

就是在监测区域内工作的传感器节点都是由电池供电,当传感器网络工作在边远地区或者危险区域的时候,工作人员无法对传感器节点进行电池的更换,除此之外,由于一个传感器网络有成千上万个节点,所以更换传感器节点的电源将耗费巨大的资源。因此,节约能量是无线传感器网络面临的一大挑战。

目前,国内外许多学者提出了各种各样的路由协议,从总体上来看,可以分为两种:一是所有网络节点的地位是平等的,不存在等级和层次差异,它们通过相互之间的局部操作和信息反馈来生成路由,这样的路由技术被称作平面路由协议;二是分簇路由协议,在这种技术中,网络通常被划分为簇,每个簇由一个簇首和多个簇内成员组成,低一级网络的簇首是高一级网络中的簇内成员,由最高层的簇首与基站通信。通过实验仿真可知,与一般的平面路由协议相比,分簇路由协议可以将网络生命周期延长约 15%<sup>[3]</sup>。

文献[4]通过修改阈值来有效地控制节点中的能量,使网络中的能量平均分配到每个传感器节点,进而有效地延长网络生命周期;文献[5]使用了定时器来控制网络内节点能否被选举为簇首节点。通过实验仿真,这两种方法都能节约网络内传感器节点的能量消耗,有效地延长网络的生命周期。但是,由于忽略了整个网络簇首节点的数目,因此在一定程度上限制了网络内能量的有效分配,本文提出了一种优化簇首节点数目算法,通过仿真可知,最优簇首数目的选取能够节约网络内传感器节点的能量消耗,进一步延长网络的生命周期。

## 2. LEACH 协议

### 2.1. 算法描述

LEACH 是 MIT 的 Chandrakasan 等人为无线传感器网络设计的低功耗自适应分层路由算法。它的基本思想是以循环方式、随机选择簇首节点,将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中,从而达到降低网络能量消耗、提高网络整体生存时间的目的<sup>[3]</sup>。

LEACH 在运行过程中不断地循环执行簇的重构过程。每个簇重构过程可以用“回合(round)”的概念来描述。而每个回合又可分为簇的建立阶段(包括簇首节点的选择阶段、簇首节点的广播阶段、簇的建立阶段和调度机制的生成)和传输数据的稳定阶段。

为了节省资源开销,稳定阶段的持续时间要大于建立阶段的持续时间<sup>[2,3]</sup>。

簇首节点的选择依据网络中所需要的簇首节点总数和迄今为止每个节点已称为簇首的次数来决定。具体的选择方式是:每个传感器节点随机选择 0~1 之间的一个值,如果选择的值小于某一个阈值  $T(n)$ ,那么这个节点成为簇首节点。 $T(n)$ 值计算方法如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{k}{N - k \lfloor r \bmod (N/k) \rfloor} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.1)$$

其中,  $N$  为网络中传感器节点的总数;  $k$  为一个回合网络中的簇首节点数;  $r$  为已完成的回合数。

选定簇首节点后,通过广播告知整个网络。网络中的其他节点根据接收信息的信号强度选定从属的簇,并通知相应的簇首节点,完成簇的建立。最后,簇首节点采用 TDMA 方法为簇中每个节点分配向其传送数据的时间片。

在稳定阶段中,传感器节点将采集的数据传送到簇首节点。簇首节点对簇中所有节点所采集的数据进行数据融合后再传送给汇聚节点,这是一种减小通信业务量的合理工作模式。稳定阶段持续一段时间后,网络重新进入簇的建立阶段,进行下一回合的簇重构,不断循环。每个簇采用不同的 CDMA 代码进行通信来减少其他簇内节点的干扰。

### 2.2. 能量计算模型

为了能够进一步分析节点在动态网络中能量消耗,本文采用一阶无线电模型<sup>[2]</sup>(first order radio model)作为能量计算模型。LEACH 协议使用这个模式是基于以下假设:

- 1) 网络里所有节点完全相同并且能量非常有限;
- 2) 无线电信号在各个方向上能量消耗相同;
- 3) 汇聚节点(基站)是固定的,并且离整个无线传感器网络较远。

传感器节点发送  $\omega$ \*bit 数据所消耗的能量为:

$$E_{\text{send}} = \omega * E_{\text{elec}} + \omega * \epsilon_{\text{amp}} * d^{\beta} \quad (1.2)$$

传感器节点接收  $\omega$ \*bit 数据所消耗的能量为:

$$E_{\text{receive}} = \omega * E_{\text{elec}} \quad (1.3)$$

其中  $\epsilon_{\text{amp}}$  是信号放大器的放大倍数。  $E_{\text{elec}}$  是发送电路

和接收电路消耗的能量。而  $\beta$  是由无线电通道决定的常量。 $d$  是信号传输距离。其中,  $k * E_{\text{elec}} \ll k * \varepsilon_{\text{amp}} * d^\beta$ , 这意味着, 信号传输距离越短, 能量消耗越少。在发送距离较近时, 适用自由空间信道模型, 取  $\beta = 2$ ; 而当发送距离较远时, 适用多径衰落信道模型, 取  $\beta = 4$ , 也称之为双路径模型。

### 2.3. 能量计算模型

由 1.1 节讨论可知, 在无线传感器网络中使用 LEACH 路由协议时, 每个传感器节点都有相同的概率被选作簇首节点, 并且能将网络中的能量平均分配到每个传感器节点, 有效地节约了网络中的能量, 但是仍存在下列情况。

第一、由于簇首节点的随机选择性, 因此当某一传感器节点能量较低并且被选做簇首节点时, 那么当节点工作一段时间后, 该节点就会因能量的耗尽而死亡, 随之由该节点监测的区域就会与用户终端失去联系。

第二、当传感器节点分布在监测区域的边缘且被选为簇首节点时, 那么该簇首节点不仅与簇内节点传送数据需要消耗较大的能量, 而且必须遍历较长的路径与汇聚节点进行数据信息的交换。

## 3. LEACH 协议簇首优化选取准则机制

### 3.1. LEACH 协议最优簇首数目选取方法

最优簇首数目的选取主要是基于以下考虑<sup>[6]</sup>, 一是使每轮中的能量消耗达到最少; 二是使网络中的能量平均分配到每个传感器节点上, 进而有效地延长整个网络的生命周期。

为了简化算法, 本文做如下假设:

1) 每个簇有相同数量的传感器节点, 并且在  $N \times N$  的区域大小分布有  $M$  个传感器节点。假设无线传感器网络包含有  $k$  个簇, 则有  $M/k$  个传感器节点被分布在该簇内, 其中包括  $M/k - 1$  个非簇首节点和一个簇首节点;

2) 假设所有的传感器节点分布在一个圆形区域, 那么有  $\pi * R^2 = N^2$ , 其中  $R$  为该圆的半径, 可得:  
 $R = (N/\sqrt{\pi})$ ;

3) 假设网络中的传感器节点呈均匀分布, 那么节点分布概率密度  $\rho = (1/N^2)$ 。

根据 LEACH 路由协议的成簇算法和一阶无线电模型可知, 每个簇首节点的能量消耗包括接收普通传感器节点发送的监测信息, 数据融合以及将融合后的数据信息传送到汇聚节点。此外, 由于簇首到汇聚节点之间的传输距离较远<sup>[6,7]</sup>, 因此本文采用多径效应来计算簇首节点的能量消耗。因此在一帧内任一簇首节点能量消耗可以通过式(1.4)计算。

$$E_{\text{CH}} = lE_{\text{elec}} \left( \frac{M}{k} - 1 \right) + lE_{\text{DA}} \frac{M}{k} + \frac{l}{\eta} (E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} d_{\text{toBS}}^4) \quad (1.4)$$

其中  $l$  为数据信息包的长度,  $d_{\text{toBS}}$  是簇首到汇聚节点的距离,  $E_{\text{DA}}$  是簇首为每一数据信号进行数据融合所消耗的能量,  $\eta$  为数据融合系数。

考虑到在每个簇内非簇首节点和簇首节点进行数据信息交换的传输距离较近, 因此本文采用自由空间模型来计算非簇首节点进行数据信息传输所消耗的能量, 如式(1.5)所示:

$$E_{\text{non-CH}} = lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{amf}} d_{\text{toCH}}^2 \quad (1.5)$$

其中,  $d_{\text{toCH}}$  为簇内非簇首节点到簇首节点的距离。

根据前面假设可以进一步得出:

$$E_{\text{non-CH}} = lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{amf}} \frac{1}{2\pi} \frac{N^2}{k} \quad (1.6)$$

因此可以计算在每簇内共消耗的能量(包括簇首节点能量消耗和非簇首节点能量消耗)为:

$$E_{\text{cluster}} = E_{\text{CH}} + \left( \frac{M}{k} - 1 \right) E_{\text{non-CH}} \quad (1.7)$$

因此, 假设包含有  $k$  个簇的无线传感器网络共消耗的能量为:

$$E_{\text{non-CH}} = lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{amf}} \frac{1}{2\pi} \frac{N^2}{k} \quad (1.8)$$

则一个簇内消耗的能量为:

$$E_{\text{total}} = kE_{\text{cluster}} = 2MlE_{\text{elec}} - 2klE_{\text{elec}} + MlE_{\text{DA}} - l\varepsilon_{\text{amf}} \frac{N^2}{2\pi} + \frac{kl}{\eta} (E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} d_{\text{toBS}}^4) + \frac{MN^2l}{2\pi} \frac{\varepsilon_{\text{amf}}}{k} \quad (1.9)$$

为了计算网络中最小能量消耗, 根据最小优化准则可以得出最优簇首数目, 即式(1.11):

$$\frac{dE_{\text{total}}}{dk} = E_{\text{cluster}} + k \times \frac{dE_{\text{cluster}}}{dk} = 0 \quad (1.10)$$

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{MN^2\eta\epsilon_{amf}}{2\pi(E_{elec} + \epsilon_{amp}d_{toBS}^4)}} \quad (1.11)$$

### 3.2. LEACH 协议簇首选择的方法

根据 1.3 节讨论可知, 簇首节点的选择需要考虑网络内传感器节点的能量消耗, 以避免剩余能量较小的传感器节点被选做簇首节点, 这样就会导致这些节点由于能量的消耗而提前死亡, 使得由这些簇首节点监测的区域与用户终端失去联系。为了进一步讨论如何实现簇首节点的选择方法, 下面定义如下变量:

- 1)  $E_0$ : 网络中任一传感器节点的初始能量;
  - 2)  $E\_node$ : 当前某一传感器节点的剩余能量。
- 那么利用公式:

$$\lambda = E\_node/E_0 \quad (1.12)$$

来衡量当前某一传感器节点的剩余能量百分比。

进一步考虑到簇首节点的能耗, 使剩余能量较大的传感器节点被选做簇首节点, 这样才能将网络内的能量平均分配到每个传感器节点, 有效地平衡网络负载, 进而进一步延长网络的生命周期, 为了避免由于某一簇首节点的死亡导致被监控区域与用户终端失去联系, 现将阈值计算准则定义为式(1.13)。

$$T(n)_{new\_leach0} = \begin{cases} G_0 * \lambda * \frac{k}{N - k(r \bmod(N/k))} + G_2, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (1.13)$$

其中  $G_0, G_2$  为网络加权系数。

先讨论如下两种情况:

- 1) 当  $G_0 = 1, G_2 = 0$  时, 式(1.13)演化为式(1.14):

$$T(n)_{new\_leach1} = \begin{cases} \lambda * \frac{k}{N - k(r \bmod(N/k))}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (1.14)$$

该式在文献[8]中表明, 利用传感器节点的剩余能量作为衡量簇首节点选择的一个因素, 能有效地平衡网络负载, 但是通过仿真发现, 当网络运行一定的轮数后, 整个传感器网络就会阻塞, 尽管网络中仍有一部分剩余能量较高的传感器节点满足需求。导致这种情况是由于通过式(1.14)计算的阈值较低, 为了避免这种情况, 本文采用  $G_0, G_2$  作为网络加权系数重新设定簇首阈值计算准则。

2) 当  $G_2 \neq 0$  时, 就  $n \in G$  而言, 式(1.13)将进一步演化为式(1.15):

$$\begin{aligned} T(n)_{new\_leach2} &= G_0 * \lambda * \frac{k}{N - k(r \bmod(N/k))} + G_2 \\ &= G_2 * \left( \frac{G_0}{G_2} * \lambda * \frac{k}{N - k(r \bmod(N/k))} + 1 \right) \\ &= G_2 * \left( G_1 * \lambda * \frac{k}{N - k(r \bmod(N/k))} + 1 \right) \end{aligned} \quad (1.15)$$

根据簇首阈值标准及上述分析可知,

$0 < T(n)_{new\_leach1} < T(n)_{new\_leach2} < 1$ , 计算可得网络加权系数必须满足:  $G_1 > 1, G_2 < 1, G_1G_2 < 1$ 。

### 4. 仿真结果分析

使用 Matlab 按照表 1 设置的网络参数进行实验仿真。此外根据 1.3 节描述可知, 网络中簇首数目的多少将会影响网络的性能, 并在 2.1 节给出了最优簇首数目的理论选取方法, 现假设数据融合系数  $\eta$  为 100%, 那么可以计算配置表 1 的无线传感器网络最优簇首数目为 30 个。

从图 1 可以看到, 簇首数目的多少会影响到全网的性能, 最优簇首数目可以进一步有效地延长网络的生命周期。图 2 则进一步验证了在不同簇首数目下网络中的能量消耗, 可以看到簇首数目大约在 30 个左右时全网能量消耗较少。

为了进一步平衡全网中能量的消耗, 有效地将全网中的能量平均分配到每个传感器节点, 本文在最优簇首数目基础上验证了以节点剩余能量选择簇首的方法, 网络配置参数见表 1。

**Table 1. Network parameter of LEACH simulation**  
**表 1. LEACH 仿真网络参数**

网络参数	取值
网络区域大小	300 (m) × 300 (m)
传感器节点数 $N$	300 (个)
初始能量 $E_0$	2 (J)
数据包长度	4000 (bit)
控制信息包长度	200 (bit)
$\epsilon_{amf}$	10 nJ/bit/m <sup>2</sup>
$\epsilon_{amp}$	0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>
全网能量 $E\_total$	600 (J)

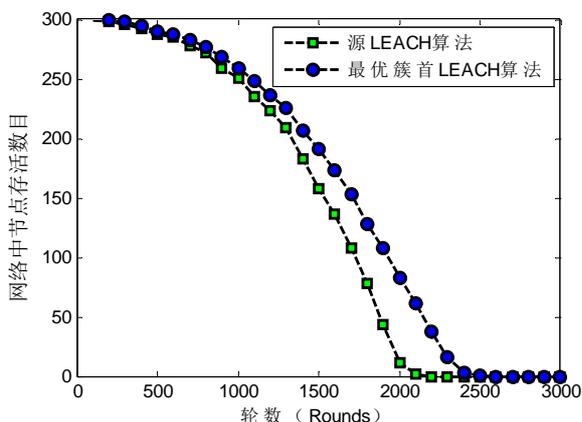


Figure 1. Simulation of network lifecycle  
图 1. 网络生命周期仿真结果

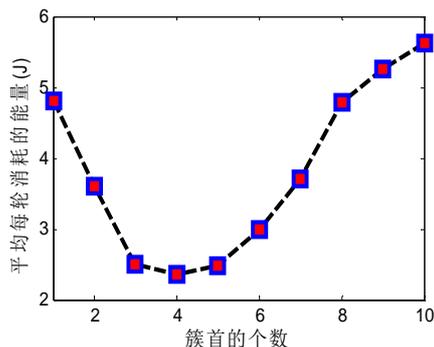
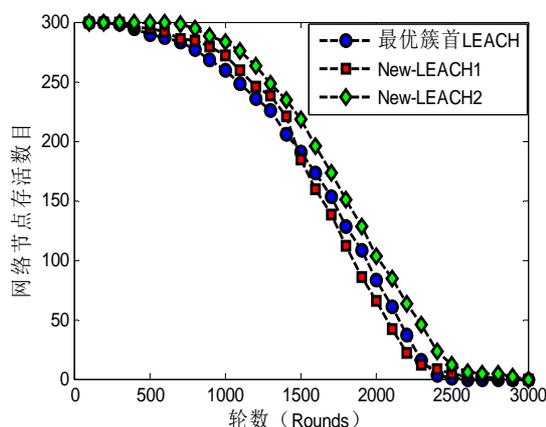


Figure 2. The different cluster number of energy consume in LEACH protocol  
图 2. 不同簇首数目下 LEACH 协议能量消耗

从图 3 可知,和最优簇首数目 LEACH 协议相比,采取节点剩余能量作为选择簇首的方法能够有效地延长网络的生命周期,但是网络大约经历在第 1500 轮左右时,整个无线传感器网络的性能所有下降,导致这种现象的主要原因是簇首选择阈值较低,因此本文采取网络加权系数进一步调节簇首选择阈值,由图 3 可知,利用网络加权系数和节点剩余能量能够进一步延长网络的生命周期,并且不会出现网络阻塞的情况。

本文采用第一个节点死亡(FND)和有一半节点死亡(HNA)所经历的轮数衡量一个网络的生命周期,表 2 记录了 5 次实验仿真的平均值。

对平均 FND 而言, New-LEACH1 和 New-LEACH2 相对于最优簇首 LEACH 协议使网络生命周期分别提高 21.7%和 29.1%;对平均 HNA 而言,则分别提高 12.3%和 18.0%。因此,通过使用传感器节点剩余能量和网络加权系数来修订阈值可以有效地延长



New\_leach1 为式 1.14, New\_leach2 使用式 1.15,  $G_1 = 20$ ,  $G_2 = 0.05$ 。

Figure 3. Simulation of network lifecycle of new LEACH  
图 3. 改进后 LEACH 协议网络生命周期仿真结果

Table 2. LEACH simulation  
表 2. LEACH 协议仿真结果

阈值类型	$T(n)$	$T(n)_{new\_leach1}$	$T(n)_{new\_leach2}$
FND (rounds)	350	426	452
HNA (rounds)	1364	1532	1610

网络生命周期,进一步平衡网络负载,将全网中的能量平均分配到每个传感器节点上。从而也验证了簇首数目的多少能够平衡整个网络的性能。

## 5. 结论

本文针对 LEACH 协议存在的缺陷,提出了一种优化簇首节点算法,并且在此基础上,给出了利用传感器节点剩余能量和网络加权系数来选择簇首节点的方法。通过仿真实验可知,通过该方法能够在一定程度上节约网络内的能量,进一步延长网络的生命周期。

## 参考文献 (References)

- [1] F. Ian, S. Weilian, S. Yogesh and C. Erdal. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocols for wireless sensor networks. IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference System Science, 2000: 3005-3014.
- [3] 于海斌, 曾鹏, 梁炜. 智能无线传感器网络系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006, 1: 119-139.
- [4] M. J. Handy, M. Haase and D. Timmermann. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communication Network, 9-11 September 2002: 368-372.
- [5] X. Y. Cui. Research and improvement of LEACH protocols in

- wireless sensor networks. International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 16-17 August 2007: 251-254.
- [6] 莫宵雁. 无线传感器网络分簇式路由协议的研究和设计[D]. 浙江大学, 2006: 1-10.
- [7] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. Energy-scalable algorithms and protocols for wireless microsensor networks. Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, June 2000: 660-760.
- [8] M. J. Handy, M. Haase and D. Timmermann. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communication Network, 9-11 September 2002: 368-372.