

文章编号:1001-9081(2013)01-0120-04

doi:10.3724/SP.J.1087.2013.00120

# 基于 LEACH 协议的动态轮时间算法——LEACH-DRT

钟一洋\*, 刘兴长

(后勤工程学院 后勤信息工程系, 重庆 401311)

(\*通信作者电子邮箱 zyy19871221@yahoo.com.cn)

**摘要:**为延长无线传感器网络(WSN)的生存时间,针对低功耗自适应集簇分层(LEACH)协议中分簇不均匀和轮时间固定的问题,提出了一种基于 LEACH 协议的动态轮时间(LEACH-DRT)算法。通过基站获取簇和簇内成员节点信息,根据簇内成员节点数和簇内剩余能量计算出各簇的轮时间,并由基站将时间信息发送至各簇,各簇按接收到的时间信息进行工作。同时,利用新的簇头选取机制,避免了因簇头节点能量不足导致的数据丢失和成员节点的无谓消耗。分析和仿真结果表明,改进后的算法比 LEACH 协议延长了约 4 倍的网络生存时间,数据丢失率降低了约 18%,在均衡网络能量消耗和降低数据丢失率方面取得了较好的应用效果。

**关键词:**网络生存时间;低功耗自适应集簇分层协议;不均匀分簇;轮时间;数据丢失率

中图分类号: TP393.09 文献标志码:A

## LEACH-DRT: dynamic round-time algorithm based on low energy adaptive clustering hierarchy protocol

ZHONG Yiyang\*, LIU Xingchang

(Department of Logistical Information Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China)

**Abstract:** Regarding the disadvantages of uneven clustering and fixed round time in Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) protocol, the Dynamic Round-Time (DRT) algorithm based on LEACH (LEACH-DRT) was proposed to prolong network life time. The algorithm obtained clusters' and member nodes' information from base station, and then figured out clusters' round time according to the number of clusters' member nodes and clusters' remaining energy. The time information was sent to different clusters by base station. Clusters began to work according to the time information received. Meanwhile, by using the new cluster head election mechanism, it avoided the data loss and useless energy consumption caused by the cluster's insufficient energy. The analysis and simulation results show that the improved algorithm prolongs about four times network life time and reduces the probability of data loss by 18% than LEACH protocol. It also demonstrates that LEACH-DRT algorithm achieves a better application effect at balancing energy consumption and data loss rate.

**Key words:** network life time; Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) protocol; uneven clustering; round time; data loss rate

## 0 引言

随着计算成本的下降以及微处理器体积的减小,越来越多的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)投入使用。目前,无线传感器网络的应用主要集中在环境监测、军事领域、医疗健康和交通管理等领域,随着技术的发展,其应用领域也会越来越广。与传统的无线网络相比,节点本身所配备的电源有限,能量的耗尽会导致节点死亡,物理的维护或替换节点往往是十分困难的。因此,保持能量的高效性以延长网络寿命是一个研究热点<sup>[1-3]</sup>。低功耗自适应集簇分层(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)协议<sup>[4]</sup>根据产生的随机数来选取簇头,采用分簇的方式,由节点轮流担当簇头,实现了网络能量消耗的均衡。本文针对 LEACH 协议的一些不足,提出了 LEACH-DRT(Dynamic Round-Time algorithm based on LEACH)算法。仿真结果表明,本文算法有效地减少了能量消耗,均衡了网络负载,避免了节点提前死亡,从而延长了网络的生存时间。

## 1 LEACH 协议分析

LEACH 是一种周期执行的自适应分簇路由算法,每个周期可理解为“轮”的概念,每轮分为簇建立和稳定数据传输阶段。

在簇建立阶段,每个节点在每轮开始时产生一个 0 ~ 1 的随机数。如果节点产生的随机数小于阈值  $T(n)$ ,则选定该节点为簇头。 $T(n)$  的表达式如式(1)所示:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times (r \bmod \frac{1}{p})}, & \forall n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $p$  为簇头数占总节点数的百分比, $r$  为当前的轮数,集合  $G$  为未担当过簇头的候选集。一旦节点使用阈值公式选定自己作为簇头后,各成员节点根据接收到的能量强度选择加入邻近的簇,由簇头给簇内的每个节点分配工作时段。在建立稳定通信后,簇内节点将自己采集到的数据传输给簇头,由簇

收稿日期:2012-07-27;修回日期:2012-08-21。

作者简介:钟一洋(1987-),男,四川自贡人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络节能协议及容错问题; 刘兴长(1973-),男,吉林蛟河人,副教授,博士,主要研究方向:无线传感器网络节能协议及容错问题。

头将数据融合之后传送给基站。LEACH 协议采用簇头由节点轮流充当的方法来均衡网络的能量消耗,比普通的平面多跳路由及静态分簇算法的网络生存时间长 15% 左右。但是 LEACH 协议也存在不足,已有相关的研究<sup>[5-10]</sup>对其不足做了总结,并进行了一定的改进。本文的改进重点在以往的研究中很少被提及。改进算法 LEACH-DRT 主要根据簇内成员节点数和剩余能量调整每轮的工作时间以实现均衡全网能量消耗,有效防止了节点提前死亡,延长了网络生存时间。

## 2 LEACH-DRT 算法设计原理

### 2.1 算法假设

假设如下:

- 1)所有节点的初始能量相同,且为同构节点;
- 2)节点随机分布,且不能移动;
- 3)基站位置固定;
- 4)基站可以获知节点信息;
- 5)基站的能量由额外的电站供给;
- 6)节点具有能量感知的功能。

### 2.2 能量消耗模型

根据发送节点和接收节点的距离  $d$  与阈值距离  $d_0$  的关系,节点发送数据的能量消耗模型有两种:自由空间模式和多径衰减模式<sup>[11]</sup>。当  $d < d_0$  时,选择自由空间模式;当  $d \geq d_0$  时,则采用多径衰减模式。因此,节点收发数据的能耗模型公式如式(2)~(3)所示:

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

$$E_{\text{RX}}(l) = E_{\text{RX-elec}}(l) = lE_{\text{elec}} \quad (3)$$

其中: $l$  为发送数据的长度; $E_{\text{elec}}, \varepsilon_{\text{fs}}, \varepsilon_{\text{amp}}$  为常数,由硬件的情况决定。

### 2.3 簇内能量分析

在稳定数据传输阶段,簇头将从成员节点接收到的数据融合后发送至基站,则每个簇头的能量消耗  $E_{\text{CH}}$  如式(4)所示:

$$E_{\text{CH}} = lE_{\text{elec}}n_i + lE_{\text{DA}}n_i + lE_{\text{elec}} + E_{\text{TX}}(l, d_{\text{toBS}}) \quad (4)$$

其中: $d_{\text{toBS}}$  为由簇头发送至基站的距离, $E_{\text{DA}}$  为簇头融合数据的能耗, $n_i$  为簇内成员节点个数。

而成员节点只需在其相应的工作时隙将数据发送至簇头,其能量消耗  $E_{\text{non-CH}}$  如式(5)所示:

$$E_{\text{non-CH}} = lE_{\text{elec}} + E_{\text{TX}}(l, d_{\text{toCH}}) \quad (5)$$

其中  $d_{\text{toCH}}$  为由节点发送至簇头的距离。

### 2.4 改进算法的分析与实现

在稳定数据传输阶段开始前,簇头和基站将计算出时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)传输时间表,当数据传输阶段开始时,成员节点在其分得的发送时隙内将其数据发送给自己的簇头,且每个节点分配的时隙长度  $t_{\text{slot}}$  是固定不变的,所以每个簇的工作周期跟簇内的成员节点数量  $n_i$  有关,其中  $i$  为每轮中产生各簇的序号。LEACH 协议中设置的轮时间  $T_{\text{round}}$  是固定不变的,当分簇不均匀时,含成员节点数量  $n_i$  较小的簇在相同的时间内传输的数据帧

$N_{\text{frames/round}} = T_{\text{round}} / (t_{\text{slot}} \cdot n_i)$  大于含成员节点数量较多的簇,导致含成员节点较少的簇传输数据更频繁,增加了簇内节点的负担,极大地影响了全网能量消耗的均衡性。LEACH-DRT 算法根据各簇和簇内成员节点信息调整各簇的轮时间,降低了含成员节点较少的簇的能量消耗,减少了提前死亡的节点数量,均衡了网络能耗。

假设序号为  $i$  的簇每轮每个节点进行  $N_{\text{frames/round}}$  帧数据传输,则每轮中簇头和成员节点消耗的能量可表示为式(6)~(7)所示:

$$E_{\text{CH/round}} = E_{\text{CH/frames}} \times N_{\text{frames/round}} \quad (6)$$

$$E_{\text{non-CH/round}} = E_{\text{non-CH/frames}} \times N_{\text{frames/round}} \quad (7)$$

因此,每轮的簇内能量消耗可表示为式(8)所示:

$$\begin{aligned} E_{i\_dissip} &= E_{\text{CH/round}}(l, d_{i\_toBS}) + \sum_{k=1}^{n_i} E_{\text{non-CH/round}}(l, d_{n_i\_toCH}) \Rightarrow \\ E_{i\_dissip} &= [E_{\text{CH/frames}}(l, d_{i\_toBS}) + \sum_{k=1}^{n_i} E_{\text{non-CH/frames}}(l, d_{n_i\_toCH})] N_{\text{frames/round}} \Rightarrow \\ N_{\text{frames/round}} &= E_{i\_dissip} / [E_{\text{CH/frames}}(l, d_{i\_toBS}) + \sum_{k=1}^{n_i} E_{\text{non-CH/frames}}(l, d_{n_i\_toCH})] \end{aligned} \quad (8)$$

设  $r_b$  为比特率,则在一个节点时隙内传输  $l$  比特的数据至少需要  $t_{\text{slot}} = l/r_b$ ,那么,簇内成员传输一帧数据的时间为  $t_{\text{frame}} = \frac{l}{r_b} \cdot n_i$ ,因此,可推导出一轮的工作时间,如式(9)所示:

$$\begin{aligned} t_{\text{round}} &= N_{\text{frames/round}} \times t_{\text{frame}} = \\ \frac{l}{r_b} \cdot n_i &\frac{E_{\text{dissip}}}{[E_{\text{CH/frames}}(l, d_{i\_toBS}) + \sum_{k=1}^{n_i} E_{\text{non-CH/frames}}(l, d_{n_i\_toCH})]} \Rightarrow \\ E_{\text{dissip}} &= \frac{[E_{\text{CH/frames}}(l, d_{i\_toBS}) + \sum_{k=1}^{n_i} E_{\text{non-CH/frames}}(l, d_{n_i\_toCH})] t_{\text{round}} r_b}{l \cdot n_i} \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)中可知,要减少簇内能量消耗,实现不同簇之间的能耗均衡,只有调整各簇的轮时间。在 LEACH-DRT 算法中,令各簇成员节点的数目为集合  $\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ ,其中: $i = 1, 2, \dots, k$ ;  $k$  是当轮的簇头数。含成员节点最多的簇  $j$  的成员节点数  $n_j = \max\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ 。假设簇  $j$  的初始轮时间设置为  $t_{\text{round}}$ ,令簇  $i$  的轮时间为  $t_{n_i\_round}$ ,为使能耗均衡,故令簇内成员节点平均能耗相等,可推出式(10)所示:

$$\frac{E_{i\_dissip}}{n_i} = \frac{E_{j\_dissip}}{n_j} \Rightarrow \frac{n_j}{n_i} = \frac{E_{j\_dissip}}{E_{i\_dissip}} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)中,可推导出簇  $i$  的轮时间为  $t_{n_i\_round}$ ,随着网络整体能量下降对各簇的影响,故又引入了当前簇内剩余能量  $E_{n_i\_current}$  与簇内初始能量  $E_{n_i\_init}$  的比值,作为参考的最大簇  $j$  的轮时间也按式(11)调整,则簇  $i$  的轮时间  $t_{n_i\_round}$  可用式(12)表示:

$$t_{n_j\_round} = t_{\text{round}} (E_{n_j\_current}/E_{n_j\_init}) \quad (11)$$

$$t_{n_i\_round} = \frac{E_{\text{CH/frames}}(l, d_{i\_toBS}) + \sum_{k=1}^{n_i} E_{\text{non-CH/frames}}(l, d_{n_i\_toCH})}{[E_{\text{CH/frames}}(l, d_{i\_toBS}) + \sum_{k=1}^{n_i} E_{\text{non-CH/frames}}(l, d_{n_i\_toCH})]} \times$$

$$\left( \frac{E_{n_i, current}}{E_{n_i, init}} \right) \left( \frac{n_i}{n_j} \right)^2 t_{n_j, round} \quad (12)$$

由于不同的簇每轮所含成员节点数量和簇内剩余能量不同,由式(12)可知,不同簇的每轮工作时间都是随参数动态变化的,旨在实现全网能量消耗的均衡,具体的算法流程如图 1 所示。

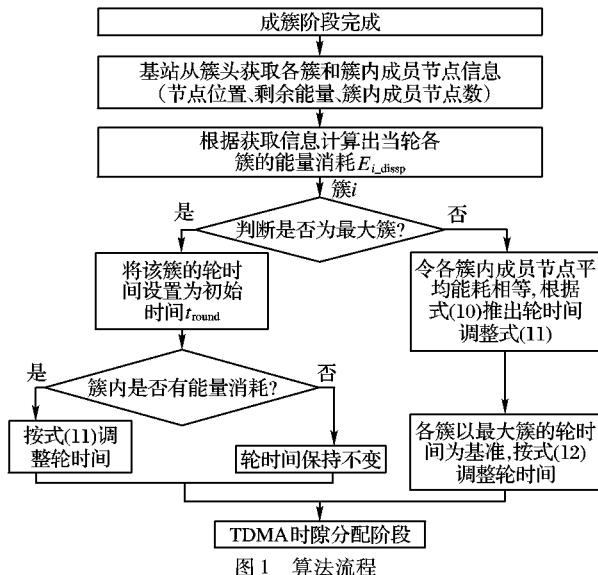


图 1 算法流程

其中各簇的动态轮时间 (Dynamic Round-Time, DRT) 的计算和分配都通过基站实现,不会增加网络的能量负担。

## 2.5 簇头的选择

在簇头选举阶段,节点在每轮开始时产生一个  $0 \sim 1$  的随机数。如果节点产生的随机数小于阈值  $T(n)$ ,则选定该节点为簇头。算法中阈值  $T(n)$  采用的公式<sup>[12]</sup> 如式(13)所示:

$$T(n) = \frac{p}{1 - p \times \left( r \bmod \frac{1}{p} \right)} \left[ \frac{E_{n, current}}{E_{n, init}} + \left( r_s \bmod \frac{1}{p} \right) \left( 1 - \frac{E_{n, current}}{E_{n, init}} \right) \right] \quad (13)$$

其中: $E_{n, current}$  表示节点的剩余能量; $E_{n, init}$  表示节点的初始能量; $r_s$  表示节点连续未当选簇头的轮数,节点当选后, $r_s$  重置为 0。

当被选中簇头的剩余能量低于每轮要消耗的能量  $E_{CH/round}$ ,为防止因能量不足引起的簇头提前死亡,导致能量的无谓消耗和数据丢失。基站将为簇重新分配新的簇头,新的簇头必须满足以下两个条件:1) 剩余能量  $E_{n, current} > E_{CH/round}$ ;2) 保证选举的簇头使簇内一轮的能耗  $E_{diss}$  最小。条件 1) 是节点成为候选簇头的基本要求,条件 2) 的目的在于通过选取一个合适的簇头使簇内的总能耗最小,从而使每个节点分担的能耗降低。

## 3 算法仿真及分析

本文使用 Matlab 软件对算法进行仿真,环境参数设置如表 1 所示。

仿真主要通过网络总能耗、网络存活节点数目和数据丢失率三个指标对比 LEACH-DRT、LEACH 和 LEACH-DS<sup>[13]</sup> 算法。

如图 2 所示,LEACH-DRT 算法的剩余能量曲线斜率小于 LEACH 和 LEACH-DS 算法,说明 LEACH-DRT 算法每轮的平

均能耗明显低于 LEACH 和 LEACH-DS 算法。从总能耗来看,LEACH 算法的能量在 600 轮左右耗尽,LEACH-DS 算法在 2200 轮左右耗尽,而 LEACH-DRT 算法的能量一直持续到 2500 轮左右,在 LEACH 算法的基础上提高了约 4 倍。

表 1 实验模拟参数

参数名	参数值
区域大小	$100 \times 100 \text{ m}^2$
节点数量	15/50/100
基站位置	(50, 150) m
节点初始能量	1 J
数据包长度	4 000 b
控制数据包长度	100 b
多路衰减模型的功率放大系数	$10 \text{ pJ} \cdot (\text{b} \cdot \text{m}^2)^{-1}$
自由空间模型的功率放大系数	$0.0013 \text{ pJ} \cdot (\text{b} \cdot \text{m}^2)^{-1}$
发送/接收电路能量	$50 \text{ nJ} \cdot \text{b}^{-1}$
数据融合消耗的能量	$5 \text{ nJ} \cdot \text{b}^{-1}$
初始每轮工作时间	2 s/5 s/10 s

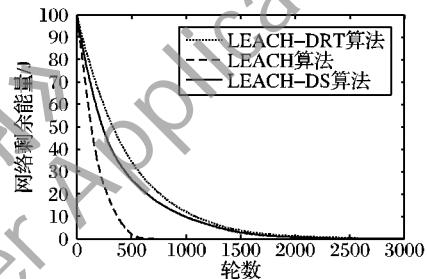


图 2 网络剩余能量曲线图

为了对比 LEACH-DRT 算法在不同的初始轮时间中的应用效果,故表 1 中的环境参数设置了三个不同的初始轮时间,对应于图 3 中的三个仿真结果。

如图 3(a)~(c) 所示,LEACH-DRT 算法极大地延长了网络生存时间。由于死亡节点过多的网络工作几乎无意义,所以,本文只以第一个节点的死亡时间和一半节点死亡的时间为评估网络性能的标准。由图 3(a) 中可知,LEACH-DRT 算法出现第一个节点死亡的时间比 LEACH 和 LEACH-DS 算法分别滞后了 396 轮和 175 轮,一半节点死亡的时间滞后了 1157 轮和 485 轮;由图 3(b) 中可知,LEACH-DRT 算法出现第一个节点死亡的时间比 LEACH 和 LEACH-DS 算法分别滞后了 110 轮和 84 轮,一半节点死亡的时间滞后 555 轮和 190 轮;由图 3(c) 中可知,LEACH-DRT 算法出现第一个节点死亡的时间比 LEACH 和 LEACH-DS 算法分别滞后了 68 轮和 49 轮,一半节点死亡的时间滞后 330 轮和 143 轮。

由于文献[11]中的 LEACH-DS 算法也是通过调整轮时间来降低能耗,因此,在与本文算法的比较中具有很好的参考价值。LEACH-DS 算法设置了时间阈值  $r_u$  和时间减少因子  $\gamma$ ,随着网络工作时间增加,当轮数超过阈值时则根据算法中的公式减少轮时间以降低总能耗。如图 2~3 所示,LEACH-DS 和 LEACH-DRT 算法在降低总能耗和延长网络生存时间方面比 LEACH 协议都有较明显的提高,且随着工作时间的推移,两种算法的优势越明显,说明通过调整轮时间来延长网络生存时间的方法是行之有效的。而 LEACH-DS 和 LEACH-DRT 算法存在性能差异的主要原因是:LEACH-DS 算法中,工作时间必须达到设定的阈值后才开始调整轮时间,且这种调整未考虑能耗的均衡性,只是简单地减少了整个网络的轮时

间;而 LEACH-DRT 算法没有设定阈值,一旦出现由分簇不均匀引起的能耗不均,便根据各簇能量消耗的差异,通过调整各簇的轮时间,使各簇中成员节点的能耗更均匀。所以,LEACH-DRT 算法较 LEACH-DS 算法的节能性更好。

由图 3(a)~(c)可知,设置的初始每轮工作时间越长,其

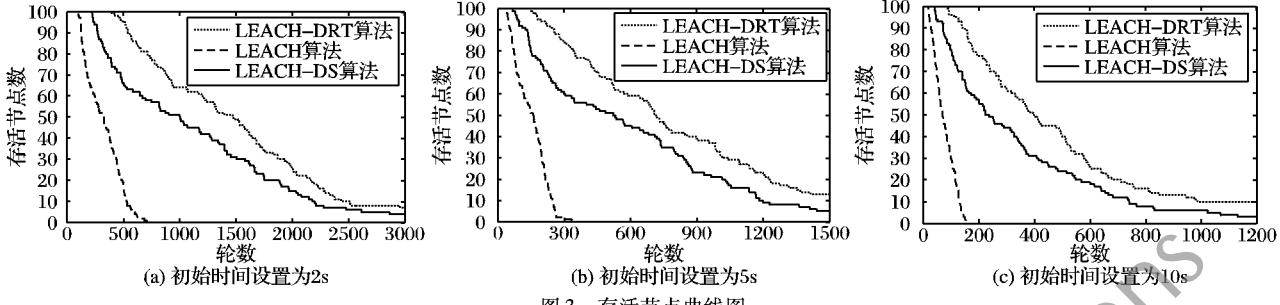


图 3 存活节点曲线图

如图 4 所示,LEACH-DRT 算法的数据丢失率要远远低于 LEACH 协议,因为算法在网络工作过程中起到了均衡能量消耗的作用,减少了提前死亡的节点数量,且算法的簇头选举机制有效地避免了因簇头提前死亡引起的数据丢失。

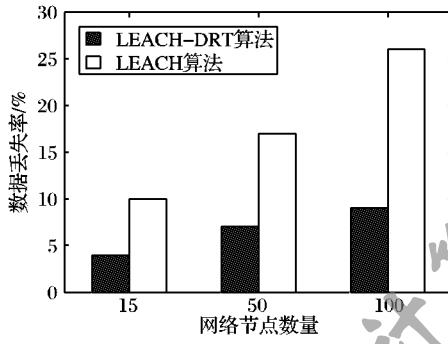


图 4 不同节点数的数据丢失率直方图

#### 4 结语

在 LEACH 协议中,由于分簇不均匀以及轮时间固定的原因,含成员节点较少的簇能量消耗较快,从而导致各簇能量消耗不均匀,部分簇内成员节点剩余能量较低的情况,如果这部分节点担当簇头,会使节点提前死亡并造成大量的数据丢失。基于上述问题,本文提出了一种 LEACH-DRT 算法,算法根据簇内成员节点的实际部署情况,引入各簇的成员节点数以及簇内剩余能量作为调整各簇轮时间的参数,实现了整个网络能量消耗的均衡。同时,根据推导出的簇内能量消耗公式,改进了 LEACH 协议中的簇头选举机制,新的簇头选举机制有效地避免了因剩余能量较低的节点当选簇头导致的数据丢失。通过对仿真结果分析,改进的 LEACH-DRT 算法,均衡了网络中节点的能量消耗,延长了节点的死亡时间,有效地延长了整个网络的生存时间且降低了数据丢失率。

LEACH-DRT 算法在无线传感器网络节能方面的应用取得了较好的效果,但对算法的研究尚不完善,由于算法对固定轮时间的调整,使各簇的轮时间出现了差异,必须对网络的时间同步机制重新调整。另外,由于各簇内的成员节点采集数据的频率不同,会产生大量的冗余数据,同时也会对数据采集的实时性造成影响。综上所述,在 LEACH-DRT 算法的基础上为各簇内的成员节点分配合理的工作时隙将是下一步研究的重点。

每轮传输的数据帧就越多,所以,网络工作的轮数自然就越少。尽管设定的每轮工作时间不同,LEACH-DRT 算法在三种不同设置下的性能提高的幅度几乎是一样的,所以,本文算法具有一定的适应性,不管初始轮时间设置是否合理,算法都能根据参数自动调整,实现了能量的高效性。

#### 参考文献:

- [1] 唐宏,谢静,鲁玉芳,等.无线传感器网络原理及应用[M].北京:人民邮电出版社,2010.
- [2] 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.
- [3] 张西红,周顺,陈立云,等.无线传感网技术及其军事应用[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [4] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy efficient communication protocol for wireless micro-sensor network [C]// Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 3005–3014.
- [5] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMANN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection [C]// Proceedings of the 4th IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 368–372.
- [6] 周玉,景博,杨洲.一种基于遗传算法的无线传感器网络 LEACH 路由协议的改进算法[J].计算机研究与发展,2010,47(z2):175–179.
- [7] 施叶玲,陈彬兵.无线传感器网络改进的 LEACH-ID 算法[J].计算机应用,2011,31(2):324–327.
- [8] 李岩,张曦煌,李彦中. LEACH-EE—基于 LEACH 协议的高效聚类路由算法[J].计算机应用,2007,27(5):1103–1105.
- [9] 掌明,王经卓,董自健.基于分簇的无线传感器网络 MAC 节能算法[J].计算机工程,2012,38(15):70–73.
- [10] 林楠,史苇杭.无线传感器 LEACH 算法的优化及仿真[J].计算机仿真,2011,28(1):178–181.
- [11] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660–670.
- [12] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad Hoc sensor network [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366–379.
- [13] AZIM A, ISLAM M M. Dynamic service policy-based clustered wireless sensor networks [C]// 2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 196–202.