

# 一种基于 LEACH 协议的改进算法

吕 涛<sup>1,2</sup>,朱清新<sup>1</sup>,张路桥<sup>1,3</sup>

(1.电子科技大学计算机科学与工程学院,四川成都 611731; 2.西南科技大学国防科技学院,四川绵阳 621010;  
3.成都信息工程学院网络工程学院,四川成都 610225)

**摘 要:** 作为能量有效、基于层次结构的路由协议的典型代表,LEACH 协议存在的不足表现为网络中会出现极大簇和极小簇并存;当节点能量不同时簇头选择不合理;在簇头死亡后簇内节点仍会消耗能量.本文基于 LEACH 提出了一种改进算法,使用引入簇成员数门限和合并极小簇的方法避免极大簇和极小簇同时存在;通过对簇头能量消耗的估计,在簇头能量耗尽前使成员节点休眠来减少节点能量浪费.分析和仿真结果表明,改进后的算法在平衡节点能量和延长网络寿命方面具有更优越的性能.

**关键词:** 无线传感器网络;极大簇;极小簇;簇成员数门限;能量预测

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1405-05

## An Improved LEACH Algorithm in Wireless Sensor Network

LÜ Tao<sup>1,2</sup>,ZHU Qing-xin<sup>1</sup>,ZHANG Lu-qiao<sup>1,3</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;  
2. School of National Defence Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621020, China;  
3. School of Network Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China)

**Abstract:** As a representative of hierarchy-based protocol in wireless sensor network, LEACH is an elegant solution for energy efficiency. However, LEACH still has some deficiencies such as the great cluster and small cluster coexist; unreasonable cluster head selection while the nodes have different energy; the node still consumes energy after the death of the cluster head. We propose a new energy-efficient LEACH-based protocol that employed cluster member threshold and merged the tiny cluster to avoid the great cluster and small cluster existing at the same time; estimated cluster head's energy to reduce unnecessary energy consumption. Analysis and simulation results show that our proposed algorithm provides more uniform energy consumption among nodes and can prolong network lifetime compared to LEACH.

**Key words:** wireless sensor network; great cluster; small cluster; cluster member threshold; energy estimate

## 1 引言

由于无线传感器网络中的节点能量有限,因此网络中的协议需要审慎使用能量有限的网络节点以保证整个网络的生存期.经典的解决方法是节点尽量避免以较高的发射功率为代价直接发送数据给汇聚节点,而采用多跳的方式将数据采集后再发送<sup>[1]</sup>. LEACH<sup>[2]</sup>作为无线传感器网络分簇路由协议的经典代表,至今仍有很高的参考价值,其后在此基础上发展和演变了很多路由协议,如 EEHC<sup>[3]</sup>、HEED<sup>[4]</sup>、DEEC<sup>[5]</sup>等.

为使 WSN 能耗最小化,近年来研究人员提出了高效的 MAC 协议<sup>[6,7]</sup>和高效的路由协议<sup>[8,9]</sup>. WSN 中的能量消耗主要包括通信能耗、感知能耗和计算能耗.其中,通信能耗所占比重最大.因此,减少通信能耗是延长网络生

存时间的有效手段.大量研究表明,通信过程中主要能量浪费存在于:冲突导致重传和等待重传;非目的节点接收并处理数据形成串音;发射/接收不同步导致分组空传;控制分组本身开销;无通信任务节点对信道的空闲侦听等<sup>[10,11]</sup>.

本文从能量角度分析了 LEACH 中存在的不足,在考虑了节点能量浪费的情况下,分析和总结了 LEACH 单簇各个阶段的能量损耗,提出通过控制簇成员数和合并极小簇的方法使 WSN 中的各个分簇的能量平衡;通过对稳定阶段的节点能量预测来改进簇头的选择,减少节点的能量浪费.通过实验仿真结果证明,改进后的算法在延长网络生存期和平衡各个分簇能量方面具有更好的性能.

## 2 问题描述

### 2.1 极大簇和极小簇并存造成能量消耗不平衡

LEACH 采用随机选择轮流成为簇头的算法,其参考指标是节点成为簇头的次数;而节点的加入是以接收信号的强弱为依据,因此在成簇过程中会出现簇内节点过多的簇(极大簇)和簇内节点过少的簇(极小簇).在 LEACH 稳定阶段,每个簇内节点根据簇头分配的时间片采集并发送数据,采用 TDMA 机制可以很好的保证节点在时间片内完成工作并不会造成冲突.簇头等待簇内所有节点采集一次数据并发送,即一帧(One Frame),将簇内数据进行融合,最后发送给 BS.由于在建立阶段和稳定阶段,各个簇头采用 CSMA 机制向 BS 发送数据,那么簇头向 BS 发送数据的频率就取决于簇内的节点总数.极小簇由于簇成员少,因此完成数据采集和发送的时间更短,会比极大簇更频繁将数据发送给基站.通过统计发现极小簇的簇头节点和簇成员节点能量消耗分别要高出极大簇 20% 左右.所以,在没有相应机制的保证下,分簇不平衡会导致极小簇的整体能量消耗严重.

### 2.2 非可靠传输造成簇成员能量浪费

在点到点网络传输模型中,从发送方到接收方的传输模式可分为可靠传输(基于 ACK)和非可靠传输两种.文献[12]的研究表明,基于 ACK 的可靠传输能耗比非可靠传输能耗大一倍以上,即采用 ACK 的传输机制能耗是较高的,而非可靠传输机制能耗开销则较低.LEACH 使用的是能耗较低的非可靠传输.如果在稳定阶段某个簇头因为能量耗尽猝死,而该簇内的节点并不知道簇头已经死亡,会继续按照事先分配好的时间片采集和发送数据直到本轮结束,造成该簇内成员的能量无谓损耗.使用 ACK 的可靠传输可以很容易解决该问题,节点发送数据后会等待簇头的 ACK 消息,超时等待后选择重发数据或直接认定簇头已经死亡,从而转入休眠状态,等待下一轮重新开始.但 ACK 机制会增加节点和簇头的能量损耗,同时增加了整个网络的延时.

## 3 基于能量平衡的改进协议

### 3.1 节点发送一次数据的平均时间

假设在任一时间片,网络中存在  $n$  个节点,有  $m$  个节点期望发送数据,每个节点发送数据的概率是  $q$ ,将节点状态定义为  $(n, m)$ ,其中  $0 \leq m \leq n$ .于是有

$$P(n, m) = \binom{n}{m} q^m (1-q)^{n-m}, \sum_{m=0}^n P(n, m) = 1 \quad (1)$$

$(n, 0)$  表示没有节点发送数据,网络为空闲状态; $(n, 1)$  表示某一个节点成功发送了信息;当  $m > 1$  时表示多个节点争用信道,网络有冲突发生.

由此可得到  $n$  个节点中某一个节点发送成功的概

率为

$$P_s = P(n, 1) = nq(1-q)^{n-1} \quad (2)$$

$n$  个节点均为空闲状态的概率为

$$P_i = P(n, 0) = (1-q)^n \quad (3)$$

若一个争用期出现的概率为  $1 - P_s - P_i$ ,则  $n$  个节点中出现  $m$  个争用期的概率为

$$P_m = (1 - P_s - P_i)^m P_s \quad (4)$$

由此求出在状态  $(n, m)$  下争用期的期望值为

$$E[(n, m)] = \sum_{m=0}^{\infty} m P_m \approx \frac{1 - P_s}{P_s} \quad (5)$$

为了简化推导,假定网络中没有干扰信号,设一个争用期长度为  $2\tau$ .从一个数据包开始发送,经冲突重发数次,到发送成功且信道转为空闲时为止,共需的平均发送时间为  $T_{\text{avg}}$ .若信道占用期由发送成功时间  $T$  和端到端的延迟  $\tau$  组成,那么网络中  $n$  个节点发送一个数据包的平均发送时间为

$$T_{\text{avg}}(n) = 2\tau \frac{1 - P_s}{P_s} + T + \tau \quad (6)$$

其中  $T = l/s$ ,  $l$  为数据包长度,  $s$  为信道速率.

### 3.2 LEACH 单簇能量计算模型

假设发送的能量包括信号处理与功率放大两部分,接收的能量仅用于信号处理,使用接近中心的距离  $d_0$  作为参考,并且假设两节点之间的距离  $d$  小于  $d_0$  时采用自由空间模型<sup>[13]</sup>,大于等于  $d_0$  时采用多径衰减模型<sup>[13]</sup>.因此,当两个距离为  $d$  的节点之间发送  $l$  比特数据时,发送和接收所消耗的能量分别为:

$$E_{\text{Tx}}(l, d) = E_{\text{Tx-elec}}(l) + E_{\text{Tx-amp}}(l, d) = \begin{cases} lE_{\text{elec}} + \epsilon_{\text{fs}} d^2, & d < d_0 \\ lE_{\text{elec}} + \epsilon_{\text{mp}} d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{\text{Rx}}(l) = E_{\text{Rx-elec}}(l) = lE_{\text{elec}} \quad (8)$$

其中  $E_{\text{elec}}$  是信号处理所需能量,由数字编码、调制、滤波和扩展信号等因素决定.放大器功耗  $\epsilon_{\text{fs}}$  和  $\epsilon_{\text{mp}}$  由发射距离和接收误码率等决定.

LEACH 在建立阶段分为三步完成:簇头发布;节点加入;簇头计算 TDMA 并发布.

#### 3.2.1 簇头发布单簇能量分析和延时估计

设区域  $M$  内共有  $N$  个节点,假设每个簇的成员数为  $k$ ,共选举产生簇头数为  $N_{\text{ch}} = \lceil N/k \rceil$ ,  $N_{\text{ch}}$  个簇头广播自己的节点 ID,此时全网节点除簇头外均接收该簇头广播信息.

单簇能量损耗为

$$E_{\text{sl}} = E_{\text{Tx}}(l_{\text{msg}}, d) + kN_{\text{ch}} E_{\text{Rx}}(l_{\text{msg}}) + (k+1) T_{\text{avg}}(N_{\text{ch}}) E_{\text{idle}} \quad (9)$$

其中簇头为

$$E_{\text{chl}} = E_{\text{Tx}}(l_{\text{msg}}, d) + T_{\text{avg}}(N_{\text{ch}}) E_{\text{idle}} \quad (10)$$

延时为

$$T_{s1} = T_{avg}(N_{ch}) \quad (11)$$

### 3.2.2 节点加入能量分析和延时估计

节点根据接收的簇头 ID 以及接收信号的强弱判断加入到那一个簇中,在该阶段由于节点采用 CSMA 方式通信,所以  $k$  个节点都试图在同一时间发送自己的加入信息.

单簇能量损耗为

$$E_{s2} = kE_{Tx}(l_{msg}, d) + kE_{Rx}(l_{msg}) + (k+1)T_{avg}(k)E_{idle} \quad (12)$$

其中簇头为

$$E_{ch2} = kE_{Rx}(l_{msg}) + T_{avg}(k)E_{idle} \quad (13)$$

延时为

$$T_{s2} = T_{avg}(k) \quad (14)$$

### 3.2.3 簇头计算 TDMA 并发布能量分析和延时估计

单簇能量损耗为

$$E_{s3} = kl_{msg}E_{eda} + E_{Tx}(l_{msg}, d) + kE_{Rx}(l_{msg}) + (k+1)T_{avg}(N_{ch})E_{idle} \quad (15)$$

其中簇头为

$$E_{ch3} = kl_{msg}E_{eda} + E_{Tx}(l_{msg}, d) + T_{avg}(N_{ch})E_{idle} \quad (16)$$

延时为

$$T_{s3} = T_{avg}(N_{ch}) \quad (17)$$

### 3.2.4 稳定阶段单簇能量分析和延时估计

假设每个节点在各自的时间片  $t$  内可以完成数据采集和发送的任务,当自己的时间片用完即进入休眠状态.

单簇能量损耗为

$$E_f = ktE_{sleep} + kE_{Tx}(l_{data}, d) + kE_{Rx}(l_{data}) + kl_{data}E_{eda} + E_{Tx}(l_{data}, d_{BS}) + T_{avg}(N_{ch})E_{idle} \quad (18)$$

其中簇头为

$$E_{ch-f} = kl_{data}E_{eda} + kE_{Rx}(l_{data}) + E_{Tx}(l_{data}, d_{BS}) + T_{avg}(N_{ch})E_{idle} \quad (19)$$

延时为

$$T_f = kt + T_{avg}(N_{ch}) \quad (20)$$

设每轮持续时间  $S$ , 则一轮中该簇的能量消耗是

$$E_{total} = E_s + \lceil (S - T_s) / T_f \rceil E_f \quad (21)$$

其中  $E_s = E_{s1} + E_{s2} + E_{s3}$ ,  $T_s = T_{s1} + T_{s2} + T_{s3}$ .

簇头能量消耗为

$$E_{total-ch} = E_{ch-s} + \lceil (S - T_s) / T_f \rceil E_{ch-f} \quad (22)$$

其中  $E_{ch-s} = E_{ch1} + E_{ch2} + E_{ch3}$ .

仿真参数设置如表 1 所示,通过仿真得到单簇一轮的簇头能量损耗和簇成员能量损耗与  $k$  的关系.如图 1 所示,当簇成员数  $k \leq 7$  时,簇头的能量消耗明显上升;当  $k \geq 20$ ,簇头的能量损耗趋于稳定.因此在后面的实验中,设定簇成员数的门限为 7,即当  $k \leq 7$  时认为该簇

是一个极小簇.

表 1 仿真参数设置

参数	值	参数	值
节点总数 $N$	100	分布区域 $M$	[100, 100]
消息长度 $l_{msg}$	25Byte	数据长度 $l_{data}$	500Byte
信号处理功耗 $E_{elec}$	50nJ/bit	计算功耗 $E_{eda}$	5nJ/bit
空闲功耗 $E_{idle}$	13.5mW	休眠功耗 $E_{sleep}$	15 $\mu$ W
放大器功耗 $\epsilon_{fs}$	10pJ/bit/m <sup>2</sup>	放大器功耗 $\epsilon_{mp}$	0.0013pJ/bit/m <sup>2</sup>
节电工作时间 $t$	0.1sec	每轮持续时间 $S$	20sec
发送概率 $q$	0.3	信道速率 $s$	125kbps
延迟 $\tau$	5 $\mu$ s	BS 坐标	(50, 175)

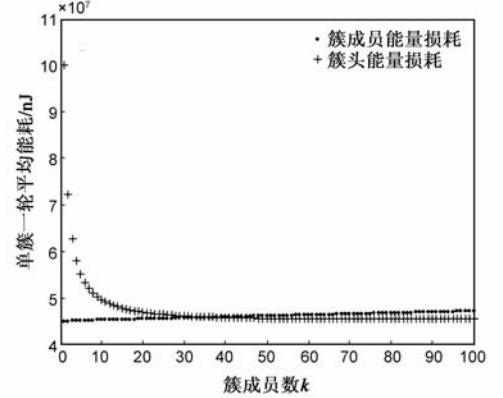


图1 单簇一轮平均能量损耗仿真

### 3.3 簇头能量估计

通过 3.2 节能量计算可知,一个簇当  $k$  值确定后,簇头可以估算出本轮稳定阶段消耗的能量,并检查是否有足够的能量完成该轮的操作,若没有,则应根据能量耗尽的时间点来计算 TDMA 并发布给所属的节点,避免因为簇头死亡而造成节点的能量无谓损耗.由于簇头在稳定阶段的能耗远大于建立阶段,将簇头在稳定阶段的能量估计简化为:

$$E_{steady-ch} = \lceil S / T_f \rceil E_{ch-f} \quad (23)$$

由此可以估计簇头在进入稳定阶段过后,它的能量可以维持多少帧的工作时间,以此作为成员停止工作进入休眠的依据.在选举簇头的时候,将簇头经过本轮后的剩余能量作为选举簇头的标准,由于选举时并不知道该簇头会有多少成员,因此使用簇成员数的门限值 7,则修改后节点成为簇头的计算公式为:

$$P_{ch} = \begin{cases} 1, & E_{NP} \geq 0 \\ \frac{E_P}{E_{init}}, & E_{NP} < 0, E_P > E_T \\ 0, & E_P \leq E_T \end{cases} \quad (24)$$

其中  $E_{NP} = E_P - E_{steady-ch}$ ,  $E_T = E_P - E_{ch-f}$ .

$E_{NP}$  是节点经过本轮过后的剩余能量,  $E_P$  是节点当前的剩余能量,  $E_{init}$  是节点的初始能量,  $E_T$  是节点的一个阈值能量,它的能量已不足以完成簇内一帧的运行.在网络运行初期,由于各个节点均有充足的能量来保

证下一轮的网络运行,因此成为簇头的概率为 1,此时通过 0-1 随机数来决定谁将成为簇头;当节点  $E_{NP}$  小于 0 时,意味着该节点能量已不足以完成一轮的运行,则成为簇头的概率由当前剩余能量和初始能量的比值决定;当能量小于阈值后,节点能量已不足以完成一帧的运行,则不适宜作簇头,此时概率为 0.

### 3.4 极小簇分布式合并

簇头在建立阶段广播自己的簇头消息(CH Message),其后簇头接收到节点的加入信息(Join Message),判断自己是否是极小簇.如果判定自己为极小簇,就应向邻居簇发送合并信息(Merge Message),若得到邻居簇的响应,那么就将自己和所属节点信息发送给邻居簇头,自己则成为辅簇头;若没有得到响应,则表示附近没有邻居簇或者邻居簇也是极小簇,正在等待响应,则按照优化结果  $k$  值计算节点的时间表.设节点工作时间为  $t$ ,一个簇成员数为  $k$  的极小簇中的节点工作间隔时间是  $(k+1)t$ , ( $1 \leq k \leq 7$ ),将其修正为  $20t$  (成员数大于 20 时簇头能耗趋于稳定),那么簇头可以在每个间隔期间休眠  $(20t - kt)/k$  时间.通过这种方式,在建立阶段避免网络中出现多次合并的情况.关于辅簇头的作用,主要是收集该簇中的节点数据,并发送给簇头.簇头在分配时间片时,根据辅簇头的节点数分配,若存在  $m$  个节点,则分配  $m+1$  个时间片,其中  $m$  个时间片用于节点采集数据,1 个时间片用于辅簇头发送数据给簇头.

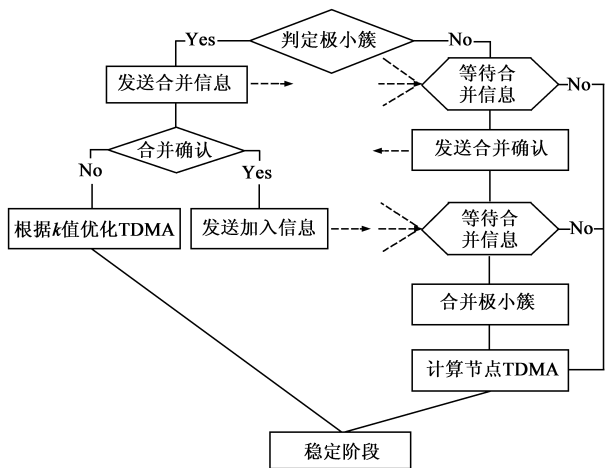


图2 合并极小簇流程图

## 4 实验仿真

### 4.1 实验环境建立

为了分析改进后的算法有效性,使用的仿真环境为随机分布在  $100\text{m} \times 100\text{m}$  范围内的 100 个节点,每个节点的初始能量为 2J.并在该环境中对 LEACH、LEACH-C<sup>[13]</sup> 算法的存活节点数、平均每轮能量消耗进行比较.其中 LEACH-C 是 LEACH 的一种改进算法,它采用集中式算法,在成簇阶段各个节点将自身位置信息和剩余

能量汇报给 BS,由 BS 根据各节点剩余能量占网络总能量的比例作为簇首概率的基准进行优化运算,选出合适的簇首,再向全网广播.LEACH-C 虽然可以改善簇首的分布,但是它需要知道节点的位置(对于廉价的节点,不容易实现),并且要求每次选举的时候,BS 需要知道全网的总剩余能量,并进行集中的运算,不能分布式实现,影响了网络的扩展性.所有试验仿真参数在 3.2.4 节表 1 中已列出.为了对算法进行比较,所有算法均采用相同的节点分布.

### 4.2 结果与分析

图 3 显示了仿真时间内各算法存活节点的总数.存活节点为 0 的时刻定义为网络的最大生存时间.由图中可以看出,改进后的算法与 LEACH 和 LEACH-C 相比,出现节点死亡的时间和节点全部死亡的时间都晚得多,体现了改进算法网络中的节点不仅能耗低而且均衡性更好.

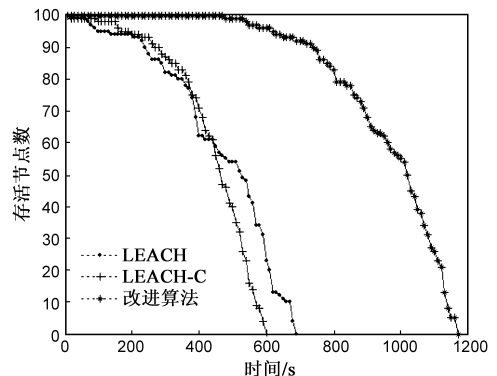


图3 存活节点数仿真结果

## 5 结束语

无线传感器网络分簇算法采用节点轮换作为簇头的方法来平衡整个网络的能量和负载,避免簇头由于负载过重而能量消耗过快.现有的分簇算法没有考虑在分簇中出现极小簇和簇头猝死情况下对网络能量平衡和负载平衡的影响,本文基于此提出通过簇成员门限和分布式合并极小簇的方法来平衡网络能量使用;并通过能量估计的方法使簇头在稳定阶段猝死后,簇内节点能停止工作,避免能量浪费;通过能量估计的方法改进了簇头选择标准,使节点成为簇头更合理.仿真结果表明,改进后的算法可以有效平衡能量负载,降低极小簇过快消耗能量的负面影响从而充分延长网络寿命.

### 参考文献

- [1] K Kredo, II and P Mohapatra. Medium access control in wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2007, 51(4): 961 - 994.
- [2] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy effi-

- cient communication protocol for wireless microsensor networks [A]. Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences[C]. Los Alamitos: IEEE, 2000. 3005 – 3014.
- [3] Bandyopadhyay S, Coyle E J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks[A]. Proceedings-IEEE Infocom[C]. San Francisco: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003. 1713 – 1723.
- [4] Younis, S Fahamy. Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach[J]. IEEE Infocom, 2004, 1: 629 – 640.
- [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.  
QING Li, ZHU Qing-Xin, WANG Ming-Wen. A distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(3): 481 – 489. (in Chinese)
- [6] Fatma Bouabdallah, Nizar Bouabdallah, Raouf Boutaba. On balancing energy consumption in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(6): 2909 – 2924.
- [7] Kwan-Wu Chin, PairWise. A time hopping medium access control protocol for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(4): 1898 – 1906.
- [8] 余勇昌, 韦岗. 无线传感器网络中基于 PEGASIS 协议的改进算法[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1309 – 1313.  
YU Yong-chang, WEI Gang. An improved PEGASIS algorithm in wireless sensor network[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1309 – 1313. (in Chinese)
- [9] 林恺, 赵海, 等. 一种基于能量预测的无线传感器网络分簇算法[J]. 电子学报, 2008, 36(4): 824 – 828.  
LIN Kai, ZHAO Hai, et al. A clustering hierarchy arithmetic based on energy prediction for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(4): 824 – 828. (in Chinese)
- [10] 蹇强, 龚正虎, 等. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展[J]. 软件学报, 2008, 19(2): 389 – 403.  
JIAN Qiang, GONG Zheng-Hu, et al. Overview of MAC protocols in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2008, 19(2): 389 – 403. (in Chinese)
- [11] Nizar Bouabdallah, et al. Continuous monitoring using event-driven reporting for cluster-based wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3460 – 3479.
- [12] Ivan Howitt, et al. Extended energy model for the low RateW-PAN[A]. 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, MASS 2005[C]. Washington: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2005. 315 – 322.
- [13] W B Heinzelman, et al. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 – 670.

#### 作者简介



吕涛 男, 1979 年出生于四川省绵阳市。讲师、博士研究生。主要研究方向为无线传感器网络及其应用。

E-mail: lvtao@swust.edu.cn



朱清新 男, 1954 年出生于四川省成都市。现为电子科技大学计算机科学与工程学院教授、博士生导师。主要研究领域为数字媒体, 物联网, 计算运筹学, 信息安全。作为项目负责人主持国家和省部级科研项目十余项, 国内外发表论文 80 余篇, 出版专著 3 本。

E-mail: qxzhu@uestc.edu.cn