

# 一种基于能量预测的无线传感器网络分簇算法

林 恺, 赵 海, 尹震宇, 罗玘玘  
(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110004)

**摘要:** 为了解决无线传感器网络能量有效利用的问题, 提出一种利用能量预测选择簇头节点的分簇算法: CHEP 利用文中建立的传感器节点工作状态转换模型, CHEP 算法将所得的剩余能量预测参数作为考虑因素引入阈值的计算, 从而使高剩余能量且能耗较慢的节点能够在每一轮中被优先选为簇头节点. 通过仿真实验, 将 CHEP 与其他分簇算法进行分析和比较, 验证了 CHEP 算法中能量预测机制以及阈值改进的有效性. 结果表明 CHEP 能够更好地平衡网络负载, 延长网络寿命.

**关键词:** 能量预测; 簇头节点选择; 状态转换; 分簇算法; 无线传感器网络

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2008) 04 0824 05

## A Clustering Hierarchy Arithmetic Based on Energy Prediction for Wireless Sensor Networks

LIN Kai, ZHAO Hai, YIN Zhen Yu, LUO Ding-ding

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

**Abstract:** To solve the energy efficiency problem in the wireless sensor networks (WSNs), a clustering hierarchy arithmetic based on energy prediction (CHEP) was presented. Taking use of the sensor nodes state diversion module, the proposed remaining energy was added as a considered parameter in calculating the threshold in CHEP. Hence it can guarantee the node with high remaining energy be chosen as the cluster head node in priority in each round. From the experiments, we analyzed the performance of CHEP and compared it with other cluster-based routing arithmetics where there was no prediction used in selecting the cluster head node. It was satisfied that the arithmetic of CHEP could prove the validity of energy prediction mechanism and threshold amended. Simulation results show that the process of CHEP can balance the energy load in the network and prolong the lifetime of the network.

**Key words:** energy prediction; cluster head node selection; state diversion; clustering hierarchy arithmetic; wireless sensor networks

### 1 引言

低功耗无线电通信技术、嵌入式计算技术和微型传感器等技术的飞速发展和日益成熟, 使得大量低成本的微型传感器可以通过无线链路自组织成为无线传感器网络(WSN)<sup>[1]</sup>. 虽然 WSN 与现有的无线自组织网络有许多相似之处, 但同时也存在很大差别<sup>[2,3]</sup>. 其中最显著的便是由于 WSN 节点一般采取随机一次性部署的方式<sup>[4-6]</sup>, 不同于无线自组织网络节点通常具有持续的能量供应, 因而其应用受到能源供应的限制, WSN 中的每个操作、计算或者相互间的通信都会消耗传感器节点的电池能量. 一旦某些节点特别是一些关键节点电池的资

源耗尽, 它们便会失效, 从而影响到整个 WSN 的连通性以及整个网络监测任务的顺利进行.

同时, 由于无线传感器网络不依赖于固定的基础设施, 当节点数目比较大, 网络规模太大的时候, 高效率的路由算法显得尤为重要. 现在国内外流行的一种解决办法就是采用分级结构将网络划分成若干个簇, 在分簇的基础上进行路由. 在这种结构中每个簇由一个簇头节点和多个簇内成员节点组成, 簇内成员节点负责数据的采集, 并将采集到的数据传送给它所属的簇的簇头, 簇头节点对簇内成员传送过来的数据进行数据融合处理, 然后将融合后的数据传送给远方的基站或观察者; 或者这些簇头节点再形成更高一级的网络, 重新进行簇的划

分,簇头选举,簇的数据传送等等.这一模式的不断重复形成簇的分级,最高级别的簇头节点直接向基站汇报.事实证明,这种分簇结构有利于无线传感器网络平衡能源负载,且在网络中进行数据融合非常便利.

LEACH<sup>[7]</sup>算法是无线传感器网络分簇算法的典型代表,其他如 TEEN、APTEEN、PEGASIS 等算法都由此而来.由于簇头节点所承担任务远多于簇内成员节点,所以必须由簇内成员轮流当选簇头节点以避免簇头节点因能耗过多而提早失效<sup>[8-10]</sup>.现有的分簇算法在簇头轮换时仅依靠随机性进行能源负载的平衡,没有充分考虑到备选节点的剩余能量,会导致某些节点过快耗尽电池能量而缩短系统寿命,簇头节点的选举方式有待于改进.

针对此问题,本文提出了一种基于能量预测参数的分簇算法,算法建立了节点工作状态转换模型并由此得到能量预测参数  $\Delta E$ ,对随机性簇头选择的阈值进行改进,使簇头的选择更加合理.

## 2 LEACH 算法

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 算法由 MIT 的 Heinzelman 等人提出的,它是第一种基于分簇结构和分层技术的无线传感器网络算法,在无线传感器网络路由算法中占有重要地位,LEACH 的操作分成“轮”(Round)来进行,每一轮具有两个运行阶段:簇建立阶段(Setup Phase)和稳定运行阶段(Steady-state Phase).为减少算法开销,稳定运行阶段的持续时间要长于簇建立阶段,其过程如图所示.

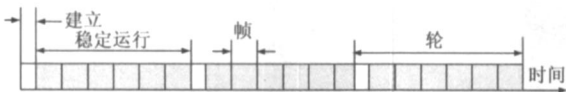


图 1 LEACH 算法的运作过程

在簇建立阶段,将所有节点划分为若干簇,每个簇随机选举一个簇头.通过随机性确保簇头与 Sink 节点之间数据传输的高能耗成本均匀地分摊到所有传感器节点.具体产生机制是:每个传感器节点生成一个(0,1)之间的随机数,如果该数小于阈值  $T$ ,则选该节点为簇头. $T$ 的计算方法如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P[r \bmod (1 - P)]}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (1)$$

式中  $P$  是网络中簇头数与总节点数的百分比; $r$  是当前的选举轮数; $G$  是最近  $1/P$  轮没有当选簇头的节点集.一旦簇头节点被选定,它们便主动向所有节点广播这一消息.依据接收信号的强度,节点选择它所加入的簇,并告知相应的簇头节点.基于时分复用(TDMA)的方式,簇头为其簇内的每个成员分配通信时隙.在稳定运行阶段,簇内成员节点持续采集监测数据,传与簇

头节点,进行必要的融合处理之后,发送到 sink 节点,这种工作模式有利于减小网络中的数据量.持续一段时间以后,整个网络进入下一轮工作周期,重新选择簇头节点.

LEACH 算法对于簇头节点的选取,并未考虑到节点的剩余电池能量,这样的负载均衡策略是不完备的.按照一个预先定义的概率随机地决定节点的“角色”,尽管一个节点在一个工作周期中只有一次机会成为簇头,但是在 LEACH 的下一工作周期中,所有的节点还是具有同样的机会成为簇头,那些电池能量已经在警戒线以下的节点会因为成为簇头而很快地耗尽电池能量.

## 3 能量预测模型

无线传感器网络,节点的能量消耗取决于不同的工作方式.无线传感器节点消耗能量的模块包括无线传感器模块、处理器模块和无线通信模块.图 2 是 Deborah Estrin 在 Mobicom 2002 会议上<sup>[11]</sup>的特邀报告中所描述的传感器节点各部分能量消耗情况.

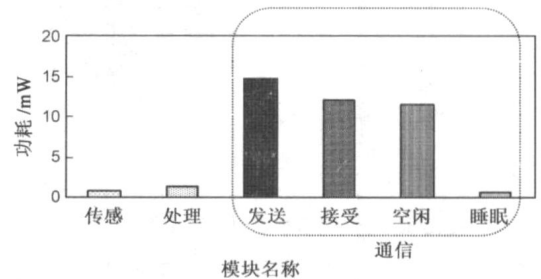


图 2 节点能量消耗

传感器节点通过工作状态的转换使通信模块在没有任务时尽量进入睡眠状态,以此降低节点的能耗.这种节点工作状态的转换对于 WSN 是有效也是必需的,同时也增加了预测能量消耗的难度.为此,本文采用通过马尔可夫链预测节点剩余能量的数学模型.能量预测模型中定义了节点状态转移的概念,即传感器节点工作模式的相互转换,并以此进行预测.利用此模型,传感器节点可以预测出自己在一段时间后的剩余能量.

在此预测模型中,我们利用马尔可夫链对每个传感器节点的运作方式进行模拟.这样,节点的运作方式通过马尔可夫链<sup>[12]</sup>的不同状态呈现出来,如果一个节点有  $M$  种运作方式,则可通过马尔可夫链的  $M$  种状态进行模拟.使用这种模型,每个传感器节点都由一系列随机数  $X_0, X_1, X_2, \dots$  代表其在每个时期所处的状态.如果  $X_n = i$ ,则节点在第  $n$  个 time-step 处于状态  $i$  (每个 time-step 节点只能有一个状态).假如节点在某个 time-step 处于状态  $i$ ,则节点会以某个固定的概率  $P_{ij}$ <sup>[13]</sup>,在下一个 time-step 转为状态  $j$ ,这个概率定义为传感器节点的一步状态转移概率<sup>[5]</sup>,可通过  $P_{ij} = P\{X_{n+1} = j | X_n = i\}$  来

表示. 进一步可以定义  $N$  步转移概率  $P_{ij}^{(n)}$ , 一个在状态  $i$  的节点在  $N$  次状态转换后, 转为状态  $j$  的概率:  $P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=1}^M P_{ik}^{(r)} P_{kj}^{(n-r)}$ , 对于任何的  $0 < r < n$ .

得知传感器节点的  $P_{ij}^{(n)}$  和节点的初始状态, 就可以使用这些转移概率来预测节点的能量下降. 完成这个预测首先是要计算出接下来的  $T$  个 time step 内, 一个节点会处在状态  $s$  的 time step 数. 如果节点处在状态  $i$ , 则一个节点在接下来  $T$  个 time step 内处在状态  $s$  的数目可计算为  $\sum_{t=1}^T P_{is}^{(t)}$ . 设  $E_s$  是一个节点停留在状态  $s$  一个 time step 所消耗的能量, 这样在接下来的  $T$  个 time steps 内所预计出消耗的能量总量  $E^T(i)$  [14]:

$$E^T = \sum_{s=1}^M \left( \sum_{t=1}^T P_{is}^{(t)} \right) \times E_s \quad (2)$$

利用式(1), 每个传感器节点可以计算出自己的能量消耗率参数  $\Delta E$ :  $\Delta E = E^T / T$ ,  $\Delta E$  代表接下来的  $T$  个 time step 内, 平均每个 time step 的节点消耗能量. 由此, 通过  $\Delta E$ , 传感器节点就可以预测出自己在接下来的  $T$  时间内的能量消耗. 有两个因素影响运用  $\Delta E$  进行预测的准确性: 一是所建立转移概率矩阵的正确性; 二是各状态能耗计算的准确性.

### 4 CHEP 算法

#### 4.1 非簇头传感器节点状态转换模型

为在 CHEP 算法中有效进行能量预测, 本文提出一种非簇头传感器节点的状态转换模型, 模型中节点共有 5 种工作状态. 休眠状态: 传感器模块关闭, 通信模块睡眠, 能量消耗最小; 感知状态: 传感器模块开启, 通信模块睡眠, 节点仅感知事件发生; 侦听状态: 传感器模块开启, 通信模块处于空闲态; 接收状态: 传感器模块开启, 通信模块接收; 发送状态: 传感器模块开启, 通信模块发送.

工作状态的转换发生在当前 time step 结束时. 图 3 所示模型中状态之间转换关系如下:

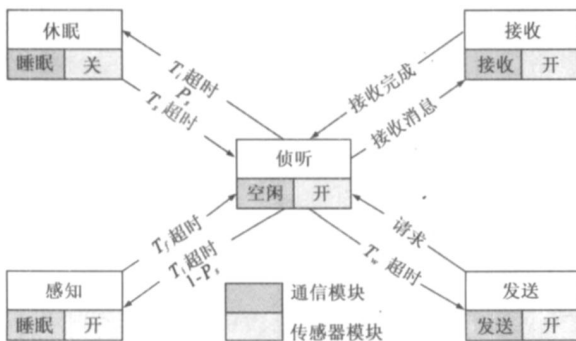


图 3 状态转换模型

(1) 休眠态与侦听态: 处于休眠态的传感器节点设

置定时器  $T_s$ , 当定时器超时后, 节点由休眠态进入侦听态; 处于侦听态的节点设置定时器  $T_i$ , 此时节点的通信模块处于空闲状态, 通过监听信道检查是否有数据发送给自己, 当定时器超时后, 节点由侦听态以概率  $P_s$  进入休眠态.

(2) 感知态与侦听态: 处于感知态的节点设置定时器  $T_r$ , 感知事件发生, 并将监测数据保存在本地存储器. 当定时器超时后, 节点由感知态进入侦听态; 处于侦听态的节点在定时器  $T_i$  超时后, 以概率  $1 - P_s$  进入感知态.

(3) 侦听态与接收态: 处于侦听态的节点除感知事件外, 其通信模块在定时器  $T_i$  超时前, 如果监听到有消息发送给自己, 节点进入接收态; 当消息接收完毕且不需要发送消息, 节点立刻由接收态进入侦听态, 定时器  $T_i$  重新计时.

(4) 侦听态与发送态: 在簇建立阶段, 非簇头传感器节点向簇头发送入簇信息后, 节点由发送态进入侦听态并设立定时器  $T_w$ , 监测确认消息的到来. 如果  $T_w$  超时, 仍然没有收到确认消息, 节点再次进入发送态, 重新发送入簇信息, 节点在重发  $k$  次后停止发送, 停留在侦听态, 定时器  $T_i$  重新计时. 簇运行阶段, 簇内成员节点在自己的通信时隙内, 处于侦听态的节点在定时器  $T_i$  超时前, 如果需要向簇头节点发送信息, 节点由侦听态进入发送态.

(5) 接收态与发送态: 传感器节点在簇建立阶段如接收到新簇头发来的消息, 则由接收态进入发送态, 向所要加入的簇头发送入簇消息.

基于此非簇头传感器节点状态转换模型, CHEP 算法中的非簇头节点可以实现对自己的能耗预测. 需要指出的是, 簇头节点的工作方式于簇内成员节点不同, 但由于簇头节点能耗较大且所处工作时间相对传感器节点的生存时间来说很短, 所以本文没有设计簇头节点的工作转换模型, 其处理方式详见 4.2 节.

#### 4.2 簇的组建和运作

考虑到 LEACH 中公式(1)存在的不足, CHEP 中将对剩余的预测作为簇头节点选择的重要参数. 修改后的阈值计算公式如下:

$$T_e(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P[r \bmod (1 - P)]} \left[ \frac{E_p}{E_{n, \max}} \right], & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (3)$$

$$E_p = E_{n, \text{current}} - E^r \quad (4)$$

其中  $E_p$  是一个传感器节点作为簇内节点经过一轮时间后的剩余能量, 由公式(4)计算得出;  $E^r$  是每一轮的能耗预测, 由公式(2)中  $T$  等于一轮时间得出,  $E_{n, \text{current}}$  是某轮开始时传感器节点的能量,  $E_{n, \text{max}}$  是传感器节点

的初始能量. 只有近  $1/P$  轮没有被选的节点才有成为簇头节点的可能. 为防止预测误差带来的影响, 需要设定一个误差门限  $d$ . 当某轮结束时传感器节点发现其剩余能量真实值和本轮开始时的预测值误差超过  $d$ , 则重新计算  $\Delta E$ . 通过分析可知, 将剩余能量预测参数  $E_p$  引入阈值会使具有较高剩余能量且耗能较慢的节点当选簇头节点的可能性大大增加, 平衡了网络的能量消耗. 值得注意的一点是, 由于一个传感器节点担任簇头的时间远少于担任簇内成员节点的时间, 且作为簇头的能耗远高于作为簇内成员节点, CHEP 算法中如果一个节点成为簇头节点, 其工作状态会改变, 在其再次转为非簇头节点时重新计算能量消耗率参数  $\Delta E$ . 这在保证了预测准确性的同时, 也避免了因节点状态转换概率的计算公式中  $n$  值较大造成的计算量庞大.

簇头节点选取过程中, 节点生成  $(0, 1)$  之间的随机数, 如果该数小于自己的阈值  $T_c(n)$ , 且没有收到其他节点当选簇头的消息则发送广播告知其他节点自己当选簇头. 其余节点根据收到簇头节点消息信号的强弱, 选择信号较强的簇头加入该簇. 进入稳定运行阶段后, 簇内成员节点持续采集监测数据, 传与簇头节点后发送到 sink 节点. 持续一段时间以后, 整个网络进入下一轮工作周期, 重新选择簇头节点.

## 5 CHEP 的仿真和分析

### 5.1 实验环境建立

为了分析 CHEP 的有效性, 利用 ns-2 模拟了  $100 \times 100$  米范围内采用 CHEP 算法的 100 个传感器节点运行状况, 并在相同的实验环境中对 CHEP、Static clustering、LEACH、LEACH-F<sup>[15]</sup> 算法的存活节点数、能量消耗的进行比较. 其中 LEACH-F 是 LEACH 的一种改进算法, 簇建立一次后簇内节点将不再变化, 该算法简化了每轮的簇建立过程, 但所选簇头的位置出现在簇边缘的机率高. 本文中实验中事件的发生符合  $\lambda = 0.2$  的泊松分布, 每个节点的初始能量为 2J, 每轮持续 20s. 每个节点根据其工作情况建立自身的状态转移矩阵. 文中使用的参数见表 1.

表 1 仿真参数表

参数	值
$\lambda$	0.2
分簇数目	5
$P_s$	0.7
睡眠时间	10s
节点初始能量	2J
通信范围	20m
Time step	0.1s

### 5.2 结果与分析

图 4 中的 correct 表示实验中一个传感器节点能量随时间下降的真实情况, 仿真结果表明在 900s 内 CHEP

算法中由公式(4) 预测的剩余能量值非常接近于真实值, 在 45 轮内仅有 3 次误差超过 3%, 该值作为参数引入阈值的合理性得到保证.

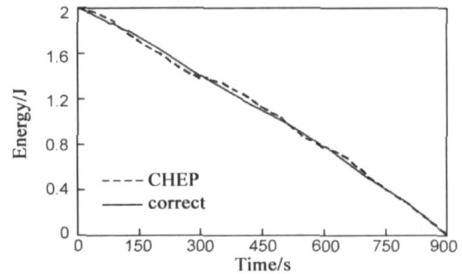


图 4 仿真中的能量消耗

图 5 描述了不同分簇算法下网络能源的耗散情况, 可以看出, 随着时间的流逝, Static clustering 由于采用固定簇头的机制, 在簇头能量耗光后, 网络虽剩余大量能量, 但因无法工作而失效. CHEP、LEACH、LEACH-F 耗光了所有的网络能量, 它们采用的簇头轮换机制使得这些算法不会出现 Static clustering 因簇头耗光能量后其簇随即失效, 以致大部分网络能源无法得以利用的情况. 特别地, 与 LEACH、LEACH-F 相比, CHEP 算法在网络总能源相同的情况下, 网络能耗率较低, 运行的时间较长.

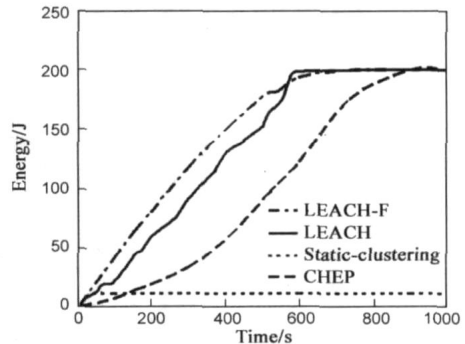


图 5 总能量消耗情况

图 6 显示了仿真时间内各算法存活节点的总数. 存活节点为零的时刻定义为网络的最大生存时间. 由图中可以看出, CHEP 算法与 LEACH、LEACH-F 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, 而且这两个时间差很短, 体现出采用 CHEP 算法, 网络中节点

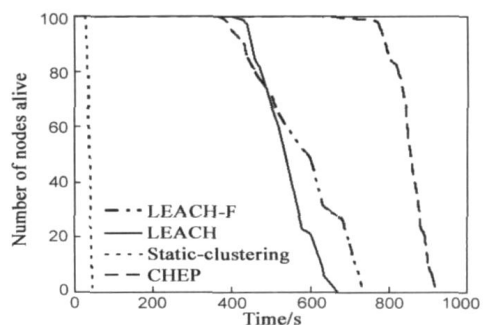


图 6 存活节点数

的不仅能耗较低而且均衡性更好。

## 6 结束语

无线传感器网络分簇算法采用节点轮换当选簇头节点的方式,以避免簇头节点由于负载过多而快速消耗完能量。现有的分簇算法在簇头轮换时没有充分考虑到备选节点的剩余能量,其随机选择性不足以保证负载均衡和抑制节点能量消耗过快,不能更有效的延长网络寿命。为此,本文提出一种基于能量预测的分簇算法 CHEP。CHEP 算法中,基于非簇头传感器状态转换模型,传感器节点利用能量消耗  $\Delta E$  可以预测得出每轮过后的剩余能量,并将其作为参数引入阈值  $T_e(n)$  的计算。 $T_e(n)$  的改进使高剩余能量且能耗较慢的节点能够在每一轮中被优先选为簇头节点。仿真结果表明 CHEP 可以有效地平衡能量负载,降低簇头节点过快消耗能量的负面影响从而充分地延长网络寿命。

### 参考文献:

- [1] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam. A survey on sensor networks[J]. In IEEE Communication Magazine, 2002, 40(8): 102–114.
- [2] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717–1727. Li Jianzhong, Li Jinbao, Shi Shengfei. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks[J]. Journal of software, 2003, 14(10): 1717–1727. (in Chinese)
- [3] Mhatre V, Rosenberg C. Design guideline for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation[J]. Ad Hoc Networks Journal, 2004, 1(2): 45–63.
- [4] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282–1291. Ren Fengyuan, Huang Haining, Lin Chuang. Wireless sensor networks[J]. Journal of software, 2003, 14(7): 1282–1291. (in Chinese)
- [5] E Shih, et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy efficient wireless sensor networks[A]. in Proc of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. 2001. 272–286.
- [6] S Singh, M Woo, C Raghavendra. Power aware routing in mobile ad hoc networks[A]. in Proc of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98)[C]. 1998. 181–190.
- [7] W Heizelman, A Chandrakasan, H Balakrishnan. Energy efficient routing protocols for wireless microsensor networks[A]. In Proc 33rd Hawaii International Conferences on System Sciences(HICSS'00)[C]. 2000.
- [8] Wendi B Heizelman, Anantha P Chandrakasan, Hari Balakrishnan. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE transaction on wireless communications, 2002, 1(4): 660–670.
- [9] C Lin, M Gerla. Adaptive clustering for mobile wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997. 15(7): 1265–1275.
- [10] Zhao L, Hong X, Liang Q. Energy-efficient self organization for wireless sensor networks: A fully distributed approach [A]. Proceedings of IEEE GLOBECOM 2004[C], Boston: IEEE Press, 2004. 1345–1351.
- [11] Estrin D Tutorial. Wireless Sensor Networks. Part IV: Sensor Network Protocols. MobiCom[OL]. 2002. <http://www-bisac.eecs.berkeley.edu>.
- [12] Raquel A F Min, Max do Val Machado, Antonio A F Loureiro, et al. Prediction based energy map for wireless sensor networks[OL]. [www.elsevier.com/locate/adhoc](http://www.elsevier.com/locate/adhoc), 2004.
- [13] S Ross. A First, Course in Probability[D]. Fifth ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1998.
- [14] Raquel A F Min, Antonio A F Loureiro, Badri Nath, et al. The distinctive design characteristic of a wireless sensor network: the energy map[OL]. [www.elsevier.com/locate/comcom](http://www.elsevier.com/locate/comcom), 2004.
- [15] Wendi Beth Heizelman. Application Specific Protocol Architectures for Wireless Networks[D]. Massachusetts Institute of Technology, June 2000.

### 作者简介:

林 恺 男, 1979 年生于辽宁省大连市, 博士研究生。主要研究方向为无线通信、计算机网络等。E-mail: lindeduoduo@vip.sina.com

赵 海 男, 1959 年生于辽宁省沈阳市, 教授, 博士生导师。主要研究方向为计算机网络、信息融合。

尹震宇 男, 1979 年生于辽宁省沈阳市, 博士研究生。主要研究方向无线传感器网络等。

罗玎玎 男, 1977 年生于辽宁省铁岭市, 博士研究生。主要研究方向无线传感器网络、操作系统等。