

# 传感器网络中的节能参与度模型

赵保华, 张 炜, 李 婧, 屈玉贵, 张英堂  
(中国科学技术大学计算机科学技术系, 安徽合肥 230027)

**摘要:** 为提出节能的传感器网络协议, 本文研究了节点参与度模型. 我们细化了无线传感器网络中的协议层次, 将网络层分为邻域发现, 动态参与度模型和路由协议. 我们具体化了邻域发现协议, 引入随机参数重构了参与度模型, 给出了相应的网络启动方式并使用数学分析、模拟程序验证了此模型.

**关键词:** 无线传感器网络; 邻域发现; 动态参与度模型; 丢包率; 负载平衡

**中图分类号:** TP393.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 11-1994-05

## Energy-Efficient Joining Model in Wireless Sensor Networks

ZHAO Bao hua, ZHANG Wei, LI Jing, QU Yur-gui, ZHANG Ying tang

(Department of Computer Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

**Abstract:** To bring out a practical energy efficient protocol of Wireless Sensor Network (WSN), this paper studies the Sensor Node (SN) joining model. First, we refine WSN layers and divide the network layer into Neighbor Discovering (ND) layer, Dynamic Joining Model (DJM) and routing layer. Moreover, we discuss the ND mechanism in detail, reconstruct the DJM with random parameters, provide the corresponding network booting style and verify the whole model above using mathematic analyses, simulations and a realistic test bed.

**Key words:** wireless sensor network (WSN); neighbor discovering (ND); dynamic joining model (DJM); packet loss percent (PLP); load balance

## 1 引言

随着微电子技术的发展, 无线传感器网络 (WSN) 已经成为当今研究的热点. 由于传感器使用电池供电, 节能研究是一个重要课题. 为研究此问题, 本文对 WSN 做以下假设:

- ① 传感器节点 (SN) 使用电池供电, 电池能量有限;
- ② WSN 采用冗余设计, 节点密集分布;
- ③ SN 无法手动放置, 节点处于三维空间中.
- ④ WSN 所处环境可能在变化, 即任意两个 SN 间的通讯质量可能发生变化.

基于以上假设, 我们把 WSN 中的节能研究分为四部分: 网络启动, 节点动态参与, 路由协议, 节点结构. 现阶段针对路由协议的研究已有很多工作, 影响较大的有 LEACH<sup>[1]</sup>, LEACH2<sup>[2]</sup>, TEEN<sup>[3]</sup>和 PEGAGIS<sup>[4]</sup>等, 但它们都是理论上的研究, 不能成为实际 WSN 协议. 而关于网络启动和参与度模型的研究较少, 只有 ASCENT 中将参与度引入 WSN 并在实际 WSN 中结合 flooding 路由协议对其参与度模型进行了实现<sup>[5]</sup>.

本文研究了节点的参与度模型和网络启动问题. 首先, 本文细化了 WSN 中的协议层次, 将网络层分为邻域发现 (Neighbor Discovering, ND), 动态参与度模型 (Dynamic Joining Model, DJM) 和路由协议并提出了各个层次的设计要求. 然后, 以响应时间和能量损耗为标准实现了 ND 协议. 最终, 我们分析了文献[5]中的 DJM 模型并以丢包率 (packet loss, PL)、邻居数、能量级别为标准重构了该模型. 其中, 丢包率为必选标准, 其它两个是可选标准. 本文把相应的路由协议作为将来工作.

## 2 WSN 参考模型

WSN 由于其节能要求, 应该具有和常规网络不同的层次结构. 本文对 WSN 协议建立模型如图 1.

其中, 本文主要研究 DJM 层及其支撑协议 ND 层. 首先, 我们简要介绍各个层次的功能. 物理层负责感知周围环境信息、发送和接收数据包. 该层实现了节点的三种状态: 节点处于 sleep 状态时天线关闭; 而在 idle 和 active 状态时天线都保持工作状态, 远大于 sleep 状态耗能. MAC 层的主要功能是尽

收稿日期: 2004-12-17; 修回日期: 2005-10-29

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目 (No. 90104010); 国家自然科学基金 (No. 60241004, 60602016); 国家 863 计划项目 (No. 2001AA121016); 国家 973 计划项目 (No. 2003CB314801); 网络与交换技术国家重点实验室开放课题

量避免信号干扰和冲突以保证无干扰传输. 文献[6]中 Sensor-MAC 协议已基本实现此功能.

网络层完成将各 SN 的数据包有效地传送到基站 (Base Station, BS), 以及将 BS 的控制命令发送到各 SN 的功能. 我们将该层细分为 ND、DJM 和路由协议等几部分. ND、DJM 在第 3 节有详细介绍. 路由协议可以依据平面型和层次型、集中式和分布式、静态和动态等标准划分. 路由策略应综合节约能量、延长网络寿命、提供所需服务质量等多种因素. 本文所提参考模型是可扩展的, 与路由协议同层除了节点定位、覆盖度之外还可以根据实际应用添加其它协议.

应用层是 WSN 参考模型的顶层, 为不同的用户提供特定类型的服务. 其中, 任务调度是该层基本功能. 依据不同的应用背景, 如跟踪和监测, 该层采取不同的调度策略并为用户提供适当的访问接口.

应用层是 WSN 参考模型的顶层, 为不同的用户提供特定类型的服务. 其中, 任务调度是该层基本功能. 依据不同的应用背景, 如跟踪和监测, 该层采取不同的调度策略并为用户提供适当的访问接口.

| 应用层   |     |      |
|-------|-----|------|
| 定位    | ... | 路由协议 |
| DJM   |     |      |
| ND    |     |      |
| MAC 层 |     |      |
| 物理层   |     |      |

图 1 WSN 参考模型

### 3 DJM 协议及其支撑 ND 协议

#### 3.1 ND 协议实现

ND 协议收集和更新节点和链路状态信息, 采取定期查询方式以保证更新的实时性. 每个节点发送的数据包分为两类: ND 消息 (ND Message) 和应用数据消息 (Application Data Message). 消息格式见附录表 2, ND 序列号记录该节点发送的 ND Message 数, 应用数据序列号记录此节点向目标节点发送的应用数据包数. ND Message 广播周期  $T_{nd}$  是节点更新自身状态信息的时间间隔. 处于 active 状态的节点每隔  $T_{nd}$  时间广播一次自身状态信息 (ND Message). 第  $i$  个邻居的丢包率 (Neighbor Loss,  $NL_i$ ) 是某节点  $n_0$  一段时间内接收第  $i$  个邻居所发数据的平均丢包率, 节点每隔  $\theta \cdot T_{nd}$  时间更新  $NL_i$  值, 设定网络初始时  $NL_i$  为 1. 其表达式为:

$$NL_i = \frac{\text{成功接收到的 } i \text{ 邻居的数据量}}{i \text{ 邻居向 } n_0 \text{ 实际发送的数据量}}, \text{ 每隔 } \theta \cdot T_{nd} (\theta \in N)$$

设  $L_j^a$  为  $i$  邻居发送的第  $j$  个应用数据包长度,  $L_c$  为  $i$  邻居发送的 ND Message 长度.  $N_c^l$  是  $i$  邻居发送的 ND Message 数目,  $N_c$  是  $n_0$  成功接收到的 ND Message 数目.  $N_a^l$  是  $i$  邻居发送的应用数据包数量,  $N_a$  是  $n_0$  成功接收到的应用数据包数量.  $NL_i$  的公式为:

$$NL_i = \frac{N_c^l \cdot L_c + \sum_{j=1}^{N_c^l} L_j^a}{N_c^l \cdot L_c + \sum_{j=1}^{N_c^l} L_j^a}, \text{ 每隔 } \theta \cdot T_{nd} (\theta \in N) \quad (1)$$

邻居的约定如下: 若  $n_1$  是  $n_0$  的邻居, 则  $n_0$  接收  $n_1$  消息的  $NL_1$  要低于邻居丢包率门限  $Th_{NL}$ . 当  $NL_1 > Th_{NL}$  时,  $n_1$  不再是  $n_0$  的邻居,  $n_0$  将其从邻居表中删除.  $Th_{NL}$  与周围 active 节点个数  $N$  成反比. 邻居数  $N$  越多, 节点间通讯信号相互干扰越大, 造成丢包率  $NL_i$  越大<sup>[5]</sup>. 我们定义  $Th_{NL}$  公式为:

$$Th_{NL} = 1 - \frac{1}{N^{a0}} \quad (2)$$

考虑到节点选择的下一跳目标通常是链路代价较小的邻居, 因此定义节点  $n_0$  的  $pl$  为前  $m$  个链路代价较小邻居  $NL$  的平均值并将其作为节点  $n_0$  通讯质量的衡量标准.  $pl$  公式为:

$$pl = \frac{NL_1 + NL_2 + \dots + NL_m}{m}, m = 1, 2, \dots \text{ 且 } m \leq n_0 \text{ 的邻居数} \quad (3)$$

链路代价 (link cost,  $lc$ ) 体现两节点间通讯消耗的能量代价. 因为实际传输质量不仅与距离有关<sup>[7]</sup>, 所以我们将节点天线的平均接收信号强弱 ( $rssi$ ) 作为  $lc$ , 它直接反映了节点间的通讯代价.  $rssi$  公式为:

$$rssi = \frac{RSSI_1 + RSSI_2 + \dots + RSSI_n}{n}, \text{ 每隔 } \theta \cdot T_{nd} (\theta \in N) \quad (4)$$

其中,  $RSSI_i$  是节点在  $\theta \cdot T_{nd}$  时间里收到的第  $i$  个消息时的  $rssi$  值,  $n$  表示在  $\theta \cdot T_{nd}$  时间内共收到  $n$  个消息. ND 协议工作过程如下: 节点进入 active 状态后就开始运行 ND 协议, 以  $T_{nd}$  为周期广播 ND Message. 同时, 该节点接收邻居发送的 ND Message 和 Application Data Message, 记录成功接收邻居发送消息的数目  $N_c^l$  和  $N_a^l$  以及  $RSSI_i$  值. 由以上信息计算出邻居表, 该表包括邻居节点标识、 $pl$  和  $lc$  三项. 当网络环境变化时, 相关 SN 的邻居信息被实时更新, 为上层决策提供了可靠依据.

#### 3.2 DJM 实现

##### 3.2.1 DJM 模型状态转换

DJM 是一种动态平衡模型, 它实时调节网络的连通度和传输质量. 传感器节点密集分布时, 只需部分节点保持 active 状态负责感知、发送和接收信息. 部分处于 idle 状态的节点通过接收 active 邻居广播的 ND Message 计算出自己的邻居表. idle 节点只接收不发送的优点在于: 它们可以在不干扰其他节点正常通讯的条件下实时监控网络的通讯质量和拓扑变化<sup>[5]</sup>. 一定条件下, idle 节点转换到 active 状态参与网络拓扑. 否则, 网络环境相对稳定时 idle 节点经过一段时间后进入 sleep 状态. 若新增的 active 节点不能改善网络通讯质量, 该节点可以一定概率回退到 idle 状态.

DJM 模型中节点分为三种状态: active、idle 和 sleep. 网络初始时, 节点以随机概率启动进入 idle 状态. 图 2 是 DJM 模型的有限状态自动机:

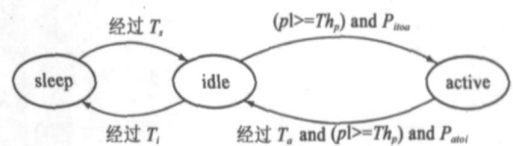


图 2 DJM 模型状态转换机

对应于此自动机的 SN 工作机制如下: 若发现没有邻居或某邻居的  $pl > Th_p$ , 就以概率  $P_{ita}$  进入 active 状态.  $P_{ita}$  是 idle 节点进入 active 的概率函数. 节点保持 active 状态  $T_a$  时间内继续监测网络中出现问题的邻居节点  $pl$  是否改善. 若  $pl < Th_p$ , 则节点维持 active 状态. 否则,  $T_a$  后节点以概率  $P_{aia}$  返回 idle 状态.  $P_{aia}$  是 active 节点回到 idle 的概率函数. 节点保持 idle 状态  $T_i$  时间后转为 sleep 状态休眠. 节点处于 sleep 状态  $T_s$  后又进入 idle 状态, 继续收集 active 邻居的信息.

### 3.2.2 DJM 模型参数

DJM 模型中三个状态 sleep、idle 和 active 的时间参数分别为  $T_s$ 、 $T_i$  和  $T_a$ 。active 和 sleep 是网络的两个主要状态, 时间相对较长。idle 是暂时状态, 因此  $T_i$  较短。监测网络环境是否变化依赖于  $rssi$  和  $pl$ , 它们每隔  $\theta \cdot T_{nd}$  时间更新一次, 所以三个状态时间都是  $\theta \cdot T_{nd}$  的倍数。定义三者关系如下:

$$T_a = \lambda \cdot \theta \cdot T_{nd}, \lambda > 1 \quad (5)$$

$$T_i > \theta \cdot T_{nd}, \text{ 取 } T_i = \theta \cdot T_{nd} \quad (6)$$

$$T_s = \rho \cdot \lambda \cdot \theta \cdot T_{nd}, \rho > = 1 \quad (7)$$

为计算方便, 我们取  $T_i = \theta \cdot T_{nd}$ 。式(7)中  $\rho$  与节点覆盖密度有关, 网络节点密度越大, 允许节点处于 sleep 状态的时间越长, 即  $\rho$  越大。

当节点的  $pl$  大于等于丢包率门限  $Th_p$  时, 表明当前网络拓扑不满足数据传输的可靠性要求。该值的确定依赖具体情况应用。

idle 节点进入 active 状态的概率函数  $P_{i \rightarrow a}$  与  $pl$  不满足要求的 active 节点(又称“问题节点”)的邻居数  $N$  和两节点间  $lc$  有关。 $N$  越大表明“问题节点”因邻居间通讯相互干扰造成  $pl$  高的可能性越大, 因此  $P_{i \rightarrow a}$  与  $N$  成反比;  $lc$  越大说明本节点与“问题节点”通讯代价越大, 所以  $P_{i \rightarrow a}$  与  $lc$  成反比。 $P_{i \rightarrow a}$  概率函数公式如下:

$$P_{i \rightarrow a} = \begin{cases} \left( \frac{|MIN| + rssi}{MAX - MIN} \right)^{\gamma} \cdot \frac{1}{N^{\alpha}}, & \gamma, \alpha > 0, N \geq 1 \\ 1, & N = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $rssi$  是  $RSSI_i$  的平均值, 见式(4)。在实际传感器网络中该值的范围在  $-80(\text{MIN}) \sim -60(\text{MAX})$  之间。 $rssi$  越大说明接收灵敏度越高,  $lc$  越小。 $\frac{|MIN| + rssi}{MAX - MIN}$  是范围在 0 到 1 之间的数, 该值越大, 反映  $lc$  越小。指数  $\gamma$  和  $\alpha$  分别代表  $lc$  和邻居数两个因素的重要程度, 我们均取为 1。在网络初始状态时,  $N$  可能为 0, 此时  $P_{i \rightarrow a}$  等于 1。

active 节点回退到 idle 状态的概率函数  $P_{a \rightarrow i}$  与两个因素有关: active 邻居数  $N$  和节点剩余能量  $\bar{E}$ 。 $N$  越大, 因邻居数多造成干扰的可能性越大, 所以  $P_{a \rightarrow i}$  与  $N$  成正比。同时,  $P_{a \rightarrow i}$  应与节点剩余能量  $\bar{E}$  成反比。设节点的初始能量为  $E_{ini}$ ,  $P_{a \rightarrow i}$  公式如下:

$$P_{a \rightarrow i} = 1 - \left( \frac{\bar{E}}{E_{ini}} \right)^{\alpha_2}, \quad \alpha_2, \beta > 0, N \geq 1 \quad (9)$$

其中,  $\bar{E}/E_{ini}$  在 0 到 1 间取值,  $\alpha_2, \beta$  反映两个因素的重要程度, 这里都取 1。当  $N = 0$  时,  $P_{a \rightarrow i}$  为 0。

## 4 分析与模拟

### 4.1 模型分析

本文使用的参数见附录表 1。文献[5]中的参与度模型有以下四点不足:

(1) active 状态不能回退。在监控应用中, 如果监控环境变化, 很可能出现 active 节点过于密集的情况, 引起能量浪费和信号干扰。

(2) 状态转换自动机使用节点邻居数  $N$  作为转换条件。

由于邻居较多时会影响通讯质量, 我们认为邻居数不应该作为状态转换的硬性条件。

(3) 自动机中没有考虑负载均衡的问题。我们考虑了节点剩余能量因素来修正此问题。

(4) 所有的节点模型相同, 可能出现多个节点同时状态转化的情况。我们引入转换概率对其进行改善。

DJM 模型中主要参数为  $T_s, T_i, T_a, Th_{NL}, Th_p, P_{i \rightarrow a}$  和  $P_{a \rightarrow i}$ 。其它因素如丢包率、邻居数的测量在 3.2 节有详细描述。DJM 网络中节点分别处于三种状态。因为 idle 节点并不实际参与传送信息, 只作为后备节点以处理传输质量下降的情况(环境变化或者周围节点故障), 所以应尽量让节点处于 active 和 sleep 状态。考虑到网络稳定性,  $T_a$  和  $T_s$  应为  $T_i$  的整数, 休眠时间  $T_s$  正比于节点密度。

$Th_{NL}$  和  $Th_p$  分别是邻居丢包率门限和数据丢包率门限。前者的制定保证了邻居间的连通性, 即只有符合门限要求的两节点才可以作为一条通信链路, 排除了两个很不稳定的节点间形成链路的情况。 $Th_p$  直接与应用需求相关, 对数据传输质量越高的应用要求  $Th_p$  值越小。我们的模型中  $Th_p$  极限为 0, 而文献[5]中  $Th_p$  的下限不是 0(某障碍物两旁存在 active 节点, 障碍物撤走后 active 节点过多而不能回退, 这时丢包率下限由于信号间的干扰不为 0)。

研究参与度问题的关键是在保证传送质量的情况下尽量减少参与网络的节点数, 该问题可以转化为尽量增加节点处于休眠状态的时间。设三种状态下的功耗比为 1:  $P_i: P_a$  ( $P_a > P_i$ ), 那么 SN 在  $t$  时间内的能量消耗见下式:

$$E(\rho * \lambda * n_1 + n_2 + \lambda * n_3) = P_{\text{sleep}} * (\rho * \lambda * n_1 + P_i * n_2 + \lambda * n_3 * P_a) \quad (10)$$

其中,  $n_1, n_2, n_3$  分别为节点进入 sleep、idle 和 active 状态的次数。 $P_{\text{sleep}}$  是 sleep 状态下节点耗能。其他参数见式(5)、(6)、(7)。由于节点密集分布, 引入概率条件仍可保证数据传输质量。而且, 这种做法相对文献[5]缩短了节点处于 active 状态的时间而没缩短节点处于 sleep 状态的时间。另外, 状态转换概率引入了节点能量因素, 改善了 WSN 中的负载均衡问题。总之, DJM 协议优于文献[5]中协议。

### 4.2 协议模拟

模拟的应用是森林防火系统。SN 参数根据伯克利大学的 Mica2 设定<sup>[9]</sup>(系统的详细参数设定见附录)。

表 1 直接传送协议

- |  |
|--|
| 1. SN 发送 connecting to CHSN 消息到组长节点, 等待 relay 消息   |
| 2. 如果收到来自组长的 relay 消息, 定时广播 connecting to neighbor 消息给邻居节点(与组长保持连接的邻居节点接收到此消息后反馈 relay 消息) |
| 3. 将接收到第一个 relay 消息对应的 SN 作为中继   |

我们对一个边长为 50m 的方形区域内 500 个节点进行模拟。假设每个节点的发送半径为 15m, 周边环境不发生变化(外部环境变化的情况下, Ascent 中 active 状态不能回退, 更加耗能<sup>[5]</sup>), 路由协议采用直接传送协议如表 1。本文使用平均能量消耗和节点耗能的方差作为参与度模型衡量标准(图 4

使用本文所提模型对应值和文献[5]中模型对应值的比值)。

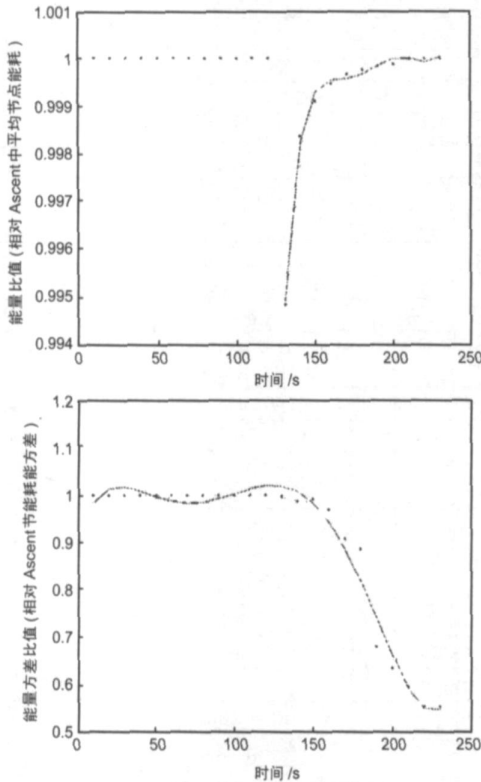


图3 与 Ascent 协议能耗和负载平衡比较

如图 3 所示, 在网络启动阶段 DJM 模型和 Ascent 性能近似。运行一段时间后, DJM 模型平均耗能小于 Ascent 模型, 这是引入概率函数  $P_{\text{door}}$  的结果。前者耗能与后者耗能的比值从下方逼近 1, 说明 DJM 模型消耗能量较少。由于两种模型下平均耗能近似相同, 我们用节点耗能的方差衡量负载平衡。从图 3 下图可以看出, 网络启动后一段时间, 方差比值快速下滑然后趋于稳定。模拟表明在网络稳定阶段 DJM 模型和 Ascent 的耗能方差比保持在 0.552 左右。因此, DJM 模型在节点平均耗能和负载平衡上都优于 Ascent, 增大了网络寿命。

### 5 结论和将来工作

本文细化了网络层, 实现了 ND 协议, 重构了 DJM 协议, 取得了良好的节能效果。主要贡献如下:

- (1) 具体化了 ND 协议;
- (2) DJM 协议中, 我们基于原有物理层提供的三种状态建立了自动机;

附录

表 2 参数表

| 参数                    | 意义                          | 模拟量   |
|-----------------------|-----------------------------|---|
| $NL_i$                | 第 $i$ 个邻居的丢包率               |   |
| $T_{nd}$              | ND Message 广播周期             | 100ms   |
| $\theta \cdot T_{nd}$ | 邻居信息更新周期                    | $\theta = 50, 0 \leq T_{nd} = 5s$                         |
| $T_s, T_i, T_a$       | sleep, idle, active 状态的停留时间 | $2 \sim 4min, 5s, 2min$ $\rho = 1, 2 \quad \lambda = 120$ |
| $Th_{NL}$             | 邻居丢包率门限                     | 0.4- 0.5  |
| $Th_p$                | 状态转换丢包率门限                   | 0.6- 0.8  |

(3) DJM 协议中, 我们在保证传送质量的前提下引入了概率因素且 active 状态可以回退, 相对文献[5]中协议进一步在参与度层次节省网络耗能;

(4) 引入了能量级别因素, 改善了负载平衡。

上述协议中某些参数有待设定, 如  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  和  $\beta$ 。需要依据具体应用和 SN 参数来确定。此外, 我们以后的研究方向有:

⊗ 研究组内路由协议, 定位和覆盖问题;

⊗ 开发模拟系统(包括 MAC 层及上层协议), 其中 MAC 层以上协议可以直接在实际 WSN 中使用。

参考文献:

- [1] W R Heinzelman, A Chandrakasan, H Balakrishnan. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]. In Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences[C]. Maui, Hawaii, January 2000.
- [2] W B einzelman, A P handrakasan, H Balakrishnan. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2002, 1(4): 660- 670.
- [3] A Manjeshwar, D P Agrawal. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[A]. Proceeding of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. (IPDPS 2001)[C]. San Francisco, 2001.
- [4] S Lindsey, C Raghavendra, K M Sivalingam. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics[J]. Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on, 2002. 13(9): 924- 935.
- [5] C Alberto, E Deborah. ASCENT: Adaptive self configuring sensor networks topologies[J]. Mobile computing, IEEE transactions on, 2004, 3(3): 272- 285.
- [6] W Ye, J Heidemann, D Estrin. An energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the IEEE Infocom[C]. New York, NY, USA: USC/Information Sciences Institute, IEEE, June, 2002. 1567- 1576.
- [7] J H Chang, L Tassiulas. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on, 2004, 12(4): 609- 619.
- [8] Crossbow Technology Inc. Mica2 wireless measurement system datasheet[DB/OL]. [http://www.xbow.com/products/product.pdf-les/datasheets/wireless/6020-0042-03\\_a\\_mica2.pdf](http://www.xbow.com/products/product.pdf-les/datasheets/wireless/6020-0042-03_a_mica2.pdf).

(续表 2)

| 参 数                                   | 意 义                                     | 模拟量         |
|---------------------------------------|---|-------------|
| $P_{idle}, P_{active}$                | idle 向 active 转换的概率、active 向 idle 转换的概率 |             |
| 传送速率 $c$                              | 每条边上的传送数据速率                             | 38.4kbps    |
| $L_{ND}, L_{AD}$                      | ND, AD 消息长度                             | 6bit, 13bit |
| $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \beta$ | 公式参数                                    | 1           |
| $P_{sleep}$                           | sleep 状态功耗                              | 1 $\mu$ W   |
| $P_i, P_a$                            | idle 和 active 状态和 sleep 状态功耗比值          | 8k, 25k     |
| $E_{mi}$                              | 每个节点的初始能量                               | 20J         |

表 3 消息格式表

| 源标识 9bit | 目的标识 9bit | 消息类型 1bit | ND 序列号 10bit | 长度 6bit | 丢包率(pl) 10bit |
|----------|-----------|-----------|--------------|---------|---------------|
|----------|-----------|-----------|--------------|---------|---------------|

ND Message

| 源标识 9bit | 目的标识 9bit | 消息类型 1bit | 应用序列号 10bit | 长度 13bit | 应用数据 4~ 5kbit |
|----------|-----------|-----------|-------------|----------|---------------|
|----------|-----------|-----------|-------------|----------|---------------|

Application Data Message

表 4 MICA2 节点参数表

| Multi Channel Radio: | MPR400CB     | MPR410CB      | Remarks                          |
|----------------------|--------------|---------------|----------------------------------|
| Center Frequency     | 868/916MHz   | 433MHz        | ISM bands                        |
| Number of Channels   | > 8, > 100   | > 8           | programmable                     |
| Data Rate            | 38.4Kbaud    | 38.4Kbaud     | manchester encoded               |
| RF Power             | - 20~ + 5dBm | - 20~ + 10dBm | programmable, typical            |
| Receive Sensitivity  | - 98dBm      | - 101dBm      | typical, analog RSSI at AD Ch. 0 |
| Outdoor Range        | 500ft        | 1000ft        | 1/4 Wave dipole, line of sight   |
| Current Draw         | 27mA         | 25mA          | transmit with maximum power      |
|                      | 10mA         | 8mA           | receive                          |
|                      | < 1 $\mu$ A  | < 1 $\mu$ A   | sleep                            |

## 作者简介:

赵保华 男, 1947 年出生, 中国科学技术大学计算机系教授, 博士生导师, 主要研究方向: 无线传感器网络, 协议理论与工程。  
E-mail: bhzhao@ustc.edu.cn

张 炜 男, 1983 年出生于山东聊城, 主要研究方向: 无线传感器网络。

李 婧 女, 1983 年出生于安徽合肥, 主要研究方向: 无线传感器网络。