

# 无线传感器网络中的 OPNET 仿真模型的研究

姜 华<sup>1</sup>, 王 沛<sup>2</sup>, 刘海涛<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 上海师范大学, 上海 201100)

**摘 要:** 传感器技术、机电系统、现代网络和无线通信等技术的进步, 推动了具有现代意义的无线传感器网络的产生和发展。无线传感器网络能够广泛地应用于恶劣环境和军事领域中。该文通过对无线传感器网络特点的分析, 提出了基于信道接入的多跳分簇网络结构, 给出了 OPNET 仿真模型, 分析了相关仿真结果。

**关键词:** 无线传感器网络; 分簇算法; 路由协议; 多跳算法; 仿真模型

## Research on OPNET Simulation Model in Wireless Sensor Networks

JIANG Hua<sup>1</sup>, WANG Pei<sup>2</sup>, LIU Haitao<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050;

2. Shanghai Normal University, Shanghai 201100)

**【Abstract】** Because of advances in sensor technology, micro-electro-mechanism system (MEMS), modern network and wireless communication technology, wireless sensor networks (WSN) are designed and developed. Wireless sensor network can be applied to both abominable and military environments. Though analysis of network characteristics in WSN, new architecture of channel access-based multihop cluster (CAMC) network is put forward, and OPNET simulation model is introduced. The simulation results are analyzed.

**【Key words】** Wireless sensor networks(WSN); Cluster algorithm; Routing protocol; Multihop algorithm; Simulation model

无线传感器网络是当前在国际上备受关注的热点研究领域。它可以定义为: 由一组按需随机分布的集成有传感器、数据处理单元和通信模块的微型传感器以自组织方式构成的无线网络, 其目的是协作的感知、采集和处理网络覆盖范围内感知对象的信息, 并传送给信息获取者<sup>[1]</sup>。无线传感器网络可广泛应用于诸如国家安全、军事领域、医疗健康、交通管理、环境监测、空间探索、商业等领域中, 被《商业周刊》称之为未来 4 大技术之一<sup>[2]</sup>。

### 1 无线传感器网络特点

无线传感器网络是集成了监测、控制以及无线通信的网络系统, 节点数目通常庞大(上千甚至上万), 节点分布密集; 由于环境和能量耗尽, 节点更容易出现故障; 同时也造成网络拓扑结构的动态变化。传统网络的首要设计目标是提高服务质量和带宽的高效利用, 而无线传感器网络的首要设计目标是能源的高效使用<sup>[3]</sup>。

### 2 网络分簇算法

分簇算法将网络划分成为可以互相连通并覆盖所有节点的多个簇, 并在网络结构发生变化时更新簇结构。迄今为止, 已经出现了大量的分簇算法, 例如基于节点 ID 的分簇算法、最高节点度分簇算法、最低节点移动性分簇算法、LEACH 算法等。大多数分簇算法主要考虑簇的形成、簇结构的调整以及通过动态调整簇头节点以平衡网络的能量消耗, 它们一般假定簇头能直接与基站通信。文献[5,6]中提出的基于信道接入的分簇算法在 MAC 层需要严格的时间同步, 在分簇过程中忽视了传感节点不同身份状态的转换, 并没有对分簇结构进行相关调整, 导致分簇不合理。文献[7,8]都假定簇头节点能直接与基站通信, 没有考虑多跳的情况。本文提出了基于信道接入的多跳分簇算法, 不需要严格的全网时间同步,

并在分簇建立后对网络结构进行了相关的调整, 在网络形成稳定的分簇结构后, 簇头与基站的通信中采用多跳路由算法。

分簇算法中假定通信链路为双向对称链路, 并且所有传感节点都能收到基站的广播消息。该分簇算法主要分为 2 个阶段: 网络分簇形成和传感数据通信。

#### 2.1 网络分簇的形成

网络分簇形成可分为分簇建立、维护、调整和取消 4 个阶段。分簇建立阶段, 一个节点如果剩余能量超过规定极限能量值, 则试图接入信道来声明自己是簇头, 如果在它的所有邻居节点中最先成功地发送了簇头声明控制消息, 那么它将成为簇头, 即按照“最先声明优先”的规则来选举簇头。在分簇维护阶段, 传感节点如果是成员状态则周期发送 HEART\_BEAT 消息, 如果是簇头节点则周期发送 HELLO 消息以维持簇结构。分簇调整阶段主要是调整簇成员的归宿和簇头节点间的距离。分簇取消阶段主要是传感节点能源即将耗尽时, 将发送 DISCONNECT 消息以取消分簇结构和分簇调整过程中的簇删除操作。

#### 2.2 传感数据通信阶段

(1) 簇内数据通信。通过分簇阶段形成稳定分簇后, 各簇的成员节点进入传感数据状态(SENSOR\_DATA)。由簇头节点的 HELLO 消息维持分簇, 并在簇内实现时间粗同步。成员节点采用 TDMA 方式与所属簇头进行数据交互。簇头定期检测所属成员列表, 动态更新成员数据。

**基金项目:** 中国科学院创新基金资助项目“微系统信息网若干信息技术研究”(KG CX2\_SW\_108)

**作者简介:** 姜 华(1977-), 男, 博士生, 主研方向: 无线传感器网络; 王 沛, 博士、副教授; 刘海涛, 博士、研究员、博导

**收稿日期:** 2006-02-25 **E-mail:** cdmajh@sohu.com

(2)簇间数据通信。簇头收到所属成员的传感数据后，先作初步的数据融合，然后将新的融合数据通过多跳算法发往基站。其中中继节点的选择方法如下：

传感节点总能量消耗 $e_{Total}$ 可以表示为可以表示为距离 $d$ 的函数<sup>[9]</sup>。

$$e_{Total}(d) = kd^\alpha + \tau \quad (1)$$

其中， $k = \omega\Delta t$ ， $\Delta t$ 为数据包的发送时间， $\tau$ 定义为额外功率消耗，它是距离 $d$ 变化的常数，在不依赖于距离变化的任何功率消耗都可以加到 $\tau$ 上去。根据传感节点的能耗与通信距离成指数关系，中继节点 $cluster\_i$   $0 < i \leq 5$ 的位置位于基站(Base station)和簇头节点 $cluster\_0$ 连线的中点时，通信链路的能耗最小。但在实际通信过程中，一般来说中继节点不在最佳位置上，如图1所示。

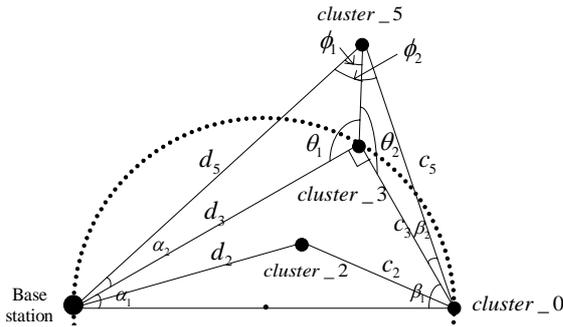


图1 簇头中继节点的选择

由式(1)可得，簇头0与基站直接通信的能耗为

$$e_{cluster\_0}(d_0) = kd_0^2 + \tau \quad (2)$$

其中， $d$ 为节点到基站的距离，在此假定传感节点的额外功率消耗 $\tau$ 相同。

通过簇头 $i$ 中继通信时，簇头0的通信能耗为

$$e_{Total\_i}(d_i, c_i) = [kd_i^2 + \tau] + [kc_i^2 + \tau] = k(d_i^2 + c_i^2) + 2\tau \quad (3)$$

其中， $c_i$ 为簇头节点1到簇头节点 $i$ 的距离。根据前面分析可知， $\tau$ 在整个节点能耗中所占比例较小，主要为无线通信链路的能耗消耗。如果忽略 $\tau$ ，则可得

$$e_{Total\_i}(d_i, c_i) \approx k(d_i^2 + c_i^2) \quad (4)$$

如图1，当中继节点处于以基站和簇头节点0的连线为直径的圆 $o$ 上时，通过中继节点所消耗的能量等同于簇头节点直接传输的能量消耗。由平面几何的知识可以证明如下不等式成立，即

$$d_2^2 + c_2^2 < d_3^2 + c_3^2 < d_5^2 + c_5^2 \quad (5)$$

由此可得

$$k(d_2^2 + c_2^2) < k(d_3^2 + c_3^2) < k(d_5^2 + c_5^2) \quad (6)$$

也就是

$$e_{Total\_2}(d_2, c_2) < e_{Total\_3}(d_3, c_3) < e_{Total\_5}(d_5, c_5) \quad (7)$$

簇头中继节点的选择一定是在圆内部的节点，并且是靠近基站和簇头节点连线最近的一个簇头节点。当考虑 $\tau$ 值的影响时，如果 $d_i^2 + c_i^2 = d_0^2$ 时，即，中继簇头处于圆 $o$ 上，因为数据中继簇头节点接收中继数据也要消耗能量，所以选择直接与基站通信。另外，当基站不在簇头节点的通信范围内时，即使最短的数据传输距离为基站，也要选择相对最小数据传输距离对应的簇头节点做中继节点，这样基站才能收到该簇头的数据。中继簇头节点的选择在有些情况下并不是最优的，为了保证网络的连通性，算法采用选择次优的中继簇

头节点。

### 3 分簇算法的仿真模型

将100个传感器随机布设在1200m×1000m的区域，基站沿传感布设区域的边沿移动，以采集传感网络的数据，网络形成分簇后，簇头实现多跳传输。在分簇算法的仿真模型中网络层为核心进程模型，在此主要针对ROUTE进程模型介绍。在ROUTE层进程模型中，分簇形成算法的状态转换图为Member\_ROUTE，如图2所示，另外，簇头多跳算法在前面已有详述，在此不再叙述。

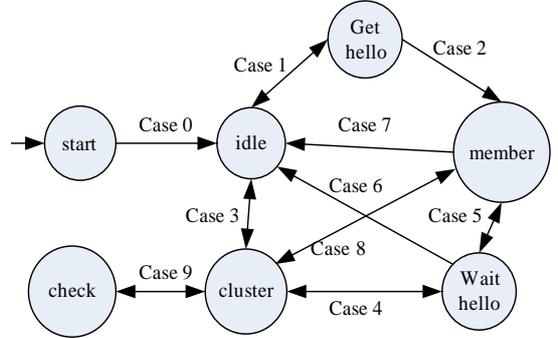


图2 Member\_ROUTE状态转换

Member\_ROUTE的状态转换过程简述如下：

(1)Idle 状态：节点经过 start 初始化状态相关的进程参数后，广播 REQ\_TO\_JOIN 消息，开始进入分簇建立阶段，等待其他传感节点的回应，并设置自中断时间 $t_{become-head}$ ，节点进入空闲态。

(2)Cluster 状态：如果在 $t_{become-head}$ 到达之前收到 REQUE\_TO\_JOIN 消息，则算法产生标识 DIRECT\_BECOME\_HEAD\_FLAG，其值服从贝努力概率分布。如果 DIRECT\_BECOME\_HEAD\_FLAG 的值为1，并且剩余能量超过簇头能量门限值，则节点成为簇头并进入 Cluster 状态；否则，节点回到 Idle 状态继续等待；在 $t_{become-head}$ 到达之前没有收到任何传感节点的应答，则节点变为簇头直接进入 Cluster 状态，同时广播 HELLO 消息，声明自己为簇头节点，等待其他传感节点的加入，形成新的分簇结构。

(3)Member 状态：节点在 Idle 状态如果收到 HELLO 消息，进入 Get hello 状态，并向发送该 HELLO 消息的簇头节点发送 JOIN 消息，申请加入该簇节点，收到 MSG\_ACK 消息后，加入该簇并进入 Member 状态；同时向所属簇头每 $t_{heart-beat}$ s 发送一次 HEART\_BEAT 消息，进入分簇维护阶段；在设定时间内没有收到 MSG\_ACK，则回到 idle 状态，则发送 REQUE\_TO\_JOIN 消息，重新进入分簇接入；

(4)Wait hello 状态：该状态的进入包括从 Cluster 状态进入和 Member 状态进入两种模式，其中从 Cluster 状态进入 Wait hello 状态有如下3种情况：

- 1)在 $t_{check-member}$ 的周期检查中，簇内成员节点的数目为0；
- 2)收到其他簇头节点的 HELLO 消息，通过粗略估计其距离与 $d_{cluster-threshold}$ 之差大于 $d_{different-cluster-threshold}$ ；
- 3)该簇头为孤立簇时，通过中继成员算法在簇内没有找到可以中继的成员节点。

从 Member 状态进入 wait hello 状态有如下2种情况：

- 1)成员节点发送传感数据后，经过 $t_{data-ack}$ 时间后没有收

到所属簇头节点的 ACK 消息,并在重发  $n_{data-ack-threshold}$  次之后,仍然没有收到 ACK 消息;

2)成员节点收到所属簇头节点发送的 DISCONNECT 消息。

在节点进入 Wait hello 状态之后设定时间  $t_{node-wait}$ ,等待其他簇头节点的 HELLO 消息;如果在  $t_{node-wait}$  时间到达之前没有收到任何簇头节点的 HELLO 消息,则节点广播 REQUE\_TO\_JOIN 消息,回到 idle 状态,重新进入分簇阶段。

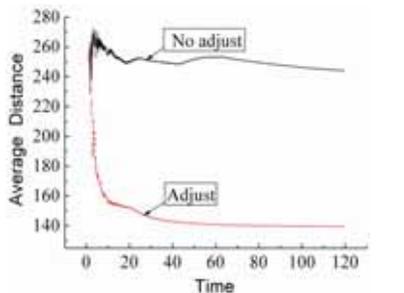
(5)Check 状态:该状态主要是簇头节点定期更新检查簇内成员节点的状态,通过与成员节点的数据交互,更新所记录的信息,并定时清空。主要是对簇内动态变化的成员节点进行管理。另外在分簇调整阶段 cluster 和 member 状态根据分簇结构可以动态调整角色,在此不再详述。

## 4 仿真结果分析

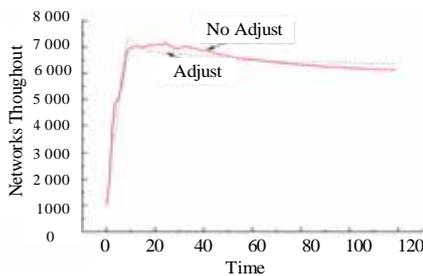
### 4.1 分簇调整阶段的效果

设定传感节点接收灵敏度为 -85dBm,收发距离为  $d = 450m$ ,数据率为 50Kbps。从图 3(a)中可以看出,通过分簇调整后,这个簇节点与其簇成员的平均距离由大约 250m 降低到 145m。

因为传感节点采用的是自由空间传播模型,基于自由空间传播损耗公式,传感节点的能量消耗与  $d^2$  成正比,因此通过分簇调整能量消耗可以降低到原来的 1/3,提高了能量的利用率,有效地延长了网络的生存周期。同时从图 3(b)中可以看出,分簇调整前后的网络吞吐量并没有多大变化,说明没有更多的额外能量消耗用于簇结构的调整。



(a) 簇头与成员节点的距离



(b) 网络总的吞吐率

图 3 分簇调整阶段的效果

### 4.2 簇头多跳中继传输

网络形成分簇结构后,簇头多跳中继发送传感数据和簇头直接将数据发送给基站(假定所有传感节点都能直接与基站通信)2种的情况进行比较,仿真结果如图 4 所示。从图 4(a)所示可以看出,采用多跳中继传输时,所有簇头节点的平均发射功率为

$$P_{average-relay} \approx 0.2mW$$

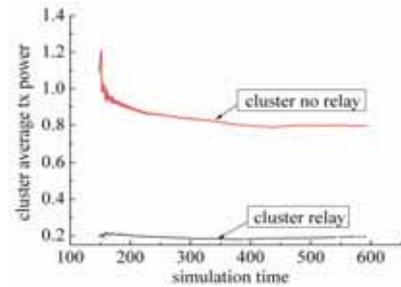
采用直接传输时,簇头节点的平均发射功率为

$$P_{average-direct} \approx 0.8mW$$

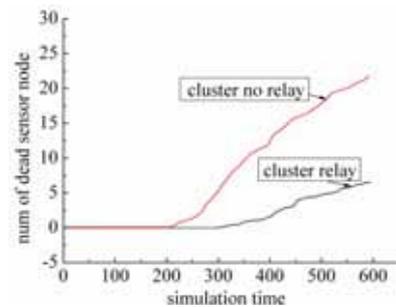
可得

$$P_{average-direct} = 4P_{average-relay}$$

这说明在相同的数据吞吐量的条件下,直接传输的簇头生存周期是中继传输簇头生存周期的 1/4,结果导致网络频繁重新分簇,消耗更多能量。由图 4(b)中所示知,中继传输的分簇网络在时间为 10min 时的失效节点数大约为 6 个,而直接传输的分簇网络中的失效节点数大约为 22 个。因为中继传输的分簇网络中要消耗中继传输的能量,所以失效节点数的倍数相对平均发射功率要小一些。另外,直接传输的网络中失效节点开始的时间要比中继传输网络早大约 100s,说明网络更早地进入不稳定时期。



(a) 簇头平均发射功率



(b) 网络失效节点数

图 4 簇头多跳传输比较曲线

## 5 结论

无线传感器网络是涉及多学科的研究领域,具有十分广阔的应用前景。本文分析了无线传感器网络的特点,针对已有分簇算法的不足,提出了基于信道接入的多跳分簇算法,分析了基于信道接入的多跳分簇算法,给出了基于该分簇网络的 OPNET 仿真模型。通过仿真结果的分析可以看出,新的分簇算法比普通的分簇算法延长网络生存周期大约 3 倍,并且算法没有特殊要求,更符合实际系统。本文提出的基于信道接入的多跳分簇算法在分簇形成中,网络结构难以控制,分簇存在不合理的情况。这样影响网络的整体性能和生存周期,在后续的工作中需进一步完善。

## 参考文献

- 1 于宏毅. 无线移动自组织网[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- 2 Akyildiz I F, SU W, Cayirci E. Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- 3 郑少仁, 王海涛, 赵志峰, 等. Ad Hoc 网络技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 102.
- 4 孙利民, 李建中. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 7-8.

(下转第 78 页)