

# 基于均衡策略的无线传感器网络协作模型

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 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 成都 610225)

**【摘要】**基于离散空间最优搜索理论中的基于博弈理论的协作策略模型,通过综合考虑无线传感器网络中节点转发数据所付出的代价和利益、节点能耗及相邻节点过去的行为,提出了一种自适应能耗均衡网络协作模型,并给出了相应的数学最优化模型及求解算法。优化的目标是均衡网络能耗和吞吐量,进而最大化网络寿命。模型通过能量因子和转发数据包数量来调节节点行为,使传感器网络的整体能耗趋向均衡。一个数值例子说明,该路由选择策略及求解算法是可行且有效的。

**关键词** 算法; 协作模型; 能量均衡; 最优搜索理论; 无线传感器网络

中图分类号 TP393

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.05.023

## Collaboration Model Based on Equilibrium Strategy for Wireless Sensor Networks

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

(1. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. School of National Defence Science and Technology, Southwest University of Science and Technology Mianyang Sichuan 621010;

3. School of Network Engineering, Chengdu University of Information Technology Chengdu 610225)

**Abstract** Base on collaboration model of optimal search theory in discrete spaces, an energy balancing collaboration model and its solution algorithm in wireless sensor networks are proposed in this paper by taking all the following factors into consideration: the costs and benefits of node to forward data, energy consumption, and the behavior of adjacent nodes in the past. The objective of the algorithm to balance the energy consumption and maximize the network lifetime. An energy factor and number of packets transmitted are presented to make the energy consumption of the network tend to equilibrium and maximize the network lifetime. A numerical example illustrates the validation of the proposed collaboration model and policy.

**Key words** algorithm; collaboration model; energy balancing; optimal search theory; wireless sensor network

随着对无线传感器网络的不断研究和发展,研究热点主要集中在如何在网络的不同层节省节点的能量,并提高节点使用能量的效率。文献[1]提出通过拥塞控制机制,为节点分配均衡带宽,从而提高节点的能量使用效率。文献[2]在MAC层通过低功耗监听和调整节点唤醒机制实现节点在能耗、吞吐量和时延间的平衡。文献[3]提出EX-MAC协议,通过一个短引导机制来减少端到端的延时,从而最小化节点能量消耗。文献[4]提出一种基于跨层的节点功率控制算法,通过最优化方法调节节点在物理层和数据链路层的功率,使节点的能耗达到最小。为了使网络整体能耗均衡,文献[5]建议采用分层的、更

加系统化的数学方法对网络进行结构分析。此外,延长网络寿命、均衡能耗单靠路由层协议是不能完全解决的,在路由过程中还需要参考数据链路层能耗及物理层电池电压等信息<sup>[6]</sup>。无线传感器网络中,在多数情况下数据的传输是以其他中间节点为中继来实现的。由于节点的能量受限,因此总是要尽量避免接受其他节点的转发请求来保存自己的能量,由此带来的负面影响会使网络吞吐量急剧下降,并会加速消耗距离基站较远的节点能量。因此,节点在多大程度上协助其他节点完成数据传输在某种程度上决定了网络的吞吐量和寿命,这也是本文研究的内容。

收稿日期: 2011-12-21; 修回日期: 2012-08-09

基金项目: 四川省教育厅青年基金(10zb015)

作者简介: 吕涛(1979-),男,博士生,主要从事无线传感器网络方面的研究。

本文基于离散空间最优搜索理论中的基于博弈理论的协作策略模型<sup>[7]</sup>,通过分析节点在转发数据包所付出的代价和获得的利益以及相邻上游节点过去的行为,并通过节点的能量因子来调节节点的行为,从而使节点在吞吐量和能量消耗两个方面达到均衡,最终实现网络的整体能耗趋于均衡。

## 1 网络协作模型

### 1.1 定义

首先假设网络中所有的节点均为自利节点 (selfish node),每个节点都希望最小化自己的数据流量延迟,同时还要尽量少的为其他节点传送中继数据。根据节点的这种利己特点,文献[8-9]介绍了Ad hoc网络中的基于博弈理论的协作策略模型,但它们并没有依据均衡策略来建立模型。下面根据文献[10-11]中的部分思想提出基于均衡策略的WSN网络协作模型,该模型具有如下假设:

假定所有的分析都基于离散时间状态,时间分为 $t_1 t_2 \dots t_n$ 时间片;节点 $i$ 在时间片 $t_k$ 时,拥有它的邻居节点集合信息,并且在该时间段内集合保持不变,该集合记为 $N_i(t_k)$ ;设节点 $i$ 的能量因子 $\alpha_i$ 表示节点对能量的重视程度。如果 $\alpha_i = 0$ ,则能量对于节点来说不是一个值得关心的因素;相反如果 $\alpha_i = 1$ ,则意味着能量对节点来说非常重要:

$$\alpha_i = 1 - \frac{E_i(t_k)}{E_i} \quad (1)$$

式中, $E_i(t_k)$ 为节点 $i$ 在 $t_k$ 时的剩余能量, $E_i$ 表示节点 $i$ 的初始能量。

将网络中传输的数据分为两种,一种为源数据,由节点自身产生;另一种为转发数据,来自其他节点。定义 $S_i(t_k)$ 和 $\bar{S}_i(t_k)$ 分别表示节点 $i$ 在 $t_k$ 期间发送的源数据包数量和转发数据包数量;定义 $R_i(t_k)$ 和 $\bar{R}_i(t_k)$ 分别表示节点 $i$ 在 $t_k$ 期间接收到的源数据包数量和转发数据包数量。

### 1.2 代价函数

定义节点 $i$ 的代价函数为:

$$w_i(t_k) = \begin{cases} \frac{\bar{S}_i(t_k)}{S_i(t_k) + \bar{S}_i(t_k)} & S_i(t_k) + \bar{S}_i(t_k) > 0 \\ 0 & S_i(t_k) + \bar{S}_i(t_k) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$w_i(t_k)$ 为在时间片 $t_k$ 期间节点 $i$ 转发的数据包数量与所有发送数据包数量的比值,即节点 $i$ 转发数据包所付出的代价。当 $S_i(t_k)$ 恒定,增加 $\bar{S}_i(t_k)$ 的值会增加节点 $i$ 付出的代价。 $\bar{S}_i(t_k)$ 是消耗能量与吞吐量

之间的折中,通过调节转发数据包数量可以平衡节点的能量与吞吐量。

节点 $i$ 在转发数据包时,不仅要考虑自己的能量与吞吐量,而且还需要根据相邻上游节点 $j$ 上一个时间片的行为来决定。定义节点 $i$ 在 $t_k$ 期间与相邻节点 $j$ 的代价函数为:

$$w_{ij}(t_k) \equiv \begin{cases} \frac{\bar{S}_i(t_k)}{\sum_{n \in N_j(t_{k-1})} \bar{R}_j^n(t_{k-1})} & \sum_{n \in N_j(t_{k-1})} \bar{R}_j^n(t_{k-1}) > 0 \\ 0 & \sum_{n \in N_j(t_{k-1})} \bar{R}_j^n(t_{k-1}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\sum_{n \in N_j(t_{k-1})} \bar{R}_j^n(t_{k-1})$ 为在上一个时间片 $t_{k-1}$ 期间,

节点 $i$ 的相邻节点 $j$ 收到所有邻居节点 $n \in N_j(t_{k-1})$ 请求进行转发的数据包数量。 $w_{ij}(t_k)$ 为在时间片 $t_k$ 期间节点 $i$ 转发数据包总数与上一个时间片其邻接点 $j$ 收到的转发数据包数量的比值,即节点 $i$ 请求转发数据包对相邻节点 $j$ 所产生的代价,且满足以下约束条件:

$$\sum_{n \in N_j(t_{k-1})} \bar{R}_j^n(t_{k-1}) \geq \bar{S}_i(t_k) \quad (4)$$

通过节点 $i$ 的转发数据包数量和相邻节点 $j$ 的吞吐量来调整 $w_{ij}(t_k)$ 。从代价函数 $w_{ij}(t_k)$ 可以发现,节点 $i$ 如果需要发送和转发更多的数据,那么 $w_{ij}(t_k)$ 将增大;如果增加相邻节点 $j$ 的吞吐量,则 $w_{ij}(t_k)$ 将减小。

### 1.3 利益函数

为了均衡网络中每个中继节点的流量,避免产生热节点,除了考察节点的代价,还应考虑节点的利益因素,因此定义节点 $i$ 的利益函数为:

$$g_i(t_k) \equiv \begin{cases} \frac{\bar{S}_i(t_k)}{\bar{R}_i(t_k)} & \bar{R}_i(t_k) > 0 \\ 0 & \bar{R}_i(t_k) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$g_i(t_k)$ 为节点 $i$ 发送转发数据包与接收转发数据包的比值,且满足以下约束条件:

$$\bar{R}_i(t_k) \geq \bar{S}_i(t_k) \quad (6)$$

## 2 数学模型及求解

定义节点 $i$ 的支付成本为:

$$\pi = \alpha_i w_i(t_k) + \alpha_i \min\{w_{ij}(t_k) | \quad (7)$$

$$j \in N_i(t_k)\} + (1 - \alpha_i) g_i(t_k)$$

支付成本通过节点 $i$ 的能量因子 $\alpha_i$ 来调节节点

付出的代价和获得的利益。 $\min\{w_{ij}(t_k) | j \in N_i(t_k)\}$ 表示选择相邻节点集合付出代价最小的节点作为它的目的节点。值得注意的是节点*i*在每一个时间片内发送一个数据包(如果有数据包需要发送的话)总是比不发送任何数据包的支付函数要大。作为自利节点的行为准则, 每个节点都要努力使其支付成本最大化。

考虑网络中的两个节点, 它们互相连接并且彼此都需要相邻节点以达到其他节点, 因而在它们之间需要交换信息。节点的行为依赖于 $\alpha$ 的值, 即节点对能量的重视程度。

在实际情况下, 节点的能量是受限的, 并且它们可能对能量和吞吐量两个指标都很重视, 此时 $0 < \alpha < 1$ 。为了实现网络的能量与吞吐量的均衡, 相邻节点间的行为是相互依赖的关系, 因此节点的行为取决于自己的 $\alpha$ 值和对相邻节点的 $\alpha$ 值的评估。如果节点*j*有 $\alpha_j = 0$ , 节点*i*有 $\alpha_i \rightarrow 0$ , 那么节点*i*发送所有的数据包, 并且为节点*i*转发数量介于0和 $\bar{S}_i(t_k)$ 之间的数据包; 节点*i*将尽可能多地向外发送数据包。如果 $\alpha_i \rightarrow 1$ , 节点*i*的行为取决与它先前对节点*j*的判断, 如果它认为 $\alpha_j \rightarrow 0$ , 则节点*i*发送那些以节点*j*为目的地的数据包外, 还将发送更多的其他数据包; 如果它认为 $\alpha_j \rightarrow 1$ , 则只发送以节点*j*为目的地的数据包。

由于在多数情况下, 节点需要考虑能量和吞吐量两个指标, 而节点转发数据包数量是消耗的能量与吞吐量之间的折中, 因此下面讨论节点转发数据包数量 $\bar{S}$ 与能量因子 $\alpha$ 之间的关系。

为了使节点达到最大支付函数, 可以令:

$$(1 - \alpha_i)g_i(t_k) + \alpha_i w_i(t_k) + \alpha_i \min\{w_{ij}(t_k) | j \in N_i(t_k)\} = 1 \quad (8)$$

展开后, 有:

$$\frac{(1 - \alpha_i)\bar{S}_i(t_k)}{\bar{R}_i(t_k)} + \frac{\alpha_i \bar{S}_i(t_k)}{S_i(t_k) + \bar{S}_i(t_k)} + \alpha_i \min \left( \frac{\bar{S}_i(t_k)}{\sum_{n \in N_j(t_{k-1})} \bar{R}_j^n(t_{k-1})} | j \in N_i(t_k) \right) = 1 \quad (9)$$

假设每个节点在一个时间片内产生源数据的数量恒定, 且节点*j*即为代价最小的相邻节点, 那么上式简化为:

$$\frac{(1 - \alpha_i)\bar{S}_i(t_k)}{\bar{R}_i(t_k)} + \alpha_i \frac{\bar{S}_i(t_k)}{S_i(t_k) + \bar{S}_i(t_k)} + \alpha_i \frac{\bar{S}_i(t_k)}{\bar{R}_j(t_{k-1})} = 1 \quad (10)$$

若 $\bar{S}_i(t_k) \gg S_i(t_k)$ 则:

$$\frac{(1 - \alpha_i)\bar{S}_i(t_k)}{\bar{R}_i(t_k)} + \alpha_i \frac{\bar{S}_i(t_k)}{S_i(t_k)} + \alpha_i \frac{\bar{S}_i(t_k)}{\bar{R}_j(t_{k-1})} = 1 \Rightarrow \bar{S}_i(t_k) = (1 - \alpha_i) \frac{\bar{R}_i(t_k) \cdot \bar{R}_j(t_{k-1})}{\alpha_i \bar{R}_i(t_k) + (1 - \alpha_i) \bar{R}_j(t_{k-1})} \quad (11)$$

当 $\alpha_i = 0$ , 有 $\bar{S}_i(t_k) = \bar{R}_i(t_k)$ , 即节点*i*转发所有接收到的转发数据包; 当 $\alpha_i = 1$ , 有 $\bar{S}_i(t_k) = 0$ , 节点*i*不转发任何数据包; 当 $0 < \alpha_i < 1$ , 节点*i*的转发数据包数量由 $t_k$ 期间接收到转发数据包数量 $\bar{R}_i(t_k)$ 和相邻节点集合中在 $t_{k-1}$ 期间代价函数最小的节点*j*所接收到的转发数据包数量决定, 并且通过能量因子 $\alpha_i$ 来调节。

在实际运行过程中, 如果节点*i*每次都查询相邻节点*j*接收到的转发数据 $\bar{R}_j(t_{k-1})$ , 那么将会消耗大量的能量。为了便于节点计算, 假设节点*j*收到*m*个节点的转发数据, 如果每个节点发送和节点*i*数量相同的转发数据包, 则节点*j*在 $t_{k-1}$ 期间收到的转发数据包约为:

$$\bar{R}_j(t_{k-1}) \approx m \bar{S}_i(t_{k-1}) \quad (12)$$

带入式(11)得到 $\bar{S}_i(t_k)$ 的估算值为:

$$S_i^*(t_k) \approx (1 - \alpha_i) \frac{\bar{R}_i(t_k) \cdot m \bar{S}_i(t_{k-1})}{\alpha_i \bar{R}_i(t_k) + (1 - \alpha_i) m \bar{S}_i(t_{k-1})} \quad m \geq 1 \quad (13)$$

由于估算值与实际值存在误差, 因此通过一个调节因子 $\rho_s$ 来减少误差, 并定时查询一次节点信息来更新该调节因子:

$$\rho_s = \frac{S_i^*(t_k)}{\bar{S}_i(t_k)} \quad (14)$$

由节点*i*估算节点*j*的能量因子为:

$$\alpha_j = 1 - \frac{E_{bj}(t_k)}{E_{init}} = 1 - \frac{E_{bj}(t_{k-1}) - E_j(t_k)}{E_{init}}$$

式中,  $E_j(t_k)$ 是节点*j*在 $t_k$ 期间消耗的能量, 由发送和接收数据包的总量决定。

$$E_j(t_k) = E(S_j(t_k) + \bar{S}_j(t_k) + R_j(t_k) + \bar{R}_j(t_k)) \quad (15)$$

假设节点*j*共收到*m*个节点的数据, 则节点*j*在 $t_k$ 期间消耗的能量估算值为:

$$E_j^*(t_k) \approx E(mR_i(t_k) + m\bar{R}_i(t_k) + mS_i(t_k) + m\bar{S}_i(t_k)) = mE_i(t_k) \quad (16)$$

所以节点*j*的能量因子的估算值为:

$$\alpha_j^* = \rho_\alpha \left( 1 - \frac{E_{bj}(t_k)}{E_{init}} \right) = \rho_\alpha \left( 1 - \frac{E_{bj}(t_{k-1}) - mE_i(t_k)}{E_{init}} \right)$$

(17)

该估算值通过  $\rho_\alpha$  来调节:

$$\rho_\alpha = \frac{\alpha_j^*}{\alpha_j} \quad (18)$$

### 3 算法及仿真

算法核心思想是节点通过相邻节点在上一个时间片的行为和节点自身代价以及利益来选择目的节点,从而达到能量和吞吐量均衡的目的。每个节点需保存的信息包括节点的上游节点集合 $p$ (传输链中位于该节点之前的相邻节点集合)、下游节点集合 $q$ (即传输链中位于该节点之后的相邻节点集合)、节点的能量因子 $\alpha$ 、节点深度 $D$ 、目的节点 $T$ 、支付成本 $\pi$ 和调节参数 $\rho_\alpha$ 、 $\rho_s$ 。

算法通过全网初始化和目的节点选择及调整两个阶段实施。算法中假设所有节点(除Sink节点以外)具有相同的初始能量。

阶段一:全网初始化,该阶段只执行一次。

1) Sink节点用泛洪方式确定第 $i$ 个节点到Sink节点的深度 $D_i$ (Sink节点的深度定义为0,距离Sink节点1跳的节点深度为1,距离Sink节点2跳的节点深度为2,其他深度的节点依此类推)。通过发送通报数据包,可以确定每个节点需要保存的信息。初始化后将能量因子设置为0,节点目的地址设置为 $p_i$ 中的随机节点,支付成本为0,调节参数 $\rho_\alpha$ 、 $\rho_s$ 为1。

2) 各个节点依次向相邻节点发送自己的节点信息。

阶段二:在每个时间片,节点完成目的节点选择和调整,假设每个时间片节点采集的传感数据包大小相同,即产生的源数据包率恒定,则算法流程如下:

1) 如果节点 $i$ 的上游节点集合不为空 $p_i \neq \emptyset$ ,节点 $i$ 选择 $p_i$ 中支付成本最小的节点 $j$ 作为自己的目的节点;如果 $p_i = \emptyset$ ,则请求查询 $D_j = n - 2 (D_i = n)$ 的节点信息,更新 $p_i$ ,直到 $p_i \neq \emptyset$ 。

2) 节点 $i$ 计算自己在该时间片结束后的能量因子 $\alpha_i$ ,如果 $\alpha_i \rightarrow 0$ ,转至3);如果 $\alpha_i \rightarrow 1$ ,通知 $q_i$ 中所有节点,节点 $i$ 在下一个时间片将停止转发数据, $q_i$ 中的节点在收到该消息后,将节点 $i$ 从上游集合中删除,同时节点 $i$ 置 $q_i$ 为空,转至3);如果 $0 < \alpha_i < 1$ ,转至3)。

3) 节点 $i$ 估算节点 $j$ 的能量因子,如果 $\alpha_j^* \rightarrow 0$ ,转至5);如果 $\alpha_j^* \rightarrow 1$ ,则向节点 $j$ 发送查询信息,如果节点 $i$ 确认 $\alpha_j \rightarrow 1$ ,回到1);否则节点 $i$ 更新节点 $j$

的信息,转至5); $0 < \alpha_j < 1$ ,转至4)。

4)  $\bar{S}_i(t_k) > 0$ ,计算 $S_i^*(t_k)$ 。如果 $\bar{S}_i(t_k) > S_i^*(t_k)$ ,节点通知 $q_i$ 中的节点最大转发数据包为 $S_i^*(t_k)$ 个; $q_i$ 中的节点更新 $\rho_s$ 。

5) 节点 $i$ 路由更新完毕,进入稳定状态。

为了分析和验证前面提出的模型和算法,本节用一个小算例网络来进行数值分析。如图1所示网络中A为源节点,I为Sink节点,其余为中继节点。源节点负责产生源数据,中继节点除了负责转发数据包外,也可以作为源节点产生源数据。

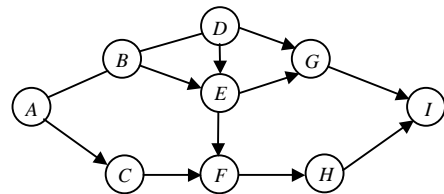


图1 算例网络

能量模型<sup>[12]</sup>和仿真参数设置为:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\varepsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\varepsilon_{mp}d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (19)$$

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec} \quad (20)$$

式中,  $E_{elec} = 50$  nJ/bit;  $\varepsilon_{fs} = 50$  nJ/bit;  $\varepsilon_{mp} = 0.0013$  pJ/bit/m<sup>2</sup>。每轮运行时间20 s;数据包大小为100字节;节点初始能量为2 J。

为验证模型的有效性,分别设置节点间距离为 $d < 25$  m和 $d < 50$  m,节点产生源数据包速率 $P = 1$  packet/s和 $P = 10$  packets/s来进行分析。单跳距离 $d < 25$  m节点死亡时间仿真结果如图2所示,单跳距离 $d < 50$  m节点死亡时间仿真结果如图3所示。

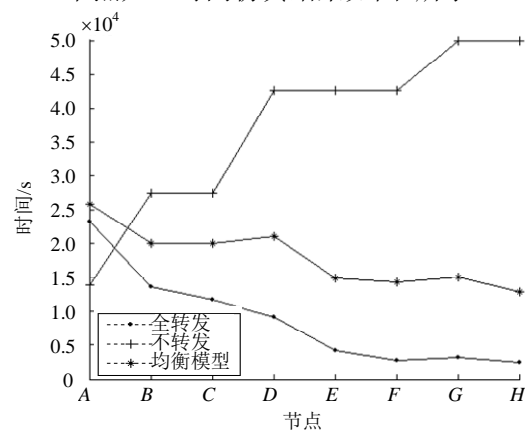


图2 单跳距离 $d < 25$  m节点死亡时间仿真结果

从图2和图3的统计数据发现,当节点距离增大时,单跳网络的性能下降明显,首节点的死亡时间要低于多跳网络,Sink节点的接收数据总量也有明显的下降,因此对于较大的网络使用多跳的方式来

传递数据更加合理。而采用均衡模型的多跳网络在首节点死亡时间和网络生存时间上均超越了全转发方式。

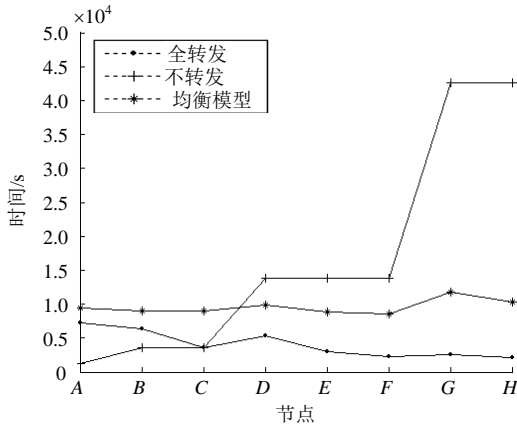


图3 单跳距离 $d < 50$  m节点死亡时间仿真结果

下面讨论当网络吞吐量增大时对模型的影响。

设置 $d < 50$ , 当节点产生源数据的速率由原来的每秒1包( $P=1$ )改为每秒10包( $P=10$ )。如图4节点死亡时间仿真结果所示, 当网络吞吐量增大时, 节点的能耗均衡性反而增加。原因是节点可以通过转发数据包数量来调节自己的能量消耗, 由于随着节点吞吐量的增加, 转发数据包的数量也随之增加, 各个节点可以进行调整的范围也跟着增大。因此网络中节点能量使用更加均衡, 各个节点的死亡时间也趋于平均。 $P=1$ 和 $P=10$ 节点死亡时间仿真结果如图4所示。

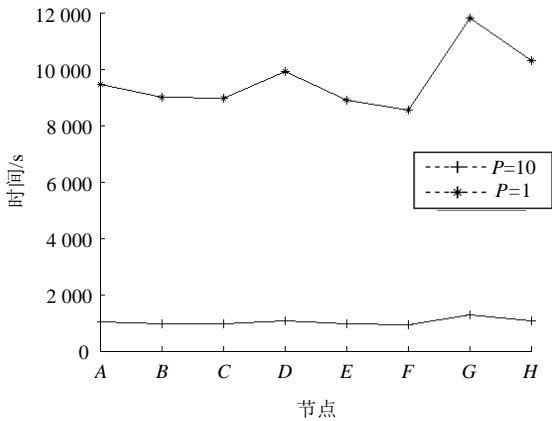


图4  $P=1$ 和 $P=10$ 节点死亡时间仿真结果

图5所示为整个网络运行期间各个节点在不同吞吐量情况下的收发数据总量仿真结果。受节点初始能量的限制, 各个节点的收发总量在两种情况下几乎相同。当吞吐量增大时, 节点的收发总量还要稍大于吞吐量较小的情况。原因是随着单个时间片节点吞吐量增加, 节点能耗也随之增加, 而持续的稳定阶段总量减少, 节点用于交换信息的次数也随

之减少, 所以收发总量反而略有增加。

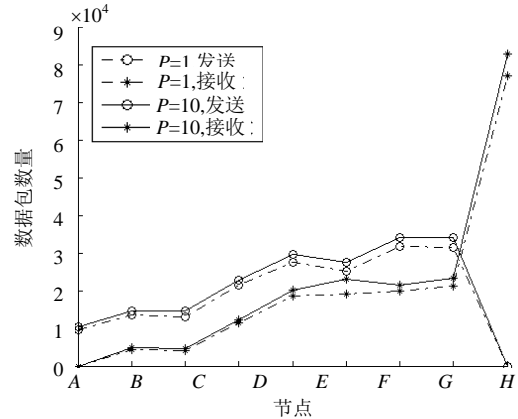


图5  $P=1$ 和 $P=10$ 收发数据仿真结果

### 4 后续工作

在进一步的研究工作中, 还有很多工作需要更细致地分析: 1) 没有考虑模型中各个节点传输的时延对模型的影响。2) 本文构造的模拟网络传输理论模型仅考虑了最主要的能耗, 没有分析由于不同传输机制以及时延对节点能量的影响。在后继工作中, 将建立一个能耗校正机制, 确保各个节点进行的能耗判断更加准确。

### 参 考 文 献

- [1] YIN Xiao-yan, ZHOU Xing-she, HUANG Rong-sheng, et al. A fairness-aware congestion control scheme in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 5225-5234.
- [2] CANO C, BELLALTA B, SFAIROPOULOU A, et al. A low power listening MAC with scheduled wake up after transmissions for WSNs[J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(4): 221-223.
- [3] HONG Sung-hwa, KIM Hoon-ki. A multi-hop reservation method for end-to-end latency performance improvement in asynchronous MAC-based wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(3): 1214-1210.
- [4] MESSIER G G, HARTWELL J A, DAVIES R J. A sensor network cross-layer power control algorithm that incorporates multiple-access interference[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(8): 2877-2883.
- [5] MUNG C, LOW S H, CALDERBANK A R, et al. Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architectures[J]. Proc of the IEEE, 2007, 95(1): 255-312.
- [6] ZHU Jun-hua, CHEN Shan, BRAHIM B, et al. Tradeoff between lifetime and rate allocation in wireless sensor networks: a cross layer approach[C]//INFOCOM 2007, 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Alaska: IEEE CS Press, 2007: 267-275.

- [7] 朱清新. 离散和连续空间中的最优搜索理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
ZHU Qing-xin. The optimal search theory in discrete and continuous spac[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [8] NG See-kee, SEAH W K G. Game-theoretic approach for improving cooperation in wireless multihop networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 2010, 40(3): 559-574.
- [9] MARBACH P, QIU Ying. Cooperation in wireless Ad hoc networks: a market-based approach[J]. IEEE ACM Transactions on Networking, 2005, 13(6): 1225-1338.
- [10] URPI A, BONUCCELLI M, GIORDANO S. Modelling cooperation mmobile Ad hoc networks: a formal description of selfishness[C]//Proc WiOpt. France: Sophia-Antipolis, [s.n.], 2003: 3-5.
- [11] MARTIN J O, ARIEL R. A course in game theory[M]. London: MIT Press, 1994.
- [12] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN I I. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans, 2002, 1(4): 660-670.

编辑 漆蓉

(上接第748页)

- [5] AL-SHAER E, HAMED H, BOUTABA R, et al. Conflict classification and analysis of distributed firewall policies[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, JSAC, 2005, 23(10): 2069-2084.
- [6] LIN C, XUE C, ZHITANG L. Analysis and classification of IPsec security policy conflicts[C]//Proc Japan-China Joint Workshop on Frontier of Computer Science and Technology. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- [7] 吴蓓. 安全策略转换关键技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.  
Wu Bei. Research on technology of security policy transformation[D]. Zhenzhou: PLA Information Engineering university, 2010.
- [8] BANDARA A K, LUPU E C, RUSSO A. Using event calculus to formalize policy specification and analysis[C]//Proc of the 4th IEEE Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks(Policy 2003). [S.l.]: IEEE, 2003: 1-14.
- [9] BALIOSIAN J, SERRAT J. Finite state transducers for policy evaluation and conflict resolution[C]//Proc of the Fifth IEEE International Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks. [S.l.]: IEEE, 2004.
- [10] 哈斯·瑞安. 面向计算机科学的数理逻辑: 系统建模与推理[M]. 第2版. 何伟, 樊磊, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
HUTH M, RYAN M. Logic in computer science: modelling and reasoning about systems[M]. 2nd ed. Translated by HE Wei, FAN Lei. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 朱泽涛. 基于模型检测的UML形式化验证及其系统实现[D]. 广州: 中山大学, 2005.  
ZHU Ze-tao. A formal verification system for UML models based on model checking[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2005.
- [12] 程亮, 张阳. 基于UML和模型检测的安全模型验证方法[J]. 计算机学报, 2009, 32(4): 699-708.  
CHENG Liang, ZHANG Yang. A verification method of security model based on UML and model checking[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(4): 699-708.
- [13] XU De-sheng, XIA Ke-jian, ZHANG De-zheng, et al. Model checking the inconsistency and circularity in rule-based expert systems[J]. Compute and Information Science, 2009, 2(1): 12-17.

编辑 税红