

文章编号:1001-9081(2010)07-1731-05

## 层次拓扑结构的无线传感器网络能量模型

魏永红<sup>1,2</sup>, 李科杰<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2. 天津科技大学 计算机科学与信息工程学院, 天津 300222)

(wei\_yonghong@163.com)

**摘要:** 能耗效率是无线传感器网络中非常重要的性能指标。为了提高网络能耗效率, 研究无线传感器网络中的能量模型是非常必要的。针对无线传感器网络层次拓扑结构模型, 根据传感器节点工作能耗特点和在网络中承担的不同角色, 推导出普通传感器节点、簇头节点能耗模型; 并对单跳和多跳两种传输方式的网络能耗以及能耗最小时的最优簇头数进行理论分析和计算, 对比了不同传输方式的网络能耗。通过理论分析推导出网络能耗和最优簇头数公式, 将为设计能量有效的无线传感器网络拓扑结构算法和通信协议提供指导和理论基础。

**关键词:** 无线传感器网络; 层次拓扑结构; 能量模型; 单跳传输; 多跳传输

中图分类号: TP393 文献标志码:A

## Energy model for wireless sensor networks based on hierarchical topology

WEI Yong-hong<sup>1,2</sup>, LI Ke-jie<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Energy efficiency is an important indicator in the performance evaluation of Wireless Sensor Network (WSN). It is very essential to research energy model for improving the energy efficiency of wireless sensor network. Concerning the hierarchical topology model of wireless sensor network, this paper proposed the energy consumption models of an ordinary sensor node and a cluster head node according to the characteristics and various roles of sensor node's working energy consumption in the network. This paper deduced the energy consumption of single-hop network and multi-hop network, computed the optimal number of cluster heads in the condition of the least energy consumption theoretically, in the meantime, compared the energy consumption of different transmitting models. The formulas of energy consumption and the optimal cluster-head were theoretically analyzed and deduced, which provided guidance and theoretical basis for the design of energy efficient topology algorithms and communication protocols.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); hierarchical topology; energy model; single-hop transmission; multi-hop transmission

## 0 引言

无线传感器网络是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点通过无线电通信形成的一个自组织网络系统, 其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域里被监测对象的信息, 并发送给用户<sup>[1-2]</sup>。由于传感器节点体积微小, 通常携带电池能量十分有限, 且部署区域环境复杂, 有些区域甚至人无法到达, 所以传感器节点电池难以充电或进行更换。因此, 受到电池容量的限制, 如何高效使用能量来最大化网络生命周期是传感器网络面临的首要挑战。为了提高无线传感器网络能量效率, 需要对无线传感器网络的能量模型进行研究。

文献[3]采用电磁场能量扩散理论、电路能量消耗理论和技术, 推导出传感器网络中普通感知的节点、数据汇聚节点和簇头节点的能量模型, 进而研究单跳传输方式下网络能耗理论模型及其分析计算。文献[4]根据传感器节点工作能耗特点和数据传输能耗模型, 建立传感器节点能量模型, 并把所有网络拓扑结构抽象为单跳和多跳传输方式, 分析两种传输模式的网络总能耗和单节点能耗。文献[5]描述一种基于能量均衡的新分簇算法, 该算法中分析了层次拓扑结构中簇头

和簇内成员能耗模型。文献[6]描述了无线传感器网络中恰当的路由选择对于节能的重要性, 并分析单跳与多跳传输路由路径能耗情况, 得出一个临界距离, 根据源节点和基站距离是否大于临界距离来选择单跳传输还是多跳传输。

本文针对层次拓扑结构网络模型, 根据传感器节点在网络中工作能耗特点、承担的角色以及采用的数据传输方式, 研究不同传输方式的网络能量模型、网络能耗最小时的最优簇头数以及网络能耗。

## 1 传感器节点能量模型

从硬件方面考虑, 传感器节点能耗模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。Gregory 分析得到传感器节点将 1 bit 信息传输 100 m 距离需要的能量大约相当于执行 3 000 条计算指令消耗的能量<sup>[7]</sup>。同样, 和无线通信模块所需能量相比, 传感器模块采集信息耗能很低, 且与工作时间成正比。由于这种常量性消耗不影响通信模型, 以下分析暂不考虑。所以在实际工作中传感器节点能耗主要集中在无线通信模块上。

采用文献[8]给出的传感器节点工作能耗模型, 发送端

收稿日期:2010-01-13;修回日期:2010-03-17。

作者简介:魏永红(1974-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络、无线通信; 李科杰(1946-), 男, 山东龙口人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 微小型系统设计与集成、机器人技术、感知与测控技术。

所消耗的能量包含无线电路能耗和发射放大器能耗两部分,接收端所消耗能量主要是接收电路能耗。根据收发端之间的距离不同,分别使用自由空间模型和多径衰落信道模型。若两者之间的距离小于  $d_0$ , 使用自由空间模型;若两者之间距离大于  $d_0$ , 使用多径衰落信道模型。故将  $l$  bit 信息传送距离  $d$ ,节点的发送和接收能耗分别为:

$$E_{\text{tx}}(l, d) = \begin{cases} lE_e + l\varepsilon_{\text{fs}}d^2, & d < d_0 \\ lE_e + l\varepsilon_{\text{amp}}d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{\text{rx}}(l) = lE_e \quad (2)$$

式中:  $E_e$  为无线通信模块发送或接收单位比特数据电路能耗,  $\varepsilon_{\text{fs}}$  和  $\varepsilon_{\text{amp}}$  表示发射放大器传送每比特数据所消耗的能量,  $d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{fs}}}{\varepsilon_{\text{amp}}}}$ 。

## 2 簇头能量模型

### 2.1 簇头聚合数据能量模型

在所研究的分层网络模型中,所有节点将感知的数据传到簇头,簇头负责对数据汇聚处理计算,并将计算的结果单跳传输到基站或相邻的簇头。

假设一个簇内有  $n$  个节点(1 个簇头和  $n - 1$  个簇内成员),且传输数据比特数为  $l$ ,则每个收发周期过程中,簇头接收和融合簇内数据所消耗的能量为:

$$E_{\text{ch}}^{\text{DA}} = nlE_{\text{DA}} + (n - 1)lE_e \quad (3)$$

其中  $E_{\text{DA}}$  为簇头融合单位比特数据所消耗能量。

### 2.2 簇头转发数据能量模型

簇头转发数据能耗  $E_{\text{chtoch}}$  由两部分能耗组成:一部分是当前簇头接收来自其他簇的数据所消耗的能量  $E_{\text{rx}}$ ;另一部分是当前簇头转发其他簇的数据所消耗的能量  $E_{\text{tx}}$ 。根据式(1)和(2)得:

$$E_{\text{chtoch}} = E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}} = \begin{cases} 2lE_e + l\varepsilon_{\text{fs}}d_{\text{chtoch}}^2, & d_{\text{chtoch}} < d_0 \\ 2lE_e + l\varepsilon_{\text{amp}}d_{\text{chtoch}}^4, & d_{\text{chtoch}} > d_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中: $l$  是簇头转发来自其他簇头数据比特数,  $d_{\text{chtoch}}$  表示簇头之间的距离。

### 2.3 簇头能量模型

每个收发周期内,簇头所消耗的能量  $E_{\text{ch}}$  分两种情况:

1) 簇头不充当中继任务,簇头能耗由簇头融合数据能耗  $E_{\text{ch}}^{\text{DA}}$  和簇头发送融合数据能耗  $E_{\text{chtoch}}^{\text{DA}}$  两部分组成;2) 簇头充当中继任务,簇头能耗是在情况 1) 基础上再加上簇头转发来自其他簇头的数据所消耗能量  $E_{\text{chtoch}}$ 。

$$E_{\text{ch}} = \begin{cases} E_{\text{ch}}^{\text{DA}} + E_{\text{chtoch}}^{\text{DA}}, & \text{情况 1)} \\ E_{\text{ch}}^{\text{DA}} + E_{\text{chtoch}}^{\text{DA}} + E_{\text{chtoch}}, & \text{情况 2)} \end{cases} \quad (5)$$

其中  $E_{\text{chtoch}}$  根据式(1)计算。

## 3 网络能量模型

无线传感器网络中数据传输方式分为单跳传输和多跳传输。本文针对层次拓扑结构,从两种数据传输方式着手,通过数学建模和理论分析推导网络能量模型和网络能耗。在分析能量模型中,忽略了控制信号的收发开销以及消息确认信号 ACK 开销。忽略这些开销一方面是为了简化模型,另一方面是因为,与大量的应用数据传输的能耗相比,这些开销相对要小得多,可忽略。

### 3.1 单跳传输能量模型

#### 3.1.1 单跳传输能量模型定义

针对层次拓扑结构网络,单跳传输是指簇头与基站采用一跳数据传输,如图 1 所示。网络被划分为若干簇,簇头以单跳方式与基站进行通信,无需通过其他节点进行数据中转,簇内节点与簇头直接进行通信,区域中心黑色圆点为基站,扇形区域表示簇,小的黑色圆点表示簇头。说明:为了使模型简洁好看,通常用扇形代替圆形表示簇,但在实际理论计算时,簇按圆形处理。

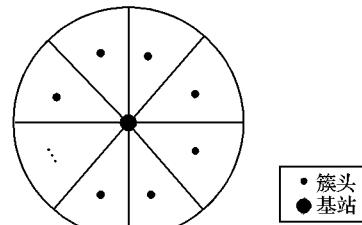


图 1 单跳传输网络模型

除了基站,根据式(1)、(2)、(3)和(5)可推出整个网络在单个收发周期时间内总能耗为:

$$E_{\text{net}} = \sum_{c=1}^{n_{\text{ch}}} (E_{\text{ch}} + \sum_{i=1}^{N(c)} E_{\text{ntoch}}) \quad (6)$$

其中:  $E_{\text{ch}}$  不承担中继任务,  $E_{\text{ntoch}}$  表示簇内成员向簇头发送数据能耗,  $n_{\text{ch}}$  为网络中簇头数,  $N(c)$  表示簇头  $c$  对应的簇内成员数。

#### 3.1.2 单跳传输能量模型应用

单跳无线传感器网络通常由成千上万节点组成,分布在一定区域内。布置网络时面临的首要问题是:至少需要多少簇头才能覆盖监测区域,并使网络能耗最小。

设  $N$  个传感器节点随机部署在一个半径为  $R$  的圆形区域内,如图 1 所示,簇头数为  $k$ , 每个簇内成员数平均为  $N/k$ (1 个簇头和  $(N/k - 1)$  个非簇头节点), 基站与簇头间的通信能耗遵循多径衰落模型。根据式(5) 推导出在单个收发周期内簇头节点的能耗为:

$$E_{\text{ch}} = E_{\text{ch}}^{\text{DA}} + E_{\text{chtoch}}^{\text{DA}} = lE_e \left( \frac{N}{k} - 1 \right) + lE_{\text{DA}} \frac{N}{k} + lE_e + l\varepsilon_{\text{amp}}d_{\text{toBS}}^4 = lE_e \frac{N}{k} + lE_{\text{DA}} \frac{N}{k} + l\varepsilon_{\text{amp}}d_{\text{toBS}}^4 \quad (7)$$

其中:  $l$  表示传输数据比特数;  $d_{\text{toBS}}$  表示簇头到基站的距离。簇头数据融合是完全融合,即簇内  $N/k$  个  $l$  比特的数据聚合为  $l$  比特。

传感器节点随机均匀部署在面积为  $\pi R^2$  的区域, 每个簇头平均覆盖的面积区域为  $\pi R^2/k$ , 其半径为  $\frac{R}{\sqrt{k}}$ , 簇内节点均匀分布, 则分布函数  $\rho(r, \theta) = \frac{k}{\pi R^2}$ , 且  $\rho(r, \theta)$  是关于  $r$  和  $\theta$  的常量。假设簇头在簇的中心,则簇内节点到簇头的期望平均距离为:

$$E(d_{\text{toBS}}^2) = \iint r^2 \rho(r, \theta) r dr d\theta = \rho \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\frac{R}{\sqrt{k}}} r^3 dr d\theta = \frac{\rho \pi R^4}{2k} = \frac{R^2}{2k} \quad (8)$$

由式(6)~(8)推导出在单个收发周期中网络总能耗为:

$$E_{\text{net}} = \sum_{c=1}^k (E_{\text{ch}} + \sum_{i=1}^{N(c)} E_{\text{ntoch}}) =$$

$$\begin{aligned} & k \left( lE_e \frac{N}{k} + lE_{DA} \frac{N}{k} + l\epsilon_{amp} d_{toBS}^4 + \right. \\ & \left. \left( \frac{N}{k} - 1 \right) (lE_e + l\epsilon_{fs} d_{toch}^2) \right) = \\ & l \left( (2N - k)E_e + NE_{DA} + \right. \\ & \left. (N - k)\epsilon_{fs} \frac{R^2}{2k} + k\epsilon_{amp} d_{toBS}^4 \right) \end{aligned} \quad (9)$$

求  $E_{net}$  关于簇头数  $k$  的导数为 0, 可得到网络能耗最小时, 所需的簇头数  $k$  为:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{net}}{dk} = -N\epsilon_{fs} \frac{R^2}{2k^2} + \epsilon_{amp} d_{toBS}^4 - E_e = 0 \\ k = \sqrt{\frac{N\epsilon_{fs} R^2}{2(\epsilon_{amp} d_{toBS}^4 - E_e)}} \approx \sqrt{\frac{N\epsilon_{fs}}{2\epsilon_{amp}}} \frac{R}{d_{toBS}^2} \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.2 多跳传输能量模型

与单跳传输方式不同, 在多跳传输方式中, 基站与簇之间是通过多跳传输方式进行通信。一个簇的数据或基站的命令通过多跳传输, 最终到达基站或目的簇, 且簇内节点与簇头采用直接通信。每个簇头通信区域远小于整个网络覆盖区域。

#### 3.2.1 多跳传输能量模型定义

借鉴文献[9]中所提的网络模型, 设分层多跳网络模型如图 2 所示, 网络中所有节点同质, 节点均匀地部署在以基站为中心的圆形区域, 网络被划分为  $M$  个相邻的环状区域, 从内向外分为  $M$  层, 每层由分布均匀的簇组成, 簇内节点也均匀分布(用扇形区域近似表示簇),  $i$  表示第  $i$  个圆环即第  $i$  层, 处于第  $i$  层簇头产生的数据需要通过第  $(i-1)$  层簇头向前经过  $i-1$  次转发传送直到基站。

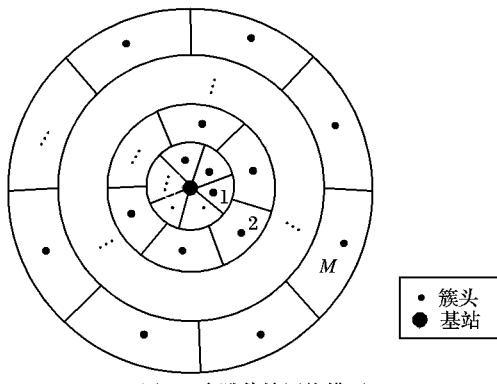


图 2 多跳传输网络模型

除基站外, 整个无线传感器网络在单位收发周期内的总能耗为:

$$E_{net} = \sum_{j=1}^M \left\{ \sum_{i=1}^{N_j^{ch}} \left( \sum_{k=1}^{N(i)} E_{ntoch} + E_{ch}^{j,i} + \sum_{l=j-1}^1 E_{chtoch}^l \right) \right\}; M \geq 2 \quad (11)$$

式中:  $N_j^{ch}$  表示第  $j$  层的簇头数;  $E_{ch}^{j,i}$  表示第  $j$  层第  $i$  个簇头节点所消耗的能量, 且不包含转发其他簇头数据所消耗能量;  $N(i)$  表示簇头  $i$  对应簇内节点数;  $E_{chtoch}^l$  表示第  $l$  层簇头节点转发数据所消耗的能量;  $\sum_{l=j-1}^1 E_{chtoch}^l$  表示将来自  $j$  层的数据经过  $j-1$  层转发直到基站所需的能耗。

#### 3.2.2 多跳传输能量模型应用

假设多跳传输网络模型如图 2, 网络中节点数为  $N$ , 簇头数为  $k$ , 每个节点通信半径为  $R$ , 网络被划分为  $M$  个相距为  $R$  的环状区域, 在单位时间内节点收发数据均为  $l$  bit, 每个簇头节点的数据融合都是完全聚合, 簇内节点和簇间通信均采用

自由模型。

由于传感器节点使用全向天线, 在半径为  $R$  的圆形通信范围内节点均能接收并转发数据, 所以处于层与层之间的簇头通信并非以最小能耗转发。为了使层间簇头数据传输的能耗最小, 本文采用文献[4]描述的逐级楔形多跳转发模型来选择层间簇头数据转发, 即第  $n$  层簇头节点发送本簇聚合数据或转发数据到  $n-1$  层簇头节点的期望距离  $\lambda$  为:

$$\begin{aligned} d_{chtoch} = E(\lambda) = \sum_{i=1}^{N_n} \lambda_i p_i = \\ \int_{(n-1)R}^{nR} \left( [x - (n-1)R] \frac{2\pi x}{\pi \{(nR)^2 - [(n-1)R]^2\}} \right) dx = \\ \frac{3n-1}{6n-3} R; 2 \leq n \leq M \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $N_n$  表示第  $n$  层的节点数(包含簇头)。

第  $n$  层具有的节点数为:

$$N_n = \frac{\pi(nR)^2 - \pi(n-1)R^2}{\pi(MR)^2} N = \frac{n^2 - (n-1)^2}{M^2} N \quad (13)$$

第  $n$  层具有的簇头数为:

$$N_n^{ch} = \frac{\pi(nR)^2 - \pi(n-1)R^2}{\pi(MR)^2} k = \frac{n^2 - (n-1)^2}{M^2} k \quad (14)$$

第  $n$  层每个簇内的成员数平均为:

$$N_m = \frac{N_n}{N_n^{ch}} = \frac{N}{k} \quad (15)$$

第  $n$  层每个簇头平均覆盖的面积区域为  $\frac{\pi R^2 (n^2 - (n-1)^2)}{N_n^{ch}}$ , 其半径为  $\frac{RM}{\sqrt{k}}$ , 节点在簇内均匀分布, 分布函数为:

$$\rho(r, \theta) = \frac{N_n^{ch}}{\pi R^2 (n^2 - (n-1)^2)} = \frac{k}{\pi R^2 M^2}$$

则簇内节点到簇头期望平方距离为:

$$\begin{aligned} E(d_{toch}^2) = \iint r^2 \rho(r, \theta) r dr d\theta = \rho \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\frac{RM}{\sqrt{k}}} r^3 dr d\theta = \\ \frac{\rho \pi R^4 M^4}{2k^2} = \frac{R^2 M^2}{2k} \end{aligned} \quad (16)$$

除基站外, 根据式(11)~(16)可得整个网络在单位收发周期内总能耗为:

$$\begin{aligned} E_{net} = \sum_{j=1}^M \left\{ \sum_{i=1}^{N_j^{ch}} \left( \sum_{k=1}^{N(i)} E_{ntoch} + E_{ch}^{j,i} + \sum_{l=j-1}^1 E_{chtoch}^l \right) \right\} = \\ \frac{(2n-1)k}{M^2} \left\{ \frac{N}{k} (lE_e + l\epsilon_{fs} d_{toch}^2) + \right. \\ \left. (lE_e \frac{N}{k} + lE_{DA} \frac{N}{k} + l\epsilon_{fs} d_{chtoch}^2) + \sum_{l=n-1}^1 (2lE_e + l\epsilon_{fs} d_{chtoch}^2) \right\} = \\ (2n-1) \left\{ \frac{N}{M^2} (2lE_e + lE_{DA}) + \frac{(3n-1)^2 R^2 l\epsilon_{fs} k}{(6n-3)^2 M^2} + \frac{l\epsilon_{fs} R^2 N}{2k} + \right. \\ \left. \sum_{l=n-1}^1 \left( \frac{2lE_e k}{M^2} + \frac{(3n-1)^2 R^2 l\epsilon_{fs} k}{(6n-3)^2 M^2} \right) \right\}; 2 \leq n \leq M \end{aligned} \quad (17)$$

求  $E_{net}$  关于簇头数  $k$  的导数为 0, 推导出网络能耗最小时, 所需的簇头数  $k$  为:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{net}}{dk} = \frac{(3n-1)^2 R^2 l\epsilon_{fs}}{(6n-3)^2 M^2} - \frac{l\epsilon_{fs} R^2 N}{2k^2} + \\ \sum_{l=n-1}^1 \left( \frac{2lE_e}{M^2} + \frac{(3n-1)^2 R^2 l\epsilon_{fs}}{(6n-3)^2 M^2} \right) = 0 \end{aligned}$$

$k =$

$$RM \sqrt{\frac{N\epsilon_{fs}}{2 \left\{ \frac{(3n-1)^2 R^2 \epsilon_{fs}}{(6n-3)^2} + \sum_{l=n-1}^1 \left( 2E_e + \frac{(3n-1)^2 R^2 \epsilon_{fs}}{(6n-3)^2} \right) \right\}}};$$

$$2 \leq n \leq M \quad (18)$$

## 4 能量模型仿真

### 4.1 单跳传输能量模型

由单跳传输能量模型推导出的网络最优簇头数公式可知,簇头数由区域的大小、区域中部署的节点数以及簇头与基站间的距离三方面因素决定。为了使验证结论简单化,在仿真中,本文只考虑在区域大小和区域中部署的节点数确定情况下,验证最优簇头数、簇头与基站间距离以及最小能耗间的关系。

设在监测区域  $M = 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  范围内随机部署节点  $N = 100$ , 节点初始能量为  $0.5 \text{ J}$ , 节点收发电路 ( $E_{\text{TX}}/E_{\text{RX}}$ ) 能耗均为  $50 \text{ nJ/bit}$ , 发射放大器能耗为  $\varepsilon_{\text{fs}} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$  和  $\varepsilon_{\text{amp}} = 0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$  两种类型, 数据聚合能耗  $E_{\text{DA}}$  为  $5 \text{ nJ/bit}$ , 节点收发数据包长度均为  $4000 \text{ bit}$ , 当簇头与基站的距离  $d_{\text{tBS}} \in (75, 200)$ , 根据式(10)求得最优簇头数为  $1 < k < 7$ , 如图3所示,此结论和LEACH算法中簇头在所有节点中占的百分比相一致,即5%。根据式(9)求得在最优的簇头取值范围内,网络的最小能耗取值范围为  $0.043 \sim 0.05 \text{ J}$ ,如图4所示。通过设置与上述相同的参数,在不考虑簇头与基站以及簇头与簇内成员距离限制情况下,执行LEACH算法得到结果如图5所示,平均每轮网络最小能耗为  $0.0485 \text{ J}$ ,且对应的簇头数为6,与理论分析推导的结论相一致。

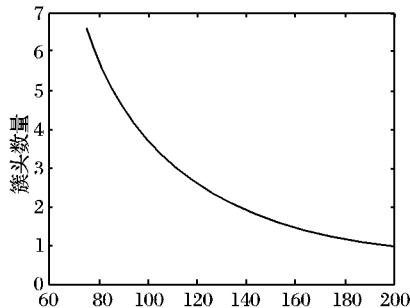


图3 单跳网络最优簇头数

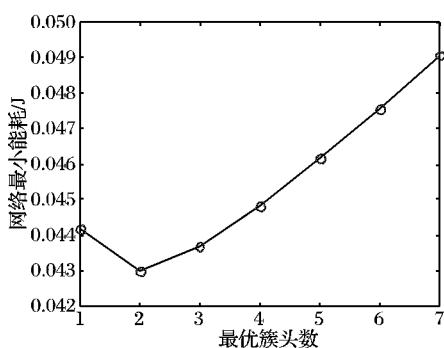


图4 单跳网络最小能耗

### 4.2 多跳传输能量模型

由多跳传输能量模型推导出的网络最优簇头数公式可知,簇头数由区域的大小、区域中部署的节点数、节点通信半径、网络分层数决定。为了使验证结论简单化,在仿真中,本文只考虑在区域大小和网络层数确定的情况下,区域中部署的节点数与网络中最优簇头数、最小能耗间的关系。

设在区域为  $M = 200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  范围内分别随机部署节点数  $N$  为  $100, 200, 300$  和  $400$ , 网络划分为5层, 节点初始能量为  $0.5 \text{ J}$ , 节点收发电路 ( $E_{\text{TX}}/E_{\text{RX}}$ ) 能耗均为  $50 \text{ nJ/bit}$ , 发射放大器能耗为  $\varepsilon_{\text{fs}} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$  和  $\varepsilon_{\text{amp}} = 0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$

两种类型,数据聚合能耗  $E_{\text{DA}}$  为  $5 \text{ nJ/bit}$ ,节点收发数据包长度均为  $4000 \text{ bit}$ 。在网络层数确定且保持网络能耗最小情况下,由式(18)得到在区域中部署不同节点数分别所需的最优簇头数取值范围,如图6所示;在网络层数确定且按照图6所得最优簇头数取值范围,由式(17)得到在区域中部署不同节点数,网络最小能耗的取值范围,如图7所示。

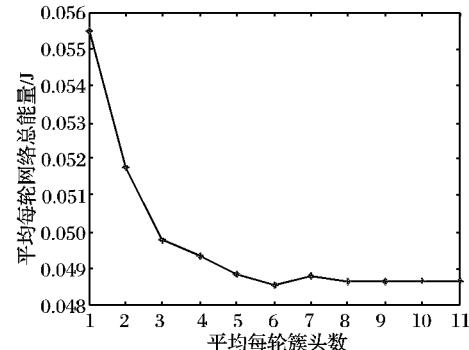


图5 LEACH算法网络能耗

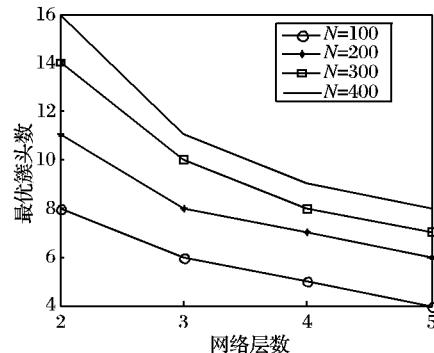


图6 网络层数与最优簇头数关系

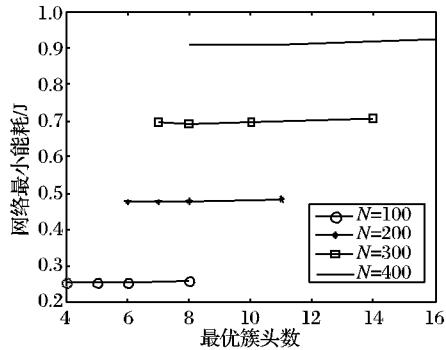


图7 最优簇头数与网络最小能耗关系

图7中显示随着簇头数增多,能耗随之增加,因为多跳传输中簇头承担中继和数据融合功能,故在多跳传输中簇头数越多能耗相对就多。根据式(17)和(18)推导出网络层数与网络最小能耗关系,如图8所示。多跳传输中位于网络内层上的簇头相比外层簇头能耗最大。因为内层簇头不但承担对本簇内数据的融合和转发,同时还转发来自外层簇的数据,从而消耗大量的能量;随着网络规模增大其能耗将会更大,最终导致内层簇头能耗快速耗尽而失效,出现网络“能量空洞”现象<sup>[10]</sup>。

### 4.3 网络能耗分析

上述理论计算推导和仿真,分析了不同传输方式的网络能耗及最优簇头数。下面分析单跳和多跳传输在相同条件下能耗对比。设监测区域为  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}, 150 \text{ m} \times 150 \text{ m}, \dots, 500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ , 随机部署 100 个节点,根据式(10)的结论设定最优簇头数为 6, 多跳传输网络分为 4 层, 根据式(9)和(17)仿真结果如图9所示。

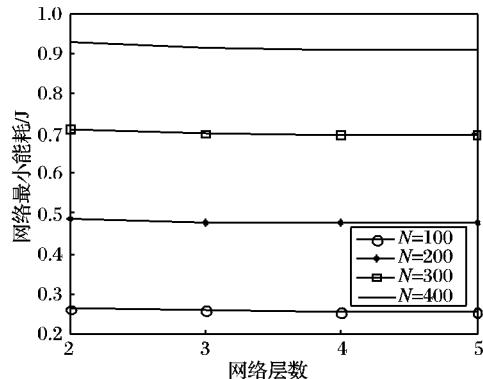


图8 网络层数与网络能耗关系

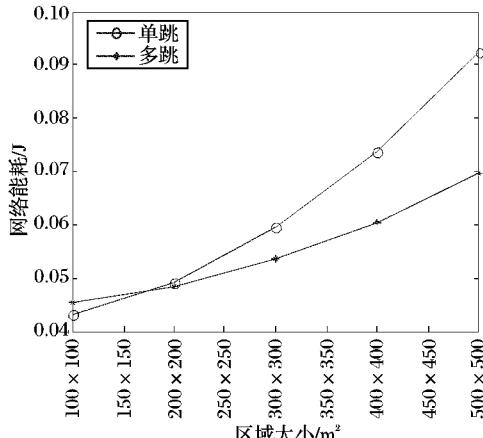


图9 单跳与多跳能耗比较

无线传感器网络若使用单跳传输模型,网络总能耗随着监测区域的增大而剧增,且离基站越远簇头能耗越快,这是由于单跳传输模型中簇头直接将本簇内融合的数据传送给基站的原因。单跳传输模型在监测小区域时,由于基站与簇头距离近,使得簇头相比监测大区域的能耗小一些,从而延长簇头寿命,进而延长网络生命周期。若使用多跳传输模式,则随着监测区域的增大,网络总能耗仍呈现递增,但增加的速率较单跳传输慢。所以当需要监测大面积区域时,采用多跳传输模式能更有效延长网络生命周期。

(上接第1730页)

数方面ACT算法的传输位数最少,然后依次是ABS算法和BT算法。这也证实了前面的理论分析结果。从图中可以看出:ACT算法的识别总位数和ABS算法近似,远远低于BT算法;而且进一步的分析可以知道随着标签长度增加,ACT算法明显优于ABS算法。

#### 4 结语

本文算法通过构造冲突树,减少碰撞数量,引入标签状态的概念,利用碰撞堆栈技术,调整搜索路径,从而提出了一种基于冲突树分解的自适应防碰撞算法。理论和仿真实验表明,ACT算法与常用的防碰撞算法相比,去除了空时隙、减少了碰撞时隙内数据通信量,有效减少识别时间,提高算法识别效率。目前算法还只限于防碰撞方面的研究,对于系统的整体架构和实现还有待于进一步的研究实践。

#### 参考文献:

- [1] 姜丽芬,卢桂章,辛运帷.射频识别系统中的防碰撞算法研究[J].计算机工程与应用,2007,43(15):29~32.
- [2] LIANG BIAO, HU AIQUN, QIN ZHONGYUAN. Trends and brief comments on anti-collision techniques in radio frequency identifica-

#### 5 结语

无线传感网络的首要任务就是节能。为了提高网络能耗效率,需构建合理的网络能量模型。本文针对层次拓扑结构的无线传感器网络,通过一般传感器节点和簇头节点能量模型,推导出单跳和多跳传输的网络能量模型和最优簇头,并分析网络能耗对网络运行的影响。网络运行过程中容易出现负载不均衡,特别是能量空洞现象,所以必须从构建拓扑控制和通信协议等方面采用有效的措施加以解决,使得网络能耗最小,负载均衡同时延长网络周期。

#### 参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor network [J]. IEEE Communications Magazines, 2002, 40(8):102~114.
- [2] CULLAR D, ESTRIN D, STRVASTAVA M. Overview of sensor network [J]. Computer, 2004, 37(8):41~49.
- [3] 杨余旺,于继明,赵炜,等.单跳无线传感器网络能量分析计算[J].南京理工大学学报,2007,31(1):81~84.
- [4] 张志东,孙雨耕,刘洋,等.无线传感器网络能量模型[J].天津大学学报,2007,40(9):1029~1034.
- [5] 付华,赵刚.无线传感器网络中一种能量均衡的分簇策略[J].计算机应用研究,2009,26(4):1494~1496.
- [6] 李小亚,黄道平,吴洪艳.无线传感器网络单跳与多跳路由的选择性[J].计算机工程,200,35(2):13~14.
- [7] IYER R, KLEINROCK L. QoS control for sensor networks[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE, 2003:517~521.
- [8] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660~667.
- [9] WANG W, SRINIVASAN V, CHUA K. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks[C]// Proceedings of the ACM MobiCom. New York: ACM, 2005:270~283.
- [10] 吴小兵,陈贵海.无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J].计算机学报,2008,31(2):253~260.

- [1] EOM J B, LEE T J. An efficient framed-slotted ALOHA algorithm with pilot frame and binary selection for anti-collision of RFID tags [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(11):861~8863.
- [2] CHOI J H. Query tree-based reservation for efficient RFID tag anti-collision [J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(1):85~87.
- [3] FINKENZELLER K. 射频识别技术[M].3版,吴晓峰,陈大才,译.北京:电子工业出版社,2001.
- [4] MYUNG J H, LEE W J. Adaptive binary splitting: A RFID tag collision arbitration protocol for tag identification [J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 11(5):347~355.
- [5] 周晓光.射频识别技术原理与应用实例[M].北京:人民邮电出版社,2006.
- [6] 陈炳才,徐东升,顾国昌,等.一种基于堆栈存储RFID防冲突算法[J].计算机应用,2009,29(6):1483~1486.
- [7] SEOL J M, KIM S W. Collision-resilient multi-state query tree protocol for fast RFID tag identification[C]// 2006 International Conference on Computational Intelligence and Security. Berlin: Springer-Verlag, 2006:1159~1162.