

## 基于网络编码的传感网重编程协议能耗模型<sup>\*</sup>

张艳, 张羽, 李君伟, 夏先进, 李士宁

(西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710129)

通讯作者: 张艳, E-mail: yanzhang@mail.nwpu.edu.cn

**摘要:** 在无线传感器网络中, 当需要进行软件更新、修复软件 Bug 时, 重编程协议能够将新程序镜像分发到多跳网络中的全部节点。近来, 基于网络编码的重编程协议被用于解决在高损环境下的有效代码分发问题, 但对这些协议性能的分析仍有待深入。提出一种基于时间和网络拓扑的能耗分析模型, 在模型中综合考虑了页面流水和节点通信距离对协议性能的影响。该模型分析结果与基于网络编码的重编程协议 Rateless Deluge 的仿真结果达到了较好的一致性(平均单节点能耗相对误差在 0.23% 左右), 验证了能耗分析模型的有效性。分析结果揭示了基于网络编码重编程过程的网络能耗与网络密度、网络大小和分发镜像页面大小的关系: 网络能耗随着网络密度的减小呈上升趋势(能耗与网络密度经拟合呈二次函数关系); 网络能耗与网络大小基本呈线性正相关关系(对于  $n \times n$  的网格型网络,  $n$  从 3~10, 随着  $n$  的增大, 网络能耗的平均增长率为 50%), 并且随着网络的增大, 单节点能耗有所增加(平均增长率为 6.9%); 页面大小增加时, 网络能耗呈下降趋势(平均下降率为 11.2%)。

**关键词:** 无线传感器网络; 重编程协议; 分析模型; 能耗; 网络拓扑

中文引用格式: 张艳, 张羽, 李君伟, 夏先进, 李士宁. 基于网络编码的传感网重编程协议能耗模型. 软件学报, 2013, 24(Suppl. (1)): 125-133. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13014.htm>

英文引用格式: Zhang Y, Zhang Y, Li JW, Xia XJ, Li SN. Analytical energy model of coding-based reprogramming protocols in wireless sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (1)): 125-133 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13014.htm>

### Analytical Energy Model of Coding-Based Reprogramming Protocols in Wireless Sensor Networks

ZHANG Yan, ZHANG Yu, LI Jun-Wei, XIA Xian-Jin, LI Shi-Ning

(School of Computer Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Corresponding author: ZHANG Yan, E-mail: yanzhang@mail.nwpu.edu.cn

**Abstract:** As application requirements evolve, the software on sensor nodes needs to be updated, or patched to fix errors to all the nodes of the entire networks. Recently, coding-based reprogramming protocols are proposed to provide efficient code dissemination in environments with high packet loss rate. Methods in analyzing the performance of these protocols, however, need further study. This paper presents an analytical model for energy cost based on time of dissemination and network topology. In this model, page pipelining and communication range between nodes are taken into accounts. Results from extensive simulations of a representative coding-based reprogramming protocol called Rateless Deluge coincide with the performance predicted by this model (the average relative error of single-node energy consumption is about 0.23%), thus validating the approach. These analytical results show that network density, network size and the number of packets per page all have significant impact on energy cost of the whole network. Particularly, a decrease in density of the network harms the energy performance (the energy consumption and network density is synthesized to be quadratic function). The energy cost of reprogramming the network is linear with the size of network (for the  $N \times N$  grid network, the average growth

\* 基金项目: 国家科技重大专项基金(2012ZX03005007); 陕西省自然科学基金(2013JQ8041); 西北工业大学基础研究基金(JC20110268)

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

rate is 50% when  $n$  change from 3 to 10) while the energy consumption of single node increases (the average growth rate is 6.9%). The energy cost is inverse with the page size of code image (the average rate of reduce is 11.2%).

**Key words:** wireless sensor network; reprogramming protocol; analytical model; energy cost; network topology

随着 WSN 应用需求的不断进化,传感器节点上的软件需要更新,以修复 Bug 或扩展新的功能.然而,物理访问部署后的节点受到实际感知环境的限制;人工更新这些节点在引入大量繁琐工作的同时会带来维护成本的提升.多跳的空中重编程方法给出了一种理想的解决途径.传统的重编程协议 Deluge<sup>[1]</sup>在因干扰、Jamming 和自然因素造成的高损环境下,其性能会急剧下降.近年来,研究人员利用基于无率码的传输方法<sup>[2]</sup>来提升有损环境下重编程协议的性能.然而,当前缺乏对基于网络编码重编程协议性能在能耗方面的定量研究.通过建立数学分析模型,一方面可以弥补因仿真实验而导致的时间和成本开销;另一方面为重编程协议性能的比较、优化和协议设计提供理论依据.

本文提出了一种基于时间和网络拓扑的能耗分析模型,深入分析了基于网络编码的 Rateless Deluge<sup>[2]</sup>协议. Rateless Deluge 协议在 Deluge 的基础上,通过在页内数据包传输过程中引入编译码机制,能够在高丢包率环境中获得良好的镜像分发性能.我们的模型分析结果与基于网络编码的重编程协议 Rateless Deluge 的仿真结果达到了较好的一致性(其中,单节点能耗平均相对误差为 0.23%左右),从而验证了能耗分析模型的有效性.

本文的主要贡献表现在:

- 1) 首次提出了一种面向网络编码的重编程协议能耗分析模型,它适用于任何网络拓扑.
- 2) 该模型综合考虑了页面流水技术和节点通信距离等关键因素对协议性能的影响.
- 3) 该模型分析结果表明,在面向网络编码的传感网重编程协议执行过程中,网络能耗与网络密度、网络大小和页面大小的关系表现在:网络能耗随着网络密度的减小呈上升趋势,能耗与网络密度经拟合呈二次函数关系;网络能耗与网络大小基本呈线性正相关关系,对于  $n \times n$  的网格型网络,  $n$  从 3~10,随着  $n$  的增大,网络能耗的平均增长率为 50%,并且随着网络的增大,单节点能耗有所增加,平均增长率为 6.9%;页面大小增加时,网络能耗呈下降趋势,平均下降率为 11.2%.

## 1 相关工作

无线传感器网络协议性能的数学分析具有挑战性,但人们在这方面的研究兴趣仍在不断增长<sup>[3]</sup>.文献[4]中,Feeney 等人通过分析无线自组网中各种路由传输方式,提出了一种面向路由协议的能耗分析数学模型及相应的具体计算方法.文献[5]给出了一种关于 WSN 中多跳 MAC 控制协议的能量模型,该模型在分析传输每比特能耗的基础上,根据多跳协议的特点计算出传输过程中的总能耗.文献[6]利用能耗分析对 IEEE 802.15.4 无线传感器网络生命周期进行预测,将每个传感器节点的基本能耗分为 5 个方面,针对每个方面建立能耗分析的数学模型,最终获得整个节点的能耗.由于这些研究成果并非直接面向基于网络编码的传感网协议性能分析,加之重编程协议具有其自身特点,因此与我们的工作不同.

在重编程协议分析方面,文献[1]初步建立了 Deluge 协议的时间分析数学模型,但此模型只适用于线性拓扑.文献[7]和文献[8]中所建立的时间分析模型忽略了页面流水技术和协议的细节内容.文献[9]中提出了一个渐进最优的评估多信道单收发器 WSN 中代码分发时延性能上下限的理论框架.文献[10]中建立了一个分发时间分析模型,并详细形式化了 Deluge 协议行为,但是将 Rateless Deluge 协议的编译码时间作为常量估计.文献[11]中针对前面的不足,利用 Dijkstra 最短路径算法,在考虑编译码机制的基础上,建立了基于网络编码的重编程协议数学分析模型.然而,该模型只针对更新代码的分发完成时间,并未对分发过程中全网节点所消耗的能量进行分析.本文针对以上问题,根据重编程协议的页面流水机制和节点通信规律,提出了基于网络编码的传感网重编程协议能耗分析模型,通过与仿真实验结果的比对,验证了所提模型的有效性.

## 2 问题定义

### 2.1 Rateless Deluge协议

#### 2.1.1 Deluge 协议

传感网重编程协议实现对更新镜像的全网分发功能,Deluge<sup>[1]</sup>是传统的基于 NACK 的重编程协议,采用三次握手机制来进行可靠数据传输.在 Deluge 中,基站在镜像分发之前,先将其分成大小相等的页,再将页进一步分成固定数量和大小相同的数据包.网络中的每个传感器节点在镜像分发的过程中,处于保持(maintain)、传送(transmit)和接收(receive)3 种不同的状态之一,如图 1 所示.

1) 保持状态下的节点会持续地、周期性地广播(这个作为周期的时间称为节点广播的时间轮)一个包含自身最新代码版本信息的广告(advertisement,简称 Adv);同时,它监听周围节点发送的信息,当未发现不一致的 Adv 时,节点将延长广播的周期.

2) 接收状态下的节点在发现自己运行的代码是旧版本后,就会向选定的邻居节点发送单播请求消息(requirement,简称 Req),要求该邻居节点发送新的程序镜像;同时,当接收节点发现自己周围有节点发送同样的请求信息时,该接收节点会抑制自己的请求,回退一段时间后再发送新的请求.

3) 传送状态下的节点接收到来自于邻居节点的请求,发送请求节点所需要的数据.

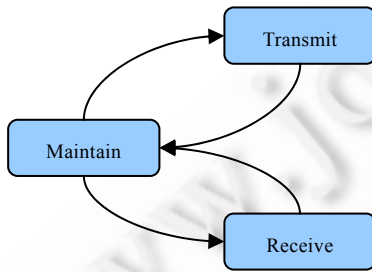


Fig.1 State transition diagram of reprogramming node

图 1 重编程节点状态转换图

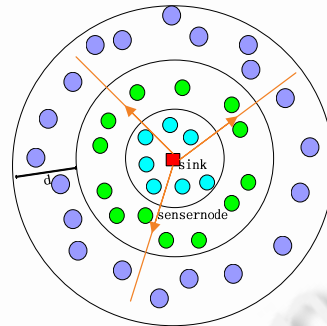


Fig.2 Schematic diagram of image distribute

图 2 镜像分发示意图

#### 2.1.2 Rateless Deluge 协议

Rateless Deluge 协议在 Deluge 的基础上,采用网络编码技术来解决大规模网络环境和高密度节点下重编程协议“NACK 内爆”问题<sup>[2]</sup>.在 Rateless Deluge 协议中,发送端以页为单位对页内的原始数据包进行随机线性编码,即由  $X_1, \dots, X_n$  个原始数据包组成的页,经过编码(见公式(1)),变换为  $m$  个编码包  $Y_1, \dots, Y_m$ ,其中  $m=1.5n$ .  $X_{i,j}$  代表包  $X_i$  的第  $j$  个比特,  $\beta$  是随机数.之后发送节点再以广播方式向其邻居节点发送编码包;在接收端,节点在接收到一定数量的编码包后,利用高斯消元法进行解码,若解码不成功,则向发送端节点发送重传请求,该请求只包含请求的页面号和解码所需的编码包数目.

$$\begin{bmatrix} \beta_{1,1} & \beta_{1,n} \\ \beta_{2,1} & \beta_{2,n} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \dots \\ \vdots & \vdots \\ \beta_{m,1} & \beta_{m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1,j} \\ X_{2,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ X_{n,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{1,j} \\ Y_{2,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ Y_{m,j} \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 2.2 问题形式化

Rateless Deluge 协议进行代码分发时,全网节点所消耗的能量可如下定义:给定  $m$  页的更新镜像和包含  $N$  个传感器节点的网络  $\{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ .其中  $S_1$  表示向其他节点分发镜像的基站; $m$  页的更新镜像被划分为  $\{P_1, P_2,$

...,  $P_m$ }. 我们定义在镜像分发过程中第  $i$  页完成分发后网络消耗的能量为  $E(i)$ , 则整个镜像分发完成后重编程过程网络消耗的总能量为  $\sum_{i=1}^m E(i)$ . 影响  $E(i)$  的因素有两个, 如下所示:

- 1) 在第  $i$  页传输过程中网络里每个节点的活动状态;
- 2) 在第  $i$  页传输过程中节点处于每种状态的比例.

在镜像传输过程中传输每一页的网络行为相似, 因此我们可以先计算出一页传输中网络所消耗的能量, 然后再计算整个镜像分发过程中网络的总能耗. 因此, 当第  $i$  页在传输过程中网络所消耗的能量确定后, 分发整个镜像后网络所消耗的总能量即可确定.

为了便于分析, 我们首先定义一个用于分发更新镜像的网络模型, 其中包含  $N$  个节点. 假设在镜像传输过程中节点间一跳的通信距离为  $d$ , 则整个网络可被看作是一个环形的网络, 如图 2 所示, 每环的距离为  $d$ . 按照 Deluge 和 Rateless Deluge 协议设计的逐页传输机制, 我们假设镜像分发过程是一个逐环推进的过程, 同时我们假设页面传输之间没有间隔, 这样在计算镜像分发过程中网络的总能耗时, 可以认为网络中在有页面传输行为的地方没有处于保持状态的节点.

### 3 能耗分析模型

重编程过程中网络能耗的构成如图 3 所示. 分发一页镜像的能耗数学模型包含两个组件: 一是单跳范围内分发一页过程中一条传输链路所消耗的能量和一个处于保持状态节点的能耗; 二是整个网络重编程过程中传输链路数目和处于保持状态节点的总数目. 根据分发一页的能耗模型和需传输的更新镜像总页面数便可计算出 Rateless Deluge 协议在重编程过程中所消耗的网络总能量. 在第 3.2.3 节, 我们以网格状拓扑网络为例, 具体说明 Rateless Deluge 重编程协议的能耗分析模型和分发更新镜像过程中网络所消耗的总能量的计算方法.

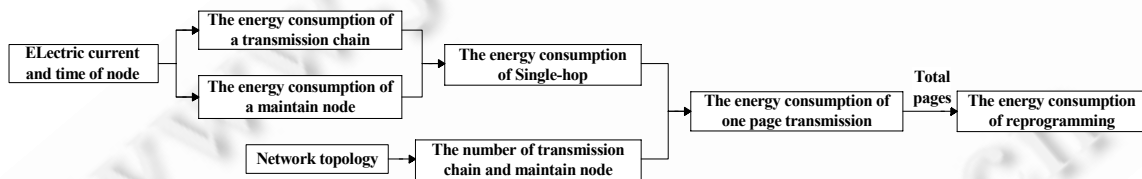


Fig.3 Energy consumption constitutes in reprogramming processing

图 3 重编程过程中网络能耗的构成

#### 3.1 单跳传输能耗

本节分为两部分, 分别介绍在一个单跳传输过程中一条传输链路的能耗和一个处于保持状态的节点的能耗计算方法.

##### 3.1.1 传输链路的能耗

一条传输链路由一个处于传送状态的节点和一个处于接收状态的节点组成, 定义其能耗计算公式如下:

$$E_{link} = E_{tx} + E_{rx} \quad (2)$$

$E_{tx}, E_{rx}$  分别表示处于传送状态节点的能耗和处于接收状态节点的能耗.

处于传送状态节点的能耗, 可以通过确定传送状态节点在重编程过程中处于每个阶段的时间和无线收发器的工作电流来计算, 定义处于传送状态节点的能耗如下:

$$E_{tx} = (T_{adv} \cdot I_{tx} + T_{req} \cdot I_{rx} + T_{data} \cdot I_{tx}) \cdot V \quad (3)$$

在公式(3)中,  $T_{adv}, T_{req}, T_{data}$  分别表示在镜像传输过程中节点处于广播信息状态、请求信息状态和传送数据状态的平均时间,  $I_{tx}, I_{rx}$  分别表示节点的无线收发器处于发射和接收状态的工作电流(节点在接收数据时无线收发器处于接收状态, 节点在发送数据时无线收发器处于发射状态),  $V$  表示节点的工作电压.

与处于传送状态的节点类似, 处于接收状态节点的能耗可如下定义:

$$E_{rx} = (T_{adv} \cdot I_{rx} + T_{req} \cdot I_{rx} + T_{data} \cdot I_{rx}) \cdot V \quad (4)$$

公式(4)中参数的含义与公式(3)中相同。

单跳传输中节点广播信息的平均时间可如下定义:

$$T_{adv} = N_{pkt} \cdot t_{interval} \cdot (1 + N_{supp}) \quad (5)$$

$N_{pkt} = \frac{1}{PRR}$  表示在网络中传输一个包时实际需传输的包数,其中,  $PRR$  为包接收率.  $t_{interval}$  表示两次发送广播消息的平均时间间隔,  $N_{supp}$  表示一个广播包被抑制的次数,在协议中我们设置  $N_{supp}=1$ .

单跳传输中节点请求信息的平均时间可如下定义如下:

$$T_{req} = N_{pkt} \cdot N_{req} \cdot \frac{\tau}{2} + T_{back} \quad (6)$$

$N_{pkt}$  与公式(5)中的含义相同,  $N_{req}$  表示接收一页数据的平均请求次数,它与  $PRR$  相关.  $\tau/2$  表示在请求之前的回退时间.  $T_{back}$  表示需要重传的时间,可如下定义:

$$T_{back} = N_{pkt} \cdot \left( \frac{N_{req}}{\lambda} - 1 \right) \cdot T_{adv} \quad (7)$$

其中,  $\lambda$  表示请求的次数,若多于此请求次数,则停止请求,等待下一次的广播信息。

单跳传输中节点传送数据的平均时间可如下定义:

$$T_{data} = N_{pkt} \cdot T_{pkt} \cdot N_{ppp} \quad (8)$$

$T_{pkt}$  表示传输一个数据包所花费的时间,  $N_{ppp}$  表示一页的包数目。

### 3.1.2 处于保持状态节点的能耗

节点在镜像传输到达之前,一直处于保持状态.在此期间内,节点以一个时间轮长度为周期发送广播消息,对于处于保持状态的节点来说,在一个单跳传输的时间内,它的能耗可如下定义:

$$E_{maintain} = \left( T_{total} \cdot \frac{t_{adv}}{T_{mavg}} \cdot I_{rx} + T_{total} \cdot \left( 1 - \frac{t_{adv}}{T_{mavg}} \right) \cdot I_{rx} \right) \cdot V \quad (9)$$

$$T_{total} = T_{adv} + T_{req} + T_{data} \quad (10)$$

$t_{adv}$  表示传输一个广播包所需要的时间,  $T_{mavg}$  表示节点处于保持状态时一个时间轮的平均长度,它可如下表示:

$$T_{mavg} = \frac{t_L + t_H}{2} \quad (11)$$

$t_L$  表示时间轮长度的最小值,  $t_H$  表示时间轮长度的最大值。

## 3.2 重编程过程能耗

本节首先介绍在一页传输过程中传输链路和保持节点总数目的计算方法,然后介绍重编程过程中整个网络能耗的计算方法,最后以网格状拓扑网络为例,具体说明网络能耗的计算方法。

### 3.2.1 单页传输

以第2节介绍的网络模型为原型,假设网络有  $n$  环.定义当页面传输到第  $i$  环时,第  $i$  环中传输链路的个数为  $n_i$ ,  $n_i$  的确定与网络拓扑和节点的通信距离  $d$  有关,随后我们会以网格状网络为例来具体地加以介绍。

在一页传输过程中传输链路的总数可如下定义:

$$n_{link} = \sum_{i=1}^n n_i \quad (12)$$

在一页传输过程中,处于保持状态的节点数可如下定义:

$$n_{maintain} = \sum_{i=1}^n \left( N - \sum_{k=1}^i n_k - 1 \right) \quad (13)$$

在公式(13)中考虑页面流水技术,在已经进行了此页更新的地方,网络中已经开始传输下一个页面,因此,只有在页面没有传输到的网络才有处于保持状态的节点,如图4所示。

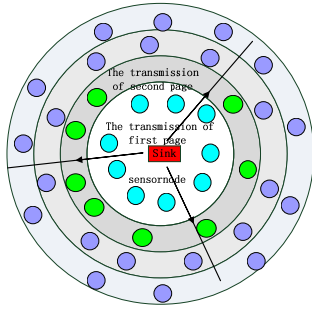


Fig.4 Schematic diagram of page pipelining  
图4 页面流水示意图

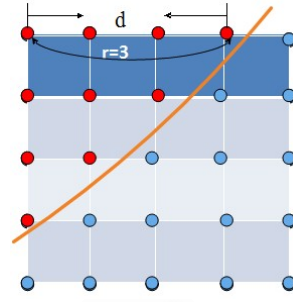


Fig.5 Schematic diagram of mesh network  
图5 网格状网络示意图

### 3.2.2 整个网络的能耗

确定了一页传输过程中传输链路和处于保持状态节点的总数目,对于重编程过程中整个网络的能耗,可定义如下:

$$E_{total} = E_{link} \cdot n_{link} \cdot N_{page} + n_{maintain} \cdot E_{maintain} \cdot 2 \quad (14)$$

$N_{page}$  表示重编程过程中所传输镜像的总页面数.由于重编程协议采用页面流水技术,因此只有在第 1 页和最后一页镜像的传输过程中有处于保持状态的节点,其余中间页面传输的时候没有处于保持状态的节点(这里我们假设两个页面的传输没有间隔),因此在式(14)中计算处于保持状态节点的总能耗时,表示页面数的系数值为 2.

### 3.2.3 网格状网络的能耗

由上一节的描述我们知道,在一页传输过程中传输链路  $n_i$  与节点的通信距离和网络拓扑有关,但我们没有给出在一页传输过程中传输链路总数的具体计算公式,下面对于网格状拓扑的网络,我们来确定  $n_i$  的计算方法.

假定在给定的  $n \times n$  网格型网络中,1 跳通信距离覆盖网格的物理跳数为  $r$  跳,如图 5 所示,则可以确定:

$$\text{当 } i \cdot r + 1 \leq n \text{ 时, } n_i = \sum_{k=(i-1) \cdot r + 2}^{i \cdot r + 1} k \quad (15)$$

$$\text{当 } i \cdot r + 1 > n \text{ 且 } (i-1) \cdot r + 2 < n \text{ 时, } n_i = \sum_{k=(i-1) \cdot r + 2}^n k + \sum_{k=[2n-(i \cdot r + 1)]}^{n-1} k \quad (16)$$

$$\text{当 } (i-1) \cdot r + 2 \geq n \text{ 时, } n_i = \sum_{k=[2n-(i \cdot r + 1)]}^{[2n-[(i-1) \cdot r + 2]]} k \quad (17)$$

通过上述公式可以确定网格型网络中一页镜像传输过程中传输链路的数目  $n_i$ ,进而可以利用公式(14)计算重编程过程中整个网络的能耗.

## 4 模型评价与结果分析

我们利用 PowerTOSSIM z<sup>[12]</sup>(一种扩展 PowerTOSSIM<sup>[13]</sup>的能量分析仿真工具)对 Rateless Deluge 协议能耗进行仿真实验.本节首先说明实验参数的设置,之后通过仿真实验结果验证所提能耗分析模型的有效性,并进一步给出在基于网络编码的重编程协议中能耗与网络密度、网络大小和分发镜像页面大小之间的变化关系.

PowerTOSSIM z 是适用于 TinyOS2.x 的能量仿真器,它在程序运行过程中记录节点各个部分的活动情况,生成能量追踪文件,然后用其自身所携带的后期处理工具对能量追踪文件进行处理,得到程序执行完毕后各个节点的剩余能量示意图.实验中,首先将 PowerTOSSIM z 集成到 TinyOS2.x 中,调试通过后,在重编程镜像分发过程中使用 PowerTOSSIM z 生成能量追踪文件,然后对文件内容作后期处理,得到整个分发过程中网络的总能耗.

### 4.1 实验参数设置

根据 Rateless Deluge 协议的实现,我们设置最大回退时间  $\tau=0.5s$ ,一个节点收到广播消息后最多请求次数  $\lambda=2$ ,有限域大小  $q=8$ .通过仿真实验,我们确定了发送两个广播包的时间间隔  $t_{interval}=0.7089s$ ,发送一个数据包的

时间  $T_{pkt}=0.007613s$ ,发送一个广播包的时间  $t_{adv}=0.007103s$ .根据仿真实验中使用的传感器节点 MicaZ 的要求,设置传感器节点处于传送状态的工作电流  $I_{tx}=17.4mA$ ,处于接收状态的工作电流  $I_{rx}=19.7mA$ ,工作电压  $V=3v$ <sup>[14]</sup>.

## 4.2 模型验证和评价

这一节,我们针对典型的网格状拓扑网络进行仿真实验,分别从网络密度、网络大小和分发镜像页面大小 3 个方面进行实验,并将仿真实验结果与模型分析结果进行比对.

### 4.2.1 网络密度对能耗的影响

验证分析模型时,我们采用 TinyOS 2.x 中的 Blink 应用程序镜像作为重编程中分发的内容,其大小为 16 页,每页 168 个字节.我们同时采用 PowerTOSSIM z 对  $10\times 10$  的网格型网络进行仿真,链路丢失指数<sup>[15]</sup>设定为 4.0,指数设置过大,会使链路质量很差,仿真难以进行;设置过小,会使链路质量过好,从而使密度对网络能耗的影响不明显,因此,我们选取适中的链路指数为 4.0.节点间距从 1.5m~6.0m,表 1 给出实验中参数  $PRR, Nreq$  的设置.参数通过 TOSSIM 仿真得到,在两个节点上运行 TinyOS2.x 中的 CountRadio 应用程序,设置不同的节点间距和链路丢失指数,每个节点发送 1 000 个包,同时计算从另一个节点接收到的包数目,从而计算得到  $PRR$  和  $Nreq$  的概率平均值.

Table 1 Parameters setting of network density experiment

表 1 网络密度实验参数的设置

Node spacing (m)	$PRR$	$Nreq$
1.5	0.940 5	0.369 3
2	0.938 0	0.703 3
2.5	0.905 0	0.792 3
3	0.795 9	0.986 1
3.5	0.779 6	1.145 8
4	0.671 1	1.599 7
4.5	0.640 2	1.998 7
5	0.607 5	2.275 9
5.5	0.585 8	2.915 4
6	0.599 7	3.39

图 6 对比了模型分析与仿真结果,可以看出,分析与仿真结果具有较好的一致性.从图中还可以看出,随着网络密度的减小,整个网络的能耗变大,网络能耗与网络密度经拟合呈二次函数关系.随着网络密度的减小,节点一跳传输所能覆盖的区域变小,在整个重编程过程中,通信开销变大,进而导致网络能耗变大.

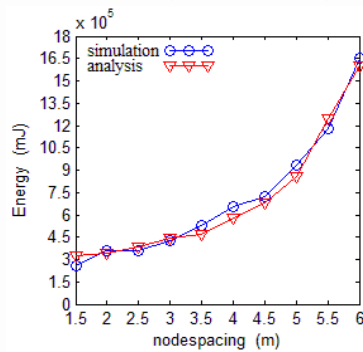


Fig.6 Energy consumption of reprogramming with different network density for analysis and simulation

图 6 不同网络密度重编程能耗分析与仿真结果

### 4.2.2 网络大小对能耗的影响

这一节,我们对节点间距为 6m 的网格型网络进行分析(节点通信的单跳距离接近 6m).链路丢失指数为 4.0,网络大小从  $3\times 3$  到  $10\times 10$ ,图 7 对比了模型分析与仿真结果.从图中可以看出,随着网络大小的增加,网络能耗基本上呈线性增长趋势,说明网络能耗与网络大小基本上呈线性正相关关系,网络大小从  $3\times 3$  到  $10\times 10$  发生变化,网络能耗的平均增长率为 50%,并且随着网络的增大,单节点能耗有所增加,平均增长率为 6.9%.

#### 4.2.3 页面大小对网络能耗的影响

我们对节点间距为 6m 的  $10 \times 10$  网格状网络进行分析,实验设定不同的页内包数,分别为 8,16,24,32,40,48,图 8 对比了模型分析与仿真结果.从图中可以看出,随着页内包数的增多,整个网络的能耗有所下降,平均下降率为 11.2%.这是因为,页内包数增多使得总页数变小,两个节点进行一页数据传输时,在保持阶段和请求阶段,能量消耗所占的比例较大,页数减少,会使整个网络的总能耗有所下降.文献[11]显示,随着每页包数目的增加,整个网络分发镜像的完成时间有所增加,因此我们要权衡网络能耗与完成时间,根据实际情况设置最适当的页面大小.

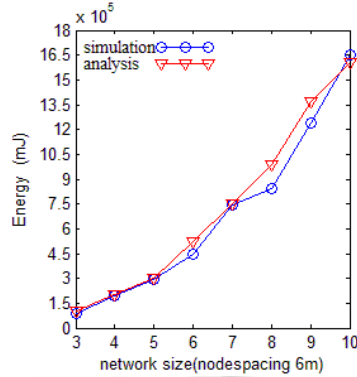


Fig.7 Energy consumption of reprogramming with different network size for analysis and simulation

图 7 不同网络大小重编程能耗分析与仿真结果

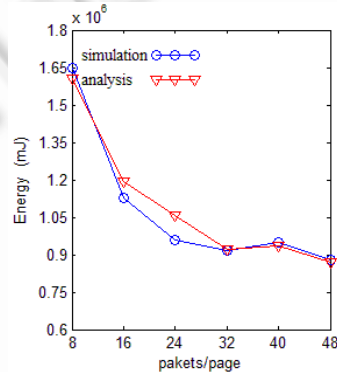


Fig.8 Energy consumption in reprogramming with different page size for analysis and simulation

图 8 不同页面大小重编程能耗分析与仿真结果

## 5 结论

本文针对无线传感器网络重编程协议建立了能耗分析模型,该模型综合考虑了页面流水和节点的通信距离的影响,适用于具有任意拓扑结构的传感器网络.通过与 PowerTOSSIM z 仿真实验结果的对比,验证了分析模型的有效性(平均单节点能耗相对误差在 0.23%左右).对于基于网络编码的重编程协议 Rateless Deluge 的分析可知,重编程过程中网络能耗与网络密度、网络大小和分发镜像页面大小的关系表现在:网络能耗随着网络密度的减小呈上升趋势(能耗与网络密度经拟合呈二次函数关系);网络能耗与网络大小基本呈线性正相关关系(对于  $n \times n$  的网格型网络, $n$  从 3~10,随着  $n$  的增大,网络能耗的平均增长率为 50%),并且随着网络的增大,单节点能耗有所增加(平均增长率为 6.9%);页面大小增加时,网络能耗呈下降趋势(平均下降率为 11.2%).

## References:

- [1] Hui JW, Culler D. The dynamic behavior of a data dissemination protocol for network programming at scale. In: Proc. of the 2nd ACM Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2004). New York: ACM, 2004. 81-94.



- [2] Hagedorn A, Starobinski D, Trachtenberg A. Rateless deluge: Over-the-Air programming of wireless sensor networks using random linear codes. In: Proc. of the 7th ACM/IEEE Int'l Conf. on Information Processing In Sensor Networks (IPSN 2008). Washington: IEEE Computer Society, 2008. 457–466.
- [3] Wang Y, Vuran MC, Goddard S. Cross-Layer analysis of the end-to-end delay distribution in wireless sensor networks. IEEE/ACM Trans. on Networking (TON), 2012,20(1):305–318.
- [4] Feeney LM. An energy consumption model for performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc networks. Mobile Networks and Applications, 2001,6(3):239–249.
- [5] Haapola J, Shelby Z, Pomalaza-Ráez C, Mähönen P. Multihop medium access control for WSNs: An energy analysis model. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2005,2005(4):523–540.
- [6] Ayoub ZT, Ouni S, Kamoun F. Energy consumption analysis to predict the lifetime of IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks. In: Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Communications and Networking (ComNet 2012). IEEE, 2012. 1–6.
- [7] Panta RK, Khalil I, Bagchi S. Stream: Low overhead wireless reprogramming for sensor networks. In: Proc. of the 26th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007). IEEE, 2007. 928–936.
- [8] De P, Liu Y, Das SK. An epidemic theoretic framework for vulnerability analysis of broadcast protocols in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing (TMC), 2009,8(3):413–425.
- [9] Starobinski D, Xiao W. Asymptotically optimal data dissemination in multichannel wireless sensor networks: Single radios suffice. IEEE/ACM Trans. on Networking (TON), 2010,18(3):695–707.
- [10] Dong W, Chen C, Liu X, Teng G, Bu J, Liu Y. Bulk data dissemination in wireless sensor networks: Modeling and analysis. Computer Networks, 2012,56(11):2664–2676.
- [11] Li JW, Li SN, Zhang Y, Law YW, Zhou XS, Palaniswami M. Analytical model of coding-based reprogramming protocols in lossy wireless sensor networks. In: Proc. of the 2013 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2013). IEEE, 2013.
- [12] Perla E, Catháin AÓ, Carbajo RS, Huggard M, Mc Goldrick C. PowerTOSSIM z: Realistic energy modelling for wireless sensor network environments. In: Proc. of the 3rd ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks. New York: ACM, 2008. 35–42.
- [13] Shnayder V, Hempstead M, Chen BR, Allen GW, Welsh M. Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2004). New York: ACM, 2004. 188–200.
- [14] CC2420 Data Sheet. <http://inst.eecs.berkeley.edu/~cs150/Documents/CC2420.pdf>
- [15] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: Proc. of the 1st Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON 2004). IEEE, 2004. 517–526.



张艳(1990—),女,陕西渭南人,学士,主要研究领域为无线传感器网络。  
E-mail: yanzhang@mail.nwpu.edu.cn



夏先进(1988—),男,硕士,主要研究领域为无线传感器网络,能量均衡。  
E-mail: jinchenxia@mail.nwpu.edu.cn



张羽(1975—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为嵌入式系统,无线传感器网络。  
E-mail: zhangyu@nwpu.edu.cn



李士宁(1967—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,移动计算,网络化嵌入式计算技术。  
E-mail: lishining@nwpu.edu.cn



李君伟(1988—),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络,传感网络软件更新,协议分析与优化。  
E-mail: ljw@mail.nwpu.edu.cn