

## WSNs 中一种能耗均衡的传染路由

陈明明<sup>1,2</sup>, 王宁<sup>1,2,3</sup>, 陈亮<sup>4</sup>, 陈育智<sup>1,2</sup>

- (1. 厦门华夏学院, 福建 厦门 361026;
2. 新一代信息通信技术与智慧教育福建省高校工程研究中心, 福建 厦门 361026;
3. 厦门大学, 福建 厦门 361005;
4. 昆明理工大学, 云南 昆明 650504)

**摘要:** 传染路由提高了传输数据包的可靠性,但因参与路由的节点数过多,增加了无线传感网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)的能耗。为此,提出一种能耗均衡的传染路由(Energy Consumption Balance-Gossip, ECB-G)。ECB-G路由利用邻居节点的剩余能量和位置,计算节点成为转发节点的分值,再依据分值择优下一跳转发节点,从而限制了参与路由的节点数,进而减少网络能耗。仿真结果表明,提出的ECB-G路由降低了能耗,延长网络寿命。

**关键词:** 无线传感网络; 传染路由; 能耗; 距离; 网络寿命

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1673-5692(2019)09-978-05

## Gossip Routing with Energy Consumption Balance in Wireless Sensor Networks

CHEN Ming-ming<sup>1,2</sup>, WANG Ning<sup>1,2,3</sup>, CHEN Liang<sup>4</sup>, CHEN Yu-zhi<sup>1,2</sup>

- (1. Dept. of Communication and IoT Engineering, Xiamen Huaxia University, Fujian Xiamen 361026, China;
2. Information Communication Technology and Smart Education of Fujian Engineering Research Center, Fujian Xiamen 361026, China;
3. Dept. of Automation, Xiamen University, Fujian Xiamen 361005, China;
4. Dept. of Traffic Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan Kunming 650504, China)

**Abstract:** Gossip routing improves the reliability of packet transmission, but the excessive number of nodes participating in routing increases the energy consumption of Wireless Sensor Networks (WSNs). For this purpose, a Energy Consumption Balance-Gossip (ECB-G) is proposed. ECB-G routing uses the residual energy and location of neighbor nodes to calculate the score of the node that becomes the forwarding node, and then selects the best next-hop forwarding node according to the score value, so as to limit the number of nodes participating in the routing and thereby reduce the network energy consumption. Simulation results show that the proposed ECB-G route reduces energy consumption and extends network lifetime of WSNs.

**Key words:** Wireless Sensor Network; Gossip; Energy Consumption; Distance; Network Lifetime

收稿日期: 2019-06-30 修订日期: 2019-08-01

基金项目: 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划; 福建省中青年教师教育科研项目: 移动通信用户故障分布式自主采集与智能分析系统 (JAT170826)

## 0 引言

无线传感网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs)<sup>[1-2]</sup>是由微型、低成本的传感节点自组连通的网络。每个传感节点能够感测、传输和接收数据。这些节点是由电池供电。当节点电池耗尽,不便于补充能量。而一旦节点能量耗尽,节点就失效,无法工作。因此,有效地利用节点能量成为 WSNs 的研究热点之一。

而传输数据所消耗的能量占据节点的 80%。因此,高效地完成数据传输策略能够降低能耗<sup>[3]</sup>。传感节点需要实时感测数据,再将数据传输至信宿。由于传感节点失效,网络连通率并不高,降低了数据包传递成功率,这给数据传输的可靠性提出了挑战。

传染路由 (Gossip) 是典型的容错路由<sup>[4]</sup>。当传感节点需要将数据传输至控制中心(信宿),它就从邻居节点中随机选择一个节点作为下一跳转发节点(转发节点)。然后,转发节点再从它的邻居节点中选择转发节点,直到信宿收到数据。信宿可能收到来自不同路径的同一份数据多个复本。这增加了冗余。

此外,由于多个节点参与转发/接收数据,消耗了大量的能量。因此,控制参与节点数是十分重要的。可通过优先策略,只选择部分节点转发数据。只允许部分节点传输数据,也减少数据在网络中的复本数。最终,能够减少能耗,提高网络寿命。

目前,有基于概率、计数和距离产生转发节点方案。其中概率方案最简单、易实施。节点以一定概率从邻居节点选择转发节点。而基于计数方案是依据离目的节点的跳数选择转发节点。基于距离方案是通过依据节点位置信息选择转发节点。

实质上,控制参与路由的节点数是降低 Gossip 路由能耗的关键。为此,提出基于能耗均衡的传染路由 (Energy Consumption Balance-Gossip, ECB-G)。ECB-G 路由通过邻居节点的位置和能量信息选择转发节点,减少参与数据包转发的节点,进而控制能耗。同时,依据节点的距离信息择优选择下一跳转发节点,从而构建稳定的路由,减少重传次数,提高带宽利用率。仿真结果证实了 ECB-G 路由在能耗和带宽利用率方面具有良好的性能。

## 1 系统模型

### 1.1 ECB-G 路由概述

用连通图  $G(V, E)$  表示 WSN 拓扑结构,其中  $V$  为顶点集,表示传感节点。而  $E$  为边集,表示节点间直接连通的链路。假定网络有  $N$  个节点。令  $(x_i, y_i)$  表示第  $i$  个节点  $s_i$  的位置。

整个 ECB-G 路由由四个阶段构成,如图 1 所示。首先,发送请求数据包,再计算距离,然后选择最优转发节点,最后转发数据。



图 1 ECB-G 路由框架

当节点需要传输数据 Data,就向邻居节点发送请求数据包 (Request Packet, RQP),旨在收集邻居节点的信息。一旦收到 RQP,邻居节点就回复数据包 (Reply Packet, RPP),其包含节点的剩余能量和位置信息。

再依据邻居节点的能量和位置信息,计算节点成为转发节点概率的分值。再选择具有最高分值的节点作为转发节点。最后,由转发节点转发数据。

### 1.2 能量模型

采用如图 2 所示的能耗模型<sup>[5]</sup>。令  $E_{sd}(m, d)$  表示传输  $m$  比特数据、传输距离  $d$  时节点消耗的能量:

$$E_{sd}(m, d) = \begin{cases} mE_{elec} + m\epsilon_{fs}d^2, & \text{if } d < d_0 \\ mE_{elec} + m\epsilon_{amp}d^4, & \text{if } d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $E_{elec}$  表示每传输 1bit 所消耗的能量。而  $d_0$  为两个能耗模式切换的距离阈值,其反映了传播空间

特性,且  $d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{amp}}}$ 。而接收  $m$  位比特数据所消耗的能量为  $E_{ri}(m, d) = mE_{elec}$ 。

## 2 ECB-G 路由

### 2.1 能效均衡因子

令  $E_0$  表示节点的初始能量。假定所有节点具有相同初始能量。令  $E_r(i)$  表示节点  $s_i$  的剩余能

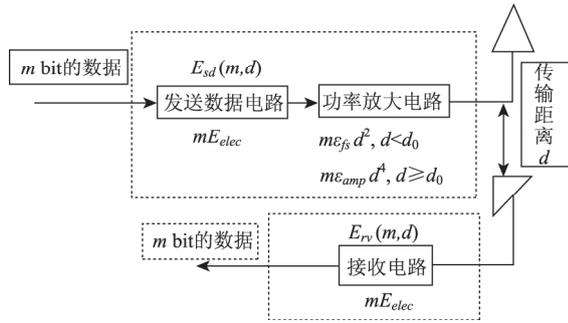


图2 能量消耗模型

量。能效均衡因子考虑节点能量消耗速度以及其邻居节点的平均剩余能量。

考虑平均剩余能量的原因在于：若节点自身具有较高的剩余能量，但其邻居节点的剩余能量低。这容易使节点处于“孤立无援”状态，也无法将数据传输出去。

令  $a_e(i)$  表示节点  $s_i$  的能效均衡因子，其定义如式(2)所示：

$$a_e(i) = \frac{E_r(i)}{E_0 - E_r(i)} + \frac{1}{|n_i|} \sum_{j=1}^{|n_i|} \frac{E_r(j)}{E_0 - E_r(j)} \quad (2)$$

其中  $n_i$  表示节点  $s_i$  的邻居节点集，而  $|n_i|$  表示集  $n_i$  的节点数。 $s_j$  表示节点  $s_i$  的一个邻居节点， $s_j \in n_i$ 。

式(1)有两个项构成。第一项  $\frac{E_r(i)}{E_0 - E_r(i)}$  反映了剩余能量与所消耗能量比例，其反映了能量的消耗速度。 $\frac{E_r(i)}{E_0 - E_r(i)}$  值越大，表示能量消耗速度越慢。反之，能耗速度越快。

而第二项  $\frac{1}{|n_i|} \sum_{j=1}^{|n_i|} \frac{E_r(j)}{E_0 - E_r(j)}$  反映了节点  $s_i$  的邻居节点的平均能耗速度。 $\frac{1}{|n_i|} \sum_{j=1}^{|n_i|} \frac{E_r(j)}{E_0 - E_r(j)}$  越大，平均能耗速度越慢。

### 2.2 距离远近因子

再依据距离远近因子选择转发节点。具体而言，节点  $s_i$  需从其  $|n_i|$  个邻居节点中选择具有距离最优的节点作为转发节点。

令  $b_d(i, j)$  表示节点  $s_i$  离节点  $s_j$  的距离远近因子，其定义如式(3)所示：

$$b_d(i, j) = \frac{1}{d_{ij}} + \left( (1 - d_{j, \text{sink}}) / d_{i, \text{sink}} \right) \quad (3)$$

其中  $d_{ij}$  表示节点  $s_i$  离节点  $s_j$  的欧式距离。而  $d_{i, \text{sink}}$ 、 $d_{j, \text{sink}}$  分别表示节点  $s_i$  离信宿 sink、节点  $s_j$  离信宿 sink 的欧式距离。如图3所示。图中的虚线圆圈表示节点

$s_i$  的通信范围。节点  $s_j$  为节点  $s_i$  的一个邻居节点。

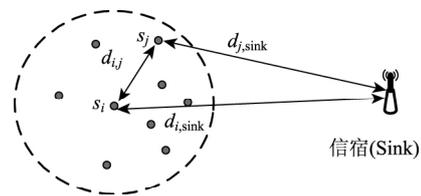


图3 距离示意图

### 2.3 数据转发

当节点  $s_i$  需要数据，就向邻居节点发送 RQP，其包含了自己位置。再监听，并收集邻居节点回复 RRP 包，进而获取邻居节点的位置和能量信息。然后就广播  $Data_i$ 。

邻居节点（假定是节点  $s_j$ ）先依据分别式(2)、式(3)计算能效均衡因子和距离远近因子。再依据式(4)计算节点转发分值。令  $F_j$  表示节点  $s_j$  的转发分值：

$$F_j = a_e(i) + b_d(i, j) \quad (4)$$

为了使具有最高分值的节点成为转发节点。每个节点（假定是节点  $s_j$ ）依据自己的分值设定定时器，且定时器的时长与分值成反比。一旦定时完毕，且没有监听到其他节点转发  $Data_i$ ，自己就立即转发  $Data_i$ 。重复上述过程，直到数据包传输至信宿。整个流程如图4所示。

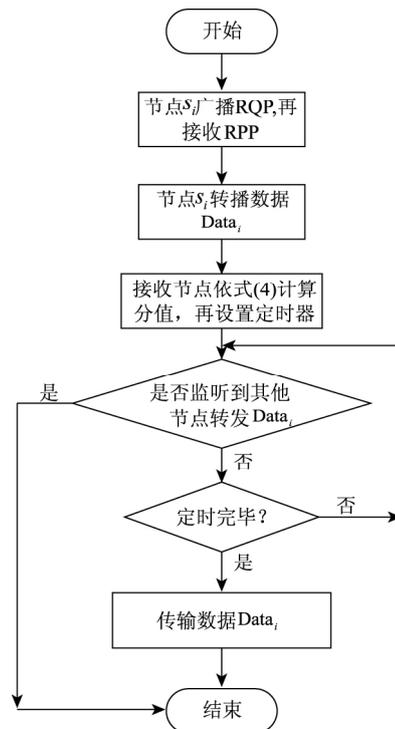


图4 数据转发流程

### 3 性能仿真

#### 3.1 仿真环境

利用 NS2++ 软件建立仿真平台。传感节点分布于  $80\text{ m} \times 60\text{ m}$  的矩形区域, 信宿位于区域中心, 且位置为  $(40, 30)$ 。节点传输范围为  $20\text{ m}$ , 所有节点的初始能量为  $0.5\text{ J}$ 。具体的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	值
仿真区域	$80\text{ m} \times 60\text{ m}$
节点数	20, 40, 60, 80, 100
节点分布	随机分布
通信范围	$20\text{ m}$
$E_0$	$0.5\text{ J}$
$E_{elec}$	$50\text{ nJ/bit}$
$\epsilon_{fs}$	$10\text{ nJ}/(\text{bit}/\text{m}^2)$
$\epsilon_{amp}$	$0.0013\text{ pJ}/\text{bit}/\text{m}^4$

为了更好地分析 ECB-G 路由性能, 选择传统的 Gossip 和文献 [6] 提出的基于公平高效的位置 Gossip 路由 (FEL-G) 作为参照, 并分析它们的传输时延、带宽利用率、网络寿命性能。其中, 传输时延是指成功接收数据的平时时延。用式 (5) 计算带宽利用率<sup>[7]</sup>:

$$\lambda_b = (N_{me} - N_{re}) / N_{me} \quad (5)$$

其中  $N_{me}$  表示所接收的数据包数。而  $N_{re}$  表示重传的数据包数。

选择每个节点失效的时间和最后一个节点失效时间评估网络寿命<sup>[8]</sup>, 且单位为轮 (Round)。本文只考虑节点因能量消耗殆尽所导致的失效<sup>[9-10]</sup>, 不考虑其他原因。

#### 3.2 数据分析

##### 3.2.1 平均传输时延

首先分析数据传输时延随节点数的变化情况。从图 5 可知, 数据传输时延随节点数增加而上升。原因在于: 数据传输时延随网络尺寸影响。节点数越多, 导致的时延越长。此外, 传统的 Gossip 路由的传输时延最低。这主要是因为: 传统的 Gossip

路由在选择下一跳节点时, 并没有进行额外的计算, 只是随机地选择下一跳转发节点。而 FEL-G 路由和 ECB-G 路由是通过计算, 选择下一跳转发节点, 这增加了计算时延。

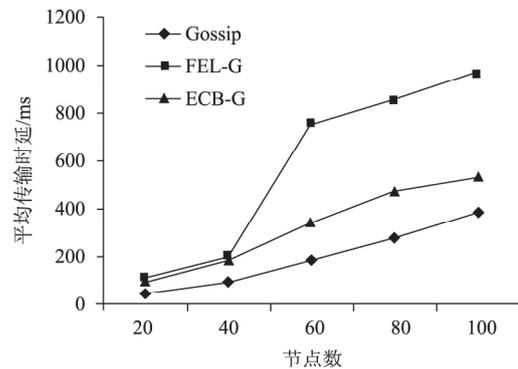


图 5 平均传输时延随节点数的变化情况

##### 3.2.2 带宽利用率

图 6 显示了三个路由协议的带宽利用率。从图 6 可知, 相比于传统的 Gossip 路由和 FEL-G 路由, 提出的 ECB-G 路由的带宽利用率得到提高。原因在于: ECB-G 路由通过能耗均衡因子和距离远近因子选择下一跳转发节点, 提高了路由的稳定性, 减少了重传数据包次数。

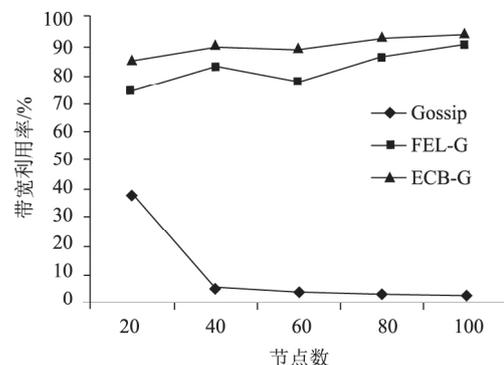


图 6 带宽利用率

##### 3.2.3 网络寿命

图 7、8 分别表示三个路由协议的第一个节点失效时间和最后一个节点失效时间。从图 6 可知, 传统 Gossip 路由最早发生第一个节点失效, 在整个节点变化的期间, 它都是最先出现的一个失效节点。

从图 8 可知, 提出的 ECB-G 路由的最后一个失效节点出现的时间最晚, 性能优于传统 Gossip 路由和 FEL-G 路由。这充分说明, ECB-G 路由通过减少重传次数、参与路由的节点, 缓解了网络能耗的速度。

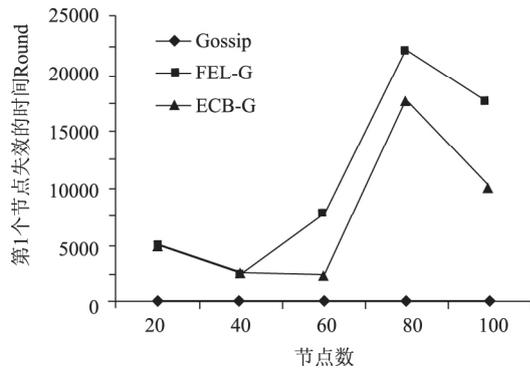


图7 第一个失效节点出现的时间

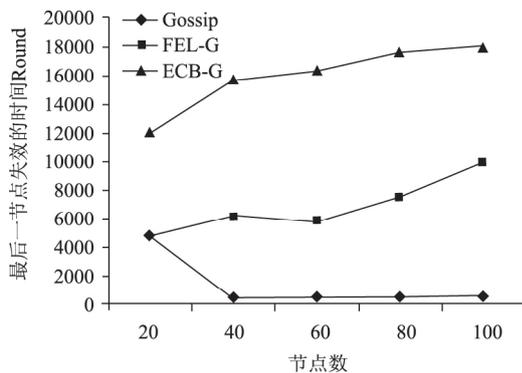


图8 最后一个失效节点出现的时间

## 4 结 语

针对 Gossip 路由的能耗问题,提出能耗均衡的 Gossip 路由改进路由 ECB-G。ECB-G 路由通过控制参与路由的节点数,减少能耗。利用邻居节点的剩余能量和地理位置,选择下一跳转发节点,限定了转发数据包的节点。仿真结果表明,相比于 Gossip 路由,提出的 ECB-G 路由有效地降低了能耗,并提高了带宽利用率。

### 参考文献:

- [1] 徐宁,胡晓辉,李慧玲,杜永文,张学军.一种能耗均衡的 WSN 分布拓扑博弈算法[J].信息与控制,2019,48(2):156-163.
- [2] 赵继军,谷志群,薛亮.WSN 中层次型拓扑控制与网络资源配置联合设计方法[J].自动化学报,2015,41(3):646-660.
- [3] 陈静静,刘三阳,丁毓.基于罚函数方法的 LEACH 路

由[J].数学的实践与认识,2019,49(7):144-152.

- [4] Z. Jiang, V. Chinde, A. Kohl, S. Sarkar, and A. Kelkar, "Scalable supervisory control of building energy systems using generalized gossip [C]. in American Control Conference (ACC), 2016. IEEE, 2016: 581-586.
- [5] 赵梦龙,许会香.基于自适应滤波的能量收集 WSNs 的路由协议[J].中国电子科学研究院学报,2019,11(6):646-651.
- [6] A. Norouzi, F. S. Babamir, and A. H. Zaim. A novel energy efficient routing protocol in wireless sensor networks [J]. Wireless Sensor Network, 2016, 3(10): 341-350
- [7] M. Abo-Zahhad, S. M. Ahmed, N. Sabor, and S. Sasaki. A new energy-efficient adaptive clustering protocol based on genetic algorithm for improving the lifetime and the stable period of wireless sensor networks [J]. International Journal of Energy, Information and Communications, 2014, 5(3): 47-72.
- [8] N. Xiong, X. Huang, H. Cheng, and Z. Wan. Energy-efficient algorithm for broadcasting in ad hoc wireless sensor networks [J]. Sensors 2017, 13(4): 4922-4946.
- [9] S. Tang, E. Jaho, I. Stavrakakis, I. Koukoutsidis, and P. Van Mieghem. Modeling gossip-based content dissemination and search in distributed networking [J]. Computer Communications 2016, 34(6): 765-779.
- [10] 刘玉军,王一博,蔡猛.基于能量均衡的自组网改进型混合路由协议[J].中国电子科学研究院学报,2017,12(5):486-492+497.

### 作者简介



陈明明(1979—),女,黑龙江人,研究生,教授,主要研究方向为信息通信网络系统、大数据系统开发、网络优化、信息存储;

E-mail: li\_linwei18@21cn.com

王宁(1979—),男,福建人,研究生,教授,主要研究方向为数据挖掘、大数据系统开发、信息系统工程、云计算;

陈亮(1982—),男,黑龙江人,研究生,讲师,主要研究方向为交通安全与仿真,机器学习,信息系统工程;

陈育智(1984—),男,福建人,讲师,主要研究方向为机器学习,计算机网络,信息存储与安全,网络优化。