

## 基于博弈论能耗均衡的 WSN 非均匀分簇路由协议

孙庆中\*, 余 强, 宋 伟

(西华大学 数学与计算机学院, 成都 610039)

(\* 通信作者电子邮箱 384773254@qq.com)

**摘 要:**在无线传感器网络(WSN)的分簇路由算法中,节点间能耗不均容易引发“能量空洞”现象,影响整个网络的性能。针对这个问题,提出了一种基于博弈论能耗均衡的非均匀分簇路由(GBUC)算法。该算法在分簇阶段,采用非均匀分簇结构,簇的半径由簇头到汇聚节点的距离和剩余能量共同决定,通过调节簇头在簇内通信的能耗和转发数据的能耗来达到能耗的均衡;在簇间通信阶段,通过建立一个以节点剩余能量和链路可靠度为效益函数的博弈模型,利用其纳什均衡的解来寻找联合能耗均衡、链路可靠性的最优传输路径,从而提高网络性能。仿真结果表明:与能量高效的非均匀分簇(EUUC)算法和非均匀分簇节能路由(UCEER)算法相比,GBUC算法在均衡节点能耗、延长网络生命周期等性能方面有显著的提高。

**关键词:**无线传感器网络;能量均衡;博弈论;非均匀分簇路由

**中图分类号:** TP393.01 **文献标志码:** A

### Energy-balanced unequal clustering routing protocol based on game theory for wireless sensor networks

SUN Qingzhong\*, YU Qiang, SONG Wei

(School of Mathematics and Computer Engineering, Xihua University, Chengdu Sichuan 610039, China)

**Abstract:** In Wireless Sensor Network (WSN) clustering routing algorithm, sensors energy consumption imbalance will result in "energy hole" phenomenon, and it will affect the network lifetime. For this problem, an energy-balanced unequal clustering routing protocol based on game theory named GBUC was put forward. In clustering stage, WSNs were divided into clusters of different sizes, the cluster radius was determined by the distance from cluster head to sink node and the residual energy. By adjusting the cluster head in the energy consumption of communication within the cluster and forwarding data to achieve energy balance. In inter-cluster communication phase, a game model was established by using the residual energy efficiency and link reliability as the benefit functions, using its Nash equilibrium solution to get joint energy balancing, optimal transmission path of link reliability, thereby improving network performance. The simulation results show that, compared with Energy-Efficient Uneven Clustering (EUUC) algorithm and Unequal Clustering Energy-Economical Routing (UCEER) algorithm, the GBUC algorithm has significantly improved the performance in balancing node energy consumption and prolonging the network lifetime.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); energy balance; game theory; non-uniform clustering routing

## 0 引言

近几年,由于传感技术、无线通信以及微电子技术的高速发展,极大地推动了具有数据感知、数据采集、数据处理等功能的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的产生和发展。由于其具有可快速部署、自组织性和高容错性的特点,使它在军事侦查、环境检测、医疗等方面得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。

WSN是由大量的无线传感器节点通过自组织的方式构成的网络。网络中的节点能量资源和计算能力非常有限,节点间采用可靠度不高的无线方式进行数据传输,所以减少节点的能耗、延长网络周期、提高通信的可靠性成为了研究

WSN的首要目标。无线传感器路由技术是WSN的主要技术之一,合理的路由算法对均衡能耗、延长网络周期具有重要的意义。

WSN路由算法引起了国内外众多学者的兴趣,文献[2]通过把WSN划分为大小不等的簇来均衡节点的能耗,但是候选簇头的节点是随机产生的,增加了不确定性,而且容易造成节点空洞问题。文献[3]利用博弈论的思想,构建一个与链路质量和节点剩余能量有关的效益函数,通过仿真实验可看出该路由算法在网络生命周期和链路质量方面得到了提高,但是该方法采用固定的簇头,而不是动态产生,适应性较差,可扩展性不高。文献[4]中仍利用博弈论的思想,节点权衡利弊选择加入最佳的博弈联盟,从而达到减少网络节点能耗

**收稿日期:** 2014-06-05; **修回日期:** 2014-08-20。 **基金项目:** 教育部春晖计划项目(13226651); 四川省数字空间保障重点实验室项目(szjj2013-018); 四川省教育厅应用基础研究项目(11226016)。

**作者简介:** 孙庆中(1986-),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络的路由算法; 余强(1973-),男,四川成都人,副教授,博士,CCF会员,主要研究方向:分布式计算、嵌入式系统、物联网; 宋伟(1988-),男,安徽阜阳人,助教,硕士研究生,主要研究方向:P2P流媒体。

目的,但是该算法适合较小规模的 WSN,而且没有考虑链路的质量因素。文献[5]在非均匀分簇的基础上,用落选的候选簇头充当簇间数据转发的中继节点来均衡能耗,但是中继节点的分布具有不规则性,在簇间通信过程中,只是在簇头剩余能量不足时才利用中继节点进行转发数据,没有充分发挥中继节点的作用。

针对 WSN 能耗不均,传输可靠性不高等问题,提出了一种基于博弈论的能耗均衡、传输可靠的非均匀分簇路由(Game theory based energy Balance Unequal Clustering routing, GBUC)算法。为了均衡簇头的能耗和延长网络周期,该算法采用非均匀分簇的网络拓扑结构,并在簇间选择合适的中继节点来减少簇头的能耗。在簇间通信过程中,通过构建一个合理的博弈模型,利用博弈的纳什均衡均衡来求解出选择最佳的数据传输路径,从而提高网络的生命周期和通信可靠性等性能<sup>[6-8]</sup>。

## 1 系统模型

### 1.1 网络模型

本文构建了一个理想的 WSN 的网络模型,该网络模型与文献[9]的类似,具有如下性质:

- 1) 每个传感器节点都具有一个唯一 ID,节点均匀分布在检测区域内;
- 2) 节点一旦部署到检测区域,不能随意移动,能量有限且不能补给;
- 3) 基站不能移动,能量没有限制,可以和检测区域的任意节点进行通信;
- 4) 节点具有多个发射功率,可以根据通信距离选择发射功率;
- 5) 网络采用数据融合技术,减少数据的传输量;
- 6) 节点没全球定位系统(Global Positioning System, GPS)功能模块,不具有位置感知能力;
- 7) 在一定的传输功率下,节点可以根据接收到的信号强度来计算通信距离。

网络模型的前三项性质是无线传感器网络的典型设置;第 4 项性质,可以确保节点根据通信距离来选择发射功率,减少了节点的能耗,从而延长网络的生命周期;第 5 项性质,通过数据融合技术,达到减少网络数据的传输量减轻数据传输过程中的网络拥塞,延长整个网络的寿命的目的;第 7 项性质,使节点在没有 GPS 模块下,根据接收信号强度判断通信双方的距离和相对位置。

### 1.2 无线通信能耗

本文采用文献[10]的无线通信能耗模式:如果通信距离小于  $d_0$ ,传感器节点之间通信能耗采用的是自由空间模型;距离大于等于  $d_0$  则采用多径衰落模型。

无线传感器节点的接收和发送电路模型如图 1 所示。从图 1 可看出,节点发送数据的能耗主要在发射电路和功率放大电路两部分,节点  $i$  向相距为  $d$  的节点  $j$  发送  $k$  比特数据的能耗如式(1)所示:

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

节点接收数据的能量消耗主要在接收电路部分,所以节点接收  $k$  比特数据的能耗如式(2)所示:

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec} \quad (2)$$

其中: $E_{elec}$ 为射频能耗系数, $\epsilon_{fs}$ 和 $\epsilon_{mp}$ 分别为不同的通信模式的功率放大能耗系数,由式(1)可得 $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs}/\epsilon_{mp}}$ 。

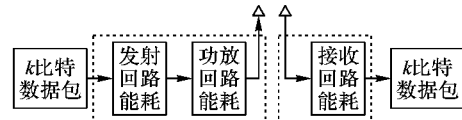


图 1 节点收发数据电路模型

### 1.3 数据融合模型

数据融合起着十分重要的作用,主要表现在减少整个网络的能量消耗、增强所收集数据的准确性以及提高收集数据的效率三方面。在 WSN 中结合数据融合技术可以减少数据量,减轻数据传输过程中的网络拥塞,延长整个网络的生命周期。

本文在簇内的通信过程中采用数据融合技术,簇头把簇内成员采集的数据进行融合,去除数据的冗余,通过多跳的路由技术把融合后的数据发送到汇聚节点,从而减少数据的传输量和能耗。在数据融合过程中,簇头的能耗为 $E_d = 5 \text{ nJ/bit}$ 。本文假设不同的簇采集的数据具有较大的差异,所以没有考虑簇间的数据融合。

## 2 WSN 路由博弈模型

WSN 中的节点都是理性的智能节点,在路由选择过程中,自私的节点会选择放弃转发数据而节省能量,为了约束节点的自私行为,博弈论采用奖励机制和惩罚机制,对转发数据的节点进行奖励,节点为了获取更高的利益避免受到惩罚而进行转发数据,所以构建合理的博弈收益能够很好地解决 WSN 在路由方面的问题。

节点的理性偏好,对路由的博弈模型相当重要,不同节点的理性偏好,将会得到不同性能的传输路径。本文主要关注的是路径的能耗均衡、延长网络寿命和数据传输的可靠性的特性。所以节点的理性偏好<sup>[10]</sup>设定为:1)减少自己的能耗,延长自己的寿命;2)将数据可靠的传输到 sink 节点。第一理性偏好趋于选择离自己较近的节点作为下一跳,但因为增加了路由的跳数,消耗更多的能量;第二个偏好趋于选择跳数更少的路由,增加路径的可靠性。两个理性偏好相互制约,通过在两个理性偏好之间寻找平衡点,来达到优化无线传感器网络的目的。

基于节点的理性偏好,本文构建一个联合传输可靠性,网络能耗、网络生命周期的最优的动态路由博弈模型,动态博弈由扩展式表述,包括以下五个要素。

1) 参与者集合:WSN 中的存活的传感器节点构成了博弈论的参与者集合,设参与者的个数为  $N$ 。

2) 参与者的行动顺序:数据传输从源点节点开始,通过多个节点的转发而最终达到汇聚节点。每个参与者都根据前面节点的策略,选择出自己收益最高的路由策略,当数据达到汇聚节点时,路由选择结束。

3) 参与者的策略集合:在 WSN 路由选择中,节点在接收

到来自其他节点发送的数据包时,有放弃转发数据和选择邻居节点转发数据两种策略。通常节点  $i$  的行动策略集合表示为:

$$L_i = \{l_{i1}, \dots, l_{ii-1}, l_{ii+1}, \dots, l_{im}\}; \forall l_{ij} \in \{0, 1\}$$

其中:  $m$  代表节点  $i$  的邻居节点个数;  $l_{ij} = 0$  表示节点  $i$  不选择邻居节点  $j$  作为下一跳节点,  $l_{ij} = 1$  表示选择邻居节点  $j$  作为下一跳节点。本文考虑纯策略空间的情况,节点只能选择其中一个邻居节点作为下一跳节点转发数据,也就是说向量  $L_i$  最多只能有一个值为 1,其他值都为 0。

4) 参与者的信息集合:每个参与者都能获得自己的邻居节点的剩余能量和两者之间的距离以及成功传送数据的概率等重要信息,并且参与者能够获取自己能量剩余情况。

5) 参与者的效益函数:博弈论中参与者的策略都是相互依赖的,每个参与者的回报都与其他参与者的策略集合相关。参与者采取不同的策略,会获得不同的收益,收益用效用函数来表示。假设博弈中任一组的策略组合为:

$$s = (s_i, s_{i-1})$$

其中:  $s_i$  代表参与者的策略,  $s_{i-1} = \{s_1, \dots, s_{i-1}, \dots, s_n\}$  代表其他参与者的策略。该策略下的参与者  $i$  的效用函数用  $U_i(s_i, s_{i-1})$  表示。效用函数由收益  $B_i(s_i, s_{i-1})$  和代价  $C_i(s_i, s_{i-1})$  两部分组成。参与者  $i$  的效用函数表示为:

$$U_i(s_i, s_{i-1}) = B_i(s_i, s_{i-1}) - C_i(s_i, s_{i-1}) \quad (3)$$

根据节点的第二理性偏好,参与数据传输节点的收益函数定义<sup>[11]</sup>如式(4)所示:

$$B_i(s_i, s_{i-1}) = b * R_{up} * R_j * R_j \quad (4)$$

其中:  $b$  为数据成功发送到基站后,参与转发节点获得的奖励;  $R_{up}$  为从源节点到节点  $i$  的可靠度;  $R_j$  为节点  $i$  和下一跳节点  $j$  之间传输的可靠度;  $R_j$  为节点  $j$  传送到基站的可靠度。

节点进行转发数据的代价为消耗自身能量和减少节点生命长度。从式(1)得到,节点的能耗与传送数据包的距离成比例关系,节点的生命长度和节点转发数据量和剩余能量有关。根据节点的第一理性偏好,节点的代价函数定义如式(5)所示:

$$C_i(s_i, s_{i-1}) = \beta \frac{(D_{ij})^2}{E_i + E_j} \quad (5)$$

其中:  $\beta$  为传输消耗的系数,  $D_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的距离,  $E_i, E_j$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  的剩余能量。从式(5)可看出转发数据代价不仅与通信者之间的距离有关,还与两者剩余的能量有关。

联合公式(3)~(5)可以推导出参与者的效益函数为式(6)所示:

$$U_i(s_i, s_{i-1}) = b * R_{up} * R_j * R_j - \beta \frac{(D_{ij})^2}{E_i + E_j} \quad (6)$$

从式(6)可看出,节点为了追求更高的收益,会选择可靠性高、传输距离近、剩余能量高的邻居节点作为下一跳节点进行传输数据。

## 2.2 路由博弈模型分析

博弈均衡是指博弈达到的一种稳定状态,在均衡状态下,所有参与者的收益都相对于其他参与者的策略而达到最大,没有参与者愿意单独改变策略。

纳什均衡是博弈均衡的一种。定义为:在一组给定策略  $S^* = (s_1^*, \dots, s_i^*, \dots, s_n^*)$ ,对于每一个参与者  $i$  的  $s_i^*$  的策略在给定其他参与者策略集合  $S_i$  下最优的,即  $U_i(s_i^*, s_{i-1}) > U_i(s_i, s_{i-1})$ ,其中  $s_i$  是集合中的任意策略,这一组给定的策略就是一个纳什均衡。

关于博弈论均衡存在性判断的相关定义和定理如下:

**定义 1** 如果一个扩展式博弈有有限个信息集,每个信息集上参与者有有限个行动选择,则称该博弈为有限博弈。

**定义 2** 完美信息博弈则指轮到行动的局中人知道先前的行动的其他局中人采取了什么策略。

**定理 1** 一个有限完美信息博弈至少有个纯策略纳什均衡。

本文构建的路由博弈模型存在一个纳什均衡,并且该模型纳什均衡的解就是所求的最优传输路径。

**证明** 在路由博弈  $G$  中,参与者个数是有限的,所以参与者的邻居节点的个数也是有限的,对于纯策略的空间路由博弈,参与者的可选的策略也是有限的,根据定义 1 可知  $G$  是一个有限博弈。每一个参与者都知道先前行动的参与者的行动,根据定义 2 可知  $G$  是一个完美信息博弈。从定理 1 可知  $G$  存在一个纯策略纳什均衡。

从式(6)可得出:效益函数和数据传输的可靠度和下一跳节点的距离以及剩余能量有关,最优路径  $P$  就是在节点能耗均衡、路径可靠性方面均达到最优值的路径。从纳什均衡的定义可知,在博弈达到纳什均衡时,每个参与者选择的策略都是最优策略,所以  $P$  上的节点不会选择非  $P$  上的节点作为下一跳节点传输数据,因为不可能获得更高的收益。所以本文提出的路由博弈模型存在一个纳什均衡,最优路径  $P$  就是  $G$  的一个纳什均衡的结果。

## 3 GBUC 协议

GBUC 算法由簇的建立和稳定通信两个阶段构成。在簇的建立阶段,主要任务是完成簇头的选择和簇的划分;而稳定通信阶段,主要完成将节点采集的数据成功的发送到汇聚节点。下面对这两个阶段的主要算法进行描述。

### 3.1 簇的建立

在均匀分簇的多跳路由中,簇头的能耗是不同的,靠近汇聚节点的簇头要承担更多的数据转发任务而消耗更多的能量。为了均衡簇头的能耗、延长网络生命周期,GBUC 算法在簇的建立阶段采取非均匀分簇,靠近汇聚节点的簇的尺寸越小,簇头的通信半径与到汇聚节点的距离有关,簇头的竞争半径定义如下:

$$R_i = \left(1 - \varepsilon \frac{d_{\max} - d(s_i, BS)}{d_{\max} - d_{\min}}\right) R_0 \quad (7)$$

其中:  $R_i$  代表节点的竞争半径;  $R_0$  为系统设置传感器网络簇的最大半径;  $\varepsilon$  为常数,取值为 0 ~ 1。从式(7)可看出越靠近基站的簇的半径越小。

在簇头的选择过程中,为了避免能量少的节点当选为簇头,本文构造了一个簇头的竞争函数如式(8)所示:

$$f(i) = c_1 \frac{E_{i-redu}}{E_{init}} - c_2 \frac{d_{\max} - d(s_i, BS)}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (8)$$



其中:  $E_{i-red}$  代表是节点  $i$  剩余的能量;  $E_{init}$  代表节点的初始时的能量;  $d_{max}$ 、 $d_{min}$  分别代表监测区域到基站的最远和最近距离;  $d(s_i, BS)$  代表节点  $s_i$  到基站的距离;  $c_1$ 、 $c_2$  都是常数, 取值为  $0 \sim 1$ 。可看出, 能量剩余较多的, 且离基站远的节点更容易成为簇头。

在分簇的路由算法中, 簇头节点的能耗远高于普通节点, 为了避免簇头过早因能源耗尽而消亡, GBUC 算法在簇与簇之间的重叠区域选择出交叉节点来充当簇间转发数据的中继节点, 如图 2 所示。首先在重叠区域的交叉节点向簇头发送申请为中继节点的请求信息, 簇头根据式 (9) 选择函数值较大的节点为中继节点。

$$K_i(E_c, E_i, d) = (\theta E_c + \varphi E_i) / \omega d \quad (9)$$

其中:  $E_c$  为簇头剩余能量;  $E_i$  为交叉节点的剩余能量;  $d$  为交叉节点与簇头之间的距离;  $\theta$ 、 $\varphi$ 、 $\omega$  为权重系数, 通过调节权重系数来选出最优的中继节点。

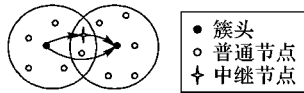


图2 簇头与中继节点

分簇过程中用到的数据包定义如表 1 所示, 具体的分簇算法的描述如下: 在分簇过程中, 首先所有的节点都通过随机函数  $RAND(0,1)$  产生随机数  $R$ , 当节点的随机数小于  $T$  值时, 主动成为候选簇头节点去竞选簇头, 如伪代码中的第 1) ~ 4) 行所示。成为候选簇头的节点  $S_i$  通过式 (7) ~ (8) 分别计算出竞争半径  $R$  和簇头竞争值  $f(i)$ , 然后以广播的形式广播竞争簇头消息  $Elect\_msg$ , 当候选簇头接收到别的候选节点发送的竞争簇头的消息时, 如果两个节点的距离小于其中任何一个节点的竞争半径, 就把该节点存储在自己的邻居表  $NT_i$  中, 当所有邻居节点的簇头竞争值都小于自己就当选为簇头否则放弃竞选, 如第 6) ~ 18) 行所示。成为簇头的节点向自己通信范围的所有节点广播一个成为簇头的信息  $Competehead\_msg$ , 收到多个簇头消息的普通节点, 判断自身能量剩余情况, 如果能量充足, 申请当中继节点; 否则根据接收信号的强度来选择离自己最近的簇头节点, 并申请加入该簇头的簇。簇头接收到节点发送的申请消息时进行处理, 并根据式 (9) 选择出中继节点。如果普通节点没有收到任何簇头发送的消息, 则自己成为簇头。重复第 4) ~ 18) 步, 当所检测区域中的所有节点都选择加入了簇, 簇的建立阶段就结束了。分簇的结构如图 3 所示。

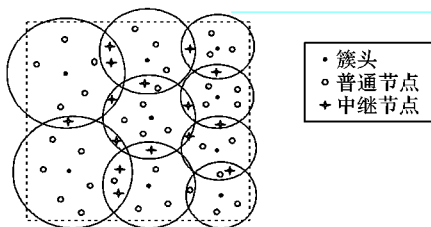


图3 GBUC 分簇结构

GBUC 算法在分簇阶段的伪代码如下所示:

For every node in the network

- 1)  $R \leftarrow RAND(0,1)$
- 2) if  $R < T$  then
- 3)  $candidate\_head = TRUE$
- 4) end if

- 5) if  $candidate\_head = TRUE$  then
- 6)  $Elect\_msg(ID, R_i, f(i))$
- 7) else
- 8) sleep
- 9) end if

For every candidate node  $v_i$

- 10) on receiving a  $Elect\_msg$  from candidate node  $s_j$
- 11) if  $d(s_i, v_j) < s_j.R_j$  OR  $d(s_i, s_j) < s_i.R_i$  then
- 12) add  $s_j$  to  $v_i$  neighbor set  $NT_i$
- 13) end if

For every volunteer node  $s_i$

- 14) if  $f(i) \geq f(j)$   $j$  belong  $NT_i$ ; compute  $f(i)$  according to Eq. (8)
- 15)  $Competehead\_msg(ID, R_i)$
- 16) else
- 17)  $Giveuphead\_msg(ID, R_i, f(i))$
- 18) end if

For every ordinary node  $s_i$

- 19) if receive  $Competehead\_msg$
- 20) if  $Competehead\_msg.count \geq 2$
- 21)  $ArossNode\_msg(ID, ClusterID, E_i)$
- 22) else  $Joincluster\_msg(ID, ClusterID)$
- 23) endif
- 24) else  $Elect\_msg(ID, R_i, f(i))$
- 25) end if

表 1 通信数据包说明

消息名称	消息含义	消息源	消息宿
Init_msg	初始化消息	汇聚节点	所有节点
Elect_msg	竞选簇头消息	候选簇头	邻居候选簇头
Competehead_msg	成为簇头消息	簇头节点	簇内所有节点
Giveuphead_msg	放弃竞争簇头节点	候选簇头	邻居候选簇头
Joincluster_msg	申请加入簇	簇内普通节点	簇头节点
JoinAk_msg	同意加入簇	簇头节点	簇内成员节点
ArossNode_msg	申请成为中继节点	交叉节点	簇头节点
CompeteArcross	成为中继节点	簇头节点	中继节点

### 3.2 稳定通信阶段

当簇的建立阶段过程结束后, WSN 进入稳定通信阶段, 该阶段的主要任务是在簇间选择出最优的数据传输路径从而达到提高网络性能的目的。簇间通信采用第 2 章构建的路由博弈模型, 通过簇头节点之间, 以及中继节点与簇头节点之间的博弈选择出联合可靠性高、能耗均衡的最优路径, 具体步骤如下:

1) 首先节点把采集的数据通过 TDMA 的方式发送到自己所在的簇头节点。簇头把采集的簇成员的数据通过数据融合技术进行融合后转发到汇聚节点。

2) 当簇头有数据需要发送和转发时, 簇头通过式 (6) 选择自己邻居节点表 (由邻居簇头和中继节点构成) 中收益最高的节点进行转发数据。

3) 当汇聚节点成为路由中节点的下一跳时的, 数据成功地发送到汇聚节点。

根据 2.2 节博弈模型的分析可知, 当博弈达到均衡时, 就是本文所求的联合能耗均衡, 可靠性高的最优路径。

### 3.3 算法分析

#### 3.3.1 算法复杂度

性质 1 GBUC 的算法复杂度为  $O(N)$ 。

证明 假设网络的节点数为  $N$ ,  $T$  为传感器网络的成为

候选簇头的概率,  $p$  为成为簇头的概率, 有  $C$  个交叉节点。在算法的初始化阶段,  $N \times T$  个节点成为候选簇头节点并发送竞争簇头的竞选簇头的数据包  $Elect\_msg$ ,  $N \times P$  个节点通过竞争成为簇头, 并且发送一个当选簇头的消息包  $Competehead\_msg$ ,  $N(1 - P)$  个非簇头节点接收到簇头发送的  $Competehead\_msg$  并发送一个选择加入簇的消息  $Joincluster\_msg$ , 簇头接收到非簇头加入簇的消息, 并回复加入簇的非簇头节点同意加入簇的消息  $JoinAk\_msg$ , 交叉节点发送  $C$  个  $AcrossNode\_msg$  消息。所以每轮初始化阶段发送的数据包量为:  $N \times T + 2N \times P + (1 - P) \times N + C = N \times (1 + T + P) + C$ 。综上所述 GBUC 的算法复杂度为  $O(N)$ 。

### 3.3.2 算法能耗的均衡性

在多跳路由的均匀分簇路由算法中, 靠近汇聚节点的簇头需要消耗更多能量用来转发数据, 使得靠近节点的簇头容易过早消亡, GBUC 算法采用非均匀分簇路由, 通过减少靠近节点簇头的簇内通信能耗来均衡簇头的能耗。在簇间引进了中继节点, 当簇间通信距离较远或者簇头的能量剩余较少时, 中继节点充当簇间的通信桥梁进行数据转发, 避免了簇头能耗过快而消亡, 达到了延长了网络生命周期的目的。簇内数据融合技术的使用, 减少了网络的数据传输量和能耗, 延长了网络生命周期。为了在簇间通信过程中选择出最优的传输路径, 本文基于节点的理性偏好, 构建了一个效益函数与通信距离、链路可靠度以及节点剩余能量相关的路由博弈模型, 参与者为了获取最高的收益值, 都会选择出相对于其他参与者的策略集的最优策略。当博弈模型达到均衡时, 选择出的数据传输路径, 就是所寻求的一条集能量均衡、可靠性和生命周期三方面最优的传输路径。

## 4 实验与分析

### 4.1 仿真参数设置

本章通过 OMNET++ 软件对 GBUC 的路由算法进行仿真分析, 并与非均匀分簇节能路由 (Unequal Clustering Energy-Economical Routing, UCCER) 算法<sup>[8]</sup> 和能量高效的非均匀分簇 (Energy-Efficient Uneven Clustering, EEUC) 算法<sup>[2]</sup> 进行比较。首先, 对仿真环境进行设定, 本文把检测区域设定为  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  的正方形检测区域, 200 个传感器节点均匀分布在检测区域, 每个节点的初始能量设定为  $10\text{ J}$ 。其他的一些主要网络参数设定如表 2 所示。

表 2 网络主要参数设置

参数	值
Data packet size	4 096 bit
Control packet size	200 bit
$E_{DA}$	5 nJ/bit
$E_{elec}$	50 nJ/bit
$\epsilon_{fs}$	10 pJ/(bit · m <sup>2</sup> )
$\epsilon_{mp}$	0.000 1 J/(bit · m <sup>4</sup> )
$T$	0.2
$\epsilon$	0.5
$c_1$	0.6
$c_2$	0.4
$R_0$	80 m
$d_0$	100 m

### 4.2 性能指标

#### 4.2.1 网络生命周期

在无线传感器网络中, 经过  $N$  轮数据传送后, 30% 传感器节点死亡的时间定义为网络的生命周期。

#### 4.2.2 能耗均衡性

本文采用文献[12]的能量均衡性的衡量指标, 通过节点剩余能量的方差来表示网络的均衡性, 方差代表样本在均值上下波动的大小, 节点的能量方差越小, 说明路由算法均衡性较好。网络的节点能量均值函数  $m_E(t)$  和能量方差函数  $D_E(t)$  定义如为:

$$m_E(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(t) \quad (10)$$

$$D_E(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{E_i(t) - m_E(t)\}^2 \quad (11)$$

#### 4.2.3 路径的可靠性

链路的可靠度代表数据成功地从数据源发送到基站的概率, 可靠度越高说明成功的概率越高, 丢数据包的现象越少。

### 4.3 仿真结果分析

#### 1) 网络生命周期。

从图 4 可看出: EEUC、UCCER 和 GBUC 三种算法有 30% 节点死亡的轮数分别为 400、550、610, 所以 GBUC 算法在网络生命周期方面分别比 EEUC 算法和 UCCER 算法提升了 50% 和 11%。

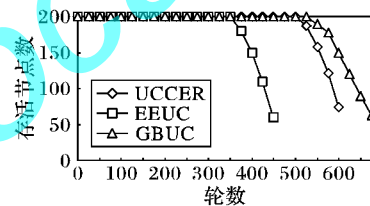


图 4 网络生命周期

#### 2) 能量均衡性。

能量方差则代表了节点偏离节点能量均值的程度, 该值越小表明网络节点能耗越平均。从图 5 可看出 GBUC 在节能和能量均衡方面比 UCCER 算法和 EEUC 算法更优越。

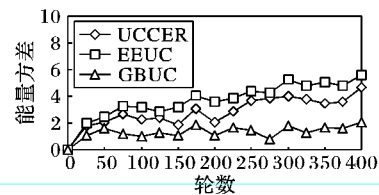


图 5 能量均衡性

#### 3) 路径的可靠度。

从图 6 可看出: GBUC 算法随着节点增多, 路径的可靠性反而越高, 而 UCCER 算法和 EEUC 算法随着节点的增多路径的可靠性降低; 而且, GBUC 算法在可靠度方面要高于 UCCER 算法和 EEUC 算法, 更适合应用在规模较大的场合。

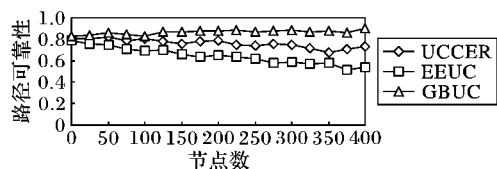


图 6 路径可靠性

## 5 结语

本文提出了一种基于能量均衡、路径可靠的 GBUC 算法,通过在簇间选择一些中继节点来分担一些簇头的能耗,在路径选择时利用路由博弈模型选择出能耗均衡、可靠性高的最优路径。从仿真效果来看,GBUC 算法在可靠性、能耗均衡、生命周期等方面都要优于 EEUC 和 UCCER 算法。但是 GBUC 算法在分簇算法中采用随机的方式产生候选簇头,会造成簇的分配不合理;而为了避免节点空洞问题,采用迭代的方式产生簇头,也消耗了一定的时间和能量资源。今后的工作中需对该问题进行改进。

### 参考文献:

- [1] SUN L, LI J, CHEN Y, *et al.* Wireless sensor networks[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.)
  - [2] LI C, CHEN G, YE M, *et al.* An uneven cluster-based routing protocol for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(1): 27 - 36. (李成海, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27 - 36.)
  - [3] HU J, SHEN L. Clustering routing protocol of wireless sensor networks based on game theory[J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2007, 30(1): 27 - 36. (胡静, 沈连丰. 基于博弈论的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(3): 441 - 445.)
  - [4] WU T, LIU K, LIU W. An energy-efficient coalition game model for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2011 30th Chinese Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 4940 - 4945.
  - [5] WANG T, WUJ, HE X, *et al.* A cross unequal clustering routing algorithm for sensor network[J]. Measurement Science Review, 2013, 13(4): 200 - 205.
  - [6] CUI Y, XU Y, XU R, *et al.* A heterogeneous wireless network selection algorithm based on non-cooperative game theory[C]// Proceedings of the 2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China. Piscataway: IEEE Press, 2011: 720 - 724.
  - [7] TU Z. Game theory[M]. Beijing: Peking University Press, 2010. (涂志勇. 博弈论[M]. 北京: 北京大学出版, 2010.)
  - [8] ZHONG L, CHENG L. Unequal clustering energy-economical routing algorithm based on game-theory for WSN[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(5): 1865 - 1867. (衷柳生, 程良伦. 基于博弈论的无线传感器网络非均匀分簇路由算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(5): 1865 - 1867.)
  - [9] LI H, JIANG S, WEI G. Game-theoretic modeling on routing in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(9): 2075 - 2079. (李慧芳, 姜胜明, 韦岗. 无线传感器网络中基于博弈论的路由建模[J]. 传感技术学报, 2007, 20(9): 2075 - 2079.)
  - [10] WANG X, MA J, WANG S, *et al.* Cluster-based dynamic energy management for collaborative target tracking in wireless sensor networks[J]. Sensors, 2007, 7(7): 1193 - 1215.
  - [11] JIANG C, SHI W, TANG X, *et al.* Energy - balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 1222 - 1232. (蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1222 - 1232.)
  - [12] ARISIAN B, ESHGHI K. A game theory approach for optimal routing: in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1 - 7.
- 
- (上接第 3159 页)
- [7] RAO S, WANG Y, TAO X. The comprehensive trust model in P2P based on improved EigenTrust algorithm [C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Piscataway: IEEE Press, 2010, 3: 822 - 825.
  - [8] XIONG L, LIU L. PeerTrust: supporting reputation based trust for peer-to-peer electronic communities [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(7): 843 - 857.
  - [9] ZHANG Y C, CHEN S S, YANG G. SFTrust: a double trust metric based trust model in unstructured P2P system [C]// Proceedings of the 23rd IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1 - 7.
  - [10] KWON O, LEE S, KIM J. FileTrust: reputation management for reliable resource sharing in structured peer-to-peer networks[J]. IEICE Transactions on Communication, 2007, E90-B(4): 826 - 835.
  - [11] DONG X, YU W, PAN Y. A dynamic trust management scheme to mitigate malware proliferation in P2P network [C]// Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1605 - 1609.
  - [12] WANG Y F, NAKAO A. Poisonedwater: an improved approach for accurate reputation ranking in P2P networks[J]. Future Generation Computer System, 2010, 26(8): 1317 - 1326.
  - [13] TIAN C, YANG C B. R2Trust: a reputation and risk based trust management framework for large-scale, fully decentralized overlay networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2011, 27(8): 1135 - 1141.
  - [14] LIANG Z, SHI W. PET: a personalized trust model with reputation and risk evaluation for P2P resource sharing [C]// Proceedings of the 38th International Conference on System Science. Piscataway: IEEE Press, 2005: 1 - 10.
  - [15] PATHAN A K. Security of self-organizing networks [M]. Florence: CRC Press, 2010: 102 - 113.
  - [16] MIAO W, FEI T, YU J Z, *et al.* An adaptive and robust reputation mechanism for P2P network [C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1 - 5.
  - [17] WEST A G, KANNAN S, LEE I, *et al.* An evaluation framework for reputation management systems. Working chapter for trust modeling and management in digital environments: from social concept to system development [EB/OL]. [2013-10-10]. [http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1430&context=cis\\_papers](http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1430&context=cis_papers).