

## 一种能量有效的无线传感器网络路由算法

闵 林,王飞飞,郭拯危,王青正

(河南大学 计算机与信息工程学院, 河南 开封 475004)

**摘 要:** 无线传感器网络中传感器节点能量有限,为了提高能量利用率,针对现有算法随机选择簇首、簇结构不合理等缺陷提出了一种新的能量有效的分簇路由算法 EERA. EERA 采用新的簇首选举、成簇,以及构建簇间路由算法,基于节点剩余能量与节点的相对位置选择簇首、成簇,使剩余能量较多的节点优先成为簇首并且各簇首能较均匀的分布在网络区域内;构建簇间路由时将最小跳数路由算法与改进的 MTE 算法结合起来,在簇间形成最小跳数、最小能耗路径. 仿真结果表明, EERA 算法可以均衡全网能量消耗,延长网络的生命周期.

**关键词:** 无线传感器网络;分簇路由;能量有效;最小跳数路由

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2010)05-0066-04

## An Energy Efficient Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks

MIN Lin, WANG Fei-fei, GUO Zheng-wei, WANG Qing-zheng

(College of Computer Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** The energy of sensor node is limited in wireless sensor networks, in order to improve the energy efficiency, the paper designs a new energy efficient clustering routing algorithm EERA based on the disadvantages, such as randomly selected the cluster head, the cluster structure is unreasonable. The EERA uses the new algorithm for selecting cluster head, forming cluster and building inter-cluster routing, based on the residual energy and the relative positions of nodes to select cluster head and form cluster can make the nodes of more energy become cluster head and also make cluster heads homogeneously distributed in the network region; according to the minimum-hop routing algorithm and improved MTE to construct the inter-cluster routing can form a minimum-hop and minimum energy path. Simulation results show that the routing algorithm effectively balances the energy consumption and prolongs the network lifetime.

**Key words:** wireless sensor networks; clustering routing; energy efficient; minimum-hop routing

### 1 引言

在 WSN 中,分簇路由的研究尤为重要. 近期对分簇路由的研究主要集中在对传统分簇算法的改进上. 典型的分簇算法有 LEACH<sup>[1]</sup>、HEED<sup>[2]</sup>、PEGASIS<sup>[3]</sup>, 以及 LEACH-C<sup>[4]</sup> 等. LEACH 是 WSN 中最早提出的分簇路由算法,它的成簇思想对后来提出的很多重要分簇路由算法影响深远;与传统的静态分簇算法和多跳路由算法 MTE 相比,LEACH 在数据发送效率和网络寿命等性能上具有很大的优势;但是 LEACH 存在随机选择簇首、一跳通信等缺陷,

扩展性差,不适合大规模网络;LEACH-C 采用集中式的簇首选取算法,即由汇聚节点负责簇首的选取,需要消耗较多的通信能量. 目前在对经典路由算法研究的基础上,提出了许多新的算法<sup>[5-8]</sup>. 文献[5] 中在 LEACH 基础上提出了一种基于节点剩余能量的选择簇首的方法,并提出了数据限制传输的思想,但没有考虑到簇首在区域内的分布. 文献[6]中提出了一种基于能量和距离的路由算法 EDBCM,在预先划分的区域内选择簇首,簇间使用多跳传输,但是没有考虑到时延问题. 综合以上经典算法与近期的研究,文中提出了一种新的路由算法 EERA(Energy

收稿日期: 2009-04-20; 修回日期: 2009-06-20

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2007AA01Z478);河南省自然科学基金项目(0611054700)

Efficient Routing Algorithm). 该算法在簇首选择、成簇以及簇间路由构建时均提出新的方案,可从整体来均衡节点能耗,减少时延,延长网络生存周期.

## 2 网络模型

一个由  $N$  个随机部署的传感器节点形成的网络,周期性的进行数据收集.用  $S_i$  表示第  $i$  个节点,相应的节点集合为  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ ,  $|S| = N$ ,假设:(1) 汇聚节点 Sink 位于一个方形观测区域的外侧.传感器节点和汇聚节点在部署后均不再发生位置移动.(2) 节点都是同构的,具备数据融合的功能.(3) 链路是对称的.若已知对方发射功率,节点可以根据接收信号的强度 RSSI 计算出发送者到自己的近似距离<sup>[9]</sup>.

这里采用文献[1]中的无线通信模型.在该通信模型中,传感器节点发送  $k$  bit 数据所消耗的能量为

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) = E_{elec} * k + \xi_{amp} * k * d^\beta \quad (1)$$

传感器节点接收  $k$  bit 数据所消耗的能量为

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

式中,  $\beta$  是由无线电通道决定的常量,  $d$  是信号传输的距离.在距离较近时( $d < d_0$ ,  $d_0 = 86.2$ ),采用自由空间信道模型,  $\beta$  取值为 2; 当传输距离较远时( $d \geq d_0$ ),采用多径衰减信道模型,  $\beta$  取值为 4. 由此可知,发送数据所消耗的能量与所发送的数据量以及数据所传输的距离相关.因此可以进行数据融合与减少数据的传输距离来减少能耗.

## 3 EERA 算法描述及分析

分簇算法 EERA 设计思想如下: EERA 算法分为三个阶段: 簇首选择, 簇的形成, 数据稳定传输阶段的路由构建. 在簇首选择阶段: 首先根据网络区域大小与节点个数得出网络内的理想簇首个数与每个节点的理想信号发射半径  $R$ . 在实际网络环境下, 为了防止独立簇首的出现, 实际半径  $r$  应大于  $R$ .  $r$  选定后, 网络内的每个节点根据剩余能量的多少产生一定时数, 待时间到, 则以  $r$  为半径广播消息, 同时更改该节点与在  $r$  半径范围内的其他节点状态. 簇首选择成功后, 每个非簇首节点根据自己接收到的信号强弱与簇首剩余能量来判断加入哪个簇, 并告知该簇首. 在数据稳定传输阶段: 簇内直接通信, 簇间进行数据传输时, 需要构建多跳路由. 首先获得各簇首通往汇聚节点的最小跳数与邻簇首集合, 根据邻簇首集合与改进的 MTE 算法获得路由候选节点

集合.

### 3.1 簇首选择

簇首的产生方法、数量和位置决定了最终形成的簇的结构、大小和数量, 也影响了节点的能量耗费进度和网络的生命周期. 在 EERA 算法中, 综合考虑节点的剩余能量与节点的相对位置, 提出了一种新的簇首选择方案, 如下:

首先确定网络覆盖的地理面积  $S = M * M$ , 网络中的节点数为  $N$ , 根据文献[10] 确定网络中的理想簇首个数  $k_{opt}$ :

$$k_{opt} = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\xi_{fs}}{\xi_{mp}}} \frac{M}{d_{toBS}^2} \quad (3)$$

根据  $S$  与  $k_{opt}$  来确定簇首节点的理想通信半径  $R$ :

$$R = \sqrt{\frac{2\pi}{N}} \sqrt{\frac{\xi_{mp}}{\xi_{fs}}} \sqrt{M} d_{toBS} \quad (4)$$

在实际情况下, 为了防止某节点不在任何簇首的通信范围内而成为独立簇首, 确定实际半径为  $r$  ( $r = c * R$ ,  $c > 1$ ); 然后根据节点剩余能量, 给每个节点确定一定时数, 确定定时数时应遵循的准则为: 剩余能量大的节点的定时数小于剩余能量小的节点的定时数. 在簇首形成阶段, 网络开始工作, 所有节点启动定时器, 进行倒计时操作, 此时所有节点状态都为候选簇首. 具体操作流程以节点  $S$  为例: 节点  $S$  启动定时器, 倒计时开始, 如果在倒计时结束之前, 节点  $S$  接收到在半径  $r$  范围内的节点发出的“我是簇首”的消息, 则停止计时, 节点  $S$  的状态声明为非簇首节点; 如果在计时结束时没有收到“我是簇首”的消息, 则节点  $S$  在计时结束时在半径为  $r$  的范围内发出“我是簇首”的消息, 该消息携带簇首的节点 ID, 剩余能量与标识, 该节点状态声明为簇首节点.

### 3.2 簇的形成

在成簇阶段, 非簇首节点根据接收到的信号强度与簇首剩余能量来决定加入哪个簇. 首先非簇首节点根据信号强度计算出发送节点到自己的近似距离  $d$ , 由于节点的剩余能量与近似距离不在一个单位等级上, 因此需要对距离进行归一化处理  $\arctan(d) * 2/\pi$ , 然后得出加入竞争值  $C_{join}$ ,  $C_{join} = \alpha * E_{current} + (1 - \alpha) * (1 - \arctan(d) * 2/\pi)$ , 非簇首节点发送请求加入信息到  $C_{join}$  值最大的簇首, 此请求消息包括该节点的 ID 号和簇首的 ID 号. 簇首根据接收到的请求消息统计成员节点数, 基于成员节点的数目, 以 TDMA 方式为每个簇成员分配一定

的时隙,并用广播的形式发送到簇内所有的节点,这样就可以保证簇内每个节点只在相应的时隙内进行数据传输.不仅减少了数据消息间的冲突,也使得簇成员节点的无线通信模块在各自的传输时段外可以一直保持关闭状态,充分减少了节点能耗.

### 3.3 构建簇间路由

#### 3.3.1 选择标准

根据第二节网络模型中的分析可知,在构建簇间路由时应尽量把一跳的发送距离限制在阈值  $d_0$  之内,避免出现能耗随着距离四次方增长.在本节首先给出簇首  $S_i$  选择路由候选节点集合的标准:假设  $S_j$  为  $S_i$  传输数据的中转节点,  $S_j$  直接将数据传输给汇聚节点,通信采用自由空间模型.则将  $k$  bit 数据传输至汇聚节点,  $S_i$  与  $S_j$  消耗的总能量为

$$E_1 = E_{\text{elec}} * k + \xi_{\text{amp}} * k * d^2(S_i, S_j) + E_{\text{elec}} * k + \xi_{\text{amp}} * k * d^2(S_j, \text{Sink}) + E_{\text{elec}} * k = 3 * E_{\text{elec}} * k + \xi_{\text{amp}} * k * [d^2(S_i, S_j) + d^2(S_j, \text{Sink})] \quad (5)$$

由  $S_i$  直接传输  $k$  bit 数据到汇聚节点的能耗为

$$E_2 = E_{\text{elec}} * k + \xi_{\text{amp}} * k * d^2(S_i, \text{Sink}) \quad (6)$$

由于  $k * E_{\text{elec}} \ll \xi_{\text{amp}} * k * d^2$ , 总能耗  $E_1$  取决于  $d^2(S_i, S_j) + d^2(S_j, \text{Sink})$  的大小. 当  $d^2(S_i, S_j) + d^2(S_j, \text{Sink}) < d^2(S_i, \text{Sink})$  时,才能在数据传输过程中最大限度减少总能耗.但是由于节点接收信息也消耗能量,并且经过中转节点个数越多时延越大,因此应在减少能量消耗的前提下减少节点往汇聚节点传输数据的中转次数.

#### 3.3.2 簇间路由构建

EERA 算法的簇间路由构建采用最小跳数算法与改进的 MTE 算法相结合的方法.首先获得每个簇首通往汇聚节点的最小跳数与邻簇首节点集合,然后根据邻簇首节点确定候选路由节点集合.具体步骤如下:

(1) 汇聚节点以阈值广播一 Hello 消息,消息中包括跳数 count 标识, count 初始值确定为 0.网络中的每个簇首维护一个邻簇首集合  $S_i \cdot S_{\text{CH}}$ .某簇首收到 Hello 消息,将 count 加 1,该簇首到汇聚节点的跳数记为 1 并且将汇聚节点加入其邻簇首集合;然后以阈值为发射半径广播 Hello 消息,消息中包括自己的 ID、count 及剩余能量信息.

(2) 簇首  $S_i$  收到  $S_j$  发送的 Hello 消息后,按照以下规则进行处理:节点  $S_i$  当前的跳数为  $\text{count}_{\text{old}}$ ,  $S_j$  的跳数为  $\text{count}_{\text{new}}$ .如果  $\text{count}_{\text{new}} + 1 > \text{count}_{\text{old}}$ ,则该

簇首节点的跳数保持不变,不更新  $S_i \cdot S_{\text{CH}}$ ,不发送消息;如果  $\text{count}_{\text{new}} + 1 = \text{count}_{\text{old}}$ ,则将簇首  $S_j$  加入  $S_i \cdot S_{\text{CH}}$ ;如果  $\text{count}_{\text{new}} + 1 < \text{count}_{\text{old}}$ ,则修改簇首  $S_i$  的跳数为  $\text{count} = \text{count}_{\text{new}} + 1$ ,且将簇首  $S_j$  加入  $S_i \cdot S_{\text{CH}}$ .然后  $S_i$  构造包括自己 ID、剩余能量,到汇聚节点跳数的新消息,以阈值为发射半径广播.此过程一直持续,直至所有节点均已得到自己通往汇聚节点的最小跳数以及自己的邻簇首集合.

(3) 构造簇首节点通往汇聚节点的最小跳数、最小时延路径.

由(1)和(2)可以得出每个簇首到达汇聚节点的最小跳数及邻簇首集合.  $S_i \cdot S_{\text{CH}}$  为  $S_i$  的邻簇首集合.  $S \in S_i \cdot S_{\text{CH}}$ , 如果  $S_j \cdot \text{count} = S_i \cdot \text{count} - 1$ , 当  $S_j$  满足  $d^2(S_i, S_j) + d^2(S_j, \text{Sink}) < d^2(S_i, \text{Sink})$  时将其加入到  $S_i$  的路由候选节点集合  $S_i \cdot R_{\text{CH}}$ .对  $S_i \cdot S_{\text{CH}}$  中的每个节点按照该规则进行处理,可以得到  $S_i$  的路由候选节点集合  $S_i \cdot R_{\text{CH}}$ .如果处理完所有节点,集合  $S_i \cdot R_{\text{CH}}$  为空.就采用以下方法:如果  $S_i \cdot R_{\text{CH}}$  中跳数为  $S_i \cdot \text{count} - 1$  的节点个数大于 3,则将  $d^2(S_i, S_j) + d^2(S_j, \text{Sink})$  值最小的三个节点加入到  $S_i \cdot R_{\text{CH}}$  中.否则将跳数为  $S_i \cdot \text{count} - 1$  的节点全部加入到  $S_i \cdot R_{\text{CH}}$  中.

EERA 算法的路由策略是:簇首节点  $S_i$  在  $S_i \cdot R_{\text{CH}}$  选取中转节点.首先选择剩余能量较大的节点,然后对其作标记,再次传输数据时在没有标记的节点中选择剩余能量最大的,所有节点均已标记的情况下重新循环执行上面的操作.

#### 3.4 算法分析

EERA 算法在选择簇首时将簇首的剩余能量与节点的相对位置结合,每个节点定时时间到则在  $r$  范围内广播信息,在此范围内的节点退出簇首竞争,在降低节点发送能耗的同时,可以控制簇首之间的相对距离,避免簇首过于集中的出现在某一区域.簇形成过程中,  $C_{\text{join}}$  值由簇首的剩余能量与节点到簇首的距离共同决定,可以避免节点加入到剩余能量较少的簇首,加速此簇首节点的能耗.而簇首节点的发射半径  $r$  的确定,则可以避免节点加入到距离过远的簇中.在簇的路由构建过程中,最小跳数的确定可以减少接收能耗与时延;路由候选节点集合的确定可以使节点选择最优中转节点而减少传输数据的能耗.

### 4 仿真

文中采用 OMNeT++ 平台对三者进行仿真并

对结果进行比较分析. 参数设置如下: 节点数为 400, 区域面积为  $200\text{m} \times 200\text{m}$ , 汇聚节点坐标在 (50, 250), 节点初始能量均为 0.5J, 传输放大器的能耗为  $10 \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$ , 数据融合能耗为  $5 \text{ nJ}/\text{bit}/\text{signal}$ , 数据包大小为 4 000bit.

对网络中存活节点的个数进行了仿真. 由仿真结果可以得出: EERA 的生存周期高于其他两种. 在能量均衡方面: 由于第一个节点死亡与最后一个节点死亡的轮次差可以反映出网络中节点的能量均衡情况, 差小说明网络的能量使用越高效, EERA 不仅延长了网络的存活时间, 而且轮次差也小于其他算法, 说明 EERA 能很好的均衡网络中所有节点的能耗.

图 1 显示了全网剩余能量随网络生存时间的变化. 由图 1 的仿真结果可知, EERA 算法在每轮数据传递之后全网剩余能量均大于 LEACH 与 EDBCM, 因此可以得出 EERA 的能耗要比 LEACH 与 EDBCM 少. EERA 能耗较少的原因: EERA 的簇首选择算法使簇首节点相对合理的分布在区域内, 簇首节点不在全网范围内进行广播而是以仿真得出的实际半径进行广播, 不但减少了簇首的发送能耗, 而且也减少了非簇首节点与簇首节点之间的通信能耗; 在簇间通信时采用最小跳数与改进 MTE 相结合的方法构建的路径也可以减少簇首能耗.

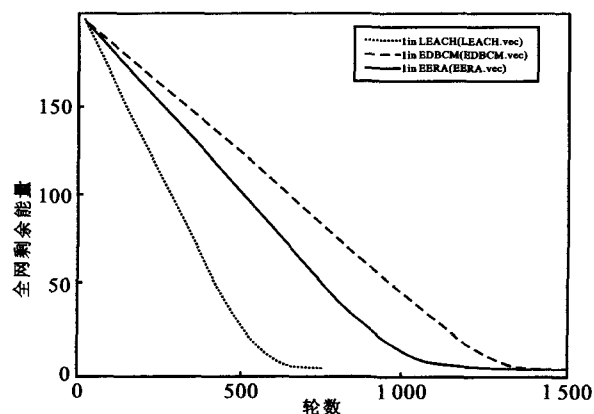


图 1 全网能耗随生存时间变化图

## 5 结束语

文中提出了一种新的无线传感器网络分簇路由算法 EERA. 在该算法中, 新的簇首选举与成簇算法使剩余能量较多的节点成为簇首且网络内的簇首分布较为均匀, 形成的簇结构较合理; 簇间数据传输时形成最小跳数、最小能耗的动态路由. 仿真结果表明: 新的算法提高了网络的通信性能, 使能量消耗较

为均衡, 并延长了网络的生存周期.

## 参考文献:

- [1] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 - 670.
- [2] Younis O, Fahmy S. Heed: a hybrid, energy - efficient, distributed clustering approach for ad - hoc sensor networks [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660 - 669.
- [3] Lindsey S, Raghavendra C. PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems[C]// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference'02. Big Sky, Montana, 2002: 1125 - 1130.
- [4] Heinzelman W. Application - specific protocol architectures for wireless networks[C]// PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology. Boston, 2000.
- [5] Ki Young Jang, Kyung Tae Kim, Hee Yong Youn. An Energy efficient routing scheme for wireless sensor networks[C]// Fifth International Conference on Computational Science and Applications. Kuala Lumpur, 2007 (10): 399 - 404.
- [6] 张磊, 陈曙. 一个新的基于能量和距离的传感器网络协议[J]. 计算机应用, 2008, 28(5): 1117 - 1119.
- [7] 龚本灿, 李腊元. 基于生成树的无线传感器网络分布式路由协议[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(11): 77 - 80.
- [8] MintRouteEE: 一种无线传感器网络能量有效的路由协议[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(9): 35 - 37.
- [9] Gibson J. The mobile communication handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [10] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, H Balakrishnan H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 - 670.

## 作者简介:

闵林男, (1963 -), 副教授, 硕士生导师. 研究方向为计算机网络运行管理.

王飞飞女, (1982 -), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络.

郭拯危女, (1963 -), 教授, 硕士生导师. 研究方向为无线传感器网络.

王青正男, (1983 -), 硕士研究生. 研究方向为计算机网络.