

基于非均匀分簇的能耗高效 WSN 路由协议

潘中强, 刘亮亮, 张 东

(平顶山学院 网络中心, 河南 平顶山 467000)

摘 要: 本文提出了能耗高效的非均匀分簇路由协议(EERP), 核心为由远及近依次求取各层成簇半径值, 使得靠近 sink 节点的成簇半径小于远离 sink 节点的成簇半径; 以节点剩余能量和相对距离为每个节点确定簇首竞争能力; 簇间采用动态路由; 依据接收比特值和簇首节点剩余能量发起簇重构. 在 Omnet++ 仿真平台下模拟实验结果显示, EERP 有效的均衡了全网节点能耗, 显著延长了网络生命周期.

关键词: 无线传感器网络; 分簇; 能耗均衡; 生命周期

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)01-0093-04

An Energy Efficient Routing Protocol Based on Uneven Clustering for Wireless Sensor Networks

PAN Zhong-qiang, LIU Liang-liang, ZHANG Dong

(Network Center, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: In this paper, it present an Energy Efficient Routing Protocol (EERP). The main idea is to strike a value of cluster radius in every level from the most far level to the nearest one, and make the radius of the clusters near the sink node less than the radius far from the sink node. The node's ability to be cluster head is determined based on the residual energy and their relative distance; inter-cluster using dynamic routing; cluster is rebuilding based on received bit value and the residual energy of cluster head. The results of simulations in OMNET++ show that EERP improves obviously in balancing energy consumption between nodes and prolonging network's life period.

Key words: wireless sensor network; clustering; energy consumption balance; life period

1 引言

无线传感器网络(WSN)是一种由成百上千的传感器节点组成的无线自组织网络, 而各传感器节点拥有感知环境、执行简单的计算并其他临近节点或基站通信的能力.

而无线传感器网络的生命周期成为制约其发展的主要因素, 因此设计一种有效的路由协议, 高效的利用传感器节点的能量, 有效的延长整个网络的生命周期成为了广大学者研究的热点^[1].

传感器、处理器和无线通信三大模块组成了传感器节点能量消耗模块. 其中无线通信模块为能耗部分^[2]. 理论和实验证明, 层次网络结构因其良好的网络扩展性、较强的资源分配、能量管理、负载均衡

等能力, 成为延长 WSN 生命周期、降低传感器节点能耗的主要方法之一. 这种层次路由以分簇的方式将传感器节点划分为簇首和簇成员, 形成以簇首为中心, 各个簇相互协作的方式完成数据的采集及任务的执行. 由于节点位置及分工存在差异, 因而传感器节点能耗方面呈现不均衡性.

LEACH^[3]协议是无线传感器网络中最具有代表性的分簇算法, 它定义了“轮(round)”的概念, 将每轮分为初始化和稳定工作两个阶段; LEACH 在一定程度上实现了负载平衡, 在不同时间点各传感器节点以随机概率 P 担任簇首角色, 分担中继通信业务. 相对平面路由协议而言, 有效均衡了传感器节点间的能耗, 在网络的整体性能方面得到提高了.

Perillo M 等^[4-8]分析了在单跳模式下, 距离基

站越远的节点能耗越大;而在多跳模式下,更容易能量耗尽而失效的节点更靠近基站,并在此基础上提出一种功率控制策略来均衡节点能耗.然后该策略会造成全网总能耗增大,在延长网络生命周期方面表现不佳. Soro S 等^[5]提出以规模各异的簇实现均衡全网节点能耗,而该方法在实际应用中具有局限性及仅适合密集型传感器网络.而李成法等^[6]采用了非均匀分簇、簇间多跳的方式来均衡节点能耗,该方法具有以下不足:由于邻居节点的选择是通过能量公式选取,而其仅使用了局部知识选择邻居节点,因此通常无法真正实现优化路由,例如在无法获取中继节点(但有通往 sink 节点的路径)的情况下,簇首将被迫与 sink 节点直接通信.张倩王等^[7]利用层次型路由结构实现能耗平衡,但该协议以节点能量选择簇,而为考虑节点的相对位置对能耗的影响;林观康等^[8]平衡节点能量和相对位置对簇首选举的影响,由于其采用了静态成簇策略,从而在很大程度上影响了网络的生命周期.

本文针对以上所存在的问题,分析并设计了一个能耗高效的路由协议(EERP).其核心思想为:距离 Sink 节点越近成簇半径越小,反之则成簇半径越大,实现非均匀分簇;以剩余能量和相对位置做为选择簇首的依据;以动态路由由簇间路由的方式实现簇间数据转发,同时采用簇重构策略实现节点能耗均衡.实验结果表明,在多跳通信模式下,该协议在节点能耗均衡、网络生命周期方面有了较大的提高.

2 系统模型及方法陈述

2.1 系统模型

本文假定在以 a 为半径的圆形区域内均匀分布 n 个传感器节点,各传感器节点具有相同的通信和数据融合能力,且具有各自专属 ID 值,同时节点在被部署完成后具有方位不变性,各节点可自主调控收发功率.传感器节点的数据融合能力为 $nk \Rightarrow k$,其中 k, n 分别表示数据包长度和参与融合节点数.

传感器节点的通讯能耗模型采用自由空间模型和多径衰减模型计算.以通讯距离阈值 d_0 为能耗分界点,若通信距离小于阈值,发送数据的能量消耗与距离的平方成正比,否则能量消耗与距离 4 次方成正比.公式如下:

$$E_{\text{trans}}(k, d) = \begin{cases} kE_{\text{elec}} + kE_{\text{amp}}d^2, & d < d_0 \\ kE_{\text{elec}} + kE_{\text{amp}}d^4, & d \geq d_0 \end{cases}$$

$$E_{\text{rec}} = kE_{\text{elec}}$$

其中, k 为发送数据 bit 值; d 为实际通信距离; E_{elec} 、

E_{amp} 分别为收发电路的基本功耗系数和功率放大电路的功耗系数.

2.2 方法陈述

分簇算法中由于簇首节点担任角色、所处位置的不同,能量消耗也存在差异,因此为了实现分簇算法的节点能耗均衡,应针对所存在问题提出解决方法:

(1) 平衡节点的能量状况和相对位置的权重,实现簇头合理选举,并以动态簇重构策略实现各节点拥有担任簇首的机会.

(2) 成簇半径应该以 Sink 节点的中心呈现放大趋势,为内部簇首提供较大的能量来满足对外部簇的数据转发.

3 EERP 算法描述

整个无线传感器网络的节点部署完成后,全网传感器节点会收到由 sink 节点广播的包含各层成簇半径等信息的信息包,传感器节点独立计算到 sink 节点的近似距离 d_i (依据所接受信号的强弱近似估计),同时确定其所属簇层 k 、相对距离 L_i .

定义 1 r_i 表示第 i 簇层的成簇半径,记最内层为 r_R ,最外层记为 r_1 .

3.1 算法介绍

该算法主要由以下几部分组成:

(1) 以节点当前能量值与自身的相对位置确定该节点竞争簇头值,该值越大则成为簇头的概率越大,反之则越小.该方法能够保证能量和相对位置综合表现较好的节点成为簇头,同时成簇半径各异的方法使得内部簇范围较小,同时各簇首获取中继节点.

(2) 簇内以单跳方式直接与簇首通信,簇间以动态多跳方式与 Sink 节点实现数据传输.

(3) 在簇重构方面,本文采用以下两种评判策略:① Sink 节点接收数据量;② 簇首节点的剩余能量与簇首平均能耗的比值.簇首平均能耗值: $E_i^c = (1 - \beta)E_i^c + \beta E_{i-1}^c$.其中: E_i^c 为第 i 次发送数据的能耗; β 为平衡参数,且不小于 0.5.

3.2 最外层簇半径的计算

通信半径为 r_i 的簇在收集一轮数据的平均消耗主要分为以下两种情况:

(1) 该节点位于第 1 层的簇首时即 $i=1$:

该簇内节点的能耗包括以下三部分:簇成员节点向簇头发送数据的能耗;簇头节点接收数据的能耗;簇头节点将融合后的数据转发给网关节点的

能耗.

因此最外层簇一次数据收集并传输的总平均能耗为:

$$\overline{E}_1 = k \left(\frac{E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}} r_1^2}{n r_1^2 / a^2} + 2E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}} r_1^2 \right) \quad (1)$$

(2) 非第1层簇即 $1 < i \leq R$ (最内层为 R) 时:

该类簇主要包括簇头节点、簇成员节点,因此该簇的能量消耗也以节点的职责不同而各异,其中簇头节点负责接收簇内成员节点的数据和外层的转发数据,以及发送簇内及簇外数据;簇成员节点向簇首节点发送监测的相关数据.

因此非最外层簇一次数据收集并传输的总平均能耗为:

$$\overline{E}_i = 2k(i-1 + n r_i^2 / a^2) \frac{2E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}} r_i^2}{n r_i^2 / a^2} \quad (2)$$

最外层簇半径求解:

令 $i=R$ 代入式(2),得 r_R 簇层节点平均能耗值. 令 $\overline{E}_1 = \overline{E}_R$. 由文献[9]可知,半径为 a ,随机分布节点数为 n 的圆形区域内,在连通概率不小于 $1-\epsilon$ 时,节点的通信半径满足 $r_o \geq a \sqrt{\ln(n/\epsilon)/n}$,令 $r_R = r_o$,由式(1)、(2)求解得 r_1 :

$$r_1 = 2 \left(\frac{(R-1)E_{\text{elec}}}{AE_{\text{amp}}} \right)^{0.5} + a \left(\frac{A+R-1}{n} \right)^{0.5} \quad (3)$$

其中, $A = \ln(n/\epsilon)$.

性质1 设位于不同簇层的簇首节点 i 和节点 j ,其通信半径分别为 r_i 和 r_j . 若 $1 \leq i < j$,则 $r_i > r_j$.

证明:设 $r_i^2 = \omega r_j^2$,将式(2)代入 $\overline{E}_i = \overline{E}_j$ 整理得: $2E_{\text{elec}}(\omega j - i) + (3E_{\text{elec}} + \omega r_j^2 E_{\text{amp}} n r_i^2 / a^2)(1 - \omega) + 2\omega r_j^2 E_{\text{amp}}(j - i) = 0$,因 $1 \leq i < j$ 则 $(3E_{\text{elec}} + \omega r_j^2 E_{\text{amp}} n r_i^2 / a^2)(1 - \omega) < 0$ 时等式方可成立. 若 $\omega > 1$ 则等式成立;若 $\omega < 1$ 则不成立,所以 $r_i > r_j$,性质得证.

3.3 其他层簇半径计算方法

r_1 值确定后,该层的平均能耗 $\overline{E}_1$ 既定,利用 $\overline{E}_1 = \overline{E}_2$,可得 r_2 成簇半径,依此类推,可得各簇层成簇半径.

3.4 成簇过程

节点成为簇头的竞争能力应综合考虑剩余能量和相对距离两方面因素,计算方法如下:

$$P_i = \lambda \frac{2\arctan E_i}{\pi} + (1 - \lambda) \left(1 - \frac{2\arctan L_i}{\pi} \right) \quad (4)$$

其中, E_i 为节点剩余能量; L_i 为距离自身簇层中心线的距离; λ 为平衡参数,取值范围为 $[0.5, 1]$ 之间,

使得能量因素占主导作用; $2\arctan(x)/\pi$ 将参数 x 归一化.

节点 $P_i > 0$ 则成为候选簇头节点,依据 P_i 值设置计时器 t_{out} ,其值与 P_i 成反比. 若节点在 t_{out} 时间内未收到其他簇首候选节点的成簇信息,则变为正式簇首并广播竞争消息 $M(ID, k, d_i, P_i, r_i)$; 若收到成簇信息,首先判断 k 值是否与自身层值相等,若为该簇层值加1,则将该成簇信息记录到中继节点信息集内,若相等,则比较两者间距离是否不大于竞争范围 r_i ,若满足则记录该成簇信息到簇首信息集内,并标记为簇成员节点,退出竞争,否则该节点持续等待广播时刻到来成为正式簇首.

簇首选举结束后,所有簇成员节点依据收到成簇信息,可能拥有多个,选择加入距离最近的一个簇首,并向簇首发送加入信息.

3.5 簇内路由和簇间路由

簇内以单跳模式实现路由,即簇成员节点直接发送数据给簇首节点.

簇间以动态多跳模式实现路由:第 R 层簇首节点与 Sink 节点直接通信,其他层簇首节点通过中继节点实现与 Sink 节点通信,中继节点选择机制如下:

在所有节点均已确定各自身份后,簇成员节点进入休眠状态,所有簇首节点依据簇首选举阶段所记录的中继节点信息集内的信息,判断是否满足 $d_j^2 + d^2(i, j) < d_i^2$,若满足则保留该节点信息,反之则删除相关信息. 簇首中继节点信息集内至少包含一个相关信息. 数据传输阶段,该簇首节点随机选择其一节点做为转发路径节点.

4 仿真结果及分析

仿真实验采用 Omnet++ 仿真器,在节点能量方差、网络生存周期、网络总能耗和三方面对 EERP、EEHRP 和 EEUC 进行比较. 模拟环境为: $a = 140\text{m}$, $n = 400$, sink 节点坐标 $(100, 250)$; $k = 4000\text{bit}$,节点初始能量 0.5J , $E_{\text{elec}} = 50\text{nJ/bit}$; $E_{\text{amp}} = 10\text{pJ/bit/m}^2$; 融合数据能耗为 5nJ/bit/signal ; $R = 3$, $\epsilon = 0.14$. 以下提取数据的结束条件为节点数失效数目达到节点总数的 60%.

首先分析节点能量方差:能量方差的波动性可以显示节点能耗的均衡性,只有合理的簇首选择机制、路由策略、簇重构机制,才能表现较好的方差稳定性. 图1显示了全网节点最大和最小剩余能量方差的随机10轮抽样图,由图可知,EERP表现较其

他两个算法要好,主要体现在方差值最低、相对波动性较小,因此在均衡全网能耗方面表现良好。EEUC 的方差波动性相对最为明显,这与其协议簇首选举策略的缺陷性有关,而 EEHRP 相对 EEUC 而言则有所改善,但与本文提出的 EERP 协议相比,在方差值和波动性方面仍存在差距,这是由于 EEHRP 的簇首选择机制考虑了节点的相对位置,但采用了静态的成簇策略,在一定程度上影响了节点的能耗。

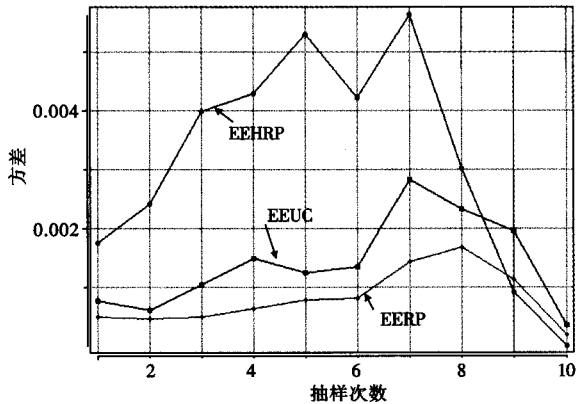


图 1 最大最小剩余能量方差

其次对比网络生存周期:由图 2 中各个协议首个节点失效的时间对比可知,EERP 较 EEUC 提高了 41% 的网络生命期,较 EEHRP 协议提高了 36%。由此可见,本文协议有效延长了网络生命期,提高了能量的有效性。

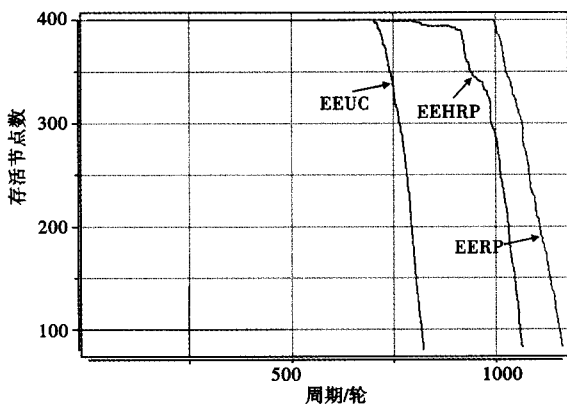


图 2 生命周期/轮

图 3 显示了全网能耗:由图可知 EERP 协议在总能耗方面明显优于其他两个协议。这是由于本协议在成簇阶段能较好的考虑簇头的位置,平衡了节点能耗,并且在路由过程中逐层转发数据,实现了簇间动态多跳,有效的节省了网络整体能耗。EEUC 虽在控制成簇半径表现不错,也利用了多跳路由的方式减少簇首节点的能量开销,但该协议多跳路由

利用的是局部知识实现节点选择,存在某些内层簇首节点戒指与 Sink 节点通信的可能,致使簇首节点能量过度消耗;EEHRP 的静态成簇成为了节点能耗的主要原因。所以 EERP 协议能更好的减少节点能耗,提高了网络的生命周期。

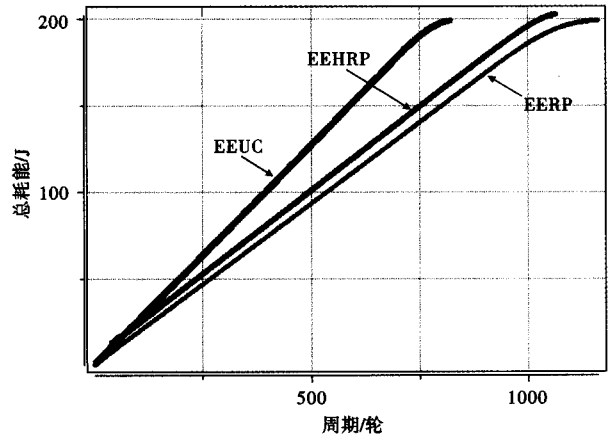


图 3 网络能耗图

参考文献:

- [1] Shen C, Jaikao C. Ad-Hoc multicast routing algorithm with swarm intelligence [J]. Journal of Mobile Networks and Applications, 2005, 10(1): 47-59.
- [2] 孙利民, 李建中, 陈渝. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [4] Perillo M, Zhao Cheng, Heinzelman W. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks [C]// Proc of IEEE GLOBECOM'04. [S. l.]: IEEE Press, 2004.
- [5] Soro S, Heinzelman W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering [C]// Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 236-240.
- [6] 李成法, 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.
- [7] 张倩王, 邓成国, 陈庆春. 能量有效的无线传感器网络层次型路由协议 [J]. 计算机工程及应用, 2010, 46(6): 92-95.
- [8] 林观康, 程良伦. 基于地理信息静态分簇的无线传感器网络路由算法 [J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(2): 37-39.

(下转第 101 页)

是 N 次试验得到的平均长度. 取 $N=10$, 进行十组实验, 每组实验障碍物设置均不相同, 但都有一条以上的可行路径. 算法参数设置如下: $m=50$, $\alpha=1$, $\beta=2$, $Tabu_{max}=60$; $Road^*=90$. 实验结果如图 4 所示.

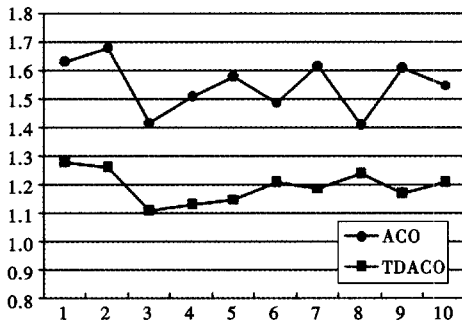


图 4 TDACO 与 ACO 的比较实验

由图 4 可知 TDACO 较基本的 ACO 算法稳定性提高明显, 求解更接近于最优解. TDACO 之所以高效主要是因为双向蚂蚁双向搜索、感知域和方向信息素矩阵的有机结合. 双向搜索和感知域的使用提高了搜索路径的速度和成功率, 而方向信息素矩阵则提高了搜索路径的多样性.

5 结束语

本文在蚁群算法基础上进行了搜索方式和信息素存储计算方面的改进, 得到了 TDACO 算法, 并改进传统的栅格法为膨胀栅格法对环境进行建模. 仿真试验证明, 改进后的算法搜索最优路径速度快, 成功率高. 各种机制的综合运用使 TDACO 算法运行的早期就能较快地收敛, 并使算法在收敛速度和执行效率整体上得到提高.

参考文献:

- [1] 孟偲, 王田苗. 一种移动机器人全局最优路径规划算法 [J]. 机器人, 2008, 30(3): 217-222.
Meng Cai, Wang Tianmiao. A global optimal path planning algorithm for mobile robot [J]. Robot, 2008, 30(3): 217-222.
- [2] Szczerba R J, Chen D Z, Uhran Jr J J. A grid based approach for finding conditional shortest paths in an unknown environment [EB/OL]. [2009-09-22]. www.cse.nd.edu/Reports/1994/tr-94-34.ps.
- [3] 孔令明, 谢圣献, 李俊青. 一种蚁群和信任结合的 P2P 节点选择机制 [J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(3): 133-136.
- [4] 王海宁, 孙守迁. 基于优化成熟度的自适应蚁群优化算法 [J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(8): 140-143.
- [5] Nilgün F, Celal O, Orhan E, et al. Investigation of ant system parameter interactions by using design of experiments for job-shop scheduling problems [J]. Computers and Industrial Engineering, 2009, 56(2): 538-559.
- [6] Jin Fei-hu, Gao Hui-jun, Zhong Xiao-jian. Research on path planning of robot using adaptive ant colony system [J]. Journal Of Harbin Institute Of Technology, 2010, 42(3): 1014-1017.
- [7] Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation [J]. Computer, 1989, 22(6): 46-57.

作者简介:

徐义晗 男, (1974—), 硕士, 讲师. 研究方向为智能控制.

程乐 男, (1979—), 双硕士, 讲师. 研究方向为人工智能与优化.

(上接第 96 页)

- [9] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation [J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 45-63.

作者简介:



潘中强 男(1978—), 讲师. 研究方向为计算机网络安全与网络管理.



刘亮亮 男(1983—), 助教. 研究方向为网络通信技术.



张东, 男(1988—). 研究方向为网络工程.