

无线传感器网络中能量均衡路由算法及实现

谢智德¹, 林亚平^{1,2}, 胡玉鹏¹

(1. 湖南大学计算机与通信学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学软件学院, 长沙 410082)

摘要: 提出并实现一种基于地理区域划分的多基站局部移动的能量均衡路由算法(RPEB)。该算法基于多基站区域划分方法实现节点的“伪非均匀”分布,即在密度相等的条件下,越靠近基站,节点数量越多,从而达到能量均衡的目的,避免节点密度高所导致的冲突。在MicaZ节点搭建的实验平台上实现RPEB算法,实验结果表明,该算法有效延长了网络生命周期,提高数据送达率。

关键词: 无线传感器网络; 能量均衡; 地理区域划分; 路由

Energy-balanced Routing Algorithm and Implementation in Wireless Sensor Network

XIE Zhi-de¹, LIN Ya-ping^{1,2}, HU Yu-peng¹

(1. College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082; 2. Software College, Hunan University, Changsha 410082)

【Abstract】 This paper proposes and implements a Region-Partition and Energy-Balanced routing algorithm(RPEB). It achieves the result of regional nodes pseudo-non-uniform by region-partition, that is, under condition of equal density, the nearer the base station there are more nodes. This algorithm can achieve the purpose of energy balance and avoid conflicting caused by dense nodes. It implements RPEB on the test bed of Berkeley MicaZ sensor nodes. Experimental results show that RPEB prolongs remarkably the network lifetime and improves data service.

【Key words】 wireless sensor network; energy-balanced; region-partition; routing

1 概述

无线传感器网络能量非常有限,当数据集中发送到单个基站时,离基站较近的节点需要承担更多的通信负载。因此,这些节点容易过早耗尽自身的能量,导致在基站周围出现能量空洞^[1]。

传感器网络中能耗不均衡,严重限制了网络的规模以及网络的生命周期。针对多跳传感器网络中能耗不均衡问题,已有一些对应机制被提出。文献[1]从理论上讨论无线传感器网络中采用节点非均匀分布策略的能量均衡问题,并得到了实现次优能耗效率的条件。文献[2]通过节点采样频率不均衡方法,即离基站越近的节点具有越低的采样频率,达到能量均衡的目的。文献[3]则采用移动基站的方法来解决网络中节点能耗不均衡问题。笔者证明如果采用移动基站方式,基站沿网络的边缘移动最符合节能要求。

上述工作主要从节点非均匀分布或移动单基站来缓解多跳无线传感器网络中能耗不均衡问题。本文改进上述思想,提出并实现一种基于地理区域划分的多基站局部移动的能量均衡路由算法RPEB,在MicaZ节点搭建的实验平台上实现RPEB算法,并与多跳路由协议LEPS^[4]进行比较,实验结果表明,RPEB路由在较大程度上延长了网络生命周期,并且有较高的数据送达率。

2 多基站区域划分策略

2.1 传感器区域划分

本文采用文献[1]中圆形网络模型。根据节点非均匀分布和移动基站能解决或有效缓解能耗不均衡理论,文献[4]证明了当移动基站沿网络边缘移动是最符合节能要求的。因此,本文使用多个基站均匀分布在感知区域边缘。为了达到节点“非均匀分布”效果,根据基站个数 n 将传感区域等分为

n 个扇形区域,如图1所示。

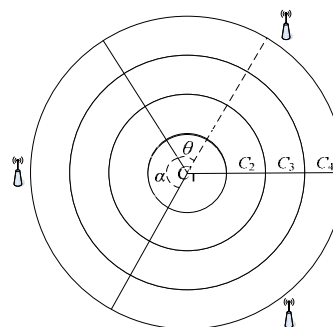


图1 圆形区域网络划分

前面网络模型中已假定传感器节点均匀分布,设密度为 ρ ,那么扇形区域内 C_i 区域中节点数 n_i 可表示为

$$n_i = \rho \int_0^\alpha \int_{r_{i-1}}^{r_i} r dr d\alpha = \frac{\rho\alpha}{2} (r_i^2 - r_{i-1}^2) \quad (1)$$

其中, $\alpha=2\pi/n$ 表示每个基站所对应扇形区域的圆心角; $r_i(1 \leq i \leq R)$ 表示第 i 个圆环半径。由于网络中每层的宽度为节点的通信半径 r ,因此有 $r_i=ir$,由此式(1)可变形为

$$n_i = \frac{\rho\alpha}{2} (r_i^2 - r_{i-1}^2) = \frac{\rho\alpha}{2} (2i-1)r^2 \quad (2)$$

由式(2)可知从圆心 O 向外直到 C_R ,节点数 n_i 递增。为了使得 C_R 层节点能直接与该扇区的基站进行通信,该基站必

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2006AA01Z227); 湖南省科技厅科技计划基金资助项目(2007FJ4157)

作者简介: 谢智德(1980-),男,硕士研究生,主研方向:无线传感器网络协议;林亚平,教授、博士生导师;胡玉鹏,博士研究生

收稿日期: 2009-05-15 **E-mail:** xiezhide@gmail.com

须在扇区外边界移动，移动范围为图 1 中灰色区域边缘，移动弧长为： $l = \alpha Rr$ 。在没有改变网络中节点密度的前提下，取得了非均匀分布的效果，即越接近基站区域，节点数目越多。

2.2 节点确定所在区域

设传感区域中心坐标为 (x_o, y_o) ，那么圆形传感区域中任意节点 ID_i 根据自身地理坐标 (x_i, y_i) 以及 2 点间距离公式可以算出节点到区域圆心 (x_o, y_o) 的距离 d_i ，从而确定所在的圆环，假设整个传感器网络有 n 个基站，均匀分布在圆形传感器区域周围，那么每个基站对应扇区的角度大小 $\alpha = 2\pi/n$ ，若基站 S_i 的坐标为 (X_i, Y_i) ，那么 S_i 对应扇区圆心角范围 β_i $[(\arctan(Y_i/X_i) - \alpha/2), (\arctan(Y_i/X_i) + \alpha/2)]$ $\arctan(Y_i/X_i)$ 为基站 S_i 对应的圆心角。由 $\gamma_i = \arctan(y_i/x_i)$ 式可以得到节点的圆心角 γ_i 。由 β_i, γ_i 式可以得到任意节点所处的扇形区域。

3 基于区域划分的能量均衡路由

本文采用策略如下：不同的扇区采用不同的信道进行通信，扇区间通信互不干扰；同一扇区中节点只向相邻环区发送数据报，同一环区的节点间互不转发数据报；传感器采集的传感数据自内向外按层发送到该扇区对应的基站；为了使得 C_R 层节点能与基站直接通信，基站沿着 C_R 层外弧以恒定速率往复运动，当基站到达节点的通信范围时，节点将数据发往基站。由于节点具备一定数据存储能力，因此整个网络拓扑无需重构。

在上述工作基础上，提出了一种基于区域划分的能量均衡路由算法——RPEB，该路由由维护网络中节点到基站的良好连通性，并均衡网络能量消耗。路由算法如下：

(1) 区域划分阶段

区域划分周期 T 内，节点接收各个基站的消息，计算网络半径、各基站所对应的圆心角以及节点所处的扇区与环区，并设置不同通信信道。

(2) 初始路由树构建阶段

1) 节点发送 $TTL=1$ 的广播消息，消息报包括源节点所处层信息、节点 ID 和节点初始能量值。

2) 节点收到广播消息，将 TTL 值减 1，同时根据广播消息中源节点所处层信息，结合自身层信息，确定是否在邻居表中记录该邻居。

(3) 数据发送/转发阶段

基站向所在扇区广播 $TTL=1$ 的广播包，通知扇区中的所有节点。

1) 外层节点收到内层节点转发数据报

相应邻居表项接收数据包计数加 1；

选择父节点；

向外层节点转发数据报；

对应父节点发送计数器加 1。

2) 节点产生一个数据报

选择父节点；

向外层节点发送数据报；

对应父节点发送计数器加 1。

(4) 路由维护阶段

节点将剩余能量消息以及链路估算所需要的接收和发送数据报数告诉上下 2 层邻居节点。节点收到消息后进行链路估算，同时结合节点剩余能力值计算父节点选择复合因子。

4 RPEB 路由算法实现

本节阐述 RPEB 路由算法的具体实现细节。RPEB 基于

LEPS 路由进行开发，增加了区域划分逻辑，并根据 RPEB 的特性，改变了父节点选择模块。设计示意图如图 2 所示。

路由引擎模块是 RPEB 系统中最主要的控制单元，负责数据转发和能量监控。路由逻辑模块主要负责区域划分以及在数据转发过程中提供父节点选择逻辑，该模块包含 2 个子模块：区域划分模块和父节点选择模块。

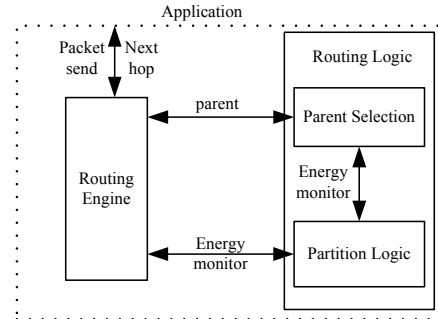


图 2 RPEB 系统示意图

4.1 邻居表管理

RPEB 路由按层传递数据，因而节点不必要知道同层节点信息。在 RPEB 路由中，首先对整个网络进行了区域划分，节点清楚知道自己所在地扇区和环区。因而只要在拓扑控制消息中加入节点的层信息，就可以实现数据的按层传递。节点收到拓扑控制消息时，对比拓扑消息中的发送节点所处层数与自身所处层数，若大于或者小于，则记录或更新邻居表，否则，丢弃拓扑控制消息。

4.2 父节点选择与能耗估算

(1) 父节点选择。在 RPEB 路由中，采用一种复合的父节点选择方法：保留了 LEPS 中的链路估算，同时加入了节点剩余能量因子，复合因子 p_i 按公式 $p_i = rE_i + (1-r)L_i$ 计算。其中， E_i 表示节点剩余能量； L_i 表示链路质量估算值； r 表示比重因子。每次转发数据时，节点选择具有最大 p_i 值的上层邻居节点转发数据。

(2) 能耗估算。周期性地检查数模转换(ADC)模块可以得到节点的工作电压和电流，进而得到节点剩余能量，但是在实际测试中发现，即使高频采样，高速数据传输，节点电压变化仍然变化不明显，因而这种粗粒度的以电压为基础的估算对算法性能评估作用不大。本文采用文献[5]中信用点系统 CREP 对传感器节点能量模型进行了精确的抽象，以获得快速有效的效果。

4.3 最外层节点数据缓存实现

由于网络中各节点发送能量级相同，且发送半径等于圆环的宽度，最外层节点某些时刻不能直接与基站通信，需要等到基站到达其通信范围才将数据发往基站，因此节点需要缓存数据。然而节点的存储能力有限，满足不了节点转发大量数据的需求。本文在 Micaz 节点上使用如下策略来实现数据缓存：通过使用节点的片外闪存缓存数据，直到侦测到基站，将数据发送给基站。由于读写片外存储的速度远慢于内存中读写，当网络中节点有较高采样频率时，节点自身产生的数据以及内层节点转发数据很多，直接写片外闪存，无法及时将所有数据写入片外闪存中，而导致大量数据丢失。在编程实践中发现，采用“双缓冲”技术能解决这个问题，建立 2 个以字节为单位、大小为数据报有效字节长度倍数的缓冲区，开始节点每收到一个数据报，将数据报有效长度按字节读入到缓冲区 1 中，直到缓冲区 1 无法装入下一个数据报

中有效字节，将缓冲区 1 中数据写入到片外闪存中，同时写入指针指向缓冲区 2，此后数据按字节填入缓冲区 2，依次交替。为了进一步减少数据丢失，引入循环队列，即开辟一个二维数组，数据的列数为转发数据报的有效字节长度，行数可根据采样频率做适当调整，每次读写数据都按行进行。实验证明，当采用双缓冲技术以及适当大小的循环队列时，在保证高数据送达率的前提下，提高节点采样频率。

4.4 RPEB 路由设计

图 3 是 RPEB 路由的详细图形描述，该路由是建立在对 LEPS 的修改和扩展之上。RoutingLogicM 包含区域划分、链路估算、能量监测以及父节点选择算法。能量监测接口同时也被 Routing Engine 使用来告诉应用节点的电池电量是否还可以足够使用。

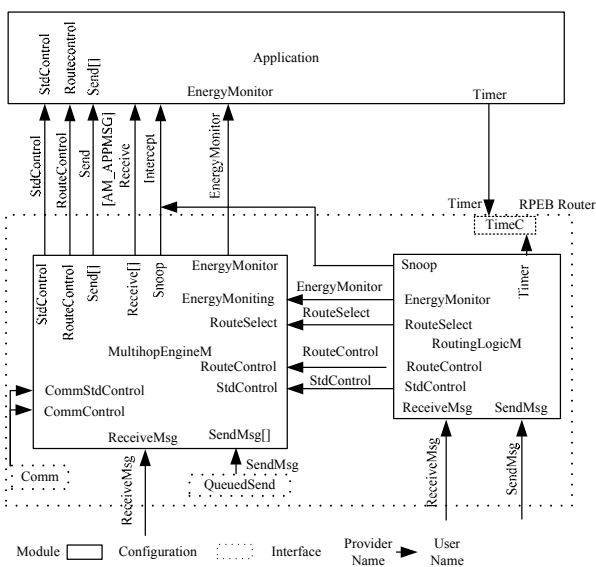


图 3 RPEB 路由实现细节模块

5 实验分析与比较

本节比较 RPEB 路由和 LEPS 路由在下面 2 个方面的性能：网络生命周期和数据送达率。

5.1 实验环境配置

本文使用 18 个 Micaz 节点，2 个基站搭建实验平台。基站分别由一个 Micaz 节点附在一块 MIB510 编程板上并通过串行接口连接到一台笔记本电脑。节点按层均匀配置在一个半径为 3 m 分为 3 层的圆形区域中，最内层放置 2 个节点，中间层有 6 个节点，最外层节点数为 10，每个节点按设定的平面坐标位置摆放，且设定圆形区域中心坐标为(0,0)，节点默认知道中心坐标值。2 个基站初始放置在圆形区域边缘，且在圆的同一直径上，基站在半圆周上做匀速运动。实验中使用的参数如下：路由更新周期为 15 s，比重因子 $r=0.5$ ，节点传输能量级为最小能量级 TXPOWER_M25DBM=-25 dB-m。节点采样周期为 100 ms~500 ms，实现中只考虑节点的发送能耗，根据 CREP 系统能耗计算方法，节点每发送一个数据报消耗 230 个能量信用点值。

5.2 实验结果与比较

本文采用的网络生命周期定义为当网络中出现第 1 个死亡节点时网络总生存时间，在此基础上对比了 RPEB 和 LEPS 协议在实验平台上的运行效果。主要从 3 个方面比较了 2 种协议的性能：相同采样频率下网络生存周期，相同采样频率

下数据送达率，随采样频率改变 2 种协议数据送达率变化幅度。为了与 RPEB 路由协议进行对比，本文对 LEPS 路由协议进行了修改，引入能量监控模块和 CREP 系统。

图 4 显示了节点采样周期为 500 ms 时，2 种协议网络生命周期随节点初始能量值变化曲线。从图中可以看到，RPEB 路由协议生命周期是 LEPS 协议的 2.5 倍左右。原因很显然，在 RPEB 路由协议中，靠近基站的数目远多于 LEPS 协议，且根据节点剩余能量值来转发数据，因此，RPEB 基站周围节点在相同条件下，比 LEPS 协议中基站周围节点转发更多的数据。因此，获得了更长的网络生命周期。

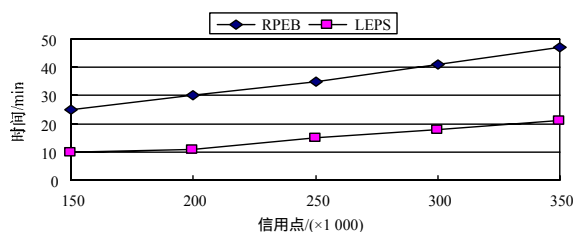


图 4 RPEB 与 LEPS 网络生命周期

图 5 表示在节点采样周期为 500 ms 时，RPEB 路由协议与 LEPS 路由协议数据送达率随节点初始能量变化曲线，从图中可以看出，2 种路由在数据送达率方面几乎相同，这是因为 RPEB 同 LEPS 一样考虑了链路质量因素。

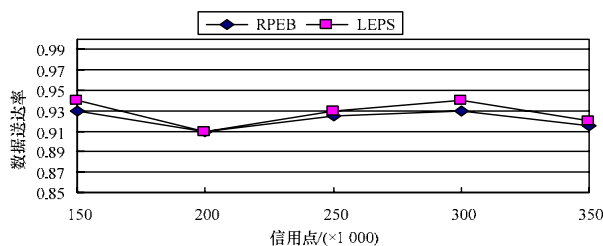


图 5 RPEB 与 LEPS 数据送达率

6 结束语

本文提出并实现一种基于地理区域划分的多基站局部移动的能量均衡路由算法，该算法较好地缓解了基站周围节点的能耗。实验结果表明，网络生命周期延长了 2.5 倍以上，并且保证了较高的数据送达率。

参考文献

- [1] 吴小兵, 陈贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布下的能量空洞问题[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 253-261.
- [2] Olariu S, Stojmenovic I. Data-centric Protocols for Wireless Sensor Networks[M]//Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures. [S. l.]: Wiler, 2005: 417-456.
- [3] Luo J, Hubaux J P. Joint Mobility and Routing for Lifetime Elongation in Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM'05. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 819-830.
- [4] Evis P, Gay D, Hill J. TinyOS[EB/OL]. (2007-12-20). <http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/doc/ad-hoc.pdf>.
- [5] Younis O, Fahmy S. An Experimental Study of Routing and Data Aggregation in Sensor Networks[C]//Proc. of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. [S. l.]: IEEE Press, 2005.

编辑 索书志