

多级能量异构无线传感器网络的 能量预测和可靠聚簇路由协议

蔡海滨^{1),2)} 琚小明¹⁾ 曹奇英²⁾

¹⁾(华东师范大学软件学院 上海 200062)

²⁾(东华大学计算科学与技术学院 上海 200051)

摘 要 传感器网络技术是普适计算中实现位置感知和上下文感知的主要技术手段,有着广泛的应用前景.文中提出了一种适合普适计算环境下多级能量异构无线传感器网络的新的剩余能量预测 REP 模型和可靠聚簇路由 RCR 协议.协议中节点通过建立相邻节点剩余能量预测机制,使选举簇头节点的概率与节点当前剩余能量直接相关,以优化数据传输路径,均衡节点的能量消耗,延长网络寿命.此外还通过多簇头方法,采用每个簇由多簇头节点共同承担簇头节点的作用,提高数据传输可靠性.仿真实验结果表明,RCR 协议能获得比 LEACH 协议和 HEED 协议等主要聚簇协议更长的生存时间、更高的能量利用率和更高的数据传输可靠性.

关键词 普适计算;无线传感器网络;异构环境;位置感知;剩余能量预测;聚簇路由

中图法分类号 TP393 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.02393

Energy Prediction and Reliable Clustering Routing Protocol for Multilevel Energy Heterogeneous Wireless Sensor Networks

CAI Hai-Bin^{1),2)} JU Xiao-Ming¹⁾ CAO Qi-Ying²⁾

¹⁾(Software Engineering Institute, East China Normal University, Shanghai 200062)

²⁾(College of Computer Science and Technology, Donghua University, Shanghai 200051)

Abstract Wireless sensor networks, which is utilized in a broad foreground, is able to monitor and collect various information for location-aware or context-aware systems in ubiquitous computing environment. This paper proposes a novel remaining energy prediction model and reliable clustering routing protocol for multilevel energy heterogeneous wireless sensor networks in ubiquitous computing environment, in which a node, according to energy prediction mechanism, independently makes its decision to compete for becoming a master cluster head in order to optimize routing, improve energy efficiency and prolong system lifetime. In addition, this protocol selects multi-cluster-heads in every cluster together as one cluster head, performing data fusion and data transmission so that data transmission reliability is enhanced. The results of simulation show that compared with LEACH and HEED protocol, the RCR protocol could lead to prolong sensor networks lifetime, improve energy efficiency and enhance data transmission reliability.

Keywords ubiquitous computing; wireless sensor networks; heterogeneous environment; location-aware; remaining energy prediction; clustering routing

1 引言

传感器网络作为推动普适计算^[1]发展的一门新技术手段,是一种全新的信息获取平台,可以实现复杂的大范围检测、定位任务和上下文感知,有着广阔的应用前景.因此基于无线传感器网络的位置感知系统研究是当前的研究热点,其目标是使用传感器融合技术达到高精度室内定位^[2-3].传感器节点有着严格的能量限制,而且一次性的布置使得节点难以进行能量补充,这些因素决定了传感器的生存时间是有限的.现有的自组织无线网络(Ad Hoc wireless networks)的协议难以适应普适计算环境下传感器网络的需求,这是由于一方面传统的 Ad Hoc 网络路由由协议更加注重服务质量(QoS),而将能耗放在次要地位,另一方面普适计算环境是一种动态异构的实时分布式环境,其资源也是严格受限的并且要求数据传输可靠.为了延长网络的生存时间和提高数据传输可靠性,需要设计能量消耗均衡且数据传输可靠的协议,以适应普适计算环境下的传感器网络的特点.

在普适计算环境下的位置感知系统中,传感器节点种类丰富,传感器节点可以根据感测能力、计算能力、通信能力和能量等分为不同的种类.多级异构传感器网络(multilevel heterogeneous sensor networks)是指由多种不同类型的传感器节点构成的网络;反之,由相同类型传感器节点组成的网络成为同构传感器网络(homogeneous sensor networks)^[4].本文着眼于能量异构网络,因为在传感器网络中,能量异构特征是普遍存在的,不同类型的传感器节点配置不同的初始能量,即使是同种类型节点构成的传感器网络,为了延长网络寿命,而在原有节点的基础上布置新的传感器节点,新加入的节点将拥有比老节点更多的能量^[5].另一方面,由于无线通信中暂时链路失败或者区域的地形特征等随机事件影响,每个节点不可能均等地使用其能量,传感器也会呈现一种能量异构的特点.第三,在普适计算环境中,节点设备种类繁多,从能量的角度来看,也是呈现一种能量异构的特点.本文研究这种具有多级能量异构无线传感器网络下的剩余能量预测问题和可靠聚簇路由协议问题,并称这种具有能量异构特征的网络为多级能量异构无线传感器网络.

本文提出一种适合普适计算环境下多级能量异构无线传感器网络的新的剩余能量预测 REP

(Remaining Energy Prediction)模型和可靠聚簇路由 RCR(Reliable Clustering Routing)协议.通过建立相邻节点剩余能量预测机制,使选举簇头节点的概率与节点当前剩余能量直接相关,以优化数据传输路径,均衡传感器网络节点的能量消耗,延长网络寿命.并通过多簇头方法,采用每个簇由多簇头节点共同承担簇头节点的作用(收集数据、融合数据并发送数据包到基站),来解决单个簇头因故障等原因导致的能量损失,并改善网络能量使用率和提高数据传输可靠性.仿真实验结果显示,RCR 协议能获得比单簇头的 LEACH 协议和 HEED 协议等主要成簇协议更长的生存时间、更高的能量利用率和更高的数据传输可靠性.

2 相关工作

当前提出了许多分布式聚簇协议.根据协议所适应的传感器网络是同构网络还是异构网络,可以将这些成簇协议分为同构聚簇协议和异构聚簇协议.由于能量配置和网络演化的动态性和复杂性,要设计一种适合异构网络的以节约能量和提供可靠数据传输为目的的聚簇协议是非常困难的.当前大多数的聚簇协议都是同构类型^[6-9].

在文献[6]中,Heinzelman 等人提出了 LEACH 协议.它是一种分布式自组织协议,其核心思想是采用所有节点周期性地轮流担任簇头节点的办法来达到使得所有节点均匀消耗能量和延长网络生存时间的目的.LEACH 协议按轮运行,每轮分为设置和稳定两个阶段.在设置阶段,首先每个节点通过一个概率来决定自己是否成为簇头,并保证每轮有相当数量的簇头节点.接着簇头进行广播,普通节点根据接收信号的强弱来选择最近的簇头加入,并同该簇头一起聚合成簇.在稳定阶段,簇中的节点把收集到的数据发送给簇头,簇头将簇中所有节点收集的所有数据进行数据聚合,并发送数据包到基站.LEACH 协议和 DIRECT 协议相比,的确能有效延长网络寿命,但 LEACH 协议存在如下 4 点缺陷:(1)从全局的角度来看,并没有优化簇头的数目.因为每个节点通过一个概率 p 来决定自己是否成为簇头,因此簇头的数目和节点的数量成正比,没有优化簇头数目的过程;(2)所有簇头直接和基站通信,对于远离基站的簇头其能量损耗很快;(3)因为簇头是每个节点以概率 p 随机选择出来的,因此簇头在网络中的分布是非均匀的;(4)由于在每个簇中只有单个簇

头且数据传输单纯依靠该簇头,该簇头的故障将影响该簇中所有节点的数据传输,因而数据传输的可靠性难以保障。

Estrin 在文献[7]中分析,无线传感器节点的绝大部分能耗在无线通信模块上,而其发送、接收、空闲和睡眠四种状态中,又以其发送和接收状态的能耗为主。为了减少节点的能耗,在文献[8]中提出了 PEGASIS 协议,它借鉴了 LEACH 中聚簇的思想,其基本思想是:PEGASIS 中的簇就是一条基于地理位置的链,假设所有节点都是静止的,根据节点的地理位置形成一条相邻节点之间距离最短的链。这类似于旅行商问题,是一个经典的 NP 问题。协议假设节点通过定位装置或者通过发送能量递减的测试信号来发现距自己最近的邻居节点,然后从距基站最远的节点开始,采用贪婪算法来构造整条链。与 LEACH 算法相比,PEGASIS 中通信只限于相邻节点之间。这样,每个节点都以最小功率发送数据,并且每轮只随机选择一个簇头与基站通信,减少了数据通信量。实验结果表明,PEGASIS 支持的 WSN 的生命周期是 LEACH 的近两倍。但 PEGASIS 协议中链的形成是由每一个节点或者基站计算得到,因此需要知道网络拓扑的全局知识,这给它带来了如下缺陷:(1)由于传感器网络的节点规模大且节点的处理和存储数据的能力有限,因此节点保持网络拓扑的全局知识比较困难;(2)传感器网络的网络拓扑是动态变化的,维护全局信息的开销比较大,也比较困难;(3)当网络规模比较大时,形成的链比较长,因而产生的传输延迟比较大;(4)数据传输的可靠性不高,因为一旦链中的每个节点出现故障,就会导致链的断裂,造成数据丢失。

在文献[9]中提出的 HEED 协议在簇头选择标准以及簇头竞争机制上都与 LEACH 不同。其基本思想是簇头的选择主要依据主、次两个参数,主参数依赖于剩余能量,用于随机选取初始簇头集合,具有较多剩余能量的节点将有较大的概率暂时成为簇头,而最终该节点是否一定是簇头取决于剩余能量是否比周围节点多得多,即迭代过程是否比周围节点收敛得快;次参数依赖于簇内通信代价,用于确定落在多个簇范围内的节点最终属于哪个簇以及平衡簇头之间的负载。HEED 的主要改进是:在簇头选择中考虑了节点的剩余能量,并以主从关系引入了多个约束条件作用于簇头的选择过程。HEED 簇头选择算法具有以下特点:(1)完全分布式的簇头产生方式;(2)簇头产生在有限次迭代内完成;(3)最

小化控制报文开销;(4)簇头分布均衡。实验结果表明,HEED 分簇速度更快,能产生更加分布均匀的簇头、更合理的网络拓扑。但 HEED 的缺陷在于:(1)只适合同构网络环境,在异构网络中,HEED 可能使低能量的节点比高能量节点拥有更大的概率成为簇头,导致网络寿命缩短;(2)因为基于单簇头而使得数据传输的可靠性不高。

由以上分析可以看出,以上对聚簇路由协议的研究都没有很好地考虑到异构网络中节点能量差异对协议的影响以及簇头失效对数据传输可靠性的影响。本文提出的新协议正是基于上述两点考虑。

3 多级能量异构网络模型和问题描述

3.1 多级能量异构网络模型

网络模型的基本假设:假定 N 个传感器节点随机分布在一个 $M \times M$ 的正方形区域内,并且节点是微移动或者静止不动的;假定所有节点能量异构,且节点总有数据传回到基站,基站远离检测区域中心并用于接入到有线网络或者蜂窝无线网络;网络节点组织成簇结构的形式,簇头执行数据的融合功能,并负责将融合后的数据传输到基站;假定基站是唯一的,并且无线发射功率可控;假定每轮中节点的能量消耗不同。

在多级能量异构网络中,节点的能量值是在一个区间随机分布的,我们区分节点为普通节点和高能节点两种。普通节点的初始能量为 E_{init} ,高能节点的初始能量为 $E_{\text{init}}(1+K_i)$, K_i 表示高能节点超过普通节点能量的倍数。因此节点的初始能量可以描述为在闭区间 $[E_{\text{init}}, E_{\text{init}}(1+K_{\text{max}})]$ 内随机分布,因此网络表现为多级能量异构形式。

设任意节点配备的初始能量为 $E_{\text{init}}(1+K_i)$,则多级能量异构网络总的初始能量为

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N E_{\text{init}}(1+K_i) \quad (1)$$

每个节点配备的初始能量不同,所以每个节点当选为簇头的加权概率 p_i 如式(2),其中, p_{init} 是首轮簇头占有所有节点的百分比,即首轮节点当选簇头的概率。

$$p_i = \frac{p_{\text{init}} N(1+K_i)}{N + \sum_{i=1}^N K_i} \quad (2)$$

根据 LEACH 协议,节点 n_i 产生一个 $0 \sim 1$ 之间的随机数作为概率门限来决定是否成为簇头,如果

这个数小于阈值 $T(n)$, 则该节点向周围节点广播它是簇头的消息. LEACH 协议是基于同构网络, 我们把它推广到多级异构网络, 则新的 $T(n)$ 的计算公式

$$T(n_i) = \begin{cases} \frac{p_{\text{init}} N(1+K_i)}{\left(N + \sum_{i=1}^N K_i\right) - p_{\text{init}} N(1+K_i) \left[r \bmod \left\lfloor \frac{N + \sum_{i=1}^N K_i}{p_{\text{init}} N(1+K_i)} \right\rfloor \right]}, & n_i \in G \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 问题描述

本质上按照轮运行延长传感器网络寿命的方法都是在最小化系统每轮能量消耗的同时, 把能量损耗均衡地分布在各个节点上. 对于基于聚簇的协议, 簇的形成将决定每轮系统能量地损耗状况. 为了减少系统每轮中能量损耗并确保能耗均衡分布在所有节点上, 协议应该重点考虑如下问题:

(1) 算法应该是完全分布式自组织的, 节点只根据本地信息独立决定自己的状态. 每个节点在聚簇阶段必须决定是否成为簇头或者属于某个簇中的成员.

(2) 簇头的选择必须充分考虑到节点的剩余能量的状况, 剩余能量多的节点应该有更高的概率成为簇头.

(3) 必须从全局的角度考虑优化簇头的分布, 簇头和成员节点之间的通信其能量损耗应该满足自由空间模型^[6], 并且要尽可能地保证簇头之间的距离大于簇半径.

(4) 簇内和簇间分别使用不同的能量等级通信. 在节点密度足够的情况下, 簇之间的通信所使用的能量等级必须保证其通信覆盖半径大于簇半径的两倍以上.

(5) 必须采取有效措施保证数据传输的可靠性.

4 RCR 协议描述

本文设计的 RCR 协议与文献[6]中所提出的 LEACH 协议一致, 同样按照轮运行, 但把每轮分为能量预测、聚簇和数据收集 3 个阶段, 分别用 $T_{\text{energy-prediction}}$ 、 T_{clusters} 和 T_{data} 表示, 其中 T_{clusters} 又包含选举主簇头 $t_{\text{election-master-head}}$ 、聚簇 $t_{\text{clustering}}$ 和选举辅助簇头 $t_{\text{election-assistant-head}}$ 3 个子阶段. 在 T_{data} 阶段节点收集数据并传送到基站进行处理. 为了保证网络的有效工作时间, 要保证 $T_{\text{energy-prediction}} + T_{\text{clusters}} \ll T_{\text{data}}$. 协议中相邻节点交换彼此的能量信息, 每个节点依据收到的能量信息, 预测相邻节点的剩余能量, 簇头的选取直接和节点的剩余能量相关, 并采用每个簇多簇

如式(3), 其中, r 是目前循环进行的轮数; G 是最近 $1/(p_i(r/\text{mod}(1/p_i)))$ 轮中还未当选过簇头的节点集合.

头节点共同承担簇头节点的作用(收集数据、融合数据并发送数据包到基站), 解决单簇头节点因故障、干扰等原因带来的不可靠而导致的能量损耗, 提高数据传输可靠性.

4.1 剩余能量预测模型及预测误差处理

我们通过建立运用马尔可夫链预测相邻节点剩余能量的数学模型, 模型中定义状态转换的概念, 即传感器节点工作模式的相互转换, 并以此进行预测. 簇头的选择依据能量预测和节点当选为簇头的加权概率 p_i 共同决定在本轮中是否成为簇头.

依据文献[7], 传感器节点的绝大部分能量消耗在无线通信模块上, 我们把无线通信模块的工作分为 4 种状态: 发送、接收、空闲和睡眠. 不同的状态有着不同的能耗水平, 发送状态的能耗最大, 空闲状态和接收状态能耗接近, 略少于发送状态的能耗, 睡眠状态的能耗最少. 在预测机制中, 利用马尔可夫链对传感器节点进行模拟, 节点的不同工作模式对应马尔可夫链的不同状态: 一个节点有 4 种工作模式, 逐个运用马尔可夫链的 4 种状态进行模拟. 在这个模型中, 每个节点都有一系列随机数 $X_1; X_2; X_3; \dots$ 分别代表节点每个 TDMA(时分复用)时隙处的发送、接收、空闲和睡眠 4 种状态中的某一种状态(每个 TDMA 时隙节点只能有一个状态), 并且把每轮时间分成 L 个 TDMA 时隙. 例如 $X_t = S_t$, 就是说节点在第 t 个 TDMA 时隙处于状态 S_t . 在下一个 TDMA 时隙, 如果当发生状态转换, 节点会以一个概率 P_{ij} 在下一个 TDMA 时隙转换为状态 S_j . 因此定义传感器节点单步状态转换概率 P_{ij}^1 和 M 步状态转换概率 P_{ij}^M 为

$$\begin{cases} P_{ij}^1 = \{X_{t+1} = S_j | X_t = S_i\} \\ P_{ij}^M = \sum_{k=1}^M P_{ik}^{(r)} P_{kj}^{(M-r)}, 1 \leq r \leq M \end{cases} \quad (4)$$

能量预测计算步骤如下:

- (1) 获取节点初始状态和配备的初始能量.
- (2) 对处于状态 S_i 的传感器节点, 计算在接下来

的 L 个 TDMA 时隙内会转换成状态 S_j 的 TDMA 时隙数目.

$$n_{S_j} = LP_{ij}^M = L \sum_{k=1}^M P_{ik}^{(r)} P_{kj}^{(M-r)}, \quad 1 \leq r \leq M \quad (5)$$

(3) 预测计算出本轮所损耗的能量 E_{consume} . 本轮的能量损耗应该为节点在 L 个 TDMA 时隙内由于状态转换所损耗的能量总和, 如式(6)所示, 其中 $E_{\text{state}}^h (0 \leq h \leq 3)$ 为 4 种工作模式下各自的能量损耗.

$$E_{\text{consume}} = E_{\text{state}}^0 n_{S_0} + E_{\text{state}}^1 n_{S_1} + E_{\text{state}}^2 n_{S_2} + E_{\text{state}}^3 n_{S_3} \quad (6)$$

代入式(5), 得

$$E_{\text{consume}} = L \sum_{h=0}^3 E_{\text{state}}^h \sum_{k=1}^M (P_{ik}^{(r)} P_{kj}^{(M-r)}) \quad (7)$$

(4) 计算本轮能量损耗百分率 $\Delta E_{\text{consume}}$.

$$\Delta E_{\text{consume}} = \frac{E_{\text{consume}}}{E_{\text{current}}} = \frac{L \sum_{h=0}^3 E_{\text{state}}^h \sum_{k=1}^M (P_{ik}^{(r)} P_{kj}^{(M-r)})}{E_{\text{current}}} \quad (8)$$

(5) 预测计算剩余能量百分率 $E_{\text{remaining}}$.

$$E_{\text{remaining}} = 1 - \Delta E_{\text{consume}} \quad (9)$$

通过剩余能量百分率 $E_{\text{remaining}}$, 传感器节点就可以通过发送的能量信息包对相邻节点在未来一段时间的能量损耗进行预测计算, 从而预测出相邻节点在一段时间后所剩余的能量. 但是这种预测计算还需要解决另外两个因预测误差所引起的问题: 抖动和传输出错的影响.

对相邻节点的剩余能量判断是通过预测计算得到的, 而预测计算不可避免地存在误差. 为了判定误差和消除误差抖动的影响, 每个节点保留自己最近发送的 $E_{\text{remaining}}$ 和 E_{current} 信息, 并在误差出现时重新计算 $E_{\text{remaining}}$, 再发送新的 $E_{\text{remaining}}$ 和 E_{current} 信息. 设定一个门限值 ξ , 只有预测误差超过这个门限值时,

$$T(n_i) = \begin{cases} \frac{p_{\text{init}} N(1+K_i)}{\left((N + \sum_{i=1}^N K_i) - p_{\text{init}} N(1+K_i) \left[r \bmod \left(\frac{N + \sum_{i=1}^N K_i}{p_{\text{init}} N(1+K_i)} \right) \right] \right)} \left[E_{\text{remaining}} + \left(r \bmod \frac{1}{p_i} \right) \Delta E_{\text{consume}} \right], & n_i \in G \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

在式(10)代入上式(2)、(8)、(9)得

$$T(n_i) = \frac{p_{\text{init}} N(1+K_i)}{\left((N + \sum_{i=1}^N K_i) - p_{\text{init}} N(1+K_i) \left[r \bmod \left(\frac{N + \sum_{i=1}^N K_i}{p_{\text{init}} N(1+K_i)} \right) \right] \right)} \cdot \left[E_{\text{remaining}} \left[1 - r \bmod \left(\frac{N + \sum_{i=1}^N K_i}{p_{\text{init}} N(1+K_i)} \right) \right] + r \bmod \left(\frac{N + \sum_{i=1}^N K_i}{p_{\text{init}} N(1+K_i)} \right) \right] \quad (11)$$

才重新计算和发送新的 $E_{\text{remaining}}$ 和 E_{current} 信息. 这样可以减少发送能量信息包的数量, 消除因抖动产生的影响.

发送和接收能量信息包所造成的传输出错的影响有两方面: 丢包和接收过时的包. 我们采用时间戳来解决这个问题. 为每个发送的能量信息包打上时间戳, 接收方检测能量信息包的时间戳, 如果发现有错序的能量信息包, 则知道发生了丢包现象, 就向出错的节点发送一个请求重发的信息; 如果发现时间戳比已经正确接收的包中的时间戳还早, 就知道接收到了过时的包, 则删除该包.

4.2 多簇头聚簇算法

4.2.1 主簇头的产生

我们基于传感器节点的角色把节点分为 3 类: 主簇头、辅助簇头和普通节点. 选举簇头的工作包括两个阶段: 选举主簇头和选举辅助簇头.

第 1 阶段选举主簇头. P 值决定了每轮产生的主簇头数量, 在实际应用中, 最佳 P 值的确定是十分困难的, 这与网络规模和节点密度有关. 在 LEACH 协议的 $T(n)$ 计算公式中没有考虑能量因素, 这种算法必须基于两个前提假设才能达到每个节点平均耗费能量的预期目标: (1) 每个节点初始能量均等; (2) 每个节点担任主簇头期间耗费的能量均等. 然而, 由于每个簇的大小以及主簇头到基站的距离不一样, 前提假设(2)不符合现实.

针对 LEACH 中 $T(n)$ 计算公式的不足, 有必要对此进行改进, 改进分成两步:

(1) 我们把 LEACH 中 $T(n)$ 计算公式推广到多级异构网络, 如式(3)所示.

(2) 进一步在 RCR 协议中将能量因素考虑进来, 改进 $T(n)$ 的计算方法, 如式(10)、(11)所示.

式(11)的改进,使能量消耗比例较低的节点优先当选主簇头。 r 表示节点连续未当选过主簇头的轮次。一旦当选了主簇头, r 重置为0。式(11)的改进有效地解决了 LEACH 协议 $T(n)$ 计算公式和式(3)的缺陷,综合考虑了节点能量和阈值大小对主簇头选取的影响,使算法更公平合理。

第2阶段选举辅助簇头是在选举主簇头后,并且聚簇过程完成后,再进行选举辅助簇头工作。

4.2.2 簇的形成

主簇头产生之后,主簇头广播当选的消息到周围节点,周围节点根据接收到的主簇头广播信号的强弱决定加入哪个簇。这是 LEACH 等大多数协议常用的簇的形成方法。这种方法实现机制比较简单,但没有从能量角度考虑簇的规模、数量以及负载均衡等问题。RCR 协议聚簇算法从这些问题出发提出了改进的聚簇方法。

把聚簇归纳成^[10]:挑选 k 个主簇头,把 n 个节点分成 (S_1, S_2, \dots, S_k) k 个簇,使得

- (1) 每个节点属于且仅属于一个簇。
- (2) 主簇头之间负载平衡,即

$$\frac{1}{k} - r \leq \frac{s_i}{n} \leq \frac{1}{k} + \delta, \quad i=1, 2, \dots, k \quad (12)$$

δ 是不平衡因子,依赖于主簇头之间的实际负载能力差异。为了均匀耗费网络能量,其目标是追求主簇头之间的负载平衡,即 $\delta=0$ 。

- (3) 簇的能量消耗总和最小,即

$$C_i = \sum_{x \in S_i} f(x, a_i) \quad (13)$$

式中, a_i 是簇 S_i 的主簇头, x 是簇中成员节点,函数 f 是主簇头与成员节点之间的通信代价。

LEACH 等算法中节点根据自身通信代价最小原则选择加入哪个簇,不能保证簇的负载平衡,没有考虑距基站较远的簇头能量耗费过快等问题。针对这一点,RCR 协议提出一个簇半径的约束条件式和一个新的通信代价公式来决定节点加入哪个簇。

我们定义簇半径为 $R_{cluster}$,主簇头的通信半径

为 R_{comm} ,那么相邻主簇头之间的距离 d 满足约束条件式(13):

$$R_{cluster} < d < R_{comm} \quad (14)$$

通过式(14)这样的关系式可以保证簇头在传感器网络中分布良好。新的通信代价式(14)如下:

$$cost(j, i) = \omega \times f(d(n_j, a_i) + (1 - \omega) \times \varphi(d(a_i, BS))) \quad (15)$$

其中, $f = \frac{d(n_j, a_i)}{d_{f-max}}$, $\varphi = \frac{d(a_i, BS) - d_{\varphi-min}}{d_{\varphi-max} - d_{\varphi-min}}$ 。

式(15)中, $d_{f-max} = EX(\max\{d(n_j, a_i)\})$; $d_{\varphi-max} = \max\{d(a_i, BS)\}$; $d_{\varphi-min} = \min\{d(a_i, BS)\}$ 。 $cost(j, i)$ 是节点 n_j 加入簇头 i 的代价; $d(n_j, a_i)$ 是节点到簇头的距离,式(15)中 f 子函数保证最小化节点与簇头之间的通信代价; $d(a_i, BS)$ 是簇头 i 到基站 BS 的距离,式(15)中 φ 子函数保证最小化簇头 a_i 到基站的通信代价;权值 ω 的设置则是根据具体应用,在成员节点能量与簇头能量耗费之间的折衷,目标是最大化网络生命周期。节点 n_j 选择最小 $cost(j, i)$ 的簇头 i 加入,从而保证每个簇头负载均衡。

4.2.3 辅助簇头的产生

主簇头选举完并且聚簇过程完成后,再选择辅助簇头。每个主簇头节点各自向簇内所有节点广播,接收广播的非主簇头节点向主簇头节点发送确认信号,该确认信号包含这个节点的剩余能量百分比信息 $E_{remaining}$,每个主簇头节点根据接收到的确认信号确定各自簇中非主簇头节点,同时在这些非主簇头节点中根据 $E_{remaining}$ 值从高到底的顺序选定若干 $(L-1)$ 个“健壮”节点辅助主簇头节点完成数据传输阶段的数据收集、融合和发送任务,这些节点称为辅助簇头节点。采用的方法是:该簇的主簇头节点为第0号簇头节点,其它 $(L-1)$ 个“健壮”辅助簇头节点一次为第1号簇头节点, ..., 第 $(L-1)$ 号簇头节点,在数据传输阶段所持续的时间平均划分为 L 个 TDMA 时隙,分别由第0,第1, ..., 第 $(L-1)$ 簇头节点负责承担收集、融合并发送数据到基站的作用,如图1所示。

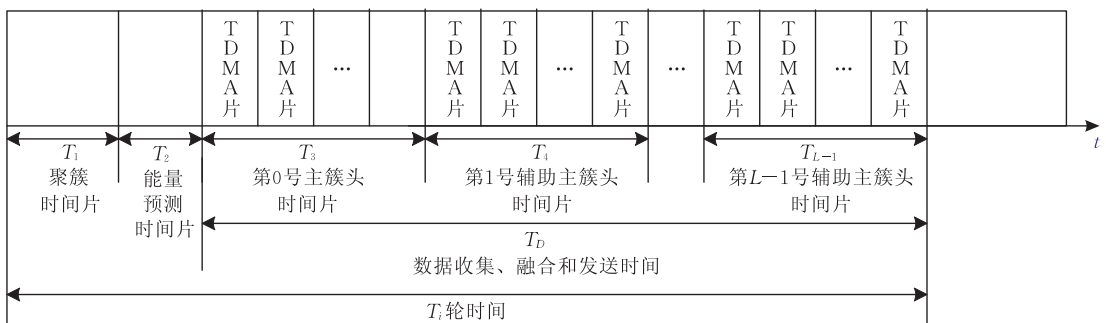


图1 每个簇采用多簇头的聚簇路由算法

4.3 簇的数据传输及可靠性证明

4.3.1 簇的数据传输

簇的路由依赖于簇的结构,聚簇算法生成的簇结构在一定程度上决定了簇的数据传输模式.按照成员节点到簇头的跳数,簇的结构一般可以分为单跳网络、多跳网络和链状网络:单跳网络如 LEACH 等算法形成的簇;多跳网络如 LSCP 等算法形成的簇;链状结构网络如 PEGASIS 形成的簇就是一条链. RCR 协议根据普适计算环境的特性,采用改进的单跳网络数据传输模式.

RCR 协议改进单跳网络的数据传输模式,只是在数据传送阶段使用不同于 LEACH 协议的策略.根据普适计算环境特性的不同,RCR 协议把 WSN 分为主动型(proactive)和响应型(reactive)两种类型.主动型 WSN 持续监测周围环境,并以恒定速率发送监测数据;而响应型 WSN 只是在被监测对象发生突变时才传送监测数据.

RCR 协议数据传输主要是针对主动型 WSN,其具体做法是:节点直接与簇头节点直接通信,簇头节点在最终融合了簇内的所有数据后,再发送数据到基站,并在协议中设置了硬、软两个阈值,以减少发送数据的次数.在每轮簇头轮换的时候将两个阈值广播出去.当监测数据第一次超过设置的硬阈值时,节点把这次数据设为新的硬阈值,并在接下来的时隙内发送它.之后,只有监测数据超过硬阈值并且监测数据的变化幅度大于软阈值时,节点才会传送最新的监测数据,并将它设为新的硬阈值.

RCR 协议数据传输的特点是:通过调节两个阈值的大小,可以在精度要求和系统能耗之间取得合理的平衡.采用这样的方法,可以监视一些突发事件和热点地区,减少网络通信量.

4.3.2 多簇头数据传输的可靠性证明

通常,在传感器网络中,节点导致数据传输失败的原因有

(1) 节点自身受能量限制.设簇头节点由于能量不足导致数据传输失败的几率为

$$p_{\text{energy}} = g(E_{\text{remaining}}) = \begin{cases} 0, & E_{\text{remaining}} \geq E_{\text{send}} + \sum E_{\text{receive}} + E_{\text{fuse}} \\ 1, & E_{\text{remaining}} < E_{\text{send}} + \sum E_{\text{receive}} + E_{\text{fuse}} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $E_{\text{remaining}}$ 为簇头节点自身的剩余能量值, E_{send} 为簇头节点向基站发送一次数据包所需消耗的能量值, E_{fuse} 为簇头节点进行一次数据融合计算所消耗的能量值, E_{receive} 为簇头节点接收簇内一个非簇头节点发送的数据所消耗的能量.

(2) 节点硬件故障,设其故障概率为 P_{fault} .

(3) 节点通道传输出错,记其出错概率为 P_{comm} .

对于单簇头方法来说,其数据传输可靠性有如下定理 1.

定理 1. 采用单簇头方法的聚簇路由协议,簇头节点随着数据传输阶段持续时间的延长,数据连续成功发送到基站的概率也随之减小.

证明. 假定稳定阶段有 n 个 TDMA 时隙,那么簇头节点成功发送数据到基站的几率:

第 0 次为 $(1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})$;

第 1 次为 $[(1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})]^2$;

...

第 $n - 1$ 次为 $[(1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})]^n$.

当 $0 < P_{\text{fault}} < 1, 0 < P_{\text{comm}} < 1$ 时,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} [(1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})]^n = 0 \quad (17)$$

证毕.

对于多簇头方法来说,其数据传输可靠性有如下定理 2.

定理 2. 采用多簇头方法的聚簇路由协议较之单簇头的聚簇路由协议,在一轮中,其簇头节点数据连续成功发送到基站的概率高.

证明. 设在数据收集阶段所持续的总时间为 n 个 TDMA 时隙,采用多簇头节点方法,某个簇中一个簇头节点平均所承担的时隙为 n/L 个时隙,记 n/L 整数部分值为 m ,若 n 能够被 L 整除,其连续传输数据到基站的几率为 $[(1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})]^m$,否则,其值至少为 $[(1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})]^{m+1}$. 不管 n 能否被 L 整除,采用多簇头节点方法的聚簇路由算法,其连续传输数据到基站的几率至少为

$$\min \left\{ \frac{P_s^{\beta(0)}, P_s^{\beta(1)}, \dots, P_s^{\beta(L-1)}}{L} \right\} = P_s^{m+1} \quad (18)$$

其中,对于任意的 i 属于 $[0, L-1]$, $\beta(i) = m$ 或 $m+1$, $\sum \beta(i) = n$, $P_s = (1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})$;

而在单簇头方法的聚簇路由算法中,其连续传输数据到基站的几率为

$$[(1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})]^n,$$

所以,当 $0 < P_{\text{fault}} < 1, 0 < P_{\text{comm}} < 1, 0 \leq P_{\text{energy}} < 1, 1 < L < n$ 时,

$$[(1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})]^{m+1} >$$

$$[(1 - P_{\text{energy}})(1 - P_{\text{fault}})(1 - P_{\text{comm}})]^n,$$

即多簇头方法的聚簇路由协议中连续传输数据到基站的可靠性比采用单簇头方法的高. 证毕.

5 仿真实验和性能分析

5.1 仿真目标和仿真环境的建立

为分析本文所提 RCR 协议的性能使用 NS2 进行仿真实验,分析目标包括:(1) RCR 协议中相邻节点剩余能量预测机制所带来的性能影响;(2) 抖动误差门限 d 的设定对协议执行的影响;(3) 通过改变异构网络的高能节点占总节点数的比例 γ 和高能节点超过普通节点能量的倍数 K 验证 RCR 协议对平衡网络负载延长网络生命周期的功效;(4) 最后通过比较采用单簇头方法和采用多簇头方法协议的数据传输可靠程度,验证 RCR 协议数据传输可靠性。

仿真实验模拟了一个在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 区域的传感器网络仿真环境中随机形成的高密度传感器网络,网络形成后节点静止不再移动,平面中随机分布 200 个传感器节点,基站位置在 (10, 90), 除基站能

源不受限外其余传感器节点的能源都是有限的且初始能源不相同,且节点的初始能量在 $[E_{\text{init}}, (1 + K_{\text{max}})E_{\text{init}}]$ 之间随机分布,网络中事件的到来服从泊松分布 λ . 在仿真实验中,设节点故障概率为 20% (将通信干扰、硬件故障等因素考虑在一起),一轮中聚簇阶段与数据收集阶段时间比设为 1:30,在 RCR 协议中,一轮中每个簇选择 5 个簇头(1 个主簇头,4 个辅助簇头). 在仿真实验中,每个节点通过统计自己过去的工作情况,本地计算并建立自己的状态转移概率矩阵,这样 P_{ij} 成为一个节点处于状态 i 且在下一个 TDMA 时隙转变到状态 j 的时隙数目,每个节点需要统计自己在不同状态下的功耗,由于节点处于静止状态,所以节点在不同状态下的功耗相对稳定. 由此节点就可以计算出参数 $E_{\text{remaining}}$ 和 $\Delta E_{\text{consume}}$. 每当预测能量误差超过误差门限 ξ 时节点需要重新计算 $E_{\text{remaining}}$ 和 $\Delta E_{\text{consume}}$,并将其发送给所有的邻居节点. 本文仿真中所用其它重要参数如表 1 所示.

表 1 仿真实验中使用的参数表

参数	值	参数	值	参数	值
初始能量	10J	节点通信半径	12	簇头通信半径	50m
抖动门限	2%~5%	数据包大小	500 字节	睡眠时间	1s
泊松分布	0.5	广播包大小	25 字节	睡眠概率	0.65
轮长	5TDMA frames	确认包大小	25 字节	持续时间最小值	0.1s
簇头	5	簇的半径	15m	持续时间最大值	50s

5.2 实验结果分析

首先分析 RCR 协议中所提出的相邻节点剩余能量预测机制对协议性能影响. 在上述环境下比较 RCR 协议与不采用预测机制但同样是基于剩余能量机制的 HEED 协议以及比较 RCR 协议与不采用预测机制也不基于剩余能量选择簇头的 LEACH 协议的性能. 然后分析通过调节抖动误差门限的大小,在节点能量下降超过抖动误差门限时,发送剩余能量信息给邻居节点的数目来看抖动误差门限的设定对 RCR 协议的影响. 再分析通过改变异构网络的高能节点占总节点数的比例 γ 和高能节点超过普通节点能量的倍数 K ,验证 RCR 协议对平衡网络负载延长网络生命周期的功效. 最后分析单簇头协议和多簇头协议的数据传输可靠性。

图 2 的仿真结果描绘了无线传感器网络有 200 个节点时节点死亡数量与网络寿命(工作轮数)之间的关系. 可以看到,图 2 中 RCR 协议的曲线几乎是一条平行于 X 轴的直线. 由于 RCR 协议使得网络能耗被均匀地分布到异构网的每个节点上,因此第一个节点和最后一个节点的死亡时间非常接近. 从图 2 中可以看到,与 LEACH 协议和 HEED 协议相

比,RCR 协议使得网络寿命分别提高了 290% 和 160% (第 1 个节点死亡).

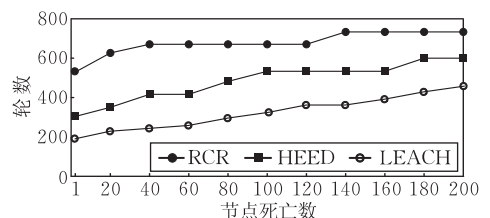


图 2 节点死亡时间图

图 3 的仿真结果描绘了采用 RCR 协议的无线传感器网络,当抖动误差门限值分别取 0.5%~8% 时,节点在 300s 内随自身的实际能量下降发送能量信息包的情况. 图 3 中显示出在 300s 的仿真中,使用 RCR 协议的节点必须发送的能量信息包随着抖动误差门限值的增大,发送的能量信息包迅速减少,拐点出现在 5% 上,在 5% 后发送的能量信息包的数量趋于稳定. 由图 3 中可以看出 RCR 协议执行的能耗是受抖动误差门限值影响的,取合适的误差门限值能大幅度减少能量信息包发送数量,这意味着能源的大量节约。

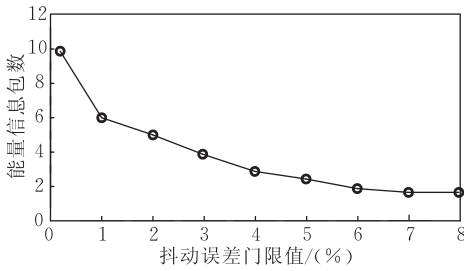


图3 抖动误差门限值与能量信息包数目关系图

图4的仿真结果描绘了在多级能量异构无线传感器网络中,采用RCR协议改变网络高能节点占总节点数的比例 γ 和高能节点超过普通节点能量的倍数 K ,所观察到的几种协议的性能.图4给出了当 γ 从5%增加到90%和 K 从0.5倍增加到9时,从开始到第一个节点死亡所经历的轮数.我们发现,LEACH协议并没有很好地利用 γ 和 K 的增加所带来的能量,采用LEACH协议的网络,其网络工作时间几乎保持不变,浪费了高能节点所带来的能量,因而表明LEACH协议是一种不适应异构网络的协议,它没有考虑节点的能量差异,而将所有节点看成具有相同能量.而对于HEED协议,我们可以发现,其网络工作时间,虽然相对于LEACH协议有所提高,但是比不上RCR协议.其主要原因是由于虽然HEED协议也是基于剩余能量机制,但是其计算比较复杂,耗能较多,并且其数据传输可靠性不高而导致能量受损所造成的.

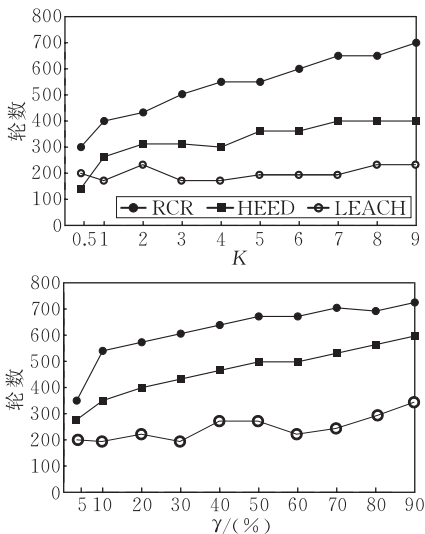
图4 当 K 和 γ 变化时各协议的网络工作时间图

图5中的仿真结果描绘了在多级能量异构无线传感器网络中,采用多簇头方法实现的RCR协议与采用单簇头方法实现的LEACH协议和HEED协议,在相同条件下数据传输可靠性的比较情况.从

图5中可以看出,在相同条件下采用多簇头的RCR协议的数据传输可靠性要明显比采用单簇头的LEACH协议和HEED协议高.因为多簇头方法中,辅助簇头有效地降低了由于主簇头故障导致的数据传输失效,大大提高了无线传感器网络的数据传输可靠性.

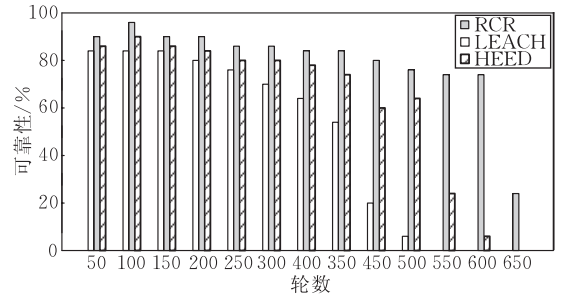


图5 各协议的数据传输可靠性比较图

6 结束语

本文提出了一种适合普适计算环境下多级能量异构无线传感器网络的新的剩余能量预测REP (Remaining Energy Prediction model)模型和可靠聚簇路由RCR(Reliable Clustering Routing)协议.在RCR协议中,每个节点通过建立相邻节点剩余能量预测机制,使选举簇头节点的概率与节点当前剩余能量直接相关,以优化数据传输路径,均衡传感器网络节点的能量消耗,延长网络寿命,并且通过多簇头方法,采用每个簇由多簇头节点共同承担簇头节点的作用,来解决单个簇头因故障等原因导致的能量损失,并改善网络能量使用率和提高数据传输可靠性.仿真实验结果表明,RCR协议能获得比单簇头的LEACH协议和HEED协议等主要聚簇协议更长的生存时间、更高的能量利用率和更高的数据传输可靠性,在性能上明显优于其它协议.

在今后的工作中,我们将考虑进一步改进剩余能量预测机制,以提高预测的精度,减少能量信息包的发送,最大限度地延长网络寿命.我们还将考虑针对普适计算环境中少量节点运动带来的拓扑结构变化所造成的影响的解决办法.我们的最终目标是将RCR协议应用在实际平台中.

参 考 文 献

- [1] Weiser M. The computer of the 21st century. Scientific American, 1991, 265(3): 66-75

- [2] Bischoff R, Wattenhofer R. Analyzing connectivity-based multi-hop Ad-hoc positioning//Proceedings of the 2nd Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom). Orlando, Florida, 2004; 165-174
- [3] Magedanz T, Schreiner F, Ziemek H. GRIPS: Generic radio based indoor positioning system//Shaker Verlag, Aachen, WPNC'2005. Hannover, Germany. Hannoversche Beiträge zur Nachrichtentechnik, Band 0. 2, Kyandoghery Kyamakya, Klaus Jobmann, Hans-Peter Kuchen-becker, 2005; 133-140
- [4] Duarte-Melo E J, Liu M. Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks//Wang C H, Lee Y eds. Proceedings of the GLOBECOM 2002. New York; ACM Press, 2002; 21-25
- [5] Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks//Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Application (SANPA04). Boston, Massachusetts, USA, 2004; 223-224
- [6] Hernzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [7] Estrin D. Tutorial wireless sensor networks Part IV: Sensor network protocols. MobiCom, Westin Peachtree Plaza, Atlanta, Georgia, USA, 2002
- [8] Lindsey S, Raghavenda C S. PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems//Williamson D A ed. Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. New York; IEEE Press, 2002, 3: 1125-1130
- [9] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669
- [10] Ghiasi S, Srivastava A, Yang X, Sarrafzadeh M. Optimal energy aware clustering in sensor networks. MDPI Sensors, 2002, 2(7): 258-269
- [11] Mini R A F, Machado M, Lourerio A A F, Nath B. Prediction-based energy map for wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 2005, 3: 235-253
- [12] Mini R A F, Leoreiro A A F, Badrinath B R. The distinctive design characteristic of a wireless sensor network; The energy map. Computer Communications, 2004, 27: 935-945
- [13] Ye F, Luo H, Cheng J, Lu S, Zhang L. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks//Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Atlanta; ACM Press, 2002; 148-159
- [14] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114
- [15] Manjeshwar A, Grawal D P. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks//Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001; 2009-2015
- [16] Akkaya K, Younis M. A survey of routing protocols in wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 325-349



CAI Hai-Bin, born in 1974, Ph. D. . His research interests include cyber-physical systems, wireless sensor networks and pervasive computing.

JU Xiao-Ming, born in 1967, Ph. D. , associate professor. His research interests include embedded system and parallel compiling.

CAO Qi-Ying, born in 1960, Ph. D. , professor, Ph. D. supervisor. His research interests include wireless sensor networks, pervasive computing and optimal decision.

Background

At present, there are more and more wireless sensor networks owing to its wide application in many domains, such as pervasive computing, cyber-physical systems and so on. It is able to monitor and collect information for location-aware or context-aware. However, the methods of energy prediction and reliable clustering routing are key problems in the research domain. How to prolong sensor lifetime, improve energy efficiency and enhance data transmission reliability are important research topics. The paper focuses on the analysis and discussion of energy prediction methods and clustering routing protocol.

This subject is supported by the Ministry of Education Technology Research Key Foundation of China under grant No. 104086 and the "Base Construction" Program of Science

and Technology Commission of Shanghai Municipality under grant No. 07dz22107. These projects focus on research and development of reliable clustering routing protocol of wireless sensor networks. The team has made a lot of progress in the area and published many papers in international and domestic journals or conference proceedings. The content of this paper mainly proposes a novel remaining energy prediction model and reliable clustering routing protocol for multilevel energy heterogeneous wireless sensor networks in ubiquitous computing environment, in which a node, according to energy prediction mechanism, independently makes its decision to compete for becoming a master cluster head in order to optimize routing, improve energy efficiency and prolong system lifetime.