

一种无线传感器网络多级异构分簇路由协议

吴迪, 钟汉, 张金波, 胡钢

(河海大学 物联网工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要: 研究了无线传感器网络, 提出了一种适合大规模应用的无线传感器网络体系结构, 并提出了一种新的路由协议——多级异构分簇路由协议; 该协议将无线传感器网络节点分成 4 种类型, 根据簇头间平均跳数、簇头能耗等因素选举出第一级簇头节点; 利用通信能耗、节点能耗以及跳数 3 个方面作为启发因子, 寻找第一级簇头到第二级簇头间的最佳路径; 基于 NS2 平台对该路由协议进行了仿真实验, 并与 LEACH 协议进行比较; 仿真结果表明: 在大规模的应用中, 该路由协议能有效地降低节点的平均能耗、延长网络生存时间。

关键词: 无线传感器网络; 路由协议; 多级异构分簇

A Multilevel Heterogeneous Clustering Routing Protocol in Wireless Sensor Network

Wu Di, Zhong Han, Zhang Jinbo, Hu Gang

(College of IoT Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Research the wireless sensor network, propose one architecture of Wireless Sensor Network for sweeping application, and propose one new routing protocol—the multilevel heterogeneous clustering routing protocol. All the wireless sensor network nodes can be divided into four kinds. The first level cluster—heads can be elected based on average hops between cluster—heads, energy dissipation of cluster—heads and so on. The best routing between the first level cluster—heads and the second level cluster—head is searched using three heuristic factors about energy dissipation for communication, energy dissipation of nodes and hops. The routing protocol has been simulated on NS2 and compared with LEACH protocol. The results of simulation demonstrate that this routing protocol can reduce average energy dissipation of nodes and prolong the lifetime of wireless sensor network effectively in sweeping application.

Keywords: wireless sensor network; routing protocol; multilevel heterogeneous clustering

0 引言

无线传感器网络集传感器技术、嵌入式计算技术、无线通信技术以及分布式信息处理技术于一体, 是由若干具有自组织能力的节点以自组网的方式构成的无线自组织网络^[1-3]。

无线传感器网络路由协议是实现无线传感器网络自组织功能的关键技术^[4]。根据网络的拓扑结构, 无线传感器网络路由协议可分为平面路由、层次路由两大类^[5]。Flooding 协议、SPIN 协议、Directed Diffusion 协议、HREEMR 协议和 SAR^[6]协议均属平面路由协议。平面路由协议的特点是节点间地位平等, 结构简单, 但可扩展性较差, 效率不高。LEACH 协议、PEGASIS 协议、TEEN 协议以及 APTEEN^[7]协议等均属层次分簇路由协议。LEACH 是最典型的分簇路由协议, 具有低功耗自适应的特点, 可扩展性好, 比较适合应用于环境监测领域, 是研究与改进的热点。本文以 LEACH 为基础提出一种无线传感器网络多级异构分簇路由协议—MHC (the multilevel heterogeneous clustering) 路由协议。

1 LEACH 协议

层次式路由协议与其他类型的路由协议相比, 可扩展性好, 更节省能量, 网络生存时间更长。LEACH (low-energy adaptive clustering hierarchy) 是层次路由协议中的典型代表, 其他几种层次式路由协议都是在 LEACH 协议的基础上发展起来的。所以, LEACH 协议在 WSN 路由协议中占有重要的地位。因此, 本文选择 LEACH 协议作为研究与改进的对象。

LEACH 协议是基于低能量自适应分簇的路由协议。LEACH 协议每“轮”分为两个阶段: 周期性的簇的建立阶段与稳定的数据通信阶段。在簇的建立阶段, 首先选举簇头节点。给每个节点设定一个阈值 $T(n)$, 同时节点产生一个介于 0、1 之间的随机数。若产生的这个随机数小于阈值 $T(n)$, 则该节点当选为簇头并向网络中发布公告消息, 宣布自己是新当选的簇头节点。其中 $T(n)$ 按公式 (1) 进行计算:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * [r \bmod (1/p)]} & \text{当 } n \in G \text{ 时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P 是簇首节点占所有传感器节点中的百分比; r 是当前轮数; G 是这一轮循环中未当选为簇头的节点集合。若节点已经当选过簇头, 则把该节点的 $T(n)$ 置 0, 则该节点就不会再次被选举为簇头。当节点被选举为簇头后, 即向网络中所有节点广播自己是新当选簇头。而非簇头节点选择收到信号最强

收稿日期: 2014-01-04; 修回日期: 2014-03-04。

基金项目: 2012 年度南通市应用研究计划 (2012800303; 2012400403)。

作者简介: 吴迪 (1980-), 女, 江苏徐州人, 讲师, 硕士, 主要从事无线传感器网络、物联网等方向的研究。

的那个广播作为加入相应簇的依据。

在数据通信阶段,簇内节点将数据发送给簇头,簇头将收集到的数据进行一定的聚集或压缩后再发送给基站。这种稳定的数据通信阶段持续一段时间以后,再次进入新一轮的簇头选举阶段。

2 改进的路由协议—MHC路由协议

本文以 LEACH 为基础,研究一种适合大规模应用的无线传感器网络体系结构,提出了一种改进的无线传感器网络多级异构分簇路由协议—MHC (the multilevel heterogeneous clustering) 路由协议^[8]。

2.1 体系结构

网络中各监测单元分别配置内、外两种节点:内节点包括一级簇头节点及普通成员节点,具有动态性和周期轮换性;外节点为二级簇头节点。无线传感器网络监测区域内所有节点形成多级异构分簇结构,其网络体系结构如图1所示。

簇内普通节点负责采集数据并发送给本簇簇头,即各自簇的第一级簇头节点。第一级簇头节点进行数据融合后通过一级簇头链转发给二级簇头节点,由二级簇头节点将数据处理后发送给 sink 节点。sink 节点直接与基站进行通信,最终将监测数据通过基站发送到远程控制中心。

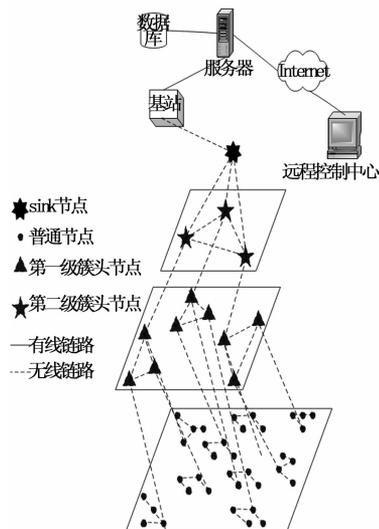


图1 WSN体系结构

2.2 MHC路由协议的基本思想

本文提出的 MHC 协议中共有 4 种类型的节点:簇内成员节点、一级簇头节点、二级簇头节点和 sink 节点。簇内成员节点负责采集监测数据。一级簇头节点进行简单的数据处理,由二级簇头节点负责对簇内节点所采集的数据进行标定、融合,并转发给 sink 节点。

MHC 路由协议每“轮”也分为周期性的簇的建立阶段与稳定的数据通信阶段。

其中,周期性的簇的建立阶段主要分为两个阶段:1) 两级簇头节点的选举及簇的建立阶段;2) 簇间路由的形成阶段。

在数据通信阶段,普通成员节点采集数据,进行数据预处理,然后将数据发送给本簇一级簇头节点。一级簇头节点接收数据并解析,然后转发给二级簇头节点。二级簇头对一级簇头

发送的数据进行汇聚和分析,然后发送给 sink 节点。sink 节点通过网络将数据上传给远程监控中心。

2.2.1 网络模型及特点

MHC 路由协议所采用的网络模型假设如下:

- (1) sink 节点位置固定且远离无线传感器网络其他节点。
- (2) 基站具有强大的功能及可持续使用的电源。
- (3) 存在异构传感器节点,普通节点的初始能量一定且有限。
- (4) 传感器节点总有数据要向上一级节点发送,且其采集的数据与邻近节点采集的数据具有较高的相关性、有较高的数据冗余,可以进行数据融合。
- (5) 网络中除大部分基本静止的节点外,也存在少数移动节点。
- (6) 采用的无线信道模型是多径衰落模型。

与现有的分簇协议相比,MHC 路由协议的特点在于:

- (1) 采用多径衰落的无线信道模型;
- (2) 根据节点功能的强弱,分为簇内节点、一级簇头、二级簇头以及 sink 节点,形成多级异构分簇结构,可扩展性好、实用性强;

(3) 改进了一级簇头的选举方式,综合考虑节点初始能量、剩余能量、上一轮中本簇簇头消耗能量及簇头平均间距等因素;

(4) 改进簇间路由方式。由于需要监测的参数较多,测点众多,需要大量的传感器节点及一级簇头节点。若所有的一级簇头节点均直接向二级簇头节点发送数据,势必浪费大量的能量,因此对簇间路由方式进行了改进。

2.2.2 两级簇头节点的选举阶段

MHC 路由协议簇头节点包括两级:一级簇头节点和二级簇头节点。两级簇头节点的选举阶段包括二级簇头节点的选择及一级簇头节点的选举两部分。首先将监测区域划分成若干子区域,由 sink 节点在根据子区域内传感器节点的能量状态选择一个节点作为二级簇头,然后由二级簇头选举子区域内的一级簇头。

为了均衡节点能耗,本文改进了簇头的选举方法,提出簇头平均间距的概念,利用簇头间距调节因子 W_1 使簇头的分布更加合理。同时,根据节点初始能量、剩余能量和上一轮本簇簇头消耗能量三方面因素,利用节点能量调节因子 W_2 调整节点竞选簇头的门限。

定义 1: 簇头间距调节因子为:

$$w_1 = \frac{1}{\text{mod}(\frac{h}{h_{\max}/n})} \quad (2)$$

式中, h 为节点距本单元二级簇头的跳数, h_{\max} 为单元内节点距本单元二级簇头的最远跳数, n 为最优分簇个数。

定义 2: 节点能量调节因子为:

$$w_2 = \frac{(E_c - E_h)}{E_t} \quad (3)$$

式中, E_c 为节点现存能量, E_h 为上一轮中本簇簇头消耗能量, E_t 为节点初始能量。

定义 3: 簇头竞选门限为:

$$T = \frac{[W_1 + W_2]P}{1 - P[r \text{mod}(1/p)]} \quad (4)$$

式中, W_1 为簇头间距调节因子, W_2 为节点能量调节因子, r 是当前轮数, p 为簇头节点占有所有传感器节点的百分比。

根据以上分析, 各监测单元内部一级簇头的选举及成簇的步骤为:

1) 由二级簇头向本区域内节点发出广播 message, message 中初始跳数设为 0, 各节点接收到 message 后更新自身距二级簇头节点的跳数, 由此可得到各个节点距离本区域二级簇头的跳数 h , 同时也得到了最远节点距二级簇头的最远跳数 h_{\max} 。设节点 i , 其距二级簇头的跳数为 h_i 。

2) 选择一级候选簇头。由于簇头分布的过密或过疏都不利于均衡节点的能量消耗, 因此本文提出设置簇头平均间距, 如公式 (5) 所示, 其中 n 为监测区域内分簇个数。理想状态下, 候选簇头的跳数应为平均间距的整数倍或接近整数倍。

$$h_{\text{ave}} = h_{\max} / n \quad (5)$$

3) 选举簇头。根据簇头竞选门限公式 (4) 计算候选节点的门限值, 并上报二级簇头。由二级簇头根据其门限值大小及跳数与平均间距的倍数关系确定本单元一级簇头。

4) 一级簇头向网络中发布广播, 宣布自己是新当选的一级簇头, 并等待簇内普通成员节点的加入。

5) 簇内普通节点根据所接收到的一级簇头信号的强弱选择所属的一级簇, 并发送请求消息。

6) 一级簇头节点给簇内成员节点分配时隙表, 成员节点可在各自的时隙内向一级簇头发送监测数据。至此, 形成了各个一级簇, 完成了簇的建立阶段。

2.2.3 簇间路由的形成阶段

无线传感器网络大规模应用时, 测点众多, 需要部署大量的传感器节点。同时, 需要选举出较多的一级簇头。若一级簇头节点均直接向二级簇头节点发送数据, 势必浪费大量的能量及资源。因此, 在簇间路由的形成阶段, 本文提出以蚁群算法为基础, 通过对启发因子 η 的改进, 寻找一级簇头到二级簇头的最佳路径, 形成簇间路由。

蚁群算法最初是由意大利学者 M. Dorigo 等人提出的, 利用人工蚂蚁模拟自然界蚁群寻找最佳路径的过程实现组合优化^[9-10]。本系统中, 一级簇头可作为源节点, 各二级簇头分别作为各自单元的目的节点, 利用改进的蚁群算法寻找源节点到目的节点间的最佳路由。

首先设蚁群中人工蚂蚁的数量为 m ; 监测单元内有 n 个簇头节点, 每 2 个节点间有边相连, 节点 i 和 j 之间的边为路径 ij ; h_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, n$) 表示簇头 i 和簇头 j 之间的距离; $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻在路径 ij 上的信息量; $p_{ij}^k(t)$ 表示 t 时刻蚂蚁 k 由簇头 i 转移到簇头 j 的概率; q 表示信息残留程度, $1-q$ 则表示信息消逝程度; η_{ij} 表示由簇头 i 路由到簇头 j 的期望程度, 作为启发因子; $b_i(t)$ 表示 t 时刻位于簇头 i 的蚂蚁的个数, 即 $\sum_{i=1}^n b_i(t) = m$; T_k 用于存储蚂蚁 k 已经走过的簇头。进行初始化, 得:

$$\tau_{ij}(t) = c \quad (6)$$

$$\Delta\tau_{ij} = 0 \quad (7)$$

$$T_k = 0 \quad (8)$$

本文对启发因子 η 进行了改进, 综合考虑了簇头节点能量、跳数以及通信能耗等因素, 具体定义如下:

$$\eta_{ij} = \left(\frac{E_{-c}}{E_{-t}}\right)^{k_1} \times E_{ij}^{k_2} \times \left(\frac{h_i}{h_{\max}}\right)^{k_3} \quad (9)$$

式中, E_{-c} 表示簇头现有剩余能量, E_{-t} 表示簇头初始能量, E_{ij} 表示簇头 i 和 j 之间的通信能耗, h_i 表示簇头 i 距二级簇头的跳数, h_{\max} 为单元内节点距本单元二级簇头的最远跳数, k_1 、 k_2 以及 k_3 均为调节系数。

蚂蚁 k ($k=1, 2, \dots, m$) 在交互式选路过程中, 根据各路径上的信息量决定下一跳路由的方向, 用 p_{ij}^k 表示由簇头 i 转移到簇头 j 的概率, 其具体定义为:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} (\tau_{ij})^\alpha \times \left[\left(\frac{E_{-c}}{E_{-t}}\right)^{k_1} \times E_{ij}^{k_2} \times \left(\frac{h_i}{h_{\max}}\right)^{k_3} \right]^\beta & j \in \text{allowed}_k \\ \sum_{s \in \text{allowed}_k} (\tau_{is})^\alpha \eta_{is}^\beta & \text{otherwise} \\ 0 & \end{cases} \quad (10)$$

式中, allowed_k 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的簇头节点, 即 $\text{allowed}_k = \{0, 1, \dots, n-1\} - T_k$ 。

在路由转移的过程中, 蚂蚁根据概率 p_{ij}^k 选择下一跳簇头 j , 将刚刚选择过的簇头 j 添加到 T_k 中, 计算信息量 τ_{ij} 及 $\Delta\tau_{ij}$, 更新路径信息量, 确定本次循环所找到的最佳路径并继续迭代, 直至达到规定的迭代次数。最后输出最优解, 即最佳路径。

至此, 寻找到一级簇头到二级簇头的最佳路径, 形成簇头链。自组网过程完毕, 进入稳定的数据传输阶段。

3 仿真实验与分析

3.1 仿真环境

通过网络仿真可以获得网络设计和优化时所需的网络性能数据, 为科研实验和新技术的应用提供参考。NS-2 是目前无线传感器网络的主要仿真工具之一, 是美国加州的 LNBL (Lawrence Berkeley National Laboratory) 网络研究组研究开发的。其源代码全部公开, 提供开放的用户接口, 其真实性和可靠性居仿真软件前列。因此, 本文选择在 NS-2 环境下进行 MHC 路由协议的仿真实验, 并将 MHC 路由协议与 LEACH 协议相比较, 得出实验结果, 证实改进算法的有效性。

在 100 m² 的区域里分别随机分布 100、200、300、400、500 个普通节点及 1 个位置固定的二级簇头节点。每个普通节点的初始能量为 1 J, 二级簇头节点的初始能量为 4 J。采用一阶无线电模型, 则节点发送、接收数据的能耗为:

$$\begin{cases} E_{TX}(k, d) = E_{\text{elec}} * k + \epsilon_{\text{amp}} * k * d^n \\ E_{RX}(k) = E_{\text{elec}} * k \end{cases} \quad (12)$$

式中, E_{TX} 为节点发送 k 比特的数据所消耗的能量, E_{RX} 为节点接收 k 比特的数据所消耗的能量, E_{elec} 为无线收发器的电路部分消耗的能量, ϵ_{amp} 为信号放大器的放大倍数, d 为信号传输的距离。

3.2 实验结果及分析

实验一: 节点的总规模为 500 个, 每个 WSN 节点的初始能量为 2 J, 数据包大小为 500 Bytes。经实验验证, 实验结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 本文改进后的 MHC 协议与 LEACH 相比, 节点规模较大时网络中出现能量耗尽节点的时间较晚, 也就是说 MHC 协议使节点的能耗更加均衡。

实验二: 500 个 WSN 节点随机分布在 10 km × 10 km 的

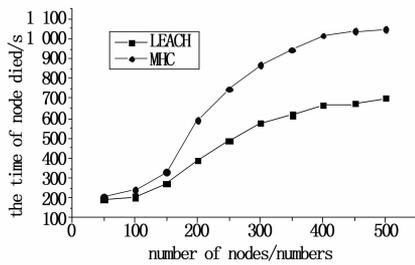


图 2 出现节点能量耗尽的时间

平面区域, 1 个 sink 节点且距监测区域较远, 每个 WSN 节点的初始能量为 2 J, 数据包大小为 500 Bytes。实验结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 随着周期性成簇“轮数”的增加, 在“轮数”相同的那个周期, 改进后的 MHC 协议中存活的节点的个数较 LEACH 协议中存活节点的个数要多。而 LEACH 算法首先达到节点存活个数为 0 的状态, 然后才是 MHC。也就是说改进后的 MHC 协议增加了达到此状态的“轮数”。MHC 与 LEACH 相比, 网络生存时间明显延长, 且首个节点死亡的时间较晚。这说明, MHC 达到了均衡节点能耗, 延长网络生存时间的目的。

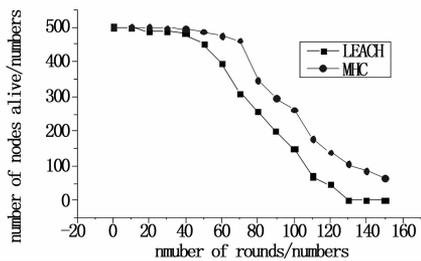


图 3 网络生存时间

实验三: 随机分布 500 个 WSN 节点, 1 个 sink 节点, 节点初始能量 2 J, 选取其中一个簇头节点进行观测。实验结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 改进后的 MHC 协议由于采取了簇间路由的形式, 所以 MHC 协议簇头的能量消耗要小于 LEACH 中的簇头节点能量的消耗。

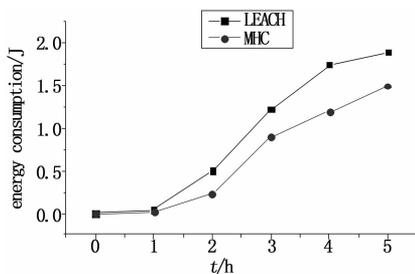


图 4 簇头节点能耗

实验四: 测试不同网络范围的平均能耗, 实验结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 随着监测区域面积的增加, 在平均能量消耗方面, 改进后的 MHC 协议优越于 LEACH 协议。

4 结论

本文研究适合大规模应用的无线传感器网络路由协议,

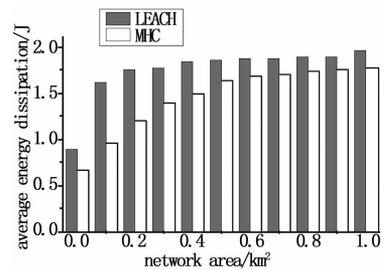


图 5 不同网络范围的平均能耗

提出一种适合大规模应用的无线传感器网络路由协议—多级异构分簇 (MHC, multilevel heterogeneous clustering) 路由协议。MHC 协议将无线传感器网络节点分为簇内节点、一级簇头、二级簇头以及 sink 节点, 根据节点初始能量、剩余能量、上一轮中本簇簇头消耗能量以及平均簇头间距等因素选举出第一级簇头节点, 并改进了两级簇头间路由方式。仿真结果表明, MHC 协议能够有效降低节点平均能耗, 延长网络的生存时间, 适合于监测节点众多的应用环境, 具有较高的实用价值。

参考文献:

- [1] 蒋凌云, 孙力娟, 王汝传, 等. 移动无线传感网能量时延约束的自适应路由及性能评估 [J]. 电子学报, 2012, 40 (12): 2495-2500.
- [2] Hu T S, Fei Y S. QELAR: A Machine-Learning-Based Adaptive Routing Protocol for Energy-Efficient and Lifetime-Extended Underwater Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9 (6): 796-809.
- [3] 杨海波, 华惊宇, 刘半藤. 基于减聚类优化算法的无线传感器网络分簇路由协议研究 [J]. 传感技术学报, 2012, 25 (11): 1603-1606.
- [4] 全杰, 杨帆, 钱德沛. 移动 Sink 传感网中基于 IEEE 802.15.4 的拓扑控制与路由 [J]. 通信学报, 2011, 32 (6): 107-115.
- [5] Wu D, Hu G, Ni G. Research and Improve on Secure Routing Protocols in Wireless Sensor Networks [A]. 2008 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, ICCSC [C], 2008: 853-856.
- [6] 周冬鑫, 金文光, 容志能. 基于分层的无线传感网多跳分簇路由算法 [J]. 传感技术学报, 2011, 24 (1): 73-78.
- [7] 王辛果, 张信明, 陈国良. 时延受限且能量高效的无线传感网络跨层路由 [J]. 软件学报, 2011, 22 (7): 1626-1640.
- [8] 吴迪, 皇润风, 柯燕燕, 等. 基于无线传感器网络的空气污染实时监测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (7): 1756-1758.
- [9] Zhang W Y, Liang Z Z, Hou Z G, et al. A power efficient routing protocol for wireless sensor network [A]. Networking, Sensing and Control, IEEE International Conference [C], London, UK, 2007: 20-25.
- [10] 黄如, 苗澎, 陈志华. 基于预测模式蚁群优化的传感网节能路由机制 [J]. 传感技术学报, 2010, 23 (5): 701-707.