

一种基于多权值优化的无线传感网分簇算法的研究

黄河清 姚道远 沈杰 马奎 刘海涛

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

摘要: 在无线传感网(WSN)中,网络的拓扑结构影响传感器节点的负载平衡,关系网络的容量与生存周期,而分簇结构是一种有效的拓扑控制方式。该文着眼于无线传感网络的拓扑结构,提出基于多权值的分簇算法MWBC(Multi-Weight Based Clustering),在初期通过节点间的信息交互,获得较多的局部网络信息,如:节点的度、当前能量值、发射功率、链路质量、相对位置等,在此基础上根据不同的网络应用背景作出不同的分簇决策,并预设簇的最大规模以利于接入协议的资源管理与分配。仿真结果表明,与具有代表性的分簇算法 LEACH 与 HEED 相比,在分簇的合理性上有较大的优势。

关键词: 无线传感网;分簇;负载平衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1489-04

A Multi-weight Based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks

Huang He-qing Yao Dao-yuan Shen Jie Ma Kui Liu Hai-tao

(Institute of Micro-system and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: Topology control in a wireless sensor network balances load on sensor nodes and increases network scalability and lifetime. Clustering architecture is one of the effective approach. In this paper, we proposed a distributed clustering algorithm MWBC for maximal-lifetime wireless sensor network design, which take into consideration many factors such as the ideal degree, current energy, transmission power, link quality, and relatively position of nodes. Through simulations we have compared the performance of proposed algorithm with that of the LEACH and HEED algorithms in terms of the number of clusters formed, and the Load Balance Factor(LBF) value. The results demonstrate the superior performance of the proposed algorithm.

Key words: Wireless sensor network; Clustering; Load balancing

1 引言

无线传感器网络(WSN)是近年来继 Ad hoc 网络之后兴起的无线自组织网络研究的一个新方向。其网络拓扑不像 Ad hoc 网络那样变化频繁,是一种“准静态”的网络,同时,其对于节能的要求更高。

分簇的网络结构具有优良的扩展性,能够提供方便的能量管理机制,对于负载平衡、资源分配及数据融合处理等均有良好的表现,对于单播、组播和广播通信都非常高效。分簇算法研究合适的簇头选取策略,来组织节点,收集、融合簇内数据,并在簇间转发。簇头节点负担较重,需要经常变换以平衡网络的能耗。

为获得更长的网络生存时间,需要能够形成负载平衡的簇结构,为此,在研究现有算法的基础上,本文提出一种基于多权值优化的分簇算法 MWBC(Multi-Weight Based Clustering),其具有良好的负载平衡特性。

本文的组织结构如下:第2节分析现有的分簇算法及存在的问题;第3节描述 MWBC 算法的思想和算法实现;第

4 节给出仿真结果及与其他分簇算法的比较;第5节给出结论,总结全文。

2 当前的研究成果与存在的问题

在有簇头分簇结构中,簇头扮演重要的角色,负责协调和管理簇内节点并负责相邻簇间的通信,因此,簇头的合理选取(包括簇头的数量及分布)直接影响分簇结构的网络性能。而现有的簇头选取算法或多或少存在一些问题。

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)算法^[1]是最早提出的分簇算法,其选取簇头的过程为:节点产生一个 0-1 之间的随机数,若其小于阈值 $T(n)$,则发布自己为簇头的消息,非簇头节点根据自己与簇头的距离来选择加入的簇,并告知簇头。式(1)中函数 $T(n)$ 用来确保每个节点当选簇头的机会相当。

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

其中 P 为簇头在所有节点中所占的百分比, r 为选举轮数, $r \bmod (1/P)$ 为该轮循环中当选过簇头的节点个数, G 为该轮

中未当选过簇头的节点集合。

作为经典算法, LEACH 算法经常被引用, 成为研究分簇算法性能的一个重要参照。由于 LEACH 算法簇头选取的随机性, 导致分簇不均匀, 使得簇头负载不平衡, 影响网络的整体性能, 故近年来的有关分簇算法的研究主要集中在不同的簇头选取策略上。

根据所考虑的网络(节点)的特征, 可将当前较流行的分簇算法划分为以下几类:

(1) 基于节点的某一参数, 如节点 ID、能量等, 如: Lowest-ID 算法^[2]和 Highest-Degree 算法^[3]等。Lowest-ID 算法将邻居节点中拥有最小 ID 的节点作为簇头, 其一跳邻居节点成为其簇成员节点, 不再参与簇头选取, 从而完成整个分簇过程。其优点在于计算简单、收敛快, 维护开销较小, 缺点与 LEACH 算法一样, 存在簇头分布不均, 负载不平衡的问题。

(2) 着重于节点的某一参数, 兼顾另一参数, 如 HEED (Hybrid Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach) 算法^[4]等。HEED 算法节点以初始化概率 CH_{prob} 竞争簇头, 剩余节点依据竞争阶段获得的簇内平均可达能量 AMRP (Average Minimum Reachability Power) 信息选择加入的簇, 其中, 初始化概率 $CH_{\text{prob}} = \max(C_{\text{prob}} \times E_{\text{resident}}/E_{\text{max}}, p_{\text{min}})$, $E_{\text{resident}}/E_{\text{max}}$ 为节点剩余能量与初始能量的比值, C_{prob} 与 p_{min} 影响算法的收敛速度, 可取 $p_{\text{min}} = 10^{-4}$, $C_{\text{prob}} = 5\%$; $AMRP = \left(\sum_{i=1}^M \text{MinPwr}_i\right)/M$, MinPwr_i 为簇内节点 i 到簇头的最小能量需求, M 为簇内节点数。HEED 算法以主从关系考虑了节点的能量与通信成本两个约束条件, 相对于(1)中算法具有更加优良的表现, 但其生成的簇仍然存在局部负载失衡。

(3) 利用加权因子, 考虑多种网络参数以获得节点的簇头选取权值, 如: WCA (Weighted Clustering Algorithm) 算法^[5]。WCA 算法将节点的当前能量 P_v 、节点的度 Δ_v (邻居节点数)、节点的相对位置信息 D_v 、节点的移动性 M_v 等参数作为簇头选取的依据, 根据式(2)计算出每个节点的权值, 在邻居节点中权值最小的节点成为簇头, 其邻居不再参与簇头的选举。

$$W_v = \omega_1 \Delta_v + \omega_2 D_v + \omega_3 M_v + \omega_4 P_v \quad (2)$$

WCA 是基于 Ad hoc 网络的分簇算法, 由于把移动性加入了考量, 其可以有效的跟随网络拓扑的变动, 随之改变分簇的情况, 分簇的合理性有较大提高, 但在 WSN 中, 节点的移动性并非考虑的重点, 影响负载平衡的因素与 Ad hoc 网络有较大不同。

因此, 本文在研究现有算法的基础上, 提出一种基于多权值优化的分簇算法, 仿真研究表明, 其负载均衡性优于 LEACH 与 HEED 算法。

3 基于多权值优化的分簇算法

在这一节给出基于多权值优化的分簇算法的设计思路

与详细的算法描述。

3.1 设计思路

无线传感器网络不同于 Ad hoc 网络, 其节点在布设后, 一般较少移动, 故不存在 Ad hoc 网络的由于节点的移动性导致的网络拓扑频繁变化的情况。对于这种“准静态”的网络, 频繁的进行全网范围的重新分簇就显得没有必要, 因此, 在初始分簇阶段节点尽量收集其周边的网络信息, 并据此作出局部最优的选择, 以获取较稳定的分簇结构, 减少全网范围重新分簇的次数, 这样做虽然在初期存在较多的信息交互, 但是对于延长整个网络的生存周期是有利的。

本文参考 Ad hoc 网络的基于权值的分簇算法的思路, 通过加权平均的方式, 在分簇过程中动态地计算节点竞争簇头的权值, 使得每次迭代中选取的簇头节点都具有该次迭代最小的权值, 在获得局部最优的基础上逼近全局最优。算法仅考虑局部网络信息, 是完全分布式的。

节点可以通过交互信息获取的描述局部网络状况的参数包括: 节点的最大发射功率 $P_{i\text{max}}$, 节点的局部链路质量 Q_i , 节点当前能量 E_i , 节点的度偏差 D_i , 节点的位置相关信息 Δ_i , 与邻居节点的平均通信成本等, 将以上信息作为计算权值的参数, 根据不同的应用背景, 选取适当的加权系数 w_j , 计算出每个节点的最终权值, 作为节点申请成为簇头的依据。给出权值计算方法如下:

$$W_i = w_1 P_{i\text{max}} + w_2 E_i + w_3 D_i + w_4 Q_i + w_5 \Delta_i + \dots \quad (3)$$

其中 $E = (E_{\text{max}} - E_{\text{cur}})/E_{\text{max}}$, 表示节点消耗的能量与最大能量的比值; $D = |D_0 - \delta|$, 表示节点度的偏差, 其中 D_0 为节点度(邻居数), 在计算时取邻居中非簇头的节点数, δ 为预设的簇规模, 可根据不同的应用环境作调整; Q 为节点间的链路质量, 可以通过计算通信时的丢包率来表征; $\Delta = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} / \bar{x}$, 表示节点到其邻居节点的距离的标准差, 其中 x_i 为节点到其邻居 i 的距离, \bar{x} 为平均距离。加权系数 w_j 要求满足 $\sum w_j = 1$, 即必须是归一化的, w_j 可根据不同的应用环境作调整, 在特定的场合可以令 $w_j = 0$ 以忽略某些参数, 加以简化, 因此, 算法具有较好的适应性。

3.2 算法描述

算法在以下假设的前提下进行:

- (1) 节点采用全向天线, 工作在半双工模式下;
 - (2) 通信链路是双向的, 两个相邻节点可以相同的发射功率通信;
 - (3) 节点是同构的、且地位平等、每个节点具有唯一的 ID;
 - (4) 节点可以不同的发射功率发送数据, 至少存在两个功率级别;
 - (5) 在分簇算法执行过程中, 网络拓扑不发生变化;
- 算法的具体步骤如下:

第 1 步 邻居发现, 各节点广播 Hello 消息, 包含节点 ID、当前能量 E_i 、权值 W_i (初始值为 0)、当前节点状态(簇

头、簇成员或未定)、地理位置(可选)等信息, 这个进程由各节点周期性进行;

第 2 步 每个节点根据接收到的广播信息建立自己的邻居表, 计算并广播自己的簇头竞争权值 W_i ;

第 3 步 若节点的权值 W_i 在其邻居中最小, 则置自己为簇头(CH), 并广播其状态变化;

第 4 步 簇头的邻居节点向其发送请求加入消息 ReqToJoin, 这里有几种情况:

(1)簇头在收到加入请求之后, 若簇未饱和, 则反馈 AckToJoin 消息, 允许节点加入簇. 节点收到 AckToJoin 消息, 置自己的节点状态为 CM(簇成员), 广播其状态变化;

(2)簇头的容量达到预设上限, 拒绝节点的加入请求, 则节点向邻居表中的其他簇头发出加入申请;

(3)节点的邻居表中无可以申请加入的簇头, 则自己成为簇头;

(4)若簇成员发现自身簇头消失, 则转为未定状态, 并向邻居中其他的簇头发送 ReqToJoin 消息;

第 5 步 重复第 2 至 4 步过程, 直到所有节点都成为簇成员或者簇头。

4 仿真研究

4.1 仿真平台

本文采用网络仿真软件 QualNet v3.9 搭建仿真平台, 其前身为 GloMoSim, 基于 C/C++, 具有严格的分层架构, 与其他仿真软件相比具有更快的仿真速度, 支持更大的仿真规模。

仿真场景是一个 2000m×2000m 的区域, 节点随机放置, 物理层采用 802.11b 规范, 双径模型, 理想无衰落信道, MAC 层采用 CSMA 协议。

4.2 性能指标

在比较各种分簇算法的性能时, 主要考虑以下几种性能指标:

(1)网络中的簇头数 K , 其直接反映分簇网络的结构和特性. K 的选取以满足系统要求与减少控制开销为准则;

(2)各簇成员数的标准差, 反映分簇的平衡性, 其值越小, 说明各簇的成员数越均匀;

(3)网络负载平衡因子(LBF), $LBF = n_c / \sum_{i=1}^{n_c} (x_i - \mu)^2$, 其中 n_c 为簇的数量, x_i 为簇 i 的成员节点数, $\mu = (N - nc) / n_c$ 为每个簇头的平均邻居节点数(N 为网络中所有节点数)。显然 LBF 越大, 网络负载平衡度越好;

(4)簇头节点的平均能量值, 尽可能选取剩余能量较高的节点担负簇头的工作, 以延长网络的生存周期。

4.3 仿真结果与分析

在仿真中, 选取的网络参量包括节点的局部链路质量信息 Q_i , 节点当前能量信息 E_i , 节点的度偏差 D_i , 节点的位置相关信息 Δ_i , 式(3)简化为

$$W_i = w_1 E_i + w_2 D_i + w_3 Q_i + w_4 \Delta_i \quad (4)$$

取 $w_1=0.4, w_2=0.2, w_3=0.2, w_4=0.2$, 将能量作为主要考察参数。

仿真中选择 LEACH 与 HEED 算法作为比较的对象, 通过改变簇的覆盖范围(簇的半径)与网络的规模来分析算法的性能表现。

4.3.1 改变簇的覆盖范围

以 200 个节点的网络为例, 仿真考察算法的表现。

图 1 中, 簇的半径较小时, 3 种算法均表现出随着簇半径增大, 簇数目减少的趋势, MWBC 算法簇的数目更少一些, 当簇的半径达到一定程度(图中为 240m 附近), 饱和簇不断增多, 簇的数量保持稳定, HEED 则一直平稳下降, LEACH 则波动较大。在图 2, 簇成员数的标准差随着簇的半径扩大呈上升趋势, MWBC 具有更低的标准差值, 且在簇半径达到一定程度时不再增大, 甚至有所下降。图 3 显示了 3 种算法的 LBF 值变化趋势, MWBC 算法的 LBF 值较高, 且在簇半径达到一定程度、饱和簇增多后迅速增大。

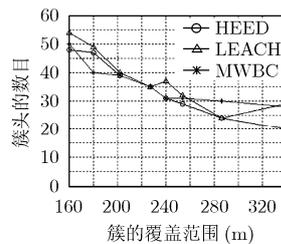


图 1 簇的数目与簇半径的关系

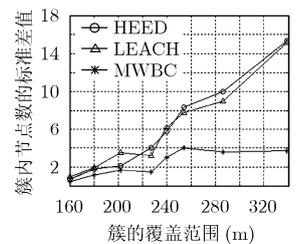


图 2 簇内节点数的标准差与簇半径的关系

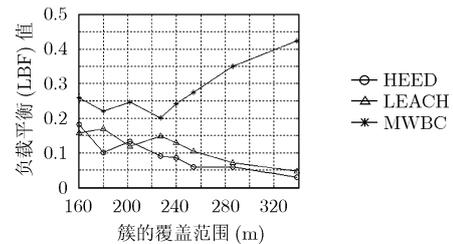


图 3 网络的 LBF 值与簇半径的关系

由上述仿真结果分析可知, MWBC 算法表现出良好的性能, 所得簇的分布更加合理, 表现为更低的簇成员数标准差值与更高的 LBF 值, 且当节点的邻居数大于预设的簇规模限制值 δ 时, 网络的簇的数目趋向于最优值, 各簇的成员数趋于一致, 簇头的负载平衡性极大提高。

4.3.2 改变网络规模

节点的分布区域为 2000m×2000m, 数量为 50~400, 随机放置, 调整节点的发射功率使其邻居数与预设的簇规模 δ 相近, 仿真的结果如图 4~图 7 所示。

图 4 描述了随着网络规模扩大, 网络中簇头数目所占的百分比的变化, 可见, MWBC 算法的簇头所占比重更加稳定, HEED 算法簇头数比例有较大的波动。图 5 显示, 网络

规模扩大的情况下,簇成员数的标准差呈上升趋势, MWBC 算法标准差值较小, 上升的也慢, 说明其受网络规模扩大的影响较少, LEACH 算法波动明显, 表现不稳定。从图 6 的结果看, MWBC 算法的 LBF 值高于 LEACH 与 HEED 算法, 且更加稳定。图 7 是算法选取的簇头的平均能量值, 图中 AveEgy 表示网络中所有节点的能量平均值, 可见, HEED 算法选择的簇头能量平均值最高, 因其仅考虑能量因素, MWBC 算法在兼顾其他因素的情况下, 选取的簇头平均能量要低一些, 但仍然是所有节点中能量较高的那些节点, 而 LEACH 算法簇头选取未考虑能量因素, 簇头的平均能量分布表现出随机性。

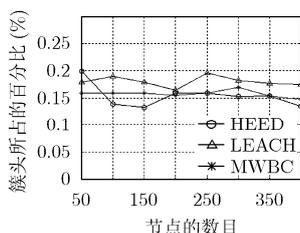


图 4 簇的数目与网络规模的关系

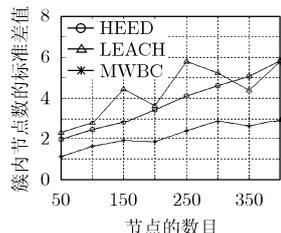


图 5 簇内节点数的标准差与网络规模的关系

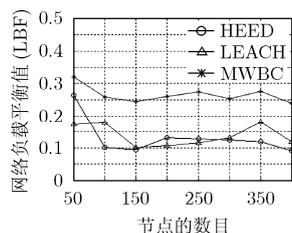


图 6 网络的 LBF 值与网络规模的关系

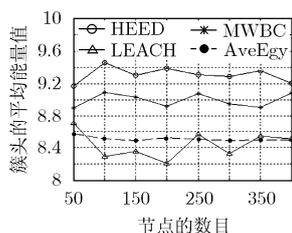


图 7 簇头的平均能量与网络规模的关系

由上可知, MWBC 算法具有较好的稳定性与扩展性, 在网络规模较大时仍具有良好的性能表现。

5 结束语

本文提出了一种无线传感网中的基于多权值优化的分簇算法 MWBC, 其在分簇初期尽量全面地考察局部网络信息, 在迭代中动态计算权值, 以获得局部最优化的簇的分布。根据不同的应用环境, 设置合理的加权因子 w_i 与合适的簇规模, 以获得较优的网络负载分布。仿真表明, 较之 HEED 算法和 LEACH 算法, MEBC 算法可以获得更加合理的簇分布, 具有更佳负载平衡特性。

但是, 线性的加权计算方式存在其局限, 并不能真实地反映出各网络参数的相互关系, 下一步, 我们将结合 MAC 协议设计, 对算法作跨层优化, 同时考虑更好的加权计算方式, 优化分簇算法。

参考文献

[1] Heinzelman W, Chandrakasan A, and Balakrishnan H.

Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.

- [2] Chatterjee M, Das S K, and Turgut D. An on-demand weighted clustering algorithm for Ad hoc networks. Proceedings of IEEE GLOBECOM 2000, San Francisco, November 2000: 1697-1701.
- [3] Gerla M and Tsai Multiclust J T C. Mobile, multimedia radio network. *Wireless Networks*, 1995: 255-265.
- [4] Younis Ossama and Fahmy Sonia. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad hoc sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 660-669.
- [5] Chatterjee M, Das S K, and Turgut D. WCA: A weighted clustering algorithm for mobile Ad hoc networks. *Journal of Cluster Computing*, 2002: 193-204.
- [6] Basagni S. Distributed clustering algorithm for Ad-hoc networks. International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks(ISPAN), 1999: 310-315.
- [7] Bandyopadhyay S and Coyle E. An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. IEEE INFOCOM, New York, 2003: 1713-1723.
- [8] Dhurandher S K and Singh G V. Weight based adaptive clustering in wireless Ad hoc networks. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Personal Wireless Communications(ICPWC), 2005: 95-100.
- [9] Younis O and Fahmy S. Distributed clustering in Ad-hoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach. Proc. of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), HongKong, 2004: 366-379.
- [10] Lindsey S and Raghavendra C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. IEEE Computer Society, Montana, 2002: 1-6.
- [11] Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, and Morris R. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in Ad hoc wireless networks. *ACM Wireless Networks*, 2002, 8(5): 481-494.
- [12] Varshney Maneesh and Bagrodia Rajive. Detailed models for sensor network simulations and their impact on network performance. ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Venice, Italy, 2004: 70-77.
- [13] 孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005, 第4-5章.

黄河清: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络。

姚道远: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络。

沈杰: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络。

刘海涛: 男, 1968年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信、无线传感器网络。