

模糊边缘检测无线传感器网络分簇算法^①

柳相楠, 陈明, 冯国富, 池涛

(上海海洋大学 信息学院, 上海 201306)

摘要: 针对传统分簇算法簇头选举仅单一考虑节点位置或能量分布的问题, 提出了一种基于模糊边缘检测的无线传感网络分簇算法, 该算法综合考虑拓扑边缘信息和节点能量分布, 根据网络能量分布情况调整带宽内边缘节点参与簇头选举的概率。仿真结果表明, 该算法簇头选举相对于 LEACH 算法分布更加合理, 有效延长网络生命周期。

关键词: 无线传感网络; 边缘检测; 分簇算法; 网络生命周期

Wireless Sensor Network Clustering Algorithm Based on Fuzzy Boundary Detection

LIU Xiang-Nan, CHEN Ming, FENG Guo-Fu, CHI Tao

(Information College, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional clustering algorithms consider node location apart from energy distribution, this paper proposes a clustering algorithm based on fuzzy boundary detection, which took into account topological boundary information and node energy distribution, and adjusted the probability that boundary nodes participate in cluster head selection according to the network energy distribution. Simulation results indicate that this algorithm can detect boundary nodes of certain boundary bandwidth, make more sensible cluster head distribution than LEACH, and obviously extend the network lifetime.

Key words: wireless sensor network; boundary detection; clustering algorithm; network lifetime

无线传感网络是一种特殊的无线自组网, 可广泛应用于军事、工业过程控制、卫生保健和环境监测等领域^[1]。由于工作环境以及节点自身的能量限制, 能量有效性成为无线传感器网络设计面临的重要挑战之一^[2,3]。

分簇路由算法具有节能、简单、网络稳定性好、管理方便、可扩展性好等特点, 与平面路由算法相比具有更好的能量有效性及可扩展性^[4]。分簇协议中簇头的产生是簇形成的基础, 如何节省能量和延长网络生命周期是必须考虑的核心问题^[5], 合理的簇头位置分布能够提高网络负载均衡程度, 均衡节点能量, 延长网络生存时间。

文中提出一种基于模糊边缘检测的无线传感网络分簇算法, 综合考虑了网络拓扑边缘信息和节点能量分布情况, 簇头分布更均匀, 分簇更合理。此外, 在

拓扑边缘信息的获取过程中, 仅依靠节点的 2 邻居图拓扑连通信息, 不需要任何 GPS 等定位设备, 降低了实现成本。

1 分簇算法问题分析

能量自适应分簇分级机制(LEACH^[6])中节点自组织成簇, 簇头随机产生, 这种簇头随机产生的方式无法保证簇头节点的合理分布。当簇头分布在边缘区域时, 增大了与汇聚节点间距离, 增加了通信开销; 当簇头节点位置比较集中时, 簇的覆盖域重叠, 网络拓扑结构不够优化; 簇头间距不均匀使得簇头负担的节点数不同, 加重个别簇头负担, 网络负载均衡程度下降^[7]。LEACH 未均衡网络能耗, HEED^[8]考虑到剩余能量对 LEACH 进行了改进; PEGASIS^[9]根据节点位置形成一条相邻节点之间距离最短的链, 并随机选择一

① 基金项目:上海市自然科学基金(11ZR1415700,10ZR1414200);国家高技术研究发展计划(863)(2007AA10Z238)

收稿时间:2011-02-16;收到修改稿时间:2011-03-22

个簇头与基站进行通信，减少了数据通信量，但位置信息的获取通常需要依靠 GPS 等定位设备，实现成本大。以上分簇算法中簇头的选举仅从节点位置或剩余能量方面单一考虑，本文采用基于模糊边缘检测对传统分簇算法进行改进，综合考虑拓扑边缘信息和节点能量分布两方面情况，优化簇头分布，延长网络生命周期。

2 模糊边缘检测分簇算法设计

2.1 网络模型及负载平衡因子

首先建立如下网络模型：

- 1) 传感器节点与汇聚节点部署后不再移动。
- 2) 节点具有唯一的 ID 标识，所有节点初始能量相同。
- 3) 根据接收者距离的远近，节点可以自由调整其发射功率。
- 4) 链路是对称的。若已知对方发射功率，节点可以根据接收信号的强度计算出发送者到自己的近似距离。

无线传感网络中，衡量一个分簇算法的优劣主要有几个标准：网络生存时间、负载平衡程度、簇结构的稳定性和覆盖率等。本文主要从网络生存时间和负载平衡程度两个参数考虑。

负载平衡程度由负载平衡因子 LBF 参数来衡量，公式如下：

$$LBF = \frac{head_num}{\sum_i (x_i - u)^2} \quad (1)$$

其中， x_i 为簇首节点 i 的成员节点数， u 为簇首的平均邻居节点数量， $u = (N - head_num) / head_num$ ， N 为网络中的传感器节点数， $head_num$ 为簇首节点的数量。LBF 的数值越大说明簇的负载越平衡^[10]。

2.2 模糊边缘检测

传统边缘检测^[11-13]的拓扑边缘发现思想仅针对监测区域的最外延边缘节点，未能提供足够的边缘信息参与簇头选举，不适合与分簇算法相结合。因此，本文设计适合与分簇协议相结合的模糊边缘检测，通过调整一跳节点、二跳节点间距得到合适的边缘带宽，利用分布式算法确定区域边缘节点。

如图 1 所示，定义距离节点 p 一跳距离的所有节点及节点间的通信链接为节点 p 的 1 邻居图，记为 G_1 ；定义 G_1 内所有节点的一跳邻居节点以及它们之间的

通信链接（除去 G_1 的部分）称为节点 p 的 2 邻居图，记为 G_2 。若节点 p 是非边缘节点，该节点的 2 邻居图是个完整的圆环；若节点 p 位于边缘则该节点的 2 邻居图是个被边缘分割的断环。

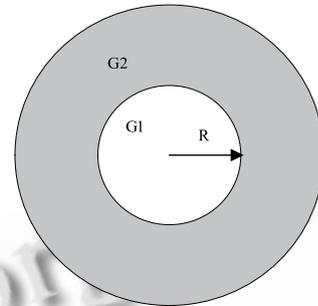


图 1 2 邻居图

程序中引用函数 IsRing(G_2)，如果 G_2 是圆环则返回 true，节点 p 为非边缘节点， $E.nearBoundaries = FALSE$ ；否则 $E.nearBoundaries = TRUE$ 。

此算法中 G_2 存储在本地，对边缘节点的判断也是在本地完成。判断 G_2 的连通性时用到了着色算法，即首先在子图 $G' 2$ 中随机选取一个点 k ，给 k 以及与 k 连接的点着色，判断是否有未被着色的点。若能全部着色，表明 G_2 是连通的；若不能全部着色，表明 G_2 是非连通的。

结合此思想的边缘节点判断过程如下：

1) 对每一个节点 p 建立 2 邻居图，步骤如下：

- ① 发现距离节点 p 为 R 的半径内所有一跳邻居节点，建立节点 p 的一跳邻居表；
- ② 将节点 p 的一跳邻居表发送给半径 R 覆盖范围内的所有节点；
- ③ 发现节点 p 一跳邻居表内节点各自的一跳邻居节点，并以此建立其各自的一跳邻居表；
- ④ 如果节点 p 收到半径 R 内的所有节点的邻居表，根据所有的邻居表建立节点 p 的 G_2 。

2) 根据 G_2 的连通性，判断 $E.nearBoundaries = TRUE$ or $FALSE$ ，步骤如下：

- ⑤ 在 G_2 中随机选择一个节点 t ，以到节点 t 距离 i 将 G_2 分成子图 ($g_0, g_1, g_2 \dots g_i$)，其中 g_0 是连通的。
- ⑥ 如果 g_1 是连通的，将 g_0, g_1 从 G_2 中除去，剩下的部分记为 $G' 2$ 。通过着色算法判断 $G' 2$ 是否连通。若连通：将进行下面的第二次判断，否则： G_2

返回值 false, 节点 p 是边缘节点。

⑦ 在 G2 中找到一点 h0, h0 的邻居集合 hn0 与 g0 邻居集合 gn0 的交集不为零且 $gn0 \not\subset hn0$ 。在 G2 中除去 hn0, 对剩余的部分进行第二次着色, 若连通: G2 返回值是 true, 节点 p 是非边缘节点, 否则返回值 false, 节点 p 是边缘节点。

3) 调整边缘带宽: 如图 1 所示, 2 邻居图宽度和边缘带宽由一跳节点、二跳节点间距决定。通过调整一跳节点、二跳节点间距得到合适的边缘带宽以备进行下一步的簇头选择及成簇。

2.3 簇头选择及成簇

在簇头选择阶段每个节点在通过模糊边缘检测得知拓扑边缘信息后, 节点自身产生 0 到 1 之间的随机数, 根据预先设置的阈值 $T(n)$, 决定是否当成为候选簇头。边缘节点成为候选簇头时, 根据邻居节点的能量信息判定是否转移簇头。未参与竞选的节点进入睡眠状态, 直到簇头竞选过程结束。最终, 所有簇头较为均匀地分布。具体过程如下:

1) 网络节点随机部署后, 都处于 sleep 状态。

2) 等待时间 T_m 后进入第一轮建簇阶段, 每个节点根据模糊边缘检测判断是否是边缘节点。

3) 依据概率 $T(n)$ 选举 M 个候选节点, 形成节点集 K, 剩余 (N-M) 个节点继续保持 sleep 状态。

4) 边缘节点当选为候选节点时, 根据邻居表的能量信息判定是否转移簇头, 如果存在更高能量节点, 将候选簇头转移到能量最高的非边缘邻居节点。

5) 簇头以半径 R 广播消息 msg_head, 邀请邻居节点加入。

6) 邻居节点根据接收到信号最强的消息 msg_head, 向此簇头发送加簇消息 msg_add 包括节点的 ID、E.nearBoundaries、能量状况。

7) 簇头收到 msg_add, 将其 ID、E.nearBoundaries、能量状况信息保存起来, 并回发消息 msg_allow, 确认加簇成功。

8) 簇头给簇成员分发 TDMA 时隙, 之后进入数据传输阶段, 簇头将数据单跳传到基站。

再次簇头选举时, 不必再次判断边缘节点, 过程重复 3) 到 8)。

3 仿真实验

采用 MATLAB7.0 仿真软件, 假设 100m100m 的范

围内随机安放 3000 个节点, 假设每个节点初始能量为 0.5J, 每个数据包的大小为 2000bit, $p=0.05$, $E_{elec}=50nJ/bit$, $\epsilon_{amp}=0.0013pJ/bit/m^4$, $\epsilon_{fs}=10 pJ/bit/m^2$ 。

3.1 模糊边缘检测

调整一跳节点、二跳节点间距为 8。如图 2 所示为 $R=8$ 时的边缘检测图, 红色点表示边缘节点, 黑色点表示非边缘节点。图中可以清晰可见一定带宽的边缘节点, 且边缘带宽近似等于 $R=8$ 。

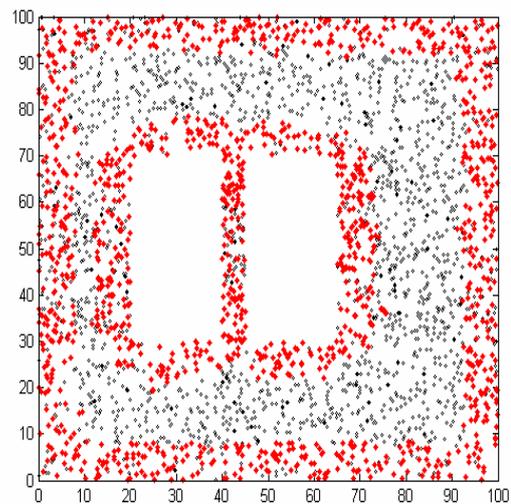


图 2 模糊边缘检测节点分布

3.2 网络生命周期

根据文献[14-15]中提到的能量模型, $E_r(1, d)$ 表示相距为 d 的两个节点间传送 1 位数据消耗的能量, 计算公式如下:

$$E_r(1, d) = E_{Tx-elec}(1) + E_{Tx-amp}(1, d) = \begin{cases} 1 \times E_{elec} + 1 \times \epsilon_{fs} d^2, & d < d_0 \\ 1 \times E_{elec} + 1 \times \epsilon_{mp} d^4, & d > d_0 \end{cases}$$

其中, 前一部分表示发射电路消耗的能量, 后一部分表示放大电路损耗的能量。若传输距离小于阈值 d_0 , 功率放大损耗采用自由空间模型; 当传输距离不小于阈值 d_0 时, 采用多路径衰减模型。

仿真包括簇的形成到数据传输全过程, 生存周期比较结果如图 3 所示, 横坐标表示生存轮数, 纵坐标表示生存节点数, 虚线部分表示传统 LEACH 算法, 实线部分表示基于模糊边缘检测的分簇算法。前者生存轮数大约为 1200 轮, 后者大约为 1400 轮, 生存轮数明显增多, 网络生命周期平均能够提高 10%。

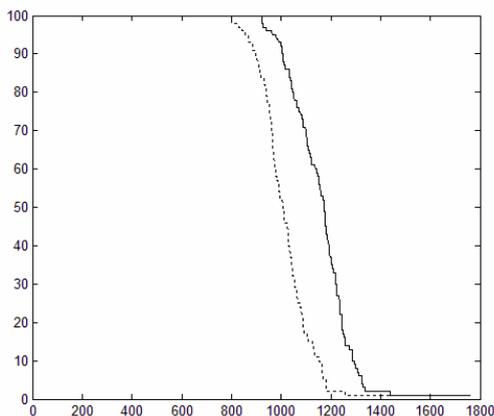


图3 网络生存周期比较

依据公式(1)计算出的基于边缘检测的分簇算法LFB平均值是0.035, LEACH协议LFB平均值是0.023, 显然改进后的负载平衡度优于LEACH协议。

4 结论与进一步工作

本文提出模糊边缘检测分簇算法, 利用模糊边缘检测感知边缘节点, 依据拓扑边缘信息和节点能量分布信息改进传统分簇算法中簇头选举的随机性, 使得分簇均匀, 网络生命周期延长。该算法仅在簇头与汇聚节点之间一跳通信, 今后工作中可以利用该分簇算法得到簇头与汇聚节点之间形成最优路由树, 进一步优化路由, 延长网络生命周期。

参考文献

- 1 Abbasi AA, Younis M. A Survey on clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks. *Computer Communication*, 2007, (30):2826-2841.
- 2 Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002,40(8): 102-114.
- 3 Akkaya K, Younis M. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. *Ad-hoc Networks*, 2005,3(3): 325-349.
- 4 Al-Karaki JN, Kamal AE. Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 2004,11(6):6-28.
- 5 沈波,张世永,钟亦平.无线传感器网络分簇路由协议. *软件学报*,2006,17(7):1588-1600.
- 6 Heinzelman W, Chandrakasan A, 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.
- 7 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. *计算机学报*,2007,30(1):27-36.
- 8 Younis O, Fahmy S. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks. *IEEE Trans. On Mobile Computing*, 2004,3(4):660-669.
- 9 Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. *Proc. of the IEEE Aerospace Conf. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society*, 2002.1125-1130.
- 10 郑少仁,王海涛,赵志峰,等. *Ad Hoc 网络技术*.北京:人民邮电出版社,2005.
- 11 Dinh TL. Topological Boundary Detection in Wireless Sensor Networks. *Journal of Information Processing Systems*, 2009,5(3):145-150.
- 12 Zhang C, Zhang YC, Fang YG. Localized algorithms for coverage boundary detection in wireless sensor networks. *Wireless Network*, 2009,15(1):3-20.
- 13 Wang Y, Gao J, Joseph S, Mitchell B. Boundary recognition in sensor networks by topological methods. *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*. Los Angeles, CA: September, 2006.23-29.
- 14 Rappaport T. *Wireless Communications: Principles & Practice*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 1996.
- 15 Wang XG, Zhang XM, Chen GL. An adaptive and distributed clustering scheme for wireless sensor networks. *IEEE 2007 International Conference on Convergence Information Technology*, San & Francisco: IEEE Computer Society Press, 2007. 522-527.