

无线传感器网络分级成簇路由算法^①

徐世武

(福建师范大学 协和学院信息技术系, 福州 350117)

摘要: 针对时间驱动的数据收集方式, 即不同类型的传感器以各自的周期采集数据, 提出了一种多级分簇路由(HCRA)算法. 在异构无线传感器网络中, 应该均衡各类传感节点的能耗. HCRA 算法在选举簇首节点时, 充分考虑节点的数据采集周期, 采用分级的门限阈值, 提高了采集数据周期较高的节点成为簇首的概率与频率, 延长了采集数据周期较低的节点生存时间. 实验仿真表明, 与 LEACH、LEACH-MAC 算法对比, 在多级异构网络模型下, HCRA 算法提供了更大的网络生存时间, 提高了网络的稳定期.

关键词: 无线传感器网络; 分级成簇; 异构网络; HCRA; 性能分析

Hierarchical Clustering Routing Algorithm for Wireless Sensor Network

XU Shi-Wu

(Concord College Department of Information Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: In this paper, a hierarchical clustering routing algorithm (HCRA) is proposed for time-driven data collection methods, in which different types of sensors have different data collection period. In heterogeneous Wireless Sensor Networks, the energy consumption of all kinds of sensor nodes should be balanced. In the choice of cluster head node, the data acquisition cycle between different nodes is adequately considered in the HCRA algorithm. The algorithm uses a hierarchical threshold, and the probability and frequency of nodes with higher acquisition cycle becoming cluster head nodes is increased, so it can prolong the life time of nodes with lower acquisition cycle. Compared with the LEACH and LEACH-MAC algorithm, the simulation shows that, in the multilevel heterogeneous network model, the HCRA algorithm provides longer network survival time, and the stability period of the network is improved.

Key words: wireless sensor networks; hierarchical clustering; heterogeneous networks; HCRA; performance analysis

无线传感器网络(WSN)通常是由大量的传感节点构成的移动自组织网络, 节点通常由电池供电, 且较难对所有节点进行能量更换, 因此降低能耗与负载均衡是 WSN 研究的前提^[1,2]. 麻省理工学院的 Wendi B.Heinzelman 等人针对 WSN 提出了一种低功耗的自适应路由协议, LEACH 协议(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[3]. LEACH 协议成为经典的分簇路由协议之一, 依然受到国内外大量学者的关注与研究. 相比于传统的平面路由协议, LEACH 协议算法简单, 且较大的延长了网络节点的生存时间. 文献[4]提出一种改进的 LEACH-MAC 协议, 该协议主要针对 LEACH 协议每轮选举簇首数存在一定的随机性, 目的

在于稳定每轮选举出的簇首个数. 文献[5]中针对节点初始能量不同, 即正常节点, 高能量节点, 超级能量节点, 提出了一种三级异构 EEHC 分簇协议, 三级节点采用各自的簇首选择阈值, EEHC 可以平衡三级节点的生存时间. 文献[6]考虑所有节点的剩余能量以及能耗速率, 提出一种两级的异构模型. 文献[7]中, 作者通过预测网络平均剩余能量, 考虑节点能量异构, 设计一种多级的异构分簇模型, EDCS 算法. 文献[8]中提出了一种 EEPKA 分级聚类路由算法, 根据节点初始能量不同, 监测对象不同选举簇首节点. 如监测温度、湿度等为周期性采集, 监测火警为非周期性采集. EEPKA 算法整个区域分成能量异构与数据采集规律

^① 基金项目:福建省教育厅 A 类科技项目(JA13368);福建师范大学协和学院教学改革研究项目(JG20140207);福建省中青年教育科研项目(JB13263)
收稿时间:2016-05-04;收到修改稿时间:2016-06-12 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005569]

异构两种异构情况. 基于能量异构的分级成簇路由算法, 大部分都是通过节点当前的剩余能量与整个网络每轮的平均能耗来判断节点成为簇首的概率, 而整个网络每轮的平均能耗获取相对较难在计算过程中反而会增加大量不必要的能量浪费. EEPKA 算法主要考虑节点通信范围内的距离, 以及不同距离节点的比例估算来计算平均能耗. 而 EDCS 算法结合上一轮消耗的平均能量与上一轮分簇后的能耗来估算本轮的平均能耗. 文献[9]提出基于能量异构的分簇路由 MHCOA 算法, 高能量节点充当簇首节点, 低能量节点充当成员节点, 然而高能量节点采用的是人工部署, 低能量节点则随机分布. 算法的应用场景受到一定的限制. 文献[10]提出一种 REAC-IN 算法, 根据节点剩余能量以及每簇的平均能量决定选举簇首节点, 分簇同时考虑到孤立节点的处理问题, 节点未收到簇首的加入请求以及通信能耗来决定节点是否成为孤立节点. 通过区域平均能量与节点与簇首的距离决定孤立节点是否通过簇首转发数据, 还是直接与基站通信. 文献[11]中结合模糊逻辑设计一种分级的 SEPFL 分簇协议, 三种模糊输入变量分别为电池能量等级, 节点与基站的距离, 节点的密度. 目的在于选举最优的簇首集, 均衡网络节点的能耗.

文献[4-11]分别从不同的点对 LEACH 算法进行改进与补充, 虽然都是针对异构的 WSN 提出分级成簇的路由算法, 均衡各类节点的能耗, 然而针对的都是能量异构的网络. 文献[12]虽然针对时间驱动的数据收集方式, 提出一种非均匀的分簇路由算法, 但并没有考虑到异构的环境, 即不同类型的传感节点时间驱动周期不同. 本文针对时间驱动的数据收集方式, 即在监控区域内传感节点周期性的采集数据^[12], 考虑到异构的 WSN, 不同类型的传感器以各自的周期采集数据, 提出了一种多级分簇路由(HCRA)算法, HCRA 提高了采集数据周期较高的节点成为簇首的概率与频率, 延长了采集数据周期较低的节点的生存时间.

1 分级成簇路由协议(HCRA)设计

本文先假设三级的异构网络模型, 通过三级进而推广到多级的网络模型.

1.1 异构无线传感器网络模型

我们假设在一个智能温室系统内包括三类传感节点, 分别为光、温度、湿度传感器, 三类节点分别周期

性的采集数据, 并且假设该系统对光、温度、湿度三类参数的要求级别不一样, 该系统对湿度要求高, 温度次之, 对光照要求级别最低, 湿度传感器采集数据的周期 T_1 最短, 温度传感器采集数据周期 T_2 次之, 光照传感器采集数据周期 T_3 最长. 系统模型如图 1 所示, 图 1 中黑色节点为该轮内的簇首节点.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

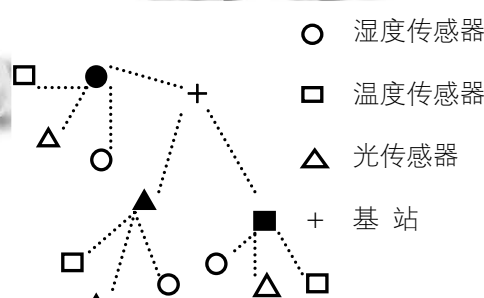


图 1 HCRA 算法的簇型结构

LEACH 协议没有考虑到异构的情况, 每个节点根据式(1)公平的竞选为簇首节点, 式(1)中, p 表示簇首节点所占的百分比, r 为当前循环轮数, G 是在前 $1/p$ 轮中未充当过簇首节点的集合. 显然我们可以知道, 采集周期间隔越短的节点, 本身采集数据的能耗就越大, 如果采用同构的网络模型, 公平的竞选成为簇首节点, 则低周期节点就会过早的死亡, 影响到整个网络的生命周期, 因此我们应该采用异构的网络模型, 降低低周期节点成为簇首的概率与频率, 提高高周期节点成为簇首的概率与频率, 从而均衡整个网络的能耗.

1.2 三级网络模型簇首选择机制的设计

节点接收和发送消息所消耗的能量遵循式(2)和(4)的规律^[3-12]. 式中 L 为传输信息的比特数, d 为节点之间距离. ϵ_{fs} 与 ϵ_{mp} 为我们使用的天线放大模型决定. 湿度、温度、光三类节点采集数据的周期间隔分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 . 我们假设整个分布区域内有 N 个节点, 湿度节点所占的比例为 a , 温度节点所占的比例为 b , 剩下的节点为光节点, $0 < a < 1, 0 < b < 1$. 则我们假设三类节点在单位时间 T 内的平均采集数据间隔 \bar{T} 设置成如式(5)所示. 则三类节点成为簇首的门限阈值 $V(S_1)$ 、 $V(S_2)$ 、 $V(S_3)$ 分别设置成式(6)(7)(8)所示. 在式(6)(7)(8)

中, r 为当前循环轮数, G_1 是在前 $1/P_1$ 轮中湿度传感节点未充当过簇首节点的集合. G_2 是在前 $1/P_2$ 轮中温度传感节点未充当过簇首节点的集合. G_3 是在前 $1/P_3$ 轮中光传感节点未充当过簇首节点的集合. $V(S_1)$ 为 $N \cdot a$ 个湿度传感节点成为簇首节点的选择门限阈值. $V(S_2)$ 为 $N \cdot b$ 个温度传感节点成为簇首节点的选择门限阈值. $V(S_3)$ 为 $N \cdot (1-a-b)$ 个光传感节点成为簇首节点的选择门限阈值. 式(6)表明湿度传感节点在每 $1/P_1$ 轮后都有机会充当为簇首节点. 式(7)表明温度传感节点在每 $1/P_2$ 轮后都有机会充当为簇首节点. 式(8)表明光传感节点在每 $1/P_3$ 轮后都有机会充当为簇首节点. 式(9)中 P_{opt} 为 N 个节点理想的簇首概率值. 从式(9)我们可以看出, 当节点采集数据的周期 T 值越大, 成为簇首的概率就越大, 每回合的更替轮数就越少, 即成为簇首的频率就越快. 相反 T 值越小的节点成为簇首的概率就越低, 每回合的更替轮数就越多, 即成为簇首的频率就越慢. 因此我们提出的 HCRA 算法可以均衡三类节点的功耗.

定理 1. 为了保持整个网络的最佳性能, 在三级网络模型下, HCRA 协议与文献[4-11]一样, 每轮竞选成为簇首的均值 $E(CH)$ 为 $N \cdot P_{opt}$ 个节点.

证明: 我们将式(5)与式(9)代入式(10)中, 可以得到 $E(CH) = N \cdot P_{opt}$, 因此 HCRA 算法可以保持每轮竞选成为簇首的理想个数.

$$E_{rx}(L, d) = \begin{cases} LE_{elec} + L\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ LE_{elec} + L\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (3)$$

$$E_{Rx}(k) = LE_{elec} \quad (4)$$

$$\bar{T} = aT_1 + bT_2 + (1-a-b)T_3 \quad (5)$$

$$V(S_1) = \begin{cases} \frac{P_1}{1 - P_1 \left(r \bmod \frac{1}{P_1} \right)} & S_1 \in G_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$V(S_2) = \begin{cases} \frac{P_2}{1 - P_2 \left(r \bmod \frac{1}{P_2} \right)} & S_2 \in G_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$V(S_3) = \begin{cases} \frac{P_3}{1 - P_3 \left(r \bmod \frac{1}{P_3} \right)} & S_3 \in G_3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_1 = \frac{T_1}{T} P_{opt}, \quad P_2 = \frac{T_2}{T} P_{opt}, \quad P_3 = \frac{T_3}{T} P_{opt} \quad (9)$$

$$E(CH) = aNP_1 + bNP_2 + (1-a-b)NP_3 \quad (10)$$

1.3 多级网络模型簇首选择机制的设计

从 1.2 节的三级异构模型中, 我们进而推导出多级的网络通用模型. 假设整个网络 N 个节点划分成 i 级的异构模型, 即整个网络有 i 类传感器, 则 i 级的异构模型平均采集数据间隔 \bar{T} 设置成如式(11)所示, 式(11)中 a_j 表示第 j 类传感节点所占的比例, T_j 表示第 j 类传感节点数据的采样周期. 多级异构网络中, 节点竞选成为簇首节点的阈值如式(12)所示, 式(12)中, $V_j(n)$ 表示第 j 类传感节点竞选成为簇首的阈值, P_j 表示第 j 类传感节点竞选成为簇首的概率, r 为当前循环轮数, G_j 是第 j 类传感节点在前 $1/P_j$ 轮中未充当过簇首节点的集合.

定理 2. 为了保持整个网络的最佳性能, 在多级网络模型下, HCRA 协议每轮竞选成为簇首的均值 $E(CH)$ 为 $N \cdot P_{opt}$ 个节点.

证明: 我们将式(11)与式(13)代入式(14)中, 可以得到 $E(CH) = N \cdot P_{opt}$, 因此在多级网络模型下, HCRA 算法可以保持每轮竞选成为簇首的理想个数.

$$\bar{T} = \sum_{j=1}^i a_j T_j \quad (11)$$

$$V_j(n) = \begin{cases} \frac{P_j}{1 - P_j \left(r \bmod \frac{1}{P_j} \right)} & \text{if } n \in G_j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_j = \frac{T_j}{T} P_{opt} \quad (13)$$

$$E(CH) = \sum_{j=1}^i a_j NP_j \quad (14)$$

1.4 算法的时间复杂度分析

定理 3. HCRA 算法的时间复杂度为 $O(n^2)$.

证明: HCRA 算法计算每个节点的成为簇首的阈值采用单层嵌套的循环, 因此计算簇首阈值的时间复杂度为 $O(n)$, 随轮数改变, 分级成簇路由协议的构造采用两层嵌套的循环, 时间复杂度为 $O(n^2)$, 因此 HCRA 算法的时间复杂度为 $O(n^2)$.

2 实验仿真分析

我们采用的仿真软件为 MATLAB, 100 个节点随机分布在 $100m \times 100m$ 的区域内, 协调器位于中间位置 (50,50), 融合率为 0.6, $E_{elec} = 50nJ/bit$, $E_{fs} = 10pJ/bit/m^2$,

Emp=0.0013pJ/bit/m4. 簇首节点总的比例 Popt=0.1. 每个节点的初始能量 Ein=0.5J. 在三级的异构网络模型下, 我们对比 HCRA、LEACH、LEACH-MAC 三种协议的性能. 我们假设湿度传感器采集数据的周期间隔 T1=1s(秒), 温度传感器采集数据的周期间隔 T2=2s, 光传感器采集数据的周期间隔 T3=3s(秒). 湿度节点所占的比例为 a, 温度节点所占的比例为 b, 剩下的节点为光节点, $0 < a < 1, 0 < b < 1$.

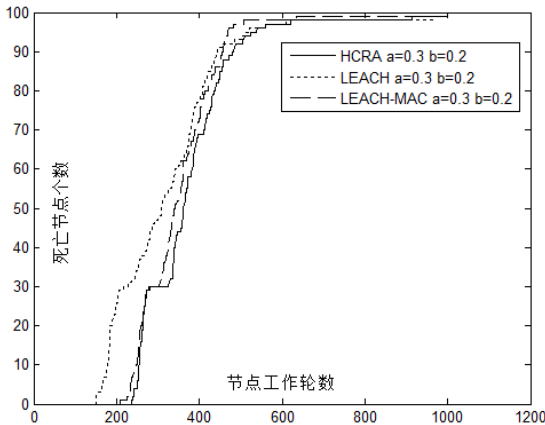


图 2 节点死亡个数对比

从图 2 我们可以看出, 当 a=0.3, b=0.2 时, 从整体来分析, HCRA 算法节点的生存时间都优于 LEACH 与 LEACH-MAC 算法. 相比于 LEACH 协议, LEACH-MAC 在节点生存时间上明显优于 LEACH 算法, 然而该算法没有考虑异构的环境, 因此不能均衡各类节点的能耗.

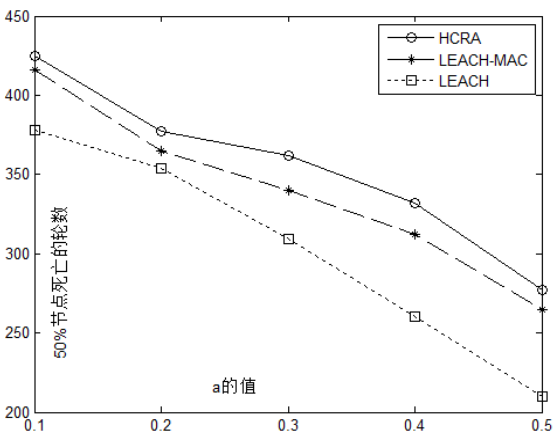


图 3 50%节点死亡轮数对比(b=0.2)

为了更加充分的比对三种算法, 为了方便比对, 我们保持 b 的比例不变, 通过改变 a 的比例来分析三

种协议, 结果如图 3 与图 4 所示, 从图 3, 图 4 我们可以看出, 当 b=0.2 不变情况下, a 分别等于 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 时, HCRA 算法 50%节点死亡的时间以及网络稳定期(第一个节点死亡出现的时间)都明显优于 LEACH 与 LEACH-MAC 协议.

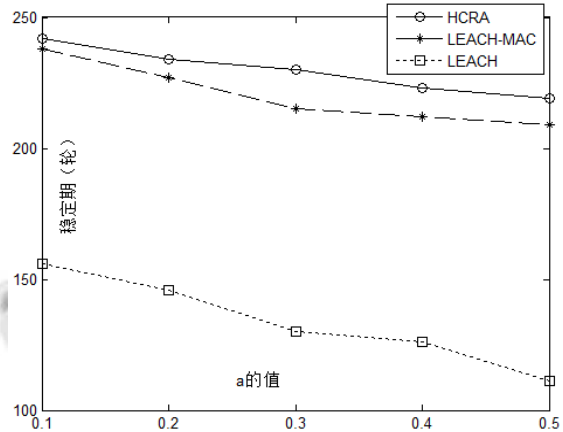


图 4 网络稳定期对比(b=0.2)

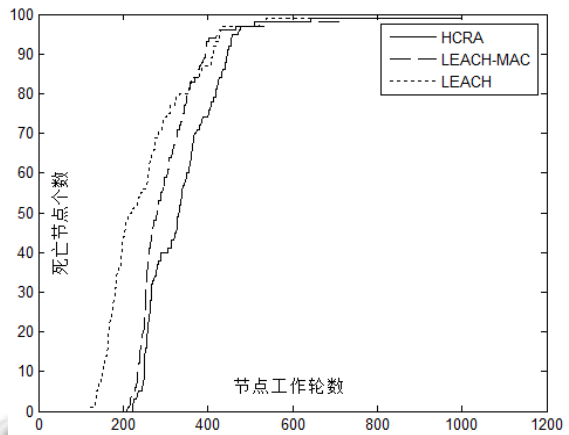


图 5 多级模型下, 节点死亡个数对比

多级异构网络模型性能比较, 假设 100 个节点采集数据的周期随机分布在 [1s,4s] 区间, 为了防止随机性对结果的影响, LEACH、LEACH-MAC、HCRA 三种采用相同数量的采集周期. 每个节点成为簇首的概率如式(13)所示. 从图 5 可以看出, HCRA 的节点生存时间明显优于 LEACH 协议, 且 LEACH 协议的稳定期非常低, 主要是 LEACH 未考虑异构的环境. LEACH-MAC 考虑簇首个数稳定性对整个网络能耗的影响, 网络稳定期明显优于 LEACH 协议, 然而其未考虑异构的环境, 因此稳定期低于 HCRA. 在多级环境下, 相比于 LEACH 协议, HCRA 协议稳定期提高了 43%, 一半节点死亡时间提高了 23%. 相比于 LEACH-

MAC协议, HCRA协议稳定期提高了7%, 一半节点死亡时间提高了16%。

3 总结

本文针对时间驱动的数据收集方式, 结合异构无线传感器网络的特征, 提出一种多级分簇 HCRA 路由协议, 相比于 LEACH 与 LEACH-MAC 分簇路由协议, HCRA 算法能够较好的均衡各类传感节点的能耗, 降低短周期采集数据节点成为簇首的概率与频率。实验仿真表明, 相比于 LEACH 与 LEACH-MAC 算法, HCRA 算法在网络节点的生存时间以及网络稳定期上都优于 LEACH 与 LEACH-MAC 算法。

参考文献

- 1 苏金树, 郭文忠, 余朝龙等. 负载均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法. 计算机学报, 2014, 37(2): 445-456.
- 2 Azrina AA, Sekercioglu YA, et al. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 121-143.
- 3 Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- 4 Batra PK, Kant K. LEACH-MAC: A new cluster head selection algorithm for wireless sensor networks. Wireless Networks, 2016, 22(1): 49-60.
- 5 Kumar D, Aseri TC, Patel RB. EEHC: Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks. Computer Communications, 2009, 32(4): 662-667.
- 6 Zhou HB, Wu YM, Hu YQ, et al. A novel stable selection and reliable transmission protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. Computer Communications, 2010, 33(15): 1843-1849.
- 7 洪榛, 俞力, 张贵军. 多级异构无线传感网高效动态聚簇策略研究. 自动化学报, 2013, 39(4): 454-460.
- 8 Peng J, Liu T, Li H, et al. Energy-efficient prediction clustering algorithm for multilevel heterogeneous wireless sensor networks. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, (3): 1-8.
- 9 Hu S, Han J, Wei X, et al. A multi-hop heterogeneous cluster-based optimization algorithm for wireless sensor networks. Wireless Networks, 2014, 21(1): 57-65.
- 10 Leu JS, Chiang TH, Yu MC, et al. Energy efficient clustering scheme for prolonging the lifetime of wireless sensor network with isolated nodes. IEEE Communications Letters, 2015, 19(2): 259-262.
- 11 Tamandani YK, Bokhari MU. SEPFL routing protocol based on fuzzy logic control to extend the lifetime and throughput of the wireless sensor network. Wireless Networks, 2016, 22(2): 647-653.
- 12 蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议. 软件学报, 2012, 23(5): 1222-1232.