

无线传感器网络改进的 LEACH-ID 算法

施叶玲, 陈彬兵

(四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

(linglong-shi@163.com)

摘要:分析了经典的分簇路由协议 LEACH, 针对 LEACH 中的簇头个数、簇中成员数太多或太少, 从而导致节点加快死亡、网络能量利用率低的问题, 通过计算最优簇头数、控制簇中成员数, 均衡了网络中能量的消耗, 提高了网络能量的利用率, 延长了网络寿命。同时给出一种简单的产生临时 ID 的方法, 保证了相互间较大概率的互异性。仿真实验结果表明, LEACH-ID 协议与 LEACH 协议相比延长了网络寿命, 推迟了第一个死亡节点出现的时间, 提高了能量利用率。

关键词:无线传感器网络; LEACH 协议; 簇头; 临时 ID 号

中图分类号: TP393.04; TN915.04 **文献标志码:** A

Improved LEACH-ID algorithm for wireless sensor networks

SHI Ye-ling, CHEN Bin-bing

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Classical clustering communication protocol of LEACH was analyzed. Concerning the problem that the amounts of cluster heads and too many or too few members of the cluster may cause the accelerated death of the nodes and low energy use of the network, by calculating optimal clustering heads and controlling members of the cluster, the consumed energy was balanced, the usage rate of the network energy was improved and the network's lifetime was prolonged. At the same time, a simple and effective method of assigning temporary ID was given, which can assure the dissimilarity of the IDs with large probability. The simulation results indicate that, compared with LEACH, LEACH-ID extends the lifetime of network, delays the first node's death time, and enhances the energy efficiency.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); LEACH protocol; cluster head; temporary ID number

0 引言

由于工作环境和自身构造所限, 无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 传感器节点的计算、通信能力及能量都十分有限, 对于节点的更换和充电也较难实现。因此, 尽量减少节点能耗、延长网络生存时间已成为 WSN 协议及传输机制研究的一个主要目标, 因此, 如何有效地使用能量降低能耗, 最大化网络生命周期成为无线传感器网络研究的重点之一^[1-3]。

目前, 基于节能的考虑, 人们已提出了各种各样的路由协议。按照网络的拓扑结构划分, 这些路由协议可分为平面路由协议和分簇路由协议。平面路由协议中, 各节点在网络中是地位平等的, 节点间协同工作的算法十分复杂, 并且由于节点单独工作, 导致网络的性能得不到优化, 工作效率低下。分簇路由协议则将部分存在一定关联的节点划分成一个集合, 称为簇, 在该集合中推选某个节点作为中心节点, 称之为簇头, 其余节点则为簇成员。簇头节点对簇内成员节点进行管理从而实现协同工作, 并负责收集簇内的信息和簇间信息转发。分簇路由协议较好地解决了平面路由协议中存在的一些问题, 成为目前路由协议研究的主流^[4-5]。

本文在研究了低功耗自适应集簇型 (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH) 协议及相关改进协议后, 针对

存在的问题, 进行了改进。首先, LEACH 协议没有考虑簇头的数目, 如果簇头个数太多, 采集到的数据有冗余, 消耗较多的能量; 如果簇头个数太少, 簇中成员与簇头通信的距离较远, 同时簇头节点接收的信息量大, 会增加簇头的工作量, 也要消耗较多的能量。文献[4]针对最优簇头数进行了研究, 本文在其基础上进行了改进。其次, LEACH 协议没有考虑簇中节点的数量, 簇中节点数量越多, 簇头消耗的能量越多; 簇中节点数量越少, 簇成员消耗的能量越多, 造成网络能耗不平衡, 本文限制了簇成员数, 使网络能量得到均衡。最后, 为网络中每个节点安装 GPS 设备、分配 ID 号, 会造成额外成本的增加。因此, 本文为每个节点分配临时 ID 号, 降低成本, 具有较强的实用性。

1 LEACH 协议

1.1 LEACH 协议分析

LEACH^[6]是 MIT 的 Chandrakasan 等人为无线传感网络设计的, 其基本思想是以循环的方式随机等概率地选择簇头, 将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中, 从而达到降低网络能量消耗、增加网络整体生存时间的目的。LEACH 协议是完全分布式的。仿真表明, 与一般的平面路由协议和静态分层算法比较, LEACH 可以将网络生命周期延长 15%。

收稿日期: 2010-07-19。

作者简介: 施叶玲 (1985-), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络、智能控制; 陈彬兵 (1966-), 女, 湖北武汉人, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 无线传感器网络、智能控制、全集成自动化。

LEACH 的执行过程是周期性的,定义了“轮”的概念,每轮循环包括两个阶段,即簇的建立阶段和稳定的数据通信阶段,数据通信阶段所用的时间较长。在簇建立阶段,每个节点选取一个介于 0 和 1 之间的随机数,如果这个数小于某个阈值 $T(n)$,则该节点成为簇头。 $T(n)$ 的计算公式为:

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

其中: p 为期望中网络的簇头数占所有节点的比例; r 为当前的轮数; G 为在前 $1/p$ 轮中还没有被选为簇头的节点的集合; \bmod 为求模运算符。

簇头节点选定以后,簇头广播自己成为簇头的消息,未被选为簇头的节点根据接收到广播信号的强弱来决定加入哪个簇,并发送请求信息,收到簇头的允许信息后成为该簇簇成员,完成簇的建立。在稳定阶段,簇内的所有节点按照时分复用(Time Division Multiple Access, TDMA)时隙将采集到的信息传送到簇头节点。簇头将簇中所有数据融合之后再传送给基站。在持续工作一段时间之后,网络进行下一轮的簇头选取工作并重新建立簇,不断循环。每个簇采用不同的码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)代码进行通信以减少其他簇的干扰。

1.2 LEACH 协议的缺点

1) LEACH 协议中在选举簇头时没有控制簇头的数量。如果选举时产生的簇头数太少,那么簇中成员与簇头通信的距离较远,消耗的能量较多,同时簇头节点接收的信息量大,消耗的能量也多;如果选举时产生的簇头数太多,就会有降低网络能量的利用率。

2) 给网络中每个节点分配一个独一无二的 ID 号或者安装 GPS 设备,需要很大的代价。

3) LEACH 协议中没有考虑簇成员的数量。簇中成员数量越多,簇头消耗的能量越多;簇中成员数量越少,簇成员消耗的能量越多,不利于网络能量均衡。

4) LEACH 协议中簇头与基站采用单跳的方式直接与基站通信,节点能量消耗很大,缩短了网络的生存时间。

2 改进的 LEACH-ID 协议

2.1 最优簇头数的公式改进

在 LEACH 路由算法中使用的能量消耗公式是一阶无线通信模式^[7],如图 1 所示。

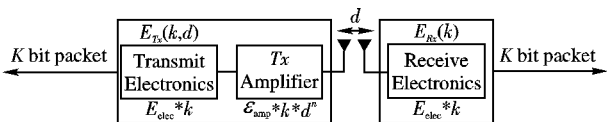


图1 一阶无线通信模型

在这种模式下,每个节点发送 1 位的数据消耗的能量为:

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

每个节点接收 1 位的数据消耗的能量为:

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = l \times E_{elec}$$

其中: E_{elec} 为发送或接收电路消耗的能量; d 为发送节点与接

收节点之间的距离。临界值 d_0 为:

$$d_0 = \frac{\sqrt{\epsilon_{fs}}}{\sqrt{\epsilon_{mp}}} \quad (1)$$

其中: ϵ_{mp} 为多路衰减模型的功率放大系数,当发送距离大于 d_0 时,采用多路衰减模型; ϵ_{fs} 为自由空间模型的功率放大系数,当发送距离小于 d_0 时,采用自由空间模型。

假设节点总数为 N ,随机分布在 M^2 的区域内,簇头个数为 K ,则平均每个簇中成员为 $N/K - 1$,每个簇成员在一轮中发送 1 位的数据,融合 1 位的数据消耗能量为 E_{DA} ,数据融合比例为 ∂ ($0 < \partial < 1$),融合后的数据量为 $L = \partial \times l \times N/K$,那么在一轮中簇头消耗的能量为:

$$E_{CH} = l \times E_{elec} \times \left(\frac{N}{K} - 1 \right) + l \times E_{DA} \times \frac{N}{K} + L \times E_{elec} +$$

$$L \times \epsilon_{mp} d_{toBS}^4$$

簇中每个节点消耗的能量为:

$$E_{no-CH} = l \times E_{elec} + l \times \epsilon_{fs} \times d_{toCH}^2$$

簇中的节点与簇头消耗的总能量为:

$$E_{cluster} = E_{CH} + \left(\frac{N}{K} - 1 \right) \times E_{no-CH} \approx E_{CH} + \frac{N}{K} \times E_{no-CH}$$

K 个簇消耗的总能量为:

$$E_{total} = K \times E_{cluster} = K \times \left(E_{CH} + \frac{N}{K} E_{no-CH} \right) = l \times \left[2N \times E_{elec} + \left(1 - \frac{L}{l} \right) \times K \times E_{elec} + N \times E_{DA} + K \times \epsilon_{mp} \times d_{toBS}^4 + N \times \epsilon_{fs} \times d_{toCH}^2 \right] \quad (2)$$

由于式(2)中的 $\left(1 - \frac{L}{l} \right) \times K \times E_{elec}$ 与其他项比较很小,所以可以忽略不计,则式(2)可化简为:

$$E_{total} \approx l \times \left[2N \times E_{elec} + N \times E_{DA} + K \times \epsilon_{mp} \times d_{toBS}^4 + N \times \epsilon_{fs} \times d_{toCH}^2 \right] \quad (3)$$

假设每个簇中的节点分布在以簇头为圆心的圆内,每个簇平均覆盖的区域面积为 M^2/K ,节点密度为 $\rho(x, y)$,则节点到簇首的距离的平方的数学期望为:

$$E[d_{toCH}^2] = \iint (x^2 + y^2) \rho(x, y) dx dy = \iint r^2 \rho(r, \theta) r dr d\theta \quad (4)$$

其中:圆的半径为 $R = \frac{M}{\sqrt{\pi K}}$,且 $\rho = \frac{1}{M^2/K}$,则式(4)可化简为:

$$E[d_{toCH}^2] = \rho \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{M}{\sqrt{\pi K}}} r^3 dr d\theta = \frac{\rho M^4}{2\pi K^2} = \frac{M^2}{2\pi K} \quad (5)$$

把式(5)代入式(3)中得:

$$E_{total} = l \times \left[2N \times E_{elec} + N \times E_{DA} + K \times \epsilon_{mp} \times d_{toBS}^4 + N \times \epsilon_{fs} \frac{M^2}{2\pi K} \right]$$

对上式中的 E_{total} 求导,令导数等于 0 时求得最优簇头数 K :

$$K_{opt} = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{fs}}}{\sqrt{\varepsilon_{mp}}} \frac{M}{d_{toBS}^2} \quad (6)$$

2.2 临时 ID 号的分配

假设节点总数为 N , 随机分布在 M^2 的区域内, 节点在初始化阶段, 可能没有分配 ID 号^[8], 当网络规模很大、节点比较廉价时, 事先为每一个节点分配一个独一无二的 ID 号的代价很大, 如果为每个节点都安装 GPS 定位设备, 这样需要花费大量的资金且消耗大量的能量, 代价更大。若根据现场节点的分布情况为每个节点分配临时的 ID 号, 可以大大降低开销。

每个节点在 $[1, N^3]$ 内随机选择一个整数作为自己的临时 ID 号, 对于 N 个节点组成的网络, 各节点选择不同的临时 ID 号的概率为 $p_{dif} = 1/N^3$, 所以不同的节点选中同一个整数作为自己临时 ID 号的概率很小, 显然, N 越大, p_{dif} 越小。

2.3 簇头选择

WSN 中节点产生一个 $0 \sim 1$ 的随机数, 如果这个数小于阈值 $T(n)$, 则该节点向基站发送竞选消息, 阈值 $T(n)$ 的计算公式^[9]如下:

$$T(n) = \frac{p}{1 - p(r \bmod \frac{1}{p})} \left[\frac{E_{n_current}}{E_{n_max}} + \left(r_s \div \frac{1}{p} \right) \left(1 - \frac{E_{n_current}}{E_{n_max}} \right) \right] \quad (7)$$

其中: $E_{n_current}$ 表示节点的当前能量; E_{n_max} 表示节点的初始能量; r_s 表示节点连续未当选簇首的轮数, 节点当选簇头后, r_s 置为 0。

2.4 簇的建立阶段簇的建立、稳定通信阶段与簇的维护

簇的建立阶段主要分为簇形成和稳定阶段, 具体步骤如下:

1) 网络中节点从 $[1, N^3]$ 中选择一个整数作为自己的临时 ID 号, 向基站发送消息报告选择的 ID 号, 如果有重复的 ID 号, 则基站向相应的节点发送重选消息。

2) 节点判断自己生成的随机数是否小于阈值 $T(n)$, 如果小于则向基站发送竞选消息。基站将收到的竞选信息与根据网络参数计算出来的最优簇头个数 K 进行比较, 如果基站收到的竞选信息大于 K , 则基站从中选取 K 个节点为簇头; 如果基站收到的竞选信息小于 K , 则基站将发布补选簇头的信息; 如果基站收到的竞选信息恰好等于 K , 基站向全网广播被选为簇头的 ID 号, 节点收到基站的广播消息后与自己的 ID 号相比较, 如果符合就成为簇头。

3) 选定簇头后, 通过广播告知整个网络。网络中的其他节点根据接收到的信号强度来决定加入哪个簇, 并且发送申请加入消息给相应的簇头, 如果簇头接收到的消息多于 $N/K + 5$, 则给其中信号强度较大的 $N/K + 5$ 个节点发送允许信息, 给其他的节点发送拒绝信息。被拒绝的节点给强度次强的簇头发送申请加入消息, 依此类推, 完成簇的建立。对于没有加入任何簇的节点, 让其进入休眠状态, 当下一轮开始时再唤醒该节点。

4) 节点将收集到的信息传输给簇头, 簇头将收到的消息融合, 去掉冗余的消息。当簇头和基站之间的距离较近时, 簇

头直接与基站通信; 当簇头和基站之间的距离较远时, 通过其他簇头以多跳的方式, 选择跳数最小的路径, 把数据传送给基站^[10]。

5) 在数据通信阶段, 如果簇头的剩余能量小于初始能量的 10%, 但一轮还没有结束, 这时簇成员把当前剩余能量报告给簇头, 簇头从中选择出剩余能量最多的节点作为新的簇头, 并把消息向它所在的区域广播, 这是簇的维护。一轮结束后, 按照这个算法从 2) 开始, 重新建立簇。

3 仿真实验和结果分析

本文采用的仿真工具是 Matlab, 仿真环境参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真环境参数设置

参数	参数值
网络覆盖区域	$(0, 0) \sim (100, 100)$ m
基站位置	$(50, 100)$ m
初始能量	0.5 J
多路衰减模型的功率放大系数	10 pJ/(bit · m ⁻²)
自由空间模型的功率放大系数	0.0013 pJ/(bit · m ⁻²)
数据包大小	4000 bit
发送/接收电路能量	50 nJ/bit
数据融合消耗的能量	5 nJ/bit
数据融合率	0.7

根据式(1)和式(6)计算得 d_0 为 87.5 m, 最优簇头数 K 为 5。本文分别从网络存活节点数和网络消耗能量两个方面进行性能分析比较。图 2 为剩余节点曲线, 从中可以看出, LEACH-ID 协议比 LEACH 协议中存活的节点数目多, 有效地延长了网络的生命时间。图 3 为网络能耗曲线, 从中可以看出, LEACH-ID 协议的总能耗明显低于 LEACH 协议。

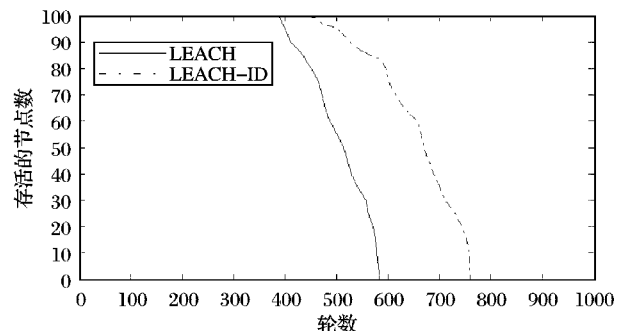


图2 剩余节点曲线图

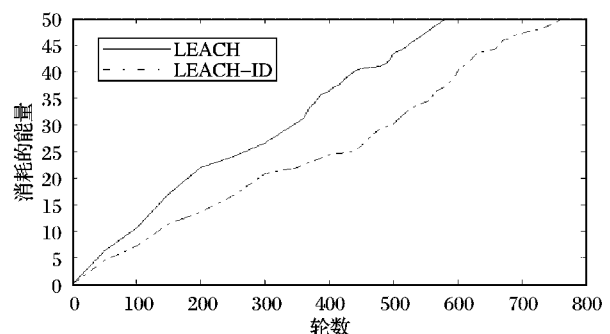


图3 网络能量消耗曲线图

表 2 为节点死亡时间对照表, 列出了第一个节点、半数节点、最后一个节点死亡发生的轮数, LEACH-ID 协议中这 3 类

节点出现的时间晚于 LEACH 协议,为了更好地说明 LEACH-ID 协议的优越性,根据节点死亡时间对照表绘制了网络生命周期柱状图,如图 4 所示。

表 2 节点死亡时间对照表

死亡节点	轮数	
	LEACH	LEACH-ID
第一个节点	372	463
半数节点	498	689
最后一个节点	576	771

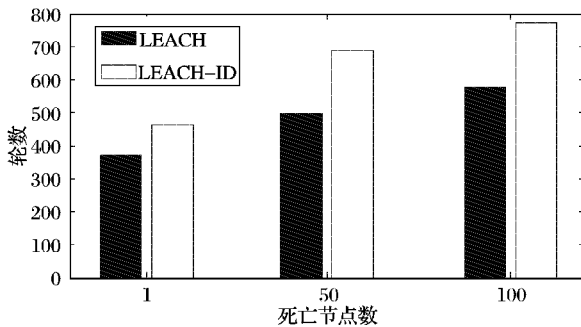


图 4 网络生命周期柱状图

4 结语

本文对 LEACH 协议进行了详细的分析并指出了其存在的问题,针对提出的问题进行改进并提出了 LEACH-ID 协议。LEACH-ID 协议为每个节点分配一个临时 ID 号,根据最优簇头公式计算出最优簇头数,并且在簇的建立阶段对簇中成员数进行控制。在仿真实验中,将 LEACH-ID 协议与 LEACH 协议进行比较,结果显示 LEACH-ID 协议能有效延长网络的工作时间,在一定程度上延长了网络寿命并提高了网络能量的利用率,具有较强的实用性。

参考文献:

[1] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学

出版社,2005.

- [2] 宋文.无线传感器网络技术与应用[M].北京:电子工业出版社,2007:3-11.
- [3] ARICI T, ALTUNBASAK Y. Adaptive sensing for environment monitoring using wireless sensor networks[C]// Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 2347-2352.
- [4] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [5] ZHANG WENYA, LIANG ZIZE, HOU ZENGQUANG, et al. A power efficient routing protocol for wireless sensor network[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 20-25.
- [6] 纪超,徐家品. WSN 中 LEACH 协议簇头生成算法的改进[J]. 微计算机信息, 2008, 24(16): 253-256.
- [7] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor network[C]// IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference on system Science. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [8] RAVELOMANANA V. Optimal initialization and gossiping algorithms for random radio networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(1): 17-28.
- [9] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMAN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]// Proceedings of the 4th IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 368-372.
- [10] 王国芳,李腊元,李春林.无线传感器网络中基于能量约束的簇首多跳算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(7): 997-1001.

(上接第 316 页)

5 结语

在具体实现中,需要考虑的问题是:

1)可以预先设定一个阈值,将计算出的邻组用户的信道冲激响应或者智能天线波束赋形权矢量归一化数值和阈值进行比较,即可分辨出强干扰用户,最终决定参与联合检测的邻群组强用户的数量。

2)目前的研究中一般都是假设基于 SIR 的功率控制是理想无误差的,事实并非如此。

3)目前的研究都假设基站已完全预知系统所有用户的扩频码字、定时信息和信道参数,而在快时变无线信道中,即便是本群组内各用户信息特征也会存在着估计误差^[20],需要考虑这些情况的影响。

4)有必要探索功率控制与基站下行波束赋形及检测进行联合参数优化分析其可能性和其对下行链路发射功率与容量的影响。

参考文献:

[1] 郑辉,陆锦华,丁锐,等.数字集群移动通信系统[M].北京:电子工业出版社,2008:10-124.

- [2] 金荣洪,耿军平,范瑜.无线通信中的智能天线[M].北京:北京邮电大学出版社,2005:165-167.
- [3] ZHANG RUI, CHAI C C, LIANG YING-CHANG. Joint beamforming and power control for multiantenna relay broadcast channel with QoS constraints[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 726-737.
- [4] RASHID-FARROKHI F, LIU K, TASSIULAS L. Transmit beamforming and power control for cellular wireless systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1437-1450.
- [5] ZHENG DANYU, JIANG ZHENG, CHANG YONGYU, et al. A cell search scheme for TD-SCDMA using multi-cell joint detection[C]// IEEE 68th VTC. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008:1-5.
- [6] 苏峰.TD-SCDMA 系统上行链路功率控制研究方案[D].西安:西北工业大学,2005.
- [7] 金晓晓.第三代移动通信系统联合功率控制技术的研究[D].杭州:浙江工业大学,2005.
- [8] ZHOU HUAYU, TANG HUI, ZHANG QIN. Joint detection based on MMSE decision feedback equalization with interference cancellation[C]// Proceedings of NGMAST '09. Cardiff, Wales: [s. n.], 2009:219-223.