

无线传感器网络 LEACH 协议能耗的改进^①

陈 晨, 杨红丽

(北京工业大学 信息学部, 北京 100124)

摘 要: LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 路由协议存在许多不足, 比如簇头选择的随机性太强, 没有考虑簇头的剩余能量等等. 以上不足会增加网络能耗和减少网络寿命. 本文在 LEACH 协议的基础上做了改进, 提出了新的协议 LEACH-CR (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy- Consumption Reduction). LEACH-CR 协议考虑了簇头的数量、分布、剩余能量以及与基站的距离等因素. MATLAB 工具仿真的结果表明改进后的协议有效的提高了网络的寿命.

关键词: 无线传感器网络; 路由协议; LEACH; LEACH-CR

引用格式: 陈晨, 杨红丽. 无线传感器网络 LEACH 协议能耗的改进. 计算机系统应用, 2017, 26(11): 205-212. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6095.html>

Energy Consumption Improvement of LEACH in WSNs

CHEN Chen, YANG Hong-Li

(Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) protocol has many shortcomings, such as the strong randomness of cluster heads' selection, not considering nodes' residual energy when selecting cluster heads. The defects of LEACH protocol will increase the energy consumption of the network and reduce the network lifetime. This paper proposes a new improved protocol named LEACH-CR (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy-Consumption Reduction) based on the research and analysis of LEACH protocol. LEACH-CR protocol takes many factors into consideration including the number, distribution, residual energy and distance to the base station of cluster heads. Finally, the outcome of MATLAB simulation indicates that the new protocol has effectively prolonged the lifetime of the network.

Key words: WSNs; routing protocol; LEACH; LEACH-CR

无线传感器网络 (WSNs) 由很多微型传感器节点组成, 这些节点的功率、内存和计算能力非常有限. WSNs 的应用涉及很多领域, 如军事、森林火灾探测和其他极端情况^[1-3]. 由于传感器节点能量耗尽时很难补充能量或用新的传感器节点代替, 因此, 尽可能地提高无线传感器网络的寿命是非常重要的. 由于传感器节点的能量消耗主要用于传输数据, 因此路由协议对能源的消耗有很大的影响. 如何设计一个高效节能的路由协议成为无线传感器网络的主要目标. 目前, 路由

协议是无线传感器网络的重要领域与研究热门^[4].

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 协议是一个经典的分簇路由协议, 很多分簇路由协议都是以 LEACH 协议为基础, 它被广泛应用于无线传感器网络中. 通过随机选择簇头节点来平衡各传感器节点的能量消耗. LEACH 协议存在以下一些问题: (1) 基站只与簇头节点进行通信, 由于选择簇头是随机的, 所以不能保证簇头节点的数量最优和位置分布均匀^[5]; (2) 因为簇头节点可能远离基站, 在数据传输的过程中

^① 收稿时间: 2017-03-02; 修改时间: 2017-03-27; 采用时间: 2017-04-05

他们会消耗更多的能量,进而缩短网络的生命周期^[6]. 本文提出的改进协议 LEACH-CR 考虑的因素多. 它在选择簇头节点时考虑了节点的剩余能量,从而避免了剩余能量少的节点去充当簇头节点;还确保了每轮的簇头节点数量稳定、分布均匀,从而有效的避免了极大簇和极小簇的发生;并且还解决了某些簇头节点距离基站远而导致过多的能量消耗问题. LEACH-CR 和 LEACH 相比没有额外的能量消耗,也没有增加节点的制作成本和硬件设备.

1 近十年国内外对 LEACH 的研究与改进

1.1 国内外其他工作的改进成果

近十年有许多关于 LEACH 协议的研究与工作,本文简述一下其他的工作与成果.

1.1.1 LEACH-C 协议

LEACH-C 协议是最有名的 LEACH 改进协议,它是由 Heinzelman 等人在 LEACH 的基础上改进的. 针对 LEACH 协议在选择簇头节点方面的不足, LEACH-C 在每轮开始时由基站根据所有节点的剩余能量和位置信息去选择一组最优的簇头节点. 然而 LEACH-C 协议也有自己的缺陷,每轮开始时所有节点都要把自己的剩余能量信息和位置信息发送给基站,从而造成了很大的额外能量消耗^[7].

1.1.2 文献[8]对 LEACH 的改进

文献[8]对 LEACH 协议的 $T(n)$ 公式进行了改进,新的 $T(n)$ 公式考虑了节点的剩余能量因素和密度因素,见公式 (1):

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P \times [r \bmod (1/p)]} \times (\alpha E_p(i) + \beta N(i)) & n \in G \\ 0 & n \notin G \end{cases} \quad (1)$$

其中, $E_p(i)$ 是剩余能量因子,节点 i 的剩余能量越多,它的 E_p 值越大. $N(i)$ 是密度因子,节点 i 的邻居节点越多, $N(i)$ 的值越大. α 和 β 是权值参数.

文献[8]仅仅考虑了簇头的剩余能量因素和密度因素,图 1 是它的仿真结果 ($n=100$, 100×100 , $E=2J$). 其中,横坐标是节点死亡的数量,纵坐标是节点死亡的时间.

1.1.3 文献[3]对 LEACH 的研究与改进

文献[3]也对 LEACH 的 $T(n)$ 公式进行了改进,新公式在选择簇头节点时考虑了节点的剩余能量和与基站距离两个因素. 新的 $T(n)$ 公式如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P \times [r \bmod (1/p)]} \times (1 + \alpha \times k \times (E_{current}/E_{total}) + \beta \times d_2^2 / (d_1^4 + d_2^2)) & n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中, k 是最优簇头数量; α 为能量参数; $E_{current}$ 为当前节点的剩余能量; E_{total} 为当前所有节点的剩余能量总值; β 为距离参数; d_2 为节点到监测区域中心的距离; d_1 为节点到基站的距离. 新的 $T(n)$ 公式使得剩余能量多和距离基站近的节点成为簇头的可能性大.

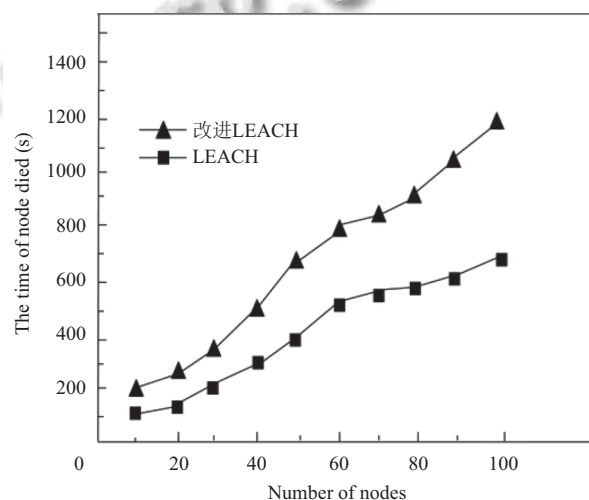


图1 出现节点能量耗尽的时间 (文献[8])

文献[3]在选择簇头节点时仅仅考虑了节点的剩余能量和与基站距离两个因素,并没有考虑簇头节点的数量不稳定以及分布不均匀等问题.

1.1.4 文献[4]对 LEACH 的改进

文献[4]提出的改进协议 LEACH-B 和上面提到的改进协议一样,也是对 $T(n)$ 公式进行了改进,在选择簇头节点时考虑了剩余能量因素. 除此之外, LEACH-B 协议尽可能的避免极大簇和极小簇的发生. 当簇内节点的数量达到 N_{max} ($N_{max}=30$) 时,簇头节点拒绝新节点的加入,新节点选择加入其他簇;当簇内节点数量小于 N_{min} ($N_{min}=4$) 时取消这个簇,簇头节点和簇员节点各自加入其他簇.

LEACH-B 协议在选择簇头节点时考虑了剩余能量因素,并且有效的避免了极大簇和极小簇的发生. 但是没有解决簇头节点与基站距离过远等问题. 图 2 是 LEACH-B 的仿真结果.

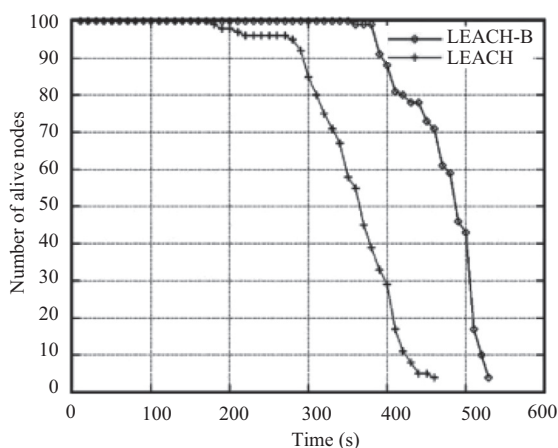


图2 网络存活节点数量(文献[4])

1.1.5 文献[19]对 LEACH 的改进

文献[19]提出了一种基于太阳能簇头选择的新协议 sLEACH(Solar-aware Low Energy Adaptive Clustering Hierar-chy). sLEACH 协议规定一些传感器节点具有把太阳能转化成电能的功能, 从而通过太阳光增加自身电量, 并且让这些节点充当簇头节点, 最终达到延长网络生命周期的目的.

由于具有能量供给的功能, 这种基于太阳能簇头选择的协议肯定比上面提到的协议在生命周期方面更优. 但是要实现太阳能供给的功能, 需要复杂的硬件设备去支持. 这样就增加了经济成本和硬件设备复杂度, 它不符合无线传感器节点的微型、简单和廉价等特点.

1.2 本文工作的创新点

LEACH-CR 协议考虑的因素非常多. 它在选择簇头时既考虑了剩余能量因素, 避免剩余能量少的节点去充当簇头节点; 还确保了每轮的簇头节点数量稳定、分布相对均匀, 有效的避免了极大簇和极小簇的发生; 并且还解决了由于基站距离远而导致的节点过多的能量消耗问题. LEACH-CR 协议和 LEACH 协议相比没有额外的能量消耗, 也没有增加节点的制作成本和硬件设备.

2 LEACH 协议

2.1 LEACH 协议介绍

LEACH 协议^[14]是无线传感器网络中低功耗自适应分簇路由协议. LEACH 协议的网络生命周期比一般的平面多跳路由协议和静态分簇协议多 15%, LEACH 协议的特点是通过随机选择簇头节点使所有节点平摊

通信能耗, 最终达到减少能耗和延长寿命的目的. LEACH 协议由很多“轮”组成, 一轮包括建簇和数据收集两个阶段^[4,10].

建簇阶段: 每一轮开始时, 每一个传感器节点都生成大于 0 小于 1 的随机数, 此随机数和阈值 $T(n)$ 比较大小. 如果随机数小于 $T(n)$, 则此节点成为簇头节点. 成为簇头的节点广播建簇消息, 非簇头节点根据信号强度选择加入信号最强的簇头. 然后簇头节点为自己的簇成员节点分配信道. 阈值 $T(n)$ 的计算公式 (3) 如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-p \times [r \bmod (1/p)]} & n \in G \\ 0 & n \notin G \end{cases} \quad (3)$$

公式 (3) 中, p 是节点成为簇头的概率, r 是当前轮数, r 从 0 开始. G 是本循环内没成为簇头的节点集合.

LEACH 协议数据收集阶段: 所有成员节点把收集到的数据直接发送给自己的簇头节点, 簇头节点收到所有成员节点的数据后进行数据融合, 最后把融合后的数据直接发送给基站.

不同的簇采用不同的 CDMA 代码进行通信^[14], 以减少其他簇的节点干扰^[3,11]. 建簇阶段和数据收集阶段合为一轮, LEACH 协议的运行过程是不断的重复建簇和数据收集阶段, 直到整个网络死亡.

2.2 LEACH 协议的不足

LEACH 协议虽然在一定程度上延长了网络的生存周期, 但是仍然存在如下不足.

(1) LEACH 选择簇头时随机性太强. 因此每轮的簇头数量不稳定, 簇头节点的空间分布也不均匀. 可能会产生极大簇和极小簇. 也可能导致某些簇头节点耗能过多, 从而快速死亡.

(2) 选择簇头节点时没有考虑它的剩余能量, 导致剩余能量很少的节点可能被选为簇头节点, 从而使它们的能量提早的耗尽.

(3) 选择簇头时没有考虑簇头与基站的距离, 所有簇头都是单跳发送数据到基站, 所以离基站过远的簇头消耗能量快. 不利于提高网络寿命.

3 LEACH-CR 协议

3.1 LEACH-CR 的前提条件

针对以上关于 LEACH 协议的不足, LEACH-CR 协议对簇头选择以及数据传输方面做出了改进. LEACH-

CR 协议的前提条件如下文.

- ① 基站距离监测区域较远并且位置固定;
- ② 所有的节点能量有限并且有唯一的 id 标识, 且位置固定;
- ③ 所有的节点都能和基站直接通信;
- ④ 每个传感器节点可以感知自己的位置^[7,12,20].

3.2 LEACH-CR 基本思想

下文将描述协议思想.

(1) 区域分簇. 逻辑上把被监测区域划分成若干小区域, 每个小区域根据包含的节点数量来划分簇 (如果小区域包含的节点数量大于阈值 M 则自己为一个簇, 若小于 M 则与周围的小区域融合直到节点数量大于 M 为止).

首先, 所有节点均匀的随机的分布在监测区域里, 如图 3 所示. 矩形方框是传感器监测区域, 传感器节点用黑色圆点来表示.

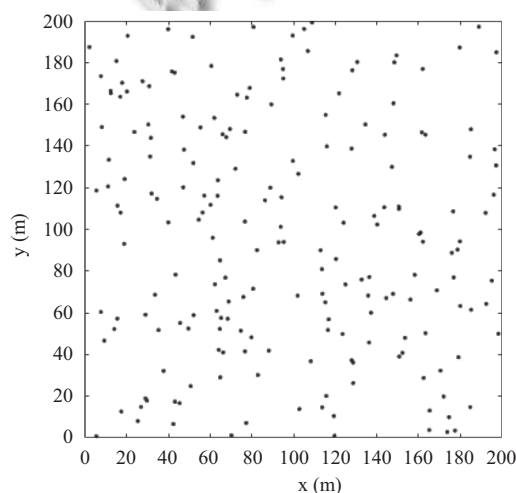


图3 节点随机大致均匀地分布在监测区域内

然后基站在逻辑上把监测区域均匀的划分成若干份. 具体划分几份根据实际情况而定, 本工作划分 9 份. 基站给各个区域标号. 如图 4 所示.

基站根据每个区域所包含的节点数量划分簇: 传感器节点把自身位置信息告诉基站, 所以基站知道所有传感器节点的位置信息, 因此基站知道每个区域所包含的传感器节点的个数. 如果某区域所包含的传感器节点个数不小于 M , 那么它单独为一个簇; 如果某区域所包含的传感器节点个数小于 M , 那么它将与周围区域融合, 直到融合的区域包含的节点个数不小于 M 为止, 最后融合的新区域为一个簇. 最后基站给各个

簇标号. 关于 M 的取值, 本工作取平均值的一半 (假设监测区域里有 n 个节点, 基站把监测区域分为 x 个簇, 那么 $M=n/x/2$), 但是具体情况可以随实际情况而定. 如图 5 所示.

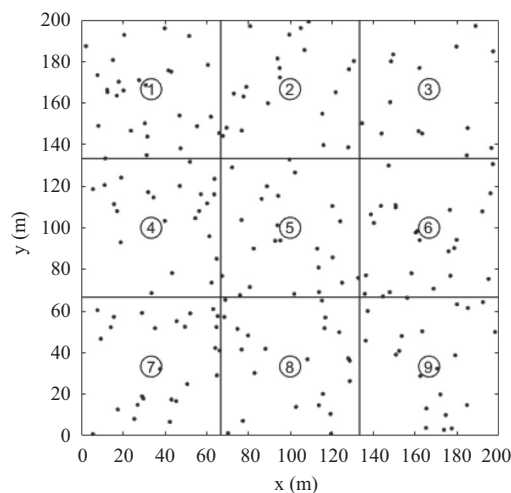


图4 监测区域的逻辑划分图

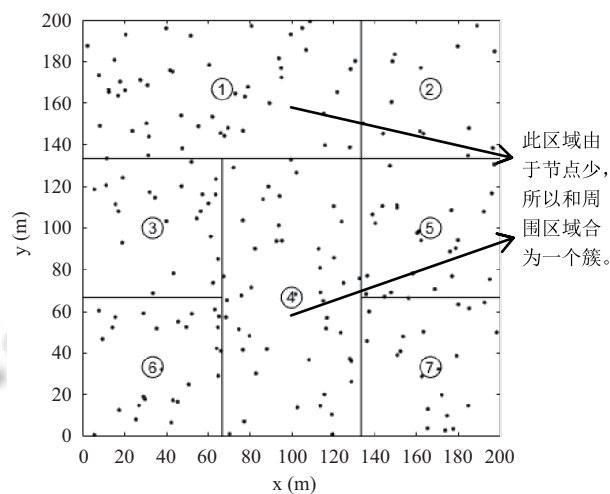


图5 监测区域的分簇图

图 3-图 5 三个图阐明了区域分簇的过程, 同一框内的节点在同一个簇里. 此过程由基站控制完成.

(2) 簇头选择. 每个簇每轮开始时选择簇内剩余能量最多的节点为簇头节点. 所有成员节点把自身信息发送给自己的簇头节点, 然后簇头节点知道所有成员节点的剩余能量信息. 在本轮即将结束的时候, 簇头节点选出剩余能量最多的成员节点为下一轮的簇头节点. 2.4 节有详细介绍.

(3) 簇头节点用单跳或多跳的方式向基站发送数

据. 根据簇头节点与基站的距离把簇头节点分为三类: 距离基站较近的簇头节点、较远的簇头节点、不近不远的簇头节点. 距离基站较近的簇头节点和距离基站不近不远的簇头节点直接把数据发送给基站, 距离基站较远的簇头节点通过多跳的方式给基站传输数据. 2.4 节有详细介绍.

3.3 LEACH-CR 的优势

“区域分簇”思想在逻辑上把被监测区域划分成若干小区域, 每个小区域选出一个簇头节点. 这使得簇头节点大致均匀地分布在被监测区域里, 并且每轮选出的簇头数量基本相同. 所以有效的避免了极大簇和极小簇的发生.

每轮开始时选择剩余能量最多的节点充当簇头节点, 避免了剩余能量过少的节点去充当簇头节点, 从而延长了节点的寿命.

当簇头节点与基站距离过远时, 它把收集到的数据发送给离自己最近的中继节点, 中继节点再把接收的数据转发给基站. 从而避免了由于距离过远而导致的过多能量消耗.

3.4 具体步骤

(1) 建立拓扑结构. 网络中的所有传感器节点把自己的位置信息 (X 坐标和 Y 坐标) 和自身剩余能量发送给基站. 基站收到所有节点的信息后, 然后根据上文提到的“区域分簇”思想对所有节点进行按区域分簇. 若区域中节点的数量大于设定的阈值 M , 则这个区域可以单独成为一个簇; 若某个区域内的节点数量小于阈值 M 值时, 将与周围的小区域合并, 直到合并后的区域中节点数量大于 M 为止, 合并后的区域成为一个簇. 基站获得了整个网络的拓扑结构图.

区域划分完成后, 基站以广播的方式通知网络中每个非簇头节点所在的簇以及自己的簇头节点. 簇头节点收到基站的信息后 (由于传感器节点在初始轮时剩余能量都很多, 所以此轮的簇头节点可以任意选), 知道自己是簇头节点. 每个成员节点向自己的簇头节点发送“加入簇”消息, 簇头节点收到自己所有簇员节点发送的“加入簇”消息后给所有的簇员节点按照 TDMA 方式分配信道, 簇员节点收到消息后会在自己的时隙内发送数据. 所有的簇都用互不相同的 CDMA^[14] 码传输消息和数据进而降低别的簇的节点通信所带来的影响^[4,13].

(2) 数据收集. 所有的成员节点在自己的信道时间

中把收集到的数据信息发送给簇头节点. 簇头节点收集到所有簇员节点发送的数据后, 连同自己收集的数据进行融合^[14], 融合结束后簇头节点通过多跳和单跳相结合的方式将数据发送给基站.

(3) 簇间数据传输. 距离基站较近的簇头节点与基站直接通信, 此类簇头节点收集完簇内的数据后直接将数据发送给基站, 并且担当中继节点; 距离基站不远不近的簇头与基站直接通信, 但是不担当中继节点; 距离基站较远的簇头把收集到的数据发送给距离自己最近的中继节点, 中继节点在收到其他簇头节点发给自己的数据后与自身的数据进行融合. 融合后将数据发送给基站. 如果网络里没有中继节点 (比如距离基站较近的节点都死亡), 那么距离基站较远的簇头节点直接把本簇收集到的数据发送给基站.

(4) 拓扑重建 (选举新簇头). 簇员节点在向自己的簇头节点发送数据的同时, 也把自己的相关信息发送给簇头, 比如 $\langle id, E \rangle$ (节点 id 的剩余能量是 E). 因此簇头节点知道所有簇员节点的剩余能量信息. 数据收集阶段持续一段时间后, 簇头节点消耗了大量的能量, 然后簇头节点指定簇内剩余能量最多的节点为新簇头, 簇头节点通过广播的方式把新簇头节点的 id 通知给簇内所有成员节点, 然后簇头节点变为普通的成员节点. 簇内所有成员节点向新簇头节点发送“加入簇”消息, 新簇头节点向簇内所有成员节点发送信道消息 (分配信道), 然后进入数据收集阶段. 新簇头节点在数据收集阶段持续一段时间后, 再以相同的方法选举下一任簇头^[15].

图 6 所示为 LEACH-CR 协议的簇头节点的数据传输示意图. 在图 6 中, 每个簇由一个或者多个小区域块组成, 每个簇里只有一个簇头节点. 距离基站较近的簇头节点把本簇收集到的数据信息直接发送给基站, 并且担当中继节点. 距离基站不远不近的簇头节点直接把本簇的数据信息发送给基站, 但是不担当中继节点. 距离基站较远的簇头节点把数据信息发送给距离自己最近的中继簇头节点, 由中继簇头节点把数据转发给基站. 图 7 是 LEACH-CR 协议的流程图.

4 仿真和结果分析

4.1 仿真环境

为了评价改进后的路由协议 LEACH-CR, 我们用网络仿真工具 MATLAB 对 LEACH、LEACH-C、LEACH-CR 进行了仿真比较. 发送数据和接收数据的

无线通信能量消耗模型分别为公式 (4) 和公式 (5)^[16]:

$$E_{tx}(k, d) \begin{cases} k \times E_{elec} + k \times \varepsilon_{fs} \times d^2 & d < d_0 \\ k \times E_{elec} + k \times \varepsilon_{amp} \times d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{rx}(k) = k \times E_{elec} \quad (5)$$

其中, $E_{tx}(k, d)$ 表示源节点向距离为 d metre 的目的节点发送 k bit 数据时的能量消耗, $E_{rx}(k)$ 表示节点接收 k bit 数据时的能量消耗. E_{elec} 表示电路的消耗; ε_{fs} 和 ε_{amp} 为放大器自由空间模型的功耗和多路衰减模型的功耗; d 是发送节点与接收节点的距离, d_0 是常数, 取决于传感器网络应用的环境. k 是发送或者接收数据的大小, 单位是 bit. $E_{tx}(k, d)$ 表示一个节点向距离为 d 的另一个节点发送 k bit 数据所消耗的能量. $E_{rx}(k)$ 表示一个节点接收 k bit 数据所消耗的能量.

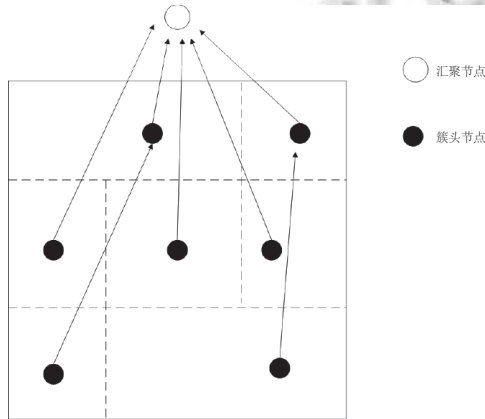


图6 LEACH-CR 协议簇头数据传输示意图

从第一个死亡节点的收集数据轮数和整个网络的收集数据轮数两个方面评价改进后的性能. 仿真环境是: 200 个节点分布在 200×200 的区域内, 基站位于 (100, 250) 处, 数据包的大小为 4000 bit. 控制包的大小为 100 bit. 节点的初始能量为 0.5J, 数据融合消耗的能量为 5 nJ/bit/message, E_{elec} 是 50 nJ/bit, ε_{fs} 是 10 pJ/(bit*m²), ε_{amp} 是 0.0013 pJ/(bit*m⁴), d_0 是 87 m. LEACH-CR 采用与 LEACH、LEACH-C 一样的仿真环境, 把被监测区域分成 $9(3 \times 3)$ 个小区域, 阈值 $M=10$.

4.2 性能指标

路由协议的性能主要以第一个传感器节点的死亡时间为主要依据. 传感器节点开始死亡的时间越晚, 节点死亡的时间越集中, 则协议的性能越好. 如果节点的剩余能量为零的话, 那么认定节点死亡. 如果整个网络的死亡节点数目大于总节点数的 $4/5$ 的话, 那么认定网

络死亡. 因此, 本文以首个节点的死亡轮数和整个网络 $4/5$ 的节点死亡轮数来评估路由协议的性能^[17,21].

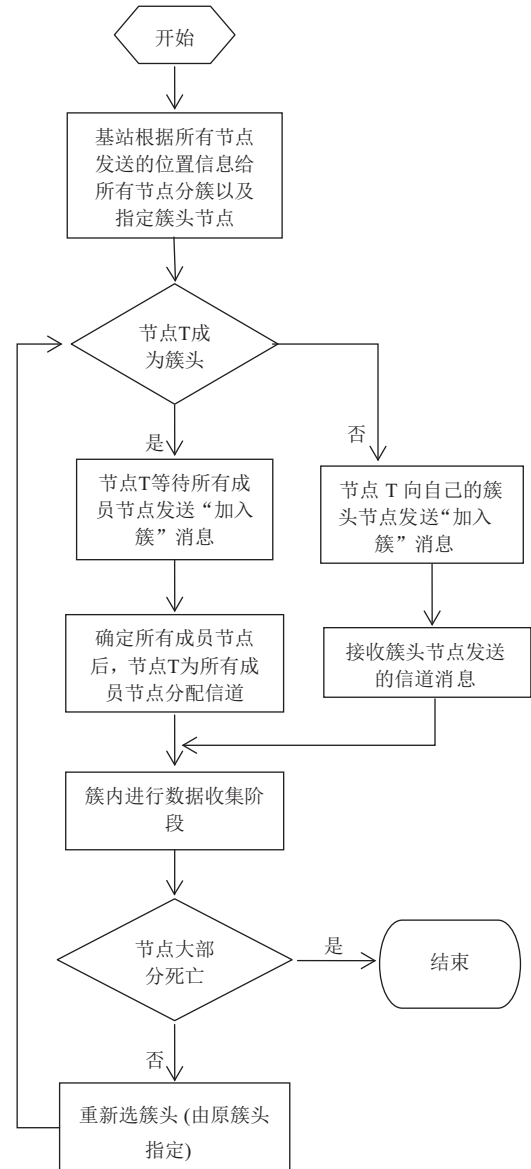


图7 LEACH-CR 协议简略流程图

4.3 仿真结果分析

图8是 LEACH 协议、LEACH-C 协议和 LEACH-CR 协议第一个节点的死亡轮数和网络的死亡轮数的仿真结果. 从图8可以看出, LEACH 协议第一个节点的死亡轮数是 276 轮, 网络的死亡轮数是 770 轮. LEACH-C 协议第一个节点的死亡轮数是 483 轮, 网络的死亡轮数是 851 轮. 而 LEACH-CR 协议第一个节点的死亡轮数是 754 轮, 第一个节点的死亡时间比 LEACH 协议多 170%, 比 LEACH-C 协议多 56%. 网络

的死亡轮数是 940 轮, 网络寿命比 LEACH 协议多 22%, 比 LEACH-C 协议多 10%。图 9 是 LEACH 协议、LEACH-C 协议和 LEACH-CR 协议的网络总能量对比图。随着轮数的增加, LEACH-CR 协议中节点总的剩余能量要高于 LEACH-C 协议, 远远高于 LEACH 协议中的节点总能量。在第 400 轮的时候, LEACH-CR 协议的网络剩余总能量比 LEACH 协议多 66%, 比 LEACH-C 协议多 25%。因此, 不管是网络寿命还是网络剩余能量, LEACH-CR 协议都要优于 LEACH 协议和 LEACH-C 协议。这说明在 LEACH-CR 协议中, 通过“区域分簇”的方法使簇头节点分布均匀、簇头数量稳定以及簇员节点分布集中, 并且选择簇头时考虑了簇头节点的剩余能量, 因而能量消耗均匀地分担在所有传感器节点上, 避免发生有的节点消耗能量少而有的节点消耗能量多, 从而避免了某些节点过快的耗尽能量。距离基站远的簇头节点采用“多跳”的方式给基站传输数据, 这也会大大的降低能量的消耗, 从而延长网络的寿命。

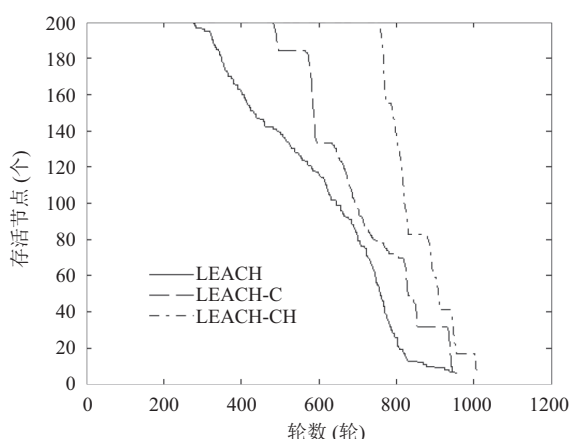


图8 存活节点比较图

5 结束语

通过对传统的 LEACH 协议进行分析, 本文发现 LEACH 协议存在一些不足: 簇头选择的不合理性以及数据传输的距离问题。针对以上不足, 本文对 LEACH 协议进行了改进, 提出了改进后的协议 LEACH-CR, LEACH-CR 协议使簇头节点的数量更加稳定、分布更加均匀。采用 MATLAB 工具对 LEACH 协议、LEACH-C 协议和 LEACH-CR 协议进行仿真比较, 仿真结果表明改进的 LEACH-CR 协议与 LEACH 协议和 LEACH-C 协议相比, 节约了网络的总能量, 增加了节点的存活时间, 最终明显的提高了网络生命周期。

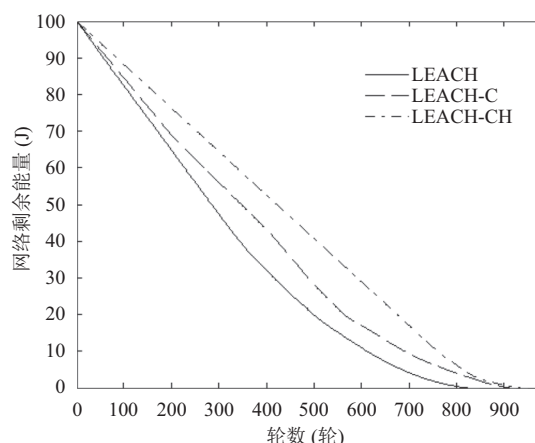


图9 网络剩余能量比较图

改进后的协议 LEACH-CR 与 LEACH 协议一样, 它不适合大规模的网络, 它只能应用于规模较小的无线传感器网络, 因此它有一定的局限性。这也是我们下一步的研究工作。

参考文献

- 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
- 洪锋, 褚红伟, 金宗科, 等. 无线传感器网络应用系统最新进展综述. 计算机研究与发展, 2010, 47(S2): 81-87.
- 李兰英, 刘昌东. 一种无线传感器网络路由协议 LEACH 的改进算法. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(2): 75-79.
- 张伟华, 李腊元, 张留敏, 等. 无线传感器网络 LEACH 协议能耗均衡改进. 传感技术学报, 2009, 21(11): 1918-1922.
- Choe J, Xu J. Energy balancing LEACH for wireless sensor networks. International Journal of Intelligent Information Processing, 2012, 3(2): 56-65. [doi: 10.4156/ijiip.vol3.issue2.8]
- Meghanathan N. An algorithm to determine energy-aware maximal leaf nodes data gathering tree for wireless sensor networks. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2010, 15(2): 96-107.
- 杜超. 基于 NS2 的 LEACH-C 协议分析与仿真. 电子测量技术, 2011, 34(9): 121-123.
- 许建真, 姚丽洁, 袁桂敏. 一种基于 LEACH 协议的簇头选择改进算法. 计算机应用与软件, 2012, 29(11): 262-263.
- Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670. [doi: 10.1109/TWC.2002.804190]
- 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291. [doi: 10.13328/j.cnki.jos.2003.07.013]

- 11 段廷勇, 胡兵. 基于 CDMA 的无线传感器网络误码率分析. 现代电子技术, 2011, 34(3): 53–55.
- 12 彭辉, 陈红, 张晓莹, 等. 无线传感器网络位置隐私保护技术. 软件学报, 2015, 26(3): 617–639. [doi: [10.13328/j.cnki.jos.004715](https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.004715)]
- 13 牛伟伟, 高铁杠. LEACH-C 协议中模拟退火算法的改进. 计算机工程与设计, 2011, 32(6): 1869–1872, 1917.
- 14 Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, HI, USA. 2000, 2. 10.
- 15 Zhao FZ, Xu Y, Li R. Improved LEACH routing communication protocol for a wireless sensor network. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 2012(4): 649609.
- 16 刘明, 龚海刚, 毛莺池, 等. 高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议. 软件学报, 2005, 16(12): 2106–2116.
- 17 秦相林, 王玮琦. 基于延长 WSN 生命周期的 LEACH 算法的改进. 黑龙江科技信息, 2015, (1): 111–112, 60.
- 18 王林, 赵绍英. 无线传感器网络 LEACH 路由协议的研究与改进. 计算机工程与应用, 2012, 48(2): 80–82.
- 19 Aslam M, Javaid N, Rahim A, *et al.* Survey of extended leach-based clustering routing protocols for wireless sensor networks. Proc. 14th International Conference on High Performance Computing and Communication & 2012 IEEE 9th International Conference on Embedded Software and Systems (HPCC-ICESSE). Liverpool, UK. 2012. 1232–1238.
- 20 钱志鸿, 孙大洋, Leung V. 无线网络定位综述. 计算机学报, 2016, 39(6): 1237–1256. [doi: [10.11897/SP.J.1016.2016.01237](https://doi.org/10.11897/SP.J.1016.2016.01237)]
- 21 李悦, 孙力娟, 王汝传, 等. 一种改进的无线传感器网络 LEACH 算法. 计算机研究与发展, 2011, 48(S2): 131–134.