

## 无线传感器网络低功耗自适应分簇协议

李玲<sup>1\*</sup>, 王林<sup>2</sup>, 张飞鸽<sup>2</sup>, 王晓哲<sup>2</sup>

(1. 西安航空学院 机械工程系, 西安 710077; 2. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

(\* 通信作者电子邮箱 55870906@qq.com)

**摘要:** 低功耗自适应分簇(LEACH)协议随机循环地选择群首节点将网络能耗平均分配到每个传感器节点中, 但没有考虑每个节点的剩余能量。为了避免能量较少节点因为当选为群首较快消耗能量而过早死亡, 提出了一种 LEACH-New 节能算法, 根据能量概率选取剩余能量较多的节点作为群首并确定最佳群首个数, 群首收集数据并融合后采用单跳和多跳相结合的方式将数据转发给基站。这样解决了 LEACH 协议能量较少节点当选为群首和群首负载过重的问题, 从而延长网络生存时间。仿真结果表明, 改进后算法有效地减少了网络能量消耗, 保证了网络负载的平衡。

**关键词:** 无线传感器网络; 低功耗自适应分簇协议; 生命周期; 随机数; 最佳群首个数

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A

### Lower energy adaptive clustering hierarchy routing protocol for wireless sensor network

LI Ling<sup>1\*</sup>, WANG Lin<sup>2</sup>, ZHANG Fei-ge<sup>2</sup>, WANG Xiao-zhe<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an Shaanxi 710077, China;

2. The Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** Lower Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) protocol randomly and circularly selects the cluster-head node and evenly distributes network energy consumption to each sensor node, but it does not consider the remaining energy of each node. In order to avoid premature death of the less energy node that was selected as the cluster-head node, an advanced algorithm named LEACH-New was proposed, which was based on the energy probability to select those nodes with more energy as cluster-head and to determine the optimal number of the cluster-head nodes. The cluster-head node collected, fused, then sent the data to the base station by the combined mode of single-hop and multi-hop. This algorithm resolved the problem that less energy node was selected to be cluster-head and cluster-head's energy overloaded in LEACH protocol, so it can prolong the lifetime of whole network. The simulation results show that the improved algorithm effectively reduces the network energy consumption and ensure network load balance.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); Lower Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) protocol; life cycle; random number; optimal number of the cluster-head

## 0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)综合了传感器技术、网络技术和无线通信技术, 在军事、医疗、环保、工业等领域有着广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。如何高效使用能量来最大化网络生命周期是 WSN 面临的首要挑战。

无线微型传感器网络低功耗自适应分簇<sup>[4-7]</sup>(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)协议是一个应用特定协议体系, LEACH 的设计与开发充分考虑了无线微型传感器网络的独特特性。但是, 由于 LEACH 在选择群首时仅考虑了群首的公平性并没有考虑节点剩余能量, 从而可能导致整个网络能量消耗不均衡, 严重影响了网络的生存时间。因此, 本文在 LEACH 协议基础上提出了一种新的群首选择算法 LEACH-New, 同时采用多跳方式传递数据, 延长了整个网络生命周期。

## 1 LEACH 概述

LEACH 将无线传感器网络中的所有节点分为若干个群, 每个群的重构过程用“轮(round)”来描述, 每轮包括群的建立

阶段和稳定状态阶段<sup>[8]</sup>。其中群的建立阶段包括群首的选取和非群首节点的加入, 稳定状态阶段主要完成数据的传输。

### 1.1 群首的选取

在群建立阶段, 传感器节点随机生成一个 0 ~ 1 的随机数, 如果选定的值小于某一阈值  $T(n)$ , 那么这个节点成为群首。 $T(n)$  值的计算<sup>[9]</sup>如下:

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

其中:  $p$  为群首在传感器网络所有节点中所占百分比的期望值,  $p = k/N$ ,  $k$  为网络中群首个数,  $N$  为网络中节点数;  $r$  为当前选举的轮数<sup>[10]</sup>;  $G$  是在  $1/p$  附近轮中没有当选过群首的节点集合。

一旦节点被选为群首, 群首节点立即使网络中所有其他节点知道自己在本轮已经作为群首。每个非群首节点根据群首发送的公告消息的接收强度, 选择通信能量最低的节点作为本轮的群首。每个节点确定了自己的群首后, 必须通知其群首自己是该分群的一个成员。最后群首创建时多分址接入(Time Division Multiple Access, TDMA)时刻表并发送给群内

收稿日期: 2012-04-10; 修回日期: 2012-06-08。

**作者简介:** 李玲(1968-), 女, 山西临县人, 讲师, 主要研究方向: 无线传感器网络; 王林(1963-), 男, 江苏东台人, 教授, 主要研究方向: 无线传感器网、复杂网络; 张飞鸽(1986-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络路由协议; 王晓哲(1986-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络。

成员,为群中的每个节点分配传输数据的时隙,从而完成了群的建立阶段,可以进入稳定状态阶段。

## 1.2 稳定状态阶段

稳定状态阶段也叫作数据传输阶段。成员节点按照 TDMA 时隙向所在群的群首发送采集的数据,然后群首节点对相关数据进行融合,最后将融合结果直接传输给基站。数据传输持续一段时间之后,将重新进行下一轮的群首选取并重新建群。

## 2 LEACH 改进方案

LEACH 算法采用分层的群型结构,路径比较简单;采用本地数据融合,使其在能耗方面的性能较好;群首的动态分配,保证了网络中某些节点的能量不可能迅速耗尽。但是,LEACH 算法选择群首的方法无论是数量上还是位置上都不存在着不稳定性,而且群首节点将数据融合后直接发送给基站,消耗能量较大。

### 2.1 群首改进方案

目前,针对 LEACH 算法的不足已经有许多改进方案。LEACH-C 协议<sup>[7]</sup>采用中心分群算法,其稳定状态阶段与 LEACH 相同,虽然该算法传承了 LEACH 的许多优点,且实现了群首的优化,但是要求每个群首节点定时向基站发送自己的位置信息和剩余能量,导致了网络的能量开销增大。

本文优化群首选择算法的目的就是为了使能量较多的节点比能量较少的节点较常成为群首节点,从而避免了能量较少节点因为当选为群首较快消耗能量而过早死亡,影响网络的生命周期。因此,可以在群首选取过程中添加能量因素,保证剩余能量较大的节点被选为群首,使得所有节点大致在相同时刻耗尽能量而停止工作。

方案一 考虑节点当前剩余能量,结合式(1)调整阈值  $T(n)$ ,可修改为<sup>[10]</sup>:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p[r \bmod (1/p)]} * \frac{E_{\text{current}}}{E_0}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (2)$$

其中: $E_0$ 为初始能量, $E_{\text{current}}$ 为当前能量。该方案虽然考虑了节点的剩余能量,使得能量较高的节点成为群首的概率增大,且保证了选取的群首节点较为合理,但是随着节点能量的降低, $\frac{E_{\text{current}}}{E_0}$ 减小,即阈值  $T(n)$  减小,那么将会导致节点成为群首的概率减小,群首的数目也会减小,群内成员节点到群首的距离增大,造成数据延迟,最终使得网络的生命周期缩短。

方案二 针对方案一的不足,结合式(1)和节点剩余能量调整阈值范围选取群首节点,添加限定条件如下:

$$T(n) > \frac{G_1 E_0 k}{E_{\text{current}} N} \quad (3)$$

其中  $G_1$  为加权系数 ( $0 < G_1 < 1$ )。由式(3)可知,当节点剩余能量越大时,满足限定条件的概率增大,即优化了群首的选择。但是该条件并不能保证节点产生的随机数一定小于阈值  $T(n)$ ,从而不能取得群首最佳个数,影响网络生命周期。

方案三 为了使能量大的节点当选为群首,且保证群首个数在最佳范围内,本文结合能量因素设置随机数,具体思路如下:

设某时刻网络总能量为  $E_{\text{total}}$ ,每个群的平均能量为  $\frac{E_{\text{total}}}{k}$ , $E_{\text{current}}$  为此刻单个节点的剩余能量,因此只要使节点的概率满足式(4),那么能量较多节点比能量较少节点更可能成为群首<sup>[11]</sup>。

$$P = \min \left\{ \frac{E_{\text{current}}}{\frac{E_{\text{total}}}{k}}, 1 \right\} \quad (4)$$

当  $kE_{\text{current}}/E_{\text{total}} > 1$  时,即某个节点的当前能量  $E_{\text{current}} > \lambda NE_0/k$ ,其发生概率虽然很小,但是却不等于零,那么群首节点的期望个数就应该小于  $k$ 。但是为了提高网络性能,选取的群首个数应该在期望值范围内,因此本文假定此条件不可能发生。

当  $kE_{\text{current}}/E_{\text{total}} < 1$  时,节点当选为群首的概率为  $P = kE_{\text{current}}/E_{\text{total}}$ ,设网络运行初始每个节点能量为  $E_0$ ,有  $k$  个分群,那么每个分群的平均能量又可表示为  $\lambda NE_0/k$  ( $0 < \lambda \leq 1$ ),由于随着网络的运行,节点能量减少,每个分群平均能量也会减少,其最大值为  $NE_0/k$ 。如果选取的群首个数  $k$  在群首最佳期望值范围内,要使剩余能量大的节点当选为群首,那么可以结合节点概率  $P$  调整节点产生的随机数  $\beta_0$ ,得到新的随机数  $\beta$  如下:

$$\beta = \frac{\beta_0 \lambda NE_0}{kE_{\text{current}} + \beta_0 \lambda NE_0} \quad (5)$$

由式(5)可知,当节点剩余能量  $E_{\text{current}}$  越大时,其成为群首节点的概率  $P$  越大,随机数  $\beta$  将会减少,同时保证了  $\beta$  在  $0 \sim 1$ ,则越容易满足式(1)的阈值,那么该节点越容易成为群首;然而当节点剩余能量  $E_{\text{current}}$  相对较小时,产生的随机数  $\beta$  就越大,越不容易成为本轮群首节点。该方案不但继承了随机数的质量(均匀性和独立性),而且在随机选取群首时尽可能地保证剩余能量较多的节点当选为群首。

方案三解决了剩余能量较少节点当选为群首造成节点过早消耗能量而失效的问题,与文献[12]相比较,式(5)产生的随机数不但考虑了节点剩余能量和初始能量而且还与群首最佳个数  $k$  有关。如果选取的群首个数满足群首最佳期望值,那么更进一步提高网络性能,延长网络生命周期。但是文献[12]中节点产生的随机数仅考虑节点初始能量和剩余能量并没有考虑群首最佳个数,因此选取的群首个数有可能不在最佳期望值范围内,从而影响整个网络的性能。

从以上分析可以看出,群首节点数目的选取直接影响到该协议性能的优劣,接近或者等于最佳群首个数能够降低网络能耗,提高整个网络性能,从而达到延长网络生命周期的目的。

### 2.2 群首最佳个数的确定

为了降低功耗,每个非群首节点根据所收群首的公告消息的信号强度,采用功率控制设置发送功率<sup>[13]</sup>。假定一个简单的电台硬件能耗模型,在距离  $d$  上发送一条长度  $l$  比特消息的电台能耗为:

$$E_{\text{tx}}(l, d) = E_{\text{tx-elec}}(l) + E_{\text{tx-amp}}(l, d) = \begin{cases} lE_{\text{elec}} + l e_{\text{fs}} d^2, & d < d_0 \\ lE_{\text{elec}} + l e_{\text{mp}} d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中:当  $d < d_0$  (门限值  $d_0$ ) 时,采用自由空间( $f_s$ )模型;当  $d \geq d_0$  时,采用多径(Multipath Propagation, MP)衰落模型。电台电子元器件耗能  $E_{\text{elec}}$ ,  $e_{\text{fs}}$  和  $e_{\text{mp}}$  为信号放大器的放大倍数。接收这条消息的电台能耗为:

$$E_{\text{rx}}(l) = E_{\text{rx-elec}}(l) = lE_{\text{elec}} \quad (7)$$

假设  $N$  个传感器节点分布在一个  $M \times M$  区域中,有  $k$  个分群,每个分群有  $m_x$  个节点。每个群首的能耗包括接收成员节点发送的信号、累积所接收的信号、将累积信号发送给基站。由于基站离节点较远,所以需要采用多跳将信号发送到基站,相对采用多径衰落模型更能节约传感器节点能量。任意一个群首节点所消耗的能量为:

$$E_{\text{CH}} = E_{\text{send}} + E_{\text{fusion}} + E_{\text{receive}} \quad (8)$$

由于群首采用多跳将数据发送给基站,所以群首只需采用自由空间模型将数据发送给中继节点,距离为  $d_{\text{hop}}$ ,群首发送数据时所消耗能量的计算公式为:

$$E_{\text{send}} = lE_{\text{elec}} + l e_{\text{fs}} d_{\text{hop}}^2 \quad (9)$$

设  $l$  为每条数据消息的比特数,  $E_{\text{DA}}$  为融合一个比特数所消耗的能量,假定数据完全累积,所以群首累积所消耗的能量为:

$$E_{\text{fusion}} = lE_{\text{DA}} m_x \quad (10)$$

群首节点接收成员节点消耗能量为:

$$E_{\text{receive}} = lE_{\text{elec}} (m_x - 1) \quad (11)$$

因此,任意一个群首节点所消耗的能量为:

$$E_{\text{CH}} = lE_{\text{elec}} + l e_{\text{fs}} d_{\text{hop}}^2 + lE_{\text{DA}} m_x + lE_{\text{elec}} (m_x - 1) = l(E_{\text{elec}} + E_{\text{DA}}) m_x + l e_{\text{fs}} d_{\text{hop}}^2 \quad (12)$$

考虑到群首节点与成员节点之间的距离不是很远,距离为  $d_{\text{toCH}}$ ,因此每个非群首节点的耗能为:

$$E_{\text{non-CH}} = lE_{\text{elec}} + l e_{\text{fs}} d_{\text{toCH}}^2 \quad (13)$$

假设基站距离传感器场较远,那么群首节点需要经过  $n$  跳才能到达基站,而且每跳都需要数据累积。设每跳距离相等,且都为  $\gamma$ ,即  $d_{\text{hop}} = \gamma$ ,所以中继节点传递消息到基站所消耗的能量为:

$$E_{\text{hop}} = (n - 1)[lE_{\text{elec}} + (lE_{\text{elec}} + l e_{\text{fs}} \gamma^2) + 2lE_{\text{DA}}] \quad (14)$$

一般地,每个分群所在区域是任意形状的区域,节点分布为  $p(x, y)$ ,那么非群首节点到达其群首节点的平方距离期望值为:

$$E[d_{\text{toCH}}^2] = \iint (x^2 + y^2) p(x, y) dx dy = \iint r^2 p(r, \theta) r dr d\theta \quad (15)$$

因为每个群中有  $m_x$  个传感器节点 ( $m_x$  在不同的群中不一定相等),则一个群的面积为  $S = \frac{M^2}{N} m_x$ ,可以将该区域抽象

成一个半径为  $R = \sqrt{\frac{m_x}{\pi N}} M$  的圆,  $p(r, \theta)$  是恒定的,  $r$  为半径,那么式(15)可以化简为:

$$E[d_{\text{toCH}}^2] = p \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{\frac{m_x}{\pi N}} M} r^3 dr d\theta = \frac{M^4 m_x^2}{2\pi N^2} p \quad (16)$$

其中  $p = \frac{N}{M^2 m_x}$ ,则:

$$E[d_{\text{toCH}}^2] = \frac{M^4 m_x^2}{2\pi N^2} p = \frac{M^4 m_x^2}{2\pi N^2} \times \frac{N}{M^2 m_x} = \frac{M^2 m_x}{2\pi N} \quad (17)$$

所以,在这种情况下有:

$$E_{\text{non-CH}} = lE_{\text{elec}} + l e_{\text{fs}} \frac{M^2 m_x}{2\pi N} \quad (18)$$

为了便于推导,每个分群节点个数相等,即  $m_x = N/k$ ,那么最差情况下整个网络的能量消耗为:

$$E_{\text{net}} = [(m_x - 1)E_{\text{non-CH}} + E_{\text{hop}} + E_{\text{CH}}] k = k \left[ (2m_x + 2n - 3)lE_{\text{elec}} + (n\gamma^2 + (m_x - 1) \frac{M^2 m_x}{2\pi N}) l e_{\text{fs}} + (2(n - 1) + m_x) lE_{\text{DA}} \right] \quad (19)$$

由于  $E_{\text{net}}$  是关于  $k$  的函数,根据导数的性质,则可以得到分群个数的最佳期望值为:

$$k_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{M^2 N}{2\pi}} \sqrt{\frac{e_{\text{fs}}}{2(n - 1)(E_{\text{elec}} + E_{\text{DA}}) - E_{\text{elec}} + n e_{\text{fs}} \gamma^2}} \quad (20)$$

对于仿真实验中的参数  $M, N, e_{\text{fs}}, E_{\text{elec}}, E_{\text{DA}}$  都是提前设置好的,其中  $n > 1, \gamma$  的范围需要根据群首节点采用多跳转发消息消耗能量小于直接转发消息到基站消耗能量的条件确定,因此,当  $\gamma < \sqrt{\frac{2E_{\text{elec}}}{n e_{\text{fs}}}}$  时,节点直接发送消息,否则采用多

跳方法转发消息。所以根据式(20)得出了群首最佳个数,即阈值  $T(n)$  (式(1)) 和随机数  $\beta$  (式(5)) 中的群首个数  $k$  得到确定,因此群首数目选取在最佳范围内可以提高网络性能。

由于每个节点到基站的距离不一定相等,群首节点向基站发送消息采用直接发送或者多跳方式发送,因此在给定的仿真实验中只能得到群首节点的最佳范围,所以只要选取的群首在此范围内,就认为是分群个数的最佳期望值。

### 2.3 数据传输策略

上面对无线通信能量消耗模型作了详细分析,得到了群首向基站发送消息时采用直接发送还是采用多跳的方法发送的条件<sup>[14]</sup>,即  $\gamma$  的范围。当  $E_{\text{elec}} = 50 \text{ nJ/bit}, e_{\text{fs}} = 10 \text{ pJ/(bit} \cdot \text{m}^2)$ ,估算得  $\gamma < 100 \text{ m}$ ,从而可以知道,距离小于  $100 \text{ m}$  时单跳比较节约能量,否则多跳节约能量。

在传输模式选择上,群首节点将接收到的数据进行数据融合后发送给中继节点或直接发送到基站。当群首节点在选择多跳方式将数据发送给基站时,群首节点将得到本群首与相邻群首的集合,而且这个集合里的群首到基站的距离要小于本群首节点到基站的距离。如果本群首没有符合要求的相邻群首节点,即集合为空,那么本群首节点只能将数据直接发送到基站。但是,如果集合中的几个群首到基站的距离相同,那么将剩余能量大的节点作为下一中继节点。

### 2.4 改进算法的实现步骤

步骤1 网络初始化,BS将区域的总体信息及其位置打包成消息并以泛洪方式广播;

步骤2 for(  $i = 1; i \leq n; i++$  )

{ 传感器节点随机生成一个  $0 \sim 1$  的随机数  $\beta$ ,并判断  $\beta$  与阈值  $T(n)$  的大小;

if(  $\beta < T(n)$  )

{ 节点  $i$  被选为群首,并广播 ADV 消息;转入等待成员节点的加入状态; }

else

{ 节点接收到来自群首发送的 ADV 消息,选择接收信号最强的群首加入,并向群首发送 Join-REQ 加入消息给群首,转入等待状态; }

}

for(  $i = 1; i \leq k; i++$  )

{ 群首接收成员节点的 REQ 消息,建立群内 TDMA 传输时刻表,并发送给成员节点; }

for(  $i = 1; i \leq N - k; i++$  )

{ 成员节点接收 TDMA 时刻表,根据自身时隙进入稳定工作状态; }

步骤3 群首节点选择路由。

if( 群首  $k$  有数据需要向 BS 发送 )

{

for(  $k = 1; k \leq m; k++$  )

{ 群首与其他群首建立路由表; }

if(  $\gamma < \sqrt{\frac{2E_{\text{elec}}}{n e_{\text{fs}}}}$  )

{ 群首将数据直接发送给 BS }

else

{ 采用多跳方式将数据融合后发送给 BS:

群首以半径  $d_0$  向其周围广播其 ID、剩余能量  $E_i$ 、群首到基站的距离  $d(\text{CH}_i, \text{BS})$  的消息包,从而得到本群首与相邻群首集合  $NCH_i = \{\text{CH}_j, \dots, \text{CH}_k\}$ ,则该群首的中继节点需满足  $XCH_i = \{\text{CH}_x \mid \text{CH}_x \in NCH_i \text{ \& } d(\text{CH}_x, \text{BS}) < d(\text{CH}_i, \text{BS})\}$ ;

if(  $XCH_i = \emptyset$  )



```

{ 群首直接将数据传送到基站; }
else
if(  $NCH_i = NCH_j$  )
{ 将能量大的作为下一跳中继群首节点; }
}
}

步骤 4 if( 稳定工作状态时间完成 )
{ 返回步骤 2, 开始新一轮群首的选取; }

```

### 3 仿真与分析

本文采用 Matlab 软件对 LEACH、LEACH-C 和 LEACH-New 算法进行了仿真实验, 仿真场景如下: 一个  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的传感器场中随机分布了 100 个传感器节点, 基站位于 (50, 175)。节点的初始能量为  $0.5\text{ J}$ , 当节点能量小于等于 0 时, 视为死亡。仿真实验中的通信能量参数设置如下:  $E_{\text{elec}} = 50\text{ nJ/bit}$ ,  $e_{\text{fd}} = 10\text{ pJ}$ ,  $e_{\text{mp}} = 0.0013\text{ pJ}$ ,  $E_{\text{DA}} = 5\text{ nJ}$ , 开始 100 个节点随机分布在传感器场中, 第一轮选取了 4 个节点作为群首, 分布如图 1 所示。

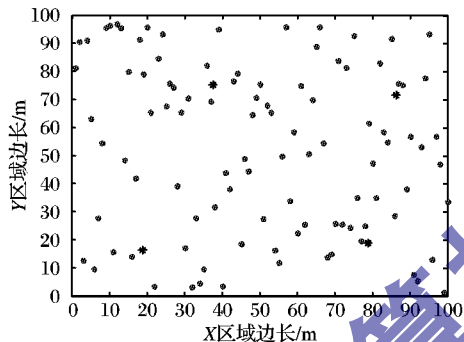


图 1 100 个传感器节点的分布

根据实验仿真设置参数, 在群首采用单跳和多跳方式向基站传递消息情况下, 结合式 (20) 可知, 当群首节点到基站的距离为  $75\text{ m} < d < 183\text{ m}$ , 可以得到群首数目的最佳范围为  $3 \leq k_{\text{opt}} \leq 5$ 。由图 2 可知, 本文采用优化群首选取算法后, 当群首节点个数为 3、4、5 时相对消耗能量较少。为了减少能耗, 本文取群首最佳个数  $k = 4$ , 且当网络中剩余节点数小于等于 4 时视为死亡。

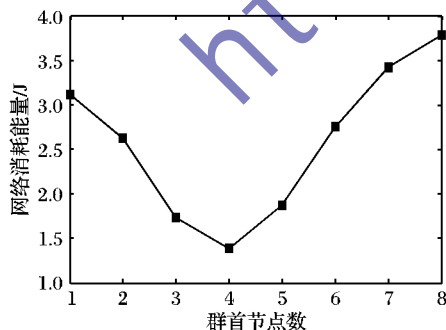


图 2 LEACH-New 在不同群首个数下网络消耗能量

图 3 显示了网络中剩余节点数随着轮数的变化图。从图中仿真结果可以看出, 改进后 LEACH-New 的生存曲线明显优于 LEACH 和 LEACH-C。LEACH 在第 724 轮开始出现第一个死亡节点, 而 LEACH-New 在第 1590 轮才出现第一个死亡节点, 且整个生存时间远远大于 LEACH 和 LEACH-C。从而可知, 新算法不但延长了网络的稳定期, 而且延长了网络的生存时间。

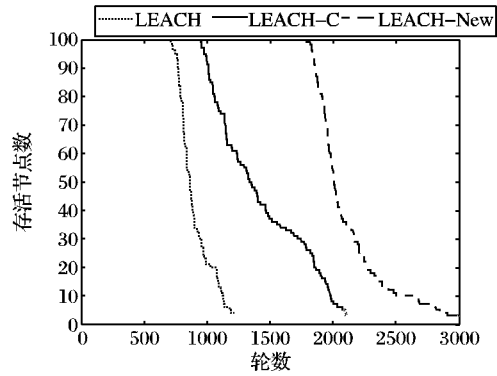


图 3 剩余节点数与轮数的关系

### 4 结语

本文研究了 LEACH 及 LEACH-C 的优缺点, 在此基础上提出了结合节点剩余能量优化随机数的方法, 从而使得选取的群首节点更加合理; 同时对群首最佳个数的期望值进行研究, 并且采用了单跳和多跳相结合的群首间通信机制。仿真结果表明, 新的群首选择算法不但延长了网络的稳定期, 而且延长了网络的生存时间。但是, 在不同的网络应用情景中路由策略应该随之调整, 比如当网络中的节点固定不变时, 通过基站结合节点位置信息和当前能量可以选取合理的节点作为群首, 很多实际问题还需要我们进一步的研究<sup>[15]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 沈帆. 无线传感器网络路由协议研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [2] 彭艾, 黄岚, 王忠义, 等. 无线传感器网络 LEACH 协议的 Petri 网模型及性能分析[J]. 计算机应用, 2009, 29(4): 1059 - 1063.
- [3] 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.
- [4] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282 - 1291.
- [5] 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议[J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588 - 1600.
- [6] 肖伟茂, 王力. 一种基于 LEACH 的无线传感器网络路由算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [7] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 - 670.
- [8] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMAN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]// The 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 368 - 372.
- [9] 王林, 潘军. 无线传感器网络中基于能量优化的路由协议 ANT-LEACH[J]. 计算机应用, 2011, 31(11): 2891 - 2894.
- [10] 刘玉华, 赵永峰, 徐凯华, 等. 无线传感器网络 LEACH 协议的改进[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(17): 117 - 120.
- [11] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless micro-sensor networks[C]// Proceedings of the 33d Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 3005 - 3014.
- [12] 张怡, 李云, 刘占军, 等. 无线传感器网络中基于能量的簇首选择改进算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2007, 19(5): 613 - 616.
- [13] 陈林星. 无线传感器网络技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [14] 杨坤. 无线传感网络中多簇头算法研究与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [15] 张飞鸽. 无线传感器网络路由协议的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.