

WSN 中的能量均衡分层路由协议

赵 明

(中电海康集团研究院, 杭州 310012)

摘要: LEACH 协议是一种经典的无线传感器网络路由协议。该协议的主要缺点是没有考虑节点剩余能量的问题, 也没有利用多跳传输节约节点的能量。提出一种能量均衡的分层路由 EBLRP 协议(Energy-Balanced Layered Routing Protocol)。通过修改簇头选择机制, EBLRP 协议使得剩余能量高的节点成为簇头的概率增加。EBLRP 协议还设计了多跳路由选择机制。该机制综合了节点距离, 剩余能量等因素计算候选路由指标 CRI(Candidate Route Index), 根据 CRI 指标选择合适的下一跳路由节点。计算机仿真结果表明, EBLRP 协议在吞吐量、能量利用效率等方面相比 LEACH 协议有明显优势。

关键词: 分层路由; 能量均衡; 簇头选择; 候选路由指标; 节点距离

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2018)01-0143-06

无线传感器网络是由一组传感器节点构成的无线网络, 其目的是感知并采集网络覆盖区域中感知对象的信息, 并将感知信息发送给监测者。路由协议是无线传感器网络中的关键技术之一。目前, 无线传感器网络路由协议领域的主要研究内容是如何降低传感器节点的能耗, 延长无线传感器网络的生命周期。

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[1] 是一种经典的分簇层次型路由协议, 能够将能耗较为均匀的分布在不同的传感器节点, 延长网络寿命。无线传感器网络中很多路由协议的设计都参考借鉴了 LEACH 的层次化思想, 例如 LEACH-C^[1], TEEN(threshold sensitive energy efficient sensor network protocol)^[2], PEGASIS(power efficient gathering in sensor information systems)^[3], EEHC(energy efficiency hierarchical clustering)^[4], HEED(hybrid, energy-efficient, distributed)^[5], DEEC(distributed energy efficient clustering)^[6] 等。

已有大量研究工作在 LEACH 协议的基础上做了改进或扩展。文献[7]研究了 LEACH 协议的最优分簇个数问题, 分别对 LEACH 协议下的簇头与非簇头节点的能耗进行数学建模, 并基于此导出了使得全网能耗最低的分簇个数。文献[8]分别对 LEACH 协议的簇头选择算法和簇头-基站传输路

由算法进行了修改。该文献采用基于遗传模拟退火的机制由基站每轮选择簇头, 即将 LEACH 协议原有的分布式簇头选择算法改成了一种集中式算法。关于簇头-基站传输路由算法, 文献[8]将 LEACH 中的单跳直接传输方式修改成了单跳与多跳相结合的方式, 减少了由较远节点直接向基站传输数据带来的能耗。文献[9]对 LEACH 协议中的成簇过程进行了修改。与 LEACH 协议中先选簇头再分簇的机制不同, 文献[9]首先利用遗传算法经过多次迭代完成分簇, 目标是各个簇在空间位置分布上较为均匀。完成分簇后, 再综合考虑节点剩余能量, 覆盖度等因素从每个簇中选出簇头。文献[10]在 LEACH 协议的簇头选举过程中, 加入了节点密集度测量机制, 避免选出的簇头周围节点密度过高, 或过于稀疏, 从而提高了簇头的能量利用效率。文献[11]在 LEACH 协议的成簇阶段之前, 插入一个以节点能量为判断标准的筛选过程, 将节点的能量与平均能量相比较, 一旦判断出本节点的能量大大低于平均能量, 本节点立刻进入休眠状态直至新的成簇阶段到来时才重新开启节点, 并再次进行筛选。通过这种机制来延长低能量节点的使用寿命。文献[12]提出的自提名式簇头选举方法利用 LEACH 算法保证在一定回合中所有节点都有机会成为候选簇头, 同时综合考虑节点到基站的距离, 剩余能量和传感器密度确定簇半径。文献[13]

收稿日期: 2017-10-13

作者简介: 赵明(1984-), 男, 浙江杭州人, 中电海康集团研究院, 高级工程师, 博士, 研究方向: 无线传感器网络, 分布式计算等。

在 LEACH 协议的基础上设计了一种基于簇成员个数门限和合并最小簇的方法,在簇头死亡前夕及时休眠簇成员,平衡了节点能量消耗,延长了网络寿命。

由于传统 LEACH 协议的簇头选举机制中没有考虑节点剩余能量分布不均匀的问题,也没有考虑节点离基站的距离,因此在节点剩余能量差异很大的场景下这种协议的能量利用效率会降低。为解决此问题,本文设计的能量均衡分层路由协议(energy-balanced layered routing protocol, EBLRP)对簇头选举机制进行了改进。另外,LEACH 协议中簇头融合簇成员节点的数据后直接发送给基站,对于一些离基站较远的簇头来说尤其消耗能量。为此有必要引入多条机制建立簇头到基站的通信链路。设计一种合适的下一跳路由选择策略是解决该问题的关键。文献[14]设计了一种基于外层-内层簇头节点间请求-确认的路由选择机制。这种机制虽然考虑了簇头剩余能量和负载均衡,但是需要交换大量信令消息,对于能量受限的簇头来说仍然是一项较大的能量消耗,而且也会增加时间开销。EBLRP 协议设计了一种由基站执行的集中式路由选择机制,可以解决上述问题。

1 经典 LEACH 协议

LEACH 协议是无线传感器网络中经典的分层层次型路由协议。LEACH 协议中节点自组织成簇,是一种分布式成簇协议。

LEACH 协议是按“轮”运行的,每轮分为成簇和传输 2 个阶段。成簇阶段主要包括簇头选举和成员加入两个步骤,具体过程为:传感器网络中每个节点产生一个随机数,该随机数服从 0~1 之间的均匀分布。如果这个数小于节点预设的阈值 $T(n)$,则该节点成为簇头节点,同时该节点广播自己成为簇头的信息,否则该节点将成为非簇头节点。非簇头节点根据收到的簇头广播信号能量大小选择能量较高的簇头加入。阈值 $T(n)$ 的表达式为:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{k}{N - k \times r(\text{mod } N/k)}, n \in G \\ 0, \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中, k 是期望的簇头个数, r 是当前运行的轮数, G 是一个集合,包括在最近 $r(\text{mod } N/k)$ 轮中还未当选过簇头的节点。

数据传输阶段包括簇成员发送数据到簇头以及簇头发送数据到基站节点。这两种传输均采用单跳传输的方式。不同簇之间使用 CDMA 机制互不干扰,簇内成员使用 TDMA 机制在分配给自己的时隙

内将数据发送到簇头。簇头接收所有簇成员发送的数据,然后对各成员的数据进行融合,之后各个簇头根据 CSMA 机制将融合后的数据发送给远方的基站节点。

2 传感节点能耗模型

本文使用的能耗模型如图 1 所示。发送端发送 k 比特信息消耗的能量包括两个部分。第一部分是发送电路(包括编码,调制,滤波等部件)消耗的能量,第二部分是功放消耗的能量。因此发送端消耗的总能量是:

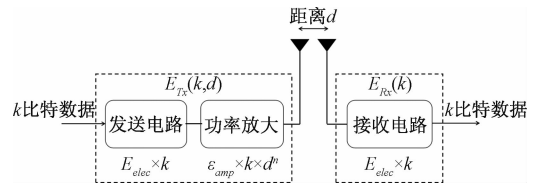


图 1 能耗模型

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^n \quad (2)$$

其中, E_{elec} 为发送电路平均每输出 1 个比特信息所消耗的能量, k 为发送比特数目, d 为通信双方的距离。 ϵ_{amp} 为功放系数, n 为阶数,这两个参数的取值和所采用的信道传播模型有关。当传输距离 d 不大于边界距离 d_c 时,采用自由空间模型, $\epsilon_{amp} = \epsilon_{friss-amp}$, $n=2$ 。当传输距离 d 大于边界距离 d_c 时,采用两径信道模型, $\epsilon_{amp} = \epsilon_{two-ray-amp}$, $n=4$ 。

接收端消耗的能量近似认为只包括接收电路消耗的能量,与发送电路能耗模型相同。

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k \quad (3)$$

3 能耗均衡分层路由协议

LEACH 协议的一个明显不足是没有考虑节点剩余能量的问题,另外簇头融合数据之后直接发送给基站,需要消耗较多的能量。EBLRP 协议通过引入基于剩余能量与节点距离等因素的路由选择指标与分层多跳传输机制,降低簇头与基站通信的能耗;通过设计基于剩余能量和节点到基站距离的簇头选择机制,促进了节点能量消耗在网络中的均匀分布。

3.1 网络模型与假设

在本文中,我们假设网络中共有 N 个传感节点和 1 个基站节点。 N 个传感节点均匀分布在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的区域中,以区域一条边的中点作为原点建立坐标系,基站位于原点,如图 2 所示。

本文采取的其它假设有:

1)通信信道是对称的,两个节点之间的双向通信消耗的能量相等。

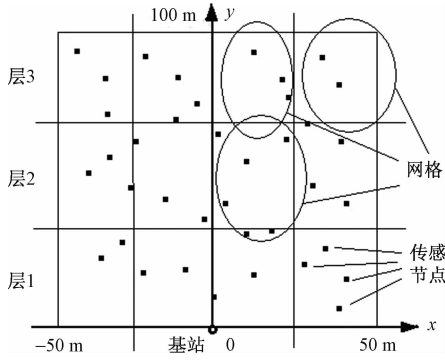


图2 网络模型示意图

2) 基站位置是固定的。

3) 传感节点的能量受限, 基站能量不受限。

4) 每个传感节点均可使用自身的定位装置获取自身位置。每个节点都可以和基站直接通信。

5) 整个区域均匀分成 L 层。在各层中均匀划分 k 个网格, 每个网格中的节点形成一个簇。

3.2 簇头选择

在簇头选择阶段, 给定某个簇 C , 基站首先计算簇 C 中每个节点 Node_i 的剩余能量在簇 C 的总剩余能量中的占比 p_i , 之后以该占比 p_i 为概率决定该节点是否进入候选簇头集合。得到候选簇头集合 M 后, 若随机选择后的候选簇头集合 M 为空, 则选择簇 C 中剩余能量占比 p_i 最大的节点作为簇头。否则, 在 M 中选择距离基站最近的节点作为簇头。剩余能量占比 p_i 的数学定义如下:

$$p_i = E_{\text{res}_i} / \sum_{\text{node}_i \in C} E_{\text{res}_i} \quad (4)$$

簇头选择流程的伪代码如下所示:

流程1 簇头选择流程

```

01: set candidate set M to empty set.
02: calculate total residual energy of cluster C:
03:  $E_{\text{tot}}(C) = \sum_{\text{Node}_i \in C} E_{\text{res}_i}$ 
04: for each node  $\text{Node}_i$  do
05: calculate  $p_i = E_{\text{res}_i} / E_{\text{tot}}(C)$ 
06: generate random number  $r$  between (0,1)
07: if  $r \leq p_i$  then
08:  $M = M \cup \{\text{Node}_i\}$ 
09: end if
10: end for
11: if  $M = \emptyset$  then
12: head of cluster  $C = \arg \max_i p_i$ 
13: else
14: head of cluster  $C = \arg \min_i d_{i \rightarrow \text{BS}}$ 

```

15: end if

3.3 路由选择

为避免簇头直接向基站发送数据, 需要通过多跳传输机制建立簇头到基站的通信链路。选择合适的下一跳节点是建立多跳传输路由的关键。在路由选择阶段, 基站根据已经掌握的各个簇头的剩余能量以及位置信息, 为每一层簇头计算合适的下一跳节点。

具体计算流程是: 给定某一层, 该层包含若干个簇头。基站为每一个簇头 CH_i 计算下一层的每个簇头: $NX_1, NX_2, \dots, NX_j, \dots, NX_c$ 的候选路由指标 CRI (Candidate Route Index)。若下层没有可利用的簇头, 则本层簇头直接发送数据到基站。CRI 的定义如下:

$$CRI_j = \alpha \frac{cE_{\text{res}_j}}{\sum_{j=1}^c E_{\text{res}_j}} - \beta \frac{cd_{i,j}}{\sum_{j=1}^c d_{i,j}} - (1 - \alpha - \beta) \frac{cn_j}{\sum_{j=1}^c n_j + \theta} \quad (5)$$

其中, E_{res_j} 表示下一跳 NX_j 的剩余能量, $d_{i,j}$ 表示簇头 CH_i 到下一跳 NX_j 的距离, n_j 表示 NX_j 已经接受的来自上一层的路由连接数目, θ 为一个略大于零的常数, 目的是防止分母为零。 α, β 为可调节的系数, 用于控制剩余能量, 簇头间距以及路由连接数目三个参数在 CRI 中的贡献权重。

CRI 计算完毕之后, 选择 CRI 最大的下层簇头作为下一跳簇头, 并更新下一跳簇头的路由连接数目 n_j 。

重复执行上述步骤直至所有本层簇头找到下一跳路由。

路由选择流程的伪代码如下所示:

流程2 路由选择流程

```

01: for each layer LAYER_i,  $i=1, 2, \dots, L$  do
02: if  $i == 1$  or no heads in LAYER_i-1 then
03: set base station as next hop of all cluster heads in LAYER_i
04: continue
05: end if
06: for each cluster head  $ch$  in LAYER_i do
07: for each cluster head  $n_j$  in LAYER_i-1 do
08: calculate CRI for  $n_j$  as per (5)
09: end for
10: find the head with the largest CRI:  $n_x$ 
11: set cluster head  $n_x$  as next hop of  $ch$ 
12: increase the connection number of  $n_x$  by 1
13: end for

```

14; end for

3.4 协议整体流程

结合 3.2 中的簇头选择流程和 3.3 中的路由选择流程,就可以形成 EBLRP 协议总体工作流程。EBLRP 协议工作流程的具体步骤如下:

Step 1. 采用和 LEACH 相同的方法进行一轮信息收集,使得基站拥有所有传感节点的剩余能量以及位置信息。

Step 2. 基站对区域中的节点分层,分块。

Step 3. 基站在每个多于一个节点的块中按照流程 1 选举簇头。

Step 4. 基站将簇头选举结果以及成簇信息发布到 WSN 中,各个节点根据选举结果完成自我配置。

Step 5. 按照流程 2 建立簇头间的路由。

Step 6. 进入稳定阶段。完成成员-簇头-基站的数据传输过程。

Step 7. 本轮结束,回到 Step 1. 开始下一轮通信。

4 仿真结果与分析

本文以 NS2 作为仿真平台,对 LEACH-E, LEACH 协议进行仿真,并对比分析其性能指标。表 1 是主要仿真参数及其取值。在 100 m×100 m 的区域中按照均匀随机分布放置了 200 个传感节点与一个基站节点,并且在整个仿真过程中假设所有节点均静止不动。每次仿真时间持续 400 秒。

表 1 主要仿真参数及其取值

参数	取值	数值单位
仿真时间	400	秒
节点总数	200	个
网络覆盖范围	100 m×100 m	—
基站节点位置	(50, 150)	—
数据包长度	4 000	比特
发送/接收电路的能耗 ERF	50	nJ/bit
数据融合能量消耗	5	nJ/bit/packet
自由空间模型放大倍数	10	pJ/bit/m ²
两径信道模型放大倍数	0.001 3	pJ/bit/m ⁴
α	0.6	—
β	0.3	—
θ	10^{-4}	—

4.1 均衡节点初始能量

为评估在节点初始能量均匀的情况下 EBLRP 协议的性能改善程度,本小节将 200 个节点的初始能量均设为 2J/节点,得到以下仿真结果。

图 3 展示了网络中存活传感节点数目随时间变

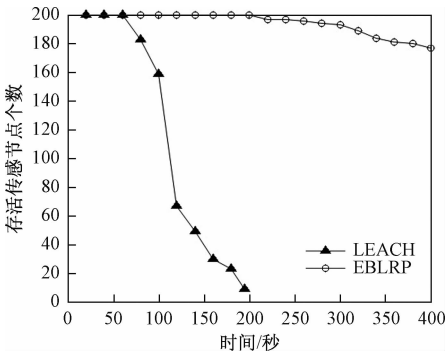


图 3 存活节点数—时间

化的曲线。从图 3 中可以看出,使用 LEACH 协议的网络从 60 秒之后开始出现死亡节点,EBLRP 协议直到 200 秒之后才出现死亡节点。并且 EBLRP 协议存活节点数目下降的速度明显低于 LEACH 协议。出现上述现象的原因是 EBLRP 能充分利用高能量节点的能量,降低了低能量节点耗能的速度,从而使得网络中节点剩余能量的分布比较均匀,延长了大量低能量节点的寿命。而 LEACH 协议只使用随机选择算法确定簇头,虽然节点初始能量分布均匀,但是运行一段时间之后节点剩余能量分布差异逐渐扩大,导致部分节点过早死亡。

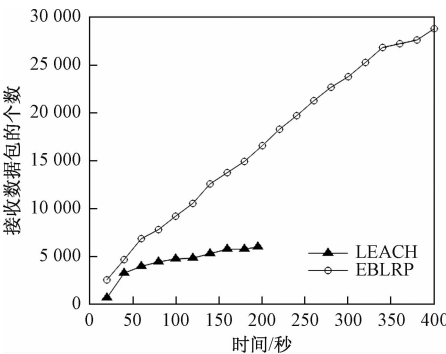


图 4 基站接收数据包个数—时间

图 4 展示了基站累计接收数据包的个数随时间变化的曲线。从图 4 中可见,LEACH 协议对应曲线始终在 EBLRP 协议的下方,且 LEACH 协议对应曲线终止于 200 秒,即全部传感节点死亡导致网络通信中断。EBLRP 协议对应的曲线在整个仿真时间内保持稳定的增长速度。出现这个现象的原因是在 LEACH 协议下,大量节点死亡无法继续发送数据,从而导致基站无法继续接收来自传感网络的数据。而 EBLRP 协议下传感网络的生存周期明显延长,因此能向基站发送更多传感数据。

图 5 展示了网络中传感节点能量总消耗随时间

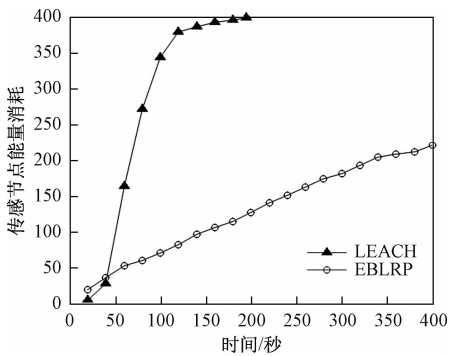


图5 传感节点总能耗—时间

变化的曲线。从图5可以看到LEACH协议能量消耗的速度明显高于EBLRP协议。出现这种现象的原因是在LEACH协议中,没有考虑节点的剩余能量,各节点成为簇头的概率一律相同,这导致一些偏远的节点多次成为簇头,从较远的距离向基站发送汇总后的数据,同时簇内的节点离簇头的距离也较远,从而消耗了更多的能量。而在EBLRP协议中,偏远节点一般无需直接向基站发送数据,这有效减少了由偏远节点成为簇头引起的过多能量消耗,最终降低了传感网络的整体能量消耗速度。

4.2 非均衡节点初始能量

为评估EBLRP协议是否充分利用高能量传感节点,提高网络生存时间,平衡节点能量消耗,本小节将10个传感节点的初始能量设为50J/节点,其余190个传感节点的初始能量设为1J/节点,总计200个传感节点。

图6展示了网络中存活传感节点数目随时间变化的曲线。从图6中可以看出,使用LEACH协议的网络从100秒之后开始出现死亡节点,EBLRP协议直到150秒之后才出现死亡节点。并且EBLRP协议存活节点数目下降的速度明显低于LEACH协议。出现上述现象的原因是EBLRP能充分利用高能量节点的能量,降低了低能量节点耗能的速度,从而延长了大量低能量节点的寿命。而LEACH协议由于过早消耗了低能量节点的能量,从而导致大量低能量节点在运行一定时间后几乎同时死亡。

图7展示了基站累计接收数据包的个数随时间变化的曲线。从图7中可见,110秒之后LEACH协议对应曲线的增长速度急剧下降,而EBLRP协议对应的曲线在整个仿真时间内保持稳定的增长速度。出现这个现象的原因是在LEACH协议下,从100秒开始出现大量节点死亡。这些死亡节点无法继续发送数据,从而导致基站只能收到剩余少数高能量节点产生的数据。而EBLRP协议下簇头主要在高能量

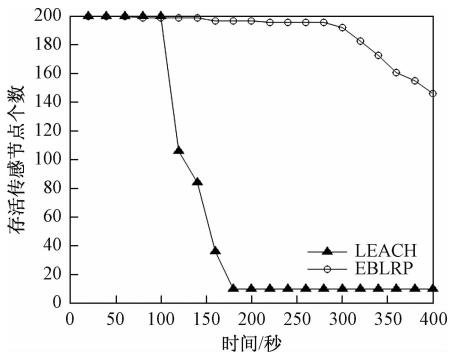


图6 存活节点数—时间

节点中产生,有利于低能量节点生存时间的延长,因此能向基站发送更多的传感数据。

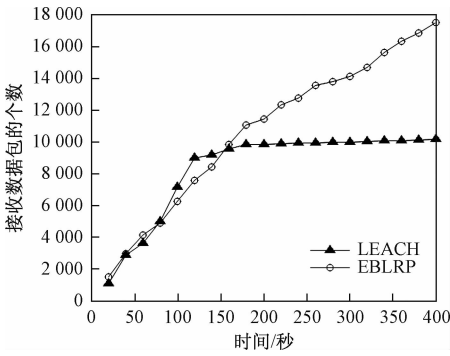


图7 基站接收数据包个数—时间

图8展示了网络中传感节点能量总消耗随时间变化的曲线。从图8可以看到LEACH协议能量消耗的速度明显高于EBLRP协议。出现这种现象的原因是在LEACH协议中,没有考虑高能量节点的因素,各个节点成为簇头的概率一律相同,这导致一些偏远的节点多次成为簇头,从较远的距离向基站发送汇总后的数据,同时簇内的节点离簇头的距离也较远,从而消耗了较多的能量。而在EBLRP协议中,偏远节点即使成为簇头也可以通过多跳的方式向基站发送数据,因此间接节约了能量。

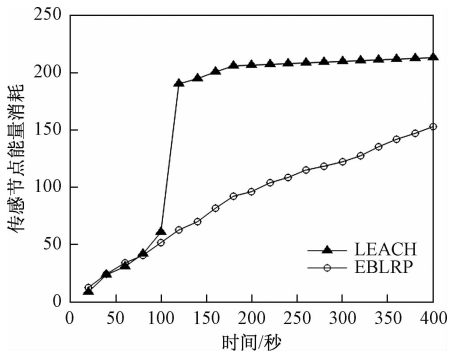


图8 传感节点总能耗—时间

5 结束语

本文回顾了经典 LEACH 协议,并分析了该协议存在的问题。针对该协议未考虑节点初始能量不均匀问题的不足,提出了改进的 EBLRP 协议。计算机仿真结果表明,EBLRP 协议相比 LEACH 协议延长了多数传感节点的使用寿命,增加了基站接收的数据总量,从而提高了能量利用效率。同时,EBLRP 协议仍然存在不足之处,例如未考虑簇成员个数和簇头-基站距离之间的关系,这可以作为下一步工作的研究方向。

参考文献

- [1] W B HEINZELMAN, A P CHANDRAKASAN, H BALAKRISHNAN. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660—670.
- [2] A MANJESHWAR, D P AGRAWAL. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco, April 23—27, 2001. USA: IEEE Communication Society, 2001: 2009—2015.
- [3] S LINDSEY, C S RAGHAVENDRA. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems [C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Montana, March 9—16, 2002. USA: IEEE Aerospace and Electronics Systems Society, 2002: 1125—1130.
- [4] BANDYOPADHYAY S, COYLE E J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks [C]//Proceedings of IEEE Infocom 2003. San Francisco: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003:

1713—1723.

- [5] YOUNIS, S FAHAMY. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(10): 366—379.
- [6] 卿利, 朱清新, 王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 481—489.
- [7] 王琳, 乔礼惠. 无线传感器网络 LEACH 路由协议的研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(17): 4278—4282.
- [8] 余静涛, 胡同森, 钟明霞. 无线传感器网络路由协议的研究与改进[J]. 计算机系统应用, 2009, 18(2): 30—34.
- [9] 周玉, 景博, 杨洲. 一种基于遗传算法的无线传感器网络 LEACH 路由协议的改进算法[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(2): 175—179.
- [10] 吴成东, 陈飞, 纪鹏. 优化 QoS 的基于 LEACH 的无线传感器网络路由协议[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(8): 1091—1094.
- [11] 王慧斌, 俞弦, 徐立中. 无线传感器网络 LEACH 协议的改进[C]//2006 年通信理论与信号处理年会. 北京: 电子工业出版社, 2006: 176—184.
- [12] 汪振前, 赵明, 武正江. 自提名式非均匀分簇路由协议[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(6): 1181—1186.
- [13] 吕涛, 朱清新, 张路桥. 一种基于 LEACH 协议的改进算法[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1405—1409.
- [14] 廖先林, 等. 一种能耗均匀的 WSN 分簇路由协议研究与设计[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(10): 2199—2202.
- [15] 何美红, 许成谦, 张东良. 基于 NS2 的 LEACH 协议仿真与分析[J]. 电子测量技术, 2009, 32(1): 40—42.
- [16] 于斌, 等. NS2 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [17] 彭艾, 黄岚, 王忠义. 基于 NS2 的 LEACH 协议改进[J]. 计算机工程, 2009, 35(21): 97—100.
- [18] 杜超. 基于 NS2 的 LEACH-C 协议分析与仿真[J]. 电子测量技术, 2011, 34(9): 121—123.

Energy-Balanced Layered Routing Protocol in WSN

ZHAO Ming

(Kang CLP Holdings Limited, Hangzhou 310012, China)

Abstract: LEACH is a classical routing protocol in wireless sensor networks. The main drawbacks of this protocol are not considering the factor of residual energy of sensor nodes and not utilizing multi-hop transmission to save nodes' energy. This paper proposes a energy-balanced layered routing protocol (EBLRP). With the modification of cluster head selection mechanism, EBLRP protocol increases the probability that nodes with high residual energy are selected as cluster heads. Moreover, EBLRP protocol designs a mechanism of multi-hop route selection. This mechanism takes the factors of node distance and residual node energy to calculate CRI(Candidate Route Index), and then uses CRI to select proper next hop route nodes. The computer simulation results show that EBLRP protocol has obvious advantages to LEACH in the aspects of throughput and energy utilization efficiency.

Key words: layered route; energy-balanced; cluster head selection; CRI; node distance