

# 分布式负载均衡的非均匀分簇算法<sup>①</sup>

杨永刚, 崔宝同

(江南大学 物联网工程学院, 无锡 214122)

**摘要:** 针对无线传感器网络生存期和能量有效性问题, 提出了一种分布式负载均衡的非均匀分簇算法(DLUC). 算法采用分环模型和逐环数据传输的方式实现簇头间的多跳通信, 通过在不同的环内设置不同的距离阈值, 从而构建规模不等的簇, 有效克服了网络中的“能量热点”问题. 在多跳路由树形成阶段, 综合考虑了中继簇头节点的能量与距离. 仿真结果表明, 与 LEACH 算法和 EEUC 算法相比, DLUC 算法很大程度上均衡了网络节点的能量消耗, 延长了网络生命周期.

**关键词:** 无线传感器网络; 环形分布; 分簇算法; 能耗均衡

## Distributed Load-Balanced Uneven Clustering Algorithm

YANG Yong-Gang, CUI Bao-Tong

(School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem of the lifetime and the energy efficiency in wireless sensor networks, we proposed a distributed load-balanced uneven clustering algorithm named DLUC. The algorithm adopted ring-based model and data transmission from one ring to the neighbor to finish multi-hop communication between cluster heads. It sets distance threshold in different rings to build unequal size of clusters. DLUC can effectively avoid the “hot spots” problem. In the stage of a multi-hop routing tree conformation, we considered the energy and the distance of relay cluster head nodes. Simulation results indicate that compared with LEACH and EEUC, DLUC balances the consumption better and prolongs the lifetime of networks effectively.

**Key words:** wireless sensor networks; ring based model; clustering algorithm; balance energy consumption

无线传感网络(Wireless Sensor Networks, WSN)中网络路由以及应用发布是建立在网络拓扑的基础上的. 由于节点能量严重受限, 有效节约通信能耗且具有很好实时性和扩充性拓扑的分簇算法<sup>[1,2]</sup>成为拓扑控制研究的一个重要方向<sup>[3]</sup>. LEACH(low energy adaptive clustering hierarchy)<sup>[4]</sup>是最早提出的分簇路由协议, 以随机性周期选择簇头的方式来平衡簇头的能量消耗, 以数据融合的方式减小网络中的数据流量. 但是采用单跳的传输机制, 不适用于大规模网络, 簇头的随机选择也会造成簇头分布的不均匀. 其后发展的分簇路由协议大多是基于它的成簇思想而设计的, PEGASIS(power efficient gathering in sensor information

system)<sup>[5]</sup>正是在 LEACH 协议的基础上建立的路由协议, 该协议采用贪婪算法生成一条链, 节点只需要与它最近的邻居节点进行通信, 能有效利用能量, 大幅提高网络的生存时间. 但该协议是一条链式结构, 从而数据传输延时增加, 不适合实时应用. HEED (hybrid energy-efficient distributed clustering)<sup>[6]</sup>算法根据节点剩余能量和通信代价两方面进行综合考虑来确定其是否有资格担任簇头, 有效避免了簇头的不均匀分布. 但是由于节点的能耗不一致, 可能使低能量的节点成为簇头的概率比高能量节点更大, 造成网络寿命缩短. EECS(Energy Efficient Clustering Scheme)<sup>[7]</sup>算法普通成员节点在选择簇首时综合考虑自身到簇首的距离和簇

① 收稿时间:2014-03-31;收到修改稿时间:2014-04-25

首到基站的距离,从而构造规模不等的簇.但该算法仅能缓解簇间能耗的不均衡,而不能有效地均衡网络中所有节点间的能耗. EEUC (energy-efficient unequal clustering)<sup>[8]</sup>根据到基站的距离不同,设置不同的竞争半径,从而在地理位置上构建出规模不等的簇.避免了 LEACH 中随机选择簇头的弊端,同时采用多跳路由的策略,有效均衡了簇头的负载.但算法中的四个参数的选取比较困难,因此很难保证算法有较佳的表现.

本文在 LEACH 算法和 EEUC 算法的基础上,提出了一种基于节点环形分布和多跳传输的能耗均衡自适应网络分簇算法 DLUC,首先将网络区域分成多个同心圆环,根据不同环内设置不同的距离阈值,从而构建规模不等的簇,外环的簇头通过内环的簇头转发数据,建立树形传输路径,最终形成一个能耗均匀、簇大小异构的多跳 WSN 网络,能够有效地克服网络中的“能量热点”问题.

## 1 DLUC

### 1.1 网络模型

本文采用文献[9]的网络模型,作如下前提假设:

- ① 有  $N$  个传感器节点随机均匀地分布在以  $R$  为半径的圆形监测区域内,基站位于圆心位置;
- ② 初始状态各节点所具有的能量是相同的;
- ③ 所有节点均能够感知自身的地理位置、剩余能量,且能进行路由;
- ④ 传播信道是对称的.节点可以根据接收到信号的强度 RSSI 来计算出发送者近似距离<sup>[10]</sup>;
- ⑤ 簇间采用多跳转发的方式传输数据到基站.

### 1.3 算法描述

为方便建立逻辑清晰的多跳路由树,本文将整个半径为  $R$  的圆形区域  $S$  分为  $K(R=Kr, r$  为环间距)个均匀间隔的同心圆环区域,圆环的中心为汇聚节点 (Sink). 第  $i$  个环区域可以表示为:

$$\{(x, y) | (i-1)r < \sqrt{x^2 + y^2} \leq ir, (x, y) \in S, 1 \leq i \leq K\} \quad (1)$$

这样节点根据自身的位置就能确定其所在的环,每个环有其编号 ID, ID 由内向外递增,节点所属的环的编号记作节点的 ring\_ID,故 ring\_ID 也由内环向外环递增.

基于非均匀分簇的理念,使得靠近基站的环所生

成的簇的规模较小,以补偿其因为转发外环簇头节点较多的数据包所造成的额外能耗;相反,远离基站的环所生成的簇的规模较大,以抵消其因转发较少的数据包而节省的能量<sup>[11]</sup>.故在我们的同心圆环模型中,依然采用这样的分簇,不过在同一圆环内的簇的规模大小相同,处在最内层的圆形区域,由于距离基站很近,不予分簇,姑且把最内层圆环内每个节点看成一个没有成员节点的簇的簇头,如图 1 所示.

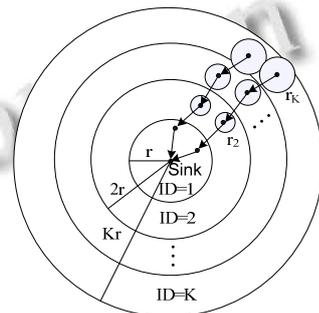


图 1 环形分布的多跳网络模型

处在较外层圆环区域内的簇头节点由于与基站距离较远,若直接与基站通信会造成这些簇头节点能量消耗过快从而过早的死亡.本文采用建立多跳路由树的方式完成网络的数据传输,当节点处在较外环时,通过比自己 ring\_ID 小 1 的簇头节点,以多跳的方式把数据向内环传输,传输到最内层圆形区域时,再由其区域内节点直接将数据传送到基站.

#### 1.3.1 簇头选择

为构建规模大小不等的簇,在不同环内分别计算出不同的最佳竞争半径,文献[9]从能耗均匀的角度出发,给出求解各环竞争半径的方法,如下:

$$r_i = \begin{cases} \sqrt{1/\pi\rho} & i=2 \\ \sqrt{\frac{(2i-1)(K^2-1)}{3(K^2-i^2)+6i-3}} \frac{1}{\pi\rho} & 2 < i \leq K \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $r_i$  为第  $i$  个环内簇的半径;  $\rho$  为区域内粒子密度,  $\rho = N/\pi R^2$ .

在簇头选择的过程中,为保证每轮中能够选举出剩余能量较多的节点当选为簇首节点,同时避免后期节点剩余能量过小而导致很难选到簇头,对 LEACH 中阈值改进,构建如下阈值  $T(n)$ .

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p * [r \bmod (1/p)]} \left( \frac{E_{current}}{2E_0} + \frac{1}{2} \right) & n \in G \\ 0 & n \notin G \end{cases} \quad (3)$$

其中  $p$  为簇头占总节点数的百分比;  $r$  为当前轮数;  $G$  为这一轮循环中未被选为簇头的节点集;  $E_0$  为节点初始能量,  $E_{current}$  为粒子当前能量.

在簇头的选举过程中, 节点  $n$  判断以下三个条件, 若同时满足, 则该节点  $n$  当选为簇头.

- ① 检测节点  $n$  的  $ring\_ID$ ,  $ring\_ID$  不为 1.
- ② 节点  $n$  生成一个 0~1 之间的随机数, 该随机数小于阈值  $T(n)$ .

③ 在选举过程中, 当选的簇头将自己成为簇头的消息  $Head\_msg$  以半径  $2r$  向外广播发送, 计算节点  $n$  与其收到广播的附近簇头集合  $Head(n)$  中各元素的距离, 距离值都大于相应的阈值  $d_i$ ,  $d_i$  的计算公式如式(4)所示.

$$d_i = \begin{cases} r_v & w - v = -1 \\ r_w & w - v = 0, 1 \\ 0 & |w - v| \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $w$  为节点  $n$  的  $ring\_ID$ ,  $v$  为簇头集合  $Head(n)$  中元素的  $ring\_ID$ . 由上式可知,  $d_i$  的取值为: 节点  $n$  和  $Head(n)$  中元素之间同环取所在环的簇竞争半径, 相邻环取较大环的簇竞争半径, 否则取 0.

若节点  $n$  当选为簇头, 则将自身标识为  $head$ , 并将自己成为簇头的消息  $Head\_msg(n)$  以半径  $2r$  向外发送, 若节点  $q$  接收到节点  $n$  发送的  $Head\_msg(n)$  消息, 则把节点  $n$  加入到自己的附近簇头集合  $Head(q)$  中, 接着判断是否满足上述的三个条件, 若是, 则节点  $q$  当选为簇头, 将自身标识为  $head$ , 并向外发送  $Head\_msg(q)$  消息; 若否, 则退出选举, 成为普通节点并标识为  $member$ . 如此反复, 直到每个节点都有自己的标识.

在簇头选举过程中, 通过引入距离约束  $d_i$ , 使簇头在网络区域内的分布相对较均匀, 所生成的簇的规模不至于太大或太小; 同时有效避免了 LEACH 中可能会出现的问题: 簇头间距太小导致电磁波互相干扰, 迫使得数据重发, 从而引起的不必要的能量损耗<sup>[12]</sup>.

### 1.3.2 簇的形成

簇头选择结束后, 接着竞选成功的簇头根据其  $ring\_ID$  以半径  $2r$  向外广播自己成为簇头的信息 ADV, 消息中包含有簇头的  $ring\_ID$ 、剩余能量和位置, 若普通节点只处于一个簇里, 则加入该簇, 否则, 根据收到的多个首领的广播消息, 分别计算加入各个簇的开销函数  $cost(j, i)$ <sup>[7]</sup>, 开销函数表达式:

$$cost(j, i) = \eta \frac{d(P_j, CH_i)}{d_{f\_max}} + (1 - \eta) \frac{d(CH_i, Sink) - d_{g\_min}}{d_{g\_max} - d_{g\_min}} \quad (5)$$

$$d_{f\_max} = \max \{d(P_j, CH_i)\} \quad (6)$$

$$d_{g\_max} = \max \{d(CH_i, Sink)\} \quad (7)$$

$$d_{g\_min} = \min \{d(CH_i, Sink)\} \quad (8)$$

其中  $P_j$  为普通节点,  $CH_i$  为簇首,  $\eta$  为权重因子,  $d$  为距离函数.

当非簇头节点收到多个 ADV 消息, 根据  $cost(j, i)$  的最小值选择加入哪个簇, 接着向该簇头发送入簇请求 Join 信息. 簇头根据收到的所有入簇请求确定簇的规模, 并分配给簇内成员节点相应的 TDMA 时隙. 成员节点进入睡眠状态, 直到进入自己的时隙才被唤醒, 进行其到簇头的数据单跳传输, 这样整个成簇阶段就完成了.

### 1.3.3 簇间多跳路由树的形成

在数据传输阶段, LEACH 协议采用的是单个簇头直接传输给 Sink 节点的方式, 这种方式简单, 但簇头能量消耗相对太大, 尤其不适用于 Sink 节点相对较远和大型网络的情况, 因此簇间采用多跳数据通信. 综合考虑节点的剩余能量和链路的消耗代价最低, 在选择下一跳簇头作为路由时, 考虑到中继节点的剩余能量和与中继节点的距离两方面.

簇生成结束后, 第  $i-1$  环簇头节点在接收到第  $i$  环簇头发送的 ADV 消息时, 根据接收信号强度计算出簇头到自己的近似距离. 对于簇头节点  $CH_i$  而言, 在  $M$  个邻簇头集合  $S'$  中选出  $CH_j$  的能量  $E(CH_j) > \bar{E}$  的簇头节点, 其中:

$$\bar{E} = 1/M \cdot \sum_{i=1}^M E(i) \quad (9)$$

再在选出的若干个符合条件的邻簇头中选取距离  $CH_i$  最近作为下一跳簇头节点, 同理第  $i-1$  环簇头选择第  $i-2$  环簇头作为下一跳, 直至传输到 Sink, 这样整个多跳路由树构建完成.

## 2 仿真实验

### 2.1 仿真模型

为评价本文提出的 DLUC 算法的性能, 使用 MATLAB 软件对算法进行仿真实验, 并与 LEACH 和 EEUC 做了性能比较. 仿真环境具体配置如下: 节点

数  $N=1000$ , 基站坐标为(0,0), 分环数为 3, 区域半径  $R=240m$ , 环间距  $r=80m$ . 节点初始能量均为  $0.5J$ , 数据包长度为  $4000bit$ , 控制包长度为  $100bit$ , 簇头占所有节点比值  $P=0.05$ , 能量模型与文献[4]相同.

### 2.2 仿真结果分析

在 DLUC 算法的仿真过程中随机抽取一轮的簇头分布情况, 如图 2 所示. 可看出, 簇头分布比较均匀, 且外环内簇头比内环内簇头有更大的竞争半径, 这样外环簇的规模比内环簇的规模要大, 这样有效均衡了各个簇的负载.

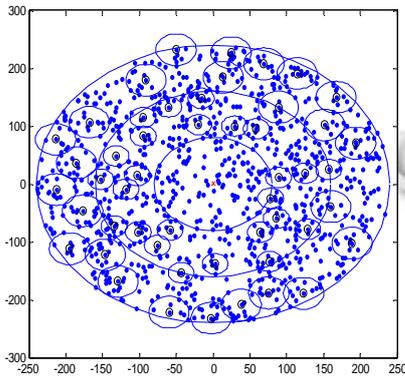


图 2 DLUC 算法的簇头分布图

在仿真实验中, 分别就第 1 个节点死亡时间 FND、半数节点死亡时间 HND 和所有节点的总剩余能量对 LEACH 算法、EEUC 算法以及 DLUC 算法进行对比评价. 当节点存活数量小于 100 时, 网络已经基本没有工作能力, 故此时存活节点数的变化不予考虑. 如图 3 所示, DLUC 算法的 FND(876 轮)较 LEACH(370 轮)延长了 136.76%, 较 EEUC(675 轮)延长了 66.96%; DLUC 算法的 HND(1127 轮)较 LEACH(724 轮)延长了 55.66%, 较 EEUC(920 轮)延长了 22.50%, 说明本文提出的改进算法的能量有效性较 LEACH 算法和 EEUC 算法有很大提高.

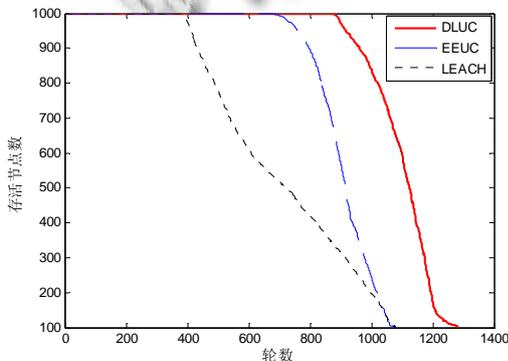


图 3 生命周期曲线

如图 4 所示, LEACH 算法的网络能量在 1060 余轮逐渐耗尽, EEUC 算法网络能量在 1200 余轮逐渐耗尽, 采用 DLUC 算法网络能量在 1450 余轮逐渐耗尽. 相比于 LEACH 和 EEUC, 节点的剩余能量较多, 并且其剩余能量下降曲线更趋近于直线, 说明节点每轮的能量消耗较为固定, 整个网络的能量消耗更加均衡, 避免个别节点因负载过度导致很快死亡.

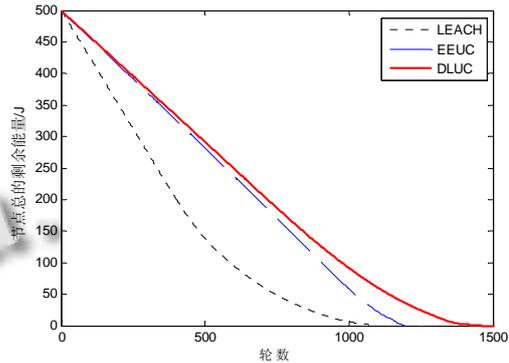


图 4 节点总的剩余能量随轮数的变化

由以上的仿真结果可以看出, DLUC 算法在网络生命周期的延长和网络负载的均衡方面都要远远超过 LEACH, 一定程度上超过 EEUC, 这是因为 DLUC 和 EEUC 均属于多跳路由算法, 较之 LEACH 这种典型的单跳路由算法在能量有效性和均衡性方面有着明显的优势, 而 DLUC 和 EEUC 之间虽同属于非均匀分簇且皆采用多跳路由机制, 但 DLUC 的分环多跳模式很好避免了 EEUC 在树形链路建立过程中可能会产生无效的通信链路, 而被迫直接与基站通信, 造成的能耗偏高的情况, 以及 EEUC 只是单单根据其局部信息选择下一跳, 容易造成数据传输跳数过多, 从而造成网络能耗的浪费的情况.

### 3 结语

本章在分析已有的非均匀分簇算法的基础上, 提出了一种能耗均衡的动态分簇算法 DLUC, 采用节点环形分布和环间多跳的方式建立路由树; 对于在不同环内设定不同的距离阈值约束, 从而形成靠近基站簇规模较小、远离基站簇规模较大的分簇结构, 在多跳路由建立阶段, 综合考虑中继节点的能量和距离因素, 从而有效避免了网络中常见的“能量热点”问题. 最后通过仿真, 对改进算法与 LEACH 算法和 EEUC 算法在性能上进行对比和具体分析, 仿真结果表明, 与

LEACH 算法和 EEUC 算法相比, DLUC 算法很大程度上均衡了网络节点的负载, 延长了网络寿命。

### 参考文献

- 1 古欣, 禹继国, 王光辉. 无线传感器网络分簇路由协议综述. 通信技术, 2013, 46(8): 88-90.
- 2 孙勇仕. 无线传感器网络基于分簇路由协议的节能研究[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.
- 3 于海斌, 梁炜, 曾鹏. 智能无线传感器网络系统. 北京: 科学出版社, 2013.
- 4 Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communication*, 2002, 1(4): 660-670.
- 5 Linasey S, Raghavendra CS. PEGASIS: power efficient gathering in sensor information system. *Proc. of IEEE Aerospace Conference*. 2002. 1125-1130.
- 6 Younis O, Fahmy S. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 660-669.
- 7 Ye M, Li CF, Chen GH, et al. EECS: an energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. *Proc. of 24th IEEE International Performance Computing and Communication Conference (IPCCC)*. Phoenix, USA. 2005. 535-540.
- 8 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议. *计算机学报*, 2007, 30(1): 27-36.
- 9 Liu T, Li Q, Liang P. An energy-balancing clustering approach for gradient-based routing in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2012, 35(17): 2150-2161.
- 10 Gong B, Li L, Wang S, et al. Multihop routing protocol with unequal clustering for wireless sensor networks. *Proc. of IEEE International Computing Communication Control and Management ISECS Colloquium (CCCM)*. 2008, 2. 552-556.
- 11 吴振华, 尹志军. 基于优化簇半径的 WSNs 非均匀分簇路由. *计算机工程与设计*, 2010, (15): 3374-3378.
- 12 涂朴, 赵全军. 基于连续渗流的 WSN 非规则通信模型. *计算机工程*, 2012, 38(12): 66-68.