

# 一种射频能量捕获网络移动能量源 均衡化充电策略

田贤忠<sup>1</sup>, 祝驿楠<sup>1,2</sup>, 何佳存<sup>1</sup>, 郭敏<sup>1</sup>, 刘高<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江杭州 310023; 2. 浙江工业大学健行学院, 浙江杭州 310023)

**摘要:** 为解决传统电池供电传感器网络存在的电池不易更换、节点能量容易耗尽等问题, 射频能量捕获技术已逐步应用于无线可充电传感器网络中. 由于不同位置传感器节点的工作负荷不同, 捕获能量也有差异, 实现节点能量的均衡化分布可以有效地提高节点的存活率. 考虑射频能量源移动充电的场景, 在已知节点位置信息的条件下, 设计合理均衡的路由方案和充电算法. 首先将区域基于蜂窝六边形网格划分, 分别对网格和节点分层, 提出逐层传输的均衡式路由策略, 然后给出无线充电小车的移动路径, 对相邻两层内节点剩余能量的方差最小化问题建模, 由内层向外层依次确定能量源在各停留点的充电时间. 仿真结果表明, 相比已有的均衡化充电方法, 该策略可以明显提高节点剩余能量的均衡性, 从而延长网络的生命周期.

**关键词:** 射频能量捕获; 无线传感器网络; 能量均衡; 无线充电

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)12-2985-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.023

## A Balanced Charging Scheme for Mobile Energy Transmitter in RF Energy Harvesting Network

TIAN Xian-zhong<sup>1</sup>, ZHU Yi-nan<sup>1,2</sup>, HE Jia-cun<sup>1</sup>, GUO Min<sup>1</sup>, LIU Gao<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

2. Jianxing Honors College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

**Abstract:** In order to solve the problems existing in the traditional battery-powered sensor network that the battery is not available to replace and the energy of nodes is easy to be exhausted, RF energy harvesting technology has been applied to the wireless rechargeable sensor network. Since the workload and harvested energy of sensor nodes in different positions are different, balanced distribution of nodes' energy can effectively improve the survival rate of nodes. Considering the scenario where mobile RF energy transmitter is employed for charging, we design a reasonable balanced routing scheme and charging algorithm under the conditions of known nodes' location information. First, the network area is discretized based on the cellular hexagonal grid where the grids and nodes are stratified respectively. A balanced routing scheme of hierarchical data transmission is proposed. Then we formulate mathematic model with pre-defined energy transmitter's moving path to minimize the variance of the nodes' residual energy in the adjacent two layers and derive the charging time at different charging spots from the inner layer to the outer layer. Simulation results reveal that compared with the existing balanced charging method, our proposed algorithm can significantly improve the balance of node's residual energy and prolong the network lifetime.

**Key words:** RF energy harvesting; wireless sensor network; nodes' energy equalization; wireless charging

### 1 引言

传统的无线传感器网络 (Wireless Sensor Network,

WSN) 中传感器节点由电池供电, 能量容易耗尽, 网络生存周期较短, 限制了其实际应用场景<sup>[1-3]</sup>. 无线可充电传感器网络作为目前的研究热点, 通过捕获外界能

量为传感器供电,以解决上述问题.射频能量作为最具研究前景的能量之一,节点可捕获专用的射频能量或环境的射频能量转化为电能给传感器的收发数据等正常工作供能.

本文考虑的是射频能量捕获网络(Radio Frequency Energy Harvesting Network, RF-EHN)中专用能量源移动的情况,主要研究的问题是确定能量源小车的移动路线和各停留点的停留时间以更优地提升网络性能.针对这个问题,已有一些研究成果.比如,针对单个移动能量源充电的场景,Fu 等人<sup>[4]</sup>阐述了充电时延对网络的阻碍,通过近似能量捕获模型将问题简化为最小时延线性规划(Linear Programming, LP)问题,最终通过聚类求解得到小车的行走路径和各停留点的停留时间;Xie 等人<sup>[5]</sup>以最大化小车休息时间为目标优化小车的行走路径、停留时间以及数据包转发路由;Shi 等人<sup>[6]</sup>在此基础上设计了一种动态路由算法,进一步优化了能量源休息时间对总时延的占比;文献<sup>[7]</sup>在能量源移动时间受限的约束下,通过研究节点激活调度方案和小车移动策略,实现节点随机事件捕获服务质量的最大化;Chen 等人<sup>[8]</sup>则同时考虑了小车移动过程动态充电和在停留位置静止充电的情况,得到了更短的充电时延.

由于射频能量源不能无休止地滞留于网络中充电,其时延过大将阻碍网络通信,因此充电后各节点的剩余能量将可能直接决定此后网络的存活时间.实现节点能量的均衡化,将有助于规避部分节点能量提前耗尽的情况.然而大量研究中节点的能量只是达到最低的工作阈值,并未较好地对节点的能量平衡进一步探讨,很大程度上导致了能量空洞、网络节点存活率低等问题.有关节点能量方面,He 等人<sup>[9]</sup>考虑传感器的剩余寿命,对充电节点的选择和能量源移动路径两个维度进行规划,设计启发式算法最大化传感器节点消耗总能量相对小车移动过程中消耗能量的比率;文献<sup>[10]</sup>中阐述了网络中节点负载不同而引发的能量失衡问题,采用平衡意识布置方法设计能量源的位置以优化充电效率;Xia<sup>[11]</sup>等人则提出能量平衡区域的概念,揭示了能量平衡仅能在局部区域中实现,将网络生命周期最优问题转化为区域分割问题.

与本文直接相关的是文献<sup>[12]</sup>.Han 等人<sup>[12]</sup>以四边形网格划分区域,针对基站附近节点中继数据包较多所引起的消耗能量较多,远离基站节点消耗能量较少的情况,考虑节点剩余能量的均衡性,制定了一种新的多跳路由选择策略,并给出小车的移动路线,使其充电时间与每层网格内部传感器消耗能量呈正比,使能量供给更均衡化,有效提高网络节点

的存活率.

但是文献<sup>[12]</sup>方案中尚存在不足:没有考虑里层节点剩余能量小于能量阈值的情况以致网络节点存活率低;小车在各方环的充电时间仅考虑节点平均消耗能量,节点剩余能量的均衡性可以进一步增强.针对上述不足,本文提出一种射频能量捕获网络移动能量源均衡化充电策略,首先将区域划分为六边形网格,将六边形的中心点作为小车移动过程中的停留点,将传感器节点分层,给定能量源移动路径,基于机会路由提出一种分配小车充电时间的算法,满足相邻两层网络节点剩余能量方差最小以实现节点能量的最大均衡化需求.本文的主要贡献如下:

(1) 本文通过六边形网格划分区域,提出一种基于节点分层的均衡式路由策略,并建立节点剩余能量均衡化模型,设计了一种移动无线射频小车充电时间分配的高效算法.

(2) 对于节点剩余能量的均衡性模型,从最里层出发,以最小化相邻两层节点剩余能量方差为目标函数,逐层求解得到充电小车在任意相邻两层停留时间的函数关系,同时设置能量阈值作为约束条件确保节点存活,最终确定小车在各层的停留时间.

(3) 通过仿真实验,对比已有的能量均衡化充电策略,验证上述策略的有效性.

## 2 系统模型

本文将传感器节点所处的二维区域以基站为中心,基于蜂窝六边形结构划分,网络模型示意图如图 1 所示.无线射频充电小车修整结束后从基站出发,由内向外按层为传感器节点进行移动充电,其移动过程中的停留位置在各六边形网格的中心点,同一层各停留点的充电时间相同,经过周期  $T$  时间后回到基站.设划分的蜂窝网格数为  $M$ ,小车移动路径上停留点的集合为  $\text{Path} = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$ ,传感器节点的数目为  $N$ ,对于第  $i$  个传感器节点  $s_i$ ,其坐标用  $(x_s^{(i)}, y_s^{(i)})$  来表示.节点初始能量  $E_0$  为常数.由于越靠近基站的节点工作负荷越大,消耗能量越多,为使节点剩余能量尽可能均衡化,因此越靠近里层的停留点上充电时间相对越长.

### 2.1 射频能量捕获模型

当无线充电小车处于第  $j$  个停留位置  $p_j(x_p^{(j)}, y_p^{(j)})$ ,节点  $s_i$  与小车之间的距离  $d_{i,j} = \sqrt{(x_s^{(i)} - x_p^{(j)})^2 + (y_s^{(i)} - y_p^{(j)})^2}$ .

根据 Free-Space 模型,节点能量接收功率  $P_r$  和能量发送功率  $P_t$  之间的关系表示如下<sup>[13]</sup>:

$$P_r = \begin{cases} \eta \frac{G_t G_r}{L_p} \left( \frac{\lambda}{4\pi(d_{i,j} + \varepsilon)} \right)^2 P_t, & d \leq d_0 \\ 0, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

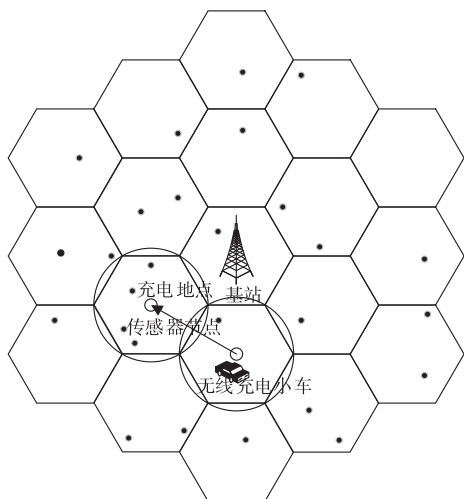


图1 传感器网络模型示意图

其中,  $\eta$  为能量转换效率,  $G_t$  为发送天线增益,  $G_r$  为接收天线增益,  $L_p$  表示极化损耗,  $\lambda$  为波长,  $\varepsilon$  是避免上述公式中  $d$  过小时捕获功率无穷大的调整参数,  $d_0$  是充电半径(节点与小车距离大于  $d_0$  时能量捕获功率近似为 0)。

关于蜂窝六边形网格的半径, 为确保小车充电范围可以完全覆盖正六边形内所有传感器节点, 六边形网格的边长不宜过大. 因此, 将充电半径  $d_0$  作为六边形的边长进行划分。

## 2.2 网格及节点分层模型

将基站(0,0)所在六边形网格作为第 0 层, 从内向外进行网格的分层, 由于区域内共有  $M$  个蜂窝网格, 而第  $k$  层中包含  $6k$  个网格, 故除第 0 层外, 总层数  $L$  满足  $3L^2 + 3L + 1 \geq M > 3L^2 - 3L + 1$ , 则总层数  $L = \left\lceil \frac{-3 + \sqrt{12M - 3}}{6} \right\rceil$ . 对于某个网格而言, 假设其中心

点坐标位置为  $(x_p, y_p)$ , 若  $|y_p| \leq \frac{\sqrt{3}}{3}|x_p|$ , 则对应的层数  $k = \frac{2}{3d_0}|x_p|$  ( $0 \leq k \leq L, k \in \mathbf{N}^*$ ); 反之, 对应的层数  $k = \frac{1}{3d_0}|x_p| + \frac{\sqrt{3}}{3d_0}|y_p|$  ( $1 \leq k \leq L, k \in \mathbf{N}^*$ ).

设置能量发送功率  $P_t$  恒定, 则节点捕获能量功率  $P_h$  可简化为:

$$P_h = \begin{cases} \frac{\alpha}{(d_{i,j} + \varepsilon)^2}, & d \leq d_0 \\ 0, & d > d_0 \end{cases} \quad (2)$$

每个传感器节点捕获的总能量最多由三个停留点供能累加, 设第  $i$  个传感器节点周边的可能供能点为  $p_1, p_2, p_3$ , 则节点捕获到的总能量为:

$$E_h^{(i)} = P_h^{(i,p_1)} t_{p_1} + P_h^{(i,p_2)} t_{p_2} + P_h^{(i,p_3)} t_{p_3} \quad (3)$$

故可通过连接相邻六边形的中心点构成边长为  $\sqrt{3}d_0$  的正三角形, 如图 2 所示. 由于后续的路由中继策略和充电方案需要建立在不同位置节点分层的基础上, 因此这里根据节点于正三角形不同区域的分布情况, 基于已分层的网格, 将各节点进行归属分配. 对于  $\forall$  层数  $k \in [0, L], k \in \mathbf{N}^*$ , 分下述四种情况阐述:

节点  $a$  同时处于第  $k$  层和第  $k+1$  层两个中心点充电半径内, 则使节点  $a$  归属于第  $k+1$  层; 节点  $b$  仅捕获第  $k$  层停留点发射的射频能量, 则节点  $b$  归属于第  $k$  层; 节点  $c$  可以捕获的能量源停留位置均处于第  $k+1$  层, 则节点  $c$  归属于第  $k+1$  层; 若节点恰好处于正三角形的中心位置, 可以接收三角形三个顶点位置的供能, 归属于第  $k+1$  层。

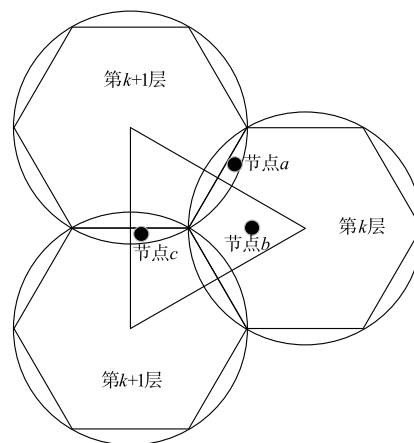


图2 节点能量捕获和分层

## 2.3 节点能量消耗模型

设  $\beta_r$  为传感器节点电路模块正常工作接收 1bit 数据消耗的能量,  $\beta_t$  为节点发送 1bit 数据消耗的能量, 节点需发送的数据包长度为  $n$  bits, 下一跳节点为  $u$ , 当前节点与下一跳节点的距离为  $d_{iu}$ , 则节点  $i$  每发送 1bit 数据消耗的能量为  $\beta_t + \beta_r d_{iu}^2$ , 每接收 1bit 数据消耗的能量为  $\beta_r$ . 其中  $\beta_r, \beta_t$  为常数<sup>[14]</sup>.

## 3 均衡式路由方案

采取数据中继传输的方式, 每个节点将感知到的数据包和自身剩余能量情况, 通过多跳传输到 Sink 节点, 即基站. 根据机会路由的思想, 提出一种均衡性指标  $d/P_h$  作为均衡式路由的选择依据, 其中  $d$  表示节点到下一跳节点的距离,  $P_h$  表示下一跳节点的能量捕获功率. 这里近似认为节点能量捕获功率  $P_h$  为各停留点捕获功率的叠加. 这种均衡性指标的合理性体现在  $P_h$  越大, 节点可负荷能力相对更强, 而  $d$  越小可以使发送数据包的能量消耗越少, 因此指标越小的节点是多跳中

继过程中优先考虑的节点.

本文采用一种基于节点分层的均衡性路由策略进行数据中继传输,命名为 LBR (Layer-based Balanced Routing),具体路由策略如算法 1.

#### 算法 1 均衡式路由方案

输入: 每个节点  $i$  的坐标位置  $(x_s^{(i)}, y_s^{(i)})$ 、节点  $i$  所属层数  $k$   
 输出: 节点  $i$  的下一跳节点  $u$

```

 $i = 1;$ 
while  $i \leq N$ 
  if  $i$  所属第  $k$  层
    节点  $i$  在发送数据包前向邻居节点广播一个路由请求包,包括节点 ID、节点位置和剩余能量等信息,同时启动计时器;
    if  $j$  收到请求包
      if  $j$  所属第  $k-1$  层且剩余能量充足
        节点  $j$  发送一个回复包返回节点  $i$ ,包括节点 ID、节点位置和能量捕获功率等信息;
      else
        节点  $j$  不回复信息;
      end if
    end if
    节点  $i$  在计时器溢出之前收到候选节点的回复包;
    if  $d(j, B) > d(i, B)$ 
      在候选节点中直接剔除节点  $j$ ;
    else
      在候选节点中选择  $d/P_h$  最小的节点  $u$  作为下一跳;
    end if
    If 没有收到回复包或不存在满足条件的节点
      将数据包直接转发至比节点  $i$  更靠近基站且距离节点  $i$  最近的节点  $u$ ;
    end if
  end if
end while
  
```

## 4 移动能量源充电方案

作为能量源充电方案的前提,上述 LBR 路由方案保证了同一层内节点剩余能量的相对均衡.对于不同层的节点间剩余能量的均衡性,下面提出一种充电方案进行优化.

$$\min_{t_k} \sum_{i=1}^{N_k} (E_h^{(i)} - E_c^{(i)} + E_0 - E_{\text{avg}}(k, k-1))^2 + \sum_{j=1}^{N_{k-1}} (E_h^{(j)} - E_c^{(j)} + E_0 - E_{\text{avg}}(k, k-1))^2$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} E_{\text{avg}}(k, k-1) = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} (E_h^{(i)} - E_c^{(i)} + E_0) + \sum_{j=1}^{N_{k-1}} (E_h^{(j)} - E_c^{(j)} + E_0)}{N_k + N_{k-1}} \\ E_0 + E_h^{(i)} - E_c^{(i)} \geq E_{\min} \\ t_k \geq 0 \\ t_0 + \sum_{k=1}^L 6k \cdot t_k = T \end{cases}$$

经过节点数据中继传输,无线充电小车通过基站了解各节点的能量损耗情况,记节点  $i$  在数据传输过程中消耗能量为  $E_c^{(i)}$ .能量就绪后,小车从基站(第 0 层)出发,根据网格的分层情况,沿六边形路径由内层向外层移动,在各网格的中心点停留充电,同层中各停留点停留充电时间相同.

如图 3 所示,在小车移动过程中,1 号点至 6 号点作为第一层停留点,7 号点到 18 号点作为第二层停留点,以此类推.其中,标号为  $p$  的停留点( $p = 1, 2, \dots, M$ ),由  $3k^2 + 3k + 1 \geq p > 3k^2 - 3k + 1$  知,其所处层数  $k =$

$$\left\lceil \frac{-3 + \sqrt{12p - 3}}{6} \right\rceil.$$

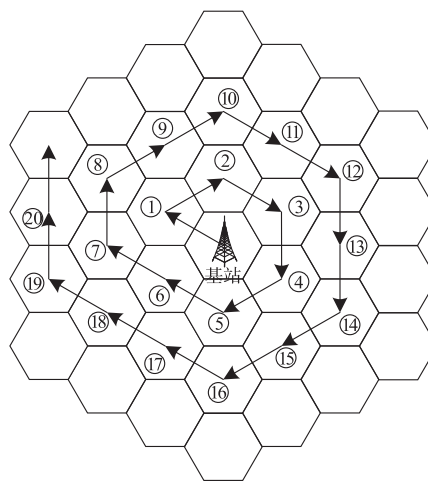


图3 无线充电小车移动路径

根据本文提出的分层方案,设第  $k$  层节点数目为  $N_k$  ( $k = 0, 1, \dots, L$ ),  $\sum_{k=0}^L N_k = N$ ,从第 1 层开始由内向外,以最小化相邻两层节点剩余能量的方差作为目标函数,每相邻两层建立数学模型,同时节点的最终剩余能量满足约束  $E_0 + E_h - E_c \geq E_{\min}$ .通过考察目标函数的极值点,从  $k=1$  开始依次求得相邻两层各停留点停留时间之间的函数关系,即  $t_k = f_{k,k-1}(t_{k-1})$ ,根据约束条件最终得到各停留点的充电时间分配方案.忽略小车在移动过程中消耗的时间,具体模型如下

将  $E_0 + E_h^{(i)} - E_c^{(i)} \geq E_{\min}$  化简得:

$$t_k \geq \max_{1 \leq i \leq N_i} \left\{ \frac{E_{\min} - E_0 + E_c^{(i)} - P_h^{(i,k-1)} t_{k-1}}{P_h^{(i,k)}} \right\} \quad (4)$$

其中  $P_h^{(i,k-1)}$  表示第  $k$  层节点  $i$  于第  $k-1$  层停留点的能量捕获功率,  $P_h^{(i,k)}$  表示节点  $i$  于第  $k$  层停留点的能量捕

获功率.

设  $E_r^{(k,k-1)} = \sum_{i=1}^{N_i} (E_0 - E_c^{(i)}) + \sum_{j=1}^{N_{i-1}} (E_0 - E_c^{(j)})$ , 当

$k=1$  时  $t_{k-2}=0$ , 将目标函数对  $t_k$  求导得:

$$\begin{aligned} & 2 \sum_{i=1}^{N_i} \left( P_h^{(i,k)} t_k + P_h^{(i,k-1)} t_{k-1} + (E_0 - E_c^{(i)}) - \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)} t_k + \sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k-1)} t_{k-1} + \sum_{u=1}^{N_{i-1}} P_h^{(u,k-1)} t_{k-1} + \sum_{u=1}^{N_{i-1}} P_h^{(u,k-2)} t_{k-2} + E_r^{(k,k-1)}}{N_k + N_{k-1}} \right) \\ & \left( P_h^{(i,k)} - \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)}}{N_k + N_{k-1}} \right) \\ & - 2 \sum_{j=1}^{N_{i-1}} \left( P_h^{(j,k-1)} t_{k-1} + P_h^{(j,k-2)} t_{k-2} + (E_0 - E_c^{(j)}) - \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)} t_k + \sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k-1)} t_{k-1} + \sum_{u=1}^{N_{i-1}} P_h^{(u,k-1)} t_{k-1} + \sum_{u=1}^{N_{i-1}} P_h^{(u,k-2)} t_{k-2} + E_r^{(k,k-1)}}{N_k + N_{k-1}} \right) \\ & \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)}}{N_k + N_{k-1}} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

由于  $t_k$  与  $t_{k-1}$  间呈线性关系, 不妨设  $t_{k-2} = H(k-1) \cdot t_{k-1} + G(k-1)$ , 其中  $H(k-1)$  和  $G(k-1)$  为常

$$A(k) = \sum_{i=1}^{N_i} \left( P_h^{(i,k)} - \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)}}{N_k + N_{k-1}} \right)^2 + \sum_{j=1}^{N_{i-1}} \left( \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)}}{N_k + N_{k-1}} \right)^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} B(k) &= \sum_{i=1}^{N_i} \left( P_h^{(i,k-1)} - \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k-1)} + \sum_{u=1}^{N_{i-1}} P_h^{(u,k-1)} + P_h^{(u,k-2)} H(k-1)}{N_k + N_{k-1}} \right) \left( P_h^{(i,k)} - \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)}}{N_k + N_{k-1}} \right) \\ &- \sum_{j=1}^{N_{i-1}} \left( P_h^{(j,k-1)} + P_h^{(j,k-2)} H(k-1) - \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k-1)} + \sum_{u=1}^{N_{i-1}} P_h^{(u,k-1)} + P_h^{(u,k-2)} H(k-1)}{N_k + N_{k-1}} \right) \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)}}{N_k + N_{k-1}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} C(k) &= \sum_{i=1}^{N_i} \left( E_0 - E_c^{(i)} - \frac{\sum_{u=1}^{N_{i-1}} P_h^{(u,k-2)} G(k-1) + E_r^{(k,k-1)}}{N_k + N_{k-1}} \right) \left( P_h^{(i,k)} - \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)}}{N_k + N_{k-1}} \right) \\ &- \sum_{j=1}^{N_{i-1}} \left( E_0 - E_c^{(j)} + P_h^{(j,k-2)} G(k-1) - \frac{\sum_{u=1}^{N_{i-1}} P_h^{(u,k-2)} G(k-1) + E_r^{(k,k-1)}}{N_k + N_{k-1}} \right) \frac{\sum_{v=1}^{N_i} P_h^{(v,k)}}{N_k + N_{k-1}} \end{aligned} \quad (8)$$

则

$$\begin{aligned} A(k) \cdot t_k + B(k) \cdot t_{k-1} + C(k) &= 0 \\ \Leftrightarrow t_k &= - \frac{B(k) \cdot t_{k-1} + C(k)}{A(k)} \end{aligned} \quad (9)$$

在充电时间受限的情况下, 假设给定小车充电总时间的初值  $T$ , 首先根据式(4)求解得到  $t_0, t_1, \dots, t_L$  的初值, 然后从第 1 层开始由内向外逐层比较判断

$$- \frac{B(k) \cdot t_{k-1} + C(k)}{A(k)} \text{ 与 } \max_{1 \leq i \leq N_i} \left\{ \frac{E_{\min} - E_0 + E_c^{(i)} - P_h^{(i,k-1)} t_{k-1}}{P_h^{(i,k)}} \right\}$$

的大小, 重新调整外层的时间, 取

$$\begin{aligned} t_k &= \max \left\{ - \frac{B(k) \cdot t_{k-1} + C(k)}{A(k)}, \right. \\ & \left. \max_{1 \leq i \leq N_i} \left\{ \frac{E_{\min} - E_0 + E_c^{(i)} - P_h^{(i,k-1)} t_{k-1}}{P_h^{(i,k)}} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

直到无法满足总时间约束  $t_0 + \sum_{k=1}^L 6k \cdot t_k = T$ . 由此可以确定小车移动过程中各停留点的停留充电时间, 同时规避了节点剩余能量小于能量阈值的情况.

由于通过求解相邻两层节点剩余能量均衡化问题

得到各层充电时间的函数关系,故将该算法命名为 ALBC (Adjacent Layer Balanced Charging) 算法,其时间复杂度为  $O(N)$ ,具体的实现过程归纳如算法 2.

#### 算法 2 ALBC 算法

输入: 每个节点的初始能量  $E_0$ 、能量捕获功率  $P_h^{(i,k)}$ 、消耗的能量  $E_c^{(i)}$ 、总充电时长  $T$ 、各层节点数目  $N_k$  和能量阈值  $E_{\min}$

输出: 小车在各层停留点的停留时间  $t_k$

Set  $k = 1$ ;

Calculate  $t_0, t_1, \dots, t_L$  according to 式(4);

while ( $k \leq L$ ) do

    Calculate  $A(k), B(k), C(k)$  according to 式(6)式(7)式(8);

    Calculate  $t_k = f_{k,k-1}(t_{k-1})$  according to 式(9);

    Update  $t_k$  according to 式(10);

    if  $t_0 + \sum_{v=1}^L 6v \cdot t_v > T$

$t_k = t_k - (t_0 + \sum_{v=1}^L 6v \cdot t_v - T) / 6k$ ; Break;

    end if

$k++$ ;

end while

## 5 仿真实验与性能评价

本文使用 MATLAB 进行仿真实验,设置网络中节点剩余能量的标准差为评价指标,主要考察联合使用 LBR 路由方案和 ALBC 充电时间分配算法的策略 (ALBC-LBR) 的性能,与文献[12]和文献[15]的策略进行对比,分析节点剩余能量均衡性的情况.主要包括以下四个实验:(1)通过改变节点数目研究节点剩余能量均衡性;(2)分析小车在各层停留点的充电时间随层数的变化(3)分析各层内节点剩余能量标准差随层数的变化;(4)调整能量阈值探究节点剩余能量均衡性的变化趋势.参照文献[12]中的参数配置情况,表 1 列举了仿真实验的参数取值.

表 1 仿真参数配置

参数	符号	取值
监测区域面积	$D$	14400m <sup>2</sup>
网格层数	$L$	9
初始能量	$E_0$	2J
节点工作能量阈值	$E_{\min}$	0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9J
能量捕获参数	$\alpha$	$4.32 \times 10^{-4}$
短距离能量捕获调整参数	$\varepsilon$	0.2316
充电半径	$d_0$	5m
数据包长	$n$	100bits
广播包长	$n_b$	25bits
数据发送间隔	$\tau$	20s
传感器节点数目	$N$	300, 350, 400, 450, 500, 550
节点电路正常工作能耗	$\beta_r$	50nJ/bit
节点发送数据能耗	$\beta_t$	10pJ/(bit · m <sup>2</sup> )

### 5.1 节点剩余能量均衡性随节点数目的变化

首先,设置能量阈值为 1.9J,在区域内随机均匀生成 300、350、400、450、500 和 550 个节点,每个节点以相同速率生成 1000 个数据包并以多跳中继的形式发送至基站,在充电时间充足的条件下进行 500 次仿真实验后得到节点剩余能量标准差的平均值作为实验结果,观察节点剩余能量标准差随节点数目的变化情况,如图 4 所示.可以发现,相较文献[12]和文献[15]提出的充电策略,对任意数目的节点,ALBC-LBR 策略所得节点剩余能量的标准差均低于文献[12]和文献[15]策略得到的标准差,这是因为 ALBC-LBR 对相邻两层节点剩余能量的标准差进行了建模优化以确定充电时间,而文献[12]和文献[15]中仅考虑了每一层节点平均消耗的能量.同时本文中对于每一层节点均设置了能量阈值以确保其存活.对比文献[12]和文献[15]的实验结果,ALBC-LBR 策略明显地提高了节点剩余能量的均衡性,以节点数为 300 为例,节点剩余能量的标准差分别降低了近 39.88% 和 34.48%.

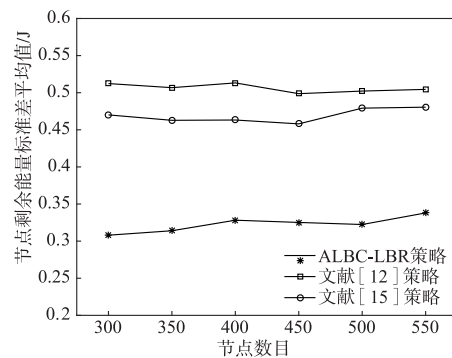


图 4 节点剩余能量标准差随节点数目的变化

### 5.2 小车各层平均充电时间分配情况

设置节点数为 300,同上进行 500 次仿真实验后得到小车在各层单个停留点停留时间的平均值作为实验结果.小车各层停留点的充电时间随层数的变化如图 5 所示,可以发现层数越小充电时间越长.这是由于层数越小的节点越靠近基站,工作负荷越大,能量需求越大,因此小车在层数较小的停留点充电时间相对较长.相反地,层数较大的节点在工作中消耗的能量较少,小车停留充电的时间也相应较短.

### 5.3 各层节点剩余能量均衡性情况

同上进行 500 次仿真实验,分析各层内部节点剩余能量标准差情况,如图 6 所示.可以发现,由于越靠近基站的节点累积工作负荷较大,经过能量捕获后其总体剩余能量的差异度也相对明显,故里层的节点剩余能量相对不平衡些,总体上变化趋势较为平缓,而小车在同一层各停留点的充电时间相同,从而证明了分层中继的均衡式路由策略的稳定性.

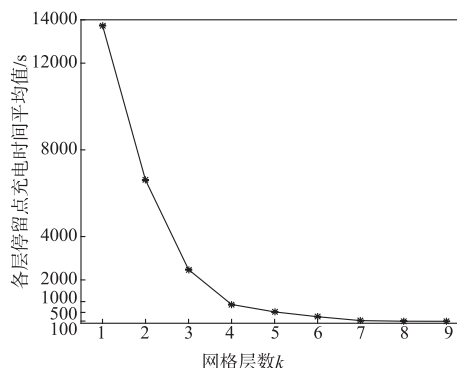


图5 各层停留点充电时间随层数的变化

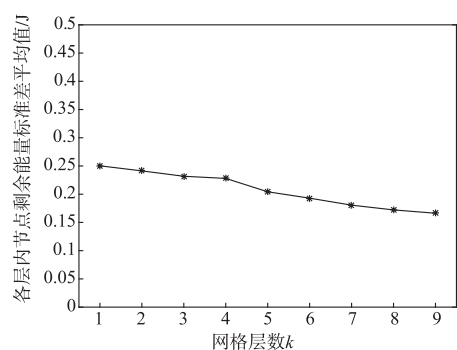


图6 各层节点剩余能量标准差随层数的变化

#### 5.4 节点剩余能量均衡性随能量阈值的变化

考虑不同能量阈值对节点剩余能量均衡性的影响,随机均匀生成 300 个节点,分别设置能量阈值为 0.9J、1.1J、1.3J、1.5J、1.7J 和 1.9J,在充电总时间受限的条件下,通过 500 次仿真实验,得到不同能量阈值条件下对应的节点剩余能量标准差,如图 7 所示.可以发现,节点能量阈值越高,节点剩余能量越不均衡.这也是合理的,因为当节点能量阈值提高,各层节点的最短充电时间变大,对于原来所需充电时间较小的节点,其充电时间偏离了最优的均衡值,故而使得能量均衡性相对变低.同时,文献[12]和文献[15]中充电算法中能量阈值的提高会带动充电时间的增加使得节点剩余能量更均衡,但导致节点的存活率下降.相较其实验结果,本文采用的 ALBC-LBR 策略,对于不同的能量阈

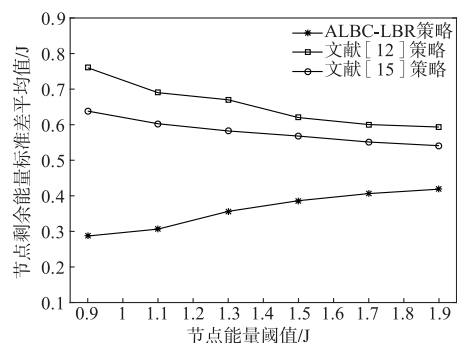


图7 节点剩余能量标准差随能量阈值的变化

值,均可明显降低节点剩余能量的标准差,提高节点剩余能量的均衡性.但本算法仍存在不足,当能量阈值设置过大时,由于充电总时间受限,ALBC-LBR 会首先保证所有节点的存活,但导致外层节点能量的标准差上升甚至与文献[12]和文献[15]中算法结果持平.这也是合理的,因为在网络供电不足的情况下,节点的存活率比能量的均衡性更为重要.

## 6 结束语

本文考虑 RF-EHN 中移动能量源均衡充电问题,由于不同位置传感器节点的能耗不同,充电时间的分配也相应调整.首先以基站为原点将网格分层,考虑节点的归属情况,设计了一种基于节点分层的均衡式 LBR 路由,建模出移动充电过程中节点剩余能量方差最小化问题,并提出一种 ALBC 充电时间分配算法,为解决该问题提供理论基础.仿真结果显示,相比已有的均衡化方案,该策略可以有效提高节点剩余能量的均衡性.在实际系统中对该策略进行验证,是今后的研究方向.

## 参考文献

- [1] 戴世瑾,李乐民. 高能量有效性的无线传感器网络数据收集和路由协议[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2336 - 2341.
- [2] Dai S J, Le-Min L I. A high energy-efficient data collecting and routing protocol for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2336 - 2341. (in Chinese)
- [3] 徐骥,朱艺华,田贤忠,等. 无线传感器网络中利用随机网络编码的低能耗可靠机会路由[J]. 电子学报, 2016, 44(8): 1799 - 1805.
- [4] Ji X U, Zhu Y H, Tian X Z, et al. Energy-efficient reliable opportunistic routing applying random network coding for wireless sensor network[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1799 - 1805. (in Chinese)
- [5] 张德干,赵晨鹏,李光,等. 一种基于前向感知因子的 WSN 能量均衡路由方法[J]. 电子学报, 2014, 42(1): 113 - 118.
- [6] Gan Z D, Peng Z C, Guang L I, et al. A kind of routing protocol based on forward-aare factor for energy balance [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(1): 113 - 118. (in Chinese)
- [7] Fu L, Cheng P, Gu Y, et al. Minimizing charging delay in wireless rechargeable sensor networks [A]. International Conference on Computer Communications (INFOCOM) [C]. Turin, Italy: IEEE, 2013. 2922 - 2930.
- [8] Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer: The multi-node case

- [A]. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON) [C]. Seoul, South Korea: IEEE, 2012. 10 – 18.
- [6] Shi L, Han J, Han D, et al. The dynamic routing algorithm for renewable wireless sensor networks with wireless power transfer [J]. Computer Networks, 2014, 74(PA): 34 – 52.
- [7] Dai H, Jiang L, Wu X, et al. Near optimal charging and scheduling scheme for stochastic event capture with rechargeable sensors [A]. International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS) [C]. Hangzhou, China: IEEE, 2013. 10 – 18.
- [8] Chen F, Zhao Z, Min G, et al. Speed control of mobile chargers serving wireless rechargeable networks [J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 80: 242 – 249.
- [9] He L, Gu Y, Pan J, et al. On-demand charging in wireless sensor networks: theories and applications [A]. International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS) [C]. Hangzhou, China: IEEE, 2013. 28 – 36.
- [10] Lin T L, Li S L, Chang H Y. A power balance aware wireless charger deployment method for complete coverage in wireless rechargeable sensor networks [J]. Energies, 2016, 9(9): 695.
- [11] Xia X, Li S, Zhang Y, et al. Towards energy-balanced data transmission for lifetime optimization in wireless sensor networks [A]. IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2016. 1 – 7.
- [12] Han G, Qian A, Jiang J, et al. A grid-based joint routing and charging algorithm for industrial wireless rechargeable sensor networks [J]. Computer Networks, 2016, 101(C): 19 – 28.
- [13] He S, Chen J, Jiang F, et al. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(10): 1931 – 1942.
- [14] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366 – 379.
- [15] Yang X, Han G, Liu L, et al. IGRC: An improved grid-based joint routing and charging algorithm for wireless rechargeable sensor networks [J]. Future Generation Computer Systems, 2017, doi: 10. 1016/j. future. 2017. 09. 051.

## 作者简介



**田贤忠** 男, 1968 年生于浙江杭州, 博士, 现为浙江工业大学计算机学院教授, 当前的研究方向包括能量捕获无线传感器网络、网络编码、移动计算、无线网络协议优化等。

E-mail: txz@zjut.edu.cn



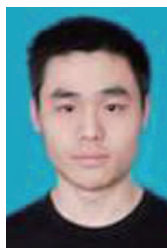
**祝驿楠** 男, 1997 年出生于浙江杭州, 现为浙江工业大学计算机学院本科生, 研究方向包括可充电传感器网络、无线自组织网络等。

E-mail: hezzyn1997@163.com



**何佳存** 男, 1992 年出生于浙江金华, 2015 年于浙江工业大学获得学士学位, 现为浙江工业大学计算机学院研究生, 研究方向包括可充电传感器网络、移动收集数据策略等。

E-mail: 372044849@qq.com



**郭敏** 男, 1992 年生于浙江东阳, 现为浙江工业大学计算机学院研究生, 研究方向包括可充电传感器网络、无线协助中继网络等。

E-mail: 348036307@qq.com



**刘高** 男, 1991 年出生于湖北洪湖, 现为浙江工业大学计算机学院研究生, 研究方向包括可充电传感器网络、无源感知网络等。

E-mail: liugaoy@163.com