

文章编号: 0258-2724(2017)06-4216-08 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.06.024

## 时延受限的无线传感网中移动式能量补充

蒋文贤<sup>1</sup>, 缪海星<sup>1</sup>, 王田<sup>1</sup>, 王成<sup>1</sup>, 赖永炫<sup>2</sup>, 梁俊斌<sup>3</sup>

(1. 华侨大学计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门大学软件学院, 福建 厦门 361005; 3. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 为了延长无线传感网的生存期, 基于可充电的移动设备, 研究设计了一种无线传感网中移动式能量补充的方法. 移动节点可以在为传感器节点补充能量的同时收集数据. 首先, 通过将无线传感器网络监测区域分割为大小相同的子区域, 该子区域内的节点组成一个簇; 其次, 以一个簇内的总能量为计算依据, 设计移动节点的路径生成算法以确定能量高效的移动路线; 最后, 使用 10 种不同的随机网络拓扑图进行了仿真实验, 以节点移动速度和时延为限制条件分别得到了对比数据. 结果表明, 本文提出的算法与 NJNP (nearest-job-next with preemption) 算法相比在时延相同的条件下 (800 s), 生存期提升了 6 000 s 左右, 在节点速度 5 m/s 条件下生存期提升了将近 14 000 s. 证明本文所提方法有效地提高了充电效率, 延长了网络的生存期, 可用于大规模的无线传感器网络.

**关键词:** 无线传感器网络; 移动节点; 无线充电; 数据收集

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A

### Delay-Constrained Mobile Energy Charging in Wireless Sensor Networks

JIANG Wenxian<sup>1</sup>, MIAO Haixing<sup>1</sup>, WANG Tian<sup>1</sup>,  
WANG Cheng<sup>1</sup>, LAI Yongxuan<sup>2</sup>, LIANG Junbin<sup>3</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. School of Software, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Xining 530004, China)

**Abstract:** In order to prolong the lifetime of wireless sensor networks by using energy-rechargeable mobile devices, this paper designs a mobile energy replenishment method wherein a mobile element gathers data and recharges sensors simultaneously. Firstly, the whole sensor network is divided into several sub-regions equally and the sensors in each sub-region are formed into a cluster. Secondly, considering the energy in a whole cluster, the mobility path is designed to find the energy-efficient mobile trace of the mobile element. Finally, in the simulation experiment, we used ten different random network topologies to show the comparisons with extensive simulation experiments under different velocities and deadlines. The results indicate that the proposed algorithm increases lifetime by approximately 6 000 s compared with Nearest-Job-Next with Pre-emption (NJNP) under the deadline of 800 s. Moreover, the proposed algorithm increases lifetime by approximately 14 000 s compared with NJNP at velocity of 5 m/s. Thus, the proposed algorithm can improve recharging efficiency and

收稿日期: 2016-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61672441, 61772148); 福建省高等学校杰出青年科研人才培养计划资助项目(2017 wangtian)

作者简介: 蒋文贤(1974—), 男, 副教授, 研究方向为无线传感器网络、移动计算等. 电话: 18359242669. E-mail: jiangwx@hqu.edu.cn

通信作者: 王田(1982—), 男, 教授, 博士, 研究方向为物联网、移动计算等. E-mail: wangtian@hqu.edu.cn

引文格式: 蒋文贤, 缪海星, 王田, 等. 时延受限的无线传感网中移动式能量补充[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(6): 1216-1223.

JIANG Wenxian, MIAO Haixing, WANG Tian, et al. Delay-constrained mobile energy charging in wireless sensor networks [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1216-1223.

prolong the lifetime of wireless sensor networks , which can be used in large-scale sensor networks.

**Key words:** wireless sensor networks; mobile nodes; wireless charging; data collection

无线传感器网络<sup>[1]</sup>是由布设于特定地理区域内的大量无线传感器节点以自组织和多跳方式构成的无线网络. 典型的无线传感器网络是在监测区域部署若干传感器节点, 通过多跳传输的方式将感知到的数据发送到汇聚节点(Sink), Sink利用因特网及卫星等通信手段将监测得到的数据发送给管理模块处理. 通过传感器节点从环境中获取到的数据, 可以掌握该区域环境的实时变化情况. 传感器网络具有部署速度快且实时工作能力强等特点<sup>[2-3]</sup>. 目前, 无线传感器网络广泛应用于军事<sup>[4]</sup>、航空<sup>[5]</sup>、医疗<sup>[6]</sup>和环境监测<sup>[7]</sup>等多个领域. 传感器在通信、感知及计算过程中会产生大量的能量消耗, 但传感器节点的能量是定量的, 随着能量的耗尽其也无法再正常工作. 传感器节点的能量特性制约着无线传感器网络的生存期.

为了延长无线传感器网络的生存期, 如何进行数据收集是重点考虑的问题之一. 在传统的无线传感器网络中, 传感器节点通过多跳的方式向基站传输数据, 基站附近的节点由于需要转发大量数据而导致能量提前耗尽而失效, 从而极大地影响了整个网络的性能. 不少研究者们通过引入能量较为充足的移动节点收集网络中固定节点的数据以减轻传感器节点的负担, 平衡网络节点负载, 从而改善网络性能.

除了通过改善数据收集方法优化网络生存期外, 能量采集也是延长网络生存期考虑的方向之一. 传感器可以将环境中的能量转换为自身使用, 如太阳能<sup>[8]</sup>、振动能<sup>[9]</sup>以及风能<sup>[10]</sup>. 但是由于这些自然能源不稳定且能量转换设备的尺寸比较大, 在实际应用中受限较多.

近年来, 随着无线电力传输技术的发展<sup>[11]</sup>, 为解决无线传感器网络的生存期问题提供了一个可行的方法. 无线充电技术可以确保源源不断的能量供应且不易受到周围环境的影响, 因此广泛应用于多个领域, 包括射频识别标签、传感器<sup>[12]</sup>和移动电话<sup>[13]</sup>等. 基于无线充电这项新兴技术, 最近的研究提出了在无线传感器网络中引入移动节点为传感器节点补充能量, 这样就能延长网络生命期. 结合移动式数据收集方法的特性, 考虑使网络中引入的移动节点同时进行数据收集和无线充电, 即移动节点在收集周围传感器节点数据的同时为传感器节

点补充能量, 最后返回基站上传收集到的数据.

综上所述, 功能较强的移动节点为解决无线传感器网络的能量问题带来了希望, 其不仅可以进行数据收集, 还具有移动充电的功能. 目前已有的研究多只针对其中的一个功能, 本文重点研究设计移动节点的充电访问序列, 同时来进行移动数据收集, 并通过设计适应节点移动的路由算法, 以节约节点能量, 延长网络生存期.

## 1 相关工作

移动节点不仅在目标跟踪<sup>[14-15]</sup>、目标监测<sup>[16]</sup>及移动式蠕虫抑制<sup>[17]</sup>等领域有所作为, 对利用移动节点协助进行网络中各传感器节点的数据收集工作这一设想也已有了不少的研究成果. 文献[18]针对移动无线传感器网络提出了一种基于蚁群算法的路由及数据收集协议, 该算法通过传感器节点之间的信号强度及通信速率来评估链路质量, 从而基于这些结果构建拓扑图, 最后运行蚁群算法生成移动机器人(收集数据)的移动路线. Wang等提出一种移动数据收集方法<sup>[19]</sup>, 在限定时间内数据接收器通过遍历Sink节点完成数据的收集任务, 为了满足限定的时延要求, 数据收集器访问汇聚节点一遍, 最后回归Sink节点交付数据. 文献[20]针对在不稳定环境的网络中, 为了更快找出最优移动节点的移动方式, 提出了一种新颖的决策框架——快速马尔科夫决策过程(FMDP), 将移动数据收集任务转化为马尔科夫决策问题. 以上这些方法仅利用移动节点解决数据收集的问题, 没有涉及到传感器节点的能量补充.

另外, 也有大量的研究引入移动节点进行无线充电. Huang等提出了一种基于队列的电动小车充电服务框架<sup>[21]</sup>, 评估各需要进行能量补充的节点, 按请求顺序和与小车距离逐一入队. 小车根据该出队顺序规划充电路径序列. Angelopoulos等提出了无线充电小车从监测区域中心点(基站)出发, 逐跳地、由内而外为传感器节点进行充电, 直到覆盖所有节点<sup>[22]</sup>. 文献[23]假设在一个普通的随机网络场景中, 预定义任意的节点充电路径, 为了最大化充电量, 定义最优的速度控制为关键设计目标, 且该速度要满足每轮的时间限制条件. Zhang等针对多移动充电节点调度问题, 提出了一种充电模式

协同移动充电,并根据这个模式提出了调度算法 PushWait<sup>[24]</sup>,在多个不同的场景中进行了实验验证. Fu 等针对在基于 RFID 的无线可充电网络场景下,提出一种最优调度方案,利用线性规划方法进一步降低产生节点移动路径算法的复杂度<sup>[25]</sup>,目标是确定节点充电位置及充电时间.以上方法仅涉及节点能量补充问题,未考虑数据收集.

在传感器网络中引入节点的多数方法或仅涉及数据收集或仅涉及节点能量补充.为同时考虑二者的特性, Xie 等将基站搭载于移动节点上沿着预定义的路径遍历的同时完成数据收集和节点能力补充的任务<sup>[26]</sup>.不过由于路线是固定的,所以无法应对突发状况. Guo 等考虑移动数据收集与能量补充相结合的优化方案<sup>[27]</sup>,设计了一种寻找最优遍历序列的自适应方案,且考虑到了节点充电和数据收集,每轮产生的移动路径都是根据上一轮收集得到的节点剩余能量信息而确定的,但并非一种实时的自适应调度方案,且考虑的拓扑结构种类太少,没考虑拓扑结构的不同会对算法性能产生影响.

本文基于数据收集和节点能量补充问题,设计了一种时延受限的移动节点调度方案.在每一轮开始调度之前,获取网络中节点的能量信息,通过算法判定产生一条访问路径指导移动节点移动.另外,通过随机算法产生多种不同的网络拓扑结构,测试算法在任意的拓扑结构下是否同样能提高网络生存期.

## 2 问题建模

参考文献[28]的网络环境设置,将网络部署区域设为一个  $K m \times K m$  的二维平面,生成  $n$  个坐标点作为传感器节点的布设点.区域内还包括一个基站  $B$  和一个移动节点  $M$ .设传感器节点  $i$  的能量为  $E_i$ ,若任意传感器节点的能量低于最低能量  $E_{\min}$ ,则该节点失效.  $E_{\max}$  为传感器节点的最大能量容纳量.传感器节点  $i$  的数据产生速率为  $R_i$ ,能量

消耗功率为  $p_i$ ,  $f_{ij}$  为节点  $i$  向节点  $j$  发送数据速率.设节点接收单位比特消耗的能量为  $\rho$ ,节点  $i$  向节点  $j$  发送 1 bit 数据消耗的能量为  $C_{ij}$ .传感器节点满足文献[29-31]的能量模型.

$M$  的移速记为  $v$ ,初始能量为  $E_M$ ,规定的数据收集时延为  $t_D$ .  $t_D$  作为一个限制条件而非实际移动节点一轮遍历所耗费的时间,在此限制条件下,尽可能地自身充电以及为节点充电,以提高整个传感器网络的效率.移动节点对传感器节点进行充电时的输出功率设为  $P_c$ ,有效充电功率设为  $P_u$ .移动节点移动时的输出功率设为  $P_t$ .设在某一轮充电任务中,移动节点的移动时长为  $t_m$ ,在节点  $i$  处停留的时间设为  $t_i$ .

设移动节点的剩余能量为  $E_r$ ,移动节点在基站充电有效功率为  $P$ .移动节点在基站位置的停留时间为  $t_{\text{vac}}$ .优化目标为最大化充电能量消耗与移动能量消耗的比值,从而进行了以下建模:

优化目标为

$$\max \frac{P_c \sum_{1 \leq i \leq n} t_i}{P_t t_m}; \quad (1)$$

限制条件为

$$\sum_{1 \leq i \leq n} p_i \left( t_{\text{vac}} + t_m + \sum_{1 \leq i \leq n} t_i \right) \leq P_u \sum_{1 \leq i \leq n} t_i, \quad (2)$$

$$t_{\text{vac}} + t_m + \sum_{1 \leq i \leq n} t_i \leq t_D, \quad (3)$$

$$E_i \geq E_{\min}, \quad (4)$$

$$E_i + P_u t_i \leq E_{\max}. \quad (5)$$

限制条件(2)防止因节点能量耗尽而引起的网络失效;限制条件(3)限制了充电节点的个数及路径长度;限制条件(4)考虑节点最低能量限制问题;限制条件(5)代表移动节点对传感器节点的充电量和节点的剩余能量不能超过传感器节点的总能量.

图1(a)为某一轮移动节点访问过程开始前网络中各节点的能量剩余状况;图1(b)为移动节点沿着某一路径访问其他传感器节点的过程中,传

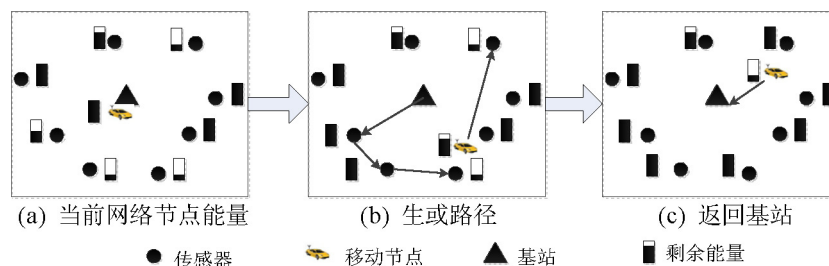


图1 移动式数据收集及充电模型及示例  
Fig. 1 Example of mobile data gathering and charging

传感器节点的能量得到了补充; 图 1(c) 为移动节点在完成一轮访问任务后需要返回基站位置提交数据以及补充能量.

### 3 算法设计

从优化目标(式(1))可以看出, 移动节点在每次出发充电的过程中, 应该尽量多地为节点充电. 根据对问题的建模以及上文设定的优化目标和限制条件, 提出了解决方案. 该方案考虑的是对初始的监测区域进一步的划分子区域. 也就是不单一地考虑某个低能量节点, 而是以区域内各节点计算得到平均能力为考虑重点. 由图 2(a) 可知, 首先将初始设定的检测区域进一步地划分为若干个相同的正方形子区域, 假设传感器节点的分布满足均匀分布, 那么每个区域内都会存在节点. 将每个正方形子区域编号, 子区域  $k$  的区域中心点记为  $A_{C_k}$ . 图 2(b) 表示的是在划分完子区域后, 计算每个子区域节点平均能量, 即子区域节点剩余总能量除以

该区域节点数. 对子区域中心点根据子区域节点平均能量从小到大排序, 得到有序集  $P_C = \{P_1, P_2, \dots, P_i\}$ . 这时运行 TSP (traveling salesman problem) 算法得到在时延  $t_D$  的限制下所能遍历最多的区域中心点集合. 该过程首先要将基站位置作为路径的起点(同样也是终点)加入 TSP 路径中, 之后从有序集  $P_C$  中依次选取中心点加入 TSP 路径中, 若 TSP 路径超出则停止加入, 得到候选区域集  $H_C = \{P_1, P_2, \dots, P_j, j \leq i\}$ . 图 2(b) 中深色区域标识候选区域. 图 2(c) 是最终需要得到的一条移动节点遍历路径. 根据之前得到的候选区域集, 依次将每个候选区域内需要充电的节点统一按照剩余能量从小到大排序, 并运行 TSP 算法, 依次加入到路径中, 最终得到在时延  $t_D$  内所能访问的最大节点集合  $V_C = \{B, v_1, v_2, \dots, v_i\}$ . 需要进一步解释的是: 若某个子区域能量很足而且移动节点不经过该区域, 则在时延限制条件下以多跳传输方式将数据发送出去, 从而兼顾了能量与时延的要求.

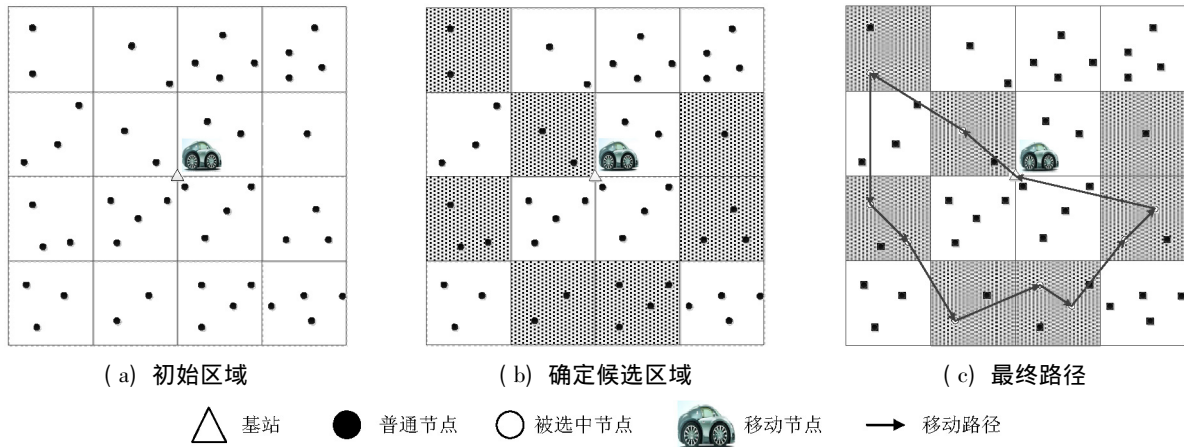


图 2 基于分区的移动节点数据收集和充电序列生成

Fig. 2 Sequence generating of data gathering and charging of the mobile node based on clustering

**算法 1** 基于分区的单移动节点充电和数据收集序列生成算法.

输入: 传感器节点集合  $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$  (0 表示移动节点), 基站  $B$ , 移动节点速度  $v$ , 数据收集时延  $t_D$ , 各节点的剩余能量  $E_i (i \in N)$ , 集合  $P_C$ , 集合  $H_C$ , 集合  $V_C$ .

输出: 移动节点的节点访问序列和相应节点的驻留时间.

- (1) 将初始网络区域划分为若干个相同的正方形子区域, 记作  $R_1, R_2, \dots, R_m$ ;
- (2) 初始化集合:  $P_C = \{\}$ ,  $H_C = \{\}$ ,  $V_C = \{\}$ ;
- (3)  $j = 1$ ;

- (4) while( $j \leq m$ ) do
- (5) 对区域  $R_j$  内各个节点的能量取平均得到  $E_{avg-j}$ ;
- (6)  $j++$ ;
- (7) end while
- (8) 子区域中心点根据  $E_{avg-j}$  升序排列得到有序集  $P_C = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ ;
- (9) 将有序集中的依次选取元素, 执行 TSP 算法得到时延  $t_D$  内所能遍历到的最大区域中心点集合  $H_C = \{P_1, P_2, \dots, P_j\}$  作为候选区域集;
- (10) 将候选区域集中的元素依次加入到 TSP 路径中, 得到移动节点在  $t_D$  时延内所能遍历的最

大节点集合  $V_G = \{B, p_1, p_2, \dots, p_i, i \leq n\}$ .

数据收集协议(每轮)

(1) 从算法 1 得到移动节点的遍历路径;

(2) 根据该路径 不在移动节点访问路径上的普通传感器节点依据地理路由协议<sup>[32-33]</sup>,将数据转发给离自身最近的路径上的节点;

(3) 自身能量小于阈值  $E_a$  的节点将无法转发其他节点的数据;

(4) 移动节点将路径上节点自身及收到的数据悉数上传给基站.

本节最后对设计的算法进行时间复杂度的分析. 传感器节点数  $n$ , 子区域数  $m$ , 采用蚁群算法(设蚂蚁数等于节点数, 迭代次数为  $S$ ) 求解 TSP 的时间复杂度为  $O(Sn^3)$ <sup>[34]</sup>, 显然, 关键性步骤之一是步骤(9) 求最大区域中心点集合, 其中调用了 TSP 路径算法, 最坏情况是调用  $m$  次, 时间复杂度记为  $O(Sm^3m)$ , 简化为  $O(Sm^4)$ ; 另外一个关键性步骤是算法 1 中的步骤(10), 计算最大节点集合, 其中也调用了 TSP 路径算法, 最坏情况是调用  $n$  次, 时间复杂度记为  $O(Sn^3n)$ , 简化为  $O(Sn^4)$ . 因此算法的时间复杂度可以记为  $O(Sn^4 + Sm^4)$ . 又因为  $n \gg m$ , 因此最终的时间复杂度为  $O(Sn^4)$ , 是一个多项式时间内可以完成的算法.

### 4 仿真实验

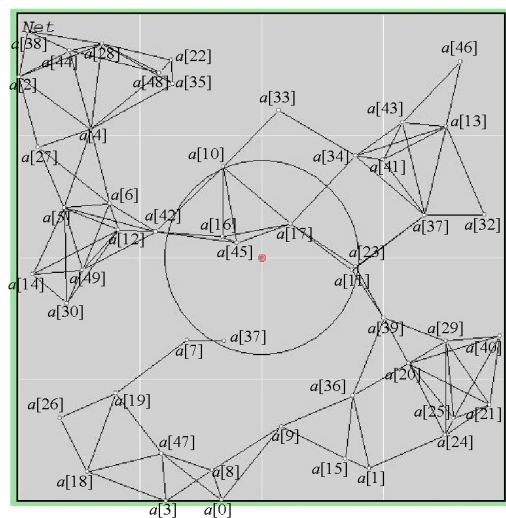
利用 Omnet++ 软件仿真算法 1, 以进行算法的性能评估. 假设将 50 个传感器节点均匀地部署在一个  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的监测区域内, 移动节点位于区域中心位置, 其他具体的相关参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数表  
Tab.1 Simulation parameters

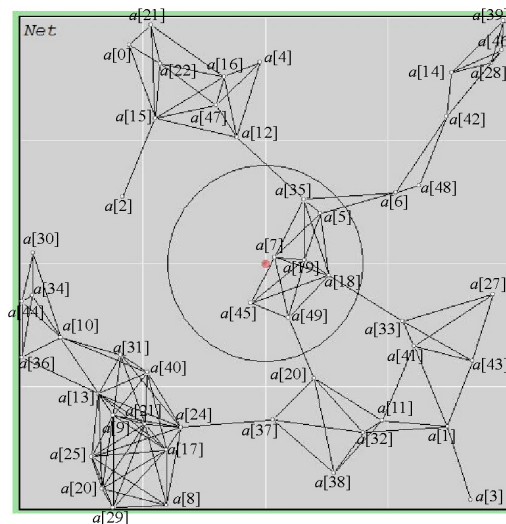
参数	取值
监测区域面积	100 m × 100 m
移动节点初始能量 $E_m$ /kJ	500
传感器节点初始能量 $E_{mi}$ /kJ	10.8
移动节点速度 $v$ / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1 ~ 5
移动节点充放电功率 $P_c$ /W	30
移动节点有效充电功率 $P_u$ /W	20
移动节点移动消耗能量功率 $P_i$ /W	100
基站为移动节点充电的有效功率 $P$ /W	50
能耗系数 $\beta_1$ / ( $\text{nJ} \cdot \text{b}^{-1}$ )	50
能耗系数 $\beta_2$ / ( $\text{pJ} \cdot \text{b}^{-1} \cdot \text{m}^{-4}$ )	0.0013
距离衰减系数 $\alpha$	4
节点通信半径 $r$ /m	20

另外, 为了突出本文算法的性能, 还加入了两种算法进行对比. 分别是: (1) NJNP( nearest-job-next with preemption) 移动充电算法<sup>[35]</sup>, 移动节点每次都为当前网络中能量最低的节点补充能量; (2) JMD ( joint mobile data) <sup>[27, 36]</sup>, 首先对普通节点按剩余能量降序排列. 依次加入 TSP 路径中, 直到超出规定的权值总和则停止加入. 同时该两种算法的路由转发协议与本文算法使用的相同.

图 3(a) 和图 3(b) 为不同的网络拓扑结构图, 为了证实算法的有效性, 仿真实验过程中测试了多种拓扑结构, 以表明本文所提算法在不同的网络拓扑结构下均可延长网络生存期.



(a) 随机因子为 1 的 50 节点的拓扑



(b) 随机因子为 5 的 50 节点的拓扑

图 3 实验中不同随机因子的拓扑图

Fig.3 Network topology of different random factors

图 4 所示 随着数据收集时延从 400 s 增加到 800 s, 也就是时延条件逐渐宽松, 相对而言有利于

延长网络生存期, 但是以牺牲实时性为代价. 各算法的网络生存期均有所提升, 本文算法稍占优势. 可以看出本文算法与 NJNP 算法相比在时延相同的条件下 ( $t_D = 800$  s), 生存期提升了 6 000 s 左右. 从图 5 可看出, 本文算法和 JMD 相比效率十分地接近. NJNP 算法最差, 且稍具浮动, 这是由于 NJNP 算法未考虑优化路径长度的原因.

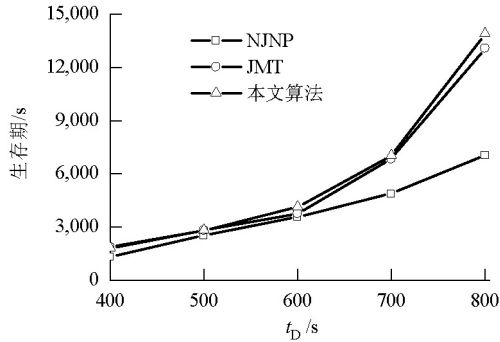


图 4 生存期与数据收集时延的关系 ( $v = 2$  m/s)  
Fig. 4 Lifetime vs. Deadline at mobile node speed of 2 m/s

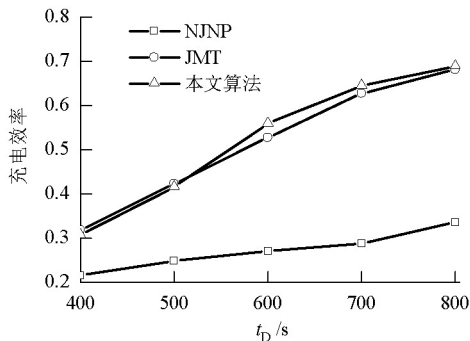


图 5 充电效率与数据收集时制的关系 ( $v = 2$  m/s)  
Fig. 5 Efficiency vs. Deadline at mobile node speed of 2 m/s

图 6 表明移动节点速度的提升 ( $t_D = 700$  s 时) 有利于网络生存期的延长, 而且, 本文算法与 JMD 相比有一定的优势, 速度越快差距越明显, NJNP 最差且起伏大 (是由于移动距离不稳定).

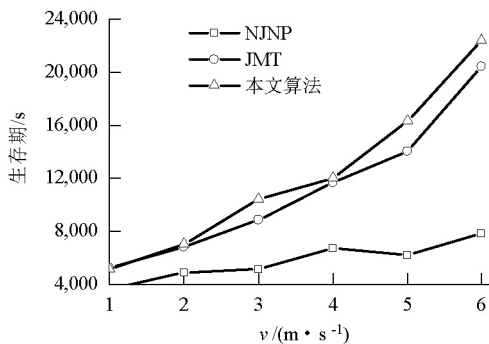


图 6 网络生存期与节点移动速度的关系 ( $t_D = 700$  s)  
Fig. 6 Lifetime vs. Speed under the deadline of 700 s

从图 7 可看出, 随着速度的提升, 各算法的充

电效率也在不断提升, 本文算法和 JMD 二者之间比较接近, 且均优于 NJNP.

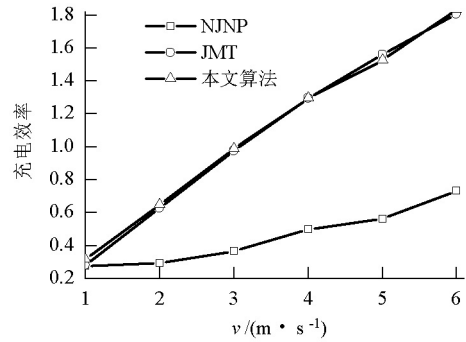


图 7 充电效率与节点移动速度的关系 ( $t_D = 700$  s)  
Fig. 7 Speed vs. Efficiency under the deadline of 700 s

### 5 结束语

在本文中, 提出了移动式充电和数据收集方法, 即移动元素在实现数据收集的同时完成对节点的充电任务, 是首个考虑时延受限的数据收集和充电的研究工作. 所提的算法首先生成移动节点路径, 基于该路径, 移动节点对传感节点的数据进行数据收集和充电. 通过大量的仿真实验验证了本文算法的有效性, 说明了本文所提出的移动式充电和数据收集方法延长了网络的生存期并提高了充电效率.

在将来的工作中, 可以增加移动节点的数目, 并考虑多个移动节点之间的协调配合, 使本文的算法可适用于大规模的传感器网络.

### 参考文献:

- [1] JIN Yangling, DING Yongsheng, HAO Kuangrong, et al. An endocrine-based intelligent distributed cooperative algorithm for target tracking in wireless sensor networks [J]. *Soft Computing*, 2015, 19(5): 1427-1441.
- [2] 张昭. 无线传感器网络虚拟骨干近似算法综述 [J]. *计算机研究与发展*, 2016, 53(1): 15-25.  
ZHANG Zhao. Survey of approximation algorithm on virtual backbone of wireless sensor network [J]. *Journal of Computer Research & Development*, 2016, 53(1): 15-25.
- [3] RAWAT P, SINGH K D, CHAOUCHI H, et al. Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies [J]. *Journal of Supercomputing*, 2014, 68(1): 1-48.
- [4] DURISIC M P, TAFI Z, DIMIC G, et al. A survey of military applications of wireless sensor networks [C]//

- Proceedings of the 2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Montenegro: IEEE, 2012: 196-199.
- [5] YEDAVALLI R K, BELAPURKAR R K. Application of wireless sensor networks to aircraft control and health management systems[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2011, 9(1): 28-33.
- [6] HII P C, CHUNG W Y. A comprehensive ubiquitous healthcare solution on an android™ mobile device[J]. *Sensors*, 2011, 11(7): 6799-6815.
- [7] KHAN A W, ABDULLAH A H, ANISI M H, et al. A comprehensive study of data collection schemes using mobile sinks in wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2014, 14(2): 2510-2548.
- [8] 王小强, 欧阳骏, 纪爱国. 无线传感器网络节点太阳能供电系统设计[J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2012, 12(3): 56-58.  
WANG Xiaoqiang, OUYANG Jun, JI Aiguo. Design of solar-powered ZigBee wireless sensor network node[J]. *Microcontroller & Embedded Systems*, 2012, 12(3): 56-58.
- [9] QIU Jing, CHEN Hengjia, WEN Yumei, et al. Magnetolectric and electromagnetic composite vibration energy harvester for wireless sensor networks[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(17): 17A331.
- [10] ABBASI A Z, ISLAM N, SHAIKH Z A. A review of wireless sensors and networks applications in agriculture[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2014, 36(2): 263-270.
- [11] MUSAVI F, EBERLE W. Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery recharging[J]. *Power Electronics, IET*, 2014, 7(1): 60-66.
- [12] DAI Haipeng, LIU Yunhuai, CHEN Guihai, et al. Safe charging for wireless power transfer[C]// *Proceedings of the INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE*. Toronto: IEEE, 2014: 1105-1113.
- [13] WU Peng, BAI Fan, XUE Quan, et al. Use of frequency-selective surface for suppressing radio-frequency interference from wireless charging pads[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(8): 3969-3977.
- [14] WANG Tian, PENG Zhen, LIANG Junbin, et al. Following targets for mobile tracking in wireless sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2016, 12(4): 31.
- [15] 王田, 彭臻, 陈永红, 等. 异构无线传感器网络对移动目标的连续跟踪[J]. *小型微型计算机系统*, 2015, 36(3): 503-507.
- WANG Tian, PENG Zhen, Chen Yonghong, et al. Heterogeneous wireless sensor networks for continuously tracking mobile targets[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2015, 36(3): 503-507.
- [16] WANG Tian, PENG Zhen, LIANG Junbin, et al. Detecting targets based on a realistic detection and decision model in wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. Qufu: Springer, 2015: 836-844.
- [17] 王田, 吴群, 文晟, 等. 无线传感网中移动式蠕虫的抑制与清理[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(9): 2202-2207.  
WANG Tian, WU Qun, WEN Sheng, et al. The inhibition and cleanup of the mobile worm in wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(9): 2202-2207.
- [18] FARZANA A H F, NEDUNCHELIYAN S. Ant-based routing and QoS-effective data collection for mobile wireless sensor network[J]. *Wireless Networks*, 2016, 23(6): 1-11.
- [19] XING Guoliang, LI Minming, WANG Tian, et al. Efficient rendezvous algorithms for mobility-enabled wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(1): 47-60.
- [20] RAO J, BISWAS S. Network-assisted sink navigation for distributed data gathering: stability and delay-energy trade-offs[J]. *Computer Communications*, 2010, 33(2): 160-175.
- [21] HUANG S, HE L, GU Y, et al. Design of a mobile charging service for electric vehicles in an urban environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(2): 787-798.
- [22] ANGELOPOULOS C M, NIKOLETSEAS S, RAPTIS T P, et al. Efficient energy management in wireless rechargeable sensor networks[C]// *Proceedings of the 15th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. Innsbruck: ACM, 2012: 309-316.
- [23] SHU Y, YOUSEFI H, CHENG P, et al. Near-optimal velocity control for mobile charging in wireless rechargeable sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(7): 1699-1713.
- [24] ZHANG S, WU J, LU S. Collaborative mobile charging[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2015, 64(3): 654-667.
- [25] FU L, CHENG P, GU Y, et al. Optimal charging in wireless rechargeable sensor networks[J]. *IEEE*

- Transactions on Vehicular Technology ,2016 ,65( 1) : 278-291.
- [26] XIE Liguang , SHI Yi , HOU Y T , et al. Bundling mobile base station and wireless energy transfer: Modeling and optimization [C]// Proceedings of the INFOCOM. Turin: IEEE ,2013: 1636-1644.
- [27] GUO Songtao , WANG Cong , YANG Yuanyuan. Mobile data gathering with wireless energy replenishment in rechargeable sensor networks [C]// Proceedings of the INFOCOM. Turin: IEEE ,2013: 1932-1940.
- [28] 缪海星. 无线传感器网络的移动数据收集及充电规划研究 [D]. 厦门: 华侨大学 ,2016.
- [29] XIE Liguang , SHI Yi , HOU Y T , et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer: The multi-node case [C]// Proceedings of the Sensor , Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Seoul: IEEE ,2012: 10-18.
- [30] 吕涛 ,朱清新 ,朱玉玉. 一种能耗均衡的无线传感器网络分簇算法 [J]. 计算机应用 ,2012 ,32( 11) : 3107-3111.  
LÜ Tao , ZHU Qingxing , ZHU Yuyu. Energy-balanced adaptive clustering algorithm for wireless sensor network [J]. Computer Application ,2012 ,32( 11) : 3107-3111.
- [31] HEINZELMAN W , CHANDRAKASAN A , BALAKRISHNAN H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// The 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Maui: Proc. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci. ,2000: 223-232.
- [32] 张衡阳 ,樊玮虹 ,王玲 ,等. 一种实时可靠的移动无线传感器网络贪婪地理路由协议 [J]. 计算机研究与发展 ,2015 ,46( 5) : 713-722.  
ZHANG Hengyang , FAN Weihong , WANG Ling , et al. Real-time and reliabled greedy geographical touting for mobile wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development , 2015 , 46( 5) : 713-722.
- [33] 李建中 ,高宏. 无线传感器网络的研究进展 [J]. 计算机研究与发展 ,2015 ,45( 1) : 1-15.  
LI Jianzhong , GAO Hong. Research advances in wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development ,2015 ,45( 1) : 1-15.
- [34] 冀俊忠 ,黄振 ,刘椿年 ,等. 基于多粒度的旅行商问题描述及其蚁群优化算法 [J]. 计算机研究与发展 ,2010 ,47( 3) : 434-444.  
JI Junzhong , HUANG Zhen , LIU Chunnian , et al. An ant colony algorithm based on multiple-grain representation for the traveling salesman problems [J]. Journal of Computer Research and Development , 2010 ,47( 3) : 434-444.
- [35] HE Liang , GU Yu , PAN Jianping. On-demand mobile energy replenishment in wireless sensor networks [R]. Singapore: Singapore University of Technology and Design ,2013.
- [36] GUO Songtao , WANG Cong , YANG Yuanyuan. Joint mobile data gathering and energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing , 2014 , 13( 12) : 2836-2852.

(编辑:唐 晴)