

射频供能传感网能量源移动路径约束下时延最小化供电方案

池凯凯^{*①} 祝驿楠^{①②} 邵奇可^①

^①(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

^②(浙江工业大学健行学院 杭州 310023)

摘要: 射频能量捕获技术是解决传统无线传感网由于节点电量有限而生命周期受限的有效方法。现有的射频能量源移动供电方案中, 能量源可以无限制地沿任何方向行进到网络区域内的任一位置来给节点供电。然而在现实场景中, 能量源通常只能沿着既有道路行进。考虑能量源行进路径约束下的供电总时延最小化问题, 分别提出全程移动供电方案和部分位置停留供电方案, 并提出高效算法来确定这两个方案的最佳行进路径和供电时间。仿真结果表明, 两种方案的供电总时延均显著优于转折点供电基准方案。相比于部分位置停留供电方案, 全程移动供电方案的计算复杂度较低, 但供电总时延更长一些。

关键词: 射频供能传感网; 无线充电; 行进路径约束; 最小供电时延

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)09-2064-08

DOI: 10.11999/JEIT171204

Charging Time Minimized Charging Schemes for RF-powered Sensor Network with Moving Trajectory Constrained Mobile Energy Transmitter

CHI Kaikai^① ZHU Yinan^{①②} SHAO Qike^①

^①(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

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

Abstract: Radio-Frequency (RF) energy harvesting technique is proved a promising way to solve the short network lifetime issue of traditional Wireless Sensor Networks (WSNs) caused by sensors' finite energy. In the existing charging schemes using the mobile RF Energy Transmitter (ET), ET can move to any location along any moving direction in the monitoring area for energy provision. However, in the practical scenario, ET can only move along the existing roads. For the first time, the charging time minimization issue is considered under the moving trajectory constraint. The Mobile Charging (MC) scheme where ET transmits RF energy while moving and the Static Charging (SC) scheme where ET transmits RF energy while unmoving are proposed, whose the moving trajectory and energy provision time are optimized by the proposed efficient algorithms. Simulation results reveal that the total charging delay of proposed schemes is smaller than the baseline scheme of transmitting energy at turning points. The MC scheme has lower computational complexity but has a slightly larger charging delay as compared to the SC scheme.

Key words: Radio-Frequency (RF)-powered sensor networks; Wireless charging; Moving trajectory constraint; Minimum charging time

1 引言

为解决无线传感器网络(Wireless Sensor Net-

work, WSN)生存周期受限问题, 能量捕获技术已逐步应用于传感器节点的能量供给, 包括太阳能充电、射频能充电等^[1-3]。其中射频能量具有易获取、稳定性高和成本低等优点, 且不受时间和空间制约, 具有广泛的应用前景^[4]。关于射频能量源的供电方式, 相比于能量源位置固定的供电, 采用可移动能量源(Mobile Energy Transmitter, MET)在网络中行进供电, 可在较近距离内为节点提供较大功率的能量供给, 避免偏远节点能量捕获功率很低的缺陷, 因而具有更佳的供电灵活性。

收稿日期: 2017-12-21; 改回日期: 2018-05-02; 网络出版: 2018-07-12

*通信作者: 池凯凯 kkchi@zjut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61472367, 61432015), 浙江省自然科学基金(LY18F020029)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61472367, 61432015), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY18F020029)

针对射频供能WSN中MET移动供电问题, 已经开展了一些研究工作^[5-9], 旨在优化网络不同方面的性能, 包括最大化网络效用等目标。Guo等人^[5]根据WSN中节点当前的剩余能量, 联合设计接下来一轮充电节点的选取和移动数据收集, 以最大化所收集数据的总效用。Xu等人^[6]考虑到MET的总能量是有限的以及MET行进会消耗电量, 以最小化给所有传感节点进行一轮充电过程中的MET电量消耗(包括供电能耗和自身行进能耗)为目标, 研究给所有节点进行一轮充电的MET多趟供电行进线路选取。Dai等人^[7]考虑MET为节点周期性供能, 以最大化随机事件的监控质量(Quality of Monitoring, QoM)为目标, 研究如何选择充电节点以及各节点的充电时间, 同时根据节点捕获的能量规划节点的激活调度策略。文献[8]中, MET周期性地从加油站出发对节点供能使各自捕获的能量达到需求值、再返回加油站休息一段时间, 最优化MET行进路线和各停留点的供能时间, 使MET每个周期内在加油站的可休息时间与周期比值最大化。Shu等人^[9]考虑MET沿着预先制定的路径行进, 在行进总时间和加速度约束下通过控制小车移动速度以最大化网络的生命周期, 并且对行进路径由直线路段构成这种情况的最优解做了理论分析。

关于总供电时延最小化该问题, Fu等人^[10]将可移动RFID阅读器作为MET, 研究其最优停留点和停留供电时长来使每个节点所捕获的能量大于一个给定值, 目标是 minimized 停留点停留总时长。Chen等人^[11]则考虑到MET行进时也可以给网络中的节点充电, 联合设计MET行进线路、行进速度以及各停留点停留时长, 来最小化行进时延和停留供电时延的总和。相比文献[10]中的原始优化方案, 该供电方案有效地利用了MET移动中浪费的时间来供电, 使得供电总时延进一步降低。Fu等人^[12]首次联合优化节点充电时延和MET移动距离, 提出了能量同步的移动充电协议ESync, 同时降低了充电时延和MET行进距离。

值得说明的是, 已有的关于MET移动供电方案都假设MET可以在网络区域中沿任何方向行进和在任意位置停留, 但是在很多实际场景中, MET只能在物理环境中的道路上行进和停留, 这很大程度上限制了已有方案的可用性。本文研究给定网络区域道路分布和传感节点位置时为每个节点充电到一个给定值的MET供电方案设计, 以供电总时延为优化指标, 分别提出了移动式供电和停留式供电方案。具体来说, 本文的主要贡献包含以下4方面:

(1) 首次考虑MET行进道路受限的场景。针对该场景, 设计了全程移动供电(Mobile Charging, MC)方案和部分位置停留供电(Static Charging, SC)方案, 前者中MET边行进边发送射频能量, 后

者中MET在一些选定的位置停留下来为节点供电, 并分别建立相应的供电时延最小化问题模型。

(2) 对于MC方案供电时延最小化问题, 根据捕获总能量与供电时间的线性关系, 将模型转化为线性规划(Linear Programming, LP)问题, 采用LP方法解得MET在每段道路上的最佳行驶时间(即最佳行进速度), 最后基于最小生成树的思想添加一些路段来构造出MET行进的连通图。

(3) 对于SC方案供电时延最小化问题, 以节点为中心构造同心圆与道路相交, 将道路分割为子路段, 将MET在一个子路段内所有位置的节点捕获功率近似为同一个值, 然后将原先的混合整数规划问题转化为LP问题, 求解出每段子路段上的最佳停留时间。

(4) 仿真结果显示, 两种方案的总供电时延均明显优于转折点供电的基准方案。相比于SC方案, MC方案的复杂度较低, 但供电总时延略大。

2 系统模型

WSN的监测区域部署了传感器节点 s_1, s_2, \dots, s_n , 定义集合 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 。节点 s_k 的坐标位置为 (x_k, y_k) 。MET从服务站(Service Station, SS)出发, 在网络区域所存在的道路中选取某些特定的路径行进, 在行进过程中进行移动式供电或者在路上的某些位置停留下来给节点供电, 在使每个节点捕获到工作所需要最小能量需求 δ 后, 返回SS进行能量补充并准备下一周期的供电活动。

给道路转折点从1开始编号, SS所在道路转折点编为序号1, 其他转折点按任意顺序编号。用 V 表示所有道路转折点编号的集合。第 i 个道路转折点的坐标位置为 (x'_i, y'_i) 。根据道路转折点 i 和 j 之间是否存在道路来定义 c_{ij} 如下: 如果它们之间有道路则 $c_{ij}=1$, 否则 $c_{ij}=0$ 。

如果道路转折点 i 与转折点 j 之间存在道路, 用 l_{ij} 表示该道路的长度, 并用 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 表示从转折点 i 与转折点 j 该有向道路。显然, 存在 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 则意味着存在 $\overrightarrow{j \rightarrow i}$ 。转折点 i 与 j 间的道路可以用函数 $y = k_{ij}x + b_{ij}$ 来刻画, 其中 k_{ij} 表示2维平面内该道路的斜率, b_{ij} 表示2维平面内该道路的截距。

文献[13]等在Friis自由空间模型的基础上, 将节点从MET发送的射频能量里捕获的功率建模为

$$P = \rho / (d + \varepsilon)^2 \quad (1)$$

其中, $\rho = \eta G_r G_t \lambda^2 P_t / (16L\pi^2)$, d 表示节点和MET之间的当前距离, G_r 表示节点的接收天线增益, G_t 和 P_t 分别表示MET的发送天线增益和发送功率, λ 表示信号波长, η 表示射频能转换为电能的效率, L 表示路径损耗系数。在原始Friis自由空间模型中加入 ε 的作用是避免 d 过小时捕获功率值趋向正无穷。

3 全程移动供电方案

3.1 问题建模

考虑到MET在 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 上行进过程中, 节点 s_k 捕获的总能量需要通过求积分 $\int_0^{l_{ij}/v_{ij}} P(t)dt$ 来得到, 然而该积分得不到闭合形式的解析表达式, 这给 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ ($i, j \in V, i \neq j$)的最优行进速度求解带来较大的计算量。由于 ε 的本质效用是即避免 d 非常小时Friis自由空间模型的高度不准确, 这里在误差范围内对式(1)作进一步近似处理用以全程移动供电的能量捕获计算。考虑当 d 较大时, 可近似忽略掉 ε , 符合传统能量捕获公式^[1]; 当 d 较小时, $(d + \varepsilon)$ 可近似用 ε 替代, 即

$$P = \begin{cases} \rho/\varepsilon^2, & d < r_0 \\ \rho/d^2, & d \geq r_0 \end{cases} \quad (2)$$

对于 $d < r_0$ 时, 相比式(1), 式(2)中的近似功率的最大可能误差为 $\left(\frac{\rho}{\varepsilon^2} - \frac{\rho}{(r_0 + \varepsilon)^2}\right) / \left(\frac{\rho}{\varepsilon^2}\right) = 1 - \frac{\varepsilon^2}{(r_0 + \varepsilon)^2}$, 为了让 $1 - \frac{\varepsilon^2}{(r_0 + \varepsilon)^2}$ 小于等于误差容限值 σ , 比如 $\sigma = 1\%$, 只需 $r_0 \leq \frac{1 - \sqrt{1 - \sigma}}{\sqrt{1 - \sigma}} \varepsilon$ 。另外, $d \geq r_0$ 时式(2)相对于式(1)的平均相对误差 $\lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d - r_0} \int_{r_0}^d \left(\frac{\rho}{x^2} - \frac{\rho}{(x + \varepsilon)^2}\right) / \left(\frac{\rho}{x^2}\right) dx = 0$ 。

用 l_{ik} 和 l_{jk} 分别表示转折点 i 和 j 与传感器节点

s_k 的距离, v_{ij} 表示MET在道路 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 的运动速度, $E^{(k,ij)}$ 表示在MET从转折点 i 运动到 j 的过程中传感器节点 s_k 捕获的能量, 则

$$E^{(k,ij)}(v_{ij}) = \int_0^{l_{ij}/v_{ij}} P^{(k,p_t)} dt \quad (3)$$

其中, $P^{(k,p_t)}$ 是MET在 t 时刻的 p_t 位置点时节点的能量捕获功率, 而 p_t 取决于道路 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 的方位和MET运动速度 v_{ij} 。

用 γ 表示 s_k 的位置点与转折点 i 之间的连线和道路 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 所成夹角。根据 γ 的大小以及 l_{ik} 和 l_{jk} 与 r_0 的大小关系, 需要分5种不同情况来计算 $E^{(k,ij)}$, 各种情况下的 $E^{(k,ij)}$ 如式(4)所示, 由于篇幅所限, 这里证明从略。从式(4)中可以发现, 节点捕获的能量与MET运动速度 v_{ij} 成反比。定义 $t_{ij} = l_{ij}/v_{ij}$ 作为MET在该路段行进的完成时间, 则对于任意传感器节点 s_k , $E^{(k,ij)}$ 与 t_{ij} 成正比。

用 α_{ij} 表示MET沿道路 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 行进的总次数, $\alpha_{ij} \in \{0, 1, \dots\}$, 则MET从SS出发再回到SS的行进过程需满足类似TSP问题的回路约束, 即对于服务站所在的道路转折点1, 因为其为行进线路的起点和终点, 至少有1次走出去和1次走回来, 从而要满足 $\sum_{i=2}^{|V|} c_{i,1} \alpha_{i,1} \geq 1$ 和 $\sum_{i=2}^{|V|} c_{i,1} \alpha_{i,1} \geq 1$, 而对其它每个转折点 i 满足 $\sum_{j=1}^{|V|} c_{ji} \alpha_{ji} = \sum_{u=1}^{|V|} c_{iu} \alpha_{iu}$, $\forall i \in V \setminus \{1\}$ 。

$$E^{(k,ij)}(v_{ij}) = \begin{cases} \frac{\rho \arctan\left(\frac{l_{ij} - l_{ik} \cos \gamma}{l_{ik} \sin \gamma}\right) + \rho\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)}{l_{ik} v_{ij} \sin \gamma}, & (\gamma \geq \frac{\pi}{2} \text{ 且 } l_{ik} \geq r_0) \text{ 或 } (\gamma < \frac{\pi}{2} \text{ 且 } l_{ik} \sin \gamma \geq r_0) \\ \frac{\rho \arctan\left(\frac{-\sqrt{r_0^2 - l_{ik}^2 \sin^2 \gamma}}{l_{ik} \sin \gamma}\right) + \rho\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) + \rho \arctan\left(\frac{l_{ij} - l_{ik} \cos \gamma}{l_{ik} \sin \gamma}\right) - \rho \arctan\left(\frac{\sqrt{r_0^2 - l_{ik}^2 \sin^2 \gamma}}{l_{ik} \sin \gamma}\right)}{l_{ik} v_{ij} \sin \gamma} \\ \quad + \left(\frac{2\sqrt{r_0^2 - l_{ik}^2 \sin^2 \gamma}}{v_{ij}}\right) \frac{\rho}{\varepsilon^2}, & \gamma < \frac{\pi}{2}, l_{ik} \geq r_0, l_{jk} \geq r_0, l_{ik} \sin \gamma < r_0 \\ \frac{\rho \arctan\left(\frac{-\sqrt{r_0^2 - l_{ik}^2 \sin^2 \gamma}}{l_{ik} \sin \gamma}\right) + \rho\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)}{l_{ik} v_{ij} \sin \gamma} + \left(\frac{l_{ij} - l_{ik} \cos \gamma + \sqrt{r_0^2 - l_{ik}^2 \sin^2 \gamma}}{v_{ij}}\right) \frac{\rho}{\varepsilon^2}, & \gamma < \frac{\pi}{2}, l_{ik} \geq r_0, l_{jk} < r_0 \\ \left(\frac{l_{ik} \cos \gamma + \sqrt{r_0^2 - l_{ik}^2 \sin^2 \gamma}}{v_{ij}}\right) \frac{\rho}{\varepsilon^2} + \frac{\rho \arctan\left(\frac{l_{ij} - l_{ik} \cos \gamma}{l_{ik} \sin \gamma}\right) - \rho \arctan\left(\frac{\sqrt{r_0^2 - l_{ik}^2 \sin^2 \gamma}}{l_{ik} \sin \gamma}\right)}{l_{ik} v_{ij} \sin \gamma}, & l_{ik} < r_0, l_{jk} \geq r_0 \\ \frac{l_{ij}}{v_{ij}} \frac{\rho}{\varepsilon^2}, & l_{ik} < r_0, l_{jk} < r_0 \end{cases} \quad (4)$$

由于节点捕获的总能量必须达到某个阈值 δ ，以维持包括采集数据、发送数据等工作，因此需要满足

$$\sum_{i,j \in V, i \neq j} c_{ij} \sum_{w=1}^{\alpha_{ij}} E^{(k,ij)}(t_{ij}^w) \geq \delta, \quad \forall k \in S \quad (5)$$

以最小化MET总供电时延作为优化目标，即

$$\min_{\alpha_{ij}, t_{ij}^w} \sum_{i,j \in V, i \neq j} \left(c_{ij} \sum_{w=1}^{\alpha_{ij}} t_{ij}^w \right) \quad (6)$$

其中， $\alpha_{ij} \in \{0, 1, \dots\}, \forall i, j \in V, i \neq j$ 和 $t_{ij}^w \geq 0, \forall i, j \in V, i \neq j, w \in \{1, 2, \dots, \alpha_{ij}\}$ 是需要优化的变量， $E^{(k,ij)}(t_{ij}^w)$ 在式(4)中代入 $v_{ij} = l_{ij}/t_{ij}$ 得到。

3.2 最优路段供电时间分配算法

式(6)是一个混合整数规划问题，很难通过推导或设计算法来得出最优解。为了求解问题式(6)，先给出以下两条性质：

引理 1 MET以相同的速度沿道路 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 行进与沿道路 $\overrightarrow{j \rightarrow i}$ 行进，这两种情况下节点的捕获能量是相同的。

证明 由微积分的定义可知，节点 s_k 捕获的能量 $E^{(k,ij)} = \int_0^{l_{ij}/v_{ij}} P^{(k,p)} dt = \lim_{\psi \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{\psi} P^{(k,p)} \frac{l_{ij}}{\psi v_{ij}}$ ，其实是MET在无穷多小路段上时节点的捕获能量总和， $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 与 $\overrightarrow{j \rightarrow i}$ 只是改变了求和顺序，节点捕获到的能量总和是相同的。证毕

引理 2 MET多次沿道路 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 行进与仅进行一次沿道路 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 行进，两者在行进总完成时间相同的条件下，各节点的捕获能量相同。

证明 由式(4)可知当MET沿道路 $\overrightarrow{i \rightarrow j}$ 行进，传感节点捕获的能量正比于MET行进耗时。因此，可用一次更慢速、耗时 $t_{ij} = \sum_{w=1}^{\alpha_{ij}} t_{ij}^w$ 的行进替代 α_{ij} 次总时长为 $\sum_{w=1}^{\alpha_{ij}} t_{ij}^w$ 的行进。证毕

基于以上引理，将问题式(6)拆分成2个子问题：(1)忽略行进道路的回路约束的子问题，且每

段道路原先的两组时间参数 t_{ij}^w 和 t_{ji}^w 合并为一个参数 $t_{\{i,j\}}$ ；(2)在求解子问题(1)后 $t_{\{i,j\}} = 0$ 的那些路段中，挑出一些路段来，将其和子问题(1)中求解出的 $t_{\{i,j\}} \neq 0$ 的路段一起构成一个从SS出发最后回到SS的连通图。

根据式(6)可得到子问题(1)如式(7)：

$$\min \sum_{i,j \in V, i \neq j} c_{ij} t_{\{i,j\}} \quad \left. \begin{array}{l} \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} t_{\{i,j\}} \geq 0, \forall i, j \in V, i < j \\ \sum_{i,j \in V} c_{ij} E^{(k,ij)}(t_{\{i,j\}}) \geq \delta, \forall k \in S \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad (7)$$

其中， $t_{\{i,j\}}$ 为MET完成道路转折点 i 与 j 之间行进供电的时间，是唯一需要优化的变量。可以看出，约束条件和目标函数都为线性，因此用LP方法可解得最佳的 $t_{\{i,j\}}$ 。

值得说明的是，求解出的那些 $t_{\{i,j\}} \neq 0$ 的路段很可能构成不了从服务站出发再回到服务站的连通图，如图1(a)所示，MET供电时间非零的那些路段并没有全连通，而是构成3个连通子图，因此需要进一步添加一些路段以构成连通图，这些路段上MET以较快速度通过，即MET的行进耗时忽略不计。结合前述引理，构成连通图后MET可以在图中任一道路上沿正反方向来回移动任意次数，只要供电总时间相等，其供电效果等价，从而MET能够在连通图上从SS出发最后回到SS。

路段添加算法如下。首先将相互连接在一起的那些路段都归到同一个集合中，称一个集合为一个连通子图，用 z_i 表示。由连通子图定义可知，不同连通子图之间不连通。用 μ 表示连通子图的个数，即有连通子图 z_1, z_2, \dots, z_μ 。接着，任挑两个连通子图 z_i 和 z_j ，找出每个 z_i 中路段包含的转折点与每个 z_j 中路段包含的转折点之间的所有路径并挑出最短的那条路径，添加这条路径使得 z_i 与 z_j 连通，并将 z_i, z_j 以及添加的这条路径一起合并为一个新的连通

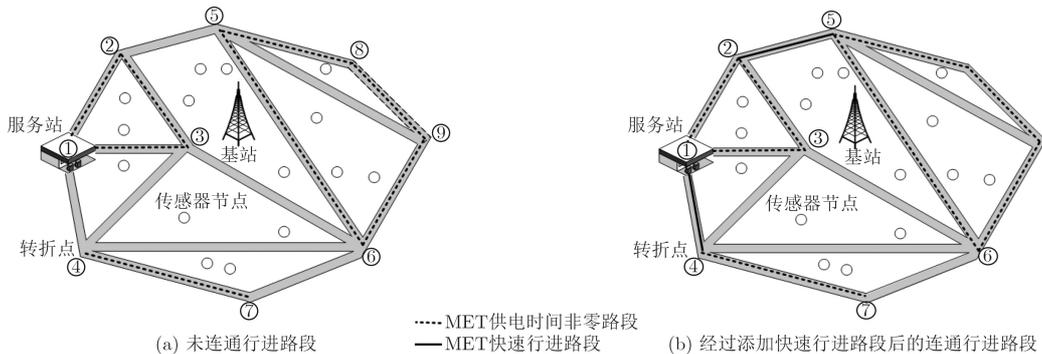


图 1 能量源行进路径未连通和连通示意图

子图。重复上述操作，直到所有连通子图都合并在一起成为连通图，即MET最终行进路段的集合。以图1为例，图1(a)中拥有3个连通子图，任选两个连通子图，比如左上方和右侧的连通子图，寻找两者间最短的路径 $(2,5)$ ($(3,6)$ 的长度大于 $(2,5)$)，将这2个连通子图合并为1个连通子图。目前还剩下2个相互未连通的连通子图，同样地，找到最近的道路 $(1,4)$ 来连接两者。最终得到包含SS的MET行进路线连通图，如图1(b)所示。

本方案的时间复杂度为 $O(|V|^{3.5})$ 。根据前面式(1)的分析可知，节点实际能量捕获功率是要略低于方案中计算用的节点近似能量捕获功率，在给定允许误差 σ 下，实际能量捕获功率与近似捕获功率的比值介于 $[1-\sigma, 1]$ ，因此实际供电总时延与计算供电总时延的比值介于 $[1, 1/(1-\sigma)]$ 。

4 部分位置停留供电方案

4.1 问题建模

考虑MET在行进路径的部分位置停留供电，假设MET在道路上行进的速度相对较快，在道路上行进的耗时忽略不计，供电的总时延为停留位置上的停留时间总和。MET的停留位置受道路约束影响。

用 m_{ij} 表示从转折点 i 与 j 间的道路上MET停留位置的数量，用 $t_{ij}^{(k)}$ 表示在第 k 个停留位置上的停留供电时长。对于 i 与 j 道路上的任一停留位置可用横坐标 x_{ij}^w 单独刻画，而 x_{ij}^w 对应的纵坐标是 $y_{ij}^w = k_{ij}x_{ij}^w + b_{ij}$ ， $w \in \{1, 2, \dots, m_{ij}\}$ 。

建立总供电时延最小化的优化模型OPT如式(8)：

$$\min \sum_{i,j \in V, i \neq j} \left(c_{ij} \sum_{w=1}^{m_{ij}} t_{ij}^w \right) \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} m_{ij} \in N \\ y_{ij}^w(y) = k_{ij}x_{ij}^w(x) + b_{ij}, \forall i, j \in V, \\ \quad i < j, w \in \{1, 2, \dots, m_{ij}\} \\ t_{ij}^w \geq 0, \forall i, j \in V, i < j, w \in \{1, 2, \dots, m_{ij}\} \\ \sum_{\substack{i,j \in V \\ i \neq j}} \left(c_{ij} \sum_{w=1}^{m_{ij}} P^{(k, x_{ij}^w)} t_{ij}^w \right) \geq \delta, \quad \forall k \in S \end{array} \right.$$

其中，各路段的停留点数目 m_{ij} ，停留位置 x_{ij}^w ，停留时长 t_{ij}^w 为需要优化的变量。这是混合整数非线性规划问题，非常难设计有效算法来获得最优解。下面通过将OPT问题在可控误差范围内转化为LP问题来求解。

4.2 部分位置停留供电时间分配算法

本算法的主要思想是：首先将每段直线道路离

散化成多段子路段，无论MET处于子路段的任意位置，节点 s_k 的能量捕获功率都被近似成同一个值；然后将具有无限个候选停留位置的OPT问题转换为具有有限个候选停留子路段的LP问题来求解。

如图2所示，将每段直线道路离散化成多段子路段的方法如下：对于一段直线道路，以每个节点为中心作一组同心圆(后面介绍同心圆半径取值)来与道路相交；所有交点中，每两个相邻的相交点构成一段子路段，从而将道路切割成多段子路段。以图2为例，节点 s_1, s_2 和 s_3 的一部分同心圆与转折点 i 到 j 的直线道路相交产生了交点1到交点8。将MET处于 s_k 的一个同心圆环内任一位置时的 s_k 能量捕获功率近似看作相等，都近似为MET处于该同心圆环的外同心圆上的 s_k 能量捕获功率。因此，MET处于同一子路段内不同位置的 s_k 能量捕获功率相等。

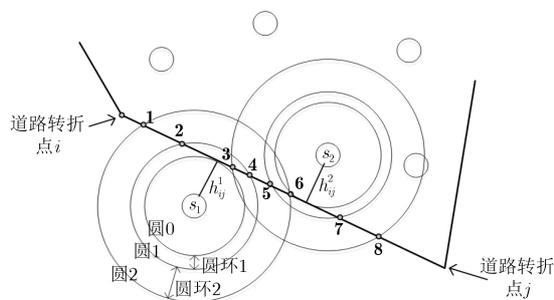


图2 道路离散化示意图

下面说明对于 i 与 j 之间道路，节点 s_k 的与该道路相交的同心圆的半径设置。 s_k 距离道路转折点 i 与 j 之间道路上所有点中最近点的距离表示为 h_{ij}^k ，离直线的两个端点中较远端点的距离表示为 f_{ij}^k 。首先，以 s_k 为圆心， h_{ij}^k 为半径作一个圆，接着根据下面方法确定更大同心圆的半径，并将这些圆依次从0开始编序。节点同心圆的半径设置，要使子路段内不同位置实际能量捕获功率与近似能量捕获功率之间的最大近似误差为 ϑ ，比如 $\vartheta = 1\%$ 。以MET处于 s_k 的第 g 个同心圆环内的子路段为例， s_k 最大能量捕获功率为MET处于第 $g-1$ 个同心圆(即第 g 个同心圆环的内同心圆)上的 s_k 能量捕获功率 $P_{ij}^k[g-1]$ ， s_k 最小能量捕获功率为MET处于第 g 个同心圆(即第 g 个同心圆环的外同心圆)上的 s_k 能量捕获功率 $P_{ij}^k[g]$ ，则同心圆半径取值要满足

$$(P_{ij}^k[g-1] - P_{ij}^k[g]) / P_{ij}^k[g] = \vartheta, \quad g = 1, 2, \dots \quad (9)$$

其中，MET处于第0个同心圆上的 s_k 能量捕获功率 $P_{ij}^k[0] = \frac{\rho}{(h_{ij}^k + \varepsilon)^2}$ 。根据式(9)，按 $g = 1, 2, \dots$ 的顺序可依次计算出 $P_{ij}^k[g]$ 如式(10)：

$$P_{ij}^k[g] = (1 + \vartheta)^{-g} \rho / (h_{ij}^k + \varepsilon)^2 \quad (10)$$

并且可计算出共有 $\left\lfloor 2 \log_{1+\vartheta} \left(\frac{f_{ij}^k + \varepsilon}{h_{ij}^k + \varepsilon} \right) \right\rfloor$ 个与转折点 i 与 j 之间道路相交的同心圆。

根据式(10)进一步计算出第 g 个同心圆的半径为

$$R[g] = (1 + \vartheta)^{\frac{1}{2}g} (h_{ij}^k + \varepsilon) - \varepsilon, \\ g = 1, 2, \dots, \left\lfloor 2 \log_{1+\vartheta} \left(\frac{f_{ij}^k + \varepsilon}{h_{ij}^k + \varepsilon} \right) \right\rfloor \quad (11)$$

对于转折点 i 与 j 之间道路，得到各个节点的同心圆半径后，用 β_{ij} 表示该道路被所有节点的同心圆切割出来的子路段数目， $P_{ij}^{k,\lambda}$ 表示 MET 在第 λ 子路段时节点 S_k 的捕获功率， $t_{\{i,j\}}^\lambda (\lambda = 1, 2, \dots, \beta_{ij})$ 表示 MET 在第 λ 子路段的停留时间。则可以将 OPT 变化为

$$\min \sum_{\substack{ij \in V \\ i \neq j}} \left(c_{ij} \sum_{\lambda=1}^{\beta_{ij}} t_{\{i,j\}}^\lambda \right) \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} t_{\{i,j\}}^\lambda \geq 0, \forall i, j \in V, i \neq j, \lambda \in \{1, 2, \dots, \beta_{ij}\} \\ \sum_{i,j \in V, i \neq j} c_{ij} \sum_{\lambda=1}^{\beta_{ij}} P_{ij}^{k,\lambda} t_{\{i,j\}}^\lambda \geq \delta, \forall k \in S \end{array} \right. \quad (12)$$

这是一个 LP 问题，因此可采用 LP 方法求解出各子路段的最优停留时间。如果一个子路段的停留时间为 0，即说明 MET 不在此子路段停留。该转化算法的时间复杂度为 $O(|V| \cdot n^2 / \vartheta^2)^{3.5}$ 。采用类似于文献[10]中的误差分析方法可知，由于节点实际能量捕获功率略高于节点近似能量捕获功率，本方案的实际供电总时延要略低于上述 LP 问题的计算值，但其比值不低於 $1/(1+\theta)$ 。

综上，部分位置停留供电方案的主要步骤如下：

(S1)根据式(11)来给每个节点计算同心圆半径；
(S2)计算每段道路被同心圆切割的交叉点坐标；
(S3)得到每个子路段在每个节点的第几个同心圆环上；
(S4)计算MET在每个子路段上时节点的能量捕获功率；
(S5)利用LP算法得到各子路段的最优停留时间。

5 仿真结果与讨论

本节通过MATLAB仿真来对上述两种方案以及MET只在转折点停留供电而在道路上快速通过的基准方案进行性能评估。基准方案中，转折点停留供电时长通过求解最小化总供电时延的线性规划问题来取最优值。由于目前已有的以供电时延最小化为目标的MET供电方案均面向MET可以沿任意方向行进该场景，无法应用于MET移动路径约束的场景。

仿真场景如下，网络区域为40 m×40 m和60 m×60 m，区域中有等间距的横向道路和纵向道路，传感器节点随机均匀地分布在该区域内。具体的仿真参数配置为：能量捕获参数 $\rho = 4.32 \times 10^{-3}$ ，短距离能量捕获调整参数 $\varepsilon = 0.2316$ ，MC方案中的误差容限 $\sigma = 5\%$ ，SC方案中的误差容限 $\vartheta = 5\%$ 。分别评估3种方案在不同传感器节点数目、不同捕获能量阈值、不同道路密集程度状况下MET的供电总时延。

5.1 不同节点数目时的MET供电总时延

图3给出了能量阈值为0.1 J、区域内共25个转折点时的不同节点数目下的平均供电总时延。可以看出，MC方案和SC方案的时延均大大优于基准方案，以图3(a)中节点数目为50的情况为例，分别降低了近33.67%和36.64%。考虑到能量捕获的误差情况，分别求出MC方案的实际总时延上界和SC方案的实际总时延下界，相较基准方案降低了30.18%和39.81%。因此实际MC方案和SC方案的供电时延，相较基准方案降低的比例分别在范围[30.18%，

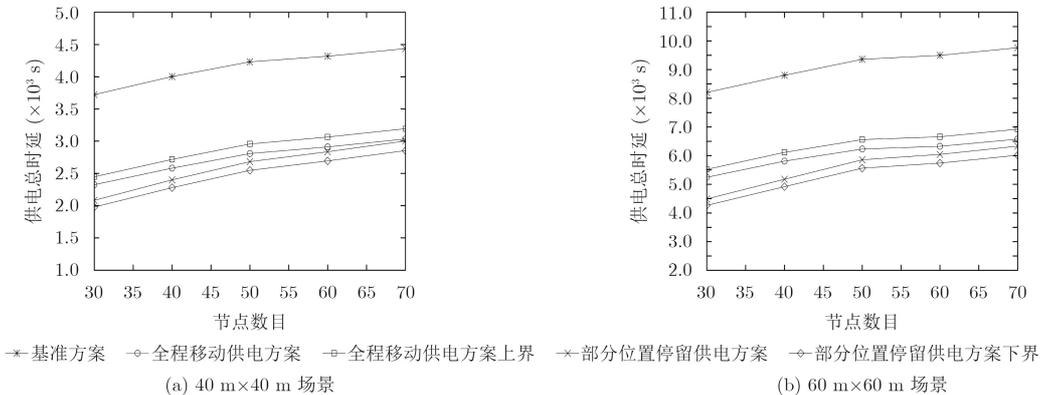


图3 移动能量源供电总时延随节点数目的变化

33.67%]和[36.64%, 39.81%]内。另外,相比于MC方案,SC方案的供电总时延更低,以图3(a)为例,降低的比例介于[4.48%, 13.80%]。而且,供电时延随节点数目的增多而缓慢上升。这是由于节点数目的增多会导致更多节点分布在远离道路的位置。而偏远位置的能量捕获功率较低,每个偏远位置的节点需要MET为其进行长时间供电。另外,通过比较图3(a)和图3(b),可以看出节点密度的大小基本不影响所提出的供能方案带来的供电总时延降低比例。比如说节点数目是50时,网络区域为40 m×40 m的场景中,MC方案和SC方案分别降低了33.67%和36.64%,而在网络区域为60 m×60 m的场景中,MC方案和SC方案分别降低了33.41%和37.41%。

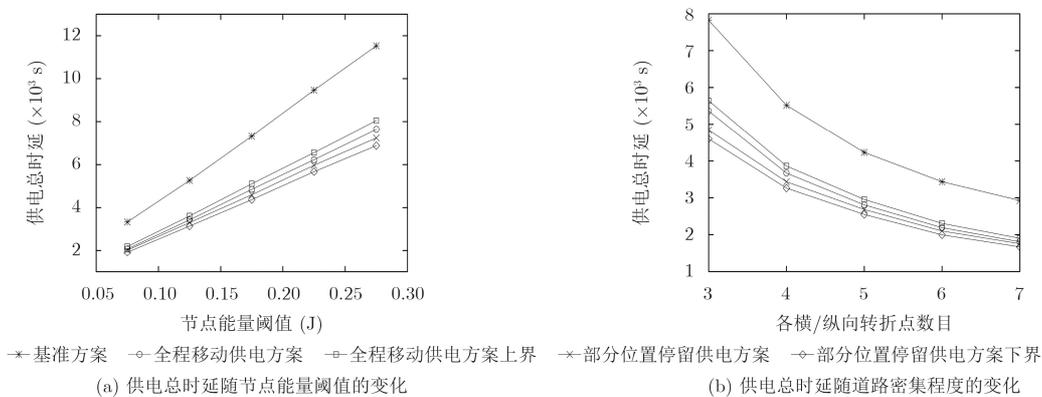


图4 移动能量源供电总时延随节点能量阈值和道路密集程度的变化(40 m×40 m场景)

5.3 不同道路密集程度时的MET供电总时延

图4(b)给出了50个节点、节点能量阈值为0.1 J时的不同道路密集程度下的平均供电总时延。当道路密度增大时,供电的总时延缩短,这是因为可以选择的直线路段或者可停留位置的数目变多和变密集,存在离节点更近的路段。另外,道路密集程度的提高,将会缩小SC方案和MC方案供电时延的差异度。这是合理的,因为SC方案和MC方案的区别在于在某条道路上前者有很多候选停留子路段来优化它们的停留时长,而后者是全程匀速、仅有一个行进速度变量可优化,前者的优化相对更加精细些。当道路变密,每段道路长度变短、道路段数增加,其效果等价于划分为更细的子路段。控制这些变短的大量路段的行进速度,类似于控制SC方案中子路段的停留时长。因此,随着道路密度的增大,MC方案供电时延将逼近SC方案。

6 结束语

本文首次考虑能量源行进道路受约束的场景,在网络区域内道路既定、节点位置已知的情况下,

5.2 不同捕获能量阈值时的MET供电总时延

图4(a)给出了50个节点、25个转折点时的不同能量阈值下的平均供电总时延。每个节点的能量阈值在 $[\delta_{\min}, \delta_{\max}]$ 中随机选择,图4(a)中相邻的能量阈值 δ_1 和 δ_2 (如 $\delta_1=0.05$ 和 $\delta_2=0.10$)之间的平均供电总时延数据点是对 $\delta_{\min}=\delta_1$ 和 $\delta_{\max}=\delta_2$ 的那些随机拓扑所得到的仿真平均结果。可以看出,节点的能量阈值越高,MET的供电时延也增大。这是因为对于每个节点而言,能量需求变大,对其供电的时间也应相对增加。由图4(a)可知,供电总时延随能量阈值的变化趋势接近线性。这是因为倘若节点位置给定不变,MET的供电时延随着节点能量阈值的增加而线性增加。另外,如前所述,相较MC方案,SC方案的供电时延略低。

设计了全程移动供电方案和部分位置停留供电方案,并分别将原问题近似为LP问题来进行求解。仿真结果表明,两种方案的供电总时延均显著优于转折点供电基准方案。相比于部分位置停留供电方案,全程移动供电方案的计算复杂度较低,但供电总时延较长。

参考文献

- [1] LU Xiao, WANG Ping, NIYATO D, *et al.* Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 757–789. doi: 10.1109/COMST.2014.2368999.
- [2] DAI Haipeng, LIU Yunhuai, CHEN Guihai, *et al.* Safe charging for wireless power transfer[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(6): 3531–3544. doi: 10.1109/TNET.2017.2750323.
- [3] KU Menglin, LI Wei, CHEN Yari, *et al.* Advances in energy harvesting communications: Past, present, and future challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 1384–1412. doi: 10.1109/COMST.2015.2497324.
- [4] DAI Haipeng, WANG Xiaoyu, LIU Xiangyang, *et al.* Optimizing wireless charger placement for directional

- charging[C]. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Atlanta, USA, 2017: 1–9. doi: 10.1109/INFOCOM.2017.8057017.
- [5] GUO Songtao, WANG Cong, and 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. doi: 10.1109/TMC.2014.2307332.
- [6] XU Junyi, YUAN Xiaohui, WEI Zhenchun, *et al.* A wireless sensor network recharging strategy by balancing lifespan of sensor nodes[C]. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). San Francisco, USA, 2017: 1–6. doi: 10.1109/WCNC.2017.7925625.
- [7] DAI Haipeng, JIANG Lintong, WU Xiaobing, *et al.* Near optimal charging and scheduling scheme for stochastic event capture with rechargeable sensors[C]. International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS), Hangzhou, China, 2013: 10–18. doi: 10.1109/MASS.2013.60.
- [8] XIE Liguang, SHI Yi, HOU T, *et al.* On renewable sensor networks with wireless energy transfer: The multi-node case[C]. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), Seoul, South Korea, 2012: 10–18. doi: 10.1109/SECON.2012.6275766.
- [9] SHU Yuanchao, YOUSEFI H, CHENG Peng, *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. doi: 10.1109/TMC.2015.2473163.
- [10] FU Lingkun, CHENG Peng, GU Yu, *et al.* Minimizing charging delay in wireless rechargeable sensor networks[C]. International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Turin, Italy. 2013: 2922–2930. doi: 10.1109/INFOCOM.2013.6567103.
- [11] CHEN Feiyu, ZHAO Zhiwei, MIN Geyong, *et al.* Speed control of mobile chargers serving wireless rechargeable networks[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 80: 242–249. doi: 10.1016/j.future.2016.12.011.
- [12] FU Lingkun, HE Liang, CHENG Peng, *et al.* ESynC: Energy synchronized mobile charging in rechargeable Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9): 7415–7431. doi: 10.1109/TVT.2015.2481920.
- [13] HE Shibo, CHEN Jiming, JIANG Fachang, *et al.* Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks[C]. International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Shanghai, China, 2011: 2006–2014. doi: 10.1109/INFOCOM.2011.5935007.
- 池凯凯：男，1980年生，教授，研究方向为物联网。
祝驿楠：男，1997年生，本科生，研究方向为物联网。
邵奇可：男，1977年生，副教授，研究方向为物联网。