

## 分簇传感器网络中时延约束下移动 sink 的路径优化

侯贵升, 吴晓蓓, 黄成, 徐志良

(南京理工大学自动化学院, 南京 210094)

**摘要:** 在分簇传感器网络中引入移动 sink, 用于协助其上层网进行数据汇聚. 为解决时延约束与节能需求间的矛盾, 提出一种基于效用优先级和反效用优先级的移动 sink 路径优化选择算法. 依据最小能耗原则首先为非访问节点设计了数据迁移路径寻找方案, 随后在此基础上提出一种基于节点效用优先级的访问点集贪婪构造算法, 并基于反效用优先级为其设计了两种优化方案. 仿真实验验证了所提出算法的有效性, 保障时延要求的同时最大限度地降低了网络能耗.

**关键词:** 分簇传感器网络; 移动 sink; 数据汇聚; 最小能耗访问点集; 时延约束

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

## Optimizing path selection for mobile sink under delay constraint in cluster sensor networks

HOU Gui-sheng, WU Xiao-bei, HUANG Cheng, XU Zhi-liang

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: HOU Gui-sheng, E-mail: guisheng\_hou@163.com)

**Abstract:** The mobile sink is introduced into the cluster sensor network to assist its upper network in aggregating data. In order to solve the contradiction between the delay constraint and the demand of energy saving, an optimal path selection algorithm for the mobile sink based on nodes' utility priority and anti utility priority is proposed. According to the principle of minimum energy consumption, a path searching scheme for non-visit nodes moving data is designed. On this basis, a visit-point set greedy construction algorithm based on nodes' utility priority is proposed, and two kinds of optimization scheme for it are designed based on nodes' anti utility priority. Simulation experiments verify the effectiveness of the proposed algorithm, and the delay requirement can be guaranteed while minimizing the energy consumption of the network.

**Keywords:** cluster sensor networks; mobile sink; data aggregation; minimum energy-consumption visit-point set; delay constraint

### 0 引言

近年来的研究<sup>[1-3]</sup>表明, 在传感器网络中引入移动 sink 能有效降低网络能耗. 但因 sink 移动速度(大约 0.1 ~ 3 m/s, 如 NIMS<sup>[4]</sup>、iRobot<sup>[5]</sup>等)的限制, 通常会带来较大的数据收集时延. 而网络应用往往对于所要求的数据有时延要求, 如何在保障时延的同时, 最大限度降低网络通信能耗是带有移动 sink 传感器网络研究的一个难点.

目前, 已有一些文献对此进行了初步研究. 文献[6]介绍了一种名叫“数据骡子调度”的通用架构, 综合多跳路由、移动路径设计和任务调度等多个方面, 试图在网络能耗与数据延时之间找到一个符合应用

需求、可调节的动态平衡. 文献[7]提出了一种利用移动 sink 进行数据聚集的实用机制, 既能用于连通网络也能在分割网络中发挥作用. 文献[8]针对 sink 移动轨迹可变和固定两种情况, 提出了相应的数据汇集点设计算法. 文献[9]将网络区域划分为若干虚拟单元格, 从这些单元格的顶点中选择一部分作为数据汇集点以避免移动 sink 访问实际节点, 从而减小节点总数对路径选择算法复杂度的影响. 文献[10]根据数据采集的不确定性, 提出了一种基于访问概率的数据汇集点选择算法. 上述算法有几个共同特点: 1) 针对平面网络, 分簇网络更适合引入移动 sink, 因为分簇网络中簇头节点不仅数据量大, 而且相互间距离远, 若利

收稿日期: 2014-05-09; 修回日期: 2014-08-05.

基金项目: 教育部博士点基金项目(20113219110028).

作者简介: 侯贵升(1985-), 男, 博士生, 从事无线传感器网络的研究; 吴晓蓓(1958-), 女, 教授, 博士生导师, 从事无线传感器网络、智能控制等研究.

用移动 sink 协助其上层网进行数据汇聚,则预期获得的能量效益将更显著. 2) 数据从源节点转移到汇集点使用最小跳数路径,该路径未能利用节点的功率控制能力,造成不小的能量浪费. 3) 未考虑数据的空间分布和动态变化特点,导致算法对于网络变化的适应性不足.

鉴于此,本文研究带有移动 sink 分簇传感器网络上层网的数据汇聚,试图在满足网络应用对于数据时延要求的前提下最小化汇聚总能耗,不仅明确了时延约束下带有移动 sink 分簇传感器网络上层网数据汇聚总能耗最小化问题,而且根据上层网数据的空间分布,为非访问节点上的数据设计了最小能耗迁移路径寻找算法,同时针对最小能耗访问点集(MEVS)问题,提出了一种基于能量收益与移动距离成本间相对关系的启发式算法,最后利用 Matlab 构建的仿真平台评估了所提出算法的性能.

## 1 系统模型和问题描述

### 1.1 系统模型

考虑带有一个移动 sink 的典型分簇传感器网络,如图 1 所示. 大量传感器节点随机均匀部署在监测区域,初始化后,运行自适应分簇算法<sup>[11-12]</sup>将网络组织为层次结构. 下层网由普通节点组成,专司数据采集;上层网由簇头节点组成,负责任务分派和数据聚合. 普通节点根据任务要求采集相关数据并将其传送给簇头,接收到全部成员节点的数据后,簇头节点先对数据进行聚合,然后发送一份简报通知移动 sink (具有移动功能的特殊 sink 节点,能量在初始点位置获得更新,计算和存储资源比较丰富),简报内容包括节点物理位置和待汇报的数据总量. 移动 sink 接收到上层网的全部简报后,根据节点位置和数据量,结合网络时延约束(在数据时延期限值与移动 sink 能量更新周期值中,取较小者)计算出最佳移动路径(保障时延的

同时最小化数据获取总能耗),并沿着该路径从初始点出发依次访问路径上的簇头节点,未被访问的簇头节点则需按移动 sink 提前通知的迁移路径将数据转移到相应的访问节点或 sink 初始点. 回到初始点后,移动 sink 将数据提交给用户或管理节点,同时接受新的任务,开始新一轮循环.

分簇传感器网络中,上层网会随着簇头的定期或不定期更新而动态变化,但这对移动 sink 获取数据并无实质影响,因为移动 sink 只关心数据,且工作模式为非固定“片式”被动响应模式或按需服务模式(一轮接一轮),能够较快地适应这种变化.

### 1.2 假设和能量模型

实际应用中,移动 sink 的路径设计不仅要满足时延和节能的要求,还必须考虑系统稳定性、移动构件机械状况、环境条件等诸多因素. 为简化研究,本文作以下假设:

**假设 1** 簇头节点能进行功率控制.

**假设 2** 簇头节点知晓自身物理位置并拥有足够大存储空间.

**假设 3** 移动 sink 只在访问点(包括访问节点和 sink 初始点)之间作匀速直线运动,且在访问点上提取数据与调整方向的时间忽略不计.

**假设 4** 普通节点采集数据的速度和数据在网络中传输的速度远大于 sink 的移动速度,由采集和网内传输引起的数据时延可忽略.

本文的研究集中在上层网,若无特殊说明,节点均指构成上层网络的簇头节点. 根据文献[11]中的无线通信能耗模型,节点发送单位比特数据的能耗  $E_T = E_{elec} + E^P$ ,接收单位比特数据的能耗  $E_R = E_{elec}$ ,其中  $E_{elec}$  表示电路驱动能耗,  $E^P$  表示路径损耗或空间传输能耗.  $E^P$  与通信距离相关,距离较近时,适于自由空间模型  $E^P = E_{fs}d^2$ ,超过某一门限距离  $d_0$  后,则宜采用多径衰落模型  $E^P = E_{mp}d^4$ .

### 1.3 路径优化问题描述

**定义 1**(最小能耗移动路径) 在满足时延约束的条件下使得数据从分簇传感器网络上层网汇聚到 sink 的总能耗最小的 sink 移动路径.

**定义 2**(最小能耗访问点集) 最小能耗移动路径对应的访问点集.

假设在某轮工作循环中,移动 sink 初始点为  $S_0$ ,移动速度为  $V_m$ ,时延约束为  $D_c$ ,于是 sink 的移动距离上限  $L_m = V_m D_c$ ;若  $C$  和  $Q = (q_i)$  分别表示上层网络节点集和对应的数据量集合,  $M$  代表需要进行数据迁移的节点集合,则依据 1.2 节描述的节点通信能耗模型,数据从上层网汇聚到 sink 的总能耗(sink 能

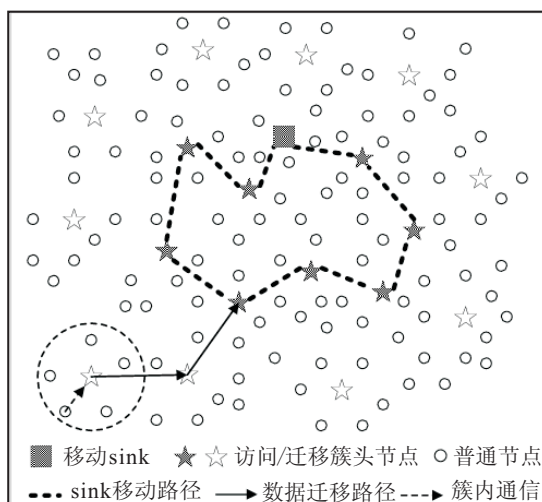


图 1 基于移动 sink 的分簇 WSN 数据汇聚情形

耗不计)为

$$E_{\text{all}} = \sum_{i=1}^{|M|} (2E_{\text{elec}}h_i + E_i^P(1) + \dots + E_i^P(h_i))q_i + E_{\text{elec}} \sum_{i=1}^{|C|} q_i - 2E_{\text{elec}} \sum_{i=1}^{|M_0|} q_i. \quad (1)$$

其中:  $h_i$  表示迁移节点  $i$  上的数据沿最小能耗路径迁移到邻近访问点的总跳数,  $E_i^P(k)$  表示其中第  $k$  ( $1 \leq k \leq h_i$ ) 跳的路径损耗,  $M_0$  表示归属于(以该访问点为迁移目标点)  $S_0$  的迁移节点集合. 式(1)中第1项表示迁移节点转移数据的总能耗, 第2项表示移动 sink 从访问点提取全部数据的能耗, 第3项表示将  $S_0$  当作普通访问节点而多计入的能耗. 极端情况下所有数据都汇聚到  $S_0$ , 即通常的固定 sink 数据汇聚, 此时, 该项相对于前两项之和可忽略不计(不足 10%). 考虑到  $Q$  对于具体的某轮工作循环而言为常量, 最小能耗移动路径问题或 sink 移动路径优化问题可描述为

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^{|M|} (2E_{\text{elec}}h_i + E_i^P(1) + \dots + E_i^P(h_i))q_i; \\ \text{s.t. TSP}(V) \leq L_m. \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $V$  (包括  $S_0$ ) 表示访问点集,  $\text{TSP}(V)$  表示移动 sink 从  $S_0$  出发经过所有访问节点所在位置点后回到  $S_0$  的最小移动距离, 即移动 sink 环游点集  $V$  的旅行商问题<sup>[13]</sup>求解. 从式(2)可以看出, 迁移节点迁移数据的能耗对于最小化数据汇聚总能耗起着决定作用, 而数据迁移总能耗不仅与迁移路径有关还与数据量以及上层网节点分布情况相关; 因而, 即使每个迁移节点的数据都选择最小能耗路径, 也难以保证总体能耗最小, 只有同时找到最佳的迁移节点组合才能达到目标, 这等价于寻找 MEVS. 求解 MEVS 问题正是本文的研究重点, 至于其对应的最短环游路径即最小能耗移动路径求解, 属于纯数学问题, 不在讨论范围之内, 在此不再赘述. 不过, MEVS 问题属于典型的组合优化问题, 难以直接求解, 本文将在下节给出一种启发式算法解决该问题.

## 2 MEVS 问题的求解

### 2.1 数据迁移

sink 移动轨迹将上层网节点划分为访问节点和迁移节点, 后者需将数据迁移到邻近的访问节点或 sink 初始点, 路径为最小能耗路径, 由 sink 根据从各节点传送来的简报中提供的位置信息构造出的网络图计算得出. 设有向网络  $G = (V, M, E)$ , 其中  $V$  (包括  $S_0$ ) 和  $M$  分别表示访问点集和迁移节点集,  $E$  为链路集,  $E = \{(i, j) : i \in M, j \in (V \cup M)\}$ . 链路  $(i, j) \in E$ ,  $W_{ij}$  为其权值即单位比特数据在该链路上的一跳能耗. 设  $M_P$  为已找到数据迁移路径的节点集合,  $P$  为

对应的路径集, 初始时两者均为空. 数据迁移路径寻找方法如下:

1) 任取  $m, m \in M$  且  $m \notin M_P$ , 设  $S$  为已知最短路径(以  $m$  为源点自身为终点的最小权值路径)的节点集, 初始化  $S = \{m\}$ , 其补集  $\bar{S} = (V \cup M) - S$ .

2) 对边集  $(S, \bar{S}) = \{(i, j) : (i, j) \in E, i \in S, j \in \bar{S}\}$  中的边作运算  $(d_{m \rightarrow i} + W_{ij})$ , 其中  $d_{m \rightarrow i}$  表示从节点  $m$  到节点  $i$  的最短路径路长.

3) 设  $j^* = \arg \min_{(i, j) \in (S, \bar{S})} (d_{m \rightarrow i} + W_{ij})$ , 标记点  $j^*$ :  $(i^*, d_{m \rightarrow j^*})$ ,  $i^*$  为  $m \rightarrow j^*$  路径上  $j^*$  的最近上游节点.

4) 若  $j^* \notin V$ , 则  $S = S \cup \{j^*\}$ ,  $\bar{S} = (V \cup M) - S$ , 跳转到 2), 否则进入下一步.

5) 节点  $m$  的数据迁移目标点找到, 即  $j^*$ , 通过标记回溯(利用标记中的第 1 项即  $i^*$  向源点方向递推)求其迁移路径  $P_m$ , 将  $m$  与  $P_m$  分别加入  $M_P$  和  $P$ ; 若  $P_m$  路径上存在中间节点, 则将其中尚未寻找到数据迁移路径的节点也加入  $M_P$ , 对于迁移路径为  $P_m$  的子路径, 将其加入  $P$ ; 如果  $M_P = M$ , 则结束, 否则跳转到 1).

求得迁移路径后, 在该路径上转移数据的能耗便能轻易获得, 即路径权值乘以数据量.

### 2.2 访问点集贪婪构造算法及优化

对于相同的距离约束而言, 最小能耗访问点集获得的能量收益显然是最高的, 若以能量收益对移动距离成本为参照选择访问节点无疑是合理的.

**定义 3** 效用优先级

$$\text{up}(v|V) = \frac{E_V^M - E^M(V \cup \{v\})}{\text{TSP}(V \cup \{v\}) - L_V},$$

$$\text{TSP}(V \cup \{v\}) \leq L_m. \quad (3)$$

其中:  $L_V$  和  $E_V^M$  分别表示当前访问点集  $V$  对应的最短环游路径长度和迁移节点转移数据的总能耗;  $v$  表示需要加入  $V$  的某个候选节点;  $\text{up}(v|V)$  表征  $v$  加入后获得的能量收益与消耗的距离成本间的比率, 用于从候选节点集中选择新的访问节点. 优先级大小比较上, 遵循“相等时分子较大者大”的原则. 基于此, 结合贪婪法则很容易设计一种求解 MEVS 问题的启发式算法, 即访问点集贪婪构造算法. 然而, 仅如此还不足以构造出上佳的访问点集, 因为随着新访问节点的不断加入, 后加入的节点会分流(分流迁移数据)甚至屏蔽先加入的节点, 致使其能量收益大幅下降(尤其是被屏蔽的访问节点), 需要及时将其清理. 为此, 引入反效用优先级.

**定义 4** 反效用优先级

$$\text{aup}(r|V) = \frac{L_V - \text{TSP}(V - \{r\})}{E^M(V - \{r\}) - E_V^M}. \quad (4)$$



### 3.1 贪婪构造算法的性能

在构造访问点集时,最简单的方法是对节点到 sink 初始点的距离排序,并由近到远依次选择访问节点,直到环游路径长度达到移动距离上限值,这种方法不考虑数据的空间分布与动态变化特点,操作简单,复杂度低,将其记为 Near To Far; 另外,实际应用中为保持系统的稳定性常采用固定 sink 移动轨迹方式,比如 NIMs 和 XYZ<sup>[14]</sup>等. 作为比较,本文设计了一个相应的实例 Fixed-Track, 如图 3 所示,两条相互交叉的固定轨道上均匀分布着众多虚拟汇集点,当移动 sink 经过时,从邻近节点上提取以该汇集点为目标点的迁移数据,虚拟汇集点的间距可根据需要调整. 显然,间距越小,汇集点越多,对于相同的距离约束而言,潜在能量收益越高.

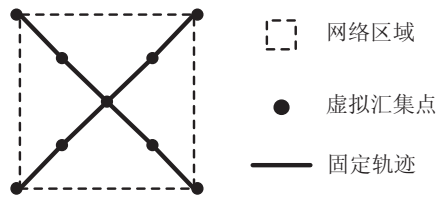


图 3 Fixed-Track 结构

图 4 显示了上述两种算法与不带优化的贪婪构造算法 Greedy-Only 在数据汇聚总能耗上的比较结果. 各算法曲线均起始于固定 sink 汇聚点,此时总能耗最大,随着 sink 移动距离上限值的增大, sink 移动路径覆盖的网络区域不断增大,3 种算法的总能耗先快速下降,随后平稳下降,最后逐渐收敛于各自的下限值. 快速下降阶段, sink 可移动范围较小, Fixed-Track-20 因间距小(间距 20 m),汇集点众多而且整体分布均匀,能量收益总体最好. 平稳下降阶段, Greedy-Only 的总能耗曲线一直处于最下面,相同移动距离约束,其能量收益最高,这主要得益于利用效用优先级选择访问节点. Fixed-Track-85 的曲线呈现阶梯状下降,主要是由于汇集点间距太大所致. 逐渐收敛阶段, Near To Far 和 Greedy-Only 都收敛于全访问位置点,大约在 5000 m 左右,并且两者总能耗相等即理论上的最小值. 虽然 Fixed-Track 覆盖所有汇集点的最小移动距离将近 4000 m(固定轨道长度和的 2 倍),但在 3000 m 后 Fixed-Track 的总能耗几乎保持不变了,原因是分布在网络四角区域的汇集点在能量收益方面相对于中间区域的汇集点大幅下降. 表 1 比较了 Fixed-Track-20 (FT20)、Near To Far (NTF) 和 Greedy-Only (GO) 在不同移动距离上限值下的仿真计算时间. 对比图 4, 显然,本文所提出算法是以计算代价换取能量收益,前者对于移动 sink 而言是廉价的,而后者对于网络而言是宝贵的,这正是所提出算法的意义所在. 至于复杂计算所引起的时延,相对于时延约束而言,可忽略不计. 因为在实际应用中,移动 sink 因速度限制,很难用

于对时延敏感的应用场合,而比较适用于协助延迟容忍但流量大的网络收集数据.

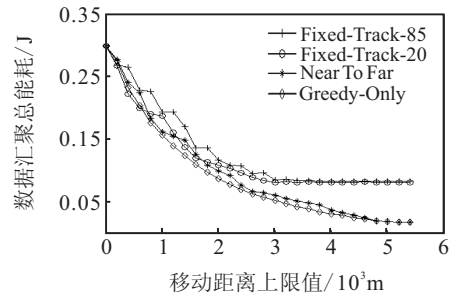


图 4 数据汇聚总能耗对比

表 1 仿真计算时间比较

算法	0	1000	2000	3000	4000	5000
FT20	0.03	0.05	0.07	0.10	0.15	0.15
NTF	0.07	0.08	0.11	0.18	0.35	0.05
GO	0.07	3.5	6.4	9.8	12.0	0.05

### 3.2 两种优化方案比较

将带有构造中优化和构造后优化的贪婪构造算法分别记为 Gopt-Step 和 Gopt-End. 图 5(a) 和图 5(b) 分别比较了两种算法相对于 Greedy-Only 总能耗和仿真计算时间的比率. 移动距离约束较紧时,可选访问节点有限;移动距离约束十分宽松时,可选迁移节点有限. 这两种情况下无论优化与否,按照节点效用优先级标准所得访问点集基本一致,但在中间区段,优化的效果凸显,在 sink 移动距离上限值为 2000 m 左右时,一度达到最佳. 相对于构造后再优化,构造中优化的效果更佳,而且优化步长越短,效果越好,但在计算复杂度上,情况则刚好相反.

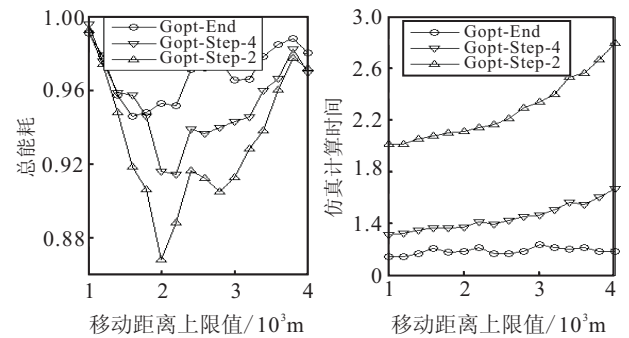


图 5 两种优化方案对比

### 3.3 移动 sink 初始位置对数据汇聚的影响

sink 初始位置会对数据汇聚产生影响. 图 6 显示了 sink 初始位置在网络区域的左下到右上对角线的 8 个等距间隔位置点上 Near To Far、Gopt-End 和 Gopt-Step-2 三种算法的数据汇聚总能耗对比,选取的移动距离上限值分别为 500 m 和 2500 m. 从对比中不难看出,可移动距离较小时, sink 的初始位置对于数据汇聚总能耗影响明显:越靠近网络中心区域,总能耗越小,这是因为移动 sink 覆盖区域越接近网络中心,迁

移节点转移数据的平均能耗就越低,故而总能耗越小,所以整体曲线呈现明显的“U”字形。相反, sink 可移动距离很大时,由于活动区域广,初始位置对数据汇聚影响十分有限。

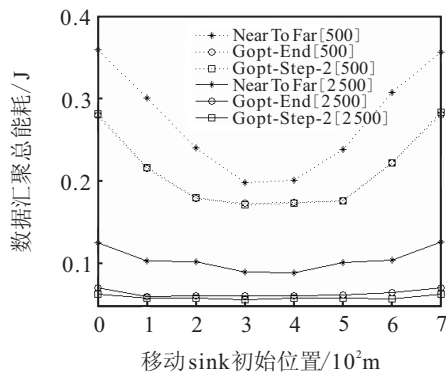


图6 sink 初始位置对于数据汇聚总能耗的影响

## 4 结论

本文将移动 sink 用于协助分簇传感器网络上层网进行数据汇聚以减小网络能耗。为满足数据时延要求,提出了一种基于能量收益对移动距离成本的访问点贪婪构造算法,并为其设计了两种优化方案:构造中优化和构造后优化。仿真结果表明,本文算法及其优化方案在相关网络参数设定下能获得预期效果,即保障数据时延的同时最大限度节省网络能量。不足之处在于本文算法的计算复杂度偏高,加上 sink 本身的移动速度限制,算法不适用于实时网络,而比较适用于网络应用对于数据时延不是十分敏感的延迟容忍型网络,如生态监测传感网、农作物长势监测传感网等。如何降低本文算法的复杂度将作为进一步研究的方向。

## 参考文献(References)

- [1] Jain S, Shah R C, Brunette W, et al. Exploiting mobility for energy efficient data collection in sensor networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2006, 11(3): 327-339.
- [2] Rao J, Biswas S. Networked-assisted sink navigation for distributed data gathering: Stability and delay-energy trade-offs[J]. *Computer Communications*, 2010, 33(2): 160-175.
- [3] Li A, Xiao J. Efficient data gathering algorithm in wireless sensor networks with optimal-path mobile sink[J]. *J of Computational Information Systems*, 2012, 8(22): 9269-9279.
- [4] Pon R, Batalin M A, Gordon J, et al. Networked infomechanical systems: A mobile embedded networked sensor platform[C]. *Proc of the 4th Int Symposium on Information Processing in Sensor Networks*. Los Angeles: IEEE Press, 2005: 376-381.
- [5] Colin A. iRobot 110 FirstLook[EB/OL]. [2012-07-12]. <http://www.irobot.com/us/learn/defense/firstlook.aspx>.
- [6] Sugihara R, Gupta R K. Optimizing energy-latency trade-off in sensor networks with controlled mobility[C]. *Proc of the 28th IEEE Conf on Computer Communications*. Rio: IEEE Press, 2009: 1398-1408.
- [7] Ma M, Yang Y Y. SenCar: An energy-efficient data gathering mechanism for large-scale multihop sensor networks[J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2007, 18(10): 1476-1488.
- [8] Xing G L, Wang T, Jia W J, et al. Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station[C]. *Proc of the 9th ACM Int Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM Press, 2008: 231-240.
- [9] 郜帅, 张宏科. 时延受限传感器网络移动 sink 路径选择方法研究[J]. *电子学报*, 2011, 39(4): 742-747. (Gao S, Zhang H K. Optimal path selection for mobile sink in delay-guaranteed sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(4): 742-747.)
- [10] 张希伟, 沈琳, 蒋益峰. 移动协助传感器网络中 sink 的路径优化策略[J]. *通信学报*, 2013, 34(2): 85-93. (Zhang X W, Shen L, Jiang Y F. Optimizing path selection of mobile sink nodes in mobility-assistant WSN[J]. *J on Communications*, 2013, 34(2): 85-93.)
- [11] Ossama Y, Sonia F. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.
- [12] 钟智, 罗大庸, 刘少强, 等. 具有移动 sink 的无线传感器网络能量均衡分簇路由协议[J]. *控制与决策*, 2012, 27(8): 1211-1215. (Zhong Z, Luo D Y, Liu S Q, et al. Energy-balanced clustering routing protocol in wireless sensor networks[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(8): 1211-1215.)
- [13] 饶卫振, 金淳, 陆林涛. 考虑边位置信息的求解 ETSP 问题改进贪婪算法[J]. *计算机学报*, 2013, 36(4): 836-850. (Rao W Z, Jin C, Lu L T. An improved greedy algorithm with information of edges' location for solving the euclidean traveling salesman problem[J]. *Chinese J of Computers*, 2013, 36(4): 836-850.)
- [14] Lymberopoulos D, Savvides A. XYZ: A motion-enabled, power aware sensor node platform for distributed sensor network applications[C]. *Proc of the 4th Int Symposium on Information Processing in Sensor Networks*. Los Angeles: IEEE Press, 2005: 449-454.