动态传感器网络区域受限的移动 sink 路径选择研究*

曾利军,刘 卉,彭 广

(湖南工学院 计算机与信息科学学院, 湖南 衡阳 421002)

摘 要:针对 sink 区域受限及节点特征参数的问题,如何规划 sink 路径选择以满足动态传感器网络高效数据收 集及低能耗的要求,提出了一种动态传感器网络区域受限的移动 sink 路径选择方法。该方法在缓存节点辅助通 信模式下,建立 sink 受限区域图模型。针对不同应用情况,分别讨论了 sink 移动全局路径信息已知和 sink 移动 局部路径信息已知这两种情况下的最优移动路径。在全局路径信息已知时,采用 Vornon 单元划分的思想求解 总传输能耗和节点平均负载;在局部路径信息已知时,采用启发式策略进行路径寻优,并证明其路径寻优的正确 性。最后通过仿真实验与理论计算来验证移动 sink 最佳路径寻优策略的有效性和可行性。

关键词:区域受限;数据收集;缓存节点;移动 sink;路径寻优

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)06-1652-04 doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.012

Path selection for mobile sink in area limited of dynamic sensor networks

ZENG Li-jun, LIU Hui, PENG Guang

(School of Computer & Information Science, Hunan Institute of Technology, Hengyang Hunan 421002, China)

Abstract: For the mobile sink in area limited and characteristic parameters in nodes, how to plan path of the mobile sink that efficient data collection and low energy in dynamic sensor networks. This paper proposed the method that path selection for the mobile sink in area limited of dynamic sensor networks. It established graph model of mobile sink in area limited under the communication mode of auxiliary cache nodes. According to different application, it discusses the optimal mobile path when known the global path information of mobile sink and when known the local information. When known the global path information, it adopted the method based on Vornon partition with energy cost and node load. When known the local information, it adopted heuristic strategy to seek the optimal path, and it also proved the validity of the method. The simulation experiments results show the affectivity and feasibility.

Key words: area limited; data collection; cache nodes; mobile sink; optimal path

0 引言

静态传感器网络中,位于 sink 周围节点的数据转发量大, 其负载远大于其他节点承担的负载,导致位于 sink 周围节点 能耗过早失效,从而影响整个传感器网络。为解决节点负载平 衡,有学者采用移动 sink 传感器网络(以下称动态传感器网 络)进行数据收与转发。动态传感器网络数据查询是将查询 信息注入传感器网路中,并由 sink 收集数据以得到感知信息。 其他节点仍采用静态传感器网络原有的数据传输技术。

由于在动态传感器网络中 sink 的移动性,这就导致其很 难与传感器网络其他节点维持稳定的传输路径,而路径规划应 考虑传感器网络通信方式。目前已有的通信方式^[1,2]主要有 单跳传输、多跳传输以及缓存节点辅助传送。单跳传输模式仅 当移动 sink 至节点接收区域范围内才与该节点进行数据传 输,因此数据传输能耗较小,但该方式需等待 sink 到达时方可 传输信息及数据转发,造成数据收集的时延较长。多跳数据转 发模式是指 sink 采用设定路线移动或进行随机移动方式,当 sink 在预设特定位置移动时以广播方式发送 sink 位置信息,位

于广播区域内节点接收到 sink 位置信息时,将数据沿路径多 跳转发至 sink 进行感知信息。这就势必需要移动 sink 建立其 他节点的通信路径。然而由于 sink 的移动性,使得 sink 需反 复进行路由信息广播,造成大量能量消耗在路由信息中。缓存 节点辅助模式[3]是单跳传输与多跳传输相结合的数据转发模 式。在缓存节点辅助模式下,信息或数据以多跳转发方式传输 到缓存节点上,移动 sink 以单跳方式访问缓存节点数据。缓 存节点辅助模式通过缓存节点与 sink 进行同步数据传输,避 免了 sink 反复广播信息而产生的能耗浪费。该模式是一种能 耗较均衡的路由方式。例如:Xing 等人^[4]提出了一种选择缓 存节点的协助传输模式,利用缓存节点存储数据,无须等待移 动 sink,达到了数据的同步;石高涛等人^[5]提出了缓存区辅助 模式,利用可接收移动 sink 广播范围内所有节点作为缓存节 点进行数据收集,一定程度上提高了能耗均衡问题;Ma 和 Shi 等人^[6,7]通过理论和仿真实验验证了 sink 移动路线对传感器 网络生命周期的影响。目前研究人员对 sink 区域受限问题涉 及很少,主要研究集中在节点特征参数以及网络拓扑结构上进 行路径规划。例如:Somadara 等人^[8]研究了传感器访问节点

收稿日期: 2012-10-04; 修回日期: 2012-11-06 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60933009);湖南省教育厅科学研究项目 (11C0375)

作者简介:曾利军(1976-),男,湖南邵东人,副教授,硕士研究生,主要研究方向为数据挖掘、无线传感器网络、智能信息处理(hokzeng@163. com); 刘卉(1981-),女,湖南衡阳人,讲师,硕士研究生,主要研究方向为信号处理、传感器网络;彭广(1977-),男,湖南衡阳人,工程师,主要研究方向 为智能信息处理、无线网络. 顺序;Gu等人^[9]提出了地理位置分割的 sink 移动路径规划。

目前,很多应用场合 sink 只能在规定空间内移动,如交通 监控传感器网络等。针对 sink 空间受限问题及 sink 移动空间 特征,结合缓存节点辅助通信模式,本文提出了动态传感器网 络区域受限的移动 sink 路径选择方法。

1 相关问题描述

Sink 移动路径选择能有效提高传感器网络的能耗效率,如 何规划 sink 路径选择以满足动态传感器网络高效数据收集及 低能耗的要求是目前研究的热点之一。给定传感器网络有 M个 sink 节点和 N 个节点,S 代表数据查询区域。Sink 为可控移 动、无能量约束,其移动区域受限。设 sink 的移动路径集 $T(S) = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 。在已有的缓存节点辅助通信模式下, 所要解决的是如何在 sink 移动路径集中选择最优的移动路 线,使得传感器网络的节点最大平均负载最小及数据收集总传 输能耗最小。本文将问题转换为以下目标函数:

$$\min \text{ imize} \begin{cases} \text{load}_{\max} = \max(\text{ load}_{n-\text{avg}}(M, R)) & n \in N\\ E_{\text{total}}(M, R) \end{cases}$$

其约束条件为

$$\begin{cases} M: L(\text{sink}) \subseteq T(S) \\ R: \text{cache-assist} \end{cases}$$

其中:load_{max}表示节点最大能耗;load_{n-avg}表示节点平均能耗;*M* 表示区域受限移动路线; E_{total} 表示数据传输总能耗; $L(sink) \subseteq$ T(S)表示 sink 的移动路径集 T(S)中的路径规划;R:cache-assist 表示数据或信息传送通信方式采用缓存节点辅助模式。

1.1 相关定义

定义1 移动路径图是指在可移动区域内以路线交点为 顶点、区域边缘及可移动子区域中轴线为边建立的可移动路 径图。

图 1 为圆形受限区域及 sink 可移动区域。图 2 为受限区 域 sink 最佳移动路径。图 1 所建立的可移动路径如图 3 所示。



图1 圆形受限区域及sink可移动区域 图2 受限区域sink最佳移动路径

定义2 路段或可选路径是指在给定的 sink 可移动路径 图中,由起点 S 出发到终点 E 的一段无重复的全路径或一段 路径,记为 $T_i = \langle t_1, t_2, \dots, t_n \rangle$ 。由可选路径 T_i 构成的所有集 合称为可选路径集。

定义3 全局路径信息已知是指预先已知 sink 可移动路 径图模型的情况,即任意由起始点到终点的路径信息中所有节 点的信息。

定义4 局部路径信息已知是指在 sink 移动过程中只能获得与 sink 位置相关或信息收发的路段信息。

在图 3 中,在全局路径信息已知的情况下,根据 sink 可移 动路径图模型, sink 由起点 *S* 到终点 *E* 的可选路径为 *S*— c_1 c_2 — E_xS — c_1 — c_3 — c_4 — c_5 —E 等共 13 条可选路径集。在局部 路径信息已知的情况下,若当前位置为*S*,则 sink 只能获得 *S* c_1 、*S*— c_6 的路段信息。

1.2 问题分析

在辅助节点缓存通信模式下,动态传感器区域受限的移动 sink 路径规划目前主要有两种选择方式^[10,11]:

a)基于网络拓扑结构的路径规划。该方法的核心是缓存节 点的选择顺序。Sink 首先沿任意路径或 sink 所在位置进行广 播,以得到网络拓扑结构信息,依据节点返回的信息来确立最佳 的缓存节点顺序,最终规划 sink 移动路径,进行数据的收集和分 发。该方法在确立最优路径时需对传感器网络进行广播以此来 收集节点信息,因此需要消耗一定的能量。该策略主要适用于 连续数据收集、查询;但该方案不利于传感器网络的扩展。

b)基于理论建模分析的路径规划。通过理论计算各可选 路径传输所需的能耗及节点负载,以期得到 sink 移动路径的 近似最优解。理论建模分析的路径规划无须传感器网络拓扑 结构信息,因此可以在网络拓扑结构未知的情况下进行数据的 收集及转发,适用于复杂无线网络的数据查询及收集,如交通 监视系统的快照查询等。

由于理论建模分析具有较好的扩展性,因此本文采用理论 建模分析的路径规划方案。路径规划又分为全局路径信息已 知和局部路径信息已知两种情况。在全局路径信息已知的情 况下,可以通过理论计算出可选路径的能耗及节点负载,以此 得到最优路径;在局部路径信息已知情况下,可以通过启发式 进行路径选择,以此得到近似最优路径。在理论建模分析中用 到多边形对象和单元,这里给出多边形对象和单元的定义。

定义5 多边形对象是指多边形的边或节点。

定义6 多边形 Vornon 单元,在多边形 G中,P为多边形内的一点,对象为O,若P到O的距离比其他对象的距离都要近,则称P为O的 Vornon 单元内一点,所有点构成 Vornon 单元。

2 动态传感器网络区域受限的移动 sink 路径选择策略

2.1 Sink 移动全局路径信息已知

在已知移动 sink 路径图模型的情况下,通过理论计算起 点 *S* 到终点 *E* 的所有路径,从而得到 *S*—*E* 的最优路径。设移 动 sink 路径图模型 *S*—*E* 的一条路径为 $T = \langle S \cdots v_i \cdots v_j \cdots E \rangle$, 则 *T* 路径的总传输能耗及节点平均负载计算如下:

1)T路径传输能耗计算

由于节点缓存区 $r \ll d$,缓存区中轴线位置可以近似代替 缓存区位置,在传感器网络全覆盖的范围内,每个节点都能沿 最短路径将数据转发到最近缓存区位置。根据定义5和6,设 T上的一段路径 $\langle v_i, v_j \rangle$,在图 G中,若节点离 $\langle v_i, v_j \rangle$ 路段的距 离比 T上其他路段的距离都近的点的集合记做 vol($\langle v_i, v_j \rangle$)。 这里的 vol($\langle v_i, v_j \rangle$)即为对象 $\langle v_i, v_j \rangle$ 的 Vornon 单元,则总的传 输能耗和负载计算由各个 vol($\langle v_i, v_j \rangle$)组成。设图 G中划分 Vornon 单元数为 m 个,vol(k) 对应的路段为 $\langle v_i, v_j \rangle$ 。设定节 点传输半径为r,节点数据大小为k,单位数能耗为 ε ,且网络 为高密度网络,节点分布密度为 ρ ,则缓存节点区域内的任意 dxdy(小区域)到 $\langle v_i, v_j \rangle$ 距离为d,可以得到 vol(k)区域内节点 的总传输能耗为

$$E_{\text{total}}(\text{vol}(k)) = \iint_{\langle x, y \rangle \in \text{vol}(k)} k \varepsilon(d/r) \rho dx dy$$
(1)

根据式(1)计算 vol(k)区域节点的能耗就可以得到 sink 沿路径 T 的所有 Vornon 单元总传输能耗为

$$E_{\text{total}}(M:T) = \sum_{k=1}^{m} E_{\text{total}}(\text{vol}(k)) = k\epsilon \rho \sum_{k=1}^{m} (d/r) \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y$$
(2)

式(2)计算的是在已知区域形状或拓扑结构及节点密度 的情况下。

2)T路径节点负载

由于采用缓存节点辅助通信模式,因而节点负载可以依据 静态传感器网络进行计算。给定数据接收节点为*S*,数据采集 边界区域为*L*,*S*到*L*的距离为*R*,中间转发节点为*D*,中间转 发节点的传输半径为*r*,*D*能转发的节点区域为*S*₁,*S*₂为可转 发*S*₁区域内节点,如图4所示。



图3 Sink可移动路径图模型



由图 4 可知,节点 *D* 的负载与 $(S_1 + S_2)/S_2$ 成正比。若 $r \ll R$ 时,则 $(S_1 + S_2)/S_2 \approx S_1/2r$,即 load(D)正比于 $S_1/2r$ 。因 此可以得出离缓存区域节点越近,则负载越大。在 *T* 路径时只 需考虑离 *T* 较近的节点,也就是缓存区域一跳内的节点。设 n_1 为缓存区域一跳内的节点且属于 vol($\langle v_i, v_j \rangle$),设 vol($\langle v_i, v_j \rangle$) 面积为 $Svol(\langle v_i, v_j \rangle), n_1$ 传送路段 vol($\langle v_i, v_j \rangle$)所有节点 数据至缓存区,则 n_1 的负载为

$$\operatorname{load}(n_1) = \frac{S(\operatorname{vol}(\langle v_i, v_j \rangle))}{2r} = \frac{\iint\limits_{\langle x, y \rangle \in \operatorname{vol}(\langle v_i, v_j \rangle)} dxdy}{2r}$$
(3)

由于 vol($\langle v_i, v_j \rangle$)内节点有可能不是由 n_1 传送,因此只能 计算其平均负载。设 m 为线段 $\langle v_i, v_j \rangle$ 对应缓存区内任意节 点,线段缓存区长度为 $L\langle v_i, v_i \rangle$,则 m 平均负载为

$$\begin{aligned} \operatorname{load}(m) &= \frac{\operatorname{load}(n_1)}{L\langle v_i, v_j \rangle} \infty \frac{S(\operatorname{vol}(\langle v_i, v_j \rangle))}{2rL\langle v_i, v_j \rangle} = \\ &\frac{\int_{\langle x, y \rangle \in \operatorname{vol}(\langle v_i, v_j \rangle)} dx dy}{2rL\langle v_i, v_i \rangle} \end{aligned}$$
(4)

其中:∞表示正比于。由式(2)和(4)可以计算路径 T 各线段 的总传输能耗和平均负载,以此来选择 sink 移动的最优路径。 当节点最大平均负载最小与总传输能耗最小不一致时,根据网 络生命周期由节点最大平均负载直接影响,首先考虑选择节点 最大平均负载最小的路径。

2.2 Sink 移动局部路径信息已知

由于 sink 移动局部路径信息已知,即在某种未知环境下 进行路径寻优或数据采集,本文采用贪婪算法的思想来设计启 发式 sink 移动局部最佳路径选择。这里先证明两个定理,以 此来计算总传输能耗和节点平均负载。

定理1 在给定的图 *G* 中,若路径 *T* 平分图 *G*,则 sink 沿路径 *T* 的总传输能耗最小。

证明 设*T* = $\langle S \cdots v_i \cdots v_j \cdots E \rangle$ 为*G*的一条路径,*T*上的一 段路径为 $\langle v_i, v_j \rangle$,以 $\langle v_i, v_j \rangle$ 为中轴建立 Vornon 单元多边形 vol ($\langle v_i, v_j \rangle$),如图 5 所示,则 vol($\langle v_i, v_j \rangle$) = vol₁($\langle v_i, v_j \rangle$) \cup vol₂ ($\langle v_i, v_j \rangle$)。

将 vol($\langle v_i, v_j \rangle$)的外接多边形记为 Ran($\langle v_i, v_j \rangle$),同理 vol₁($\langle v_i, v_j \rangle$)和 vol₂($\langle v_i, v_j \rangle$)对应矩形记为 Ran₁($\langle v_i, v_j \rangle$)和 Ran₂($\langle v_i, v_j \rangle$),则得到

$$\begin{cases} S(\operatorname{vol}(\langle v_i, v_j \rangle)) \propto S(\operatorname{Ran}(\langle v_i, v_j \rangle)) \\ S(\operatorname{vol}_1(\langle v_i, v_j \rangle)) \propto S(\operatorname{Ran}_1(\langle v_i, v_j \rangle)) \\ S(\operatorname{vol}_2(\langle v_i, v_j \rangle)) \propto S(\operatorname{Ran}_2(\langle v_i, v_j \rangle)) \end{cases}$$
(5)

由 2.1 节可知:

$$E_{\text{total}}(\operatorname{Ran}(\langle v_i, v_j \rangle)) = \iint_{\langle x, y \rangle \in \operatorname{Ran}(\langle v_i, v_j \rangle)} k\varepsilon(y/r)\rho dxdy = \int_{-a}^{a} \int_{l-l}^{l} k\varepsilon(y/r)\rho dxdy = k\varepsilon\rho/2r(l^2 - (l-l)^2)$$
(6)

求导式(6)可得 t = 1/2,即 $S(\text{Ran}_1(\langle v_i, v_j \rangle)) = S(\text{Ran}_2(\langle v_i, v_j \rangle))$ 时, $E_{\text{total}}(\text{Ran}(\langle v_i, v_j \rangle))$ 得到极小值,也就是当路段 $\langle v_i, v_j \rangle$ 平分外接多边形时, $\langle v_i, v_j \rangle$ 对应的总传输能耗最小。而 图 G的总能耗为 T上各段 Vornon 单元节点的总能耗和,因而 定理 1 证明完毕。

定理2 在给定的图 *G* 中,若路径 *T* 平分区域图 *G*,若 *T* 在平分 *G* 中所有路线最长的路径,则 sink 沿路径 *T* 的节点平 均负载最小。

证明 由定理1的证明中可知: $S(\operatorname{vol}(\langle v_i, v_j \rangle)) \propto S(\operatorname{Ran}(\langle v_i, v_i \rangle)),$ 得到

$$S(\operatorname{Ran}(\langle v_i, v_j \rangle)) = \iint_{\substack{\langle x, y \rangle \in \operatorname{Ran}(\langle v_i, v_j \rangle) \\ \int_{-a}^{a} \int_{t-l}^{t} dx dy} 2al} dx dy S(\operatorname{Ran}(\langle v_i, v_j \rangle)) =$$
(7)

$$\log(m) \approx \frac{S(\operatorname{Ran}(\langle v_i, v_j \rangle))}{L(\langle v_i, v_j \rangle)} = \frac{2al}{L(\langle v_i, v_j \rangle)}$$
(8)

由式(8)可以看出,当 $L(\langle v_i, v_j \rangle)$ 取最大值(即T最长) 时,节点的平均负载最小。在区域形状已知的情况下,采用 贪婪算法设计启发式 sink 移动局部最佳路径选择的基本思 路为:Sink 首先从起点 S 开始,当到达路径交叉点时,sink 计 算已完成的路径与各可选路径所组成的多边形对区域 G进 行划分;然后根据定理1选择将 G 平分的路径;若有多条路 径满足条件,则根据定理2选择 T在平分 G中所有路线最长 的路径作为最佳路径。如在图6中,当 sink 沿着路线 L_1 到达 P时,此时 sink 分别计算已完成路线 L_1 和 L_2 、路线 L_1 和 L_3 、 路线 L_1 和 L_4 的延长线所构成的对区域 G的划分,通过比较 分析可得路线 L_1 和 L_3 最趋近对图 G的平分,因此得到 L_3 即 为 sink 下次移动的最佳路线。



3 实验数据及仿真实验

1)Sink 移动全局路径信息已知可行性分析

实验采用 MATLAB 和 Sense 为仿真平台^[12] 对 sink 沿不同 路径进行可行性及有效性评估,在 sink 移动全局路径信息已知 和 sink 移动局部路径信息已知这两种情况下,根据理论计算总 传输及节点平均负载与实际能耗及负载进行对比。实验中的参 数设置为传感器设定的区域为圆形区域,其半径 *R* = 100 m,传 感器节点的传输半径为 *r* = 10 m,采用随机函数生成 50 个坐标 为关键点,并从中随机选择 10 个点(即 10 条路径)作为中转节 点、起点、sink 中转点及终点。实验中对生成的5 种拓扑结构图 任选一种来考察节点数为2000、3000和4000的实际能耗及负载。在理论计算中选择 $k < \varepsilon \rho$ 为1,每个数据包均为1 Byte。其仿真和理论计算如图7所示。图中传感器节点按最短直线路径进行仿真,记为 Sdlp(shortest direct line path)。



图7 总传输能耗和节点最大平均负载的数据仿真与理论计算对比

图 7 将理论计算值缩小 10 倍再进行归一到仿真平台,因此两者在空间上不一致。从图 7 可以看出,采用 sink 移动全局路径信息已知的理论计算与仿真数据基本上是一致的,因而验证了实际应用中的可行性。

2)全局路径信息已知下节点平均负载与总能耗不一致的 路径选择

在第2章讨论了当节点最大平均负载最小与总传输能耗 最小不一致时,根据网络生命周期由节点最大平均负载直接影 响,首先考虑选择节点最大平均负载最小的路径。实验通过仿 真来验证不同路径的最优选择方案,如图8所示。图中用 MSL 表示总传输能耗最小的路径,用 MNL 表示节点最大平均负载 最小的路径, MAX-MSL 和 MIN-MSL 表示在图 *G* 中除 MSL 和 MNL 路径之外的最大和最小传输能耗,同理 MAX-MNL 和 MIN-MNL 表示在图 *G* 中除 MSL 和 MNL 路径之外的最大和最 小节点最大平均负载。





从图 8 可以看出,全局路径信息已知,节点最大平均负载 最小路径与总传输能耗最小路径不一致时,根据网络生命周期 由节点最大平均负载直接影响,应选择节点最大平均负载最小 的路径。这里从图 8 中很容易看出,MNL 路径的节点最大平 均负载最小,因此 MNL 路径为最优路径。

3)局部路径信息已知的启发式路径寻优策略

实验中设置可选路径数分别为 10、20、30、40、50 的不同区 域图,根据第2章的式(6)和(8)的计算及仿真来选择路径最 优方案,如图9所示。其中:用 SLE 表示较短路径能耗,LLE 表 示较长路径能耗,MAX-SLE、MIN-SLE MAX-NLE、MIN-NLE 分 别表示总传输能耗最大、最小及节点平均负载最大、最小。

从图9可以看出,在局部路径信息已知的情况下,启发式 路径寻优策略的误差和最优路径存在一定的误差,随着可选路 径的增加,误差范围越来越小。这里因为路径数量增加,使得 其每一次平均误差减少,总平均误差降低。在总传输能耗相近 的情况下,路径长而节点平均负载小,这就验证了定理2的正 确性。



4 结束语

本文研究了 sink 区域受限情况下路径规划问题,在缓存 节点辅助通信模式下,建立了 sink 受限区域模型;针对不同应 用情况,分别讨论了 sink 移动全局路径信息已知和 sink 移动 局部路径信息已知这两种情况下的最优移动路径;在全局路径 信息已知时,采用 Vornon 单元划分的思想求解总传输能耗和 节点平均负载;在局部路径信息已知时,采用启发式策略进行 路径寻优,并证明其正确性。最后通过仿真实验来验证其有效 性和可行性。下一步将对综合时延受限和区域受限情况下的 路径选择进行研究。

参考文献:

- ALMALKAWI I T, ZAPATA M G, AI-KARAKI, et al. Wireless multimedia sensor networks; current trends and future directions[J]. Sensors,2010,10(7):6662-6717.
- HOUNGBADJI T, PIERRE S. QoSNET: an integrated QoS network for routing protocols in large scale wireless sensor networks [J].
 Computer Communications, 2010, 33(11):1334-1342.
- [3] DEMIR E, AYKANAT C, CAMBAZOGLU B B. A link-based storage scheme for efficient aggregate query processing on clustered road networks[J]. Information Systems, 2010, 35(1):75-93.
- [4] XING Guo-liang, WANG Tian, XIE Zhi-hui, et al. Rendezvous planning in mobility-assisted wireless sensor networks [C]//Proc of the 28th IEEE International Real-time Systems Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2007;311-320.
- [5] 石高涛,廖明宏. 传感器网络中具有负载平衡的移动协助数据采 集模式[J]. 软件学报,2007,18(9):2235-2244.
- [6] MA Ming, YANG Yuan-yuan. 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.
- [7] SHI Yi, HOU Y T. Theoretical results on base station movement problem for sensor network [C]//Proc of the 27th IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2008:1-5.
- [8] SOMADARA A, KANSAL A, JEA D D, et al. Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(8):958-973.
- [9] GU Yao-yao, BOZDAG D, BREWER R W, et al. Data harvesting with mobile elements in wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2006, 50(17): 3449-3465.
- [10] 李泽军,曾利军,刘卉. 无线传感器网络数据环区域查询处理算 法[J].传感技术学报,2012,25(8):1132-1137.
- [11] 罗青春,彭伟,郦苏丹,等. 一种结合卫星通信的容迟无线传感网 数据收集方法[J]. 计算机应用研究,2011,28(7):2651-2154, 2657.
- [12] 陈兴阳,张林,山秀明,等. 无线传感网协作能量感知路由方法
 [J]. 计算机应用研究,2011,28(6):2250-2253,2270.