

文章编号:1671-7848(2014)04-0533-04

移动传感器网络中能量有效分簇算法

陈伟宏^{1,2}, 李仁发², 黄晶²

(1. 湖南城市学院 信息科学与工程学院, 湖南 益阳 413000;

2. 湖南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410082)



摘 要: 针对移动传感器网络中节点移动及能量有限问题, 提出基于 TDMA 和事件触发的能量有效分簇算法。该算法以移动网络为应用背景, 结合时分复用, 通过分析簇头节点剩余能量及簇头节点移动进行分簇, 以减少网络中簇重构次数, 有效均衡系统中节点能耗, 并延长网络生存时间。仿真结果表明: 所提出方法相对 CBVRP 算法簇重构次数可减少 6.0%, 相对 MCR 算法网络生存时间提高了 10%。

关键词: 移动传感器网络; 分簇; 能量有效

中图分类号: TP27

文献标志码: A

A Clustering Algorithm for Energy Efficiency in Mobile Sensor Networks

CHEN Wei-hong^{1,2}, LI Ren-fa², HUANG Jing²

(1. School of Information Science and Engineering, Hunan City University, Yiyang, 413002, China;

2. School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, 410082, China)

Abstract: For the issues of node mobility and energy efficiency in mobile sensor networks (MSNs), an algorithm of clustering based on Time Division Multiplexing Access and event triggering is proposed. For the application background of the mobile network, the proposed algorithm combines analyzing the remaining energy of nodes and the mobility of the cluster head with TDMA to achieve perform clustering. It can reduce the number of clusters reconstruction in MSM, balance the node energy consumption effectively and prolong the lifetime time of the network. Simulation results show that the proposed algorithm has reduced the number of cluster reconstruction by 6.0% in comparison with CBVRP and prolonged the lifetime by 10% against MCR.

Key words: mobile sensor networks; clustering; energy efficiency

1 引言

无线传感器网络 (WSN) 广泛应用于移动终端设备, 例如汽车、人体等, 移动传感器网络逐渐成为人们关注的焦点^[1]。移动传感器网络不同于传统网络, 它不仅受节点能量、通信能力等限制, 节点移动也将影响网络拓扑结构变化, 以及整个网络的生存时间。因而研究移动传感器网络中能量有效的分簇算法具有重要意义。

目前, 国内外关于传感器网络分簇及其能耗管理做了一些研究, 主要包括: 网络能耗系统模型、能耗均衡分簇、路由算法等^[2-13]。文献[2]基于3种数据传递模式和3种网络能耗机制构建了网络能耗优化模型, 但只针对有固定拓扑结构的无线传感器网络。文献[6]提出了基于马尔可夫博弈的能量均衡路由算法, 该算法引入概率模型, 根据收益函数求解能量和收益之间的纳什均衡, 以延长网络的

生命周期。随着无线传感器网络技术应用的不断深入, 节点移动成为传感器网络应用的一大特性。节点移动性直接影响无线传感器网络拓扑结构, 良好的网络拓扑控制能有效均衡网络的能量消耗, 延迟网络的生存时间。

在 WSN 分簇方面, 经典的分簇算法有: LEACH 算法、GAF 算法等。LEACH 算法让网络中节点轮流充当簇头, 网络中各节点共同承担高能耗的簇头, 以达到网络能耗均衡。但是, LEACH 算法没有考虑节点移动。LEACH-Mobile 协议针对节点的可能移动采取应答机制, 在每个 TDMA 时隙簇头发出 Req_data 请求后, 成员节点发回应答, 通过检测簇头是否收到成员节点应答来判断该节点是否移出该簇^[8]。MCR 算法通过计算移动因子进行簇头选举, 尽可能在移动性或相对移动性最小的节点中选择^[9]。文献[10]考虑了节点移动的随意性, 提出了基于通信终端的应用属性进行分簇, 主要是

收稿日期: 2013-09-11; 收修定稿日期: 2014-01-30

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(12JJ4060, 13JJ6072); 国家自然科学基金项目(61173036)。

作者简介: 陈伟宏(1976-) 女 湖南益阳人 副教授 主要从事计算机网络等方面的教学与科研工作; 李仁发(1957-) 男 教授 博士生导师。

针对传感器技术在车联网中的应用展开。

以上文献虽然考虑了节点移动，但都没有考虑能量有效对移动传感器网络分簇的影响。文献 [11] 通过分析汇聚节点移动研究了异构无线传感器网络中的节点覆盖和能耗控制问题，但仅考虑了汇聚节点移动，没有考虑网络中簇头节点及簇成员节点的随机移动。

本文以移动节点部署在一定监测区域为应用背景，考虑节点剩余能量，采取事件触发和时分复用 (TDMA) 相结合方式进行分簇，能有效均衡系统中节点能量，延长网络生存时间。

2 系统模型

2.1 网络拓扑模型

本文提出采用 3 层结构的网络模型，如图 1 所示。最底层为各个簇成员与其簇头构成的通信网络；中间层为各簇头连接到各子 sink 节点的网络，形成系统的骨干网络；最上层为子 sink 节点与 sink 节点连接的外接通信网。

在大面积部署的网络监测区域中，存在簇头节点不能一跳将数据传输到达 sink 节点情况，因而设置了子 sink 节点。子 sink 节点的作用有 2 个：一是从数据传输距离角度考虑作为簇头节点与 sink 节点之间的中继；二是考虑各传感器节点可能连接异构网络。由于子 sink 节点接收数据并进行网络异构的处理，使得数据到达 sink 节点时已屏蔽了网络下层的异构。

本文对网络模型假设如下：

1) 允许节点移动，且适合一般应用场合的节点随机移动。

2) 每个节点都有全网唯一的 id 号，且携带 GPS 定位系统，能随时跟踪节点的地理位置信息。

3) 系统中节点之间的连通性由节点自身信号所能覆盖范围确定。若节点处于某节点的信号覆盖范围内，能接受到它的信号，则称这两节点为邻居节点；同时指出：某区域的节点覆盖为 K -覆盖。

4) 初始时，所有节点有相同的数据处理能力和通信能力，都有机会成为簇头。

5) 在网络系统运行期间，节点能量仅与当前状态有关，与节点历史能耗无关。

6) 节点与簇头的最远通信距离为 K 跳。

整个网络系统的运行分为簇建立和稳定工作两种状态，假设系统中节点遵循 TDMA 通信方式。

2.2 移动模型

移动传感器网络中的节点移动可分为 4 类：间歇移动、一维随机移动、二维随机移动和三维随机移动。

1) 间歇移动 (SM) 模型：将感知过程分成单

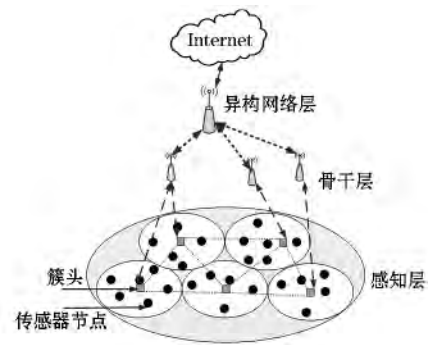


图 1 移动网络系统三层逻辑结构

Fig 1 Three-layer logic structure of the mobile network system

位长度的时隙，在每个时隙的开始，每个传感器节点都在监测区域内任意选择一个位置，在其余时间保持静止。

2) 一维随机移动 (1DM) 模型：将传感器的节点分成水平移动或垂直移动两类。在每个时隙的开始，传感器节点任意选择一个方向移动。假设移动距离为 D ，分布函数 $f_D(d)$ 满足：当 $d < d_0$ 或 $d > 1$ 时 $f_D(d) = 0$ 。其中 d_0 为一任意常数， $0 < d_0 < 1$ 。这说明传感器的传输距离不能太短，也不能太长，但对传感器节点的移动速度没有要求。

3) 二维随机移动 (2DM) 模型：每组中的传感器节点根据概率分布函数任意选择一个方向 $\theta \in [0, 2\pi)$ ，任意选择一个速度 $v \in [0, v_{max})$ ，在平面上移动。

4) 三维随机移动 (3DM) 模型：每组中的传感器节点任意选择 3 个参数 (θ, φ, v) 在空间移动。其中， φ 为移动矢量 r 与 $X-Y$ 平面的夹角， θ 为移动矢量 r 在 $X-Y$ 平面投影与 X 轴的夹角， $\theta \in [0, 2\pi)$ ， $\varphi \in [0, 2\pi)$ ， $v \in [0, v_{max})$ 。

在移动模型中，1DM 应用在有确定轨道的网络，2DM 考虑节点在平面移动的任意性，3DM 描述了节点在空间的任意移动，适合描述运动场景的实时情形。

3 能量有效的簇头选举算法

3.1 簇头选举原则

移动传感器网络在系统工作过程中，有数据包的发送和接收。根据前面假设，设计系统中传感器节点的 Hello 包格式如图 2 所示。

Node id	Clust id	Current Energy	NeighborNode List and its cost	Update Time
---------	----------	----------------	--------------------------------	-------------

图 2 Hello 包格式

Fig 2 Format of the packet Hello

其中，Node id 为本节点的序号；Clust id 为本节点所属的簇号；Current Energy 为本节点当前的剩余能量；Neighbor Node List and its cost 是指本节

点的邻居节点及达到各邻居节点的代价; Update Time 为数据包的更新时间。

系统中还需设置 E_0 和 E_1 2 个常量。 E_0 为节点成为簇头节点的最低能量阈值, E_1 为允许节点正常通信的最低能量阈值。成簇时刻由当前簇头节点运行簇头选举算法, 选出本簇下一轮的簇头节点, 成簇时刻采用事件触发方式。触发的事件考虑了簇头节点的当前剩余能量和簇头节点的移动性。当簇头节点剩余能量 $E_c \leq E_0$ 时, 则启动簇头选举算法; 若簇头节点移动离开本簇, 则启动簇头选举算法。

系统中节点采用 TDMA 方式向簇头节点报告节点当前剩余能量, 实时比较 E_c 和 E_1 。若节点当前能量 $E_c \leq E_1$, 表示节点的能量即将耗尽, 则将该消息报告给簇头, 启动网络的 K -覆盖算法, 更新相关节点信息并重选路由。

非簇头节点打开接收器, 监听 Hello 消息, 并从收到的 Hello 消息得知自己的簇头节点, 更新节点的字段信息, 同时回复一个确认消息 ACK 给簇头。当节点移动时, 根据移动模型和分簇算法确定该节点所属簇的变化。系统内各节点信息除“当前剩余能量”字段由各自节点实时更新外, 其余信息只有在簇头节点变化、邻居节点变化等情况下才更新。

3.2 簇头选举算法

簇头收集簇成员信息, 簇成员通过邻居节点将信息多跳转发至簇头; 相邻簇之间可以通过簇头直接通信, 也可以利用相邻簇之间的边缘节点进行数据转发; 最后由簇头节点将信息发送至 sink 节点, 实现与 Internet 的网络通信。在分簇过程中, 不仅要选举出簇头节点, 也要形成边界节点, 以便物理位置不在同一通信范围的相邻簇头间通过边缘节点转发。簇头选举过程如下:

1) 初始时, 节点初始化 Hello 包信息, 如节点 id 和节点初始能量。

2) 系统中各节点广播 Hello 包, 获取其邻居节点列表, 并通过邻居节点在 K 跳范围内转发 Hello 包给其他节点。通过这种方式, 形成各节点的网络拓扑, 并获取 K 跳范围内的邻居节点信息。

3) 对系统中各节点的当前剩余能量排序, 选取剩余能量最大者为簇头节点。该节点升级为簇头后, 向簇内其余节点发送广播消息, 宣称自己为簇头。

4) 成员节点收到簇头消息后, 将节点的 clust id 属性设置为该簇号, 并回复 ACK 确认消息给本簇头节点。若某节点收到多个不同的宣称簇头的消息, 则以早收到的为准, 将其簇号属性根据收到消息时间依次设置为多个簇号值, 该节点归属为边缘节点。注意: 选取早收到簇头消息的 Clust id, 是

因为在此轮簇头选举过程中, 说明该节点到簇头的时延相对最小。

重复上述过程, 直至系统中所有节点成为簇头或属于簇成员节点。在 TDMA 的固定时隙, 簇头节点移出原来簇或簇头节点当前能量 $E_c \leq E_0$ 时, 需要重复执行 2)~4), 重新选举簇头。

3.3 簇维护策略

初始化的分簇与簇头选举过程完成后, 由于节点的移动、节点工作耗能等因素, 严重影响了网络拓扑结构的变化, 因而需要对系统中簇成员进行管理, 对簇头进行维护。

3.3.1 簇成员管理

簇成员的变化主要由 3 种情况引起: 一是节点的移动, 二是节点剩余能量的变化, 三是节点角色的变化。

对于第一种情况, 节点移动会造成节点空间位置上的变化, 从而节点可能加入不同的簇。根据节点 GPS 定位信息和移动模型, 判断节点是否移动。若是, 则该节点向邻居节点发送 Request 请求包, 包括自己的节点 id 及簇号, 并请求邻居节点的第一簇号。邻居节点收到该请求包后, 发回一个应答, 包括自己的节点 id 和簇号信息, 移动节点对收到的邻居节点簇号进行比较。若有和自己原来相同的簇号, 则不更新簇号; 否则, 选取一个时延最小或跳数最少的邻居节点簇号为自己的簇号, 并从原来簇号中退出, 完成移动节点加入与退出簇过程。

对于第二种情况, 随着节点工作时间越长, 节点的可用能量将不断减少。当节点可用能量减少到某阈值时, 需要更换新的节点来替代其工作, 则使用 K -覆盖选取新的节点加入该簇; 原来节点当其可用能量减少到 0 时, 则退出该簇。

对于第三种情况, 在簇头节点移出原来簇或者簇头节点能量 $E_c \leq E_0$ 时, 需要重新选举簇头。一旦新的簇头选出, 则原来簇头成为簇成员节点, 新的簇头对其簇成员进行管理。

3.3.2 簇头维护

簇头维护主要体现在上述第三种情况。维护过程中节点检测各自的当前剩余能量, 周期性地向簇头节点报告节点剩余能量, 选举簇内节点剩余能量最大者为簇头, 以及簇头节点移动对整个簇的影响。当成员节点离开簇时, 仅影响边缘节点的选取, 对簇头无影响。

簇头选举与维护过程如图 3 所示。

4 仿真分析

仿真场景如下: 100 个节点随机放置在 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的矩形区域内; 节点通信范围为 20 m , 所

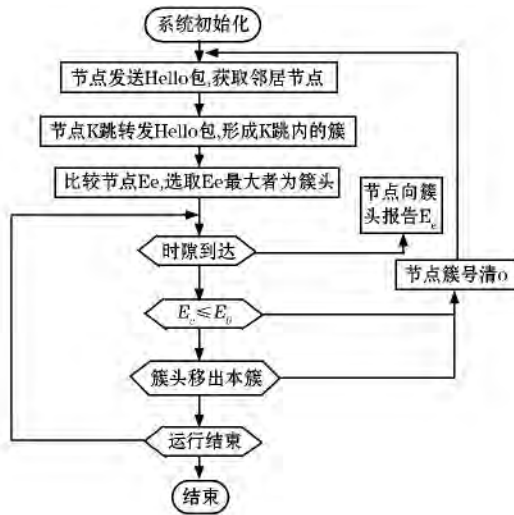


图 3 簇头选举与维护工作流程
Fig 3 Flow chart of the cluster head selection and maintenance

有节点的初始能量饱和，为 1 000 J；簇号为大于或等于 1 的整数，簇头节点直接转发簇成员数据给子 sink 节点，数据的融合与处理交由子 sink 节点完成。子 sink 节点一般移动较小或者相对静止。仿真中主要分析的性能指标有：①簇结构的稳定性；②节点剩余能量方差；③网络生存时间。

网络结构的稳定性可通过簇重构次数来衡量。簇重构的次数越少，网络结构越稳定。图 4 为移动传感器网络中节点为 100 个时，簇重构次数随时间的变化情况。

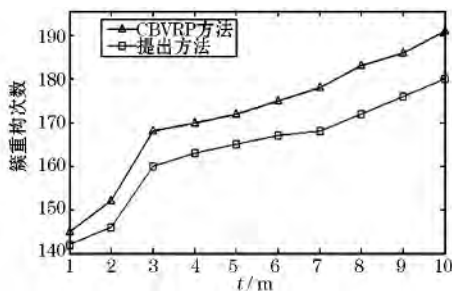


图 4 簇重构次数随时间变化情况
Fig 4 The numbers of cluster reconstruction over time

图 4 中 CBVRP 算法为文献 [10] 提出的分簇算法；本文方法采用簇头是否移出簇和簇头节点当前能量变化的事件触发簇重构，设置相对长的时隙，可以有效减少簇重构次数。从图 4 看出，本文方法相对 CBVRP 算法簇重构次数最大减少了 6.0%，提高了网络结构的稳定性。

图 5 描述了本文方法与文献 [9] MCR 算法的节点剩余能量方差，图 6 对比了这两种方法的网络生存时间。图 5 表明，本文方法的节点剩余能量方差比 MCR 算法小，变化幅度也相对较小。从图 6 看出，本文方法相对 MCR 算法网络生存时间提高了 10%。这是因为通过均衡移动传感器网络中节点

的能耗，有效延迟了网络生存时间。

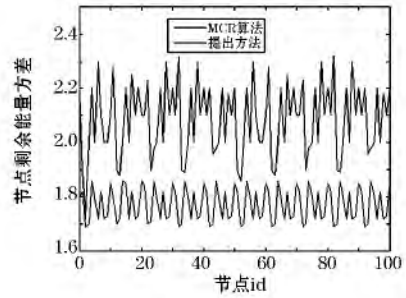


图 5 节点剩余能量方差对比
Fig 5 Comparison of the nodes' remaining energy variance

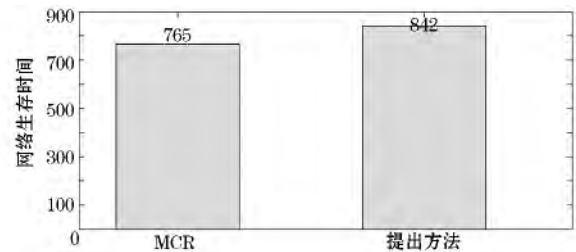


图 6 网络生存时间对比
Fig 6 Comparison of the networks' lifetime

5 结 论

本文针对移动传感器网络中节点移动和能耗不均问题，建立了节点移动模型，提出了基于事件触发的分簇算法。

该方法结合 TDMA，考虑节点移动及节点当前剩余能量选取簇头，均衡了各节点的能耗使用，相对纯 TDMA 方法减少了簇头选举次数。

网络在分簇过程中还考虑了成员节点当前剩余能量小于某一阈值时，使用 K-覆盖方法替换节点，能确保网络通信的正常运行不掉线，提高数据传输成功率。

实验结果表明，本文方法能均衡系统中节点能量，有效延长网络的生存时间，实现移动传感器网络的节能通信。

参考文献 (References)

[1] Ma X, Zhang J, Yin X, et al. Design and analysis of a robust broadcast scheme for VANET safety-related services [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(1): 46-61.
 [2] 张法, 王林, 侯晨颖, 等. 网络能耗系统模型及能效算法 [J]. 计算机学报, 2012, 35(3): 603-615. (Zhang Fa, Wang Lin, Hou Chen-ying, et al. Network Energy Consumption Models and Energy Efficient Algorithms [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(3): 603-615.)
 [3] 胡静, 沈连丰, 宋铁成, 等. 新的无线传感器网络分簇算法 [J]. 通信学报, 2008, 29(7): 20-26. (Hu Jing, Shen Lian-feng, Song Tie-cheng, et al. Novel Clustering algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2008, 29(7): 20-26.)

(下转第 546 页)

nonlinear system with uncertainties and disturbance. What's more, the proposed guidance strategy has already put into practical use in our flight test, which has obtained good performance.

References:

- [1] Rugh W J, Shamma J S. Research on gain scheduling [J]. *Automatica*, 2000, 36(10): 1401-1425.
- [2] Leith D J, Leithead W E. Survey of gain-scheduling analysis and design [J]. *International Journal of Control*, 2000, 73(11): 1001-1025.
- [3] Lee L H, Sphillman M. Control of slowly varying lpv systems: an application to flight control [C]. San Diego: The IEEE Conference on Decision and Control, 1997.
- [4] Nichols R A, Reichert R T, Rugh W J. Gain scheduling for H_∞ controllers: a flight control example [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1993, 1(2): 69-78.
- [5] Jang J, Annaswamy A M, Lavretsky E. Adaptive control of time-varying systems with gain-scheduling [C]. Washington: American Control Conference, 2008.
- [6] Qin S J, Borders G. Multi-region fuzzy logic control system with auxiliary variables [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1994, 2(1): 74-89.
- [7] Leith D J, Leithead W E. Appropriate realization of gain scheduled controllers with application to wind turbine regulation [J]. *International Journal of Control*, 1996, 65(2): 224-248.
- [8] Khalil H K. *Nonlinear Systems (3rd edition)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [9] Slotine J E, Li P W. *Applied nonlinear control* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1991.
- [10] Efe M O. Robust low altitude behavior control of a quadrotor rotorcraft through sliding modes [C]. Athens: Mediterranean Conference on Control and Automation, 2007:1-6.
- [11] Bouabdallah, Siegwart R. Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor [C]. In Proceedings of The IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005.
- [12] Madani T, Benallegue A. Backstepping control for a quadrotor helicopter [C]. Beijing: International Conference on Control and Automation, 2006.
- [13] Han J Q. From pid to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(4): 900-906.
- [14] Han J Q. Active disturbance rejection control technique—the technique for estimating and compensating the uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [15] Shao L W, Liao X Z, Xia Y Q. Stability analysis and synthesis of third order discrete extended state observer [J]. *Information and Control*, 2008, 37(2): 136-139.
- [16] Zheng Q, Chen Z Z, Gao Z Q. A practical approach to disturbance decoupling control [J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(9): 1016-1025.
- [17] Hu Q, Fei Q, Wu Q H, Geng Q B. Research and application of nonlinear control techniques for quadrotor UAV [J]. *Journal of university of science and technology of China*, 2012, 42(8): 656-663.
- [18] DU M M, JIN F. Design and control of a mini quad-rotor UAV based on embedded system [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 44(2): 477-481.
- [19] Zheng Q. On active disturbance rejection control: stability analysis and application in disturbance decoupling control [D]. Cleveland: Cleveland state university, 2009.
- [20] Han J Q, Zhang R. Error analysis of the second order eso [J]. *Journal of System Science and Mathematical Sciences*, 1999, 19(4): 465-471.
- [21] WEI H J. The research of helicopter flight simulation system based on flightgear [D]. Dalina: Dalian University of Technology, 2008.
- [22] YU Y P. 3D visual simulation system for quadrotor unmanned aerial vehicles based on flightgear [D]. Tianjing: Tianjing University, 2010.

(上接第 536 页)

- [4] 赵彤, 郭田德, 杨文国. 无线传感器网络能耗均衡路由模型及算法 [J]. *软件学报*, 2009, 20(11): 3023-3033. (Zhao Tong, Guo Tian-de, Yang Wen-guo. Energy Balancing Routing Model and its Algorithm in Wireless Sensor Networks [J]. *Journal of Software*, 2009, 20(11): 3023-3033.)
- [5] 刘安丰, 徐娟, 陈志刚. 无线传感器网络能量均衡消耗的 TDMA 调度算法 [J]. *计算机研究与发展*, 2010, 47(2): 245-254. (Liu An-feng, Xu Juan, Chen Zhi-gang. A TDMA Scheduling Algorithm to Balance Energy Consumption in WSNs [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47(2): 245-254.)
- [6] 董荣胜, 马争先, 郭云川, 等. 一种基于马尔可夫博弈的能量均衡路由算法 [J]. *计算机学报*, 2013, 36(7): 1500-1508. (Dong Rong-sheng, Ma Zheng-xian, Guo Yun-chuan, et al. A Markov Game Theory-based Energy Balance Routing Algorithm [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(7): 1500-1508.)
- [7] 刘述钢, 刘宏立. 无线传感器网络中能量有效的多层分簇算法 [J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(6): 2257-2260. (Liu Shu-gang, Liu Hong-li. Energy-efficiency Multi-level Clustering Algorithm in Wireless Sensor Networks [J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(6): 2257-2260.)
- [8] Kim D S, Chung Y J. Self-organization routing protocol supporting mobile nodes for wireless sensor network [C]. *IEEE, IM-SCCS 2006*. 2006, 2: 622-626.
- [9] 王璨, 骆坚, 张大方, 等. 一种基于移动性的无线传感器网络分簇路由协议 [J]. *计算机工程与科学*, 2012, 34(3): 6-12. (Wang Can, Luo Jian, Zhang Da-fang, et al. A Mobility-Based Cluster Routing Protocol for Mobile Wireless Sensor Networks [J]. *Computer Engineering and Science*, 2012, 34(3): 6-12.)
- [10] 默罕默德·默森, 许凯凯, 夏玮玮, 等. 荒漠场景应用的车联网及其分簇路由算法 [J]. *通信学报*, 2012, 33(10): 166-174. (Mohamed Mohsen, Xu Kai-kai, Xia Wei-wei, et al. Vehicular ad hoc network and clustering routing algorithm applied in wilderness scenarios [J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(10): 166-174.)
- [11] 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): 1211-1220. (Zhong Zhi, Luo Da-yong, Liu Shao-qiang, et al. Energy-balanced clustering routing protocol in wireless sensor networks with a mobile sink [J]. *Control and Decision*, 2012, 27(8): 1211-1220.)
- [12] Wang Y C, Wu F J, Tseng Y C. Mobility management algorithms and applications for mobile sensor networks [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2012, 12(1): 7-21.
- [13] Wang X, Han S, Wu Y. Coverage and Energy Consumption Control in Mobile Heterogeneous Wireless Sensor Networks [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(4): 975-988.