

基于博弈论的无线传感器网络簇间路由选择算法

赵昕*, 张新

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710061)

(*通信作者电子邮箱 270307024@qq.com)

摘要:针对无线传感器网络(WSN)中,网络覆盖范围大,但传感器节点通信范围有限,长距离传输容易造成数据丢失的问题,提出了一种基于博弈论的无线传感器网络簇间路由算法,通过建立以网络服务质量(QoS)和节点剩余能量为效用函数的博弈模型,并求解其纳什均衡来解决以上问题。仿真结果表明:所提出的博弈模型在优化网络服务质量、降低节点能耗的同时,延长了整个网络的生存时间。

关键词:无线传感器网络;服务质量;节点剩余能量;博弈模型;纳什均衡

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A

Inter-cluster routing algorithm in wireless sensor network based on game theory

ZHAO Xin*, ZHANG Xin

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an Shaanxi 710061, China)

Abstract: In Wireless Sensor Network (WSN), the network coverage range is wide, the communication range of sensor nodes is limited, and the long distance transmission is easy to cause data loss problem. To solve these problems, a routing algorithm based on game theory for WSN was proposed, through establishing the network Quality of Service (QoS) and the nodes' residual energy of nodes as the utility function of game model, and resolving the Nash equilibrium. The simulation results show that the proposed game model can optimize network service quality, reduce the energy consumption of nodes and prolong the survival time of the entire network.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Quality of Service (QoS); node residual energy; game model; Nash equilibrium

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并将感知信息发给观察者^[1]。近些年,WSN广泛应用于军事、环境保护、智能交通等领域,并解决了许多实际中的问题,取得了显著的成果^[2]。但由于传感器节点的能量有限,并且在大多数情况下都无法更换电池,因此,无线传感器网络的生存周期常常依赖于无线传感器节点的电池容量。由于单个传感器节点的通信范围有限,所以每个传感器节点都必须与其邻域内的节点协同完成数据的传输,这样不但可以避免长距离传输造成的数据丢失,还可以减少节点能量的消耗,从而保证网络的可靠性,平衡网络中各个传感器节点的能量消耗,延长整个网络的生存周期。所以,设计合理的簇间路由算法对延长网络生存周期、平衡网络中传感器节点的能耗有着重要的意义。

文献[3]提出了一种基于优化传输路径可靠度和长度的路由博弈模型,但这种博弈模型并没有考虑路由节点的偏好,也不能描述动态的路由过程。文献[4]考虑到传感器节点的历史行为和能量的不确定性,提出了一种基于动态贝叶斯博弈的数据包转发算法(Packet Forwarding algorithm based on Dynamic Bayesian Game, PFDBG),可对传感器节点的数据速

率进行动态的分配,从而减少了节点的能量消耗,延长了网络的生存周期,但此算法并没有考虑节点间链路质量对数据转发的影响。文献[5]针对无线传感器网络中的分布式功率控制问题,提出了一种基于节点发射功率和节点度的博弈模型,但在无线传感器网络中功率值与节点度的关系并不明显,并且该模型也没有考虑节点的剩余能量。

本文针对无线传感器网络,提出了一种新的簇间路由算法,将簇头节点的选路问题看作是网络中的博弈问题,并通过博弈求解的过程确定其纳什均衡^[6-8]。通过博弈均衡分析表明,对于无线传感器网络,它的簇间路由由博弈存在一个纯策略的纳什均衡,在网络服务质量(Quality of Service, QoS)和节点能耗之间进行折中,那么联合降低网络能耗、优化网络QoS就是纳什均衡对应的结果。

1 系统架构

无线传感器网络通常由部署在监测区域的大量传感器节点组成,为了减少系统能量的消耗以及组网成本,本文采用与蜂窝网类似的正六边形簇状拓扑,且簇头节点固定,位于六边形的几何中心。然后通过汇聚节点与远端的监测中心进行信息的传输,其系统架构如图1所示。

其中位于监测区域的普通传感器节点周期性地采集系统所需的数据,并将收集到的信息传输到自己所在子网的簇头节点;簇头节点会对收集到的簇内的信息进行融合、计算等初步处理,然后将处理后的信息以多跳路由的方式发送至位于

收稿日期:2013-02-05;修回日期:2013-03-03。 基金项目:西安市科技计划项目(CXY1117(5))。

作者简介:赵昕(1988-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络管理; 张新(1968-),女,陕西西安人,教授,博士,主要研究方向:网络计算、网络管理。

无线传感网络边缘的汇聚节点,实现无线传感器网络与移动网络之间的互联互通,监测管理中心会对收集到的数据进行存储、分析和决策等操作。

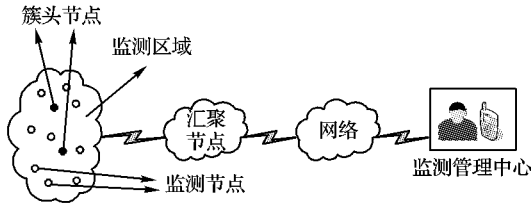


图1 系统架构

2 基于博弈论的簇间路由算法

2.1 网络的服务质量模型

2.1.1 参数偏移度

为了合理量化网络中不同节点的 QoS,本文将对不同节点的 QoS 的各相关参数进行参数偏移度的统一量化,根据网络 QoS 将参数分为有益量和代价量,并对参数的偏移度进行归一化处理。其中有益量就是 QoS 追求其值最大化的量,如带宽、接入信噪比等,代价量是指 QoS 希望其值越小越好的量,如终端功耗、连接延时等,两类衡量参数的偏移度如式(1)~(2)所示:

1) 有益量参数的偏移度:

$$V_i = \frac{x_{\max}^i - x_c^i}{x_{\max}^i - x_{\min}^i} \quad (1)$$

2) 代价量参数的偏移度:

$$V_i = \frac{x_c^i - x_{\max}^i}{x_{\max}^i - x_{\min}^i} \quad (2)$$

其中: x_c^i 表示第 i 个节点实际提供的参数值, x_{\max}^i 和 x_{\min}^i 分别表示网络对 x_c^i 的最大值和最小值的需求量, V_i 表示参数 x_c^i 的偏移度。

2.1.2 量化网络 QoS

本文采用了人工神经网络学习算法中常用的 Sigmoid 函数,来实现不同节点 QoS 的统一量化,该模型通过计算各个节点参数的偏移度,确定参数所对应的敏感因子以及网络 QoS 可容忍的参数偏移度,衡量网络链路质量中各参数的影响程度。定义 M 为网络的 QoS,如式(3):

$$M = \frac{C_1}{1 + \exp\left(-S \sum_{i=1}^K w_i (T_i - V_i)\right)} \quad (3)$$

其中: C_1 、 S 均为常量; w_i ($0 < w_i \leq 1$) 表示所选参数 i 的敏感因子; T_i 表示网络 QoS 可容忍的参数偏移度; V_i 表示所选参数的偏移度。

2.2 基于博弈论的簇间路由算法

簇间路由是指簇头节点将处理后的信息通过多跳到达汇聚节点的路径选择。簇头节点以“收集—存储—处理—转发”的模式进行数据的处理^[9],但由于簇头节点的无线通信范围有限,所以需要与其他的节点相互协作将信息转发到目的地,即簇头节点需要经过多跳的方式将信息转发给汇聚节点。

如图2所示的网络结构,每个相邻的簇头间有两个公共的普通传感器节点,当簇头节点 A 向汇聚节点传递数据的时候,可以使用中间节点(簇头节点和普通传感器节点均可)作为中继节点进行协作的传输,簇头节点 A 可以通过 2 或 3 普通传感器节点将数据传输到簇头节点 B,然后簇头节点 B 经

过 4 或者 5 普通传感器节点将数据传输到汇聚节点;簇头节点 A 也可以通过 1 或 2 普通传感器节点将数据传输到簇头节点 C,然后簇头节点 C 经过 4 或者 6 普通传感器节点将数据传输到汇聚节点。当节点协助转发数据的时候都要消耗自己有限的资源,如能量、带宽等,因此当节点面对是否成为中继节点协助转发数据的问题时,它会为了节约自己的资源而拒绝协助转发,这样就会导致网络的整体性能显著降低。

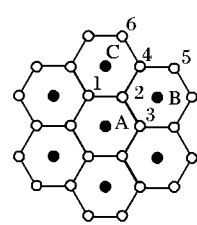


图2 簇头节点数据转发的场景

本文提出的簇间路由算法是在网络 QoS 和节点能耗之间进行折中,可以将簇头节点的选路问题看作是网络 QoS 与节点能耗之间的博弈问题,通过博弈求解的过程确定其纳什均衡,从而在满足应用需求的前提下尽可能延长网络的生存时间。

博弈空间^[10]定义如下:

参与者 需要转发数据的簇头节点以及簇与簇之间的公共节点,假设参与的节点数为 $1 \leq i \leq k$ 。

参与者的信息集 本文提出的模型中的信息集是随着时间而变化的,其中主要的信息包括参与者需转发的数据量、节点的剩余能量和 QoS 等。

策略空间 从图2中可以看出从簇头节点 A 到簇头节点 B 的数据传输存在多条路径,簇头节点会根据节点的剩余能量和 QoS 来选择传输路径,每一次选路的过程中,以节点是否成为本次路由的中继节点作为该节点的策略。

效用函数 本文定义博弈模型的效用函数为 QoS 需求量 M_i 与节点的剩余能量 E_i 的二次效用函数^[11],则路径选择博弈模型中总的效用函数如式(4):

$$U(\mathbf{M}) = \sum_{i=1}^k M_i e_i - \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^k M_i^2 + 2\rho \sum_{i \neq j} M_i M_j \right) - \sum_{i=1}^k E_i M_i \quad (4)$$

其中: $\mathbf{M} = (M_1, \dots, M_i, \dots, M_k)$ 为需转发数据的簇头节点对 QoS 的需求向量; ρ 表示不同节点 QoS 间的竞争因子, $0 \leq \rho \leq 1$, $\rho = 1$ 时,表示备选节点 QoS 无差异, $\rho = 0$ 时,表示某一条节点 QoS 具有不可替代的优势; e_i 表示节点 i 对应的 M_i 的效率因子,由公式 $e_i = C_2 \left(1 - \sum_{i=1}^k w_i V_i / \sum_{i=1}^k w_i \right)$ 求解得到, C_2 为常数, w_i ($0 < w_i \leq 1$) 表示所选参数 i 的敏感因子, V_i 表示所选参数的偏移度。

最佳 QoS 需求量 M_i 可通过最大化 $U(\mathbf{M})$ 得到,也就是将 $U(\mathbf{M})$ 对 M_i 求导,并令其等于 0,如式(5)所示:

$$\frac{\partial U(\mathbf{M})}{\partial M_i} = e_i - M_i - \rho \sum_{i \neq j} M_j - E_i = 0 \quad (5)$$

就可得到 QoS 需求量的函数,如式(6)所示:

$$M_i(E) = \frac{(e_i - E_i)[\rho(N-2) + 1] - \rho \sum_{i \neq j} (e_j - E_j)}{(1 - \rho)[\rho(N-1) + 1]} \quad (6)$$

2.3 路由选择机制

一般情况下,簇头节点都会选择 QoS 好的路径来转发数

据包,但是网络的 QoS 要求越高,其相应的节点能量消耗也会增加。本文提出一种以 QoS 和节点剩余能量为决策量的路径选择机制。

假设节点 j 如果选择节点 i 为下一跳节点,并且参与路由的节点最大能量相同,则选择节点 i 的决策函数可表示为式(7):

$$u_i = \pi_i / C_i \quad (7)$$

其中 π_i 为节点 i 的收益函数^[12],表示为式(8):

$$\pi_i = M_{ij} \rho + \frac{E_i}{E} (1 - \rho) \quad (8)$$

其中: M_{ij} 为节点 i, j 之间的 QoS; E_i 为节点 i 当前的剩余能量; E 为节点的初始能量; ρ 为可调参数,其值的选取由控制中心根据天气状况及簇头剩余能量统计情况决定,当能量供应充足时 $\rho = 1$,当遇到灾害天气时 $\rho \in [0, 1)$ 。显然,该支付函数综合考虑了节点剩余能量以及 QoS。

其中 C_i 为节点 i 被选为中继节点的代价^[13],表示为式(9):

$$C_i = \frac{(E_i^r + E_i^t) \cdot n}{E_i + E_j} \quad (9)$$

其中: E_i^r 为节点 i 接收单位比特的数据所消耗的能量, E_i^t 为节点 i 发送单位比特的数据所消耗的能量, n 为节点 j 需要节点 i 转发的数据量, E_i 为节点 i 当前的剩余能量, E_j 为节点 j 当前的剩余能量。为了计算方便,假设:1) 节点接收数据和节点发送数据消耗相同的能量;2) 节点剩余能量相同。则式(9)可化简为:

$$C_i = E_i^r \cdot n / E_i \quad (10)$$

将式(8)和式(10)代入式(7),就可得到一个关于 QoS 和节点剩余能量的决策函数,如式(11)所示:

$$u_i = \frac{M_{ij} \rho + \frac{E_i}{E} (1 - \rho)}{\frac{E_i^r \cdot n}{E_i}} \quad (11)$$

2.4 博弈模型的纳什均衡

纳什均衡对应的是一个稳定的博弈结果,一旦出现这种博弈结果,任何一个参与者都不愿意单独改变自己的策略,因为单独改变对自己没有好处。

本文中的纳什均衡解可通过博弈方的最佳策略函数联立求解获得。最佳策略函数^[14]定义为: $BRF(E_{-i}) = \arg \max_{E_i} (E_{-i} \cup \{E_i\})$, 其中 E_{-i} 为节点 i 之外的其他节点的剩余能量,当且仅当对于 $\forall i, E_i^* = BRF(E_{-i}^*) = \arg \max_{E_i} (E_{-i}^* \cup \{E_i\})$ 成立时,向量 $E^* = (E_1^*, E_2^*, \dots, E_{i-1}^*, E_i^*, E_{i+1}^*, \dots, E_k^*)$ 为纳什均衡解。

由函数(6)和函数(11)的关系,就可将收益函数表示为式(12):

$$u_i(E) = \frac{\rho}{E_i^r \cdot n} \cdot F_1 \cdot (e_i - E_i) \cdot E_i + \frac{(1 - \rho)}{E_i^r \cdot n \cdot E} \cdot F_2 \cdot E_i^2 \cdot \sum_{i \neq j} (e_j - E_j) \quad (12)$$

其中:

$$F_1 = \frac{\rho(N - 2) + 1}{(1 - \rho)[\rho(N - 1) + 1]} \quad (13)$$

$$F_2 = \frac{\rho}{(1 - \rho)[\rho(N - 1) + 1]} \quad (14)$$

将 $u_i(E)$ 对 E_i 求导,并令其为 0:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i(E)}{\partial E_i} &= 2F_2 \cdot \frac{(1 - \rho)}{E_i^r \cdot n \cdot E} \cdot E_i \cdot \sum_{i \neq j} (e_j - E_j) - \\ &\quad \frac{\rho}{E_i^r \cdot n} \cdot F_1 \cdot e_i = 0 \\ \Rightarrow E_i^* &= \frac{1 + \rho(N - 2)}{2(1 - \rho)} \cdot \frac{E}{\sum_{i \neq j} (e_j - E_j)} \end{aligned} \quad (15)$$

E_i^* 即为节点 i 的最佳能耗策略函数,同理可求得其他节点的最佳能耗策略函数,联合节点的最佳能耗策略函数就可得纳什均衡能耗 $E^* = (E_1^*, E_2^*, \dots, E_k^*)$, 由于各节点的最佳能耗策略函数均为线性的,所以纳什均衡点是存在的并且唯一^[15]。

3 仿真与分析

3.1 参数设置

本文实验仿真中将 100 个节点按照正六边形的结构分布于一个 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的区域,并且簇头节点位于正六边形的几何中心。数值仿真实验中假设簇头节点有两条不同的路径选择,仿真的参数设置为 $C_1 = 1, S = 10, K = 2$ 。

3.2 仿真分析

图 3 比较了选择两种不同路径对判决量的影响,从图中可以看出,在纳什均衡点上,由于两条路径的能耗相同,所以选择任何路径传输的概率也是相同的。

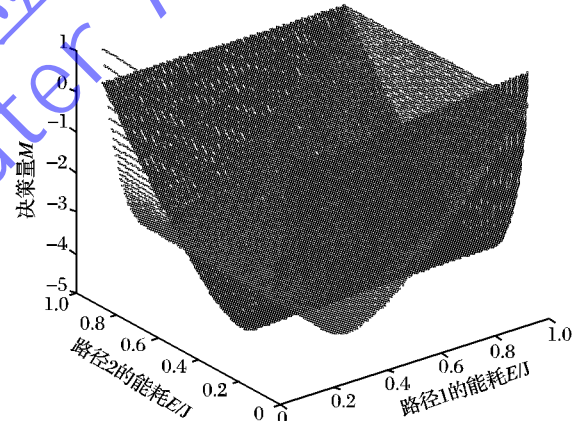


图3 路径1、2的能耗以及决策量之间的关系

图4所示为所选路径在不同能量消耗对决策量的影响。从图中可以看出:决策量随着能耗的增加而减小,随着效率因子 e_i 的增长而增加;随着路径2能耗的增加,路径1的决策量也会增加,这样用户选择路径1的可能性也会随之增加。原因是用户更倾向于选择能耗低的路径。

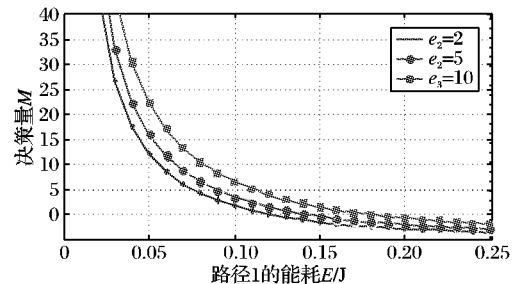


图4 不同能耗下的决策量的变化

4 结语

本文采用博弈论,对无线传感器网络簇间路由算法进行
(下转第1819页)

控传输,将传输时间延长来减少 EPI 的网络拥塞。在稀疏车辆 Ad Hoc 网络中,对于动辄几十秒上百秒甚至几个小时的时延,增加的这点时延在可接受的范围内,且 Ad-EPI 信息的到达率与峰值传输控制效果非常好,这也是保证到达率和峰值传输控制效果所必须付出的代价。

4 结语

通过多次仿真实验,其结果证实,由于 Ad-EPI 算法的三个关键参数受控,在带宽占用、峰值控制和缓存利用等方面比 Epidemic 有明显优势,通过自适应地控制策略对三个参数进行调节,在保证有较高的到达率的条件下,峰值传输控制、带宽资源占用、缓存利用以及时延等方面可达到一个综合平衡,取得明显的效果。Ad-EPI 算法对于到达率和时延性能方面有一定的影响,有待进一步研究,加以改善。

参考文献:

- [1] PERKINS C E, BHAGWAT P. Highly dynamic Destination-Sequenced Distance Vector routing (DSDV) for mobile computers [C]// SIGCOMM94: Proceedings of the 1994 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications. New York: ACM Press, 1994: 234 - 244.
- [2] 杨成恩,徐家品. 稀疏车辆 Ad Hoc 网络移动模型研究[J]. 通信技术,2011,44(5): 88 - 91.
- [3] BURLEIGH S, HOOKE A, TORGERSON L, *et al.* Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary internet [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(6): 128 - 126.
- [4] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected Ad Hoc networks [R]. Durham, NC: Duke University, 2000.
- [5] JAIN S, FALL K, PATRA R. Routing in a delay tolerant network [C]// SIGCOMM 2004: Proceedings of the 2004 Conference on Ap-

plications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2004: 145 - 158.

- [6] SEVIMLI K K, SOYTURK M. Lifetime determination for delay tolerant communications in sparse vehicular networks [C]// ISWPC 2010: Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing. Piscataway: IEEE Press, 2010: 250 - 255.
- [7] HIGAKI H. Navigation system based DTN routing in sparse vehicular networks [C]// 2011 International Conference on Communications and Information Technology. Piscataway: IEEE Press, 2011: 171 - 175.
- [8] ABDRAADABOU A, LIANG B, ZHUANG W H. Delay analysis for a reliable message delivery in sparse vehicular Ad Hoc networks [C]// 2010 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1 - 5.
- [9] REIS A B, SARGENTO S, TONGUZ O K. On the performance of sparse vehicular networks with road side units [C]// 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1 - 5.
- [10] FARRELL S, CAHILL V. Security considerations in space and delay tolerant networks [C]// SMC-IT06: Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology. Piscataway: IEEE Press, 2006: 29 - 38.
- [11] OpenStreetMap 2[ER/OL]. [2012-11-20]. <http://www.openstreetmap.org/>. 2010.
- [12] FIORE M, HARRI J, FILALI F, *et al.* Vehicular mobility simulation for VANETs [C]// Proceedings of the 40th Annual Simulation Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2007: 301 - 309.
- [13] 王博,黄传河,杨文忠. 时延容忍网络中基于效用转发的自适应机会路由算法[J]. 通信学报,2010,31(10): 36 - 47.

(上接第 1815 页)

了探索分析,决策量综合考虑了节点的剩余能量以及 QoS,该算法采用一种量化 QoS 的评价模型,即最大化路径决策量的路由选择方法。通过求解模型的纳什均衡解,确定最佳策略,可以均衡节点的能耗,从而延长网络的生存时间,本文的方法为簇间路由算法提供了一种新的思路。基于该模型的仿真分析表明,该博弈存在一个纯策略的纳什均衡而且最优路径就是该博弈的一个纳什均衡解。

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] 崔莉,鞠海玲,苗勇,等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展,2005,42(1): 163 - 174.
- [3] RAJGOPAL K, IYENGAR S. Game-theoretic models for reliable path-length and energy-constrained routing with data aggregation in wireless sensor networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6): 1141 - 1150.
- [4] 赵永辉,史浩山. 一种无线传感器网络数据包转发的博弈论算法[J]. 西安电子科技大学学报,2010,37(6): 1125 - 1131.
- [5] RAMAKANT S K, ALLEN B M. Distributed topology control in Ad-Hoc networks: a game theoretic perspective [C]// Proceedings of the 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2006: 563 - 568.
- [6] CUI Y, XU Y B, XU R Q, *et al.* A heterogeneous wireless network se-

lection algorithm based on non-cooperative game theory [C]// Proceedings of 2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking. Piscataway: IEEE Press, 2011: 720 - 724.

- [7] LA R J, ANANTHARAM V. Network pricing using game theoretic approach [C]// Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press, 1999: 4008 - 4013.
- [8] 涂志勇. 博弈论[M]. 北京:北京大学出版社,2010.
- [9] 张程,刘慧君,陈自郁,等. 基于信用的重复博弈模型在节点转发中的应用[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2010,13(2): 152 - 158.
- [10] 范如国. 博弈论[M]. 武汉:武汉大学出版社,2011.
- [11] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of Nash equilibrium, and collusion [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 192 - 202.
- [12] 胡静,沈连丰. 基于博弈论的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 东南大学学报,2010,40(3): 441 - 445.
- [13] 李慧芳,姜胜明,韦岗. 无线传感器网络中基于博弈论的路由建模[J]. 传感技术学报,2007,20(9): 2075 - 2079.
- [14] 陈前斌,周伟光,柴蓉,等. 基于博弈论的异构融合网络接入选择方法研究[J]. 计算机学报,2010,33(9): 1643 - 1652.
- [15] SARAYDAR C U, MANDAYAM N B, GOODMAN D J. Efficient power control via pricing in wireless data network [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(2): 291 - 303.