

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.01.013

博弈论在无线传感器网络路由机制中的应用

田得润, 李长云, 张 瑶, 张 军

(湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了解决节点间不协作的问题, 将博弈论应用于无线传感器网络路由机制中, 使网络的生命周期和网络运行效率得到较大的提高。分析了节点自私性的表现和对网络效率的影响, 总结了博弈论在无线传感器网络路由机制中数据包转发和网络分簇路由协议的典型应用, 分析了当前研究中存在的问题和发展方向。

关键词: 无线传感器网络; 博弈论; 路由机制

中图分类号: TN915.05

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)01-0055-06

Application of Game Theory in Wireless Sensor Network Routing Mechanism

Tian Derun, Li Changyun, Zhang Yao, Zhang Jun

(School of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to solve the problem of non-coordination between nodes, applies the game theory in the research of wireless sensor network routing mechanism to prolong the life cycle of network and greatly improve network efficiency. Analyses the performance of node selfishness and its influences on the network efficiency, summarizes the typical application of game theory in terms of data packet forwarding and cluster routing protocol of wireless sensor network routing mechanism, and proposes the problems of current research and the developmental direction.

Keywords: wireless sensor networks; game theory; routing mechanism

0 引言

无线传感器网络是由大量无线传感器节点组成, 具有节点密集、资源受限和动态拓扑结构等特点的多跳网络^[1]。该网络中所有节点都具有相互协作、管理自身资源的能力。无线传感器网络的正常运行必须依靠节点间的相互协作^[2], 而节点的自私性^[3-5]使节点间缺乏协作。在分析无线传感器网络模型时, 通常认为节点间具有良好的协作性, 但是在实际应

用中并不尽然, 每个节点都受到自身能量、处理能力的限制^[6], 在转发数据时会消耗大量的自身资源, 为了节约自身能量而不参与网络协作, 这种行为体现了节点的自私性^[7-12]。节点的通信距离是有限的, 所以数据包的转发通常是由节点间的相互协作来完成。在具有激励机制的无线传感器网络中, 节点的自私性主要表现为: 1) 节点为延长自己的生存期, 拒绝为网络中的其他节点提供数据包转发服务; 2) 节点为获取收益以欺骗的方式承诺转发数据包, 在

收稿日期: 2011-11-01

基金项目: 国家技术创新基金资助项目(11C26214302856), 湖南省自然科学基金资助项目(11JJ4050), 湖南省教育厅科研基金资助项目(10C0620), 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(11B039)

作者简介: 田得润(1985-), 男, 河南驻马店人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为嵌入式应用,

E-mail: tianderun@foxmail.com

获得收益后将承诺转发的数据包丢弃。节点间缺乏协作将导致无线传感器网络路由机制效率低下,如网络能耗不均,网络稳定性下降,网络生存期缩短等。因此,如何让节点更好地协作是当前无线传感器网络研究的一个热点问题,解决这一问题的关键在于设计合理的路由机制,以便抑制无线传感器节点的自私性。传感器节点间缺乏协作的原因是节点间存在利益冲突,而博弈论是解决相互作用的多个参与者间的利益冲突的工具,可有效解决无线传感器网络中的节点自私性问题,提高网络效率。本文总结了博弈论在无线传感器网络路由中2个方面的应用:数据包转发和网络分簇路由协议。

1 数据包转发机制

国内外研究者们对无线传感器网络中的数据包转发机制已经有了较深入的研究。如戴沁芸等人^[13]将博弈论应用到基于协作的包转发研究方法中,刘田^[14]、刘群等人^[15]对合作性重复博弈模型进行了研究,E. Campos-Nañez等人^[16]提出一种基于博弈论的无线传感器数据包转发机制。

博弈论在无线传感器网络中数据包转发的应用主要分为合作性重复博弈模型、能耗均衡博弈模型和拍卖博弈模型3种。

1.1 合作性重复博弈

重复博弈是由相同结构的单次博弈重复多次构成的^[17],其中,单次博弈也称为子博弈是节点转发一次数据包的过程。

节点可采用不同策略的阶段博弈收益模型,其中,参与者集合是节点及其邻居节点的集合。节点*i*是否成功转发表示为 p_i ,如果成功转发 $p_i=1$,否则 $p_i=0$;节点*i*与节点*k*之间的路径是否连通表示为 p_{ik} ,如果路径连通 $p_{ik}=1$,否则 $p_{ik}=0$;将节点的初始能量、转发1个数据包的能耗、发送1个数据包的能耗分别定义为 E_i, E_t, E_o ,数据包的转发包括接收和发送2个阶段,所以 $E_t > E_o$ 。节点成功转发1个数据包的收益用 r 表示。节点*i*和节点*k*之间的策略用一个三元组 (p_i, p_{ik}, f) 表示,其中 f 的取值为0或者1, $f=1$ 表示节点转发数据包; $f=0$ 表示节点不转发数据包。节点采用不同策略的阶段博弈收益如表1所示。

表1 节点采用不同策略的阶段博弈收益

Table 1 Staged game income of the node with different strategy

节点 <i>i, k</i> 的策略	(p_i, p_{ik}, f)	<i>i</i> 的收益	<i>k</i> 的收益
发送并转发	(1, 1, 1)	$r - E_o - E_t$	$r - E_t$
发送不转发	(1, 1, 0)	$r - E_o$	r
不发送不转发	(1, 0, 0)	0	0

从表1可以看出:所有节点选择发送而不转发时收益最高,但是这样的网络是不能正常运行的。为了保证节点间的相互合作,引入惩罚机制,如果节点在前一轮博弈中不合作,则该节点将在下一轮博弈中受到惩罚。节点会根据预期收益和惩罚来决定是否转发数据包。根据重复博弈理论的收益评估方法^[18],当节点死亡率高于90%时,宣告网络失效,否则节点进行包转发博弈。

利用收益评估方法对博弈进行评估,可使网络达到子博弈精炼纳什均衡^[19]。但是,如果博弈结果不存在占优策略,则需要多次博弈以使网络均衡,这样将会影响无线传感器网络的性能。

1.2 能耗均衡博弈

陆音等人^[20]的利用不完全信息博弈提出了一种基于能耗均衡的无线传感器网络中数据包转发机制。在无线传感器网络路由中,基于能耗的路由算法较少考虑全局能量均衡^[21-23]。数据包的转发工作多集中于能耗较低的路径上,这部分路径上的节点会因为能耗过快而提前死亡,使网络出现能量空洞和网络分割现象,严重缩短了无线传感器网络的生存周期。针对网络能耗不均衡的问题,有研究者提出了能耗均衡的博弈模型,它是利用自信概率来构建完全但不完美信息的静态博弈。

能耗均衡博弈模型中,博弈的参与者集合是节点的邻居节点集合。节点通过自信概率值来决策是否转发数据。自信概率定义为

$$P_{\text{exp}i} = \mu_i \ln(1 + r_i) - \lambda_i E_{ci}(r_i), p_{Ti}^* \in \arg \max(P_{\text{exp}i}),$$

式中: $P_{\text{exp}i}$ 为节点*i*的期望支付函数,为其期望收益与期望消耗之差;

r_i 为节点 n_i 的期望收益;

$E_{ci}(r_i)$ 为节点*i*的期望能量消耗;

p_{Ti}^* 为最优决策。

在初始状态时,节点的自信概率服从(0, 1)的均匀分布。节点*i*最终将以最优决策 p_{Ti}^* 的概率转发数据,并消耗相应的能量。这种算法的优势是通过引入自信概率,将节点选择是否转发数据的博弈转化为完全但不完美的信息博弈,进而求出均衡解。

1.3 拍卖博弈

L. Yukun等人^[24]提出了基于拍卖博弈的无线传感器网络路由模型。拍卖博弈模型是经济学中一种解决卖方和买方交易问题的经典理论。在数据包转发机制中,拍卖博弈理论将发送数据的节点作为交易中的买方,发送数据节点的下一跳节点作为交易中的卖方,结合卖方节点的剩余能量和到Sink节点的跳数等因素,设计了基于支付的奖励机制,促进买

方节点和卖方节点相互合作,形成一个耗能较低、传输可靠的路径。

基于支付的奖励机制的基本思想是在网络中设置一个“中央银行”,中央银行采用“虚拟货币”的形式激励节点间相互协作。在无线传感器网络中,由Sink节点担任“中央银行”,如果买方节点和卖方节点成功合作,Sink节点分别给双方节点一个奖励,以补偿节点在合作过程中的能量损耗。

拍卖博弈分为买方 j 节点和卖方 s 节点,在 t 时刻卖方 s 的收益函数为

$$u_s(t) = a_s(t) [b_1 - E_{ss}(t)/E_s(t) - \varphi(s, j)],$$

式中: $E_s(t)$ 为节点 s 的剩余能量;

$E_{ss}(t)$ 为节点 s 发送数据包消耗能量;

b_1 为Sink节点支付给源节点 s 价格;

$\varphi(s, t)$ 为拍卖的报价。

假设转发成本为0,则节点 j 在时刻 t 的收益为 $u_j(t) = \varphi(s, t)$ 。在下一轮的拍卖博弈过程中,买方节点 j 的角色会转换为卖方,新的买方节点继续寻找报价最低的卖方节点,直到数据包转发到sink节点为止。

在拍卖博弈中,卖方节点为了获得最大收益,会选择报价最低、能耗最少的节点来转发数据,使自身利益最大化^[25],在买方和卖方节点博弈的过程中形成了一个耗能较低、传输可靠的数据传输路径。

2 网络分簇路由协议

无线传感器网络路由协议按照网络拓扑结构分为平面路由协议和分簇路由协议,其中,分簇路由协议更加适合大规模无线传感器网络^[26]。R. Kannan等人^[27-28]提出了结合能量和路径的平面路由协议建立博弈模型,杨宁等人^[29]提出了综合节点分布与节点能耗的分布式路由协议,胡静等人^[30]从农田智能灌溉系统的应用出发,设计了一种基于博弈论的分布式二级路由协议。

2.1 簇头选择机制

在基于博弈论的簇头选择机制中,所有的节点组成博弈论的参与者集合 N 。将节点 i 的支付函数设定为 f 。簇头选择时,节点根据 f 值进行决策。如果一个子区域中的某个节点的支付函数的值最大,则选取这个节点作为簇头。支付函数为

$$f(i) = \varepsilon E_i / E_{\text{init}} - (1 - \varepsilon) \sum E_{\text{path}} / (n_i * E_{\text{gen}}),$$

式中: E_i 为节点 i 剩余能量;

E_{init} 为节点 i 初始能量;

$\sum E_{\text{path}}$ 为节点 i 传输路径中的总能耗;

n_i 为节点 i 的邻居节点数量;

E_{gen} 为节点 i 最大传输距离的能耗;

ε 为调节因子,根据实验情况可改变其数值。

当节点 i 的当前能量不足时,节点 i 成为簇头的概率降低。当备选簇头 i 到邻居节点平均路径消耗低时,备选簇头 i 成为簇头的概率提高。

节点竞选簇头的决策过程是:网络初始化时,节点之间相互协作并计算自身 f 值;每个节点向邻居节点广播自身 f 值,并等待接收邻居节点的包含 f 值的信息;当收到邻居节点的信息后,将其 f 值与该节点 f 值进行对比,如果大于该节点 f 值,则将邻居节点作为备选簇头记录到该节点备选簇头信息表中,如果接收到的所有邻居节点的 f 值都小于自身 f 值,则该节点作为备选簇头;当所有节点对比完毕,备选簇头节点自动成为簇首,其他节点申请加入簇头形成的簇中。

在这个博弈过程中,节点可以根据之前节点的决策作出自身决策,所有节点的决策构成整个策略集合,这样的组合符合纳什均衡,能平衡簇内的能量消耗,延长无线传感器网络的生命周期。

2.2 簇间路由协议

Zengwei Zheng等人^[31]提出了结合节点位置信息和剩余能量的博弈模型。簇间路由指网络中的簇头通过多跳方式将信息发送到Sink节点。为了实现基于博弈论的簇间路由协议,对簇头功能进行扩展,每个簇头里面包含邻居簇头节点标识、与邻居簇头间的链路评估值和邻居簇头节点的剩余能量信息的路由表,下面对簇间路由协议进行建模:

当前网络中参与簇间路由的簇头构成博弈的参与者集合 N 。每一次路径选择过程中,将备选中继节点的簇头支付函数 f 定义为

$$f(i) = M_{ij} \rho + E_i / E_{\text{init}} (1 - \rho),$$

式中: M_{ij} 为节点 i, j 之间的链路质量;

E_i 为节点 i 的当前能量;

E_{init} 为节点 i 的初始能量;

ρ 为方程调节因子。

该算法的博弈论模型构建过程是:首先每个簇头节点过滤掉其路由表中 f 值比较低的簇头和已经失效的簇头;然后簇头节点根据其到Sink节点的距离对邻居节点进行分类,并对距离Sink节点近的节点进行标记,挑出 f 值最大的节点作为当前簇头节点的下一跳节点;当所有节点挑选完毕后,簇间路由的博弈论模型构建完毕。

无线传感器网络工作一段时间后,如果有某个簇头的的数据无法转发出去时,簇头会对邻居节点列表进行遍历并挑出 f 值最大的节点作为下一跳节点继

续进行转发。

基于博弈论的簇间路由协议,既适用于静态分簇路由协议,也可以适用于动态分簇协议,这种方法有效地优化了整个网络中簇头的能耗平衡,但是没能解决距离 Sink 节点近的簇头过早死亡的问题。

基于博弈论的簇间路由协议体现了多阶段有限次重复博弈的思想,由于在一轮博弈中所有参与者的决策都是能被其他参与者做决策时进行参照,这样在每一轮博弈均能得到纳什均衡,整个网络的生存周期会得到较大提高。

2.3 非均匀分簇节能路由协议

王伟东等人^[32]提出了考虑节点能量的分簇路由博弈模型的非均匀分簇节能路由协议。在分簇无线传感器中,距离 Sink 节点较远的簇头通过多跳的方式与 Sink 节点进行通信。由于距离 Sink 节点的距离远近不一,所承担的数据转发量不同。如果利用平均分簇的方式建立簇,则距离 Sink 节点较近的簇头会因能量耗尽过早死亡^[33]。

非均匀分簇算法是根据簇头节点的支付策略的不同将他们划分为不均匀的竞争范围,这种方法使得靠近 Sink 节点的簇内节点数目低于远离 Sink 节点的,使簇首在网络中的分布更加符合降低整体网络数据传输能耗的要求^[34]。根据基于博弈论非均匀分簇路由协议的要求,并结合节点的理性偏好来对博弈过程进行建模。

当前网络中存活的节点集合 N 为博弈论的参与者集合,参与者节点的信息集包括参与者剩余能量、需转发的数据和参与者保存的邻居节点信息表等。节点的收益函数为

$$B_i(s_i, s_{-i}) = R_{up} * R_j * R_{ij},$$

式中: R_{up} 为数据源节点到 Sink 节点的路径可靠度;

R_j 为第 j 个邻居节点到 Sink 节点的路径可靠度;

R_{ij} 为节点 i, j 之间的路径可靠度。

节点 i 的代价函数为

$$C_i(s_i, s_{-i}) = (E_i^x + E_i^y) * D_i / (E_i + E_j),$$

式中: E_i^x 为接受单位数据包的能耗;

E_i^y 为发送单位数据包的能耗;

E_i 为节点 i 的当前能量;

E_j 为节点 j 的当前能量;

D_i 为节点 i 转发数据包的总量。

由节点的收益和代价函数得到支付函数 f , 当节点参与数据转发时, 支付函数为

$$f(i) = R_{up} * R_j * R_{ij} * (E_i + E_j) / [(E_i^x + E_i^y) * D_i].$$

当节点不参与数据转发时, $f(i)=0$ 。函数 f 结合了节点的路径可靠度、网络能耗等, 可使距离 sink 节点距离不同的簇头密度不同^[35]。根据节点 i 的 f 值以及非均匀分簇的方法, 进行分簇, 最终构造出簇头分布均衡合理的无线传感器网络。

非均匀分簇路由协议将节点的剩余能量、节点的分布综合考虑, 进而选出具有能耗和路径优势的簇头, 提升了无线传感器网络的存活时间。

3 存在的问题及未来研究方向

本文对基于博弈论的无线传感器网络的包转发机制和簇头选择机制的几种典型算法进行了归纳和总结, 并分析了其优势和不足。虽然博弈论经过多年的发展已经成为较成熟的理论, 但是其在无线传感器网络领域的应用研究才刚刚起步, 且很多方法都是基于 Ac Hoc 网络, 有较多不完善之处。由于研究中涉及许多实际问题, 比如无线传感器网络具有能量有限、自组织、分布性等特点, 使得经过博弈构造的策略的效率不高。这不仅是无线传感器网络路由机制研究中亟待解决的问题, 也是博弈论理论实际应用的一个挑战。本课题组成员认为博弈论在无线传感器网络路由机制应用中存在如下问题:

1) 在无线传感器网络中, 如果网络拓扑的结构比较复杂, 博弈模型易受到其他因素的影响而使得网络的稳定性不高。

2) 无线传感器网络的激励机制虽然在一定程度上促进了节点间的相互协作, 但是还有许多关键性的问题尚待解决, 如节点共谋问题等。

3) 在特殊情况下, 博弈论的收敛性较差。如果博弈结果不存在占优策略时, 需要进行多次博弈才能达到均衡, 这严重影响无线传感器的网络性能。

如何解决如上问题, 将是网络研究者们面临的新课题。同时, 目前大部分的研究主要是博弈论在同构无线传感器网络的应用, 而博弈论在异构无线传感器网络中的应用也将是未来值得研究的一个关键问题。

参考文献:

- [1] 孙雨耕, 周寅, 边桂年, 等. 无线传感器网络中一种能量有效的分簇组网算法[J]. 传感技术学报, 2007, 20(2): 377-381.
Sun Yugeng, Zhou Yin, Bian Guinian, et al. Energy-Aware Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators.

- 2007, 20(2): 377-381.
- [2] Nikodem Jan. Modelling an Activity in Wireless Sensors Network[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 47(39): 18-25.
- [3] Richard Dawkins. The Selfish Gene[M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1989: 88-90.
- [4] 刘新华, 李方敏, 旷海兰, 等. 基于能量异构的无线传感器网络分布式成簇算法[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(1): 26-31.
Liu Xinhua, Li Fangmin, Kuang Hailan, et al. Energy-Heterogeneous Distributed Clustering Algorithm for Wireless Sensor Network[J]. Mini-Micro Systems, 2010, 31(1): 26-31.
- [5] Osborne M, Rubinstein A. A Course in Game Theory[M]. Cambridge: MIT Press, 1994: 124-126.
- [6] Ramanathan R, Redi J. A Brief Overview of Ad Hoc Networks: Challenges and Directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(6): 48-53.
- [7] 汪洋, 林闯, 李泉林, 等. 基于非合作博弈的无线网络路由机制研究[J]. 计算机学报, 2009, 32(1): 54-68.
Wang Yang, Lin Chuang, Li QuanLin, et al. Non-Cooperative Game Based Research on Routing Schemes for Wireless Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(1): 54-68.
- [8] 叶阿勇, 许力. 移动AdHoc网络中节点协作性的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(11): 1886-1889.
Ye Ayong, Xu Li. Study on Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks[J]. Mini-Micro Systems, 2005, 26(11): 1886-1889.
- [9] 王淼, 张玉军, 李国杰. 自私感知的数据驱动覆盖网络[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 534-540.
Wang Miao, Zhang Yujun, Ling Guojie. Selfishness-Aware Data-Driven Overlay Network[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 534-540.
- [10] Marti S, Giuli T J, Lai K, et al. Mitigating Routing Misbehavior in Mobile Ad Hoc Networks[C]// International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston: ACM Sigmobility, 2000: 255-265.
- [11] Buchegger S, Boudec J-Y L. Nodes Bearing Grudges: Towards Routing Security, Fairness and Robustness in Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of the 10th EuroMicro Workshop on Parallel Distributed and Network-Based Processing. Canary Islands: IEEE, 2002: 403-410.
- [12] Alec Woo, Terence Tong, David Culler. Taming the Underlying Challenges of Reliable Multihop Routing in Sensor Networks[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Sigmobility, 2003: 14-27.
- [13] 戴沁芸, 徐景, 阎毓杰. 无线传感器网络中基于协作的包转发研究[J]. 信息与控制, 2007, 36(5): 551-556.
Dai Qinyun, Xu Jing, Yan Yujie. Cooperative Packet Forwarding in Wireless Sensor Networks[J]. Information and Control, 2007, 36(5): 551-556.
- [14] 刘田, 周四清. 无线传感器网络节点包转发策略重复博弈分析[J]. 暨南大学学报: 自然科学版, 2009, 30(5): 514-518.
Liu Tian, Zhou Siqing. Repeated Game Modeling of Packet Forwarding Strategies in Wireless Sensor Network Nodes[J]. Journal of Jinan University: Natural Science, 2009, 30(5): 514-518.
- [15] 刘群, 先兴平, 郭松涛, 等. 无线传感器网络路由中合作性重复博弈模型的研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(9): 1322-1327.
Liu Qun, Xian Xingping, Guo Songtao, et al. Repeated-Game Theory of Cooperative Model in Wireless Sensor Network Routing[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(9): 1322-1327.
- [16] Campos-Nañez E, Garcia A. A Game Theoretic Framework for Power Control in Wireless Sensor Network[J]. IEEE Transaction on Computers, 2008, 56(3): 552-561.
- [17] Bansal S, Baker M. Observation-Based Cooperation Enforcement in Ad Hoc Networks[R]. Ithaca: Stanford University, 2003: 2-3.
- [18] 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(26): 1125-1131.
Zhao Yonghui, Shi Haoshan. Game Theoretical Packet Forwarding Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(26): 1125-1131.
- [19] 郭文旭. 基于分簇的无线传感器网络能量空洞问题研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2009: 25-30.
Guo Wenxu. Cluster-Based Energy Hole Problem in Wireless Sensor Networks Research[D]. Chongqing: University of Posts and Telecommunications, 2009: 25-30.
- [20] 陆音, 石进, 谢立. 基于重复博弈的无线自组网络协作增强模型[J]. 软件学报, 2008, 19(3): 755-768.
Lu Yin, Shi Jin, Xie Li. Repeated-Game Modeling of Cooperation Enforcement in Wireless Ad Hoc Network[J]. Journal of Software, 2008, 19(3): 755-768.
- [21] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C]//Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii: IEEE, 2000: 1-10.
- [22] Zhou G, He T, Krishnamnuthy S, et al. Models and Solutions for Radio Irregularity in Wireless Sensor Networks[J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2006, 2(2): 221-226.
- [23] 曾加, 慕春棣. 基于不完全信息博弈的传感器网络能量平衡路由[J]. 自动化学报, 2008, 34(3): 317-322.
Zeng Jia, Mu Chundi. Game Theory-Based Energy Balance Routing with Incomplete Information in Wireless Sensor

- Networks[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(3): 317-322.
- [24] Li Yukun, Gao Zhipeng, Yang Yang, et al. An Improved Auction Scheme for Task Allocation in Wireless Sensor Network[C]//*Wireless Communications Networking and Mobile Computing*. Chengdu: IEEE, 2010: 1-4.
- [25] Liu H, Krishnamachari B. A Price-Based Reliable Routing Game in Wireless Networks[C]//*Proceedings of the First Workshop on Game Theory for Networks*. New York: ACM, 2006: 3-5.
- [26] 杨伟伟, 刘润杰, 申金媛. 一种基于LEACH的高效节能协议[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(8): 1153-1157.
Yang Weiwei, Liu Runjie, Shen Jinyuan. An Energy Efficient Algorithm Based on LEACH[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(8): 1153-1157.
- [27] Kannan R, Ray L, Kalidindi R, et al. Max-Min Length-Energy-Constrained Routing in Wireless Sensor Networks [C]//*Proceedings of the 1st European Conference Workshop on Wireless Sensor Networks*. Berlin: Springer, 2004: 234-249.
- [28] Kannan R, Iyengar S S. Game-Theoretic Models for Reliable Path-Length and Energy-Constrained Routing with Data Aggregation in Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE Journal*, 2004, 22(6): 1141-1150.
- [29] 杨宁, 田辉, 黄平, 等. 基于博弈理论的无线传感器网络分布式节能路由算法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(5): 1230-1233.
Yang Ning, Tian Hui, Huang Ping, et al. Distributed Energy-Economical Routing Algorithm Based on Game-Theory for WSN[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1230-1233.
- [30] 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: 自然科学版*, 2010, 40(3): 441-445.
Hu Jing, Shen Lianfeng. Clustering Routing Protocol of Wireless Sensor Networks Based on Game Theory[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2010, 40(3): 441-445.
- [31] Zheng Zengwei, Wu Zhaohui, Lin Huaizhong. Clustering Routing Algorithm Using Game-Theoretic Techniques for WSNs[C]//*Proceedings of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems*. Canada: IEEE, 2004(4): 904-907.
- [32] 王伟东, 朱清新. 无线传感器网络中一种层次分簇算法及协作性分析[J]. *软件学报*, 2006, 17(5): 1157-1167.
Wang Weidong, Zhu Qingxin. A Hierarchical Clustering Algorithm and Cooperation Analysis for Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of Software*, 2006, 17(5): 1157-1167.
- [33] 衷柳生, 程良伦. 基于博弈理论的无线传感器网络非均匀分簇路由算法[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(5): 1865-1867.
Zhong Liusheng, Cheng Lianglun. Unequal Clustering Energy-Economical Routing Algorithm Based on Game-Theory for WSN[J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(5): 1865-1867.
- [34] 卢旭, 程良伦. 高数据融合的非均匀分簇无线传感器网络路由协议[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(4): 1269-1271.
Lu Xu, Cheng Lianglun. Highly Data Fusion Unequal Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(4): 1269-1271.
- [35] 刘国梅, 马伟杰, 路玲. 一种基于非均匀分簇的大规模无线传感器网络路由协议[J]. *科技通报*, 2011, 27(4): 580-584.
Liu Guomei, Ma Weijie, Lu Ling. An Uneven Cluster-Based Routing Protocol for Large Scale Wireless Sensor Networks[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2011, 27(4): 580-584.

(责任编辑: 邓彬)