

WSN中基于博弈论的节点功率控制算法

滕志军, 吕金玲[†], 张 力, 郭力文

(东北电力大学 信息工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对如何降低无线传感器网络中节点传输的能量消耗, 延长网络生存周期, 本文将博弈论引入WSN功率控制中, 综合考虑节点的剩余能量、发射功率等因素构建效用函数, 将剩余能量较大的节点作为下一跳节点, 连接其他节点并承载较多的传输任务. 节点在通信过程中以功率博弈算法作为策略方案, 不断调整各自的策略, 提高信息传输的准确率, 并证明该算法纳什均衡的存在. 仿真结果表明, 与传统分布式功率控制算法相比, 该算法通过控制节点传输功率实现了降低能耗的目的, 能更快迭代出最优发射功率, 并得到较大的信干比.

关键词: 无线传感器网络; 博弈论; 功率控制; 纳什均衡; 能耗

引用格式: 滕志军, 吕金玲, 张力, 等. WSN中基于博弈论的节点功率控制算法. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 717–721

中图分类号: TN99 **文献标识码:** A

Based on game theory algorithm in nodes power control of WSN

TENG Zhi-jun, LÜ Jin-ling[†], ZHANG Li, GUO Li-wen

(School of Information Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012, China)

Abstract: In this paper, game theory is applied to the WSN power control to reduce the energy consumption of the point transmission and prolong the lifetime of the network. The utility function is constructed by considering the residual energy and the transmitted power of the node. The remaining energy larger node is as the next hop node, which connects other nodes and takes more transmission tasks. In the communication process, the nodes take power control game algorithm as strategy and constantly adjust their strategies to improve the accuracy of information transmission. Nash equilibrium is proved to exist in the algorithm. Simulation results show that this algorithm can realize the purpose of reducing the energy consumption of wireless sensor network through the control of node transmission power, calculating the optimal transmit power faster, and getting the higher signal interference ratio compared with traditional distributed power control algorithm.

Key words: wireless sensor network; game theory; power control; Nash equilibrium; energy consumption

Citation: TENG Zhijun, LÜ Jinling, ZHANG Li, et al. Based on game theory algorithm in nodes power control of WSN. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(5): 717–721.

1 引言(Introduction)

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是由大量静止或移动的传感器以自组织和多跳的方式构成的无线网络, 以协作方式感知、收集、处理和传输网络覆盖地理区域内被感知对象的信息, 并最终把这些信息发送给网络的所有者. 由于无线传感器网络节点采用电池供电, 且电池容量较小, 一旦能量耗尽则不能及时充电或更换, 因此降低节点能耗、延长网络存活周期成为无线传感器网络在实际应用中需要解决的关键问题.

传感器网络由大量的传感器节点和一个或多个汇聚节点组合而成^[1–2]. 假设网络中只有一个汇聚节点(sink节点), 其需要接收周围大量的传感器节点传来的信息并通过通信方式(互联网和卫星)将信息发送到任务管理节点或用户^[3]. sink节点的处理能力、存储能力和通信能力相对较强, 但同时接收大量的信息仍然会造成信息的拥堵、节点性能降低和节点能量大量消耗而导致节点部分死亡. 局部节点的过早死亡, 会造成网络的拓扑结构发生变化, 节点会调整其发射功率和组网结构, 从而会增加整个网络的能量消耗进

收稿日期: 2017–12–11; 录用日期: 2018–03–26.

[†]通信作者. E-mail: 1114130692@qq.com; Tel.: +86 13578553740.

本文责任编辑: 梅生伟.

国家自然科学基金项目(51277023), 国家自然科学基金青年科学基金项目(61501107), 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(JJKH20180439KJ)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51277023), the National Natural Science Foundation Youth Science Foundation Project (61501107) and the 13th “Five-Year” Scientific Research Planning Project of Jilin Province Department of Education (JJKH20180439KJ).

而降低整个网络的生存周期^[4].

在WSN中节点之间进行通信涉及选择问题,每个节点可采用使其利益最优的策略.博弈论(game theory)又称对策论,早期被广泛应用于微观经济学中,直到最近才被作为分析工具应用于分布式无线资源管理当中^[5].文献[6]中定义了博弈论理论框架,其中包括功率控制、呼叫接入控制和干扰避免.文献[7-9]用非合作博弈功率控制算法对网络中的节点进行分布式功率控制.但这几篇文献都没有考虑节点的剩余能量,针对这个问题,本文借鉴文献[10]中的功率控制算法,提出了一种基于博弈论的节点分配模型并建立了效用函数,该函数考虑了节点的发射功率、剩余能量、干扰和数据大小等因素,来提高节点的数据传输效率和存活时间,延长网络生存周期.

2 系统模型(System model)

2.1 基于博弈论的功率模型(Power model based on game theory)

假设在网络中有一个汇聚节点和多个传感器节点,则无线传感器网络中节点的功率控制可看作非合作博弈模型,选用的数学模型为 $\Gamma = \langle N, P, \{u_i\} \rangle$,其中网络中的传感器节点数为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$,每个传感器节点的策略集合为 $P = \{p_i\} (p_i \in (0, p_{\max}))$, $p_{\max}$ 为最大发射功率,网络中每个传感器节点根据效用函数选择相应的策略来保证自身利益的最大化,即

$$\max_{p_i \in P_i} u_i(p_i, p_{-i}), i = 1, 2, \dots, n,$$

p_i 表示节点 i 的发射功率, p_{-i} 表示除 i 之外的其他节点的发射功率^[11].设定网络中的传感器节点均匀分布在区域内,所有节点都要将数据传送到汇聚节点并且可以根据信道的条件和周围的影响调整自己的发射功率.

网络中有 N 个节点,节点 i 到sink节点的距离为 d_i , p_i 和 λ_i 分别表示第 i 个节点的发射功率和信号干扰比,信道噪声为 σ^2 , h_i 表示节点到sink节点的链路增益.综合考虑发射功率和剩余能量这两个方面,本文参考文献[12]所给出的信号干扰比(signal to interference ratio, SIR)公式得

$$\text{SIR}_i = \lambda_i = G \frac{h_i p_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j c_{ji} + \sigma^2}, \quad (1)$$

其中:增益 $G = W/R_{ik}$ (W 表示传播带宽, R_{ik} 表示信息传输速率), $\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j$ 为节点 i 接收数据期间内在其干扰半径内的其他节点发送数据对节点接收数据所产生的干扰总和, c_{ji} 表示节点 j 和 i 之间的相关性,

$$c_{ji} = \begin{cases} 1, & i, j \text{ 选择同一信道,} \\ 0, & i, j \text{ 选择不同信道.} \end{cases}$$

2.2 超模博弈模型(Supermodular game model)

超模博弈中的“格”是指,如果存在一个集合 X 为偏序集,对于所有属于集合 X 的元素 a, b ,有 $a \vee b = \sup\{a, b\}$ 和 $a \wedge b = \inf\{a, b\}$ 都属于 X ,则这个偏序集称为格.

所谓超模就是指函数 $f: X \rightarrow R$, X 是一个格,如果对于 X 中的任意元素 a, b 存在 $f(a) + f(b) \leq f(a \wedge b) + f(a \vee b)$,这个函数就是超模函数.

如果在一个博弈中所选择的效用函数是超模的且策略集合构成一个格,这样的博弈就叫做超模博弈.

根据定义所给条件,超模博弈的判定比较复杂.在实际判定过程中,如果博弈参与者所选择的效用函数满足下列条件:

- 1) 策略集合是实数空间的一个区间;
- 2) 效用函数在策略集合中是二阶连续可微函数;
- 3) $\frac{\partial^2 u_i(p)}{\partial p_i \partial p_j} \geq 0, \forall j \neq i \in N$, 那么该博弈即为超模博弈^[13].

2.3 效用函数(Utility function)

在一次传输数据过程后,每个节点 i 都会获得收益值 $u_i(p_i, p_{-i})$.这表明每个节点的收益不仅取决于自身采取的策略也受到其他节点策略的影响,也就是说任何一个节点的收益都由整个策略集合决定.理论上,一个节点要依据网络中其他节点的功率来选择自身的策略,但在分布式的无线传感器网络中,是不可能知道其他节点的发射功率策略.

节点在发送信号时都希望以较高的传输功率发送,提高信息的传输率.但是,发送功率的增加会加大对其他节点的干扰,其他节点也会提高自身功率来抵抗这种变化,同时将会增大对该节点的干扰^[14].因此效用函数采用如下形式:

$$u_i(p_i, p_{-i}) = U(p_i) - C(p_i), \quad (2)$$

式(2)中: $U(p_i)$ 是收益函数,是信干比和功率的函数,通过调节发射功率 p_i 使节点的信息传输达到最优; $C(p_i)$ 是成本函数.

节点以包的形式进行信息传输,若SIR越大说明传输的信息多且错误较少;选择初始能量 E_i 较大的,能保证节点的存活率,延长整个网络的寿命.

根据节点的功率、信道条件和相邻节点的SIR,定义传感器节点发射功率的收益函数:

$$U(p_i) = E_i \frac{MR}{Lp_i} (1 - e^{-\lambda_i})^L. \quad (3)$$

式中: R 为信息传输速率, L 为数据包的大小, M 为信息比特数.

为了得到较好的效益节点会试图以高功率传送信息,虽然选择大功率进行传输能提高信息正确传输概率,但是增大功率也会造成较大的干扰,同时也会导

致电池的能量很快耗尽. 如果第 i 个节点所使用的发射功率的策略 $p_i \in P$, 所产生的成本是 p_i 的函数, 记为 $C(p_i)$:

$$C(p_i) = b \cdot p_i^2, \quad (4)$$

其中 b 为成本因子.

得到效用函数:

$$u_i(p_i, p_{-i}) = E_i \frac{MR}{Lp_i} (1 - e^{-\lambda_i})^L - b \cdot p_i^2. \quad (5)$$

2.4 纳什均衡(Nash equilibrium)

对本算法的纳什均衡存在性的判断, 从超模博弈的定义可知, 只需要满足超模博弈的3个条件, 即可证明算法纳什均衡的存在.

令 $T(\lambda_i) = (1 - e^{-\lambda_i})^L$, 代入式(5)得

$$u_i(p_i, p_{-i}) = E_i \frac{MR}{Lp_i} \cdot T(\lambda_i) - b \cdot p_i^2. \quad (6)$$

对效用函数求一阶导数, 得

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial p_i} &= E_i \cdot \frac{MR}{L} \cdot \frac{\frac{\partial T(\lambda_i)}{\partial \lambda_i} \cdot \frac{\partial \lambda_i}{\partial p_i} \cdot p_i - T(\lambda_i)}{p_i^2} - 2bp_i = \\ &E_i \cdot \frac{MR}{L} \cdot \frac{\frac{\partial T(\lambda_i)}{\partial \lambda_i} \cdot \lambda_i - T(\lambda_i)}{p_i^2} - 2bp_i. \end{aligned} \quad (7)$$

效用函数的二阶偏导为

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial p_i \partial p_j} = E_i \cdot \frac{MR}{Lp_i^2} \cdot \frac{\partial^2 T(\lambda_i)}{\partial \lambda_i^2} \cdot \frac{\partial \lambda_i}{\partial p_j} \cdot \lambda_i. \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 符合第2.2节中超模博弈的前两个条件.

因为

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial p_j} = - \frac{Gh_i p_i (\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j c_{ji})}{(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j c_{ji} + \sigma^2)^2} < 0,$$

因此只需使 $\frac{\partial^2 T(\lambda_i)}{\partial \lambda_i^2} \leq 0$, 即

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T(\lambda_i)}{\partial \lambda_i^2} &= L(L-1)(1 - e^{-\lambda_i})^{L-2} \cdot e^{-2\lambda_i} - \\ &L(1 - e^{-\lambda_i})^{L-1} \cdot e^{-\lambda_i} \leq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

通过计算可得, 当 $\lambda_i \geq \ln L$ 时, 满足

$$\frac{\partial^2 u_i(p)}{\partial p_i \partial p_j} \geq 0, \quad \forall j \neq i \in N$$

的条件. 因此本文所提出的效用函数存在纳什均衡.

令式(7)等于0可得

$$p_i = \sqrt[3]{\frac{E_i \cdot M \cdot R}{2b \cdot L} \cdot [L\lambda_i e^{-\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i})^{L-1} - (1 - e^{-\lambda_i})^L]}.$$

(10)

将 $\lambda_{i \min} = \ln L$ 代入式(10)可求得最优发射功率.

3 算法描述(Algorithm description)

- 1) 初始化模型中的参数, $\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j = 0$;
- 2) 根据参数计算节点的信号干扰比 λ_i ;
- 3) 判断 λ_i 与 $\lambda_{\min}$ 的关系, 若 $\lambda_i < \lambda_{\min} = \ln L$, 重复步骤2), 直到 $\lambda_i = \lambda_{\min} = \ln L$;
- 4) 根据 λ_i 值计算 p_i 的值.

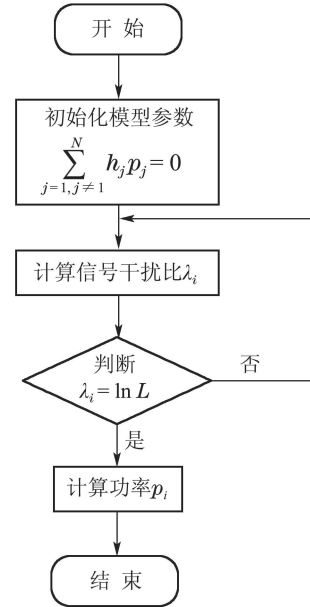


图1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

4 仿真及性能分析 (Simulation and performance analysis)

对于本文的算法仿真, 首先讨论不同的收益因子和代价因子下的效用函数, 然后分析本文算法与其他算法在数据传输、网络寿命方面的性能. 100个节点均匀分布在长宽都为100m的区域内, sink节点放置在(50, 50)的位置上, 增益 G 为100, 系统的背景噪声 σ^2 为0.05, 路径增益 h_i 为0.01. 选取模型中的任意两个传感器节点进行研究、仿真, 各自的参数如表1所示.

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	节点1	节点2
信息传输速率 R/bps	60	15
信息比特 M/bit	5	6
数据包大小 L/byte	10	15
初始的最大能量 $E_{\max}/\text{J}$	50	30

图2-3中上、下两部分曲线是在初始能量相同、成本因子不同的情况对发射功率和效用函数的分析, 表明成本因子越小节点迭代出的合适的发射功率越大, 相应的效用函数也越好.

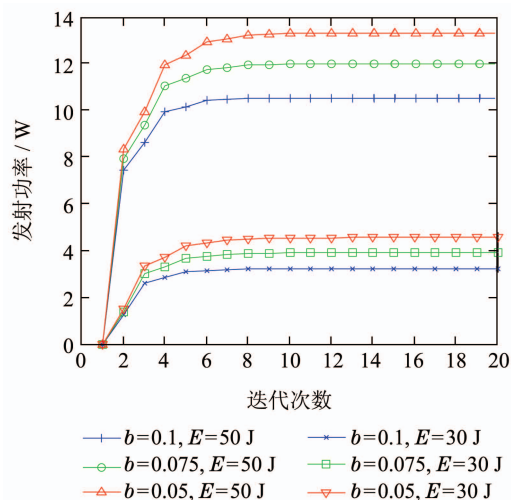


图2 不同参数下的节点传输功率

Fig. 2 Node transmission power under different parameters

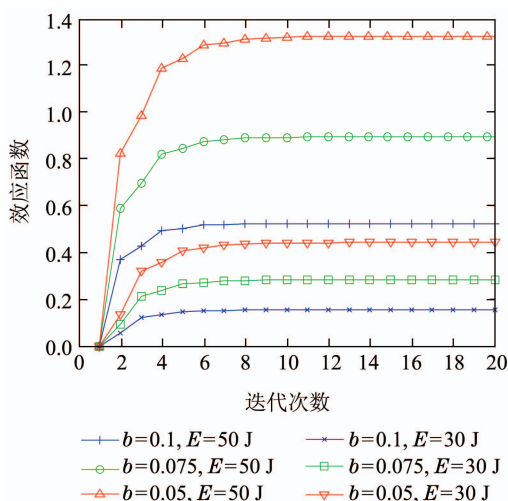


图3 不同参数下的效用函数

Fig. 3 Utility function under different parameters

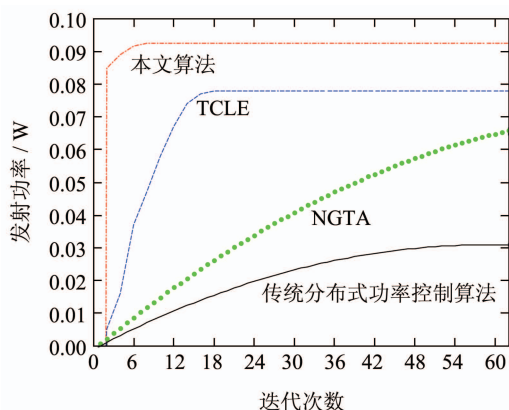


图4 两种算法发射功率对比

Fig. 4 Comparison of two algorithms transmit power

在算法执行前设定初始功率,通过迭代得到最佳功率,从图4可知,本文采用的算法比其他3种算法更能够在执行过程中达到功率最佳,这是由于其他3种功率控制算法是在开始时设定一个目标信号干扰比,

在节点传输数据的过程中要不断调整功率来达到这个预先设定的值^[15],从图中可以看出根据迭代次数的增加,功率不断变化但是直到迭代结束都没有迭代出最佳功率.因而,通过4种算法的对比,本文算法能更快得到最优发射功率,避免了节点不断调整发射功率造成能量浪费.

从信号干扰比的定义可知,其值越大说明节点发送信号的成功率越大.从图5中看出,本文采用的算法得到的信号干扰比明显大于其他3种算法.由于传统算法及TCLE, NGTA算法是预先设定一个信号干扰比比值,因此在通信过程中会提高功率来提高信号干扰比,但到达目标值之后就不再改变.而本文算法根据自身及外界条件不断干扰比比值,更能适应不断变化的传感器网络.

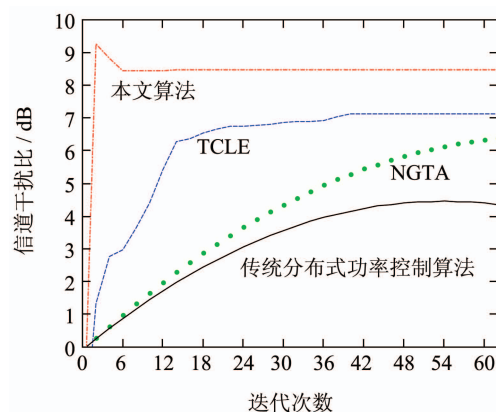


图5 两种算法的信号干扰比对比

Fig. 5 Comparison of signal interference ratio of two algorithms

5 结论(Conclusions)

本文采用博弈论方法对无线传感器节点分配问题进行了研究,通过考虑节点的发射功率、剩余能量和干扰等因素创建了效用函数.将剩余能量较大的节点作为下一跳节点,连接其他节点并承载较多的传输任务.节点在通信过程中以功率博弈算法作为策略方案,不断调整各自的策略,提高信息传输的准确率.从仿真结果中看出,在考虑节点的剩余能量后,系统的性能得到较明显的改善.在下一阶段研究中,将着重考虑整个网路的能量消耗,从而提高整个网络的生存周期.

参考文献(References):

- [1] SUN Zeyu, WU Weiguo, CAO Yangjie, et al. EBPCC: energy balance parameters-controlled coving algorithm for wireless sensor networks [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(8): 77-83. (孙泽宇, 伍卫国, 曹仰杰, 等. 无线传感器网络中能量均衡参数可控覆盖算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(8): 77-83.)
- [2] TANG Wenjun, ZHANG Guoliang, ZENG Jing, et al. Parallel fusion distributed unscented information filter algorithm for sparse dynamic wireless sensor network [J]. *Control Theory & Applications*, 2016,

- 33(7): 903 – 914.
(汤文俊, 张国良, 曾静, 等. 适用于稀疏动态无线传感器网络的并行融合分布式无迹信息滤波算法 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(7): 903 – 914.)
- [3] LI Lin, LEI Kang, LI Xiaosan. Routing algorithm for multi-sink node and multi-direction WSN [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(2): 214 – 218.
(李琳, 雷康, 李小二. 网络多向多sink节点WSN路由算法 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2013, 43(2): 214 – 218.)
- [4] DONG Rongsheng, MA Zhengxian, GUO Yunchuan, et al. A Markov game theory-based energy balance routing algorithm [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(7): 1500 – 1508.
(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.)
- [5] ZHAO Chunhui, WU Zhou. Interference avoidance algorithm based on game theory in CR system [J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(3): 82 – 86.
(赵春晖, 吴舟. CR系统中基于博弈论的干扰避免算法 [J]. 通信学报, 2008, 29(3): 82 – 86.)
- [6] NEEL J, REED J H, GILLES R P. The role of game theory in the analysis of software radio networks [J]. *Revista Medica De Chile*, 2002, 118(3): 313 – 319.
- [7] ZENG Jia, MU Chundi. Power control and simulation on non-cooperative game in wireless sensor networks [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(10): 1 – 3.
(曾加, 慕春棣. 传感器网络非合作博弈功率控制及其仿真 [J]. 计算机工程, 2008, 34(10): 1 – 3.)
- [8] XU M M, YANG Q H, KWAK K S. Distributed topology control with lifetime extension based on non-cooperative game for wireless sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(9): 3332 – 3342.
- [9] YANG G Y, GUAN X. A non-cooperative game theoretic approach to energy-efficient power control in wireless sensor networks [J]. *International Journal of Future Generation Communication & Networking*, 2014, 7(1): 169 – 180.
- [10] CHEN Xianming, CAI Yueming, ZHANG Yu, et al. Topology control algorithm based on game theory in wireless sensor networks [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 12(5): 414 – 418.
(陈贤明, 蔡跃明, 张余, 等. WSN中一种基于博弈论的拓扑控制算法 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(5): 414 – 418.)
- [11] ZHENG Gengzhong, LIU Sanyang, QI Xiaogang. Study on power control of wireless sensor networks based on noncooperative game [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(7): 1014 – 1018.
(郑耿忠, 刘三阳, 齐小刚. 基于非合作博弈的无线传感器网络功率控制研究 [J]. 控制与决策, 2011, 26(7): 1014 – 1018.)
- [12] WANG Lin, CHEN Di, CHEN Ninglin. Power control based on game theory in wireless sensor network [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(19): 145 – 147, 166.
(王琳, 陈涤, 陈宁林. 无线传感器网络中基于对策论的功率控制 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(19): 145 – 147, 166.)
- [13] WANG Jian, TAN Xuezhi, LIU Yutao. Power control algorithm based on game theory in cognitive radio networks [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(19): 5680 – 5683.
(王俭, 谭学治, 刘玉涛. 认知无线电中基于博弈论的功率控制算法 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9(19): 5680 – 5683.)
- [14] SENGUPTA S, CHATTERJEE M, KWIAT K. A game theoretic framework for power control in wireless sensor network [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2010, 59(2): 231 – 242.
- [15] GU Fanglin, ZHANG Hang. Distributed power control algorithm in CDMA systems [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(19): 118 – 120.
(辜方林, 张杭. CDMA系统中的一种分布式功率控制算法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(19): 118 – 120.)

作者简介:

滕志军 (1973–), 男, 教授, 主要研究方向为无线通信技术, E-mail: tengzhijun@163.com;

吕金玲 (1993–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信技术, E-mail: 1114130692@qq.com;

张 力 (1993–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信技术, E-mail: 1030758805@qq.com;

郭力文 (1991–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信技术, E-mail: 425340904@qq.com.