

1-4-2019

## Power Control Algorithm Based on Non-cooperative Game Theory of WBANs

Xu Yong

*School of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;*

Mengya Ke

*School of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;*

Fen Liu

*School of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;*

Qianming Zha

*School of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Power Control Algorithm Based on Non-cooperative Game Theory of WBANs

### Abstract

**Abstract:** A non-cooperative self-adaptive power control algorithm is proposed based on the model of TDMA wireless body area networks (WBANs) interference. *The algorithm is put forward using payoff function and cost function as utility functions. The transmitting power vector is obtained by the optimal response strategy update. It is proved that the network can reach Nash Equilibrium with the transmitting power vector, and in this situation all the users' utility function is maximized.* The Matlab is applied to simulation process of the algorithm, during which simulation has been carried out with different parameters. Compared with the traditional allocation scheme K-G, results show that algorithm based on the non-cooperative game theory has a very good astringency. Performance of the system can be improved through the selection of the price factor between 3.5 and 6.9.

### Keywords

wireless body area networks (WBANs), power control algorithm, non-cooperative game, interference

### Recommended Citation

Xu Yong, Ke Mengya, Liu Fen, Zha Qianming. Power Control Algorithm Based on Non-cooperative Game Theory of WBANs[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1601-1607.

# 基于非合作博弈的 WBANs 功率控制算法

许勇, 柯梦雅, 刘芬, 查千明

(安徽师范大学数学计算机科学学院, 安徽芜湖 241000)

**摘要:** 针对基于 TDMA 媒体访问控制方式的无线体域网间干扰模型, 利用非合作博弈自适应功率控制算法对体域网中的用户进行功率分配。该算法为用户构造了由收益函数和代价函数所表示的效用函数模型, 根据最佳响应策略的迭代方案获得功率控制的纳什均衡策略, 使体域网中所有用户的效用函数达到最优化。通过 Matlab 对不同参数的情况进行仿真, 与传统的功率分配方案 K-G 相比, 仿真结果表明, 基于非合作博弈自适应功率控制算法有较好的收敛性, 当价格因子在 3.5-6.9 时, 体域网的总体效能提高。

**关键词:** 无线体域网; 功率控制算法; 非合作博弈; 网间干扰

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 04-1601-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804048

## Power Control Algorithm Based on Non-cooperative Game Theory of WBANs

Xu Yong, Ke Mengya, Liu Fen, Zha Qianming

(School of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** A non-cooperative self-adaptive power control algorithm is proposed based on the model of TDMA wireless body area networks (WBANs) interference. The algorithm is put forward using payoff function and cost function as utility functions. The transmitting power vector is obtained by the optimal response strategy update. It is proved that the network can reach Nash Equilibrium with the transmitting power vector, and in this situation all the users' utility function is maximized. The Matlab is applied to simulation process of the algorithm, during which simulation has been carried out with different parameters. Compared with the traditional allocation scheme K-G, results show that algorithm based on the non-cooperative game theory has a very good astringency. Performance of the system can be improved through the selection of the price factor between 3.5 and 6.9.

**Keywords:** wireless body area networks (WBANs); power control algorithm; non-cooperative game; interference

## 引言

无线体域网 (WBAN, Wireless Body Area Network) 是一种以人体为中心, 由一些具有通信功

能、可移动的、能量受限的传感器节点组成的新型无线传感网络<sup>[1-2]</sup>。WBAN 特定的应用背景对其实现技术和性能提出了特殊的要求<sup>[3]</sup>, 由于 WBAN 中的节点体积较小, 且由电池供电, 电池因受能量密度的限制, 容量非常有限<sup>[4]</sup>, 其中功耗和可靠性尤为关键。在实际应用中, 由于多个 WBANs 共处一个密集环境, 通信范围重叠, 且多采用独立分布式工作方式, 网络间缺乏信息交换和协调单元,



收稿日期: 2016-04-28 修回日期: 2017-01-11;  
基金项目: 安徽省自然科学基金(11040606M137);  
作者简介: 许勇(1966-), 男, 安徽六安, 博士, 教授, 研究方向为无线传感器网络协议与安全; 柯梦雅(1993-), 女, 安徽宿州, 硕士生, 研究方向为无线传感网。

<http://www.china-simulation.com>

• 1601 •

加上无线频带资源的有限性<sup>[5]</sup>, 相邻 WBAN 间势必产生同频干扰, 从而导致数据丢失或数据错误, 对系统的可靠性及网络生存周期产生不利影响。此外, 用户为了确保自身以较高的成功率发射数据包而私自提高自身的发射功率, 不仅对无线传输系统的性能产生影响, 而且也成为引起网间干扰的主要诱因。因此, 在 WBANs 中, 如何进行功率控制技术, 缓解网间干扰, 是其研究中的关键技术之一。目前, 常用的方法是使用博弈论进行建模求解。

近年来, 许多学者已经针对 WBANs 出现的网间干扰现象提出了集中式和分布式两类算法。文献[6-8]采用集中式算法在蜂窝电信系统中以基站作为中心控制单元, 通过媒体访问控制方式和功率传输控制方式协调网络干扰, 但上述算法并没有考虑 WBANs 的工作方式。文献[9-10]是目前基于博弈论的一些研究成果。其中, 文献[9]在考虑 WBANs 间干扰的情况下, 建立了基于博弈论的分布式协同调度模型。文献[10]里提出了三种自适应的定量评估算法, 并根据自身的调制方式、数据速率、占空比的链路自适应控制改善在 WBAN 干扰环境下的通信质量。文献[11]首次将人的社交网络信息考虑到 WBANs 间干扰问题中, 提出一种基于情景感知的干扰缓解算法。文献[12]提出了改进的传输功率控制算法自适应地校正传输功率。在文献[13]中, Koskie-Gajic 等提出的基于 SINR 的博弈功率控制算法, 但该算法仅考虑了收益函数或代价函数的简单形式, 不能满足不同用户对 SINR 的需求, 无法实现对代价函数中惩罚因子的自适应调整。

本文针对上述问题, 在 K-G 算法的基础上, 设计了一种基于自适应代价函数的非合作博弈功率控制算法。该算法考虑了无线信道状态、网络服务质量的需求以及功率阈值的影响, 通过设计一种具有反馈机制的代价函数, 实现对代价因子的自适应调整。其次, 提出了一种最佳响应迭代算法, 并对算法中纳什均衡解的存在性和唯一性进行了数学分析与证明。最后, 通过 Matlab 仿真, 验证了本文算法的有效性。

## 1 系统模型

本文中的 WBANs 是由  $N$  个无线传感器节点 (SN, Sensor Node) 和协调器 (CN, Coordinator Node) 组成。每个独立的 WBAN 均以 CN 为中心形成单跳星型的网络拓扑结构。其中 SN 可以对数据进行采集、处理、存储及传输, 将网内数据汇聚到协调器, 并通过基站发送至远程的医疗监护机构和数据的共享平台。

无线信道中传输特性一般变化较快, 然而在这里我们假设每个体域网内采用 TDMA (时分多址) 媒体访问控制方案, 即所分配的各时隙周期内信道特性是固定的, 即块衰落 (block fading)。因此, 可以认为对于每个 WBAN 而言, 在一个时间片周期内干扰增益和信道增益保持不变, 并且在每个时隙中只有一个 SN 与 CN 通信, 进而避免网络内部节点之间的干扰。

当多个 WBANs 共存时 (以两个为例), 就会出现网络通信范围重叠现象, 造成网间干扰, 如图 1 所示。在该场景下, 当多个 WBANs 同时在相同的频段工作时, 就会产生严重的网络干扰, 我们假设  $m$  个 WBANs 共存于同一个环境, 将 WBANs 集合设为  $M = \{1, \dots, m\}$ , 体域网  $i \in m$  中有  $N_i$  个传感器节点, 节点系数可用  $n_i \in \{1, \dots, N_i\}$  表示。由于网内节点是基于 TDMA 接入方式来避免网内干扰, 即在某一时间片内只有一个传感器节点  $SN_i$  和协调器节点  $CN_i$  通信, 因此我们可以定义用户  $m_i$  表示  $CN_i$  和  $SN_i$  之间的通信链路, 用户  $m_j$  表示  $CN_j$  和  $SN_i$  之间的通信链路。其中  $h_{ij}$  表示  $SN_i$  到  $CN_j$  的信道增益, 当  $i=j$  时表示网内信号增益, 当  $i \neq j$  时表示网间干扰信号的增益。

根据综上所述的系统模型, 我们可得出体域网  $i$  的信号强度同干扰和噪声之和的比值, 即信干比为:

$$\gamma_i = \frac{h_{ii} p_i}{\frac{1}{B} \sum_{j \neq i} h_{ji} p_j + \sigma_i^2} \quad (\gamma_i \geq \gamma_i^{th}) \quad (1)$$

式中:  $\gamma_i^{th}$  表示为用户信干比最小的阈值, 用户  $m_i$  的发射功率为  $p_i$ , 用户的发送功率组成的向量为

$\vec{p} = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_M)$ ,  $\sigma_i^2$  为环境噪声功率, 用户  $m_i$  的相应传输率可用香农公式  $B \log(1 + \gamma_i)$  来表示, 其中  $B$  为可用的信道带宽。目标是寻找合适的发射功率向量  $\vec{p}$  使其最大化系统的传输率和最小化用户的发射功率,  $p_i$  必须要满足一定的约束条件, 即  $p_i \in P_i \equiv [p_i^{\min}, p_i^{\max}]$ , 其中,  $p_i^{\min}$  与  $p_i^{\max}$  分别表示用户的最小和最大发射功率, 上述问题可用公式表述为:

$$\begin{aligned} & \max \sum \log(1 + r_i) \\ & \min \sum p_i \\ & s.t. p_i \in P_i = [p_i^{\min}, p_i^{\max}] \end{aligned} \quad (2)$$

由于 WBANs 是分布式独立工作, 各个网络间缺乏协调机制, WBANs 间不会通过合作的方式来实现最佳功率的选择。这意味着每个 WBAN 都是理性和自私的, 它可以根据自身对其他网络策略的认知, 独立选择自己的发射功率。因此, 将上述问题建模成 WBANs 的功率控制非合作博弈模型。

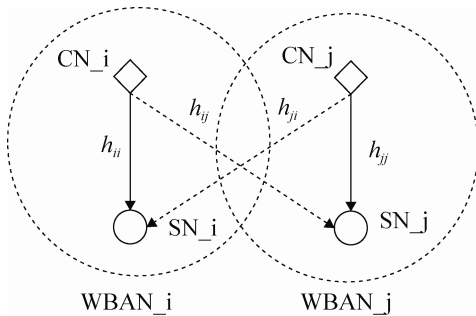


图 1 无线体域网间干扰模型  
Fig.1 Inter-network interference model in WBANs

## 2 基于自适应代价函数的非合作博弈功率控制算法

### 2.1 非合作博弈功率控制模型

博弈理论是一种处理多个具有利益冲突或者资源争用的局中人的策略选择及均衡的有效数学工具。按照参与者在博弈的过程中是否能够达到一个具有约束性的协议可将博弈分成两大类, 即合作博弈和非合作博弈。若参与者从自身的利益出发与其他参与者达成协议或形成联盟, 即为合作博弈;

否则为非合作博弈。在 WBANs 中, 非合作博弈的功率控制模型可定义为:

$$G = \langle M, S, u \rangle \quad (3)$$

其中, 构成博弈论的三个基本要素为:

(1) 参与者:  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ , 即参与者  $i$  在某个时段内, 传感器节点  $SN_i$  和协调器  $CN_i$  之间的通信链路;

(2) 策略集:  $S_i = \{p_i | p_i \in P_i\}$ ,  $\forall i \in M$ ,  $p_i$  表示第  $i$  个参与者选定发送功率所形成的策略空间, 每个博弈者策略空间的笛卡尔积为整个博弈的策略空间  $\{ \times S_i | i \in M \}$ 。  $p_{-i} = (p_1, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_M)$  表示除了参与者  $i$  之外其他用户的发射功率;

(3) 效用函数:  $u = \{u_i\}_{i \in M}$ , 在非合作博弈功率控制中, 每个博弈者都设法使自己的效用函数达到最大值, 即  $\max_{p_i \in P_i} u_i(p_i, p_{-i})$ ,  $\forall i \in M$ 。

### 2.2 效用函数的设计

在 WBANs 的功率控制博弈模型中, 效用函数通常是由收益函数和代价函数共同表示, 其中, 收益函数表示博弈者对无线信道状态、网络服务质量等满意程度, 而代价函数则表示博弈者在获得收益的同时给其他参与者造成的干扰所必须要支付的代价。为了避免非合作博弈算法中参与者私自增大自身的发射功率, 引入了代价函数。在 K-G 功率控制算法中, 代价函数中的代价因子是一个常数, 即对不同的参与者采用了统一的代价机制, 但是由于每个参与者的信道增益不同, 发射功率也不同, 所以统一的代价函数机制是不公平的。综合考虑以上问题, 在效用函数设计这一环节中, 在价格因子中引入了一种自适应的价格调整因子  $t_i$ , 它由 WBANs 根据自身信道状态、网络服务质量的要求以及能量约束条件来动态设定, 来满足不同的应用需求。则本文的效用函数定义如下:

$$u_i(p_i, p_{-i}) = \log \left( 1 + \frac{h_{ii} p_i}{\frac{1}{B} \sum_{j \neq i} h_{ji} p_j + \sigma_i^2} \right) - c_i p_i \quad (4)$$

为了有效表示价格因子对功率控制博弈的影

响, 给出公式:

$$\frac{1}{2\tau_i + P_i^{\max}} \leq c_i \leq \frac{1}{2\tau_i} (\tau_i > 0) \quad (5)$$

其中,  $\tau_i$  表示干扰等级, 其值定义如下:

$$\tau_i = \frac{\left(\sum_{j \neq i} h_{ji} P_j + \sigma_i^2\right)}{2h_{ii}} \quad (6)$$

$c_i = t_i \gamma_i$ , 当  $\gamma_i^{\text{th}} \leq \gamma_i \leq \gamma_i^{\text{tar}}$  时,  $t_i$  保持不变;

当  $\gamma_i > \gamma_i^{\text{tar}}$  时,  $t_i = t_i \gamma_i / \gamma_i^{\text{th}}$ , 算法通过这种方式来限制用户的信干比 ( $\gamma_i^{\text{tar}}$  表示用户  $m_i$  的目标信干比)。信道强度和功率预算低的用户增加其自身代价, 反之则反, 从而兼顾了系统的公平性。

### 2.3 最佳响应策略迭代算法

在标准式  $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$  博弈中, 如果策略组合  $\{p_1^*, \dots, p_n^*\}$  满足对每一参与者  $i$ ,  $p_i^*$  是 (至少不劣于) 针对其他  $n-1$  个参与者所选策略  $\{p_1^*, \dots, p_{i-1}^*, p_{i+1}^*, \dots, p_n^*\}$  的最佳反应策略, 则称策略组合  $\{p_1^*, \dots, p_n^*\}$  是该博弈的一个纳什均衡:

$$u_i(p_1^*, \dots, p_{i-1}^*, p_i^*, p_{i+1}^*, \dots, p_n^*) \geq u_i(p_1^*, \dots, p_{i-1}^*, p_{ij}, p_{i+1}^*, \dots, p_n^*) \quad \forall p_{ij} \in P_i \quad (7)$$

在这个状态下 (即纳什均衡点), 没有一个用户为了提高自身的利益而改变自身的策略, 为求解式 (4) 中的  $p_i^*$ , 采用最佳响应动态迭代算法来更新博弈中用户的发射功率以达到均衡点。即假设根据给定 WBANs 内其他用户的功率策略, 将选择最佳响应策略作为更新功率。给定  $p_{-i}$  体域网  $i$  的最佳响应策略可表示为:

$$\overline{p_i} = \operatorname{argmax}_{p_i \in P_i} u(p_i, p_{-i}) = \operatorname{argmax}_{p_i \in P_i} \left[ \log \left( 1 + \frac{h_{ii} p_i}{\frac{1}{B} \sum_{j \neq i} h_{ji} p_j + \sigma_i^2} \right) - c_i p_i \right] \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 体域网  $i$  的最佳反应策略转化成关于式 (8) 求极值的问题, 则有:

$$\max_{p_i \in P_i} u_i(p_i, p_{-i}) = \max_{p_i \in P_i} \left[ \log \left( 1 + \frac{h_{ii} p_i}{\frac{1}{B} \sum_{j \neq i} h_{ji} p_j + \sigma_i^2} \right) - c_i p_i \right] \quad (9)$$

且约束条件为:

$$p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max} \quad (10)$$

联立式 (9) 和式 (10) 可求拉格朗日函数为:

$$\phi(p_i, \lambda_{i,1}, \lambda_{i,2}) = u_i(p_i, p_{-i}) - \lambda_{i,1}(p_i^{\min} - p_i) - \lambda_{i,2}(p_i - p_i^{\max}) \quad (11)$$

式 (11) 中,  $\lambda_{i,1}, \lambda_{i,2}$  表示为体域网  $i$  的拉格朗日乘数。由拉格朗日乘子法可得体域网  $i$  的库恩-塔克 (Kuhn-Tucker, KKT) 条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial p_i} + \lambda_{i,1} - \lambda_{i,2} = 0 \\ \lambda_{i,1}(p_i^{\min} - p_i) = 0 \\ \lambda_{i,2}(p_i - p_i^{\max}) = 0 \\ \lambda_{i,1} \geq 0, \lambda_{i,2} \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

将式 (1) 与 (12) 联立求解可得:

$$\begin{cases} p_i = \frac{1}{c_i} - \frac{\frac{1}{B} \sum_{j \neq i} h_{ji} p_j + \sigma_i^2}{h_{ii}} \\ \lambda_{i,1} = 0, \lambda_{i,2} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

可得 WBANs 的发射功率更新的迭代公式为:

$$p_i^{m+1} = \begin{cases} \frac{1}{c_i^m} - \frac{\frac{1}{B} \sum_{j \neq i} h_{ji}^m p_j^m + \sigma_i^2}{h_{ii}^m}, \\ p_i^{\min} \leq p_i^{m+1} \leq p_i^{\max}, p_i^{\max}, p_i^{m+1} \geq p_i^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

## 2.4 纳什均衡解的存在性和唯一性

### 2.4.1 存在性证明

纳什均衡是每一个参与者均不能通过改变自己的一组策略来提高相应的收益, 即纳什均衡是最优函数的不动点。

定理 1: 若非合作博弈  $G = \langle M, S, u \rangle$  存在纳什均衡, 则只需证明该博弈模型满足以下条件<sup>[14]</sup>:

- (1) 参与者集合是有限的;
- (2) 策略空间  $S(P_i)$  是欧几里德空间上封闭的, 有界的凸集;
- (3) 效用函数  $u_i(p_i, p_{-i})$  是在策略空间  $S(P_i)$  上的连续的拟凹函数。

证明: 效用函数  $u_i(p_i, p_{-i})$  是关于  $p_i$  的连续函数, 对该函数求一阶偏导数得:

$$\frac{\partial u_i}{\partial p_i} = \frac{h_{ii}}{\frac{1}{B} \sum_{j \neq i} h_{ji} p_j + \sigma_i^2 + h_{ii} p_i} - c_i \quad (15)$$

求二阶偏导数可得:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial p_i^2} = - \frac{(h_{ii})^2}{\left( \frac{1}{B} \sum_{j \neq i} h_{ji} + \sigma_i^2 + h_{ii} p_i \right)^2} < 0 \quad (16)$$

因为  $p_i \in P_i \equiv [p_i^{\min}, p_i^{\max}]$ , 所以满足前两个条件, 又二阶偏导数小于零, 由此可得  $u_i(p_i, p_{-i})$  在  $p_i$  上是连续的拟凹函数, 故存在纳什均衡解。

### 2.4.2 唯一性证明

定理 2: 当  $c_i > 0$  时, 在非合作博弈功率控制式(3)中存在唯一的纳什均衡点。

证明: 因为每个 WBAN 的发射功率  $p_i \in [p_i^{\min}, p_i^{\max}]$  在取值范围内是连续的, 所以发射功率所形成的策略空间  $S(P_i)$  是欧几里德空间上非空的、凸的、紧子集。根据文献[14]中定理 1.2 可得, 所建立的 WBANs 功率控制博弈模型存在唯一的纳什均衡点。

## 3 仿真结果与性能分析

在本节, 我们利用 MATLAB 对功率控制博弈算法进行仿真。为了达到更好的仿真结果, 我们在现有平台研究的基础上设计了一个硬件和软件相结合的混合仿真系统平台。本文不考虑阴影衰落等对信号的影响, 首先设定一个  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的空间为仿真实验场景<sup>[15]</sup>, 左侧包含了由 SN 和 CN 组成的 WBAN, 右侧包含了由 IEEE802.11 组成的通信系统, 作为干扰源。若干个体域网随机分布在此空间内, 工作频段为 2.4 GHz。每个 WBAN 内部, SN 随机分布在以 CN 为圆心, 1 m 为半径的圆形范围内。

### 3.1 体域网节点模型的建立

在 Matlab 中建立 CN 节点的进程模型<sup>[16]</sup>并在它的进程状态中写入相应的入口和出口代码。该进程模型分为强制和非强制状态, 这些状态之间通过状态转移线相连。在 CN 节点进程模型中当有数据

包传输时才由空闲状态转移到接收状态, CN 节点在功率控制博弈模型中主要作用是广播当前各用户的发射总功率  $\sum_{i=1}^m h_i p_i$ , 计算  $\sum_{j \neq i} h_j p_j$  并根据式(14)计算下一轮通信的发射功率, 最后将这功率值传输至 CN, 如此迭代直至纳什均衡。其体域网节点的结构如图 2 所示, 被分为硬件和软件两个部分。

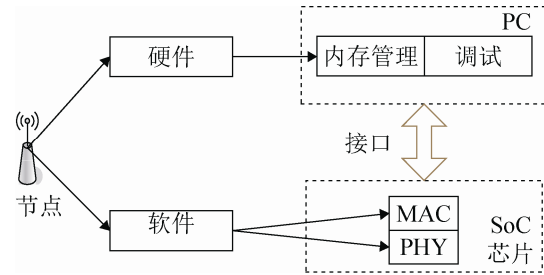


图 2 节点实现框图  
Fig.2 Block diagram of node implementation

### 3.2 系统仿真

实验仿真采用自适应价格因子机制, 为验证本文算法的优越性, 综合考虑用户的效用函数、平均能量消耗、用户平均迭代次数等方面来比较 K-G 算法和本文算法。本文实验中的一些仿真参数是基于文献[13]基础上来设置的, 初始发射功率  $p_i = 1 \times 10^{-16} \text{ W}$ ,  $p_i^{\max} = 1 \text{ mW}$ ,  $\gamma_i^{\text{th}} = 6$ ,  $\gamma_i^{\text{tar}} = 8$ ,  $B = 128 \text{ Hz}$ 。  $p_i^{\max} / \sigma_i^2 = 40 \text{ dB}$ 。

K-G 算法的发射功率迭代公式如下:

$$p_i^{m+1} = \gamma_i^{\text{tar}} \frac{p_i^m}{\gamma_i^m} - \theta_i \left( \frac{p_i^m}{\gamma_i^m} \right)^2 \quad (17)$$

图 3 表示在一定的价格因子范围内体域网用户总的网络效能关系图。仿真实验中, 用户数作为一个变量, 其值由 2 增加至 38。由图 3 可知, 随着价格因子所设值逐渐增加, 时隙内体域网用户总的网络效能逐渐降低。在非合作博弈功率控制机制下, 随着用户数的增加, 虽然两者总的网络效能都是缓慢增加, 但是本文所提出的算法要优于 K-G 算法, 结合图 3 和图 4 可知本文算法主要以牺牲 10% 左右的网络效能为代价节省了 50% 左右的功耗来提高用户的传输效率, 延长自身的生命周期对

能量受限的 WBANs 而言，这是一个很大的优势。

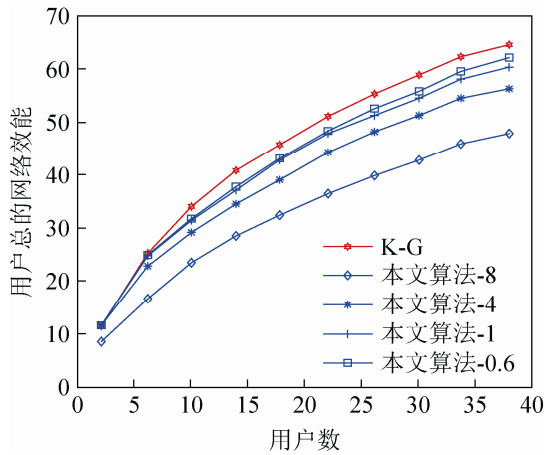


图3 不同价格因子下用户总的网络效能对比图  
Fig.3 System total utility versus different price factor

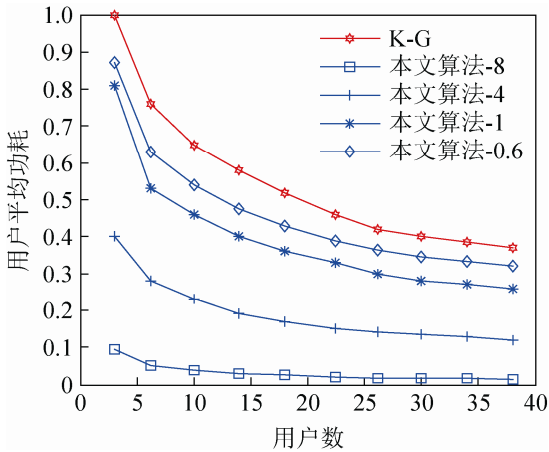


图4 不同价格因子下体域网平均能效性能对比图  
Fig.4 Users' average power consumption versus different price factor

图4表示为在一个时隙内体域网用户的平均能耗曲线图。从图4可以看出随着价格因子所设值逐渐提高，体域网用户的平均功耗逐渐降低，但价格因子也并非越高越好，结合图3所示，若所设价格因子过高，则用户的发射功率过小，其结果会降低体域网用户总的网络效能。因此，价格因子需要根据体域网的 QoS 和能耗的要求来设定，以达到网络效能和功耗之间的合理折中。

由图5可知，随着共存体域网用户数目的增加，两种算法收敛到功率均衡点所需平均迭代次数缓慢增加，最终趋于稳定值。当用户数目固定，随着价

格因子逐渐提高时，本文算法的收敛次数明显低于 K-G 功率控制算法，表明本文所介绍的新算法具有好的收敛性，并验证了其纳什均衡策略。因此，平均功耗低、迭代次数少是本文新算法较突出的优点。

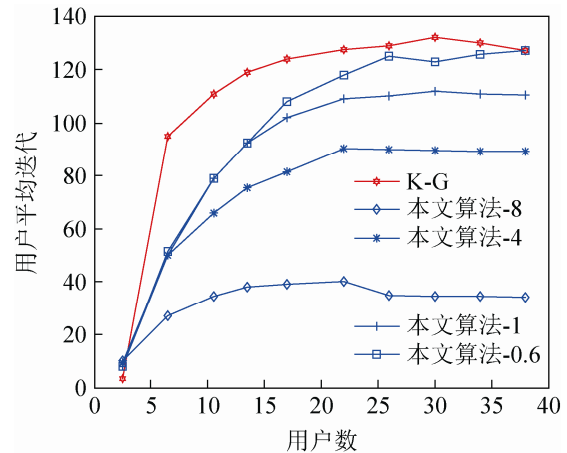


图5 达到均衡点所需平均迭代次数和用户数的关系图  
Fig.5 Users' average number of iterations for reaching Nash Equilibrium

由图6可知，上面两种算法的信干比随着用户数的增加，整体呈现下降趋势，这是因为随着用户数量的增加，共存 WBANs 之间的干扰也随之增大，用户的信干比也会相应的逐渐降低。相对于 K-G 算法，在效用函数设计这一环节中，增加了自适应调节因子  $t_i$ ，不仅可使信干比调整在阈值范围内，还可让信干比较高的用户付出较大代价，而信干比较低的用户付出较小代价，从而使系统获得更好收益。

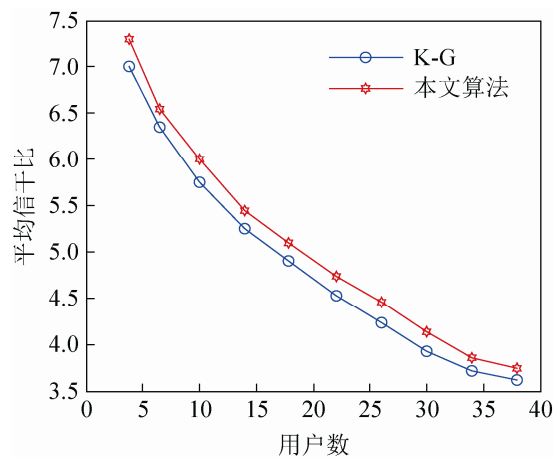


图6 平均信干比和用户数的关系图  
Fig.6 Relationship between average SINR and users



由仿真结果可见, 在基于 TDMA 通信方式的无线体域网中, 网络的效用和通信代价是一对相互制约的因素, 需要根据实际情况选择较为适宜的价格因子, 从而可以有效发挥网络的效能, 在本文所述的仿真环境下, 通过多次实验, 当价格因子取值在 3.5-6.9 时, WBANs 的总体性能提高。

## 4 结论

本文针对基于 TDMA 通信方式的 WBANs 网间干扰模型, 将功率控制抽象为一个非合作博弈过程, 采用自适应功率控制博弈算法对 WBANs 中的 SN 进行分布式功率控制。通过最佳响应策略的迭代算法获得功率控制的纳什均衡策略, 使用户的效用函数达到最优。为验证算法的有效性, 本文采用 Matlab 进行仿真, 在算法仿真前构造了符合 CN 节点的进程模型, 在此基础上建立基于 TDMA 通信方式的 WBAN 仿真环境。最后对不同参数的情况进行大量仿真, 结果表明该算法具有较好的收敛性, 选择合适价格因子能提高网络的性能。

## 参考文献:

- [1] Riccardo Cavallari, Flavia Martelli. A Survey on Wireless Body Area Networks: Technologies and Design Challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials (S1553-877X), 2014, 36(3): 1635-1657.
- [2] 卢先玲, 彭能明, 卢胜男, 等. 无线体域网节能策略综述[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(2): 325-329.  
Lu X L, Peng N M, Lu S N, et al. Survey of energy-efficient strategy for wireless body area network [J]. Application Research of Computers, 2013, 30(2): 325-329.
- [3] 刘毅, 宋余庆. 无线体域网技术研究[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(8): 1758-1762.  
Liu Y, Song Y Q. Study on Wireless Body Area Networks [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(8): 1758-1762.
- [4] 居征与, 喻剑. 面向无线体域网的低功耗多频道 MAC 协议[J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(1): 78-82.  
Ju Z Y, Yu J. Multi-channel Energy Efficiency MAC for Wireless Personal Area Network [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 37(1): 78-82.
- [5] 宫继兵, 王睿, 崔莉. 体域网 BAN 的研究进展及面临的挑战[J]. 计算机应用研究, 2010, 47(5): 737-753.
- [6] Gong J B, Wang R, Cui L, et al. Research Advances and Challenge of Body Sensor Network [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(5): 737-753.
- [7] Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems [J]. Selected Areas in Communications(S0733-8716), 1995, 13(7): 1341-1347.
- [8] 孙绪宝, 王世范. CDMA 通信系统自适应功率控制仿真的研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 1136-1147.  
Sun X B, Wang S F. Study on Adaptive Power Control Simulations for CDMA Systems [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(5): 1136-1147.
- [9] Xiao M, Shroff N B, Chong E K P. A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking(S1063-6692), 2003, 11(2): 210-221.
- [10] Wang L, Goursaud C, Nikaein N, et al. Cooperative scheduling for coexisting body area networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications(S1536-1276), 2013, 12(1): 123-133.
- [11] Yang W B, Sayrafian-Pour K. Interference Mitigation Using Adaptive Schemes in Body Area Networks [J]. International Journal of Wireless Information Networks (S1068-9605), 2012, 19(3): 193-200.
- [12] Zhang Z, Wang H, Wang C, et al. Interference Mitigation for Cyber-Physical Wireless Body Area Network System Using Social Networks [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing(S2168-6750), 2013, 1(1): 121-132.
- [13] 王志军, 胡封晔, 尹颖奇, 等. 基于无线体域网的传输功率控制和调度算法[J]. 通信学报, 2015, 36(10): 271-277.  
Wang Z J, Hu F Y, Yin Y Q, et al. Transmission power control and scheduling algorithm in wireless body area networks [J]. Journal on Communications, 2015, 36(10): 271-277.
- [14] Koskie S, Gajic Z. A Nash Game Algorithm for SIR-based Power Control in 3G Wireless CDMA Networks [J]. IEEE Transactions on Communication (S1063-6692), 2005, 13(5): 1017-1026.
- [15] Fienberg D, Tirol J. Game Theory [M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1991.
- [16] Hanlen L W, Miniutti D, Rodda D, et al. Interference in body area networks [C]//Personal, indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on IEEE, 2009: 281-285.
- [17] 曾加. 基于博弈论的无线数据网络功率控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.  
Zeng J. Power Control on Game in Wireless Sensor Networks [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.