

文章编号: 1000-582X(2011)10-130-06

CDMA 系统功率控制收敛速度的改善

谭晓衡, 韦 伟, 黄振林

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 在码分多址(CDMA)系统中引入博弈论进行更优化的功率控制已成为近年来蜂窝移动通信研究的热点,但传统静态博弈论下的功率控制算法收敛速度不够快,且迭代过程中功率波动幅度较大。针对问题,提出了将动态博弈引入 CDMA 系统功率控制算法。通过仿真表明,提出的动态博弈功率控制算法与传统静态博弈论下分布式功率控制算法相比,在保证系统总的功率相同的情况下,能大幅度的提高功率的收敛速度。

关键词: 码分多址;移动通信;功率控制;收敛速度

中图分类号: TN 929. 533

文献标志码: A

Research on the improvement of the convergence speed for CDMA system power control

TAN Xiao-heng, WEI Wei, HUANG Zhen-lin

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Optimal power control with game-theory has been a hot research topic in code division multiple access (CDMA) system. However, the convergence speed of the power control algorithm based on traditional static game-theory is not fast enough and the power fluctuation is large during the iterative process. In order to solve this problem, dynamic game-theory is introduced into CDMA system power control algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm, compared with the distributed power control algorithm based on the traditional static game theory, can improve the convergence speed obviously with the same power spending.

Key words: code division multiple access; mobile communication; power control; convergence speed

对于码分多址(CDMA)通信系统,功率控制能够有效的减弱上行链路的远近效应,减少多址干扰,降低各用户的发射功率,提高系统容量,已是 CDMA 蜂窝通信系统的一项关键技术^[1]。

近年来,CDMA 系统的功率控制都主要在非合作静态博弈论模型下研究^[2-10],通过将各用户看作相互博弈的竞争者,让其各自更新功率达到最优化

的博弈论理想模型——纳什均衡,完成性能优于传统的功率控制。文献[2]提出基于香农信道理论的效用函数的博弈模型,文献[3]提出了基于数据通信的经典效用函数与价格函数,文献[4]将博弈论与 MIMO 技术结合用于 CDMA 系统功率控制,文献[5]对基于线性功率价格函数做了数学讨论和改进,文献[6]从用户满意度入手提出了不同的效用函数,

收稿日期: 2011-03-20

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(2010BB2049);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR10160011)

作者简介: 谭晓衡(1976-),男,重庆大学教授,主要从事无线通信系统、测控及遥感信息传输、扩频通信等方向研究。
(Tel) 13708377655; (E-mail) txh@cqu.edu.cn.

文献[7]为了获得更多功率节省,略微降低了信干比要求,而文献[8-10]都给出了新的效度函数。

在上述的所有静态博弈功率控制过程中,各用户都是同时更新功率,每次更新依据的参数都是由各用户功率前一次更新结束后得到的^[2-10]。各博弈用户在做出决策前,所掌握的信息都是“过时”信息,并不能根据竞争对手最新的情况做出决策。尽管博弈的结果达到纳什均衡,但博弈论模型的选择不是最佳的,导致存在着一些问题,尤其功率控制收敛速度的缓慢的问题一直都存在,达不到 3G 甚至 4G 通信系统的要求。针对以上情况,将博弈理论中的动态博弈引入功率控制,对静态博弈功率控制算法进行改进,得到了动态博弈功率控制算法。该算法下用户功率达到收敛所需的迭代次数比静态博弈功率控制算法的迭代次数要小很多,改善了收敛速度。

1 静态非合作博弈功率控制模型

1.1 系统模型

考虑 1 个单蜂窝小区 CDMA 系统,系统中有 N 个用户,用户 $j(j \in N)$ 与基站的距离为 d_j , p_j 、 r_j 分别表示第 j 个用户的发射功率和接收信干比 SIR,所有用户的功率选择策略都限制在 0 与 P_{\max} 之间。背景噪声功率为 σ^2 。设定所有用户的信息传输速率为 R bit/s,扩频码带宽为 W Hz,扩频增益: $L=W/R$ 。根据文献[7],信干比 SIR 可以表示为

$$\gamma_j = L \frac{h_j p_j}{\sum_{i \neq j} h_i p_i + \sigma^2}, \quad (1)$$

其中 h_j 表示用户 j 与基站之间的信道增益,选择衰落信道模型: $h_j = k/d^\theta$, k 为一常数, θ 取值范围为 3 ~ 6。

1.2 效度函数与价格函数

采用文献[6]提出的基于用户满意度的效度函数

$$u'_j(p_j, p_{-j}) = \frac{a\gamma_j}{\gamma_j + b}, \quad (2)$$

其中 a, b 为参数,分别代表用户满意度级别与曲线陡峭程度。

价格函数定义为传输功率的线性函数 $c_j = \lambda p_j$ ^[6-7]。

可得净效度函数

$$u_j(p_j, p_{-j}) = \frac{a\gamma_j}{\gamma_j + b} - \lambda p_j, \quad (3)$$

p_{-j} 表示除了 j 用户外的其他用户的功率值构成的向量。

1.3 静态博弈下的纳什均衡

$G = (\Gamma, \{P_j\}, \{u_j(\cdot)\})$ 表示静态非合作功率控制博弈^[2],其中,博弈方 $\Gamma = \{1, 2, \dots, N\}$ 为同时通话用户集,策略空间 P_j 为连续功率集 $[0, P_{\max}]$, $u_j(\cdot)$ 为用户 j 的净效度函数。博弈过程中,每个用户在策略空间 P_j 里选择功率,优化效度函数 $u_j(\cdot)$ 。文献[11]已证明,每个用户各自迭代功率来优化自己的效度函数,最终达到稳定状态,得到一组最优的功率向量 \mathbf{p}^* ,为此博弈下的纳什均衡,即:对所有用户 $j \in N$,都有 $u_j(p_j^*, \mathbf{p}_{-j}^*) \geq u_j(p_j, \mathbf{p}_{-j})$ 。在纳什均衡下,每个用户都不能单方面的改变自己的发射功率来增加效度。

2 动态博弈论下的功率控制算法

2.1 动态博弈

动态博弈的博弈方先后、依次决策,并且后行动者能够观察到先行动者所选择的策略和行动,后行动者就能在获得更多更新的信息的情况下做出更优的决策^[11-12]。

静态功率控制博弈的每个用户,都同时在策略空间 $[0, P_{\max}]$ 中选择功率来优化效度函数,掌握其他用户的决策信息 \mathbf{p}_{-j} ,都是前一次迭代后的结果。设用户 j 在第 k 次静态博弈时掌握的信息为 $I_j(k)$,可表示为

$$I_j(k) = \sum_{i \neq j} p_i(k-1)h_i = \sum_{i=1}^{j-1} p_i(k-1)h_i + \sum_{i=j+1}^N p_i(k-1)h_i. \quad (4)$$

由式(4)可知,用户 j 在第 k 次博弈时采用第 $k-1$ 次的信息,并不是最新信息,体现在效度函数 u_j 的优化中,不能对其他用户的功率干扰 $p_i h_i$ 做最佳的估计,影响 u_j 的优化。造成这种情况的原因,就是没有考虑博弈次序的问题。

这里提出动态博弈下功率控制,在上述的静态博弈中加入博弈次序,让 N 个用户依次行动,有顺序的进行博弈。这样,每次都只有 1 个用户单独选择功率,而且这个用户掌握了在它之前行动用户的决策和效度函数,设用户 j 在第 k 次动态博弈时掌握的信息为 $I'_j(k)$,表示为

$$I'_j(k) = \sum_{i=1}^{j-1} p_i(k)h_i + \sum_{i=j+1}^N p_i(k-1)h_i. \quad (5)$$

由式(5)可知,由于加入了博弈次序,用户 j 在第 k 次动态博弈时,掌握了在他之前行动的竞争者的本次信息(具体体现在第一项),与式(4)全部采用“过

时”信息的静态博弈相比,动态博弈掌握了最新信息,更能优化效用函数 u_j 。这样的动态博弈也叫完美信息动态博弈^[13]。

2.2 子博弈完美纳什均衡

在博弈理论中,完美信息动态博弈得到的均衡解为子博弈完美纳什均衡,简称完美均衡^[14]。

动态功率控制博弈中,每个即将行动的用户与它所有后面未行动的用户一起构成一个子博弈, N 个用户就构成了 N 个子博弈,如果有一组功率向量 \mathbf{p}^* ,对每个子博弈都构成纳什均衡,那么 \mathbf{p}^* 就是这个动态功率博弈的子博弈完美纳什均衡。每个子博弈的效用函数与原博弈一样,如式(3)所示,每个用户的策略空间仍为 $[0, P_{\max}]$ 。

定理 1 每个完美信息动态博弈都存在子博弈完美纳什均衡。

采用逆向归纳法^[15]的思想,最后一级子博弈必然是 1 个静态博弈,可以用静态理论证明纳什均衡的存在,倒推回去,过程中每次的子博弈都是单用户决策问题,只是信息发生了变化,也可以找到策略上的最优解——纳什均衡,直推到博弈的最开始也是如此,因此子博弈完美纳什均衡是一定存在的。

因此,可以将动态博弈划分成多个静态子博弈来分析,只需证明每个静态子博弈存在纳什均衡且唯一,就能证明整个动态博弈的完美均衡存在,并由唯一性可得各子博弈的纳什均衡就是整个动态博弈的完美均衡。

下面证明各静态子博弈下的纳什均衡存在且唯一,并求出均衡解。

定理 2 如果 1 个静态博弈满足下面 2 个条件,那么此博弈一定存在纳什均衡:

1) 策略空间是欧氏空间的 1 个非空的、闭的、有界的凸集;

2) 效用函数在其策略空间上连续,且为拟凸(凹)函数。

每级子博弈下的用户,其策略空间都是连续集 $[0, P_{\max}]$,显然满足条件 1)。

区别于文献[6]针对所有用户整体的静态博弈,这里不失一般性,考虑第 $j(j \in N)$ 级静态子博弈,用户 j 单独决策,其信息集为前 $j-1$ 个用户最新信息与后 $N-j$ 个用户前一次信息之和,其效用函数由式(3)可得

$$u_j(p_j, \mathbf{p}_{-j}) = \frac{\alpha \gamma_j}{\gamma_j + b} - \lambda p_j. \quad (6)$$

最大化效用函数 $u_j(p_j, \mathbf{p}_{-j})$

$$\partial u_j(p_j, \mathbf{p}_{-j}) / \partial p_j = 0. \quad (7)$$

得到

$$p_j^* = \frac{1}{Lh_j} \left\{ \left[\frac{abLh_j}{\lambda} \left(\sum_{i \neq j} h_i p_i + \sigma^2 \right) \right]^{0.5} - b \left(\sum_{i \neq j} h_i p_i + \sigma^2 \right) \right\}. \quad (8)$$

将 $u_j(p_j, \mathbf{p}_{-j})$ 对 p_j 求 2 阶偏导数,可得

$$\frac{\partial^2 u_j(p_j, \mathbf{p}_{-j})}{\partial p_j^2} = \frac{-2ab(Lh_j)^2 \left(\sum_{i \neq j} h_i p_i + \sigma^2 \right)}{(Lh_j p_j + b \sum_{i \neq j} h_i p_i + b\sigma^2)^3} < 0. \quad (9)$$

由式(6)、(9)可知,子博弈满足条件 2)。因此,由 j 的一般性,所有子博弈都存在纳什均衡,加上功率 p_{\max} 限制,均衡解为

$$r_j(\mathbf{p}) = \min(p_j^*, p_{\max}). \quad (10)$$

定理 3 如果一个静态博弈的纳什均衡解是一个标准函数,那么这个纳什均衡是唯一均衡解^[16],现需要证明式(10)是标准函数,即 \mathbf{p}_j^* 是标准函数,

设 $f(p_j) = \mathbf{p}_j^* = \frac{1}{Lh_j} \left\{ \left[\frac{abLh_j}{\lambda} \left(\sum_{i \neq j} h_i p_i + \sigma^2 \right) \right]^{0.5} - b \left(\sum_{i \neq j} h_i p_i + \sigma^2 \right) \right\}$ 。证明 $f(p_j)$ 是标准函数,就需要证明它满足正性: $f(p_j) > 0$; 单调性: 对任意 $p_1 > p_2$, 都满足 $f(p_1) > f(p_2)$; 可扩展性: 对任意 $\alpha > 1$, 都满足 $\alpha f(p_j) > f(\alpha p_j)$ 。

1) 对式(6),只要通过对参数 a, b, L, λ 的恰当选择,必然可使 $p_j^* > 0$ 。换个角度, p_j^* 是用户功率选择的策略之一,属于策略空间 $[0, P_{\max}]$,也可以保证 $p_j^* > 0$ 。

2) 令 $I = \sum_{i \neq j} h_i p_i + \sigma^2$, 数学讨论中忽略极小量 σ^2 , I 是 p_i 的线性函数,因此可以转为讨论 $f(I) = \left(\frac{ab}{Lh_j \lambda} \right)^{0.5} I^{0.5} - \frac{b}{Lh_j} I$, 设任意 $I_1 > I_2$, $f(I_1) - f(I_2) = \left(\frac{ab}{Lh_j \lambda} \right)^{0.5} (I_1^{0.5} - I_2^{0.5}) - \frac{b}{Lh_j} (I_1 - I_2)$, 由 $I < 1$ 和 $f(p_j) > 0 \Rightarrow \left(\frac{ab}{Lh_j \lambda} \right)^{0.5} I^{0.5} > \frac{b}{Lh_j} I$, 可得 $f(I_1) - f(I_2) > 0$, 单调性得证。

3) 对任意 $\alpha > 1$, 有 $\alpha f(p_j) - f(\alpha p_j) = \left(\frac{ab}{Lh_j \lambda} \right)^{0.5} I^{0.5} (\alpha - \alpha^{0.5}) > 0$, 可证得其可扩展性。

通过上述分析,动态博弈下功率控制存在其完美纳什均衡,各用户可以在动态博弈中通过算法来实现功率优化,达到完美纳什均衡解。此外,通过用博弈理论的分析知道,在同一个效用函数式(3)下,

动态博弈最终的完美均衡解与静态博弈的纳什均衡解是一致的,但是动态博弈由于博弈方掌握的信息强于静态博弈,达到均衡的速度要明显快于静态博弈,这就是动态博弈下功率控制提高了功率收敛速度的根本原因。

2.3 动态博弈功率更新算法

在动态博弈模型下,提出分布式的迭代功率更新算法。流程如下

1) 初始化每个用户的初始功率 $p_j(k)=0$, 其中迭代次数 $k=0$;

2) $k=k+1$, 对每个用户依次用式(8)、(10)计算

$$p_j^*(k) = \frac{1}{Lh_j} \left\{ \left[\frac{abLh_j}{\lambda} \left(\sum_{i=1}^{j-1} p_i(k)h_i + \sum_{i=j+1}^N p_i(k-1)h_i \right) - 1 \right]^{0.5} - b \left(\sum_{i=1}^{j-1} p_i(k)h_i + \sum_{i=j+1}^N p_i(k-1)h_i \right) \right\},$$

$$r_j(p_j(k)) = \min(p_j^*(k), p_{\max}),$$

直到 N 个用户迭代完毕,其中,第 j 个用户用到了先行动的 $j-1$ 个用户本次迭代的信息;

3) 对计算出的每个用户功率做判断,如果 $p_j^*(k) = p_j^*(k-1)$, 说明功率已经收敛到稳定值, $p_j^*(k)$ 为动态博弈功率控制的完美均衡解;否则,重复步骤 2), 直到得出均衡解。

3 仿真分析

考虑在 1 个单小区 CDMA 系统中,共有 9 个用户分布在半径为 1 000 m 的圆形小区中,这 9 个用户具有代表性的分布在小区内距离基站分别为 $d = [300, 450, 550, 660, 740, 800, 880, 940, 1 000]$ m 处,按照距离由小到大编号为 1 到 9。效用函数中参数取 $a=1.0, b=2.0, \lambda=60.0$ 。各通信指标与参数作如下选择:扩频码带宽 $W=1$ MHz,数据速率 $R=10$ kbps,扩频增益 $L=100$,背景噪声 $\sigma^2=5 \times 10^{-15}$,路径增益 h 里取 $k=6.70 \times 10^{-3}, \theta=3.6$,功率上限 $p_{\max}=1$ w。通过计算机仿真得到图 1、图 2 和图 3 所示的功率控制曲线,它们分别给出了随着迭代次数的增加,在没有加入博弈(采用文献[7]提出方法得到)、静态博弈和动态博弈功率控制下,所有用户的功率更新情况,其中每一条曲线代表一个用户的发射功率变化情况。

将图 2 和图 3 与图 1 比较可得,与非博弈功率控制相比,2 种博弈论下的功率控制,都能够在同等条件下收敛到更低的发射功率,节约了无线资源,降低了多址干扰和远近效应的影响,并且收敛速度也明显提高。

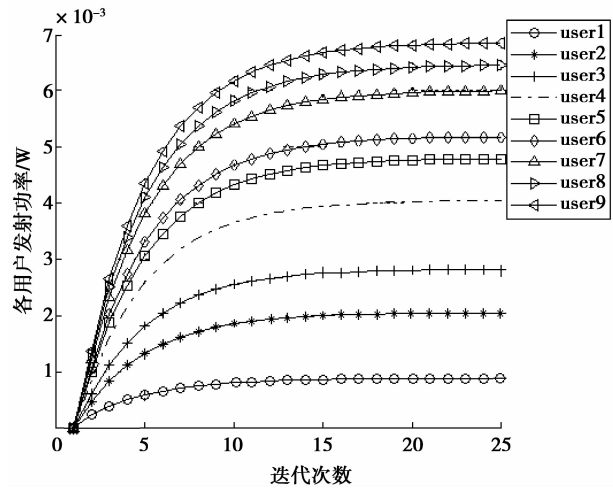


图 1 非博弈下用户功率控制曲线

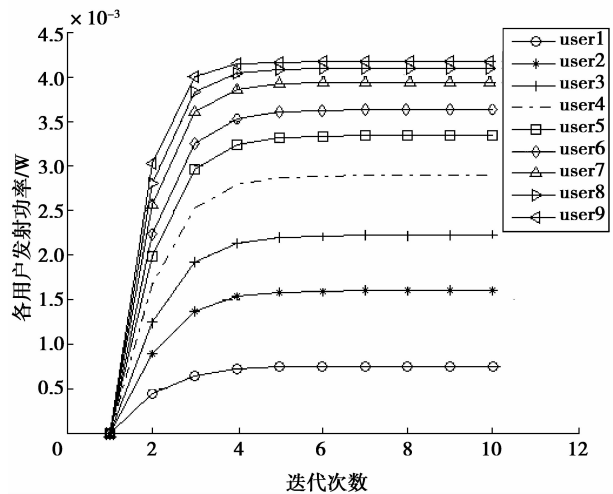


图 2 静态博弈下用户功率控制曲线

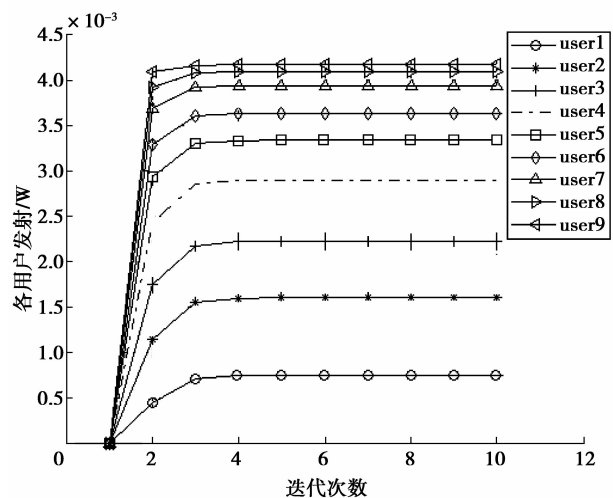


图 3 动态博弈下用户功率控制曲线

比较图 2 和图 3 两种博弈模型,两种情况下同 1 个用户的功率都能够收敛到同样的均衡值,那么其

信干比 SIR 也相等,和上面的理论证明是相符合的。与静态博弈相比,动态博弈功率控制在没有牺牲其他任何性能的情况下,功率从初始值达到收敛需要的迭代次数明显要少,功率的收敛速度更快。并且,动态博弈功率控制迭代过程中功率的波动幅度也要小于静态博弈功率控制算法,只需要迭代一次,每个用户的功率就接近于均衡功率了,原因在于动态博弈下,各用户获得更多的信息,能更快的达到均衡点。这对于要求快速、准确的下一代移动通信系统的功率控制算法,是很好的改善。

图 4 给出了 2 种博弈算法下,每个用户功率达到收敛需要的迭代次数。数值结果表明,动态博弈算法达到均衡点的迭代次数接近减少了 1/2,更能满足快速功率控制的要求,例如用户 4 的功率,在静态博弈下收敛需要迭代 6 次,在动态博弈下只需要 3 次;静态博弈时,用户 9 需要迭代 5 次才收敛,而动态博弈下只需要迭代 3 次。若将动态博弈用在文献[2]、[3]、[7]和[8]等达到均衡需要迭代次数更多的静态博弈模型中,功率收敛速度的改善和波动幅度的减小会有更好的表现。

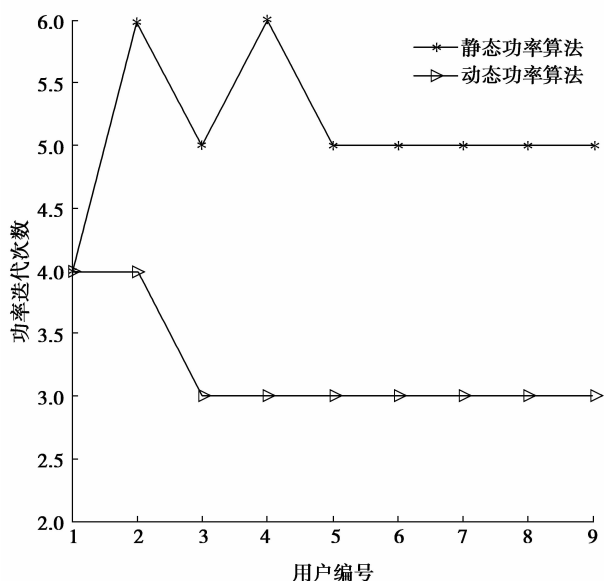


图 4 两种博弈算法功率迭代次数曲线

所有用户采用 3 种方式功率控制时收敛的平均功率和需要的平均迭代次数的对比附在表 1 中。通过计算可得,动态博弈功率控制的所有用户平均功率值与非博弈功率控制相比,降低了 30.2%,动态博弈功率控制的所有用户平均迭代次数与非博弈功率控制和静态博弈功率控制相比,分别降低了 81.7%和 40.0%。

表 1 3 种算法性能对比

参量	非博弈功率控制	静态博弈功率控制	动态博弈功率控制
所有用户平均功率/mw	4.3	3.0	3.0
所有用户平均迭代次数	16.9	5.1	3.1

4 结 论

讨论了 CDMA 蜂窝移动通信系统的功率控制问题。先给出了近年来研究较多的静态博弈模型下功率控制算法,在此基础上提出了将动态博弈加入原模型,让每个参与博弈的用户更加理性和聪明,在博弈过程中能获得更多的信息。理论分析和仿真结果都表明,在其他性能不降低的情况下,动态博弈下功率控制算法比静态博弈功率控制算法的收敛速度快 1 倍左右,并且每次迭代的功率都比静态下更接近均衡值。

参考文献:

- [1] 喻的雄,蔡跃明,钟卫. CDMA 系统中一种新的分布式博弈功率控制算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 443-446.
YU DI-XIONG, CAI YUE-MING, ZHONG WEI. A novel distributed power control algorithm in CDMA system: a game theoretic approach [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(2): 443-446.
- [2] GUNTURI S, PAGANINI F. Game theoretic approach to power control in cellular CDMA [J]. IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2008, 4: 2362-2366.
- [3] GOODMAN D J, MANDAYAM N B. Power control for wireless data[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(2): 48-54.
- [4] NAGARAIAAN V, DANANJAVAN P. A game theoretic power control algorithm with pricing for spectral efficient communication in MIMO MC-DS/CDMA system[J]. IEEE 3rd International Conference on BC, IT and BA, 2008, 11: 129-136.
- [5] GHASEMI A, FAEZ K, DEHGHAN M. A new pricing function for power control game [C] // Proceedings of 64th Vehicular Technology Conference. Montreal, Canada: IEEE, 2006: 1-5.
- [6] YIN Z M, XIE J Y, LV P B. An economic model for power control in wireless CDMA data networks [C] //

- Proceedings of International Conference on Communication Technology Proceedings. Beijing: IEEE, 2003, 2:835-838.
- [7] KOSKIE S, GAJIC Z. A nash game algorithm for SIR-Based power control in 3G wireless CDMA networks [J]. IEEE ACM Trans on Networking, 2005, 13(5): 1017-1026.
- [8] HAYAINEH M, KHALIL I, AWAD M. Non-cooperative uplink power control game for CDMA wireless [J]. IEEE Symposium on Computers and Communications, 2009:587-592.
- [9] 程世伦, 杨震, 张晖. 新的认知无线电功率控制博弈算法[J]. 通信学报, 2007, 28(3): 100-107.
CHENG SHI-LUN, YANG ZHEN, ZHANG HUI, Novel power control game algorithm for cognitive radios[J]. Journal on Communications, 2007, 28(3): 100-107.
- [10] ZHAO C L, GUO Y, A novel distributed power control algorithm based on game theory [J]. IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009:1-4.
- [11] 程世伦, 杨震. 基于信干比的认知无线电自适应功率控制算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1):59-62.
CHENG SHI-LUN, YANG ZHEN. Adaptive power control algorithm based on SIR in cognitive radios[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(1):59-62.
- [12] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海:上海人民出版社, 2004.
- [13] 姚国庆. 博弈论[M]. 天津:南开大学出版社, 2005.
- [14] 黄涛. 博弈论教程[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社, 2004.
- [15] 任建英. 用逆向归纳法求解动态博弈问题[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2009, 5:126-127.
REN JIAN-YING. Solving dynamic game with backward induction [J]. Management, science and technology in enterprise, 2009, 5:126-127.
- [16] YATES R D. A framework for uplink power control in cellular radio system [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1995, 13:1341-1347.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 129 页)

- [12] HAN D S, YANG W, ZHANG Y, et al. Antenna selection in coordinated multi-cell MIMO system[C]// Proceedings of 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR). Wuhan: IEEE, 2010: 346-348.
- [13] GOROKHOV A, GORE D A, PAULRAJ A J. Space-time processing for MIMO communications [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [14] GORE D, GOROKHOV A, PAULRAJ A. Joint MMSE versus V-Blast and antenna selection[J], Signal Systems and Computers, 2002, 1(11): 505-509.
- [15] SHIM S, KWAK J S, HEATH R W, et al. Block diagonalization for multi-user MIMO with other-cell interference[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2008, 7(7):2671- 2681.
- [16] SHEN Z, CHEN R, ANDREWS J G, et al. Low complexity user selection algorithms for multiuser MIMO systems with block diagonalization [J]. IEEE Trans Signal Process, 2006, 54(9): 3658-3663.
- [17] HOM R A, JOHNSON C R. Matrix analysis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.
- [18] GOLUB G H, VAN LOAN C F. Matrix Computations (3rd ed) [M]. Baltimore, MD: the John Hopkins University Press, 1996.

(编辑 侯 湘)