

# CDMA 系统中基于博弈论的速率与功率联合控制

刘冰, 万佑红

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:**该文针对 CDMA 系统中的多业务处理的飞速发展, 采用非合作博弈方法来实现系统速率与功率联合控制。将速率控制和功率控制分别等效为一个非合作博弈过程, 并且针对传统算法收敛速度慢和非合作博弈算法远近不公平的缺点, 考虑用户所受干扰大小以及信干噪比误差, 提出一种改进的代价函数, 将其应用到速率效用函数中。证明了联合算法 NASH 均衡的存在性和唯一性, 通过仿真表明, 用户通过较低的功率获得了较高的传输速率, 且具有较快的收敛速度, 公平性问题也得到了改善。

**关键词:**速率控制; 功率控制; 博弈论; NASH 均衡

**中图分类号:** TP301.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2012)11-0053-04

## Joint Control of Rate and Power in CDMA System Based on Game Theory

LIU Bing, WAN You-hong

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Due to the rapid development of multimedia services, use game theory to achieve joint control of power and rate in CDMA system. The power and rate control problem is equivalent to be a non-cooperative problem. The users' interference and the SINR error are considered to give a new cost function, because the non-cooperative game is unfair for the far users and the slow traditional algorithm convergence. What's more, use the new cost function to the rate control, and the existence and uniqueness of the proposed algorithm's NASH equilibrium are proved. The simulation results show that the algorithm can attain higher transmission rate using lower power and better convergence rate. The fair of the system for the far users is also illustrated in the proposed algorithm.

**Key words:** rate control; power control; game theory; NASH equilibrium

## 0 引言

随着移动通信的飞速发展, 面向数据传输业务成为下一代无线通信的主导方向, 以用来支撑用户所需要的多样的多媒体服务。但是由于无线网络资源的不足, 有效的资源分配显得尤为重要, 其中传输功率和速率的分配显得更加重要, 它直接影响着系统的性能。

功率控制算法有很多种, 传统经典的功率控制算法有 DPC (Distributed Power Control)、FDPC 算法<sup>[1]</sup>等, 其最大的缺点就是功率分配存在浪费以及收敛速度慢。最近, 将博弈论应用到功率控制中的方法, 已经得到了广泛的认可。David Goodman<sup>[2]</sup>等人以及文献[3]都提出了各自的非合作博弈算法<sup>[3]</sup>。另外, 发现在 CDMA 系统中, 想要支持多业务的应用服务, 除了要对终端用户进行功率控制外, 还要对用户传输速率

进行控制。因此, 会想到利用速率和功率联合控制, 在文献[4~6]中, 已经做了很多相关工作, 但是只是用数学的方法来解决这一问题, 而且求解文献[6]中问题, 要求知道全局信息, 这样的算法就是一种集中式算法<sup>[4~6]</sup>。但是知道运用博弈论来解决功率控制所得到的算法是分布式的, 所以可以用博弈论方法来解决速率和功率联合控制问题。文献[7, 8]提出了一种 NPRGP (non-cooperative power and rate control game via price)<sup>[7, 8]</sup>算法。但是 NPRGP 算法只是单纯地引入简单的线性代价函数, 没有考虑算法的公平性问题, 所以文中算法考虑用户间干扰以及信干噪比误差提出新的代价函数, 结合速率控制提出了新的非合作博弈速率与功率联合控制算法。

## 1 系统建模以及效用函数

考虑在一个单一蜂窝小区 CDMA 系统中, 同时有  $N$  个用户在通信, 用户  $i$  ( $i \in N$ ) 与基站的距离用  $d_i$  表示, 则由文献[9]可得其信干噪比表达式<sup>[9]</sup>为:

收稿日期: 2012-03-15; 修回日期: 2012-06-22

作者简介: 刘冰 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为 CDMA 系统功率控制; 万佑红, 博士, 副教授, 研究方向为混沌通信、复杂网络理论及其应用、通信系统中的控制理论应用。

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

其中,信干噪比与功率分别用  $\gamma_i, p_i$  表示,  $R_i$  为传输速率,由于发射机功率的限制,功率  $p_i$  和速率  $R_i$  分别有上限和下限,即  $p_i \in [0, p_{\max}]$ ,  $R_i \in [0, R_{\max}]$ 。传输信道带宽为  $W$ ,背景噪声用  $\sigma^2$  表示,扩频增益为:  $G = W/R_i$ ,设用户  $i$  受到的总干扰为:  $I_{ip} = \sum_{j \neq i} h_j p_j + \sigma^2$ ,则信干噪比可以简化表示为:

$$\gamma_i = G h_i p_i / I_{ip} \quad (2)$$

其中  $h_i$  为用户  $i$  到基站的链路增益<sup>[10]</sup>,可以由下式获得:  $h_i = A/d_i^\alpha$ ,  $A$  为常数,  $\alpha$  根据用户所在环境不同取值范围为:  $\alpha \in [3, 6]$ 。

在博弈论中每一个用户所获得的收益大小,一般用效用函数(utility function)<sup>[11]</sup>来表示,而效用函数的设计对算法性能有着极大的影响。由博弈论概念<sup>[11]</sup>知道效用函数具有:凸函数、非负性以及具有单一最小值。文献[7]中给出了结合速率控制的经典模型,其表达式为:

$$u_i = R_i f(\gamma_i) / p_i \quad (3)$$

其中  $R_i$  为传输速率,  $f(\gamma_i)$  为效率函数是效用函数的一部分。这里  $f(\gamma_i)$  是误帧率(FER)的函数,用  $p_e$  表示,代表的是如果有一比特或者更多的信息传输错误,那么这些信息将重新发送。它的单位是(bit/J),其表达式为:

$$f(\gamma_i) = \ln(K\gamma_i) = p_e \quad (4)$$

其中  $K$  为常数。

经过观察发现,(2)式没有包含任何用户间的约束。换言之,各个用户之间是完全的非合作博弈过程,这样会引起一个误区就是所有用户都会为了提高自己的效用而增大发射功率,这与实际情况显然是不符合的。因为,在同一个系统中用户之间是存在干扰的,当一个用户提高发射功率,那么其对于其他用户的干扰也会随之增大,对于其他用户来讲其受到干扰增大后,其性能就会下降,这样他也会提高发射功率来提高自己的性能,这样就形成了一种恶性循环,所以为了避免这种情况的出现,文中加入考虑用户间干扰和信干噪比误差的代价函数 ISE(interference and SINR error pricing),其表达式设计为:

$$J_i(p_i, \gamma_i)^{\text{ISE}} = \frac{a p_i}{I_{ip}} + b \Delta \quad (5)$$

其中  $a, b$  为常数,  $\Delta = (\gamma_i - \gamma_{\text{tar}})^2$ <sup>[4]</sup> 为所得信干噪比与目标信干噪比的误差的平方。所以可以得到文中算法的净效用函数为:

$$u_i^{\text{ISE}} = \frac{R_i \ln(K\gamma_i)}{p_i} - \frac{a p_i}{I_{ip}} - b \Delta \quad (6)$$

上式右边第一项为文献[7]所给出的速率博弈模型,第二项为改进后代价函数的一部分,反映的是用户受到其他用户的干扰大小,当用户受到较大干扰时其受到的惩罚应该降。第三项表示用户所得信干噪比与目标信干噪比的偏离程度,即信干噪比误差越大,受到惩罚越多,从而保证了所有用户尽量接近目标信干噪比,以满足公平性要求。

对于用户  $i$  的传输速率的最优解问题,就是从速率的策略空间  $R_i \in [0, R_{\max}]$ ,找到一个最优解  $R_i^*$ 。通过上述(5)效用函数中,知道速率的最优解是在  $\partial u_i^{\text{ISE}} / \partial R_i = 0$  处,所以得到:

$$\frac{\partial u_i^{\text{ISE}}}{\partial R_i} = \frac{1}{p_i} (\ln(K\gamma_i) - 1) + \frac{2b\gamma_i}{R_i} (\gamma_i - \gamma_{\text{tar}}) = 0 \quad (7)$$

即:

$$R_i^* = \arg \max_{R_i \in R} u_i^{\text{ISE}}(p_i, R_i) \quad (8)$$

对于用户  $i$  的最佳传输功率  $p_i^*$  的最优解问题,同样可以由  $\partial u_i^{\text{ISE}} / \partial p_i = 0$  得到,即:

$$\frac{\partial u_i^{\text{ISE}}}{\partial p_i} = -\frac{1}{p_i^2} (\ln(K\gamma_i) - 1) - \frac{a}{I_{ip}} - \frac{2b\gamma_i}{p_i} (\gamma_i - \gamma_{\text{tar}}) = 0 \quad (9)$$

即可以简写为:

$$p_i^* = \arg \max_{p_i \in P} u_i^{\text{ISE}}(p_i, R_i) \quad (10)$$

## 2 算法 NASH 均衡存在性和唯一性证明

### 2.1 存在性

在文献[12]中给出了 NASH 均衡<sup>[12]</sup>存在性条件,即:

- (1) 所有局中人的策略空间是紧集合;
- (2)  $u_i^{\text{ISE}}$  是关于  $p_i$  的连续且拟凹函数。

文中所提算法速率和功率的策略空间显然满足第一个条件,下面对条件二做出证明,对于式(5)模型,对于  $p_i$  求二阶偏导,由于(9)式已经对功率进行了偏导求解,所以直接利用(9)式来进行下面证明。为了便于证明先将(9)式分为三项,令:  $B = -\frac{1}{p_i^2} (\ln(K\gamma_i) - 1)$ ,

$$C = -\frac{a}{I_{ip}}, D = -\frac{2b\gamma_i}{p_i} (\gamma_i - \gamma_{\text{tar}})。$$

对于第一项  $B$  对功率  $p_i$  求偏导得到:

$$\frac{\partial B}{\partial R_i} = \gamma_i \frac{\ln(K\gamma_i) - 1}{p_i^3} \quad (11)$$

由(4)式可知  $\ln(K\gamma_i) = p_e$ , 其中  $p_e \leq 1$  (误码率是概率函数),所以得到  $\ln(K\gamma_i) \leq 1$ ,从而得到  $\frac{\partial B}{\partial p_i} \leq 0$ 。

由  $C$  对功率  $p_i$  求偏导得到:  $\frac{\partial C}{\partial p_i} = 0$ , 由于不含有变

量  $p_i$ , 所以对整体式子不产生影响。

最后由  $D$  对功率  $p_i$  求偏导得到:

$$\frac{\partial D}{\partial p_i} = -\frac{\partial 2b\gamma_i(\gamma_i - \gamma_{tar})}{\partial p_i} = -2b\gamma_i^2 = -\frac{2b\gamma_i^2}{p_i^2} \leq 0 \quad (12)$$

其中  $\gamma_i = \frac{w}{R_i} \cdot \frac{h_i}{\sum_{j \neq i} h_j p_j + \sigma^2}$  为信干噪比对功率的导数。

综上所述, 所以有  $u_i^{ISE}$  是关于  $p_i$  的连续且拟凹函数, 所以算法 NASH 均衡点存在。

## 2.2 唯一性

要证明唯一性只需要证明  $u_i^{ISE}$  是关于  $p_i$  的一个标准函数<sup>[13]</sup>, 即满足:

- (1) 正性  $u_i^{ISE} > 0$ ;
- (2) 单调性, 即当  $y > x$  时, 有  $u_i^{ISE}(y) > u_i^{ISE}(x)$ ;
- (3) 可扩展性: 对于所有  $\mu > 1$  有  $\mu u_i^{ISE}(x) > u_i^{ISE}(\mu x)$ 。

由上述存在性可知, 至少可以得到一组解  $(R_i^*, p_i^*)$ , 由于发射功率和传输速率都是有上下限  $p_i \in [0, p_{\max}]$ ,  $R_i \in [0, R_{\max}]$ , 将它们带入到式(7)和(9)中可以很容易得到它们是标准函数, 如果所得解不在其取值范围内, 但是其在功率和速率策略空间是单调的, 所以 NASH 均衡是惟一的, 命题得证。

## 3 仿真及分析

### 3.1 文中算法迭代过程

- 1) 设定初始迭代次数  $t = 0$ , 在功率取值范围内随机选取一组功率:  $\hat{p} = (p_1, p_2, \dots, p_N)$ ;
- 2) 对于所有的  $i \in N$ , 由式(7)求得  $R_i^*$ , 选取  $R_i^*(t+1) = \max\{R_i^*, R_{\max}\}$ ;
- 3) 再由式(9)求得  $p_i^*$ , 选取  $p_i^*(t+1) = \max\{p_i^*, p_{\max}\}$ ;
- 4) 比较功率, 如果有:  $\|p_i^*(t+1), p_i^*(t)\| \leq \varepsilon$

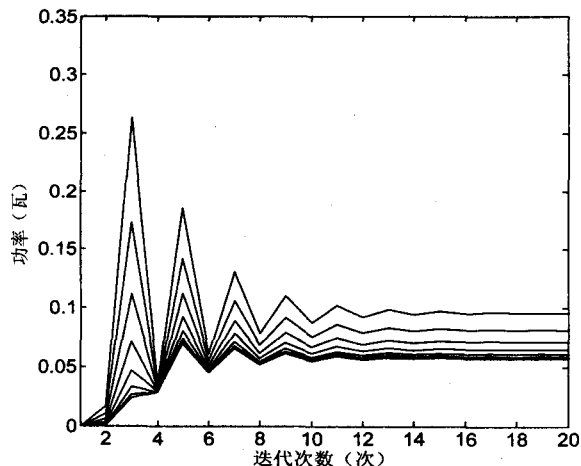


图1 DPC 算法功率迭代过程

成立, 则结束, 否则返回第二步, 其中  $\varepsilon$  为精度误差。

### 3.2 仿真环境及分析

文中对传统 DPC 算法、文献[7]算法以及文中算法进行了 MATLAB 仿真<sup>[14]</sup>。仿真环境与参数为: 考虑单个小区, 假设有  $N = 9$  个同时激活的移动台, 每个用分组长度固定为  $M = 80$ , 每帧所包含的信息比特数  $L = 64(b)$ ,  $W = 10^6$  (Hz) 为扩频带宽, 对于文中算法传输速率  $R_i$  由给定功率计算得出。其他两种算法传输速率固定为:  $R = 10^4$  (bps), 扩频增益  $G = W/R$ , 接收噪声  $\sigma^2 = 5 \times 10^{-15}$  (w),  $K = 0.2189$ ,  $a = 10^{-3}$ ,  $b = 4 \times 10^9$  为加权系数, 用户初始功率  $p = 2.22 \times 10^{-15}$  (w), 用户  $i$  的链路增益为  $h_i = 10^{-4}/d^4$ , 其中用户到接收基站的距离为  $d = [50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450]$  m。速率  $R$  的范围为  $[0, 80]$  kb/s, 功率  $p$  的范围为  $[0, 0.2]$  w, 目标信干噪比为 12.42 (dB)。

下面是三种算法迭代过程:

由图 1 到图 3 可以看出, 在各算法功率迭代过程中, 文中所提出的算法的收敛速度与文献[7]算法相当在 10 次左右, 而 DPC 算法收敛速度在 13 次左右, 而且 DPC 算法迭代过程功率起伏较大, 所以存在功率浪费问题。其中, 图 2 中用户 5 功率的突然下降, 是因为其速率突然下降所致, 这在图 6 中速率比较可以体现出来, 以上是 3 种算法的收敛速率及过程的分析。

图 4 到图 6 主要给出了三种算法的收敛功率、信干噪比以及速率的仿真比较与分析。在图 4 中, 文中所提出的算法在收敛功率方面优于传统 DPC 算法, 而与文献[7]算法相比, 对于近处用户文中算法功率较低, 远处用户文中算法功率较高, 但是从曲线的走势来看文中算法相对平缓远近兼顾。在图 5 中可以看出文中算法信干噪比较高, 而文献[7]算法对于远处用户信干噪比较低, 这显然不够公平, 而传统 DPC 算法的信干噪比最低。在图 6 可以看出, 文中所提出的算法与文献[7]算法, 在采用速率控制后传输速率都有所

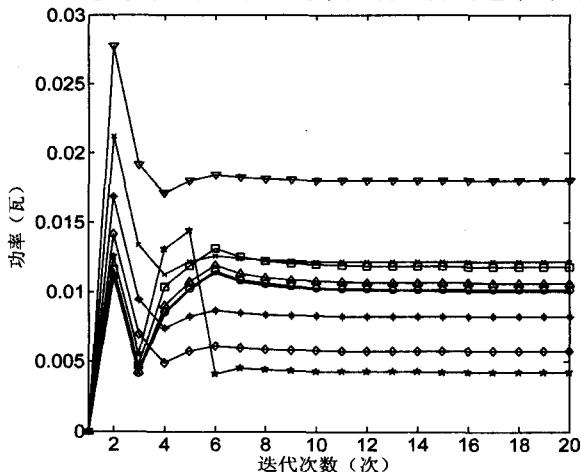


图2 文献[7]算法功率迭代过程

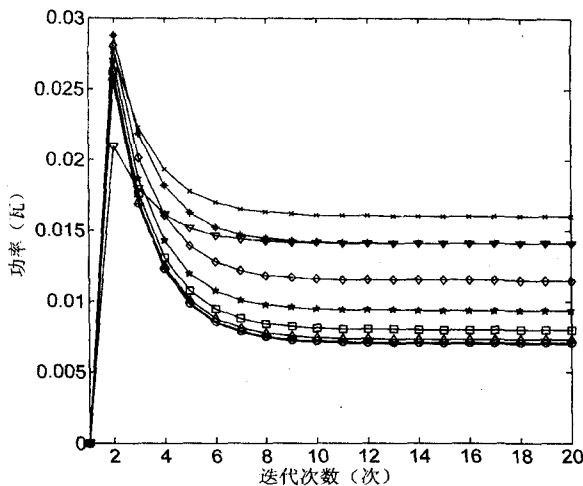


图 3 文中算法功率迭代过程

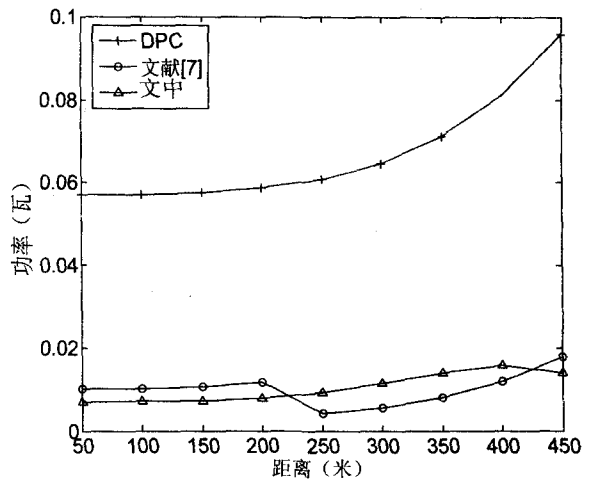


图 4 功率与距离的关系

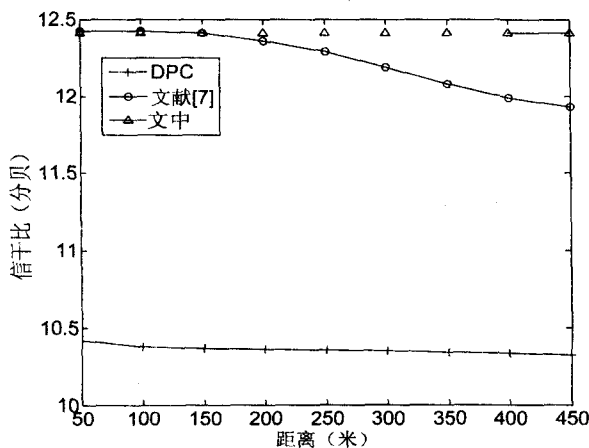


图 5 信噪比与距离的关系

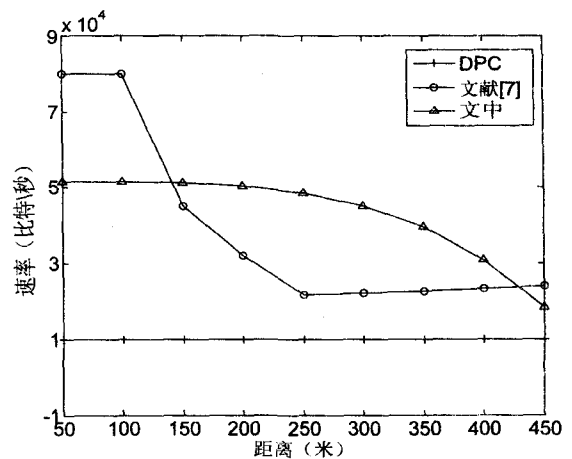


图 6 速率与距离的关系

提高,而 DPC 算法只是保持用户速率恒定,结合图 4 可以得到算法在采用功率控制后可以用相对较低的功率获得较高的传输速率。

#### 4 结束语

文中看到了未来移动通信的发展趋势,以多媒体为主的多业务必将是以后移动通信发展的主流,为此在算法中考虑了速率与功率联合控制,以适应未来多业务处理的要求。与此同时,针对非合作博弈算法的公平性问题,重新设计了算法的代价函数,以用户间的干扰以及信干噪比误差来约束用户之间的博弈过程,克服了以往算法中用户单纯追求自身利益最大化的缺点。最后对新算法与以往算法进行了仿真比较体现了其优越性,文中所提出算法在远近用户公平性方面有所改善,并且以相对较低的发射功率获得了较高的传输速率。

#### 参考文献:

[1] Lee Tsern-Huei, Lin Jen-Cheng. A Fully Distributed Power Control Algorithm for Cellular Mobile Systems[J]. IEEE Jour-

nal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(4): 692-698.

- [2] Goodman D. Power Control for Wireless Data[J]. IEEE Personal Communication, 2000, 7(2): 48-54.
- [3] Koskie S, Gajic Z. A Nash Game Algorithm for SIR-based Power Control in 3G Wireless CDMA Networks[J]. IEEE Trans on Networking, 2005, 13(5): 1017-1027.
- [4] Kim D I, Hossain E, Bhargava V K. Downlink Joint Rate and Power Allocation in Cellular Multirate WCDMA Systems[J]. IEEE Trans. on Wireless Commun., 2003(1): 69-80.
- [5] Yin Zhiming, Xie Jianying. Joint Power and Rate Allocation for the Downlink in Wireless CDMA Data Networks[C]//IEEE (PIMRC'03) Proceedings. [s. l.]: [s. n.], 2003: 326-330.
- [6] O'Neill D, Julian D, Boyd S. Seeking Foschini's Genie: Optimal Rates and Powers in Wireless Networks[J]. IEEE Trans. on Veh. Tech., 2004, 52(9): 1547-1557.
- [7] Zhou Pan, Liu Wei, Yuan Wei, et al. Energy-efficient Joint Power and Rate Control via Pricing in Wireless Data Networks[C]//WCNC 2008. [s. l.]: IEEE Communications Society, 2008: 1091-1097.
- [8] Zhou Pan, Yuan Wei, Liu Wei, et al. Joint Power and Rate

(下转第 60 页)

隙发送标识符,如果成功识别则标签静默,在下一帧中再选择一个时隙重新发送,直到所有标签成功识别;

当  $2N_{\max\_id} > F_{\max}$  时,从  $PS_{\max\_id}$  组开始每组标签依次采用帧长  $F = N_i$  的帧时隙 ALOHA 算法进行标签识别,直到所有组标签都成功识别。

### 3 ASFSA 算法仿真结果及分析

系统识别效率是衡量 RFID 防碰撞算法性能的重要指标,文中使用 MATLAB 对提出的 ASFSA 算法进行仿真,仿真了在不同标签数目下 ASFSA 算法的系统识别效率,并与帧时隙 ALOHA 算法和二进制树搜索算法的系统识别效率进行了比较。系统识别效率定义为成功识别的标签数和识别所用时隙数的比值,如图 4,ASFSA 算法的系统识别效率优于其余两种算法。电子标签的 ID 码为随机产生的 64bit 数据。在仿真时不考虑标签的运动、传输误码等因素。

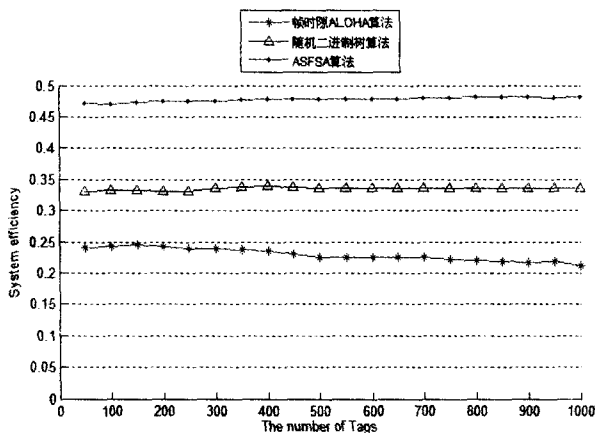


图4 防碰撞算法的系统效率比较

### 4 结束语

传统的帧时隙 ALOHA 算法识别标签时需要的最优帧长随标签数目的增加而增加,在实际应用中由于系统硬件所限制,帧长度不可以无止境的增大,当标签数目非常大时,传统帧时隙 ALOHA 算法的系统识别效率会急剧下降,但文中所提出的 ASFSA 算法很好地

解决了这一问题,并且执行过程简单,可以使标签数目非常大时系统的识别效率也没有大的影响。

### 参考文献:

- [1] Lu I S J, Flores M. Performance of RFID tags in near and far field [C]//ICPWC' 2005. India; New Delhi, 2005.
- [2] Raza N, Bradshaw V, Hague M. Applications of RFID technology [C]//IEEE Colloquium on RFID Technology. London, England; [s. n.], 1999.
- [3] 宁焕生,张瑜,刘芳丽. 中国物联网信息服务系统研究[J]. 电子学报, 2006(12A): 2514-2517.
- [4] 郭雷勇,谭洪舟,高守平,等. RFID 系统阅读器反碰撞算法分类与研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(9): 13-16.
- [5] 王铖岑. RFID 系统防碰撞算法[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(1): 29-32.
- [6] 吴跃前,辜大光,范振粤,等. RFID 系统防碰撞算法比较分析及其改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2009(3): 210-213.
- [7] Prodanoff Z G. Optimal frame size analysis for framed slotted ALOHA based RFID networks [J]. Computer Communications, 2010, 33(5): 648-653.
- [8] Bueno-Delgado M V, Vales-Alonso J. On the optimal frame-length configuration on real passive RFID systems [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(3): 864-876.
- [9] Shih Dong-Her, Sun Po-Ling, Yen D C, et al. Taxonomy and survey of RFID anti-collision protocols [J]. Computer Communications, 2006, 29: 2150-2166.
- [10] Capetanakis J I. Tree algorithms for packet broadcast channels [J]. IEEE Trans. on Inform. Theory, 1979, 25(5): 505-515.
- [11] 余松森,詹宜巨,彭卫东. 基于返回式索引的二进制树形搜索反碰撞算法及其实现[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(16): 26-28.
- [12] EPCglobal Inc. EPCTM radio-frequency identify protocols class-1 gen-2 UHF RFID protocol for communications at 860 MHz version 1.2.0 [S]. Lawrenceville; EPCglobal Inc, 2008.
- [13] 姜丽芬,卢桂章,辛运帷. 射频识别系统中的防碰撞算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(15): 29-32.

(上接第 56 页)

Control in Cognitive Radio Networks: A Game-theoretical Approach [C]//ICC 08. [s. l.]: IEEE Communications Society, 2008: 3296-3302.

- [9] 王薇,李晓辉. CDMA 系统中基于 SVM 的多用户检测算法[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(1): 140-142.
- [10] 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.

[11] 朱·弗登博格,让·梯若尔. 博弈论[M]. 黄涛,郭凯译. 北京:中国人民大学出版社, 2002.

- [12] 巫房贵,刘海林. 基于非合作博弈的联合功率与速率控制算法[J]. 通信技术, 2010, 43(6): 160-163.
- [13] 张红伟. CDMA 系统中基于代价函数的联合功率控制算法[J]. 通信学报, 2003, 24(6): 75-81.
- [14] 张志勇. 精通 MATLAB [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010.