

## MIMO-CDMA 系统中一种基于博弈方式的分布式功率控制

钟 卫 徐友云 蔡跃明

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

**摘 要:** 针对 MIMO-CDMA 系统中的无线数据业务, 本文研究了分布式非合作功率控制博弈。对 MIMO-CDMA 系统中的无线数据业务建立了收益函数, 该收益函数对功率效率和频谱效率都进行了考虑, 并能够反映系统中无线数据用户对服务质量(QoS)的满意程度。以收益函数为基础, 建立了两种非合作功率控制博弈模型, 并对模型纳什均衡的存在性和唯一性进行了推导。另外, 还研究了两种代价函数机制。最后, 给出了一种获得纳什均衡的算法, 数值仿真结果表明该算法具有良好的性能, 有效地控制了各用户的发射功率。

**关键词:** 多输入多输出; CDMA; 功率控制; 博弈论; 非合作博弈; 收益函数

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1929-05

## Distributed Game-Theoretic Power Control for Wireless Data over MIMO-CDMA System

Zhong Wei Xu You-yun Cai Yue-ming

(Institute of Communications Engineering, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Distributed noncooperative power control game for wireless data is considered in multiple-input multiple-output (MIMO) CDMA system. Utility functions are established for wireless data over the MIMO CDMA system. The spectral efficiency and power efficiency are both referred to as utility which reflects the level of satisfaction a data user gets. According to the utility functions, two noncooperative power control games are developed, and establish the existence, uniqueness of the Nash equilibria of them. The pricing mechanism is studied for the power control games. We also present power control algorithms to get the Nash equilibria and analyze the performance of the proposed power control games.

**Key words:** Multiple-Input Multiple-Output; CDMA; Power control; Game theory; Noncooperative game; Utility function

### 1 引言

多址干扰会严重影响CDMA系统的性能, 同时CDMA系统还具有明显的远近效应。随着通信系统的发展与进步, 现有通信系统必然不能满足本文的要求, 于是人们开始大力研究新一代移动通信系统, 即第四代移动通信系统。MIMO技术作为下一代移动通信系统中的关键技术, 受到了人们的广泛关注。MIMO技术充分开发空间资源, 利用多个天线实现多发多收, 在不需要增加频谱资源和天线发送功率的情况下, 可以成倍地提高信道容量。把MIMO技术与CDMA技术相结合, 可以提高现有CDMA系统的性能。可是, MIMO-CDMA系统仍然具有CDMA系统固有的缺点。因此, 有效的干扰抑制和功率控制对MIMO-CDMA系统的性能提高起着非常重要的作用<sup>[1]</sup>。

本文主要研究MIMO-CDMA系统中的功率控制问题。功率控制可以给系统带来以下两个主要好处: 一是节约电池电量, 延长电池使用寿命, 并使资源的利用更加高效; 二是

抑制干扰, 增加系统容量。近年来博弈论(Game Theory)被用来作为分析和研究功率控制的有利工具<sup>[2-8]</sup>。对CDMA系统中的每个终端来说, 发送功率与接收信干比常常是相互制约的。根据这个特点, 文献[3]和文献[4]提出在CDMA系统中, 采用基于博弈论的分布式功率控制算法来有效利用系统中的无线资源。因此, 本文考虑采用博弈论的分析方法来研究多用户MIMO-CDMA系统中的上行链路功率控制。在文献[3]的基础上, 本文对MIMO-CDMA系统建立了新的收益函数和非合作博弈模型, 并研究了模型的纳什均衡以及由此得到的功率控制算法的性能。本文建立的收益函数同时考虑了功率效率和频谱效率, 并被用来反映各数据用户的服务质量(QoS)要求。本文中, 服务质量(QoS)要求主要是指误码率, 因为本文的研究对象是相对能够忍受一定的时延数据用户<sup>[3]</sup>。

人们已经对MIMO系统中功率分配的问题做了一定的研究。文献[9]研究了高斯信道道的和容量。他们认为MIMO信道在已知信道状态的情况下, 通过奇异值分解(SVD)可以分解为独立并行的子信道, 而采用迭代功率注水算法可以得到获取最大和容量的最优功率分配方案。文献[10]

2006-03-06 收到, 2006-10-08 改回

国家自然科学基金(60372080)和江苏省自然科学基金(BK2004014)资助课题

采用博弈论的分析方法研究了信道未知情况下 MIMO 系统的鲁棒功率分配解(robust solution)。该博弈的收益函数被设计为互信息率,最后得到的鲁棒解为平均功率分配。文献[11]把 MIMO 系统描述为一个非合作博弈模型,并以各用户的互信息率为收益函数,采用迭代功率注水算法来获得博弈的纳什均衡。文献[12]则采用了一种基于博弈论的分布式算法来优化协同通信中下行链路的资源配置。

然而,本文的研究与前人所做的工作是有所不同的。第一,尽管本文借鉴了文献[2]的思想,但本文研究的是 MIMO 系统,而在文献[2-8]中,所有用户考虑的都是单天线系统。第二,本文对代价函数机制做了讨论,并采用了本文自己设计的代价函数机制。文献[3,4]仅采用线性的代价函数。文献[5]提出采用组合代价函数(group price)。

本文具体组织如下:第 2 节给出了描述 MIMO-CDMA 系统并建立了收益函数。第 3 节建立了 MIMO-CDMA 系统的非合作功率控制博弈模型;第 4 节推导证明了博弈模型的存在性和唯一性,给出了获得纳什均衡的算法。第 5 节给出了仿真结果,以验证算法的性能;最后是结束语。

### 2 系统模型和收益函数

考虑一个有反馈的单小区  $N$  用户 MIMO-CDMA 系统,每个用户都具有  $M_t$  个天线,基站端则有  $M_r$  个天线。处理增益为  $G$ 。在这个系统中,用户的数据流被复用到多个发射天线上,每个天线同时在一个频带上传输独立的调制信号。基站端通过天线阵列对接收到的信号进行解调还原。假设接收端知道完全的信道状态信息(CSI),而接收端在需要可以通过反馈获得所需的信息。

设  $H_i$  为用户  $i$  的信道矩阵,信道矩阵为

$$H_i = \{h_{mn}^{(i)}\}, 1 \leq m \leq M_r, 1 \leq n \leq M_t \quad (1)$$

其中  $h_{mn}^{(i)}$  用户为  $i$  从发射端  $n$  到接收端  $m$  的复信道增益。本文采用如下信道增益模型:  $h_{mn}^{(i)} = \sqrt{c/d_i^\alpha} \sqrt{s} \cdot z_{mn}$ , 其中  $d_i$  为用户  $i$  到基站的距离(以千米为单位),  $\alpha$  路径衰减指数,  $c$  为  $d = 1\text{km}$  时链路增益均值的中值,  $s$  是归一化对数阴影衰落向量,当  $10 \cdot \log s$  为具有标准偏差  $\eta$  的零均值高斯随机变量,  $z_{mn}$  表示多径散射的相位和,它是零均值单位方差的复高斯随机变量<sup>[13]</sup>。

由文献[13]得,单个用户的归一化吞吐量可以表示为各输入数据流对应的吞吐量之和。用户  $i$  的归一化吞吐量为

$$T_i = \sum_{k=1}^{M_t} T_{k,i} = \sum_{k=1}^{M_t} \log_2 M_{k,i} (1 - \text{BER}(\gamma_{k,i}))^L \quad (2)$$

其中  $\log_2 M_k$  为每个符号的比特数, BLER 为一个  $L$  比特分组的分组错误概率, BER 为比特误码率,  $\gamma_{k,i}$  表示用户  $i$  第  $k$  个子数据流的信干噪比(SINR)。而  $\gamma_{k,i}$  的定义为

$$\gamma_{k,i} = \frac{G p_{k,i} h_{k,i}^2}{\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_{k,j} h_{k,j}^2} \quad (3)$$

其中  $p_{k,i}$  是用户  $i$  第  $k$  个子数据流的发射功率,为  $\sigma^2$  高斯白噪声功率,  $h_{k,i}^2 = \sum_{m=1}^{M_r} |h_{mk}^{(i)}|^2$ 。

为了研究 MIMO-CDMA 系统的功率控制,本文建立了如下的功率控制博弈的收益函数:

$$u_i = \frac{\sum_{k=1}^{M_t} \log_2 M_{k,i} (1 - 2\text{BER}(\gamma_{k,i}))^L}{P_i} = \frac{\sum_{k=1}^{M_t} \log_2 M_{k,i} f(\gamma_{k,i})}{P_i} \quad (4)$$

其中  $P_i$  是用户  $i$  的总发射功率,  $P_i = \sum_{k=1}^{M_t} p_{k,i}$ ,  $f(\gamma_{k,i}) = (1 - 2\text{BER}(\gamma_{k,i}))^L$  被称为:效率函数(efficiency function),用来近似表示成功发送率(FSR),当  $P_i=0$  时,它也为 0。实际上,设计的收益函数要满足以下性质(性质 1):  $u_i(0) = 0$ ,  $u_i(\infty) = 1$ ,  $u_i$  为递增函数。只要满足性质 1,本文可以设计多种收益函数以获得满意的性能。假设功率是平均分配到各个子数据流上的,于是  $p_{1,i} = \dots = p_{k,i} = P_i/M_t$ ,所以式(3)可以写为

$$\gamma_{k,i} = \frac{G P_i^2 h_{k,i}^2}{M_t \sigma^2 + \sum_{j \neq i} P_j h_{k,j}^2} \quad (5)$$

这个收益函数可以看作是归一化吞吐量的功率效率,其单位为:比特每秒/赫兹/瓦(bit per second/Hertz/Watt)。文献[3]把代价函数机制引入到 CDMA 非合作功率控制博弈中去,以获得性能改善(帕雷托改善)。本文也引入了代价函数机制:

$$u_i^c = \frac{\sum_{k=1}^{M_t} \log_2 M_{k,i} f(\gamma_{k,i})}{P_i} - x_i P_i \quad (6)$$

本文采用两种代价函数:  $x_i = t$  和  $x_i = t h_i$ , 其中  $t$  是一个正标量,  $h_i = \sum_{k=1}^{M_t} h_{k,i}^2$ 。

### 3 MIMO-CDMA 系统中的非合作功率控制博弈

本文用  $G = [N, \{A_i\}, \{u_i(\bullet)\}]$  表示非合作 MIMO 功率控制博弈(NMCPG),其中  $N = \{1, 2, \dots, N\}$  为小区内现有的用户序号集合。第  $i$  个用户的发射功率策略为  $P_i$ , 且  $P_i \in A_i$ , 其中  $A_i$  表示第  $i$  个用户的策略空间。用矢量  $\mathbf{P} = (P_1, \dots, P_N)$  表示博弈的结果,形式为各用户选择的发射功率值。用  $P_{-i}$  表示  $\mathbf{P}$  中除了用户  $i$  以外的其它所有矢量元素。而除了用户  $i$  以外的策略空间为  $A_{-i}$ 。

联系第 2 节的分析,给出如下两种博弈模型,它们具有相同的参与人空间和策略空间,但是收益函数不同。

第 1 个博弈用  $G_1$  表示,它以式(4)为基础,其收益函数为

$$G_1 : \max_{P_i \in A_i} \left\{ u_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \sum_{k=1}^{M_t} \log_2 M_{k,i} f(\gamma_{k,i}) / P_i \right\}, \quad \text{对所有的 } i \in N \quad (7)$$

第 2 个博弈用  $G_2$  表示, 它以式(4)为基础, 其收益函数为

$$G_2 : \max_{P_i \in A_i} \left\{ u_{2i}(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{\sum_{k=1}^{Mt} \log_2 M_{k,i} f(\gamma_{k,i})}{P_i} - x_i P_i \right\},$$

对所有的  $i \in N$  (8)

设用户的策略空间  $A_i$  是紧凸集, 且  $A_i = [P_i, \bar{P}_i]$ , 其中  $\bar{P}_i$  和  $P_i$  分别表示最大和最小的总发射功率限制值。在这两个博弈中, 假设各用户, 即博弈参与人是理性自私的。各用户总是选择最佳的发射功率策略来最大化他们的收益。当其它用户的策略给定时, 本文可以找到一个使用户满意的发射功率策略, 通常这被称为均衡态。

#### 4 纳什均衡

在非合作博弈模型里最为广泛应用的解就是纳什均衡。纳什均衡是一种策略组合, 它使得每个参与者的策略是对其它参与者策略的最优反应, 任何参与者单独改变策略, 其收益都会受损。下面, 本文分析本文设计的博弈模型的纳什均衡。

**定义 1** 考虑一个一般的博弈  $G = [N, \{A_i\}, \{u_i(\bullet)\}]$ , 其策略空间为对所有的  $i$  都有  $P_i \subset \mathcal{R}$ , 当  $u_i(P_i, \mathbf{P}_{-i})$  在  $(P_i, \mathbf{P}_{-i})$  上具有递增差异时, 或者说, 当且仅当对任意的  $j \neq i$ , 有  $\partial^2 u_i(\mathbf{P}) / \partial P_i \partial P_j \geq 0$ , 则  $G$  是超模的。

**定理 1** 在合适的策略空间  $A_i = [P_i, \bar{P}_i]$  下, 博弈  $G_1, G_2$  均是超模博弈。

**证明** 首先考虑博弈  $G_1$ , 由式(7)得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{1i}}{\partial P_i} &= \frac{1}{P_i^2} \left[ \sum_{k=1}^{Mt} \log_2 M_{k,i} \left( \gamma_{k,i} \frac{df(\gamma_{k,i})}{d\gamma_{k,i}} - f(\gamma_{k,i}) \right) \right] \quad (9) \\ \frac{\partial^2 u_{1i}}{\partial P_i \partial P_j} &= \frac{1}{P_i^2} \left[ \sum_{k=1}^{Mt} \log_2 M_{k,i} \left( \frac{\partial \gamma_{k,i}}{\partial P_j} \frac{df(\gamma_{k,i})}{d\gamma_{k,i}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \gamma_{k,i} \frac{\partial \gamma_{k,i}}{\partial P_j} \frac{d^2 f(\gamma_{k,i})}{d\gamma_{k,i}^2} - \frac{df(\gamma_{k,i})}{d\gamma_{k,i}} \frac{\partial \gamma_{k,i}}{\partial P_j} \right) \right] \\ &= \frac{1}{P_i^2} \left[ \sum_{k=1}^{Mt} \log_2 M_{k,i} \left( \gamma_{k,i} \frac{\partial \gamma_{k,i}}{\partial P_j} \frac{d^2 f(\gamma_{k,i})}{d\gamma_{k,i}^2} \right) \right] \quad (10) \end{aligned}$$

从式(5)得

$$\frac{\partial \gamma_{k,i}}{\partial P_j} = - \frac{G h_{k,i} h_{k,j} P_i}{\left( M t \sigma^2 + \sum_{j=i}^N h_{k,j} P_j \right)^2} \leq 0, \quad j \neq i \quad (11)$$

所以, 只要  $d^2 f(\gamma_{k,i}) / d\gamma_{k,i}^2 \leq 0$ , 就可以证得对所有的, 有  $\partial^2 u_{1i} / \partial P_i \partial P_j \geq 0$ 。假设存在着一个由  $d^2 f(\gamma_{k,i}) / d\gamma_{k,i}^2 \leq 0$  推导出来的  $P_i$ , 且  $0 < P_i < \bar{P}_i$ , 能够保证对所有的  $j \neq i$ , 有  $\partial^2 u_{1i} / \partial P_i \partial P_j \geq 0$ 。所以, 本文得出结论: 当策略空间  $A_i = [P_i, \bar{P}_i]$  中的  $P_i$  能够保证  $d^2 f(\gamma_{k,i}) / d\gamma_{k,i}^2 \leq 0$ , 且  $0 < P_i < \bar{P}_i$ , 则博弈  $G_1$  为超模博弈。采用相同的方法可以证

明博弈  $G_2$  也是超模博弈, 因为对博弈  $G_2$  有:

$$\frac{\partial u_{2i}}{\partial P_i} = \frac{1}{P_i^2} \left[ \sum_{k=1}^{Mt} \log_2 M_{k,i} \left( \gamma_{k,i} \frac{df(\gamma_{k,i})}{d\gamma_{k,i}} - f(\gamma_{k,i}) \right) \right] - x_i \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 u_{2i}}{\partial P_i \partial P_j} = \frac{\partial^2 u_{1i}}{\partial P_i \partial P_j} \quad (13)$$

以下定理保证了超模博弈纳什均衡的存在性和唯一性, 并且给出了获得均衡的算法。

**定理 2** 超模博弈的纳什均衡集合为非空的<sup>[3]</sup>。

定义最优响应为:

$$BR(\mathbf{P}_{-i}) = \{P_i \in A_i : u_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) \geq u_i(P_i', \mathbf{P}_{-i}) \forall P_i' \in A_i\}.$$

**定理 3** 设对于所有的  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $A_i$  是紧凸且下半连续的, 并具有可测量性。另外, 设对每一个  $i = 1, 2, \dots, N$ , 都有对所有的  $P_j \in A_j, j \neq i, BR(\mathbf{P}_{-i}) > 0$ 。这样一来, 纳什均衡就是唯一的, 且通用更新算法(GUA)能够单调收敛到一个均衡点上, 而不论其初始值为多少。

文献[14]给出了通用更新算法的定义。由定理 2 和定理 3 可以得到以下推论:

**推论 1** 博弈  $G_1, G_2$  均具有唯一的纳什均衡, 且通用更新算法能够以任意初始值收敛到纳什均衡点上。

现在, 可以得出结论: 本文所建立的博弈  $G_1, G_2$  都具有唯一的纳什均衡。下面, 本文给出一种能够收敛到博弈纳什均衡点的非同步功率控制算法。在这个算法里, 各用户采用与文献[3]中类似的方式来更新其发射功率。设各用户在下列时刻  $T_i = \{t_{i1}, t_{i2}, \dots\}$  更新自己的发射功率, 其中  $t_{il} < t_{i,l+1}$ , 且  $t_{i0} = 0, i \in N$ 。令  $T = \{t_1, t_2, \dots\}$ , 且  $T = T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_N, t_l < t_{l+1}$ 。令  $\underline{P}, \bar{P}$  分别表示策略空间 A 中最小和最大的策略向量。

**算法 1** 考虑一个非合作 MIMO-CDMA 功率控制博弈采用如下方式产生一组功率向量:

(1) 在  $t = 0$  时刻, 令  $\mathbf{P}(0) = \underline{P}$ , let  $l = 1$ ;

(2) 对所有的  $i \in N, t_l \in T_i$ : 给定  $\mathbf{P}(t_{l-1})$ , 然后计算  $r_i(t_l) = \arg \max_{P_i \in P_i} u_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}(t_{l-1}))$  并令  $P_i(t_l) = \min(r_i(t_l), P_{\max})$

(3) 如果  $\mathbf{P}(t_l) = \mathbf{P}(t_{l-1})$ , 则停止运算, 并声明纳什均衡向量为  $\mathbf{P}(t_l)$  否则令  $l = l + 1$ , 同时跳到 2。

实际上根据式(7)可得, 对博弈有:

令

$$\frac{\partial u_{1i}}{\partial P_i} = \frac{1}{P_i^2} \left[ \sum_{k=1}^{Mt} \log_2 M_{k,i} \left( \gamma_{k,i} \frac{df(\gamma_{k,i})}{d\gamma_{k,i}} - f(\gamma_{k,i}) \right) \right] = 0 \quad (14)$$

则可求得一个最优的  $\gamma_{k,i}^{(1)*}$ , 所以对博弈  $G_1$  有:

$$\begin{aligned} r_i(t_l) &= \arg \max_{P_i \in P_i} u_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}(t_{l-1})) \\ &= \gamma_{k,i}^{(1)*} \left( \frac{M t \sigma^2 + \sum_{j=i}^N P_j(t_{l-1}) h_{k,j}^2}{G h_{k,i}^2} \right) \quad (15) \end{aligned}$$

同理, 根据式(8)可得, 对博弈  $G_2$  在  $t_i$  时刻有:

$$r_i(t_i) = \arg \max_{P_i \in \mathcal{P}_i} u_i(P_i, P_{-i}(t_{i-1}))$$

$$= \gamma_{k,i}^{(2)*} \left[ \frac{Mt\sigma^2 + \sum_{j \neq i}^N P_j(t_{i-1})h_{k,j}^2}{Gh_{k,i}^2} \right] \quad (16)$$

若令

$$I_i(t_i) = \frac{Mt\sigma^2 + \sum_{j \neq i}^N P_j(t_{i-1})h_{k,j}^2}{Gh_{k,i}^2} \quad (17)$$

则博弈  $G_1, G_2$  的功率更新公式可以写为:

$$\text{博弈 } G_1: P_i(t_i) = \min(I_i(t_i)\gamma_{k,i}^{(1)*}, P_{\max}) \quad (18)$$

$$\text{博弈 } G_2: P_i(t_i) = \min(I_i(t_i)\gamma_{k,i}^{(2)*}, P_{\max}) \quad (19)$$

下面, 给出分布式的功率控制算法, 使得博弈  $G_1, G_2$  能够获得纳什均衡。

**算法 2**

(1)初始化;

(2)在基站端获取  $t_i$  时刻的信道状态信息并做相应处理, 即根据式(15)到式(16)算出  $I_i(t_i)$  和  $\gamma_{k,i}^{(1)*}$  或  $\gamma_{k,i}^{(2)*}$ , 然后把相关的信息  $I_i(t_i)$  和  $\gamma_{k,i}^{(1)*}$  或  $\gamma_{k,i}^{(2)*}$  反馈给对应的用户。

(3)在每个用户终端执行算法 1, 并以此在所设计收益函数(式(7)和式(8))以及式(18)和式(19)的基础上获得纳什均衡。

**5 数值仿真分析**

考虑一个单小区无线数据 MIMO-CDMA 系统。该系统具有稳定的 9 个用户, 固定的大小, 无前向差错控制,  $Mt = Mr = 4$ , 用户与基站的距离为:  $d = [260, 330, 450, 560, 660, 800, 900, 950, 1000]$  m, 采用了非相关频移键控(Non-coherent FSK),  $BER = e^{-0.5\gamma}$ 。本文没有采用 CDMA 实际系统中常用的 QPSK 调制, 这是为了便于仿真, 并不影响对算法性能的分析。实际上, 不论采用什么调制方式, 本文的算法都是通用的, 只不过不同的调制方式具有不同的误码率 BER 公式。设分组大小为:  $L = 80\text{bit}$ , 接收噪声(AWGN)功率为  $\sigma^2 = 5 \times 10^{-15}$  W, 各用户的最大功率限制均为:  $\bar{P}_i = 2$  W。另外, 设  $\alpha = 3.6, c = 0.097, G = 100$ , 各用户采用相同的代价函数。

本文通过算法 1 和算法 2 获得博弈  $G_1, G_2$  和博弈  $G_2$  采用链路代价函数(博弈 PGP)的纳什均衡总发射功率和收益。其中, 博弈  $G_2$  采用的是线性代价函数:  $t = 1 \times 10^8$ , 博弈 PGP 的代价函数为  $x_i = th_i = (0.6 \times 10^8)h_i$ , 仿真结果见图 1 和图 2。图 1 给出了在获得纳什均衡时博弈  $G_1, G_2, PGP$  的收益比较。而图 2 则给出了相对应的纳什均衡策略, 即均衡发射功率值。图 1 和图 2 都表明本文设计的博弈能够收敛到一个稳定的均衡点。且距离基站近的用户比距离基站远的用户具有更高的收益和更低的总发射功率。另外, 由图可见, 博弈  $G_2$  的结果与  $G_1$  的结果相比, 各用户的收益都得到了大幅

提高, 同时各用户的均衡发射功率更低。这意味着, 采用代价函数在 MIMO-CDMA 系统中仍然更为有效。从图 3 可见博弈  $G_1$  中的各用户会得到相同的信干噪比值, 采用线性代价函数的博弈  $G_2$  却是距离基站近的用户信干噪比值相对较高, 且与博弈  $G_1$  相比, 各用户的信干噪比值表现为, 距离基站越远下降得就越厉害。这说明博弈  $G_2$  是让距离基站越远的用户做更多的让步, 从而换得所有用户收益的提高, 这同时也表明博弈  $G_2$  是不够公平的。但是, 从图 3 发现采用链路代价函数后, 在与博弈  $G_1$  具有相当的收益时, 其公平性(主要是指信干噪比值)比采用线性代价函数的博弈  $G_2$  得到了改善。对此现象的解释是, 当采用链路代价函数时, 距离基站近的用户想要增加发射功率来提高自己的信干噪比时, 将要付出更多的代价, 这显然在一定程度上促使了更为公平的资源利用。由于链路代价函数仅仅利用了反馈回来的已知量(链路增益值), 所以链路代价函数的运算复杂度并没有比线性代价函数增加多少。可见, 在适当增加反馈开销的情况下, 链路代价函数比线性代价函数具有更好的性能。图 4 给出了总吞吐量随用户数变化的情况, 假设所有用户均距离基站 300m。由图可知, 采用博弈方式的功率控制, 其总吞吐量比没有功率控制时高, 尤其是随着用户数的增加, 其差距越来越明显。这表明, 当用户数增加时, 如果不进行有效的功率控制, 则用户间的干扰将会极大的影响系统的总体性能, 而本文设计的功率控制则能够抑制用户间干扰, 提高系统容量。

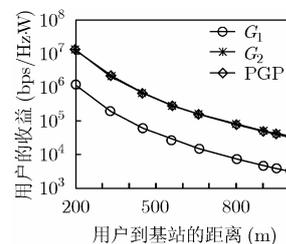


图 1 各博弈的收益比较

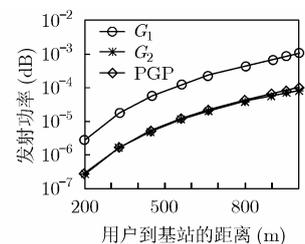


图 2 各博弈的发送总功率比较

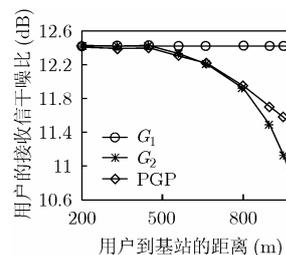


图 3 获得纳什均衡时各博弈的收益比较

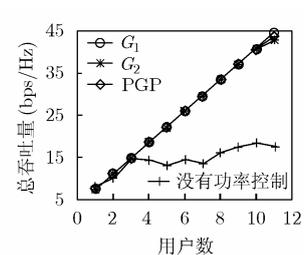


图 4 各功率控制博弈及没有功率控制的总吞吐量比较

**6 结束语**

本文研究了无线数据 MIMO-CDMA 系统中的非合作功率控制博弈。本文采用收益函数来反映数据用户的服务质量(QoS)要求。在非合作功率控制博弈中, 各用户都是理性自私的, 他们只考虑如何使自己的收益最大化。本文推导证明了博弈纳什均衡的存在性和唯一性, 并给出了获得纳什均衡的算法。仿真结果表明, 所有的博弈都能够获得纳什均衡

策略,即能够用很低的发射功率获得高收益。具有代价函数的博弈比没有代价函数的博弈,具有更好的性能。而采用链路代价函数,又可以比线性代价函数更为公平。当然与没有功率控制的情况相比,所有的非合作功率控制博弈,都具有更好的性能。

### 参 考 文 献

- [1] Liu C H. Low-complexity Performance Optimization for MIMO CDMA Systems. IEEE WNCN, New Orleans, LA USA, Mar. 2005, 1: 280-285.
- [2] Mackenzie A B and Wicker S B. Game theory in communications: motivation, explanation, and application to power control. IEEE GLOBECOM, San Antonio, Texas, Nov. 2001: 25-29.
- [3] Saraydar C, Mandayam N B, and Goodman D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(2): 291-303.
- [4] Goodman D and Mandayam N. Power control for wireless data. *IEEE Personal Commun Mag.*, 2000, 7(4): 48-54.
- [5] Sung C and Wong W. A Noncooperative power control game for multirate CDMA data networks. *IEEE Trans. on Commun.*, 2003, 2(1): 186-199.
- [6] Xiao M, Shroff N B, and Chong E K P. A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems. *IEEE/ACM Trans.on Networking*, 2003, 11(2): 210-221.
- [7] Alpcan T, Basar T, and Srikant R. CDMA uplink power control as a Noncooperative game. *Wireless Networks*, 8(4): 659-670.
- [8] Ji H and Huang C Y. Non-cooperative uplink power control in cellular radio systems. *Wireless Networks*, 1998, 7(12): 861-874.
- [9] Yu W, Rhee W, Boyd S, and Cioffi J M. Iterative water-filling for gaussian vector multiple access channels. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2004, 50(1): 145-152.
- [10] Palomar D P, Cioffi J M, and Lagunas M A. Uniform power allocation in MIMO channels: A game-theoretic approach. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2003, 49(7): 1707-1727.
- [11] Ye S and Blum R S. Optimized signaling for MIMO interference systems with feedback. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(11): 2839-2848.
- [12] Agustin A, Munoz O, and Vidal J. A game theoretic approach for cooperative MIMO schemes with cellular reuse of the relay slot. IEEE ICASSP, Montreal, Quebec, Canada, May 2004, 4: 581-584.
- [13] Catreux S, Driessen P F, and Greenstein L J. Data throughputs using multiple-input multiple-output (MIMO) techniques in a noise-limited environment. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2002, 1(4): 226-234.
- [14] Altman E and Altman Z. S-Modular games and power control in wireless networks. *IEEE Trans. on Automat. Contr.*, 2003, 48(5): 839-842.

钟 卫: 男, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为 B3G 移动通信关键技术、无线资源管理、博弈论在无线通信中的应用。  
徐友云: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信、战术无线通信网、信道编码与调制、网络信息论、B3G 移动通信技术等。  
蔡跃明: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信、信号处理、B3G 移动通信技术等。