

## 多用户 MIMO 系统中的一种基于博弈论的功率控制

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** 多输入多输出(MIMO)系统是未来移动通信热点技术之一。单小区多用户 MIMO 多接入系统性能受限于同信道干扰。该文提出了采用博弈论的分析方法,对系统进行分布式功率控制,优化系统资源配置。仿真结果表明,该文建立的非合作博弈模型是合理的,而分布式功率控制算法也是有效可行的。

**关键词** 无线通信,多输入多输出,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(2006)08-1368-05

## Power Control Based on Game Theory for Multiuser MIMO System

Zhong Wei Xu You-yun Cai Yue-ming

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

**Abstract** Multiple-input and Multiple-output (MIMO) is a hot mobile communication technology in future. Single cell multiple user MIMO system is interference-limited by cochannel. The contribution of this paper is: game theory is used to analyse the MIMO multiuser system, and a distributed power control algorithm is given to optimize the system resource. The simulation results show that the noncooperative game model is reasonable. And the power control algorithm is found to give a significant performance improvement for the MIMO system when compared with the system without power control.

**Key words** Wireless communication, Multiple-input Multiple-output, Power control, Game theory, Noncooperative game, Utility function

### 1 引言

功率控制在多用户的干扰受限无线通信系统中起着非常重要的作用。它可以降低用户间干扰,提高系统容量;同时,还可以提高功率效率,节省能量,延长电池寿命。我们知道,在干扰受限系统中,用户的性能不仅与自己的发射功率有关,同时,还受到其它用户的影响。对于这种系统,可以利用博弈论的分析方法,进行分布式功率控制,从而优化系统资源的利用。文献[1]研究了 CDMA 系统中的博弈功率控制,它对博弈收益函数进行了巧妙设计,还引入了代价机制来提高系统性能,并且得到了非常有效的分布式功率控制算法。这使我们认识到,博弈论作为分析利益冲突的工具,能够很好地解决干扰受限的系统中的分布式优化问题。文献[2]研究了数字用户线 DSL 的博弈功率控制。它们的结果表明,基于博弈论的分布式功率控制是有效可行的。于是,我们考虑将其算法引入到多用户多输入多输出(MIMO)系统中。

多输入多输出(MIMO)系统能够有效地提高无线网络的容量和性能,因而受到极大关注。然而,现在针对MIMO系统功率控制(分配)的研究,大多都集中在如何优化设计各天线的功率上,而结合考虑优化设计总发射功率的研究还非常

少<sup>[3-9]</sup>。其中,文献[3]研究了多用户MIMO系统中获取最大多接入和容量的功率分配策略,并指出采用迭代功率注水算法可以得到最优的性能。这种功率注水算法只考虑如何达到最大MIMO多接入和容量,并没有考虑系统的功率效率的问题。而实际上,功率效率是我们非常关心的一个问题。尤其是随着多媒体等多种业务的展开,如何有效节省电量,延长终端电池寿命,是非常重要的。而且,低发送功率可以有效降低移动终端对人体的辐射,有利于人体健康。文献[4]指出,在多用户MIMO系统中,当用户间的干扰变得足够大时,系统互信息率将会发生变化,进而影响系统性能。该文也提出可以采用非合作博弈模型来描述干扰MIMO系统,并能够通过迭代功率注水算法获得纳什均衡策略。然而,这篇文献关注的是如何得到最优的发送协方差矩阵。而且,它对MIMO系统非合作博弈模型描述也相对比较简单,其算法也不总是收敛。

本文的贡献是:详细描述了多用户 MIMO 干扰系统的非合作博弈模型,对博弈纳什均衡的存在性做了分析证明,并采用迭代功率注水算法来获得纳什均衡策略。仿真结果表明,迭代功率注水算法具有良好的收敛性。同时,我们在文献[2]的基础上提出了一种针对多用户 MIMO 干扰系统的算法,结合我们建立的非合作功率控制博弈,对多用户 MIMO 干扰系统中进行分布式功率控制,以此有效提高系统的功率效率。

本文内容安排为:第2节给出了基于MIMO多接入系统的非合作博弈模型;第3节析了本文建立的博弈模型,并给出相应的功率控制算法;第4节对算法进行了仿真,并对仿真结果做了分析;第5节对全文做了小结。

## 2 MIMO多接入信道和非合作博弈模型

在单小区蜂窝系统中的MIMO多接入上行链路中,设小区内有 $n$ 个用户,基站有 $N_R$ 根接收天线,各用户均有 $N_T$ 根发送天线。假设MIMO多接入信道为平坦衰落信道,接收端和发送端完全获知信道状态信息(CSI)。则一个MIMO多接入系统框图如图1所示,相应的输入输出关系如下:

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^n \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{z} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ 为接收信号, $\mathbf{H}_i \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$ 为用户 $i$ 到基站的信道矩阵; $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ 为用户 $i$ 的发射信号,假设为零均值,单位协方差的高斯随机变量; $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ 为接收端独立同分布的循环对称复高斯噪声向量。

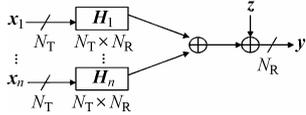


图1 MIMO多接入系统模型

Fig.1 System model of MIMO multi-access channel

对于一个干扰MIMO系统来说,每个用户所接收到的复基带信号向量为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \mathbf{H}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{z}_i \quad (2)$$

同时,设 $\mathbf{x}_i$ 的协方差矩阵为 $\mathbf{S}_i = E\{\mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^H\}$ ,且满足 $\text{tr}(\mathbf{S}_i) = p_i$ 。其中, $p_i$ 为用户 $i$ 的发射功率限制, $\mathbf{z}_i$ 为用户 $i$ 的高斯噪声向量, $\text{tr}(\cdot)$ 表示对矩阵做迹运算。

定义数率 $R_i$ 为用户 $i$ 的互信息率,则

$$R_i = \frac{1}{2} \log \left( \left| \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right| \right) - \frac{1}{2} \log \left( \left| \mathbf{I}_i \right| \right) \quad (3)$$

其中,假设信道带宽为单位带宽, $\mathbf{I}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \mathbf{H}_j \mathbf{S}_j \mathbf{H}_j^T + \mathbf{z}$ 为其它用户对用户 $i$ 的干扰。

### 2.1 博弈论简介

博弈论(Game theory)是使用严谨数学模型来解决现实世界中的利害冲突的理论,又称对策论。换句话说是一门研究精明理智的决策者之间的冲突和合作(亦即利害关系)的数学模型的理论。它是一门交互式的决策理论,分析冲突的理论。

博弈问题有5个要素:局中人,局中人的可行方案集,局中人决策的先后顺序,局中人的收益函数,信息。一个策略式博弈由3种元素组成:局中人集合( $N$ -player);策略集合(Action);收益函数( $u(\cdot)$ )。表示如下: $G = \{N, A, u\}$ 。其中,收益函数是博弈最后结果中各个局中人利益的表示。

纳什均衡是非合作博弈理论中的一个重要概念。它是一

种策略组合,使得每个局中人的策略是对其它局中人策略的最优反应。其定义如下:一个策略组合 $a$ 是一种纳什均衡,如果对所有的局中人 $i \in N$ , $b_i \in A_i$ 都有: $u_i(a_i, a_{-i}) \geq u_i(b_i, a_{-i})$ 。其中, $a$ 和 $b$ 为不同的策略组合; $-i$ 表示在局中人集合中,除了 $i$ 以外的其他所有局中人。纳什均衡不一定存在,也不具有唯一性。纳什均衡是关于博弈将会如何进行“一致”预测,这就是说,如果所有局中人预测特定纳什均衡会出现,那么没有局中人有动力采用与均衡不同的行动,亦即没有人会单方面地改变策略。

### 2.2 收益函数

传统的信息论认为,在发送端各个用户可以通过各自的编码策略来实现合作,从而使得接收端能够进行干扰消除。如果这种所谓的合作不能够实现,我们就可以把这种干扰信道视为非合作博弈模型。

我们把MIMO系统中用户的互信息率定义为各个用户的收益函数,即

$$u_i = R_i = \frac{1}{2} \log \left( \left| \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right| \right) - \frac{1}{2} \log \left( \left| \mathbf{I}_i \right| \right) \quad (4)$$

其中 $\mathbf{I}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \mathbf{H}_j \mathbf{S}_j \mathbf{H}_j^T + \mathbf{z}$ , $\text{tr}(\mathbf{S}_i) \leq p_i$ , $\mathbf{S}_i \geq 0$ 。 $p_i$ 为用户 $i$ 的发射功率限制, $\mathbf{H}_i$ 为用户 $i$ 的信道增益矩阵, $\mathbf{S}_i$ 为用户 $i$ 发射信号的协方差矩阵, $\mathbf{I}_i$ 为其它用户对用户 $i$ 的干扰, $\mathbf{z}$ 为高斯白噪声。

这个收益函数定义,采用了我们所熟悉的信息论的概念,且考虑了用户间的干扰。每个用户将在博弈过程中,通过改变自己的发送策略,最大化自己的收益。

### 2.3 MIMO系统非合作博弈模型

用 $G = \{N, \{P_i\}, u_i\}$ 表示MIMO系统非合作功率控制博弈模型。其中,系统共有 $n$ 个用户, $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。 $P_i$ 是策略集合,系统中的每个用户都在这个集合中选择一个发送协方差矩阵 $\mathbf{S}_i$ ,即 $\mathbf{S}_i \in P_i$ 。用向量 $\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_n) \in P$ 表示博弈完成时的发送协方差矩阵组合,其中 $P$ 表示所有发送协方差矩阵的组合;用 $u_i(\mathbf{S})$ 表示用户 $i$ 的收益。通常,也用 $u_i(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{-i})$ 来表示用户 $i$ 的收益, $\mathbf{S}_{-i}$ 表示 $\mathbf{S}$ 中去除 $\mathbf{S}_i$ 后的分量,则用户 $i$ 的收益函数为

$$u_i(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{-i}) = \frac{1}{2} \log \left( \left| \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right| \right) - \frac{1}{2} \log \left( \left| \mathbf{I}_i \right| \right) \quad (5)$$

设策略空间 $P_i$ 是紧凸集,且有 $P_i = [p_i, \bar{p}_i]$ , $\text{tr}(\mathbf{S}_i) \geq p_i$ , $\text{tr}(\mathbf{S}_i) \leq \bar{p}_i$ ,其中 $p_i, \bar{p}_i$ 分别为用户 $i$ 的最小发射功率值和最大发射功率值。各用户的策略是相互影响,相互制约的。每个用户的收益取决于该用户自己的策略,以及其他用户此时所选择的策略。

在这个博弈中,各个用户都是理性而且自私的,他们在博弈过程中,只考虑如何最大化自己的收益。于是,可以把这个博弈表示如下:

$$\max_{\mathbf{S}_i \in P_i} u_i(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{-i}), \quad i \in N \quad (6)$$

其中  $P_i$  是用户  $i$  的策略空间, 收益函数  $u_i(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{-i})$  的定义由式(4)给出. 表1给出博弈模型参数及其含义.

研究博弈, 实际上就是研究博弈如何达到均衡. 对于 MIMO 系统的非合作博弈模型, 纳什均衡是研究的要点.

表1 博弈模型参数及其含义

Tab. 1 Parameters of the game and their meanings

符号	系统含义	博弈含义
$N$	用户终端	局中人
$P_i$	发送协方差矩阵集合	策略组合
$u_i(\cdot)$	单位频谱传输的信息比特数	收益函数

#### 2.4 MIMO 系统非合作博弈模型的纳什均衡

关于纳什均衡的存在性有如下定理:

**定理 1 纳什定理** 对于策略博弈  $G = \{N, \{P_i\}, u_i\}$ ,

假设: (1) 所有  $P_i \subseteq R^n$  是非空、紧致、凸集; (2) 所有  $u_i$  是连续而且拟凹的函数; 则此博弈必存在纳什均衡.

我们所建立的 MIMO 系统非合作博弈模型, 其策略空间是符合定理 1 的假设(1)的. 而我们所定义收益函数  $u_i(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{-i}) = \frac{1}{2} \log(|\mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i|) - \frac{1}{2} \log(|\mathbf{I}_i|)$ , 在有限的策略空间里, 其值也是连续且拟凹的(证明见下文), 即符合定理 1 的假设(2). 所以, 由定理 1 可得我们所建立的 MIMO 系统非合作博弈模型一定具有纳什均衡.

下面我们证明收益函数  $u_i(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{-i})$  是连续拟凹的. 首先, 我们介绍几个关于矩阵求导运算的公式<sup>[5]</sup>:

$$\frac{d}{dx} \text{tr}(\mathbf{A}) = \text{tr}\left(\frac{d\mathbf{A}}{dx}\right) \quad (7)$$

$$\frac{d}{dx} \ln \det(\mathbf{A}) = \text{tr}\left(\mathbf{A}^{-1} \frac{d\mathbf{A}}{dx}\right) \quad (8)$$

$$\frac{d}{dx} \mathbf{A}^{-1} = -\mathbf{A}^{-1} \frac{d\mathbf{A}}{dx} \mathbf{A}^{-1} \quad (9)$$

假设  $\mathbf{S}_i = t\mathbf{Z}_i + (1-t)\mathbf{X}_i = \mathbf{X}_i + t\mathbf{Y}_i$ ,  $\mathbf{Y}_i = \mathbf{Z}_i - \mathbf{X}_i$ . 其中,  $\mathbf{X}_i \geq 0$ ,  $\mathbf{Y}_i \geq 0$ ,  $\mathbf{Z}_i \geq 0$ ,  $0 \leq t \leq 1$ .

要证明  $u_i(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{-i}) = R_i = \frac{1}{2} \log(|\mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i|) - \frac{1}{2} \log(|\mathbf{I}_i|)$  是关于  $\mathbf{S}_i$  的拟凹函数, 就是要证明:

$$\frac{d^2}{dt^2} u_i \leq 0 \quad (10)$$

利用式(7)–式(9), 可得

$$\begin{aligned} \frac{du_i}{dt} &= \frac{1}{2 \ln 2} \text{tr} \left[ \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right)^{-1} \frac{d}{dt} \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right) - \mathbf{I}_i^{-1} \frac{d\mathbf{I}_i}{dt} \right] \\ &= \frac{1}{2 \ln 2} \text{tr} \left[ \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right)^{-1} \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \frac{d\mathbf{I}_i}{dt} \right) - \mathbf{I}_i^{-1} \frac{d\mathbf{I}_i}{dt} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

因为,  $\frac{d\mathbf{I}_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{H}_j \mathbf{S}_j \mathbf{H}_j^T + \mathbf{z} \right) = 0$ , 所以, 上式可写为

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{2 \ln 2} \text{tr} \left[ \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right)^{-1} \left( \mathbf{H}_i \mathbf{Y}_i \mathbf{H}_i^T \right) \right] \quad (12)$$

由式(12)可得

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u_i}{dt^2} &= \frac{1}{2 \ln 2} \text{tr} \left[ \frac{d \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right)^{-1}}{dt} \left( \mathbf{H}_i \mathbf{Y}_i \mathbf{H}_i^T \right) \right. \\ &\quad \left. + \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right)^{-1} \frac{d \left( \mathbf{H}_i \mathbf{Y}_i \mathbf{H}_i^T \right)}{dt} \right] \\ &= \frac{1}{2 \ln 2} \text{tr} \left[ - \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right)^{-1} \right. \\ &\quad \left. \cdot \frac{d \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right)}{dt} \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right)^{-1} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

由  $\mathbf{S}_i \geq 0$ ,  $\mathbf{X}_i \geq 0$ ,  $\mathbf{Y}_i \geq 0$ ,  $\mathbf{Z}_i \geq 0$ , 可知,  $\frac{d^2}{dt^2} u_i \leq 0$ . 所以收益函数  $u_i(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{-i})$  是连续且凹的. 同时, 因为一个凹函数一定是拟凹函数<sup>[10]</sup>, 所以收益函数也是拟凹的. 证毕

### 3 功率控制算法

文献[3]给出的功率分配算法, 即迭代功率注水算法, 可以获得 MIMO 系统的最大和容量, 而且这个算法具有良好的收敛性. 但是, 这个算法是对各用户的天线进行最优功率分配, 而没有对各用户的发射功率进行优化, 因此其功率效率不高. 同时, 这个算法的结果也是不公平的: 信道质量好的用户性能好, 信道质量差的用户性能就差.

文献[2]针对 DSL 的特点, 提出了基于非合作博弈理论的功率控制算法. 这个算法是分布式的, 且它能在最大化数据传输速率和最小化干扰间找到一个平衡, 同时也实现了对功率和频率资源的优化配置.

联合上述两种算法, 得到能够使 MIMO 系统的非合作博弈收敛到纳什均衡的算法. 让各个用户轮流更新他的发射功率策略, 直到纳什均衡出现为止. 这个算法描述如下:

**算法 1** 对于一个  $n$ -用户 MIMO 系统, 假设所有用户的总发射功率上限为  $P_{\max}$ , 下限为 0, 即  $P_i = [0, P_{\max}]$ . 设  $T_i$  为用户  $i$  的目标传输速率. 我们的功率控制算法如下:

- (1) 在  $t=0$  时刻, 初始化功率向量  $\mathbf{p}(0) = \underline{\mathbf{p}}$ ,  $\mathbf{S}_i = \mathbf{0}$ ;
- (2) 给定初始目标吞吐量值:  $T_i = T_i^0$ ;
- (3) Repeat

Save all data as data\_pre;

Repeat

For  $i=1$  to  $n$

$$\mathbf{I}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{H}_j \mathbf{S}_j \mathbf{H}_j^T + \mathbf{z};$$

$$\mathbf{S}_i = \arg \max_s u_i(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{-i})$$

$$= \arg \max_s \left[ \frac{1}{2} \log(|\mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i|) - \frac{1}{2} \log|\mathbf{I}_i| \right];$$

$$u_i = \frac{1}{2} \log \left( \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{I}_i \right) - \frac{1}{2} \log \left( \mathbf{I}_i \right);$$

End

Until the desired accuracy is reached.

For  $i=1$  to  $n$ ,

If  $u_i > T_i + \varepsilon$ , set  $p_i = p_i - \delta$ .

If  $u_i < T_i$ , set  $p_i = p_i + \delta$ .

If  $p_i > P_{\max}$ , set all data as data\_pre, break..

End

Until  $u_i > T_i$ , for all  $i$

- (4) If  $p_i < P_{\max}$ , for all  $i$ , set  $T_i = T_i + \eta$ , goto (3);  
Else End.

其中  $\mathbf{S}_o$  表示发送策略更新前用户  $i$  的发送协方差矩阵。算法 1 中第(3)步有两个循环, 第 1 个循环是一个迭代功率注水过程, 它使得各用户在各自的天线上最优的分配功率, 同时也能够使我们所建立的 MIMO 系统非合作博弈达到纳什均衡。第 2 个循环则是各用户寻找一个合适的总发射功率的过程。这与文献[2]中的算法类似。另外, 在算法 1 中, 我们规定只要有用户的发射功率均达到或超过了最大发射功率限制时, 就结束运算, 同时以各用户前一次的运算结果作为输出, 这保证算法 1 总能够收敛。而这个算法收敛时得到的发送协方差矩阵集合, 就是博弈的纳什均衡策略。

#### 4 数值仿真与分析

考虑典型的市郊蜂窝传播环境, 移动台附近存在着富局部散射体, 因而基站天线有一定的相关性。根据文献[11],

可以得到 MIMO 系统的信道矩阵为  $\mathbf{H} = \sum_{l=0}^{L_p-1} \mathbf{R}_l^{1/2} \mathbf{H}_w$ , 其中, 假设信道存在  $L_p$  个散射簇, 同一簇散射体发出的路径有相同的时延, 不同簇的信道矩阵非相关。设第  $l$  簇散射体有相同的平均到达角(AOA)  $\bar{\theta}_l$ , 实际到达角为  $\theta_l = \bar{\theta}_l + \hat{\theta}_l$ ,  $\hat{\theta}_l \sim N(0, \delta_l^2)$ ,  $\delta_l$  称为小角度扩展, 路径增益为  $g_l^2$ 。所有簇的  $\bar{\theta}_l$  的均值  $\bar{\theta}$  称为大角度扩展。基站天线相对间距为  $\Delta = d/\lambda_w$ ,  $\lambda_w$  为载波波长, 则接收天线间相关矩阵定义为

$$[\mathbf{R}_l]_{a,b} = g_l^2 e^{-j2\pi(b-a)\Delta \cos(\bar{\theta}_l)} e^{-(1/2)(2\pi(b-a)\Delta \sin(\bar{\theta}_l)\delta_l)^2},$$

$$a, b = 1, \dots, M \quad (14)$$

假设每个用户都具有相同的发射总功率限制, 且具有相同的接收天线和发送天线和相同的目标传输速率。具体的目标传输速率值由算法 1 而定。仿真中, 我们人为地给出了目标传输速率的初始值, 它可以保证各用户一开始都能顺利进行通信。具体仿真参数见表 2。

表 2 仿真参数

Tabl.2 Simulation parameters

参数名	数值
$N_T \times N_R$	$2 \times 2, 4 \times 4, 8 \times 8$
$n$	2, 4, 8
$P_{\max}$	2W
$T_i^0$	0.5bps
$\eta$	$0.2 * T_i^0$
$\varepsilon$	$0.1 * T_i^0$
$\delta$	$0.25\% * P_{\max}$

图 2, 图 3 中每条曲线表示每个用户的收益值随迭代次数的变化情况。我们可以看到迭代功率算法具有良好的收敛性, 且通常只要迭代两次就基本上收敛了。仿真结果表明, 采用迭代功率注水算法总是可以使用户获得纳什均衡策略。

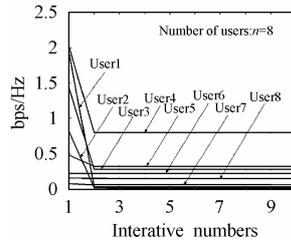


图 2 2x2 MIMO 系统迭代功率算法的收敛性  
Fig.2 Convergence of iterative water-filling algorithm of 2x2 MIMO system

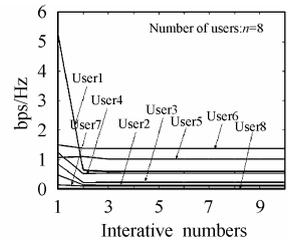


图 3 4x4 系统迭代功率算法的收敛性  
Fig.3 Convergence of iterative water-filling algorithm of 4x4 MIMO system

图 4 至图 9 分别给出了当用户数  $n=2, n=4$  和  $n=8$  时, 本文采用的分布式功率算法的性能。在仿真中, 我们发现在  $2 \times 2, 4 \times 4$  和  $8 \times 8$  MIMO 系统中, 本文的功率控制算法都能够显著地提高系统的功率效率。

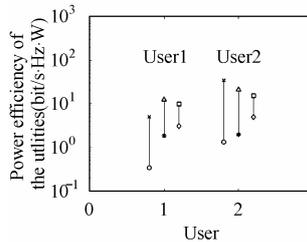


图 4  $n=2$  时的收益功率效率图  
Fig.4 Power efficiency of the utilities when  $n=2$

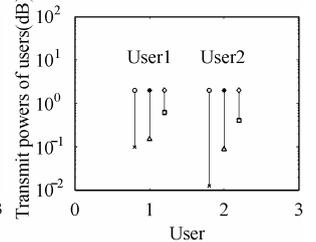
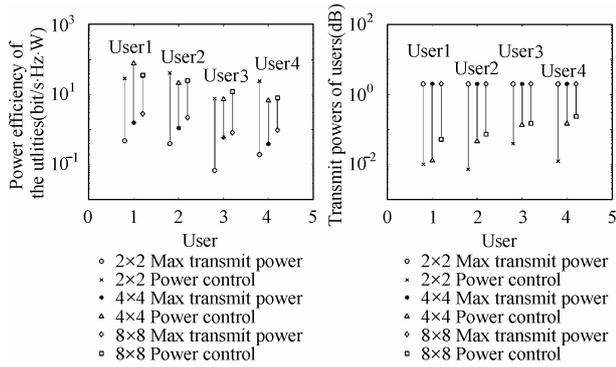
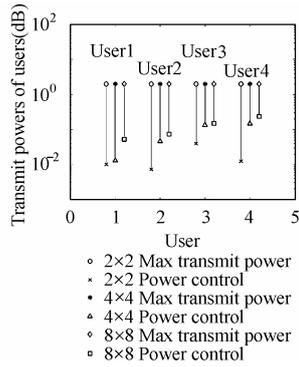
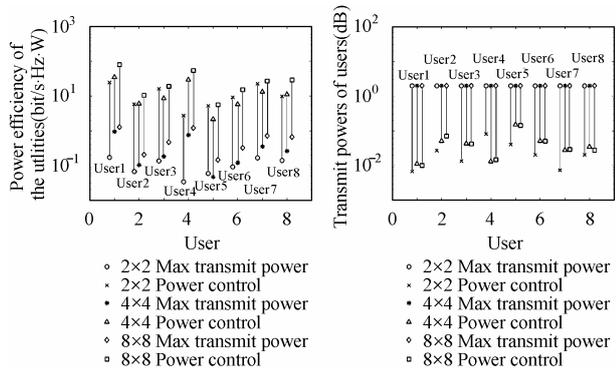
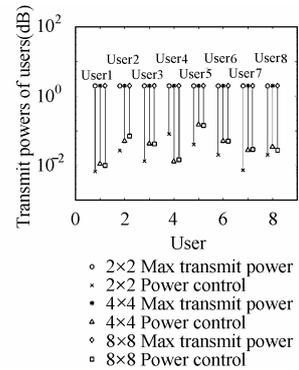


图 5  $n=2$  时的发射功率图  
Fig.5 Transmit powers when  $n=2$

图 6  $n=4$  时的收益功率效率图Fig.6 Power efficiency of the utilities when  $n=4$ 图 7  $n=4$  时的发射功率图Fig.7 Transmit powers when  $n=4$ 图 8  $n=8$  时的收益功率效率图Fig.8 Power efficiency of the utilities when  $n=8$ 图 9  $n=8$  时的发射功率图Fig.9 Transmit powers when  $n=8$ 

从上述结果中, 可以看到, 本文的分布式功率控制算法, 具有良好的收敛性, 且能明显提高系统的功率效率, 减少了不必要的能量浪费。

## 5 结束语

本文采用了非合作博弈模型, 来描述 MIMO 多接入干扰信道, 并对博弈模型进行了分析说明, 证明了该博弈具有纳什均衡。在此基础上, 结合迭代功率注水和文献[2]中的分布式功率控制算法, 提出了一种针对 MIMO 多接入干扰信道的分布式功率控制算法, 并对算法进行了数值仿真与分析。我们发现, 该算法具有良好的收敛性, 与没有功率控制的情况相比, 系统功率效率显著提高。我们今后的工作是研究采用更合适的非合作博弈模型来描述 MIMO 多接入干扰系统, 从而得到针对 MIMO 系统的更有效的资源管理方案。

## 参考文献

- [1] Saraydar C, Mandayam N B, Goodman D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(2): 291–303.
- [2] Yu W, Ginis G, Cioffi J M. Distributed multiuser power control for digital subscriber lines. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 2002, 20(5): 1105–1115.
- [3] Yu W, Ginis G, Cioffi J M. Iterative water-filling for Gaussian vector multiple access channels. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2004, 50(1): 145–152.
- [4] Catreux S, Driessen P F. Simulation results for an interference-limited multiple-input and multiple-output cellular system. *IEEE Commun. Lett.*, 2000, 4(12): 334–336.
- [5] Ye Sigen, Blum R S. Optimized signaling for MIMO interference systems with feedback. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2003, 51(11): 2839–2848.
- [6] Goldsmith A, Jafar S A, Jindal N, Vishwanath S. Capacity limits of MIMO channels. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 2003, 21(5): 684–702.
- [7] Paulraj A J, Gore D A, Nabar R U, Bölcskei H. An overview of MIMO communications—A key to gigabit wireless. *Proc. IEEE*, 2004, 92(2): 198–218.
- [8] Gesbert D, Shafi M, Shiu D, Smith P J, Naguib A. From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 2003, 21(3): 281–302.
- [9] Yoo T, Goldsmith A J. Capacity and optimal power allocation for fading MIMO channels with channel estimation error. submitted to *IEEE Trans. on Info. Theory*.
- [10] Simon C P, Blume L. *Mathematics for Economists*. New York: W. W. Norton, 1994.
- [11] Bölcskei H, Gesbert D. On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(2): 225–234.

钟卫: 男, 1981年生, 硕士生, 研究方向为 B3G 移动通信技术、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。