

# 块对角化预编码下的用户选择技术

尚 鹏 朱光喜 苏 钢 谭 力

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074) (武汉光电国家实验室 武汉 430074)

**摘 要** 针对下行多用户多天系统(MU-MIMO)的资源分配和用户调度,提出了一种基于遗传算法(GA)的多用户比例公平调度算法,并通过在初始群体中加入具有优秀基因的个体并保持其基因稳定性,加快了遗传算法的收敛性。基站端采用块对角化预编码机制来消除用户间干扰,并在保证用户间速率比例公平的前提下最大化系统吞吐量,在同一时刻选择最优用户集来传输。此外,分析了信道反馈错误对该系统的影响。仿真与分析表明,提出的基本算法与改进算法在公平性和系统的吞吐量方面取得了较好的折中,同时算法复杂度比较低。

**关键词** MIMO,多用户分集,块对角化,比例公平,遗传算法

**中图分类号** TN929 **文献标识码** A

## Multi-user Selection with Block Diagonalization Precoding

SHANG Peng ZHU Guang-xi SU Gang TAN Li

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

**Abstract** For the resource allocation and scheduling of downlink multi-user multiple input multiple output (MU-MIMO) system, a multi-user proportional fair scheduling scheme based on genetic algorithms (GA) was proposed. By adding some good-gene individuals to the initial population and keeping its gene stable, the convergence of GA was greatly accelerated. Specifically, the base station exploited Block Diagonalization (BD) precoding technique to eliminate the inter-user interference. To guarantee the fairness while maintaining the throughput performance, a subset of users was selected to serve at one time slot. Moreover, the impact of feedback error on the channel state information was analyzed. Simulation results show that both schemes can achieve a good tradeoff between fairness and throughput with low computational complexity compared with other scheduling schemes.

**Keywords** MIMO, Multiuser diversity, Block diagonalization, Proportional fairness, Genetic algorithm

## 1 引言

近年来,多用户 MIMO 系统的研究逐渐成为研究热点<sup>[1,2]</sup>。当前信息论研究表明,对于多天系统 MIMO 下行链路,在发射端采用脏纸编码(DPC)可以获得多天系统广播信道的最大和容量<sup>[3,4]</sup>。但脏纸编码以及其他接近容量域边界的次优 MIMO 多用户方案的算法复杂度非常高,难以在实际系统中应用。因此,文献[5-7]提出了一些次优的接近脏纸编码的和容量的线性预编码方案,其中一种简单有效的方法是在发射端采用预编码对信道矩阵进行块对角化。块对角化预编码(BD)的基本思想是每个用户的预编码矩阵均位于其他所有用户的信道矩阵的零空间,完全消除了用户之间的干扰,并将多用户 MIMO 系统转化为多个独立的单用户 MIMO 系统。

在实际系统中,活跃的用户数有可能非常大。而在大部

分多用户 MIMO 系统文献中,下行用户总数一般不超过 30,因此有必要研究用户总数比较大的情况。由于块对角化预编码在同一时刻所能发送的用户数受限于基站发送天线数和用户接收天线数,基站需根据信道状态信息来选取合适的用户发送以获取多用户分集增益。最优的用户集可以通过穷举的搜索算法获得,但其需极大的计算量<sup>[8]</sup>。当用户信道条件比较差时,有可能出于深衰落而长期得不到调度,存在极大的不公平性,本文引入比例公平调度算法来避免该情况<sup>[9]</sup>。由于遗传算法(GA)对规划问题具有较强的最优解搜索能力<sup>[10]</sup>,因此,本文在发射端采用块对角化预编码的 MIMO 系统中,提出了一种次优的基于遗传算法的多用户比例公平调度算法。

本文第 2 节介绍了采用的系统模型及几种用户调度方案。第 3 节详细描述了基于遗传算法的多用户比例公平调度及其改进算法,并分析了信道反馈误差的影响。第 4 节通过

到稿日期:2009-06-08 返修日期:2009-08-14 本文受国际科技合作计划(2008DFA11630),国家自然科学基金项目(60496315)和(60802009),国家“863”重点基金项目(2008AA01Z204)和(2009AA01Z205),湖北省自然科学基金(2007ABA008),博士后基金一等(20070410279)资助。

尚 鹏(1983-),男,博士生,主要研究方向为 MIMO 系统中多用户分集、资源调度、信道反馈等,E-mail:shang158@gmail.com;朱光喜(1945-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带多媒体通信等;苏 钢(1972-),男,副教授,主要研究方向为 MIMO-OFDM 自适应传输技术等;谭 力(1976-),男,讲师,主要研究方向为多用户分集、资源调度等。

仿真对比了几种调度算法并进行了分析。最后是结论。

标识说明:矩阵和矢量用粗体字表明。 $(\cdot)^T$ 和 $(\cdot)^H$ 分别表示转置及 Hermitan 转置。 $rank(\cdot)$ 表示矩阵的秩, $tr(\cdot)$ 表示矩阵的迹。 $CN(\mu, \sigma^2)$ 表示服从均值为 $\mu$ ,方差为 $\sigma^2$ 的复循环对称高斯分布。

## 2 系统模型

在多用户 MIMO 系统下行链路中,假定有  $K$  个用户,如图 1 所示。基站的发送天线数为  $n_t$ ,用户  $k$  的接收天线数为  $n_{r,k}$ 。该系统为准静态平坦衰落, $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{n_{r,k} \times n_t}$  为从基站到用户  $k$  的信道矩阵,其元素为独立同分布的  $CN(0, 1)$  变量。用户  $k$  的发送信号矢量  $\mathbf{x}_k \in \mathbb{C}^{N_k \times 1}$  ( $N_k \leq n_{r,k}$ ) 乘以预编码矩阵  $\mathbf{F}_k \in \mathbb{C}^{n_t \times N_k}$  后由基站天线阵列发出。 $\hat{K}$  表示在同一时刻基站所选取的用户数。用户  $k$  的接收信号可表示为:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \sum_{j=1, j \neq k}^{\hat{K}} \mathbf{H}_k \mathbf{F}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{v}_k \quad k=1 \cdots \hat{K} \quad (1)$$

式中,第二项为其它用户对用户  $k$  所造成的干扰, $\mathbf{v}_k$  为加性高斯白噪声,其协方差矩阵为  $E[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H] = \sigma^2 \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{I} \in \mathbb{C}^{n_{r,k} \times n_{r,k}}$  为单位矩阵。令预编码矩阵  $\mathbf{F}_k = \mathbf{B}_k \mathbf{D}_k$ ,其中  $\mathbf{B}_k$  用来消除用户间干扰, $\mathbf{D}_k$  用来做并行化处理及功率分配。

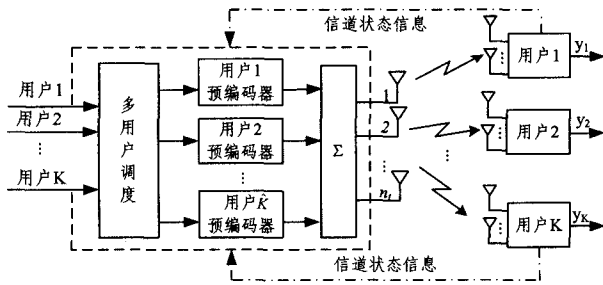


图1 块对角化预编码机制的多用户 MIMO 下行系统框图

为保证各用户的接收信号中没有其他用户的干扰,则要求<sup>[5]</sup>

$$\mathbf{H}_j \mathbf{B}_k = 0 \quad \forall j \neq k \text{ and } 1 \leq j, k \leq \hat{K} \quad (2)$$

即每个用户的预编码矩阵位于其他所有用户的信道矩阵的零空间。令  $\tilde{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_k^T \cdots \mathbf{H}_{k-1}^T, \mathbf{H}_{k+1}^T \cdots \mathbf{H}_{\hat{K}}^T]^T$ , 文献[5]中选择的  $\mathbf{B}_k$  的列向量位于  $\tilde{\mathbf{H}}_k$  的零空间。令  $\tilde{N}_k = rank(\tilde{\mathbf{H}}_k)$ ,  $\tilde{\mathbf{H}}_k$  的奇异值分解为:

$$\tilde{\mathbf{H}}_k = \tilde{\mathbf{U}}_k \tilde{\mathbf{\Lambda}}_k [\tilde{\mathbf{V}}_k^0 \tilde{\mathbf{V}}_k^H]^H \quad (3)$$

式中, $\tilde{\mathbf{U}}_k$ 和 $\tilde{\mathbf{\Lambda}}_k$ 分别为 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的左奇异向量矩阵和奇异值对角矩阵。 $\tilde{\mathbf{V}}_k^0$ 对应前 $\tilde{N}_k$ 个右奇异向量, $\tilde{\mathbf{V}}_k^H$ 对应的后 $(n_t - \tilde{N}_k)$ 右奇异向量构成了 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的零空间的一组标准正交基。因此取 $\mathbf{B}_k = \tilde{\mathbf{V}}_k^0$ ,用户 $k$ 的接收信号简化为:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{eff,k} \mathbf{D}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (4)$$

式中, $\mathbf{H}_{eff,k} = \mathbf{H}_k \mathbf{B}_k$ 看作用户 $k$ 的等效信道矩阵。预编码后的等效多用户信道矩阵为一块对角阵,其效果是将多用户信道块对角化,故称为块对角化预编码。采用块对角化预编码后,可以将所有 $\hat{K}$ 个用户的特征子信道看作等效的单用户 MIMO 系统的特征子信道,因此可采用传统的注水功率算法来最大化系统的容量。 $\mathbf{H}_{eff,k}$ 的SVD分解为:

$$\mathbf{H}_{eff,k} = \mathbf{U}_k \begin{pmatrix} \Sigma_k & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} [\mathbf{V}_k^{(1)} \mathbf{V}_k^{(0)H}]^H \quad (5)$$

式中, $\mathbf{V}_k^{(1)}$ 的列向量为对应非零奇异值的右奇异向量。取 $\mathbf{D}_k = \mathbf{V}_k^{(1)} \mathbf{Q}_k^{1/2}$ ,  $\mathbf{Q}_k$ 为用户 $k$ 的各特征子信道所分配的功率。用户 $k$ 的预编码矩阵表示为:

$$\mathbf{F}_k = \tilde{\mathbf{V}}_k^0 \mathbf{V}_k^{(1)} \mathbf{Q}_k^{1/2} \quad (6)$$

采用块对角化预编码的系统的总速率为:

$$C_{BD} = \log \left| \mathbf{I} + \sum_{k=1}^{\hat{K}} \frac{\mathbf{Q}_k}{\sigma^2} \right| \quad (7)$$

式中, $\Sigma = \text{diag}(\Sigma_1, \dots, \Sigma_{\hat{K}})$ ,  $\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_{\hat{K}})$ 。为了保证预编码矩阵 $\mathbf{F}_k$ 的存在,发送天线数应满足:

$$n_t \geq \sum_{j=1}^{\hat{K}} n_{r,j} \quad (8)$$

因而限定了采用块对角化预编码机制的 MIMO 系统所能支持的最大用户数。本文假定所有用户的接收天线数相等,即 $n_{r,k} = n_r, \forall k$ ,则系统所支持的最大用户数为 $\hat{K} = \lceil n_t / n_r \rceil$ ,其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整操作。定义 $A = \{1 \cdots K\}$ 为系统所有用户集合, $S \in A$  ( $|S| \leq \hat{K}$ )为当前时刻所调度的用户集。

## 3 基于遗传算法的比例公平调度

传统的采用预编码机制的系统主要注重于系统容量的最大化<sup>[5]</sup>,用户的服务质量要求得不到保证,因此本文引入比例公平的概念,在高效率分配资源的同时保障信道条件差的用户的服务质量。

在时隙 $t$ ,基站选择最优的用户集 $S^*$ 发送信号,选择准则定义如下<sup>[9]</sup>:

$$S^* = \underset{S \subseteq A, |S| = \hat{K}}{\text{argmax}} \sum_{k \in S} \left( \frac{R_k(t)}{T_k(t)} \right) \quad (9)$$

式中, $R_k(t)$ 和 $T_k(t)$ 分别表示用户 $k$ 在时隙 $t$ 的瞬时速率和平均速率, $T_k(t)$ 按照下式更新:

$$T_k(t+1) = \begin{cases} (1 - \frac{1}{t_c}) T_k(t) + \frac{1}{t_c} R_k(t), & k \in S^* \\ (1 - \frac{1}{t_c}) T_k(t), & k \notin S^* \end{cases} \quad (10)$$

式中, $t_c$ 为更新窗口大小,度量了算法的记忆。根据式(10)可以明显看出, $t_c$ 越大, $T_k(t)$ 变化越慢,用户平均速率对调度算法影响越小,公平性也越差。当 $t_c = \infty$ 时,比例公平调度退化为最大总速率调度。此外,本文为了与比例公平调度,参考了轮训调度算法。

### 3.1 遗传算法

遗传算法是一类以 Darwin 自然进化论和 Mendel 遗传变异理论为基础的求解复杂全局优化问题的仿生学概率性迭代搜索算法,最早由 J. H. Holland 教授提出<sup>[11]</sup>。其从一定数量的初始群体处罚,经过适应度计算、选择、交叉和变异等操作后生成子代群体,新的子代又经同样操作生成其子代群体,如此迭代,直至找到最优解或满意解,并从最后一代群体中选择最好的个体,经过解码得到问题的最优解。但遗传算法本身有缺陷,算法随机搜索而导致收敛速度慢及计算稳定性差。为了弥补遗传算法的不足,本文提出了一种改进的遗传算法。

### 3.2 基于遗传算法的多用户调度

根据以上分析,遗传算法可以很好地解决多用户 MIMO 系统中的用户调度问题。具体算法描述如下:

1) 编码:首先生成一个 $\hat{K}$ 维的数组,其每个元素代表基站所调度的用户编号,取值为 $1 \sim K$ ,对应系统中的 $K$ 个用户。

每个数组对应于系统的一种用户调度方案。

2)种群初始化:随机产生  $W$  个数组组成初始群体。每个群体对应一个二位数,每行代表一个个体。

3)适应度评价:对每个群体采用注水算法来进行功率分配,适应度函数定义如下:

$$U = \sum_{k \in S} \left( \frac{R_k(t)}{T_k(t)} \right) \quad (11)$$

其值越大,群体的适应度越大。

4)选择:选取适应度最大的  $Y$  个个体直接进入下一代,并淘汰适应度最差的  $Y$  个个体。剩余的  $(W-2Y)$  个个体与直接进入下一代的  $Y$  个个体直接进入交配池。

5)交叉和变异:按照一定的概率  $P_c$  从群体中随机选择 2 个个体进行配对,以指定的方式进行交叉操作产生新的 2 个群体。本文采用 2 点交叉方法。同时按一定的概率  $P_m$  对交配池中的个体进行变异操作。

6)分配方案评价:将新产生的  $(W-Y)$  个个体及最优  $Y$  个个体组成新的群体,重复步骤 3-步骤 6,直至循环达到上限活着算法收敛(连续  $G_m$  代没有找到适应度更高的个体)。则最后一代的群体中适应度最高的个体就是本算法搜索出来的最优的调度方案。

### 3.3 改进的基于遗传算法的多用户调度

为了防止遗传算法早熟,引入了具有优秀基因的个体参与遗传,具体措施包括:

1)在初始群体中加入具有优秀基因的个体,即  $R_k(t)/T_k(t)$  值比较大的个体。

2)在变异操作中,当算法中适应度最高的个体连续  $G_m/2$  代没有进化时,变异概率增加为  $P_{m1}$ 。

3)在交叉和变异阶段,适应度最高的几个个体参与到其中。

通过以上步骤,改进的遗传算法保证了基因的相对稳定性,加快了算法的收敛速度。

### 3.4 算法复杂度分析

在采用块对角化预编码的多用户调度算法中,复杂度主要与矩阵的奇异值分解、注水功率算法以及系统容量的计算有关,本文忽略各种运算的具体复杂度,主要集中在考虑用户选择的次数。假定遗传算法需要优化的代数为  $T$ ,群体个数为  $W$ ,则本文算法的计算复杂度约为  $O(T \times (W-Y))$ (基本遗传算法和改进遗传算法的复杂度的主要差别是  $T$  值的不同,改进遗传算法  $T$  相对小一些),而基于穷举搜索的算法复杂度为  $O(K! / \hat{K}!)$ 。可以明显看出,本文所提出的算法复杂度比穷举搜索算法要小很多,特别是当  $K$  比较大时。

### 3.5 信道反馈误差的影响

当基站端不能得到理想信道状态信息时,本文采用文献[12]中的信道估计模型,基站获得各用户信道矩阵为  $\hat{\mathbf{H}}_k, k=1 \dots K$ ,满足:

$$\mathbf{H}_k = \hat{\mathbf{H}}_k + \mathbf{E}_k \quad j=1 \dots K \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{E}_k$  表示信道反馈错误矩阵,其元素服从  $N(0, \sigma_{\text{MSE}}^2)$  分布。当用户信道反馈存在错误时,其预编码矩阵  $\mathbf{F}$  根据  $\hat{\mathbf{H}}_k$  设计,用  $(\hat{\mathbf{H}}_k + \mathbf{E}_k)$  代替  $\mathbf{H}_k$ ,代入式(12),简单运算,由于  $\sum_{k=1, k \neq j}^K \hat{\mathbf{H}}_j \mathbf{T}_k \mathbf{x}_k = 0$ ,有:

$$\mathbf{y}_j = \hat{\mathbf{H}}_j \mathbf{T}_j \mathbf{x}_j + \hat{\mathbf{v}}_j \quad j=1 \dots K \quad (13)$$

式中,  $\hat{\mathbf{v}}_j = \mathbf{v}_j + \mathbf{E}_j \sum_{k=1}^K \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k \quad j=1 \dots K$ 。与完全正确反馈信道状态相比,信道反馈存在错误时,对角化预编码机制只是影响了噪声方差,其协方差矩阵表示为  $(\sigma^2 + \sigma_{\text{MSE}}^2) \mathbf{I}_{n_r}$ ,若各用户误差参数  $\sigma_{\text{MSE}}^2$  相同时,对于各种调度机制的比较没有影响。因此本文仿真未考虑信道反馈错误的影响。

## 4 仿真与分析

本节针对采用块对角化预编码的多用户 MIMO 下行链路,通过蒙特卡罗仿真比较了提出的多用户调度算法与其他集中调度算法的系统性能,每次信道实现仿真至少 3000 次。定义信噪比  $\text{SNR} = P/\sigma^2$ ,假定信道为准静态平稳衰落,基站可以获取理想的信道状态信息。基站发送天线数为 4,用户的接收天线数为 2,发送给每个用户的数据流等于其接收天线数,根据式(8)可得基站每次最多调用 2 个用户。一般情况下,  $t_c = 100$ 。本文考虑用户信道独立但非同分布的情况。前 1/3 用户对应的信道增益服从  $CN(0, 1)$ ,中间 1/3 用户服从  $CN(0, 1/2)$ ,最后 1/3 用户服从  $CN(0, 1/4)$ 。

本文主要仿真对比了以下几种调度算法的系统性能。

- 1)采用迭代注水方法的脏纸编码(容量域上界)
- 2)采用轮询调度(RR)的块对角化预编码方案
- 3)最大化系统容量的块对角化预编码方案(MSC)
- 4)基于穷举搜索算法的比例公平调度方案(PFS-BF)
- 5)基于基本遗传算法的比例公平调度方案(PFS-GA)
- 6)基于改进遗传算法的比例公平调度方案(IPFS-GA)

遗传算法中,初始种群数  $W=36$ ,选择群体  $Y=6$ ,交叉概率  $P_c=0.9$ ,变异概率  $P_m=0.2$ ,  $P_{m1}=0.4$ ,最大迭代次数  $I=100$ ,最大连续的不同遗传数  $G_m=20$ 。

图 2 和图 3 分别描述了以上 6 种方案的系统和容量随着用户总数变化的情况,信噪比 SNR 分别为 0dB 和 20dB。从图中可以看出,基于最大化系统容量的 MSC 算法的系统性能优于采用比例公平算法的方案,而采用比例公平算法的方案又优于轮询调度方案。轮询调度方案由于没有考虑多用户分集增益,因此随着用户数的增加其性能变化比较小。与 PFS-BF 算法相比,两种遗传算法 PFS-GA 和 IPFS-GA 在算法复杂度降低的情况下仍可以至少达到其 95% 的性能。IPFS-GA 算法由于加入了优秀基因以及采用了自适应变异概率,其性能略优于 PFS-GA 算法。当用户总数为 20, SNR 为 20dB 时,IPFS-GA 算法的平均迭代次数为 28.29, PFS-GA 算法的平均迭代次数为 34.68,改进的遗传算法的收敛速度明显加快。由于遗传算法有可能早熟,因此当用户数超过 100 时,系统性能有可能比用户数少的时候要差一点。

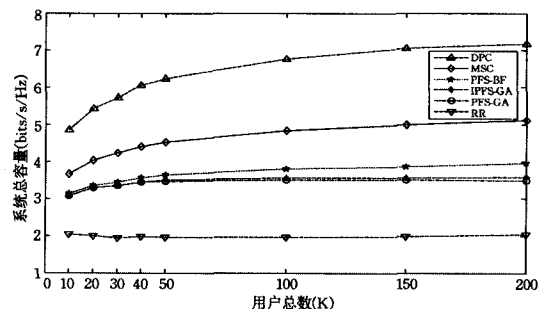


图 2 系统总速率与用户总数的关系(SNR=0dB,  $n_t=4, n_r=2$ )

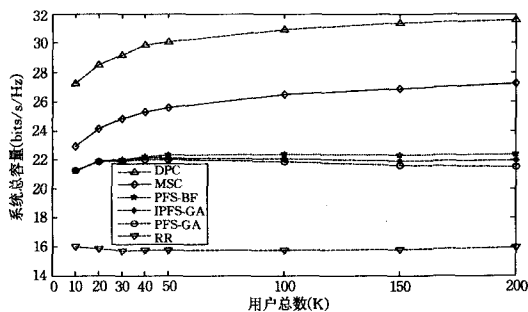


图3 系统总速率与用户总数的关系 (SNR=20dB,  $n_t=4, n_r=2$ )

在多用户 MIMO 系统下行链路中,公平的定义主要有两种,一类是基于信道资源分配的公平度,另一类是基于用户吞吐率的公平度,本文采用后一种定义,并引入公平因子来衡量算法的公平性,其定义为:  $F(K) = (\sum_{k=1}^K x_k)^2 / K \times \sum_{k=1}^K x_k^2$ 。式中  $x_k$  表示每个用户的平均调用比率。 $F(K)$  值越大,其公平性越好,其取值范围为 0~1。当  $F(K)$  为 1 时,表明所用用户的调用次数基本相同,系统的公平性最好。表 1 对比了系统用户总数为 20, SNR 为 20dB 时,各种算法的公平因子。从表中可以看出,  $t_c$  值的大小对系统的公平性影响比较小。

表 1 公平因子的比较 (SNR=20dB,  $K=20$ )

调度算法	MSC	PFS-BF $t_c=500$	PFS-BF $t_c=100$	PFS-BF $t_c=20$	PFS-GA $t_c=100$	IPFS-GA $t_c=100$	RR
公平因子	0.4430	0.9918	0.9937	0.9950	0.9933	0.9930	1

**结束语** 本文针对采用块对角化预编码机制的多用户 MIMO 系统下行链路,提出了一种基于遗传算法的多用户比例公平调度算法。预编码机制可以消除多用户之间的干扰,同时为多个用户提供多数据流服务。基于穷举搜索算法的多用户调度算法复杂度太大,难以在实际系统中应用。而遗传算法能够在全局并行搜索以得到最优解或者满意解,其操作简单,适应性强。改进的遗传算法由于加入具有优秀基因的个体而加快了算法的收敛性。仿真结果显示,本文所提出的两种算法在用户非同分布时,在系统容量和公平性之间取得了良好的折中,同时算法复杂度比较低。

### 参考文献

[1] Spencer Q H, Peel C B, Swindlehurst A L, et al. An introduction

to the multi-user MIMO downlink[J]. IEEE Communication Magazine, 2004; 60-67

[2] 王德胜,朱光喜,刘应状,等. 基于虚拟 MIMO 子信道的多用户分集资源调度算法[J]. 计算机科学, 2008, 35(6): 114-117

[3] Weingarten H, Steinberg Y, Shamai S. The Capacity Region of the Gaussian Multiple-Input Multiple-Output Broadcast Channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(9): 3936-3964

[4] Gesbert D, Kountouris M, Heath R W Jr, et al. Shifting MIMO Paradigm: From Single User to Multiuser Communications[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5): 36-46

[5] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 461-471

[6] Lai U C, Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 3(1): 20-24

[7] Yoo T, Goldsmith A. Optimality of zero - forcing beamforming with multiuser diversity[C]//IEEE International Conference on Communications. 2005; 542-546

[8] Shen Z K, Chen R H, Andrews J G, et al. Sum Capacity of Multiuser MIMO Broadcast Channels with Block Diagonalization[C] //IEEE International Symposium on Information Theory. 2006; 886-890

[9] Jalali A, Padovani R, Pankaj R. Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system[C] // IEEE 51st Vehicular Technology Conference. 2000; 1854-1858

[10] Man K F, Tang K S, Kwong S. Genetic algorithms: concepts and applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43(5): 519-534

[11] Holland J H. Adaptation in nature and artificial systems[D]. Massachusetts: MIT press, 1992

[12] Yoo T, Goldsmith A. Capacity and power allocation for fading MIMO channels with channel estimation error[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(5): 2203-2214

(上接第 51 页)

[6] Helmer G, Wong J, Honavar V, et al. Automated discovery of concise predictive rules for intrusion detection[J]. The Journal of Systems and Software, 2002, 60(3): 165-175

[7] Hong J R. AE1: An extension matrix approximate method for the general covering problem[J]. International Journal of Computer and Information Science, 1985, 14(6): 421-437

[8] 洪家荣. 示例式学习及多功能学习系统 AE5[J]. 计算机学报, 1989, 12(2): 98-105

[9] 李敏强, 寇纪淞, 戴林. 示例学习和特征选择的规划模型方法

[J]. 系统工程学报, 2000, 15(2): 163-167

[10] MIT Lincoln Laboratory. 1999 DARPA Intrusion Detection Evaluation Data Set[EB/OL]. [2009-3-23]. <http://www.ll.mit.edu/mission/communications/ist/corpora/ideval/data/1999d-ata.html>

[11] Lippmann R, Haines J, Fried D, et al. The 1999 DARPA Off-Line Intrusion Detection Evaluation [J]. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2000, 34(4): 579-595