

基于块对角化和服务公平性的次最优用户选择方案

陈晓晗^{①②} 刘 琚^① 郑丽娜^① 许宏吉^①

^①(山东大学信息科学与工程学院 济南 250100)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要: 该文基于块对角化的思想提出了一种次最优用户选择方案。首先推导出一个和速率容量的上界公式, 将其作为该文提出算法的选择准则; 然后用此上界公式代替瞬时和容量公式作为自适应准则, 得到了所提出算法的简化算法; 最后考虑到用户之间服务公平性的因素, 把该文的提出算法与比例公平调度机制相结合, 使得系统既能获得一定的信道容量增益又能让所有用户均得到公平的服务。仿真结果表明, 该文所提出算法具有接近最优的性能, 与比例公平调度机制相结合后可以达到系统和容量与服务公平性的折衷。

关键词: 多用户 MIMO; 用户选择; 块对角化; 比例公平调度

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1554-06

A Suboptimal User Selection Algorithm Based on Block Diagonalization and Fairness

Chen Xiao-han^{①②} Liu Ju^① Zheng Li-na^① Xu Hong-ji^①

^①(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

^②(State Key Lab. of Mobile Communications, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, a suboptimal user selection method is proposed based on Block Diagonalization (BD). Firstly, an upper-bound of sum-rate capacity is deduced, and is used as the selection criterion of proposed algorithm. Secondly, the upper-bound is used as the adaptive criterion instead of capacity formula, called simplification of the proposed algorithm. Finally, considering the fairness between users, proposed algorithm is combined with Proportional Fair Scheduling (PFS) method. The simulation results show that proposed algorithm almost achieves the performance of the optimal algorithm and the proposed algorithm with PFS can obtain a tradeoff between the system sum-rate capacity gain and fairness.

Key words: Multi-user MIMO; User selection; Block Diagonalization (BD); Proportional Fair Scheduling (PFS)

1 引言

多用户 MIMO 系统可以提供分集增益及空间复用增益, 极大地提高了系统的性能, 因此受到了广泛的关注^[1,2]。在多用户 MIMO 下行链路中, 用户间的干扰是必须考虑的一个问题。最优的脏纸编码技术(DPC)^[3]可以完全消除用户间干扰, 但当用户数目较大时实现复杂度非常大, 这就限制了它在实时系统中的应用。另外一种有效的预编码机制是块对角化算法(BD)^[4]。该算法与脏纸编码技术相比, 复杂度大大降低, 但是基站同时可支持的用户数目会受到发射天线数和接收天线数的限制。因此如何从全部用户中选择最优的用户子集以最大化系统容量

成为研究的热点之一。

最优的用户选择算法是穷举法, 遍历所有可能的用户组合, 但当系统中存在大量用户时该算法计算复杂度非常大而无法实时实现。另一种典型且直接的算法称为最大范数选择方法, 其核心思想是选择信道范数最大的用户, 虽然复杂度大大降低, 但却存在较大的性能损失。近年来, 次最优低复杂度的用户选择算法受到了关注。Xu 和 Lin^[5]基于不同用户之间信道矩阵的范数和相关性提出了一种次最优的贪婪用户选择算法, 但该系统的用户端只有单根天线。针对用户端多天线的情况, Ji 和 Zhou^[6]选择 BD 预编码机制提出了一种自适应选择算法。该算法不是选择用户而是选择用户的空间子信道, 在一定程度上提高了信道容量, 但是在接收端逐次选择单根天线存在较大的计算复杂度。

本文针对多用户 MIMO 下行链路, 基于块对角化的技术提出了一种次最优用户选择方案。首先推

2008-04-23 收到, 2009-03-04 改回

国家自然科学基金(60572105), 新世纪优秀人才大学支持计划(NCET-05-0582), 教育部博士点专项基金(20050422017), 移动通信国家重点实验室开放基金(W200802)和综合业务网国家重点实验室开放基金资助课题

导出和速率容量的一个上界公式, 将其作为块对角化算法的选择准则, 每次选择用户的数目可以根据当前的信道状态自适应地改变; 然后用此上界公式代替瞬时和容量公式作为自适应准则, 得到了块对角化算法的简化算法; 最后考虑到用户之间服务公平性的因素, 把本文的块对角化算法与比例公平调度机制相结合, 使得系统既能获得一定的信道容量增益又能让所有用户均得到公平的服务。

2 系统模型

如图1所示, 基站有 n_t 根天线, 系统中共有 K 个用户, 第 j 个用户的接收天线数为 $n_{r,j}$ 。用户的信道状态信息(CSI)通过反馈链路反馈到基站。假设无线信道为准静态平瑞利衰落信道且发射端已知准确的CSI, 这表明信道估计完全准确并且反馈时延足够小。

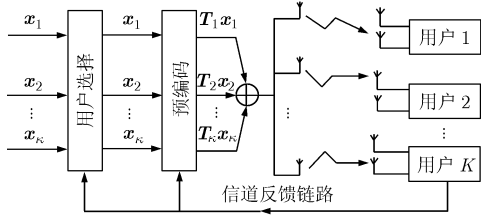


图1 多用户 MIMO 系统下行链路模型

系统中 \mathbf{x}_j 为用户 j 的数据, 是 $N_j \times 1$ 维的矢量。 \mathbf{T}_j 为用户 j 的 $n_t \times N_j$ 维的预编码矩阵。定义 κ 为系统同时可服务的最大用户数, 满足条件 $n_t - \sum_{j=1, j \neq k}^{\kappa} n_{r,j} > 0$ 。本文假设每个用户有相同的接收天线数记为 n_r , 那么 $\kappa = \lceil n_t / n_r \rceil$, 其中 $\lceil \cdot \rceil$ 是上取整操作。用户端不同天线数的情况可以简单类推得到。

由以上可得用户 j 的接收信号表达式为

$$\mathbf{y}_j = \mathbf{H}_j \mathbf{T}_j \mathbf{x}_j + \sum_{k=1, k \neq j}^{\kappa} \mathbf{H}_j \mathbf{T}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_j \quad (1)$$

其中, 等式右边第1项是用户期望的有用信号, 第2项是其他用户对用户 j 产生的干扰, 第3项 $\mathbf{w}_j \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_{n_{r,j}})$ 为加性高斯白噪声矢量。信道矩阵 $\mathbf{H}_j \in \mathcal{C}^{n_r \times n_t}$ 中各元素是服从i.i.d的零均值单位方差的复高斯随机变量。令 $\mathbf{Q}_j = E[\mathbf{x}_j \mathbf{x}_j^H]$, 为用户 j 的发射协方差矩阵。在本文中, $\mathbf{A}^T, \mathbf{A}^H$ 和 $\|\mathbf{A}\|_F$ 分别表示矩阵 \mathbf{A} 的转置, 共轭转置和Frobenius范数。

为了消除用户之间的干扰, 本文采用块对角化的方法, 那么预编码矩阵 \mathbf{T}_j 需要满足:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{T}_j^H \mathbf{T}_j &= \mathbf{I} \\ \mathbf{H}_k \mathbf{T}_j &= 0, k \neq j \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

定义 $\tilde{\mathbf{H}}_j = [\mathbf{H}_1^T, \dots, \mathbf{H}_{j-1}^T, \mathbf{H}_{j+1}^T, \dots, \mathbf{H}_K^T]^T$ 为第 j 个用户的干扰矩阵, 按照块对角化的思想要求预编码矩阵 \mathbf{T}_j 位于 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 的零空间里。通过奇异值分解(SVD)

$$\text{得到 } \tilde{\mathbf{H}}_j = [\hat{\mathbf{U}}_j \quad \bar{\mathbf{U}}_j] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{V}}_j^H \\ \bar{\mathbf{V}}_j^H \end{bmatrix}。 \bar{\mathbf{V}}_j \text{ 中的各列组成}$$

$\tilde{\mathbf{H}}_j$ 的零空间的基集, 那么 \mathbf{T}_j 可以表示为 $\bar{\mathbf{V}}_j$ 中各列的线性组合。此时将用户的等价信道矩阵表示为 $\bar{\mathbf{H}}_j = \mathbf{H}_j \mathbf{T}_j$ 。

3 和速率容量的上界推导

引理 假设用户端天线数为 n_r , 发射总功率为 P , 系统中共有 κ 个用户, $\Phi = \{1, 2, \dots, \kappa\}$ 为用户集合, 则该系统所能获得的和速率容量存在一个上界为

$$C(\Phi) \leq \sum_{j \in \Phi} n_r \lg \left(\frac{P}{\kappa n_r} \|\bar{\mathbf{H}}_j\|_F^2 + 1 \right) \quad (3)$$

证明 经过块对角化, 多用户系统被分割成多个独立的单用户信道。用户 j 的最大数据率是

$$C_j(\bar{\mathbf{H}}_j) = \max_{\mathbf{Q}_j} \lg |\mathbf{I} + \bar{\mathbf{H}}_j \mathbf{Q}_j \bar{\mathbf{H}}_j^H| \quad (4)$$

系统的和速率容量可以表示为

$$C(\Phi) = \sum_{j \in \Phi} C_j \quad (5)$$

利用块对角化技术消除用户间干扰之后, 用户 j 的接收信号可以表示成 $\mathbf{y}_j = \bar{\mathbf{H}}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{w}_j$, 那么 \mathbf{y}_j 的协方差矩阵为

$$\left. \begin{aligned} E[\mathbf{y}_j \mathbf{y}_j^H] &= E[\bar{\mathbf{H}}_j \mathbf{x}_j \mathbf{x}_j^H \bar{\mathbf{H}}_j^H] + E[\mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H] \\ &= \bar{\mathbf{H}}_j \mathbf{Q}_j \bar{\mathbf{H}}_j^H + \mathbf{I} \\ E[\mathbf{y}_j^H \mathbf{y}_j] &= E[\mathbf{x}_j^H \bar{\mathbf{H}}_j^H \bar{\mathbf{H}}_j \mathbf{x}_j] + E[\mathbf{w}_j^H \mathbf{w}_j] \\ &= E[\|\bar{\mathbf{H}}_j \mathbf{x}_j\|^2 + n_r] \leq \|\bar{\mathbf{H}}_j\|_F^2 E[\|\mathbf{x}_j\|^2] + n_r \\ &= \frac{P}{\kappa} \|\bar{\mathbf{H}}_j\|_F^2 + n_r \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

如果令 $\mathbf{S} = \bar{\mathbf{H}}_j \mathbf{Q}_j \bar{\mathbf{H}}_j^H + \mathbf{I}$, 则存在

$$(\det(\mathbf{S}))^{1/n_r} \leq \frac{1}{n_r} \text{trace}(\mathbf{S}) \quad (7)$$

将式(6), 式(7)合并化简可得

$$C(\Phi) = \lg(\det(\mathbf{S})) \leq \sum_{j \in \Phi} n_r \lg \left(\frac{P}{\kappa n_r} \|\bar{\mathbf{H}}_j\|_F^2 + 1 \right)。 \text{证毕}$$

4 多用户选择

4.1 基于块对角化的多用户选择算法

定义 $\Omega = \{1, 2, \dots, K\}$ 为所有用户的集合, $\Phi = \{1, 2, \dots, \kappa\}$ 为 Ω 的一个子集, 表示已选择用户的集合。按照上文推导出的和速率的上界公式, 本文采

用递增的过程提出一种新的用户选择算法。假设已经选择了 $i-1$ 个用户, 那么新增的用户需要满足如下条件:

$$s_i = \arg \max_{k \in \Omega} \prod_{s \in \Phi} \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_s\|_F^2 + 1 \right) \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_k\|_F^2 + 1 \right) \quad (8)$$

显然, 新增的用户会影响当前的和容量, 但是并不一定总能使和容量增加。这是因为新增用户一方面能够提供容量增益, 但同时也能够降低已存在用户的发射分集增益, 从而有可能降低和容量。因此, 最优的方法不一定是每次都服务 κ 个用户。本文提出的算法根据瞬时信道容量自适应地调整选择用户的数目。具体步骤如下:

(1) 初始化: $\Omega = [1, 2, \dots, K]$, $\Phi = \emptyset$, $C_{\text{temp}} = 0$;

(2) 选择第 1 个用户: $s_1 = \arg \max_{k \in \Omega} \|\mathbf{H}_k\|_F^2$, $C_{\text{temp}} = \lg |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{s_1} \mathbf{Q}_{s_1} \mathbf{H}_{s_1}^H|$, $\Omega = \Omega - s_1$, $\Phi = s_1$;

(3) 选择第 i 个用户: 对任意的 $k \in \Omega$

(a) 令 $\mathbf{H}_{\Phi, k} = [\mathbf{H}_{s_1}^T, \dots, \mathbf{H}_{s_{i-1}}^T, \mathbf{H}_k^T]^T$, 利用块对角化计算等价信道 $\bar{\mathbf{H}}_s$ 和 $\bar{\mathbf{H}}_k$;

(b) 选择用户 s_i 满足条件:

$$s_i = \arg \max_{k \in \Omega} \prod_{s \in \Phi} \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_s\|_F^2 + 1 \right) \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_k\|_F^2 + 1 \right)$$

(c) 自适应选择: 注水分配功率并计算和容量 $C(\Phi)$ 。

如果 $C(\Phi) > C_{\text{temp}}$, $C_{\text{temp}} = C(\Phi)$, $\Phi = \Phi + \{s_i\}$, $\Omega = \Omega - \{s_i\}$;

否则算法结束。

4.2 基于块对角化算法的简化

从上文可以看出, 本文提出的算法以容量上界作为选择准则, 以瞬时容量作为自适应准则。当选择第 i 个用户时, $K-i+1$ 次瞬时容量的计算是多余的。所以当系统中用户数很大时, 以容量准则进行自适应用户选择将会引起很多不必要的计算。注意到容量上界 $\sum_{j \in \Phi} n_r \lg \left(\frac{P}{\kappa n_r} \|\bar{\mathbf{H}}_j\|_F^2 + 1 \right)$ 的计算相对简单, 考虑可以将其代替瞬时容量作为自适应准则。仿真结果表明简化之后的性能与原提出算法的性能几乎一致, 这也说明了和速率容量上界公式的有效性。简化步骤如下:

(1) 选择用户 s_i 满足条件:

$$s_i = \arg \max_{k \in \Omega} \prod_{s \in \Phi} \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_s\|_F^2 + 1 \right) \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_k\|_F^2 + 1 \right)$$

$$\text{upper_bound}_i = \max_{s \in \Phi} \prod_{s \in \Phi} \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_s\|_F^2 + 1 \right) \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_k\|_F^2 + 1 \right)$$

(2) 自适应选择: 如果 $\text{upper_bound}_i > \text{upper_bound}_{i-1}$, $\Phi = \Phi + \{s_i\}$, $\Omega = \Omega - \{s_i\}$, 注水分配功率并计算和容量 $C(\Phi)$;

否则算法结束。

4.3 引入比例公平调度机制的多用户选择

从上文可以看出本文提出的算法在系统容量上取得了很好的性能, 但是由于算法本身的思想是将服务的机会分配给信道条件较好的用户, 信道条件较差的用户会一直得不到服务, 这样就造成了用户之间服务的不公平性。为了提高用户之间的服务公平性, 将本文的基于块对角化的算法与比例公平调度机制相结合, 既能使所有用户都有服务的机会, 又能使信道容量保持在一定水平上。

原始的比例公平调度算法^[7]的思想是选择用户

$$J_n = \arg \max_{i \in \Omega} \frac{R_i(n)}{T_i(n)}$$

其中 $R_i(n)$ 是 n 时隙用户 i 的瞬时容量值, $T_i(n)$ 是 n 时隙用户 i 的容量的权值, 表示 n 时隙之前一段时间 T_c 内用户 i 的平均容量值。而 T_c 为调度时间比例权值, 是一个遗忘因子, 可根据不同情况合理选取。规定 $T_i(n)$ 初始值为 1, 并且按照以下规则进行实时更新:

$$T_i(n+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) T_i(n) + \frac{1}{T_c} R_i(n), & i = J_n \\ \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) T_i(n), & i \neq J_n \end{cases} \quad (9)$$

将本文的提出算法和比例公平调度机制相结合, 改进步骤如下:

(1) 选择第 1 个用户: $s_1 = \arg \max_{k \in \Omega} \frac{R_k(n)}{T_k(n)}$;

(2) 选择用户 s_i 满足条件:

$$s_i = \arg \max_{k \in \Omega} \sum_{s \in \Phi} \frac{\lg \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_s\|_F^2 + 1 \right)}{T_s(n)} + \frac{\lg \left(\frac{P}{in_r} \|\bar{\mathbf{H}}_k\|_F^2 + 1 \right)}{T_k(n)}$$

5 算法复杂度分析

本文采用浮点操作(flops)作为衡量算法复杂度的标准, 定义一次 flop 为一次实数浮点操作^[8]。即 1 次实数相加或相乘为 1 次 flop, 而 1 次复数相加或相乘分别需要 2 次 flop 或 6 次 flop。按照上面的定义, 给定 $m \times n$ 维的复值矩阵 \mathbf{H} , 计算 $\|\mathbf{H}\|_F^2$ 需要 $4mn$ 次 flop, 计算 \mathbf{H} 的 SVD 近似需要 $48m^2n + 24mn^2 + 54m^3$ 次 flop, 而对 k 个特征值注水需要 $2k^2 + 6k$ 次 flop^[9]。

最优的选择方法是遍历所有可能的用户子集寻找最优的一组, 其算法复杂度近似为 $O(\kappa C_\kappa \kappa n_t^3)$ 。

下面按照本文提出的算法的步骤逐一分析算法

的复杂度。在本文提出的算法中, 当选择第 1 个用户时, $\|\mathbf{H}_k\|_F^2$ 花费 $4n_r n_t$ 次 flop 并循环 K 次, 计算信道容量需要 $8n_r^2 n_t + 8n_r^3 - 2n_r^2$ 次 flop。当选择第 i 个用户时, 计算干扰矩阵的 SVD 需要 $48(i-1)^2 n_r^2 n_t + 24(i-1)n_r n_t^2 + 54(i-1)^3 n_r^3$ 次 flop, 计算 $\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k$ 矩阵相乘需要 $8n_t n_r (n_t - (i-1)n_r)$ 次 flop, 这两步均需要循环 $i(K-i+1)$ 次。基站端注水分配功率花费 $2(in_r)^2 + 6in_r$ 次 flop, 计算 C_{temp} 花费 $8n_r^2 (n_t - (i-1)n_r) + 8n_r^3 - 2n_r^2$ 次 flop, 这两步均循环 $K-i+1$ 次。

因为选择的用户数最大不会超过 κ , 所以提出的自适应选择算法的复杂度 φ 约为

$$\begin{aligned} \varphi \leq & 4Kn_r n_t + (8n_r^2 n_t + 8n_r^3 - 2n_r^2) \\ & + \sum_{i=2}^{\kappa} [48(i-1)^2 n_r^2 n_t + 24(i-1)n_r n_t^2 + 54(i-1)^3 n_r^3 \\ & + 8n_t n_r (n_t - (i-1)n_r)] \times i(K-i+1) \\ & + [8n_r^2 (n_t - (i-1)n_r) + 8n_r^3 - 2n_r^2 + 2(in_r)^2 \\ & + 6in_r] \times (K-i+1) \approx O(K\kappa^5 n_r^3) \approx O(K\kappa^2 n_t^3) \end{aligned}$$

本文所提出算法的简化算法中用和速率容量的上界公式代替瞬时容量公式作为自适应准则, 节省了不必要的容量计算和注水计算, 这样相比本文提出的算法, 其简化算法的复杂度减少了。

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = & \sum_{i=2}^{\kappa} [8n_r^2 (n_t - (i-1)n_r) + 8n_r^3 - 2n_r^2 + 2(in_r)^2 \\ & + 6in_r] \times (K-i) \approx O(K\kappa^3 n_r^2) \approx O(K\kappa n_t^2) \end{aligned}$$

本文提出的算法和 PFS 机制相结合后, 算法复杂度没有大的变化, 仍为 $O(K\kappa^2 n_t^3)$ 。

6 算法性能分析

通过系统仿真从系统容量和服务公平性两个方面给出性能分析, 并且与最优的穷举算法和最大范数算法做出比较。4.1 小节的基于块对角化的算法记为提出算法, 4.2 小节的利用提出的和速率容量的上界公式对提出算法的简化记为简化算法, 各用户选择算法与 PFS 机制结合之后的方案记为“算法名称+PFS”。假设信道均为准静态平瑞利衰落信道。

图 2-图 4 的所有结果都是经由 1000 次独立信道求平均获得。图 2, 图 3 分别给出了 $\kappa = 2, 3$ 时在不同的 SNR 情况下 (SNR = 0, 10, 20 dB), 各种算法的和速率容量与用户数目关系的曲线比较。图 2 的天线配置是 $n_t = 4, n_r = 2, \kappa = 2$, 图 3 中是 $n_t = 6, n_r = 2, \kappa = 3$ 。从仿真结果可以看出: 最大范数选择方法性能较差, 那是由于每次都选择最优的用户信道, 但未考虑用户之间的影响。本文的简化算法与提出算法性能几乎一致, 说明了容量上界公式的有效性。在较高信噪比情况下 (SNR = 10, 20 dB), 简化算法与提出算法的和速率容量与最优算法非常接近, 而

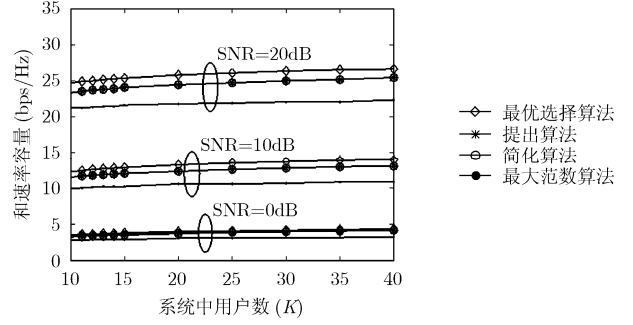


图 2 系统和速率与用户数目的关系曲线, $n_t = 4, n_r = 2$

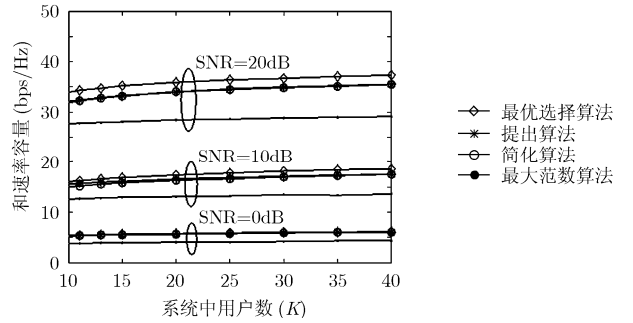


图 3 系统和速率与用户数目的关系曲线, $n_t = 6, n_r = 2$

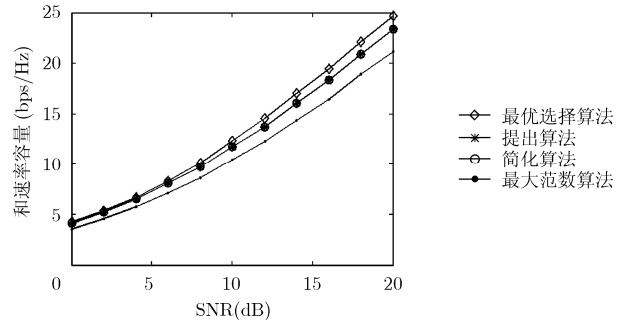


图 4 系统和速率与 SNR 的关系曲线, $n_t = 4, n_r = 2, K = 10$

在较低信噪比情况下 (SNR = 0 dB), 两者与最优选择算法的性能几乎一致。从曲线上还可以看出, 当用户数目较少时, 两者与最优的差距较小, 随着用户数目的增大差距有所增大, 当系统用户数目大于 10 的时候, 差距趋于平稳。这是因为提出算法第 1 个用户的选择非常重要, 虽然第 1 个用户自身的瞬时容量最大, 但是它与其他用户组合之后的和容量却不一定最大。而用户数目越多, 第 1 个用户处于最优组合中的可能性就越小。

图 4 是 $n_t = 4, n_r = 2, K = 10$ 时的和速率容量与不同 SNR 的关系图。当 SNR 值在较大范围内变化时, 提出算法始终接近于最优曲线, 尤其当信噪比较低时, 与最优曲线基本吻合。提出算法相对于最大范数算法的性能优势随 SNR 的提高而逐渐增大。由仿真结果也可以看出, 随着 SNR 的变化, 简

化算法与提出算法的曲线一直基本重合。

图 5-图 8 中假设每个用户在无干扰情况下的平均接收 SNR 在 0 dB 到 20 dB 的范围内呈对数增长, 使得不同用户处于不同的信道状态。按照 IS-856 标准中的规定, 每个时隙为 1.67 ms^[7], 仿真中 T_c 取 5000 slots。

图 5, 图 6 描述的是每个用户的平均信道速率, 历经 50000 次运算取平均获得。系统中共有 40 个用户, 其中图 5 中 BS 和 MS 的天线数为 $n_t = 4, n_r = 2$, 而图 6 中为 $n_t = 8, n_r = 2$ 。从仿真结果可以看出, 不加调度机制的提出算法和最大范数算法在 50000 次的用户选择过程中均只选取信道条件较好的用户。可以预想即使在更长的服务时间内, 信道条件较差的用户也不会有服务的机会。而加上 PFS 调度机制之后信道较差的用户可以获得服务的机会, 用户之间的公平性得到了大大的提高。本文的提出算法+PFS 和简化算法+PFS 的每个用户的平均数据率均优于最大范数算法+PFS 和原始 PFS 法, 且 BS 端天线数越多, 优越性体现的越明显。

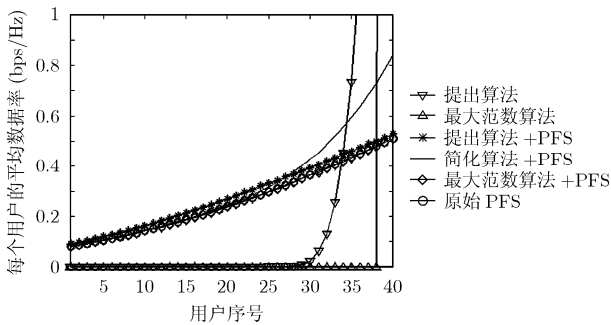


图 5 每个用户的平均信道速率曲线, $n_t = 4, n_r = 2$

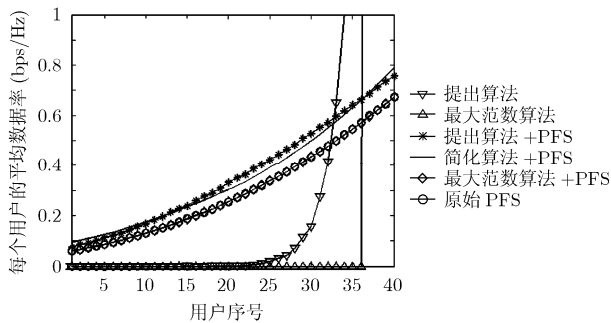


图 6 每个用户的平均信道速率曲线, $n_t = 8, n_r = 2$

图 7, 图 8 描述了系统总的信道容量与系统中用户数目的关系, 历经 1000 次运算取平均获得, 其中图 7 中 BS 和 MS 的天线数为 $n_t = 4, n_r = 2$, 而图 8 中为 $n_t = 8, n_r = 2$ 。从仿真图可以看出, 与调度机制结合后由于信道较差的用户也获得了服务的机会, 所以整个系统的和速率有所下降。随着 K 的

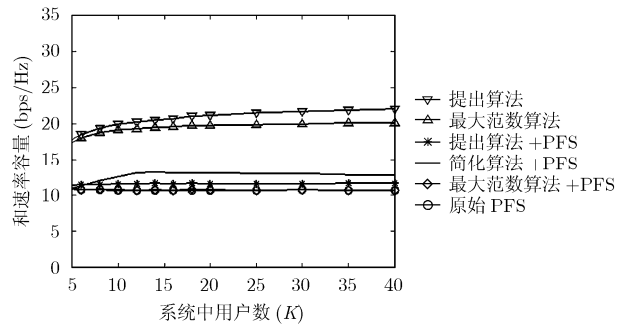


图 7 系统和速率与用户数目的关系曲线, $n_t = 4, n_r = 2$

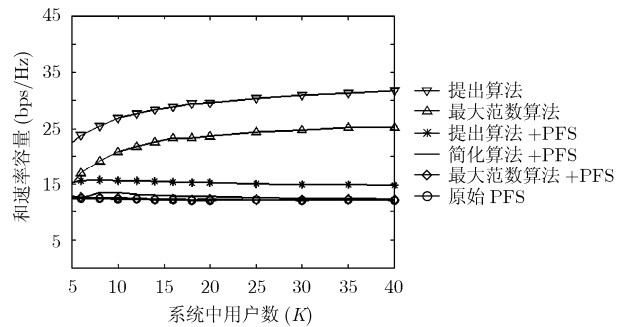


图 8 系统和速率与用户数目的关系曲线, $n_t = 8, n_r = 2$

增加, 与 PFS 结合后的算法的和速率几乎没有变化, 这是因为加入调度必然获得信道容量和服务公平性的折衷。本文提出算法+PFS 和简化算法+PFS 在任何用户数目下任何发射天线数目下的性能均优于其他算法。

7 结束语

本文推导出了一个和速率容量的上界公式, 将其作为用户选择的准则, 并基于块对角化的思想提出了一种新的自适应用户选择方案。然后用此上界公式代替瞬时容量公式作为自适应准则, 进一步减小了算法复杂度, 从仿真结果可以看出简化后的算法和原始提出算法性能几乎一致, 并且与最优算法非常接近。另外, 考虑到用户之间的服务公平性, 将提出算法和 PFS 算法相结合, 使得系统既能得到一定的信道容量增益, 又能使所有的用户均得到公平的服务。

参考文献

[1] Vishwanath S, Jindal N, and Goldsmith A. Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of gaussian MIMO broadcast channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2658-2668.

[2] Weingarten H, Steinberg Y, and Shamai S. The capacity region of the gaussian MIMO broadcast channel[C]. *Proc.*

- IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Chicago, USA, 2004: 174.
- [3] Costa M H M. Writing on dirty paper[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1983, 29(5): 439-441.
- [4] Choi Lai-U and Murch R. D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(1): 20-24.
- [5] Xu M G and Lin D. Low-complexity user selection strategies in the downlink of multi-user channels[C]. Proc. IEEE International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Korean, 2006, 1: 20-22.
- [6] Ji T X, Zhou C H, Zhou S D, and Yao Y. Low complex user selection strategies for multi-user MIMO downlink scenario[C]. Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Hong Kong, 2007: 1532-1537.
- [7] Visawanath P, Tse D N C, and Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 48(6): 1277-1294.
- [8] Rim M. Multi-user downlink beamforming with multiple transmit and receive antennas[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(25): 1725-1726.
- [9] Shen Z, Chen R, Andrews J G, Heath R W, and Evans B L. Low complexity user selection algorithms for multiuser MIMO systems with block diagonalization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(9): 3658-3663.
- 陈晓晗: 女, 1984年生, 硕士生, 研究方向为多用户 MIMO 系统、空时信号处理等。
- 刘 据: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信信号处理、盲信号处理等。
- 郑丽娜: 女, 1980年生, 讲师, 研究方向为网络通信技术、通信信号处理等。
- 许宏吉: 男, 1976年生, 讲师, 研究方向为空时信号处理、智能天线、盲信号处理等。