

多用户 MISO 系统下行链路的自适应用户选择算法

邢蕊^{①②} 刘璐^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: 针对多用户多输入单输出(MISO)系统中的用户选择问题, 该文基于多用户系统的容量公式提出一种低复杂度的自适应用户选择算法, 使选择的用户数随当前的信道状态自适应变化以最大化所有用户的和速率。仿真结果表明, 该算法具有接近最优的性能。在此基础上结合比例公平调度对算法进行改进以保证系统中用户服务的公平性。

关键词: 多用户 MISO 系统; 用户选择; 自适应; 比例公平调度

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2584-04

An Adaptive User Selection Algorithm for Multiuser MISO Downlink Systems

Xing Rui^{①②} Liu Ju^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: For multiuser MISO downlink systems, an efficient user selection algorithm aiming to maximize the sum rate capacity is proposed in this paper. The number of selected users can change adaptively according to current channel condition. It achieves near optimal performance while with low computational complexity. Through simulation results, the excellent performance of the proposed algorithm is shown. Based on this method, a fair scheduling scheme is further given to ensure fairness to all users in the system.

Key words: Multiuser MISO systems; User selection; Adaptive; Proportional fair scheduling

1 引言

多输入多输出(MIMO)系统可以有效地提高无线通信系统的容量和传输速率^[1]。多用户 MIMO 系统则可以在不需要附加时隙和频谱资源的前提下同时与多个用户通信, 从而达到更高的信道容量^[2], 近来成为研究热点。

对移动终端只有一根接收天线的多用户多输入单输出(MISO)系统, 可同时支持的用户数受发射天线数目的限制。如果系统中用户数大于基站端发射天线数则需要从所有用户中选出数目有限的用户子集以最大化系统容量, 获得多用户分集增益。为了消除同道用户间的干扰, 通常采用波束形成(BF)包括迫零波束形成(ZFBF)这一复杂度较低的次优机制^[3,4]。很多文献开始考虑多用户 MIMO 系统的联合波束形成和调度策略^[5,6]。

最优的 ZFBF 用户选择方法通过遍历所有可能的用户子集寻找最好的一组, 计算复杂度很高。为了快速选择出用户组, 选择信道条件最优也就是具有最大信道增益的用户是最直观的方法, 但是与最优的方法相比有较大的性能差异。

Dimic 提出了一种 ZFS(dubbed ZF with Selection)算法^[7], 在每次迭代更新时需要求矩阵的逆, 复杂度仍较大。Yoo 提出一种简单的半正交用户选择(SUS)算法^[6], 当系统中用户数目比较庞大时, 该方法快速有效, 但是用户数目较少时性能损失较大。另外, 最优的正交系数 α 随着总用户数变化而变化, 需要附加的计算量。

矩阵的正交分解是近年来研究并且应用广泛的一种有效的数学方法, 它可以用于 MIMO 系统中的空时码检测, 也可以用于通信中收发机的联合设计等。本文考虑多用户 MISO 系统下行链路, 基于和容量(sum capacity)公式分析及矩阵的正交分解和计算提出一种自适应用户选择算法, 使选择出的用户数目根据当前的信道状态调整变化以维持最大的系统容量。此外为了保证系统中所有用户的公平性, 在此基础上进一步扩展提出结合比例公平调度的算法改进。

2 多用户 MISO 系统模型

考虑一个 M 天线基站与 K 个单天线用户通信的多用户 MISO 系统下行链路(图 1)。移动终端将估计的信道信息通过反馈链路传送给基站。假设无线信道为准静态平瑞利衰落信道, 并且系统的反馈时延足够小以保证移动台的反馈信息可以及时到达基站, 另外假设不存在反馈错误。

令 \mathbf{y} 为接收信号矢量, \mathbf{s} 为发射信号矢量。接收信号可

2007-05-24 收到, 2008-04-14 改回

国家自然科学基金(60572105), 移动通信国家重点实验室开放基金(W200802), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0582)和 ISN 国家重点实验室开放基金项目资助课题

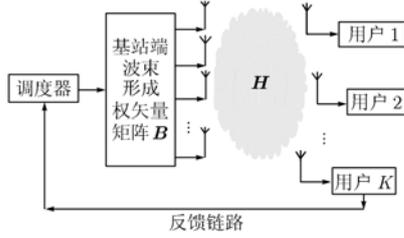


图 1 多用户 MISO 系统下行链路模型

以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{s} + \mathbf{w} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{K \times M}$ 代表基站与移动台之间的信道响应矩阵, 矩阵中各元素是服从 i.i.d 分布的复高斯随机变量。 \mathbf{w} 是方差 σ^2 的加性高斯白噪声, \mathbf{B} 为波束形成权矢量矩阵。基站端采用迫零波束形成机制消除用户间干扰, 则

$$\mathbf{B}^{(u)} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (2)$$

为了使同时通信的各个用户获得公平的服务, 即获得相同的数据速率, 考虑采用等速率和误码率(ERB)准则优化权矢量矩阵^[8]。假设基站总的发射功率为 P_T , 则所有用户具有相同的功率分配系数 β 。

$$\begin{aligned} \beta^2 &= P_T / \|\mathbf{B}^{(u)}\|_F^2 = P_T / \text{tr}((\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-H} \mathbf{H}\mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}) \\ &= P_T / \text{tr}((\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-H}) = P_T / \text{tr}((\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数, $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。获得最终的权矢量矩阵 $\mathbf{B} = \beta \mathbf{B}^{(u)}$ 。

3 下行链路的自适应用户选择

3.1 多用户选择方案

假设从系统中选择 k 个用户同时进行通信, 则信道矩阵可以表示为 $\widehat{\mathbf{H}} = [\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T, \dots, \mathbf{h}_k^T]^T$ 。将发射 SNR (P_T/σ^2) 表示为 γ^n , 得到第 i 个用户接收到的 SNR

$$\gamma_i = \frac{P_T}{\text{tr}[(\widehat{\mathbf{H}}\widehat{\mathbf{H}}^H)^{-1}]\sigma^2} = \frac{\gamma^n}{\text{tr}[(\widehat{\mathbf{H}}\widehat{\mathbf{H}}^H)^{-1}]} \quad (4)$$

所有用户的和速率为

$$R_{\text{sum}} = \sum_k \log_2(1 + \gamma_i) \quad (5)$$

为了最大化系统总的和速率式(5), 也就是要最小化 $\text{tr}[(\widehat{\mathbf{H}}\widehat{\mathbf{H}}^H)^{-1}]$ 。对信道矩阵 $\widehat{\mathbf{H}}$ 中的每一行 \mathbf{h}_i 向前面所有行构成的子空间做正交投影

$$\mathbf{g}_i = \mathbf{h}_i - \mathbf{h}_i \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\mathbf{g}_j^* \mathbf{g}_j}{\|\mathbf{g}_j\|^2} \quad (6)$$

定义 $h_{ij} = \mathbf{h}_i \mathbf{g}_j^* / \|\mathbf{g}_j\|$ 为 \mathbf{h}_i 沿 $\mathbf{g}_j / \|\mathbf{g}_j\|$ 方向的投影分量, 从式(6)看出, 信道矩阵 $\widehat{\mathbf{H}}$ 可以分解为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{h}_k \end{pmatrix} = \mathbf{R}\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \|\mathbf{g}_1\| & 0 & \cdots & 0 \\ h_{21} & \|\mathbf{g}_2\| & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{k1} & h_{k2} & \cdots & \|\mathbf{g}_k\| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{g}_1 / \|\mathbf{g}_1\| \\ \mathbf{g}_2 / \|\mathbf{g}_2\| \\ \vdots \\ \mathbf{g}_k / \|\mathbf{g}_k\| \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中 \mathbf{R} 为下三角矩阵, \mathbf{Q} 是满足 $\mathbf{Q}\mathbf{Q}^H = \mathbf{I}_k$ 的 $k \times M$ 维矩

阵。优化的代价函数通过计算简化为

$$\text{tr}[(\widehat{\mathbf{H}}\widehat{\mathbf{H}}^H)^{-1}] = \text{tr}[(\mathbf{R}\mathbf{Q}\mathbf{Q}^H\mathbf{R}^H)^{-1}] = \|\mathbf{R}^{-1}\|_F^2 \quad (8)$$

本文采用递增的用户选择过程。从空集合开始, 每次添加一个用户到该集合中直到完成所有的选择。假设集合中已经选择出 $i-1$ 个用户并且 \mathbf{R}_{i-1}^{-1} 已知。新添加一个用户, \mathbf{R}_i^{-1} 的最后一行可以由前面所有行以及信道矩阵分解后的元素计算得到

$$\mathbf{r}_i^{-1} = \frac{1}{\|\mathbf{g}_i\|} \left(\mathbf{e}_i - \sum_{j=1}^{i-1} h_{ij} \mathbf{r}_j^{-1} \right) \quad (9)$$

其中 \mathbf{r}_i^{-1} 为 \mathbf{R}_i^{-1} 的第 i 行, \mathbf{e}_i 是只有第 i 个元素为 1 的零向量。它们之间满足关系式

$$\|\mathbf{R}_i^{-1}\|_F^2 = \|\mathbf{R}_{i-1}^{-1}\|_F^2 + \|\mathbf{r}_i^{-1}\|_2^2 \quad (10)$$

为了寻找第 i 个用户, 只需要使之满足 $\|\mathbf{r}_i^{-1}\|_2^2$ 最小。算法流程如下:

初始化: $\Omega_1 = [1, 2, \dots, K]$, $\mathbf{S} = \phi$, $R_{\text{temp}} = 0$

For $i = 1 : M$

(1) 对 $k \in \Omega_i$ 的每一行, 计算 $h_{kj}, \mathbf{g}_k, \mathbf{r}_k^{-1}$, $j = 1, \dots, i-1$ $i = 1$ 时, $\mathbf{g}_k = \mathbf{h}_k$, $\mathbf{R}_k^{-1} = 1/\|\mathbf{g}_k\|$ 。

(2) 选择第 i 行满足 $\pi(i) = \arg \min_{k \in \Omega_i} \|\mathbf{r}_k^{-1}\|_2^2$, 计算 $\|\mathbf{R}_i^{-1}\|_F^2$

以及和速率 R_{sum} 。

(3) 如果 $R_{\text{sum}} > R_{\text{temp}}$

$$R_{\text{temp}} = R_{\text{sum}} \quad \mathbf{S} \leftarrow \mathbf{S} \cup \{\pi(i)\}$$

$$\mathbf{h}(i) = \mathbf{h}_{\pi(i)} \quad \mathbf{g}(i) = \mathbf{g}_{\pi(i)}$$

$$\Omega_i = \{k \in \Omega_i, k \neq \pi(i)\}$$

否则算法结束

End

需要注意的是为了实现用户之间零干扰, 每次迭代增加一个用户后可能使总的速率下降。所以步骤(3)是必要的, 可以使选择的用户数随当前的信道状态自适应调整变化。当信道状态好的时候同时服务较多的用户, 信道状态较差时服务较少的用户。提出的算法则为每次迭代提供了简单的计算和速率的方法。

3.2 结合比例公平调度的算法改进

基于容量最大化的用户选择方法存在一个缺点, 即基站总是尝试把资源分配给信道条件较好的用户, 而没有保证单个用户的服务质量。这种服务对整个系统来说是不公平的, 因为一些用户由于信道条件较差可能一直不被选择用于通信。比例公平调度算法是一种既能满足一定公平性又能保持较高和速率的方法。其优化的目标函数为

$$\max_{\mathbf{S} \subset \{1, \dots, K\}} \sum_{i=1}^k \mu_i(t) R_i(\mathbf{S}, t) \quad (11)$$

其中 $\mu_i(t)$ 和 $R_i(\mathbf{S}, t)$ 分别表示第 i 个用户在 t 时刻的权值和当前的数据率(IS-856 标准中每个时隙为 1.67ms), \mathbf{S} 为已经选定的用户集。初始化所有用户的权值为 1, 随后每个用户的权值按下式子更新

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\mu_i(t+1)} &= \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) \frac{1}{\mu_i(t)} + \frac{1}{t_c} R_i(\mathbf{S}, t), \quad i \in \mathbf{S} \\ \frac{1}{\mu_i(t+1)} &= \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) \frac{1}{\mu_i(t)}, \quad i \notin \mathbf{S} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中调度时间比例 t_c 的大小是合理选取的。这相当于原始比例公平调度算法 (PFS)^[9] 的扩展, 将前面算法第(2)步用式(11)的代价函数代替。本文算法可以在每次迭代时计算出当前每个用户的数据率, 从而根据相应的权值计算代价函数, 选出最优的用户并进行自适应。迭代完毕后更新权值进行下一时刻的选择。

4 仿真结果

这一节主要通过仿真比较所提出的算法与几种典型用户选择算法的性能。仿真中假设信道为准静态平瑞利衰落信道。所有的结果都是经由 1000 次独立信道实现求平均获得。在 ZFBF-SUS 算法中, 对每个用户数 K 计算求取最优的 α 值。

图 2 为发射天线 $M = 6$, $\text{SNR} = 10\text{dB}$, 各种算法的系统速率容量与用户数目关系曲线的比较。从结果中可以看出, 传统的只服务信道最好的一个用户的 TDMA 机制和轮询调度(RRS)算法性能很差。因为没有空间复用增益, 即使系统中总的用户数增加, 和速率容量也基本保持不变。与其他的多用户选择算法相比, 本文方法的性能有较大的优越性, 并且接近于最优的曲线。图 3 分别比较了 $M = 6$ 和 $M = 4$ 时不同算法的性能。虽然当 $M = 4$ 时本文方法的曲线与 ZFBF-SUS 相互接近, 但是随着发射天线数的增加, 本文算法的优越性越来越明显, 而且这种优越性会随着天线数目继续增加进一步提高。

在低信噪比情况下, 比如 $\text{SNR} = 0\text{dB}$, 图 4 给出了 $M = 6$ 时各种算法的和速率曲线。这时 ZFBF-SUS 与最大范数的性能很接近, 特别当用户数目较小的时候, ZFBF-SUS 甚至比最大范数法还要差。而本文的算法始终比其他的方法好, 并且基本与最优重合。由于计算复杂度的关系, 上面的结果中只给出最优曲线的部分性能 ($M = 4$ 时, 用户数 K 的范围从 10 到 30, 而 $M = 6$ 时从 10 到 25)。

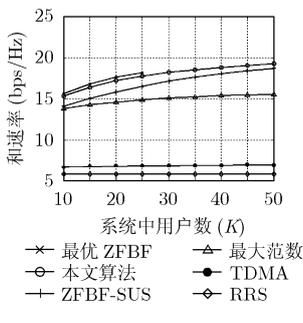


图 2 系统和速率与用户数目的关系曲线, $M = 6$, $\text{SNR} = 10\text{dB}$

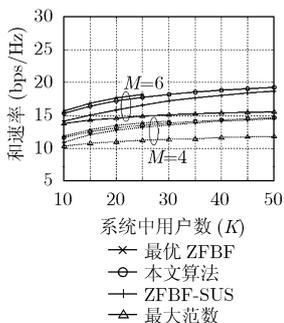


图 3 系统和速率在 $M = 6$, $M = 4$ 时的性能比较, $\text{SNR} = 10\text{dB}$

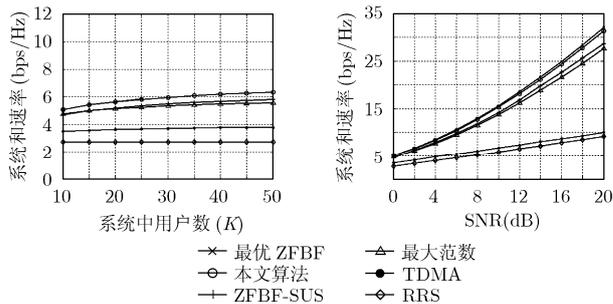


图 4 系统和速率与用户数目的关系曲线, $M = 6$, $\text{SNR} = 0\text{dB}$ 图 5 系统和速率与 SNR 的关系曲线, $M = 6$, $K = 10$

图 5 是 $M = 6$, $K = 10$ 时和速率与不同 SNR 的关系图。当 SNR 值在很大范围内变化时, 本文的算法始终接近最优的曲线, 并且信噪比较低时基本与最优重合。相对于 ZFBF-SUS 以及最大范数的性能差异也会随 SNR 的提高逐渐增大。

图 6 采用每个用户的平均数据率比较本文提出的公平调度算法与其他算法的公平性。调度时间比例 t_c 的取值不固定, 它由实际中所需要的等待时间决定。仿真中为了保证所有用户的公平性, 选择 $t_c = 1000$ slots (1.67s)^[9,10]。假设系统中用户数为 40, 每个用户在无干扰情况下平均接收到的 SNR 从 0dB 到 20dB 范围呈对数线性增加, 即不同用户处于不同的信道状态。从仿真结果中可以看出, 结合比例公平调度之后的算法可以达到与 RRS 算法类似的公平性。不论用户所处的信道状态好坏, 它们都有公平服务的机会, 并且每个用户的速率要比 RRS 高, 而且要比 PF-ZFBF^[6] 性能好。不加入公平调度时, 本文提出的算法优先选择 SNR 较高或信道状态好的用户, 从而造成低 SNR 用户一直得不到服务。

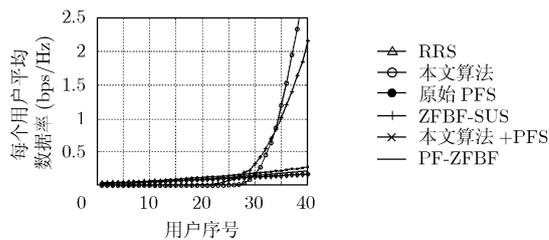


图 6 各种算法的公平性比较

当然, 在系统和速率与用户的公平性之间存在一种折中, 为了保证一定的公平性必然是以一定的速率损失为代价的。是否进行公平调度或者需要保证的公平度要根据具体情况决定。

5 复杂度分析

算法流程中步骤(1)~步骤(3)最多运行 M 次, 我们只给出最大值。通常情况下 M 固定, K 变化且一般值较大。步骤(1)主要的计算量集中在计算 h_{ij} 时需要一次矢量乘并且计算 K 个用户, 最大复杂度为 $O(MK)$, 循环 M 次之后的复杂度为 $O(M^2K)$ 。步骤(2)用于用户选择, 其中 r_k^{-1} 已知, 计算

其范数需要一次矢量乘并循环 M 次之后对应的最大复杂度仍为 $O(M^2K)$ 。步骤(3)只需进行数值比较,相对前面两步的计算复杂度可以忽略。通过分析,用户选择过程的整体复杂度为 $O(M^2K)$ 。

从用户选择的角度看,提出算法的复杂度与 ZFBF-SUS 相当,但是又有各自的特点。SUS 每次循环的时候通过消除与已选择用户正交性较低的用户来减少待选用户的数目并进行自适应,而系统中存在不同用户数时最优的正交系数 α 并不相同。为了寻找最优的正交系数需要附加的计算量。在计算最终信道容量时也需要求取矩阵的逆,计算量较大。并且由于其自适应条件的特性,虽然 SUS 算法在系统中用户数很大时比提出算法快速有效,但在系统中用户数目较少时有明显的性能损失。而提出算法每次通过简单的数值计算即可得到当前的系统容量,并且相对于 SUS 方法尤其在用户数较少时有很大的性能优势。

结合比例公平调度的算法中第(2)步的代价函数用于最大化当前系统和速率,即每次迭代选择使系统加权容量增加最大的用户,计算过程比之前算法要复杂,但是复杂度并没有增加。算法的整体复杂度仍然为 $O(M^2K)$ 。

6 结束语

本文基于最大化多用户 MISO 下行链路的系统容量提出一种自适应用户选择算法。所提出的用户选择准则以及算法可以在每次迭代时简单计算出当前的和速率并进行自适应。该算法提高了系统的自适应性,并且由于整个过程只需要矢量相乘,计算复杂度较低。不论发射天线数或者发射 SNR 如何变化,提出的算法都能表现出较好的性能,并且接近最优的方法,尤其对于系统中用户数目较少的情况。在此基础上结合比例公平调度对算法进行改进,保证整个系统所有用户服务的公平性,在保持一定用户速率的同时使得信道状态一直比较差的用户也能得到服务机会。

参 考 文 献

- [1] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. *European Trans. on Telecommun.*, 1999, 10(6): 585-595.
- [2] Vishwanath S, Jindal N, and Goldsmith A. Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of gaussian MIMO broadcast channels[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, 49(10): 2658-2668.
- [3] Chung J, Hwang C S, Kim K, and Kim Y K. A random beamforming technique in MIMO systems exploiting multiuser diversity[J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2003, 21(5): 848-855.
- [4] Spencer Q H, Swindlehurst A L, and Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multi-user MIMO channels[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(2): 461-471.
- [5] Kobayashi M and Caire G. Joint beamforming and scheduling for a MIMO downlink with random arrivals[C]. *IEEE International Symposium on Information Theory*, Seattle, USA, 2006: 1442-1446.
- [6] Yoo T and Goldsmith A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming[J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2006, 24(3): 528-541.
- [7] Dimic G and Sidiropoulos N D. On downlink beamforming with greedy user selection: performance analysis and a simple new algorithm[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 53(10): 3857-3868.
- [8] Bartolome D and Perez-Neira A I. Spatial scheduling in multiuser wireless systems: from power allocation to admission control[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communication*, 2006, 5(8): 2082-2091.
- [9] Viswanath P, Tse D N C, and Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2002, 48(6): 1277-1294.
- [10] Jalali A, Padovani R, and Pankaj R. Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system[C]. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Tokyo, Japan, 2000, 3: 1854-1858.

- 邢蕊: 女, 1983年生, 硕士生, 研究方向为多用户 MIMO 系统、空时信号处理等。
- 刘 璐: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、盲信号处理、多媒体通信等。
- 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。