

MIMO多用户系统中的有限反馈研究

潘沛生, 宋荣方, 郑宝玉, 曹士珂

(南京邮电大学通信与信息工程学院 江苏 210003)

【摘要】在MIMO下链路通信系统中, 如果每个用户将它们的信道状态信息反馈回基站, 则基站可以根据用户信道状态信息, 调度信道条件好的用户传输数据, 从而获得很高的系统容量。该文针对当系统中用户个数显著增加, 大量的反馈信息导致反馈信道溢出的状况, 提出一种基于用户分级的减少反馈信息总量的策略, 该策略要求只有当用户的信扰噪比高于某个门限, 用户才反馈其信道方向信息和用户级别信息; 否则不反馈任何信息。理论分析和计算机仿真结果证明了该策略能有效地减少反馈的信息总量并且可获得复用增益和多用户分集增益。

关键词 有限反馈; MIMO信道; 多用户分集; 用户级别; 波束成形

中图分类号 TN92

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.04.005

Limited Feedback for MIMO Multiuser Systems

PAN Pei-sheng, SONG Rong-fang, ZHENG Bao-yu, and CAO Shi-ke

(College of Communication & Information Engineering, University of Posts and Telecommunications Nanjing 210003)

Abstract In multiple input multiple output (MIMO) downlink systems, if all users send their channel state information (CSI) to the base station, the base station can schedule users whose channels are good and send them information to obtain high system throughput. However, when the number of users in the systems grows quickly, large quantity of feedback information will lead the overflow of the feedback channel. In this paper, we propose a limited feedback strategy based on user rank. In this strategy, only those users whose signal interference and noise ratio (SINR) above a predetermined threshold will send their channel direction information (CDI) and their user ranks to the base station and other users will send nothing to the base station, resulting in the greatly reduced feedback load. Theoretical analysis and computer simulation show the feedback load can be greatly reduced by this method and MIMO downlink systems can achieve multiplexing and multiuser diversity gain at the same time.

Key words limited feedback; MIMO channel; multiuser diversity; user rank; zero-forcing beamforming

目前的研究表明, 在MIMO下链路系统中, 通过脏纸编码(dirty-paper coding, DPC)可获得复用分集, 即通信系统容量随着基站配置的发送天线个数 M 的增加而线性增长^[1]。而且当系统中用户个数 K 很大时, 还可获得多用户分集, 即系统容量随着 $\log\log K$ 而增长。但是由于DPC算法的运算复杂性使其不适合实际的通信系统, 因而研究者们又提出了运算复杂度较低而又能接近DPC容量的算法^[2-3]。

以上算法均有一个共同的假设, 即基站必须知道所有用户的信道状态信息(CSI)。而在实际的通信系统中该假设不成立, 因此研究者们又提出了把用户的信道状态信息通过上链路反馈信道, 传送给基

站的反馈技术^[4-6]。文献[7]提出了一种可以同时获得多用户分集和复用分集的MIMO下链路通信系统。该系统要求所有的用户不仅要反馈其信道方向信息(CDI)而且还要反馈其信道的质量信息(channel quality information, CQI)给基站, 基站利用反馈回的CDI和CQI信息, 通过半正交用户选择算法调度需要发送信息的用户, 最后通过迫零波束成形(zero-forcing beamforming, ZFBF)发送数据。但当系统中用户个数很多时, 所有用户均反馈其CDI和CQI将使反馈的信息量增大, 从而导致反馈信道的溢出。而且从如此多的反馈用户中选取正交用户, 将是一个非常费时的任务。

收稿日期: 2010-11-16; 修回日期: 2011-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(60972039,60972041); 江苏省高校自然科学基金基础研究计划重大项目(08KJD510001); 国家科技重大专项基金(2009ZX03003-006)

作者简介: 潘沛生(1966-), 男, 博士生, 副教授, 主要从事无线网络与通信信号处理方面的研究。

文献[8]提出了一种基于SNR反馈门限的有限反馈方法,即只有当一个用户的SNR大于基站预先设置的某个阈值时,该用户才反馈其CQI。该方法考虑的是单输入单输出(SISO)场景,即基站只配备一根发射天线,因此不必考虑用户CDI信息的反馈。而在MIMO下链路多用户场景下,不仅需要考虑CQI,而且还需要考虑表示信道空间方向的CDI以及用户间的干扰等。在MIMO下链路多用户场景下,文献[9-12]提出的基于SINR反馈门限的有限反馈方法均应用了随机波束成形(random beamforming),即在调度用户前先构造波束成形,然后在每个波束上选择用户。而迫零波束成形ZFBC则要求先调度用户,然后形成正交波束。

在MIMO下链路多用户ZFBC场景下,本文提出了基于用户级别的反馈策略以减少文献[7]所需要的反馈量,即按照用户的CQI亦或信道的信扰噪比(signal interference and noise ratio, SINR)对用户进行分级,当一个用户的SINR大于由基站预先设置的阈值时,该用户不仅反馈其CDI,而且还反馈其用户级别。

1 系统模型

本文反馈策略的系统模型如图1所示,设系统共有 K 个用户,每个用户配置一根天线。由基站预先设置两个SINR阈值,分别称为高反馈门限和低反馈门限。将SINR值大于高反馈门限的用户称为一级用户,其级别用0表示;将SINR值介于低反馈门限和高反馈门限之间的用户称为二级用户,其级别用1表示,因此用户的级别可以用1 bit表示。假设其中 U 个用户的SINR值大于低反馈门限,不仅需要把它们CDI反馈给基站,而且它们的用户级别也要反馈给基站。

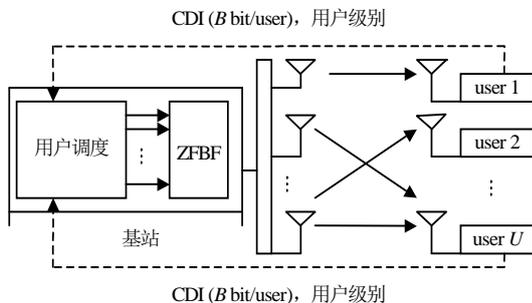


图1 K 个用户中有 U 个用户反馈其CDI和用户级别的MIMO下链路系统模型

设基站配置有 M ($M \geq K$)根天线,用户与基站各天线间的信道为相互独立的瑞利平衰落信道,则

第 k 个用户接收到的信号为:

$$y_k = \mathbf{h}_k \mathbf{x} + z_k \quad k=1,2,\dots,K \quad (1)$$

式中, $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示第 k 个用户的平衰落信道向量; $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示基站发送的符号,其平均功率约束为 $E\{\|\mathbf{x}\|^2\} = P$; z_k 表示单位方差的复高斯白噪声。

2 CDI量化模型

采用随机向量量化法^[12](random, RVQ vector quantization)设计量化的码本模型,每个码字均是随机独立地产生一个 M 维单位复高斯向量,整个码本由 N 个 M 维单位复高斯向量组成:

$$C_k = \{\mathbf{c}_{k1}, \mathbf{c}_{k2}, \dots, \mathbf{c}_{kN}\} \quad N = 2^B \quad (2)$$

式中, B 表示码字标号的比特数目。定义每个用户的信道方向为:

$$\tilde{\mathbf{h}}_k = \mathbf{h}_k / \|\mathbf{h}_k\| \quad (3)$$

每个用户将其信道方向 $\tilde{\mathbf{h}}_k$ 按照最小距离准则量化为一个单位复高斯向量码字 $\hat{\mathbf{h}}_k$,其值为 \mathbf{c}_{kn} ,码字 \mathbf{c}_{kn} 的选择由下式确定:

$$n = \arg \max_{1 \leq j \leq N} |\tilde{\mathbf{h}}_k \mathbf{c}_{kj}^H| \quad (4)$$

式中, n 是该码字的标号。

3 用户调度

假设基站拥有与用户同样的码本,并且事先存放在各自的存储器中,另假设有 U 个用户的SINR值大于低反馈门限。当基站收到 U 个用户反馈的用 B 个比特表示的码字的标号后,就可以获得相应用户的CDI信息,当基站收到 U 个用户反馈的用1 bit表示的用户级别后,就可以获得相应用户的级别信息。

假设 U 个反馈用户中有 V 个一级用户,其他为二级用户。采用两级用户调度法:首先定义由 V 个一级用户组成的用户集合 B_0 和 $U-V$ 个二级用户组成的集合 B_1 为:

$$B_0 = \{u_1, u_2, \dots, u_V\} \quad (5)$$

$$B_1 = \{v_1, v_2, \dots, v_{U-V}\} \quad (6)$$

基站从初始用户集合 B_0 中,任意选择一个用户作为第一个调度用户 $\pi(1)$ 。当选出第1个调度用户后,定义一级用户集合 B_{10} 和二级用户集合 B_{11} 如下:

$$B_{10} = \{k \in B_0 : |\hat{\mathbf{h}}_k \hat{\mathbf{h}}_{\pi(1)}^H| \leq \varepsilon\} \quad (7)$$

$$B_{11} = \{k \in B_1 : |\hat{\mathbf{h}}_k \hat{\mathbf{h}}_{\pi(1)}^H| \leq \varepsilon\} \quad (8)$$

式中, ε 表示两个量化后的信道的最大空间相关度, ε 越小表示信道间的正交程度越高,当 ε 为0时表示信道完全正交。显然用户集合 B_{10} 表示与已选出的第一个调度用户均半正交的一级用户的集合,用户集合

B_{i1} 表示与已选出的第一个调度用户均半正交的二级用户的集合。如果集合 B_{i0} 不为空, 则基站从集合 B_{i0} 中任意选择一个一级用户作为第二个调度用户 $\pi(2)$; 否则基站从集合 B_{i1} 中任意选择一个二级用户作为第二个调度用户 $\pi(2)$ 。依次类推, 当已经选出了 i 个调度用户后, 定义一级用户集合 B_{i0} 和二级用户集合 B_{i1} 为:

$$B_{i0} = \{k \in B_0 : |\hat{\mathbf{h}}_k \hat{\mathbf{h}}_{\pi(j)}^H| \leq \varepsilon, 1 \leq j \leq i\} \quad (9)$$

$$B_{i1} = \{k \in B_1 : |\hat{\mathbf{h}}_k \hat{\mathbf{h}}_{\pi(j)}^H| \leq \varepsilon, 1 \leq j \leq i\} \quad (10)$$

如果集合 B_{i0} 不为空, 则基站从集合 B_{i0} 中任意选择一个一级用户作为第 $i+1$ 个调度用户 $\pi(i+1)$; 否则基站从集合 B_{i1} 中任意选择一个二级用户作为第 $i+1$ 个调度用户 $\pi(i+1)$, 继续该过程直到 M 个用户全部被挑选出为止。需要说明的是只要选择的低反馈门限足够小, 即其SINR值大于低反馈门限的用户个数 U 足够大, 总能选出 M 个彼此半正交的用户。最后组成基站调度的用户集合为:

$$S_c = \{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(M)\} \quad (11)$$

从调度用户的选择算法可以看出, 在选择调度用户时, 首先从所有与已选出的用户均半正交的一级用户中任意选择一个用户, 如果不存在, 才从所有与已选出的用户均半正交的二级用户中任意选择一个用户。因为被选择的用户均是近似正交的, 所以可通过迫零波束成形ZFBF发送数据。因不是完全正交, 所以存在干扰。

4 性能分析

采用等功率分配的方法, 即每个用户被分配的功率为:

$$\rho = P/M \quad (12)$$

则由文献[7]可得每个用户的近似SINR为:

$$\text{SINR}_k = \frac{\rho \|\mathbf{h}_k\|^2 \cos^2 \theta_k}{1 + \rho \|\mathbf{h}_k\|^2 \sin^2 \theta_k} \quad (13)$$

式中, θ_k 表示信道向量 \mathbf{h}_k 和信道方向被量化后的向量 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 之间的夹角。则系统总容量的统计平均为:

$$E\{R\} \approx E \left\{ \sum_{i \in S_c} \log_2(1 + \text{SINR}_i) \right\} \geq \sum_{i=1}^M \log_2(1 + \gamma) \quad (14)$$

式中, γ 为SINR低反馈门限。

下面分析如何选择 γ 。为了使系统能获得复用增益和多用户分集增益, 可令:

$$E\{R\} = \alpha M \log_2(\log_2 K) \quad (15)$$

式中, $\alpha > 0$ 为比例因子, 由式(14)和式(15)有:

$$\sum_{i=1}^M \log_2(1 + \gamma) \leq \alpha M \log_2(\log_2 K) \quad (16)$$

由式(16)可获得SINR低反馈门限为:

$$\gamma \leq (\log_2 K)^\alpha - 1 \quad (17)$$

由式(17)知, γ 可以取值 $(\log_2 K)^\alpha - 1$, 只有SINR大于 γ 的用户才将其CDI和用户级别反馈给基站。但是当 α 取值很大时, 低反馈门限 γ 的值很大, 此时能够反馈信息的用户个数 U 极小, 无法从中选出 M 个彼此半正交的用户, 造成系统容量性能的下降。而当 α 取值很小时, 低反馈门限 γ 的值很小, 此时能够反馈信息的用户个数 U 极大, 造成反馈信息量的剧增。所以 α 的取值, 既要保持像文献[7]中所有用户均反馈其SINR时系统的容量性能, 又要使反馈信息量尽可能小。因为只有SINR大于低反馈门限的用户才需要把它们CDI和用户级别反馈给基站, 高反馈门限值的设定不影响反馈信息量的大小, 本文省略对高反馈门限取值的讨论。

5 反馈信息量数量分析

本文提出基于用户分级的反馈策略, 即可由基站预先设置高反馈门限和低反馈门限两个SINR阈值。假设其中 U 个用户的SINR大于低反馈门限(即一级用户和二级用户的个数为 U), 则不仅需要把它们CDI反馈给基站, 而且它们的用户级别也反馈给基站。 U 个用户中的每个用户CDI信息用 B 个比特进行量化, 用户级别可用1个比特表示, 本文策略的反馈信息总量为 $U(B+1)$ 个比特; 文献[7]需要全部 K 个用户反馈其CDI和SINR, 其反馈信息总量为 KB 个比特和 K 个SINR标量。因为每个用户的CDI信息均用 B 个比特进行量化, 而且为了便于比较, 本文忽略未被量化的标量SINR的反馈和1个比特的用户级别的反馈, 所以定义反馈负载为 U , 即需要反馈的用户的个数。下面推导反馈负载。

由文献[7]可知一个用户的SINR的分布函数为:

$$F_{\text{SINR}}(x) = 1 - \frac{2^B e^{-\frac{x}{\rho}}}{(x+1)^{M-1}} \quad (18)$$

则有 i 个用户的SINR大于门限 γ 的概率为:

$$P_i = C_K^i (1 - F_{\text{SINR}}(\gamma))^i (F_{\text{SINR}}(\gamma))^{K-i} = C_K^i \left(\frac{2^B e^{-\frac{\gamma}{\rho}}}{(\gamma+1)^{M-1}} \right)^i \left(1 - \frac{2^B e^{-\frac{\gamma}{\rho}}}{(\gamma+1)^{M-1}} \right)^{K-i} \quad (19)$$

则平均的反馈负载为:

$$E(U) = \sum_{i=0}^K iP_i = \sum_{i=0}^K iC_K^i \left(\frac{2^B e^{-\frac{\gamma}{\rho}}}{(\gamma+1)^{M-1}} \right)^i \left(1 - \frac{2^B e^{-\frac{\gamma}{\rho}}}{(\gamma+1)^{M-1}} \right)^{K-i} = \sum_{i=0}^K iC_K^i \frac{2^{Bi} e^{-\frac{\gamma i}{\rho}} (1 - 2^B e^{-\frac{\gamma}{\rho}})^{K-i}}{(\gamma+1)^{2(M-1)}} \quad (20)$$

从式(20)可以看到下链路系统中存在的用户越多, 平均的反馈负载就越大。低反馈门限 γ 越大, 平均的反馈负载就越小, 这是因为SINR大于低反馈门限的用户个数减少了。基站配置的发射天线个数 M 越多, 平均的反馈负载就越小, 这是因为发射天线个数越多, 造成的用户间的干扰就越大, SINR能够高于低反馈门限的用户个数就减少, 从而使平均的反馈负载减少。CDI信息的量化精度越高即 B 越大, 平均的反馈负载就越大。所以在设计系统时上述参数需要综合考虑。

6 仿真结果

仿真环境设置如下: 基站天线个数 $M=8$; 量化比特数目 $B=10$; 量化后信道的最大空间相关 $\varepsilon=0.15$; 每个用户与基站各天线间的信道均是相互独立的同分布的瑞利平衰落信道。

文献[7]所提出的方法与本文提出的减少反馈信息量的方法在系统容量方面的性能比较, 如图2所示, 作为理想限DPC性能也被画出。结果显示随着反馈门限的降低(即 α 减少), 本文方法与文献[7]的性能差距逐渐减少, 当 α 减少至 0.25×1.625 时, 两者的性能已经完全相等; 当 $\alpha < 0.25 \times 1.625$ 时, 系统的性能不会继续改善。这是因为 α 取值很大时, 低反馈门限 γ 的值很大, 此时能够反馈回来的用户个数 U 极小, 无法从中选出 M 个彼此半正交的用户, 造成系统容量性能的下降。而当 α 取值越来越小时, 低反馈门限 γ 的值也越来越小, 此时能够反馈信息的用户个数 U 越大, 因此系统容量性能逐渐增加, 直至与文献[7]相同。本文对 α 的取值是从高到低逐步实验得到的, 还无法从理论上给出其最佳闭式解, 这也是未来需要进一步做的工作。

文献[7]与本文方法在反馈负载方面的性能比较如图3所示, 本文提出的方法可以显著地减少系统的反馈负载, 如果考虑到文献[7]要求反馈的每个用户的SINR信息, 这种差距将更加巨大。

综合图2与图3的结果, 可以看到: 本文提出的方法与文献[7]的方法相比, 当选择恰当的反馈门限, 本文方法与文献[7]的系统容量性能几乎相同, 即可同时获得复用增益和多用户增益, 但所需要的反馈量却显著地减小。

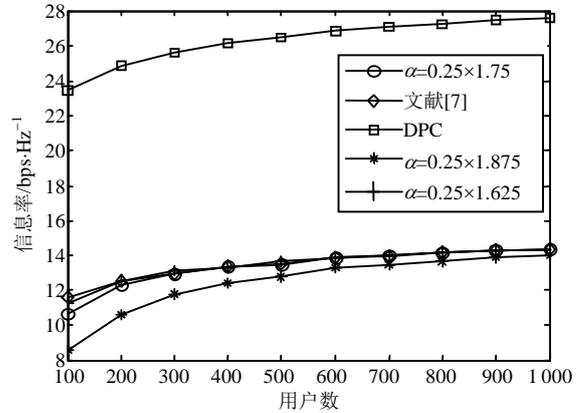


图2 随系统中用户个数变化的系统总信息率

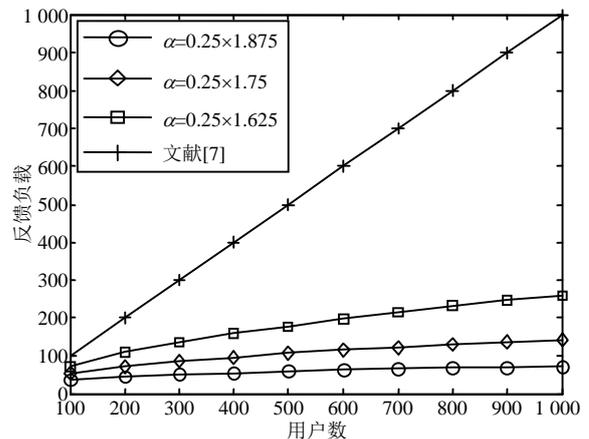


图3 随系统中用户个数变化的反馈负载

通过蒙特卡罗实验仿真得到的反馈负载与通过式(20)计算得到的结果的比较, 如图4所示, 结果显示两者基本吻合, 说明了式(20)计算系统反馈负载的正确性。

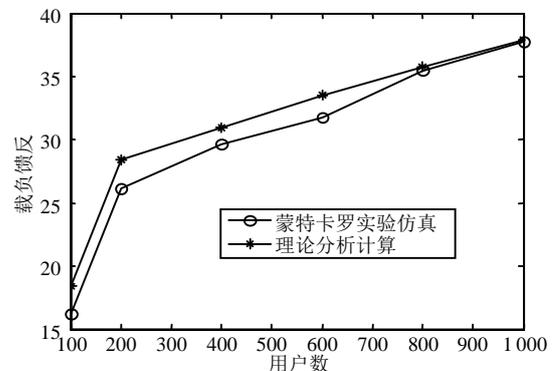


图4 通过蒙特卡罗实验仿真得到的反馈负载与通过理论计算得到的结果的比较

7 结 论

文献[7]提出了一种可以同时获得多用户分集和复用分集的多用户下链路MIMO系统, 该系统要求所有的用户给基站不仅要反馈其信道方向信息CDI, 而且还要反馈其信道质量信息SINR, 但是当系统中用户个数显著增加时, 大量的反馈信息会导致反馈信道的溢出。作为改进, 本文研究了能同时获得复用增益和多用户分集增益的方法, 提出了基于用户级别的反馈策略。理论分析和计算机仿真结果表明当系统中用户个数足够多时, 本文策略的性能与文献[7]的性能基本相同, 但需要反馈的信息量却显著减少。

参 考 文 献

- [1] SHARIF M, HASSIBI B. A comparison of time-sharing, DPC, and beamforming for MIMO broadcast channels with many users[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(1): 11-15.
- [2] DIMIC G, SIDIROPOULOS N D. On downlink beamforming with greedy user selection: Performance analysis and a simple new algorithm[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(10): 3857-3868.
- [3] YOO T, GOLDSMITH A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 528-541.
- [4] JINDAL N. MIMO broadcast channels with finite rate feedback[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(11): 5045-5060.
- [5] GESBERT D, KOUNTOURIS M, HEATH R W, et al. Shifting the MIMO paradigm[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 36-46.
- [6] LOVE D J, HEATH R W, LAU V K N, et al. An overview of limited feedback in wireless communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(8): 1341-1365.
- [7] Yoo T, JINDAL N, GOLDSMITH A, et al. Multi-antenna broadcast channels with limited feedback and user selection[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(7): 3417-3428.
- [8] GESBERT D, ALOUINI M S. How much feedback is multi-user diversity really worth?[C]//*IEEE International Conference on Communications*. Paris: IEEE, 2004: 234-238.
- [9] PUGH M, RAO B D. Reduced feedback schemes using random beamforming in MIMO broadcast channels[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(3): 1821-1832.
- [10] DIAZ J, SIMEONE O, BAR NESSY. Asymptotic analysis of reduced feedback strategies for MIMO Gaussian broadcast channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(3): 1308-1316.
- [11] ZHANG WEI, LETAIEF K B. MIMO broadcast scheduling with limited feedback[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(7): 1457-1467.
- [12] YEUNG C A, JAFAR S. On the performance of random vector quantization limited feedback beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(2): 458-462.

编辑 张俊