

文章编号: 1000-5862(2013)01-0037-05

多蜂窝 MISO 通信系统中干扰消除策略研究

郭荣新, 袁继昌

(华侨大学信息科学与工程学院 福建 厦门 361021)

摘要: 针对部分信道状态信息下的小区间干扰消除问题, 通过使用 2 个独立的随机矢量量化(RVQ)码本分别量化期望信道和干扰信道, 首次分析了 2 个小区 MISO 有限反馈系统模型下 3 种波束形成传输策略(特征波束形成、迫零波束形成、最大化信漏噪比)和速率性能, 并根据用户在小区中的位置和小区边缘的平均信噪比, 研究了基站最优的波束形成传输策略选择. 仿真结果表明: 当用户噪声受限时, 相邻小区基站应选择特征波束形成传输策略; 当用户干扰受限时, 相邻小区基站应选择最大化信漏噪比传输策略.

关键词: 小区间干扰; 波束形成; 有限反馈; 和速率

中图分类号: TN 911.7 **文献标志码:** A

0 引言

多输入多输出(MIMO)技术能够提高无线通信频谱利用率并带来显著的系统增益, 但相邻小区的信号干扰严重地影响了这种性能, 尤其对处于小区边缘的用户更为严重.

协作多小区传输技术也叫网络 MIMO(network MIMO), 在 3GPP LTE-A 中也叫协作多点传输(CoMP)技术, 能够把干扰信道转换成 MIMO 广播信道, 可以完全消除小区间干扰, 因此受到广泛的关注^[1-3]. 最优的脏纸编码(DPC)和次优的线性预编码已经在文献[4-6]中已有相关研究. 但 DPC 计算复杂度较高, 在实际系统中很难应用; 线性预编码通常需要基站发射天线数与服务用户总的接收天线数满足一定的关系^[6]. 中继辅助的协作通信在无需配置多天线的前提下可获得空间分集增益、增加无线链路容量; 文献[7]针对并行双向中继系统, 提出了一种中断概率最优的中继选择策略, 能够显著提升系统的性能. 文献[8]提出了一种基于最大化信漏噪比(SLNR)的预编码设计方案, 由于不需要考虑发射天线与接收天线数的关系, 且预编码的设计考虑了噪声的影响, 因此该方案性能上要优于迫零波束形成. 上述这些方案可以显著地提升系统的性能, 但是这些方案通常需要基站已知完全信道状态

信息(Full-CSI), 并假设基站间通过理想的回程链路进行信息交互. 但是在实际系统中很难获取完全信道状态信息, 而且对于容量有限的回程链路, 基站间大量的信息交互无疑会增加其负载.

本文在有限反馈 2 个小区 MISO 系统模型下, 分析了小区间干扰消除的 3 种波束形成传输策略: 特征波束形成、迫零波束形成、最大化信漏噪比波束形成, 并针对用户在小区中的位置和小区边缘的平均信噪比, 研究了 2 个基站应选择何种传输策略才能使系统的和速率最优. 仿真的结果表明: 当用户噪声受限时, 相邻小区基站应选择特征波束形成传输策略; 当用户干扰受限时, 相邻小区基站应选择最大化信漏噪比传输策略.

在本文中, X 代表矩阵; x 代表向量; X^T 和 X^H 分别代表 X 的转置和共轭转置; $E(\cdot)$ 表示期望; I_N 代表 $N \times N$ 单位向量; $\|x\|$ 代表 x 的范数.

1 系统模型

考虑 2 个小区 MISO 下行链路通信系统(如图 1 所示), 假设每个小区的基站在一个时间段仅服务 1 个用户. 其中每个基站配备 M 根发射天线, 每个移动用户配备单个接收天线. 每个用户在接收到同小区基站发送数据的同时还会接收到来自相邻小区基站发送数据的干扰.

收稿日期: 2012-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61201264), 福建省自然科学基金(2011J05152), 厦门市科技计划项目(3502Z20123035)和泉州市重大科技专项(2011ZD01G01)资助项目.

作者简介: 郭荣新(1980-), 男, 福建泉州人, 实验师, 硕士, 主要从事无线通信中的信号处理和多用户 MIMO 通信的研究.

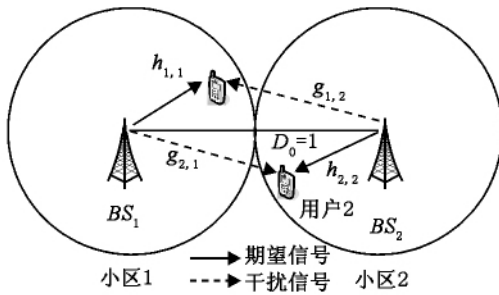


图1 两蜂窝 MISO 下行链路通信系统模型

以小区 1 为例,期望信号为第 1 个基站发送给第 1 个用户的信号,信道系数可表示为 $\mathbf{h}_{1,1} \in \mathbf{C}^{M \times 1}$; 干扰信号为第 2 个基站发送给第 1 个用户的信号,信道系数可表示为 $\mathbf{g}_{2,1} \in \mathbf{C}^{M \times 1}$. 这里假设所有用户经历大尺度衰落和阴影效应,即 $\mathbf{h}_{i,j}$ 和 $\mathbf{g}_{i,j}$ ($i=1, 2; j=1, 2; i \neq j$) 中的每个元素均服从独立同分布零均值单位方差的复高斯随机分布,即 $\mathcal{CN}(0, 1)$.

因此,该两蜂窝 MISO 网络内的 2 个用户接收到的信号可分别表示为

$$y_1 = \sqrt{P_{1,1}} \mathbf{h}_{1,1}^T \mathbf{f}_1 s_1 + \underbrace{\sqrt{P_{1,2}} \mathbf{g}_{1,2}^T \mathbf{f}_2 s_2}_{\text{interference}} + n_1, \quad (1)$$

$$y_2 = \sqrt{P_{2,2}} \mathbf{h}_{2,2}^T \mathbf{f}_2 s_2 + \underbrace{\sqrt{P_{2,1}} \mathbf{g}_{2,1}^T \mathbf{f}_1 s_1}_{\text{interference}} + n_2, \quad (2)$$

其中 $P_{i,j}$ 为用户 i 从基站 j 接收到的功率,采用的路径损耗模型为 $P_{i,j} = P_0 (D_0/d_{i,j})^\alpha$; α 为路径损耗因子; P_0 为相对于距离为 D_0 处的接收功率; $d_{i,j}$ 表示用户 i 到基站 j 的距离. 为简单起见,在下文中设置 D_0 为小区的半径,因此 P_0 为小区边缘处的平均接收功率. 假设 2 个用户只能在 2 个基站相连的线段上移动,且 2 个基站等功率发送信号,即不考虑功率分配. $\mathbf{f}_i \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ 表示基站向本地服务用户 i 发送的波束形成矢量,满足 $\|\mathbf{f}_i\| = 1$. n_i 表示服从零均值单位方差的复高斯白噪声的向量,即 $n_i \sim \mathcal{CN}(0, 1)$. s_i 表示给用户 i 发送的能量归一化为 $1(\int |s_i|^2 = 1)$ 的信号.

公式(1)、(2)右边第 2 项表示小区用户接收到来自相邻小区基站发送的干扰数据. 小区中用户 i ($i=1, 2$) 接收到的信干噪比可表示为

$$SINR_i = P_{i,j} \mathbf{f}_i^H \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^T \mathbf{f}_i / (P_{i,j} \mathbf{f}_j^H \mathbf{g}_i \mathbf{g}_i^T \mathbf{f}_j + 1), \quad (3)$$

平均和速率为

$$R_i = \lfloor \log_2(1 + SINR_i) \rfloor, \quad (4)$$

因此,该两蜂窝 MISO 通信系统中所有用户的和速率表达式为

$$R = \sum_{i=1}^2 R_i. \quad (5)$$

2 波束形成传输策略

在本节中,为了设计波束形成向量 \mathbf{f}_i , 3 种经典的波束形成传输策略在文献 [8-11] 分别被提出,目的是使可获取的和速率最大化.

(1) 特征波束形成传输策略 (BF): 在这种情况下,相邻小区的干扰通常被完全忽略,预编码向量的设计依赖于用户本身的信道方向信息,对于第 i 个用户,基站发送的预编码向量为

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{h}_{i,j} / \|\mathbf{h}_{i,j}\|. \quad (6)$$

注意到(6)式实际上是把(3)式的分子最大化.

(2) 迫零波束形成传输策略 (ZF): 该传输策略能够有效消除小区间干扰. 假设发射端已知完整信道状态信息,则小区间干扰消除应满足 $\|\mathbf{g}_{j,i}^T \mathbf{f}_i\|^2 = 0, \|\mathbf{f}_i\| = 1$, 记 $\mathbf{U}_i = [\mathbf{h}_{i,j}^T; \mathbf{g}_{j,i}^T]$ 和 $\mathbf{W}_i = (\mathbf{U}_i^H \mathbf{U}_i)^{-1} \mathbf{U}_i^H$, 最优的迫零波束形成可表示为

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{w}_i / \|\mathbf{w}_i\|, \quad (7)$$

其中 \mathbf{w}_i 为 \mathbf{W}_i 的第 1 列,满足 $\|\mathbf{g}_{j,i}^T \mathbf{w}_i\| = 0$. (7) 式实际上是把(3)式的分母最小化.

(3) 最大化信漏噪比传输策略 (SLNR): 迫零波束形成传输策略虽然在已知完全信道状态下可以完全消除小区间干扰,但基站发射天线数与用户总的接收天线数之间需要满足一定的关系^[6],且预编码的设计没有考虑到噪声的影响,用户在接收端接收到的是放大了噪声的信号. 为此文献 [8] 提出了一种不用考虑收发天线数的最大化信漏噪比预编码设计方案. 假设发射端已知完整信道状态信息,小区中用户 i 的信漏噪比可表示为

$$SLNR_i = P_{i,j} \mathbf{f}_i^H \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^T \mathbf{f}_i / (P_{j,i} \mathbf{f}_i^H \mathbf{g}_j \mathbf{g}_j^T \mathbf{f}_i + 1), \quad (8)$$

与文献 [8] 中定义的 SLNR 相同,故可采用相同的方法求出最优波束形成向量,最优的波束形成可表示为

$$\mathbf{f}_i^{\text{opt}} \propto \arg \max_{\mathbf{f}_i \in \mathbf{C}^{M \times 1}} \frac{P_{i,j} \mathbf{f}_i^H \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^T \mathbf{f}_i}{P_{j,i} \mathbf{f}_i^H \mathbf{g}_j \mathbf{g}_j^T \mathbf{f}_i + 1}. \quad (9)$$

根据瑞利-里兹不等式,(9)式的最优波束形成成为

$$\mathbf{f}_i^{\text{opt}} = \lambda_{\max} \left\{ \left(\frac{P_{i,j}}{P_{j,i}} \mathbf{g}_j \mathbf{g}_j^T + \frac{1}{P_{i,j}} \mathbf{I}_M \right)^{-1} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^T \right\}, \quad (10)$$

其中 $\lambda_{\max}(A)$ 为矩阵 A 最大特征值对应的特征向量.

3 有限速率 CDI 量化反馈模型

在基于 FDD 的系统中, 系统获取用户的信道状态信息通常是不完整的, 因而基站信号预处理不能完全消除小区间干扰. 一个有效的解决方法是用户估计期望信道和干扰信道, 然后通过上行信道反馈给基站, 基站再采取相应的预编码方案. 假设用户 i 使用独立的训练符号已经完整地估计了期望信道 h_{ij} 和干扰信道 g_{ij} , 然后分别使用 B_Q 和 B_C 个反馈比特分别量化 h_{ij} 和 g_{ij} , 其中 $B_Q + B_C = B$ 是固定的. h_{ij} 和 g_{ij} 的量化分别使用 2 个独立的码本, 记为 $\mathcal{F}_Q = \{f_1, f_2, \dots, f_{2^{B_Q}}\}$ 和 $\mathcal{F}_C = \{f_1, f_2, \dots, f_{2^{B_C}}\}$. 为便于分析, 码本采用随机矢量量化码本. 随机矢量量化码本中的码字是通过从各项同性分布的 M 维单位欧几里德空间中选择出来的^[12].

用户依据下列公式计算信道的最大投影值对应的码字, 并反馈相应的索引值

$$\hat{h}_{ij} = \arg \max_{f \in \mathcal{F}_Q} | \hat{h}_{ij}^H f |^2, \quad (11)$$

$$\hat{g}_{ij} = \arg \max_{f \in \mathcal{F}_C} | \hat{g}_{ij}^H f |^2, \quad (12)$$

其中 $\tilde{h}_{ij} = h_{ij} / \|h_{ij}\|$, $\tilde{g}_{ij} = g_{ij} / \|g_{ij}\|$ 分别为期望信道和干扰信道的方向信息.

根据以上分析, 利用 Matlab 仿真工具, 仿真比较了本文第 2 节中分析的 3 种波束形成传输策略的和速率性能. 仿真环境: 小区半径 $D_0 = 1$, 用户 1 和用户 2 都在 2 个基站的连线上距离各自小区边缘 0.1 处, 基站天线数 $M = 2$ (该算法同样适用于 $M > 2$ 的情况), 用户接收天线 $N_r = 1$, $\alpha = 3.7$, 反馈比特数 $B = 6$. 由于 BF 传输策略不考虑干扰, 因此所有的比特都反馈给服务基站; 其他 2 种传输策略的比特分配采用等比特分配算法.

从图 2 中可以发现, 最大化信漏噪比传输策略的和速率性能在低 SNR 时要优于迫零波束形成传输策略, 这是由于在低 SNR 时, 用户受到的干扰主要来自噪声, 迫零波束形成传输策略的设计忽略了噪声的影响, 相当于在接收端放大了噪声, 而最大化信漏噪比预编码的设计则考虑了噪声的影响, 因此性能要优于迫零波束形成传输策略, 但是随着接收功率的增加两者的性能差异逐渐减小.

4 2 个基站传输策略对的选择

本文第 2 节分析了 3 种波束形成传输策略. 本节利用本文第 3 节分析的有限反馈模型采用等比特

分配算法, 研究了用户在小区中移动的情况下 2 个基站选取何种传输策略对才能够使系统的和速率最优, 分析如下:

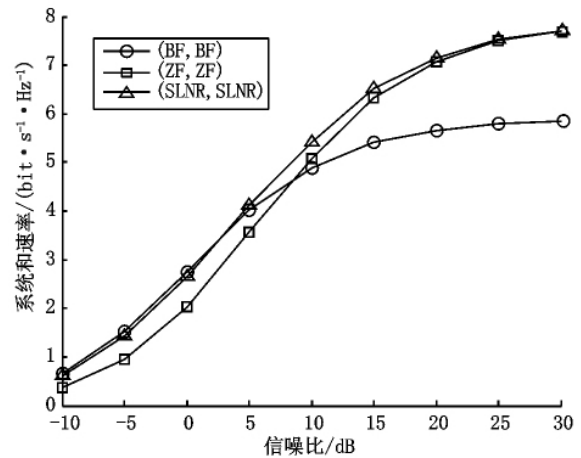


图 2 3 种波束形成传输策略的速率性能比较

(1) 2 个用户噪声受限: 这种情况通常出现在 2 个用户都处于小区中心, 或者边缘信噪比非常低, 小区间干扰主要来自噪声干扰, 因此不需要做干扰消除, 故 2 个基站选择 (BF, BF) 传输策略对.

(2) 2 个用户干扰受限: 在这种情况下, 2 个用户通常处于小区边缘或者边缘信噪比相对噪声较高, 用户遭受严重的小区间干扰, 因此 2 个基站选择 (ZF, ZF) 或 (SLNR, SLNR) 传输策略对.

(3) 一个用户干扰受限, 一个用户噪声受限: 这种情况通常是用户 1 处于小区边缘, 用户 2 处于小区中心. 对于用户 1, 会遭受来自小区 2 的干扰, 需要基站 2 采取迫零波束形成传输策略消除对用户 1 的干扰, 同时基站 1 采取特征波束形成传输策略能够提高用户 1 的接收信号功率. 对处于小区中心的用户 2, 由于其 SINR 较高, 为用户 1 做干扰消除不会对用户 2 造成较大的损失, 因此 2 个基站选择 (BF, ZF) 或 (BF, SLNR) 传输策略对.

由以上分析可知, 小区间干扰消除不是在任何时候都需要. 根据用户在小区中位置对 2 个基站可能选择的传输策略对进行了计算机仿真比较. 仿真环境: 小区半径 $D_0 = 1$, $P_0 = 15$ dB, 用户 1 在 2 个基站的连线上距离小区 1 边缘 0.1 处, 用户 2 在 2 个基站的连线上从小区边缘向基站移动, 基站天线数 $M = 2$, 用户接收天线 $N_r = 1$, $\alpha = 3.7$, 反馈比特数分别为 $B = 6$ 和 $B = 8$. 这里除 BF 传输策略外, 其他 2 种传输策略的比特分配采用等比特分配算法.

由图 3 和图 4 可知, 当固定用户 1 在小区边缘, 用户 2 从小区边缘向中心移动的过程中, 基站依次选择 (SLNR, SLNR) 和 (BF, SLNR) 传输策略对获

取的和速率性能最优. 仿真结果与分析的结果相同. 这是由于随着反馈比特数的增加, 基站获得的信道状态信息已经逐渐逼近完全信道状态信息, 基站策略对的选择将不再随着反馈比特数的增加而有所变化.

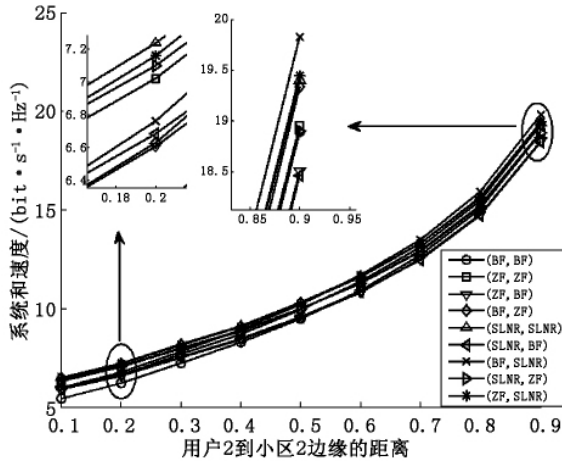


图3 不同传输策略对下的和速率性能比较 ($B = 6$)

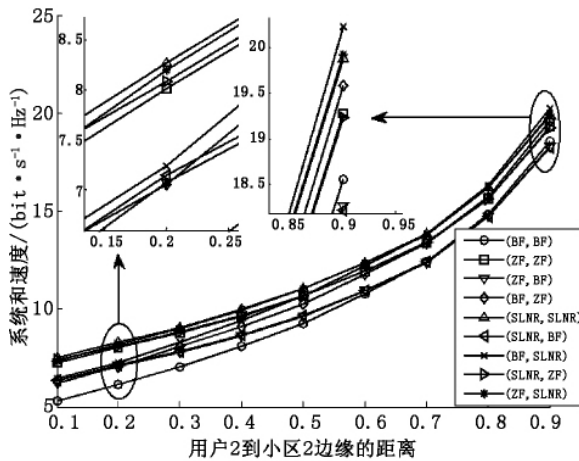
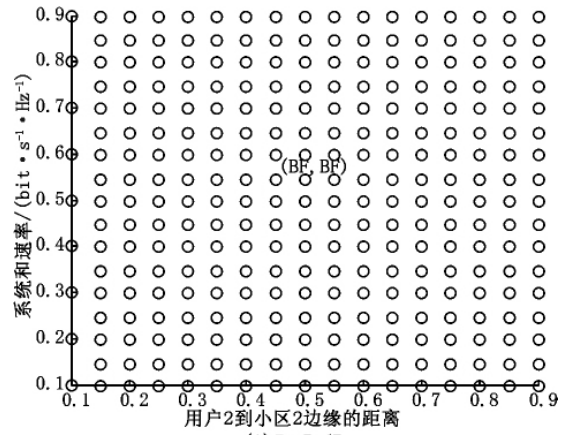


图4 不同传输策略对下的和速率性能比较 ($B = 8$)

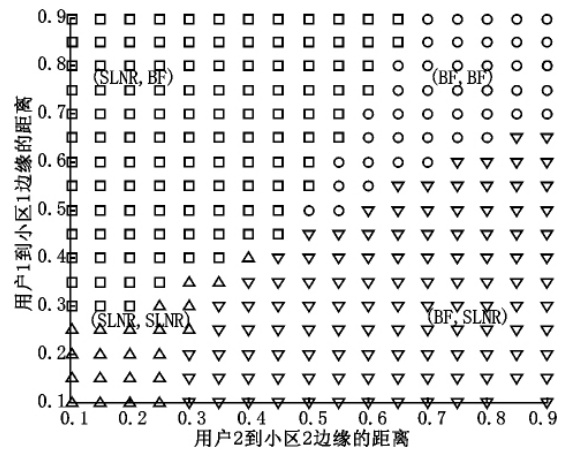
5 仿真结果与分析

图2的仿真限定了用户1在小区1的边缘, 用户2在小区2中移动. 本节将仿真比较用户1和用户2都在小区中移动的情况下2个基站在不同边缘信噪比下分别选择的最优传输策略对. 仿真环境: 小区半径 $D_0 = 1$, 基站天线数 $M = 2$, 用户接收天线 $N_r = 1$, $\alpha = 3.7$, 反馈比特数 $B = 6$. 这里除 BF 传输策略外, 其他2种传输策略的比特分配采用等比特分配算法. 其中符号 ‘○’ 代表 (BF, BF); 符号 ‘□’ 代表 (SLNR, BF); 符号 ‘△’ 代表 (SLNR, SLNR); 符号 ‘▽’ 代表 (BF, SLNR).

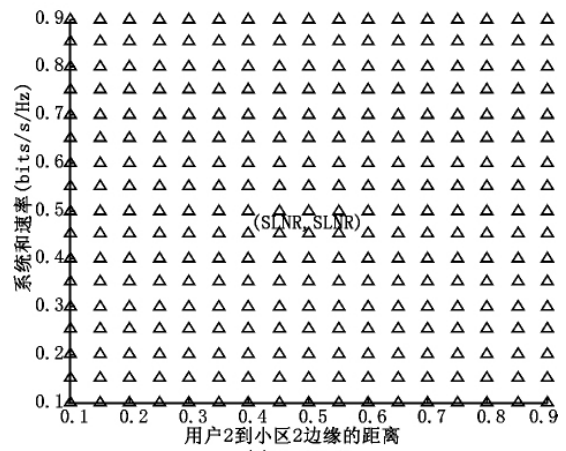
从图4中可以发现:



(1) $P_0 = 5$ dB



(2) $P_0 = 10$ dB



(3) $P_0 = 20$ dB

图4 用户的位置与策略对的选择

(1) 当小区边缘信噪比较低时 ($P_0 = 5$ dB), 用户噪声受限, 此时2个基站选择 (BF, BF) 传输策略对, 能够提高服务用户的接收信号功率.

(2) 当小区边缘信噪比较高时 ($P_0 = 20$ dB), 用户干扰受限, 此时2个基站选择 (SLNR, SLNR) 传输策略对, 能够消除相邻小区间干扰.

(3) 当小区边缘信噪比处于中间时 ($P_0 = 10$ dB) 2个基站传输策略对的选择依赖于用户在

小区中的位置;当 2 个用户都在小区边缘时 2 个基站选择(SLNR, SLNR) 传输策略对;当 2 个用户都在小区中心时 2 个基站选择(BF, BF) 传输策略对;当一个用户在小区中心,另一个用户在小区边缘时,用户在小区中心的那个基站为另一个在小区边缘的用户做小区间干扰消除,即用户在小区中心的那个基站选择 SLNR 传输策略。

6 总结

本文针对下行 2 个小区 MISO 有限反馈通信系统,分析了小区间干扰消除的 3 种波束形成传输策略的和速率性能,由于信漏噪比波束形成的设计考虑了噪声的影响,因此其速率性能要优于迫零波束形成。此外,还研究了基站选择最优的传输策略跟用户在小区中的位置和小区边缘的平均信噪比的关系。最后发现,当用户在小区边缘时,相邻小区基站选择最大化信漏噪比波束形成的速率性能最优,当用户在小区中心时,相邻小区基站选择特征波束形成的速率性能最优。未来的研究方向可以拓展到多小区多用户、用户的选择以及最优的码本设计。

7 参考文献

- [1] Boccardi F, Huang H. Zero-forcing precoding for the MIMO broadcast channel under per-antenna power constraints [C]. Cannes: IEEE 7th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications 2006: 1-5.
- [2] Karakayali K, Yates R, Foschini G, et al. Optimum zero-forcing beamforming with per-antenna power constraints [C]. Nice: IEEE International Symposium on Information Theory 2007: 101-105.
- [3] Yu Wei, Lan Tian. Transmitter optimization for the multi-antenna downlink with per-antenna power constraints [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 5(6): 2646-2660.
- [4] Costa M. Writing on dirty paper [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 39(3): 439-411.
- [5] Weingarten H, Steinberg Y, Shaimai S. The capacity region of the Gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(9): 3936-3964.
- [6] Zhang Jun, Chen Runhua, Andrews J G, et al. Networked MIMO with clustered linear precoding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1910-1921.
- [7] 赵睿, 陈东华. Nakagami-m 信道下双向中继选择的中断概率分析 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2011, 35(4): 396-399.
- [8] Sadek M, Tarighat A, Sayed A. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5): 1711-1721.
- [9] Bhagavatula R, Heath Jr R W. Adaptive limited feedback for sumrate maximizing beamforming in cooperative multi-cell systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(2): 800-811.
- [10] Zhang Jun, Andrews J G. Adaptive spatial intercell interference cancellation in multicell wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(9): 1455-1468.
- [11] Shi Fengfeng, Xu Wei, Zhao Cunming. A Limited Feedback Strategy for Cooperative Multicell MISO Systems [C]. Nanjing: International Conference on Wireless Communications and Signal Processing 2011: 1-5.
- [12] Santipach W, Honig M. Signature optimization for CDMA with limited feedback [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(10): 3475-3492.

The Study of Interference Cancellation Schemes in Multi-Cell MISO Communication Systems

GUO Rong-xin, YUAN Ji-chang

(School of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian 361021, China)

Abstract: The inter-cell interference cancellation schemes were investigated with partial channel state information. The sum-rate performance of three kinds of beamforming transmission strategy (i. e. eigen-beamforming, zero-forcing beamforming and signal to leakage and noise ratio beamforming) by exploiting two independent random vector quantization codebooks to quantize the desired channel and the interference channel respectively is analyzed. The optimal transmission strategy choice of the base station according to user locations and average cell-edge signal to noise ratio is studied. Simulation results demonstrate that when the user is noise-limited, the neighbor base station will choose eigen-beamforming transmission strategy, and when the user is interference-limited, the neighbor base station will choose signal to leakage and noise ratio beamforming transmission strategy.

Key words: inter-cell interference; beamforming; limited feedback; sum-rate

(责任编辑:冉小晓)