

# 基于信干噪比反馈的多基站协作预编码

张宏群, 史小平

(南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 针对蜂窝小区的干扰, 给出了基于信干噪比(SINR)反馈的基站协作策略, 采用 SINR 门限锁定系统边缘用户, 避免了传统穷搜索算法的复杂性, 在多小区规模上索引协作基站。基于 SWF 功率分配, 采用 SVD 预编码设计。仿真表明, 该方案既弱化了小区边缘用户受到的干扰, 提高了系统信息吞吐量, 又减少了高反馈量带来的复杂度, 是一个很好的折中方案。

**关键词:** 多基站; 协作; 预编码; 奇异值分解

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)24-0049-03

## Research of pre-coding with multi-cell cooperation

Zhang Hongqun, Shi Xiaoping

(Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In this paper, for inter-cell interference, we propose a cooperation strategy based on the SINR feedback. According to the SINR decision threshold, we lock edge users to avoid the complexity of the traditional poor search algorithm and index the collaboration BS within multi-cell scale. Based on the SWF power allocation algorithm, we use SVD to do the pre-coding design. Simulation results show that the program, which not only weakens the cell edge users disruption and improves the information throughput, and reduces the complexity brought by the feedback amount, is a quite good compromise.

**Key words:** multi-cell; cooperation; pre-coding; singular value decomposition

目前, 对于蜂窝系统干扰抑制的研究有很多, 多数是在接收端进行处理, 而预编码技术是在发射端进行的一种预处理, 且采用预编码的闭环结构能进一步提高系统的可靠性。多基站协作突破了传统蜂窝网络单基站协调干扰的约束, 引入联合协调干扰的思想<sup>[1]</sup>。如果将多个相互协作的基站看作一个虚拟的多输入多输出(MIMO)系统, 那么包括脏纸编码(DPC)以及基于不同准则(如系统容量、PEP 误码率等)的多用户预编码方案都可以应用到多小区系统中, 唯一不同的是发射功率的约束不再是总功率约束, 而是每个基站的功率约束<sup>[2]</sup>。迫零(ZF)预编码<sup>[3]</sup>是一种主要针对用户为单天线、基站为多天线的预编码算法, 它简单易实现, 且在高信噪比情况下渐进最优, 但是局限性很大; 随之而改进的 BD 块对角化预编码<sup>[4]</sup>是针对用户为多天线的 MIMO 信道而提出的一种预编码算法, 具有较好的吞吐量和信干噪比, 但各用户必须拥有全局 CSI, 实现起来相对比较困难。参考文献[5]中提出了多小区簇间协作方案, 折中了小区边缘用户享受信息的公平性与达到较好的信息吞吐量, 但是

很大程度上增加了系统的复杂度。

本文针对小区间的干扰问题, 给出了基于信干噪比(SINR)反馈的基站协作策略, 采用 SINR 判决门限来锁定系统边缘用户, 避免了传统穷搜索算法带来的复杂性, 并在多个小区的规模上索引协作基站。采用奇异值分解(SVD)预编码算法进行协作发送, 并采用一种复杂度较低的次优功率分配算法—SWF(Scaled Water-Filling)算法, 最后给出了数据仿真结果与性能分析。

### 1 系统模型

考虑三基站协作的情况, 如图 1 所示, 假设各协作基站之间共享信道状态信息(CSI), 每个用户有  $M_r$  个接收天线, 每个基站有  $M_t$  个发送天线,  $a_{i,j}$  表示大尺度衰落因子, 包括路径损耗和阴影衰落的影响; 并且在无散射和平坦衰落的条件下, 用小尺度衰落信道矩阵  $H_{i,j}$  ( $j=1, \dots, N; i=1, \dots, K$ ) 表示基站  $j$  到用户  $i$  之间的信道, 且为零均值、单位方差的复高斯随机过程。

讨论  $K$  个边缘用户、3 个协作基站的情况。首先, 对边缘用户  $i$  的接收信号  $s_i$  进行预处理:  $\hat{s}_i = W_i Q s_i$ , 其中  $W_i$

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 49

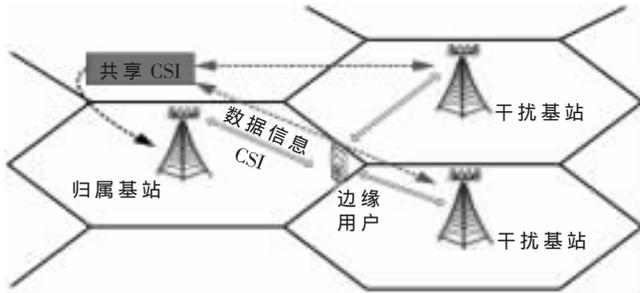


图1 多基站协作示意图

为  $M \times M_r$  维预编码矩阵 ( $M=3M_r$ ), 以抑制多小区间的干扰,  $Q_i$  为  $M_r \times M_r$  维对角矩阵,  $s_i$  为功率分配因子。因此, 从所有的 3 个基站到  $K$  个边缘用户的发送信号可表示为:

$$\hat{s} = \sum_{i=1}^K \hat{s}_i = \sum_{i=1}^K W_i Q_i s_i = W Q s \quad (1)$$

其中,  $W = [W_1, W_2, \dots, W_K]$ ,  $Q = \text{diag}[Q_1, Q_2, \dots, Q_K] = \text{diag}[Q_1, Q_2, \dots, Q_{(KM_r \times 1)}]$ ,  $s = [s_1^T, s_2^T, \dots, s_K^T]^T$  是包含发送信息的  $(KM_r \times 1)$  维向量, 用户  $i$  从三个基站所接收到的信号向量  $y_i$  可以表示为:

$$y_i = H_i \hat{s}_i + H_i \sum_{j \neq 1} \hat{s}_j + n_i \quad (2)$$

式中第一项是来自本小区主基站的期望信号, 第二项是来自相邻小区(干扰基站)的同频干扰信号, 第三项  $n_i$  是拥有  $M_r$  个元素的加性高斯白噪声向量, 均值为零, 其协方差矩阵满足:  $E[n_i n_i^T] = \sigma^2 I_{M_r}$ , 信道矩阵  $H_i = [a_{i,1} H_{i,1}, a_{i,2} H_{i,2}, a_{i,3} H_{i,3}]$ 。

## 2 基于信干噪比反馈的多基站协作策略

选一组小区作为研究对象<sup>[5]</sup>, 当反馈的小区范围较大时, 对全局 CSI 以及同步性要求较高, 从而限制了一个非常大的系统规模, 并且由于大尺度衰落因素的影响, 用户从那些远距离的基站获益很小。研究证明, 在给定的发射功率条件下, 规模为 7 时是保证系统性能与减小复杂度之间的一个很好的权衡, 从而避免了穷搜索算法带来的复杂性。并为每个基站编上索引号, 各用户向本小区基站反馈其信干噪比, 以及较大的两个等效信道功率  $P_j \|H_{i,j}\|^2$  所对应的基站  $j$ , 此时本小区基站为归属基站, 临近基站为干扰基站。小区  $i$  的用户获得的信干噪比为:

$$\text{SINR}_{i,j} = \frac{P_i \|H_{i,i}\|^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^M P_j \|H_{i,j}\|^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

式中  $H_{i,i}$  为主基站  $i$  到区内用户的信道矩阵,  $H_{i,j}$  为基站  $j$  与用户  $i$  之间的信道矩阵,  $\sigma^2$  为加性高斯白噪声, 根据用户反馈来决定传输模式, 根据服务质量的要求设定合适的判决门限值  $\phi$ :

(1) 若  $\text{SINR}_{i,j} \geq \phi$ , 表明该用户处于本小区信号较强的位置, 系统默认在常规模式下工作, 由本小区基站独立对其发送数据;

(2) 若  $\text{SINR}_{i,j} < \phi$ , 表明该用户处于本小区信号较弱的位置, 判定为边缘用户, 系统工作在协作模式, 将最大和次大  $P_j \|H_{i,j}\|^2$  所对应基站的索引号反馈给主基站, 由所选基站对该用户进行协作发送, 即为图 1 所示的三基站协作模型。

## 3 基于 SVD 的预编码设计

由系统模型可知, 所有的接收信号向量  $y$  可以表示为:

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_K]^T = [H_1^T, H_2^T, \dots, H_K^T]^T \hat{s} + n \quad (4)$$

假设  $H_i (i=1, 2, \dots, K)$  的各行是满秩的, 即  $r(H_i) = M_r$ , 则满足条件  $M \geq K \times M_r$ , 对  $H_i$  进行奇异值分解, 可得:

$$H_i = U_i [\Sigma_i^{1/2}, 0] V_i^H = U_i [\Sigma_i^{1/2}, 0] \begin{bmatrix} V_{is}^H \\ V_{in}^H \end{bmatrix} = U_i \Sigma_i^{1/2} V_{is}^H \quad (5)$$

其中  $U_i$  和  $V_i$  分别为  $M_r \times M_r$ 、 $M \times M$  维的正交矩阵,  $\Sigma_i = \text{diag}[\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{iM_r}]$  是一个  $M_r \times M_r$  维的对角矩阵, 包含  $H_i H_i^H$  的特征值。  $V_{is}$  是一个  $M_r \times M_r$  维矩阵, 由  $H_i^H H_i$  的非零特征值所组成;  $V_{in}$  是一个  $M \times (M - M_r)$  维矩阵, 由  $H_i^H H_i$  的零特征值所组成。同样地,  $U_i$  也是由  $H_i H_i^H$  的特征向量所构成, 接收信号进而表示为:

$$y = U \Sigma^{1/2} V_s^H W Q s + n \quad (6)$$

其中,  $\Sigma = \text{diag}[\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_K]$ ,  $U$  和  $\Sigma$  是  $KM_r \times KM_r$  维的矩阵,  $V_s$  是  $M \times KM_r$  维的矩阵,  $n$  为加性高斯白噪声向量, 具有零均值, 且协方差矩阵为  $\sigma^2 I_{KM_r}$ 。基于奇异值分解, 预编码矩阵  $W$  可以选为:

$$W = [V_s^H]^+ = V_s [V_s^H V_s]^{-1} \quad (7)$$

用户  $i$  所接收的经过预编码处理的信号为:

$$y_i = U_i \Sigma_i^{1/2} Q_i s_i + n, \quad i=1, 2, \dots, K \quad (8)$$

单小区 SVD 有一个总的功率约束 (TPC), 而多小区 SVD 对每一个基站都有一个功率约束 (PBPC), 即每个基站  $j$  都有一个平均的固定发射功率  $P_j$ 。边缘用户  $i$  总的预编码矩阵  $W_i = [W_{i,1}^T, W_{i,2}^T, W_{i,3}^T]$ ,  $W_{i,j}$  为基站  $j$  对边缘用户  $i$  的  $M_r \times M_r$  维的预编码矩阵。定义  $\bar{W}_j$  为基站  $j$  对所有  $K$  个边缘用户的总的预编码矩阵:  $\bar{W}_j = [\bar{W}_{j,1}, \bar{W}_{j,2}, \dots, \bar{W}_{j,K}]$ 。依据参考文献[2]和参考文献[5]可知, 为了符合所有基站的总功率约束 (TPC), 必须满足条件:

$$\text{Tr}[\bar{W}_j Q Q^H \bar{W}_j^H] = \sum_{i=1}^{M_r} Q_i^2 [\bar{W}_j^H \bar{W}_j]_{i,i} \leq P_j \quad (9)$$

其中  $[\bar{W}_j^H \bar{W}_j]_{i,i}$  是矩阵  $[\bar{W}_j^H \bar{W}_j]$  中第  $i$  个对角元素, 在此约束条件下, 每个用户每根天线可达到的最大平均信息速率可由下式给出:

$$R_{opt} = \max \frac{1}{KM_r} \sum_{i=1}^K \log \left| \frac{1}{\sigma^2} U_i \Sigma_i^{1/2} Q_i^2 \Sigma_i^{1/2} U_i^H + I_{M_r} \right|$$

## 网络与通信 Network and Communication

$$= \max \frac{1}{KM_r} \sum_{i=1}^K \log \left| \frac{1}{\sigma^2} \Sigma_i^{1/2} \mathbf{Q}_i^2 + \mathbf{I}_{M_r} \right| \quad (10)$$

以上为最优功率分配(Optimal Power Allocation),该优化问题考虑到不同用户的功率约束,相应的关于每个天线上功率约束问题在参考文献[3]中有研究,而基于PBPC多基站协作系统的相应研究可以参考文献[2]。然而,这种方法复杂性很高,不能简单地延伸到更一般的情况,故对于式(10)中的最优化问题,没有封闭形式的解决方案可用。这里采用一种次优功率分配方案—SWF算法,将式(10)转为凸优化问题,首先假定所有的基站总功率共享,即有一个总功率约束(TPC),也就是说,可以达到的最大平均信息速率式(10)可表示为:

$$R_{TPC} = \max \frac{1}{KM_r} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{M_r} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\sigma^2} \lambda_i Q_{ij}^2 \right) \quad (11)$$

存在约束条件:

$$\text{Tr}[\mathbf{Q}\mathbf{Q}^H\mathbf{W}^H\mathbf{W}] = \sum_{i=1}^{\Sigma M_r} Q_i^2 [\bar{\mathbf{W}}^H \bar{\mathbf{W}}]_{i,j} \leq \sum_{j=1}^3 P_j \quad (12)$$

为了满足PBPC,对功率控制矩阵 $\mathbf{Q}$ 通过因子 $\mu$ 进行缩放, $\mu \in (0, 1)$ ,由下式给出:

$$\mu = \frac{P_j}{\max_{j=1,2,3} \sum_{i=1}^{\Sigma M_r} Q_i^2 [\bar{\mathbf{W}}_j^H \bar{\mathbf{W}}_j]_{i,i}} \quad (13)$$

因此,在SWF功率分配方案下,每个用户所能达到的最大平均信息速率为:

$$R_{SWF} = \frac{1}{KM_r} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{M_r} \log_2 \left( 1 + \mu \frac{1}{\sigma^2} \lambda_i Q_{ij}^2 \right) \quad (14)$$

## 4 仿真结果与分析

图2为 $M_r=M_t=2$ 条件下取不同判决门限时系统的容量,随着门限值 $\phi$ 的增加,边缘用户通过协作通信的机会随之增大,信道的容量也随之升高,当判决门限达到一定数值后,边缘用户急剧增多,容量达到最优,但是也大大增加了系统的复杂度。可知,设定合适的判决门限 $\phi$ ,决定了判定小区边缘用户的准确性和系统复杂性;选择适当的协作基站能够优化预编码的性能。

图3为单基站模式以及两种功率分配方案下协作

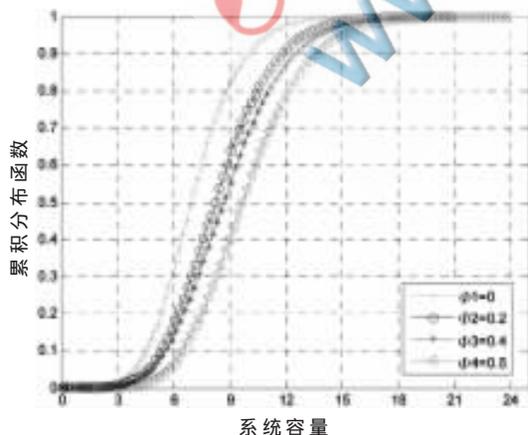


图2 不同 SINR 判决门限下系统容量的比较

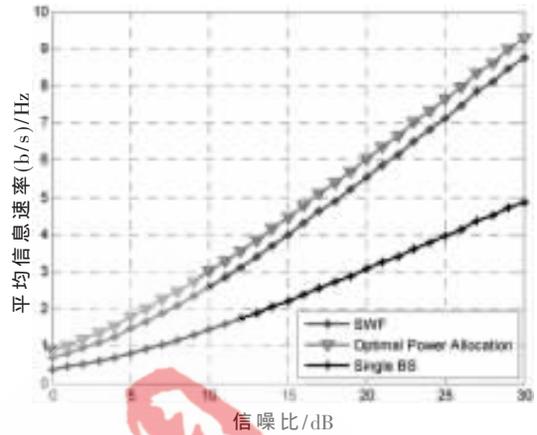


图3 最优功率分配、SWF算法与单基站模式的比较

时数据仿真结果,本文提出三基站协作的情况,假设用户与基站天线数量均为2,即 $M_r=M_t=2$ ,判决门限值取 $\phi=0.4$ ,忽略阴影衰落的影响, $a_{r,j}$ 取0.5, $i=j$ 时取1,平均信噪比为 $P_j/\sigma^2$ 。可知,SWF方案与最优功率分配方案相比,有几乎近似的信道传输效果,说明该SWF算法提供了近似于最优算法的性能。与参考文献[5]中的算法相比,该次优算法有一个封闭形式的解决方案,从而避免了N-维的梯度迭代。首先,与最优方案相比,降低了解决优化问题的复杂性;其次,对每一个用户来说,一个等价的功率分配方案仅仅导致了很小的容量损失;第三,用户缩放使不同用户之间发射功率的调整更为方便,例如,为了满足固定传输速率的限制等。

该预编码方案在获取最大化信息速率上虽然不是最优方案,但是相比其他BD、ZF等预编码方案而言,在获取较好的系统信息吞吐量和较低复杂度之间有一个很好的权衡。图4为 $M_r=M_t=2$ 的情况下,三种方案信道容量的比较。可以看出,就三种方法的信息吞吐量而言,SVD方法居于中等,优于迫零算法<sup>[3]</sup>,接近块对角化方案<sup>[4]</sup>,然而BD方法要求协作基站必须拥有全局CSI和数据流信息,给系统带来了很大的反馈量,因此,SVD方案,在协作增益与反馈开销上,是一个次优折中方案。

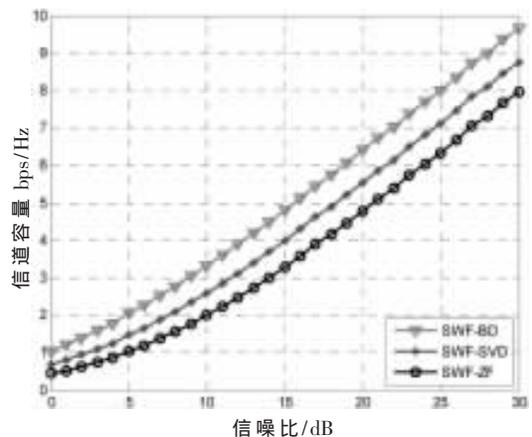


图4 BD、SVD、ZF三种方案信道容量的比较

本文在基于 SINR 反馈的基站协作策略中, 通过设定合适的信噪比门限值来区分小区的边缘用户与普通用户, 避免了传统穷搜索方法带来的盲目性, 提高了系统的工作时效; 各协作基站共享 CSI, 协作系统把不同基站的无线资源分配给同一个边缘用户, 基于 SWF 功率分配算法, 采用 SVD 方法进行预编码设计, 通过仿真表明, 该方案既弱化了小区边缘用户受到的干扰, 提高了系统的信息吞吐量, 又减少了诸如块对角化 (BD)、协作簇等预编码算法在反馈量上带来的复杂性, 是一个很好的折中方案。

#### 参考文献

- [1] BIGLIERI E, CALDERBANK R. MIMO wireless communications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [2] ZHANG H, DAI H. Co-channel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks[J]. European J. Wireless Communication. and Networking, 2004(2): 222-235.
- [3] BOCCARDI F, HUANG H. Zero-forcing precoding for the MIMO broadcast channel under per-antenna power con-

straints[C]. in Proc. IEEE PAWC, 2006: 1-5.

- [4] SHIM S, KWAK J S, JR R W H, et al. Block diagonalization for multi-user mimo with other-cell interference[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008(7): 2671-2681.
- [5] Zhang Jun, Chen Runhua, JEFFREY G. Andrews, et al. Networked MIMO with clustered linear precoding[J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2009, 8(4): 1910-1921.
- [6] CAIRE G, RAMPRASHAD S A, PAPADOPOULOS H C, et al. Multiuser MIMO downlink with limited inter-cell cooperation: approximate interference alignment in time, frequency, and space[C]. in Proc. Allerton Conf. on Comm. Control and Comp., 2008.

(收稿日期: 2011-08-17)

#### 作者简介:

张宏群, 女, 1966年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 通用和专用自动测试系统, 虚拟仪器, 数字化通用电子测量仪器系统及高性能测试仪, 信号与信息处理。

史小平, 男, 1984年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 信号与信息处理。