

# 基于 BD 预编码和时分复用的 MIMO 广播传输方案

陈培磊 刘 萍

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

**摘 要** 在 MIMO 系统中,块对角化(BD)预编码用来消除多用户的共信道干扰(CCI)。BD 预编码要求系统发射天线数大于全部用户接收天线数目的总和。当用户数增多时,用户接收天线总数随之增多,BD 算法的复杂度将急剧增大。为了解决这个问题,同时使系统支持的用户数最大化,提出了一种基于 BD 预编码和时分复用(TDM)相结合的广播传输方案。该方案通过对用户进行分组,对组内的用户进行 BD 预编码,并对组间进行时分复用,从而降低系统对发射天线数目的要求和算法的复杂度。仿真结果表明,这种组合方案在支持更多用户的同时还可以获得较高的吞吐率。

**关键词** 块对角化,预编码,MIMO,时分复用,吞吐率

**中图分类号** TN92 **文献标识码** A

## MIMO Broadcast Transmission Scheme Based on BD Precoding and TDM

CHEN Pei-lei LIU Ping

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

**Abstract** In MIMO(Multi-Input Multi-Output)system, the block diagonalization(BD) precoding algorithm is applied to eliminate the co-channel interference(CCI). And BD precoding algorithm requires the number of the system receiving antennas should be less than the number of all users transmitting antennas. With the increasing of system users, the amount of the receiving antennas add, and the complexity of BD algorithm increases sharply. In order to solve the above problem and maximize users capacity supported by the system, this paper presented an transmission scheme based on block diagonalization precoding and time division multiplexing(TDM). In this scheme, the users are divided into several groups which will be assigned to different slots. The scheme reduces the requirements on the number of system transmitting antennas and the complexity of the algorithm. Simulation results show that the scheme can support more users and increase the throughput of the system.

**Keywords** Block diagonalization(BD), Precoding, MIMO, Time division multiplexing, Throughput

## 1 引言

目前多用户 MIMO(Multi-Input Multi-Output, MIMO)技术是 MIMO<sup>[1,2]</sup>研究中的热点。在多用户 MIMO 广播信道的下行链路中,基站以相同频率和时隙同多个用户进行通信,用户之间存在共信道干扰(Co-Channel Interference, CCI)。根据现有算法,对 CCI 的处理可分为干扰抑制<sup>[3]</sup>和干扰消除<sup>[4-6]</sup>。发送预编码技术是抑制 CCI 的主要手段之一,其中脏式编码<sup>[7]</sup>(Dirty Paper Coding, DPC)的容量域可以达到多天线广播信道的容量域<sup>[8,9]</sup>,但是由于 DPC 算法的复杂度较高且只是作为一种容量可达域的描述,在实际中通常采用一种基于线性预编码的次优方案,在高容量和低复杂度之间取得折中<sup>[10,11]</sup>。干扰消除能够完全去除用户间的 CCI,其中最具代表性的一种是基于迫零思想联合设计的块对角化(Block Diagonalization, BD)算法<sup>[12]</sup>。但由于 BD 算法零空间自由度的限制,要求发射天线数目大于全部用户接收天线数目的总

和,因此限制了 BD 算法的广泛应用。

本文针对 BD 算法的上述问题,提出了一种基于 BD 预编码和时分复用的 MIMO 广播传输方案。该方案的主要思想是把系统内用户分为多个组,每组有少量用户,比如每组 2 或 3 个用户,为每个用户组分配不同的时隙,组内的用户通过 BD 编码来消除共信道干扰。仿真结果表明,相对于普通的 BD 算法,该方案更容易满足天线配置的条件,且使得算法复杂度大幅度降低。

## 2 系统模型

本文以如图 1 所示的多用户 MIMO 系统下的行链路为模型。该系统模型共有  $K$  个用户,基站(BS)端配置有  $n_T$  个天线,用户  $i$  配置  $n_{R_i}$  个天线。设基站到各用户的信道为瑞利平坦衰落信道,基站到用户  $i$  的信道可以表示为  $n_{R_i} \times n_T$  信道矩阵  $\mathbf{H}_i$ ,其元素为独立的高斯随机变量, $\mathbf{H}_i$  在每次符号传输过程中保持不变,不同的符号传输时  $\mathbf{H}_i$  不同。用户  $i$  的发射

陈培磊(1989—),男,硕士,主要研究方向为多用户 MIMO 技术,E-mail:peileichener@163.com;刘 萍(1987—),女,硕士,主要研究方向为移动通信与无线技术。

送信号为  $l_i$  维向量  $\mathbf{d}_i$ , 对应  $n_T \times l_i$  维预编码矩阵  $\mathbf{M}_i$ 。

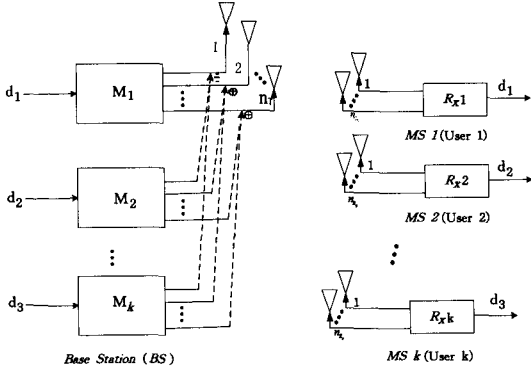


图1 多用户 MIMO 下行链路模型

对用户  $i$  发送的数据  $\mathbf{d}_i$  经过预编码后得到  $\mathbf{x}_i = \mathbf{M}_i \mathbf{d}_i$ , 协方差矩阵  $\mathbf{Q}_i = E[\mathbf{x}_i^H \mathbf{x}_i]$ , 发送端受到总的功率约束为  $P$ , 即  $tr(\mathbf{Q}_x) \leq P$ , 其中  $\mathbf{Q}_x = E[\mathbf{x}^H \mathbf{x}] = \mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2 + \dots + \mathbf{Q}_K$ ,  $\mathbf{x} = \sum_{i=1}^K \mathbf{x}_i$ ,  $E[\cdot]$  表示变量的均值,  $(\cdot)^H$  表示共轭转置,  $tr(\cdot)$  表示矩阵的迹。

用户  $i$  接收的信号  $\mathbf{y}_i \in \mathbb{C}^{n_r \times 1}$  为:

$$\mathbf{y}_i = \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_i \mathbf{M}_j \mathbf{d}_j + \mathbf{n}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{M}_i \mathbf{d}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_i \mathbf{M}_j \mathbf{d}_j + \mathbf{n}_i \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{H}_i \mathbf{M}_i \mathbf{d}_i$  为用户  $i$  期望得到的数据,  $\sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_i \mathbf{M}_j \mathbf{d}_j$  为共信道干扰,  $\mathbf{n}_i$  为复加性高斯白噪声。

对角化用来消除用户间干扰, 即:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_i \mathbf{M}_j \mathbf{d}_j = 0 \quad (2)$$

为了满足式(2), 只需下式成立即可:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \dots \mathbf{M}_K]$$

$$= \arg \min_{0 < \text{trace}(\mathbf{M}_i^H \mathbf{M}_i) \leq P_i, i=1, 2, \dots, K} \begin{cases} \mathbf{H}_1 \sum_{i=1, i \neq 1}^K \mathbf{M}_i \mathbf{d}_i = 0 \\ \mathbf{H}_2 \sum_{i=1, i \neq 2}^K \mathbf{M}_i \mathbf{d}_i = 0 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_K \sum_{i=1, i \neq K}^K \mathbf{M}_i \mathbf{d}_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

用户  $i$  的干扰矩阵定义为:

$$\tilde{\mathbf{H}}_i = [\mathbf{H}_i^1, \dots, \mathbf{H}_i^{i-1}, \mathbf{H}_i^{i+1}, \dots, \mathbf{H}_i^K]^T \quad (4)$$

对  $\tilde{\mathbf{H}}_i$  进行 SVD 分解:

$$\tilde{\mathbf{H}}_i = [\tilde{\mathbf{U}}_i \mathbf{U}_i] \begin{bmatrix} \Sigma_i & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_i^H \\ \tilde{\mathbf{V}}_i^H \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中,  $\mathbf{V}_i$  的列矢量构成了零空间一组基的集合, 等效的信道矩阵为  $\bar{\mathbf{H}}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{V}_i$ , 通过对  $\mathbf{V}_i$  的处理, 把多用户 MIMO 系统分解为多个单用户 MIMO 系统的集合, 对  $\bar{\mathbf{H}}_i$  进行 SVD 分解:

$$\bar{\mathbf{H}}_i = [\bar{\mathbf{U}}_i^0 \bar{\mathbf{U}}_i^0] \begin{bmatrix} \Sigma_i & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\bar{\mathbf{V}}_i^1)^H \\ (\bar{\mathbf{V}}_i^0)^H \end{bmatrix} \quad (6)$$

则系统容量可表示为:

$$C_{BD} = \sum_{i=1}^K \lg \left| \mathbf{I} + \frac{1}{N_0} \bar{\mathbf{H}}_i \mathbf{Q}_i \bar{\mathbf{H}}_i^H \right| \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{Q}_i$  表示在用户  $i$  输入的方差矩阵, 即功率分配矩阵。在总功率受限的情况下, 通过使用灌水算法分配功率, 使吞吐率

达到最优。

### 3 块对角化编码和时分复用的结合

本小节将讨论块对角化(BD)预编码和时分复用(TDM)相结合的 MIMO 广播传输方案。

块对角化预编码通过将多用户 MIMO 系统分成许多个单用户 MIMO 系统的集合, 去除用户间的干扰, 而不用按照信道求逆的方法将信道矩阵完全对角化。当用户距离较近时, 信道之间存在一定的相关性, 会降低系统的吞吐率。同时随着用户数的增多, 用户接收天线总数随之增多, BD 算法的复杂度将急剧增大。

传统的时分复用方案无法同时为过多的用户提供服务, 但因其算法较简单且容易实现而受到广泛的应用。假定基站向用户  $i$  提供的最大速率(单信道容量)为  $C_i$ , 用户要求的共同速率为  $R_{req}$ 。则用户  $i$  获得的时隙长为  $T_i = \frac{R_{req}}{C_i}$ , 基站可同时服务的用户数  $N_{TDM}$  为:

$$N_{TDM} = \max \left\{ N; \sum_{i=1}^N \frac{R_{req}}{C_i} \leq 1, R_0 \leq C_i \right\} \quad (8)$$

结合 BD 预编码最优性和时分复用的简单性, 本文提出了基于 BD 预编码和时分复用 MIMO 传输方案。通过对基站内的用户分组, 每一组内用户采用块对角化预编码算法来消除共信道干扰, 给每个用户组分配不同的传输时隙。通过讨论该方案下系统所能够容纳的用户数来判断该方案的性能。

假定系统共有  $m$  个分组  $G_1, G_2, \dots, G_m$ , 把每个分组视为一个整体, 分别分配一个时隙, 且系统使用最大功率进行传输。只有当每组的共同速率最大时, 才能节约时隙, 使得系统容纳更多的分组, 对于  $G_i$  组, 优化问题可以表示为:

$$\max_{\{C_1, \dots, C_{|G_i|}\} \in C_{BD}(H_{G_i}, P)} C_{opt} \quad (9)$$

其中,  $|\cdot|$  表示集合中元素的个数,  $C_{BD}(P, \mathbf{H}_{G_i})$  为总功率的约束条件。通过调节功率分配矩阵  $\mathbf{Q}$ , 使得组内用户的最小速率尽可能大。最大共同速率为:

$$C_{opt} = \min \left\{ \lg \left| \mathbf{I} + \frac{1}{N_0} \bar{\mathbf{H}}_i \mathbf{Q}_i \bar{\mathbf{H}}_i^H \right|, i=1, \dots, |G_i| \right\} \quad (10)$$

在速率  $R_{req}$  要求下, 时隙的分配取决于该组最小用户的容量, 将每个分组作为一个整体, 进行时分复用。在算法复杂度约束下,  $|G_i|$  一般取值 2 或 3。

假设系统中有足够的用户数,  $N_G = \max \{|G_1|, \dots, |G_m|\}$ , 系统要求的速率为  $R_{req}$ , 具体的 BD 预编码和时分复用相结合的算法描述如下:

第一步: 初始化用户备选集合  $\Omega = \{1, 2, \dots, K\}$ , 并计算每个用户的单用户容量, 根据单用户容量进行降序排列, 定义  $i=1$ ;

第二步: 对组  $G_i$ , 从备选集合  $\Omega$  中选取  $N_G$  个最优用户, 并根据 BD 算法和功率注水算法可得该组用户的最大相同速率  $C_{G_i}$ , 并给该用户组分配时隙  $T_i = \frac{R_{req}}{C_{G_i}}$ ;

第三步: ①如果时隙足够  $\sum_{i=1}^i T_i \leq 1$ , 则将所选的用户从备

(下转第 186 页)

- [28] Li Y, Su G, Hui P, et al. Multiple mobile data offloading through delay tolerant networks [C] // Proceedings of the 6th ACM workshop on Challenged networks. ACM, 2011; 43-48
- [29] Lee K, Lee J, Yi Y, et al. Mobile data offloading: how much can WiFi deliver? [C] // Proceedings of the 6th International Conference. ACM, 2010; 26
- [30] Gass R, Diot C. An experimental performance comparison of 3g and wi-fi [C] // Proceedings of the 11th International Conference on Passive and Active Measurement. PAM'10, 2010; 71-80

(上接第 169 页)

选集合  $\Omega$  中去除并分配到  $G_i$  组,  $i=i+1$ , 转到第二步; 否则减小  $N_G$ , 使得  $N_G = N_G - 1$ ; ②如果  $N_G = 0$ , 则转到第四步;

第四步: 返回  $G_1, \dots, G_m, N = \sum_{i=1}^m |G_i|$ 。

#### 4 性能仿真分析

本节, 我们对所提出的 BD 预编码和时分复用相结合的 MIMO 传输方案进行性能仿真。使用蒙特卡洛的方法, 根据信道分布随机产生一组信道增益矩阵  $H_i$ , 使用第 3 节提出的 BD 编码和时分复用相结合的算法, 计算系统支持的用户数以及系统吞吐量。本次仿真中系统发射端配置 4 根天线, 接收端配置 2 根天线, 信噪比采用  $SNR = 10\text{dB}$ , 系统要求的速率  $R_{req} = 3\text{bps/Hz}$ 。

图 2 为不同方案所能够支持的最大平均用户数。把只采用时分复用的方案记作 TDM, 只采用 BD 编码的方案记作 BD 以及采用 BD 和 TDM 结合的方案记为 BD-TDM。在 BD-TDM 方案中考虑了每组 2 或 3 个用户的情况, 分别用 BD-TDM(2)、BD-TDM(3) 来表示。仿真图表明 BD-TDM(2) 和 BD-TDM(3) 编码方案的性能比 BD 方案和 TDM 方案更加优异, 同时它们的编码复杂度却不及 BD 方案的  $\frac{1}{2}$  和  $\frac{2}{3}$ 。

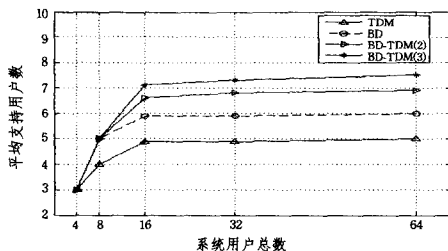


图 2 不同方案的平均支持用户数

图 3 为不同方案的吞吐量。仿真结果显示 BD-TDM(2) 和 BD-TDM(3) 编码方案的吞吐量比 TDM 和 BD 编码方案有较大的提高。

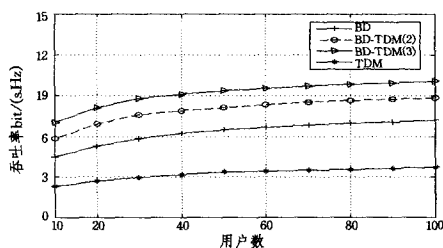


图 3 不同方案的吞吐量

- [31] Im Y, Joe-Wong C, Ha S, et al. AMUSE: Empowering users for cost-aware offloading with throughput-delay tradeoffs [C] // 2013 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2013; 435-439
- [32] Zhuo X, Gao W, Cao G, et al. Win-Coupon: An incentive framework for 3G traffic offloading [C] // 2011 19th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP). IEEE, 2011; 206-215
- [33] Dong W, Rallapalli S, Jana R, et al. iDEAL: Incentivized dynamic cellular offloading via auctions [C] // 2013 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2013; 755-763

**结束语** 本文提出了一种基于 BD 预编码和时分复用的 MIMO 广播传输方案。仿真结果表明, 基于块对角化和时分复用的方案比只用 BD 算法的性能更优, 可以支持更多的用户数以及更高的吞吐率, 同时更加容易满足系统天线配置的要求, 降低了系统的复杂度。

#### 参考文献

- [1] Telatar I E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels [J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10 (6): 585-595
- [2] Gesbert D, Shafi M, Shiu D S, et al. From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems [J]. IEEE J. on Selected Areas in Commun., 2003, 21(4): 281-302
- [3] Jafar S A, Vishwanath S, Goldsmith A J. Channel Capacity and Beamforming for Multiple Transmit and Receive Antennas with Covariance Feedback [C] // IEEE International Conference on Communications. 2001, 7: 2266-2270
- [4] Chen R, Andrews J G, Heath R W. Multi-user space-time block coded MIMO system with Downlink Precoding [C] // IEEE International Conference on Communications. 2004; 2689-2693
- [5] Jongren G, Skoglund M, Ottersten B. Combining beamforming and orthogonal space-time block coding [J]. IEEE Trans. Info. Theory, 2002, 48: 611-627
- [6] Wong K K, Murch R D, Letaief K B. A joint-channel diagonalization for multiuser MIMO antenna systems [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2003, 2(4): 773-786
- [7] Costa M. Writing on Dirty Paper [J]. IEEE Trans. Info. Theory, 1983, 29: 439-441
- [8] Caire G, Shamai S. On the Achievable Throughput of a Multi-Antenna Gaussian Broadcast Channel [J]. IEEE Trans. Info. Theory, 2003, 49: 1691-1706
- [9] Weingarten H, Steinberg Y, Shamai S. The capacity region of the Gaussian MIMO broadcast channel [J]. IEEE Trans. Info. Theory, 2004; 174
- [10] Lai U C, Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2004, 3(1): 20-24
- [11] Serbetli S, Yener A. Beamforming and Scheduling Strategies for Time Soltted Multimuser MIMO System [J]. IEEE Signals, Systems and Computers, 2004; 1227-1231
- [12] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Hartin M. Zero-Forcing Methods for Downlink Spatial Multiplexing in Multiuser MIMO Channels [J]. IEEE Transactions on Signal, 2004, 52 (2): 461-471