

基于正交空分复用的多用户调度策略

尚 鹏^{1,2}, 朱光喜^{1,2}, 苏 钢^{1,2}, 曾宇辉^{1,2}

(1 华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074; 2 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 为了消除多用户 MIMO 下行系统的多用户间干扰以及改进系统的误码率性能, 研究了块对角化预编码与几何均值分解的联合方案(BD-GMD). 针对 BD-GMD 系统的资源分配和用户调度, 对比了等功率分配和注水算法对系统的影响, 并基于系统容量最大化, 提出了一种根据用户信道的子空间特性的低复杂度的用户调度算法. 此外, 对比分析了穷举搜索算法和传统的贪婪算法. 数值仿真结果表明, 文中所提出的基于正交投影的多用户调度算法在保证系统容量的同时降低了算法复杂度.

关键词: MIMO; 预编码; 多用户调度; 几何均值分解; 正交空分复用

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)10-0018-05

Multiuser Scheduling with Orthogonal Space-Division Multiplexing

SHANG Peng^{1,2}, ZHU Guang-xi^{1,2}, SU Gang^{1,2}, ZENG Yu-hui^{1,2}

(1 Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China;

2 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

Abstract: The combined Block Diagonalization precoding and Geometric Mean Decomposition (BD-GMD) scheme is developed to eliminate the multi-user interference and improve the system performance of bit error rate (BER) in a multiuser multiple input multiple output (MU-MIMO). For the resource allocation and scheduling of BD-GMD system, the equal power allocation and water-filling algorithm for the impact of the system is compared. According to the subspace characteristics, a multi-user scheduling scheme based on maximizing the system throughput with low computational complexity is proposed. At the meantime, the brute-force search algorithm and conventional greedy algorithm is analyzed and compared with the proposed algorithm. Simulation results show that the proposed algorithm based on the orthogonal projection can reduce the computational complexity while maintaining the system throughput.

Key words: MIMO; precoding; multiuser scheduling; geometric mean decomposition; orthogonal space-division multiplexing

1 引言

在无线通信系统中通过采用多副发射天线和接收天线可以提供用于通信的额外的空间维数, 并产生自由度增益, 利用这些额外的自由度可以将若干数据流在空间上多路复用至 MIMO 信道中, 系统容量随收发两端最小天线数成线性增加^[1-2]. 当发射端可以获取完整的信道状态信息(CSI)时, 对于 MI-

MO 高斯广播信道(GBC)这一非退化信道, 可以通过采用脏纸编码(DPC)^[3]来实现其容量域. 尽管 DPC 的理论研究价值重大, 但由于其实现复杂度过高, 且对信道信息的准确度非常敏感, 因此其实用性不是很高, 随之出现了一些次优的复杂度低的非线性预编码^[4-5]和线性预编码^[6-8]方案. 而线性预编码由于复杂度比脏纸编码和非线性与编码的复杂度都要低, 且随着用户数的增加, 通过利用多用户分集技

收稿日期: 2009-08-20; 修回日期: 2009-10-20

基金项目: 国际科技合作计划(2008DFA11630); 国家自然科学基金项目(60496315, 60802009); 国家“八六三”重点基金项目(2008AA01Z204, 2009AA01Z205); 湖北省自然科学基金(2007ABA008); 博士后基金一等资助(20070410279)

术,能够获得与脏纸编码渐进相同的和容量,近年成为研究热点.正交空分复用(OSDM)技术通过在基站端对用户发送信号进行预处理,使每个发送用户的接收信号未包含其他用户的信号,以消除多用户间干扰(MUI).其中之一为块对角化预编码技术^[7],通过使当前用户矩阵位于其他发送用户矩阵的零空间,从而将多用户 MIMO 信道分解为多个独立的等效单用户信道,最后通过利用注水功率算法来计算系统的总和速率.传统的块对角化预编码方案不仅基站需要知道所有用户的 CSI,同时每个用户也需要知道其他所有用户的 CSI,系统开销非常大.此外,由于 BD 基于奇异值分解(SVD),每个用户的各个子信道的信道增益差异比较大,因此系统的误码率性能比较差.基于以上两点,本文在 BD 算法的基础上引入几何均值分解(GMD)^[9],使得每个用户的所有子信道的信道增益相同,从而最大化该用户子信道中性能最差的一路.同时在接收端采用 VBLAST 进行解码,采用盲算法得到每个用户的接收滤波器,极大地减少了信道反馈信息量.

由于受限于基站发射天线数和用户的接收天线数,BD-GMD联合方案与传统的 BD 一样,在同一时刻基站需从所有用户集中选择一定的用户进行通信.最优的用户子集可以通过穷举搜索算法获得,但其算法复杂度非常大,特别当用户总数比较大时^[8].一般采用传统的贪婪算法来进行用户选择以降低算法复杂度,但其性能损耗相对比较大.本文根据用户信道特性,提出了一种低复杂度的用户调度算法,在系统容量和算法复杂度之间取得了良好的折中.

2 系统模型

在多用户 MIMO 系统下行链路中,设基站有 M 根发送天线,总共有 K 个活跃用户,用户 k 的接收天线数为 $N_{r,k}$, K_0 为同一时刻基站所选取的用户数.假定该系统为平坦块衰落信道,发射天线和接收天线处于丰富的散射环境,天线间具有非相关性,且用户信道状态信息 CSI 能准确无时延地反馈到基站.用户 k 的接收信号可表示为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{H}_k \sum_{j=1, j \neq k}^{K_0} \mathbf{W}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

$k = 1, \dots, K_0$

式中, $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_{r,k} \times N_t}$ 为用户 k 的信道增益矩阵,其元素为独立同分布的具有零均值、单位方差的复循环对称高斯随机变量. $\mathbf{x}_k \in \mathbb{C}^{N_k \times 1}$ ($N_k \leq N_{r,k}$) 为用户 k 的发送信号,其与预编码矩阵 $\mathbf{W}_k \in \mathbb{C}^{N_t \times N_k}$ 相乘以

后由基站天线阵列发出. $\mathbf{n}_k$ 为加性高斯白噪声,其协方差矩阵为 $E[\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^H] = \sigma^2 \mathbf{I}$, $\mathbf{I} \in \mathbb{C}^{N_{r,k} \times N_{r,k}}$ 为单位矩阵.本文中 $(\cdot)^T$ 和 $(\cdot)^H$ 分别表示转置及 Hermitan 转置, $\text{rank}(\cdot)$ 表示矩阵的秩, $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹.

本文采用块对角化预编码来消除用户间干扰以保证各用户的接收信号中没有其他用户的干扰,则要求

$$\mathbf{H}_j \mathbf{W}_k = 0 \quad \forall j \neq k \text{ and } 1 \leq j, k \leq K_0 \quad (2)$$

即每个用户的预编码矩阵位于其他所有用户的信道矩阵的零空间.令 $\tilde{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_1^T \cdots \mathbf{H}_{k-1}^T, \mathbf{H}_{k+1}^T \cdots \mathbf{H}_{K_0}^T]^T$, $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 为其他调度用户组成的信道矩阵,则文献^[7]中选择的 $\mathbf{W}_k$ 的列向量位于 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的零空间.令 $\tilde{N}_k = \text{rank}(\tilde{\mathbf{H}}_k)$, $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的奇异值分解为

$$\tilde{\mathbf{H}}_k = \tilde{\mathbf{U}}_k \tilde{\mathbf{\Lambda}}_k [\tilde{\mathbf{V}}_k^1 \tilde{\mathbf{V}}_k^0]^H \quad (3)$$

式中, $\tilde{\mathbf{U}}_k$ 和 $\tilde{\mathbf{\Lambda}}_k$ 分别为 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的左奇异向量矩阵和奇异值对角矩阵. $\tilde{\mathbf{V}}_k^1$ 对应前 $\tilde{N}_k$ 个右奇异向量, $\tilde{\mathbf{V}}_k^0$ 对应的后 $(n_t - \tilde{N}_k)$ 右奇异向量组成了 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的零空间的一组正交基.因此取 $\mathbf{W}_k^0 = \tilde{\mathbf{V}}_k^0 \mathbf{D}_k$, 用户 k 的接收信号简化为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{\text{eff},k} \mathbf{D}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k \quad (4)$$

式中, $\mathbf{H}_{\text{eff},k} = \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{V}}_k^0$ 为用户 k 的等效信道矩阵.为了消除 SVD 分解所导致的各个子信道的信道增益的差异,本文对 $\mathbf{H}_{\text{eff},k}$ 采用 GMD 分解来取代 SVD 分解, $\mathbf{H}_{\text{eff},k} = \mathbf{Q}_k \mathbf{R}_k \mathbf{P}_k^H$. 其中 $\mathbf{Q}_k$ 和 $\mathbf{P}_k$ 为酉矩阵, $\mathbf{R}_k$ 为对角元素相等的实上三角矩阵, r_{ii} 为其对角元素.由于 $\mathbf{R}_k$ 的最小对角元素对应的子信道误码率最大,因此文献^[9]通过选择合适的 $\mathbf{Q}_k$ 和 $\mathbf{P}_k$, 以使 $\mathbf{R}_k$ 的最小对角元素最大.其对角元素为

$$r_{kk} = \left(\prod_{m=1}^M \sigma_m \right)^{1/M}, 1 \leq m \leq M \quad (5)$$

式中, σ_m 是 $\mathbf{H}_{\text{eff},k}$ 的第 m 个非零奇异值, $M = \text{rank}(\mathbf{H}_{\text{eff},k})$. 取 $\mathbf{D}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{E}_k^{1/2}$, $\mathbf{E}_k$ 为对角矩阵,其元素为用户 k 的各特征子信道所分配的功率,系统总功率限制为 P , 则式(4)可简化为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{Q}_k \mathbf{R}_k \mathbf{P}_k^H \mathbf{P}_k \mathbf{E}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k = \mathbf{Q}_k \mathbf{R}_k \mathbf{E}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k \quad (6)$$

在用户的接收端采用 VBLAST 译码算法,则用户 k 可以得到 N_k 个独立的且信道增益均为 r_{kk}^2 的子信道.为了保证预编码矩阵 $\mathbf{W}_k$ 的存在,当前选取的所有用户的接收天线总数应不大于基站的发送天线总数.不失一般性,本文假定所有用户的接收天线数相等,即 $N_{r,k} = N_r, \forall k$. 则同一时刻系统所能选取

的最大用户数为 $K_{\max} = \text{ceil}(N_t/N_r)$, 其中 $\text{ceil}(\cdot)$ 表示朝正无穷大方向取整. 定义 $I = \{1, \dots, K\}$ 为系统所有用户集合, $S \in I$ ($|S| \leq K_{\max}$) 为当前时刻所调度的用户集.

采用 BD-GMD 的系统的总速率可表示为

$$C_{\text{BD_GMD}}(S) = \max_{|S| \in I} \sum_{k \in S} \log \det(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma^2} r_{kk}^2 \mathbf{E}_k) \quad (7)$$

最简单的功率分配为等功率分配方案, 基站将功率平均分配给每个用户的子信道, 此时式(7)可简化为

$$C_{\text{BD_GMD_EPA}}(S) = \max_{|S| \in I} \sum_{k \in S} N_k \log(1 + \frac{P}{|S| N_k \sigma^2} r_{kk}^2) \quad (8)$$

当基站根据子信道的信道增益进行注水算法时, 可以获得更大的信道容量, 但其算法复杂度也随之增加. 在本文的后面仿真证明, 等功率算法与注水算法所达到的信道容量差别很小, 因此本文在随后的多用户调度方案中采用等功率分配算法.

3 用户选择算法

由于基于系统容量最大化的最优的用户子集一般通过穷举搜索算法获得, 其需计算 $C_{K_{\max}}^K$ 个用户集的系统容量, 算法复杂度非常大, 不适合实际应用. 传统的贪婪算法每次根据所达到的信道容量选择最合适的一个用户, 但其未考虑用户之间的相关特性. BD-GMD 算法的基本思想是使当前用户的预编码矩阵位于其他所有用户信道矩阵的零空间, 因此可以根据用户在当前已选择的用户集所组成的信道矩阵的正交投影来选择新加入的用户. 由 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的行向量所组成的行空间与 $\tilde{\mathbf{H}}_k^H$ 的列向量所组成的列空间为同一矢量空间, 则 $\tilde{\mathbf{H}}_k^H$ 的列空间的正交投影算子为^[10]

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{I} - \tilde{\mathbf{H}}_k^H (\tilde{\mathbf{H}}_k \tilde{\mathbf{H}}_k^H)^{-1} \tilde{\mathbf{H}}_k \quad (9)$$

则 $\mathbf{H}_k^H$ 列空间在 $\tilde{\mathbf{H}}_k^H$ 列空间的正交投影为 $\mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^H$, 因此可以根据 MIMO 系统中所调度的用户的信道的正交特性来选择用户.

定义 s_i 为第 i 次迭代中选取的用户序号, $s_i \in \{1, 2, \dots, K\}$, $1 \leq i \leq K_{\max}$. 定义 Ω 为未选定用户集, S^* 为选定用户集, 传统的贪婪算法和本文提出的多用户调度算法步骤具体描述见下.

3.1 贪婪算法

(1) 初始化: 令 $\Omega = \{1, 2, \dots, K\}$, $S^* = \emptyset$, $i = 1$.

(2) 选择第 1 个用户: $s_1 = \arg \max_{k \in \Omega} N_k \log(1 + \frac{P}{N_k} r_{kk}^2)$, 当前信道容量 $C_1 = N_{s_1} \log(1 + \frac{P}{N_{s_1}} r_{s_1 s_1}^2)$, 更新用户集 $\Omega = \Omega - \{s_1\}$, $S^* = S^* + \{s_1\}$, $i = 2$.

(3) 对于每个用户 $k \in \Omega$, 令 $S_k^* = S^* + \{k\}$, 由式(8)得到当前的系统容量 C_k^* , 此次迭代选取得用户为 $s_i = \arg \max_{k \in \Omega} (C_k^*)$, 更新当前用户集 $\Omega = \Omega - \{s_i\}$, $S^* = S^* + \{s_i\}$.

(4) 当 $i = K_{\max}$ 时, 算法结束, 得到本算法的最优用户集 S^* , 否则 $i = i + 1$, 返回步骤(3).

3.2 基于正交投影的多用户调度算法

(1) 初始化: 令 $\Omega = \{1, 2, \dots, K\}$, $S^* = \emptyset$, $l = 1$, $i = 1$.

(2) 选择第 1 个用户: $s_1 = l$, 其信道矩阵记为 $\mathbf{H}_{s_1}$, 更新用户集 $\Omega = \Omega - \{s_i\}$, $S^* = S^* + \{s_1\}$, $i = 2$. 则 $\mathbf{H}_{s_1}^H$ 的列空间的正交投影算子 $\mathbf{P}_1$ 为

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{I} - \mathbf{H}_{s_1}^H (\mathbf{H}_{s_1} \mathbf{H}_{s_1}^H)^{-1} \mathbf{H}_{s_1} \quad (10)$$

(3) 假定已经选择了 $i - 1$ 个用户, 则这些用户构成的信道矩阵为 $\tilde{\mathbf{H}}_{i-1} = [\mathbf{H}_{s_1}^T, \dots, \mathbf{H}_{s_{i-1}}^T]^T$, $\tilde{\mathbf{H}}_{i-1}^H$ 的列空间的正交投影算子 $\mathbf{P}_{i-1}$ 参照式(10)由式(9)获得, 第 i 个用户由下式获得

$$i = \arg \max_{k \in \Omega} \text{tr}(\mathbf{P}_{i-1}^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{i-1}) \quad (11)$$

更新当前用户集 $\Omega = \Omega - \{s_i\}$, $S^* = S^* + \{s_i\}$.

(4) 当 $i < K_{\max}$, $i = i + 1$, 返回步骤(3); 当 $i = K_{\max}$, 且 $l < K_{\max}$, 计算当前用户集 S_l^* 对应的系统容量 $C_{S_l^*}$, $l = l + 1$, 返回步骤(2), 当 $l = K_{\max}$ 时算法结束, 得到本算法的最优用户集 S_m^* , 其中 $m = \arg \max_{l=1, \dots, K} (C_{S_l^*})$.

3.3 算法复杂度分析

在采用 BD-GMD 联合编码的系统中, 基于系统容量最大化的最优的用户调度子集由穷举搜索算法获得, 需计算 $C_{K_{\max}}^K$ 次系统和容量, 系统和容量的计算复杂度主要包括 K_0 次 SVD 分解及 K_0 次 GMD 分解. $M \times N$ 的矩阵的 GMD 分解的算法复杂度与 SVD 分解相比, 多了 $O((M+N)L)$ (L 为该矩阵的秩) 次浮点运算. 传统的贪婪算法需进行 $O(KK_{\max})$ 次系统和容量的计算, 而本文提出的算法只需计算 K 次系统和容量, 但每次需计算 $K_{\max} - 1$ 次矩阵的正交投影算子及 $O(KK_{\max})$ 次矩阵的投影运算. 当系统总用户数 K 比较小时, 本文所提出的多用户调度算法的计算复杂度要比传统的贪婪算法低, 当系

统总用户数 K 比较大且系统所能同时选取的用户数 K_0 也较大时,传统的贪婪算法的计算复杂度比本文所提出的算法要低.但在这两种情况下,两种算法均比穷举搜索算法的复杂度要低得多.

4 仿真与分析

定义信噪比 $SNR = P/\sigma^2$,假定信道为准静态平稳衰落,基站可以获取所有用户理想的信道状态信息.本文以下主要仿真对比了以下几种调度算法的系统容量:

- (1) 采用迭代注水方法的脏纸编码(DPC)
- (2) 基于 BD-GMD 的穷举搜索算法(BD-GMD-

- BF)
- (3) 基于 BD-GMD 的贪婪算法(BD-GMD-GA)
- (4) 基于 BD-GMD 的本文提出的算法(BD-GMD-OP)

首先通过仿真对比了基于 BD-GMD 的系统采用等功率分配(EPA)和注水分配算法(WF)的区别.表 1 描述了系统用户总数 $K=20$,基站发送天线数 $N_t=4$,用户接收天线数 $N_r=2$ 时几种功率算法分别采用两种功率算法的对比.当信噪比较低时,功率在用户各个子信道上平均分配所能达到的容量与按照注水算法分配差别很小,高信噪比时几乎无差别,因此本文后面的仿真均采用等功率分配算法.

表 1 BD-GMD 系统中等功率分配与注水功率分配算法的对比 ($K=20, N_t=4, N_r=2$)

信噪比及功率分配	SNR=0dB 等功率	SNR=0dB 注水	SNR=10dB 等功率	SNR=10dB 注水	SNR=20dB 等功率	SNR=20dB 注水
BD-GMD-BF	3.666 9	3.704 6	13.059 3	13.060 4	25.708 6	25.708 7
BD-GMD-OP	3.635 2	3.677 6	12.993 6	12.994 9	25.638 0	25.638 0
BD-GMD-GA	3.490 1	3.551 8	12.725 6	12.727 6	25.292 2	25.292 2

图 1 和图 2 分别描述了天线配置为 ($N_t=4, N_r=2$) 和 ($N_t=6, N_r=2$) 时采用 4 种方案系统总速率随系统总用户数的变化情况,所对应的系统同时选取的最大用户数 $K_{\max}$ 为 2 和 3.图 1、图 2 中的(a)和

(b)分别对应信噪比 SNR 为 0dB 和 20dB.从图中可以看出,三种多用户选择算法的系统容量与 DPC 方案均有比较大的差距,但算法复杂度却降低很多.当基站发送天线数增加时,系统同时发送的用户数也增加,四种算法的系统容量也都随之增加.无论在低

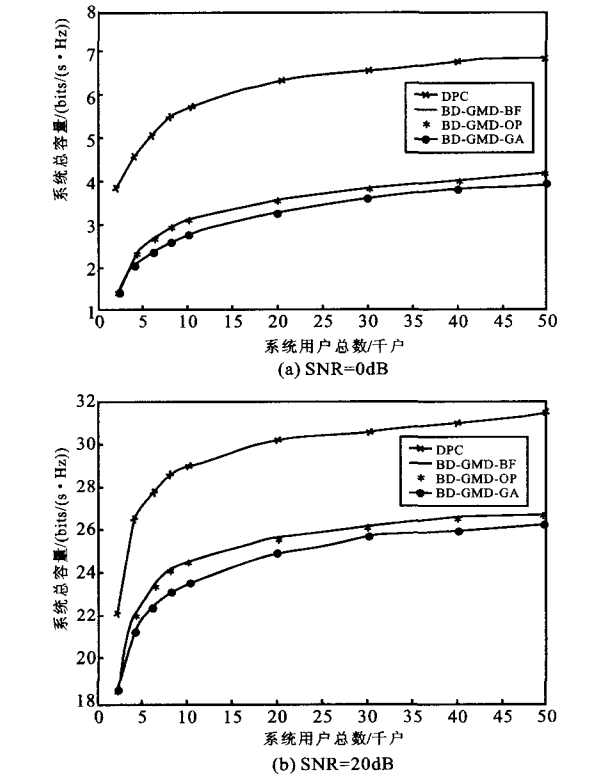


图 1 系统总速率随用户总数变化的情况 ($N_t=4, N_r=2$)

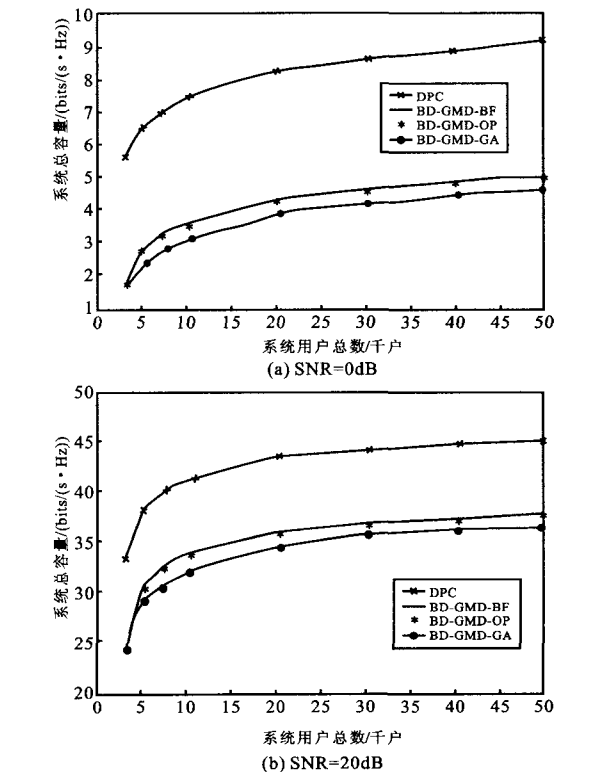


图 2 系统总速率随用户总数变化的情况 ($N_t=6, N_r=2$)

SNR 还是高 SNR 区域,本文提出的 BD-GMD-OP 算法的系统总容量均非常接近穷举搜索算法 BD-GMD-BF,达到 95% 以上,明显优于采用传统的贪婪算法 BD-GMD-GA. 由于 BD-GMD-OP 算法充分利用线性预编码的正交特性,以此来选择后续用户,因此其找到最优用户集的可能性比 BD-GMD-GA 要大.

5 结束语

本文研究了在多用户 MIMO 下行链路系统采用块对角化预编码和几何均值分解的联合方案. 块对角化预编码可以消除多用户之间的干扰,而采用几何均值分解可以最大用户子信道中性能最差的一路,提高了系统的误码率性能. 受限于基站发送天线和用户接收天线数, BD-GMD 需在同一时刻选取用户子集来传输. 由于穷举搜索算法的算法复杂度非常大,不适合实际应用. 本文针对用户信道空间在提出了一种低复杂度的多用户调度算法. 与传统的贪婪算法相比,其系统容量更高,并且在系统用户总数不是很大的时候,算法复杂度也比其低,因此本算法是一种适合实际应用的多用户调度方案.

参考文献:

- [1] 彭端,彭璐丽,尹长川,等. MIMO-OFDM 系统定时同步算法[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(3): 1-10.
- [2] 郭磊,朱光喜,梁学俊. 一种多用户天线组选择辅助的 MIMO-OFDM 新型子载波分配算法[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(2): 168-171.
- [3] Weingarten H, Steinberg Y, Shamai S. The capacity region of the gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(9): 3936-3964.
- [4] Zamir R, Shamai S, Erez U. Nested linear/lattice codes for structured multiterminal binning[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6): 1250-1276.
- [5] Peel C B, Hochwald B M, Swindlehurst A L. A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication - part I: channel inversion and regularization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(1): 195-202.
- [6] 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.
- [7] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 461-471.
- [8] Shen Z K, Chen R H, Andrews J G, et al. Sum capacity of multiuser MIMO broadcast channels with block diagonalization[J]. IEEE International Symposium on Information Theory, 2006, 6(6): 886-890.
- [9] Jiang Y, Hager W, Li J. The geometric mean decomposition[J]. Linear Algebra and Its Applications, 2005(396): 373-384.
- [10] Zhang Xianda. Matrix analysis and applications [M]. Beijing: Tsinghua Univ Press, 2004.

作者简介:

尚 鹏 男, (1983-), 博士研究生. 研究方向为 MIMO 系统中多用户分集、资源调度、信道反馈等.

朱光喜 男, (1945-), 教授, 博士生导师. 研究方向为宽带多媒体通信等.

苏 钢 男, (1972-), 副教授. 研究方向为 MIMO-OFDM 自适应传输技术等.

曾宇辉 男, (1979-), 博士研究生. 研究方向为无线通信中的资源分配等.