

多用户 MIMO 系统中基于块对角化预编码的天线选择算法

冯亦琳 任品毅 汪瑞 魏莉

(西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

摘要: 针对多用户 MIMO 系统中块对角化预编码零空间存在的问题, 提出了一种用户天线选择算法。该算法以最小符号错误概率为准则, 根据最小符号错误概率上界与最小信干噪比之间的关系, 最优用户天线选择子集就是所有等效信道矩阵奇异值分解后使得最小奇异值最大的天线选择子集。仿真表明, 发射天线数为 5, 3 个用户, 每个用户从 2 根天线中选取 1 根用于接收, 采用 QPSK 调制时, 该算法能够在保证零空间存在的基础上极大地提高系统性能。

关键词: 多用户 MIMO 系统; 块对角化预编码; 天线选择; 零空间

Receive Antenna Selection based on Block Diagonalization Precoding in Multi-user MIMO System

FENG Yi-lin REN Pin-yi WANG Rui WEI Li

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Considering the problem that the null space may not exist due to Block Diagonalization Precoding algorithm in the Multi-user MIMO system, a novel users' receive antenna selection algorithm is proposed. The minimum symbol error rate is regarded as the receive antenna selection criterion. Following the fact that the upper bound of the minimum symbol error rate is determined by the minimum SINR of all the antennas, the optimal users' receive antenna selection subset is the one which maximizes the minimum singular value of the equivalent channel matrices. Simulation results show that when with 5 transmit antennas, 3 users, each user choosing 1 receive antenna from 2 receive antennas, QPSK modulation, the proposed algorithm can achieve better system performance with the existence of null space.

Keywords: Multi User MIMO System; Block Diagonalization; Antenna Selection; Null Space

1 引言

MIMO 系统因能极大地提高系统性能和增大系统容量而引起了广泛的关注, 尤其是近些来的多用户 MIMO 系统, 但是多用户 MIMO 下行链路系统的信道为广播信道, 用户之间地理位置的差异导致了用户之间不能协作译码。当发射端已知信道状态信息 CSI (channel state information) 时, 可以在发射端对用户间

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60832007); 国家 863 项目 (2006AA01Z262); 国家级重点实验室基金项目 (9140C5303030803); 国家级重点实验室基金项目 (9140C5303030703)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60832007); The National High Technology Research and Development Program of China (2006AA01Z262); The National Key Laboratory Foundation of China (9140C5303030803); The National Key Laboratory Foundation of China (9140C5303030703)

干扰进行预消除，使得用户在接收端可以不需要译码而直接接收。当用户端天线数为 1 时，迫零算法 (ZF)^[1]对信道矩阵直接求逆，通过对共信道干扰的抑制，可以得到多个独立的并行信道；THP (Tomlinson Harashima Precoding)^[2]和矢量预编码算法^[3]都是非线性算法，矢量预编码算法通过在发射端加入加扰矢量来提高功率效率和误码性能，最优加扰矢量的选取可以采用球形译码算法。当用户天线个数大于 1 时，文献[4]提出了一种块对角化 (Block Diagnolization) 算法，该算法通过寻找干扰用户信道矩阵的零空间，来抑制多用户共道干扰，使得多用户 MIMO 信道分解为一系列单用户 MIMO 信道，进而采用单用户 MIMO 的一些处理方法。虽然块对角化算法可以实现无共道干扰传输，但是它需要计算由其他干扰用户信道所组成信道组合的零空间。本论文针对零空间维数限制的问题，提出了一种用户接收天线选择算法，通过减小用户有效接收天线个数，来放松对于零空间维数的限制。

MIMO 系统中天线选择算法的提出，最初是由于激励天线的射频链路的使用和维护成本都很高，文献 [5] 针对多用户 MIMO 系统提出了一种基于和容量最大化的贪婪算法，该算法每一次增加一根使得和容量增加最大的天线知道天线个数达到所需数量。本文提出的用户天线选择算法基于最小符号错误概率准则，该准则等价于最大化最小信干噪比。仿真结果表明采用天线选择算法可以在保证零空间存在性的基础上极大地提高系统的误码系能，同时该算法不仅不会降低系统容量，在某些情况下还会很大程度增加系统容量。

全文结构如下：第二节给出了多用户 MIMO 系统模型；第三节首先分析了多用户 MIMO 系统中干扰用户零空间存在性的问题，之后给出了一种基于最小符号错误概率准则的天线选择算法；在第四节中给出了性能分析和计算机仿真；最后是对全文的总结。

2 系统模型

考虑一个多用户 MIMO 系统下行链路，发射端具有 M_r 根发射天线， K 个用户，第 k 个用户具有 N_k 根接收天线， $1 \leq k \leq K$ 。该多用户 MIMO 系统图 1 所示。

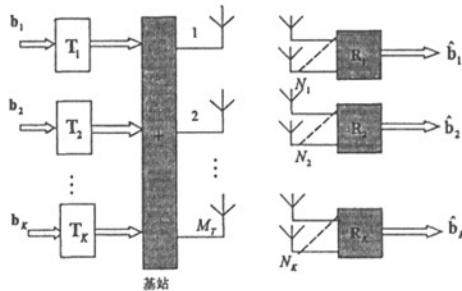


图 1 多用户 MIMO 系统结构图

基站向所有移动用户传送的数据，首先根据每个用户的信道信息进行预编码，然后利用同一频率同一时隙并行传输。第 k 个用户的接收信号可以表示为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \sum_{j=1}^K \mathbf{T}_j \mathbf{b}_j + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

采用块对角化算法，令 $\mathbf{G}_k = (\mathbf{H}_1^H, \dots, \mathbf{H}_{k-1}^H, \mathbf{H}_{k+1}^H, \dots, \mathbf{H}_K^H)^H$ 第 k 个用户的干扰矩阵，它由除去第 k 个用户信道矩阵的其他所有用户的信道矩阵组成的矩阵组合。令 \mathbf{T}_k 处于 \mathbf{G}_k 的零空间中，也即 $\mathbf{G}_k \mathbf{T}_k = \mathbf{0}$ 。这样第 k 个用户的接收信号为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \sum_{j=1}^K \mathbf{T}_j \mathbf{b}_j + \mathbf{n}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{b}_k + \mathbf{n}_k \quad (2)$$

它等效为一个无共道干扰的单用户 MIMO 系统。

\mathbf{G}_k 的零空间可以通过 SVD 分解来得到

$$\mathbf{G}_k = \tilde{\mathbf{U}}_k \tilde{\Sigma}_k \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{V}}_k^{(1)} & \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)} \end{bmatrix}^H \quad (3)$$

其中 $\tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}$ 表示矩阵 \mathbf{G}_k 的零空间。

3 基于块对角化预编码的天线选择算法

3.1 零空间存在性问题

在块对角化预编码算法中，对某一用户 k 来说，要求第 k 个用户的干扰信道矩阵 \mathbf{G}_k 的零空间存在，该零空间存在是保证块对角化算法能够用于有效传输的充分必要条件。

在充满散射体的环境中，每一条传输路径都是独立的，因此 \mathbf{G}_k 或者是行满秩，或者是列满秩的。 \mathbf{G}_k 的零空间 $\tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}$ 的维数 $d_k = \max\left(M_T - \sum_{j=1, j \neq k}^K N_j, 0\right)$ ，因此，零空间 $\tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}$ 存在的充分必要条件为：

$$M_T > \sum_{j=1, j \neq k}^K N_j \quad \forall k \quad (4)$$

3.2 用户天线选择算法

令 $MU[M_T; N_1(N'_1), N_2(N'_2), \dots, N_K(N'_K)]$ 表示多用户 MIMO 下行链路用户接收天线选择系统，其中 $N_k(N'_k)$ 表示第 k 个用户的 N_k 根天线中选取 N'_k 根天线作为用户 k 的接收天线。

对于第 k 个用户从 N_k 根天线中选取 N'_k 根天线，共有 $C_{N_k}^{N'_k}$ 种选取方法，最优的用户天线选择不能分解为各用户独立地选择天线，而需要对所有用户联合进行天线选择。对于 K 个用户来说，天线子集选择个数共有

$$L = \prod_{k=1}^K C_{N_k}^{N'_k} \quad (5)$$

采用最小符号错误概率作为用户接收天线选择的准则，对于给定的某一根天线 q ，符号错误概率为 P_q ，根据 NNUB (Nearest Neighbour Union Bound) 矢量符号错误概率 P_{SM} 可以表示为

$$P_{SM} = 1 - \prod_{q=1}^M (1 - P_q) \leq 1 - (1 - P_{q_{min}})^M \approx MP_{q_{min}} \leq MN_e Q\left(\sqrt{SINR_{min} \frac{d_{min}^2}{2}}\right) \quad (6)$$

其中， d_{min} 是发射星座图中星座点之间的最小距离， N_e 表示星座图中最近邻居星座点的个数。

因此，可以得出结论：符号错误概率的上界由所有天线中的最小信干噪比决定。

采用基于 SVD 分解的检测方法，考虑第 p 种天线子集选择，第 k 个用户的估计信号为

$$\hat{\mathbf{b}}_k^{(p)} = \Sigma_k^{-1(p)} \mathbf{U}_k^{H(p)} \cdot \mathbf{H}_k^{(p)} \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)(p)} \mathbf{V}_k^{(1)(p)} \mathbf{b}_k^{(p)} + \Sigma_k^{-1(p)} \mathbf{U}_k^{H(p)} \cdot \mathbf{n}_k \quad (7)$$

第 k 个用户的译码矩阵为 $\mathbf{R}_k^{(p)}$

$$\mathbf{R}_k^{(p)} = \Sigma_k^{-1(p)} \mathbf{U}_k^{H(p)} \quad (8)$$

第 k 个用户的预编码矩阵和第 k 个用户的信道矩阵的乘积记为

$$\mathbf{W}_k^{(p)} = \mathbf{H}_k^{(p)} \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)(p)} \mathbf{V}_k^{(1)(p)} \quad (9)$$

这时，第 k 个用户的估计信号可以重新写为

$$\hat{\mathbf{b}}_k^{(p)} = \mathbf{R}_k^{(p)} \cdot \mathbf{W}_k^{(p)} \mathbf{b}_k^{(p)} + \mathbf{R}_k^{(p)} \cdot \mathbf{n}_k \quad (10)$$

那么，第 k 个用户第 i 根天线上的 SINR

$$SINR_{k,i}^{(p)} = \frac{|\mathbf{r}_{k,i}^{(p)} \cdot \mathbf{w}_{k,i}^{(p)}|^2}{N_0 \|\mathbf{r}_{k,i}^{(p)}\|^2 + \sum_{j \neq i} |\mathbf{r}_{k,j}^{(p)} \cdot \mathbf{w}_{k,j}^{(p)}|^2} \quad (11)$$

由于对等效信道做奇异值分解，对于第 k 个用户来说，它的多条信道是平行的，因此 $\sum_{j \neq i} |\mathbf{r}_{k,j}^{(p)} \cdot \mathbf{w}_{k,j}^{(p)}|^2 = 0$ ，那么第 k 个用户第 i 根天线上的 SINR 可以写为

$$SINR_{k,i}^{(p)} = \frac{1}{N_0 / |\lambda_{k,i}^{(p)}|^2} = |\lambda_{k,i}^{(p)}|^2 / N_0 \quad (12)$$

其中 $\lambda_{k,i}^{(p)}$ 表示第 k 个用户等效信道矩阵奇异值分解后的第 i 个奇异值。

所以，在 L 种可能的天线选择子集中，天线选择子集 p 使得 $SINR_{\min}^{(p)}$ 最大，也即

$$p = \arg \max_L SINR_{\min}^{(p)} \quad (13)$$

p 记为符号错误概率最小的最优天线选择子集。

4 性能分析和仿真

4.1 平均和容量分析

一般地，基站发给用户 k 的独立的数据流的数目 L_k 不能超过 d_k 和接收天线数 N_k 以保证可靠的检测，即 $L_k \leq \min(d_k, N_k)$ 。在高信噪比区域，系统的和容量与空间自由度近似成线性关系。当采用块对角化预编码算法同时给 K 个用户发送数据，空间自由度为

$$D = \sum_{k=1}^K \min(d_k, N_k) \quad (14)$$

4.2 系统仿真

采用准静态平坦衰落的 MIMO 信道，并且发射端和接收端都已知准确信道状态信息信道矩阵的各元素相互独立，发射端采用 QPSK 调制，每帧由 100 个发射向量组成，每帧内信道不变，帧之间信道随机独立变化。

图 2 为用户天线选择算法的误码率曲线，可以看出：在误码率达到 10^{-4} 时，本文提出的天线选择算法比随机选择算法性能提高约 4dB。对于多用户系统 [4;2,2,2] 和 [3;2,2,2]，它们不满足零空间存在性限制 (4) 所必须满足的充要条件，因此不能采用块对角化算法进行传输。在该系统中，对用户接收天线进行选择，多用户系统 [4;2(1),2(1),2(1)] 和 [3;2(1),2(1),2(1)] 采用块对角化算法进行有效传输且误码性能较随机选择算法大大提高。

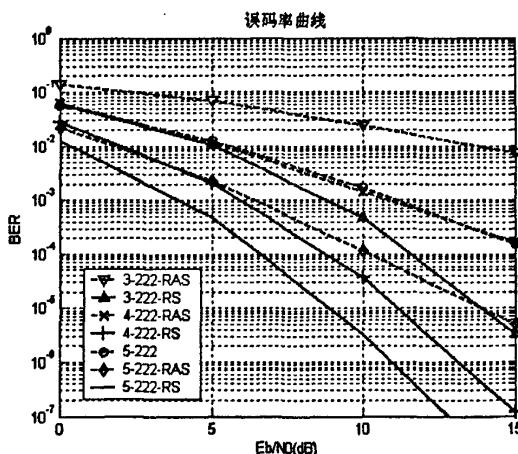


图 2 用户天线选择算法误码率曲线

从图 3 中可以看出：在[5;2,2,2]多用户系统中，进行天线选择后的系统平均和容量比未进行天线选择的系统平均容量增加大约 2b/s/Hz。而在[4;3,3]多用户系统中，进行天线选择后的系统平均和容量比未进行天线选择的系统平均和容量要大得多，大约为 10b/s/Hz。这样的结果说明，在用户端进行天线选择不仅不会使系统容量减少，反而在某些情况下会使得系统容量大大增加。

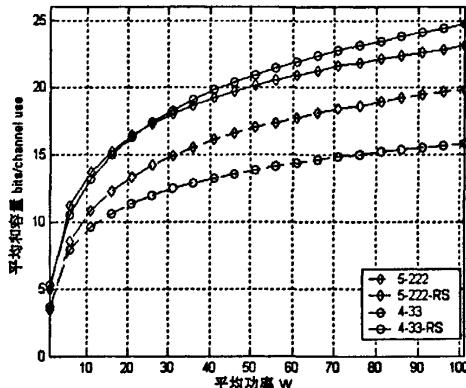


图 3 多用户 MIMO 系统平均和容量仿真

5 结论

针对多用户 MIMO 系统中块对角化预编码方法中零空间的存在性问题，本文提出了一种用户接收天线选择算法。该算法基于最小符号错误概率准则，它可以在保证用户干扰矩阵零空间的存在性的条件下极大地提高系统的误码性能。

参考文献

- [1] Michael Joham, Wolfgang Utschick, and Josef A. Nossek, "Linear Transmit Processing in MIMO Communications systems," IEEE transactions on signal processing, vol. 53, no. 8, pp. 2700-2712, August 2005
- [2] K. Kusume, M. Joham, W. Utschick, and G. Bauch, "Efficient Tomlinson-Harashima Precoding for Spatial Multiplexing on Flat MIMO Channel," Proc. ICC 2005, vol. 3, pp. 2021-2025, May 2005
- [3] Bertrand M. Hochwald, Christian B. Peel, A. Lee Swindlehurst, "A Vector-perturbation Technique for Near-Capacity Multiantenna Multiuser Communication-Part II: Perturbation," IEEE Transactions on Communications, vol. 53, no. 3, pp.537-544, March 2005
- [4] Lai-U Choi and Ross D. Murch, "A Transmit Preprocessing Technique for Multiuser MIMO Systems Using a Decomposition Approach," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 3, no. 1, pp. 20-24, January 2004
- [5] Federico Boccardi, Howard Huang, "A Near-Optimum Technique Using Linear Precoding For The MIMO Broadcast Channel," III17-20, ICASSP 2007

作者简介

任品毅，男，1971 年生，湖南长沙人，西安交通大学电子与信息工程学院，教授，博士，主要研究方向为无线通信和预编码；

冯亦琳，女，1984 年生，陕西西安人，硕士生，主要研究方向为多用户 MIMO 预编码。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>