

多用户 MIMO 系统的低复杂度天线选择算法

王俊,徐洪波,王丽华

WANG Jun,XU Hong-bo,WANG Li-hua

华中师范大学 电子与信息工程系,武汉 430079

Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China

E-mail: myhd_2005@yahoo.com.cn

WANG Jun,XU Hong-bo,WANG Li-hua.Low complexity antenna selection algorithm for multiuser MIMO systems. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(5):174-176.

Abstract: Block Diagonalization(BD) is a precoding technique that eliminates interference in downlink multiuser Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) systems. We propose a novel suboptimal antenna selection algorithm which is based on the channel Frobenius norm for multiuser MIMO systems with BD while keeping the computational complexity lower. Simulation show that the algorithm can be close to the sum capacity of the optimal algorithm.

Key words: multiuser; MIMO; sum capacity; antenna selection

摘要:块对角化是一种用于多用户 MIMO 系统下行链路的预编码方案,它可以完全消除多用户间的干扰。论文就是针对采用块对角化预编码的多用户 MIMO 下行链路,基于信道 F-范数提出一种新的次优天线选择算法。该算法计算复杂度较低。仿真结果显示,其系统容量接近采用最优算法的系统容量。

关键词:多用户;MIMO;容量;天线选择

文章编号:1002-8331(2008)05-0174-03 文献标识码:A 中图分类号:TN924

1 引言

MIMO 系统因其巨大的容量优势与改善链路质量的潜力而在最近几年受到了广泛的研究与关注,但在实际应用中,它的使用受到了一些因素的限制,其中一个关键因素就是多个射频链路所带来的高成本,一种能有效地降低射频链路成本但同时还能保证相当的性能增益技术便是天线选择,其基本思想是在所有天线中选择“最好”的一小部分天线进行接收,并且容量损失相对较小。

天线选择在单用户 MIMO 系统中已有很多研究。文献[1,2]提出了一种最优天线选择算法,它需要采用穷举搜索方法得出最优天线子集 $\binom{N_R}{n_R}$ 使系统容量最大,但这种方法计算复杂度太大。因此,许多文献提出了降低复杂度的次优天线选择算法。文献[3,4]提出了一种基于行(或列)范数最大的天线选择算法。该算法复杂度低,但是性能往往比较差。文献[5]采用一次除去一根天线的方法,直到剩余的天线数等于计划的天线数,在每一步去除哪根天线由容量损失最小的准则确定。文献[6]采用一次增加一根天线的方法,在每一步增加哪根天线根据使容量增益为最大的准则确定。文献[7]提出了一种基于范数和不相关最大的天线选择算法,但是该算法在 n_k 大时会产生较大的容量损失。

本文针对采用块对角化预编码的多用户 MIMO 下行链路提出了一种复杂度低的次优天线选择算法,该算法是基于信道 F-范数的天线依次选择算法。

2 系统模型

多用户 MIMO 系统下行链路如图 1 所示,其中一个是基站(BS)可以同时给 K 个独立用户发送数据。设基站天线数为 n_T ,用户 k 的天线数为 n_k ,选择后用户 k 的天线数为 $n_{r,k}$,发送给用户 k 的数据为 s_k ,对应的预编码矩阵为 T_k 。假设基站到各用户的信道为 Rayleigh 平坦衰落,则基站到用户 k 的信道可表示为 $n_k \times n_T$ 矩阵 H_k ,其每个元素服从独立同分布复高斯分布 $CN(0, 1)$ 。

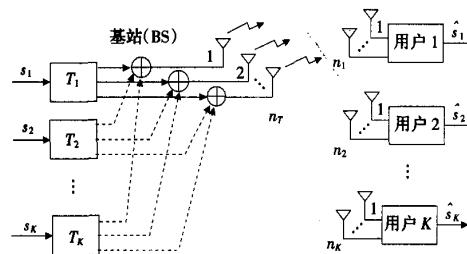


图 1 多用户 MIMO 系统下行链路

用户 k 接收到的信号可表示为

作者简介:王俊(1983-),男,硕士生,主要研究方向:无线通信理论;徐洪波(1971-),男,副教授,主要研究方向:无线通信理论和信号处理;王丽华(1983-),女,硕士生,主要研究方向:数字信号处理。

收稿日期:2007-07-09 修回日期:2007-10-24

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \sum_{i=1}^K \mathbf{T}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{w}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{T}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{w}_k \quad (1)$$

式中第2个等号的右边第一项是对用户 k 有用的信号,第2项是其他用户信号对用户 k 的干扰,第3项 \mathbf{w}_k 是均值为0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声向量。

定义矩阵 $\mathbf{H}_k = [\mathbf{H}_1^\top, \dots, \mathbf{H}_{k-1}^\top, \mathbf{H}_{k+1}^\top, \dots, \mathbf{H}_K^\top]^\top$,若要求式(1)中所有用户间干扰项为0,则各用户的预编码矩阵需满足

$$\tilde{\mathbf{H}}_k \mathbf{T}_k = 0, \quad (2)$$

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 $r_k = \text{rank}(\tilde{\mathbf{H}}_k)$, $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的奇异值分解为 $\tilde{\mathbf{H}}_k = \tilde{\mathbf{U}}_k \tilde{\Lambda}_k [\tilde{\mathbf{V}}_k^1 \ \tilde{\mathbf{V}}_k^0]^\top$, 其中 $\tilde{\mathbf{V}}_k^0$ 包含 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的后 $n_r - r_k$ 个右奇异向量。 $\tilde{\mathbf{V}}_k^0$ 中的列向量构成了 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的零空间的一个标准正交基,因此, \mathbf{T}_k 的列向量可表示为 $\tilde{\mathbf{V}}_k^0$ 各列的线性组合,

$$\mathbf{T}_k = \tilde{\mathbf{V}}_k^0 \mathbf{A}_k \quad (3)$$

经过预编码后,用户 k 接收到的信号可简化为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{w}_k \quad (4)$$

预编码后系统的容量可以表示为

$$C = \max_{\mathbf{T}_k} \sum_{k=1}^K \ln \left[\det \left(I + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{T}_k^\top \mathbf{H}_k^\top \right) \right] \quad (5)$$

3 低复杂度的天线选择算法

最优算法是在所有可能的天线集搜索出一个最优的天线子集使信道容量最大,计算复杂很高,因此提出一种基于信道F-范数复杂度低的次优的天线选择算法。

令尚没有确定天线选择的用户集合为 Ω ,已确定天线选择的用户集合为 γ ,同样地,令用户 k 中未选的天线集合和已选天线集合分别为 A_k 和 B_k 。

算法的具体步骤如下:

(1) 初始化: $\Omega = \{1, 2, \dots, K\}$, $\gamma = \phi$, $A_k = \{1, 2, \dots, n_k\}$, $B_k = \phi$ 。

(2) 对每个 $k \in \Omega$

①从其 $n_k \times n_r$ 信道矩阵 \mathbf{H}_k 中找到 l_2 范数大的 $n_{r,k}$ 行构成

$n_{r,k} \times n_r$ 矩阵 $\bar{\mathbf{H}}_k$,其 F-范数记为 $F(k)$ 。

②第1个确定所选天线的用户为 $u_1 = \arg \max_{k \in \Omega} F(k)$, 它所选

择的 n_{r,u_1} 根天线即为 $\bar{\mathbf{H}}_{u_1}$ 的各行所对应的接收天线。

③更新 $\Omega = \Omega - \{u_1\}$, $\gamma = \gamma + \{u_1\}$ 。

(3) 对 $i=2:K$

①对每个 $k \in \Omega$,用 $\mathbf{h}_{k,1}, \mathbf{h}_{k,2}, \dots, \mathbf{h}_{k,n_r}$ 表示 \mathbf{H}_k 的行向量。令

$\mathbf{P}_i^\perp = \mathbf{I}_{n_r} - \mathbf{V}_{i-1}^\top \mathbf{V}_{i-1}$,其中 \mathbf{V}_{i-1} 表示对 $\mathbf{H}(\gamma) = [\mathbf{H}_{u_1}^\top, \mathbf{H}_{u_2}^\top, \dots, \mathbf{H}_{u_{i-1}}^\top]^\top$ 按行进行 Gram-Schmidt 正交化(GSO)得到各行标准正交矩阵。

对 $i=1:n_r$

$$(i) r_{k,i} = \arg \max_{k \in A_i} (\|\bar{\mathbf{H}}_k \mathbf{P}_i^\perp\|_F^2 + \sum_{j=1}^{i-1} \|\bar{\mathbf{H}}_{u_j} \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{H}}_{u_j}}^\perp\|_F^2), \text{其中 } r_{k,i} \text{ 表}$$

示用户 k 第 i 次选定的天线, $\bar{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{h}_{k,r_{1,i}}^\top, \mathbf{h}_{k,r_{2,i}}^\top, \dots, \mathbf{h}_{k,r_{i-1,i}}^\top, \mathbf{h}_{k,n_r}^\top]^\top$,

$\mathbf{P}_{\bar{\mathbf{H}}_{u_j}}^\perp = \mathbf{I}_{n_r} - \mathbf{V}_{u_j}^\top \mathbf{V}_{u_j}$ 表示对 $\bar{\mathbf{H}}_{u_j} = [\mathbf{H}_{u_j}^\top, \dots, \mathbf{H}_{u_{j-1}}^\top, \mathbf{H}_{u_j}^\top, \dots, \mathbf{H}_{u_{i-1}}^\top, \mathbf{H}_{u_i}^\top]^\top$ 按行进行 GSO 得到各行标准正交矩阵, $j=1, 2, \dots, i-1$ 。

(ii) 更新 $A_k = A_k - \{r_{k,i}\}$, $B_k = B_k + \{r_{k,i}\}$ 。

$\Omega = \arg \max_{k \in \Omega} r_{k,i}$, 它所选的天线集合为 $B_{u_i} = \{r_{u_i,1}, r_{u_i,2}, \dots,$

$r_{u_i,n_r}\}$, $\bar{\mathbf{H}}_{u_i}$ 表示对应于 B_{u_i} 的信道。

③更新 $\Omega = \Omega - \{u_i\}$, $\gamma = \gamma + \{u_i\}$ 。

4 复杂度分析

复杂度可以用实浮点操作的次数来度量。一次复数加法,复数乘法复杂度分别为 2,6。

典型几种矩阵 $\mathbf{H} \in C^{mn}$ 操作复杂度如下:

(1) F-范数复杂度为 $4mn$;

(2) GSO 复杂度为 $8m^2n - 2mn$;

(3) SVD 复杂度为 $24mn^2 + 48m^2n + 54m^3$;

(4) 注水算法 $2n^2 + 6n$ 。

为了简单起见,假定 $n_k = n$, $n_{r,k} = n_r$, $n < n_r$, $n < n_r$, $K \leq \frac{n_r}{n_r} < n_r$ 。

(1) 最优算法复杂度

对每个 $k \in \Omega$ 计算 \mathbf{T}_k 的复杂度为 $24(K-1)n_r n_r^2 + 48(K-1)^2 n_r^2 n_r + 54(K-1)^3 n_r^3$, 计算 $\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k$ 的复杂度为 $8n_r n_r (n_r - (K-1)n_r)$, 计算 SVD($\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k$)复杂度为 $24n_r (n_r - (K-1)n_r)^2 + 48n_r^2 (n_r - (K-1)n_r) + 54n_r^3$, 注水算法复杂度为 $2Kn_r (Kn_r + 3)$ 。所以总的复杂度为 $\varphi_{opt} > [(24(K-1)n_r n_r^2 + 48(K-1)^2 n_r^2 n_r + 54(K-1)^3 n_r^3 + 8n_r n_r (n_r - (K-1)n_r) + 24n_r (n_r - (K-1)n_r)^2 + 48n_r^2 (n_r - (K-1)n_r) + 54n_r^3)K + 2Kn_r (Kn_r + 3)](C_n^K) \approx O(K^2 n_r^2 (C_n^K)^K)$

(2) 次优算法复杂度

步骤(2)复杂度为 $4Kn_r n_r + K(n_r - 1)$;

步骤(3)对每个 $k \in \Omega$, GSO(\mathbf{H})复杂度为 $8(i-1)^2 n_r^2 n_r - 2(i-1)n_r n_r V_{i-1}^\top V_{i-1}$, 复杂度为 $8(i-1)n_r n_r^2, r_{k,i}$ 复杂度为 $8ln_r^2 + 4ln_r + (i-1)[((i-2)n_r + l)n_r + 8((i-2)n_r + l)n_r^2 + 8n_r n_r^2 + 4n_r n_r]$ 。因此总的复杂度为

$$\varphi_{subopt} \approx \sum_{i=2}^K [8(i-1)^2 n_r^2 n_r - 2(i-1)n_r n_r + 8(i-1)n_r n_r^2 + \sum_{l=1}^{n_r} (n_r + l)[8ln_r^2 + 4ln_r + (i-1)((i-2)n_r + l)n_r + 8((i-2)n_r + l)n_r^2 + 8n_r n_r^2 + 4n_r n_r]](K+1-i) + (4nn_r + n_r + 1)K \approx O(K^3 n_r^2 n_r) \quad (7)$$

复杂度比率为

$$\eta = \frac{\varphi_{subopt}}{\varphi_{opt}} < \frac{K^3 n_r^2 n_r}{K^3 n_r^2 (C_n^K)^K} = \frac{Kn_r}{(C_n^K)^K} \quad (8)$$

例如,当 $n_r = 30$, $n = 4$, $n_r = 2$, $K = 15$ 时, $\eta < 1.276 \times 10^{-10}$,因此计算复杂度大大减小。

5 仿真结果

针对采用块对角化预编码的多用户 MIMO 下行链路,通过仿真比较提出的次优选择算法和最优选择算法的系统性能。

仿真 1: 基站天线数为 $n_r=4$, 用户数为 $K=2$, 每个用户天线数 $n_t=3, n_{r,k}=2$, 信道为准静态平坦衰落信道, 基站知道精确的信道状态信息。图 2 给出了采用本文次优算法, 最优选择算法和不选择系统容量随 SNR 变化的比较曲线。图 3 给出了系统容量的累积分布函数(CDF)随容量变化的比较曲线。

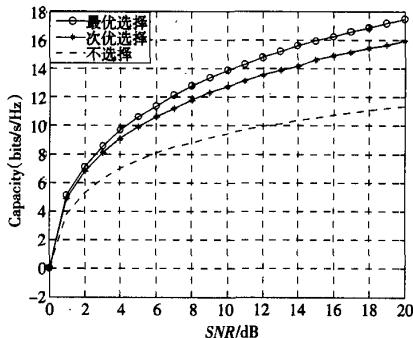


图 2 $n_r=4, n_t=3, n_{r,k}=2, K=2$ 时不同的算法系统容量随 SNR 变化的比较曲线

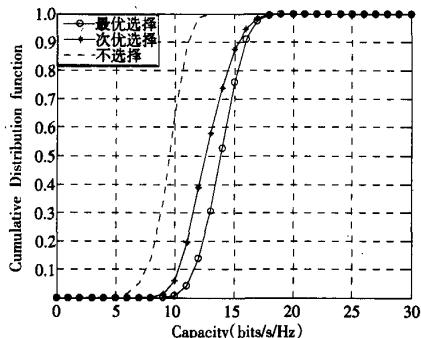


图 3 $n_r=4, n_t=3, n_{r,k}=2, K=2, SNR=10$ 时不同算法系统容量的累积分布函数

仿真 2: 基站天线数为 $n_r=6$, 用户数为 $K=3$, 每个用户天线数 $n_t=3, n_{r,k}=2$ 其它条件同仿真 1。图 4 给出了采用本文的次优算法, 最优选择算法系统的容量随 SNR 的比较曲线。图 5 给出了系统容量的累积分布函数(CDF)随容量变化的比较曲线。

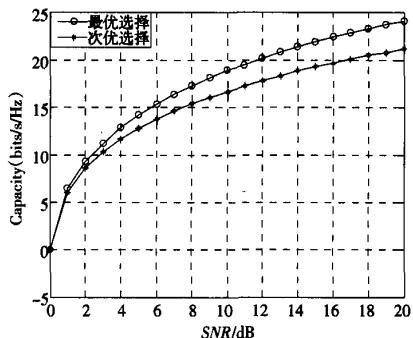


图 4 $n_r=6, n_t=3, n_{r,k}=2, K=3$ 时不同的算法系统容量随 SNR 变化的比较曲线

从图 2 可以看出, 提出的算法容量介于最优选择和不选择

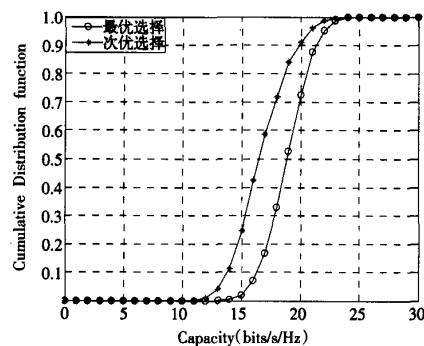


图 5 $n_r=6, n_t=3, n_{r,k}=2, K=3, SNR=10$ 时不同算法系统容量的累积分布函数

之间, 当 $SNR=20$ 时, 本文的次优算法容量达到 16 bits/s/Hz, 明显高于不选择时容量 4.6 bits/s/Hz, 但相比最优算法仅有 1.5 bits/s/Hz 的容量损失。图 4 显示, $SNR=20$ 时, 本文的次优算法容量达到 21 bits/s/Hz, 相比最优算法仅有 3 bits/s/Hz 的容量损失。比较图 2 和图 4, 随 n_r 增大, 系统的容量会增加。

从图 3 和图 5 都可以看出, 随着中断容量的增大, 提出的次优算法接近最优算法, 但好于不选择的方法。

仿真 2 复杂度比率 $\eta < 0.3333$, 很明显本文提出的次优算法复杂度减小了, 但是由于 K 太小, 复杂度减小的不多。

6 结论

本文提出了一种用于多用户 MIMO 系统的次优天线选择算法, 该系统在发送端采用块对角化预编码。这种算法是基于信道 F-范数的准则的次优天线选择算法, 当用户数 K 很大时其复杂度远低于最优算法。仿真结果显示, 提出的算法系统的容量接近最优的算法的系统的容量。

参考文献:

- [1] Molisch A F.MIMO systems with antenna selection—an overview[C]// Radio and Wireless Conference, 2003-08:167-170.
- [2] Sanaye S, Nosratinia A.Antenna selection in MIMO systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10):68-73.
- [3] Molisch A F, Win M Z, Winters J H.Capacity of MIMO systems with antenna selection[C]//IEEE International Conference on Communications, 2001-01, 2:570-574.
- [4] Chen Zhuo, Yuan Jinhong, Vucetic B, et al.Performance of Alamouti scheme with transmit antenna selection[J].Electronics Letters, 2003, 39(23):1666-1668.
- [5] Gorokhov A.Antenna selection algorithms for MEA transmission systems[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2002-05:2857-2860.
- [6] Gharavi-Alkhansari M, Gershman A B.Fast antenna subset selection in MIMO systems[J].IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2):339-346.
- [7] Park Joo-Seok, Park Dong-Jo.A new antenna selection algorithm with low complexity for MIMO wireless systems[C]//IEEE International Conference on Communications, 2005, 4(16):2308-2312.

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>