

文章编号:1009-671X(2007)10-0009-04

一种基于功率分配和天线选择算法的 V-BLAST 系统设计

王凌云, 马惠珠

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 将天线选择算法引入采用功率分配算法的 V-BLAST (vertical bell laboratories layered space-time) 系统能有效改善 BER 的性能, 从而降低错误传播对系统的影响。在此, 以最小化向量错误概率为目标, 在一种发射端有 2 根天线的最优功率分配 V-BLAST 系统的基础上引入发射天线选择技术(算法), 将该系统从发射端有 2 根天线的 V-BLAST 系统扩展到通用的 V-BLAST 系统中。仿真结果表明, 此方案无论是在各层 BER 性能上还是在向量错误概率上都优于原系统的无天线选择方案, 并且随着系统向量错误概率的进一步降低, 有天线选择的方案相对于无天线选择的方案在性能上会有进一步的提高。

关键词: 天线选择; 功率分配; MIMO

中图分类号: TN911.72 文献标识码: A

A design of V-BLAST system based on power allocation and antenna selection algorithm

WANG Ling-yun, MA Hui-zhu

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Incorporation of antenna selection algorithm into power allocation algorithm in V-BLAST system can effectively improve the BER performance and reduce the influence of error propagation on the system. In this article, with the minimal probability as a criterion, the antenna selection algorithm is introduced into the V-BLAST system with optimal power allocation and two antennae at emitting end. Then this system is extended into a universal V-BLAST system. Simulation results indicate that this approach has better performance in BER and vector error probability than the original system without antenna selection. Moreover, the performance will tend to be better when the vector error probability further decreases.

Keywords: antenna selection; power allocation; MIMO

在传统的 MIMO (multiple input and multiple output) 系统中, 发射机和接收机需要同时使用所有的天线进行发射和接收, 这就要求系统中使用的射频链路数目与天线数目一样, 在天线数目较多的系统中, 这会大大增加系统的硬件成本及无线系统前端的复杂度。天线部分与射频部分相比成本很低, 因此可以通过采用天线选择(发射天线选择/接收天线选择)的方法进行传输, 即用相对较少的发/收射频链路来选择较多的天线, 从而降低系统的复杂度和成本。功率分配能有效减小随机信道对传输数据

的影响, 改善系统性能, 保证一定质量的服务, 它也是减少 OSIC 算法中错误传播影响的有效途径之一。V-BLAST 系统是一种基于分层空时码的系统, 它的编码简单, 具有较高的频带利用率及相对较低的应用复杂度。它的检测算法有最大似然译码算法, 追零(ZF)算法, OSIC (ordered successive interference cancellation) 算法等。其中, 最大似然译码算法虽然性能较好, 但具有指数计算复杂度, 实用化较困难。OSIC 算法计算的复杂度介于最大似然算法和线性检测算法之间, 应用复杂度较低, 性能上不如最大似然

收稿日期: 2007-05-08。

基金项目: 哈尔滨市青年科学基金资助项目(2005AFQXJ047)。

作者简介: 王凌云(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: MIMO 系统, E-mail: wanglingyun@hrbeu.edu.cn.

算法,而且错误传播会影响系统的检测性能,因此有必要改善 OSIC 算法的性能,采用功率分配能有效抑制错误传播的影响. 基于以上考虑,在 V-BLAST 系统的 OSIC 算法基础上引入天线选择和功率分配算法,即可以降低成本,又可以提高系统的性能.

1 系统模型

在 MIMO 系统中,假定发射端有 N 根天线,接收端有 M 根天线;信道为准静态平坦衰落,信道矩阵为 $M \times N$ 矩阵 \mathbf{H} ,其元素 h_{ij} 表示从发射天线 j 到接收天线 i 的信道衰落系数,信道衰落系数之间是相互独立的,且都服从均值为 0、方差为 0.5 的循环对称复高斯分布 $cn(0,1)$,包络服从瑞利分布. 若接收端从 M 根天线中选择 L 根天线,即从 S 集合中选择天线子集 s ($s \in S, S$ 为所有可能的接收天线子集的集合)用以接收信号. 则发射天线和接收天线间的信道矩阵定义为 $L \times N$ 矩阵 \mathbf{H}_s ,接收信号为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_s \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{n}.$$

式中: \mathbf{y} 为接收信号向量, \mathbf{x} 为发射信号向量, \mathbf{P} 为功率分配矩阵, \mathbf{n} 为均值为 0、方差为 $2\sigma_n^2$ 的独立同分布加性高斯白噪声向量.

2 基于不同准则的天线选择算法

现有的天线选择算法主要以信道容量最大化或接收端信噪比最大化为准则,下面简要介绍基于这两种准则的天线选择算法.

2.1 信道容量最大化

MIMO 系统容量由文献[1]中给出,即

$$C = \log_2 \det(\mathbf{I}_M + (\mathbf{P}\mathbf{H})^H(\mathbf{P}\mathbf{H})).$$

式中: \mathbf{I}_M 为 M 维单位阵.

不失一般性,当接收端选择最好的 L_r 根天线最大化信道容量时,信道容量上界为^[2]

$$C_{\text{select}} \leq \sum_{i=1}^L \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N} \gamma_i\right).$$

式中: γ_i 表示矩阵 \mathbf{H} 行范数的平方由小到大排列后的第 i 行,为 $2N$ 维 χ^2 分布的随机变量.

天线选择算法的复杂度为 $(\frac{L}{M})^L$,这个计算量很大. 为了减小运算的复杂度,前人提出了一些子最优算法^[2-4],这些子最优算法与最优算法相比,信道容量损失很小.

2.2 接收端信噪比最大化

正交空时块码(orthogonal space-time block coding),由于其设计简单,接收机复杂度低,所以得到了广泛的应用. OSTBC 与天线选择结合可以降低硬件成本,文献[5]给出了 OSTBC 误码率的上边界曲线.

假定 BPSK 调制,最大似然检测,在高信噪比下误码率为^[6]

$$P_b(e) \approx \left(\frac{2MN-1}{MN}\right) (4\gamma)^{-MN}. \quad (1)$$

式中 $\gamma = \frac{E_s}{N_0} E(|\alpha_k|)$.

此式表明分集增益为 MN .

当接收端选择最好的 L_r 根天线时,BER 表达式可近似为

$$P_b(e) = \left(\frac{2MN-1}{MN}\right) \left(\frac{4L_r}{M}\right)^{-MN}. \quad (2)$$

式(2)与式(1)相比,天线选择仍然保持分集增益阶数. 但由于 L_r/M 的影响,在高信噪比条件下,天线选择使信噪比最大有 $10 \lg(\frac{M}{L_r})$ dB 的损失.

3 最优功率分配算法

文献[7]给出了传统的 V-BLAST 检测算法 ZF-OSIC(zero forcing-ordered successive interference cancellation),步骤如下:

选择权重向量 \mathbf{w}_i ($i=1, 2, \dots, N$),使

$$\mathbf{w}_i^T(\mathbf{H})_j = \delta_{ij}^T.$$

式中: $(\mathbf{H})_j$ 是 \mathbf{H} 的第 j 列向量,则第 i 个子数据流的判决统计量为

$$\mathbf{y}_{k_i} = \mathbf{w}_{k_i}^T \mathbf{r}_1.$$

由 \mathbf{y}_{k_i} 可解码得到

$$\hat{\mathbf{x}}_{k_i} = D(\mathbf{y}_{k_i}).$$

从接收向量 \mathbf{r}_1 中抵消掉第 k_i 层可得到

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_1 - \hat{\mathbf{x}}_{k_i}(\mathbf{H})_{k_i}.$$

依此递推,直到检测出最后一层为止.

考虑到功率分配,在 V-BLAST 系统中改进的 ZF-OSIC 算法步骤如下^[8]:

初始化

$$i = 1, y_1 = y,$$

$$\mathbf{G}_1 = (\mathbf{H}\mathbf{P})^+ = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{H}^+,$$

$$k_1 = \operatorname{argmin}_j \|(\mathbf{H}^+)_j\|^2.$$

递推

$$\mathbf{w}_{k_i} = \langle \mathbf{G}_i \rangle_{k_i} = \frac{\langle ([\mathbf{H}]_{\bar{k}_{i-1}})^+ \rangle_{k_i}}{\sqrt{P_{k_i}}}$$

$$\mathbf{z}_{k_i} = \mathbf{w}_{k_i} \mathbf{y}_i, \hat{\mathbf{x}}_{k_i} = D(\mathbf{z}_{k_i}),$$

$$\mathbf{y}_{i+1} = \mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{x}}_{k_i} [\mathbf{H} \mathbf{P}]_{k_i},$$

$$\mathbf{G}_{i+1} = ([\mathbf{H} \mathbf{P}]_{\bar{k}_i})^+,$$

$$k_{i+1} = \operatorname{argmin}_{j \in \{k_1, \dots, k_i\}} \|\langle ([\mathbf{H}]_{\bar{k}_i})^+ \rangle_j\|^2, \\ i \leftarrow i + 1.$$

如果采用 MMSE 检测, 则 \mathbf{G} 变为

$$\mathbf{G}_{i+1} = ([\mathbf{H} \mathbf{P}]_{\bar{k}_i})^H (([\mathbf{H} \mathbf{P}]_{\bar{k}_i}) ([\mathbf{H} \mathbf{P}]_{\bar{k}_i})^H) + \sigma_n^2 [\mathbf{I}_N]_{\bar{k}_i}^{-1}$$

第 k 层检测分量的信噪比为

$$\rho_{k_i} = \frac{1}{\sigma_n^2 \|\mathbf{w}_{k_i}\|^2} = \frac{P_{k_i}}{\sigma_n^2 \|\mathbf{v}_{k_i}\|^2}. \quad (3)$$

式中: $\mathbf{v}_{k_i} = \langle ([\mathbf{H}]_{\bar{k}_{i-1}})^+ \rangle_{k_i}$.

对于发射端有 2 根天线的 V-BLAST 系统, 令 $e_{k_i} = 0$, ($i = 1, 2$) 为第 i 层检测正确. 由式(3)得第 1 层检测错误概率为(BPSK 调制)^[9]

$$P(e_{k_1} \neq 0) = Q\left(\frac{\sqrt{E_{k_1}}}{\sigma_n \|\mathbf{w}_{k_1}\|}\right). \quad (4)$$

在第 1 层检测正确的条件下, 第 2 层检测错误的概率为

$$P(e_{k_2} \neq 0 | e_{k_1} = 0) = Q\left(\frac{\sqrt{E_{k_2}}}{\sigma_n \|\mathbf{w}_{k_2}\|}\right). \quad (5)$$

由式(4)、(5)得到向量错误概率为(2 层中有 1 层发生错误即为向量错误发生)

$$P_e = 1 - (1 - P(e_{k_2} \neq 0 | e_{k_1} = 0))(1 - P(e_{k_1} \neq 0)) = \\ 1 - (1 - Q\left(\frac{\sqrt{E_{k_1}}}{\sigma_n \|\mathbf{w}_{k_1}\|}\right))(1 - Q\left(\frac{\sqrt{E_{k_2}}}{\sigma_n \|\mathbf{w}_{k_2}\|}\right)) = \\ 1 - (1 - Q\left(\frac{\sqrt{\alpha E}}{\sigma_n \|\mathbf{w}_{k_1}\|}\right))(1 - Q\left(\frac{\sqrt{(1-\alpha)E}}{\sigma_n \|\mathbf{w}_{k_2}\|}\right)). \quad (6)$$

式中: E_{k_1} , E_{k_2} 为第 1 层和第 2 层能量, 且 $E_{k_1} + E_{k_2} = 2E$, α 为功率分配系数.

4 基于最优功率分配的发射天线选择算法

由式(6)可以看出, 在功率分配系数 α 和功率 E 固定的前提下, 系统的 BER 性能主要受 $\frac{1}{\|\mathbf{w}_{k_i}\|}$ 的

影响, $\frac{1}{\|\mathbf{w}_{k_i}\|}$ 越小, BER 性能越好.

由 $\mathbf{w}_{k_i}^* \mathbf{h}_{k_i} = 1$, $i = 1, \dots, N$
得

$$\|\mathbf{w}_{k_i}\| \geq \frac{1}{\|\mathbf{h}_{k_i}\|}, i = 1, \dots, N$$

可以看出, 当 $\|\mathbf{h}_{k_i}\|$ 增大, $\frac{1}{\|\mathbf{w}_{k_i}\|}$ 的上边界会扩大. 因此有必要扩展发射天线的数目, 以便能够选择 $\|\mathbf{h}_{k_i}\|$ 较大的天线发射信号. 在接收端进行天线选择和功率分配的计算, 并将结果通过反馈信道传给发射端. 天线选择算法采用基于欧几里得向量范数的 NBS(norm-based selection) 算法, NBS 算法相对于最优天线选择算法(OSA)的优点是计算复杂度很低, 缺点是在性能上较差. 结合 NBS 的最优功率分配算法步骤如下:

$$\{l_1, l_2\} = \operatorname{argmax}_j \|\mathbf{H}_j\|^2,$$

$$\mathbf{H}_s = [\mathbf{H}_{l_1}, \mathbf{H}_{l_2}],$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{H}_s^+,$$

$$k_i = \operatorname{argmin}_i \|\mathbf{G}_i\|^2,$$

$$k_2 = \{1, 2\} - k_1,$$

$$\alpha_{\min} = \operatorname{argmin}_\alpha P_e,$$

$$E_{k_1} = \sqrt{\alpha_{\min} E},$$

$$E_{k_2} = \sqrt{2 - \alpha_{\min} E}.$$

式中: $(\mathbf{H})_j$ 为矩阵 \mathbf{H} 的第 j 列.

5 仿真结果

假定信道为瑞利衰落信道, 接收端准确知道信道状态信息 CSI(channel state information), 且接收端到发射端的反馈信息是准确和无时间延迟的. 仿真采用发射端有 10 根天线, 接收端有 2 根天线的系统, 发射端从 10 根天线中选择 2 根天线进行信息传输. 如果增加发射天线的数目, 天线选择方案的性能会有进一步的提高; 若增加接收天线的数目, 系统的分集增益会增大. 利用 MATLAB 中 FMINCON 函数求得 P_e 最小值以及对应的 α_{\min} . 图 1 为平均信噪比 (E/σ^2) 与功率分配系数 α_{\min} 之间的关系. 从图中可以看出, 为了使向量错误概率最小, 随着平均信噪比的增加, α_{\min} 会逐渐减小, 第 1 层的功率逐渐减小, 第 2 层的功率逐渐增加.

图2为无天线选择方案(发射端有2根天线的V-BLAST系统)和天线选择方案(发射端有10根天线的V-BLAST系统)第1层、第2层检测的误码率曲线。图3模拟了天线选择方案(发射端有10根天线的V-BLAST系统)与无天线选择方案(发射端有2根天线的V-BLAST系统)的向量错误概率曲线。从图2和图3的仿真结果可以看出,在高信噪比环境下,与无天线选择的方案相比,有天线选择的方案能进一步提高BER的性能及降低向量错误概率。在向量错误概率为 10^{-3} 时,系统性能提高约2 dB。随着向量错误概率的降低,有天线选择的方案相对于无天线选择的方案在性能上会有进一步的提高。

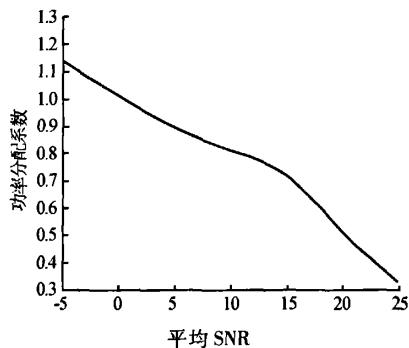


图1 功率分配系数与平均信噪比的关系

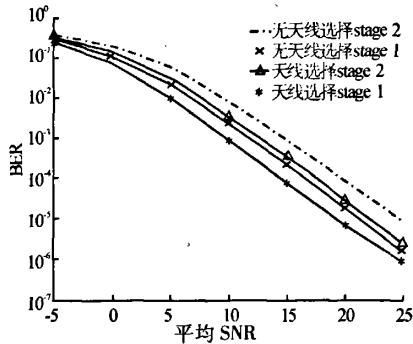


图2 有/无天线选择方案的各层BER性能

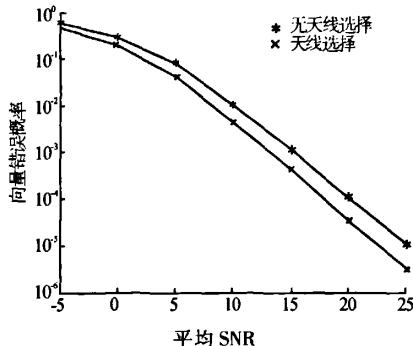


图3 有/无天线选择方案的向量错误概率比较

6 结束语

天线选择技术可以减小系统的复杂性,降低系统成本,功率分配技术可以根据信道状况自适应调整功率的分配,优化系统性能。在V-BLAST系统中,这种天线选择算法和最优功率分配算法的结合可以使误码率进一步降低。由于天线选择算法采用了计算复杂度较低的NBS算法,因此可以在计算复杂度没有明显提高的前提下,降低系统误码率。如果采用复杂的天线选择算法,系统性能会有进一步提高。

参考文献:

- [1] FOSCHINI G, GANS M. On the limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antenna [J]. *Wireless Personal Commun*, 1998, 6(3): 311-335.
- [2] MOLISCH A F, WIN M Z, CHOI Y, et al. Capacity of MIMO systems with antenna selection [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(4): 1759-1772.
- [3] GOROKHOV A, GORE D A, PAULRAJ A J. Receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing: Theory and algorithms [J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2003, 51: 2796-2807.
- [4] GHARAVI-Alkhansari M, GERSHMAN A B. Fast antenna selection subset selection in MIMO systems [J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2004, 52(2): 2796-2807.
- [5] ZENG X, CHRAYEB A. Performance bounds for space-time block codes with receive antenna selection [J]. *IEEE Trans Inform Theory*, 2004, 50(9): 2130-2137.
- [6] PROAKIS J G. *Digital communications*; 4th Ed [M]. New York: McGraw Hill, 2000.
- [7] WOLNIANSKY P W, FOSCHINI G J, GOLDEN G D, et al. An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel [A]. *Proc URSI Int Symp Signals, Systems, Electronics* [C]. Pisa, Italy, 1998.
- [8] NAM S H, SHIN O, LEE K B. Transmit power allocation for a modified V-BLAST system [J]. *IEEE Trans Commun*, 2004, 52: 1074-1079.
- [9] KALBASI R, FALCONER D D, BANIHASHEMI Amir H. optimum power allocation for a V-BLAST system with two antennas at the transmitter [J]. *IEEE communication letters*, 2005, 9(9): 826-828.

[责任编辑:李玲珠]

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>