

基于发射天线优化的 MIMO 空时分组码算法研究^{* **}

Analysis of Space - Time Block Codes Based on Optimizing Transmit Antenna in MIMO System

肖道文^{***} 汪利辉 龚耀寰
(电子科技大学 成都 610054)

摘要: 空时分组码 (STBC) 近来已被人们应用在多径衰落环境中以提高系统性能, 并且已经运用在第三代合作伙伴计划 (3GPP) 标准中。STBC 不需要发射端具有信道信息 (CSI) 即可以实现发射分集, 然而在有信道反馈的 STBC 系统中, 发射端利用 CSI 是否能进一步提高系统性能。经过分析和仿真表明, 发射端利用少量的 CSI, 在保持总发射功率一定的条件下, 采用选择部分发射天线的方案能显著的改善 STBC 系统的性能。

关键词: STBC; 天线选择; 最大比率合并

中图分类号: TN91 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-4550(2005)04-0028-03

1 引言

采用空时联合处理的多输入多输出 (MIMO) 技术使无线通信系统的容量和频谱利用率得到了成倍提高, STBC 作为一种典型的空时编码方案受到了人们的广泛关注。基于 STBC 的等功率发射为出发点, 通过在发射端加权调节发射天线的功率分配以提高系统的接收符号信噪比, 从而降低系统误码率。在两发两收 (2×2) STBC 的基础上提出了一种简单的发射端加权方案 (SW-STBC)。分析表明, 当最优加权时, SW-STBC 的实质就是选择一个发射天线, 接收采用 MRC 最大比率合并 (TASI-MRC)。以选择部分发射天线来实现全部发射天线的分集作用为目的, 从而降低移动台的复杂度和减少发射端的射频链路成本, 本文着重考虑优化发射天线功率的分配问题。在文章的后半部分, 我们把 SW-STBC 的结论推广到 $M_t \times M_r$ 的 STBC 系统中, 得出了最优的 TASI-MRC 方案 (从 M_t 中选择一个发射天线, 接收采用 MRC) 和次优的 TAS2-STBC 方案 (从 M_t 中选择两个发射天线采用 Alamouti 编码, 接收采用空时分组解码)。在 TASI

-MRC 和 TAS2-STBC 方案中, 接收端只需要反馈要选择的一个或两个发射天线的编号给发射端, 这对移动台的反向链路要求很低, 易于系统实现。

我们假设系统为准静态平坦衰落瑞利信道模型, 接收端完全知道并能反馈部分 CSI 到发射端。

2 方案和系统分析

2.1 SW-STBC 方案

传统的 STBC 在发射端无信道信息 CSI 的情况下, 各发射天线以等功率发射, 系统即可以获得发射分集增益。在 SW-STBC 方案中, 我们考虑在 Alamouti 的编码方案基础上, 接收端可以反馈部分 CSI 到发射端, 采用发射端加权的方式, 在保持总发射功率恒定的条件下, 调节发射天线间的功率分配使接收符号信噪比达到最大。系统框图, 如图 1 所示。

加权矩阵 $W = \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{22} \end{bmatrix}$, W 满足功率约

束 $\|W\|_F^2 = 2$ 。

对于不加权的 Alamouti 方案 (图 1 中去掉 W 和信道反馈), 两个发射天线在时刻 1 和时刻 2 分

* [收稿日期] 2005-01-12; [修改日期] 2005-03-03

** [基金项目] 抗干扰通信国防重点实验室。

*** [作者简介] 肖道文 (1978—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

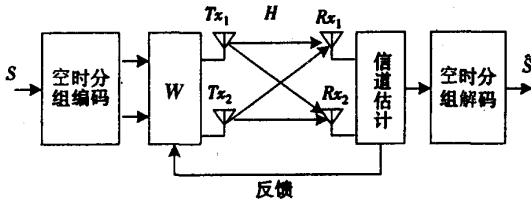


图 1 SW-STBC 框图

别发射符号 s_1 、 $-s_2^*$ 和 s_2 、 s_1^* ，两个接收天线在时刻 1 和时刻 2 分别接收到符号 r_{11} 、 r_{21} 和 r_{12} 、 r_{22} 。系统方程可表示为

$$\begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21}^* & -h_{11}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{21} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} r_{12} \\ r_{22} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \begin{bmatrix} h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{12} \\ n_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中： E_s 是发射天线总功率，

$$E[|s_1|^2] = E[|s_2|^2] = 1;$$

信道矩阵 $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$ ， h_{ji} 是第 i 个发射天线到第 j 个接收天线的信道衰落系数。 n_y 是 t 时刻 j 天线收到的复高斯白噪声随机变量，每维方差为 N_0 。

把式 (1) 表示成矩阵向量形式，有

$$r_1 = \sqrt{\frac{E_s}{2}} H_1 s + n_1, \quad r_2 = \sqrt{\frac{E_s}{2}} H_2 s + n_2 \quad (2)$$

对式 (2) 采用最大似然解

$$\hat{S} = \arg \min \| (H_1^H r_1 + H_2^H r_2) - \sqrt{E_s/2} (\alpha + \beta) \hat{S} \| \quad (3)$$

其中： $\alpha = |h_{11}|^2 + |h_{12}|^2$ ， $\beta = |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2$ ，经过线性合并后的噪声 $\tilde{n} = \| H_1^H n_1 + H_2^H n_2 \|$ ， $E[\tilde{n} \tilde{n}^H] = (\alpha + \beta) N_0$ 。

因此，接收符号的瞬时信噪比

$$\eta = (\alpha + \beta) E_s / 2 N_0 \quad (4)$$

由式 (4) 知，加权 W 后接收符号的瞬时信噪比

$$\eta_w = (|w_{11}|^2 \|h_1\|_F^2 + |w_{22}|^2 \|h_2\|_F^2) E_s / 2 N_0 \quad (5)$$

其中： $h_1 = [h_{11}, h_{21}]^T$ ， $h_2 = [h_{12}, h_{22}]^T$ ， h_i 表示第 i 个发射天线和两个接收天线形成的信道衰落系数向量。

系统的目标方程是

$$\begin{cases} \max \eta_w = (|w_{11}|^2 \|h_1\|_F^2 + |w_{22}|^2 \|h_2\|_F^2) E_s / 2 N_0 \\ \text{s. t. } \|W\|_F^2 = 2 \end{cases} \quad (6)$$

可以很容易得到式 (6) 的最优解

当 $\|h_1\|_F^2 > \|h_2\|_F^2$ 时， $|w_{11}| = \sqrt{2}$ ， $|w_{22}| = 0$ ， $\max \eta_w = \|h_1\|_F^2 E_s / N_0$ 。

当 $\|h_1\|_F^2 < \|h_2\|_F^2$ 时， $|w_{11}| = 0$ ， $|w_{22}| = \sqrt{2}$ ， $\max \eta_w = \|h_2\|_F^2 E_s / N_0$ 。

当 $W = W_{\text{opt}}$ 时， 2×2 的 MIMO 系统转换成了一个 1×2 的 SIMO 系统，具体选择哪个发射天线由 $\|h_1\|_F^2$ 和 $\|h_2\|_F^2$ 的大小决定。因此，接收端根据 $\|h_1\|_F^2$ 和 $\|h_2\|_F^2$ 的大小选择一个发射天线进行不编码发射，接收采用 MRC 的方案能改善接收符号信噪比，降低系统的误码率。

2.2 $M_t \times M_r$ 的 TAS-STBC 方案

我们把 SW-STBC 方案的发射天线的选择技术推广到有 M_t 个发射天线 M_r 个接收天线的 STBC 系统中。 $M_t \times M_r$ 的 STBC 系统接收符号信噪比 $\eta = \|H\|_F^2 E_s / M_t N_0$ ， $H = [h_1, h_2, \dots, h_{M_t}]$ ， h_i 是第 i 个发射天线和 M_r 个接收天线形成的信道衰落系数向量。由 SW-STBC 知道，在总发射功率一定的条件下，要通过选择发射天线使 η 最大，那么应该选择 $\max \|h_i\|^2$ 的那个发射天线。也可以从 M_t 中选择 $\|h_i\|^2$ 较大的 P ($1 \leq P \leq M_t$) 个发射天线，此时 $\eta^P = \|H_P\|_F^2 E_s / P N_0$ ，因为 $\frac{\|H\|_F^2 E_s}{M_t N_0} \leq \frac{\|H_P\|_F^2 E_s}{P N_0} \leq \frac{\|H\|_F^2 E_s}{P N_0}$ ，故 $\eta^{\text{STBC}} \leq \eta^P \leq \frac{M_t}{P} \eta^{\text{STBC}}$ 。当 $P=1$ 时 (TAS1-MRC 方案)，选择一个发射天线能最大的提高接收符号信噪比；当 $M_t > 2$ ， $P=2$ 时 (TAS2-STBC 方案)，选择两个发射天线也能提高接收符号信噪比，但不及 TAS1-MRC 的性能好。

3 仿真结果

我们对 STBC 和 TAS1-MRC、TAS2-STBC 的性能进行了仿真，作为比较，还仿真了 BF 波束形成方案 (信道矩阵主特征值发射方案)。系统类型为 2×2 ， 4×2 ， 4×4 ；信道为理想瑞利衰落模型；调制方式采用 QPSK。

图 2 是 2×2 时 BF、Alamouti、TAS1-MRC 方案的误码率性能曲线。结果表明性能关系 $\text{BF} > \text{TAS1-MRC} > \text{Alamouti}$ 。BF 的性能最好，但 BF 要求接收端完全反馈 CSI (包括信道衰落系数的幅度和相位) 和发射端需要对信道矩阵进行特征分

解, 这对接收端的反向链路和发射端的计算能力都提出了很高的要求, 因此 BF 方案难于实际应用。TASI-MRC 的性能其次, 比 Alamouti 大约提高了 1.5 dB, 这与前面的理论分析是一致的。同时, TASI-MRC 要求接收端反馈的 CSI 少, 系统的复杂度低。

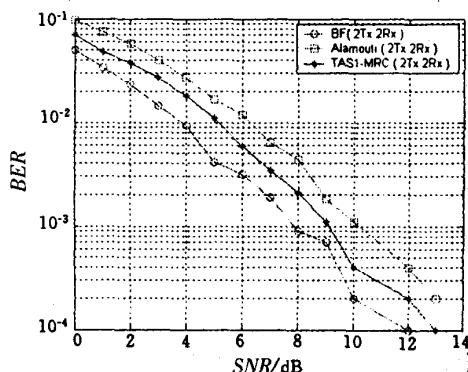


图2 (2×2) STBC, TASI-MRC, BF 方案

图3是4×2时BF、STBC、TASI-MRC、TAS2-STBC方案的误码率性能曲线。结果表明性能关系TASI-MRC > TAS2-STBC > STBC, TASI-MRC比STBC提高了大约2.5 dB, TAS2-STBC比STBC提高了大约1.5 dB。

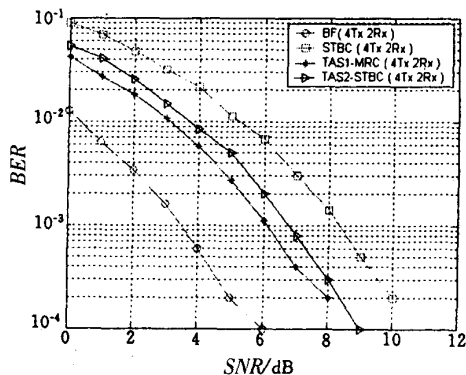


图3 (4×2) STBC, TASI-MRC, TAS2-STBC, BF 方案

图4是4×4时, BF、STBC、TASI-MRC、TAS2-STBC方案的误码率性能曲线。结果表明性能关系TASI-MRC > TAS2-STBC > STBC, TASI-MRC比STBC提高了大约1.5 dB, TAS2-STBC比STBC提高了大约1 dB。

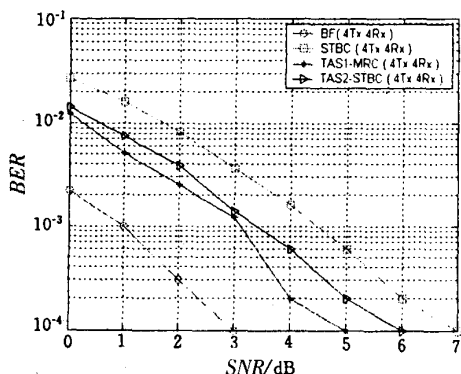


图4 (4×4) STBC, TASI-MRC, TAS2-STBC, BF 方案

分配问题作了研究, 提出了一种发射端的简单加权方案, 得出了利用信道反馈选择发射天线提高 STBC 系统性能的结论, 还给出了 TASI-MRC、TAS2-STBC 两种发射天线选择方案。分析和仿真表明, 这两种方案对接收端的 CSI 反馈要求很低, 与纯空时分组码相比能显著提高系统性能。

参考文献

- [1] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. European Transactions on Telecommunications, 1999, (10): 585~595
- [2] Foschini G, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. Wireless Personal Communications, 1998, (6): 311~355
- [3] Tao Xiaofeng, Harald H, Yu Zhuizhuan, et al. Closed loop space-time block code. Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th, Volume: 2, 7~11 Oct. 2001 (2): 1093~1096
- [4] Chen Zhuo, Vucetic B, Yuan Jinhong, Lo Ka Leong. Analysis of transmit antenna selection/maximal-ratio combining in Rayleigh fading channels Communication Technology Proceedings, 2003. ICCT 2003. International Conference on, Volume: 2, 9~11, April, 2003, 2: 1532~1536
- [5] 黄海洋, 龚耀寰. (6×4) (8×4) STBC 系统新方案.
- [6] Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar, Dhananjay Gore Introduction to Space-Time Wireless Communications.
- [7] 李祥明, 罗涛, 乐光新. 正交空时分组码性能估计的一种方法. 电子学报, 2001, (7):

4 结论

本文对优化纯空时分组码系统发射天线的功率

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，一直致力和专注于微波、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>