



闭环扩展正交空时分组码的设计研究^{*}

丁阿丹^{1,2}, 龙飞^{1,2}, 李卓越³

(1. 贵州大学智能信息处理研究所 贵阳 550025;

2. 贵州大学计算机科学与信息学院 贵阳 550025; 3. 国网技术学院信息中心 济南 250002)

摘要: 基于复正交设计的空时编码在发射天线数大于 2 时不能同时达到满速率全分集, 针对这个问题, 利用正交空时分组码系统的等效信道矩阵的正交性及系统信道信息的反馈, 提出了两种针对闭环扩展正交空时分组码的改进设计方案。系统在接收端以最大等效信道增益为目标进行设计, 分别结合天线选择技术和功率自适应分配技术进行信道信息的反馈, 并对其性能进行理论分析与比较, 仿真结果显示, 两种改进方案均能减小系统的误码率, 提高系统的信噪比增益, 和结合天线选择技术的方案相比, 与功率自适应分配相结合的设计方案性能更为优越。

关键词: 扩展正交空时分组码; 闭环反馈; 信道增益; 天线选择; 功率分配

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.06.016

Research on Design of Extending Orthogonal Space-Time Block Code

Ding Adan^{1,2}, Long Fei^{1,2}, Li Zhuoyue³

(1. Institute of Intelligent Information Processing, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. College of Computer Science and Information, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. Information Centre, State Grid of China Technology College, Jinan 250002, China)

Abstract: For the problem that complex orthogonal design of space-time coding cannot reach full speed and full diversity when the transmitting antenna number is greater than two, two kinds of improved schemes for the closed loop EOSTBC were proposed, which used the orthogonality of the equivalent channel matrix and the feedback of the channel information in the STBC system. The system was designed to maximize the equivalent channel gain. The first scheme was combined with antenna selection techniques and the second was combined with adaptive power allocation. Also, the feedback information was carried respectively. Then its performance was theoretically analyzed and compared. The simulation results show that the bit error rate of the system is reduced and the signal-to-noise ratio gain of the system is improved by the two kinds of improved scheme, and compared with the scheme which is combined with antenna selection technology, the performance of the second scheme combined with adaptive power allocation is superior.

Key words: extending orthogonal space-time block coding (EOSTBC), close-loop feedback, channel gain, antenna selection, power allocation

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.61263005), 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No.20105201120003), 教育部新世纪优秀人才基金资助项目(No.NCET-12-0657), 贵州大学创新基金校级研理工基金资助项目(No.2013045)

1 引言

多输入多输出(MIMO)系统利用多天线的空间自由和空间复用能极大地提高通信系统的可靠性和有效性^[1]。正交空时分组码(orthogonal space-time block code),由于其译码简单而且能够实现全分集,受到了无线通信领域的广泛关注和研究。Alamouti 提出的基于 2 发射天线数的正交空时分组码,虽然能够实现满速率传输和获得满分集增益,但是当发射天线数大于 2 时,基于复正交设计的空时分组码系统则无法实现满速率传输。为此 Jafarkhani 提出了一种准正交空时分组码,虽然可以达到全速率的要求,但却是以牺牲分集增益为代价的,而且也增加了接收端的译码复杂度。

大部分空时分组码都是基于开环系统而设计的,即信道不需要知道任何反馈信息,研究发现,在发送端利用信道反馈的信息对正交空时分组码进行预处理可以有效地提高系统性能。为了降低反馈信道的开销,应尽量减少反馈量,因此基于部分反馈的正交空时分组码的设计研究受到更多的关注^[1]。

参考文献[2]中 Akhtar 对 Alamouti 空时分组码进行扩展,将 2 发射天线的编码结构扩展为 4 发射天线,同时根据接收端反馈的 1 bit 信道信息,实现系统的满分集和满速率传输;参考文献[3]中 Yu 提出了一种基于 2 bit 反馈信息的方案,以最大平均信噪比为目标设计提高系统的性能;参考文献[4]中 Eltayeb 利用最优星座旋转对其进行改进来优化系统性能;参考文献[5]中 Choi 提出了一种利用相位反馈并以最大化信道增益为目标的设计方案。由于以上文献仅是通过 $0, \pi$ 或者部分量化的辅角反馈信息进行设计,因此性能提高不是很明显。本文在参考文献[3]和参考文献[4]的基础上提出了两种改进方案:一种是以最大化信道增益为目标,通过天线的自适应选择来选择发送编码矩阵进行设计;另一种是在系统的发射端利用功率的自适应分配对发送编码矩阵进行预处理来设计。两种设计方案的发射端信号均采用 QPSK 星座映射,接收端采用最大似然译码算法,通过仿真比较可以看出两种方案的误码性能均优于前几种传统的闭环控制方案,而且第二种设计方案在性能上更加出色。

2 传统闭环 EOSTBC 系统模型

扩展正交空时分组码(EOSTBC)是由典型的 Alamouti 空时码编码矩阵根据正交原则扩展而成的,以 4 发射 1 接收天线为例,Alamouti 基本编码结构为:

$$A_0 = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, x_1 和 x_2 为调制后的信息符号, 设 $S_1 = [x_1 \ -x_2^*]^T$, $S_2 = [x_2 \ -x_1]^T$, 则对 A_0 扩展后有两种编码形式:

$$EA_1 = \lambda [S_1 \ S_1 \ S_2 \ S_2] \quad (2)$$

$$EA_2 = \lambda [S_1 \ S_2 \ S_1 \ S_2] \quad (3)$$

由于 EA_1 和 EA_2 这两种扩展码具有相同的性能, λ 是一个常量,不影响系统性能,可以忽略。

传统的闭环 EOSTBC 系统的设计均是以 EA_1 为编码矩阵,本方案的设计基本模型是在发射天线数为 4、接收天线为 1 的情况下,以发送编码矩阵 EA_2 为例,其具体模型如图 1 所示。

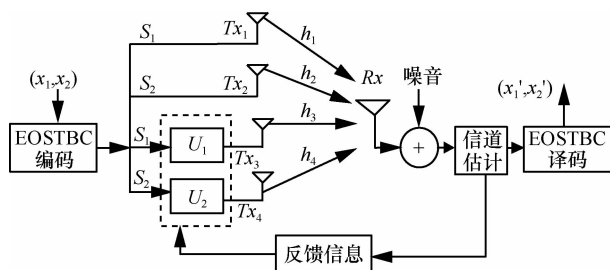


图 1 基于闭环控制 4 发射天线 1 接收天线的 EOSTBC 的系统模型

则该系统经过部分反馈后的发送编码矩阵 EA_b 为:

$$EA_b = [S_1 \ S_2 \ U_1 S_1 \ U_2 S_2] \quad (4)$$

其中, 反馈因子 $U_1 = \sqrt{2}e^{j\theta_1}$, $U_2 = \sqrt{2}e^{j\theta_2}$, 则该系统的等效信道矩阵的特征矩阵为:

$$G_{EA_b} = H_{epb}^H H_{epb} = \begin{bmatrix} \alpha_b + \beta_b & 0 \\ 0 & \alpha_b + \beta_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

由参考文献[6]可知,接收信噪比增益等于等效信道矩阵的特征矩阵对角线上的值,那么闭环 EOSTBC 系统的信噪比增益 γ 可以表示为:

$$\gamma = \alpha_b + \beta_b \quad (6)$$

其中, $\alpha_b = \sum_{i=1}^4 |h_i|^2$ 为常规信道增益; $\beta_b = 2 \text{Re}[U_1 \text{Re}(h_1 h_3^*) + U_2 \text{Re}(h_2 h_4^*)]$ 为反馈信道增益。

通过最大化信道增益可得最优反馈角为:

$$\theta_1 = -\text{angle}(h_1 h_3^*) \quad (7)$$

$$\theta_2 = -\text{angle}(h_2 h_4^*) \quad (8)$$

3 新型闭环 EOSTBC 编码方案

3.1 基于天线自适应选择的闭环 EOSTBC 的设计

参考文献[3]和参考文献[4]提出的闭环设计方法仅



是通过系统接收端提供的相位角的反馈信息提高系统的性能。方案 1 提出的基于天线选择的闭环 EOSTBC 的设计所依据的基本模型如图 1 所示,信息的编码结构采用 EA_2 形式,在传统的接收端提供的相位角的反馈信息的基础上,通过对信道增益系数的计算,判断发送端是选择发送第三根或是第四根天线,即如果信道增益系数 $|h_3|^2 \geq |h_4|^2$,系统选择天线 3 发送信息;否则的话,选择天线 4 发送信息。则相应的发送编码矩阵 E_{p1} 为:

$$E_{p1} = [S_1 \ S_2 \ U_1 S_1 \ 0], |h_3|^2 \geq |h_4|^2 \quad (9)$$

$$E_{p1} = [S_1 \ S_2 \ 0 \ U_2 S_2], |h_3|^2 < |h_4|^2 \quad (10)$$

其中,反馈因子 $U_1 = \sqrt{2}e^{j\theta_1}$, $U_2 = \sqrt{2}e^{j\theta_2}$,则该方案 E_{p1} 的等效信道矩阵的特征矩阵为:

$$G_{ep1} = H_{ep1}^H H_{ep1} = \begin{bmatrix} \alpha_{p1} + \beta_{p1} & 0 \\ 0 & \alpha_{p1} + \beta_{p1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中,信道增益因子 α_{p1} 和 β_{p1} 分别为:

$$\alpha_{p1} = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_3|^2, \quad \beta_{p1} = 2\text{Re}(U_1 h_1 h_3^*), |h_3|^2 \geq |h_4|^2 \quad (12)$$

$$\alpha_{p1} = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_4|^2, \quad \beta_{p1} = 2\text{Re}(U_2 h_2 h_4^*), |h_3|^2 < |h_4|^2 \quad (13)$$

通过最大化信道增益可得最优反馈角为:

$$\theta_1 = -\angle(h_1 h_3^*) \quad (14)$$

$$\theta_2 = -\angle(h_2 h_4^*) \quad (15)$$

3.2 基于功率自适应分配的闭环 EOSTBC 的设计

当总发射功率一定时,通过信道信息的反馈对各个发射天线进行合理的功率自适应分配,可以优化发送端各个天线之间的抗噪性能与克服多径衰落性能,并且可以降低符号间的干扰。下面仍以图 1 所示的四发射天线闭环 EOSTBC 的系统为基本模型,信息源的编码结构依然采用 EA_2 形式,但在发射端发送信息时需要先对编码矩阵进行预处理,即对各个发射天线分别乘以一个自适应反馈系数,则该设计方案的发送编码矩阵 E_{p2} 可以表示为:

$$E_{p2} = \sqrt{2}[\cos \varphi_1 S_1 \ \cos \varphi_2 S_2 \ \sin \varphi_1 S_1 e^{j\theta_1} \ \sin \varphi_2 S_2 e^{j\theta_2}] \quad (16)$$

则其对应的等效信道矩阵的特征矩阵为:

$$G_{ep2} = H_{ep2}^H H_{ep2} = \begin{bmatrix} \alpha_{p2} + \beta_{p2} & 0 \\ 0 & \alpha_{p2} + \beta_{p2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中信道增益 α_{p2} 和 β_{p2} 分别为:

$$\alpha_{p2} = 2(\cos^2 \varphi_1 |h_1|^2 + \sin^2 \varphi_1 |h_3|^2 + \cos^2 \varphi_2 |h_2|^2 + \sin^2 \varphi_2 |h_4|^2) \quad (18)$$

$$\beta_{p2} = 2\sin 2\varphi_1 \text{Re}(h_1 h_3^* e^{j\theta_1}) + 2\sin 2\varphi_2 \text{Re}(h_2 h_4^* e^{j\theta_2}) \quad (19)$$

通过最大化信道增益可得最优反馈信息为:

$$\theta_1 = -\angle(h_1 h_3^*) \quad (20)$$

$$\theta_2 = -\angle(h_2 h_4^*) \quad (21)$$

$$\varphi_1 = \arctan \frac{|h_3|}{|h_1|} \quad (22)$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{|h_4|}{|h_2|} \quad (23)$$

4 仿真结果与分析

本文在 Windows XP 环境下使用 MATLAB 仿真软件进行系统的仿真,给出系统在准静态平坦瑞利衰落环境下的性能和误差比较,并对结果进行了分析。

总发射功率一定的条件下两种方案与传统闭环 EOSTBC 系统接收端平均信噪比增益比较见表 1。在理想状态下,即发送端接收到的反馈信息不存在量化误差的条件下,信道矩阵衰落系数 h_i 为零均值、每维方差为 1/2 的复高斯随机变量,所提设计方案 1 的平均信噪比增益比传统的 EOSTBC 系统有了 10.22%~43.09% 的提高;而方案 2 的设计虽然是以增加反馈量为代价的,但其平均信噪比增益比传统的 EOSTBC 系统有了 25.21%~62.55% 的提高,同时比方案 1 增加了 13.60%,明显提高了系统的可靠性。

表 1 各种闭环 EOSTBC 系统接收端平均信噪比增益比较

方案	反馈信息	$E[\alpha]$	$E[\beta]$	$E[\alpha+\beta]$
参考文献[2]	1 bit	4	1.5	5.5
参考文献[3]	2 bit	4	2	6
参考文献[4]	∞	4	3.14	7.14
所提方案 1	∞	5	2.87	7.87
所提方案 2	∞	4	4.94	8.94

所提的两种设计方案与各种传统的 EOSTBC 编码系统的误码率与信噪比关系曲线如图 2 所示。具体的仿真条件为:发射端为 4 天线、接收端为 1 天线,采用最大似然译码算法,采用 QPSK 调制和相同的传输速率。由图 2 可以看出,第二种设计方案也就是结合功率自适应分配的

EOSTBC 编码性能最好, 误码率最低, 与传统的几种 EOSTBC 编码系统相比, 信噪比降低了 0.8~1.7 dB; 其次是利用天线自适应选择技术的编码方案, 虽然比第二种方案较差, 但是与传统的编码形式相比, 在误码率为 10^{-3} 时, 信噪比依然降低了 0.3~1.2 dB。图 2 在误码率为 10^{-3} 左右的情况下系统仿真的放大如图 3 所示。

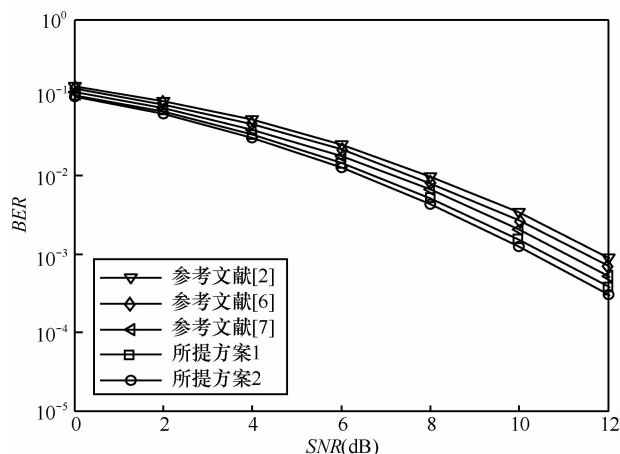


图 2 四发射天线下所提方案与传统的 EOSTBC 系统的误码率性能比较

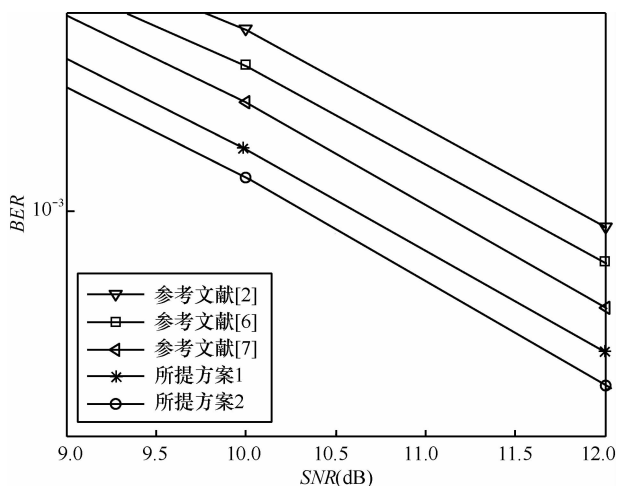


图 3 图 2 在误码率为 10^{-3} 左右的情况下系统仿真的放大

所提的两种设计方案与参考文献[4]方案在接收天线数为 1、发射天线数分别为 4 和 8 时的误码率性能的比较如图 4 所示。可以看出, 相对于 4 发射天线, 当发射天线数为 8 时, 所提方案 1 的误码率性能与参考文献[4]方案差别不大, 二者曲线几乎达到重合, 这是由于天线数增多时, 做天线选择时所提方案 1 受到分集性能的影响; 而所提方案 2 即是与功率自适应分配相结合的设计方案的误码率性能得到较大幅度的提升, 在误码率为 10^{-3}

时, 比与天线选择技术相结合的编码方案在信噪比上约有 0.9 dB 的性能优势。而且随着信噪比的增大, 8 发射天线的第二种设计方案的曲线下降速度更快, 说明分集性能更好。总体上说, 与功率自适应分配相结合的设计方案在误码率性能上更加优越, 而与天线选择技术相结合的编码方案也是一种次优的设计方案。图 4 在误码率为 10^{-3} 左右的情况下系统仿真的放大如图 5 所示。

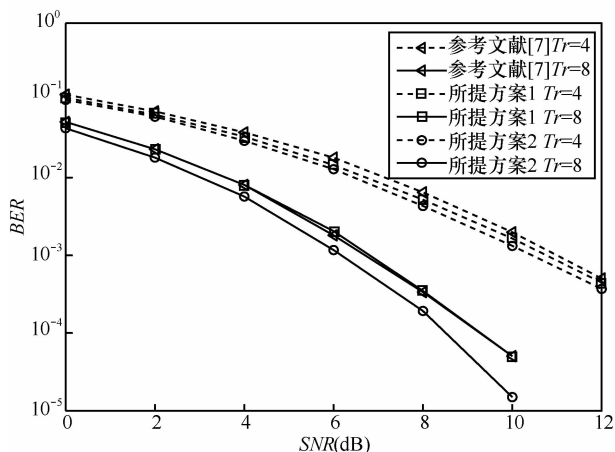


图 4 在 QPSK 调制下所提方案与参考文献[4]方案在发射天线为 4 和 8 时的误码率性能比较

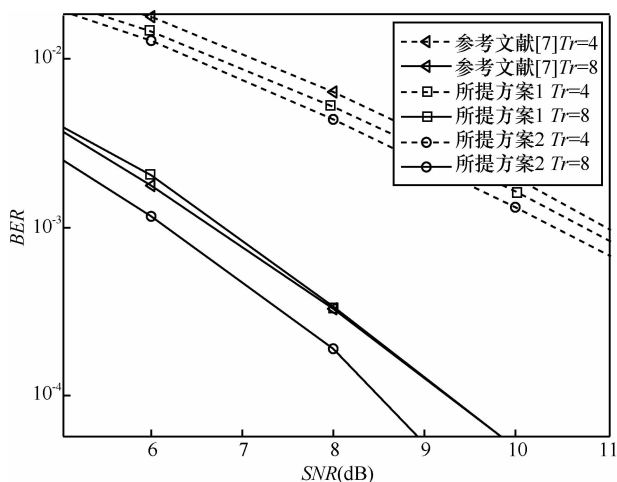


图 5 图 4 在误码率为 10^{-3} 左右的情况下系统仿真的放大

5 结束语

本文在传统的、闭环控制的扩展正交空时分组码系统基础上, 提出了两种新型的闭环 EOSTBC 的设计方案, 一种设计方案是结合天线选择技术对编码矩阵进行选择性地发送; 另一种是与功率的自适应分配相结合的设计方案。



两种设计方案均是以最大化等效信道增益为目标进行设计改进的,通过改变发送端的编码矩阵来提高系统的性能,同时又保证了满分集和全速率的传输。通过仿真分析可以看出,当发射天线数为4时,两种设计方案的性能均比传统的EOSTBC系统有所提升,但是8发射天线时,与功率的自适应分配相结合的设计方案能够更大提高系统的信噪比增益,虽然增加了信息的反馈量,但是比与天线选择技术相结合的方案在降低系统的误码率方面性能上更有优势。

此外,本方案的研究不仅局限于4发射天线1接收天线的系统,可以推广到多发射多接收天线系统,但是随着收发天线数的增加,系统计算反馈信息的复杂度也会相应地增加,对于如何在提高系统的性能与减小系统计算反馈信息的复杂度方面做一个较好的折中平衡,有待进一步研究。

参考文献

- 1 田心记,倪水平,宋成等.一种改进的广义正交空时分组码.西安电子科技大学学报,2012,39(4):161~165
- 2 Akhtar J and Gesbert D. Extending orthogonal block codes with partial feedback. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004,3(6):1959~1962
- 3 Yu Y, Keroueden S, Yuan J. Closed-loop extended orthogonal space-time block codes for three and four transmit antennas. IEEE Signal Processing Letters, 2006,13(5):273~276
- 4 Eltayeb N M, Lambbotharan S, Chambers J A. A phase feedback based extended space-time block code for enhancement of diversity. IEEE VTC2007-Spring, 2007,4(7): 2296~2299
- 5 Choi I, Kim J K, Lee H, et al. Alamouti-codes based four-antenna transmissoon schemes with phase feedback. IEEE Communications Letters, 2009,10(13): 749~751
- 6 倪英俊,李明奇,郭文强.全速率准正交空时分组码设计研究.计算机工程与应用,2012,48(12):120~124
- 7 Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. IEEE Journals on Selected Areas Communications, 1998,16(8):1451~1458
- 8 Xian L, Liu H. Simplified receiver design for STBC binary continuous phase modulation. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008,2(7): 452~457
- 9 Zhang W, Letaief K B. Cooperative spectrum sensing with transmit and relay diversity in cognitive radio networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 12(7): 4761~4766
- 10 Ozgul B, Delic H. Orthogonal space-time block coding for continuous phase modulation with frequency-domain equalization. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009,10(57): 3579~3584
- 11 Guo X, Xia X G. On full diversity space-time block codes with partial interference cancellation group coding. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(10): 4366~4385
- 12 Lee I, Kim D. Achieving maximum spatial diversity with decouple-and-forward relaying in dual-hop OSTBC transmissions. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010,9(3):921~925
- 13 李卓越,龙飞,李鑫超.准正交空时分组码自适应设计方案与性能分析.济南大学学报(自然科学版),2011, 10(25):915~918
- 14 叶卓映,顾跃宗,吴江等.多发射天线 STBC-SCFDE 系统的性能研究.电信科学,2012,28(12):59~64
- 15 Huang H, Li S. Optimized non-unitary linear precoding for orthogonal space-time block codes. IEEE Communications Letters, 2009,13(6):414~416
- 16 Punchihewa A, Bharqava V, Despains C. Linear precoding for orthogonal space-time block coded MIMI-OFDM cognitive radio. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011,59(3): 767~779

[作者简介]



丁阿丹,女,贵州大学硕士研究生,主要研究方向为无线通信、空时编码与智能信息处理。



龙飞,男,贵州大学教授,博士生导师,主要研究方向为复杂系统神经网络控制与智能信息处理。



李卓越,男,硕士,国网技术学院信息中心信息运行管理工程师,主要研究方向为空时编码与智能天线。

(收稿日期:2013-04-01)