

基于随机旋转的准正交空时分组码研究

邓 单 朱近康

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

摘 要 为了提高准正交空时分组码的性能,该文提出基于随机旋转的准正交空时分组码(Random-rotation QO-STBC)的发射分集方法。这种方法对每个输入信息符号序列进行随机旋转,使准正交空时分组码的符号间干扰(ISI)随机化。仿真结果表明,在 4×1 MIMO QPSK调制系统中,采用最大似然检测方法,当误码率为 10^{-5} 时,新的发射方案比传统的两种准正交空时分组码误码性能有约4dB的增益;当误码率低于 10^{-4} 时,RR-J码相比于ST-LCP码,仍表现出0.5-1dB增益;当SNR高于16dB时,RR-J与CFR具有几乎相同的误码性能。文章讨论了实际系统中随机旋转矩阵数受限情况下性能的损失,仿真结果显示当可用随机旋转矩阵数大于16时,对系统性能的影响可以忽略。

关键词 空时分组码, 准正交, 随机旋转, 发射分集

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1626-04

Study on Random-Rotation Quasi-orthogonal Space-Time Block Code

Deng Dan Zhu Jin-kang

(PCN&SS Lab, EEIS, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract In order to improve the performance of Quasi-Orthogonal Space-Time Block Code(QO-STBC), a Random-Rotation QO-STBC(RR-QO-STBC) is proposed. This transmission diversity scheme randomly rotates every information symbol vector, thus the inter-symbol interference between multi-antennas of QO-STBC is randomized and alleviated. Simulation results suggest, in 4×1 MIMO QPSK modulation system, under the ML detection rule, the proposed scheme outperforms the conventional QO-STBC about 4dB when the BER is 10^{-5} , and also better than ST-LCP 0.5-1dB when the BER is below 10^{-4} ; The new scheme owns similar performance with the CFR scheme when SNR is above 16dB. The performance loss due to the limitation of number of random-rotation matrixes in the practical scenario is investigated. When the number of matrixes is greater than 16, the performance loss is negligible.

Key words Space-Time Block Code (STBC), Quasi-orthogonal, Random-rotation, Transmission diversity

1 引言

随着移动通信技术的不断发展,人们对传输速率和稳定性提出了越来越高的要求。近年来,作为一种简单有效的传输分集方式,空时编码技术得到了广泛的关注^[1-3]。正交空时分组码(O-STBC)可以在接收端进行简单的最大比合并解码,并实现全分集增益。但复数域正交空时分组码在发射天线数较大($N > 2$)时,不可能达到全速率传输。为获得更高的传输速率,文献[4]提出准正交空时分组码(QO-STBC),牺牲一定的分集增益以获得全速率容量。准正交空时分组码仍然有分群的快速最大似然解码算法,但达不到全分集增益。在低信噪比环境下准正交空时分组码误码性能优于正交空时分组码,但在高信噪比环境下,由于丢失了部分分集增益,误码性能劣于正交空时分组码。

为了提高准正交空时分组码的误码性能,文献[5]提出Random-ABBA的方法。在每个分集块的至少一个天线上,进行随机的相位旋转,以使得块间干扰(block-interference)随

机化,从而在有信道编码的条件下获得系统性能改善;然而该方案在块衰落(block fading)环境下,不会体现出性能增益。文献[6]提出多维调制(multi-modulation codes)的方法,在不同天线采用不同调制模式的方法来提高系统速率,但这种策略在相同传输速率下比准正交空时分组码性能差。文献[7]通过Hadamard变换将单符号扩展到多天线同时发送。文献[8-11]研究通过星座图固定旋转(Constellation Fixed Rotation, CFR)的方法来提高系统性能。文献[8-10]提出半数符号星座图旋转的方法,并给出了常用星座图的最佳旋转值。文献[11]则基于BLAST,提出通过星座图随机旋转的方法,降低系统误帧率。文献[12]提出了空时线性星座图预编码(ST-LCP)的方案,来获得全分集增益。

本文提出基于随机旋转(Random-Rotation)准正交空时分组码(QO-STBC)的发射分集方法。这种方法对每个输入信息符号序列进行随机旋转,使准正交空时分组码的符号间干扰(ISI)随机化。仿真结果表明,在 4×1 MIMO QPSK调制系统中,采用最大似然检测方法,当误码率为 10^{-5} 时,新的发射方案比传统的两种准正交空时分组码误码性能有约4dB的增

益; 当误码率低于 10^{-4} 时, RR-J码与 ST-LCP 码^[12] 相比, 仍表现出 0.5-1dB增益; 当SNR高于 16dB时, RR-J与CFR^[9]具有几乎相同的误码性能。最后文章讨论了实际系统中随机旋转矩阵数受限情况下性能的损失。仿真结果显示: 当可用随机旋转矩阵数大于 16 时, 对系统性能的影响可以忽略。

2 系统模型

本文中假设信道为准静态瑞利衰落信道, 信道在若干个符号周期内保持恒定, 而在不同的信道周期之间完全独立。考虑 N 发射天线 M 接收天线 L 个符号周期的 MIMO 系统, 接收天线信号矩阵为

$$r = BH + N \quad (1)$$

式中 N 为统计独立零均值复高斯噪声矩阵 $N \in C^{L \times M}$, 各元素的方差为 N_0 。 H 为 $N \times M$ 的瑞利衰落信道矩阵 $H = \{h_{i,j}(t)\}_{N \times M}$, $h_{i,j}(t)$ 为从第 i 个发射天线到第 j 个接收天线的信道衰落系数。信道矩阵中各元素均为统计独立零均值单位方差复高斯随机变量, 其幅值服从瑞利分布。 B 为 N 个天线的发射符号块 $B = \{b_{t,i}\}_{L \times N}$, $b_{t,i}$ 为 t 时刻第 i 个发射天线发射的符号。发射端满足功率归一化限制 $E\{\text{tr}(BB^H)\} = L$, 使得发射的总功率一定, 与发射天线数无关。空时编码将信息符号在 N 个天线和 L 个符号周期上进行编码来获得分集增益。

在 2×1 两天线发射分集中, 文献[1]提出了著名的 Alamouti 码:

$$C(s_1, s_2) = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

$C(s_1, s_2)$ 的两个列矢量分别表示两个发射天线的发射符号矢量, 则接收端的接收矢量为

$$r = C(s_1, s_2)H + N \quad (3)$$

Alamouti码具有全速率全分集的优秀特性, 但当发射天线数大于 2 时, 只可能存在非全速率复正交空时矩阵^[2]。为了获得更高的发射速率, 文献[4,13]提出了准正交空时分组码。文献[14]提出一种最简单的 4 天线ABBA型准正交空时分组码矩阵(TBH码):

$$S_{\text{TBH}}(s_1, s_2, s_3, s_4) = \begin{bmatrix} A & B \\ B & A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ s_3 & s_4 & s_1 & s_2 \\ -s_4^* & s_3^* & -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

文献[4]提出另一种准正交空时分组码矩阵(Jafarkhani码):

$$S_J(s_1, s_2, s_3, s_4) = \begin{bmatrix} A & B \\ -B^* & A^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ -s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \\ s_4 & -s_3 & -s_2 & s_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ABBA 型 TBH 码虽然达到了全速率但却牺牲了正交性, 从而引入了码间干扰。考虑 TBH 准正交空时分组码的相关矩

阵:

$$R_{\text{TBH}} = S_{\text{TBH}}^H S_{\text{TBH}} = \begin{bmatrix} a & 0 & b & 0 \\ 0 & a & 0 & b \\ b & 0 & a & 0 \\ 0 & b & 0 & a \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$a = \sum_{i=1}^4 |s_i|^2 \quad (7)$$

$$b = 2\text{Re}[s_1 s_3^* + s_2 s_4^*] \quad (8)$$

由于发射端满足功率归一化限制, 所以 $a \equiv 1$ 。由于干扰分量 b 的影响, 使得准正交空时分组码在高信噪比环境下性能劣于正交空时分组码。

3 随机旋转准正交空时分组码

本文提出基于随机旋转准正交空时分组码(RR- QO-STBC)的发射分集方法。这种方法对每个输入信息符号序列进行随机旋转, 使准正交空时分组码的符号间干扰(ISI)随机化。新方法的发射端基带信号处理框图如图 1 所示。

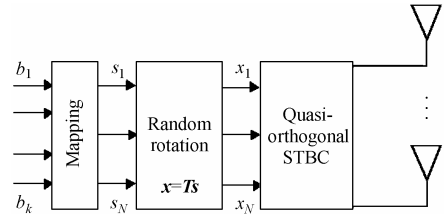


图 1 随机旋转准正交空时分组码发射框图

二进制信息序列 $\{b_1, \dots, b_k\}$, 经过串并转换和星座图映射为复数域符号序列 $s = [s_1, \dots, s_N]^T$, 然后对符号序列 s 做随机旋转变换^[11], 获得新的符号序列 x :

$$x = T_l s \quad (9)$$

式中 T_l 为第 l 个空时分组块的随机旋转酉矩阵, 即 $T_l^H T_l = I_N$ 。并且在不同时刻的空时发射块, 其对应的随机旋转变换矩阵都是不相同的。 T_l 可以通过对 $N \times N$ 的随机矩阵 Y 的 QR 分解来获得。设方阵 $Y \in C^{N \times N}$, 方阵各元素为独立的零均值单位方差复高斯随机变量, 对 Y 进行 QR 分解:

$$Y = \Phi U \quad (10)$$

U 为上三角矩阵, Φ 为酉矩阵。则可令 $T_l = \Phi$, 获得一个随机旋转变换矩阵。随机旋转变换矩阵具有各向同性分布(Isotropically distributed)的特性。与单位矢量相乘后得到的新的向量 x 仍为各向同性单位向量^[15]。新的符号序列 x 的各元素为 s_1, s_2, s_3, s_4 的随机线性叠加。随机旋转后的星座图会在单位圆附近相对均匀地分布, 旋转前后的星座图比较如图2所示。旋转后的星座图分布与旋转前固定的QPSK星座图分布相比, 呈现出近似高斯的随机分布特性, 星座图分布自由度有了明显的提高, 可以提供一定的星座图分集增益。从容量角度看, 旋转后得到的随机分布星座图信源能为系统提供一定的容量增益。

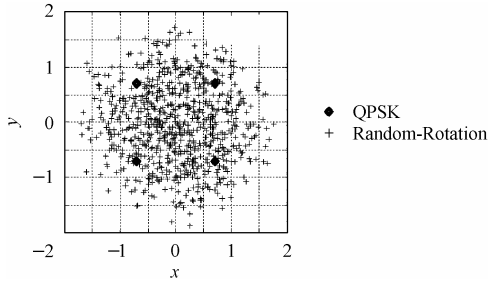


图2 随机旋转前后星座图分布比较图

与文献[5]提出的先编码后旋转的方法(Random-ABBA)不同, 本文提出的RR-QO-STBC方法先对编码前的符号矢量 \mathbf{s} 进行随机旋转, 得到新的符号矢量 \mathbf{x} 后, 再进行准正交空时分组编码。对于Random-ABBA, 信道保持周期必须大于一个编码块才能体现出增益, 这一假设条件在实际系统中很难满足; RR-QO-STBC克服了这一缺点, 在快衰落环境下, 相比传统空时分组编码方案, 仍有一定的性能增益。

实际系统中, 收发两端可以事先计算并存储一定数量的随机旋转变换矩阵, 在发射时按照约定的规则伪随机地提取出一个当前使用矩阵。

将得到的新符号序列 \mathbf{x} , 进行准正交空时分组编码 $\mathbf{S}_{QO}(\mathbf{x}^T)$, 在 N 个发射天线上同时发射。信号经过无线信道后, 在接收端进行最大似然解调。接收信号矢量为

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}_{QO}(\mathbf{x}^T)\mathbf{H} + \mathbf{N} \quad (11)$$

根据最大似然准则解调出原始符号序列:

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\mathbf{s}} \|\mathbf{r} - \mathbf{S}_{QO}[(T_1\mathbf{s})^T]\mathbf{H}\| \quad (12)$$

考查随机旋转准正交空时分组码(RR-QO-STBC)与传统的准正交空时分组码(QO-STBC)在码间干扰的差异(式(8))。以QPSK调制方式为例, QO-STBC采用TBH编码方式, 遍历所有可能的信息符号序列 \mathbf{s} , QO-STBC的干扰功率 b 集中在 $\{0,0.5,1\}$ 这 3 个点值上, 而RR-QO-STBC将所有的干扰功率随机地分布在 $(0,1)$ 整个数域上。两者干扰值的概率密度分布函数(PDF)和概率累积分布函数(CDF)的比较分别如图 3, 图 4 所示。QO-STBC在强干扰功率 $b=1$ 处, 仍有较大的概率密度分布 $p(b=1)=0.125$, 而强干扰会极大地降低系统性能; RR-QO-STBC将所有的干扰功率白化, 相对均匀地分散在全部功率段上, 并且在大功率干扰段的概率密度相对较小, 从而可以提高系统性能。

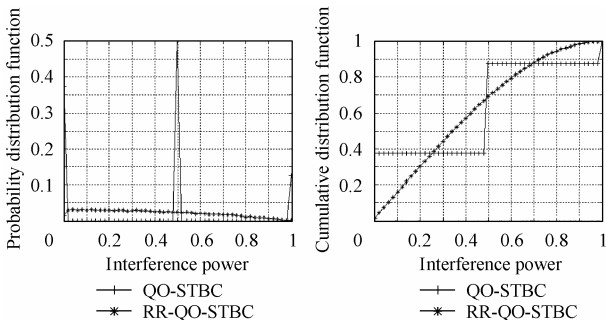


图3 干扰功率 b 的概率密度分布 图4 干扰功率 b 的概率累积分布

4 仿真与分析

为了更好地比较RR-QO-STBC与QO-STBC及其他改进方法的误码性能, 我们进行计算机仿真实验。仿真中假定无线信道为准静态瑞利块衰落(block-fading)信道, 信道矩阵中各元素均为统计独立零均值单位方差复高斯随机变量。并且接收端已知准确的信道衰落信息。信道保持周期为一个编码块(4个符号间隔周期), 且不同的信道实现之间完全独立。信噪比(SNR)定义为接收天线端有用信号总平均功率与噪声平均功率之比。仿真系统采用 4×1 发射分集QPSK调制, QO-STBC分别采用式(4), 式(5)中的TBH码和Jafarkhani码。对应的随机旋转准正交空时分组码分别为RR-TBH码和RR-J码。

系统在不同的信噪比环境下的误比特率(BER)曲线如图 5, 图 6 所示。图 5 为TBH码与随机旋转TBH码(RR-TBH)的性能比较; 图 6 为Jafarkhani码与随机旋转Jafarkhani码(RR-J code)以及文献[12]中ST-LCP码和文献[9]中的星座图固定旋转(CFR)方法的性能比较。仿真结果表明, 在低信噪比环境下, RR-QO-STBC比QO-STBC性能相当; 但在较高信噪比环境下, 对两种准正交码字, RR-QO-STBC都有明显的性能改善。根据图 5 仿真数据容易看出, 当系统误码率在 10^{-4} 时, RR-QO-STBC比QO-STBC约有 2dB 的增益; 当系统误码率在 10^{-5} 时, RR-QO-STBC比QO-STBC约有 4dB 的增益。根据图 6 性能曲线比较, 当误码率低于 10^{-4} 时, RR-J码相比于ST-LCP码^[12], 仍表现出 0.5-1dB 增益; 当SNR高于 16dB 时, RR-J与CFR^[9]具有几乎相同的误码性能。

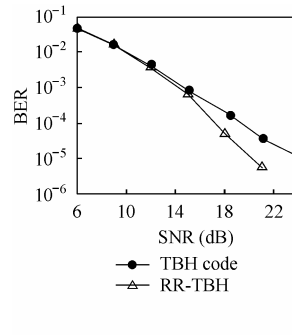


图5 TBH 码与随机旋转 TBH 码的性能比较

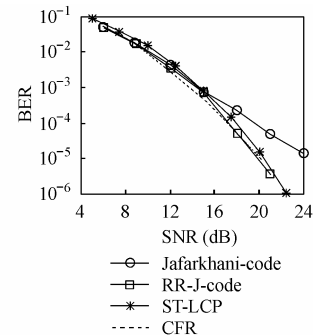
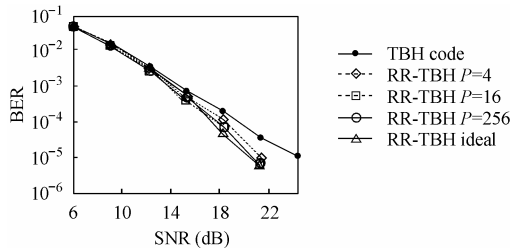


图6 随机旋转 Jafarkhani 码的 BER 性能比较

考虑到系统实现, 在收发两端只能存储有限数量的随机旋转矩阵。假定所有使用的随机旋转矩阵数为 P , 我们考查了当 P 取值不同时, 对系统性能的影响。仿真中取 $P = \infty$, 256, 16, 4。QO-STBC 采用 TBH 码。发射端循环使用 P 个矩阵; 当 $P = \infty$ 时, 发射端实时生成随机旋转矩阵, 并传送给接收端, 以此来模拟矩阵集合无穷大的情况。在 P 取值受限情况下系统的 BER 性能曲线比较如图 7 所示。数据比较表明, 当 $P=256, 16$ 时, 相对于理想随机情况($P=\infty$)下的系统性能影响完全可以忽略。当 $P=4$ 时, 在高信噪比下, 系统约有 1dB 的性能损失。

图7 随机旋转矩阵数 P 受限时的 BER 性能曲线

5 结束语

本文提出基于随机旋转的准正交空时分组码(Random-Rotation QO-STBC)的发射分集方法。这种方法对每个输入信息符号序列进行随机旋转,使准正交空时分组码的符号间干扰(ISI)随机化。仿真结果表明,在 4×1 MIMO QPSK调制系统中,采用最大似然检测方法,当误码率为 10^{-5} 时,新的发射方案比传统的两种准正交空时分组码误码性能有约4dB的增益;当误码率低于 10^{-4} 时,RR-J码相比于ST-LCP码,仍表现出0.5–1dB增益;当SNR高于16dB时,RR-J与CFR具有几乎相同的误码性能。最后文章讨论了实际系统中随机旋转矩阵数受限情况下性能的损失。仿真结果显示当可用随机旋转矩阵数大于16时,系统性能的损失可以忽略。

参考文献

- [1] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(8): 1451–1458.
- [2] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1999, 45(5): 1456–1467.
- [3] Vielmon Antony, Li Ye, Barry J R. Performance of Alamouti transmit diversity over time-varying Rayleigh-fading channels. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004, 3(5): 1369–1373.
- [4] Jafarkhani Hamid. A quasi-orthogonal space-time block code. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49(1): 1–4.
- [5] Hottinen Ari, Tirkkonen Olav. A Randomization Technique for Non-Orthogonal Space-Time Block Codes. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2001 Spring. Greece, 6–9 May, 2001, 2: 1479–1482.
- [6] Tirkkonen Olav, Hottinen Ari. Tradeoffs between rate, puncturing and orthogonality in space-time block codes. *IEEE International Conference on Communications*, 2001, the Netherlands, 30 June –3 July, 2001, 4: 1117–1121.
- [7] Damen M O, Abed-Meraim K, Belfiore J C. Transmit diversity using rotated constellations with hadamard transform. *IEEE Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000*, Canada, 1–4 Oct., 2000: 396–401.
- [8] Sharma Naresh, Papadias Constantinos B. Improved quasi-orthogonal codes through constellation rotation. *IEEE Trans. on Communications*, 2003, 51(3): 332–335.
- [9] Su Weifeng, Xia Xiang-Gen. Signal constellations for quasi-orthogonal space-time block codes with full diversity. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004, 50(10): 2331–2347.
- [10] Sezgin A, Jorswieck E A. On optimal constellations for quasi-orthogonal space-time codes. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP2003*, Hong Kong, April 6–10, 2003, 4: 345–348.
- [11] Larsson Erik G. Improving the frame-error-rate of spatial multiplexing in block fading by randomly rotating the signal constellation. *IEEE Communications Letters*, 2004, 8(8): 514–516.
- [12] Xin Yan, Wang Zhengdao, Giannakis, G B. Space-time diversity systems based on linear constellation precoding. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2003, 2(2): 294–309.
- [13] Jia Hou, Moon Ho Lee, Ju Yong Park. Matrices analysis of quasi-orthogonal space-time block codes. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(8): 385–387.
- [14] Tirkkonen O, Boariu A, Hottinen A. Minimal nonorthogonality rate one space time block codes for 3+ Tx antennas. *Spread Spectrum Techniques and Applications*, 2000 IEEE Sixth International Symposium on, USA, 6–8 Sept., 2000, 2: 429–432.
- [15] Marzetta Thomas L, Hochwald Bertrand M. Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1999, 45(1): 139–157.

邓 单: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为MIMO, 空时编码。
朱近康: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信与个人通信、通信信号处理。