

基于迹正交的多用户满分集空时编码方案

邓冬虎,李宏伟,朱仁飞,于 涛
(空军工程大学 电讯工程学院,陕西 西安 710077)

摘 要:提出了一种基于迹正交(Trace-Orthogonal)的适合于多用户 MIMO 传输系统的全分集空时编码(Space-Time Coding)方案.通过引入该码型,可以使得多用户 MIMO 传输系统可以获得满分集增益,以保证在高信噪比下有较好的误比特性能.并且可以通过改变码型的构造矩阵,来改变用户信息的传输速率.而 MMSE 检测算法对于该码型仍然适用,与 ML 检测相比,译码时复杂度大大降低.

关键词:迹正交;空时码;全分集;传输速率;MMSE

中图分类号: TP911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)11-0106-03

A Full Diversity Trace-Orthogonal Multi-User Space-Time Coding

DENG Dong-hu, LI Hong-wei, ZHU Ren-fei, YU Tao

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A trace-orthogonal space-time coding with full diversity and suitable for multi-user MIMO transmission system is proposed. Through the introduction of this coding, it can make the system achieve full diversity which could ensure better BER when the signal to noise rate is higher. By changing the structure of the encoding matrices, the transmission rate of the users could be changed together. The MMSE decoder can be used in the system with low complexity compared with ML decoder.

Key words: trace-orthogonal; space-time coding; full-diversity; transmission rate; MMSE

1 引言

空时编码技术可以在不额外增加功率和带宽的条件下成倍增加传输速率和大幅度改善链路质量,是对抗衰落、提高频谱效率的一种重要手段,引起了越来越多的重视^[1-2]. 对于一个具有 M 根发送天线和 N 根接收天线的多入多出(multiple input multiple output, MIMO)系统而言,其可以有较高的数据传输速率,并且由于分级增益的存在,可以使得系统获得较好的误码性能^[3]. 如果编码达到满分集,那么在高信噪比的情况下,系统将会获得较好的误码性能. 文献[3]提出的分层空时码(Layer Space-Time Coding, LST)速率可以达到 M 级,但是不能达到满分集,并且译码复杂度与数据速率呈线性关系^[4]. 正交空时码(Orthogonal Space-Time Block Coding, OS-

TBC)虽然可以达到满分集但是速率不能达到 M ,且不能充分利用收发天线间的互信息量^[5]. 基于最大化收发天线间的互信息量的优化准则,文献[6]提出了线性疏散码(Linear Dispersive Coding, LDC),在传输速率与分集之间取得一个较好的折中.

文献[3]结合 LDC 码的设计构造提出了一种适合于多用户,广播信道模型的的空时码方案. 该方案可以调整传输速率,并且由于符合迹正交的特性使得该方案可以使用 MMSE 进行线性译码,从而大大减小了接收端的译码复杂度. 但是该方案不能达到满分集,使得其在高信噪比的情况下,使用最大似然检测不能达到较好的误码性能. 文献[7]虽然能够达到全分集,但是是基于单用户系统基础上提出的. 文中结合文献[7]通过调整疏散矩阵的设计方法,使其具有满分集增益,并且仍然符合迹正交特型,从而

收稿日期: 2009-09-04; 修回日期: 2009-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(60672032)

可以使用 MMSE 进行检测。

2 系统模型

假设一个用户数为 U , 发射天线为 M , 第 i ($1 \leq i \leq U$) 个用户的接收天线数为 N_i 的无线通信系统, 信道是平坦瑞利衰落信道, 该模型如图 1 所示。假设信道为准静态平坦瑞利衰落信道, 第 m 根发射天线到第 n 根接收天线的信道衰落系数 h_{nm} 服从为独立同分布的零均值单位方差的复高斯随机变量, 在 T ($T \geq n_T$) 个符号周期内保持不变。假设第 i 个用户在第 l 个时刻所要发送的符号为 s_l^i , 且其相应的疏散矩阵为 C_l^i , 那么所在时刻对应发送矩阵为:

$$X = \sum_{i=1}^U \sum_{l=1}^T C_l^i s_l^i \quad (1)$$

矩阵 X 的第 (m, n) 个元素则表示在第 n 时刻由第 m 根发送天线所发送的信息。

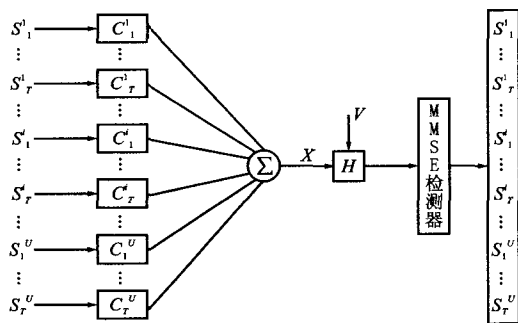


图 1 多用户 MIMO 系统结构图

假设矩阵 H_k 为发送天线到第 k 个用户的信道增益矩阵, 那么该用户所接受到的信息矩阵为:

$$Y_k = H_k X + V = H_k \sum_{i=1}^U \sum_{l=1}^T C_l^i s_l^i + V \quad (2)$$

V 为复高斯白噪声。

为了方便进行 MMSE 检测, 使用向量进行如下表示:

$$y_k = \text{vec}(Y_k), H_k = I_T \otimes H_k,$$

$$s = [s_1^1, \dots, s_T^1, \dots, s_1^U, \dots, s_T^U]$$

$$F = [\text{vec}(C_1^1), \dots, \text{vec}(C_T^1), \dots, \text{vec}(C_1^U), \dots, \text{vec}(C_T^U)];$$

$$v = \text{vec}(V)$$

其中, vec 表示向量化函数。从而可以得出:

$$y_k = H_k F s + v \quad (3)$$

3 疏散矩阵的选取

对于迹正交的疏散矩阵集合 $\{C_l^i, i = 1 \dots U, l = 1 \dots L_i\}$, 要求其具有如下性质:

$$\begin{cases} \text{tr}(C_{l_1}^{i_1 H} C_{l_2}^{i_2}) = \begin{cases} 1 & \text{若 } i_1 = i_2 \text{ 且 } l_1 = l_2 \\ 0 & \text{若 } i_1 \neq i_2 \text{ 且 } l_1 \neq l_2 \end{cases} \\ C_{l_1}^{i_1 H} C_{l_2}^{i_2} = \frac{1}{n_T} I_{n_T} & \text{若 } i_1 = i_2 \text{ 且 } l_1 = l_2 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\text{tr}(\cdot)$, 表示矩阵的迹, 而 H 则表示共轭转置。其选取步骤为:

(1) 首先做一个 $n_T \times T$ 的 latin 矩阵 $L_{n_T \times T}$, 其特性要求: ① $T \geq n_T$; ② 在每一行且每一列中, 从 1 到 T 的整数最多只能出现一次。例如 3×4 的 latin 矩阵为:

$$L_{3 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(2) 生成矩阵 S_k ($k = 1, \dots, T$), 并且 S_k 满足:

$$S_k(i, j) = I_T(L_{n_T \times T}(i, k), j) \quad (6)$$

其中, $i = 1, \dots, n_T, j = 1, \dots, T$ 。

(3) 生成酉矩阵 $W^{(k)}$ ($k = 1, \dots, T$), 该矩阵每个元素的幅度都是 $1/\sqrt{n_T}$, 例如可以假设

$$W^{(k)} = e^{j\theta_k} Q \text{diag}\{1, \omega, \dots, \omega^{n_T-1}\} \quad (7)$$

其中, $Q(i, j) = \frac{1}{\sqrt{n_T}} e^{\frac{j2\pi(i-1)(j-1)}{n_T}}, i = 1, \dots, n_T, j = 1, \dots, n_T$ 。

那么疏散矩阵:

$$C_l^i = \text{diag}\{w_i^{(l)}\} S_l \quad (8)$$

其中, $w_i^{(l)}$ 表示矩阵 $W^{(l)}$ 的第 i 行。

4 酉矩阵 $W^{(k)}$ 中参数的选择

假设所有用户发送的信息序列为 s' , 经过信道译码之后被错判为 s'' , 其差为 z , 即 $z_l^i = s_l^{i'} - s_l^{i''}$, 且 z 不是零矩阵。那么所用码型的分集增益可以由式 (9) 决定。

$$\begin{aligned} & \text{rank}\left(\sum_{i=1}^U \sum_{l=1}^T C_l^i s_l^{i'} - \sum_{i=1}^U \sum_{l=1}^T C_l^i s_l^{i''}\right) \\ &= \text{rank}\left(\sum_{i=1}^U \sum_{l=1}^T C_l^i z_l^i\right) \\ &= \text{rank}\left(\sum_{i=1}^U \sum_{l=1}^T \text{diag}\{w_i^{(l)}\} S_l z_l^i\right) \\ &= \text{rank}\left(\sum_{l=1}^T \text{diag}\left(\sum_{i=1}^U w_i^{(l)} z_l^i\right) S_l\right) \\ &= \text{rank}\left(\sum_{l=1}^T \text{diag}(W^{(l)} z_l) S_l\right) \end{aligned} \quad (9)$$

如果式 (9) 值为 n_T , 那么可以说明该码型达到全分集的效果。

文献[7]提供了其参数的选取, $\omega = e^{j\frac{2\pi}{K}}$, K 为大于 n_T 的素数, $\theta_k = p^{\frac{k-1}{T}}$ ($k = 1, \dots, T$), p 为任意素数. 为了简化, 在此不做证明.

5 译码

当某用户的接收天线数不小于发送天线数的时候, 可以使用 MMSE 进行检测, 这样可以降低 ML 检测所带来的较高复杂度. 该文采用线性 MMSE 检测.

假设发送序列经译码后判为 $\hat{s} = [\hat{s}_1^1, \dots, \hat{s}_T^1, \dots, \hat{s}_1^i, \dots, \hat{s}_T^i, \dots, \hat{s}_1^U, \dots, \hat{s}_T^U]$, 由式(3)可知:

$$\hat{s} = K_{sy_k} K_{y_k y_k}^{-1} y_k \quad (10)$$

其中

$$K_{sy_k} = E\{s y_k^H\} = \sigma_s^2 F^H (I_T \oplus H_k^H) \quad (11)$$

$$K_{y_k y_k} = E\{y_k y_k^H\}$$

$$= \sigma_s^2 \left(I_T \otimes \left(H_k H_k^H + \frac{\sigma_v^2}{\sigma_s^2} I_{n_T} \right) \right) \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(10)之后可得:

$$\hat{s} = F^H \text{vec} \left[H_k^H \left(H_k H_k^H + \frac{\sigma_v^2}{\sigma_s^2} I_{n_T} \right)^{-1} Y_k \right] \quad (13)$$

为方便说明, 假设

$$P_k = H_k^H \left(H_k H_k^H + \frac{\sigma_v^2}{\sigma_s^2} I_{n_T} \right)^{-1} \quad (14)$$

由向量化函数的特性可以得知:

$$\hat{s}_i^j = \text{tr}(C_i^j P_i Y_i) \quad (15)$$

根据式(15)可知, 该算法的计算量较 ML 算法大大减小, 复杂度大大降低.

6 仿真结果

为了验证所提算法的性能, 在 MATLAB 下对算法进行了仿真. 仿真假定为: (1) 信道为准静态平坦瑞利衰落信道, 信道矩阵的元素为独立同分布的零均值单位方差的复高斯随机变量, 并且在接收端可以获得完全的信道信息; (2) 有两个用户, 两根发送天线, 在接收端每个用户拥有两根接收天线, 调制办法为 QPSK, 在图 2 中, 采用 ML 检测算法; 在图 3 中, 采用 MMSE 检测算法.

可以看出, 在 $\text{BER} = 10^{-4}$ 时, 文中方法与文献[3]相比要好 2.5 dB, 文中算法可以达到全分集的效果. 而在采用 MMSE 进行检测时, 由于并不能体现分集效果, 所以性能与文献[3]相比几乎相同.

7 结束语

文中通过调整码元的调制办法, 使得码元可以

达到全分集的效果, 从而能够在高信噪比的情况下获得较好的系统性能, 与文献[3]相比, 在采用 ML 检测算法时性能有较大提高. 但是采用 MMSE 算法进行检测时, 效果不明显.

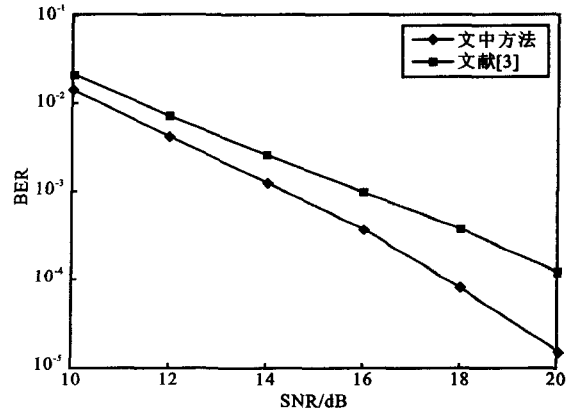


图 2 ML 检测性能图

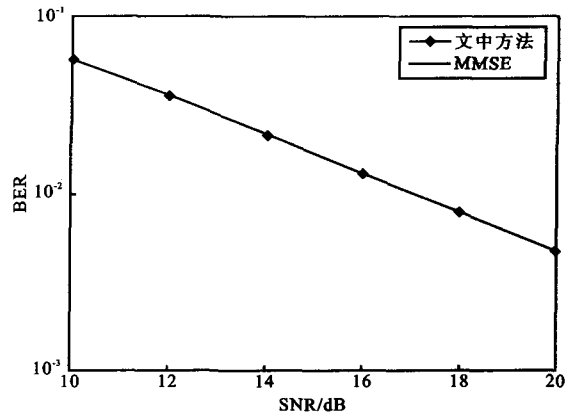


图 3 MMSE 检测性能图

参考文献:

- [1] 李膺东, 朱光喜. 基于分布式 MIMO 的分层快速天线选择算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(6): 246-249.
- [2] 郭磊, 朱光喜, 梁学俊. 一种多用户天线组选择辅助的 MIMO-OFDM 新型子载波分配算法[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(2): 168-171.
- [3] Qinghua Ma, Jianguo Liu, Luxi Yang. A trace-orthogonal multi-user space-time coding[J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2007, 21(25): 310-313.
- [4] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas[J]. Bell Labs Tech. J., 1996, 1(9): 41-59.
- [5] Alamouti S. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 1998, 16(8): 1451-1458.

(下转第 112 页)

表 1 snort 中算法时间性能测试结果 (时间/s)

测试数据(outside. tcpdump)	AC-STD	AC-BANDED	AC-SPARSEBANDS	DCAC
Mon(206MB)	155.2300	80.6154	41.0032	28.7887
Tues(287MB)	222.4250	126.6900	63.0658	56.3814
Wed(304MB)	248.0290	147.9350	92.4920	75.8100
Thurs(381MB)	278.0820	161.9540	99.4688	84.7250
Fri(249MB)	238.1780	134.7470	70.4000	56.5940

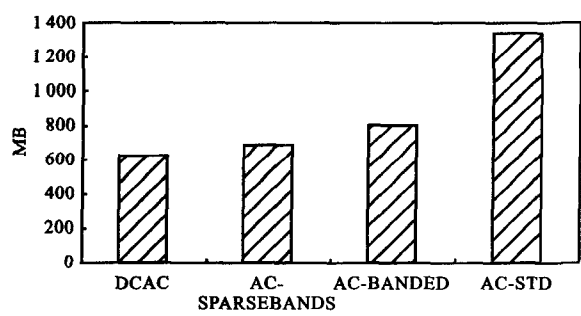


图 2 算法存储 snort 规则集空间开销对比

5 结束语

文中对 AC 算法及其改进在入侵检测系统中的应用进行了研究,针对 AC 自动机大量占用无效存储空间的情况,基于存储空间压缩提出了双重压缩 AC 算法,并将其与 AC 算法及其改进作了对比,结果表明双重压缩 AC 算法在空间性能和时间性能上都更优越.

参考文献:

[1] Tuck N, Sherwood T, Calder B, et al. Deterministic memory-efficient string matching algorithms for intrusion

detection[C]//Proc. of the IEEE INFOCOM conference. Hong Kong, China: Institute of electrical engineers inc., 2004:333-340.

[2] 卢汪节,鞠时光.入侵检测系统中一种改进的 AC 算法[J].计算机工程与应用,2006(15):146-148.

[3] Yu Jianming, Xue Yibo, Li Jun. Memory efficient string matching algorithm for network intrusion management system[J]. Tsinghua Science and Technology, 2007, 12 (5):585-593.

[4] Alfred V Aho, Margaret J Corasik. Efficient string matching:an aid to bibliographic search[J]. Communications of the ACM,1975,18(6):333-340.

[5] Norton M. Optimizing pattern matching for intrusion detection[EB/OL]. [2004-12-10]. <http://www.NID-Sresearch.org>.

[6] Martin Roesch. Snort user manual[EB/OL]. [2008-08-28]. <http://www.snort.org/docs/snort-htmanuals/ht-manual-282/>.

作者简介:

徐红女,(1981-),硕士.研究方向为计算机体系结构.

秦志光男,(1956-),教授,博士生导师.研究方向为计算机开放系统与网络安全、信息系统安全、智能交通、电子商务.

(上接第 108 页)

[6] Hassibi B, Hochwald B M. High-rate codes that are linear in space and time[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2002,48(7):1804-1824.

[7] Antonio Fasano, Sergio Barbarossa. Information lossless full-rate full diversity trace-orthogonal space-time codes[C]// IEEE Signal Processing Magazine. Cannes, 2006:1-5.

作者简介:

邓冬虎男,(1986-),硕士研究生.研究方向为 MIMO 系统空时编码技术.

李宏伟男,(1966-),副教授,硕士生导师.研究方向为移动通信技术.

朱仁飞男,(1986-),硕士研究生.研究方向为雷达信号处理.

于涛男,(1981-),硕士研究生.研究方向为电子与信息对抗.