

# 基于 STBC-OFDM 的非协作 虚拟 MIMO 传输策略

曾玖贞<sup>1</sup>, 詹杰<sup>3</sup>, 王彦<sup>1</sup>, 王超<sup>1,2</sup>

(1. 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 湖南科技大学 物理与电子科学学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**针对多用户配对虚拟 MIMO (multiple input multiple output) 安全性差、对信道估计器依赖性强的问题,在分析理想 MIMO 系统和多径 SISO (single input single output) 系统本质关系的基础上,提出一种基于空时分组编码 STBC (space-time block coding) 和正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 的非协作式虚拟 MIMO 传输策略.在发送端,为了获得最佳发射分集增益,利用信道循环矩阵奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 后得到的左酉矩阵进行预编码;在接收端,为了获得平行子信道传输效果,提出一种基于低复杂度线性 STBC 译码和傅里叶变换预解码的非协作虚拟 MIMO 接收方案.该虚拟 MIMO 在收发两端均无需信道瞬时信息,以非协作方式在单天线内模拟多天线的收发效果.仿真分析结果表明该虚拟 MIMO 系统能有效逼近实际理想 MIMO 的系统容量和误比特率性能,显著降低了虚拟 MIMO 系统的检测门限.该结果验证了其有效性和优越性.

**关键词:**虚拟多输入输出;非协作;空时分组编码;正交频分复用

**中图分类号:**TN914      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2017)03-0067-08

## Non-cooperative virtual MIMO transmission based on STBC-OFDM

Zeng Jiuzhen<sup>1</sup>, Zhan Jie<sup>3</sup>, Wang Yan<sup>1</sup>, Wang Chao<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. School of Physics and Electronics, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** on basis of analyzing the essential relationship between the ideal MIMO and multi-path SISO, a non-cooperative virtual MIMO based on STBC and OFDM was proposed to counter the poor security performance and strong dependence on channel estimation of virtual MIMO using user-pairing algorithm. To obtain full diversity gain, a valid pre-encoding for virtual MIMO was implemented at the transmitter by use of the left unitary matrix, which was obtained by singular value decomposing on the channel cyclic matrix. At the receiver, a detection scheme for the virtual MIMO based on a linear STBC decoding with low complexity and the Fourier transform pre-decoding was also presented to achieve the transmission effect being similar to those of parallel sub-channels. Although the instantaneous channel state information was unavailable at both sender and receiver, the single-antenna users even gain the multiple antennas transmission effect in a non-cooperative way. Simulation results show that the proposed virtual MIMO achieves similar performance on the capacity and bit error rate to ideal MIMO. These results verify its effectiveness and superiority.

**Keywords:** Virtual MIMO; Non-cooperative; STBC; OFDM

收稿日期:2017-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61540012);湖南省教育厅重点资助项目(16A181);衡阳市科技计划发展资助项目(2015KG48)

通信作者:王超(1984-),男,湖南衡阳人,博士生,讲师,主要从事移动通信和协作通信信号处理技术研究. E-mail: chao\_wang@hnu.edu.cn

多输入多输出(MIMO)技术利用多根收发天线获得空间分集增益,能大幅度提升无线通信系统信道容量<sup>[1-2]</sup>.然而,用户终端设备尺寸和成本制约了MIMO技术在无线通信系统上行链路中的应用.虚拟多输入多输出(Virtual-MIMO)技术是解决上述问题的有效方案.在虚拟MIMO系统中,多个单天线用户构成虚拟天线阵列,利用相同频域资源同时向多天线基站发送数据流,由此获得类似于传统MIMO技术的分集增益<sup>[3-4]</sup>.根据不同的虚拟天线阵列传输模式,虚拟MIMO可分为协作式和非协作式两种<sup>[5]</sup>.协作式虚拟MIMO的合作用户彼此交换数据后共同向基站传输数据,非协作式虚拟MIMO的合作用户无需相互共享数据.

上述2种传输模式下的虚拟MIMO均以合理用户配对选择算法为基础<sup>[6-7]</sup>.用户配对选择算法可分为随机配对、正交配对和行列式配对3类<sup>[5]</sup>,基于3类基本配对算法,研究者开展了相关改进研究工作.文献[8]提出一种分组用户配对算法,以信噪比为依据将用户分为2组,选择使得信道容量最大的用户为合作用户;文献[9]提出相邻用户吞吐量分享机制用于配对用户选择;文献[10]提出一种基于竞争方式的协作用户选择方案,根据平均误码率逼近公式选择满足误码率要求的协作用户;文献[11]分析了非均匀虚拟MIMO系统中的资源分配和调度问题,提出一种搜索空间小、迭代次数少的用户分配算法;文献[12]为提高高速公路环境下交通信息传输速率,提出基于聚类的协作虚拟MIMO方法,用户以机会机制选择其他用户构成虚拟天线阵列;为延长无线传感网络节点生命周期,文献[13,14]分别提出基于博弈论的分布式虚拟MIMO和多跳混合式虚拟MIMO,均提高了无线传感网络能耗效率;文献[15]为了降低用户配对算法复杂度,提出一种次优虚拟MIMO用户配对算法,解决了系统吞吐量和用户公平性之间的非平衡问题;文献[16]提出一种自适应调制和协作方法来改善2收2发虚拟MIMO吞吐量;文献[17,18]分别提出基于块空时分组编码的DFT-S-OFDM虚拟MIMO传输方案和虚拟MIMO中继传输方案,降低了虚拟MIMO系统检测门限;文献[19]提出一种无须反馈信息的虚拟MIMO结构,解决了认识无线网络中频谱信道随机性对信道信息反馈性能的不良影响.

上述研究成果均考虑如何合理构成虚拟天线阵列,本质上属于多天线收发范畴.对单用户来说,它们仍存在安全性威胁大、协作距离有限和传输可靠性低等缺陷.本文通过深入类比MIMO系统和OFDM系统模型,结合空时分组编码,提出一种单天线非协作虚拟MIMO传输方案,并进行了性能仿真比较与分析.

## 1 相关模型分析

### 1.1 理想MIMO系统模型

MIMO系统的发送端和接收端都采用多根天线,多天线带来的空域自由度能够提升系统性能和系统容量.考虑理想4发4收MIMO系统,如图1所示.

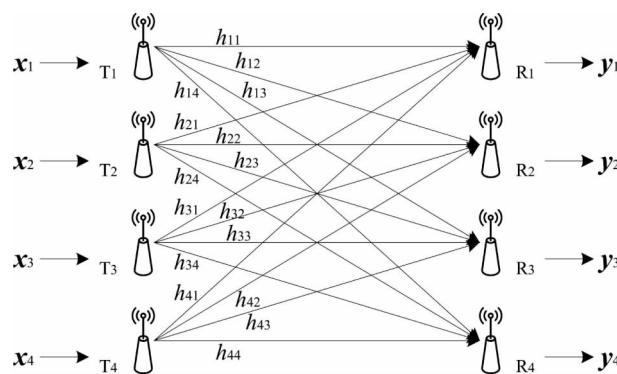


图1 4发4收MIMO示意图

忽略信道噪声,其收发关系为  $\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X}$ :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} & h_{41} \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} & h_{42} \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} & h_{43} \\ h_{14} & h_{24} & h_{34} & h_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

在理想信道估计情况下,对信道传输矩阵  $\mathbf{H}$  进行 SVD 分解,得到左酉阵  $\mathbf{U}$ , 对角阵  $\mathbf{S}$  和右酉阵  $\mathbf{V}$ , 即  $\mathbf{H} = \mathbf{USV}$ :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 \\ u_5 & u_6 & u_7 & u_8 \\ u_9 & u_{10} & u_{11} & u_{12} \\ u_{13} & u_{14} & u_{15} & u_{16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \\ v_5 & v_6 & v_7 & v_8 \\ v_9 & v_{10} & v_{11} & v_{12} \\ v_{13} & v_{14} & v_{15} & v_{16} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

利用右酉阵  $\mathbf{V}$  对发送矩阵  $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$  预编码,令  $\mathbf{X}' = \mathbf{V}^H \mathbf{X}$ ,  $\mathbf{V}^H$  为  $\mathbf{V}$  的共轭对称矩阵.由酉矩阵的性质可知  $\mathbf{V}^H \mathbf{V} = \mathbf{V} \mathbf{V}^H = \mathbf{I}$ , 则收发关系  $\mathbf{Y} = \mathbf{H} \mathbf{X}$  可化为  $\mathbf{Y} = \mathbf{USV} \mathbf{V}^H \mathbf{X} = \mathbf{USX}$ ; 同理,利用左酉阵  $\mathbf{U}$  对接收矩阵  $\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4]$  预解码,令  $\mathbf{Y}' = \mathbf{U}^H \mathbf{Y}$  可得  $\mathbf{Y}' = \mathbf{S} \mathbf{X}$ :

$$\begin{bmatrix} y'_1 \\ y'_2 \\ y'_3 \\ y'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

观察式(3)可知:在信道估计性能理想的情况下,利用信道传输矩阵  $\mathbf{H}$  的 SVD 分解信息分别对发送矩阵  $\mathbf{X}$  和接收矩阵  $\mathbf{Y}$  进行预编码和预解码, MIMO 系统可获得最佳空间分集增益,即各发送天线发送的信息向量各自经过一条独立子信道到达接收端,各信息向量之间无干扰.

## 2.2 多径 SISO 系统模型

仍考虑发送矩阵  $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$ . 假设发送向量  $x_i (i = 1, 2, 3, 4)$  分别是多载波调制系统的 4 个并行输出信号,并串变换后经 1 根发送天线发出,并设  $h_i (i = 1, 2, 3, 4)$  为多径信道增益,且  $h_2, h_3$  和  $h_4$  相对  $h_1$  分别延时 1, 2 和 3 个时间单位,如图 2 所示.

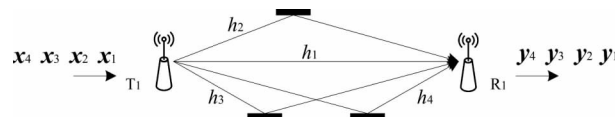


图 2 4 径 SISO 示意图

忽略信道噪声影响,接收天线先后收到 4 个接收向量  $y_i (i = 1, 2, 3, 4)$ , 满足:

$$\begin{aligned} y_1 &= h_1 x_1 \\ y_2 &= h_1 x_2 + h_2 x_1 \\ y_3 &= h_1 x_3 + h_2 x_2 + h_3 x_1 \\ y_4 &= h_1 x_4 + h_2 x_3 + h_3 x_2 + h_4 x_1 \end{aligned} \quad (4)$$

用卷积表示式(4):  $\mathbf{Y} = \mathbf{h} * \mathbf{X}$ , 其中  $\mathbf{h} = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4]$ ,  $\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4]$ . 显然,  $y_1, y_2$  和  $y_3$  均受到了其他发送符号的干扰(inter symbol interference, ISI). 为了有效对抗图 2 所示 4 径传播环境引起的 ISI, 在发送矩阵  $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$  中插入循环前缀  $[x_3 \ x_4]$ , 即  $\mathbf{X}_{\text{CP}} = [x_3 \ x_4 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$ . 此时系统输出  $\mathbf{Y}_{\text{CP}} = \mathbf{h} * \mathbf{X}_{\text{CP}}$ , 用矩阵乘可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \mathbf{y}_3 \\ \mathbf{y}_4 \\ \mathbf{y}_5 \\ \mathbf{y}_6 \\ \mathbf{y}_7 \\ \mathbf{y}_8 \\ \mathbf{y}_9 \\ \mathbf{y}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & 0 \\ h_2 & h_1 & 0 & 0 \\ h_3 & h_2 & h_1 & 0 \\ h_4 & h_3 & h_2 & h_1 \\ h_1 & h_4 & h_3 & h_2 \\ h_2 & h_1 & h_4 & h_3 \\ h_3 & h_2 & h_1 & h_4 \\ 0 & h_3 & h_2 & h_1 \\ 0 & 0 & h_3 & h_2 \\ 0 & 0 & 0 & h_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_3 \\ \mathbf{x}_4 \\ \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中  $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2$  和  $\mathbf{y}_3$  受到前一个发送符号影响,  $\mathbf{y}_8, \mathbf{y}_9$  和  $\mathbf{y}_{10}$  会影响后一个发送符号, 即他们均会受到 ISI 的影响, 但  $\mathbf{y}_4, \mathbf{y}_5, \mathbf{y}_6$  和  $\mathbf{y}_7$  未受 ISI 影响, 正是接收端所需信号. 将  $\mathbf{y}_4, \mathbf{y}_5, \mathbf{y}_6$  和  $\mathbf{y}_7$  重写如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_4 \\ \mathbf{y}_5 \\ \mathbf{y}_6 \\ \mathbf{y}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_4 & h_3 & h_2 & h_1 \\ h_1 & h_4 & h_3 & h_2 \\ h_2 & h_1 & h_4 & h_3 \\ h_3 & h_2 & h_1 & h_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_3 \\ \mathbf{x}_4 \\ \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

观察式(6)可知其传输矩阵为循环矩阵, 记为  $\mathbf{H}_{CP}$ . 将式(6)与式(1)对比可知其等效于4发4收 MIMO 系统收发关系. 由此可得: 在利用循环前缀消除 ISI 之后, 多径 SISO 传播模型等效于 MIMO 系统; 或者说 MIMO 系统利用多径传播效应消除了 ISI.

## 2 基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO

依据相关模型分析结论, 可用单发天线模拟多发天线操作, 即虚拟多发的非协作式模拟. 结合虚拟多收技术, 该节提出一种基于 STBC-OFDM 的虚拟 MIMO 非协作式传输策略.

### 2.1 发送策略描述

为了获得全发射分集增益, 首先对发送符号进行空时分组编码(space-time block coding, STBC). 考虑复数项发送矩阵  $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{x}_n]$ , STBC 编码后的复传输矩阵  $\mathbf{X}_{n_T}$  满足<sup>[20]</sup>:

$$\mathbf{X}_{n_T} \times \mathbf{X}_{n_T}^T = c(|\mathbf{x}_1|^2 + |\mathbf{x}_2|^2 + \cdots + |\mathbf{x}_n|^2) \mathbf{I}_{n_T}. \quad (7)$$

$\mathbf{X}_{n_T}$  是一个  $n_T \times k$  的空时分组编码输出传输矩阵,  $n_T$  是发射分集数,  $k$  是传输周期数, 空时分组码码率  $R = n/k$ . 根据不同的发射分集级数, 复空时分组编码的最大码率如表 1 所示:

表 1 最大码率关系

$n_T$	最小 $n$	最大 $k$	最大 $R$
1	1	1	1
2	2	2	1
3-4	4	3	3/4
5-8	8	4	1/2
9-16	16	5	5/16
$2^{Q-2} - 2^{Q-1}$	$2^{Q-1}$	$Q$	$Q/2^{Q-1}$

对于码率 1/3 的 4 发空时分组编码, 其复传输矩阵  $\mathbf{X}_4$  为

$$\mathbf{X}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 & -\mathbf{x}_2 & -\mathbf{x}_3 & -\mathbf{x}_4 & \mathbf{x}_1^* & -\mathbf{x}_2^* & -\mathbf{x}_3^* & -\mathbf{x}_4^* \\ \mathbf{x}_2 & \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_4 & -\mathbf{x}_3 & \mathbf{x}_2^* & \mathbf{x}_1^* & \mathbf{x}_4^* & -\mathbf{x}_3^* \\ \mathbf{x}_3 & -\mathbf{x}_4 & \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \mathbf{x}_3^* & -\mathbf{x}_4^* & \mathbf{x}_1^* & \mathbf{x}_2^* \\ \mathbf{x}_4 & \mathbf{x}_3 & -\mathbf{x}_2 & \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_4^* & \mathbf{x}_3^* & -\mathbf{x}_2^* & \mathbf{x}_1^* \end{bmatrix}. \quad (8)$$

为了获得类似无干扰平行子信道的传输效果,需对复空时传输矩阵  $\mathbf{x}_{n_T}$  预编码.采用 1.1 小节中基于信道传输矩阵 SVD 分解的预编码方法.首先对 1.2 小节所描述的等效 4 发 4 收 MIMO 系统的循环信道矩阵  $\mathbf{H}_{CP}$  进行 SVD 分解得:

$$\mathbf{H}_{CP} = \mathbf{U}_{CP} \mathbf{S}_{CP} \mathbf{V}_{CP} \quad (9)$$

由引理可知:左酉阵  $\mathbf{U}_{CP}$  是逆傅里叶变换矩阵,右酉阵  $\mathbf{V}_{CP}$  是傅里叶变换矩阵,用  $\mathbf{T}^{-1}$  和  $\mathbf{T}$  分别表示逆傅里叶变换矩阵和傅里叶变换矩阵,则  $\mathbf{H}_{CP}$  的 SVD 分解为:

$$\mathbf{H}_{CP} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{S}_{CP} \mathbf{T}. \quad (10)$$

令  $\mathbf{x}'_{n_T} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{x}_{n_T}$ , 即对传输矩阵  $\mathbf{x}_{n_T}$  进行离散逆傅里叶变换预编码,在预编码输出数据中添加循环前缀,这样使得发送数据经过独立平行的正交子信道,且不受多径时延带来的 ISI 干扰.值得注意的是:理想 MIMO 系统预编码是在良好信道估计基础上进行的,即发送端需要获得完整信道传输矩阵,以便得到预编码右酉阵  $\mathbf{V}$ ; 而本节提出的预编码方案直接利用逆傅里叶变换矩阵  $\mathbf{T}^{-1}$  进行预编码,不依赖信道估计性能好坏,且整个预编码和添加循环前缀过程可以使用 OFDM 多载波调制实现.处理后的符号经 D/A 转换,送入中频及射频处理,最后由单根天线发射.

## 2.2 接收策略描述

单根接收天线收到信号经过射频、中频降频,A/D 转换后交数字基带模块处理.基带处理模块在去除循环前缀和利用傅里叶变换矩阵  $\mathbf{T}$  对接收码字预解码之后进行 STBC 译码.这样使得数据传输过程等价于经历独立平行的正交子信道,不受多径时延带来的 ISI 干扰.此外,与理想 MIMO 系统中 STBC 译码不同,非协作虚拟 MIMO 接收端 STBC 译码所需信道系数  $h_{i,j}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_T, j = 1, 2, \dots, n_T$ ) (虚拟 MIMO 收发天线数相等)是多径信道增益  $h_m$  ( $m = 1, 2, \dots, n$ ) 组成的循环传输矩阵中的对应元素<sup>[21]</sup>,即满足:

$$h_{i,j} = \begin{cases} h_n & i = j \\ h_m & \text{当 } i = j - m \mid m = 1, 2, \dots, n-1 \\ h_{n-m} & \text{当 } i = j + m \mid m = 0, 1, 2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (11)$$

假设  $h_m$  ( $m = 1, 2, \dots, n$ ) 在传输周期  $k$  内恒定,采用最大似然译码进行 STBC 解码,判决统计函数  $\tilde{\mathbf{x}}_i$  为

$$\tilde{\mathbf{x}}_i = \sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_T} \text{sgn}_t(i) r_t^j h_{i, \in_t(i)}^* \cdot j. \quad (12)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, n_T$ ;  $\in_t(i)$  为第  $t$  列中  $x_i$  行的位置;  $\text{sgn}_t(i)$  为第  $t$  列中  $x_i$  的符号.由于循环传输矩阵各行两两正交,要使得最大似然矩阵最小:

$$\sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_T} \left| r_t^j - \sum_{i=1}^{n_T} h_{i, \in_t(i)} x_i \right|^2. \quad (13)$$

等价于使联合判决度量最小:

$$\sum_{i=1}^{n_T} \left[ |\tilde{\mathbf{x}}_i - x_i|^2 + \left( \sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_T} |h_{t,j}|^2 - 1 \right) |x_i|^2 \right]. \quad (14)$$

对于已知接收信号、多径传播系数和正交循环传输矩阵的虚拟 MIMO 接收结构,由于  $\tilde{\mathbf{x}}_i$  只取决于发送码符号  $\mathbf{x}_i$ , 使得式(14)最小可等价于使每个独立判决度量最小:

$$|\tilde{\mathbf{x}}_i - \mathbf{x}_i|^2 + \left( \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_T} |h_{i,j}|^2 - 1 \right) |\mathbf{x}_i|^2. \quad (15)$$

根据循环矩阵正交性,发送符号  $x_i$  的判决统计独立于其他发送符号,通过对各个传输符号采用独立最大似然译码,这种线性处理简化了 STBC 联合译码过程。

### 3 性能仿真分析

仿真环境选择 LTE 通信系统上行链路:用户数为 8, LTE 帧长为 8 个 OFDM 符号、循环前缀长度为 2 个 OFDM 符号、系统带宽 10 MHz、载波频率 5 GHz, QPSK 数字调制、卷积编码、LS 信道估计和信道均衡、复数加权共轭算法消除 ICI 影响;信道模型为 4 径瑞利衰落信道;通过仿真比较本文非协作虚拟 MIMO 与实际 MIMO, 随机用户配对 (random pairing, RP) 虚拟 MIMO、正交用户配对 (orthogonal pairing, OP) 虚拟 MIMO 和行列式用户配对 (determinant pairing, DP) 虚拟 MIMO 的性能优劣。

图 3 比较了不同虚拟收发天线数目情况下,基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 和实际 MIMO 系统信道容量性能。曲线比较表明:收发天线数目较小时,基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 基本获得了与实际 MIMO 同等的空间分集效果,其信道容量性能接近实际 MIMO 系统。收发天线数目较大时,基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 获得了一定的空间分集效果,但由于收发天线数目增加,子信道数目也增加,系统对载波频偏和多普勒频移敏感,即使使用有效 ICI 消除措施,其子信道间相关性也影响了信道容量性能。图 4 比较了固定虚拟收发天线数目情况下,基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 与 RP 虚拟 MIMO、OP 虚拟 MIMO 和 DP 虚拟 MIMO 信道容量性能,曲线比较表明:基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 空间分集效果是最优的,其信道容量性能是行列式用户配对虚拟 MIMO 的 1.17 倍,是正交用户配对虚拟 MIMO 的 1.37 倍,是随机用户配对虚拟 MIMO 的 1.89 倍。

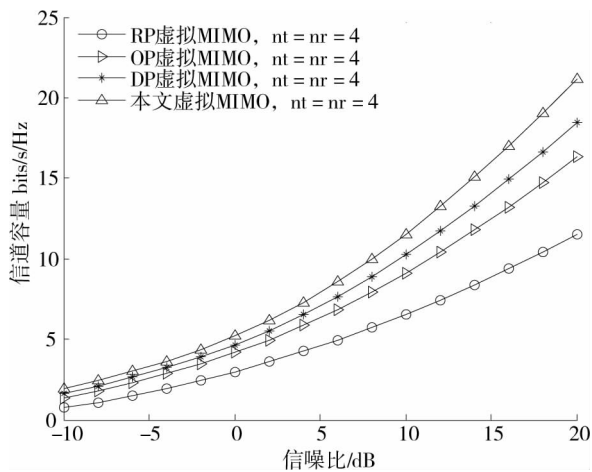


图 3 本文虚拟 MIMO 与实际 MIMO 信道容量性能比较

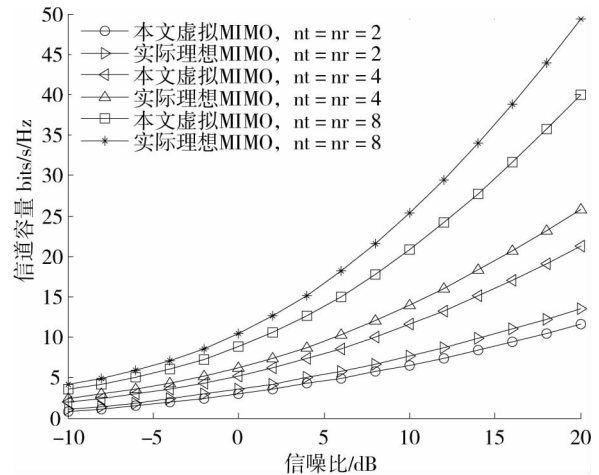


图 4 本文虚拟 MIMO 与其他虚拟 MIMO 信道容量性能比较

图 5 比较了不同虚拟收发天线数目情况下,基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 和实际 MIMO 系统误码率性能。曲线比较表明:基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 系统误码率随着收发天线数目的增加而减小,这得益于虚拟 MIMO 带来的收发空间分集效果;在收发天线数较小时其误码率性能同实际 MIMO 系统基本接近,验证了本文非协作式虚拟 MIMO 传输方案的有效性。虽然在收发天线数目较大时,基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 同实际 MIMO 的误码率性能存在差距,但若进一步优化 ICI 消除算法,可减小其差距。图 6 比较了固定虚拟收发天线数目情况下,基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 与 RP 虚拟 MIMO、OP 虚拟 MIMO 和 DP 虚拟 MIMO 误码率性能,曲线比较表明:基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 误码率性能优于其他虚拟 MIMO,在  $BER = 10^{-4}$  时,其接收机检测门限较 DP、OP 和 RP 虚拟

MIMO 分别降低了 0.3、0.5 和 0.9 dB.

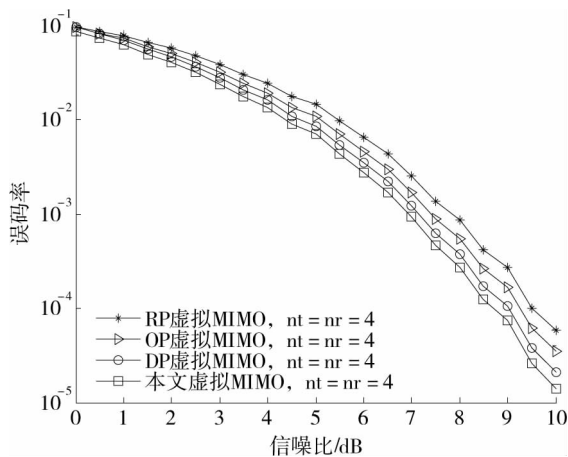


图5 本文虚拟 MIMO 与实际 MIMO 误码率性能比较

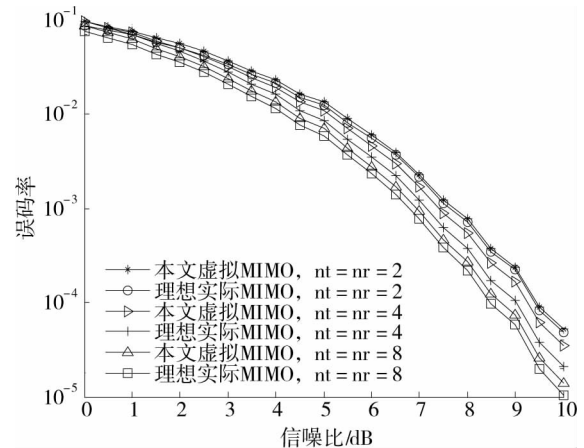


图6 本文虚拟 MIMO 与其他虚拟 MIMO 误码率性能比较

## 5 结论

本文从理论上详细阐述了基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 传输策略,并通过仿真实验对其性能进行了比较分析.结果表明:基于 STBC-OFDM 的非协作虚拟 MIMO 所获得的空间分集效果与实际 MIMO 系统基本一致,其信道容量性能优于行列式用户配对虚拟 MIMO、正交用户配对虚拟 MIMO 和随机用户配对虚拟 MIMO.且其系统误码率较低,在  $BER = 10^{-4}$  时,其接收机检测门限较上述三种虚拟 MIMO 分别降低了 0.3、0.5 和 0.9 dB.仿真实验结果论证了本文虚拟 MIMO 系统信道容量和误码率性能均能较好逼近实际理想 MIMO 并优于传统用户配对虚拟 MIMO 的结论.所提策略能有效提高无线移动通信系统上行链路虚拟 MIMO 系统的有效性和可靠性.

## 参考文献:

- [1] Björnson E, Sanguinetti L, Hoydis J, et al. Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: Is massive MIMO the answer? [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2015, 14(6): 3059-3075.
- [2] Björnson E, Larsson E G, Marzetta T L. Massive MIMO: Ten myths and one critical question[J]. IEEE communications magazine, 2016, 54(2): 114-123.
- [3] Xu H, Huang L, Qiao C, et al. Joint virtual MIMO and data gathering for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(4): 1034-1048.
- [4] Wu J, Jia M, Tong W, et al. Methods and systems for scheduling in a virtual MIMO communication environment; U.S. Patent 8,953,481[P]. 2015-02-10.
- [5] 傅子维.虚拟 MIMO 系统中基于博弈论的用户稳定配对[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- [6] 潘俊林. 虚拟 MIMO 系统用户配对算法研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2010.
- [7] 吴春靓. V\_MIMO 系统中用户配对与资源分配问题研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.
- [8] Song Y, Su G, Wang S, et al. Group-based user pairing of virtual MIMO for uplink of LTE system[C]//CECNET. Yi Chang, China. 2012: 346-349.
- [9] Bennani H, Sabir E, Kobbane A, et al. Virtual MIMO systems: A game theoretical approach[C]//Codes, Cryptography and Communication Systems (WCCCS), 2014 5th Workshop on. IEEE, 2014: 77-80.
- [10] 田雨, 马林华, 唐红, 等. 基于虚拟 MIMO 的协作通信节点选择算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 797-803.
- [11] Biswas J, Ni W, Liu R P, et al. Low complexity user pairing and resource allocation of heterogeneous users for uplink virtual MIMO system over LTE-A network[C]//WCNC. Istanbul, Turkey, 2014: 1903-1908.

- [12] Wu H, Zhang Z, Zhang H. Faster Information Propagation on Highways; a virtual MIMO approach [C]//Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE. IEEE, 2014: 1654–1660.
- [13] Ramirez R A V, Thompson J S, Altman E, et al. A distributed virtual MIMO coalition formation framework for energy efficient wireless networks[J]. EURASIP journal on wireless communications and networking. 2015, 91(3): 964–984.
- [14] Chung J M, Kim J Y, Han D Y. Multihop hybrid virtual MIMO scheme for wireless sensor networks[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2012, 61(9): 4069–4078.
- [15] Zhao H Z, Ma S, Liu F W, et al. Suboptimal multiuser pairing algorithm with low complexity for virtual MIMO systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology. 2014, 63(7): 3481–3486.
- [16] Jiang J, Thopson J S, Sun H. A singular value based adaptive modulation and cooperation scheme for virtual MIMO systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology. 2011, 60(6): 2495–2504.
- [17] 刘海涛, 王勇, 李冬霞. 基于块空时分组编码 DFT-S-OFDM 虚拟 MIMO 传输方案[J]. 电子与信息学报. 2010, 32(5): 1183–1187.
- [18] 刘海涛, 王勇, 杜超. 基于块空时分组编码虚拟 MIMO 中继传输方案[J]. 电路与系统学报, 2010, 15(5): 116–121.
- [19] Lai I W, Chen C L, Lee C H. End-to-end virtual MIMO transmission in Ad Hoc cognitive radio networks [J]. IEEE transactions on wireless communications. 2014, 13(1): 330–341.
- [20] Marey M, Dobre O A, Liao B. Classification of STBC systems over frequency-selective channels[J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 2015, 64(5): 2159–2164.
- [21] Liu T H. Analysis of the alamouti STBC MIMO system with spatial division multiplexing over the rayleigh fading channel[J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2015, 14(9): 5156–5170.