

## 基于空时分组编码的协同通信系统性能的研究

罗涛 李祥明 王健康 乐光新  
(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

**摘要:** 该文提出了一种基于空时分组编码的协同通信方案(WCC-STBC), 通过理论分析得到了系统的误码率传输特性, 并给出了Monte Carlo仿真结果。理论分析和仿真结果表明: WCC-STBC方案通过临近用户之间的空时协同发送可获得分集增益, 增益的大小与协同信道及各用户信道的传输特性有关。在误比特率为  $10^{-3}$ , 两用户间协同信道的传输特性优于各用户(假设各用户传输特性相同)5dB时可获得约 3dB的分集增益; 一个用户信道的传输特性(假设其与两用户间协同信道传输特性相同)优于另一用户 5dB时, 信道传输特性较差的用户可获得约 5dB的性能提升, 且较好信道用户的性能损失并不大, 仅约 0.5dB。

**关键词:** 协同通信; 空时分组编码; 分集

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2142-04

## Studies on Space-Time Block Coded Cooperative Communication System

Luo Tao Li Xiang-ming Wang Jian-kang Yue Guang-xin

(School of Telecommunications Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** A communication system With Cooperative Communication based on Space-Time Block Coding (WCC-STBC) is proposed in this paper. A closed-form expression of bit error ratio for WCC-STBC system is also derived. The results through computer Monte Carlo simulation show that the diversity gain, which is dependent on the characteristics of the user's individual channel and the cooperative channel between them, can be gotten in the WCC-STBC system. When BER is  $10^{-3}$ , and if the cooperative channel between them is 5dB better than their individual's, about 3dB gain could be gotten in WCC-STBC system; and if one user's channel is 5dB better than his partner's, 5dB gain for the performance of the worse user could be improved while that of the better one is less loss, only about 0.5dB or so.

**Key words:** Cooperative communication; Space-Time Block Codes(STBC); Diversity

### 1 引言

多天线(MIMO)发送分集技术作为对抗无线多径、时变衰落信道的有效措施之一, 近年来得到了快速的发展, 并在一些通信系统的基站中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>; 但现阶段, 由于受移动终端成本、尺寸以及硬件实现复杂度等的限制, 在移动终端一般还仅设计一副天线。基于此, 人们提出了另一种新的解决方法——协同通信(Cooperative Communication)<sup>[4-7]</sup>。协同通信的基本思想是: 在多用户通信环境中, 使用单副天线的各临近移动用户可按照一定方式共享彼此的天线协同发送, 从而产生一种类似多天发送的虚拟环境, 获得空间分集增益, 提高系统传输性能。目前, 协同通信主要有检测转发、放大转发和编码协作 3 种信号处理方案<sup>[4]</sup>。检测转发方案中, 每个用户对收到的临近用户(以下简称“同伴”)的数据再生后再进行转发, 这非常类似于中继。Sendonari等人在文献[5]中给出了一种基于CDMA的检测转发协同方案: 在第 1 和第 2 个间隔内, 各用户发送自己的数据, 并检测同伴

的第 2 个数据; 在第 3 个间隔内, 各用户均发送自己和检测到的同伴数据的线性组合。由于采用的是CDMA接入方案, 所以在接收端容易得到各自用户的数据, 获得分集增益。抛开第 1 个间隔发送的数据和CDMA接入技术不说, 仅对于协同通信部分而言, 第 3 个间隔发送的实际上是通过检测估值得到的同伴第 2 个间隔中发送的数据, 即此方案可简化为直接检测转发机制, 下文用WCC-Rep表示, 其结构如图 1 所示。WCC-Rep方案实现简单, 但获得的分集增益也有限。基于此, 本文结合Alamouti提出的正交空时分组编码思想<sup>[2,8]</sup>, 提出一种基于正交空时分组编码的协同发送方案(WCC-STBC)。研究表明, 与WCC-Rep方案相比较, 本文提出的WCC-STBC协同发送方案可以获得更多的分集增益, 增益的大小与协同信道及各用户信道的传输特性有关。为了便于分析, 本文只以两用户的协同通信为例进行分析, 多用户情况下可依此类推。

### 2 WCC-STBC 系统模型

基于正交空时分组编码的两用户协同发送系统模型(WCC-STBC)如图 2 所示。为了便于分析, 在WCC-STBC方案中, 不妨假设用户 A 与用户 B 之间的协同信道  $h_0$  满足

2006-02-13 收到, 2006-07-14 改回  
国家自然科学基金(60472070), 教育部科学技术重点项目(105035)和高校博士点基金(20050013005)资助课题

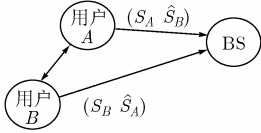


图1 WCC-Rep 系统

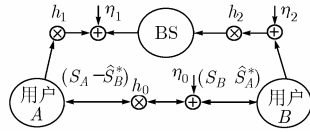


图2 WCC-STBC 系统

TDD双工方式(两用户TDMA或CDMA多址接入方式均可满足), 用户A和用户B与基站之间的信道分别用 $h_1$ 和 $h_2$ 表示,  $h_0$ 、 $h_1$ 和 $h_2$ 均服从0均值、方差为1的复高斯分布, 相互独立, 且在一个空时符号块内准静态。假设信道噪声 $\eta_0$ 、 $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 均服从均值为0, 方差分别为 $N_0$ 、 $N_1$ 和 $N_2$ 的白高斯分布。

在WCC-STBC方案中, 信号的发送同样可分为两个阶段。在第1阶段, 用户A和用户B分别只发送自己的数据 $S_A$ 和 $S_B$ , 同时接收并检测得到同伴数据的估值 $\hat{S}_A$ 和 $\hat{S}_B$ (假设没有传输和处理时延); 在第2阶段, 根据Alamouti的STBC编码方式进行正交发送<sup>[8]</sup>, 各用户分别发送检测到的同伴数据的复共轭信号 $-\hat{S}_B^*$ 和 $\hat{S}_A^*$ , 即空时发送矩阵为

$$\begin{pmatrix} S_A & S_B \\ -\hat{S}_B^* & \hat{S}_A^* \end{pmatrix}。显然, 这不同于 WCC-Rep 方案的  $\begin{pmatrix} S_A & S_B \\ \hat{S}_B & \hat{S}_A \end{pmatrix}。$$$

综上所述, 不采用协同通信, 各用户单独与基站进行通信时, 基站接收到用户A和用户B的信号分别为

$$\begin{cases} Y_A = \sqrt{P_A}h_1S_A + \eta_1 \\ Y_B = \sqrt{P_B}h_2S_B + \eta_2 \end{cases} \quad (1)$$

在采用上述WCC-STBC协同发送方案的情况下, 基站在第1和第2阶段接收到的信号分别为

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{P_A/2}h_1S_A + \sqrt{P_B/2}h_2S_B + \eta'_1 \\ R_2 = -\sqrt{P_B/2}h_1\hat{S}_B^* + \sqrt{P_A/2}h_2\hat{S}_A^* + \eta'_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\eta'_1$ 和 $\eta'_2$ 分别为第1和第2阶段信道的加性噪声。 $\hat{S}_A$ 和 $\hat{S}_B$ 分别为用户B和用户A通过它们之间的协同信道 $h_0$ , 接收到的对方在第1个阶段发送数据的检测估值, 即

$$\begin{cases} Y_1 = \sqrt{P_B/2}h_0S_B + \eta_0 \Rightarrow \hat{S}_B = \text{dec}(Y_1) \\ Y_2 = \sqrt{P_A/2}h_0S_A + \eta_0 \Rightarrow \hat{S}_A = \text{dec}(Y_2) \end{cases} \quad (3)$$

其中dec表示进行检测和估值, 式(2)和式(3)中发送功率除以2是为了保证总发送功率恒定。

### 3 WCC-STBC 系统性能分析

为了便于分析, 下面不妨再假设发送功率归一化, 即有 $P_A = P_B = 1$ , 且采用BPSK调制方式。下面使用图2, 式(1)和式(2)给出的模型来进行差错性能分析。

#### 3.1 不采用协同通信, 各用户单独与基站独立地进行通信

由式(1)可得系统的瞬时信噪比分别为

$$\begin{cases} \gamma_A = |h_1|^2 E_s / N_1 \\ \gamma_B = |h_2|^2 E_s / N_2 \end{cases} \quad (4)$$

由前面假设,  $h_1$ 和 $h_2$ 分别服从0均值、单位方差的复高斯分布, 所以其包络服从Rayleigh分布。采用BPSK调制方

式时, 得到Rayleigh衰落下系统的平均误比特性能近似为<sup>[9]</sup>

$$\bar{P}_{\text{bpsk}} = E(Q(\sqrt{2\gamma})) = 1/4\bar{\gamma} \quad (5)$$

其中 $\gamma$ 为信噪比, 且 $\bar{\gamma} = E(\gamma)$ ,  $E(*)$ 表示求数学期望, 将式(4)代入并进行简单积分运算后得到

$$\begin{cases} \bar{P}_A = E(Q(\sqrt{2\gamma_A})) = 1/4E(\gamma_A) = N_1/4E_s \\ \bar{P}_B = E(Q(\sqrt{2\gamma_B})) = 1/4E(\gamma_B) = N_2/4E_s \end{cases} \quad (6)$$

#### 3.2 WCC-STBC 两用户协同发送方案

在采用基于正交空时分组编码的WCC-STBC两用户协同发送方案中, 在第1阶段, 通过检测得到同伴数据的估值, 其误差错率用 $P_{e1}$ 表示; 在第2阶段, 通过空时分组编码方案进行空时发送, 其误差错率用 $P_{e2}$ 表示。同样, 为了便于分析, 下面也只分析采用BPSK调制方式时的性能。

类似3.1节的分析, 由式(3)可得到Rayleigh衰落下采用BPSK调制时第1阶段系统的平均差错性能为

$$\bar{P}_{e1} = N_0/2E_s \quad (7)$$

若第1阶段传输不出现误码, 即有 $\hat{S}_A = S_A$ 和 $\hat{S}_B = S_B$ 时, 利用文献[2,10]中的平方简化译码算法, 由式(2)可得到采用BPSK调制时第2阶段Alamouti空时分组编码系统的瞬时信噪比, 对其求均值即可得到Rayleigh衰落下的平均差错性能<sup>[2,11]</sup>

$$\bar{P}_{e2} = \frac{1}{2} \left( 1 - \mu - \frac{\mu(1-\mu^2)}{2} \right) \quad (8)$$

其中参数 $\mu = \sqrt{\frac{E_s}{M_t P_N} / \left( 1 + \frac{E_s}{M_t P_N} \right)}$ ,  $M_t$ 和 $P_N$ 分别为发送天线数和信道加性噪声的方差。

若记整个WCC-STBC系统的误差错性能为 $P_e$ , 则它应该是两个阶段都不出现差错事件的补集, 如表1所示。表1中计算WCC-STBC系统的差错概率 $P_e$ 时, 对第1阶段的差错概率 $P_{e1}$ 使用了修正因子1/2。这是因为在第2阶段的第1时刻发送的是各用户自己的数据, 不会出现误码; 而仅在第2时刻才会由于检测估值而会出现误码的缘故。故有

$$\bar{P}_e = 1 - (1 - \bar{P}_{e1}/2)(1 - \bar{P}_{e2}) \quad (9)$$

表1 WCC-STBC 系统的差错概率

第1阶段 $\bar{P}_{e1}$	第2阶段 $\bar{P}_{e2}$	WCC-STBC 系统 $\bar{P}_e$
出现差错 $\bar{P}_{e1}$	出现差错 $\bar{P}_{e2}$	出现差错 $\bar{P}_{e1}\bar{P}_{e2}/2$
出现差错 $\bar{P}_{e1}$	不出现差错 $1 - \bar{P}_{e2}$	出现差错 $\bar{P}_{e1}(1 - \bar{P}_{e2})/2$
不出现差错 $1 - \bar{P}_{e1}$	出现差错 $\bar{P}_{e2}$	出现差错 $(1 - \bar{P}_{e1}/2)\bar{P}_{e2}$
不出现差错 $1 - \bar{P}_{e1}$	不出现差错 $1 - \bar{P}_{e2}$	不出现差错 $(1 - \bar{P}_{e1}/2)(1 - \bar{P}_{e2})$

### 4 计算机仿真

图3和图4给出了传输100000个数据符号时对系统进行Monte Carlo仿真的结果。仿真条件是：采用BPSK调制，信道 $h_0$ ， $h_1$ 和 $h_2$ 均只取单径，且都服从独立复高斯分布。为了便于比较，图3中也给出了由式(6)，式(8)和式(9)数值计算得到的理论结果，图中用Theory来标示。由图可看出，理论分析和仿真结果吻合得相当好。图中，WCC和WoCC分别表示采用(With)和不采用(Without)协同通信方案。如前所述，WCC-Rep可认为是文献[5]中方案的简化，表示将检测得到的同伴数据的估值直接进行协同转发，而不进行空时编码发送。为了便于描述，假设用户A和用户B与基站进行通信时的发送信噪比分别用 $\gamma_a = E_s / N_1$ 和 $\gamma_b = E_s / N_2$ 表示，而两用户间协同通信时的发送信噪比用 $\gamma_0 = E_s / N_0$ 表示。

图3仿真中假设用户A和用户B的信道条件相同，且等功率发送，即 $h_1$ 和 $h_2$ 满足独立同分布，仿真中取0均值、单位方差的独立复高斯随机变量，即有 $\gamma = \gamma_a = \gamma_b$ 。图3(a)–3(d)分别给出了 $\Delta\gamma = \gamma_0 - \gamma = 0\text{dB}$ ， $5\text{dB}$ ， $10\text{dB}$ 和 $20\text{dB}$ 时的仿真结果，横坐标为用户A(或B)的信噪比SNR，纵坐标为误比特率。由图可知，两用户间的协同信道 $h_0$ 的优劣对性能的影响较大。图3(a)中， $\Delta\gamma = 0$ 时，WCC-STBC曲线和WoCC-A曲线，WoCC-B曲线几乎都是重叠的，即并没有带来增益，这是因为协同信道传输中出现的差错几乎完全抵消了空间分集增益的缘故，这种情况下可以通过添加差错控制编码进行改进，或者建议不使用协同机制。图3(b)–3(d)表明，WCC-STBC获得的分集增益随着 $\Delta\gamma$ 的增大也增加了。如在误比特率为 $10^{-3}$ 时， $\Delta\gamma = 5\text{dB}$ ， $10\text{dB}$ 和 $20\text{dB}$ 获得的分集增益分别约为3dB，5dB和9dB左右。由图3还可看出，WCC-Rep方案在 $\Delta\gamma > 5\text{dB}$ 后才开始获得分

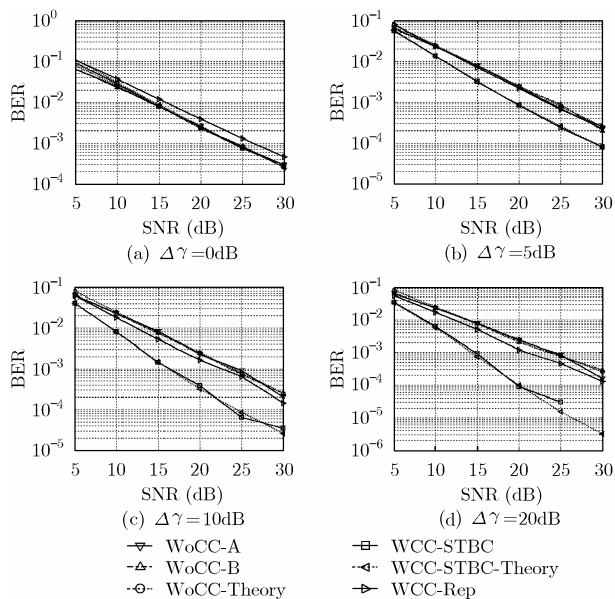


图3 协同通信WCC-STBC系统的误比特率差错性能

$$(\gamma = \gamma_a = \gamma_b, \Delta\gamma = \gamma_0 - \gamma)$$

集增益，WCC-STBC方案在几乎不增加实现复杂度(增加取

共轭运算)的情况下，性能要优于WCC-Rep方案约3–6dB。

图4仿真中假设两用户间的协同信道 $h_0$ 与用户A的信道 $h_1$ 传输特性相同，且优于用户B的信道 $h_2$ ，即有 $\gamma = \gamma_0 = \gamma_a$ ，仍假设A和B等功率发送。图4(a)–4(b)分别给出了 $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_b = 5\text{dB}$ 和 $10\text{dB}$ 时的仿真结果，横坐标为用户A(或协同信道)的信噪比，纵坐标为误比特率。由图可知，WCC-STBC和WCC-Rep协同发送方案均可提升信道条件较差用户(B)的传输性能，相应地信道较好用户(A)的传输性能会稍有降低，但变化不大。如在误比特率为 $2.3 \times 10^{-3}$ ， $\Delta\gamma = 5\text{dB}$ 和 $10\text{dB}$ 时WCC-STBC方案对用户B获得的分集增益分别约为4.5dB和9dB左右，而用户A分别也只损失约0.3dB和1dB左右。另外，在这种情况下，还可以根据用户信道的实际状况自适应地选择是否需要协同通信。

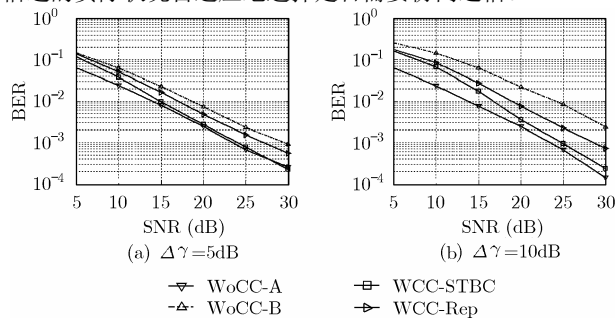


图4 协同通信WCC-STBC系统的误比特率差错性能

$$(\gamma = \gamma_0 = \gamma_a, \Delta\gamma = \gamma - \gamma_b)$$

## 5 结束语

综上所述，本文提出的WCC-STBC协同发送方案可获得分集增益，增益的大小与协同信道及各用户信道的传输特性有关。对于传输特性较差的用户，若能找到一个传输特性较好的用户进行协同通信，则可在较好特性用户的传输性能变化不大的情况下获得分集增益，提高自身的传输特性。实际情况是：蜂窝移动通信中，移动终端虽然属于单发单收，且发射功率有限，但当它们距离较近时，它们之间的协同信道的传输特性还是可以满足条件的。另一方面，本文的研究均基于信道传输特性已知、等功率发送等假设，若再辅之以注水分布功率分配发送、差错控制编码、自适应技术等还可以进一步提高系统的传输性能。

## 参考文献

- [1] Paulraj A, et al. Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [2] 罗涛, 乐光新. 多天线无线通信原理与应用. 北京邮电大学出版社, 2005年11月第1版, 第4–5章.
- [3] Yang Hongwei. A road to future broadband wireless access MIMO-OFDM-based air interface. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(1): 53–60.
- [4] Nosratinia A, et al. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10):

- 74–80.
- [5] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity Part I and Part II. *IEEE Trans. on Commun.*, 2003, 51(11): 1927–1948.
- [6] Janani M, *et al.* Coded cooperation in wireless communications: Space-time transmission and iterative decoding. *IEEE Trans. on Signal. Processing.*, 2004, 52(2): 362–371.
- [7] Laneman J N and Wornell G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 2003, 49(10): 2415–2425.
- [8] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(8): 1451–1458.
- [9] Proakis J G. *Digital Communication*, Third Edition. New York: McGraw-Hill, 1995, Chapter14: 772–775.
- [10] 罗涛, 李祥明, 乐光新. 正交空时分组码最大比率合并接收组合形式的配方方法. *电子与信息学报*, 2002, 24(4): 473–478.
- Luo Tao, Li Xiang-ming, and Le Guang-xin. A souaring method of the maximal-ratio receive combining scheme for orthogonal space-time block codes. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2002, 24(4): 473–478.
- [11] 滕勇等. 瑞利相关衰落下 MIMO 系统的差错率分析. *重庆邮电学院学报*, 2003, 15(3): 80–83.
- 罗涛: 男, 1971年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为基于多天线、多载波的未来无线移动通信系统的理论及其关键技术的研究.
- 李祥明: 男, 1970年生, 博士, 主要研究方向为编码、调制及其高速信息网络的研究.
- 王健康: 男, 1974年生, 博士, 现在鼎桥通信技术有限公司工作, 主要研究方向为智能天线、MIMO 以及 3GPP 的长期演进技术的研究.
- 乐光新: 男, 1937年生, 教授, 主要研究方向为通信理论、数字通信、信息处理及高速信息网络的研究.