

移动通信中基于交互差错的协作发射性能研究

郭金淮 徐晓建 赵雄伟 刘冰 于宏毅
(信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

摘要: 未来移动通信系统中相互独立的多个手机通过协作发射可以获得协作分集的好处。同时,发射端信息交互差错会影响协作发射性能。考虑瑞利衰落信道及基于空时分组码的协作发射方案,该文研究了信息交互差错对分集性能的影响。理论分析及仿真结果表明,当信噪比较高时发射端信息交互差错成为影响接收性能的主要因素,发射端协作手机数大于2时,接收端增加接收天线数可在一定程度上提高接收性能极限。

关键词: 分布式MIMO; 空时分组码; 信息交互差错; 协作发射

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2418-04

Performance Research of Cooperative Transmit with Information Exchange Error in Mobile Communication System

Guo Jin-huai Xu Xiao-jian Zhao Xiong-wei Liu Bing Yu Hong-yi
(Information Engineering Institute Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In future mobile system some independent handsets can obtain the benefits of cooperative diversity by the way of cooperative transmission. At the same time, information exchange error will degrade the performance of cooperative transmission. Considering Rayleigh fading channel and the cooperative transmit scheme based on STBC, the effect of information exchange error on cooperative diversity is researched. Finally, the theory analysis and simulation results show that when the SNR is high information exchange error becomes the main factor that degrades the reception performance, if the number of cooperative handsets is more than two, increasing the number of reception antennas can improve the reception performance boundary in some degree.

Key words: Distributed MIMO; STBC; Information exchange error; Cooperative transmission

1 引言

为了满足人们对无线通信领域日益增长的需求, MIMO系统越来越受到研究者的关注^[1-6], 与SISO系统相比, MIMO系统可以大大改善通信性能。MIMO系统要求收发端有多个天线, 通常情况下, 受体积、功率等因素的限制, 单个节点难以安装多个天线, 多个独立节点可以通过相互协作共享彼此天线的方式提高通信性能, 获得MIMO系统的好处, 从而构成分布式MIMO系统。文献[7]研究了分布式MIMO系统采用不同中继模式时的系统性能。文献[4]针对两个协作用户的情况, 研究了编码协作的好处。能量受限无线传感器网中, 多个传感器节点可以构成分布式MIMO系统完成信号发射与接收, 考虑电路能耗、发射能耗, 当通信距离超过某门限时基于分布式MIMO的通信方式可以降低网络能耗及数据延时^[6], 与SISO相比基于分布式MIMO系统的交互层设计能更好地改善网络能量效率、数据延时性能^[8]。

考虑未来移动通信系统的上行链路, 多个单天线手机用户可以构成分布式MIMO系统, 以协作方式向基站发射信

息。不同手机用户独立分布需要考虑发射端信息交互问题, 而基站可以安装多个天线, 不需要考虑接收端天线间信息交互问题。这样, 考虑发射端手机间信息交互差错而不考虑基站信息交互问题, 本文对协作发射性能进行研究。

文章结构安排如下: 第2节给出了系统模型。第3节研究了交互差错对协作发射性能的影响。第4节描述了本文工作的意义。第5节是结束语。

2 系统模型

(1)考虑发射端信息交互差错、不考虑接收端信息交互问题。为描述方便, 称发射端手机用户为协作节点、接收端基站天线为天线, 信息交互差错用交互误码率来描述。采用基于STBC的协作发射方案。

(2)发射端协作节点编号 $1, 2, \dots, n_T$, 发射符号分别记为 x_1, x_2, \dots, x_{n_T} , 对应统计判决量 $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{n_T}$ 具有相同统计特性, 不失一般性, 后面只讨论 \tilde{x}_1 。某些STBC, 发射符号数不等于发射端协作节点数, 本文只考虑两者相同的情况, 文中分析方法可以扩展到两者不等的情况。

(3)信息交互时, 协作节点 n 接收到协作节点 m 的符号 x_m 完成解码判决后的估计值表示为 x_m^n , 当 $x_m^n \neq x_m$ 时表示

信息交互误码事件发生，对应信息交互误码率 p_e ， $m \neq n$ 且 $m, n \in \{1, 2, \dots, n_T\}$ ，满足 $p_e < 0.5$ 。任意协作节点间信息交互误码事件独立且误码率均为 p_e 。

(4)考虑瑞利衰落信道，发射节点 i 与接收天线 j 之间信道 $h_{i,j}$ 为零均值、独立、圆对称复高斯随机变量，令其方差为 1 以实现信道归一化。假设信道估计理想，采用 BPSK 信号。

3 协作发射性能

考虑发射端交互误码，该节研究基于 STBC 的协作发射性能。首先基于两种简单 STBC 研究交互误码对协作发射性能的影响，然后扩展到一般 STBC 研究交互误码对协作发射性能的影响。

3.1 Alamouti 码

基于该码不考虑协作节点间信息交互误码时，发射矩阵表示为 $\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}$ ，其中 * 表示共轭，矩阵行表示时隙，列表示节点^[9]。考虑协作节点间信息交互误码时，发射矩阵为 $\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^{1*} & x_1^{2*} \end{bmatrix}$ 。

假设接收端有 n_R 个接收天线，不考虑交互误码时，接收端合并后 \tilde{x}_1 的统计结果为

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{n_R} \left[(|h_{1,j}|^2 + |h_{2,j}|^2) x_1 + h_{1,j}^* n_1^j + h_{2,j} n_2^{j*} \right] \quad (1)$$

考虑交互误码时，合并后 \tilde{x}_1 的统计结果表示为

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{n_R} \left[|h_{1,j}|^2 x_1 + |h_{2,j}|^2 x_1^2 + h_{1,j}^* h_{2,j} (x_2 - x_2^1) + h_{1,j}^* n_1^j + h_{2,j} n_2^{j*} \right] \quad (2)$$

其中 n_t^j 表示时隙 t 接收天线 j 处的噪声。

比较式(1)与式(2)知，发射端存在交互误码时，破坏了发射矩阵的正交性，对接收性能造成两方面影响。一是互干扰，是由于交互误码使其它节点的信号不能抵消造成的，式(2)中当 $x_2^1 \neq x_2$ 时会带来互干扰；二是自干扰，原因是交互误码造成信号自身的反向叠加，式(2)中 $x_1^2 \neq x_1$ 时会造成自干扰。

结合式(1)、式(2)，下面分析发射端协作节点间交互误码对协作发射性能的影响：

(1)信噪比较低时，噪声干扰为影响误码性能的主要因素，可以不考虑信息交互误码的影响。

(2)信噪比较高时，噪声可以忽略不计， \tilde{x}_1 整理为

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{n_R} \left[|h_{1,j}|^2 x_1 + |h_{2,j}|^2 x_1^2 + h_{1,j}^* h_{2,j} (x_2 - x_2^1) \right] \quad (3)$$

根据式(3)经过分析可知：当 $x_1^2 \neq x_1$ 时，对应误判概率为 $0.5p_e$ ；当 $x_1^2 = x_1$ 时，发生误判的概率可以忽略。即采用基于 Alamouti 码的协作发射方案时，接收误码性能极限近似为交互误码率的一半，且该结论与接收天线数无关。图 1

为基于 Alamouti 码的协作发射性能比较图，图中针对接收天线数为 1, 2, 3 的情况分别研究了考虑交互误码、不考虑交互误码时的协作发射性能，交互误码率 $p_e = 10^{-3}$ 。

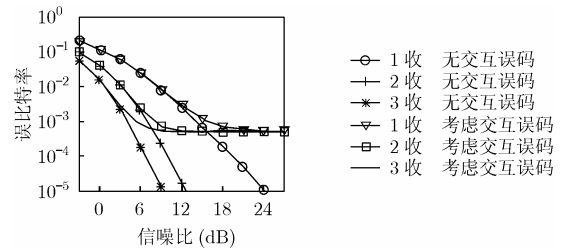


图 1 基于 Alamouti 码的协作发射性能比较

根据图 1 可以看出，信噪比较低时，交互误码对协作发射性能的影响可以忽略。信噪比大于某门限(图中为 15dB)时，交互误码成为限制接收性能提高的瓶颈，随着信噪比的增加，接收性能限制在 5×10^{-4} 左右，为交互误码率的一半，与上述分析一致。

3.2 协作节点数 3 的 STBC

这里采用文献[10]中介绍的速率 3/4 协作节点数 3 的 STBC，接收端有 n_R 个天线。采用类似的分析方法，不考虑交互误码时，合并后 \tilde{x}_1 的统计结果为

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{n_R} \left[(|h_{1,j}|^2 + |h_{2,j}|^2 + |h_{3,j}|^2) x_1 + h_{1,j}^* n_1^j + h_{2,j} n_2^{j*} + h_{3,j} n_3^{j*} \right] \quad (4)$$

考虑交互误码时，合并后 \tilde{x}_1 的统计表达式如下：

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{n_R} \left[|h_{1,j}|^2 x_1 + |h_{2,j}|^2 x_1^2 + |h_{3,j}|^2 x_1^3 + h_{1,j}^* h_{2,j} (x_2 - x_2) + h_{1,j}^* h_{3,j} (x_3 - x_3) + h_{1,j}^* n_1^j + h_{2,j} n_2^{j*} + h_{3,j} n_3^{j*} \right] \quad (5)$$

由式(5)可以看出，信噪比较低时，可以不考虑交互误码带来的影响。信噪比较高时，区别于基于 Alamouti 码的协作发射方案，上述方案采用 3 个协作节点，根据式(5)难以分析直接得到接收误码性能极限，下面通过仿真加以说明。

图 2 为基于上述 STBC 的协作发射性能比较图，图中针对接收天线数目分别为 1、2、3 的情况研究了考虑交互误码、不考虑交互误码时的接收误码性能，交互误码率 $p_e = 10^{-3}$ 。

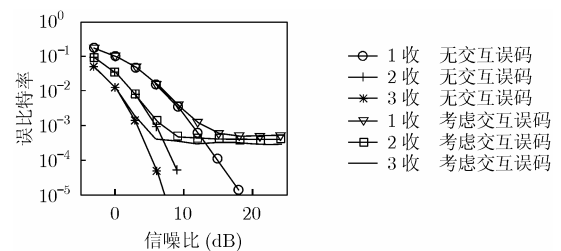


图 2 基于 3 个协作节点 STBC 的协作发射性能比较

由图 2 可以看出，信噪比较低时，交互误码对协作发射

性能的影响较小。信噪比较高时,交互误码成为限制接收性能提高的瓶颈,当信噪比达到某门限时,接收误码率趋于常数,而且随着接收天线数的增加,上述接收误码率常数会降低。即增加接收天线数可以改善接收性能极限,这也是与图 1 不同之处。下面给出基于一般 STBC 的协作发射方案交互误码对接收性能的影响,并对上述现象进行分析。

3.3 一般 STBC

根据 STBC 的性质,发射端有 n_T 个协作节点,接收端有 n_R 接收天线, \tilde{x}_1 的统计表达式如下:

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{n_R} |h_{1,j}|^2 x_1 + \sum_{i=2}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} |h_{i,j}|^2 x_i^i + I + N \quad (6)$$

其中 I 表示交互误码造成的互干扰, N 表示噪声, I 与 N 的表达式由具体 STBC 决定且其均值均为 0。随着信噪比的增加,交互误码的影响变大,信噪比较大时,式(6)改写为

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{n_R} |h_{1,j}|^2 x_1 + \sum_{i=2}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} |h_{i,j}|^2 x_i^i + I \quad (7)$$

$n_T = 2$ 时,前面已经做了分析,这里分析 $n_T \geq 3$ 的情况。

令 $I = 0$, 式(7)进一步整理为

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{n_R} |h_{1,j}|^2 x_1 + \sum_{i=2}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} |h_{i,j}|^2 x_i^i \quad (8)$$

基于式(8),接收天线数与信噪比达到某门限时接收性能的关系分析如下:

根据前面系统模型中描述,式(8)中信道因子可表示为 $h_{ij} = \alpha_{ij} + \Delta \cdot \beta_{ij}$, 其中 $\Delta = \sqrt{-1}$, α_{ij}, β_{ij} 相互独立且均服从均值 0, 方差 σ^2 的高斯分布, $\sigma^2 = 0.5$ 。

不失一般性,令 $x_1 = 1$, 当 x_1^i 有 m 个发生错误时 ($m \leq n_T - 1$), 式(8)可以表示如下:

$$\tilde{x}_{1m} = Ch_{2n_R(n_T-m)} - Ch_{2n_R m} \quad (9)$$

其中 $Ch_{2n_R(n_T-m)}$, $Ch_{2n_R m}$ 分别服从自由度 $2n_R(n_T-m)$, $2n_R m$ 的 χ^2 分布。 x_1^i 中有 m 个发生错误时导致误判的概率,即 $\tilde{x}_{1m} < 0$ 的概率,记为 p_m , x_1^i 中有 m 个发生错误即 $\tilde{x}_1 = \tilde{x}_{1m}$ 的概率记为 Γ_m , Γ_m 服从二项分布, $\Gamma_m = \binom{n_T-1}{m} p_e^m \cdot (1-p_e)^{n_T-1-m}$ 。根据全概率公式,可以得到 $\tilde{x}_1 < 0$ 即发生误判的概率:

$$P = \sum_{m=1}^{n_T-1} \Gamma_m p_m \quad (10)$$

n_T 为奇数时,式(10)整理得:

$$P = \sum_{m=1}^{(n_T-1)/2} (\Gamma_m p_m + \Gamma_{n_T-m} p_{n_T-m}) \quad (11)$$

任取一项 $\Gamma_m p_m + \Gamma_{n_T-m} p_{n_T-m} = \Gamma_{n_T-m} + p_m (\Gamma_m - \Gamma_{n_T-m})$, 经分析知 Γ_{n_T-m} 与 n_R 无关, $\Gamma_m - \Gamma_{n_T-m}$ 总大于 0 且其取值与 n_R 无关。 $p_m = \Pr(Ch_{2n_R(n_T-m)} - Ch_{2n_R m} < 0)$, 结合 m 取值及 χ^2 分布性质,有 $n_R \uparrow, p_m \downarrow$, 因此 $\Gamma_m p_m + \Gamma_{n_T-m} p_{n_T-m}$ 随接收天线的增加而减小,由任意性知式(11)

随接收天线的增加而减小。采用类似方法知该结论亦适用于 n_T 为偶数的情况。即增加接收天线可以改善接收性能极限,分析中没有考虑互干扰,由图 2 知互干扰不会改变该结论正确性,同时互干扰统计特性也是后面的工作。

4 本文工作的意义

对于单天线手机用户来说,为了获得 MIMO 系统的好处,分布式 MIMO 系统是常用的方法。基于分布式 MIMO 的特点,本文研究了基于交互差错的协作发射性能,该问题与诸多因素有关,较为复杂,这里对其做了初步探讨,具体意义有以下两点:

(1)低信噪比条件下,可以不考虑发射端手机用户间交互差错的影响,随着信噪比的提高,交互差错成为影响协作发射性能的主要因素,当信噪比达到某门限时存在接收性能极限,即地板效应。特别地,基于 Alamouti 码的协作发射方案,接收性能极限近似为交互误码率的一半,发射端协作手机用户数大于 2 时增加基站接收天线数可在一定程度上改善接收性能极限。

(2)上面提到发射端协作手机用户数大于 2 时,增加接收天线数可以改善信噪比达到某门限时的接收性能极限,不过该性能改善是受限的,根据式(10),当 $n_R \rightarrow \infty$ 时,有:

$$P = \sum_{m=(n_T+1)/2}^{n_T-1} \Gamma_m, \quad n_T \text{ 为奇数时} \quad (12a)$$

$$P = 0.5 \Gamma_{n_T/2} + \sum_{m=n_T/2+1}^{n_T-1} \Gamma_m, \quad n_T \text{ 为偶数时} \quad (12b)$$

上式表示忽略互干扰且接收天线无穷多时的接收性能,实际接收性能远无法达到式(12)所示,因此,靠增加接收天线数目来克服交互差错的影响是受限的。

由于考虑交互差错时接收性能存在地板效应,某些情况下,协作发射的性能尚不及传统的单节点发射。基于该特性可以选用更为合理的通信方式,比如说,协作手机用户交互差错率较低且手机距基站较远时可考虑采用协作发射方案,协作手机用户间交互差错率较高或手机距基站较近时可采用传统的发射方式。

5 结束语

考虑由多个单天线手机构成的分布式 MIMO 系统,采用基于 STBC 的协作发射方案,本文研究了交互差错对协作发射性能的影响并得到了相关结论,同时,本文研究内容也是一般分布式 MIMO 系统经常遇到的问题。文中研究主要针对未来移动通信系统上行链路,下一步工作可考虑下行链路多个手机用户协作接收的情况,研究接收端手机用户间信息交互方式及其对系统性能的影响。

参考文献

- [1] Driessen P F and Foschini G J. On the capacity formula for multiple input multiple output wireless channels: A geometric

- interpretation. *IEEE Trans. on Commun.*, 1999, 47(2): 173-176.
- [2] Shiu D, Foschini G J, Gans M, and Kahn J M. Fading correlation and its effect on the capacity of multi-element antenna systems. *IEEE Trans. on Commun.*, 2000, 48(3): 502-513.
- [3] Marzetta T L and Hochwald B M. Capacity of a mobile multiple antenna communication link in Rayleigh flat fading. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1999, 45(1): 139-157.
- [4] Hunter T E and Nosratinia A. Performance analysis of coded cooperation diversity. IEEE International Conference on Communications (ICC), Anchorage, AK, May 2003: 2688-2692.
- [5] Tu Y S and Pottie G J. Coherent cooperative transmission from multiple adjacent antennas to a distant stationary antenna through AWGN channels. IEEE VTC Spring 02, Birmingham, Alabama, May 2002: 130-134.
- [6] Cui Shuguang, Goldsmith A J, and Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks. *IEEE J. Select. Areas Commun*, 2004, 22(6): 1089-1098.
- [7] 殷勤业, 张莹, 丁乐等. 协作分集: 一种新的空域分集技术. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 551-557.
Yin Qin-ye, Zhang Ying, and Ding Le, *et al.*. Cooperation diversity: A new spatial diversity technique. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 39(6): 551-557.
- [8] Cui Shuguang and Goldsmith A J. Cross-layer design in energy-constrained networks using cooperative MIMO techniques. EURASIP's Signal Processing Journal, Special Issue on Advances in Signal Processing-based Cross-layer Designs, Aug 2006, vol. 86: 1804-1814.
- [9] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [10] Hochwald B, Marzetta T L, and Papadias C B. A transmitter diversity scheme for wideband CDMA systems based on space-time spreading. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2001, 19(1): 48-60.
- 郭金淮: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网节能通信及分布式协作通信.
- 徐晓建: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为分布式 MIMO 及无线网络交互层设计.
- 赵雄伟: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为 Ad-hoc 网络、协作通信.
- 刘冰: 男, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为基于分布式 MIMO 的协作通信.
- 于宏毅: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 从事信号处理、自组织网及传感器网的研究.