

LDPC编码与空时编码相结合的编码协作方法

雷维嘉¹, 谢显中², 李广军¹

(1. 电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054; 2. 重庆邮电大学个人通信研究所 重庆 南岸区 400065)

【摘要】采用多天线技术是对抗无线信道衰落的有效手段,但在无线通信系统的用户终端上实现多天线技术较为困难。在单天线的用户间通过协作,共享天线,可以实现虚拟的多天线。利用LDPC编码码字内码元间的相关性,通过在用户间进行协作,对编码码字的一部分进行空时编码,并由多个用户的天线进行发送,可以实现虚拟的MIMO系统,从而获得分集增益。仿真结果显示,在不增加系统带宽和发射功率的条件下,编码协作能显著提高快衰落和慢衰落信道下系统的性能。

关键词 编码协作; 分集; 衰落; LDPC编码; 多输入多输出; 空时编码
中图分类号 TN911.22 **文献标识码** A

Code Cooperation by Using LDPC Code and Space-Time Code

LEI Wei-jia¹, XIE Xian-zhong², and LI Guang-jun¹

(1. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;
2. Institute of Personal Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications Nan'an Chongqing 400065)

Abstract Cooperative communication allows the sharing of antennas among single antenna wireless terminals, and thus can create a virtual multi-antenna system. Because of the strong coherence among the symbols of the LDPC code word, a virtual multiple input multiple output (MIMO) system can be created to obtain space diversity gain by encoding the parts of the symbols of a LDPC code word using space-time code and transmitting them via different users' antennas. By using such a code cooperation method, the system performance can be improved effectively without increasing the transmitting bandwidth or power.

Key words code cooperation; diversity; fading; LDPC code; MIMO; space-time code

在无线通信系统中,信道衰落是影响系统性能的重要因素,而分集技术是对抗衰落的有效手段。采用多发送多接收天线的MIMO系统通过空间分集能大幅度地提升系统的性能^[1-2]。但在无线通信系统的终端设备上实现多天线较为困难。协作通信是以在终端设备间进行协作的方式来实现虚拟的多天线。常见的协作通信方式主要有放大-转发、检测-转发、编码协作3种^[3]。在文献[4]中提出了一种利用低密度奇偶校验编码(LDPC)进行编码协作的方法。以蜂窝系统中两用户间的协作为例,协作状态下用户数据的发送分为两个阶段:(1)用户将要发送的数据进行第一次编码并发送。(2)接收协作伙伴发送的数据并译码,如译码正确,则采用系统码的形式对协作伙伴的数据进行第二次编码,生成校验位并发送给基站;如译码错误,则对自己的数据进行编码、生成校验位并发送。基站接收到的同一用户的

编码码字的不同部分是由不同的用户发送的,由于码字内部的相关性,能获得空间分集增益。仿真结果表明,在慢衰落环境下,这种协作方式能在不增加系统带宽和功耗的情况下显著提升系统性能。但在快衰落信道下,由于发送码字前后两部分时信道衰落的相关性已经很小,因此这种方法对系统性能的改善并不大。文献[5]研究了基于卷积码的编码协作方法,也得到了类似的结论。本文将LDPC编码与空时编码相结合,提出一种新的编码协作方法,该方法不论是在快衰落还是在慢衰落环境下,都能在不增加系统带宽和发送功率的情况下有效地改善系统性能。

1 原理和方法

用户间的协作分成两个阶段:(1)按码率 R_1 对长度为 K 的信息位进行LDPC编码,得到长度为 $N_1 = K/R_1$ 的码字并发送。基站和协作伙伴均接收这一部

收稿日期: 2007-09-12; 修回日期: 2008-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(60872037); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ080508)

作者简介: 雷维嘉(1969-),男,博士生,副教授,主要从事无线通信传输技术方面的研究。

分数据。为避免出现误码扩散,用户需要对合作伙伴的数据进行译码,在协作双方都正确译出对方数据的情况下才进入协作状态。(2)在协作状态下,用户采用系统码的形式,以码率 R_2 分别对自己和协作伙伴的数据进行第二次编码,生成长度为 $N = N_1/R_2 = K/R_1R_2 = K/R$ 的码字, $R=R_1R_2$ 为总码率,校验位长度为 $N_2=N-N_1$ 。随后与协作伙伴协同对两用户的校验位进行空时编码并发送。发送时,使用自己的信道发送自己的校验位,使用对方的信道发送伙伴的校验位,各占一半的功率。而如果协作用户中任一方译码不正确,则不进行协作,第二阶段只生成自己的校验位,用自己的信道以全功率发送。图1是协作状态下用户发送数据的示意图。这里的信道指用户占用的时隙(TDMA)、频带(FDMA)或扩频码(CDMA),用户 i 天线-用户 j 信道意为由用户 i 的天线发送,但使用用户 j 的信道。为分析简单起见,采用文献[6]的方法进行空时编码,考虑基站设置一个和两个天线的情况。

	阶段 1	阶段 2
用户1 天线	用户1信道, 用户1数据 N_1 比特, 功率 P	用户1信道, 用户1数据 N_2 比特, 功率 $P/2$ 用户2信道, 用户2数据 N_2 比特, 功率 $P/2$
用户2 天线	用户2信道, 用户2数据 N_1 比特, 功率 P	用户2信道, 用户2数据 N_2 比特, 功率 $P/2$ 用户1信道, 用户1数据 N_2 比特, 功率 $P/2$

图1 协作过程

1.1 基站一个天线

图2是基站设置一个天线时第二阶段数据发送的模型。其中符号的上标表示时刻或顺序; s_i^m 表示用户 i 的第 m 个符号; n_i^m 表示 i 用户信道上 m 时刻的噪声; r_i^m 表示基站在 i 用户信道上 m 时刻接收到的信号; h_{ij} 表示使用用户 i 的信道,从用户 j 的天线到基站天线间的信道增益。实线和虚线分别表示用户1和用户2的数据传送。

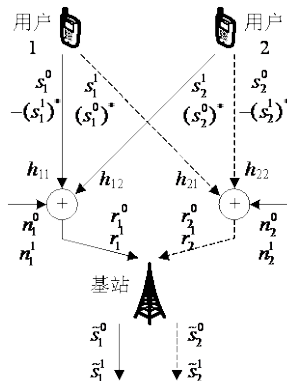


图2 第二阶段数据发送模型(基站一天线)

当两用户均正确译出对方第一阶段发送的数据后,进入协作状态,生成对方和自己的 N_2 比特校验位。每两个符号为一组,以空时码^[6]进行编码并发送。用户 i 天线-用户 i 信道和用户 j 天线-用户 i 信道为一组,传送用户 i 的数据, $i, j=1, 2, i \neq j$ 。假设信道特性在连续的两个符号周期内保持不变,则基站接收到的数据为:

$$\begin{bmatrix} r_1^0 \\ r_1^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1^0 & s_1^1 \\ -(s_1^1)^* & (s_1^0)^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^0 \\ n_1^1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} r_2^0 \\ r_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_2^0 & s_2^1 \\ -(s_2^1)^* & (s_2^0)^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{22} \\ h_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_2^0 \\ n_2^1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 n_i^m 是均值为零、方差为 σ_n^2 的复高斯白噪声, $i \in \{1, 2\}, m \in \{0, 1\}$ 。若基站已知信道特性,将天线上接收到的信号进行组合后得到:

$$\begin{bmatrix} \tilde{s}_1^0 \\ \tilde{s}_1^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}^* & h_{12} \\ h_{12}^* & -h_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1^0 \\ (r_1^1)^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2)s_1^0 + h_{11}^*n_1^0 + h_{12}(n_1^1)^* \\ (|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2)s_1^1 + h_{12}^*n_1^0 - h_{11}(n_1^1)^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{s}_2^0 \\ \tilde{s}_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{22}^* & h_{21} \\ h_{21}^* & -h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_2^0 \\ (r_2^1)^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (|h_{22}|^2 + |h_{21}|^2)s_2^0 + h_{22}^*n_2^0 + h_{21}(n_2^1)^* \\ (|h_{22}|^2 + |h_{21}|^2)s_2^1 + h_{21}^*n_2^0 - h_{22}(n_2^1)^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

组合后的信号 \tilde{s}_i^m 是均值为 $(|h_{i1}|^2 + |h_{i2}|^2)s_i^m$ 、方差为 $(|h_{i1}|^2 + |h_{i2}|^2)\sigma_n^2$ 的复高斯随机变量。由于LDPC编码采用概率译码,故不进行判决,而是根据 s_i^m 的先验概率和 \tilde{s}_i^m 的值计算出 \tilde{s}_i^m 的后验概率。基站将这 N_2 个符号的后验概率与在第一阶段接收到的 N_1 个符号的后验概率组合在一起,进行第二次LDPC编码的和-积译码^[7-8]。若译码有错,则将译码后前 N_1 个符号的概率传递给第一次LDPC编码的译码程序,进行第二次译码,最终获得长度为 K 的信息位。

1.2 基站两个天线

图3是基站设置两个天线时第二阶段数据发送的模型。使用符号的上下标含义与图2类似,其中 $n_{ik}^m, r_{ik}^m, h_{ijk}$ 中的下标 k 表示基站天线序号。数据的发送过程与基站一个天线时相同,但接收的处理不同。基站天线接收到的信号为:

$$\begin{bmatrix} r_{1k}^0 \\ r_{1k}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1^0 & s_1^1 \\ -(s_1^1)^* & (s_1^0)^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11k} \\ h_{12k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1k}^0 \\ n_{1k}^1 \end{bmatrix} \quad k=1, 2 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} r_{2k}^0 \\ r_{2k}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_2^0 & s_2^1 \\ -(s_2^1)^* & (s_2^0)^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{22k} \\ h_{21k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{2k}^0 \\ n_{2k}^1 \end{bmatrix} \quad k=1, 2 \quad (6)$$

式中 k 表示基站天线序号。基站将两个天线上接收到的信号进行组合后,得到用户1、2的符号为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{s}_1^0 \\ \tilde{s}_1^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{111}^* & h_{121} & h_{112}^* & h_{122} \\ h_{421}^* & -h_{411} & h_{422}^* & -h_{412} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11}^0 \\ (r_{11}^1)^* \\ r_{12}^0 \\ (r_{12}^1)^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{s}_2^0 \\ \tilde{s}_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{221}^* & h_{211} & h_{222}^* & h_{212} \\ h_{211}^* & -h_{221} & h_{212}^* & -h_{222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{21}^0 \\ (r_{21}^1)^* \\ r_{22}^0 \\ (r_{22}^1)^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

在计算出 \tilde{s}_{ij}^m 的后验概率后进行LDPC编码的译码。

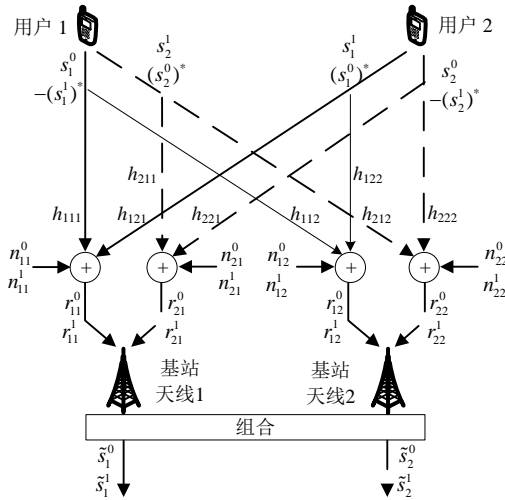


图3 第二阶段数据发送模型(基站两天线)

1.3 实现中要考虑的问题

用户间信道的性能和协作系数 C_C ^[4]的设置对协作系统的性能有较大影响。协作系数定义为编码码字中对方协助发送部分的长度 N_2 与码字长度 N 的比值 $C_C = N_2/N$ 。协作系数 C_C 决定通过空时编码传输部分所占的比例, C_C 越大,分集效果越好。但由于 $N = N_1 + N_2$, $C_C = N_2/N = (N - N_1)/N = 1 - R_2$,在系统总的码率 $R = R_1 R_2$ 不变的前提下,增大 C_C ,则 R_2 减小, R_1 增大,第一次编码的纠错能力下降,导致协作伙伴第一阶段正确译码的概率和系统处于协作状态的比例下降,性能改善也随之下降。因此, C_C 需要根据用户间信道的情况进行设置,在用户间信道较好时, C_C 应设置得大一点;而当用户间信道较差时,适当降低 C_C ,提高第一次编码的纠错能力,有利于提高系统处于协作状态的比例。

为了避免误码扩散影响系统性能,在两个用户都正确译出对方第一阶段发送的数据后才进入协作状态。这要求用户在对方的数据进行译码后向对

方和基站发送一个译码是否正确的指示。这个指示的数据量很小,但要进行很强的差错保护。这会轻微增加系统的复杂度和开销,但相比较由协作带来的性能改善而言是值得的。

2 仿真结果

在基站设置一个和两个天线情况下,分别针对快衰落和慢衰落环境对该协作机制进行仿真。仿真中调制方式为BPSK;假设用户至基站的信道(上行信道)和协作用户间的信道均为瑞利衰落信道;接收方已知信道特性。在快衰落下,两次信道编码均采用二进制LDPC规则码^[7],其中第一次编码码长为 $N_1 = 504$,码率 $R_1 = 2/3$;第二次编码码长为 $N = 1\ 008$,码率 $R_2 = 1/2$;系统的总码率为 $R = R_1 R_2 = 1/3$;协作系数 $C_C = 0.5$;假定信道增益在两个符号周期内保持不变。在慢衰落下,第一次编码采用CRC校验码;第二次编码为码长 $N = 1\ 008$ 、码率 $R_2 = 1/2$ 的二进制LDPC规则码;系统的总码率为 $R \approx R_2 = 1/2$;协作系数 $C_C = 0.5$;假定信道增益在一个LDPC编码码字(1 008个符号)周期内保护不变。

基站设置一个接收天线时,快衰落环境下协作系统的仿真性能如图4所示。5条曲线分别为不协作系统,用户间信道信噪比为5、6、7 dB的协作系统,以及用户间信道为完美信道的协作系统的误码率(BER)随上行信道信噪比(SNR)变化的性能曲线。用户间信道的情况对协作系统的性能有重要的影响,如用户间信道信噪比为5 dB时,协作系统的性能只比非协作系统稍好。而随着用户间信道的改善,系统性能也显著提升。在用户间信道信噪比为7 dB、 $BER = 10^{-6}$ 时,相比较非协作系统,性能改善约为0.75 dB,已经很接近用户间信道为完美信道时的性能(对系统性能的改善约为0.9 dB)。

基站设置一个接收天线时,慢衰落环境下协作系统的仿真性能如图5所示。与快衰落情况下类似,用户间信道的性能对系统的性能有很大的影响。当用户间信道为完美信道、 $BER = 10^{-5}$ 时,相比较非协作系统,协作系统的性能改善达到了12 dB。

基站设置两个天线时,快衰落和慢衰落环境下系统的仿真性能分别如图6、图7所示。当用户间信道为完美信道、 $BER = 10^{-4}$ 时,比较非协作系统,协作系统的性能改善到达了0.3 dB(快衰落)、5.5 dB(慢衰落)。

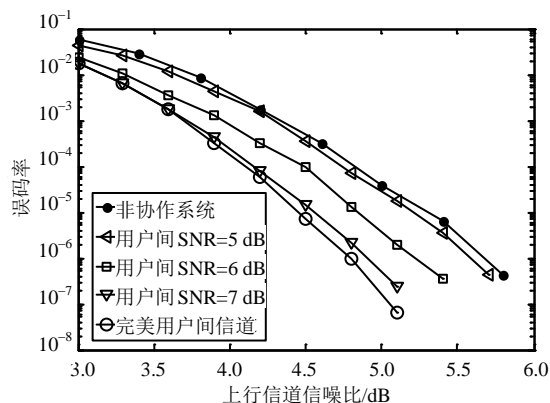


图4 快衰落时的仿真结果(基站一天线)

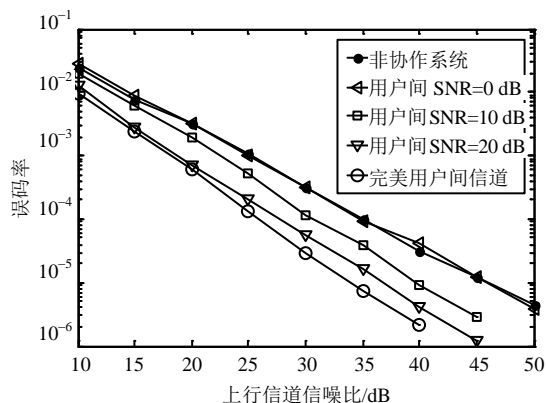


图5 慢衰落时的仿真结果(基站一天线)

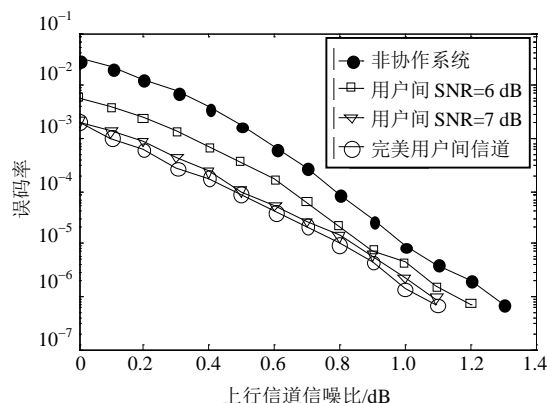


图6 快衰落时的仿真结果(基站两天线)

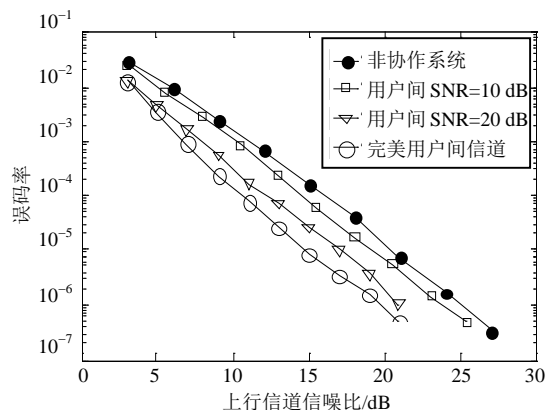


图7 慢衰落时的仿真结果(基站两天线)

3 结论

仿真结果表明, 将LDPC编码与时空编码相结合, 把用户LDPC编码码字中的一部分通过多个用户传输来实现虚拟的多发送天线, 能给系统的性能带来很大的改善。相比较其他协作通信方式, 该方法的优势在于系统占用的带宽和功耗与非协作系统基本相同。本文的分析是针对文献[6]提出的时空编码、两个用户间的协作进行的, 考虑了基站设置一个和两个天线的情况。但本文提出的方法很容易扩展到多用户间的协作、基站拥有多个天线以及采用其他时空编码的情况。另外, 出于提高仿真速度的考虑, 仿真中采用LDPC短规则码, 在实际应用中应使用性能更好的长码、不规则码^[8-10], 同时两次编码应结合起来, 在统一考虑用户间信道的特性、系统总码率, 以及协作系数等因素的影响下进行优化设计, 将能获得更优的性能。

参考文献

- [1] PAULRAJ A J, GORE D A, NABAR R U, et al. An overview of MIMO communications—a key to gigabit wireless[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(2): 198-218.
- [2] 付卫红, 杨小牛, 刘乃安, 等. 宽带无线通信中的MIMO系统[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(2): 176-178, 205. FU Wei-hong, YANG Xiao-niu, LIU Nai-an, et al. MIMO systems in wideband wireless[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(2): 176-178, 205.
- [3] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 74-80.
- [4] 雷维嘉, 谢显中, 李广军. 一种基于LDPC编码的协作通信方式[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 712-715. LEI Wei-jia, XIE Xian-zhong, LI Guang-jun. A cooperative communication method based on LDPC code[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 712-715.
- [5] HUNTER T E, NOSRATINIA A. Diversity through Coded Cooperation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(2): 283-289.
- [6] ALAMOUTI S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [7] GALLAGER R G. Low-density parity-check codes[M]. Cambridge, Mass: MIT Press, 1963: 4-10, 39-48.
- [8] DAVEY M C. Error-correction using low-density parity-check codes[D/OL]. [2002-01-18]. http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mcdavey/papers/davey_phd.html.
- [9] HONARY B, MOINIAN A, AMMAR B. Construction of well-structured quasi-cyclic low-density parity check codes[J]. IEE Communications Proceedings, 2005, 152(6): 1081-1085.
- [10] MYUNG S, YANG K, KIM J. Quasi-cyclic LDPC codes for fast encoding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(8): 2894-2901.