

# 一种基于LDPC编码的协作通信方式

雷维嘉<sup>1</sup>, 谢显中<sup>2</sup>, 李广军<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学通信与信息工程学院, 四川成都 610054; 2. 重庆邮电大学移动通信重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 采用空间分集的方法可以有效地对抗无线信道中的衰落. 由于受到体积、重量、成本等因素的限制, 在无线通信系统的用户终端上实现多天线技术较为困难. 而在单天线的无线用户间通过协作, 共享天线, 可以实现虚拟的多天线. 低密度奇偶校验(LDPC)编码是一种性能优良的线性分组码, 利用其码字内码元间固有的相关性, 通过不同的用户发送码字的不同部分, 可以实现虚拟的多发送天线, 获得发送分集增益, 在不增加系统带宽和发射功率、系统复杂度也不会明显增加的情况下能显著地提高系统性能.

**关键词:** 衰落; 协作通信; 分集; 多天线; LDPC编码; 编码协作

**中图分类号:** TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 04-0712-04

## A Cooperative Communication Method Based on LDPC Code

LEI Wei-jia<sup>1</sup>, XIE Xian-zhong<sup>2</sup>, LI Guang-jun<sup>1</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

2. Key Lab of Mobile Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Spatial diversity is an effective method to resist fading effect in wireless channel. Due to the limitation of size, weight and cost, it is difficult to use the multi-antenna technique on the terminal of wireless communication. Cooperative communication allows the mobile terminals with a single-antenna to share their antennas. Thus virtual multi-antenna can be created to realize transmitting diversity. LDPC code is a good linear block code. Because of the intrinsic coherence among the bits of the code word, we can create virtual multi-antenna and obtain diversity gain by making different users transmit different parts of the code word. Once diversity gain is obtained, the system performance can be improved effectively, without much rise in the system bandwidth and transmitting power, nor would the cost and complexity of the system increase evidently.

**Key words:** fading; cooperative communication; diversity; multi-antenna; low-density parity-check code (LDPC); coded cooperation

## 1 引言

多输入多输出(MIMO)系统通过采用多个发送和多个接收天线的方式来获得空间分集增益, 以对抗无线信道中的衰落, 提升系统性能. 在蜂窝移动通信、无线传感器网络等无线通信系统中, 终端设备由于受到体积、重量、功耗, 以及成本等因素的限制, 实现多天线较为困难. 近年来有学者提出了协作通信的概念, 其核心思想是在只具有单天线的用户间进行协作, 共享它们的天线, 实现虚拟的多发送天线. 一个蜂窝系统中两个用户间进行协作

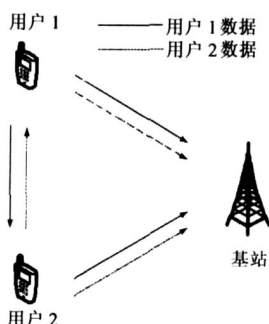


图1 两用户协作通信模型

作通信的模型如图1所示. 参与协作通信的用户间相互称对方为自己的协作伙伴. 每个用户的发送过程分为两个阶段. 第一阶段用户各自向基站发送自己的信号, 同

时接收协作伙伴发送的信号. 第二阶段用户将接收到的协作伙伴的信号经过处理后, 向基站发送. 这个阶段也可以合并本用户的信号进行发送. 如果参与协作的两个用户相距足够远, 则可以认为它们到基站的上行信道是相互独立的, 因而基站收到每个用户信号两个独立的副本, 实现了发送分集. 目前协作通信主要有三种实现方式<sup>[1,2]</sup>:

(1) 放大-转发方式. 用户将在第一阶段接收到的协作伙伴的信号简单地放大后发送给基站.

(2) 检测-转发方式. 用户在收到协作用户的信号后, 对其进行检测和估计, 尝试恢复出原始信号, 并将其发送给基站.

(3) 编码协作方式. 这种方式下, 用户不是重复发送协作用户的信号, 而是利用编码的特点, 分别发送码字的不同部分. 由于编码码字内部不同部分间固有的相关性, 若基站是通过相互独立的信道接收到码字的不同部分, 也就意味着每个码字携带的信息是通过两个信道传送的, 因此也能实现发送分集. 从信息论的角度来看,

收稿日期: 2006-05-16; 修回日期: 2007-01-21

基金项目: 重庆市自然科学基金(No. CSTC2006BB2363); 教育部留学回国人员科研启动基金(No. [2005]383); 重庆市留学回国人员科技活动择优资助项目

在信道的利用上,编码协作方式要优于前两种方式.这种协作方式可以采用现有的信道编码,包括线性分组码和卷积码,也可以设计专用的编码来实现.编码的性能越好,码字内部的相关性越强,则编码协作的性能也越好.

低密度奇偶校验(LDPC)编码具有优异的性能,在长码的情况下达到甚至超过了 Turbo 码的性能.同时由于其是一种线性分组码,相比 Turbo 码而言,在译码上具有潜在的速度优势.用 LDPC 编码来进行编码协作通信,可在不明显增加系统带宽和发送功率的情况下,利用 LDPC 编码在纠错能力上的性能优势,能获得可观的分集增益,有效地提升系统性能,而系统设备的成本和复杂度并不会会有明显的增加.

本文的第二部分介绍基于 LDPC 编码的协作通信的原理和实现方法,第三部分是仿真的结果,最后是全文的总结.

## 2 基本原理

这里考虑蜂窝系统中两个用户间采用 LDPC 编码进行编码协作通信的情况,其模型如图 1 所示.设编码总的码率为  $R = R_1 R_2$ ,码长为  $N$ ,信息位长为  $K = RN$ .将一个码字分为两个部分,长度分别为  $N_1$ 、 $N_2$ ,  $N = N_1 + N_2$ .编码时先按码率  $R_1$  对信息位进行第一次编码,得到长度为  $N_1 = K/R_1$  的码字,作为协作通信时第一阶段发送的数据.协作伙伴在收到这一部分的数据后,对其进行译码.如果译码正确,则按码率  $R_2$ ,并采用系统码的形式对译码结果进行第二次编码,生成长度为  $N = N_1/R_2 = K/R_1 R_2 = K/R$  的码字.其中,第二次编码码字的校验位长度为  $N_2 = N - N_1 = (1/R_2 - 1)K/R_1$ ,作为第二阶段的数据发送到基站.如果译码不正确,则直接按第二次编码的规则对自己第一阶段发送的数据进

行编码并发送其校验位.因此每个用户发送的数据总长度恒为  $N = N_1 + N_2$ .

编码协作中,第一次编码是为了使信息能更可靠地为协作伙伴接收,同时使协作伙伴能够对接收的数据是否正确进行判断,避免出现误码扩散.第二次编码是实现分集的关键.如果编码的纠错能力越强,码字内部码元间的相关性越高,那么一个码字通过相互独立的多个信道传输所能获得的分集效果也就越好.由于 LDPC 码具有优异的性能,因此两次编码均选择使用 LDPC 编码.一种特殊的情况是当用户间信道性能较好时,用户第一阶段发送的数据可以采用 CRC 校验,协作伙伴只进行检错,不进行纠错.现在很多无线通信系统中的数据链路层或媒体接入控制(MAC)子层为了实现差错检测-反馈重发功能,都在其发送的数据块中加入了 CRC 校验位.进行编码协作通信时可利用这一特点,不再进行第一次编码.这样可以提高系统码率.

考虑两用户间是否正确译出对方第一阶段发送的数据,可将协作通信分为下面 4 种情况,如图 2 所示.

情况 1:协作双方均正确地译出对方第一阶段发送的数据,第二阶段两用户均发送对方的校验位.此为完全协作通信情况,如图 2(a) 所示.

情况 2:协作双方均未能正确地译出对方第一阶段发送的数据,第二阶段两用户均发送自己的校验位.此为不协作通信情况,如图 2(b) 所示.

情况 3:用户 1 正确地译出了用户 2 第一阶段发送的数据,但用户 2 未能正确地译出用户 1 发送的数据.第二阶段用户 1 和用户 2 均发送用户 2 的校验位.此为部分协作通信情况,如图 2(c) 所示.

情况 4:与情况 3 类似,只是用户 1 和用户 2 互换了位置.如图 2(d) 所示.

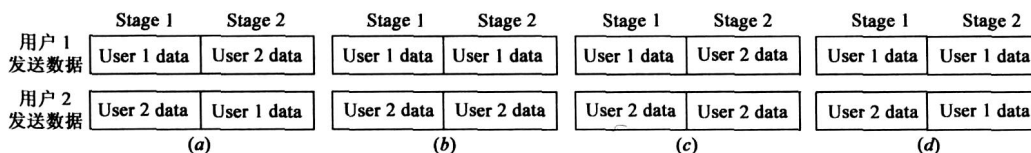


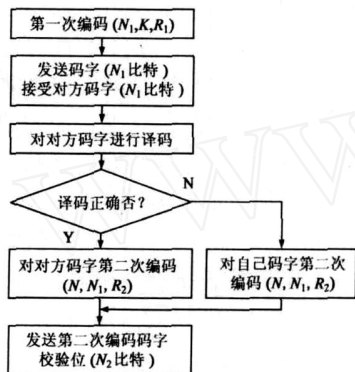
图 2 编码协作通信的四种情况

在接收端(即基站),在情况 1 和情况 2 下,只需简单地将第一阶段和第二阶段接收到的数据按用户简单地进行装配,然后就可以按照正常的译码方式进行第一次译码,译出用户第一阶段发送的长为  $N_1$  的数据.然后再进行第二次译码,译出长为  $K$  的信息位.在情况 3 下,基站没有接收到用户 1 第二次编码的校验位,因此只进行第二次译码.同时,基站接收到了用户 2 第二次编码校验位的两个独立的副本,基站采用最佳组合方式对其进行组合,然后如情况 1、2 进行两次译码.情况 4 与情况 3 类似,只是用户 1 和用户 2 互换位置.

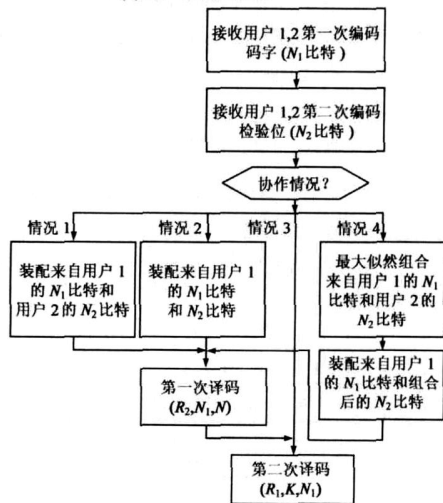
图 3 是协作通信过程中编、解码的流程图.其中(a)是发送方(终端用户)的编码流程,(b)是接收方(基站)的解码流程.图 3(b)中只画出了对用户 1 的解码过程,对用户 2 的解码过程类似,只是对情况 3 和情况 4 的处理作一下掉换.

定义协作系数为  $C_c = N_2/N = 1 - R_2$ ,表示协作的程度,也就是由协作伙伴发送的数据占总数据的比例,  $C_c < 0.5$ .在保持总的码率  $R$  不变的情况下,协作系数  $C_c$  减小,  $R_2$  增大,这意味着协作程度降低;但另一方面  $R_1$  减小,意味着对方能正确译出第一次编码的概率增

加,处于协作状态的概率也增加.因此,协作系数的设置将会对系统的性能有较大的影响,应根据用户间信道的情况进行设置.如果用户间的信道较好,那么将协作系数设置在 0.5 附近将能获得较好的性能;而如果用户间的信道较差,那么适当地降低协作系数更为有利.另外,如果两用户的上行信道性能有较大差距时,通过协作,上行信道较好的用户能通过牺牲自己的一部分性能来帮助上行信道较差的用户大幅提高性能.即协作通信能够平衡两用户的性能,缩小性能差距.在这种情况下,协作系数能在一定程度上控制调节的力度,较大的协作系数有较大的调节能力.



(a) 用户端编码流程



(b) 基站解码流程 (对用户 1)

图 3 编、解码流程

在进行编码协作通信时,协作用户间不需要专门的反馈信道控制协作.当用户不能正确译出对方的数据时就转为不协作状态,因此不会产生误码扩散、导致系统性能的恶化,协作通信系统的性能始终不会低于非协作通信系统的性能.相对于放大-转发和检测-转发协作方式在用户间信道很差时会产生严重的误码扩散,并导致系统性能的急剧恶化而低于非协作通信的性能,编码协作在这方面具有明显的优势.但这里带来的一个问题是基站需要知道用户在第二阶段发送的是

哪个用户的数据,这需要由用户为基站提供一个指示,而且对这个指示必须进行很强的差错保护,以免因该指示出错而造成基站译码的严重错误.这会在一定程度上增加系统的开销,但不会对系统的性能和复杂度带来大的影响.

当用户间信道是对称信道时,通过对协作通信的 4 种情况进行分析,可以知道在用户间信道性能较好的情况下,系统多处于情况 1 下,能获得较完全的分集增益.当用户间信道性能很差时,系统多处于情况 2 下,基本未进行协作通信,系统与非协作通信的性能相当.当用户间信道性能介于前两者之间时,系统可处于 4 种情况下,进行部分协作通信,性能也介于前两者之间,可获得部分分集增益.

### 3 仿真结果

为验证基于 LDPC 编码的编码协作通信的性能,我们进行了仿真.仿真在以下假设条件下进行:协作用户间信道和用户到基站的上行信道为瑞利衰落信道,衰落系数在一个码字长度时间内保持不变;接收端已知信道特性(对于基站而言是用户到基站的上行信道特性,对于用户而言是用户间信道特性);用户能够正确判断第一阶段接收到的数据是否正确(这对于信息数据块中已包含 CRC 检验位而言是合理的),不进行第一次编码.选择码长  $N = 504$ 、码率  $R = 0.5$  的二进制 LDPC 规则码<sup>[3]</sup>进行协作通信,并采用系统码的形式, BPSK 调制.仿真针对两用户间进行协作通信的情况进行,其模型如图 1 所示. LDPC 编码的译码采用和-积译码算法<sup>[3,4]</sup>,协作系数  $C_c = 1 - R = 0.5$ .

图 4 是两用户上行信道信噪比完全相同时的仿真结果.由于两用户具有完全相同的性能,因此图中只画出其中一个用户的仿真结果.图中的 4 条曲线分别是用户间信道信噪比为 0dB、10dB、20dB,以及非协作通信时的仿真结果.从图中可以看出,在用户间具有较好的信道时,可获得明显的性能改善,分集增益随着上行链路信噪比的改善而增加.如当用户间信道信噪比为 20dB、误比特率 (BER) =  $10^{-4}$  时约有 5.5dB 的分集增益.当用户间信道变差时,系统的性能也相应有所下降,但仍能获得一定的分集增益.如当用户间信道信噪比为 10dB、BER =  $10^{-4}$  时约有 3dB 的分集增益.当用户间信道很差时,系统的性能与非协作通信非常接近,如图中用户间信道信噪比为 0dB 的曲线所示.这与我们的预期十分吻合.

图 5 是两用户上行信道信噪比不相同时的仿真结果.其中,用户 2 的上行信道信噪比恒定为 30dB,用户间信道信噪比为 20dB.用户 1 在上行信道比用户 2 差的情况下(即 30dB 以下)时能获得很大的性能改善,如

在  $BER = 10^{-3}$  时约有 7.5dB 的分集增益,  $BER = 10^{-4}$  时约有 6.5dB 的分集增益. 尽管用户 1 的上行信道较用户 2 差,但在信噪比差值小于 11.5dB 以下(即用户 1 的信噪比大于 18.5dB)时用户 2 仍能从协作通信中获得性能改善,并随着用户 1 上行信道信噪比的改善而增加,如在用户 1 上行信道信噪比为 24dB 时用户 2 的  $BER = 1.22 \times 10^{-4}$ ,而在非协作通信时要达到这个 BER,用户 2 的上行信道信噪比须达到约 33dB,这说明用户 2 获得了约 3dB 的增益(用户 2 的上行信道信噪比固定为 30dB);在用户 1 上行信道信噪比为 28dB 时,用户 2 的  $BER = 7.58 \times 10^{-5}$ ,在非协作通信时达到这个 BER 时的上行信道信噪比约为 35dB,因此用户 2 获得了约 5dB 的增益. 当用户 1 的上行信道信噪比达到 30dB 以上时,其性能已经好于用户 2 的上行信道性能,用户 1 从协作中的获益减少,而用户 2 的获益增加并超过了用户 1. 这说明在协作用户上行信道信噪比不相同的情况下,通过编码协作通信,信噪比好的用户能显著地帮助信噪比差的用户提高性能,同时除在对方上行信道信噪比很差的情况下性能会有所损失外,自身也能通过协作通信受益. 这使系统的整体性能得到了显著改善.

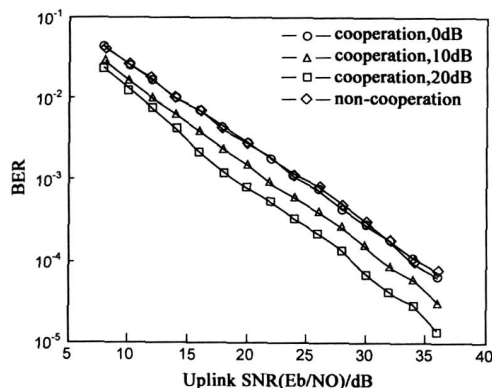


图 4 编码协作通信性能(瑞利衰落信道,用户上行信道信噪比不同)

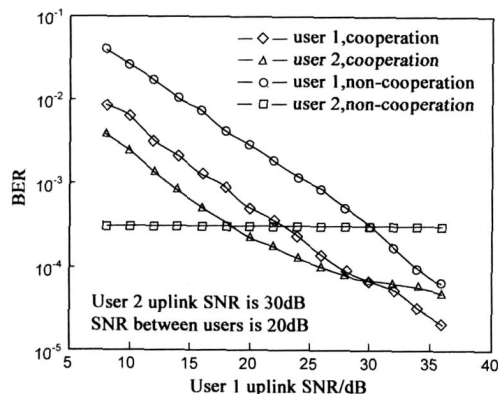


图 5 编码协作通信性能(瑞利衰落信道,用户上行信道信噪比不同)

## 4 总结

通过分析和仿真,证明基于 LDPC 编码的协作通信可以有效地提升系统的性能,而付出的代价主要是终端用户需要接收协作伙伴第一阶段发送的数据并译码,然后进行第二次编码. 系统占用的带宽和发送功耗并未增加. 比较采用放大-转发和检测-转发两种重复发送方式的协作机制,编码协作在带宽效率、发送功率,以及误码扩散等问题上具有明显的优势.

本文提出的编码协作通信机制也可采用其它线性分组码,并且两次编码可以采用不同的编码方案. Hunter 研究了基于卷积码和 Turbo 码的编码协作通信方式<sup>[2]</sup>,其研究结果也表明编码协作能给系统性能带来很大的提升. 考虑到 LDPC 编码是一种线性分组码,其译码相对卷积码而言具有一定速度上的优势,而且在长码的情况其性能可以媲美 Turbo 码. 因而利用 LDPC 编码来进行编码协作具有很大的潜力.

基于 LDPC 编码的编码协作通信尚有大量的研究工作需要进行:当两用户上行信道不相同,可以采取适当的功率分配策略来提升系统性能;当两用户采用不同的调制机制或不同的传输速率时的协作机制;将空时编码引入到协作的第二阶段中,并在接收端采用多天线,构成 MIMO 系统等. 另外,要获得更好的性能,仅在两个用户间进行协作显然是不够的,多用户间的协作通信机制也是一个重要的研究内容.

## 参考文献:

- [1] A Nosratinia, T E Hunter, A Hedayat. Cooperative communication in wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 74 - 80.
- [2] T E Hunter. Coded Cooperation: A New Framework for User Cooperation in Wireless Networks [D/OL]. The University of Texas at Dallas, 2004. [http://www.utdallas.edu/~aria/mcl/theses/hunter\\_thesis.pdf](http://www.utdallas.edu/~aria/mcl/theses/hunter_thesis.pdf).
- [3] R G Gallager. Low-Density Parity-Check Codes [M]. Cambridge, Mass, MIT Press, 1963: Chapter 1, 4.
- [4] M C Davey. Error-correction using Low-Density Parity-Check Codes [D/OL]. University of Cambridge, 1999. [http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mcdavey/papers/davey\\_phd.html](http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mcdavey/papers/davey_phd.html).

## 作者简介:



雷维嘉 男, 1969 年生于云南元谋, 副教授, 1992 年、1999 年分别于重庆邮电学院和北京邮电大学获学士和硕士学位, 现为电子科技大学在读博士生. 主要研究方向为无线通信技术. E-mail: leiweijia@21cn.com