

一种基于 Turbo 乘积码的编码协作通信方式

孙岳 朱文凯 王新梅

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

摘要 提出了一种新的基于 Turbo 乘积码的编码协作通信方式。两个单天线用户通过共享自己的天线,形成一个虚拟的多天线系统,乘积码字的不同部分通过不同用户的上行衰落链路传输到基站,获得分集增益,来抵抗无线信道中衰落的影响。在相同的系统带宽和发送功率下,与非协作通信方式相比,该编码协作方式可显著提高系统的性能。

关键词 协作通信,传输分集,衰落,Turbo 乘积码

中图分类号 TN911 **文献标识码** A

Coded Cooperative Communication Scheme on Turbo Product Code

SUN Yue ZHU Wen-kai WANG Xin-mei

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract A novel cooperative coding communication scheme in use of Turbo Product Code was presented. A virtual multi-antenna system was created by two mobile terminals with a single-antenna. Different parts of the product code word were transmitted to the base station through different users' uplink fading channels to obtain diversity gain. This scheme can effectively resist the fading effect in wireless channel. Compared with non-cooperative scheme, the system performance can be improved effectively in the same system bandwidth and transmitting power.

Keywords Cooperative communication, Transmit diversity, Fading, Turbo product code

1 引言

协作分集被广泛认为是一种抵抗移动信道中衰落影响的有效方式。一个协作传输系统通常由多个移动终端构成,它们相互中继彼此的信息。单天线用户通过共享自己的天线和其它无线资源,可构成一个虚拟的多天线协作系统,从而克服移动终端由于受到体积、重量、成本等因素的限制,无法实现多天线技术的困难。

在以前的研究中, Nosratinia 等^[1]第一个研究了基于 RCPC 码的编码协作通信,证明了将经典的信道编码和协作系统相结合,在各种信道状态下可显著改善系统的性能,并对编码协作通信的理论性能进行了分析^[2,3]。分布式 Turbo 码和删余 Turbo 码也在协作通信中得到了应用^[4]。Cao 研究了基于串行级联卷积码的编码协作通信系统的性能^[5]。最近 Pyndiah 研究了编码协作通信下的 LDPC 码的设计问题^[6]。将网络编码与协作通信相结合也可有效地改善系统性能^[7]。

Turbo 乘积码是一种接近信道容量的高效纠错编码技术,其不但可以纠正随机错误,而且可以纠正信道的突发错误。在高码率和加性高斯白噪声信道中, Turbo 乘积码比相同码率的 Turbo 码更加接近 Shannon 信道编码定理的理论极限,具有比 Turbo 码更好的渐进性能。针对 Turbo 乘积码的基于修正 Chase 算法的迭代译码方法具有复杂性较小、对

译码过程中的有限字长效应不敏感,译码无需估计信道的增益和噪声方差等优点^[8],为 Turbo 乘积码在无线通信系统中的应用提供了极大的方便。

本文第 2 节介绍了基于 Turbo 乘积码的协作通信的原理和实现方法,第 3 节是该编码协作方式在瑞利慢衰落信道下的仿真结果,最后是全文的总结。

2 协作原理和系统模型

这里考虑两个移动用户 (User 1 和 User 2) 与基站 (Base Station) 间进行编码协作通信的情况,其模型如图 1 所示。该无线系统可以是一个无线蜂窝网络、无线局域网或者是一个 ad hoc 网络。构建这样一个系统的基本思想是使得每一个用户所发送的码字经过两个不同的衰落路径到达基站,以获得发送分集。每一个用户具有一个发射器和一个接收器,但是不能同时发射和接收。我们采用基于 TDMA 的信道分配方式。在非协作通信模式下,分配给每一个用户的时隙长度为 N 个编码比特数据发送时间长度,两用户按次序依次传输数据。每一用户将自己的数据分成长为 K 的数据块,数据块附有一定的循环冗余 (CRC) 比特,然后进行编码,生成长为 N 的码字。协作通信模式采用与非协作通信模式相同的信息发送速率和平均功率消耗。协作模式下,每一个用户将自己的时隙划分成两阶段,相应地将码长为 N 的一个码字分成

到稿日期:2008-07-09 返修日期:2008-10-06 本文受国家“863”计划资助项目(2007AA01Z215),高等学校学科创新引智计划资助项目(B08038)资助。

孙岳(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为协作通信和网络编码,E-mail:ysun@mail.xidian.edu.cn;朱文凯(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为 MIMO 和 OFDM 技术;王新梅(1937-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为纠错编码和密码学。

长度分别为 N_1 和 N_2 的两部分进行传输 ($N = N_1 + N_2$)。用户在第一阶段将自己的长度为 N_1 的数据进行广播。协作用户在收到这一部分数据后,对其进行译码。如果译码正确(通过检验 CRC 来确定),对译码结果重新编码,得到相应码字的第二部分, N_2 长数据,将其在第二阶段发送到基站。如果译码不正确,协作用户转为非协作模式,将自己码字的第二部分发送到基站。基站对两阶段的数据进行合并,这样每一用户发送的数据长度为 $N = N_1 + N_2$,与非协作模式一致。令 $C_c = N_2/N$ 表示协作系统的协作程度。图 1 描述了编码协作模式的操作过程。通过编码协作可以避免传统的检测-转发协作通信模式中协作用户错误检测造成的错误传播等缺点。此外还可根据信道状态的动态变化,调整编码协作系数 C_c ,即协作用户之间以及用户和基站之间的编码速率,来改善整个协作系统的性能。

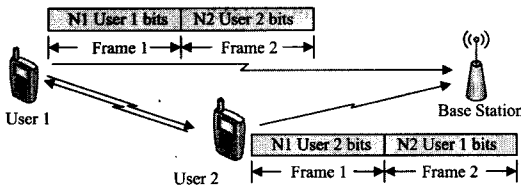


图 1 协作通信模型

乘积码 $P = C_1 \otimes C_2$ 的构造方法如图 2 所示,它由两个系统分组码 C_1 和 C_2 (参数分别为 $(n_i, k_i, d_i), i \in \{1, 2\}$) 分别对信息矩阵依次按行和列进行编码构成。在协作通信的第一阶段,用户对自己的信息矩阵 I 的 k_1 行按码 C_2 进行逐行编码,得到 $I + P_1$,进行广播。协作用户接收到该数据后进行译码,如果能正确译码,则对恢复得到的编码矩阵 $I + P_1$ 的 n_2 列按码 C_1 进行逐列编码,得到校验块 P_2 和 P_3 ,然后将 $P_2 + P_3$ 发送到基站。基站通过将两个不同的上行链路传输的数据块进行合并得到一个完整的乘积码 $I + P_1 + P_2 + P_3$,然后依次按行和列进行迭代译码。整个系统总的码率为 $N = n_1 \times n_2$,编码协作系数为 $C_c = N_2/N = ((n_1 - k_1) \cdot n_2) / (n_1 \cdot n_2) = 1 - k_1/n_1$ 。

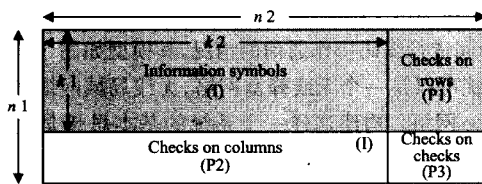


图 2 乘积码的构造

这里系统采用 BPSK 调制,信道的状态信息对接收节点是已知的,对发送节点是未知的。接收节点对接收到的信号采用相关检测。两个用户之间以及用户和基站间的信道是相互独立的,服从瑞利慢衰落。用户发送的时间离散等效基带信号为

$$s_i(n) = \sqrt{E_{b,i}} \cdot b_i(n), i \in \{1, 2\} \quad (1)$$

这里 $E_{b,i}$ 是用户 i 每一比特的发送能量, $b_i(n) \in \{-1, +1\}$ 是 BPSK 调制在时间 n 的码比特。相应地用户 $j \in \{0, 1, 2\}$ ($j \neq i, j=0$ 表示基站) 的接收信号为

$$\begin{aligned} r_j(n) &= a_{ij}(n) s_i(n) + z_j(n) \\ &= a_{ij}(n) \sqrt{E_{b,i}} \cdot b_i(n) + z_j(n) \end{aligned} \quad (2)$$

这里 $a_{ij}(n)$ 是用户 i 和 j 间在时刻 n 的衰落系数,服从瑞

利分布。 $z_j(n)$ 是加性高斯白噪声。噪声采样的均值为零,方差为 $N_j/2$,并且相互独立。对慢(准静态)衰落,衰落系数在整个传输阶段保持不变 ($a_{i,j}(n) = a_{i,j}, n = 1, \dots, N$)。

每一信道的质量通过相应的平均接收 SNR 来刻画:

$$E_{a_{ij}} [\text{SNR}_{ij}] = E_{a_{ij}} \left[\frac{a_{ij}^2 E_{b,i}}{N_j} \right] = \overline{a_{ij}^2(n)} \frac{E_{b,i}}{N_j} \quad (3)$$

这里 $\overline{a_{ij}^2(n)}$ 表示平均衰落功率。

3 仿真结果

通过计算机仿真,我们对基于 Turbo 乘积码的编码协作通信模式下两个协作用户在不同信道状态下的性能进行了验证。这里采用以扩展 BCH 码 (32, 21, 6) 为子码的 Turbo 乘积码 (32, 21, 6)²,码长为 $N = 1024$ 比特,信息块长度为 $K = 144$ 比特,系统总的码率为 $R = 0.43$,协作系数为 $C_c = 0.66$ 。这里假设两个协作用户间距离比较近,信道状况非常好,彼此可以正确译出对方的码字。

图 3 是考虑两个协作用户上行信道信噪比(平均接收 SNR)完全相同时的仿真结果。两个用户具有相同的发送功率。这里只画出了一个用户的仿真结果。从仿真图中可以看出,协作方式较非协作方式在系统性能方面有明显的改善。在用户的上行信噪比大于 12dB 时,用户约有 3dB 的稳定分集增益。

图 4 给出了两个不同用户在不同上行信道信噪比下的仿真结果。其中用户 2 的上行信噪比较用户 1 的上行信噪比高 10dB。从仿真图中可以看出,在高信噪比下,用户 1 可以获得约 3dB 的稳定分集增益。对于用户 2,当用户 1 的上行信道信噪比小于 4.5dB 时,用户 2 的性能要差于非协作模式。当用户 1 的上行信道信噪比高于 4.5dB 时,用户 2 的性能较非协作时有较大的改善,并不断增加,在 $\text{BER} = 10^{-4}$ 时,用户 2 约有 3.5dB 的分集增益。这一结果表明,即使一个用户具有好的上行信道,也会主动去与其它用户进行协作,以获取分集增益。

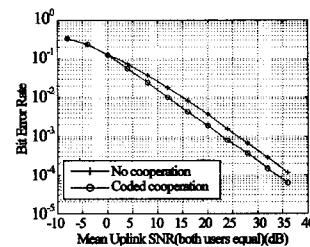


图 3 编码协作通信性能(两用户上行信道信噪比相同)

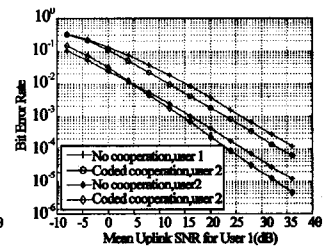


图 4 编码协作通信性能(用户 2 的上行信道信噪比用户 1 高 10dB)

图 5 给出了当用户 2 的上行信道信噪比恒定为 30dB 时用户 1 和用户 2 的性能仿真结果。仿真结果表明,用户 1 在上行信道信噪比比用户 2 差的情况下,能获得很大的性能改善,在 $\text{BER} = 10^{-3}$ 时约有 3.5dB 的分集增益。对于用户 2,当用户 1 的上行信道信噪比小于 15.5dB 时,其性能有很大的牺牲,但是当用户 1 信噪比大于 15.5dB 时,即两用户信噪比差小于 14.5dB 时,用户 2 仍能从协作中获得性能改善,并随用户 1 的上行信道信噪比的改善而增加。如用户 1 的上行信噪比为 20dB,用户 2 的 $\text{BER} = 2.9 \times 10^{-4}$ 。而在非协作通信时,要达到这个 BER,用户 2 的上行信噪比必须达到 32dB,这

(下转第 128 页)

的基本同学联盟 X_1, \dots, X_s , 其中每个 X_i 都必须具有学习 T 中所有学习任务的能力, 并且 X_i 所包含的元素个数尽可能少, $1 \leq i \leq s$. 如果找不到这样的基本同学联盟, 则转到步骤 (3), 执行下一次循环;

③ 计算包含 Agent a 的每个基本同学联盟 X_i 在学习 T 时的性能 $V(X_i)$, $1 \leq i \leq s$, 由此得到包含 Agent a 的最终同学联盟 C , 使得 C 满足 $V(C) = \underset{i=1}{\text{Max}} V(X_i)$;

④ 返回最终同学联盟 C . 将学习任务 T 委托给联盟 C , C 中的所有学习者 Agent 共同合作完成学习任务 T ;

⑤ 根据学习任务 T 的完成情况, 修改同学联盟 C 中的所有学习者 Agent 的同学通讯录. 如果任务 T 被完成, 则联盟 C 中的所有 Agent 对于 C 中其他 Agent 的信任度增加一个单位值, 否则联盟 C 中的所有 Agent 对于 C 中其他 Agent 的信任度减少一个单位值;

⑥ $E = E - C$

(4) 如果还有新任务, 则转到步骤 (2), 否则算法结束.

结束语 为了在协作学习中实现学习者 Agent 之间的有效合作, 本文通过引入同学关系网模型来构建学习系统中学习者 Agent 之间的同学联盟, 再基于这种 Agent 的同学联盟来实现多个学习者 Agent 之间的协作学习. 由于同学关系网模型可以解决多 Agent 系统中普遍存在的通信开销和资源开销等问题, 从而使得在 Agent 同学联盟中实现的协作学习更加可行和有效, 很好地弥补了现有协作学习系统这方面存在的不足. 针对特定的协作学习系统, 我们还提出了同学联盟的形成策略, 并提出一种同学联盟的形成算法. 下一步的研究工作包括如何将我们的同学联盟形成策略和算法应用于实

际的远程教育和网络教学中.

参考文献

- [1] B S 布卢姆. 教育评价[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1987
- [2] 黄荣怀. CSCL 的理论与方法[J]. 电化教育研究, 1999(6): 25-30
- [3] 徐林, 伍顺比. 基于网络环境下的协作学习教学设计研究[J]. 计算机教育, 2007(8): 37-39
- [4] Dorneich M C. A system design framework-driven implementation of a learning collaboratory[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans, 2002, 32(2): 200-213
- [5] Florea A M. An Agent-based collaborative learning[J]. ICCE 99, 1999, 1(3): 161-164
- [6] Lowyck J, Poysa J. Design of collaborative learning environments[J]. Computers in Human Behavior, 2001, 17(5/6): 507-516
- [7] Smith R G. The Contact Net Protocol: High-level Communication and Control in a Distributed Problem Solver[J]. IEEE Trans. on Computer, 1980, 29(12): 1104-1113
- [8] 陈刚, 陆汝钫. 关系网模型——基于社会合作机制的多 Agent 协作组织方法[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(1): 108-109
- [9] 兰少华, 叶东海, 吴慧中. 一种 Agent 任务求解联盟形成策略[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(5): 941-942
- [10] 魏巍, 刘弘. 基于关系网模型的 Agent 联盟形成策略[J]. 计算机应用研究, 2006, 23(10): 41-43
- [11] Ngolah C F. A Tutorial on Agent Communication and Knowledge Sharing. 2002[OL]. http://www.enel.ucalgary.ca/People/far/Lectures/SENG60922/PDF/tutorials/2002/Agent_Communication_and_Knowledge_Sharing.pdf
- [12] 叶斌, 马忠贵, 曾广平, 等. 多 Agent 系统的联盟框架及形成机制[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(10): 864-867

(上接第 96 页)

说明用户 2 获得了约 2dB 的增益(用户 2 的上行信噪比固定为 30dB); 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 从协作中获益减小, 而用户 2 的获益增加并超过用户 1. 仿真结果表明, 通过编码协作通信模式, 上行信道信噪比好的用户会显著地帮助信噪比差的用户提高性能, 同时在高信噪比下自身也能通过协作通信获得收益, 从而使整个协作系统的性能得到有效改善.

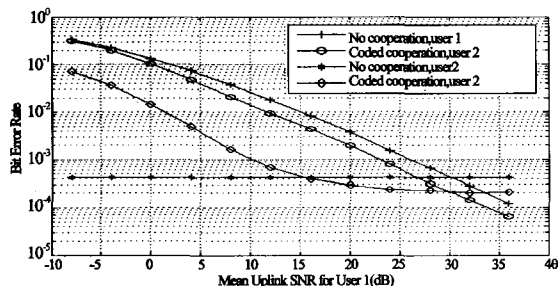


图 5 编码协作通信性能(用户 2 的上行信道信噪比固定为 30dB)

结束语 协作通信被证明是一种有效的抵抗无线信道衰落影响的技术. 将信道编码和协作通信有效地结合, 在获得传输分集增益的同时可获得相应的编码增益. 本文提出的基于 Turbo 乘积码的协作通信可以有效地提高系统的性能, 而无需增加整个系统的系统带宽和发送功率. 下一步我们将针对当前的研究做进一步的研究, 可将二维 Turbo 乘积码扩展

到多维 Turbo 乘积码以及依据信道状态的自适应编码协作通信. 此外, 还将研究功率分配对编码协作系统的影响.

参考文献

- [1] Nosratinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative Communication in Wireless Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 74-80
- [2] Hunter T E, Nosratinia A. Diversity through Coded Cooperation[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2006, 5(2): 283-289
- [3] Hunter T E, Sanayei S, Nosratinia A. Outage analysis of coded cooperation[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2006, 50(12): 3062-3080
- [4] Janani M, Hedayat A, Hunter T E, et al. Coded Cooperation in Wireless Communications: Space-time Transmission and Iterative Decoding[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2004, 52(2): 362-371
- [5] Cao Yang, Vojcic B. Cooperative Coding using Serial Concatenated Convolutional Codes[J]. IEEE Communications Society, 2005, 2: 1001-1006
- [6] Razaghi P, Yu W. Bilayer Low-density Parity-check Codes for Decode-and-Forward in Relay Channels[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2007, 53(10): 3723-2739
- [7] Xiao L, Fuja T E, Klierer J, et al. A Network Coding Approach to Cooperative Diversity[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2007, 53(10): 3714-3722
- [8] Pyndiah R M. Near-optimum Decoding of Product Code: Block Turbo Code[J]. IEEE Trans. Commun., 1998, 46(8): 1003-1010
- [9] 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