

采用帧延迟的实时编码协作方案

牛兰奇^{1,2}, 张太镒¹, 张璟¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 710048, 西安)

摘要: 为了解决码分多址(CDMA)和频分多址(FDMA)编码协作系统中协作用户之间存在的冲突和碰撞问题,提出了一种采用帧延迟的实时编码协作方案. 该方案将用户信道码字分割为 2 部分,如果某个用户对协作伙伴前一帧数据成功译码,则将协作伙伴前一帧码字的第 2 部分冗余作为协作信息传输,否则传输自身当前帧码字的第 2 部分冗余,从而实现实时编码协作. 此外,还利用紧联合界技术推导了新方案的误比特率估计公式,给出了数值计算结果. 数值结果表明:采用帧延迟的实时编码协作方案能够很好地解决 CDMA 和 FDMA 编码协作系统中协作用户之间的碰撞问题,但会有少量的性能损失,对于 0 dB 互易用户间信道,性能损失为 1.2 dB.

关键词: 码分多址; 频分多址; 帧延迟; 实时编码协作; 紧联合界

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)02-0063-04

A Real Time Coding Cooperation Scheme with on Frame Delay

NIU Lanqi^{1,2}, ZHANG Taiyi¹, ZHANG Jing¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To solve the collision problem between the partners in code-division multiple access (CDMA) and frequency-division multiple access (FDMA) coding cooperative systems, a new real time coding cooperation scheme is proposed with frame delay. The scheme partitions the user channel codeword into two parts. If one user decodes successfully his partner's previous frame data, he then transmits the second redundancy of the partner's previous frame as cooperative information, otherwise he transmits the second redundancy of his own codewords, so that the real coded cooperation is implemented. Furthermore, the bit-error-rate evaluation formula of the new scheme is derived using the tightening union bound techniques. Numerical results show that the real coding cooperation scheme with frame delay can solve the collision problem between the partners in CDMA and FDMA coding cooperative systems very well, but the proposed scheme would result in a little performance loss of 1.2 dB for 0 dB reciprocal inter-user channels.

Keywords: code-division multiple access; frequency-division multiple access; frame delay; real time coding cooperation; tightening union bound

协作通信通过移动用户之间的相互协作获得发射分集,减轻无线通信系统中信道衰落的影响. Sendonaris 等人^[1-2]首先提出了基于码分多址的通用协作信息论模型并考察了系统的可达速率区域和截断概率, Laneman 等人^[3]扩展了 Sendonaris 的协

作方案并系统分析了几种协作方案的截断性能,但是这些协作方案从本质上均属于重复编码,因此频谱使用效率非常低. Hunter 等人^[4-5]提出了编码协作方案并系统讨论了系统的性能,该方案将用户协作与信道编码有机地结合起来,每个用户仅转发协

作伙伴信道码字的部分冗余信息,可以获得较高的频谱使用效率.但是,Hunter提出的编码协作方案没有考虑协作用户间的冲突和碰撞问题,仅适用于时分多址(TDMA)编码协作系统,这是因为在这种编码协作系统中,相互协作的用户分别在不同的时隙发送数据.然而,对于码分多址(CDMA)和频分多址(FDMA)编码协作系统,相互协作的2个用户同时进行数据的发送和接收,因此将会产生相互冲突和碰撞问题.本文提出一种新的编码协作方案,称为延迟编码协作方案,通过延迟一个帧的办法传输协作信息,可以克服CDMA和FDMA编码协作系统中协作用户间的冲突和碰撞问题,实现实时编码协作.本文考虑信道码为LDPC码,采用凿孔方法实现信道码码字分割,利用紧联合界技术研究延迟编码协作方案对CDMA和FDMA编码协作系统性能的影响.

1 系统模型与延迟编码协作方案

假设2个用户相互协作,向同一个目的地(访问点或基站)通信,用户间信道和上行链路信道(两用户与基站接收机间的信道)是相互独立的准静态平坦Rayleigh衰落信道,即在1个码字传输期间信道衰落系数为常数,不同码字的信道衰落系数相互独立,信道衰落系数服从Rayleigh分布,衰落是频率非选择性的.如果系统采用二进制相移键控(BPSK)调制,等效离散基带信道模型可以描述为

$$y(n) = \alpha(n)x(n) + z(n) \quad (1)$$

式中: $x(n) \in \{+1, -1\}$ 为发送信号; $y(n)$ 为接收信号; $\alpha(n)$ 为信道衰落系数,服从Rayleigh分布,且 $\alpha^2(n)$ 的期望 $E[\alpha^2(n)] = 1$; $z(n)$ 为高斯白噪声,双边功率谱密度为 $N_0/2$.

假定每比特信号能量为 E_b ,则接收机瞬时信噪比和对应的期望值可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \gamma(n) &= \alpha^2(n) \frac{E_b}{N_0} \\ \Gamma &= E[\gamma(n)] = E[\alpha^2(n)] \frac{E_b}{N_0} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由于信道衰落系数服从Rayleigh分布,则瞬时信噪比服从指数分布.

延迟编码协作方案的思想是:假定CDMA和FDMA系统相互协作的2个用户间是完全同步的,首先将信道码码字分割为2部分,每个用户仅传输协作伙伴延迟了1个传输帧的协作信息,这样2个用户在协作过程中可以避免相互之间的冲突和碰

撞.每个用户在对当前帧进行信道编码时,已经对前一帧的协作用户数据译码.如果译码成功,则在当前帧的第2个子帧发送协作用户前一帧码字的第2部分(称为协作信息),否则发送自身当前帧码字的第2部分.用户1和用户2的数据流可以表示为

$$\begin{aligned} &\cdots, [\mathbf{X}_{11}(n), \mathbf{X}_{22}(n-1)/\mathbf{X}_{12}(n)], \\ &[\mathbf{X}_{11}(n+1), \mathbf{X}_{22}(n)/\mathbf{X}_{12}(n+1)], \cdots \\ &\cdots, [\mathbf{X}_{21}(n), \mathbf{X}_{12}(n-1)/\mathbf{X}_{22}(n)], \\ &[\mathbf{X}_{21}(n+1), \mathbf{X}_{12}(n)/\mathbf{X}_{22}(n+1)], \cdots \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{X}_{11}(n)$ 和 $\mathbf{X}_{21}(n)$ 分别代表用户1和用户2第 n 帧码字的第1部分; $\mathbf{X}_{12}(n)$ 和 $\mathbf{X}_{22}(n)$ 分别代表用户1和用户2第 n 帧码字的第2部分.

当目的接收机接收到两用户的第 n 帧和第 $n+1$ 帧数据后,就可以对第 n 帧数据进行最优合并和联合译码.假定不同用户以及同一用户在不同传输帧的行为是完全独立的,则目的接收机对两用户第 n 帧数据译码时将形成16种协作情况.下面以理想协作和非协作这2个特殊情况为例来说明.

对于理想协作情况,用户1和用户2都能成功地对对方的第 $n-1$ 帧和第 n 帧的第1子帧正确译码,因此在第 n 帧和第 $n+1$ 帧的第2子帧传输对方的协作信息

$$\begin{aligned} &[\mathbf{X}_{11}(n), \mathbf{X}_{22}(n-1)]; [\mathbf{X}_{21}(n), \mathbf{X}_{12}(n-1)] \\ &[\mathbf{X}_{11}(n+1), \mathbf{X}_{22}(n)]; [\mathbf{X}_{21}(n+1), \mathbf{X}_{12}(n)] \end{aligned}$$

每种情况下的4对方括号分别代表用户1和用户2在第 n 帧和第 $n+1$ 帧的传输情况.

对于非协作情况,用户1和用户2均不能够将对对方的第 $n-1$ 帧和第 n 帧的第1子帧实现正确译码,因此在第 n 帧和第 $n+1$ 帧的第2子帧传输自身码字的第2部分

$$\begin{aligned} &[\mathbf{X}_{11}(n), \mathbf{X}_{12}(n)]; [\mathbf{X}_{21}(n), \mathbf{X}_{22}(n)] \\ &[\mathbf{X}_{11}(n+1), \mathbf{X}_{12}(n+1)]; [\mathbf{X}_{21}(n+1), \mathbf{X}_{22}(n+1)] \end{aligned}$$

2 系统性能分析

2.1 成对错误概率

假设接收机利用相干解调,考虑准静态Rayleigh平坦衰落信道,基站B接收到来自用户1和用户2信号的瞬时信噪比分别为 $\gamma_{1,B}$ 和 $\gamma_{2,B}$,那么就可以分别给出2个用户在所有协作情况下的条件成对错误概率^[5].下面仅给出非协作和理想协作情况下2个用户的条件成对错误概率.

对非协作情况,两用户的条件成对错误概率为

$$\left. \begin{aligned} P_1(d/\gamma_{1,B}) &= Q[(2d\gamma_{1,B})^{1/2}] \\ P_2(d/\gamma_{2,B}) &= Q[(2d\gamma_{2,B})^{1/2}] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对理想协作情况,两用户的条件成对错误概率为

$$\begin{aligned} P_1(d/\gamma_{1,B}, \gamma_{2,B}) &= Q[(2d_1\gamma_{1,B} + 2d_2\gamma_{2,B})^{1/2}] \\ P_2(d/\gamma_{1,B}, \gamma_{2,B}) &= Q[(2d_1\gamma_{2,B} + 2d_2\gamma_{1,B})^{1/2}] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Q 代表高斯 Q 函数; d 代表每个码字的错误比特个数; d_1 和 d_2 分别代表经过码字分割后的 2 部分中包含的错误比特个数, $d = d_1 + d_2$. 利用文献[4]的分析方法容易给出其他情况下的成对错误概率,并且可以看出,2 个用户在 16 种协作情况下有 50% 可以获得完全协作分集阶数 2.

2.2 系统误比特率的估计

本文用数值计算的方法估计 LDPC 码延迟编码协作系统的平均误比特率. 假定 LDPC 码采用和积译码算法, 和积算法使用前次迭代得到的外部信息作为先验信息进行译码, 属于 MAP 译码, 因此数值计算可以用紧联合界技术来实现. 下面以用户 1 为例来说明.

联合界利用重量枚举函数和成对错误概率估计线性分组码的误码率, 而紧联合界技术是对联合界的修正, 使估计更精确^[6]. 成对错误概率前面已经给出, 重量枚举函数可以表示为 $A(W, X) = \sum_{w,x} A_{w,x} W^w X^x$, 其中 $A_{w,x}$ 代表输入重量为 w 的信息产生校验重量为 x 的码字数量, w, X 分别为输入、输出虚拟变量. 对于规则的 LDPC 码, $A_{w,x}$ 可以利用文献[7]的方法估算. 对于非协作情况, 误码率的紧联合界可以表示为^[8]

$$R_b \approx \int \min\left\{0.5, \sum_{d=d_{\min}}^N B_d Q[(2d\gamma_{1,B})^{1/2}]\right\} \cdot p(\gamma_{1,B}) d\gamma_{1,B} \quad (5)$$

式中: N 和 K 分别为码字长度和信息分组长度; $d_{\min}$ 为最小码距; $p(\gamma_{1,B})$ 为 $\gamma_{1,B}$ 的概率密度函数, 服从指数分布; $B_d = \sum_{w+x=d} A_{w,x} w/K$.

延迟编码系统的平均误比特率由每种协作情况发生的概率和每种协作情况下的误比特率共同决定. 将 16 种协作情况模型化为 $C=1, 2, \dots, 16$, 用户 1 在上行链路上的平均误比特率可以表示为^[4]

$$\bar{R}_b = \sum_{m=1}^{16} R_b(C=m) P(C=m) \quad (6)$$

式中: $R_b(C=m)$ 为 $C=m$ 时的误比特率; $P(C=m)$ 为 $C=m$ 出现的概率. $R_b(C=m)$ 和 $P(C=m)$ 均可以用紧联合界技术计算.

假定理想协作对应 $C=1$, $R_b(C=1)$ 的紧联合界为^[6,8]

$$\begin{aligned} R_b(C=1) &\approx \iint \min(0.5, z) p(\gamma_{1,B}) \cdot \\ &\quad p(\gamma_{2,B}) d\gamma_{1,B} d\gamma_{2,B} \\ z &= \sum_{d=d_{\min}}^N B_d Q[(2d_1\gamma_{1,B} + 2d_2\gamma_{2,B})^{1/2}] \end{aligned} \quad (7)$$

$P(C=m)$ 主要由用户间信道的误帧率决定, 也以 $C=1$ (理想协作) 为例说明. 假设 $\gamma_{1,2}$ 和 $\gamma_{2,1}$ 分别代表用户 1、用户 2 和用户 2、用户 1 之间的瞬时信噪比. 对于独立的用户间信道, $\gamma_{1,2}$ 和 $\gamma_{2,1}$ 相互独立, 因此 $P(C=1)$ 可用下式计算^[6,8]

$$\begin{aligned} P(C=1) &= R_f^3 (1 - R_f) \\ R_f &\approx \int \min\left\{1, \sum_{d=d_{\min}}^N A_d Q[(2d_1\gamma)^{1/2}]\right\} p(\gamma) d\gamma \end{aligned} \quad (8)$$

式中: γ 可以是 $\gamma_{1,2}$ 或 $\gamma_{2,1}$; $A_d = \sum_{w+x=d} A_{w,x}$; R_f 代表用户间信道的误帧率.

对于互易的用户间信道, 在一个传输帧内, 用户间信道是互易的, 即 $\gamma_{1,2}(n) = \gamma_{2,1}(n)$, 而对于不同传输帧用户间信道是独立的, 即 $\gamma_{1,2}(n)$ 和 $\gamma_{2,1}(n)$ 与 $\gamma_{1,2}(n+1)$ 和 $\gamma_{2,1}(n+1)$ 相互独立, 则有^[6,8]

$$\begin{aligned} P(C=1) &\approx \iint [\min(1, z_n)]^2 \min(1, z_{n+1}) [1 - \min(1, z_{n+1})] \cdot \\ &\quad p(\gamma_n) p(\gamma_{n+1}) d\gamma_n d\gamma_{n+1} \\ z_n &= \sum_{d=d_{\min}}^N A_d Q[(2d_1\gamma_n)^{1/2}] \\ z_{n+1} &= \sum_{d=d_{\min}}^N A_d Q[(2d_1\gamma_{n+1})^{1/2}] \end{aligned} \quad (9)$$

式中: γ_n 和 γ_{n+1} 分别为第 n 帧和 $n+1$ 帧用户间信道的瞬时信噪比. 其他情况下也可以得出类似的结果.

3 数值计算结果

考虑(504, 3, 4)规则 LDPC 码构成的延迟编码协作系统, 信道模型为式(1)定义的准静态平坦 Rayleigh 衰落信道, 假设 CRC 能够完全检测出用户间信道引入的误码. LDPC 母码码长 $N=504$ B, 信息分组长度为 $K=126$ B, LDPC 总码率为 1/4, 采用 16 位 CRC, 考虑协作水平 25% (协作水平定义为协作信息的比特数与码长之比), 对应的凿孔 LDPC 码的码长 $N_1=378$ B. 根据前面推导的有关性能估计方法, 给出如下的仿真和数值计算结果.

图 1 给出了协作水平为 25%、用户间信道信噪比分别为 5 dB 和 10 dB 时, 非协作和延迟编码协作

数值计算结果和仿真结果比较,二者吻合较好。

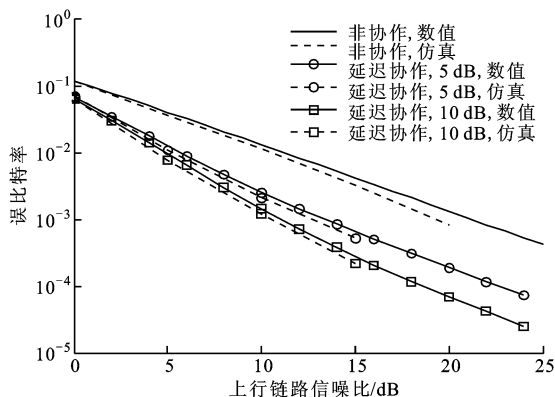


图1 数值计算结果与仿真结果比较

图2给出了在互易的用户间信道上延迟编码协作与 Hunter 的编码协作系统性能的数值结果比较,其中用户间信道平均信噪比分别为 0 dB、10 dB 和 20 dB,协作水平为 25%,2 个用户的上行链路信道具有相同的统计特性。图中显示采用帧延迟的编码协作的性能比 Hunter 的编码协作的性能略有下降,随着用户间信噪比的增加,二者性能的差别将减少,对于 0 dB 用户间的信道性能损失为 1.2 dB 左右。这是为克服 CDMA 和 FDMA 系统中协作用户间的碰撞问题必须付出的代价。

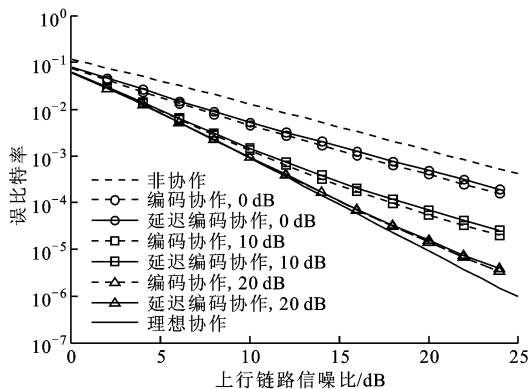


图2 延迟编码协作与编码协作性能比较

当用户间信道是相互独立时,用同样的方法可以证明延迟编码协作和 Hunter 的编码协作的性能相同。

4 结 论

本文提出一种延迟编码协作方案,利用紧联合

界技术推导了新方案的误比特率估计方法,并给出了数值计算结果。数值结果表明:对于互易的用户间信道,延迟编码协作方案通过牺牲一定的性能能够克服 CDMA 和 FDMA 系统中协作用户间的碰撞问题,而对于独立的用户间信道延迟编码协作则不改变系统的性能。

本文仅讨论了基于 LDPC 码的延迟编码协作问题,但是完全可以推广到速率匹配凿孔卷积码(RCPC)和 Turbo 码编码协作系统中,因为产生碰撞的原因和解决的办法均与信道编码方式无关。

参考文献:

- [1] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity, part I: system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11):1927-1938.
- [2] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity, part II: implementation aspects and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11):1939-1948.
- [3] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12):3062-3080.
- [4] HUNTER T E, SANAYEI S, NOSRATINIA A. Outage analysis of coded cooperation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2):375-391.
- [5] HUNTER T E, NOSRATINIA A. Diversity through coded cooperation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(2):283-289.
- [6] ZHANG Jingqiao, LEE H. Performance analysis on coded system over quasi-static(MIMO) fading channels [C] // 2005 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005:800-804.
- [7] NGO V, PARK S. Tightening union bound by applying Verdu theorem for LDPC [C] // 2003 IEEE Proc on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003:420-423.
- [8] 王琳,徐位凯. 高效信道编译码技术及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.

(编辑 刘杨)