

基于 BICM 的高效编码协作方案及性能分析

宫丰奎,葛建华,王 勇,张 南

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 提出一种基于比特交织编码调制(BICM)的高效编码协作(CC)方案,该方案中协作用户编码比特分为两帧,每一帧都通过 BICM 调制发送,通过结合比特交织器满足高阶调制星座符号的不同比特经历的衰落独立.一方面,论文分析了该协作方案在不同信道下的成对错误概率,并进一步推导了错误比特概率上界.理论分析以及仿真结果都表明:准静态衰落信道下,基于 BICM 的高谱效率编码协作方案仍然可以获得完全分集;而快衰落信道下,编码协作没有分集.另一方面,论文针对提出 CC 方案中映射方式以及交织器的设计进行研究,得出 GRAY 映射仍然是协作用户采用的最佳映射,且两帧的交织器不同更利于提高性能.

关键词: 比特交织编码调制; 编码协作; 成对错误概率; 分集

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 04-0748-06

A BICM-Based CC Scheme with High Efficiency and Its Performance Analysis

GONG Feng-kui, GE Jian-hua, WANG Yong, ZHANG Nan

(State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: A high-efficient coded cooperative scheme based on bit-interleaved coded modulation is proposed. Encoded bits of the cooperative user are partitioned into two frames, bit interleaved, mapped and then transmitted on the allocated time slots respectively. Bit interleaver is utilized to satisfy the fading coefficients of the different bits of a same symbol could be modeled as i. i. d variables. One hand, the pairwise error probability over various fading channels is derived, and an upper-bound on bit-error probability is presented. Both theory analysis and simulations show that the BICM CC with high-order constellations can also achieve the full diversity under quasi-static Rayleigh fading channels, whereas no any cooperation diversity over fast fading channels. On the other hand, labeling maps and interleavers are studied. It can be concluded that GRAY labeling is still optimum for the cooperative users and different interleavers of two frames can improve the performance.

Key words: bit-interleaved coded modulation (BICM); coded cooperation (CC); pairwise error probability (PEP); diversity

1 引言

实际的蜂窝通信系统中,对于上行链路,移动终端由于受到体积、功耗、工艺等多方面的限制,携有多个天线有很大困难,因此极大地限制了多输入多输出技术(Multiple Input Multiple Output, MIMO)的空间分集应用.协作分集^[1,2]使得终端按照一定的方式共享彼此的天线,产生一个虚拟的 MIMO 系统以获得发射分集增益,为多天线技术走向实用化提供了一条新的途径.编码协作(Coded Cooperation, CC)是一种通过协作用户发送冗余信息提高分集度的协作方式,研究表明^[3,4]:慢衰落信道下,采用 BPSK 调制的两用户 CC 可以获得二阶完

全分集.基于 CC 协议的协作通信研究是最近的一个热门课题,如 Stefanov、Erkip^[5]以及 Chakrabarti 等^[6]研究适合 CC 的纠错码设计;Janani 等^[7]进一步考虑将分布式空时码结合 CC 协议以适应快衰落信道;Lin 等^[8]研究了 CC 协议下的伙伴选择问题;国内雷维嘉等^[9]对基于 LDPC 的编码协作做了一定的分析.上述所有研究中,调制方式都假定为 BPSK 调制,频谱利用率很低.为了提高谱效率,非常有必要研究高阶二维星座调制在 CC 中的应用,作者在文献[10]中给出了一种基于高阶星座调制的高效编码协作方案,但仅给出了慢衰落信道下的成对错误概率,缺少方案的设计理论分析,且仅针对用户间完全协作的情况.

高阶调制应用到 CC 中的难点可以概括为:一是 BPSK 符号衰落和编码比特衰落一一对应的关系不再满足,原针对 BPSK 的性能分析对 QAM 等高阶调制不再适用;二是高阶调制星座的映射方式不再单一,需要考虑映射方式对协作性能的影响.考虑到一方面比特交织编码调制(Bit-Interleaved Coded Modulation, BICM)技术^[11]适合衰落信道且纠错码适合采用简单的卷积码,和 CC 方案可以方便结合;另一方面, BICM 方案中假定理想比特交织器可以满足同一符号的不同衰落相互独

立.因此,针对两用户编码协作,本文提出一种基于 BICM 的新型 CC 方案(简称 BICM-CC),方案中协作用户编码比特分组后分别通过比特交织器,之后映射到一高阶 QAM 星座按分配时隙发送.论文通过分析成对错误概率(Pairwise Error Probability, PEP)研究该方案在准静态瑞利衰落以及快衰落信道下的分集增益,进一步推导其错误比特概率的上界.论文同时针对相关的映射方式以及比特交织器进行设计分析,通过数值计算和仿真给出了初步结论.

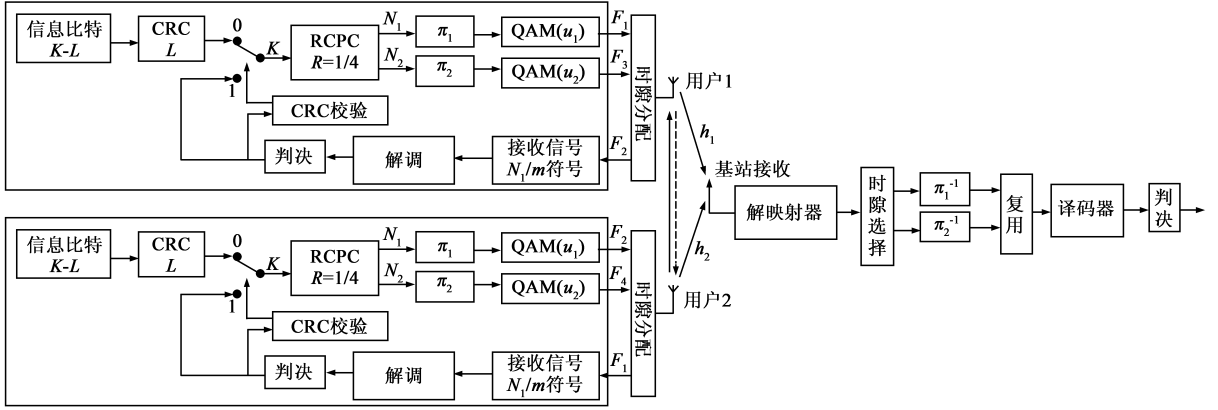


图1 基于QAM星座调制的CC方案实现框图

2 基于 BICM 的 CC 方案

基于 BICM 的两用户编码协作方案如图 1 所示.图 2 给出的是两用户基于 TDMA 的时隙分配示意.为了便于说明,定义:每个用户 $u, u \in \{1, 2\}$ 的数据发送周期都分为两个阶段,称每个阶段为一帧,用 f 表示, $f \in \{1, 2\}$; F_k 表示采用 TDMA 方式时的第 k 个时隙,这里 $k \in \{1, 2, 3, 4\}$; $r^{(k)}(n)$ 表示第 k 个时隙基站端的第 n 个接收信号; $x_{u,f}(n)$ 表示用户 u 的第 f 帧信息的第 n 个符号; m 为每星座符号包含比特数.

BICM-CC 工作流程可以说明如下:长度为 K 的信息比特(包含 L 长的 CRC 校验位)经 RCPC(Rate Compatible Punctured Convolutional Code)编码后生成 $P = P_1 + P_2$ 个编码比特(码率为 $R = K/P$).对于第一帧,每个用户 u 发送的符号为 P_1 个编码比特交织(π_1)后的映射符号 $\mathbf{x}_{u,1} = [x_{u,1}(1), x_{u,1}(2), \dots, x_{u,1}(P_1/m)]$.每一个用户都尝试对伙伴的数据进行正确的译码,如果 CRC 校验正确,在第二帧,用户 u 将计算并发送其伙伴的第二部分,包括 P_2 个比特交织(π_2)映射后的符号序列 $\mathbf{x}_{u \oplus 2,2} = [x_{u \oplus 2,2}(1), x_{u \oplus 2,2}(2), \dots, x_{u \oplus 2,2}(P_2/m)]$ (\oplus 表示模 2 加).否则用户 u 将在第二帧传送自己的第二部分 $\mathbf{x}_{u,2} = [x_{u,2}(1), x_{u,2}(2), \dots, x_{u,2}(P_2/m)]$.图 1 所示的 BICM-CC 方案的主要贡献在于:(1)将 BICM 调制和 CC 有效结合,充分利用了两种通信技术的优点,使得方案非常适合衰落信道;(2)通过利用比特交织器实现了调

制方式从 BPSK 到高阶 QAM 的转换,提高了系统频谱利用率;(3)定义的不同交织器以及映射方式增加了系统的自由度,便于进一步向迭代译码技术推广.

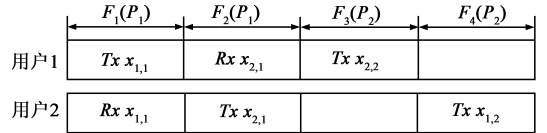


图2 基于TDMA的编码协作时隙分配(完全协作)

上述流程可以通过数学方式描述,以协作用户 1 为例,完全协作时,基站端在第 1、3 时隙的接收信号分别表示为:

$$\begin{aligned} r^{(1)}(n) &= h_1^{(1)}(n)x_{1,1}(n) + w_1^{(1)}(n) \\ r^{(3)}(n) &= h_1^{(3)}(n)x_{2,2}(n) + w_1^{(3)}(n) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $h_u^{(k)}(n)$ 表示第 k 个时隙用户 u 到基站端信道衰落响应的第 n 个符号间隔采样值;噪声采样值 $w_u^{(k)}(n)$ 是独立的复高斯随机变量,零均值,每维方差为 $N_u/2$.其它情况可以类似得到.

3 不同信道下基于 BICM-CC 的 PEP 分析

本节推导瑞利衰落信道下图 1 方案的 PEP,进一步定义:

\mathbf{c} 和 $\hat{\mathbf{c}}$ 为输入二进制编码序列和估计二进制序列,

* 这里假定 P_1, P_2 被 m 整除

汉明距离为 d , η 是满足 $c(n) \neq \hat{c}(n)$ 的 n 的集合;

\mathbf{x} 和 $\hat{\mathbf{x}}$ 为对应上述二进制序列 \mathbf{c} 和 $\hat{\mathbf{c}}$ 的星座符号信号序列, $P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}})$ 为相应的 PEP;

$f(d, \mu, \chi)$ 或 $P(\mathbf{c} \rightarrow \hat{\mathbf{c}})$ 为通过关于标识位置和标识映射方式对所有可能序列 \mathbf{x} 和 $\hat{\mathbf{x}}$ 的 $P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}})$ 取平均计算得到.

不失一般性, 定义 \mathbf{c} 和 $\hat{\mathbf{c}}$ 前 d 个连续比特不同, 由于假定理想交织器, 相应的 \mathbf{x} 和 $\hat{\mathbf{x}}$ 可以定义为:

$$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_d] \text{ 及 } \hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_d]$$

相应的用户 u 到基站信道的路径衰落 \mathbf{h}_u 定义为:

$$\mathbf{h}_u = [h_{u,1}, \dots, h_{u,d}], u \in \{1, 2\}$$

3.1 慢衰落信道

当信道为准静态衰落信道时, 每个用户在一周期内的衰落内保持不变, 即 $h_{u,1} = h_{u,2} = \dots = h_{u,d} = h_u$ 为服从瑞利分布的独立同分布随机变量.

3.1.1 用户间完全协作

根据文献[10], 理想比特交织时成对错误概率为:

$$f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_1 E[h_1^2] \Delta_1}{4N_1} \right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{d_2 E[h_2^2] \Delta_2}{4N_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中 $\Delta_\mu = \frac{1}{m2^m} \sum_{k=1}^m \sum_{b=0}^1 \sum_{x \in \chi(b,k)} \|x - \hat{x}\|^2$; \hat{x} 为 x 的最近邻, $\chi(b, k)$ 表示第 k 比特为 b 的信号矢量集合.

特殊情况下, 当采用 BPSK 调制时, 假定符号间距为 $2a$, 信道衰落均值为 1, 式(2)简化为:

$$f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + d_1 \Gamma_1} \cdot \frac{1}{1 + d_2 \Gamma_2} \quad (3)$$

其中, $\Gamma_u = \frac{a^2}{N_u} E[h_u^2] = \frac{E_s}{N_u}$ 表示用户 u 到基站信道的平均信噪比. 式(3)和 Hunter 等^[4]给出的结果一致.

而非协作时, 易得到:

$$f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \left[\left(1 + d \frac{E[h^2]}{4N_0 m 2^m} \sum_{k=1}^m \sum_{b=0}^1 \sum_{x \in \chi(b,k)} \|x - \hat{x}\|^2 \right)^{-1} \right] \quad (4)$$

由式(2)及式(4)可见, 采用 BICM-CC 方案, 在慢衰落信道下, 当 d_1 和 d_2 都不为零时, 通过编码协作仍然可以获得全分集增益. 当信噪比较高时, 假定信道衰落均值为 1^{**} , 式(2)简化为:

$$f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \cdot \frac{16N_1 N_2}{d_1 d_2 \Delta_1 \Delta_2} \quad (5)$$

3.1.2 用户间部分协作

假定用户 2 对用户 1 的第一帧数据正确译码 (CRC 校验正确), 而用户 1 对用户 2 数据译码错误, 这样第二帧两个用户都发送用户 1 的冗余信息. 此时, 基于信道衰落的条件 PEP 表示为:

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2)$$

$$= Q \left(\sqrt{\frac{h_1^2}{2N_1} \sum_{e=1}^d \|x_e - \hat{x}_e\|^2 + \frac{h_2^2}{2N_2} \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2} \right)$$

类似文献[10]中完全协作时的分析:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) &= E_{\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2} [P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2)] \\ &< E_{\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2} \left[\frac{1}{2} \exp \left\{ \frac{-h_1^2}{4N_1} \sum_{e=1}^d \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right\} \right. \\ &\quad \cdot \left. \exp \left\{ \frac{-h_2^2}{4N_2} \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right\} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{4N_1} \sum_{e=1}^d \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right]^{-1} \\ &\quad \cdot \left[1 + \frac{1}{4N_2} \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right]^{-1} \quad (7) \end{aligned}$$

以及

$$f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d\Delta_1}{4N_1} \right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{d_2\Delta_2}{4N_2} \right)^{-1} \quad (8)$$

式(7)中利用了不等式: $Q(x) < \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$ 以及

$$E_h \{ \exp(-\lambda h^2) \} = \frac{1}{1 + E[h^2] \lambda}$$

由式(7)可见, 用户 1 此时仍然可以获得完全分集. 但由于此时用户 2 仅发送了第一帧数据, 因此性能会有所降低. 该情况适合用户 2 的上行链路信道质量较好的情况.

3.2 快衰落信道

快衰落信道下, $\mathbf{h}_u = [h_{u,1}, \dots, h_{u,d}]$ 中的各个元素为服从 *i. i. d* 的随机变量, 我们同样分情况讨论.

3.2.1 用户间完全协作

此时, 条件 PEP 表示为:

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2) = Q \left(\sqrt{\sum_{u=1}^2 \frac{1}{2N_u} \sum_{e=1}^{d_u} h_{u,e}^2 \|x_e - \hat{x}_e\|^2} \right) \quad (9)$$

同理,

$$\begin{aligned} P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) &\leq \frac{1}{2} \prod_{e=1}^{d_1} \left(1 + \frac{\|x_e - \hat{x}_e\|^2}{4N_1} \right)^{-1} \\ &\quad \cdot \prod_{e=1}^{d_2} \left(1 + \frac{\|x_e - \hat{x}_e\|^2}{4N_2} \right)^{-1} \quad (10) \end{aligned}$$

以及,

$$f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Delta_1}{4N_1} \right)^{-d_1} \cdot \left(1 + \frac{\Delta_2}{4N_2} \right)^{-d_2} \quad (11)$$

可见, 较非协作时没有任何分集.

3.2.2 用户间部分协作

类似 3.1.2 小节的推导, 用户 1 的 PEP 为:

$$f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Delta_1}{4N_1} \right)^{-d} \cdot \left(1 + \frac{\Delta_2}{4N_2} \right)^{-d_2} \quad (12)$$

** 不失一般性, 本文以下推导均满足该假定

可见,对用户 1 而言,CC 协作在快衰落信道下仍然有一定的分集.

4 基于 BICM-CC 的误比特率界

进一步的,本节以慢衰落信道为例,在 PEP 的基础上推导完全协作时的错误比特概率的上界.

对卷积码而言,误比特率可以表示为:

$$P_b \leq \frac{1}{k_c} \sum_{d=d_{\min}}^{\infty} W_I(d) f(d, \mu, \chi) \quad (13)$$

其中 $W_I(d)$ 为汉明距离为 d 的错误事件的总输入重量. d_{\min} 为码字的最小汉明距离, $f(d, \mu, \chi)$ 表示 BICM 的 PEP, 根据式(2)及式(5)计算得到.

近似考虑上述和式的第一项, 高信噪比时, 根据式(5), 得到:

$$P_b \approx \frac{1}{k_c} W_I(d_f) f(d_f, \mu, \chi) \quad (14)$$

上式可以表示成对数形式:

$$\log_{10} P_b \approx \log_{10} \left[\frac{1}{2k_c} W_I(d_f) \left(\frac{d_1 d_2 \Delta_1 \Delta_2}{16 N_1 N_2} \right)^{-1} \right] \quad (15)$$

对 [5 7 7 7] 卷积码, $d_f = 10$, $k_c = 1$, 式(15)简化为:

$$\log_{10} P_b \leq -\frac{1}{10} \left[(\Delta_1)_{dB} + (\Delta_2)_{dB} + \left(\frac{E_b}{N_1} \right)_{dB} + \left(\frac{E_b}{N_2} \right)_{dB} \right] + const \quad (16)$$

其中 $const = 9 \log_{10}(2) - 2$, 当两用户上行链路信道质量相同且映射方式相同时, 式(19)成为:

$$\log_{10} P_b \leq -\frac{1}{5} \left[(\Delta_1)_{dB} + \left(\frac{E_b}{N_1} \right)_{dB} \right] + const \quad (17)$$

式(13)的求解错误概率界方法也称为平均后求和法, 慢衰落信道时, 式(13)给出的界过于松散, 这时可以利用 Malkamäki^[12] 等人提出的平均前限幅方法, 对条件成对错误概率在整个取值域概率积分前先进行限幅, 具体表示为:

$$P_b \leq \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \min \left[\frac{1}{2}, PEP_{\gamma} \right] p(\gamma_{1,0}) p(\gamma_{2,0}) d\gamma_{1,0} d\gamma_{2,0} \quad (18)$$

其中, $PEP_{\gamma} = \frac{1}{k_c} \sum_{d=d_{\min}}^{d_{\max}+d_{\min}-1} W_I(d) P(d | \gamma_{1,0}, \gamma_{2,0})$,

而慢衰落完全协作时,

$$\begin{aligned} P(d | \gamma_{1,0}, \gamma_{2,0}) &= P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2) \\ &< \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{h_1^2}{4N_1} \sum_{e=1}^{d_1} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -\frac{h_2^2}{4N_2} \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right\}. \end{aligned}$$

d_{\max} 表示求和式的项数, 一般不用太大, 如本文仿真选择为 1 和 6.

5 编码协作中的映射方式以及交织器设计

由于方案中采用了比特交织器, 根据式(3)、(8)、(11)等, 信噪比固定时, Δ_u 和调制方式 χ 、映射方式 μ 有关, 该值越大, PEP 就越小. 16QAM 调制, 信号平均功率为 1 时相应的计算结果如表 1 所示. 可见非协作时, GRAY 映射为最佳映射; 而协作时, 因为满足 $\Delta_1 \Delta_2$ 最大的映射为最佳映射, 因此要求两用户映射方式都应选择为相同的 GRAY 映射.

表 1 各种标识映射方法的计算 Δ_u 值***

χ	GRAY	SP	MSP	MSEW	MIXED	EFD	DRO
Δ_u	0.700	0.550	0.475	0.400	0.400	0.475	0.4562

对交织器而言, 从系统实现角度考虑, 不同用户的交织器应相同. 对同一用户, 考虑到在第二帧发送前需要对第一帧接收数据译码, 因此, 第一帧和第二帧比特应分别交织(如图 1, 分别对应 π_1 和 π_2). 这样, 当两帧长度不等时, 交织器 π_1 和 π_2 必然不同; 当两帧长度相等时(50% 协作), 交织器可以选择相同或者不同, 但不同时更利于提高性能, 这点我们将在仿真中进一步说明.

6 计算机仿真

两用户编码协作方案采用的仿真参数为: 信息块长度 $K = 512$, 采用生成多项式为 [5 7 7 7] 的 RCPC 码, 码率为 1/4 和 1/2, 即对应的 $P_1 = P_2 = 1024$. 比特交织器长度为 1024. 根据本文对编码协作映射方式的分析, 调制方式采用 GRAY 映射的 16QAM 调制, 接收端采用最大后验概率解映射及软 Viterbi 译码算法. 用户和基站的信道为瑞利衰落信道且相互独立, 基站完全已知上行链路信道状态信息.

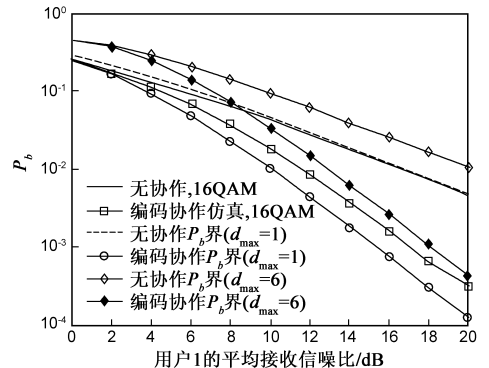


图 3 16QAM 调制下, 两用户上行链路信道质量相同时的协作性能

图 3 给出了当用户 1、2 上行链路信道质量相同时用户 1 的协作与非协作性能比较, 假定用户间信道条件

*** 各种映射方式的定义请参见文献[13]

较好,可以正确译码,即完全协作.由于此时两用户的性能曲线完全相同,图3仅以用户1为例说明.结合图3给出的关于协作以及非协作时的误比特概率的上界,可以看出协作时可以获得2阶分集增益,从而从误比特概率的角度验证了式(2)的分析结果.注意到图3中给出了利用式(18)的两种不同的上界, $d_{\max} = 1$ 以及 $d_{\max} = 6$.当 $d_{\max} = 1$ 时,式(18)和式(17)表示的上界等价.

上文在分析时假定理想交织,从而保证比特间的衰落独立性,实际中采用的非理想交织器不能保证统计独立的条件,会造成一定的性能损失,这也使得其理论分析相当困难.本文通过仿真帮助读者理解交织器对系统性能的影响.定义两种S随机交织器:S-Random1和S-Random2.其它参数同图3设置.图4给出了当 π_1 和 π_2 分别为[S-Random1 S-Random1],[S-Random1 S-Random2],[S-Random2 S-Random2]时的完全协作性能.说明两帧的比特交织器选择不同更利于提高性能,而复杂度几乎没有增加.这是因为,当发送两帧采用不同的交织器时,相当于增加了整个发送帧的交织长度,使得接收比特更接近分布独立的条件.

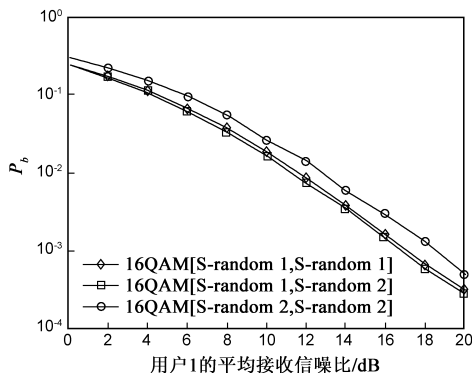


图4 不同交织器时的协作性能,16QAM调制,上行链路信道质量相同

7 结论

本文对提出的基于高阶星座调制的两用户高效CC方案进行了详细分析.慢瑞利衰落信道下,成对错误概率和误比特概率界公式都表明采用高阶星座调制的CC方案仍然可以获得二阶完全分集;而快衰落信道下,类似基于BPSK调制的CC方案,不能获得协作分集.论文同时对协作用户的映射方式选择以及不同帧的交织器设计问题给出了一定的分析.下一步将研究信道估计误差对性能的影响.

参考文献:

[1] A Sendonaris, E Erkip, B Aazhang. User cooperation diversity-Part I, II[J]. IEEE Transaction on Communications, 2003, 51(11):1927-1948.

[2] J N Laneman, D Tse, G Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.

[3] T E Hunter, A Nosratinia. Diversity through coded cooperation[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2006, 52(2):283-289.

[4] T E Hunter, S Sanayei, A Nosratinia. Outage analysis of coded cooperation[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2006, 52(2):375-391.

[5] A Stefanov, E Erkip. Cooperative coding for wireless networks[J]. IEEE Transaction on Communications, 2004, 52(9): 1470-1476.

[6] A Chakrabarti, A de Baynast, A Sabharwal, B Aazhang. Low density parity check codes for relay channel[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 280-291.

[7] M Janani, A Hedayat, T E Hunter, A Nosratinia. Coded cooperation in wireless communications: space-time transmission and iterative decoding[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2004, 52(2):362-371.

[8] Z Lin, E Erkip, A Stefanov. Cooperative regions and partner choice in coded cooperative systems[J]. IEEE Transaction on Communications, 2006, 54(7):1323-1334.

[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.
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. (in Chinese)

[10] 宫丰奎, 韩春雷, 王勇, 葛建华. 慢衰落信道下高阶调制编码协作方案及性能分析[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2008, 35(4):664-667.
Gong Feng-kui, Han Chun-lei, Wang Yong, Ge Jian-hua. Design and analysis of a CC scheme with high-order constellations over slow-fading rayleigh channels[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(4):664-667. (in Chinese)

[11] G Caire, G Taricco, E Biglieri. Bit-interleaved coded modulation[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1998, 44(5):927-946.

[12] E Malkamäki, H Leib. Evaluating the performance of convolutional codes over block fading channels[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1999, 45(5):1643-1646.

[13] 宫丰奎, 葛建华, 李兵兵等. BI-STCM-ID系统的标识映射设计及性能分析[J]. 计算机学报, 2006, 29(4):561-569.
Gong Feng-kui, Ge Jian-hua, Li Bing-bing. Design and analysis of labeling map methods for BI-STCM-ID system[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(4):561-569. (in Chinese)

作者简介:



宫丰奎 男,1979 年 11 月出生于山东潍坊.2007 年毕业于西安电子科技大学通信工程学院,获得博士学位.现为西安电子科技大学副教授,硕士生导师,从事宽带无线通信信号处理、卫星通信等方面研究.

E-mail: fkgong@xidian.edu.cn



葛建华 男,1961 年 9 月出生于江苏南通.1989 年毕业于西安电子科技大学获通信与电子系统学科博士学位,现为西安电子科技大学教授,博士生导师,通信工程学院科研副院长,综合业务网理论及关键技术国家重点实验室副主任,陕西省电子学会理事.主要研究方向为无线通信、高清晰度数字电视技术.

E-mail: jhge@xidian.edu.cn

王 勇 男,1976 年 7 月出生于陕西西安.2005 年获通信与信息工程专业博士学位.现为西安电子科技大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为新一代无线通信关键技术.

E-mail: johnnyly@xidian.edu.cn

张 南 女,1980 年 5 月出生于湖北天门,2005 年获通信与信息工程专业硕士学位.现为西安电子科技大学讲师,在读博士生,主要研究方向为协作通信.

E-mail: nzhang532@yahoo.com.cn

(上接第 757 页)

- [9] B Li, R Difazio and A Zeira. results on SNR estimation of MP-SK modulated signals[J]. Proc. IEEE PRIMC, 2003: 2373 – 2377.
- [10] B Li, R Difazio and A Zeira. A low bias algorithm to estimate negative SNRs in an AWGN channel[J]. IEEE Commun. Letters, 2006, 6(2): 469 – 471.
- [11] 许华, 郑辉. MPSK 信号的最大似然 SNR 估计方法[J]. 电子与信息学报, April. 2005, 27(4): 527 – 531.
- XuHua, ZhengHui. On the maximum – likelihood SNR estimation algorithm for MPSK signals[J]. Journal of Electronics&

Information Technology. April. 2005, 27(4): 527 – 531. (in Chinese)

- [12] N S Alagha. Cramer-Rao bounds of SNR estimates for BPSK an QPSK modulated signals[J]. IEEE Commun. Letters, 2001, 5(1): 10 – 12.
- [13] J S Lee and L E Miller. CDMA 系统工程手册[M], 许希斌, 周世东等译, 北京: 人们邮电出版社, 2002.
- J S Lee and L E Miller. CDMA Systems Engineering Handbook, J S Lee Associates, Inc. 1998.