

# 慢衰落信道下高阶调制编码协作方案及性能分析

宫丰奎, 韩春雷, 王 勇, 葛建华

(西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 提出一种基于高阶星座调制的高效编码协作方案. 用户或协作伙伴的编码比特分组后分别通过比特交织器, 之后映射到高阶二维星座按分配时隙发送. 推导了该协作方案在慢瑞利衰落信道下的成对错误概率. 理论分析及仿真结果都表明, 慢瑞利衰落信道下, 本方案在提高频谱效率的同时可获得完全分集.

**关键词:** 编码协作; 成对错误概率; 分集; 高阶二维星座; 比特交织器

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2008)04-0664-04

## Design and analysis of a CC scheme with high-order constellations over slow-fading rayleigh channels

GONG Feng-kui, HAN Chun-lei, WANG Yong, GE Jian-hua

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

**Abstract:** A high-efficient coded cooperative (CC) scheme with high-order constellations is proposed. In this scheme, encoded bits of the user or the partner are partitioned, bit interleaved, mapped on a high-order two-dimensional constellation and then transmitted on the allocated time slots. The pairwise error probability over slow-fading Rayleigh channels are derived. Both theoretical analysis and simulations show that the coded cooperation with high-order constellations can achieve full diversity with an improved spectrum efficiency over slow-fading Rayleigh channels.

**Key Words:** coded cooperation; pairwise error probability; diversity; high-order two-dimensional constellation; bit interleaver

无线信道的多径衰落特性是影响其传输速率与质量的重要瓶颈, 而分集技术是抵抗多径衰落的有效方式. 如以多输入多输出技术(Multiple Input Multiple Output, MIMO)为首的空间分集可使得接收端得到经历独立衰落的多个信号副本, 从而有效消除多径衰落的影响. 由于多天线技术不需要占用额外的时间和频带资源, 因此得到了广泛关注. 考虑到在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 MIMO 技术的应用. 协作分集<sup>[1,2]</sup>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<sup>[3,4]</sup>, 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, 如适合 CC 的纠错码设计<sup>[5,6]</sup>、快衰落信道下的 CC 协议<sup>[7]</sup>及 CC 协议下的伙伴选择<sup>[8]</sup>等问题. 上述研究都假定为 BPSK 调制, 频谱利用率很低. 为了提高谱效率, 有必要研究高阶二维星座调制在 CC 中的应用.

笔者考虑采用基于高阶调制时的 CC 方案的协作性能, 提出一种两用户协作时, 基于比特交织编码调制

收稿日期: 2007-10-20

基金项目: “863”项目资助(2006AA01Z270); 国家自然科学基金资助(60496316, 60772138); 广东自然科学基金项目资助(U0635003); 高等学校学科创新引智计划资助(B08038)

作者简介: 宫丰奎(1979-), 男, 讲师, 博士, E-mail: fkgong@xidian.edu.cn.

(Bit Interleaved Coded Modulation, BICM)技术的 CC 方案. 该方案中协作用户编码比特分组后分别通过比特交织器,之后映射到高阶二维星座按分配时隙发送. 采用 TDMA 区分不同的多址信道. 进一步通过分析成对错误概率研究其在慢瑞利衰落信道下的分集增益.

### 1 基于二维星座调制的 CC 方案

考虑采用高阶星座调制时的两用户编码协作方案,如图 1 所示. 为了便于说明,定义: 每个用户  $u$  ( $u = 1, 2$ ) 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,  $f = 1, 2$ ;  $F_k$  表示采用 TDMA 方式时的第  $k$  个时隙,这里  $k = 1, 2, 3, 4$ ;  $r^{(k)}(n)$  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.

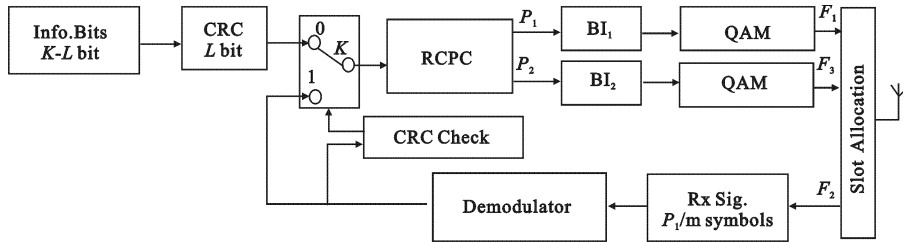


图 1 基于二维星座调制的 CC 方案实现框图(协作用户 1 为例)

协作流程说明: 长度为  $K$  的信息比特(包含  $L$  长的 CRC 校验位, Cyclic Redundancy Check)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 1 帧, 每个用户  $u$  发送的符号为  $P_1$  个编码比特交织后的映射符号  $\mathbf{x}_{u,1} = [x_{u,1}(1), x_{u,1}(2), \dots, x_{u,1}(P_1/m)]$ (假定  $P_1, P_2$  被  $m$  整除). 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 2 帧, 用户  $u$  将计算并发送其伙伴的第 2 部分, 包括  $P_2$  个比特交织映射后的符号序列  $\mathbf{x}_{u\oplus 2,2} = [x_{u\oplus 2,2}(1), x_{u\oplus 2,2}(2), \dots, x_{u\oplus 2,2}(P_2/m)]$ ( $\oplus$  表示模 2 加). 否则用户  $u$  将在第 2 帧传送自己的第 2 部分  $\mathbf{x}_{u,2} = [x_{u,2}(1), x_{u,2}(2), \dots, x_{u,2}(P_2/m)]$ .

### 2 慢衰落信道下基于 PEP 的 CC 性能分析

通过推导瑞利衰落信道下的成对错误概率(PEP), 分析图 1 方案的协作分集性能. 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, 汉明距离为  $d$ ;

$\mathbf{x}$  和  $\hat{\mathbf{x}}$  为对应  $\mathbf{c}$  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

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

相应的用户  $u$  到基站信道的路径衰落  $\mathbf{h}_u$  定义为

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

考虑准静态瑞利衰落信道, 即每个用户在一周期内的衰落内保持不变,  $h_{u,1} = h_{u,2} = \dots = h_{u,d} = h_u$  为服从瑞利分布的独立同分布随机变量. 于是, 采用编码协作且用户间完全协作时, 基于信道衰落的条件 PEP 表示为

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2) = Q \left( \left( \frac{1}{2N_1} h_1^2 \sum_{e=1}^{d_1} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 + \frac{1}{2N_2} h_2^2 \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right)^{1/2} \right) \quad , \quad (1)$$

式中  $N_u$  是用户  $u$  的噪声功率谱密度, 因为  $Q(x) = \int_0^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2 \sin^2 \theta}\right) d\theta$  以及当  $h$  为瑞利分布时, 有

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

则非条件 PEP 表示为

$$\begin{aligned} P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) &= E_{h_1, h_2} [P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2)] = \\ &\int_0^\infty \int_0^\infty P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2) P(\mathbf{h}_1) P(\mathbf{h}_2) d\mathbf{h}_1 d\mathbf{h}_2 = \\ &\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\infty \int_0^\infty \exp \left\{ -\frac{1}{2 \sin^2 \theta} \left[ \frac{h_1^2}{2N_1} \sum_{e=1}^{d_1} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 + \frac{h_2^2}{2N_1} \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right] \right\} p(h_1) p(h_2) dh_1 dh_2 d\theta = \\ &\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left[ 1 + \frac{E[h_1^2]}{4 \sin^2 \theta N_1} \sum_{e=1}^{d_1} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right]^{-1} \left[ 1 + \frac{E[h_2^2]}{4 \sin^2 \theta N_2} \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right]^{-1} d\theta \quad , \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)含有积分,为了进一步简化,考虑到不等式  $Q(x) < \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$ , 式(1)满足:

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2) < \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{1}{4N_1} h_1^2 \sum_{e=1}^{d_1} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right\} \exp \left\{ -\frac{1}{4N_2} h_2^2 \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right\} \quad . \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得到

$$\begin{aligned} P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) &< E_{h_1, h_2} \left[ \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{1}{4N_1} h_1^2 \sum_{e=1}^{d_1} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right\} \exp \left\{ -\frac{1}{4N_2} h_2^2 \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right\} \right] = \\ &\frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{E[h_1^2]}{4N_1} \sum_{e=1}^{d_1} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right]^{-1} \left[ 1 + \frac{E[h_2^2]}{4N_2} \sum_{e=1}^{d_2} \|x_e - \hat{x}_e\|^2 \right]^{-1} \quad , \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{式(4)还可以进一步写成 } P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) < \frac{1}{2} \left( 1 + \sum_{e=1}^{d_1} \Delta_{1,e} \right)^{-1} \left( 1 + \sum_{e=1}^{d_2} \Delta_{2,e} \right)^{-1} \quad , \quad (5)$$

其中  $\Delta_{u,e} = (E[h_u^2]/(4N_u)) \|x_e - \hat{x}_e\|^2$ . 假定理想比特交织以及 Gray 映射,  $\Delta_{u,e}$  是独立同分布的随机变量, 则对所有星座点取平均可以得到:

$$f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \frac{1}{1 + d_1 \Delta_1} \frac{1}{1 + d_2 \Delta_2} \quad , \quad (6)$$

其中  $\Delta_u = \frac{E[h_u^2]}{m2^m} \sum_{k=1}^m \sum_{b=0}^1 \sum_{x_i \in \chi(b,k)} \frac{\|x_i - \tilde{x}_i\|^2}{4N_u}$ , 该值和信噪比有关,  $\tilde{x}_i$  为  $x_i$  的最近邻,  $\chi(i, b)$  表示第  $i$  比特为  $b$  的信号矢量集合. 式(6)利用了 BICM 理论中的删余界思想<sup>[9]</sup>. 注意根据式(6), 不同的调制方式和映射方式, 计算的  $\Delta_u$  不同, 故  $f(d, \mu, \chi)$  和调制方式  $\chi$  以及映射方式  $\mu$  有关.

特殊情况下, 当采用 BPSK 调制时, 假定符号间距为  $2a$ , 信道衰落均方值为 1, 式(6)简化为

$$f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \frac{1}{1 + d_1 \Gamma_1} \frac{1}{1 + d_2 \Gamma_2} \quad , \quad (7)$$

其中,  $\Gamma_u = \frac{a^2}{N_u} E[h_u^2] = \frac{E_s}{N_u}$  表示用户  $u$  到基站信道的信噪比. 式(7)和 Hunter 等<sup>[4]</sup>给出的结果一致.

$$\text{而非协作时, 易得到: } f(d, \mu, \chi) < \frac{1}{2} \left[ 1 + d \frac{E[h^2]}{m2^m} \sum_{k=1}^m \sum_{b=0}^1 \sum_{x_i \in \chi(b,k)} \frac{\|x_i - \tilde{x}_i\|^2}{4N_0} \right]^{-1} \quad . \quad (8)$$

由式(6)及(8)可见, 采用比特交织器的高阶星座调制方案, 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.

### 3 计算机仿真

两用户编码协作方案采用的仿真参数: 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  $P_1 = P_2 = 1024$ . 比特交织器采用长度为 1024 的随机交织器(该例假定图 1 的两个比特交织器相同). 调制方式采用 GRAY 映射的 QPSK 调制或者 16QAM, 接收端采用最大后验概率解映射及软 Viterbi 译码算法<sup>[10,11]</sup>. 假定完全协作. 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.

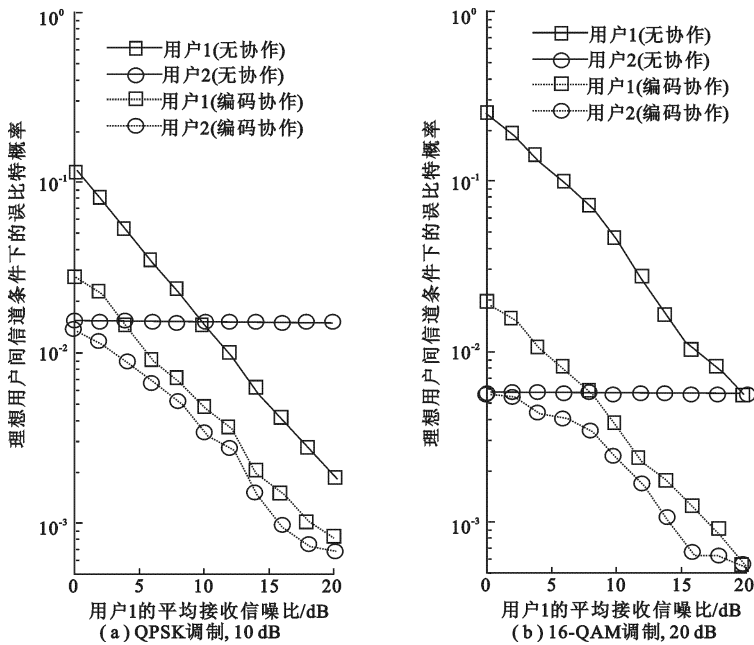


图 2 用户 2 上行信道信噪比固定时用户 1 的性能比较

图 2 给出了当用户 2 上行链路信道信噪比分别固定为 10 dB 以及 20 dB 时用户 1 的协作与非协作性能比较, 对应的调制方式分别为 QPSK 和 16QAM. 可见, 与未协作时比较, 协作伙伴信道为 10dB 时用户的性能改进大于 6 dB (QPSK 调制); 而协作伙伴信道为 20dB 时用户的性能改进近似为 12 dB (16QAM 调制). 对照 Hunter 等<sup>[4]</sup>人给出的 BPSK 的结果, 可以看出, 协作性能的改进主要取决于协作用户信道质量, 和选择的调制方式关系不大, 这同时也验证了式(7)的结论. 图 3 进一步给出了两用户上行信道质量相同时, 协作与非协作的性能比较. 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. 两种调制方式的仿真结果都表明, 信道质量越好, 协作对性能改进就越明显. 图 3 还表明, 对块衰落信道, 比特交织器的应用使得本文协作仿真系统的性能提高约 1 dB.

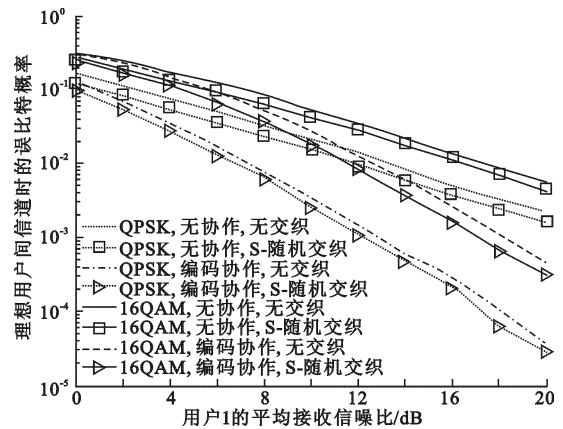


图 3 两用户上行链路信道质量相同时的协作性能

## 4 结 论

笔者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. 准静态瑞利衰落信道下, 成对错误概率公式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. 论文通过对完全协作下系统的性能仿真验证了该结论. 当协作用户间信道较差, 即部分协作时的情况也可以类似得到. 论文下一步继续研究快衰落信道下的高阶调制编码协作方案及其性能界.

### 参考文献:

[1] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User Cooperation Diversity-part I, II [J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(11): 1927-1948.