

基于 Spinal 码的编码协作^①

杨二鹏^② 吴绍华^③ 许嗣岳 罗俊欣

(哈尔滨工业大学深圳研究生院 深圳 518055)

摘 要 针对 5G 的高速率传输需求,研究了基于 Spinal 码的编码协作。基于 Spinal 码的无速率性,提出了直接选用不同通道内所有编码符号实现编码协作的 CC-SPSC 方案。在此方案基础上,考虑基站在设备条件和中心调度方面的优势,引入以基站为控制核心的策略,提出了 CC-SPSC-BSC-AL 方案和 CC-SPSC-BSC-SR 方案。仿真结果表明,所提方案在模拟信道和数字信道下均有显著的误码率性能提升,尤其是 CC-SPSC 和 CC-SPSC-BSC-SR 方案,分别在模拟信道和数字信道下的应用优势突出。

关键词 分集, 编码协作(CC), 信道编码, 无速率码, Spinal 码

0 引 言

编码协作结合信道编码实现虚拟多输入多输出 (multi-input multi-output, MIMO) 技术,在不增加额外开销的前提下能同时取得编码增益和分集增益,在 5G 及未来通信中极具应用前景。Spinal 码是新近提出的可近容量限传输的无速率信道编码技术,是编码协作中信道编码环节的优选。未来 5G 无线移动通信系统的突出需求是更快的速率和更大的容量,而无线信道环境复杂多变,存在各种衰落^[1],分集技术能够明显削弱衰落对通信系统的影响,进而提升系统速率和容量。MIMO 系统是分集技术中典型而有效的一种空间分集方式,应用广泛,但是在移动通信系统中,移动台受到天线尺寸和发射功率的限制,较难实现 MIMO 系统的发送分集。协作通信技术^[2]使多个单天线的移动终端按照一定规则来共享它们的天线,构成虚拟的 MIMO 系统,能够取得明显的分集增益,且多小区协作能够构成提高速率、容量的基本框架。典型的协作技术有放大转发、译码转发及编码协作,放大转发和译码转发的实质是

通过协作伙伴向基站传输重复信息,消耗协作伙伴资源较大。编码协作^[2,3]结合信道编码,通过两条独立的衰落路径传输用户码字的不同部分,保持了与非协作情形相同的码率、发射功率和带宽,几乎不额外占用协作伙伴的资源,且能够同时取得编码增益和分集增益,这些特点使编码协作在 5G 通信中有很好的应用前景。

物理层具体的信道编码方式的选择,是影响编码协作性能的重要因素,应采用可近香农限传输的先进编码技术,以满足高速率需求。Spinal^[4]码是新近提出的一种在二进制对称信道(BSC)、加性高斯白噪声(AWGN)信道上均能实现近容量限传输的无速率编码方式。无速率编码技术由于其前向递增冗余特性,可自动适应信道变化,在很少增加系统开销的前提下适应复杂多变的无线信道,对噪音和错误有很好的鲁棒性。同时,Spinal 码的编译码复杂度与消息长度均呈线性关系,在极宽的信噪比范围内均获得了很好的性能^[5]。这些特点使得 Spinal 码在编码协作及 5G 中的应用具有很大的研究价值。近年来众多学者对编码协作技术进行了研究,然而由于 Spinal 码是新近提出的一种信道编码方式,学

① 863 计划(2014AA01A704)和国家自然科学基金(6146113600, 61371102)资助项目。

② 男,1993 年生,硕士;研究方向:信道编码,编码协作;E-mail: erpengyang@sina.com

③ 通讯作者,E-mail: hitwush@hit.edu.cn

(收稿日期:2016-12-11)

界内关于 Spinal 码的研究很少,尤其是 5G 背景下关于 Spinal 码在编码协作中的应用研究几乎空白。本文着眼于 Spinal 码和编码协作技术在未来 5G 通信中的巨大应用潜力,选用瑞利慢衰落加高斯白噪声的信道模型,针对 Spinal 的特性,全面地展开其在编码协作中的研究:(1) 基于 Spinal 码应用哈希函数 h 和随机数发生器 (random number generator, RNG),可产生任意个通道编码符号数的无速率特性,提出直接选用 Spinal 码不同通道内所有编码符号实现编码协作的方案:CC-SPSC (coded cooperation with selected passes of Spinal codes)。(2) CC-SPSC 方案在模拟信道下误码率性能提升明显,然而在数字信道下并不理想,针对数字信道工作模式下的特点,以及 5G 通信系统中基站在设备条件和中心调度方面的优势,结合文献[6-14],在 CC-SPSC 方案中引入以基站为控制核心的策略,提出了方案 CC-SPSC-BSC-AL (coded cooperation with selected passes of Spinal codes and base station control-altruism) 和方案 CC-SPSC-BSC-SR (coded cooperation with selected passes of Spinal codes and base station control-self regard)。本研究对各方案分别在模拟信道和数字信道下进行了大量的仿真测试。仿真结果表明各方案在模拟信道和数字信道下,相对不协作均能提升系统的误码率性能。在模拟信道下 CC-SPSC 方案的误码率性能最优,在数字信道下 CC-SPSC-BSC-SR 方案的误码率性能最优。

1 系统模型

图 1 所示为最简单的两用户 (U1、U2) 和基站 (B) 通信,U1、U2 相互协作的模型图,本部分主要介绍该系统模型的工作方式。在编码协作系统中每个用户的信息传输分为两帧:第一帧和第二帧。每个用户先对经循环冗余校验码 (cyclic redundancy check, CRC) 编码后的 k 比特待传信息进行信道编码,编码后码字为 C (码长 $N = N_1 + N_2$),采用一定的方式构造两部分分码字 C_1 (码长 N_1) 和 C_2 (码长 N_2)。每个用户第一帧,把自己的数据编码后得到的分码字 C_1 调制后广播发送,同时接收协作伙伴的

数据并进行译码。如果译码正确 (通过 CRC 码判断),则采用同样的编码处理过程得到协作伙伴未发送的分码字 C_2 ,在自己的第二帧传输。如果译码错误,则在第二帧传输自己数据编码后的分码字 C_2 。在基站端,根据协作发生情况,对接收到的每个用户的两帧数据进行组合译码。

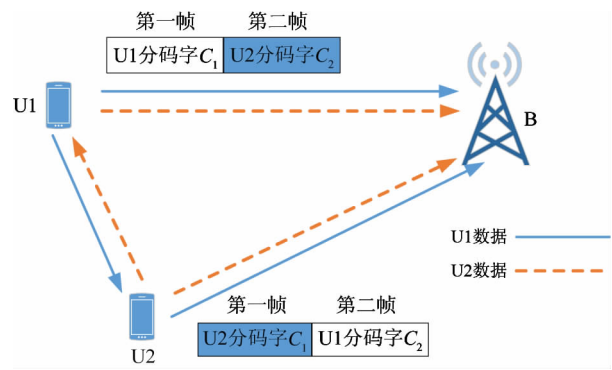


图 1 编码协作系统模型

每个用户接到其他用户的数据以后,对其他用户数据的译码正确与否导致其第二帧数据的传输有 4 种情况。情况 1:U1 把 U2 的数据译码正确,同时 U2 也把 U1 的数据译码正确,U1 第二帧协作传输 U2 的数据,U2 第二帧也协作传输 U1 的数据。情况 2:U1、U2 都没有把对方的数据译码正确,在自己的第二帧只传输自己的数据,不进行协作。情况 3:U2 把 U1 的数据译码正确,第二帧协作传输 U1 的数据,而 U1 没有把 U2 的数据译码正确,第二帧还是传输自己的数据。情况 4:U1 把 U2 的数据译码正确,第二帧协作传输 U2 的数据,而 U2 没有把 U1 的数据译码正确,第二帧还是传输自己的数据。

我们可以对上述编码协作系统在慢衰落信道下的成对差错概率进行简单的理论分析。成对差错概率如下式所示:

$$P(c \rightarrow e | \gamma) = Q\left(\sqrt{2 \sum_{n \in \eta} \gamma(n)}\right) \quad (1)$$

式中 $Q(x)$ 为 Q 函数,向量 γ 表示瞬时接收信噪比, c 为传输的码字, e 为接收端译码后含有错误的译码码字。集合 η 为所有满足 $c(n) \neq e(n)$ 的 n 的集合,因此 $|\eta| = d$, d 为 c 和 e 之间的汉明距离。假设传输的码字为接收端译码错误概率独立于传输码字的线性码,则上式可以简化为 $P(d | \gamma)$ 。

在慢衰落信道下,每个时隙内所传输的码字经历的信道衰落情况是不变的,即 $\gamma_{i,0}(n) = \gamma_{i,0}$, $n = 1, \dots, N$ 。在情况 1 中,每个用户的数据经过其自己的信道和协作用户的信道传输,因此, U1 的成对错误概率如下式所示:

$$P(d | \gamma_{1,0}, \gamma_{2,0}) = Q(\sqrt{2d_1\gamma_{1,0} + 2d_2\gamma_{2,0}}) \quad (2)$$

式中 d_1 和 d_2 分别表示 U1 数据经过 U1 信道和 U2 信道传输后,在接收端译码错误的位数 ($d_1 + d_2 = d$),有

$$P(d) = \int_0^\infty \int_0^\infty P(d | \gamma_{1,0}, \gamma_{2,0}) p(\gamma_{1,0}) p(\gamma_{2,0}) d\gamma_{1,0} d\gamma_{2,0} \quad (3)$$

式中 $p(\cdot)$ 为慢衰落信道的错误概率分布函数。使用文献[6]中的 Q 函数计算方法和矩生成函数法,在瑞利慢衰落信道下有

$$P(d) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left(1 + \frac{d_1 \Gamma_{1,0}}{\sin^2 \theta}\right)^{-1} \left(1 + \frac{d_2 \Gamma_{2,0}}{\sin^2 \theta}\right)^{-1} d\theta$$

$$P(d) \leq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 + d_1 \Gamma_{1,0}}\right) \left(\frac{1}{1 + d_2 \Gamma_{2,0}}\right) \quad (4)$$

可见,式(4)的错误概率与两用户上行信道平均信噪比的乘积成反比,当 d_1 和 d_2 都不为 0 时,如果 U1 和 U2 能对彼此的数据正确接收,并互相协作,采用编码协作后 B 处将达到和 2 阶分集相同的译码性能提升。

在情况 3 中, U2 把 U1 的数据译码正确,而 U1 没有把 U2 的数据译码正确,两用户第二帧均输 U1 的数据。U1 的数据在 B 处将进行最佳的合并后译码,此时,对于 U1 上述式(1)变为

$$P(d | \gamma_{1,0}, \gamma_{2,0}) = Q(\sqrt{2d_1\gamma_{1,0} + 2d_2(\gamma_{1,0} + \gamma_{2,0})})$$

$$= Q(\sqrt{2d\gamma_{1,0} + 2d_2\gamma_{2,0}})$$

可得

$$P(d) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left(1 + \frac{d \Gamma_{1,0}}{\sin^2 \theta}\right)^{-1} \left(1 + \frac{d_2 \Gamma_{2,0}}{\sin^2 \theta}\right)^{-1} d\theta$$

$$\leq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 + d \Gamma_{1,0}}\right) \left(\frac{1}{1 + d_2 \Gamma_{2,0}}\right) \quad (5)$$

式(5)表明,当 d_1 和 d_2 都不为 0 时,在情况 3 下 U1 参与编码协作后,同样获得了和 2 阶分集相同的增益。上述初步的理论分析表明, U1 和 U2 使用自己

的单天线实现编码协作后,能够获得 2 根天线实现的 2 阶分集相当的传输增益。

在本文后续的研究中,使用 Matlab 进行实验,在 Matlab 中实现编码协作时,首先是对图 1 中两用户间的交互信道和上行信道的建模,然后是按照各种编码协作方案的原理对各用户的数据传输流程编写仿真程序,其中在 Matlab 中实现信道建模的理论基础如下:

图 1 中两用户间的交互信道和每个用户到基站的上行信道,均建模为瑞利慢衰落加高斯白噪声信道,每个用户采用时分多址(TDMA)的方式实现各个信道的正交分离,调制解调方式选择 4G 系统中建议的 16QAM。 n 时刻,用户 i ($i \in \{1, 2\}$, $i=1$ 表示 U1, $i=2$ 表示 U2) 发送,被对象 j ($j \in \{1, 2\}$, $j \neq i$, $j=1$ 代表 U1, $j=2$ 代表 U2, $j=0$ 代表基站 B) 接收的信号 $r_{i,j}(n)$ 见下式:

$$r_{i,j}(n) = h_{i,j}(n) \times u_i(n) + n_{i,j}(n) \quad (6)$$

式中 $h_{i,j}(n)$ 为信道传输时经历的衰落系数,服从能量归一化的瑞利分布,且在一帧数据时间内保持不变, U1 到 U2 的传输信道与 U2 到 U1 的传输信道可逆,即 $h_{1,2}(n) = h_{2,1}(n)$ 。 $u_{i,j}(n)$ 为用户 i 经过 16QAM 调制后的传输符号,符号能量进行了归一化。 $n_{i,j}(n)$ 为信号传输过程中经历的高斯噪声,服从均值为 0、均方值为 $N_{i,j}/2$ 的高斯分布。用户 i 到 j 的瞬时接收信噪比 $\gamma_{i,j}(n)$ 如下式所示:

$$\gamma_{i,j}(n) = \frac{h_{i,j}^2(n) \times E_s}{N_{i,j}} \quad (7)$$

式中 $E_s = 1$ 表示调制符号能量,每条信道的状态条件用它的平均接收信噪比 $\Gamma_{i,j}$ 来量化,如下式所示:

$$\Gamma_{i,j} = E[\gamma_{i,j}(n)] = E\left[\frac{h_{i,j}^2(n) \times E_s}{N_{i,j}}\right] = \frac{E[h_{i,j}^2(n)]}{N_{i,j}} \quad (8)$$

2 Spinal 编译码基本原理

Spinal 编译码的核心思想是使用与卷积码类似的结构,引入 Hash 函数对输入比特序列进行散列随机编码。在发送端, Spinal 码的编码流程如图 2 所示。首先,将长度为 n bit 的信息比特序列 M , 以 k

bit 为单位,分成 n/k 个信息块,即 $M = \bar{m}_1 \bar{m}_2 \cdots \bar{m}_{n/k}$ 。每个信息块 $\bar{m}_i$ 都通过哈希函数生成一个与它对应的状态值 S_i 。然后,以 S_i 为随机数发生器(RNG)的种子生成随机比特序列。对每一个信息序列 M ,发送端编码后,对应生成多个通道(设通道数为 L)的编码序列,当一个通道编码结束时,加上 CRC 校验发送出去,然后继续编码发送下一个通道,直到收到接收端正确译码的反馈信息,或者是接收端(或发送端)放弃这段信息序列,发送端才开始发送下一个信息序列 M ,这一过程也正是体现了 Spinal 码的无速率特性。

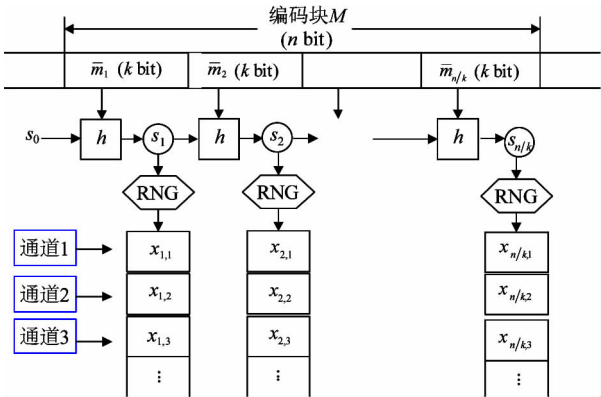


图 2 Spinal 编码原理图

Spinal 译码的核心思想是最大似然 (ML) 译码,接收端译码原理图如图 3 所示。

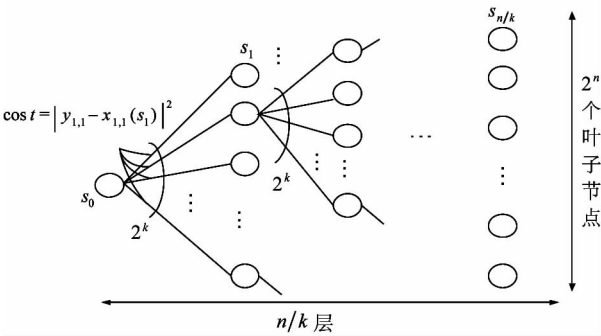


图 3 Spinal 码的最大似然译码原理图

译码时要使用与编码端相同的初始状态值 S_0 、哈希函数 h 和 RNG 复现译码树:以 S_0 为根节点,顺序考虑各个信息块 $\bar{m}_i$ 的 2^k 种可能取值,利用已知的和编码端相同的 h ,生成译码树上第 i 级共 2^{ik} 个

子节点 S_i 。把每一个复现的 S_i 作为已知的 RNG 的种子,可得到该 S_i 对应的信息块 $\bar{m}_i$ 的 Spinal 编码结果,记作 $\bar{x}(\bar{m}')$,然后把复现的该编码结果与接收到的编码进行对比,利用 ML 规则确定译码结果。在模拟信道和数字信道下,Spinal 码译码时的处理有所不同。模拟信道下,译码端没有独立的解调模块,译码过程中采用和编码端完全相同的 h 和 RNG 复现编码后,再采用和编码端相同的调制方式得到待选的调制符号,然后将调制符号与接收到的带噪声的接收符号计算最小二范数距离,作为译码路径开销,模拟信道工作模式采用联合解调译码,能够充分利用接收信号所携带的信道信息。数字信道下对应有独立的调制、解调模块,接收端译码之前先进行解调得到数字信号,计算解调后的数字信号与复现的待选比特间的汉明距离,作为译码路径开销。

ML 译码结果对应译码路径开销和最小的叶节点。以模拟信道工作模式为例,当接收到共 L 个通道的符号后,接受到的符号 $\bar{y}$ 见下式:

$$\bar{y} = \begin{pmatrix} \{y_{1,1}, y_{2,1}, \cdots, y_{n/k,1}\}, \\ \{y_{1,2}, y_{2,2}, \cdots, y_{n/k,2}\}, \\ \cdots, \\ \{y_{1,L}, y_{2,L}, \cdots, y_{n/k,L}\} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$\bar{y}$ 对应的 ML 译码结果见下式:

$$\begin{aligned} \hat{M} &= \underset{M' \in (0,1)^n}{\operatorname{argmin}} \|\bar{y} - \bar{x}(M')\| \\ &= \underset{M' \in (0,1)^n}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^{n/k} \sum_{j=1}^L \|\bar{y}_{i,j} - \bar{x}_{i,j}(\bar{m}')\| \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\bar{y}_{i,j}$ 表示第 i 个信源信息块对应的第 j 个通道的编码结果经过信道传输后在接收端收到的符号, $\bar{x}_{i,j}(\bar{m}')$ 表示接收端复现的第 i 个信源信息块对应的第 j 个通道的复现编码结果,内层求和 $\sum_{j=1}^L \|\bar{y}_{i,j} - \bar{x}_{i,j}(\bar{m}')\|$ 是译码树上第 i 级 L 个通道的路径开销和,外层求和 $\sum_{i=1}^{n/k} \sum_{j=1}^L \|\bar{y}_{i,j} - \bar{x}_{i,j}(\bar{m}')\|$ 为所对应 M' 的叶节点的译码路径开销和。

Spinal 采用最大似然译码思想,需要遍历计算 M' 的共 2^n 种可能,是指数级的复杂度,计算量巨大,实用性差。依据 Spinal 码顺序的编码结构和哈希函数的强混合作用等特点,可以得到一种基于译码树裁减的近似 ML 译码规则^[4]:从译码树的某一级开

始(设为第 d 级),只保留该级节点中译码开销和最小的 B 个,后续的每一级扩展,只需计算 $B \cdot 2^k$ 个子节点的译码开销,并继续保留最小的 B 个,如此继续,最后形成的部分译码中,所保留的 B 个叶节点中译码开销和最小的叶节点即为译码结果。译码时采取该译码树裁剪的方案,降低了译码复杂度的同时却削减了译码性能。译码性能被削减的关键在译码树的最后几层^[4],把编码端的最后一个符号重复发送可降低译码性能的削减。其原理是,最后一个重复发送的符号在计算最后一个译码符号的边开销时,使得开销累加了一倍,从而提高了选择最优路径的可能性,进而提高最后一层的译码性能。考虑到性能提高及复杂度增加这两个因素间的矛盾调和,本文只对每个通道最后一位符号重复发送一次来提高译码性能。Spinal 的消息长度 n 、分块长度 k 、译码树开始裁剪级数 d 和每一级保留的子叶数 B 的大小,会影响到编译码的性能和复杂度。本文的研究背景为 5G 移动通信场景,鉴于此,在本文的仿真研究中,各参数选取: $n = 256$ 、 $k = 4$ 、 $d = 2$ 、 $B = 256$ 。

由于 Spinal 码是新近提出的一种信道编码技术,学界内关于 Spinal 码的研究很少,尤其是 5G 背景下关于 Spinal 码在编码协作中的研究几乎空白,本文基于本节所述 Spinal 码原理特性,展开其在编码协作中的应用研究。

3 基于 Spinal 码的编码协作方案

3.1 CC-SPSC 方案

CC-SPSC 方案是针对 Spinal 码应用哈希函数 h 和随机数发生器 RNG,可产生任意个通道编码符号的无速率特性,直接选用 Spinal 的不同通道内所有编码符号实现编码协作。以图 1 所示场景为例,CC-SPSC 的数据传输示意图如图 4 所示。首先对 U1、U2 设定一个相同的最高传输通道权限数 N (在实际应用中 N 通过信道估计技术根据信道情况设定)。把每个用户在整个通信过程中的信息传输分为两个阶段,第一阶段广播自己的数据,第二阶段是把其他用户数据解码正确以后的传输阶段。U1、U2

先用 Spinal 编码算法对各自要传输的信息进行编码,各用户每个阶段传输数据以一个个完整的编码通道为单位。第一阶段向基站和协作伙伴广播发送 $N/2$ 的符号(N 为奇数情况时,第 $(N + 1)/2$ 个通道,发送其前一半的符号),同时对其他伙伴的第一阶段数据进行接收并解码,通过 CRC 判断解码正确与否。若解码正确,每个用户第二阶段不发送自己的数据,而是协作传输伙伴剩余的 $N/2$ 个编码符号;若解码不正确,每个用户第二阶段广播发送自己剩余的 $N/2$ 个编码符号。基站 B 根据协作标志位判断协作发生的情况进行译码。

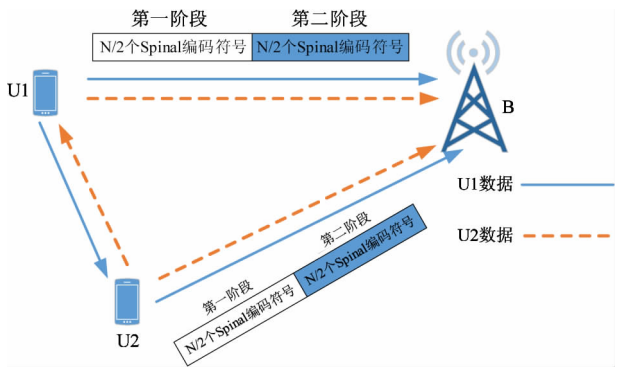


图 4 CC-SPSC 方案示意图

3.2 CC-SPSC-BSC-AL 和 CC-SPSC-BSC-SR 方案

CC-SPSC 方案在模拟信道工作模式下,对系统误码率性能提升明显,但是在数字信道工作模式下并不理想,针对数字信道工作模式的特点,以及移动通信系统中基站在设备条件和中心调度方面的优势,结合文献[7-15],在 CC-SPSC 方案中引入以基站为控制核心的策略,设计出 CC-SPSC-BSC-AL 和 CC-SPSC-BSC-SR 两种协作方案,两种方案中的用户在把其他用户数据解码正确以后组织自己第二阶段传输数据时,前者以为其他用户提供协作为原则(利他),后者以保证自己数据的正确传输为原则(利己)。

以图 1 所示场景为例,在 CC-SPSC-BSC-SR 方案中 U1、U2 采用全双工工作模式,首先对每个用户设定一个最高传输通道权限数 N (N 在实际中通过信道估计技术根据信道情况动态确定),各用户的整个传输过程也分为两个阶段。第一阶段内各用户

先在自己的传输权限内广播自己数据,同时对其他用户数据进行接收和解码,各用户和 B 之间通过 ACK 信号来告知对方自己解码正确与否,并协调协作的进行。某一用户对其他用户数据解码正确之后,仍然在自己的发送权限内继续广播自己的数据,直到确定自己的数据被 B 解码正确,而其他用户数据未被 B 正确解码,之后才利用自己剩余的传输权限为其他用户提供协作,这也是把这种方案称为利己的原因所在。CC-SPSC-BSC-AL 与 CC-SPSC-BSC-SR 方案唯一的不同在于,第一阶段数据中某一用户对其他用户的数据解码正确,而 B 还未对该其他用户的数据正确解码,该用户便会以为其他用户协作为原则,直接使用自己剩余的传输权限为其他用户提供协作。由于两种方案唯一的不同在某一用户对其他用户的数据解码正确以后的处理上,本文只详细介绍 CC-SPSC-BSC-SR 方案细节。

具体以 U1 为源用户, U2 为协作用户进行阐述,三端处理流程如下:

(1)U1 处。首先对自己要传输的原始数据进行 Spinal 编码,每次传输时以所选通道内所有符号为基本单位发送自己的编码数据。U1 广播自己第一阶段数据的同时, U2 和 B 对 U1 数据进行解码,同时 U1 也会对接收到的 U2 的数据进行解码,解码正确便会向空间信道广播发送 u2ACK_fromU1 信号。同时核对自己是否收到来自 B 的 u1ACK_fromB 信号,以及 u2ACK_fromB 信号(B 对 U1 数据解码正确便会向空间信道广播 u1ACK_fromB 信号,对 U2 数据解码正确便会广播 u2ACK_fromB 信号)。U1 如果未收到 u1ACK_fromB 信号,将始终在自己的发送权限内发自己的数据,直到收到 u1ACK_fromB 信号,之后判断是否收到 u2ACK_fromB 信号,如果没收到 u2ACK_fromB, U1 将会利用自己剩余的传输权限为 U2 协作;否则,将停止发送数据,把信道空闲出来。

(2)B 处。如果 B 对 U1 数据解码正确便会向 U1 和 U2 同时广播 u1ACK_fromB。最终根据自己对每个用户第一阶段数据的解码情况,以及通过 U1、U2 传过来的 u1ACK_fromU2、u2ACK_fromU1 信号判断相互的协作情况,根据不同的协

作情况,对各个用户数据进行组合解码。

(3)U2 处。U2 对 U1 数据解码正确后,会广播发送 u1ACK_fromU2 信号,同时核对自己是否收到来自 B 的 u1ACK_fromB 和 u2ACK_fromB 信号。如果未收到 u2ACK_fromB, U2 将始终在自己的传输权限内发送自己数据,直到收到 u2ACK_fromB 信号。之后会判断是否收到 u1ACK_fromB 信号,若未收到 u1ACK_fromB, U2 将会使用自己剩余的传输权限为 U1 提供协作,若收到了 u1ACK_fromB 信号, U2 将停止发送数据,把信道空余出来。

以 U2 为源用户, U1 为协作用户的例子与上述内容相同,只是 U1、U2 角色互换,不再赘述。

CC-SPSC-BSC-SR、CC-SPSC-BSC-AL 方案在 U1、U2、B 间引入 ACK 信号,控制协作的进行与否,能够提高整个系统内信道的利用效率,比如当 U1 数据被 B 正确解码, U2 便知此时无需为 U1 提供协作,避免了某一用户数据被基站正确接收时其他用户仍然为其协作这种情况发生造成的资源浪费。而且以 B 为核心的控制策略,符合实际移动通信场景中基站处设备条件优越,中心调度优势突出的特点,具有可行性。

4 仿真结果与分析

本文以下的所有仿真中均采用图 1 所示的系统模型,在瑞利慢衰落和加性高斯噪声融合的信道模型下,使用 16QAM 调制方式, Spinal 本身的编译码参数为: $n = 256$ 、 $k = 4$ 、 $d = 2$ 、 $B = 256$ 。使用基于 MA-TLAB 的计算机仿真平台,仿真平台使用的计算机配置为四核 CPU、4. 10G 主频、16G RAM, Windows 8. 1 系统。每个信噪比下传输的原始信息为每帧 256 比特,每个信噪比下均进行 2000 帧的数据仿真,对每个信噪比下实验生成的误码率数据进行统计平均计算后作为该信噪比下的误码率。

4.1 模拟信道下仿真结果及分析

在模拟信道工作模式下, Spinal 本身的误码率性能较优,根据仿真的信道条件特性, CC-SPSC、CC-SPSC-BSC-SR 和 CC-SPSC-BSC-AL 方案中每个用户的传输权限 N 均设置为 2 个通道符号数, U1、U2 到

B 的上行信道条件相同,如图 5 横轴变化。(1)2 通道不协作;(2)20dB 交互信道 CC-SPSC-BSC-AL 方案协作;(3)30dB 交互信道 CC-SPSC-BSC-AL 方案协作;(4)20dB 交互信道 CC-SPSC-BSC-SR 方案协作;(5)30dB 交互信道 CC-SPSC-BSC-SR 方案协作;(6)20dB 交互信道 2 通道下 CC-SPSC50% 协作;(7)理想交互信道 2 通道下 CC-SPSC50% 协作;等 7 种情况的仿真结果如下图 4 所示。由图示仿真结果可以得出结论,在模拟信道下,CC-SPSC、CC-SPSC-BSC-SR 和 CC-SPSC-BSC-AL 协作方案相对不协作,均能提升性能,其中 CC-SPSC-BSC-SR 方案性能比 CC-SPSC-BSC-AL 更优;同一个方案下,交互信道条件越好对应的性能越好;在模拟信道下,CC-SPSC 方案 50% 协作性能优于 CC-SPSC-BSC-SR 和 CC-SPSC-BSC-AL,且交互信道越好,CC-SPSC 方案的 50% 协作性能越好,图中当各用户上行信道信噪比同为 15dB 时,CC-SPSC 理想交互信道 50% 协作相对不协作,约有 15dB 的误码率性能增益。

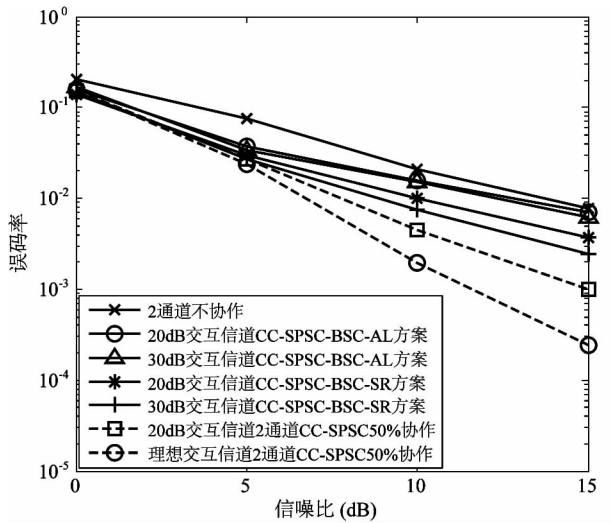


图 5 模拟信道 2 通道限制下各方案性能

4.2 数字信道下仿真结果及分析

在数字信道下,Spinal 本身的误码率性能较差,根据仿真的信道条件特性,CC-SPSC、CC-SPSC-BSC-SR 和 CC-SPSC-BSC-AL 方案中每个用户的传输权限 N 均设置为 6 个通道符号数,U1、U2 到 B 的上行信道条件相同,如图 5 横轴变化情况下:(1)6 通道

不协作;(2)30dB 交互信道 6 通道 CC-SPSC50% 协作;(3)理想交互信道 6 通道 CC-SPSC50% 协作;(4)30dB 交互信道 CC-SPSC-BSC-AL 方案;(5)30dB 交互信道 CC-SPSC-BSC-SR 方案,仿真结果如图 6 所示。

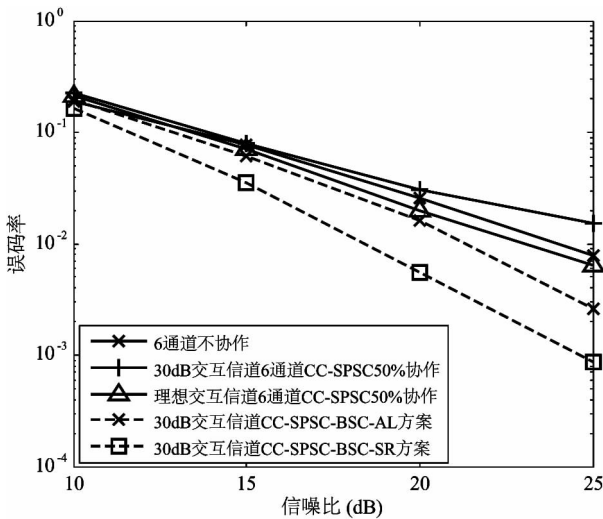


图 6 数字信道 6 通道限制下各方案性能

由图 6 可知,在数字信道下,理想交互信道的 CC-SPSC 方案相对不协作性能提升较少,当交互信道条件变差,相应 CC-SPSC 方案的性能提升程度降低,该方案在数字信道下的性能表现并不理想,这点与在模拟信道下的性能并不相同。但是,在数字信道下,交互信道条件较好时(30dB),CC-SPSC-BSC-AL 和 CC-SPSC-BSC-SR 协作方案相对不协作性能均有明显提升,且 CC-SPSC-BSC-SR 方案性能要优于 CC-SPSC-BSC-AL 方案。图中当各用户上行信道信噪比同为 25dB 时,30dB 交互信道 CC-SPSC-BSC-SR 协作相对不协作,约有 9.5dB 的误码率性能增益。

在数字信道下 CC-SPSC 方案的优势丧失,CC-SPSC-BSC-SR 方案展现了更优的性能,这是由于不同信道下 Spinal 码本身的特点,以及 CC-SPSC、CC-SPSC-BSC-SR、CC-SPSC-BSC-AL 三种方案本身的特点所致。Spinal 码在模拟信道下的特点是在接收端充分利用了接收符号中包含的信道状态等有用信息进行译码,而 CC-SPSC 方案中所有通道符号 50% 协

作,正是利用信道状态等信息来提高协作性能的,所以 CC-SPSC 方案在模拟信道下有很好的性能表现。Spinal 码在数字信道下硬解调译码的工作模式特点是,接收端在译码时抛弃了接收信号中包含的信道状态等有用信息,在这种工作模式下,CC-SPSC-BSC-SR 和 CC-SPSC-BSC-AL 方案相对 CC-SPSC 方案的优势便显现出来。

设定交互信道信噪比为 30dB,U1 到 B 的上行信道信噪比固定为 25dB,U2 到 B 的上行信道如图 7 横轴所示变化,数字信道工作模式, $N = 6$ 情况下:(1) U2 不协作;(2) U1 不协作;(3) CC-SPSC-BSC-SR 方案协作 U1 误码率;(4) CC-SPSC-BSC-SR 方案协作 U2 误码率,4 条性能曲线如下图 7 所示。数字信道工作模式, $N = 6$ 情况下:(1) U2 不协作;(2) U1 不协作;(3) CC-SPSC-BSC-AL 方案协作 U1 误码率;(4) CC-SPSC-BSC-AL 方案协作 U2 误码率,4 条性能曲线如下图 8 所示。

由图 7 的仿真结果可以看出,在数字信道下,具有较差上行信道的 U2,使用 CC-SPSC-BSC-SR 方案与具有较好上行信道的 U1 协作,获得很明显的性能提升,而且对于本身上行信道条件较好的 U1,使用 CC-SPSC-BSC-SR 方案与上行信道较差的 U2 协

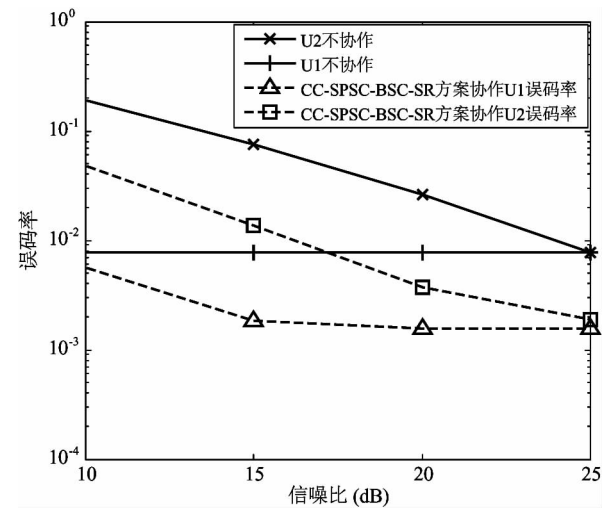


图 7 数字信道 6 通道限制下不对称上行信道 CC-SPSC-BSC-SR 方案性能

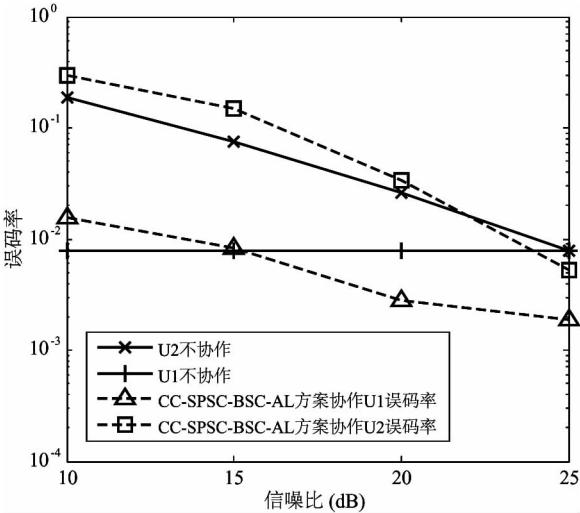


图 8 数字信道 6 通道限制下不对称上行信道 CC-SPSC-BSC-AL 方案性能

作,仍然有很好的性能提升。这说明 CC-SPSC-BSC-SR 方案,在数字信道下,当各个协作用户的上行信道条件不一致时,对每一个参与协作的用户,都能得到性能提升,该方案在各种情景中具有更稳定的性能提升表现,具有更大应用优势。图 8 的仿真结果表明,当 U1、U2 上行信道条件不一致时,使用 CC-SPSC-BSC-AL 方案协作,并没有帮助上行信道条件较差的 U2 提升性能,而且在 U2 上行信道条件较差(图中为小于 15dB)时也没有帮助上行信道条件较好的 U1 提升性能,只有当 U2 的上行信道条件变好(图中为大于 15dB)时,才帮助 U1 提升了性能,相对 CC-SPSC-BSC-SR 方案的性能而言,CC-SPSC-BSC-AL 在这种仿真情境中并没有明显优势。

各种仿真条件下 CC-SPSC-BSC-AL 方案性能均优于 CC-SPSC-BSC-SR 方案的原因在于两方案中能够提升性能的原因均包含协增益的引入,而 CC-SPSC-BSC-AL 方案中,各用户以帮助其他用户协作传输为原则的特点使得其提升性能的原因主要在于协增益的引入,CC-SPSC-BSC-SR 方案中各用户在保证自己数据正确传输的原则下,尽力争取利用剩余权限为其他用户提供协作,使得整体性能优于 CC-SPSC-BSC-AL 方案,同时在各信道条件的变化的情况下具有更稳定的性能提升。

5 结 论

编码协作和 Spinal 码,在未来 5G 通信中均有着巨大的应用潜力。本文研究了基于 Spinal 码的编码协作,提出了直接选用 Spinal 不同通道内所有编码符号实现编码协作的 CC-SPSC 方案;在 CC-SPSC 方案基础之上,针对 Spinal 码在数字信道工作模式下的特点及 5G 通信系统中基站在设备条件和中心调度方面的优势,引入以基站为控制核心的协作策略,提出了 CC-SPSC-BSC-AL 和 CC-SPSC-BSC-SR 协作方案,并分别在模拟信道和数字信道下对所提方案进行了仿真评估,验证了各方案在不同场景中的应用优势。在实际应用中可以根据应用场景的特点对 CC-SPSC、CC-SPSC-BSC-SR、CC-SPSC-BSC-AL 等协作方案进行选取:在模拟信道下,优先选用 CC-SPSC 方案;在数字信道下,可以选择 CC-SPSC-BSC-AL 和 CC-SPSC-BSC-SR 方案,优先选用 CC-SPSC-BSC-SR 方案。下一步,拟设定更多的应用场景,测试 3 种协作方案的性能,并分析其特点及原因,进一步在应用方面对 3 种方案进行研究并提供建议。

参考文献

- [1] Rappaort T S. Wireless Communication: Principles and Practice. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 34-68
- [2] Nosratinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 74-80
- [3] Hunter T E, Nosratinia A. Diversity through Coded Cooperation. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2006, 5(2): 283-289
- [4] Perry J, Iannucci P A, Fleming K E, et al. Spinal codes. In: Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication, Helsinki, Finland, 2012. 49-60
- [5] 汪雪琴,吴绍华,王贵山等. Spinal 码在深空通信中的应用研究. 高技术通讯, 2015, 25(4): 365-375
- [6] Craig J W. A new, simple, and exact result for calculating the probability of error for two-dimensional signal constellations. In: Proceedings of the IEEE Military Communications Conference, McLean, USA, 1991. 571-575
- [7] Yang Z, Host-madsen A. Rateless Coded Cooperation for multiple access channels in the low power regime. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory, Seattle, USA, 2006. 967-971
- [8] Uppal M, Host madsen A, Xiong Z. Practical rateless cooperation in multiple access channels using multiplexed Raptor codes. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory, Nice, France, 2007. 671-675
- [9] Uppal M, Host madsen A, Xiong Z. Cooperation in the MAC channel using frequency division multiplexing. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory, Seoul, Korea, 2009. 1373-1377
- [10] Chen W, Chen W. A new rateless coded cooperation scheme for multiple access channels. <http://wnt.sjtu.edu.cn>; Shanghai Jiaotong University, 2011
- [11] Shirvanimoghaddam M, Li Y, Vucetic B. User cooperation via rateless coding. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Anaheim, USA, 2012. 4096-4101
- [12] Shirvanimoghaddam M, Li Y, Vucetic B. Distributed rateless coding with cooperative sources. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory, Cambridge, USA, 2012. 488-492
- [13] Shirvanimoghaddam M, Li Y, Tian S, et al. Distributed raptor coding for erasure channels: partially and fully coded cooperation. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(9): 3576-3589
- [14] Wang X, Dong Y, Liu F, et al. Benefit from rateless characteristic. In: Proceedings of the International Conference of Wireless Algorithms Systems and Applications, Chengdu, China, 2011. 380-391
- [15] Tarasak P, Minn H, Lee Y H. Analysis of incremental relaying protocol with RCPC in cooperative diversity systems. In: Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference, Dallas, USA, 2005. 2537-2541

Coded cooperation based on Spinal codes

Yang Erpeng, Wu Shaohua, Xu Siyue, Luo Junxin

(Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055)

Abstract

In view of 5G communication systems' high rate transmission demand, the coded cooperation based on Spinal codes was studied. According to the rateless characteristic of Spinal codes, a scheme for coded cooperation (CC) with selected passes of Spinal codes (SPSC), called the CC-SPSC, was put forward. Then, on the basis of CC-SPSC, by introducing the strategy regarding the base station as the control center because of its advantages in equipment condition and centralized scheduling, the schemes of CC-SPSC-BSC-AL (coded cooperation with selected passes of Spinal codes and base station control-altruism) and CC-SPSC-BSC-SR (coded cooperation with selected passes of Spinal codes and base station control-self regard) were proposed. The simulation results shows that all three schemes can significantly improve the bit error rate performance in both digital channels and analog channels, especially, the CC-SPSC in analog channels and the CC-SPSC-BSC-SR in digital channels have the prominent application advantages.

Key words: diversity, coded cooperation (CC), channel coding, rateless codes, Spinal codes