

# 基于有限反馈的用户协作分集策略

宁元辉<sup>1,2</sup> 朱光喜<sup>1</sup> 苏 钢<sup>1</sup> 谭 力<sup>1</sup>

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)<sup>1</sup>

(中铁第四勘察设计院集团有限公司通信信号研究设计处 武汉 430063)<sup>2</sup>

**摘 要** 基于放大转发和解码转发的协作策略要求用户在协作帧内为协作伙伴转发数据。然而,当基站仅由直接发射的数据就能正确解码用户数据时,在协作帧内为该用户数据的发射则是多余的。为此,结合 RCPC 码,提出了一种基于基站端有限反馈的用户协作分集策略,用户根据反馈信息自适应调整协作帧内的数据发射。相比于不协作或者传统协作方法,在多种不同场景下的仿真结果均表明,所提出的协作策略不仅极大地提高了用户的性能而且节省了大量的功率和带宽,并提高了用户的吞吐率和频谱效率。

**关键词** 协作分集,放大转发,解码转发,编码协作,有限反馈,用户协作

中图分类号 TN929 文献标识码 A

## User Cooperative Strategy and Performance Analysis Based on Limited Feedback

NING Yuan-hui<sup>1,2</sup> ZHU Guang-xi<sup>1</sup> SU Gang<sup>1</sup> TAN Li<sup>1</sup>

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)<sup>1</sup>

(Department of Communication & Signaling & Research, China Railway Si Yuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan 430063, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The cooperative schemes based on amplify-and-forward and decode-and-forward involve the user forward partner's data in the cooperative frame. However, it seems a waste of power and bandwidth when the based station can recover the user's data only based on the direction transmission. Thus, we proposed a new cooperative strategy, which is based on limited feedback from the base station and employed RCPC codes for its implementation. Based on our proposed scheme, the users adaptively change the data transmission in the cooperative frame. The simulation results reveal that our proposed scheme achieves impressive gains in contrast with non-cooperative system and also outperforms existing cooperative schemes while not only saving considerable power and bandwidth but also improving the throughput and spectral efficiency under various inter-user and uplink channel conditions.

**Keywords** Cooperative diversity, Amplify-and-forward, Decode-and-forward, Coded cooperation, Limited feedback, User cooperation

在蜂窝网系统和无线局域网中,由于尺寸、复杂度、功耗、或者其它限制原因,对移动用户配备多根天线是不实用的,因此这样的用户不可能获得像多天线系统那样的上行发射分集。然而,在 Ad-hoc 无线网络中的多个具备单天线的移动节点可以通过多跳的方式从源节点发射数据到目的节点,从而节省大量的能量并获得多个节点天线提供的空间分集。正是受此启发,才有了近年来提出的一门新技术,即协作通信。由于下一代无线宽带网需要更高的速率、更高的频谱效率和更低的误码率要求,因此对单天线用户终端提出了更高的挑战。为满足以上要求,需要更多的新技术。毫无疑问,协作通信将以提供更广阔的空间,它可以使得单天线用户之间相互协作,互相共享天线以形成虚拟多天线系统,从而可以获得与 MIMO 相近的性能,因此将协作引入到蜂窝网架构的通信系统中,具有很高的理论价值和实用价值。

## 1 用户协作发射技术

用户协作分集可以使多个具备单天线的用户通过互相共享天线转发数据以获得上行发射分集并增强系统的鲁棒性,从而有效对抗衰落<sup>[1]</sup>。用户协作在 TDMA 系统<sup>[2,3]</sup>和 CDMA 系统<sup>[4,5]</sup>的开创性研究开辟了蜂窝网下用户协作通信的篇章。Laneman 等在文献[3]中给出了放大转发(AF)、解码转发(DF)、选择中继(selection relaying)以及增量中继(incremental relaying)用户协作策略,并指出只有 DF 策略不能获得满分集。为了克服 DF 的缺点和不足,Xingka<sup>[6]</sup>等提出了解码放大转发(DAF)协作策略,该策略是先解出软信息然后再放大转发。而将信道编码引入到协作通信中,Hunter<sup>[7]</sup>和 Stefanov<sup>[8]</sup>等做了大量的工作,其中 Hunter 等结合 RCPC 码<sup>[9]</sup>提出的编码协作(coded cooperation)更具有有效性和灵活

到稿日期:2008-11-11 返修日期:2009-07-28 本文受国际科技合作计划(No. 2008DFA11630),国家自然科学基金(No. 60802009),国家“863”项目(No. 2008AA01Z204)资助。

宁元辉(1981—),男,博士生,主要研究方向为协作通信等,E-mail:ningyuanhui@163.com;朱光喜(1945—),男,教授,主要研究方向为无线通信等;苏 钢(1971—),男,副教授,主要研究方向为无线通信等;谭 力(1976—),男,讲师,主要研究方向为无线通信等。

性,即用户解码正确协作伙伴的第一部分数据,然后转发协作伙伴的冗余数据。关于协作过程中用户性能得到改善还是损失的问题,Zinan 等<sup>[10]</sup>指出当上行信道质量好的用户与差的用户协作时,只有在差的用户上行信道质量达到一个临界值时,上行信道质量好的用户才可以得到增益。近年来,关于压缩转发(compress-forward)和各种编码有效结合的研究<sup>[11]</sup>也取得了很多成果。

文献[12,13]在分析条件成对错误概率 PEP 时,假设汉明距离满足  $d_1/d_2 = N_1/N_2$ ,并指出在非对称上行信道质量下尤其是当用户 1 为 20dB,用户 2 为 0dB 时,用户 1 依然可以在协作中改善误码率。然而这一假设显然只有在 2 个用户上行信道质量类似时才成立,文献[10]的结论也说明了这一点。之前文献提出的协作策略要求用户在协作帧内为协作伙伴转发数据,然而,当基站仅依靠用户直接发射的数据就可以正确解码时,在协作帧内为该用户发射数据就是多余的。尽管文献[3]给出了增量中继是基于有限反馈的策略,但是当用户知道仅协作伙伴的数据被基站正确解码时,并不会在协作帧中发射自己的数据,而是保持空闲状态。因此,本文提出了基于基站端有限反馈并结合 RCPC 码的用户协作策略,用户利用反馈信息自适应调整协作帧内的数据处理。它兼顾了 AF 和编码协作的优点并结合了有限反馈的思想,例如反馈信息指示只有用户 1 的数据被正确解码时,在协作帧内,用户 2 不转发用户 1 的数据而发射自己的数据,用户 1 首先尝试解码用户 2 的数据,如果解码正确则为用户 2 发射冗余数据,否则放大转发用户 2 直接发射的数据。尤其是,当反馈指示 2 个用户都被正确解码时,协作帧内将不转发任何数据而是发射下一个新的数据帧,从而极大地提高了吞吐率和频谱效率。由于编码协作是目前性能最为有效的一种协作策略之一,因此本文将给出所提出的用户协作策略与不协作以及编码协作的平均误码率和平均吞吐率性能比较,以及功率和带宽的使用情况比较。当用户间信噪比仅为 0dB 的条件下,仿真结果显示相比于不协作以及编码协作,本文提出的用户协作策略极大地改善了用户的平均误码率和平均吞吐率,并节省了大量的能量和带宽。

## 2 基于有限反馈的用户协作发射策略

本节将介绍基于基站端有限反馈的用户协作策略算法,系统应用场景如图 1 所示,其包括一个基站和 2 个用户。用户之间以及用户与基站之间均为平坦慢瑞利衰落信道,而且它们之间相互独立。

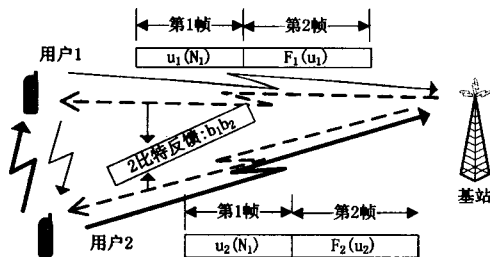


图 1 用户协作发射简图

### 2.1 RCPC 码介绍

本文提出的用户协作策略主要基于信道编码,它可以通过卷积码、分组码、级联码等多种方式实现。这里与编码协作<sup>[14]</sup>一样选用了速率兼容打孔卷积码(RCPC)来实现,主要

在于其灵活的打孔方案可以很好地控制用户协作的比例,而且多种不同打孔方案使用同一个编解码器,因此首先简单介绍 RCPC 码的编解码方法。

RCPC 码使用卷积编码器,它的母码码率为  $R = k/N$ ,其中  $k$  为编码信息块长度, $N$  为编码之后的总长度。由于  $N$  中冗余比特相对较多,因此可以通过打孔的方式删除一部分冗余的比特  $N_2$ ,从而剩下长度为  $N_1$  的码字,此时  $N_1$  码字的码率为  $R_1 = k/N_1 > R$ ,通过解码  $N_1$  也可以恢复原始信息。所以对于 RCPC 解码器,有 2 种主要的解码方式,第一种是直接输入长度为  $N_1$  的码字进行解码,另外一种输入长度为  $N = N_1 + N_2$  的码字。对于第二种方式,接收端把接收到的  $N_1$  部分和  $N_2$  部分根据之前的打孔方案,把数据恢复成打孔前长度为  $N$  的码字。RCPC 的打孔方案有 13 种,因而可以把  $N$  非常灵活地分成不同长度的  $N_1$  和  $N_2$ 。

### 2.2 基于有限反馈的用户协作算法

如图 1 所示,用户 1 和用户 2 与基站通信的过程中,由于发射信号具有广播特性,基站和其它用户都可以接收到。当用户接收到对方信号后以放大、解码、编码等方式为用户转发数据,从而用户信号经历不同的衰落路径以实现空间分集。本文采用 RCPC 实现用户协作分集,假设 2 个用户的编码信息块长度都为  $k$ ,打孔方案相同。定义  $u_1$  和  $u_2$  分别表示用户 1 和用户 2,互为对方的协作伙伴, $u_1(N_1)$  和  $u_2(N_1)$  分别表示用户 1 和用户 2 的长度为  $N_1$  的码字, $u_1(N_2)$  和  $u_2(N_2)$  则表示被打孔删除的长度为  $N_2$  的数据。2 个用户以分时的方式共享上行信道,比如  $u_1$  发射数据时, $u_2$  只能接收而不能发射。基站为每个用户预分配 2 个时隙帧以发射用户的码字  $N$ ,由于是慢衰落场景,假设所有信道衰落系数在该时间内保持恒定,其中第一帧为直接发生帧以发射码字  $N_1$ ,而第二帧为协作帧,该帧根据基站有限反馈信息决定发射哪个用户的哪部分数据,这正是协作算法的关键所在,不同的算法就是体现在协作帧的数据发射处理。

图 2 给出了用户 1 的协作发射过程简图,用户 2 的过程也类似。用户的  $B$  比特的信息块,经过 CRC 加校验比特之后成为长为  $k$  的待编码块,然后进入 RCPC 编码器,根据  $R_1$  的选择, $u_1$  产生  $u_1(N_1)$  和  $u_1(N_2)$ ,而  $u_2$  产生  $u_2(N_1)$  和  $u_2(N_2)$ ,并定义  $u_1(N_1)'$  和  $u_2(N_1)'$  为每个用户下一个待发码字的第一部分数据,并定义  $A_{p12}(N_1)$  表示  $u_1(N_1)$  经过用户之间的信道之后,被  $u_2$  放大之后的数据, $A_{p21}(N_1)$  则表示  $u_2(N_1)$  经过用户之间的信道之后,被  $u_1$  放大之后的数据。如图 2 可知,用户 1 发射完毕第一帧数据之后,将结合反馈比特来决定协作帧发送决策,根据反馈比特的不同值,该发射决策可能包括发射  $u_1$  自身的第二部分数据  $u_1(N_2)$ , $u_2$  的  $A_{p21}(N_1)$  以及  $u_1$  的下一个待发码字的第一部分数据  $u_1(N_1)'$ ,具体算法将在下文给出。

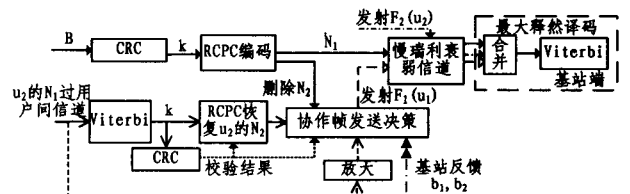


图 2 用户 1 协作发射过程简图

#### 2.2.1 用户直接发射以及解码

用户分别在第一帧内发射各自的第一部分数据  $u_1(N_1)$  和  $u_2(N_1)$ , 此时基站以及协作伙伴都可以接收到对方的信号。基站在接收到用户的第一帧数据之后, 进行第一次解码尝试并结合 CRC 校验, 使用 2 比特反馈信息  $b_1 b_2$  来指示对用户数据解码结果。同时考虑到用户之间也需要解码对方的第一帧数据, 因此定义  $c_{12}$  指示  $u_2$  解码  $u_1$  的数据结果,  $c_{21}$  则指示  $u_1$  解码  $u_2$  的结果。以上指示比特值为 1, 则表示解码正确, 为 0 表示解码失败。

### 2.2.2 用户协作帧发送策略

如图 2 所示, 用户得到反馈比特  $b_1 b_2$  和自己解码协作伙伴结果之后, 便可以分别做出协作帧发送决策。 $u_1$  的协作帧发射数据用  $F_1(u_1)$  表示, 而  $u_2$  的协作帧发射数据用  $F_2(u_2)$  表示, 其具体算法描述如下:

1)  $b_1 b_2 = 00$ : 基站对 2 个用户的第一帧数据解码都失败, 用户协作策略退化成为编码协作方式<sup>[7]</sup>。即用户相互解码对方的第一帧数据, 如果解码正确则恢复协作伙伴的第二部分数据并转发, 否则发射自己的第二部分数据。对于用户  $u_1$ , 当  $c_{21} = 1$  时,  $F_1(u_1) = u_2(N_2)$ ; 当  $c_{21} = 0$  时,  $F_1(u_1) = u_1(N_2)$ 。对于用户  $u_2$ , 当  $c_{12} = 1$  时,  $F_2(u_2) = u_1(N_2)$ ; 当  $c_{12} = 0$  时,  $F_2(u_2) = u_2(N_2)$ 。

2)  $b_1 b_2 = 10$  基站只解码正确  $u_1$  的第一帧数据。此时 2 个用户协作帧内都将发射  $u_2$  的数据。 $u_2$  发射自己的数据  $F_2(u_2) = u_2(N_2)$ , 而  $u_1$  将根据解码  $u_2$  第一帧数据结果  $c_{21}$  决定如何转发。具体算法为, 当  $c_{21} = 1$  时,  $u_1$  可以解码正确  $u_2$  的数据, 此时  $F_1(u_1) = u_2(N_2)$ ; 当  $c_{21} = 0$  时, 放大转发  $u_2$  的数据, 此时  $F_1(u_1) = A p_{21}(N_1)$ 。

3)  $b_1 b_2 = 01$ : 基站只解码正确  $u_2$  的第一帧数据。此时 2 个用户协作帧内都将发射  $u_1$  的数据。 $u_1$  发射自己的数据  $F_1(u_1) = u_1(N_2)$ , 而  $u_2$  将根据解码  $u_1$  第一帧数据结果  $c_{12}$  决定如何转发。具体算法为, 当  $c_{12} = 1$  时,  $u_2$  可以解码正确  $u_1$  的数据, 此时  $F_2(u_2) = u_1(N_2)$ ; 当  $c_{12} = 0$  时, 放大转发  $u_1$  的数据, 此时  $F_2(u_2) = A p_{12}(N_1)$ 。

4)  $b_1 b_2 = 11$ : 此时基站对 2 个用户的第一帧数据解码都正确, 用户之间不需要协作发射任何数据, 而是将协作帧用以发射用户的下一个新的码字的第一部分数据。即  $F_1(u_1) = u_1(N_1)'$ , 而  $F_2(u_2) = u_2(N_1)'$ , 从而开始下一个新的信息块 B 的发射循环。

由以上提出的协作发射算法可知, 在任何情况下, 本算法都是最大程度帮助需要帮助用户, 而且在任何时候都尽量选择最佳的协作策略。当  $b_1 b_2 = 00$  时, 退化成为编码协作方式, 而编码协作在基于转发的协作策略中被认为是最佳的<sup>[15]</sup>。当  $b_1 b_2 = 01$  或者  $b_1 b_2 = 10$  时, 第一帧已经正确的用户首先选择解码途径, 如果不能解码, 又从 AF 和 DF 中选择性能更好的 AF 协议<sup>[3]</sup>来转发对方的数据。对于之前提出的几种经典的用户协作策略, AF 和编码协作都可以实现满分集, 而且也被认为是最为有效的 2 种策略; 而本文提出的算法不仅兼容了 AF 和编码协作策略, 而且还引入了有限反馈的思想。

## 3 系统模型

### 3.1 用户数据发射模型

本文将描述如图 1 所示的系统模型, 主要研究慢衰弱信

道且为瑞利衰弱以及窄带数据发射场景, 以更好地分析用户协作带来的空间分集益处。选择 BPSK 调制方式, 每个符号分配的能量均归一化为 1, 并假设所有接收机已知信道状态信息(CSI), 发射机未知信道 CSI, 使用相干检测, 而基站已知用户间的信道 CSI。使用等效基带模型描述数据处理过程, 则用户和基站对第一帧数据接收表示为:

$$r_{ij}(1, n) = h_{ij}(1, n)x_i(1, n) + n_{ij}(1, n), \quad (1)$$

$$i \neq j, i \in \{1, 2\}, j \in \{0, 1, 2\}$$

其中,  $x_i(1, n)$  表示用户  $u_i$  发射的第一帧数据符号;  $r_{ij}(1, n)$  表示用户  $u_j$  接收用户  $u_i$  发射的数据;  $n_{ij}(1, n)$  表示  $u_j$  端接收机端均值为 0; 方差为  $N_{ij}(1, n)$  的加性复高斯白噪声;  $h_{ij}(1, n)$  表示  $u_i$  到用户  $u_j$  之间的衰弱系数, 且满足衰弱功率为 1, 即满足  $E(|h_{ij}(1, n)|^2) = 1$ 。基站和用户接收到第一帧数据之后, 分别开始解码接收到的数据。

当  $b_1 b_2 = 10, c_{21} = 0$  时,  $u_1$  需要对  $u_2$  的数据放大处理, 并满足下式:

$$A p_{21}(N_1) = \beta_{21} r_{21} \quad (2)$$

当  $b_1 b_2 = 01, c_{12} = 0$  时,  $u_2$  需要对  $u_1$  数据放大处理, 并满足下式:

$$A p_{12}(N_1) = \beta_{12} r_{12} \quad (3)$$

由于用户分配给第二帧的总能量固定, 因此式(2)和式(3)放大系数满足:

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{1}{|h_{ij}(1, n)|^2 + N_{ij}(1, n)}}, i \neq j, i, j \in \{1, 2\} \quad (4)$$

当  $b_1 b_2 = 11$  时, 将用户第二帧数据的输出  $F_i(u_i)$  直接代入式(1), 也进行下一个新的数据发射周期。而当  $b_1 b_2 \neq 11$  时, 用户完成第一帧数据的解码之后, 结合  $b_1 b_2$  和  $c_{21} c_{12}$  的情况做出第二帧数据发射决策:

$$r_{i0}(2, n) = h_{i0}(2, n)F_i(u_i) + n_{i0}(2, n), i \in \{1, 2\} \quad (5)$$

$r_{i0}(2, n)$  表示基站接收到  $u_i$  的第二帧数据;  $h_{i0}(2, n)$  表示此时  $u_i$  到  $u_j$  之间的衰弱系数, 且满足衰弱功率为 1;  $n_{i0}(2, n)$  表示基站接收机端均值为 0、方差为  $N_{i0}(2, n)$  的加性复高斯白噪声。

由于 2 个帧内的衰弱系数相同, 因此  $h_{ij}(1, n) = h_{ij}(2, n) = h_{ij}(n)$ 。并假设同一个接收机 2 个数据帧内的白噪声均值和方差相等, 即  $N_{ij}(1, n) = N_{ij}(2, n) = N_{ij}$ , 且各接收机端噪声相互独立。由于每个符号的发射能量归一化为 1, 信号衰弱功率为 1,  $u_j$  接收  $u_i$  符号的平均接收信噪比定义为:

$$\text{SNR}_{ij} = E\left(\frac{|h_{ij}(n)|^2}{N_{ij}}\right) = \frac{1}{N_{ij}} \quad (6)$$

### 3.2 基站最大释然译码

当  $b_1 b_2 \neq 11$  时, 对于第一帧没有被解码正确的用户  $u_i$  (其协作伙伴为  $u_j$ ), 基站还需要结合第二帧发射的数据, 对用户进行解码。基站接收到的关于  $u_i$  的数据有以下 3 种分类:

1)  $u_i$  通过自身信道发射的  $u_i(N_1)$  和  $u_i(N_2)$ 。

针对这种情况, 基站只需要将  $u_i(N_1)$  和  $u_i(N_2)$  衰弱之后的数据恢复长度为  $N$  的序列, 然后使用 RCPC 解码器解码。

2)  $u_i$  通过自身信道发射的  $u_i(N_1)$  和  $u_i(N_2)$ , 并通过协作伙伴  $u_j$  放大转发的  $A p_{ij}(N_1)$  信号。

针对这种情况, 基站首先使用最大比合并  $u_i(N_1)$  和  $A p_{ij}$

( $N_1$ )经过衰弱之后的数据,其合并权值系数分别为:

$$\omega_1 = \frac{h_{j0}^*}{N_{j0}}, \omega_2 = \frac{h_{ij}^* h_{j0}^* \beta_{ij}}{|h_{j0}|^2 |\beta_{ij}|^2 N_{ij} + N_{j0}} \quad (7)$$

通过以上合并得到对  $u_i(N_1)$  经过 2 个路径衰弱的最后判决值并结合  $u_i(N_2)$  经过衰弱之后的数据,恢复长度为  $N$  的序列,然后使用 RCPC 解码器解码。

3)  $u_i$ : 通过自身信道发射的  $u_i(N_1)$  和  $u_i(N_2)$ , 并通过协作伙伴  $u_j$  解码转发的  $u_i(N_2)$  信号。

针对这种情况,基站首先使用最大比合并  $u_i(N_2)$  经过 2 条衰弱路径到达基站的信号,其合并权值系数分别为:

$$\omega_1 = \frac{h_{j0}^*}{N_{j0}}, \omega_2 = \frac{h_{ij}^*}{N_{j0}} \quad (8)$$

通过以上合并基站得到对  $u_i(N_2)$  经过 2 个路径衰弱的最后判决值并结合  $u_i(N_1)$  经过衰弱之后的数据,恢复长度为  $N$  的序列,然后使用 RCPC 解码器解码。

通过以上 3 种情况的分析可知,除第一种情况,其它两种情况都存在着一个用户的数据经过了 2 条独立的路径到基站,从而实现了使用其它用户的天线,因而可以实现空间分集的效果,也就是用户协作上行发射分集。

#### 4 性能仿真与分析

本节将给出本文所提出的用户协作策略与不协作以及编码协作在两种典型应用场景下的性能比较与分析。为了与之前提出的最为有效的用户协作策略即编码协作比较,给出的参数与文献[13]一样。RCPC 码的卷积编码器的移位寄存器长度  $M=4$ , 打孔周期  $P=8$ , 母码码率为  $R=1/4$ 。信息比特为 112 比特,加 16 比特 CRC 校验比特之后  $k=128$ , CRC 的生成多项式系数为 16 进制数 15935。本文提出的协作策略,适应于任何打孔方案,这里仅给出 2 个用户的打孔方案为  $R_1=1/2$  时的性能分析,此时  $N_1=N_2$ 。为了突出所提出的协作策略的优越性,所有仿真都假设用户之间的信道信噪比仅为 0dB,可以想象随着用户间信噪比的增加,所提出的策略将表现出更强大的性能增益。本节给出了两种最为典型应用场景下的性能比较,为了便于描述,定义:

场景 1: 用户上行信道不对称,此时用户 1 的上行信道平均接收信噪比固定为 20dB, 用户 2 的则为 0 到 20dB, 用户间信道信噪比固定为 0dB。

场景 2: 用户上行信道对称,用户 1 和用户的上行信道平均接收信噪比相等,且为 0 到 20dB, 用户间信道信噪比固定为 0dB。

图 3 给出了场景 1 下的用户平均误码率比较。由图 3 看出,本文提出的用户协作策略使得 2 个用户在协作过程中都有很大的性能增益,当用户 2 的信噪比只有 0dB 时,用户 1 依然能受益于协作。对于用户 2 码率为  $10^{-3}$  时,所提出的方案性能比不协作时有 8dB 的增益,而相比于编码协作方案还有 4dB 的性能增益。还可以看出在用户 2 达到 4dB 之前,编码协作策略使得用户 1 的性能有损失,即用户 1 没有在协作过程中得到增益,因此证实了文献[12,13]在非对称信道时假设  $d_1/d_2=N_1/N_2$  是不严谨的。

图 4 给出了场景 2 下的用户平均误码率比较,此时 2 个用户的平均误码率相同。由图 4 可以看出,本文提出的用户协作策略的性能大大超过不协作或者编码协作策略,在误码率为  $10^{-3}$  时,本文提出的方案性能比不协作时有 8dB 的增

益,而对于编码协作方案还有 4dB 的性能增益。尤其当信噪比增大的时候,增益更大,这是因为随着信噪比的增加,2 个用户的第一帧的数据同时不能被基站正确解码的概率降低,因此 2 个用户在协作帧内同时发射第一帧不能恢复的用户的数据,从而得到更大的性能增益。

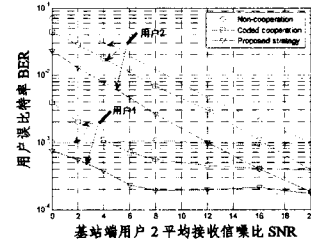


图 3 场景 1 下的用户平均误码率比较

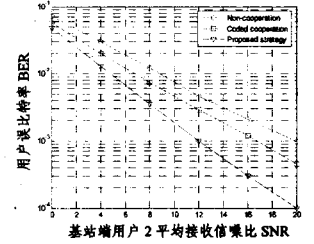


图 4 场景 2 下的用户平均误码率比较

图 5 和图 6 分别给出了场景 1 下的用户 1 和用户 2 的资源(功耗和带宽)使用情况与不协作或编码协作的比值。因为不协作和编码协作,用户会把所有分配的资源用完,所以定义不协作或编码协作消耗的资源为单位 1。由于本文提出的策略具有基于有限反馈的优点,当  $b_1 b_2=11$  时,系统节省了大量本来用户用于发射协作信号的资源。从图 5 可知,随着用户 2 SNR 的增加,用户 1 为用户 2 消耗的资源逐渐减少,在用户 2 的 SNR 为 0dB, 用户 1 为用户 2 提供了 25% 的资源,为自己发射的资源几乎一直为 50%。从图 6 可知,随着用户 2 SNR 的增加,用户 2 为用户 1 使用的资源一直非常少,这是因为用户 2 的 SNR 很低,基站将以更大的概率正确解码用户 1 的第一帧数据,从而使得用户 1 为用户 2 发射数据,而用户 2 发射自己的第二部分数据。用户 2 为自己使用的资源,随着 SNR 的增加最近接近 50%, 当为 20dB 的时候,用户 1 和用户 2 的 SNR 相等,因此 2 用户为对方使用的能力趋于相等。尽管如此,由图 5 和图 6 可以看出,2 个用户节省的资源几乎相同,因此对于场景 1 下的信噪比高的用户也愿意与信噪比差的用户协作。

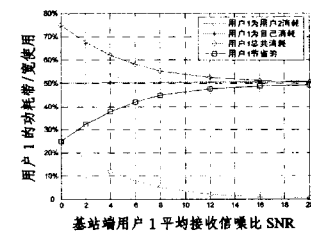


图 5 场景 1 下用户 1 的资源消耗性能比较

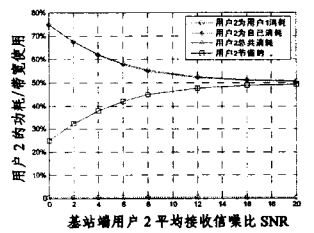


图 6 场景 1 下用户 2 的资源消耗性能比较

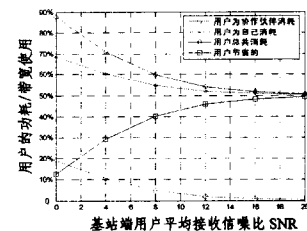


图 7 场景 2 下用户的资源消耗性能比较

图 7 给出了场景 2 下的用户资源使用情况与不协作或编码协作的比值。由图 7 可以看出,随着用户 SNR 的增加,用户为自己使用的资源逐渐趋于 50%, 同时为对方使用的资源

也由最开始的 20%，逐渐减少到几乎为 0。这是因为当用户 SNR 比较低的时候，用户需要在协作帧内发射数据的概率更大，从而需要更多的资源。尽管如此，用户依然从协作中节省大量的资源，即使在 SNR 为 0dB 的情况下，也可以节省 12% 左右的资源，因此对于场景 2 下的用户，也是非常愿意协作的。

图 8 给出了场景 1 下用户平均吞吐率的性能比较，定义了用户平均吞吐率为单个符号正确解码信息比特数的平均值，单位为比特/符号。由于编码协作的吞吐率显然大于不协作，因此关于吞吐率的比较，只限于编码协作。由图 8 可知，对于编码协作，2 个平均用户的吞吐率随着用户 2 的 SNR 增加而增加，但最多不超过 0.25 比特/符号，这是因为每个用户都需要发射  $N$  个符号，而对于  $k$  比特信息比特，平均吞吐率最大极限为  $R=0.25$  比特/符号。本文提出的用户协作策略中，2 个用户的平均吞吐率几乎相等，而且随着用户 2 的 SNR 增加，并逐渐趋于 0.482 比特/符号，这是因为用户 1 的第一帧数据被基站正确解码的概率非常大，从而用户 1 的第二帧将更多地为用户 2 转发数据。

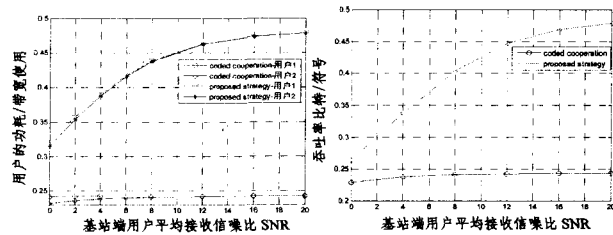


图 8 场景 1 用户吞吐率性能比较 图 9 场景 2 用户吞吐率性能比较

图 9 给出了场景 2 下用户平均吞吐率的性能比较，由图 9 可知，对于编码协作，用户的平均吞吐率随着用户 SNR 增加而增加，但最多不超过 0.25 比特/符号，这是因为此时的平均吞吐率最大极限为  $R=0.25$  比特/符号。而对于本文提出的用户协作策略，用户的平均吞吐率随着用户 SNR 增加而增加，并逐渐趋于 0.482 比特/符号，这是因为随着用户 SNR 的增加，基站同时正确解码用户第一帧的概率增加，从而提高了平均吞吐率。

**结束语** 通过本文对基于有限反馈的用户协作策略的详细分析以及仿真结果，可以看出该策略给协作用户带来了很大的性能增益，这主要是因为本用户协作策略结合了有限反馈的思想，同时还兼容了目前被认为最为有效的用户协作策略，即 AF 和编码协作。由仿真结果可知，用户的误码率的改善，以及用户带宽和功耗的节省也是非常大的，同时很大程度提高了用户的吞吐率。因此基于本文提出的协作策略，任何场景下用户都是愿意协作的，因为在带来很大的性能增益的同时还能节省大量的资源，并提供吞吐率。本文仅给出了 2 个场景下，用户间信噪比为 0dB 的情况，而随着用户间 SNR 的提高，本策略带来的性能增益将会更大。相对于协作给用户和系统带来的增益，本文提出的用户协作策略付出的 2 比特反馈代价是值得的。本文仅选取了  $R_1=1/2$  的情况分析与仿真，根据用户间信道条件或者用户到基站的信道条件，合理地选择  $R_1$  还是一个需要进一步研究的问题。同时用户协作过程中用户资源如何分配，以达到系统性能最优，同时代价最

小也非常值得研究。本文提出的用户协作策略，对于协作通信具有很高的理论和实用价值。

## 参考文献

- [1] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. Increasing uplink capacity via user cooperation diversity[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 1998
- [2] Laneman J N, Wornell G W, Tse D N C. An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2001
- [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: 3062
- [4] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity. Part I. System description[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51: 1927
- [5] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity. Part II. Implementation aspects and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51: 1939
- [6] Xingkai B, Jing L. Efficient Message Relaying for Wireless User Cooperation: Decode-Amplify-Forward(DAF) and Hybrid DAF and Coded-Cooperation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6: 3975
- [7] Hunter T E, Nosratinia A. Cooperation diversity through coding [C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2002
- [8] Stefanov A, Erkip E. Cooperative coding for wireless networks [C]//4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network. 2002
- [9] Hagenauer J. Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications[J]. IEEE Transactions on Communications, 1988, 36: 389
- [10] Zinan L, Erkip A, Stefanov E. An asymptotic analysis on the performance of coded cooperation systems[C]//VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference. 2004
- [11] Zhixin L, Uppal M, Stankovic V, et al. Compress-forward coding with BPSK modulation for the half-duplex Gaussian relay channel[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2008
- [12] Hunter T E, Nosratinia A. Performance analysis of coded cooperation diversity[C]//ICC '03. IEEE International Conference on Communications. 2003
- [13] Hunter T E, Nosratinia A. Diversity through coded cooperation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5: 283
- [14] Hunter T E, Sanayei S, Nosratinia A. Outage analysis of coded cooperation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 52: 375
- [15] Hunter T E, Nosratinia A. Coded cooperation under slow fading, fast fading, and power control[C]//Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 2002