

# 频分双工协作多点传输系统面向用户的 传输模式选择性能

苏 笛 杨晨阳

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 协作多点传输在提高边缘用户性能方面具有很大的优势, 近年来受到了广泛关注。根据基站间交换信息的不同, 基站协作的形式可以分为联合处理与波束协调。用户可以根据需要为协作簇内的每个基站选择联合处理、波束协调或不协作的传输方式。本文分析了在基于单小区量化并反馈相位模糊的频分双工系统中, 存在信道量化误差时用户端应当如何选择基站传输模式。通过推导用户平均信干噪比的下界并针对特殊位置的用户进行分析, 我们发现协作簇内所有基站都参与协作的性能优于不协作的性能, 但具体协作方式取决于相位模糊量化是否准确。当相位模糊量化准确时非本地基站都应参与联合处理, 否则非本地基站则应进行波束协调。仿真结果表明当用户位于一般的位置时上述结论依然成立。

**关键词:** 协作多点传输; 频分双工; 单小区码本量化; 传输模式选择

中图分类号: TN911 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2013)09-1113-07

## Performance of User-specific Transmission Mode Selection in Frequency Division Duplex Coordinated Multi-point Systems

SU Di YANG Chen-yang

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Coordinated multi-point (CoMP) transmission has drawn broad attention due to its advantage of improving the performance of cell-edge users. According to the information exchanged among base stations, the base station cooperative strategies can be roughly divided into joint processing and coordinated beamforming. Each user selects the transmission mode for the base stations in the cooperative cluster, including joint processing, coordinated beamforming and non-CoMP. In this paper we analyze the performance of transmission mode selection at the user in percell codebook based CoMP systems with phase ambiguity feedback. By deriving the lower bound of average SINR and analyzing the performance of the users with specific location, we find the performance of base stations participating cooperation is better than that of non-CoMP, and the bits of phase ambiguity determines which cooperative strategy should be selected. When the number of bits is large, all the base stations should participate joint processing, otherwise they will join coordinated beamforming, which is still true for the user with general location as shown by simulations.

**Key words:** Coordinated multi-point transmission; Frequency division duplex; Percell codebook; Transmission mode selection

### 1 引言

近来, 多基站协作传输(也即协作多点传输)技

术受到了国内外的广泛关注。这种技术能够有效抑制小区间干扰, 大幅度提升小区边缘用户的数据率<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2013-05-20; 修回日期: 2013-08-05

基金项目: 新一代宽带无线移动通信网科技重大专项(2011ZX03003-001-01)

根据基站间交换信息种类的不同,基站协作的方案可以大致分为两种:联合处理(Joint Processing, JP)和波束协调(coordinated Beamforming, CB)。JP传输是将所有基站联合起来作为一个超级基站进行下行传输,但需要基站间交换用户的信道信息和数据;CB则是通过基站间预编码协调降低小区间干扰。从交互的信息量来看,CB只需要基站间交换用户的信道信息,由于用户信道信息量远远小于用户的数据信息,因此CB需要的基站间交互信息量远远小于JP。实际系统中基站间需要通过骨干网传递信息,而骨干网的容量通常有限,基站应当选择哪种协作方案与骨干网容量有关<sup>[3]</sup>。当假设骨干网容量不受限且基站能获得理想下行信道信息时,JP传输的性能总是优于CB传输以及基站间不协作的性能<sup>[2]</sup>。

在频分双工系统中,上下行信道不互易,基站不能通过上行信道估计获得用户的下行信道而只能通过用户端反馈得到。考虑到上行反馈链路容量有限,在实际系统中用户需要用有限比特数对下行信道进行量化,往往会导致量化误差<sup>[4]</sup>。可见,在频分双工系统中即使骨干网容量不受限,基站也无法获得理想的下行信道信息,此时JP传输的性能不一定仍优于CB传输以及基站间不协作时的性能。

本文中分析在频分双工系统的一个协作簇内,从用户的角度应当如何为协作簇内的每个基站选择JP、CB或不协作的传输方式。我们考虑协作多点传输系统中常用的基于单小区码本的量化方案,并考虑低复杂度独立码字选择和相位模糊的反馈<sup>[5]</sup>。为了突出信道量化误差的影响,假设骨干网容量不受限制。研究结果表明,即使考虑了信道的量化误差,基站协作的性能也总优于不协作的性能,不过JP传输的性能并不总优于CB。协作簇内基站传输模式选择的结果与用户位置和相位模糊的量化比特数有关。

## 2 系统模型

### 2.1 信道模型

考虑下行协作多点传输系统中的一个协作簇包含 $N_b$ 个基站,这些基站将同时服务簇内 $M$ 个单天线用户。每个协作基站有 $n_i$ 根发射天线,所有协

作基站都通过骨干网与中心处理器相连。协作簇内所有基站到用户的单小区信道组成了用户的下行联合信道,我们将其表示为

$$\mathbf{g}_m = [\alpha_{m,1} \mathbf{h}_{m,1}^H, \dots, \alpha_{m,N_b} \mathbf{h}_{m,N_b}^H]^H \quad (1)$$

其中 $\alpha_{m,k}$ 是包含路径损耗与阴影衰落的第 $k$ 个协作基站到用户单小区信道(以下简称第 $k$ 个单小区信道)的大尺度衰落因子, $\mathbf{h}_{m,k} \in \mathbb{C}^{n_i \times 1}$ 是第 $k$ 个单小区小尺度衰落信道。为了简化分析且抓住协作多点传输信道的特征,假设同一用户的不同单小区信道 $\mathbf{h}_{m,k}$ 空间不相关,且其每个元素都服从标准复高斯分布。

不失一般性,设用户的单小区信道增益从高到低顺次排列,且将距离用户最近的基站1定义为用户的“本地基站”。设参与JP传输的基站数目为 $K_1-1$ ,则参与JP的基站到用户的信道(以下简称“JP联合信道”)记为

$$\mathbf{g}_{m\text{-JP}} = [\alpha_{m,1} \mathbf{h}_{m,1}^H, \dots, \alpha_{m,K_1-1} \mathbf{h}_{m,K_1-1}^H]^H, \quad K_1 \in (1, N_b+1] \quad (2)$$

设参与CB的基站数目为 $K_2-K_1$ ,则参与CB的基站到用户的信道记为

$$\mathbf{g}_{m\text{-CB}} = [\alpha_{m,K_1} \mathbf{h}_{m,K_1}^H, \dots, \alpha_{m,K_2-1} \mathbf{h}_{m,K_2-1}^H]^H, \quad K_2 \in (K_1, N_b+1] \quad (3)$$

协作簇内的剩余基站不参与协作,这样的基站数目为 $N_b-K_2+1$ 个。不参与协作的基站到用户的联合信道记为

$$\mathbf{g}_{m\text{-Non}} = [\alpha_{m,K_2} \mathbf{h}_{m,K_2}^H, \dots, \alpha_{m,N_b} \mathbf{h}_{m,N_b}^H]^H \quad (4)$$

这样,为协作簇内的基站选择传输模式的问题即为设计 $K_1$ 和 $K_2$ 的问题。

### 2.2 信道量化精度

每个用户需要分别量化并反馈信道信息用于基站的调度与预编码。考虑到协作多点传输系统中通常采用基于单小区码本的量化方式<sup>[6]</sup>,用户实际反馈的是量化后的单小区信道 $\hat{\mathbf{h}}_{m,k}$ , $k=1, \dots, K_2-1$ ,其中 $\hat{\mathbf{h}}_{m,k}$ 是对第 $k$ 个单小区信道方向向量 $\bar{\mathbf{h}}_{m,k} \triangleq \mathbf{h}_{m,k} / \|\mathbf{h}_{m,k}\|$ 的量化。根据文献[4]单小区信道方向向量的量化精度满足

$$E[\cos^2 \theta_{m,k}] = E[|\bar{\mathbf{h}}_{m,k}^H \hat{\mathbf{h}}_{m,k}|^2] = 1 - 2^{-B/(n_i-1)} \quad (5)$$

其中 $B$ 为量化单小区信道方向向量的比特数,量化误差定义为 $\sin^2 \theta_{m,k} = 1 - \cos^2 \theta_{m,k}$ 。

对于参加 CB 的基站, 只需知道  $\hat{\mathbf{h}}_{m,k}$  即可计算预编码; 但对于参加 JP 的基站来说, 计算预编码则需要 JP 联合信道方向向量  $\bar{\mathbf{g}}_{m-JP} = \mathbf{g}_{m-JP} / \|\mathbf{g}_{m-JP}\|$ , 因此基站需要对 JP 联合信道方向向量进行重构。考虑到大规模衰落因子是准静态信道信息, 不需要频繁反馈, 基站可以基于大规模信息对信道方向向量进行重构<sup>[6]</sup>, 也即

$$\hat{\mathbf{g}}_{m-JP} = [\hat{g}_{m,1} \hat{\mathbf{h}}_{m,1}^H, \dots, \hat{g}_{m,K_1-1} \hat{\mathbf{h}}_{m,K_1-1}^H]^H \quad (6)$$

其中  $\hat{g}_{m,k}$  表示单小区方向向量在构成 JP 联合信道方向中的加权因子且

$$\hat{g}_{m,k} = \alpha_{m,k} / \sqrt{\sum_{i=1}^{K_1-1} \alpha_{m,i}^2} \quad k=1, \dots, K_1-1 \quad (7)$$

重构的联合信道量化精度可表示为

$$\cos^2 \theta_{m-JP} = |\bar{\mathbf{g}}_{m-JP}^H \hat{\mathbf{g}}_{m-JP}|^2 \quad (8)$$

其中  $\bar{\mathbf{g}}_{m-JP} = \mathbf{g}_{m-JP} / \|\mathbf{g}_{m-JP}\|$  为 JP 联合信道方向向量, 联合信道量化误差为  $\sin^2 \theta_{m-JP} = 1 - \cos^2 \theta_{m-JP}$ 。

重构信道的量化精度与码字选择方式有关, 本文中考虑协作多点传输系统中常用的低复杂度独立码字选择方案<sup>[5]</sup>。需要注意的是, 此时 JP 联合信道中的相位模糊也需要反馈, 否则将使得不同单小区信道方向非相干叠加带来极大的性能损失<sup>[5]</sup>。根据文献[7]我们可以写出 JP 联合信道的平均量化精度为

$$E[\cos^2 \theta_{m-JP}] \approx \sum_{i=1}^{K_1-1} \hat{g}_{m,i}^4 (1 - 2^{-n_i}) + 2 \sum_{i=1}^{K_1-1} \sum_{j>i}^{K_1-1} \hat{g}_{m,i}^2 \hat{g}_{m,j}^2 (1 - 2^{-n_i}) \frac{2^{2b}}{p} \sin^2(\frac{p}{2^b}) \quad (9)$$

其中  $b$  为量化单个相位模糊所用的比特数。式中对平均量化精度的近似在单小区码本比特数足够大 (即  $B \rightarrow \infty$ ) 且基站天线数足够多 (即  $n_i \rightarrow \infty$ ) 时是准确的<sup>[7]</sup>。

### 3 用户的下行传输信干噪比

实际系统中需要由用户估计下行传输信干噪比并反馈给基站端用于用户调度与调制编码方式选择。考虑在调度用户间进行等功率分配, 则每个用户的实际下行传输信干噪比可表示

$$SINR_m = \frac{p \|\bar{\mathbf{g}}_{m-JP}\|^2 |\bar{\mathbf{g}}_{m-JP}^H \mathbf{w}_{m-JP}|^2}{\sigma_m^2 + I_{m-MUI} + I_{m-ICI} + p \|\mathbf{g}_{m-Non}\|^2} \quad (10)$$

其中  $p$  表示每个用户的功率,  $\sigma_m^2$  表示簇外干扰加噪

声的能量,  $I_{m-MUI}$  表示多用户干扰能量,  $I_{m-ICI}$  表示小区间干扰即协作簇内做 CB 的基站对用户  $m$  造成干扰的能量。

如果基站能获得所有用户的理想下行信道则可以通过调度和预编码保证  $I_{m-MUI} = I_{m-ICI} = 0$ 。然而在频分双工系统中, 基站端获得的信道信息都带有误差, 因此

$$I_{m-MUI} = p \|\mathbf{g}_{m-JP}\|^2 \sum_{i \neq m}^M |\bar{\mathbf{g}}_{m-JP}^H \mathbf{w}_{i-JP}|^2 > 0 \quad (11)$$

$$I_{m-ICI} = p \sum_{k=K_1}^{K_2-1} \alpha_{m,k}^2 \|\mathbf{h}_{m,k}\|^2 |\bar{\mathbf{h}}_{m,k} \mathbf{w}_{m,k}|^2 > 0 \quad (12)$$

其中  $\mathbf{w}_{i-JP}$  表示第  $1, \dots, K_1-1$  基站对用户  $i$  的 JP 预编码且  $\|\mathbf{w}_{i-JP}\| = 1$ ,  $\mathbf{w}_{m,k}$  为第  $k$  个 CB 基站对用户  $m$  的预编码, 其中  $\|\mathbf{w}_{m,k}\| = 1, k=K_1, \dots, K_2-1$ 。

用户端需要利用已知的信道信息估计 (10) 中的信干噪比并反馈给基站端。但是由于用户只能知道自身的信道信息, 不能获知其他调度用户的信道信息, 因此无法准确估计出下行传输的信干噪比。单小区系统中常用采用基于正交预编码的有限反馈方案<sup>[8]</sup>, 其中用户端估计的信干噪比在满复用调度时是准确的。在协作多点传输系统中我们可以借鉴这种有限反馈方案, 即此时用户的预编码向量为  $\mathbf{w}_{m-JP} = \hat{\mathbf{g}}_{m-JP}$ , 且调度用户的预编码向量满足  $\mathbf{w}_{m-JP}^H \mathbf{w}_{k-JP} = 0, \forall m \neq k$ 。此时多用户干扰能量  $I_{m-MUI}$  满足

$$I_{m-MUI} \leq p \|\mathbf{g}_{m-JP}\|^2 \sin^2 \theta_{m-JP} \triangleq I_{m-MUI}^{UB} \quad (13)$$

当满复用调度时等号成立。

至于小区间干扰能量  $I_{m-ICI}$ , 从式 (12) 可看出干扰大小取决于 CB 预编码。预编码的具体形式依赖于设计准则, 本文中考虑最常用的迫零准则预编码。消除小区间干扰需要基站端有多余的自由度, 为了简化分析假设基站端的自由度能够满足干扰消除条件。对于 CB 基站  $k$  预编码  $\mathbf{w}_{m,k}$  是基于量化信道  $\hat{\mathbf{h}}_{m,k}$  计算得到的, 即  $\hat{\mathbf{h}}_{m,k}^H \mathbf{w}_{m,k} = 0$ , 故我们能得到

$$|\bar{\mathbf{h}}_{m,k} \mathbf{w}_{m,k}|^2 = \sin^2 \theta_{m,k} \quad (14)$$

将上式代入 (12) 可得

$$I_{m-ICI} = p \sum_{k=K_1}^{K_2-1} \alpha_{m,k}^2 \|\mathbf{h}_{m,k}\|^2 \sin^2 \theta_{m,k} \quad (15)$$

将 (13) 和 (15) 代入 (10) 中可得

$$SINR_m \geq \frac{p \|\mathbf{g}_{m-JP}\|^2 \cos^2 \theta_{m-JP}}{\sigma_m^2 + I_{m-MUI}^{UB} + I_{m-ICI} + p \|\mathbf{g}_{m-Non}\|^2} \triangleq \gamma_m \quad (16)$$

当满复用调度时等号成立。

由于用户端无法得知基站的调度结果,为避免对信干噪比的乐观估计产生传输误包,用户端通常按照最大的多用户干扰能量来估计信干噪比<sup>[8]</sup>。这意味着用户将反馈  $\gamma_m$  给基站端用于调度和调制编码方式选择,而用户的最终数据率即为  $\log_2(1 + \gamma_m)$ 。

既然用户反馈的信干噪比  $\gamma_m$  与系统最终的数据率直接相关,可以令用户端根据  $\gamma_m$  为协作簇内的基站选择下行传输模式,即决定  $K_1$  和  $K_2$  的大小。为节省信令开销,基站传输模式不能频繁变化,因此可用平均信干噪比作为模式选择的准则,即

$$E[\gamma_m] = E\left[\frac{p \|\mathbf{g}_{m-JP}\|^2 \cos^2 \theta_{m-JP}}{\sigma_m^2 + I_{m-MUI}^{UB} + I_{m-ICI} + p \|\mathbf{g}_{m-Non}\|^2}\right] \quad (17)$$

上式中分子分母均为正数,根据文献[9],可以得到  $E[\gamma_m]$  的下界为

$$\begin{aligned} E[\gamma_m] &\geq \frac{p \cdot E[\|\mathbf{g}_{m-JP}\|^2] E[\cos^2 \theta_{m-JP}]}{\sigma_m^2 + E[I_{m-MUI}^{UB}] + E[I_{m-ICI}] + p \cdot E[\|\mathbf{g}_{m-Non}\|^2]} \\ &= \frac{p \cdot \left(\sum_{i=1}^{K_1-1} \alpha_{m,i}^2\right) E[\cos^2 \theta_{m-JP}]}{\sigma_m^2 + E[I_{m-MUI}^{UB}] + E[I_{m-ICI}] + p \cdot \left(\sum_{i=K_2}^{N_b} \alpha_{m,i}^2\right)} \\ &\triangleq \bar{\gamma}_m(K_1, K_2) \end{aligned} \quad (18)$$

其中  $E[I_{m-MUI}^{UB}] = p \cdot \left(\sum_{i=1}^{K_1-1} \alpha_{m,i}^2\right) E[\sin^2 \theta_{m-JP}] E[I_{m-ICI}]$

$$= p \left(\sum_{i=K_1}^{K_2-1} \alpha_{m,i}^2\right) E[\sin^2 \theta_{m,k}]$$

将(5)和(9)带入(18)即可得到  $\bar{\gamma}_m(K_1, K_2)$  的显示表达式,可以看出  $\bar{\gamma}_m(K_1, K_2)$  仅与用户信道的大尺度特性、单小区码本比特数  $B$  和相位模糊量化比特数  $b$  有关。

从(15)式中我们可以得到如下关系

$$E[I_{m-MUI}^{UB}] \leq p \cdot \left(\sum_{i=1}^{K_1-1} \alpha_{m,i}^2\right) = p \cdot E[\|\mathbf{g}_{m-JP}\|^2],$$

$$E[I_{m-ICI}] \leq p \left(\sum_{i=K_1}^{K_2-1} \alpha_{m,i}^2\right) = p \cdot E[\|\mathbf{g}_{m-CB}\|^2]$$

其中  $p \cdot E[\|\mathbf{g}_{m-JP}\|^2]$  和  $p \cdot E[\|\mathbf{g}_{m-CB}\|^2]$  可看做是当参与 JP/CB 的基站不协作时对用户产生的干扰。

这两个关系式表明,无论对信道量化是否准确,这些基站对用户 JP/CB 传输的信干噪比优于不参与协作的性能。

#### 4 基于用户的基站传输模式选择分析

下面将分析协作簇内的基站采用不同传输模式对用户平均信干噪比下界  $\bar{\gamma}_m$  的影响。由于  $\bar{\gamma}_m$  与用户位置有关,而对于一般位置的用户该表达式较为复杂不便于分析,因此以下将考虑几种特殊位置的用户。

##### A. 小区中心用户 ( $\alpha_1 \gg \alpha_i, \forall i \neq 1$ )

假设第 1 号基站到用户的单小区信道能量远大于其余单小区信道的能量,此时  $E[\cos^2 \theta_{m-JP}] \leq 1 - 2^{-B/(n_r-1)}$ 。在(15)中平均信干噪比  $\bar{\gamma}_m$  的分母部分由多用户干扰能量主导。事实上无论如何分配  $K_1$  和  $K_2$ ,我们均可得到

$$\bar{\gamma}_m(K_1, K_2) \leq \frac{p \cdot \alpha_{m,1}^2 (1 - 2^{-B/(n_r-1)})}{\sigma_m^2 + p \cdot \alpha_{m,1}^2 2^{-B/(n_r-1)}} \quad (19)$$

虽然以最大化平均信干噪比为原则用户仍倾向协作簇内的所有基站都参与 JP,但性能提升并不显著。这是由于对于小区中心用户来说,非本地基站到用户的单小区信道路径损耗严重造成信道能量较小,因此无论这些基站采用哪种传输模式对用户的信干噪比影响都很小。

##### B. 绝对小区边缘用户 ( $\alpha_{m,1} = \dots = \alpha_{N_b}$ )

与用户位于小区中心的情况完全相反的是,当用户处于绝对小区边缘时协作簇内所有基站到用户的距离完全相同,这意味着这些单小区信道对构成联合信道的贡献也完全相同。由于用户到各个基站都距离较远,因此每条单小区信道的能量都很弱,虽然实际系统中并不一定存在这种用户,我们可将这种情况视为协作多点传输系统中的最差情况用于分析。

根据(9)可写出绝对边缘用户 JP 联合信道方向向量的平均量化精度,

$$E[\cos^2 \theta_{m-JP}] \approx \frac{(1 - 2^{-\frac{B}{n_r-1}})}{K_1 - 1} + \frac{(K_1 - 2)(1 - 2^{-\frac{B}{n_r-1}}) 2^{2b}}{p^2 (K_1 - 1)} \sin^2\left(\frac{p}{2^b}\right) \quad (20)$$

此时  $\bar{\gamma}_m$  的表达式仍然比较复杂, 为便于分析我们考虑两种极限情况: 量化相位模糊的比特数  $b=0$  或  $b \rightarrow \infty$ 。

当  $b=0$  时, 我们可以推导出

$$\bar{\gamma}_m = \frac{p\alpha_{m,1}^2(1-2^{-B/(n_r-1)})}{\Omega_m - p\alpha_{m,1}^2(K_2 - K_1)(1-2^{-B/(n_r-1)})} \quad (21)$$

其中  $\Omega_m = \sigma_m^2 + pN_b\alpha_{m,1}^2 - p\alpha_{m,1}^2(1-2^{-B/(n_r-1)})$  与基站传输模式选择无关, 该式是关于  $(K_2 - K_1)$  的增函数。

这个结果说明, 当不反馈相位模糊时非本地基站参与 JP 并不会带来性能增益, 反而应当令非本地基站参与 CB。这是由于当不反馈相位模糊时, JP 联合信道方向向量的量化精度为  $E[\cos^2\theta_{m-JP}] = (1-2^{-B/(n_r-1)}) / (K_1 - 1)$  和信道维度成反比, 此时增加参与 JP 的基站数目会极大降低信道的量化精度从而影响性能。因此在这种情况下令本地基站对用户进行数据传输, 其余非本地基站均对用户 CB 即可达到最好性能。

当  $b \rightarrow \infty$  时, 我们可以推导出

$$\bar{\gamma}_m = \frac{p(K_1 - 1)\alpha_{m,1}^2(1-2^{-B/(n_r-1)})}{\sigma_m^2 + pN_b\alpha_{m,1}^2 - p(K_2 - 1)\alpha_{m,1}^2(1-2^{-B/(n_r-1)})} \quad (22)$$

是关于  $K_1$  和  $K_2$  的增函数。这说明此时参与 JP 传输的基站数目越多用户的信干噪比越大。这是由于当相位模糊理想反馈时, JP 联合信道能够量化得较为准确, 增加参与 JP 的基站数目一方面能极大提升信号能量, 另一方面能降低多用户干扰能量, 对用户信干噪比的其决定性作用。在这种情况下使用户平均信干噪比最大的基站传输模式为协作簇内所有基站都对用户进行 JP 传输。

从上述分析中可以发现从提升用户数据率的角度来看, 即使是绝对边缘用户也不一定会要求协作簇内的所有基站都对自己进行 JP 传输, 这取决于相位模糊的量化是否准确: 当相位模糊量化准确时越多基站参与 JP 传输用户的信干噪比越高; 当相位模糊不量化时 JP 联合信道的量化精度与参与 JP 的基站数目成反比递减, 此时反而更期望非本地基站做 CB。

### 5 仿真结果

上一节针对某些特定位置的用户分析了基站传输模式选择与用户信干噪比之间的关系。本节

将利用仿真分析一般用户应当如何进行基站传输模式选择。

考虑典型的协作场景——协作簇内有 3 个基站, 每基站有 4 根发射天线。协作簇内每个基站到用户的单小区信道均为统计独立同分布的复高斯信道。对单小区信道量化采用随机矢量码本<sup>[10]</sup>, 码本大小  $B$  为 4 比特, 对相位模糊采用均匀量化<sup>[10]</sup>。为了反映协作多点传输系统中信道的非对称特性, 在以下仿真中没有用路径损耗模型建模用户的大尺度衰落能量, 而是令用户的大尺度衰落因子满足  $\alpha_{m,i}^2 = \rho^i \cdot (1-\rho) / (1-\rho^{N_b})$ ,  $i=1, \dots, N_b$ 。调整参数  $\rho \in (0, 1]$  可仿真不同位置用户的性能,  $\rho$  越大表示用户越靠近小区边缘,  $\rho$  越小表示用户越靠近小区中心。虽然这种大尺度模型无法反映物理信道的能量因而仿真得到信干噪比数值不具备参考价值, 但并不影响我们分析不同位置的用户如何选择基站传输模式。

首先评估(18)中平均信干噪比下界  $\bar{\gamma}_m$  的紧致程度。平均信干噪比的计算与具体的基站传输模式有关, 以下仿真中我们评估三种基站传输模式  $\bar{\gamma}_m$  的紧致性: 1) 协作簇内所有基站都参与 JP 对用户进行数据传输(以图例“3JP 0CB”表示); 2) 只有本地基站对用户传输数据其余非本地基站均参与 CB(以图例“2JP 1CB”表示); 3) 只有本地基站对用户传输数据, 非本地基站中一个对用户做 CB、一个不参与协作(以图例“1JP 1CB 1non-CoMP”表示)。在其他基站传输模式下  $\bar{\gamma}_m$  具有类似的紧致性。仿真中相位模糊的量化比特数取为 1 比特。

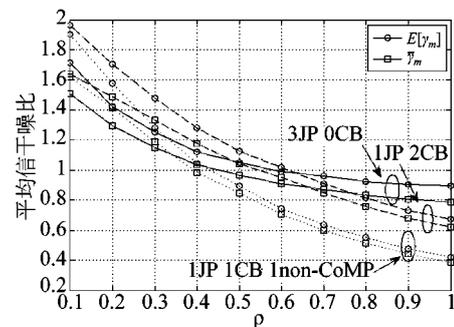


图 1 平均信干噪比下界  $\bar{\gamma}_m$  的紧致性

Fig. 1 The tightness of the upper bound of average signal to interference and noise ratio

图1中的仿真结果表明(18)中的平均信干噪比下界  $\bar{\gamma}_m$  在不同的基站传输模式下都较为紧致。以平均信干噪比最大为准则,不同位置的用户倾向不同的基站传输模式,例如靠近小区中心的用户更希望非本地基站参与CB,而靠近小区边缘的用户则更希望本地基站参与JP。同时该仿真结果也表明非本地基站参与协作的性能优于不参与协作的性能,验证了我们之前的分析。

以下将比较不同基站传输模式对不同位置用户平均信干噪比的影响。由于对任意位置的用户非本地基站参与协作的性能一定优于不协作时的性能,因此以下仿真中令  $K_2 = N_b + 1$ ,即非本地基站只对用户做JP或CB传输。同时通过上一节的分析我们发现相位模糊量化的比特数也会影响基站传输模式的选择结果,以下仿真中我们考虑量化相位模糊不同的比特数,  $b = 0, b = 1$  与  $b = 2$  比特,如图2所示。

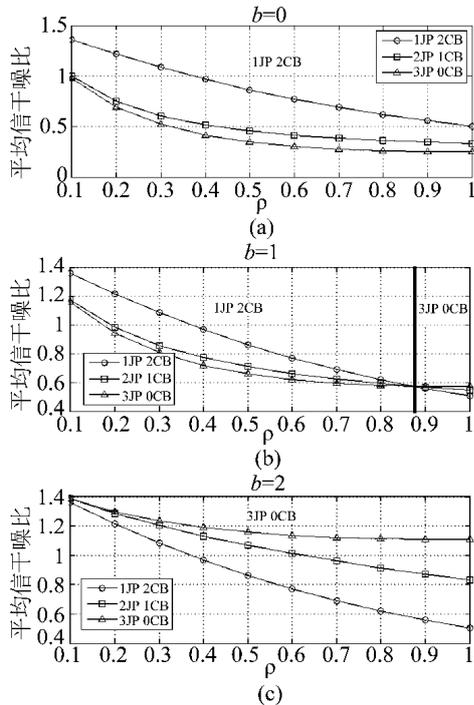


图2 相位模糊量化比特不同时不同位置用户在不同基站传输模式下的性能比较

Fig.2 The average signal to interference and noise ratio with different BS transmission mode when the location of user and the bits for phase ambiguity are different

从仿真结果可以看出,当相位模糊量化较准确(即  $b=2$  比特)时只有令协作簇内的所有基站都参与JP传输才能使用户达到最佳性能。对于靠近小区边缘的用户来说,越多基站参与JP性能提升就越显著;而对于靠近小区中心的用户来说,虽然参与JP的基站数越多用户性能越好,然而这种性能提升并不明显,这验证了前面的分析。

当相位模糊完全不量化(即  $b=0$  比特)时用户更倾向令非本地基站做CB。这是由于相位模糊不量化时越多基站参与JP,JP联合信道的量化精度损失就越严重。JP联合信道量化精度的损失将导致信号能量的损失,从而造成信干噪比的明显下降,这种损失对于信道条件较好的小区中心用户来说更加明显。

当相位模糊有较大量化误差(即  $b=1$  比特)时,不同位置的用户有各自倾向的基站传输模式:靠近小区中心的用户更倾向非本地基站做CB;靠近小区边缘的用户更倾向非本地基站做JP。

## 6 结论

本文分析了在频分双工系统的一个协作簇内从提升各用户性能的角度应当如何为协作簇内的每个基站选择JP、CB或不协作传输方式的问题。我们推导了用户平均信干噪比的下界,并针对特殊位置用户进行了理论分析,且通过仿真进行了验证。分析结果表明从提升单个用户性能的角度,协作簇内的所有基站都应参与协作,但如何协作则取决于相位模糊量化是否准确。当相位模糊量化准确时非本地基站都应参与JP传输,否则非本地基站则应做CB。仿真结果支持理论分析得到的结论。

### 参考文献

[1] C. Yang, S. Han, X. Hou and A. F. Molisch. How to Design CoMP to Achieve its Promised Potential? [J]. IEEE Wireless Communications Magazine (invited paper), Feb. 2013, 20(1): 67-74.

[2] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. Shamai, O. Simeone and W. Yu. Multi-cell MIMO cooperative networks: A new

- look at interference [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., Dec. 2010, 28(9): 1380-1408.
- [3] Q. Zhang, C. Yang, A. F. Molisch. Cooperative Downlink Transmission Mode Selection under Limited-Capacity Backhaul [C]. in Proc. IEEE Wireless Commun. and Networking Conf. (WCNC), Apr. 2012.
- [4] N. Jindal. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback [J]. IEEE Trans. on Inf. Theory, Nov. 2006, 52(11): 5045-5060.
- [5] D. Su, X. Hou, and C. Yang. Quantization based on per-cell codebook in cooperative multi-cell systems [C]. in Proc. IEEE WCNC 2011.
- [6] Y. Cheng, V. Lau, and Y. Long. A scalable limited feedback design for network MIMO using per-cell product codebook [J]. IEEE Trans. on Wireless Commun., Oct. 2010, 9: 3093-3099.
- [7] D. Su and C. Yang. Necessity of phase ambiguity quantization for limited feedback coordinated multi-point transmission [C]. in Proc. IEEE VTC Fall Sep. 2011.
- [8] K. Huang, J. G. Andrews, and R. W. Heath. Performance of orthogonal beamforming for SDMA with limited feedback [J]. IEEE Trans. on Veh. Tech., Jan. 2009, 58(1): 152-164.
- [9] L. G. Hardy and G. P'olya. Inequalities [M]. 2nd ed., Cambridge Mathematical Library, 2004.
- [10] A. Gersho and R. M. Gray. Vector quantization and signal compression [M]. Boston: Kluwer, 1992.

#### 作者简介



苏 笛 女, 1984 年生, 湖南洛阳人, 本科, 北京航空航天大学博士在读, 近期主要研究方向包括协作多点传输中的有限反馈方案设计。

E-mail: disu@ee.buaa.edu.cn



杨晨阳 女, 1965 年生, 浙江杭州人, 博士, 北京航空航天大学教授, 博士生导师, 近期研究方向包括协作多点传输、绿色通信与干扰对准等。

E-mail: cyyang@buaa.edu.cn