

文章编号:1001-9081(2011)08-02025-04

doi:10.3724/SP.J.1087.2011.02025

## 信道非对称下的联合预编码方案

郑丽清,黄开枝,李印海

(国家数字交换系统工程技术研究中心 研究生队,郑州 450002)

(zhenglicqing81ndsc@126.com)

**摘要:**在多基站(BS)协作系统中,信道的非对称导致相互协作的两基站从协作中获得的性能增益不一样。因此,在选择协作基站的过程中,当一方想合作,而另一方更想与其他基站合作的时候,分簇问题变得非常困难,使整个系统性能受限。为解决此问题,定义了协同度的概念,针对此情况提出了一种重叠分簇方案,并在此基础上设计了一种联合迫零—汤姆林森—哈拉希玛预编码(ZF-THP)算法。该方案通过对局部基站进行重叠分簇调整,并利用THP技术消除重叠基站带来的干扰。仿真分析表明,该方案较好地解决了协同度非对称性导致的分簇矛盾,提高了系统的频谱效率,并改善了用户的公平性能。

**关键词:**多小区联合处理;分簇;预编码;信道状态信息

**中图分类号:** TN911.21    **文献标志码:**A

### Joint precoding scheme under condition of channel asymmetry

ZHENG Li-qing, HUANG Kai-zhi, LI Yin-hai

(Graduate School, National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou Henan 450002, China)

**Abstract:** In a Base Station (BS) cooperation system, the capacity gains of two BSs by cooperating with each other are different owing to the channel asymmetry. Thus, in the process of selecting cooperative BS, when one BS wants to coordinate but another does not want to cooperate with it and prefers others, it will be difficult to judge whether to group the two into a cluster or not and the whole system is capacity-limited. To demonstrate this, the authors proposed an overlapped clustering scheme and then designed a joint precoding algorithm called Zero Force-Tomlinson-Harashima Precoding (ZF-THP) scheme. In this scheme, several BSs were adjusted to be overlapped and THP technique was used to eliminate the interference caused by overlapped BSs. The simulation results show that the proposed scheme solves the clustering contradiction well, efficiently increases the system capacity and enhances the system fairness.

**Key words:** Multi-cell Cooperative Processing (MCP); clustering; precoding; Channel State Information (CSI)

### 0 引言

目前,多小区联合处理(Multi-cell Cooperative Processing, MCP)技术<sup>[1]</sup>是新一代无线传输技术研究的热点<sup>[2-3]</sup>。但是,联合处理技术需要基站间共享部分或全部的信道状态信息(Channel State Information, CSI)以及用户的数据信息<sup>[4]</sup>,这对基站间的网络传输能力提出了巨大的挑战,尤其是系统规模较大时,将带来难以负荷的信息交互量<sup>[5-6]</sup>。对此,一般采用局部协作的方法来解决,即将整个系统划分为多个小的分簇<sup>[7-8]</sup>,簇内的基站采用联合处理技术。文献[9-10]采用静态分簇方案,预先将整个系统划分为多个小的合作簇,并利用联合处理技术消除簇内干扰,提高了系统的频谱效率。但是由于静态的分簇方案无法适应实际系统中信道的时变性,会损失一定的系统吞吐量,因此近几年出现了动态分簇算法<sup>[11-13]</sup>。这类算法利用实时的CSI动态地构造协作分簇,系统的频谱效率比静态分簇方案有很大提高。

然而,静态分簇及动态分簇都面临一个难题:信道干扰矩阵的不对称性导致相互协作的两个基站从协作中获得的性能

增益不一样,因此在分簇时会产生严重的矛盾。例如,对基站A、B、C和相应用户a、b、c,基站A到用户b和基站B到用户a的信道参数差距很大时,此时基站A和B间的信道不对称,A和B协作给用户a和b带来的性能增益出现了较大的落差。为了刻画这种现象,本文引入协同度(Degree of Willingness to Cooperate, DWC)的概念。定义DWC(i, j)为基站i与基站j协作给基站i所在小区用户带来的信噪比增益,有DWC(i, j)越大,基站i越想与j合作。当DWC(A, B)和DWC(B, C)较大,而DWC(B, A)较小时,A想与B合作,而B更想与C合作。此时若将A、B划分为一个协作簇,用户b的性能较差,而若将B、C划分为一个簇,a的性能则会受影响,故整个系统性能受限。

这类现象可以通过资源调度等手段进行缓解,但无法完全消除。因此,本文给出了另一种解决思路:利用协同度不对称性对存在矛盾的基站进行重叠分簇,并在此基础上设计了一种联合迫零—汤姆林森—哈拉希玛(Zero Force-Tomlinson-Harashima Precoding, ZF-THP)预编码算法,可以有效解决这类分簇矛盾,提高系统整体吞吐量。仿真分析表明,该方案很好地抑制了小区间干扰,提高了系统的频谱效率并改善了用

收稿日期:2011-01-19;修回日期:2011-03-18。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX03003-004);国家973计划项目(2007CB310608)。

作者简介:郑丽清(1987-),女,福建莆田人,硕士研究生,主要研究方向:第四代移动通信; 黄开枝(1973-),女,安徽来安人,副教授,主要研究方向:第三代移动通信、异构无线网络安全; 李印海(1964-),男,河南郑州人,副研究员,主要研究方向:异构无线网络安全、软交换、流量均衡。

户的公平性能。

## 1 模型建立及问题描述

### 1.1 协同度不对称定义

对于基站  $A$  和基站  $B$ , 定义  $DWC$  表示两基站间相互合作的愿望程度。对基站  $A$  而言, 基站  $B$  与其合作给所在小区用户带来的性能增益越大,  $A$  想与  $B$  合作的愿望越强。因此可以将  $DWC(A, B)$  定义为基站  $A$  与基站  $B$  协作给基站  $A$  所在小区用户带来的接收信噪比增益。设  $a, b$  分别为基站  $A, B$  对应服务的两个用户, 有  $h_{Aa}, h_{Ab}, h_{Ba}$  分别为基站  $A$  到用户  $a$ 、基站  $A$  到用户  $b$  及基站  $B$  到用户  $a$  的信道参数。则  $A$  不与  $B$  合作和  $A$  与  $B$  合作两种情况下, 用户  $a$  的接收信噪比分别为:

$$SINR_a = \frac{P_A \cdot |h_{Aa}|^2}{\sigma^2 + P_B \cdot |h_{Ba}|^2} \quad (1)$$

$$SINR_a^{coop} = \frac{P_A' \cdot |h_{Aa}|^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

其中假设两种情况下基站  $A$  的发射功率分别为  $P_A$  和  $P_A'$ 。

所以,  $DWC(A, B) = SINR_a^{coop}/SINR_a$ , 可以表示为:

$$DWC(A, B) = \frac{P_A' \cdot (\sigma^2 + P_B \cdot |h_{Ba}|^2)}{P_A \cdot \sigma^2} \quad (3)$$

从式(3)中可以看出,  $DWC(A, B)$  的值与  $h_{Ba}$  的值的关系很大, 同理有  $DWC(B, A)$  与  $h_{Ab}$  有关。因此有  $h_{Ba}$  与  $h_{Ab}$  相差很大时,  $DWC(B, A)$  与  $DWC(A, B)$  相差也较大, 将此情况定义为协同度不对称。

### 1.2 系统模型

为了刻画典型的协同度不对称场景, 本文选用维纳类型的环形网络模型<sup>[1]</sup>。如图1所示,  $n$  个小区, 每个小区中心分布一个基站。设小区内无干扰且只有相邻小区存在小区间干扰(Inter-Cell Interference, ICI)。对用户  $Y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 将其分布在  $X_i$  与  $X_{i+1}$  之间的小区边缘上。此时, 基站  $X_i$  到用户  $Y_{i+1}$  间的距离与基站  $X_{i+1}$  到用户  $Y_i$  间的距离差距很大, 则基站  $X_i$  与  $X_{i+1}$  间相互的信道参数也会存在较大的差距。令  $h_{ij}$  表示基站  $i$  到用户  $j$  的信道参数, 则有  $h_{i(i-1)} \ll h_{i(i+1)} \ll h_{(i+1)i} \ll h_{(i+1)(i+2)}$  等, 依此类推, 通过 1.1 节中关于协同度的分析, 这会导致基站间的协同度不对称。

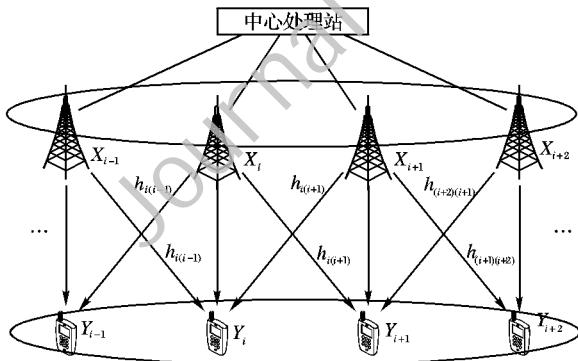


图 1 协同度不对称下的维纳系统模型

## 2 联合 ZF-THP 预编码方案

### 2.1 协同度不对称下的重叠分簇方案

如图1所示, 由于基站间的协同度不对称, 即为了改善  $Y_i$  的性能, 相比于  $X_{i-1}$ , 基站  $X_i$  更愿意与  $X_{i+1}$  合作。同理, 基站  $X_{i+1}$  更愿意与  $X_{i+2}$  合作, 如此反复造成了死循环, 导致无论怎样分簇, 都有一些用户性能较差。以静态分簇为例, 若进行两小区静

态分簇有结果如图2(a), 基站  $X_{i-1}, X_{i+1}$  和  $X_{i+3}$  的性能受限。若进行三小区静态分簇有结果如图2(b), 依然存在  $X_i, X_{i+3}$  性能较差。因此, 本文设计了一种重叠分簇方案如图2(c)。在静态分簇的基础上, 每个簇增加一个协作基站, 利用该基站的信息来改善原簇内用户的性能。比如, 图2(c)中的簇1是在图2(a)中的簇1的基础上增加了一个辅助基站  $X_i$ 。

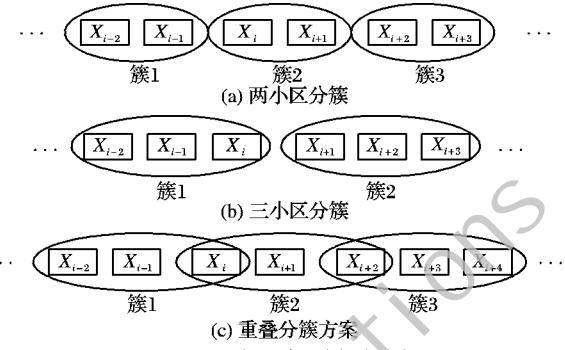


图 2 三种不同的分簇方案

对于图2(c)的分簇结果, 若仍采用传统的预编码方案, 重叠部分的基站必须参与到两个协作簇的联合预编码。这将给这些基站带来严重的开销及复杂度。因此本文提出一种新的预编码方案, 重叠部分的基站只参与信息的共享而不需要进行联合预编码设计。例如, 图2(c)的簇1中,  $X_i$  只参与信息的共享, 却并不与  $X_{i-2}$  及  $X_{i+1}$  一起联合预编码。

不失一般性, 定义重叠分簇  $C$ , 将重叠部分基站集合定义为  $U$ , 非重叠部分基站定义为  $V$ 。用参数  $[m, k]$  来描述这个重叠分簇  $C$ , 其中  $m$  为重叠基站个数,  $k$  为非重叠基站个数, 令  $n$  为簇内所有基站个数, 有  $n = m + k$ 。

### 2.2 联合 ZF-THP 预编码算法

对一个重叠分簇  $[m, k]$ , 有簇内的信道矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_k^k & \mathbf{H}_m^k \\ \mathbf{H}_k^m & \mathbf{H}_m^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{array}{cccc} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1k} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{k1} & h_{k2} & \cdots & h_{kk} \end{array} & \begin{array}{cccc} h_{1(k+1)} & h_{1(k+2)} & \cdots & h_{1n} \\ h_{2(k+1)} & h_{2(k+2)} & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{k(k+1)} & h_{k(k+2)} & \cdots & h_{kn} \end{array} \\ \begin{array}{cccc} h_{(k+1)1} & h_{(k+1)2} & \cdots & h_{(k+1)k} \\ h_{(k+2)1} & h_{(k+2)2} & \cdots & h_{(k+2)k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{(k+1)1} & h_{(k+1)2} & \cdots & h_{(k+1)k} \end{array} & \begin{array}{cccc} h_{(k+1)(k+1)} & h_{(k+1)(k+2)} & \cdots & h_{(k+1)n} \\ h_{(k+2)(k+1)} & h_{(k+2)(k+2)} & \cdots & h_{(k+2)n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{(k+1)(k+1)} & h_{(k+1)(k+2)} & \cdots & h_{(k+1)n} \end{array} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中:  $n$  为簇内所有基站的个数,  $h_{ij}$  表示基站  $i$  到用户  $j$  的信道参数;  $\mathbf{H}_k^k \in \mathbb{C}^{k \times k}$  表示非重叠部分基站到所在小区用户的信道参数矩阵;  $\mathbf{H}_m^m \in \mathbb{C}^{m \times m}$  表示重叠部分基站到所在小区用户的信道参数矩阵;  $\mathbf{H}_k^m \in \mathbb{C}^{k \times m}$  表示非重叠部分基站到重叠部分基站所在小区用户的信道参数矩阵;  $\mathbf{H}_k^m \in \mathbb{C}^{m \times k}$  表示重叠部分基站到非重叠部分基站所在小区用户的信道参数矩阵。

对于被基站集合  $V$  服务的用户  $i$ , 其接收到的信号可以表示为式(5) :

$$y_i = h_{ii} \cdot x_i + \sum_{j \in V, j \neq i} h_{ji} \cdot x_j + \sum_{j \in U} h_{ji} \cdot x_j + n_0 \quad (5)$$

其中:  $h_{ii} \cdot x_i$  为期望收到的信号;  $\sum_{j \in V, j \neq i} h_{ji} \cdot x_j$  为  $V$  内基站导致的 ICI;  $\sum_{j \in U} h_{ji} \cdot x_j$  为  $U$  内基站导致的 ICI;  $n_0$  为噪声, 服从  $N(0, \sigma^2)$ ,  $\sigma^2$  为噪声方差。令  $\mathbf{Y}^k = [y_1, y_2, \dots, y_k]$  为  $V$  内服务的所有用户的接收信号向量, 则  $\mathbf{Y}^k$  可以描述为:

$$\mathbf{Y}^k = (\mathbf{H}_k^k)^H \cdot \mathbf{x}^k + (\mathbf{H}_m^m)^H \cdot \mathbf{x}^m + \mathbf{N}_0 \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{x}^k \in \mathbb{C}^{k \times 1}$ ,  $\mathbf{x}^m \in \mathbb{C}^{m \times 1}$  分别表示非重叠基站和重叠基站的发射信号向量;  $\mathbf{N}_0 \in \mathbb{C}^{k \times 1}$  为噪声向量, 服从  $N(0, \sigma^2)$  分布。

从式(5)中可知, 用户收到两部分的干扰: 一是  $V$  内其他

基站对它的干扰;二是 $U$ 内基站对它的干扰。针对第一部分干扰,本文采取传统的迫零预编码处理方式<sup>[13]</sup>,而对第二部分,采用THP(Tomlinson-Harashima Precoding)进行消除<sup>[14]</sup>。这样,对基站 $i$ 属于 $V$ ,设计发射信号 $x_i^k$ 为:

$$x_i^k = \{\mathbf{B}_i \cdot (\mathbf{S} - \boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}})\} \bmod \xi; i = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

其中: $\mathbf{B}_i \in \mathbb{C}^{1 \times k}$ 为迫零预编码矩阵 $\mathbf{B}$ 的第 $i$ 列,按照文献[13]的设计, $\mathbf{B} = \mathbf{H}_k^k \cdot ((\mathbf{H}_k^k)^H \cdot \mathbf{H}_k^k)^{-1}; \mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_k]$ 为基站的单位发射符号向量,有 $E[\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^H] = \mathbf{I}_k, \mathbf{I}_k$ 为 $k$ 维单位向量,其中 $s_i$ 表示用户 $i$ 期望收到的符号; $\boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}}$ 为THP预编码部分,有 $\boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}} = [\boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}}^1, \boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}}^2, \dots, \boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}}^k], \boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}}^i$ 为针对每个用户的THP预编码部分,令

$$\boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}}^i = \sum_{j \in U} h_{ji} x_j \quad (8)$$

式(8)的物理含义为 $U$ 内重叠基站对 $V$ 内用户的所有干扰分量之和。而式(7)中参数 $\xi$ 用于限制发射信号功率<sup>[14]</sup>, $\xi^2 = Q, Q$ 为调制阶数。

若按照式(7)设计发射信号时,有发射信号向量可以表示为:

$$\mathbf{x}^k = \{\mathbf{B} \cdot (\mathbf{S} - \boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}})\} \bmod \xi \quad (9)$$

其中 $\mathbf{x}^k = [x_1^k, x_2^k, \dots, x_k^k]$ 。将式(9)代入式(3),此时有接收信号向量:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}^k &= (\mathbf{H}_k^k)^H \cdot \mathbf{B} \cdot (\mathbf{S} - \boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}}) \bmod \xi + (\mathbf{H}_k^m)^H \cdot \mathbf{x}^m + \boldsymbol{\beta} \cdot \\ &\quad \xi + \mathbf{N}_0 = \mathbf{S} - \boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}} + (\mathbf{H}_k^m)^H \cdot \mathbf{x}^m + \boldsymbol{\beta} \cdot \xi + \mathbf{N}_0 \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\boldsymbol{\beta}$ 为整数。由式(8)知 $\boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}} = (\mathbf{H}_k^m)^H \cdot \mathbf{x}^m$ ,故:

$$\mathbf{Y}^k = \mathbf{S} + \boldsymbol{\beta} \cdot \xi + \mathbf{N}_0 \quad (11)$$

此时,用户接收信号后进行模 $\xi$ 运算处理:

$$\hat{\mathbf{Y}} = (\mathbf{Y}^k) \bmod \xi \quad (12)$$

经过上面处理,用户端就可以恢复出有用信号,且 $V$ 内用户受到的所有干扰完全被消除。

发送端可采用两种功率分配方式<sup>[13]</sup>。当发射端采用功率注水时,该编码方案必须进行适当的改动。假设根据信道等效增益得到的各用户发射功率为 $p_k, \mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_k]$ ,则发射信号设计为:

$$x_i^k = \{\mathbf{B}_i \cdot p_k \cdot (\mathbf{S} - \mathbf{P}^{-1} \cdot \boldsymbol{\Gamma}_{\text{thp}})\} \bmod \xi \quad (13)$$

同理,接收端模运算后进行判决即可估计出有用信号。

值得注意的是,联合ZF-THP预编码算法并不局限于本文所介绍的分簇模型。在蜂窝系统中,同样可以改进静态分簇方案为部分重叠分簇方案并结合联合ZF-THP算法消除簇间干扰,提高系统整体性能。除此之外,在多基站协同系统中,如果基站接收信噪比非常好,可以把该基站归为辅助基站,并利用ZF-THP预编码技术节省该基站的信息量传输开销。类似的应用场景在蜂窝系统中非常多,相关的研究也非常有意义。

### 2.3 联合ZF-THP预编码算法开销分析

对于一个重叠分簇 $[m, k]$ ,若采用传统的迫零预编码技术,存在两种情况:1)令非重叠的 $k$ 个基站采用联合预编码,将此记为 $k$ 小区协作方案,此时发射端需要已知 $\mathbf{H}_k^k$ 以及 $\mathbf{x}^k$ ,但只能消除非重叠基站内部的ICI;2)令簇内的 $n$ 个基站采用预编码技术,将此记为 $n$ 小区协作方案,此时发射端需要预知整个信道矩阵 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{x}^k$ 以及 $\mathbf{x}^m$ ,且可以完全消除簇内干扰。若采用联合ZF-THP预编码技术,则需要预先知道 $\mathbf{H}_k^k, \mathbf{H}_k^m, \mathbf{x}^k$ 以及 $\mathbf{x}^m$ ,同样可以消除簇内干扰。作为比较,图3给出了联合ZF-THP方案与其他两类方案的信息量开销,其中纵坐标表示算法所需的信道参数个数。可以看出,开销的大小(即所需的信道参数个数)与 $m$ 及 $k$ 的大小有关,本文所提的联合

ZF-THP算法在信息量开销上是两者的一个折中。与 $k$ 小区协作相比,联合ZF-THP以额外的信息量代价消除了更多的ICI,而与 $n$ 小区协作方案相比,该算法在取得相同的性能基础上减少了信息交互量的开销。

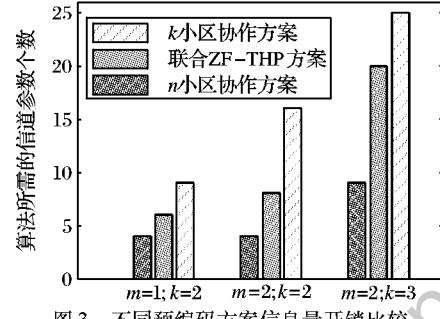


图3 不同预编码方案信息量开销比较

### 3 仿真结果分析

通过蒙特卡罗仿真来验证提出的联合ZF-THP算法性能。将ZF-THP预编码算法应用到图2(c)的分簇结果中。设整个系统小区个数为 $n = 60$ ,小区半径为1 km。令信道参数 $h_{ij} = a_{ij} \cdot b_{ij}$ ,其中 $b_{ij}$ 表示小尺度衰落,服从瑞利分布; $a_{ij}$ 表示大尺度衰落,有 $a_{ij} = PL_{ij} \cdot \gamma_{ij}$ ,其中 $\gamma_{ij}$ 为阴影衰落,方差设为8 dB。 $PL_{ij}$ 为路径衰落常数,参数设置参照3GPP LTE信道模型<sup>[10]</sup>: $PL_{ij} = 148.1 + 37.6 \lg d_{ij}, d_{ij}$ 表示基站 $i$ 到用户 $j$ 的距离。联合预编码算法采用每基站功率受限方式。

图4给出了联合ZF-THP算法与图2(a)、(b)两种分簇方案下的性能比较。其中系统信噪比为不考虑小区间干扰的用户接收信噪比均值,频谱效率的计算参照文献[13]。可以看出,本文提出的联合三小区ZF-THP协作性能优于两小区及三小区分簇下的协作性能。而由图3可知,当 $m = 3, k = 2$ 时,联合ZF-THP算法所需的信息量开销,是两小区与三小区开销的一个折中。图5给出了这三种方案的可达速率累计概率分布曲线,其中本文方案的速率曲线更为陡峭,分布更为集中,用户公平性优于静态两小区及三小区方案。

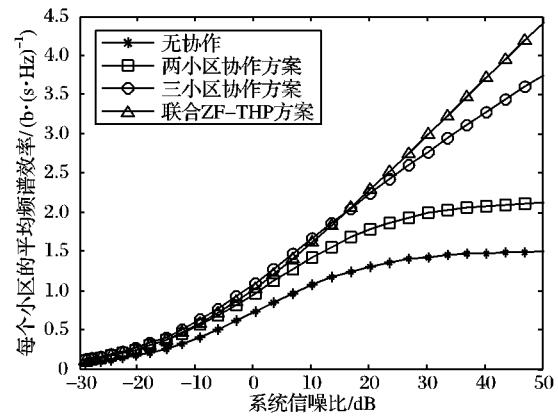


图4 不同协作方案性能比较

### 4 结语

本文提出了一种改进的重叠分簇方案,并在此基础上设计了一种联合ZF-THP预编码算法。仿真分析表明,该方案能够有效解决分簇矛盾,提高系统的频谱效率,并改善用户的公平性能。虽然本文只考虑了简单的维纳模型,但所提的编码方案可以很容易扩展到蜂窝系统中。蜂窝系统中的信道情况更加复杂,出现不对称的情况更多,如何协调蜂窝网络中的分簇矛盾是一项非常有意义的工作,也是后期可以研究的内容。

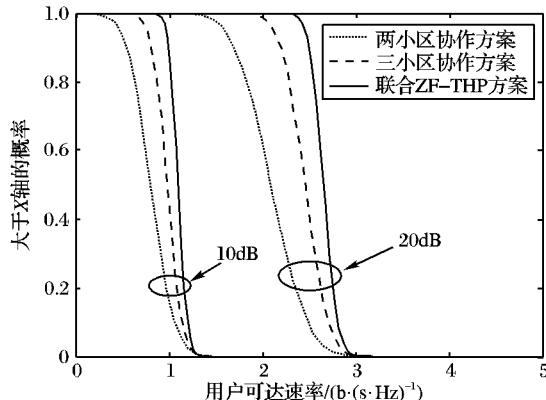


图 5 不同协作方案用户可达速率分布图

## 参考文献:

- [1] SHAMAI S, ZAIDEL B M. Enhancing the cellular downlink capacity via co-processing at the transmitting end [C]// VTC'01: Proceedings of the 53rd IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001: 1745 – 1749.
- [2] GESBERT D, HANLY S, HUANG H, et al. Multi-cell MIMO cooperative networks: a new look at interference [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(9): 1 – 29.
- [3] NAM Y H, LIU L J, YAN W, et al. Cooperative communication technologies for LTE-advanced [C]// ICASSP 2010: Proceedings of the 35th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Dallas, TX: [s. n.], 2010: 5610 – 5613.
- [4] SEOKHYUN Y, SOMEKH O, SIMEONE O, et al. A comparison of opportunistic transmission schemes with reduced channel information feedback in OFDMA downlink [C]// PIMRC 2007: Proceedings of the 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 1 – 5.
- [5] BO N, SIMEONE O, SOMEKH O, et al. Ergodic and outage performance of fading broadcast channels with 1-bit feedback [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(3): 1282 – 1293.
- [6] PAPADOGIANNIS A, BANG H J, GESBERT D, et al. Downlink overhead reduction for multi-cell cooperative processing enabled wireless networks [C]// PIMRC 2008: Proceedings of IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 1 – 5.
- [7] HOYDIS J, KOBAYASHI M, DEBBAH M. On the optimal number of cooperative base stations in network MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(3): 1282 – 1293.
- [8] NG C T K, HUANG H. Linear precoding in cooperative MIMO cellular networks with limited coordination clusters [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(9): 1446 – 1454.
- [9] VENKATESAN S. Coordinating base stations for greater uplink spectral efficiency in a cellular network [C]// PIMRC 2007: Proceedings of the 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 1 – 5.
- [10] BOCCARDI F, HUANG H. Limited downlink network coordination in cellular networks [EB/OL]. [2011-01-20]. [http://www.imperial.ac.uk/membrane/documents/publications/2007/netowrk\\_coordination\\_pimrc07.pdf](http://www.imperial.ac.uk/membrane/documents/publications/2007/netowrk_coordination_pimrc07.pdf).
- [11] PAPADOGIANNIS A, GESBERT D, HARDOUIN E. A dynamic clustering approach in wireless networks with multi-cell cooperative processing [C]// ICC'08: Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 4035 – 4037.
- [12] LIU JINGXIN, WANG DONGMING. An improved dynamic clustering algorithm for multi-user distributed antenna system [C]// WCSP 2009: Proceedings of 2009 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1 – 5.
- [13] ZHOU SHENG, GONG JIE, NIU ZHISHENG, et al. A decentralized framework for dynamic downlink base station cooperation [C]// GLOBECOM'09: Proceedings of the 28th IEEE Conference on Global Telecommunications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 3640 – 3645.
- [14] 许道峰, 黄永明, 杨绿溪, 等. 多用户 MIMO 系统 TH 预编码[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 657 – 660.

(上接第 2020 页)

- [45] ZHANG RUI, LIANG YING-CHANG, CHAI C C, et al. Optimal beamforming for two-way multi-antenna relay channel with analogue network coding [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(5): 699 – 712.
- [46] YAO SHA, SKOGLUND M. Analog network coding mappings in Gaussian multiple-access relay channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(7): 1973 – 1983.
- [47] MARIC I, COLDSMITH A, MEDARD M. Analog network coding in the high-SNR regime [C]// Proceedings of the IEEE Wireless Network Coding Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 1 – 6.
- [48] SAGDUYU Y E, GUO DONGNING, BERRY R. On the delay and throughput of digital and analog network coding for wireless broadcast [C]// Proceedings of the 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 534 – 539.
- [49] GACANIN H, ADACHI F. Broadband analog network coding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1577 – 1583.
- [50] HAO YONGGANG, GOECKEL D, DING ZHIGUO, et al. Achievable rates of physical layer network coding schemes on the ex-
- change channel [C]// Proceedings of IEEE Military Communications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 1 – 7.
- [51] SHARMA S, SHI YI, LIU JIA, et al. Is network coding always good for cooperative communications? [C] // Proceedings of the 29th International Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 1 – 9.
- [52] WANG T, GIANNAKIS G B. High-throughput cooperative communications with complex field network coding [C]// Proceedings of the 41st Annual International Conference on Information Sciences and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 253 – 258.
- [53] WANG T, GIANNAKIS G B. Complex field network coding for multiuser cooperative communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(3): 561 – 571.
- [54] WANG T, GIANNAKIS G B. Capacity scaling of wireless networks with complex field network coding [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 4(3): 830 – 840.
- [55] LI JUN, CHEN WEN, WANG XINBING. Complex field network coding for wireless cooperative multicast flows [C]// Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 1 – 5.