

基于重叠分簇的联合预编码方案设计

郑丽清 黄开枝* 李坤 吉江

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

摘要: 论文提出了一种重叠簇模型,并针对该模型的特点,设计了一种联合迫零-汤姆林森-哈拉希玛预编码(ZF-THP)算法;分析了现有分簇算法存在的两个问题,并针对每个问题采用基于重叠分簇的联合预编码技术设计了两种解决方案:一是抑制簇间干扰方案;二是协同度不对称下的重叠分簇方案。仿真表明,所提方案能够很好地解决分簇存在的问题,提高传统分簇算法的系统频谱效率,并改善局部用户的公平性能。

关键词: 预编码;分簇;小区间干扰;基站协同

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2293-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00197

Joint Precoding Scheme Based on Overlapped Clustering Model

Zheng Li-qing Huang Kai-zhi Li Kun Ji Jiang

(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A joint precoding algorithm—Zero Force-Tomlinson-Harashima Precoding (ZF-THP) algorithm is proposed based on overlapped clustering model. Then, two problems in existing clustering scheme are investigated and corresponding resolutions are designed by employing the ZF-THP algorithm: one is an inter-cluster interference mitigated scheme; the other is an overlapping clustering scheme under the condition of asymmetry of Degree Wiliness to Cooperate (DWC). Simulation results show the scheme proposed performs better than other conventional clustering algorithm in the system spectrum efficiency, and enhances the capacity of partial users' fairness.

Key words: Precoding; Cluster; Inter-Cell Interference (ICI); Base station cooperation

1 引言

多基站协同处理技术^[1]能够有效抑制小区间干扰(Inter-Cell Interference, ICI),提高系统的频谱效率,因而已经成为无线传输技术研究的热点^[2,3]。但是,该技术需要基站间共享全部或部分的信道状态信息(Channel State Information, CSI)以及大量的用户数据信息,所以当系统规模较大时,将给基站间的传输网络带来难以负荷的信息交互量^[4,5]。为解决此问题,一般对可协同的基站群进行分簇^[6,7],即将整个系统划分为多个小的协同簇(cooperative cluster)且令簇内的基站采用协同处理技术。现有的分簇算法主要分为静态分簇及动态分簇算法。文献[8,9]分别针对通信链路上、下行设计两种静态分簇算法;然而静态算法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,因此文献[10-12]通过利用实时的CSI信息来动态地构造协同簇,能够获得比静态分簇算法更好的系统

性能。但是,基于分簇的基站协同方案仍存在以下问题:(1)只能消除簇内干扰,而不能抑制簇间干扰(inter-cluster interference);(2)基站间的协同度不对称时,动态分簇与静态分簇算法性能受限,部分用户公平性较差。

为了解决以上两个问题,本文首先引入了重叠簇的概念,并针对重叠簇的特点,提出了一种联合迫零-汤姆林森-哈拉希玛预编码(ZF-THP)算法。然后,利用该算法设计了两个解决方案。针对问题(1),通过在系统分簇结果基础上,利用门限方式对引起簇间干扰大于门限的基站进行重叠分簇调整,并在重叠簇内采用ZF-THP算法,能够消除原分簇结果之外重叠基站带来的额外簇间干扰分量,提高系统的整体性能。针对问题(2),首先定义了协同度的概念,利用简单的维纳(wyner)模型^[1]来搭建典型的协同度不对称场景;然后,分析了该场景下分簇算法存在的局限,并利用重叠分簇思想及联合ZF-THP技术来解决这个问题。最后,本文对所提方案的性能进行了仿真分析。仿真结果表明,两种方案能够较好地解决了相应的两个问题,提高了系统的频谱效率,并改善了用户的公平性能。

2011-03-10收到, 2011-07-06改回

国家863计划项目(2009AA011205)资助课题

*通信作者: 黄开枝 huangkai-zhi@tsinghua.org.cn

2 重叠簇模型

对一个具有 N 个基站的蜂窝系统进行分簇, 并利用 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_l\}$ 表示系统的分簇结果。其中 l 为分簇结果中协同簇的个数, c_i 表示第 i 个协同簇, $k_i = |c_i|$ 表示 c_i 内基站的个数, 符号 $|\cdot|$ 表示集合内元素个数。假设对分簇结果 C 进行重叠分簇调整, 并用集合 $C' = \{c'_1, c'_2, \dots, c'_l\}$ 表示调整后的分簇结果, $c'_i = c_i \cup v_i$ 为调整后的协同簇, 其中 c_i 为原第 i 个协同簇内基站集, v_i 为新增加的基站集。

定义1 重叠簇 令 c'_i 为一个重叠簇。重叠簇包含两个部分: 一是原协同簇内的基站, 称为非重叠基站; 二是新增加的基站, 由于新增加的基站必然为其他簇内的基站, 因此称为重叠基站。

如图1所示为简单的重叠簇例子。其中, 簇1为 [BS1, BS2], 簇2为 [BS3, BS4]; 经过调整后, BS3 作为新加入的基站增加到簇1中, 构成一个重叠簇。因此BS3为重叠基站, BS1和BS2为非重叠基站。

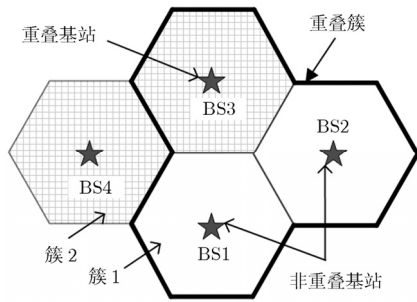


图1 重叠簇模型($m=1, k=2$)

用参数 $[n_t, n_r, m, k]$ 描述一个重叠簇 c' , 其中 $m = |v|$ 为重叠基站个数, $k = |c|$ 为非重叠的基站个数, n_t 表示基站端配置的天线数, n_r 为用户端配置的天线数。设每个小区内随机分布一个用户, 且基站和用户端都配置单根天线, 即 $n_t = n_r = 1$ 。考虑下行通信链路, 则簇内的信道矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_k^k & \mathbf{H}_m^k \\ \mathbf{H}_k^m & \mathbf{H}_m^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1k} & h_{1(k+1)} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{k1} & \cdots & h_{kk} & h_{k(k+1)} & \cdots & h_{kn} \\ h_{(k+1)1} & \cdots & h_{(k+1)k} & h_{(k+1)(k+1)} & \cdots & h_{(k+1)n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nk} & h_{n(k+1)} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 h_{ij} , $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$ 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对

应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对应用户的信道参数矩阵; $\mathbf{H}_m^k \in \mathbb{C}^{k \times m}$ 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 c 内基站服务的用户 i , 其接收到的信号 y_i 可以表示为

$$y_i = \underbrace{h_{ii}x_i}_{\text{期望收到的信号}} + \underbrace{\sum_{j \in c, j \neq i} h_{ji}x_j}_{c \text{ 内基站带来的ICI}} + \underbrace{\sum_{j \in v} h_{ji}x_j^m}_{v \text{ 内基站带来的ICI}} + n_0 \quad (2)$$

其中 x_j^k 和 x_j^m 分别为 c 和 v 内第 j 个基站的发射信号, n_0 为噪声, 服从 $N(0, \sigma^2)$, σ^2 为噪声方差。令 $\mathbf{Y}^k = [y_1, y_2, \dots, y_k]$ 为 c 内基站服务用户的接收信号向量, 则 \mathbf{Y}^k 为

$$\mathbf{Y}^k = (\mathbf{H}_k^k)^H \cdot \mathbf{x}^k + (\mathbf{H}_k^m)^H \cdot \mathbf{x}^m + \mathbf{N}_0 \quad (3)$$

其中 $\mathbf{x}^k = [x_1^k, \dots, x_k^k]$, $\mathbf{x}^m = [x_1^m, \dots, x_m^m]$ 分别为 c 和 v 内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。

3 基于重叠分簇的联合 ZF-THP 算法

从式(2)中可知, 用户 i 受到两部分的干扰: 一是 c 内其它基站对它的干扰; 二是 v 内基站对它的干扰。若在重叠簇内直接采用传统的预编码算法(比如 ZF、块对角化等等), 则这两部分干扰都可以消除。但是这种方式会导致重叠部分基站必须参与到多个协同簇的预编码设计及联合发射过程, 给重叠基站带来巨大的信息量开销及计算复杂度。对此, 本文设计了 ZF-THP 算法。

该算法的主要思想为: c 集合内基站, 通过共享簇内所有基站(包括 v 内基站)的发射数据信息, 采用联合 ZF-THP 技术, 消除簇内所有基站对其服务用户的 ICI。与传统预编码相比, 本算法存在以下两个特点:

(1) v 内基站只参与信息的共享, 而不进行联合预编码发射。即仅 c 内 k 个基站进行联合发射信号给 k 个用户, 但可消除簇内所有基站给 k 个用户带来的 ICI。

(2) c 内 k 个基站采用 ZF 技术消除 c 内基站之间的 ICI, 而采用 THP 技术消除 v 内基站给 c 内用户带来的 ICI。

针对第1部分干扰, 采取传统的 ZF 预编码处理方式^[13], 而对第2部分 ICI, 采用 THP 技术消除^[14]。因此, 设计发射信号向量 \mathbf{x}^k 为

$$\mathbf{x}^k = \{\mathbf{W} \cdot (\mathbf{S} - \Gamma_{\text{thp}})\} \bmod \xi \quad (4)$$

其中 $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_k]$ 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； s_i 表示用户 i 期望收到的数据符号； \mathbf{W} 为ZF预编码矩阵，设计为 $\mathbf{W} = \mathbf{H}_k^k ((\mathbf{H}_k^k)^H \cdot \mathbf{H}_k^k)^{-1}$ ；参数 ξ 用于限制发射信号功率^[14]， $\xi^2 = Q$ ， Q 为调制阶数。 $\mathbf{\Gamma}_{\text{thp}}$ 为THP预编码部分，有

$$\mathbf{\Gamma}_{\text{thp}} = (\mathbf{H}_k^m)^H \cdot \mathbf{x}^m \quad (5)$$

将式(4)代入式(3)，则接收信号向量为

$$\mathbf{Y}^k = (\mathbf{H}_k^k)^H \cdot \mathbf{W} \cdot (\mathbf{S} - \mathbf{\Gamma}_{\text{thp}}) \bmod \xi + (\mathbf{H}_k^m)^H \cdot \mathbf{x}^m + \mathbf{N}_0 \quad (6)$$

将 \mathbf{W} 表达式及式(5)代入式(6)，有

$$\mathbf{Y}^k = (\mathbf{S} - (\mathbf{H}_k^m)^H \cdot \mathbf{x}^m) \bmod \xi + (\mathbf{H}_k^k)^H \cdot \mathbf{x}^m + \mathbf{N}_0 \quad (7)$$

对式(7)继续转化，

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}^k &= \mathbf{S} - (\mathbf{H}_k^m)^H \cdot \mathbf{x}^m + (\mathbf{H}_k^m)^H \cdot \mathbf{x}^m + \mu\xi + \mathbf{N}_0 \\ &= \mathbf{S} + \mu\xi + \mathbf{N}_0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中 μ 为整数。

用户端收到信号 \mathbf{Y}^k 后，进行模 ξ 运算处理，

$$\hat{\mathbf{Y}} = (\mathbf{Y}^k) \bmod \xi = (\mathbf{S} + \mu\xi + \mathbf{N}_0) \bmod \xi \quad (9)$$

经过上面处理，

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{S} + \mathbf{N}_0 \quad (10)$$

用户端即可恢复出期望信号。

对于每个属于 c 的基站 i ，其发射信号 x_i^k 为

$$x_i^k = \{\mathbf{w}_i \cdot (\mathbf{S} - \mathbf{\Gamma}_{\text{thp}})\} \bmod \xi, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (11)$$

其中 \mathbf{w}_i 为矩阵 \mathbf{W} 的第 i 列。

发射信号时，基站端可采用两种功率分配方式^[13]。当发射端采用功率注水时，根据信道等效增益得到的各用户发射功率为 p_k ，令发射功率向量为 $\mathbf{P}_k = [p_1, p_2, \dots, p_k]$ ，相应的功率分配矩阵 $\mathbf{P} = \mathbf{P}_k \cdot \mathbf{I}_k$ ，则发射信号 x_i^k 为

$$x_i^k = \{\mathbf{w}_i p_k (\mathbf{S} - \mathbf{P}^{-1} \mathbf{\Gamma}_{\text{thp}})\} \bmod \xi \quad (12)$$

同理，用户端经过模处理后可恢复出期望信号。

4 联合ZF-THP的两个应用场景

现有的分簇协同方案仍存在以下问题：(1)只能消除簇内干扰，而不能抑制簇间干扰；(2)基站间的协同度出现不对称时，动态分簇与静态分簇算法性能受限，部分用户公平性较差。针对这两个问题，利用基于重叠分簇的联合预编码算法，设计了两种解决方案。

4.1 抑制簇间干扰方案

系统分簇后，在簇内采用协同处理技术可以完全消除簇内干扰，却无法抑制簇间干扰。对此，通过设置一定的干扰门限，然后对系统分簇结果进行重叠分簇调整，将引起簇间干扰大于干扰门限的基

站以重叠基站身份加入到重叠簇内，并利用联合ZF-THP消除重叠基站带来的干扰，可以在一定程度上消除簇间干扰。

设置干扰门限 η_{thd} ，令

$$\eta_{\text{thd}} = \eta_0 \frac{1}{l} I_{\text{mean}}(c_i) \quad (13)$$

其中 η_0 为门限调整因子，通过调整 η_0 可以调整 η_{thd} 的大小； $(1/l)I_{\text{mean}}(c_i)$ 为系统分簇后的簇间干扰分量均值， $I_{\text{mean}}(c_i)$ 为每个簇 c_i 受到的簇间干扰分量均值。即

$$I_{\text{mean}}(c_i) = \sum_{j=1; j \neq i}^l \sum_{\alpha \in c_j} \sum_{\beta \in u_i} h_{\alpha\beta} / k_i (N - k_i) \quad (14)$$

令 $c_i \rightarrow u_i$ ， u_i 为簇 c_i 对应的用户集合。

然后，判断分簇结果中所有簇间干扰大于 η_{thd} 的分量，对引起相应干扰的基站进行重叠分簇调整。具体的处理流程如下：

步骤 1 对每个分簇 $c_i, i = 1, 2, \dots, l$ ，作如下调整：

(1) 计算 c_i 内所有基站受到的簇间干扰分量；

(2) 若某个簇间干扰分量大于 η_{thd} ，将引起该干扰的基站作为 c_i 的重叠基站加入 c_i' 。

步骤 2 对调整后的重叠分簇结果 C' 按先后顺序编号。

顺序编号的原因是由于预编码处理需要已知重叠基站的发射信息，故在进行联合预编码设计时，协同簇需要有先后顺序。

步骤 3 在重叠簇内利用联合ZF-THP技术消除所有干扰分量。

若在重叠簇内采用传统的预编码技术(比如ZF、MMSE等)，则会导致重叠部分基站必须参与到多个协同簇的联合预编码处理过程。这将使重叠部分基站的计算复杂度及开销倍增。而联合ZF-THP只需重叠基站共享其发射信息，因此能够降低重叠基站的复杂度，适用于重叠簇模型。

经过上述处理，可以消除重叠簇内的干扰分量。相比于未进行重叠分簇调整的分簇协同方案，本方案可以额外消除重叠部分基站引起的簇间干扰。

图2(a)给出部分基站(7个基站)的重叠分簇例子。对于协同簇 $G = [\text{BS3}, \text{BS4}, \text{BS7}]$ ，在簇内采用协同处理后，UE3, UE4和UE7仍受到其它簇外基站(比如BS5, BS6等)的干扰。为此，假设图2(a)中BS5和BS6带来的干扰分量大于干扰门限 η_{thd} ，则簇 G 调整为重叠簇 G' 。此时，若在簇 G' 中采用联合ZF-THP技术，则可消除BS5和BS6带来的簇间干扰，且并不会给BS5和BS6带来额外的计算复杂度。

具体的重叠分簇调整伪代码如表1所示。

4.2 协同度不对称下的重叠分簇方案

在对分簇算法的研究过程中发现，有一种情况

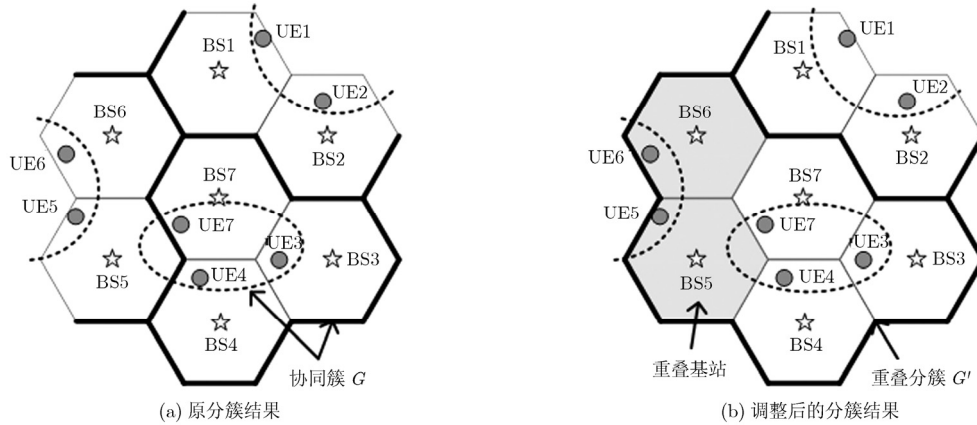


图2 重叠分簇示意图

表 1 重叠分簇调整伪代码

已知分簇结果 C , 令 B 为系统内所有基站的集合; 令 $v_i = \emptyset$, 即 $c'_i = c_i$;	
(1)	初始化: 计算 η_{thd}
(2)	For $i = 1 : l$ //对于第 i 个协同簇 c_i
(3)	For $\alpha \in B, \alpha \notin c_i, \beta \in u_i$ //遍历所有簇外基站对簇 c_i 内用户的干扰分量
(4)	If $h_{\alpha\beta} \geq \eta_{\text{thd}}$ //如果哪个基站导致的簇间干扰分量大于 η_{thd}
(5)	$v_i = v_i \cup \alpha$ //将该基站添加到簇 c_i 的重叠基站部分 v_i 中
(6)	End //判断干扰分量结束
(7)	End //每个簇 c_i 调整完毕
(8)	$c'_i = c_i \cup v_i$ //将重叠基站加到调整后的重叠簇 c'_i 中
(9)	End //所有协同簇调整完毕
(10)	$C' = \{c'_1, c'_2, \dots, c'_l\}$ //调整后的重叠簇集合 C'

会导致动态分簇算法失效, 性能接近于静态分簇算法, 且局部用户性能较差。这种情况就是系统内出现大量协同度不对称的情况。

设有基站 A, B 及对应用户 a, b 。对于基站 A , 基站 B 与其合作给 a 带来的信干噪比增益越大, A 想与 B 合作的愿望越强。令 $\text{DWC}(A, B)$ 表示基站 A 到基站 B 的协同愿望度, 简称协同度。定义 $\text{DWC}(A, B)$ 为基站 A 与基站 B 协作给基站 A 带来的接收信干噪比增益。即

$$\text{DWC}(A, B) = \text{SINR}_A^{\text{coop}(A, B)} / \text{SINR}_A^{\text{non-coop}} \quad (15)$$

其中 $\text{SINR}_A^{\text{coop}(A, B)}$ 表示基站 A 与基站 B 协作时基站 A 的接收信干噪比, $\text{SINR}_A^{\text{non-coop}}$ 表示基站 A 与基站 B 没有协作时基站 A 的接收信干噪比。不考虑除 A 和 B 外其他基站的干扰, 对式(15)计算如下:

$$\begin{aligned} \text{DWC}(A, B) &= \frac{\text{SINR}_a^{\text{coop}(A, B)}}{\text{SINR}_a^{\text{non-coop}}} \\ &= \frac{P'_A |h_{Aa}|^2 / \sigma^2}{P_A |h_{Aa}|^2 / (\sigma^2 + P_B |h_{Ba}|^2)} \\ &= \frac{P'_A (\sigma^2 + P_B |h_{Ba}|^2)}{P_A \sigma^2} \\ &= \frac{P'_A}{P_A} + \frac{P_B}{P_A \sigma^2} |h_{Ba}|^2 \end{aligned} \quad (16)$$

其中 h_{Aa} 为基站 A 到用户 a 的信道参数, h_{Ba} 为基站 B 到用户 a 的信道参数。 P_A 和 P'_A 分别为协作及不协作时基站 A 的发射功率, P_B 为基站 B 的发射功率, σ^2 为噪声方差。

协同度具有方向性, 即基站 A 和基站 B 相互合作分别给用户 a 和 b 带来的信干噪比增益并不一样, 有 $\text{DWC}(A, B) \neq \text{DWC}(B, A)$ 。如果两个基站间的协同度差距很大时, 比如 $\text{DWC}(A, B)$ 很大而 $\text{DWC}(B, A)$ 很小, 此时基站 A 与基站 B 合作的愿望很强, 而基站 B 与 A 合作的愿望很弱, 将此情况称为基站间的协同度不对称。从式(16)中看出, $\text{DWC}(A, B)$ 的值与 h_{Ba} 的关系很大, 因此直接采用信道参数来定义协同度不对称。

定义 2 协同度不对称对于基站 A 与基站 B , 若有

$$\frac{\min(h_{Ab}, h_{Ba})}{\max(h_{Ab}, h_{Ba})} \leq \tau_{\text{thd}} \quad (17)$$

称基站 A 与基站 B 间的协同度不对称。其中 τ_{thd} 为协同度不对称门限, h_{Ab} 为基站 A 到用户 b 的信道参数, h_{Ba} 为基站 B 到用户 a 的信道参数, τ_{thd} 可依据实际情况及需求适当设置。

当一个系统内出现大量协同度不对称的情况时, 分簇结果性能变的非常差。如图3所示, 采用维

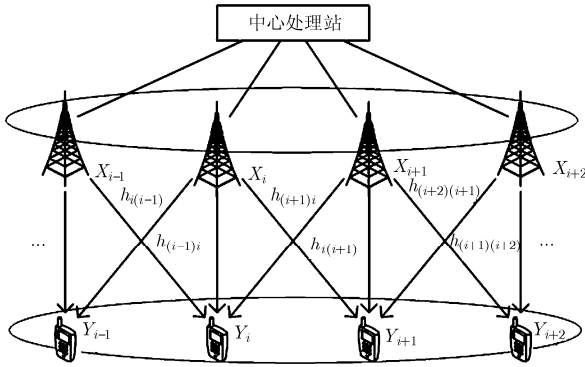


图3 协同度不对称下的维纳圆模型

纳类型的环形网络模型来描述典型的协同度不对称场景。对用户 $Y_i, i = 1, \dots, N$, 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, 即有 $h_{i(i-1)} \ll h_{(i-1)i}, h_{(i+1)i} \ll h_{i(i+1)}$ 等等。通过定义2可知, 这容易导致基站间的协同度不对称。即有基站 X_i 想与 X_{i+1} 合作, 而基站 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, 部分用户的性能较差。以静态分簇为例, 若对图3进行2小区静态分簇, 结果如图4(a), 用户 Y_{i-1}, Y_{i+1} 和 Y_{i+3} 的性能受限。若进行3小区静态分簇, 结果如图4(b), 存在用户 Y_i, Y_{i-3} 性能较差。

因此, 协同度不对称导致系统内局部用户性能较差, 用户公平性较差。对此, 采用重叠分簇方案来解决。如图4(c)所示, 在2小区静态分簇的基础上, 每个协同簇增加一个重叠基站; 然后每个重叠簇内采用联合ZF-THP技术。通过这种方式, 可以消除 X_i 对 Y_{i-1} 的干扰及 X_{i+2} 对 Y_{i+1} 的干扰, 提高 Y_{i-1} 和 Y_{i+1} 的接收性能。

5 仿真结果及分析

本小节利用蒙特卡洛方法对所提算法的性能进行了仿真。首先, 分析了联合ZF-THP算法的开销情况, 然后对两个方案进行了性能仿真。

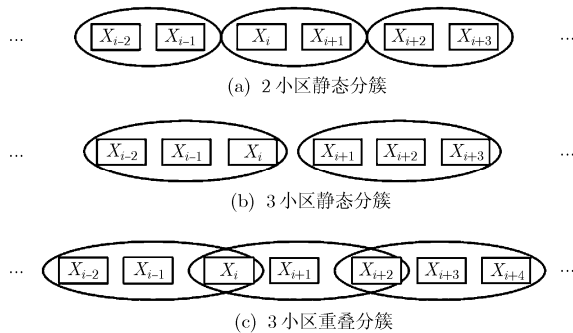


图4 3种不同分簇方案

5.1 联合 ZF-THP 算法开销

对一个重叠簇 $[m, k]$, 若采用传统的ZF预编码技术, 存在两种情况: (1)非重叠的 k 个基站采用ZF预编码, 将此记为 k 基站协作方案, 此时发射端需要已知 H_k^k 以及 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ZF预编码, 将此记为 n 基站协作方案, 此时发射端需要预知整个信道矩阵 H , x^k 以及 x^m , 可以完全消除簇内干扰。若采用联合ZF-THP技术, 需要预先知道 H_k^k, H_k^m, x^k 以及 x^m , 可以消除非重叠基站内部的ICI及重叠基站给非重叠基站服务用户带来的干扰。图5给出了联合ZF-THP方案与其它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, 开销的大小与 m 及 k 的大小有关, 联合ZF-THP算法在信息量开销上是两者的一个折中。从性能上来讲, 联合ZF-THP算法的性能也是两者的一个折中。与 k 基站协作方案相比, 联合ZF-THP以额外的信息量代价消除了重叠基站带来的ICI, 而与 n 基站协作方案相比, 该算法以性能略差的代价减少了信息交互量开销。

5.2 基于重叠分簇的联合预编码性能分析

考虑下行通信链路, 设整个系统小区个数为 $N = 60$, 小区半径为1 km。令信道参数 $h_{ij} = a_{ij}b_{ij}$, 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 $a_{ij} = PL_{ij}\gamma_{ij}$ 。其中 γ_{ij} 为阴影衰落, 方差设为8 dB, PL_{ij} 为路径衰落, $PL_{ij} = PL_0d_{ij}^{-\lambda}$; 其中, d_{ij} 表示用户 i 到基站 j 的距离, λ 为路径损耗因子设为3.76^[10], PL_0 为路径衰落常数。联合预编码算法采用每基站功率受限方式, 下行通信和容量参照文献[13]计算。

5.2.1 抑制簇间干扰方案

首先, 采用静态6小区静态分簇算法将整个系统划分为10个协同簇, 然后利用重叠分簇调整方案进行分簇调整并在簇内采用联合ZF-THP技术消除簇内干扰。图6所示为重叠分簇方案的系统性能仿真结果。其中, 系统信噪比为不考虑ICI的用户接收信噪比均值, 频谱效率为每小区的系统和容量均值; 无协作是指单基站无协作的服务模式; 完全协作是指整个系统所有基站一起采用联合处理的方案。重叠分簇调整方案调整因子 η_0 分别设为0.1, 0.25和0.5三种情况。从图6中可知, 由于消除了簇间干扰分量, 所以重叠分簇方案性能优于静态6小区方案; 而且干扰门限越低, 系统的频谱效率越高。这是因为门限越低, 重叠部分的基站增多, 重叠簇的规模增大, 利用协同处理技术可消除的簇间干扰越多, 协同性能越好。但是,

干扰门限 η_0 不能无限制减小，因为重叠基站增多会导致给重叠分簇顺序编号困难，限制系统的整体性能提升。

5.2.2 协同度不对称下的重叠分簇方案 对维纳类型的环形网络，按照图 4(c)的分簇方案进行分簇调整，可以将系统划分为 30 个重叠簇^[1, 2]。在每个重叠簇内采用联合 ZF-THP 算法进行协同处理，然后计算系统分簇调整后的频谱效率。图 7 给出了分簇结果与图 4(a), 4(b)两种分簇方案下分簇性能的对比图。其中，无协同是指单基站无协作的服务模式，

系统信噪比是指不考虑 ICI 的用户接收信噪比均值。从图 7 中看出，基于 ZF-THP 重叠分簇调整方案的频谱效率高于 2 小区及 3 小区协同分簇方案。图 8 给出了这 3 种方案的可达速率累计概率分布曲线。其中，横坐标为用户的可达速率，纵坐标为系统内用户速率大于横坐标时用户个数占整个系统的百分比。可以看出，本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 2 小区及 3 小区方案。

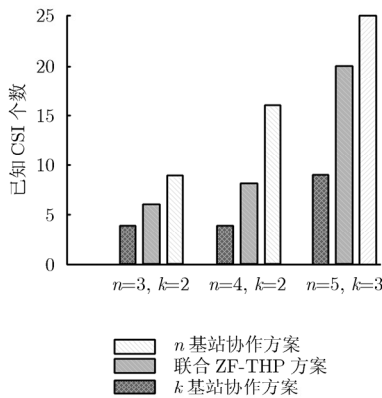


图 5 不同预编码方案信息量开销对比图

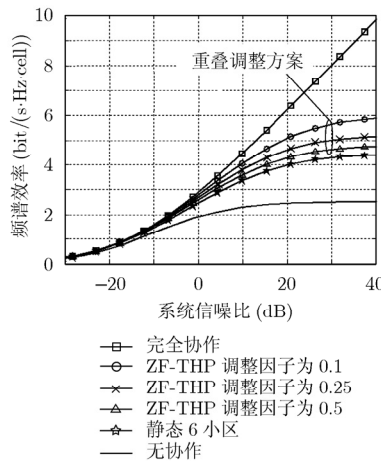


图 6 蜂窝系统重叠分簇调整方案性能分析

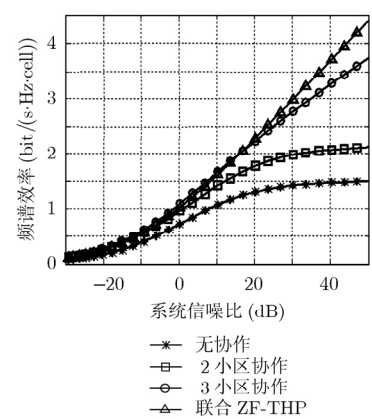


图 7 维纳模型下不同协作方案性能比较

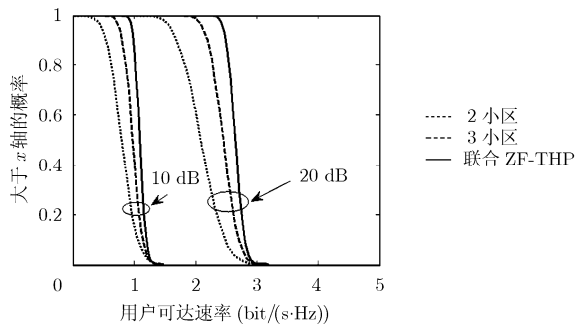


图 8 不同协作方案用户可达速率分布图

6 结论

本文提出了一种基于重叠分簇的联合 ZF-THP 算法；并针对分簇存在的两个问题，利用联合 ZF-THP 技术，设计了两种解决方案。主要的研究成果及结论如下：(1)针对重叠簇的特点，设计了一种联合 ZF-THP 算法，该算法不会增加重叠基站的复杂度，适用于重叠簇模型。(2)通过对系统分簇结果进行重叠分簇调整，并在重叠簇内采用联合 ZF-THP 技术可以消除所有簇间干扰大于设置门限的干扰分量。本方案可以结合现有的静态及动态分簇算法来抑制簇间干扰情况，应用场景较为广阔，具有一定

的研究价值。(3)针对一种特殊的情况——系统内出现大量协同度不对称，分析了现有分簇算法存在的问题，并采用基于重叠分簇的联合 ZF-THP 技术来解决。

仿真结果表明，联合 ZF-THP 算法的开销低于传统的预编码算法。而基于联合 ZF-THP 的重叠分簇调整方案能够解决部分基站受到严重簇间干扰的问题，改善系统内的用户公平性，提高系统的频谱效率。

参考文献

[1] Shamai S and Zaidel B M. Enhancing the cellular downlink capacity via co-processing at the transmitting end [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Rhodes, Greece, 2001: 1745-1749.

[2] Sawahashi M, Yoshihisa K, Akihito M, *et al.* Coordinated multipoint transmission/ reception techniques for LTE-advanced [coordinated and distributed MIMO] [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(3): 26-34.

[3] Li Q, Li G, Lee W, *et al.* MIMO techniques in WiMAX and LTE: a feature overview [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(5): 86-92.

- [4] Papadogiannis A, Bang H J, Gesbert D, *et al.*. Downlink overhead reduction for multi-cell cooperative processing enabled wireless networks [C]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC), Cannes, France, 2008: 1-5.
- [5] Ng C and 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.
- [6] Zhang J, Chen R, and Andrews J. Networked MIMO with clustered linear precoding [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(4): 1910-1921.
- [7] Li C, Wang Y, Xiang W, *et al.*. Performance of user cooperation and clustering scheme in cellular networks [C]. IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), Kyoto, Japan, 2010: 1-5, DOI: 10.1109/PIMRC.2007.4394771.
- [8] Venkatesan S. Coordinating base stations for greater uplink spectral efficiency in a cellular network [C]. 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Athens, Greece, 2007: 1-5, DOI:10.1109/PIMRC.2007.4394807.
- [9] Boccardi F and Huang H. Limited downlink network coordination in cellular networks [C]. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Athens, Greece, 2007: 1-5.
- [10] Papadogiannis A, Gesbert D, and Hardouin E. A dynamic clustering approach in wireless networks with multi-cell cooperative processing [C]. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Beijing, China, 2008: 4033-4037.
- [11] Liu J and Wang D. An improved dynamic clustering algorithm for multi-user distributed antenna system [C]. Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Nanjing, China, 2009: 1-5.
- [12] Zhou S, Gong J, and Niu Z S. A decentralized framework for dynamic downlink base station cooperation [C]. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Honolulu, Hawaii, USA, 2009: 1-6.
- [13] Zhang H Y and Dai H Y. Co-channel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks. [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking*, 2004, 2004(2): 222-235.
- [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.
Xu Dao-feng, Huang Yong-ming, Yang Lu-xi, *et al.*. Tomlinson-Harashima Precoding for Multiuser MIMO Systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(3): 657-660.
- 郑丽清：女，1987年生，硕士生，研究方向为第4代移动通信关键技术。
- 黄开枝：女，1973年生，副教授，硕士生导师，研究方向为第3代移动通信及异构无线网络安全。
- 李坤：男，1987年生，硕士生，研究方向为第4代移动通信关键技术。
- 吉江：男，1983年生，博士生，研究方向为移动通信关键技术及无线网络安全。