

# 功率约束条件不同时下行相干 CoMP 传输异构网的性能

凌 为 韩圣千 杨晨阳

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 本文研究在异构网中进行相干协作多点传输时低复杂度迫零(ZF)预编码的性能。我们考虑在同构网中常用的低复杂度 ZF 预编码结构,即先进行 ZF 波束形成再进行功率分配,分析在采用和功率约束及单基站功率约束下使和数据率最大的功率分配时协作传输的性能,并与实际系统中常用的等功率分配的性能进行比较。分析结果表明,在异构网多载波系统中进行下行相干协作传输时,与在同构网中的结果不同,协作传输后单基站功率约束的性能远优于其他功率约束下的性能。但是,当协作的宏基站与微基站最大功率差别较大时,宏用户的性能在协作后甚至不如不进行协作传输,而微用户的性能会有所提高。这意味着在异构网中设计协作预编码时必须考虑单基站功率约束,而且不能只对功率分配进行优化设计。

**关键词:** 异构网; 协作多点传输; 单基站功率约束

**中图分类号:** TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)10-1586-07

## Performance of downlink CoMP transmission with different power constraints in Heterogeneous Network

LING Wei HAN Sheng-qian YANG Chen-yang

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

**Abstract:** In this paper, the performance of low complexity zero-forcing (ZF) precoder in coordinated multipoint (CoMP) transmission for heterogeneous networks is investigated. We consider the low complexity precoder structure often applied in homogeneous networks, which is decoupled into a ZF beamformer followed by power allocation. The performance of cooperative transmission with sum power constraint and per base-station (BS) power constraint is analyzed, where the power allocation is to maximize the sum rate. The performance is compared to that of equal power allocation, which is usually used in practical systems. It is shown that the downlink cooperative transmission in multi-carrier heterogeneous networks is quite different from that in homogeneous networks. The performance of CoMP with per BS power constraint is much better than those with other power constraints. However, when the maximal power of the cooperative macro BS and that of micro BS are quite different, the performance of macro users with CoMP is even inferior to that without coordination, while the performance of micro users is improved as expected. This implies that when designing the cooperative precoder in heterogeneous networks we must consider the per BS power constraint, and we should not only optimize the power allocation with a given ZF beamformer.

**Key words:** Heterogeneous network; coordinated multipoint (CoMP); per base-station power constraint

### 1 引言

小区间干扰是制约未来全频复用蜂窝网络频谱效率的瓶颈,尤其是对于多天线(Multi-input multi-output, MIMO)系统。当多个基站可以通过理想的骨干网交换数据和信道信息时,相干协作多点(Coordinated multipoint, CoMP)传输(又称网络化 MIMO[1]或 CoMP-JP (CoMP joint processing)[2]),可以充分利用多基站、多天线的资源,把小区间干扰变为有用信号,大大提升系

统的频谱效率[1-4]。

若协作基站之间理想时频同步、骨干网容量足够大且无传输延时,则 CoMP-JP 系统可以被视为一个具有更多分布式天线的多用户 MIMO 系统。不过,CoMP-JP 与多用户 MIMO 系统的一个本质区别是二者的发射功率约束不同。在进行优化设计时,多用户 MIMO 系统一般考虑多天线和功率约束(Sum power constraints, SPC),而对于 CoMP-JP 系统则应该考虑单基站功率约束(Per-Base-station power constraints, PBPC),因为基站

之间不可能共享发射功率。由于在 PBPC 下进行优化设计或进行理论性能分析比较困难[5],研究者往往采用简单的等功率分配或直接沿用 SPC 以便简化分析、设计与性能评估[6]。

尽管脏纸编码[7]能达到多用户 MIMO 系统的和容量,但其复杂度过高难以实现;而线性预编码可以在性能和复杂度之间进行折中,已经得到了广泛的应用。当系统中用户数很多时,基于多天线 SPC 优化设计的迫零(Zero Forcing, ZF)预编码可以渐近地达到脏纸编码的性能[8],而当考虑比 PBPC 更为一般的单天线功率约束时,ZF 预编码仍然可以达到渐近最优的性能[9]。因此,在进行系统实现、性能分析以及优化收发机时,人们经常采用 ZF 准则。ZF 预编码包括迫零波束形成(Zero forcing beamforming, ZF-BF)和功率分配。基于信道伪逆的 ZF-BF 在 SPC 条件下是使和数据率最大的 ZF 波束形成[10],而在 PBPC 条件下的最优 ZF 预编码则需要对波束形成和功率分配进行联合优化[5]。为了降低设计和实现复杂度,不少文献采用在传统 SPC 条件下最优的 ZF-BF,而后在 PBPC 条件下设计使和率最大的功率分配[11-13]。事实上,在同构网中,当多个小区内的用户数趋于无穷时,利用这种思路设计的 ZF 预编码与在 PBPC 条件下优化设计的结果性能差别不大[12-13]。

为了进一步提高蜂窝系统的频谱效率,近来异构网(HetNet, Heterogeneous network)受到了学术和工业界的广泛关注[14-17]。通过在宏(Macro)基站的覆盖范围内增加一些低功率节点,例如微(Micro)基站、毫微(Pico)基站、家庭基站(Femtocell)、远程射频节点(RRH, remote radio head)和中继(本文将这些节点统称为微基站),可以增强对热点地区的覆盖,并有效地提高整个蜂窝网络的吞吐量[14]。与同构网(HomNet, homogeneous network)相比,微基站的引入使得干扰环境更为复杂,因此对异构网中的干扰进行协调是目前的研究热点之一。目前提出的干扰协调技术主要集中在频谱划分和功率控制方面。最近,3GPP 提出了一种针对异构网的协作传输场景,在宏基站和 RRH 之间通过 CoMP-JP 服务这两种小区内的多个用户[17]。

本文考虑宏基站和微基站之间进行下行 CoMP-JP 传输的系统。与同构网不同,在异构网中不同类型基站的发射功率不同,基站的发射天线数也不同。我们将分析在异构网中进行相干协作传输时,是否依然可以沿用现有在同构网中采用的设计思路[11-13]——即采用在传统 SPC 条件下最优的 ZF-BF,而后在 PBPC 条件下设计使和率最大的功率分配;分析在 SPC、PBPC 条件下设计的最优功率分配以及采用工程上常用的等功率分配方法(EPA, Equal power allocation)[1]是否在用户数较多时依然差异不大;在此基础上进一步分析 CoMP-JP 异构网的性能。

## 2 系统模型

为了简化分析并不失一般地,考虑在宏基站覆盖范围内有一个低功率的微基站(如 RRH)的异构网,如图 1 所示。这两个基站以 CoMP-JP 的方式在每个子载波上协作服务所在区域内的多个宏用户和微用户。设宏基站和微基站的发射功率分别为  $P_{CM}$  和  $P_{CR}$ ,发射天线数分别为  $N_m$  和  $N_r$ ,用户均有单个天线。设在载波  $k, k=1, \dots, L$  的用户  $i, i=1, 2$  上的信道响应为  $\tilde{\mathbf{h}}_k^i = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_k^1 \\ \mathbf{h}_k^2 \end{pmatrix}$ ,其中  $i=1$  代表这个子载波上的宏用户, $i=2$  代表微用户(为简化符号,这里略去了载波下标  $k$ ),  $\mathbf{h}_k^1 \in \mathbb{C}^{N_m \times 1}$  和  $\mathbf{h}_k^2 \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$  分别为在载波  $k$  上宏基站和微基站到用户  $i$  的信道向量。值得说明的是,不同载波上服务的用户可能相同也可能不同,考虑到宏基站有较多的宏用户,因此在实际系统中可能  $M$  个用户占用  $L$  个载波,而微基站由于服务用户较少,故认为只有一个微用户占用全部载波,这意味着同一个载波上总是以 CoMP-JP 空分多址的方式同时服务一个宏用户和一个微用户,而在所考虑的一个频段上以频分多址的方式服务宏用户(在实际系统中当微基站服务多个用户时,我们假设这多个用户也以频分的方式服务,而我们依然可以以某一个用户所在的频段为例进行如下分析)。

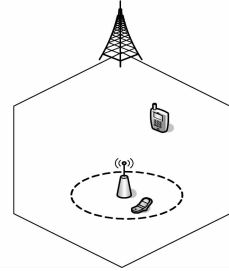


图 1 异构网拓扑图

Fig. 1 Topology of HetNet

设在载波  $k$  上进行 CoMP-JP 传输时的预编码矩阵

为  $\mathbf{W}_k = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_k^1 \\ \mathbf{W}_k^2 \end{pmatrix}$ ,其中  $\mathbf{W}_k^1 \in \mathbb{C}^{N_m \times 2}$ ,  $\mathbf{W}_k^2 \in \mathbb{C}^{N_r \times 2}$ 。则用户  $i$

在载波  $k$  上的接收信号为:

$$r_k^i = (\tilde{\mathbf{h}}_k^i)^T \mathbf{W}_k \mathbf{s}_k + u_k + n_k = (\tilde{\mathbf{h}}_k^i)^T \mathbf{W}_k \begin{pmatrix} s_k^1 \\ s_k^2 \end{pmatrix} + \tilde{n}_k \quad (1)$$

其中  $s_k^1, s_k^2$  分别为在载波  $k$  上发送给用户 1、用户 2 的信号, $u_k$  为协作基站外的小区干扰,这里为了便于分析将其建模为高斯白噪声(对应于最坏情况), $n_k$  为接收机的加性高斯白噪声;定义  $\tilde{n}_k \triangleq u_k + n_k$  为等效噪

声,其均值为0、方差为 $\sigma^2$ 。

### 3 不同功率约束下的协作预编码算法

与文献[11-13]的思路一样,我们把载波 $k$ 上的预编码矩阵 $\mathbf{W}_k$ 分为波束形成矩阵和功率分配矩阵两部分来设计,即: $\mathbf{W}_k = \mathbf{G}_k \mathbf{P}_k$ ,其中 $\mathbf{G}_k \in \mathbb{C}^{(N_m+N_r) \times 2}$ 为协作波束形成矩阵, $\mathbf{P}_k = \text{diag}\{\sqrt{p_k^1}, \sqrt{p_k^2}\}$ 为协作功率分配矩阵,其中 $\text{diag}\{\mathbf{x}\}$ 表示以向量 $\mathbf{x}$ 为对角线元素的对角矩阵。

#### 3.1 协作波束形成及其性能

与文献[11-13]相同,我们采用在SPC条件下使和数据率最大的ZF-BF进行协作波束形成。在载波 $k$ 上下行CoMP-JP信道为 $\mathbf{H}_k = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{h}}_k^1 & \tilde{\mathbf{h}}_k^2 \end{pmatrix}^T$ ,则波束形成成为 $\mathbf{G}_k = \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^T)^{-1}$ 。假设 $E(\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H) = \mathbf{I}$ ,其中 $E(\cdot)$ 表示数学期望, $\mathbf{I}$ 为单位阵,则采用这种ZF-BF的CoMP-JP系统可以达到的和数据率为:

$$\begin{aligned} R &= \sum_{k=1}^L \log_2 \det \left( \mathbf{I} + \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^H \mathbf{H}_k^H}{\sigma^2} \right) \\ &= \sum_{k=1}^L \log_2 \det \left( \mathbf{I} + \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{G}_k \mathbf{P}_k \mathbf{P}_k^H \mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_k^H}{\sigma^2} \right) \\ &= \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^2 \log_2 \det (1 + \eta_k^i p_k^i) \end{aligned} \quad (2)$$

其中等效信噪比 $\eta_k^i = \frac{|(\tilde{\mathbf{h}}_k^i)^T \mathbf{g}_k^i|^2}{\sigma^2}$ 。

#### 3.1.1 单基站功率约束下的最优功率分配

根据(1)以及 $E(\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H) = \mathbf{I}$ ,宏基站所发射的功率为:

$$\begin{aligned} &E \left( \sum_{k=1}^L \text{Tr} \left( \mathbf{W}_k^1 \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H (\mathbf{W}_k^1)^H \right) \right) \\ &= \sum_{k=1}^L \text{Tr} \left( \mathbf{G}_k^1 \mathbf{P}_k \mathbf{P}_k^H (\mathbf{G}_k^1)^H \right) = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^2 a_k^i p_k^i \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{G}_k^1 \in \mathbb{C}^{N_m \times 2}$ 为 $\mathbf{G}_k$ 的前 $N_m$ 行, $a_k^i = (\mathbf{c}_k^i)^H \mathbf{c}_k^i$ , $\mathbf{c}_k^i$ 为 $\mathbf{G}_k^1$ 的第 $i$ 列, $\text{Tr}(\cdot)$ 代表矩阵迹。

类似的,微基站所发射的功率为:

$$\sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^2 b_k^i p_k^i \quad (4)$$

其中 $\mathbf{G}_k^2 \in \mathbb{C}^{N_r \times 2}$ 为 $\mathbf{G}_k$ 的后 $N_r$ 行, $b_k^i = (\mathbf{d}_k^i)^H \mathbf{d}_k^i$ , $\mathbf{d}_k^i$ 为 $\mathbf{G}_k^2$ 的第 $i$ 列。

则PBPC可以表示为如下更简洁的向量形式:

$$\mathbf{a}^T \mathbf{p} \leq 1 \quad (5)$$

$$\mathbf{b}^T \mathbf{p} \leq 1 \quad (6)$$

其中 $\mathbf{a} = \left( \frac{a_1^1}{P_{CM}}, \frac{a_1^2}{P_{CM}}, \dots, \frac{a_L^1}{P_{CM}}, \frac{a_L^2}{P_{CM}} \right)^T$ ,

$\mathbf{b} = \left( \frac{b_1^1}{P_{CR}}, \frac{b_1^2}{P_{CR}}, \dots, \frac{b_L^1}{P_{CR}}, \frac{b_L^2}{P_{CR}} \right)^T$ ,

$$\mathbf{p} = (p_1^1, p_1^2, \dots, p_k^1, p_k^2, \dots, p_L^1, p_L^2)^T.$$

根据(2)、(5)和(6),在PBPC约束下使和数据率最大的功率分配问题可以建模为:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{p}} \quad & R = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^2 \log_2 \det (1 + \eta_k^i p_k^i) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A}_i \mathbf{p} \leq \mathbf{1} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{A}_i = (\mathbf{a} \ \mathbf{b})^T$ , $\mathbf{1}$ 为元素全1的列向量。

根据KKT条件[18],可以推出最优功率分配具有如下形式:

$$p_m = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^2 \beta_i [\mathbf{A}_i]_{i,m}} - \eta(m) \right)^+, \quad m = 1, \dots, 2L \quad (8)$$

其中 $\boldsymbol{\eta} = (\eta_1^1, \eta_1^2, \dots, \eta_k^1, \eta_k^2, \dots, \eta_L^1, \eta_L^2)^T$ , $\eta(m)$ 为 $\boldsymbol{\eta}$ 的第 $m$ 个元素, $(x)^+ = \max(x, 0)$ , $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2)^T$ 为满足PBPC约束的水平面向量。

可见,求解最优功率分配向量 $\mathbf{p}$ 是一个多水平面注水问题,可以通过内点法[18]迭代求解。

#### 3.1.2 和功率约束下的最优功率分配

和功率约束是指总的实际发射功率不能超过两个基站总的最大发射功率。两个基站的总发射功率为:

$$\begin{aligned} &E \left( \sum_{k=1}^L \text{Tr} \left( \mathbf{W}_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H \mathbf{W}_k^H \right) \right) \\ &= \sum_{k=1}^L \text{Tr} \left( \mathbf{G}_k \mathbf{G}_k^H \mathbf{P}_k \mathbf{P}_k^H \right) = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^2 \lambda_k^i p_k^i \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\lambda_k^i = (\mathbf{g}_k^i)^H \mathbf{g}_k^i$ 。

因此,在SPC下使和数据率最大的优化问题可以建模为:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{p}} \quad & R = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^2 \log_2 \det (1 + \eta_k^i p_k^i) \\ \text{s.t.} \quad & \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{p} \leq 1 \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\boldsymbol{\lambda} = \left( \frac{\lambda_1^1}{P_{sum}}, \frac{\lambda_1^2}{P_{sum}}, \dots, \frac{\lambda_k^1}{P_{sum}}, \frac{\lambda_k^2}{P_{sum}}, \dots, \frac{\lambda_L^1}{P_{sum}}, \frac{\lambda_L^2}{P_{sum}} \right)^T$ , $P_{sum} =$

$P_{CM} + P_{CR}$ 。

这个优化问题的解可以通过单水平面注水得到。在得到最优功率分配向量 $\mathbf{p}_o$ 后,若宏基站、微基站的实际发射功率 $P_{CM\_vir}$ 、 $P_{CR\_vir}$ 超过其最大允许的发射功率,则实际的功率分配向量为 $\mathbf{p} = \min \left( \frac{P_{CM}}{P_{CM\_vir}}, \frac{P_{CR}}{P_{CR\_vir}} \right) \mathbf{p}_o$ ,即系统强制使其自动满足单基站功率约束。

#### 3.2 实际中常用的等功率分配

由于通过注水进行功率分配实现较复杂,在实际系统中经常应用简单的等功率分配方法,即 $p_i^1 = p_j^2 = p$ , $i, j = 1, \dots, L$ 。文献[1]的研究表明,在使用户的最小数据率最大化准则下EPA是最优的功率分配方案。为了

满足单基站的功率约束,实际的功率分配向量为:

$$p = \min \left( \frac{P_{CM}}{\sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^2 a_k^i}, \frac{P_{CR}}{\sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^2 b_k^i} \right) \quad (11)$$

如果经过多用户调度选择的用户的信道不能保证完全正交,则在进行 ZF-BF 时会存在功率损失。解决这个问题一个简单的方法,是把协作波束形成矩阵  $\mathbf{G}_k = (\mathbf{g}_k^1 \ \mathbf{g}_k^2)$  的每一列进行能量归一化,得到  $\mathbf{g}_k^i \leftarrow \frac{\mathbf{g}_k^i}{\|\mathbf{g}_k^i\|}$ ,  $i=1,2$ 。这样,实际上可以保证在经过 ZF 预编码一即经过 ZFBF 与功率分配后给每个用户发射的功率相同,我们称之为归一化的等功率分配 (NEPA, Normalized equal power allocation) [19]。

### 4 不同功率约束条件下 CoMP-JP 异构网的性能

下面,我们通过仿真分析在上述功率约束下异构网 CoMP-JP 的性能。若无特别说明,仿真的参数如下(主要参数参照 3GPP 的提案[20]选取):宏基站和微基站的<sub>最大发射功率分别为 46dBm 和 30dBm、发射天线数分别为</sub>

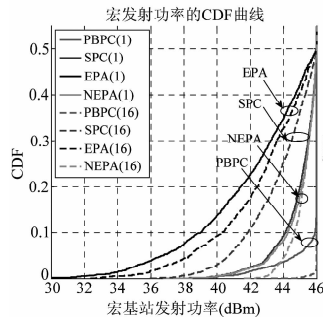


图 2 宏基站发射功率 CDF (载波数增加)

Fig.2 CDF of Transmit Power of Marco BS

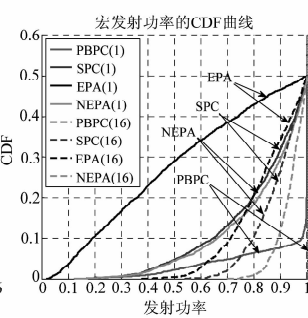


图 3 宏基站发射功率 CDF (用户数增加)

Fig.3 CDF of Transmit Power of Marco BS

比较图 2 和图 4 可见,当每个用户占用的载波数增加时,PBPC、EPA 和 NEPA 条件下宏基站发射功率的方差逐渐变小,宏基站也越来越接近满功率发射,但是在 SPC 的约束下,载波数越多,宏基站发射功率的方差越大。而图 3 和图 5 的结果表明,当不同用户占用的载波数增加、即用户数增加时,在 SPC、EPA、NEPA 条件下两个宏基站所发射的功率越来越接近 PBPC 下的发射功率。

### 4.2 同构、异构网中不同功率约束条件下 CoMP-JP 的性能

图 6 ~ 图 9 的仿真曲线是在不同载波数下,同构 CoMP-JP 和异构 CoMP-JP 在不同功率约束下的平均频谱效率,其中异构网分为图 7 ~ 图 9 三种情况:宏基站

4 和 2、小区半径分别为 250m 和 40m、在同样的时频资源块上分别服务 28 个和 2 个用户,路径损耗模型分别为  $15.3+37.6\log_{10}d$  dB 和  $30.1+36.7\log_{10}d$  dB,其中  $d$  表示用户到基站的距离;单天线用户的接收机噪声为 -95dBm,协作基站外干扰为 -100dB;总载波为  $L=16$ ,其中宏基站在频域上等频段调度  $M=4$  个用户,微基站总频段上调度一个微用户;用户在空间和频率上的调度均采用轮询方法,相当于空频随机调度;在异构网中宏基站和微基站相距 150m。

作为比较基准,我们也将给出同构网的性能,即两个相同配置的宏基站进行协作,其中每个宏小区里有 15 个宏用户(与异构网的总用户数相同,共有 30 个用户)。

### 4.1 不同功率约束条件下同构网功率分配结果

图 2 ~ 图 5 比较了同构网在各种功率约束下的性能,为了分析载波数和用户数对不同约束下给两个基站分配的功率的影响,图 2、图 4 仿真了不同载波上服务用户相同时(即全部载波服务同一个用户)两个宏基站发射功率的累积分布函数(CDF)和方差;图 3、图 5 仿真了每个载波上用户不同(即一个用户仅占用一个载波)的情况,图中图标后括号内的数字表示载波个数。

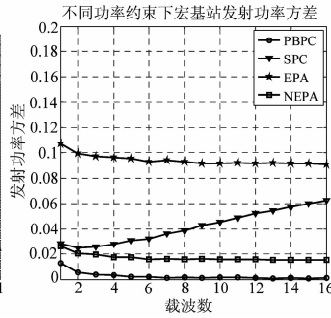


图 4 宏基站发射功率方差 (载波数增加)

Fig.4 Variance of Transmit Power of Marco BS

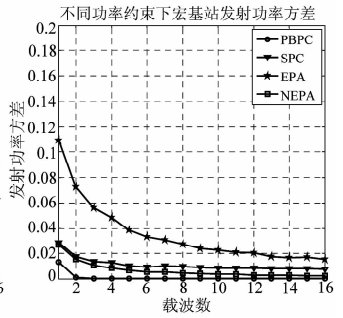


图 5 宏基站发射功率方差 (用户数增加)

Fig.5 Variance of Transmit Power of Marco BS

和微基站相同最大发射功率(46dBm)、不同发射天线数(分别为 4,2);宏基站和微基站不同最大发射功率(分别为 46dBm,30dBm)、相同发射天线数(4);以及宏基站和微基站不同最大发射功率(46dBm,30dBm)、不同发射天线数(分别为 4,2)。总载波数为 16 个。其他条件见本节开始的说明,此时,每个宏用户占用 4 个载波,而每个微用户占用 16 个载波。

从图 6 的仿真结果可见,对于同构的 CoMP-JP 多载波系统,在 PBPC、SPC 和 NEPA 这几种不同的功率约束下系统的性能差别不大,而 EPA 的性能明显下降(需要说明的是,图 6 的同构网中两个宏基站相距 250m,而图 7 至图 9 中宏基站和微基站相距 150m,因此图 6 中尽管一个基站的天线数更多,其整体性能仍

低于图7。不过,在这里我们关心的是在基站的不同天线和最大发射功率配置下各种功率约束的差异。而在异构网中进行 CoMP-JP 时,如果基站发射天线数不同、最大发射功率相同(图7),则在 PBPC、SPC 和 NEPA 条件下性能差别仍然不大,而 EPA 的性能仍然与其

他方法差距很大;一旦基站最大发射功率不同,即使发射天线数相同(图8),PUPC、SPC 的性能与 PBPC 会有较大的差距;比较图8和图9,可见异构网中不同功率约束间的性能差距主要来自基站间最大发射功率的不平衡。

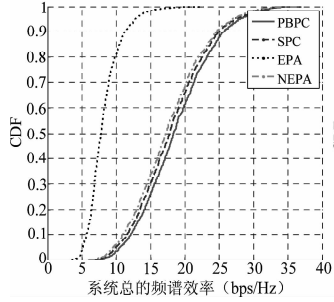


图6 同构网下的性能比较:两个基站最大发射功率相同(46dBm)、相同发射天线数(均为4)

Fig. 6 Performance Comparison in HomNet: Same Maximal Transmit Power of Marco BS (46dBm), Same Number of Transmit Antennas (4)

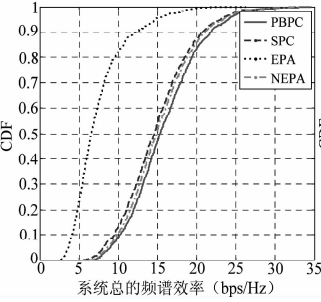


图7 异构网下的性能比较:宏基站和微基站相同最大发射功率(46dBm)、不同发射天线数(分别为4,2)

Fig. 7 Performance Comparison in HetNet: Same Maximal Transmit Power of Marco BS and Mico BS, Transmit Antennas (4, 2 respectively)

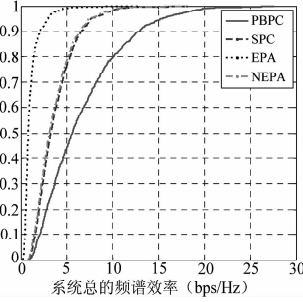


图8 异构网下的性能比较:宏基站和微基站不同最大发射功率,相同发射天线数(均为4)

Fig. 8 Performance Comparison in HetNet: Different Maximal Transmit Power of Marco BS and Mico BS, Same Number of Transmit Antennas (4)

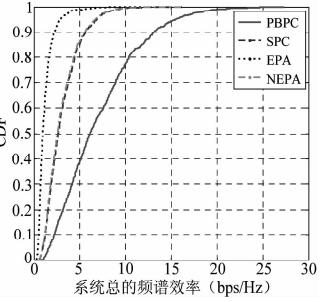


图9 异构网下的性能比较:宏基站和微基站不同最大发射功率,不同发射天线数(分别为4,2)

Fig. 9 Performance Comparison in HetNet: Different Maximal Transmit Power of Marco BS and Mico BS, Transmit Antennas (4, 2 respectively)

为了进一步解释上述现象,图10和图11给出了同构和异构 CoMP-JP 在不同功率约束下宏基站发射功率的 CDF 曲线,其中载波数  $L=16$ 。同时,仿真结果表明(由于篇幅限制,未附仿真结果),在异构 CoMP-JP 系统中在不同功率约束下微基站发射功率始终为 30dBm。

下宏基站也不能以很大概率满功率发射,并且有一个较大的变化范围,其他三种功率约束下的发射功率更是远小于最大发射功率,与 PBPC 的发射功率有较大的差距,而低功率的微基站在不同的功率约束下总是以最大功率发射。这意味着在异构 CoMP-JP 系统中,高功率的宏基站由于受到低功率的微基站的限制,已经不能发挥它的高功率能力,尤其是在 SPC、NEPA、EPA 这几种常见的功率约束下。

从图10可见,同构 CoMP-JP 多载波系统在 PBPC 功率约束下,两个基站几乎总是以最大发射功率发射,而 SPA、EPA 和 NEPA 这三种功率约束下宏基站发射功率小于 PBPC 发射的功率,但是它们所发出的功率最低也总比最大发射功率小 1~5dB,差别不大,故在这些功率约束下同构 CoMP-JP 系统的性能差异不大。相反,从图11可见,异构 CoMP-JP 系统即使在 PBPC 条件

图12和图13进一步给出了在异构网 CoMP-JP 系统中宏基站实际发射的平均功率以及系统的频谱效率随着微基站发射功率变化的曲线,其中微基站的发射天线数  $N_{tr}=2$ ,载波数  $L=16$ 。

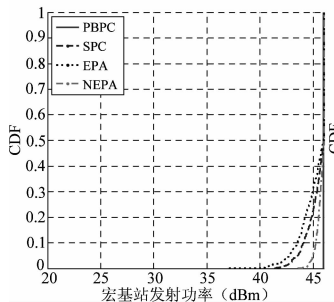


图10 同构 CoMP-JP 系统中宏基站发射功率的 CDF 两个基站最大发射功率相同(46dBm)、发射天线数相同(均为4)

Fig. 10 CDF of Transmit Power of Marco BS in HomNet Same Maximal Transmit Power of Marco BS (46dBm), Same Number of Transmit Antennas (4)

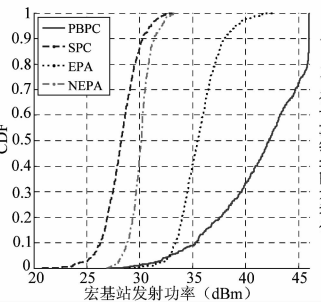


图11 异构 CoMP-JP 系统中宏基站发射功率的 CDF 宏基站和微基站不同最大发射功率,不同发射天线数(分别为4,2)

Fig. 11 CDF of Transmit Power of Marco BS in HetNet Different Maximal Transmit Power of Marco BS and Mico BS, Transmit Antennas (4, 2 respectively)

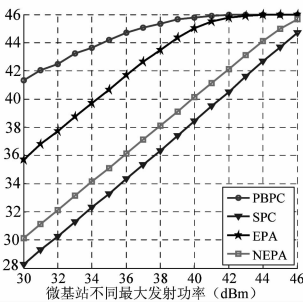


图12 异构 CoMP-JP 下宏基站发射的平均功率比较

Fig. 12 Comparison of Average Transmit Power of Marco BS in HetNet

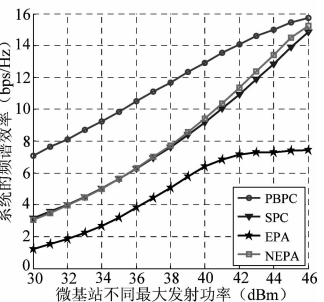


图13 异构网 CoMP-JP 下的系统性能比较

Fig. 13 Performance Comparison of system in HetNet

从图 12 可见,随着微基站最大发射功率的增大, PBPC、SPC、EPA、NEPA 这四种功率约束下的宏基站平均发射功率一直增大,尤其当微基站最大发射功率增大到与宏基站的功率相同时,在 PBPC 以及 EPA 条件下的宏基站能以最大功率发射。从图 13 可见,随着微基站最大发射功率的提高,在四种功率分配方法下系统性能都在提升,且 SPC、NEPA 的性能与 PBPC 的性能越来越接近,而 EPA 提升速度较慢,与 PBPC 的差距越来越大。这是因为 EPA 不是面向和数据率最大进行优化的[1]。

### 4.3 异构网中 CoMP-JP 与不协作性能的比较

图 14 ~ 图 15 是在采用 PBPC 条件下异构网中宏用户和微用户进行 CoMP-JP 传输和完全不 CoMP 时的性能,其中  $PC_R = 30$  dBm、 $N_{ir} = 2$ ,载波数  $L = 16$ ,宏基站在整个频段上调度 4 个宏用户,微基站在整个频段上只调度一个微用户。宏基站和微基站的距离分别为 100m、200m。

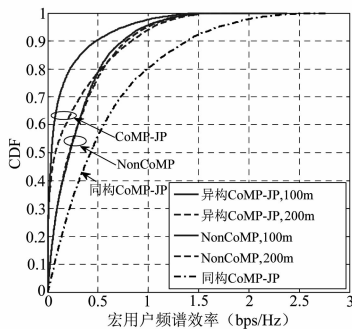


图 14 PBPC 约束下宏用户的性能比较

Fig. 14 Performance Comparison of Macro Users with PBPC

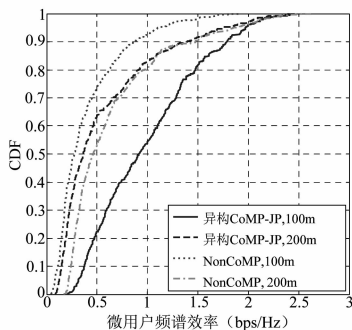


图 15 PBPC 约束下微用户的性能比较

Fig. 15 Performance Comparison of Micro Users with PBPC

从仿真结果可见,在异构网中采用 CoMP-JP 传输时,宏用户的性能甚至不如不 CoMP 时的性能,尤其是边缘用户的性能下降很多。这是因为异构网中两个基站最大发射功率的差异,使得高功率宏基站的功率不能完全发射出来。微用户在采用 CoMP-JP 传输后,性能比不 CoMP 时都有所提升,但是随着宏基站和微基站的距离加大,这种提升越来越小。例如当这个两个基站相距 200m 时,微用户在 CoMP-JP 和不 CoMP 时的性能基本相同。

以上分析结果表明,在异构网中采用[11-13]的低复杂度策略进行 CoMP-JP 传输虽然会提升微用户的性能,但是却会以宏用户性能的急剧下降为代价。尤其是在宏基站和微基站相距较远时,CoMP-JP 给微用户带来的性能增益并不明显,而宏用户的性能与不 CoMP 相比却大为下降。这意味着在异构网 CoMP-JP 系统中,考虑到不同基站最大发射功率的不同,我们不能再简单地采用在 SPC 条件下最优的 ZF-BF、而后通过在 PBPC 条件下优化设计功率分配来得到近最优的性能,而应该在 PBPC 条件下对波束形成和功率分配进行联合优化。

## 5 总结

本文分析了异构网中相干协作多点传输在采用 ZF 波束形成和在不同功率约束下优化得到的功率分配时的性能,并与同构网中相干协作多点传输的相应结果进行了比较。分析结果表明,在同构网中进行协作传输时,归一化等功率分配与单基站功率约束条件下的结果相差不大;而当载波数较多、且载波上服务的用户数也多时,采用 ZF 波束形成和在和功率约束及单基站功率约束下使用和功率最大的功率分配时协作传输的性能与等功率分配的性能差异很小,无论是否对各用户的波束形成向量进行能量归一化。然而,在异构网中进行协作传输时,采用单基站功率约束优化功率分配的性能远远优于其他功率分配的性能。不过,当协作的宏基站与微基站最大功率差别较大时,微用户的性能可以大大提高,但是宏用户的性能在协作后反而会下降。这意味着在异构网中进行相干协作传输不能再简单地采用在和功率约束下最优的 ZF 波束形成与最优功率分配级联,也不能在多载波系统里只考虑和功率约束或单用户功率约束下的最优功率分配,不仅必须考虑单基站功率约束,而且需要对 ZF 波束形成和功率分配进行联合优化设计。

## 参考文献

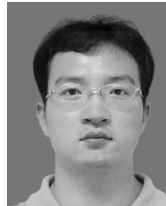
- [1] Karakayali. M. K, Foschini. G. J, Valenzuela. R. Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems[J]. IEEE Wireless Commun Mag, 2006, 13(4): 56-61.
- [2] Gesbert. D, Hanly. S, Huang. H, Shamai. S, Simeone. O, Yu. W. Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference[J]. IEEE J. Select. Areas Commun, 2010, 28(9): 1380-1408.
- [3] 3GPP TR36. 814 v. 9. 0. 0, Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)[S], 2010.
- [4] Zhang. H, Mehta. N. B, Molisch. A. F, Zhang. J, Dai. H. Asynchronous interference mitigation in cooperative base station systems[J]. IEEE Trans. Wireless Commun, 2008,

- 7(1): 155-165.
- [5] Zhang. R. Cooperative Multi-Cell Block Diagonalization with Per-Base-Station Power Constraints[J]. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 2010, 28(9): 1435-1445.
- [6] Huang. H, Trivellato. M, Hottinen. A, Shafi. M, Smith. P. J, Valenzuela. R. Increasing Downlink Cellular Throughput with Limited Network MIMO Coordination[J]. IEEE Trans. Wireless Commun, 2009, 8(6): 2983-2989.
- [7] Costa. M, Writing on dirty paper[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1983, 29(3): 439-441.
- [8] Taesang YOO, Goldsmith. A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming[J]. IEEE J. Select. Areas Commun, 2006, 24(3): 528-541.
- [9] Boccard. F, Huang. H. Zero-forcing precoding for the MIMO broadcast channel under per-antenna power constraints[C]. Proceedings of IEEE Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2006:1-5.
- [10] Wiesel. A, Eldar. Y, Shamai. S. Zero-forcing precoding and generalized inverses[J]. IEEE Trans. Sig. Process, 2008, 55(9): 4409-4418.
- [11] Boccardi. F, Huang. H. Optimum power allocation for the MIMO BC zero-forcing precoder with per-antenna power constraints[C]. In Proc. Conf. Inf. Sciences Systems (CISS), Cancun, Mexico, 2006.
- [12] Liu. W, Ng S. X, Hanzo. L. Multicell cooperation based SVD assisted multi-user MIMO transmission[C]. IEEE Veh. Technol Conf. (VTC), Barcelona, Spain, 2009: 1-5.
- [13] Zhang. J, Chen. R, Andrews. J, Ghosh. A, Heath. R. W. Networked MIMO with clustered linear precoding[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2009, 8(4): 1910-1921.
- [14] Somekh. O, Simeone. O, Bar-Ness. Y, Haimovich. A. M, Shamai. S. Cooperative Multicell Zero-Forcing Beamforming in Cellular Downlink Channels[J]. IEEE Trans Information Theory, 2009, 55(7): 3206-3219.
- [15] Chandrasekhar. V, Andrews. J. G, Gatherer. A. Femto-cell networks; a survey[J]. IEEE Commun. Mag, 2008, 46(9): 59-67.
- [16] 3GPP, RP-090536, New SI proposal: LTE heterogeneous network deployments [S]. Qualcomm, Nokia, NSN, 2009.
- [17] 3GPP, RP-105724, Views on eICIC Schemes for Rel-10 [S]. NTT DOCOMO, 2010.
- [18] Boyd. S, Vandenberghe. L. Convex Optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004, 257-263.
- [19] Kobayashi. M, Debbah. M, Belfiore. J. -C, Outage efficient strategies for network MIMO with partial CSIT[C]. ISIT 2009, Novo mesto, Slovenia, 2009:249-253.
- [20] 3GPP TSG RAN#50, RP-101425, Revised SID Proposal: Coordinated Multi-Point Operation for LTE[S]. Samsung, 2010.

#### 作者简介



凌 为(1986-),女,湖南娄底人,北京航空航天大学硕士,主要研究方向为异构网干扰协调,异构网协作传输等。  
E-mail: lingfengerqi@yahoo.com.cn



韩圣千(1981-),男,山东威海人,博士,北京航空航天大学博士后,主要研究方向为多天线系统、协作 MIMO、多用户调度与资源分配。  
E-mail: sqhan@ee.buaa.edu.cn



杨晨阳(1965-),女,浙江杭州人,博士,北京航空航天大学教授,博士生导师,主要研究方向为协作 MIMO、绿色通信、认知无线电、超宽带通信和无线传感网等。E-mail: cyyang@buaa.edu.cn