

异构网络跨层协作传输技术研究

张琛^{1,2}, 粟欣², 王文清³, 曾捷², 邝育军¹

(1. 电子科技大学 移动互联实验室, 四川 成都 611731;
2. 清华大学 信息技术研究院 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084;
3. 大唐移动通信设备有限公司, 北京 100083)

摘 要: 提出了一种分层协作框架, 在此框架下采用结合协作预编码的跨层协作传输技术以解决异构网络严重的层间干扰, 特别是小区范围扩展区域的干扰问题。所提出的协作传输策略基于 OFDMA 下行传输系统并支持宏基站和低功率基站在资源块级别的协作传输。仿真结果表明在使用小区范围扩展的异构网络中, 基于分层协作框架的协作传输技术在系统吞吐量性能方面优于现有 eICIC 技术。

关键词: 异构网络; 协作传输; small cell; 协作预编码; 资源块分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)08-0198-08

Research of cross-tier cooperative transmission technology in heterogeneous network

ZHANG Chen^{1,2}, SU Xin², WANG Wen-qing³, ZENG Jie², KUANG Yu-jun¹

(1. Mobile Link Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. Research Institute of Information Technology, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Datang Mobile Communications Equipment Co.,LTD, Beijing 100083, China)

Abstract: A cross-tier cooperative transmission strategy with cooperative precoding is used to reduce the intercell interference in heterogeneous network, especially the interference in cell range expansion areas. The proposed cooperative strategy supports the cooperative transmission of Macro BS and low power BS at resource block level based on LTE-Advanced downlink transmission system. Simulation results indicate that the cooperative strategy based on hierarchical cooperative framework provides more satisfactory system throughput gains compared with non-cooperative scheme and the existing eICIC technology under cell range expansion.

Key words: heterogeneous network; cooperative transmission; small cell; cooperative precoding; resource block allocation

1 引言

为满足日益增长的数据业务需求, 3GPP LTE-Advanced 引入异构网络 (HetNet, heterogeneous network) 以实现较高的频谱效率^[1]。HetNet 系统由传统宏 (Macro) 基站和不同特性的低功率基站 (如

微 (Micro) 基站、毫微 (Pico) 基站、家庭 (Femto) 基站和远程射频节点 (RRH, remote radio head)) 共同构成。通过引入低功率基站, 异构网络能够获得更大的小区分裂增益, 进而提高整个网络的容量。在本文中主要讨论的低功率基站是 Pico 基站。与 Macro 基站不同的是, Pico 基站具有更小的发射功

收稿日期: 2013-11-27; 修回日期: 2014-04-09

基金项目: 国家科技重大专项课题基金资助项目 (2013ZX03003-003); 北京自然科学基金重点基金资助项目 (4110001); 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 基金资助项目 (2012AA011402, 2014AA01A706); 中瑞合作基金资助项目 (2012DFG12010); 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 基金资助项目 (2013CB329002)

Foundation Items: The National S&T Major Project (2013ZX03003-003); Beijing Natural Science Foundation Funded Project (4110001); The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA011402, 2014AA01A706); Sino-Swedish Strategic Cooperative Programme (2012DFG12010); The National Basic Research Program of China(973 Program) (2013CB329002)

率和覆盖范围，并且可以部署于室内外热点区域提供增强覆盖。因此在异构网络中，Macro 基站的部署用于确保基本网络的覆盖，而低功率基站则用于增强热点地区的容量。

然而异构网络的部署也带来了一些技术挑战。在传统的宏蜂窝网络中加入低功率基站会导致上行和下行覆盖不平衡。在传统的用户接入机制中，每个用户是根据最大接收功率接入网络，即用户根据接收附近基站的导频信号强度来选择最佳的基站接入。因此，低功率基站由于其较低的发射功率导致接入负载较少。同时，在部署异构网络的时候考虑 Macro 基站与低功率基站的同频部署以提高频谱资源的利用率，然而同频部署将为异构网络带来严重的层间干扰问题。

为了提高异构网络中低功率基站的资源利用率，文献[2]采用了小区范围扩展（CRE, cell range expansion）的方法，即通过对低功率基站的导频信号加入偏置值迫使用户接入低功率基站。然而，这种方法使位于低功率基站 CRE 区域内的用户收到附近 Macro 基站严重的下行干扰。为了解决这个问题，文献[3]采用了增强小区间干扰协调（eICIC, enhanced intercell interference coordination）技术来减小异构网络层级干扰。但是此方法只考虑了时域的干扰协调且无法完全消除数据传输阶段的干扰。针对异构网络层间干扰问题，文献[4]提出了一种异构协作中继网络中协作传输情况下的资源分配方法。然而，此方法主要关注的是带内协作中继的反馈资源和接入资源的分配问题。

在 LTE-Advanced 下行传输系统中，新的物理层设计使系统可以实现灵活的时域和频域资源分区。正交频分多址（OFDMA, orthogonal frequency division multiple access）动态资源分配在文献[5, 6]中都有一定的研究，但是其忽视了基站间的协作并且资源分配的场景设定为同构网络。以往同构网络中多用协同多点传输（CoMP, coordinated multi-point）技术^[7]来实现基站间的协作传输。但是其核心思路是协作多个相邻基站同时为小区边缘用户提供服务以有效降低小区间干扰，并不能完全解决异构网络中的具体问题。因此，结合上述的协作传输和资源分配的相关研究，本文提出了一种分层协作框架来实现资源块（RB, resource block）级别的协作传输以减少 CRE 区域内的跨层干扰。在此框架内结合协作预编码和资源分配来完成异构

网络协作传输。

本文主要研究的是 Macro-pico 部署场景，考虑在 Macro 和 Pico 基站之间采用 RB 级别的协作传输技术以减少严重的层间干扰。通过系统级仿真验证此协作传输在系统吞吐量性能上优于现有的 eICIC 技术。

2 系统模型

根据 3GPP TR 36.814 协议^[8]中关于异构网络部署的详细描述，本文中考虑 Macro 和 Pico 共存的异构网络下行传输系统。可以把 Pico 基站看作是常规基站，与传统的 Macro 基站的区别在于 Pico 基站具有更低的发射功率。一般情况下，Pico 基站会配置全向天线，并且根据需要在室内或室外进行部署。

对于异构网络，节点和用户的分布有新的要求，具体部署可参考 TR 36.814 协议。一个简单的异构协作传输系统模型如图 1 所示。每个小区分为 3 个扇区，每个扇区部署 N_p 个 Pico 基站，其中，根据传统的小区部署策略 Pico 基站将位于热点的中心提供热点覆盖。

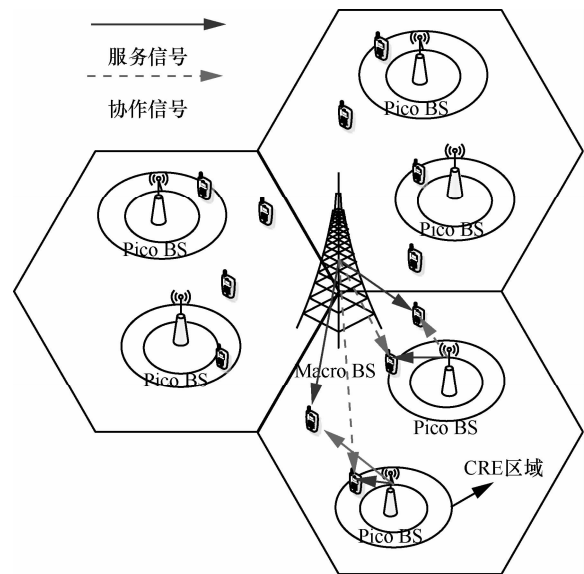


图 1 系统模型

OFDMA 是 3GPP LTE-Advanced 的下行链路主流多址方案。因此本文考虑基于 OFDMA 的下行链路传输系统，在此系统中，无线资源可以分为频域和时域资源。其中，频域资源可分为多个传输信道，时域资源可分为多个时隙。基于频域和时域的划分，无线资源被分为 N 个 RB。每个用户可以占用

多个 RB 进行下行数据传输。本文中的协作传输研究基于以下几点假设：

- 1) 在一个小区内,每个 RB 只能分配给一个用户;
- 2) 协作基站可以占用相同的带宽来实现在某一特定 RB 上的协作传输;
- 3) 发送端和接收端可以及时地知道完整的信道状态信息,即假设反馈信道没有发生错误和延时。

本文将每个扇区作为一个协作簇,其中,每个协作簇中包含一个 Macro 基站和 N_p 个 Pico 基站,假设协作基站间有良好的信息交互能力,共有 N_u 个用户分布在基站覆盖的区域中。根据所提出的协作传输机制,用户共分为 3 类。前 2 类用户只由 Macro 基站或 Pico 基站提供服务,表示为 M_UE 或 P_UE ; 第 3 类用户由 Macro 基站和 Pico 基站同时提供服务,表示为 C_UE 。前 2 种为非协作用户,而最后一种为协作用户。上述 3 种用户在第 i 个协作簇中的个数分别是 K_i^m 、 $K_{i,b}^p$ 和 $K_{i,b}^c$ ($b=1, \dots, N_p$)。用指数 $y_{k,i,0,n}^m$ 来表示第 i 个协作簇中的 Macro 基站的 RB 分配情况。当 RB_n 分配给连接在 Macro 基站上的 M_UE_k 时, $y_{k,i,0,n}^m$ 为 1, 否则为 0。当 RB_n 分配给连接在 Pico 基站上的 P_UE_k 时, $y_{k,i,b,n}^p$ 为 1, 否则为 0。同样地,对于由 Macro 基站和 Pico 基站共同服务的 C_UE_k , 由 $y_{k,i,b,n}^c$ 来表示协作 RB 分配情况。

在协作传输中,为减少共信道干扰,用户所需要的数据是由多个传输节点所共享并在这些节点上进行联合处理。因此,协作传输需要依靠在传输节点处使用协作预编码技术对发送数据进行处理。为了提高系统吞吐量,本文采用迫零脏纸预编码(ZFDP, zero-forcing dirty paper coding)技术^[9]。ZFDP 是一种相干传输预编码策略,能够使多个 C_UE 在同一个资源块上接受协作簇中多个协作基站的服务以减少层间干扰。本文中所用的下行链路协作传输系统如图 2 所示。

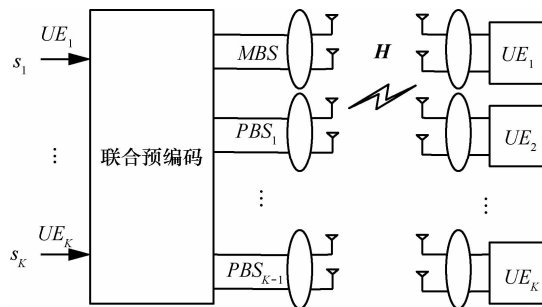


图 2 异构网络协作传输系统模型

首先,在发送节点和接收节点之间建立一个 $K \times K$ 信道矩阵 H , 为

$$H = \begin{pmatrix} h_{M,1} & h_{P_1,1} & \dots & h_{P_{K-1},1} \\ h_{M,2} & h_{P_1,2} & \dots & h_{P_{K-1},2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M,K} & h_{P_1,K} & \dots & h_{P_{K-1},K} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $h_{k,i,b,n}$ ($b=0, \dots, K-1$) 包含大尺度衰落和快衰落(建模为零均值、单位方差的瑞利分布随机变量)。在第 i 协作簇中参与协作传输的 Pico 基站集合可以表示为 P_i 。ZFDP 假设的线性预编码矩阵 W 可以通过信道 H 的 LQ 分解得到,表示为

$$W = Q^H \quad (2)$$

其中, $H = LQ$, $L \in C^{K \times K}$ 是一个下三角矩阵, $Q \in C^{K \times K}$ 是一个酉矩阵。因此,在第 i 个协作簇中的 C_UE 接收的信号可以表示为

$$y = H W s + n = L Q Q^H s + n$$

$$= \begin{pmatrix} L_{1,0}^c & 0 & \dots & 0 \\ L_{2,0}^c & L_{2,1}^c & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{K,0}^c & L_{K,1}^c & \dots & L_{K,K-1}^c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \dots \\ n_K \end{pmatrix} \quad (3)$$

用 $r_{k,b}^c$ ($b=0, \dots, K-1$) 表示发送节点和接收节点之间的等效信道矩阵。在通过线性预滤波处理后,采用脏纸预编码可以使第 k 个用户不再受到前面 $k-1$ 个用户的干扰。因此, $r_{k,b}^c$ ($b=0, \dots, K-1$) 可以由 $r_{k,b}^c = |L_{i,b}^c|^2 P_b$ 得到^[9]。综上可得,在第 i 协作簇的 RB_n 上的 M_UE_k / P_UE_k 接收信干噪比(SINR, signal to interference and noise ratio)可以表示为

$$SINR_{k,i,0,n}^{M-UE} = \frac{P_M |h_{k,i,0,n}|^2}{\sum_{i'=1, i' \neq i}^{N_s} P_M |h_{k,i',0,n}|^2 + \sum_{i'=1}^{N_s} \sum_{b'=1}^{N_p} P_P |h_{k,i',b',n}|^2 + \sigma^2} \quad (4)$$

$$SINR_{k,i,b,n}^{P-UE} = \frac{P_P |h_{k,i,b,n}|^2}{\sum_{i'=1}^{N_s} P_M |h_{k,i',0,n}|^2 + \sum_{i'=1}^{N_s} \sum_{b'=1, (i',b') \neq (i,b)}^{N_p} P_P |h_{k,i',b',n}|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

作为协作用户,在 RB_n 上 C_UE_k 从包括 Macro 基站和 Pico 协作集的多个基站处接收信号,其 SINR 可以表示为

$$SINR_{k,i,b,n}^{C-UE} = \frac{r_{k,b}^c}{\sum_{i'=1, i' \neq i}^{N_s} P_M |h_{k,i',0,n}|^2 + \sum_{\substack{i'=1 \\ b'=1 \\ (i', b' \in P)}}^{N_s, N_P} P_P |h_{k,i',b',n}|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

这样，在第 i 协作簇的 RB_n 上 $M-UE_k$ 的吞吐量可以根据 SINR 到吞吐量的映射关系得到^[10]。

$$T_{k,i,0,n}^m = f(SINR_{k,i,0,n}^{M-UE}) \quad (7)$$

相似地， $T_{k,i,b,n}^P$ 和 $T_{k,i,b,n}^C$ 也可以由相应的映射关系得到。因此，在 RB_n 上的系统吞吐量可以表示为

$$T_n = \sum_{k=1}^{K_P^m} T_{k,i,0,n}^m \nu_{k,i,0,n}^m + \sum_{b=1}^{N_P} \left(\sum_{k=1}^{K_{i,b}^P} T_{k,i,b,n}^P \nu_{k,i,b,n}^P + \sum_{k=1}^{K_{i,b}^C} T_{k,i,b,n}^C \nu_{k,i,b,n}^C \right) \quad (8)$$

系统总吞吐量为

$$T_{total} = \sum_{n=1}^N T_n \quad (9)$$

下节将提出异构网络分层协作通信框架，并根据此框架用一种复杂度低的协作资源块分配算法来实现资源块级别的异构网络协作传输以减少层间干扰。

3 分层协作传输框架

图 3 所示为异构网络分层协作传输框架。协作

传输是在协作簇内的协作基站间实现的。在协作簇内，如果一个用户被选为协作用户，则该用户可以接入多个基站并由多个基站协作对其服务。其中，协作用户的选择是协作机制的一个重要方面。

系统中所有的无线资源被分成了 N 个 RB，协作传输实现的前提条件是多个基站可以占用相同的 RB。在协作簇中，协作基站所占用的资源块被分成协作资源块和非协作资源块。为了更好地说明此协作传输框架，在图 3 中，假设在由一个 Macro 基站和 2 个 Pico 基站组成的协作传输系统中，共有 12 个资源块集 (RBG, resource block group)，12 个用户分布在协作区域内。系统的初始阶段，用户根据接收的参考接收信号功率 (RSRP, reference signal received power) 值来决定其接入基站。

$$BS_{serving}(b) = \arg \max_{\{k\}} \{SINR_{k,b} + Bias\} \quad (10)$$

考虑到异构网络负载均衡，在选择服务基站时，设定 Pico 的 CRE 偏置值 $Bias$ (可选为 3/6/9 dB)，而对 Macro 来说，偏置值选为 0 dB。每个用户从附近的基站监听导频信号，并反馈信道状态信息给基站。基站同时将信息转发给协作簇内的调度器。调度器根据协作用户选择机制在协作簇中选出协作用户，并判断是否可以协作。

在判断协作传输是否可以进行之后，系统的资源被重新分配。例如，在图 3 中，在协作后深色的

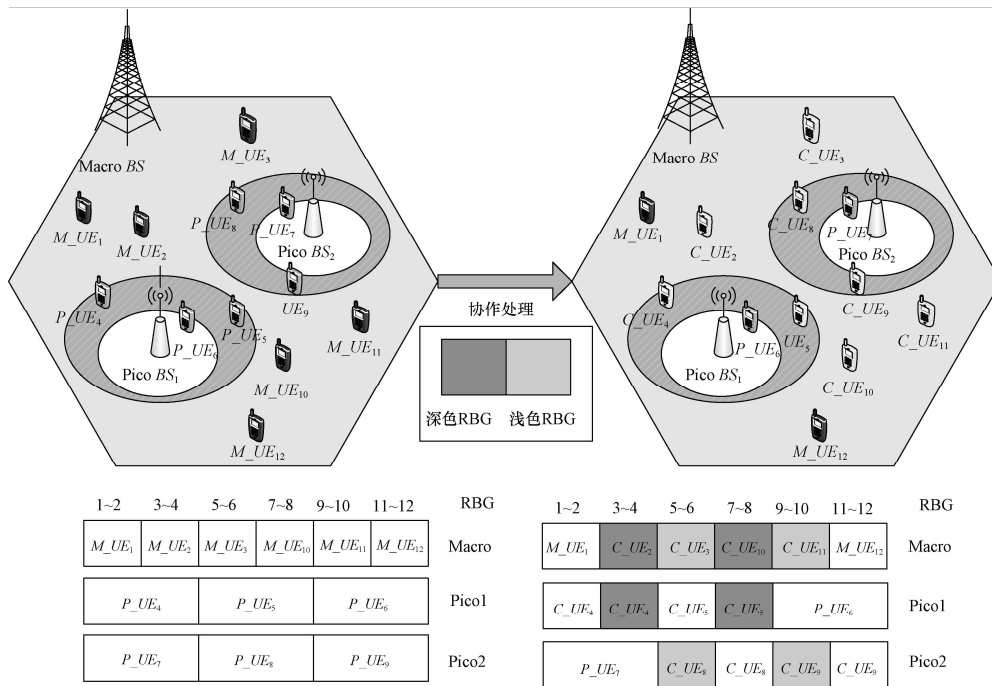


图 3 分层协作框架

RBG 表示 Macro 和 Pico BS_1 的协作资源块。同样地, 浅色的 RBG 表示 Macro 和 Pico BS_2 的协作资源块。而其他的资源块是非协作资源块, 用于各基站的非协作用户。例如, 作为 Pico BS_1 上的协作用户, C_{UE_4} 可以使用第 3、第 4 个 RBG 作为协作资源块, 在此 RBG 上由 Macro 和 Pico BS_1 协作对其服务。然而, 在协作前, Macro 基站上的第 3、第 4 个 RBG 是分配给 M_{UE_2} 的。在 C_{UE_4} 占用的其他资源块上, 仍然是 Pico BS_1 对其服务。

在异构网络中, 可以利用 CRE 解决 Macro 基站和低功率基站覆盖不均衡的问题。然而, 在 CRE 区域内的用户将处于 Macro 基站的强烈下行干扰中, 这会导致系统吞吐量的降低。上述的协作传输框架通过选择 CRE 区域内的用户作为协作用户参与协作传输来提高整个系统的吞吐量。

4 基于协作传输架构的资源块分配算法

4.1 协作传输过程

在 Macro 基站和 Pico 基站同频部署的异构网络中, 根据上述的协作传输机制在 Pico 基站的 CRE 区域内选择协作用户。调度器将通知相应的协作基站协作调度信息。协作基站根据协作调度信息在相应的协作资源块上共同为协作用户服务。为了实现上述的分层协作传输框架, 本文提出了一种协作资源块分配策略, 在此策略中, 在 Macro 基站和 Pico 基站上共同实现无线资源控制, 具体步骤如图 4 所示。

4.2 协作用户的选择算法

在实现协作资源块分配之前首先要在协作簇内的所有用户中挑选出协作用户。考虑到 Pico 基站的 CRE 区域内的用户受到 Macro 基站严重的下行干扰, 优先选择 Pico 基站 CRE 内的用户作为协作用户以减少层间干扰。 C_{UE} 选择过程可以分为以下 2 步。

步骤 1 选择 CRE 内的用户作为 C_{UE_1} , 其选择准则如下。

$$U_{i,b,n}^{C-UE} = \{k \in U_{i,b,n}^{CRE} \mid SINR_{k,i,b,n}^{CRE} < T\} \quad (11)$$

在这里, $U_{i,b,n}^{C-UE}$ 是位于在第 i 协作簇中 Pico 基站的 CRE 区域内的用户, T 是选择 C_{UE} 的 SINR 门限。此门限的值是由在 CRE 内频谱效率较差的用户比例和 Macro 基站和 Pico 基站发射功率的差值

共同决定的。

步骤 2 为了提高在协作传输中的多用户分集性能, 需要为 C_{UE_1} 选择合适的配对用户, 这些配对用户可以标记为 C_{UE_2} 。为了提高系统吞吐量, 可选择基于信道质量的用户配对方法来选择 C_{UE_2} 。

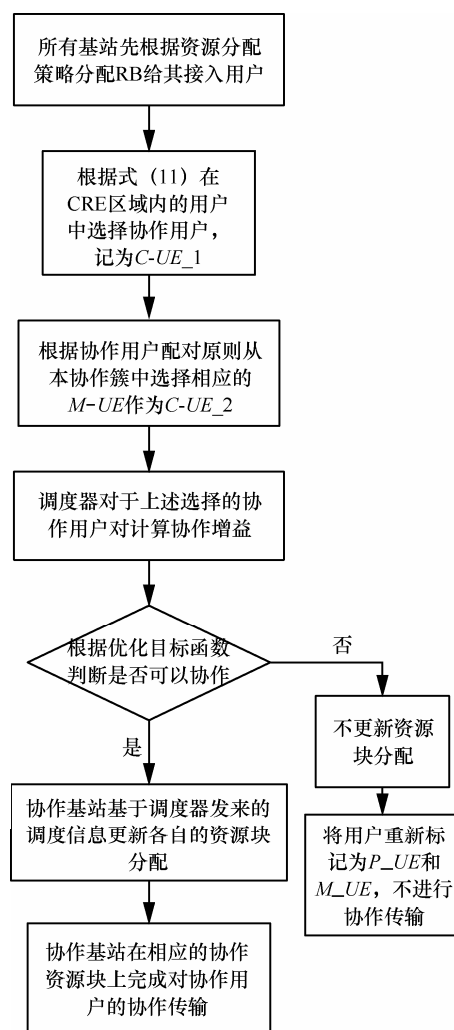


图 4 一个协作簇内的协作传输过程

首先, 对于协作簇中的 C_{UE_1} 的每个协作资源块, 在相同的协作簇的所有 M_{UE} 中, 以轮询的方式选择出 C_{UE_2} 。然后, 根据所选择的预编码方法计算出其与该 C_{UE_1} 在第 RB_n 上的预编码向量并且可以得到基于此种协作用户配对的用户吞吐量。最后, 选择能够带来最大吞吐量增益的 M_{UE} 作为该 C_{UE_1} 在此 RB 上的配对用户。

4.3 协作资源块的分配算法

根据以上协作用户选择的结果, 改变系统中的

资源块分配方式，具体步骤如下。

将此协作用户所使用的资源块标号记下来。

Macro 根据此信息重新分配资源块给接入其上的用户。**Macro** 对接入其上的用户根据资源分配策略分配资源块。**Pico** 上的协作用户的资源块被分为 2 个部分，一部分是协作资源块，另一部分是非协作资源块。在非协作资源块上仍然只有 **Pico** 单独为其服务。

为了更好地衡量系统的性能，本文引入了联合性能度量(CPM, combined performance measurement)作为优化目标函数。其形式为

$$CPM = (1 - \gamma)SE_{\text{avg}} + \gamma SE_{\text{edge}} \quad (12)$$

其中， γ 是折中系数， $0 < \gamma < 1$ 。 SE_{avg} 是平均用户吞吐量， SE_{edge} 是边缘用户吞吐量。如果进行协作传输能使系统的 CPM 增加，则此协作可以被接受，否则，协作将不被接受。本文中的优化目标是均衡考虑平均用户吞吐量和边缘用户吞吐量，因此 γ 的取值可设为 0.5。

5 仿真结果与分析

5.1 仿真参数设置

下面将基于协作框架的资源块分配算法在 19 小区 3 扇区的系统仿真平台上实现。仿真参数的设置遵循 3GPP 技术报告中的 Case1 场景^[8]。每个扇区中配备了 120°定向天线，而 **Pico** 和用户的接收/发射天线是全向天线。在每个扇区中有 10 个随机分布的 **Pico** 基站进行热点部署。同时考虑 OFDMA 下行传输链路，系统带宽是 10 MHz，每个扇区共有 30 个用户。详细的仿真参数设置如表 1 所示。

5.2 仿真结果

在系统级仿真平台中比较 4 种异构网络场景下的系统性能。4 种场景设置如下。

1) 没有 CRE，用户基于最佳 RSRP 接入基站并得到服务。

2) 采用 CRE，即在 **Pico** 基站的导频功率上加入 9 dB 的偏置值，使更多用户接入 **Pico** 基站以提高 **Pico** 基站上资源的利用率。

3) 在 CRE 的基础上，采用 eICIC 技术来减少层间干扰。

4) 采用协作传输技术来提高 CRE 区域内用户的吞吐量性能。

表 1 系统参数设置

设置参数	参数值
异构部署场景	3GPP, Pico/Hot zone, configuration 1, model 1
系统拓扑	19 eNB, 3 cell/site
每个扇区的 Pico 数目	10
ISD (站间距)	500 m
热点地区半径	40 m
热点用户比例 p^{hotspot}	2/3
载波频率	2 GHz
系统带宽	10 MHz, downlink
资源块数目	50
每个扇区的用户数	30
宏基站发射功率	46 dBm
Pico 发射功率	30 dBm
路损模型	Macro: $-(128.1 + 37.6 \log(d_{k,l}^m))$ Pico: $-(140.7 + 36.7 \log(d_{k,l}^p))$
阴影衰落相关距离	50 m
传播损耗	20 dB
天线增益	Macro: 14 dBi Pico: 5 dBi
阴影衰落标准偏差	8 dB
噪声密度	-174 dBm/Hz

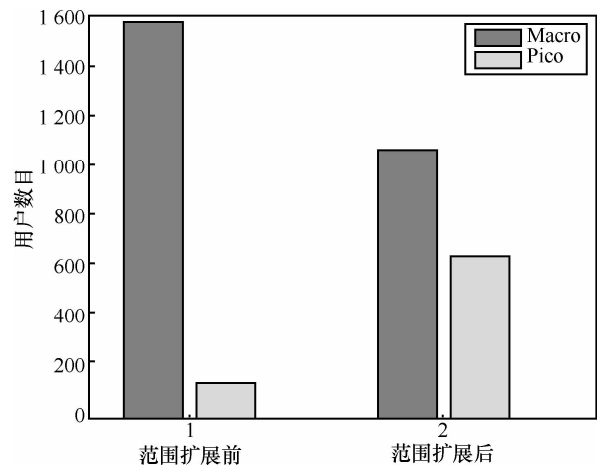


图 5 范围扩展前后的接入 Macro 和 Pico 基站的用户数目比较

从图 5 可以得知，通过 CRE，接入 **Pico** 基站的用户数增加到 37.5%。而在此之前，接入 **Pico** 基站的用户数仅占 7.8%。由此可以得到在异构网络中加入 CRE 可以使系统负载均衡，进一步提高 **Pico** 基站上资源的利用率。然而，仅采用 CRE 会使得该区域内的用户受到严重的层间干扰，进而引起系统性能的下降。在上述 4 种方法用户的吞吐量比较如图 6 所示。在 **Macro** 基站和 **Pico** 同频部署的异构网络中，CRE 带来了整体的系统吞吐量下降，其平均用户吞吐量下降了 9.8%。可以看到，采用 CRE

方法实现的负载均衡是以牺牲整体系统吞吐量性能的代价得到的。

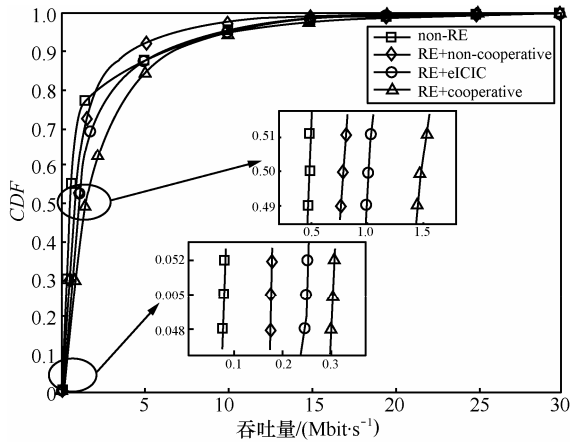
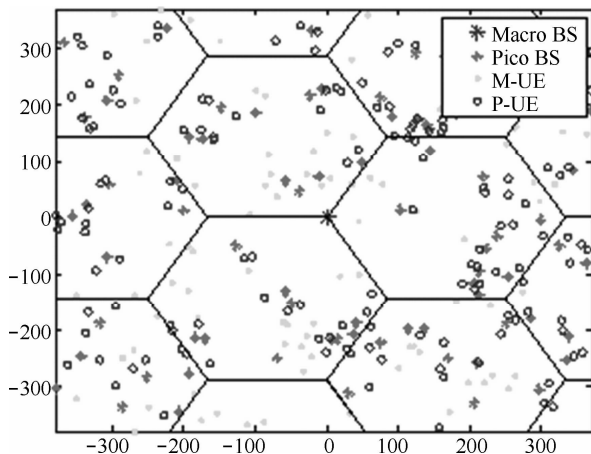


图 6 4 种仿真场景下用户下行吞吐量曲线

为了提高异构网络系统性能,选择那些在 CRE 区域内且受到 Macro 基站强烈干扰的用户作为协作用户。共有 491 个用户被选为协作用户,协作用户的分布情况如图 7(b)所示。通过协作机制,原本的干扰信号变成了有用信号,这样可以带来较大的协作增益。

为了更好地评估所提出的协作传输策略,在仿真时将所提的协作传输方法与现有的 eICIC 技术进行比较。

在 eICIC 技术中,通过设置几乎空白子帧(ABS, almost blank subframe),即 Pico 基站可以在 ABS 的时隙中服务 CRE 用户,而 Macro 基站在此期间则不进行用户数据的传输。仿真中采用的 eICIC 技术的 ABS 和有效的下行子帧配置比例是 1/6。



(a) 协作前用户分布

从表 2 可以看到,在 eICIC 技术和协作传输方式下用户平均吞吐量分别提高了 38.8%和 65.7%。采用协作传输方法能有效改善 5%边缘用户吞吐量性能,边缘用户吞吐量分别提升了 47%和 73%。

表 2 4 种场景下的系统吞吐量对比

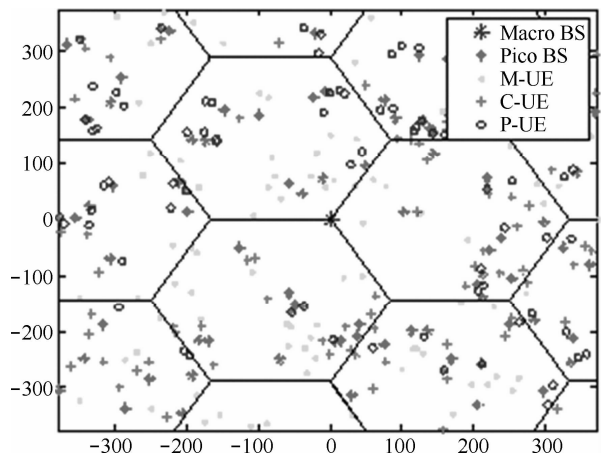
仿真场景	系统吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)	50%用户吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)	5%用户吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)
non-RE	3 381.8	0.575 1	0.087 6
RE+non-cooperation	2 881.2	0.785 3	0.175 7
RE+eICIC	3 999.5	1.021 5	0.258 3
RE+cooperation	4 776.0	1.494 8	0.304 8

6 结束语

在异构网络中,如何能使不同特性的基站有效地进行协作是需要解决的问题。在这里提出了一种异构网络分层协作架构来支持 Macro 基站和 Pico 基站之间的协作传输。在此协作架构中,提出了资源块级别的协作传输技术来解决异构网络中严重的层间干扰问题,并且可以改善异构网络的系统吞吐量性能。通过系统级仿真,可以看到所提出的协作传输策略在系统吞吐量性能方面优于现有的 eICIC 技术。

参考文献:

- [1] KHANDEKAR A, BHUSHAN N, TINGFANG J, *et al.* LTE-advanced: heterogeneous networks[A]. European Wireless Conference (EW)[C]. Lucca, Italy, 2010. 978-982.
- [2] DAMNJANOVIC A, MONTOJO J, WEI Y B, *et al.* A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. Wireless Communications, IEEE, 2011, 18(3):10-21.



(b) 协作后用户分布

图 7 协作前后用户分布示意

- [3] SORET B, WANG H, PEDERSEN K I, *et al.* Multicell cooperative for LTE-advanced heterogeneous network scenarios[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 20(1): 27-34.
- [4] LI Q, HU R Q, QING Y, *et al.* Intracell cooperation and resource allocation in a heterogeneous network with relays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(4): 1770-1784.
- [5] KOUTSIMANIS C, FODOR G. A dynamic resource allocation scheme for guaranteed bit rate services in OFDMA networks[A]. IEEE International Conference on (ICC'08)[C]. Beijing, China, 2008. 2524-2530.
- [6] LI G Q, LIU H. Downlink radio resource allocation for multi-cell OFDMA system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications 2006, 5(12): 3451-3459.
- [7] HAN S Q, YANG C Y, WANG G, *et al.* Coordinated multi-point transmission with non-ideal channel reciprocity[A]. IEEE 2012 Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C]. Shanghai, China, 2012. 952-957.
- [8] 3GPP TR36.814. Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects v.9.0.0[S]. 2010.
- [9] KARAKAYALI M K, FOSCHINI G J, VALENZUELA R, *et al.* On the maximum common rate achievable in a coordinated network[A]. IEEE International Conference on (ICC'06)[C]. Istanbul, Turkey, 2006. 4333 - 4338.
- [10] 3GPP TR36.942. Radio Frequency (RF) System Scenarios v.11.0.0[S]. 2012.

作者简介:



张琛 (1989-), 女, 安徽宿州人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为异构网络协作通信。



粟欣 (1962-), 男, 重庆人, 清华大学教授, 主要研究方向为宽带无线接入、自组织网络、软件无线电、协作通信。



王文清 (1972-), 男, 河北唐山人, 大唐移动通信设备有限公司政府事务部总经理, 主要研究方向为移动通信。



曾捷 (1985-), 男, 湖北仙桃人, 清华大学助研, 主要研究方向为宽带无线接入、软件无线电、4G/5G 技术与标准化。



邝育军 (1971-), 男, 四川广汉人, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线信息传输技术、虚拟 MIMO、无线 Mesh 网络、移动互联网理论及技术。