

# 基于迭代联合传输的超密集网络动态干扰协调方案

李晓娜<sup>1,2</sup>, 王中方<sup>1,2</sup>, 程谦<sup>1,2</sup>, 付婧雯<sup>1,2</sup>, 张顺亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院信息工程研究所, 北京 100093; 2. 中国科学院大学网络空间安全学院, 北京 100049)

**摘要:** 鉴于超密集网络中急剧增长的小区 and 用户数量, 研究了如何通过合理地选择联合传输用户来实现动态干扰协调, 以此提高小区边缘用户频谱效率。通过动态协作簇划分和动态联合静默传输 2 种手段, 将所有用户分类; 再利用迭代优化算法进一步提高系统性能, 同时解决了联合传输用户的数量选择问题。仿真结果表明, 与传统的协作多点方案相比, 所提方案在不损失小区平均频谱效率的前提下, 在小区边缘频谱效率方面存在显著的性能增益。

**关键词:** 5G; 超密集网络; 干扰协调; 动态协作簇划分; 动态联合静默传输

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**doi:**10.11959/j.issn.1000-436x.2020032

## Dynamic interference coordination scheme based on the iterative joint transmission in ultra dense network

LI Xiaona<sup>1,2</sup>, WANG Zhongfang<sup>1,2</sup>, CHENG Qian<sup>1,2</sup>, FU Jingwen<sup>1,2</sup>, ZHANG Shunliang<sup>1,2</sup>

1. Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2. School of Cyber Security, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** In consideration of the rapidly increasing number of cells and users in the ultra-dense network, how to realize dynamic interference coordination by selecting the appropriate joint transmission users was studied, so as to improve the spectral efficiency of the edge users. All users were classified by dynamic coordination cluster division and dynamic joint-muting transmission. The iterative optimization algorithm was used to further improve the system performance and solve the problem of selecting the number of joint transmission users. The simulation results prove that compared with the conventional CoMP JT scheme, the proposed scheme has significant performance gains in the cell edge spectral efficiency without reducing the cell average spectral efficiency.

**Key words:** 5G, ultra dense network, interference coordination, dynamic coordination cluster division, dynamic joint-muting transmission

### 1 引言

据估计, 2010—2020 年, 全球移动数据流量将增长 250 倍<sup>[1]</sup>。为了应对未来移动通信流量增长的需求, 5G 网络开始走上通信世界的舞台。与 LTE-A 系统相比, 5G 通过密集的小区部署可以提供更高的系统容量和更广的网络覆盖。在超密集网络 (UDN, ultra dense network) 中, 小小区的部署可

以缩短用户设备 (UE, user equipment) 与其服务小区的距离, 以此显著改善频谱效率和系统容量。但是, 小小区的部署形成了一种异构网络。在异构网络中, 由于存在微基站、微微基站以及家庭基站等多种站点, 而且相邻小区使用相同的频谱资源, 导致小区间干扰问题严重恶化。因此, 小区间干扰协调 (ICIC, inter-cell interference coordination) 方案需要适用于新的无线接入技术以及新的网络部署方式。

收稿日期: 2019-09-24; 修回日期: 2020-01-09

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFB0801900); 国家自然科学基金资助项目 (No.61501459)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFB0801900), The National Natural Science Foundation of China (No.61501459)

## 2 相关工作情况

在第三代合作伙伴计划 (3GPP, The Third Generation Partnership Project) 的版本 8 (R8, release 8) 阶段, 部分频率复用<sup>[2]</sup>和软频率复用<sup>[3]</sup>是最常见的 ICIC 技术。部分频率复用的提出主要是为了提升小区边缘吞吐量, 但是需要牺牲一定的频谱效率来实现。相比之下, 软频率复用可以在每个小区中使用所有的频谱资源, 因此不仅使小区平均吞吐量有所提升, 宏小区的边缘用户所受的干扰也有一定程度的下降。但是, 由于宏小区中心用户与微小区用户使用相同的子载波, 导致二者之间的干扰增加。为了进一步解决异构网络中的干扰问题, 3GPP R10 提出了增强的 ICIC 技术<sup>[4]</sup>。宏基站可以在某些子帧静默所有的下行物理资源, 不向宏用户传输数据信息, 以此减小对微基站下行传输的干扰, 该方案也称作几乎空白子帧 (ABS, almost blank subframe)。然而, 随着小区密度的急剧增加, 干扰情况变得更加复杂, 基于时域的增强 ICIC 方案无法满足新的传输要求。

针对未来的无线网络, 多种新颖的 ICIC 方案被提出, 这些方案在性能和损耗方面均有各自的优缺点。一种基于启发式负载均衡的动态切换算法被提出, 以解决 UE 分布不均匀的问题<sup>[5]</sup>。文献[6]给出了一种分布式资源分配方案, 有效减小了宏基站与微微基站之间的干扰。但是, 由于中心用户和边缘用户分配的资源是正交的, 使系统频谱效率明显下降。文献[7]基于超密集家庭基站网络提出了一种小区半聚类的方案, 通过将所有小区划分为干扰小区和被干扰小区的方式提高了系统性能。文献[8]将调度、干扰对齐以及功率控制进行联合研究, 提出了一种分布式的多域干扰管理方案。在文献[9]中, 动态小区选择、链路调度以及非正交多址接入 3 种不同的技术被用来实现干扰管理。虽然以上 ICIC 方案可以在部分方面提升系统性能, 但均没有考虑到协作多点 (CoMP, coordinated multi-point) 传输技术带来的性能增益。

事实上, CoMP 技术是一种对抗小区间干扰的有效方式, 一些文献也结合 CoMP 研究了干扰协调方案。文献[10]证明了宏分集 CoMP 在密集蜂窝网络中具有较好的性能增益, 但该方案仅考虑了宏基站的场景。文献[11]介绍了一种基于小区负载感知的 CoMP 方案, 平衡了微基站覆盖范围中的负载。

以上提到的研究成果均基于同构网络场景, 不符合 5G 系统中的 UDN 拓扑结构。相比之下, 文献[12]提出了一种基于自适应干扰感知的非相干 CoMP 方案, 以减少异构 UDN 中的跨层和同层干扰; 通过对用户进行分组以及每组用户分组概率的计算, 推导出覆盖范围概率。文献[13]在 UDN 中采用了两层频谱资源分配的 CoMP 传输方法, 将所有用户分为中心用户和边缘用户, 边缘用户的频谱资源由中心调度器分配。然而, 以上方案中均没有涉及联合传输 (JT, joint transmission) 技术对 UDN 性能的影响。

JT 是 CoMP 传输的一种方式, UE 同时接收来自多个协作传输节点的信号, 可以显著提高小区边缘吞吐量和系统吞吐量<sup>[14]</sup>。在 JT 技术中, 采用 JT 方案传输的 UE 数量是影响系统性能的一个重要因素。过量的 JT UE 会导致协作簇中能够调度的 UE 总数量严重下降, 从而导致小区平均频谱效率的下降; 相反, 如果 JT UE 数量不足, 则会导致部分边缘 UE 无法获得吞吐量的增益, 从而导致小区边缘频谱效率的下降。基于以上考虑, 本文针对 UDN 场景设计了一种基于 JT 的动态干扰协调方案。该方案的核心思想主要反映在 3 个方面: 动态协作簇划分、动态联合静默传输以及迭代优化算法。动态协作簇划分的主要目的是解决 JT UE 的数量和资源分配问题, JT UE 服务小区的选择主要考虑通信链路的信道质量和小区的负载均衡。动态联合静默传输的主要目的是进一步提高边缘 UE 的吞吐量, 基于 UE 反馈的信道质量指示 (CQI, channel quality indicator)<sup>[15]</sup>决定是否要静默相应的宏基站资源块 (RB, resource block)。通过迭代优化算法综合考虑小区边缘吞吐量和用户调度公平性, 进一步优化用户资源调度情况, 使系统性能达到最优。仿真结果表明, 与传统 CoMP JT 方案相比, 本文提出的方案可以显著提高小区边缘吞吐量。此外, 本文还给出了不同 JT UE 的选择比例对小区平均频谱效率和小区边缘频谱效率的影响。

## 3 UDN 场景模型

本文考虑如图 1 所示的两层异构 UDN 场景, 其中, 第一层为宏小区层, 第二层为小小区层。成簇的小小区均匀地分布在宏小区的地理区域内<sup>[16]</sup>, 宏小区层和小小区层的频率复用系数为 1。很多文献中都给出了改善 5G 网络回程链路性能的先进方法<sup>[17-18]</sup>, 例如联合优化接入链路和回程链路<sup>[19]</sup>, 因

此本文假设宏基站 (MBS, macro base station) 和小基站 (SBS, small base station) 之间是理想回程。

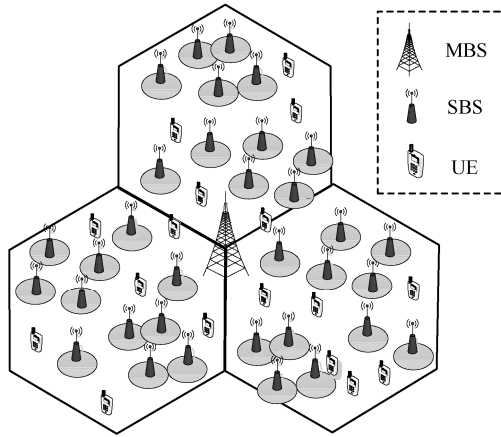


图 1 两层异构 UDN 场景

假设一个协作簇内有  $M$  个小区, 其中宏小区数量为  $N_M$ , 每个宏小区地理范围内的小小区数量为  $N_S$ ; MBS 和 SBS 的发射天线数量为  $N_t$ , UE 的接收天线数量为  $N_r$ 。  $\frac{1}{3}$  的 UE 均匀随机分布在宏小区的地理范围内,  $\frac{2}{3}$  的 UE 分布在成簇的小小区地理范围内<sup>[16]</sup>。

根据不同的传输方案, UE 被分为 3 个不同的种类, 即 non-JT UE、JT UE 和 JT-muting UE。图 2 给出了不同种类 UE 的数据传输模式。non-JT UE 只接收主服务小区传输的数据; JT UE 有 2 个或 2 个以上的小区为其服务, 接收多个小区在相同时频资源上发送的相同数据; JT-muting UE 是本文提出的特殊类型的 UE, 当 JT-muting UE 被调度时, 对其干扰最大的 MBS 的资源块需要保持静默, 以此减小跨层干扰。

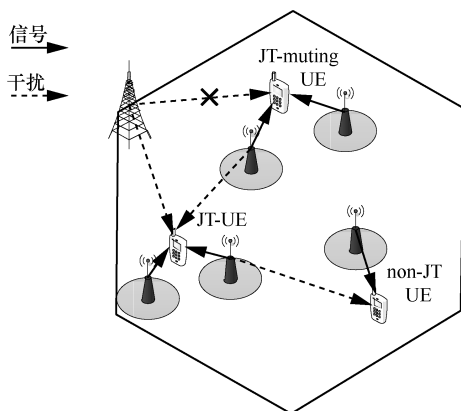


图 2 不同种类 UE 的数据传输模式

为了方便表示, 分别用  $S$  和  $I$  表示服务小区集合和干扰小区集合。因此, 对于  $UE_k$  而言, 其  $N_r \times 1$  维接收信号向量可以表示为

$$y_k = \sum_{s \in S} G_{s,k} H_{s,k} w_s x_s + \sum_{i \in I} G_{i,k} H_{i,k} w_i x_i + n_k \quad (1)$$

其中,  $G_{s,k}$  表示从  $UE_k$  到其服务小区的大尺度接收功率,  $H_{s,k}$  表示从  $UE_k$  到其服务小区的  $N_r \times N_t$  维快衰落信道矩阵,  $w_s$  表示  $N_t \times 1$  维服务小区的波束成形向量,  $x_s$  表示来自服务小区的传输数据。相应地,  $G_{i,k}$  表示从  $UE_k$  到其干扰小区的大尺度接收功率,  $H_{i,k}$  表示从  $UE_k$  到其干扰小区的  $N_r \times N_t$  维快衰落信道矩阵,  $w_i$  表示  $N_t \times 1$  维干扰小区的波束成形向量,  $x_i$  表示来自干扰小区的传输数据。此外,  $n_k$  表示方差是  $\sigma^2$  的  $N_r \times 1$  维加性高斯白噪声向量。

由此可计算得到  $UE_k$  的信干噪比 (SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio) 为

$$SINR_k = \frac{\sum_{s \in S} G_{s,k} \|H_{s,k} w_s\|^2}{\sum_{i \in I} G_{i,k} \|H_{i,k} w_i\|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

$UE_k$  可以根据 SINR 的不同, 自适应选择不同的调制编码方案 (MCS, modulation and coding scheme) <sup>[15]</sup>。由此可得  $UE_k$  的吞吐量  $T_k$  为

$$T_k = N_{RE,k} \text{Ef}_k (1 - BLER_k) \quad (3)$$

其中,  $N_{RE,k}$  表示为  $UE_k$  分配的资源粒子数量;  $\text{Ef}_k$  表示  $UE_k$  采用的 MCS 的效率;  $BLER_k$  表示  $UE_k$  的传输误块率, 由链路级仿真结果中的误块率 (BLER, block error rate)–信噪比 (SNR, signal-to-noise ratio) 曲线得到。

$UE_k$  能否被分配到时频资源, 需要依据比例公平 (PF, proportional fairness) 调度算法<sup>[20]</sup>。 $UE_k$  的比例公平系数可表示为

$$p_k = \frac{r_k}{T_k} \quad (4)$$

其中,  $r_k$  表示  $UE_k$  在当前传输时间间隔 (TTI, transmission time interval) 的瞬时吞吐量。因此, 当比例公平系数  $p_k$  足够大时, 才会给  $UE_k$  分配时频资源。

本文提出的方案综合考虑用户吞吐量和调度公平性 2 个因素, 使资源调度达到最优。

#### 4 基于迭代联合传输的动态干扰协调方案

在 UDN 场景下, 由于传输节点数量大大增加,

传统的干扰协调方案无法实现最优的资源调度，而 CoMP 技术如何有效地应用到 UDN 场景中也是一个重要问题。基于以上考虑，本文提出了一种基于迭代联合传输的动态干扰协调方案。该方案的实现分为 3 个步骤：动态协作簇划分、动态联合静默传输以及迭代优化算法。

#### 4.1 动态协作簇划分

假设 UDN 场景中的小区总数量为  $N_c$ ，UE 总数量为  $N_u$ ， $\alpha$  表示一个  $N_c \times N_u$  维的 UE 调度矩阵，其中  $\alpha_{i,k} \in \alpha$  表示 UE $_k$  被小区  $i$  的服务情况。若  $\alpha_{i,k}=1$ ，代表小区  $i$  是 UE $_k$  的服务小区；若  $\alpha_{i,k}=0$ ，代表小区  $i$  不是 UE $_k$  的服务小区。

首先，对每个 UE 的协作簇集合进行初始化，可以分为以下 3 个步骤。

- 1) 根据大尺度接收功率以及切换门限的大小选择每个 UE 的主服务小区。
- 2) 计算 UE 的 Geometry，判断该 UE 是否为 JT UE。Geometry 可以看作大尺度 SINR，表示为

$$\text{Geometry}_k = \frac{G_{0,k}}{\sum_{i \neq 0} G_{i,k}} \quad (5)$$

其中， $G_{0,k}$  表示从 UE $_k$  到其主服务小区的大尺度接收功率， $G_{i,k}$  表示从 UE $_k$  到其他小区的大尺度接收功率。如果满足  $\text{Geometry}_k < \beta_0$ ，则认为 UE $_k$  是 JT UE。

- 3) 选择 JT UE 的协作小区，需要满足的条件为

$$|G_{0,k} - G_{i,k}| < \beta_1, i = 1, \dots, N_{c,k} - 1 \quad (6)$$

其中， $N_{c,k}$  表示 UE $_k$  的服务小区数量， $\beta_0$  和  $\beta_1$  是门限值。

由此，可以得到 UE $_k$  的协作簇为  $S_k = \{c_0, c_1, \dots, c_{i_b}, \dots, c_{N_{c,k}-1}\}$ ，其中  $c_0$  表示 UE $_k$  的主服务小区， $c_i$  表示 UE $_k$  的协作小区。因此，整个 UDN 场景下的协作簇集合可以表示为  $S = \{S_0, S_1, \dots, S_k, \dots, S_{N_u-1}\}$ 。根据获得的协作簇集合  $S$ ，可以完成调度矩阵  $\alpha$  的初始化，即

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{0,0} & \cdots & \alpha_{i,0} & \cdots & \alpha_{N_c-1,0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{0,k} & \cdots & \alpha_{i,k} & \cdots & \alpha_{N_c-1,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{0,N_u-1} & \cdots & \alpha_{i,N_u-1} & \cdots & \alpha_{N_c-1,N_u-1} \end{bmatrix}$$

若  $c_i \in S_k$ ，则  $\alpha_{i,k}=1$ ；否则， $\alpha_{i,k}=0$ 。

协作簇初始化过程结束后，已经将全部 UE 划分为 non-JT UE 和 JT UE，但划分方式较粗糙，无法得到最优的 JT UE 数量。

下一步，将资源分配情况考虑进来，对用户调度矩阵  $\alpha$  进行优化。假设一个调度周期为一个无线帧，包括的子帧数为  $N_{\text{sub}}$ ，每个子帧中的物理资源块数量为  $N_{\text{rb}}$ 。为了确保每个小区在每个调度周期内可以最大程度地利用时频资源，在保证小区内每个 UE 均可以被调度的前提下，则可以增加 JT UE 的数量，提高资源利用率；反之，若初始化的 JT UE 过多，可能导致部分 UE 无法被调度，此时则应减少 JT UE 数量，确保 UE 调度的公平性。因此矩阵  $\alpha$  应满足

$$N_{i,u} \leq \sum_{k=0}^{N_u-1} \alpha_{i,k} \leq \frac{N_{\text{rb}} N_{\text{sub}}}{n_p} \quad (7)$$

其中， $n_p$  为 UE $_k$  被调度时分配的物理资源块数量， $N_{i,u}$  为小区  $i$  覆盖范围内的 UE 数量。

此外，为了避免因小区间信息共享引起的回程链路开销过大，本文方案限定一个 JT UE 的服务小区数量不大于 3，即

$$1 \leq \sum_{i=0}^{N_c-1} \alpha_{i,k} \leq 3 \quad (8)$$

综上所述，本方案要在式(7)和式(8)的约束条件下求解用户调度矩阵  $\alpha$ ，以确保系统容量达到最大。

令  $P_{i,k} = G_{i,k} \|\mathbf{H}_{i,k} \mathbf{w}_i\|^2$ ，则

$$\alpha = \arg \max \sum_k B_k \text{lb}(1 + \text{SINR}_k) =$$

$$\arg \max \sum_k B_k \text{lb} \left( 1 + \frac{\sum_i \alpha_{i,k} P_{i,k}}{\sum_i (1 - \alpha_{i,k}) P_{i,k} + \sigma^2} \right)$$

$$\text{s.t. } N_{i,u} \leq \sum_{k=0}^{N_u-1} \alpha_{i,k} \leq \frac{N_{\text{rb}} N_{\text{sub}}}{n_p}$$

$$1 \leq \sum_{i=0}^{N_c-1} \alpha_{i,k} \leq 3$$

$$\alpha_{i,k} \in \{0, 1\} \quad (9)$$

其中， $B_k$  表示 UE $_k$  的传输带宽。

由于式(9)的最优化问题是非凸的，求解全局最优解为 NP-hard 问题，因此本文通过分析  $\alpha_{i,k}$  的取值特征，简化上述问题并求取局部最优解。详细求解过程如下。

**简化情况 1** 假设 UDN 中的宏站点数量为  $N_{\text{macro}}$ ，考虑一种固定协作区域的特殊场景，即每个

宏站点的 3 个扇区内的小区可以相互协作，处于该宏站点覆盖下的用户，只能选择其中的小区进行服务。此时，UDN 的协作区域如图 3 所示。

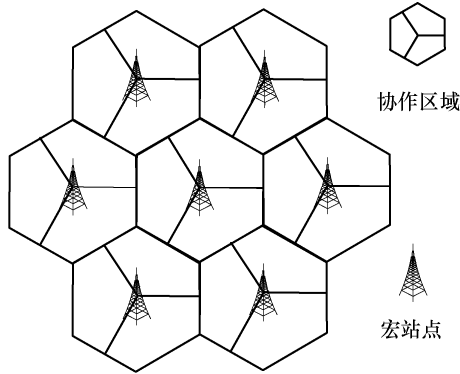


图 3 协作区域示意 (简化情况 1)

每个宏站点覆盖下的用户在选择协作小区时均应满足式(6)和式(9)给出的条件，并且限定为该宏站点覆盖下的小区。因此，当仅考虑该宏站点覆盖下的小区与用户之间的服务关系时，其可能存在的情况是有限的，可以归纳出所有可能的用户调度情况。计算每种用户调度情况下的系统容量，可确定该宏站点系统容量最大时的用户调度情况，记为  $\alpha_{1,1}$ 。以此类推，可以得到各个宏站点在其容量最大时的用户调度情况，表示为  $\alpha_1 = \{\alpha_{1,1}, \dots, \alpha_{1, N_{\text{macro}}}\}$ ，此时整个 UDN 的系统容量记为  $C_1$ 。

**简化情况 2** 在本文考虑的场景中，协作区域并不是固定不变的，简化情况 1 只能是所有协作场景的一种情况。由于用户在选择协作小区时受到式(6)的限制，导致其选择的服务小区只能在一定的地理范围内，距离过远的小区不会成为其服务小区，因此，UDN 的协作区域可看作在一定范围内动态变化。图 4 给出了位于中间的宏站点覆盖下的用户可能选择的协作小区的所在范围示意。

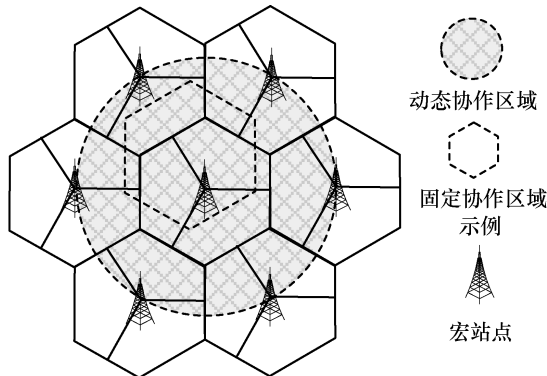


图 4 协作区域示意 (简化情况 2)

此时，该宏站点覆盖下的用户与协作区域内小区之间的服务关系有无限种情况，本文通过随机固定协作区域的方式，划分出  $F$  种可能的固定协作区域图样， $F \in [1, +\infty)$ 。对于每种固定协作区域图样下的 UDN，均可以按照简化情况 1 所述的方法得到其用户调度情况  $\{\alpha_2, \dots, \alpha_F\}$  以及相应的系统容量  $\{C_2, \dots, C_F\}$ 。

根据上述简化分析，可以得到  $F$  种用户调度矩阵以及相应的系统容量，通过比较可以得出系统容量最大时的用户调度矩阵，即为求得的局部最优解。当  $F$  取值越大时，求得的局部最优解越逼近全局最优解。

#### 4.2 动态联合静默传输

上述动态协作簇划分方案已将全部 UE 划分为 non-JT UE 和 JT UE，并优化了 JT UE 的服务小区集合。但对于少数信道质量极差的边缘用户，仅依靠联合传输方案不足以使其达到服务质量要求，此时采用动态联合静默传输方案进一步提高边缘用户吞吐量。

为了在提升边缘用户吞吐量的同时兼顾用户调度的公平性，动态联合静默传输方案提供 3 种可选的传输方式  $M_t, t \in \{1, 2, 3\}$ 。对于传输方式  $M_1$ ，需将对边缘用户产生干扰最大的小区对应的 RB 保持静默；对于传输方式  $M_2$ ，需将边缘用户当前分配的 RB 保持静默，另行分配其他 RB 进行数据传输；对于传输方式  $M_3$ ，不静默任何 RB，保持现有传输方式。根据吞吐量和调度公平性 2 个因素，边缘用户将选择最优的动态联合静默传输方案。

首先，假设  $UE_k$  为信道质量极差的边缘用户，其协作簇集合为  $S_k = \{c_1, \dots, c_{N_{c,k}}\}$ ，则  $UE_k$  的 SINR 满足

$$\text{SINR}_k = \frac{\sum_{c_i \in S_k} G_{c_i, k} \|\mathbf{H}_{c_i, k} \mathbf{w}_{c_i}\|^2}{\sum_{c_i \notin S_k} G_{c_i, k} \|\mathbf{H}_{c_i, k} \mathbf{w}_{c_i}\|^2 + \sigma^2} \quad (10)$$

其中， $c_i \in S_k$  表示  $UE_k$  的服务小区， $c_i \notin S_k$  表示  $UE_k$  的干扰小区， $N_{c,k}$  表示  $UE_k$  的服务小区数量。

在当前 RB 和 TTI 中，系统边缘用户总吞吐量可以表示为

$$T_t^{\text{edge}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{edge}}} T_k = \sum_{k=1}^{N_{\text{edge}}} N_{\text{RE}, k} \text{Ef}_k (1 - \text{BLER}_k) \quad (11)$$

其中， $T_t^{\text{edge}}$  表示采用动态联合静默传输方案  $M_t$  的情况下，系统边缘用户的总吞吐量； $T_k$  表示  $UE_k$  的平均吞吐量； $N_{\text{edge}}$  表示系统中边缘用户的数量。

其次，仅考虑边缘用户的吞吐量是不全面的，忽视了用户调度的公平性。例如，若使用动态联合

静默传输方案  $M_1$ ，则干扰最强的小区对应的 RB 将保持静默，此时可能导致原本被调度在这些 RB 上的用户在当前 TTI 上无法获得资源。因此，考虑用户调度的公平性是十分重要的。

系统比例公平系数的平均值可以根据每个用户的比例公平系数来计算，即

$$PF_t = \frac{1}{N_u} \sum_{k=0}^{N_u-1} p_k \quad (12)$$

其中， $PF_t$  表示采用动态联合静默传输方案  $M_t$  的情况下，系统的用户调度公平性。

根据得到的 3 种传输方式下的  $T_t^{\text{edge}}$  和  $PF_t$ ，并考虑到边缘用户吞吐量和用户调度公平性所占的权重，依据式(13)得到每种传输方式的评价系数。本文方案选择评价系数最大的传输方式作为最终的动态联合静默传输方案。

$$EC_{M_t} = \delta_1 \frac{T_t^{\text{edge}}}{\max(T_t^{\text{edge}})} + \delta_2 \frac{PF_t}{\max(PF_t)} \quad (13)$$

其中， $EC_{M_t}$  表示传输方式  $M_t$  的评价系数， $\delta_1, \delta_2 \in [0,1]$  分别表示边缘用户吞吐量和用户调度公平性的权重值，在本方案中  $\delta_1 = \delta_2 = 0.5$ ，即边缘用户吞吐量和用户调度公平性 2 个因素的重要性相同。

### 4.3 迭代优化算法

通过动态协作簇划分以及动态联合静默传输，系统中所有用户被划分为 3 种类型：non-JT UE、JT UE 和 JT-muting UE。但是，由于 JT-muting UE 的产生导致了对其干扰最强的小区相应的 RB 被静默，原本被调度在该 RB 上的 UE 无法分配到资源，造成用户调度矩阵  $\alpha$  的改变。因此，本文方案通过迭代方法进一步优化用户调度矩阵  $\alpha$ 。

假设初始化的用户调度矩阵为  $\alpha_0$ ，经过动态协作簇划分以及动态联合静默传输过程后，用户调度矩阵被更新为  $\alpha_1$ 。将一次动态协作簇划分以及动态联合静默传输过程记为  $\Psi$ ，则该变化可以表示为

$$\alpha_0 \xrightarrow{\Psi} \alpha_1$$

此时，需要判断当前的用户调度矩阵  $\alpha_1$  是否满足式(9)给出的约束条件。如果矩阵  $\alpha_1$  不满足该约束条件，则将当前的矩阵  $\alpha_1$  看作初始化矩阵，继续执行动态协作簇划分以及动态联合静默传输方案，即完成第一次迭代优化 (Iter 1<sup>st</sup>)

$$\text{Iter 1}^{\text{st}}: \alpha_1 \xrightarrow{\Psi} \alpha_2$$

以此类推，第  $i$  次迭代优化过程可以表示为

$$\text{Iter } i^{\text{th}}: \alpha_i \xrightarrow{\Psi} \alpha_{i+1}$$

该迭代过程直到矩阵  $\alpha_i$  满足式(9)的约束条件或迭代次数达到设置的最大值  $N_{\text{iter}}$ 。经过  $N_{\text{iter}}$  次迭代，可以确定最终选择的动态联合静默传输方案，并且得到最优的用户调度矩阵  $\alpha$ 。综上所述，本方案的处理流程如算法 1 所示。

**算法 1** 基于迭代联合传输的动态干扰协调方案处理流程

- 1) 初始化用户调度矩阵  $\alpha$ ，将用户分为 non-JT UE 和 JT UE
- 2) 第一次执行动态协作簇划分方案，优化用户调度矩阵  $\alpha$
- 3) 第一次执行动态联合静默传输方案，确定采用的方案  $M_t$ ，更新用户调度矩阵  $\alpha$
- 4) // 迭代优化算法
- 5) for  $n = 1$  to  $N_{\text{iter}}$  do
- 6)     if  $\alpha$  不满足式(9)的约束条件 do
- 7)         执行动态协作簇划分方案，修正用户调度矩阵  $\alpha$
- 8)         for  $UE_k = 1$  to  $N_u$  do
- 9)             计算  $UE_k$  的比例公平系数  $p_k$
- 10)             if  $UE_k$  为边缘用户 do
- 11)                 计算  $UE_k$  的吞吐量  $T_k$
- 12)             end if
- 13)         end for
- 14)     end if
- 15)     计算系统边缘用户总吞吐量  $T_t^{\text{edge}}$  和比例公平系数平均值  $PF_t$
- 16)     确定采用的动态联合静默传输方案  $M_t$ ，更新用户调度矩阵  $\alpha$
- 17) end for

图 5 给出了迭代优化前后的资源调度变化情况。通过第一次执行动态协作簇划分以及动态联合静默传输方案，得到用户调度矩阵  $\alpha$ ，此时资源调度情况如图 5(a)所示，其中， $UE_0, UE_3$  为 non-JT UE， $UE_1$  为 JT UE， $UE_2$  为 JT-muting UE。此时， $UE_2$  被调度在  $RB_1$  上，选择的动态联合静默传输方案为  $M_1$ ，对其干扰最大的为最近的宏小区。因此，宏小区在  $RB_1$  上需要保持静默，导致原本被调度的  $UE_0$  不能在该 RB 上调度。若直接放弃调度  $UE_0$ ，则会对用户调度公平性产生较大影响，因此通过执行迭代算法，将  $UE_0$  调度在  $RB_2$  上，如图 5(b)所示。

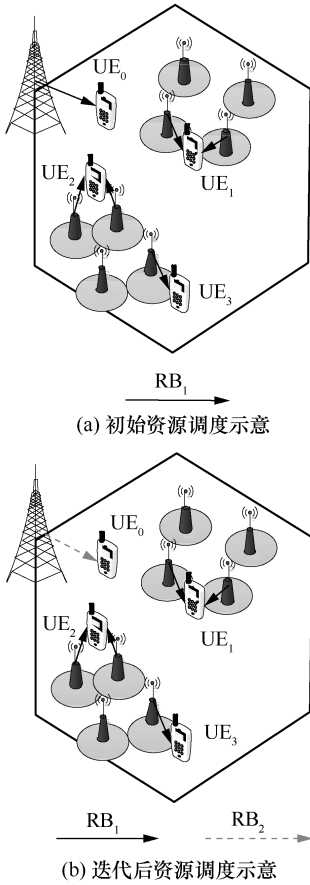


图 5 迭代前后资源调度

### 5 仿真验证与结果分析

本节将依据图 6 所示的系统级仿真平台对提出的基于联合传输的动态干扰协调方案进行实验验证。仿真工作将从 3 个方面展开：1) 评估本文提出的方案与普通联合传输方案在小区平均频谱效率 (ASE, average spectral efficiency) 和小区边缘频谱效率 (ESE, edge spectral efficiency) 方面的性能对比；2) 改变 UDN 场景的小小区数量，评估提出的动态干扰协调方案的性能变化；3) 评估 JT UE 的数量变化对系统性能的影响。

#### 5.1 仿真场景及参数

本文将基于如图 1 所示的 UDN 场景进行性能仿真。宏站点的布局采用符合 3GPP 标准的六边形模型，共有 7 个宏站点，每个站点包含 3 个扇区。小小区的拓扑结构遵循文献[16]中给出的 Scenario 1 场景，小区簇均匀随机分布在宏站点中，同时每个小小区也均匀随机分布在小区簇中。为了更准确地模拟干扰情况，仿真中考虑了多小区布局的环绕式处理技术 (wrap-around) [21]。

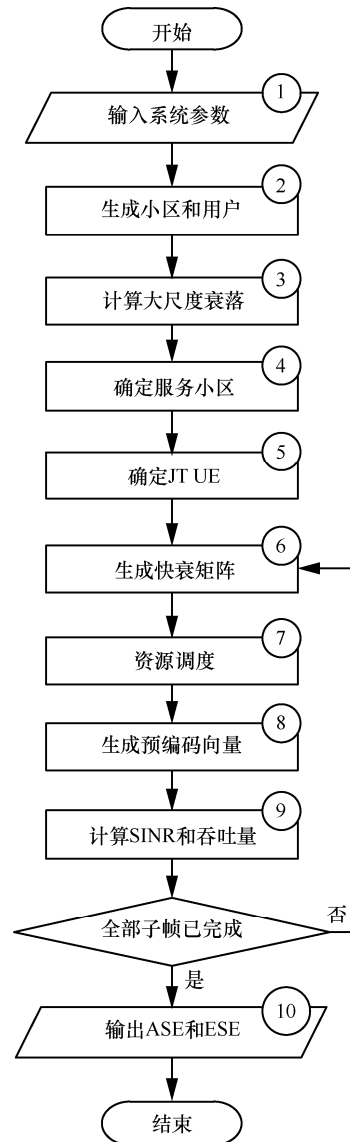


图 6 系统级仿真平台

仿真中应用了符合 3GPP 标准[22]的无线信道模型。对于大尺度衰落，宏小区和 UE 之间采用城市宏小区 (UMa, urban macro) 模型，小小区和 UE 之间采用城市微小区 (UMi, urban micro) 模型。阴影衰落服从对数正态分布，在非视距 (NLoS, not line of sight) 和视距 (LoS, line of sight) 的情况下标准差不同。对于小尺度衰落，仿真中采用先进的国际移动通信 (IMT-A, international mobile telecommunications-advanced) 信道模型[23]。

此外，宏小区和小小区分别配置 3D 样式和 2D 样式的天线方向图。3D 样式是指具有固定天线方向的三扇区站点，包含水平增益与垂直增益；而 2D 样式则是全方向性天线。其中，3D 样式的水平增益与垂直增益可以表示为 [22]

$$A_H(\varphi) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\varphi}{\varphi_{3\text{dB}}} \right), A_m \right] \quad (14)$$

$$A_V(\theta) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\theta - \theta_{\text{tilt}}}{\theta_{3\text{dB}}} \right), \text{SLA}_V \right] \quad (15)$$

其中,  $\varphi$ 表示宏小区和 UE 之间的水平角度,  $\varphi_{3\text{dB}}=70^\circ$ , 天线最大衰减值  $A_m=25\text{ dB}$ ;  $\theta$  表示宏小区和 UE 之间的垂直角度,  $\theta_{3\text{dB}}=10^\circ$ ,  $\text{SLA}_V=20\text{ dB}$ ,  $\theta_{\text{tilt}}=15^\circ$ 。基于水平和垂直天线增益, 最终的 3D 样式天线方向可以合并为

$$A(\varphi, \theta) = -\min \{ -[A_H(\varphi) + A_V(\theta)], A_m \} \quad (16)$$

综上所述, 本文应用的仿真参数<sup>[16]</sup>如表 1 所示。

表 1	仿真参数
参数名称	参数取值
UE 数量	每个宏小区地理范围内 60 个
系统带宽/MHz	10
载波频率/GHz	2.0
宏基站发射功率/dBm	46
小小区发射功率/dBm	30
宏小区路损模型	ITU UMa
小小区路损模型	ITU UMi
宏小区阴影衰落模型/dB	6 (NLoS), 4 (LoS)
小小区阴影衰落模型/dB	4 (NLoS), 3 (LoS)
宏小区天线方向	3D 样式
小小区天线方向	2D 样式
宏小区天线增益+连接损耗/dBi	17
小小区天线增益+连接损耗/dBi	5
小小区落在簇中的半径/m	50
UE 落在簇中的半径/m	70
多天线配置	2 发 2 收, 交叉极化
UE 速率/(km·h <sup>-1</sup> )	3
接收算法	最小均方误差

## 5.2 仿真结果及分析

### 5.2.1 不同干扰协调方案性能比较

传统的 CoMP JT 方案是 UE 选择其协作区域内的多个信号质量好的小区同时进行数据传输。文献 [11] 提出了一种基于小区负载感知 (CLA, cell load-aware) 的 CoMP 方案, 通过调节 SBS 服务的用户数量达到平衡小区负载的目的。本节将所提方案与传统的 CoMP JT 方案以及 CLA CoMP 方案进行比较, 评估了所提出的动态干扰协调方案在迭代

优化前后的 UE 吞吐量性能。图 7 给出了 4 条累积分布函数 (CDF, cumulative distribution function) 曲线, 分别表示传统 CoMP JT 方案、CLA CoMP 方案、无迭代优化的本文方案以及迭代优化后的本文方案。从仿真曲线中可以看出, 无迭代优化的本文方案比传统的 CoMP JT 方案存在微小的性能增益; 但是, 通过迭代优化后, 本文方案在小区边缘用户吞吐量方面可以获得可观的性能增益。而 CLA CoMP 方案在用户平均吞吐量方面有较大优势, 相比之下, 本文方案在小区边缘用户吞吐量方面的性能更突出。

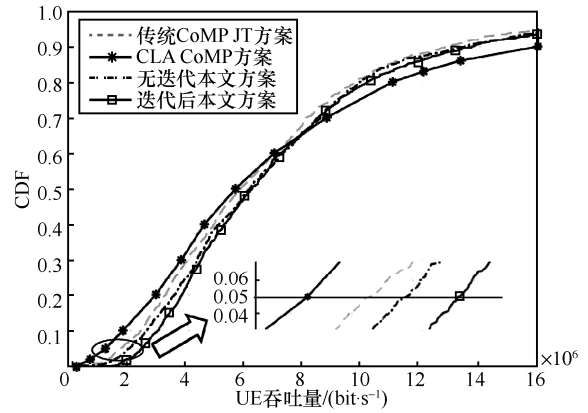


图 7 不同方案的 UE 吞吐量曲线

图 8 和图 9 分别给出了不同方案的 ASE 和 ESE 仿真结果。与传统方案相比, 无迭代优化的本文方案可以获得 3.29% 的 ASE 性能增益以及 19.29% 的 ESE 性能增益; 考虑到迭代优化后, 在不影响 ASE 的情况下, 本文方案的 ESE 性能增益可以达到 45.33%。与 CLA CoMP 方案相比, 迭代优化后的本文方案存在 -3.63% 的 ASE 性能损失, 但 ESE 的性能增益可达 108.64%, 这符合本文改善小区边缘用户频谱效率的目的。

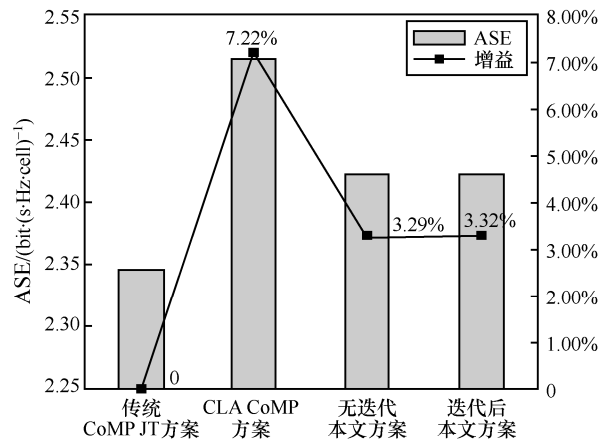


图 8 不同方案的 ASE 仿真结果

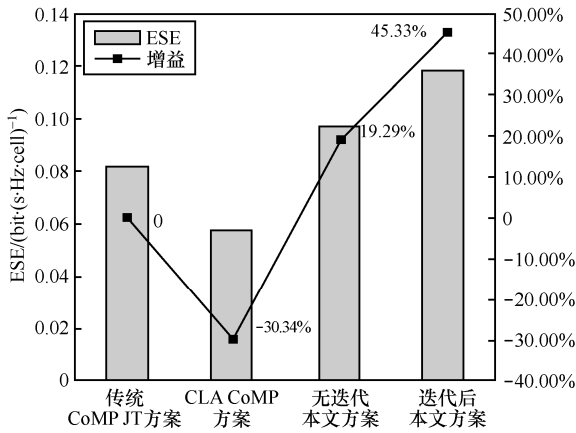


图 9 不同方案的 ESE 仿真结果

### 5.2.2 小小区数量对干扰协调方案性能的影响

本节针对 UDN 场景中的小小区数量不同对 UE 吞吐量进行性能仿真。仿真包括 2 种场景：1) 每个宏小区覆盖范围内撒 2 个小小区簇，每个小小区簇中撒 4 个小小区，即每个宏小区覆盖范围内有 8 个小小区；2) 每个宏小区覆盖范围内撒 4 个小小区簇，每个小小区簇中撒 10 个小小区，即每个宏小区覆盖范围内有 40 个小小区。2 种场景分别代表了小小区密度为一般和密集 2 种情况。

与传统的 CoMP JT 方案相比，图 10 给出了 UE 吞吐量的 CDF 曲线。从仿真结果中可以看到，当每个宏小区覆盖范围内有 8 个小小区时，本文方案比传统 CoMP JT 方案有一定的性能增益。而当每个宏小区覆盖范围内有 40 个小小区时，由于干扰情况变得更加恶劣，传统 CoMP JT 方案的性能恶化明显，本文方案的性能增益更加显著。

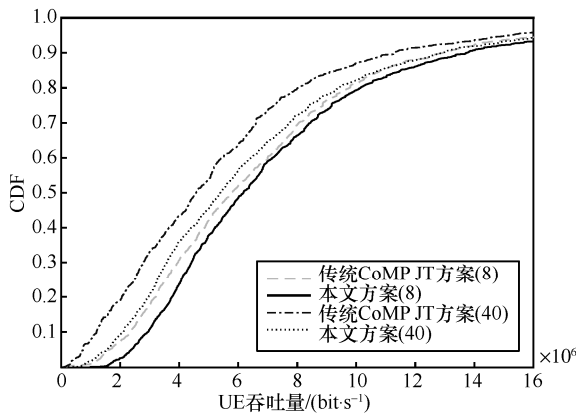


图 10 不同小小区数量的 UE 吞吐量曲线

根据图 10 的仿真结果，定量给出不同情况下的边缘用户吞吐量情况，如表 2 所示。与传统 CoMP JT 方案比较，当小小区密度一般时，本文方案可以

获得 45.24% 的边缘用户吞吐量增益；而当小小区密度变得更加密集后，本文方案有更明显的性能提升，其边缘用户吞吐量增益可以达到 107.96%。

表 2 不同小小区数量的边缘用户吞吐量

每个宏小区覆盖范围内的 小小区数量/个	传统 CoMP JT 方案/(bit·s <sup>-1</sup> )	本文方案/ (bit·s <sup>-1</sup> )	性能增益
8 (一般)	1.629×10 <sup>6</sup>	2.366×10 <sup>6</sup>	45.24%
40 (密集)	0.742×10 <sup>6</sup>	1.543×10 <sup>6</sup>	107.96%

### 5.2.3 JT UE 选择比例对干扰协调方案性能的影响

通过调整门限值  $\beta_0$  和  $\beta_1$  的取值，可以决定系统中 JT UE 的数量，本节分析了 JT UE 的数量变化对 ASE 和 ESE 的影响。当 JT UE 数量分别为 22、34、73、135 和 214 时，占有用户数量的比例分别为 1.75%、2.70%、5.79%、10.71% 和 16.98%。随着 JT UE 数量的增加，ASE 和 ESE 的性能均有一定波动，分别如图 11 和图 12 所示。

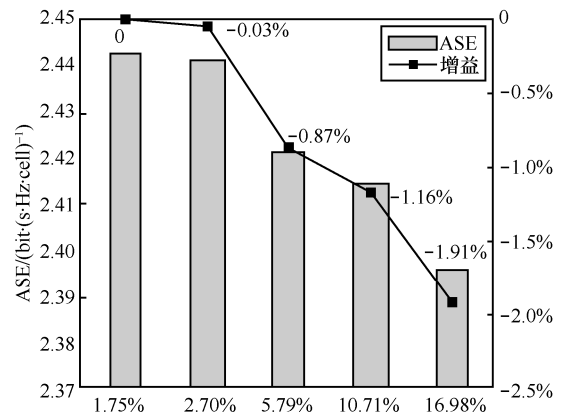


图 11 不同 JT UE 比例的 ASE 仿真结果

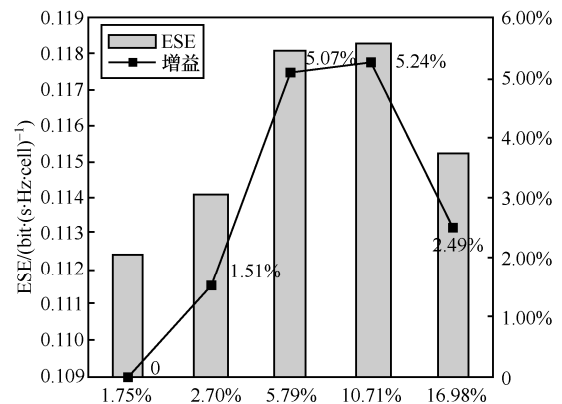


图 12 不同 JT UE 比例的 ESE 仿真结果

从仿真结果可见，随着 JT UE 的比例升高，ASE 有小幅下降，相应的增益值分别为 -0.03%、-0.87%、-1.16%、-1.91%；ESE 的性能先有一定程度的上升，

然后开始下降,相应的增益值分别为 1.51%、5.07%、5.24%、2.49%。这是由于 JT UE 的数量越多,在相同的时间和频率上,有更多的物理资源块被 JT UE 占用,导致部分 UE 无法被调度,因而引起小区平均吞吐量的下降。然而,由于 JT UE 数量的增加,更多的信号质量差的用户性能被提升,因此小区边缘用户吞吐量有所提高;但过多的 JT UE 会影响用户调度公平性,导致部分 UE 无法被调度,进而影响了边缘用户吞吐量的性能。

由此可见, JT UE 的数量选取是影响系统频谱效率的重要因素之一。如果选择恰当的 JT UE 数量,可以获得更优异的系统性能。从仿真结果可以看到,当 JT UE 的选择比例为 6%~10%时, ESE 的性能增益约为 5%;同时, ASE 仅有约 1%的性能下降。因此,本文提出的方案对 UDN 系统中 JT UE 的选择有一定的参考意义。

## 6 结束语

本文以提高超密集网络中小小区边缘用户频谱效率为目的,通过设计动态协作簇划分、动态联合静默传输以及迭代优化,提出了一种基于联合传输的动态干扰协调方案。仿真结果证明,所提方案可以在不影响小区平均频谱效率的情况下,显著提高小区边缘用户频谱效率,尤其当小小区密度增加时,性能增益更加明显。此外,本文评估了 JT UE 的选择比例对性能的影响,可以为系统中 JT UE 的选取提供参考。

## 参考文献:

- [1] ERICSSON. Ericsson mobility report, No. EAB-15:010920[R]. (2015-02) [2020-01-09].
- [2] ELAYOUBI S E, HADDADA O B, FOURESTIE B. Performance evaluation of frequency planning schemes in OFDMA-based networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1623-1633.
- [3] YANG X. Soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE[R]. Huawei, R1-050507, 3GPP RAN1 41#, (2005-05-09) [2020-01-09].
- [4] DAMNJANOVIC A, MONTOJO J, WEI Y, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 10-21.
- [5] EZZAOUIA M, GUEGUEN C, YASSIN M, et al. Autonomous and dynamic inter-cell interference coordination techniques for future wireless networks[C]//IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). IEEE, 2017: 1-8.
- [6] SONG Q, WANG X, QIU T, et al. An interference coordination-based distributed resource allocation scheme in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 2152-2162.
- [7] SHGLUOF I, ISMAIL M, NORDIN R. Semi-clustering of victim-cells approach for interference management in ultra-dense femtocell networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 9032-9043.
- [8] XIAO J, YANG C, ANPALAGAN A, et al. Joint interference management in ultra-dense small cell networks: a multi-domain coordination perspective[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(11): 5470-5481.
- [9] NADERIALIZADEH N, NIKOPOUR H, ORHAN O, et al. Feedback-based interference management in ultra-dense networks via parallel dynamic cell selection and link scheduling[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018: 1-6.
- [10] GARCIA V, ZHOU Y, SHI J. Coordinated multipoint transmission in dense cellular networks with user-centric adaptive clustering[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4297-4308.
- [11] WU J, ZENG J, SU X, et al. Joint CoMP and power allocation in ultra dense networks[C]//Wireless Telecommunications Symposium (WTS). IEEE, 2017: 1-5.
- [12] LIU L, ZHOU Y, ZHUANG W, et al. Tractable coverage analysis for hexagonal macrocell-based heterogeneous UDNs with adaptive interference-aware CoMP[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 503-517.
- [13] CHEN Y, CHAO H, WU S, et al. Resource allocation with CoMP transmission in ultra dense cloud-based LTE small cell networks[C]//IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2017: 1-5.
- [14] BARBIERI A, GAAL P, GEIRHOFER S, et al. Coordinated downlink multipoint communications in heterogeneous cellular networks[C]//IEEE Information Theory and Applications Workshop. IEEE, 2012: 7-16.
- [15] 3GPP TS 36.213. Physical layer procedures: V12.5.0[S]. 2015.
- [16] 3GPP TS 36.872. Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN - Physical layer aspects: V12.1.0[S]. 2013.
- [17] SONG J, CHOI W. Minimum cache size and backhaul capacity for cache-enabled small cell networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 7(4): 490-493.
- [18] CHU S, LI J, LIU T. A contract-based incentive mechanism for data caching in ultra-dense small-cells networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2017: 1-6.
- [19] SAHA C, AFSHANG M, DHILLON H S. Integrated mmWave access and backhaul in 5G: bandwidth partitioning and downlink analysis[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018: 1-6.
- [20] MA Y. Proportional fair scheduling for downlink OFDMA[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2007: 4843-4848.

- [21] HYTÖNEN T. Optimal wrap-around network simulation[R]. Helsinki University of Technology, Report A432, (2001-12)[2020-01-09].
- [22] 3GPP TR 36.814. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects: V9.2.0 [S]. (2017-03)[2020-01-09].
- [23] ITU-R Report. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced: M.2135[R]. 2008.



程谦 (1995- ), 女, 安徽池州人, 中国科学院大学博士生, 主要研究方向为干扰消除、非正交多址接入。

[作者简介]



李晓娜 (1986- ), 女, 辽宁沈阳人, 中国科学院工程师, 主要研究方向为移动通信、信息安全。



付婧雯 (1990- ), 女, 河北沧州人, 中国科学院工程师, 主要研究方向为无线通信技术。



王中方 (1987- ), 男, 河南南阳人, 中国科学院工程师, 主要研究方向为移动通信系统物理层安全。



张顺亮 (1974- ), 男, 陕西西安人, 博士, 中国科学院高级工程师, 主要研究方向为移动通信网络与安全技术。