



专题:异构网络

# 基于 CoMP 传输的分布式异构网络资源分配

于 佳,王 野,吴绍华,张钦宇

(哈尔滨工业大学深圳研究生院 深圳 518055)

**摘 要:** 提高无线资源利用效率是缓解日益增长的无线通信需求和有限的可用传输资源之间矛盾的主要途径。基于多点协调(coordinated multipoint, CoMP)传输技术的异构网络在提高频谱效率和能量效率方面具有巨大的潜力,近年来受到学术界和工业界的广泛关注。在研究基于 CoMP 技术的异构网络资源分配问题的基础上,提出了一种基于交叉熵方法的分布式频谱资源调度算法。仿真实验验证了本文提出方法在系统吞吐量、能量效率以及用户公平性等方面的有效性。

**关键词:** 异构网络;多点协调传输;资源分配

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2015245

## Resource Allocation of Distributed Heterogeneous Network Based on CoMP Transmission

Yu Jia, Wang Ye, Wu Shaohua, Zhang Qinyu

(Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Improving utilization of radio resource is a promising solution to alleviate the contradiction between increasing wireless communications demands and limited radio resources of wireless transmission. Coordinated multipoint (CoMP) based heterogeneous network (HetNet) has huge application prospects to improve the spectrum efficiency and energy efficiency, and therefore, has attracted constant attentions from not only academia and industry. The radio resource allocation for CoMP based HetNet was investigated, and a distributed resource schedule algorithm by means of cross-entropy method was proposed. Extensive simulations are conducted to verify the effectiveness of the proposed algorithm in terms of throughput, energy efficiency and user fairness.

**Key words:** heterogeneous network, CoMP transmission, resource allocation

收稿日期:2015-08-20;修回日期:2015-09-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2014AA01A704),国家科技重大专项基金资助项目(No.2012ZX03001027-002),中兴通讯校企合作项目(No.CON1312050008)

**Foundation Items:** The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2014AA01A704), National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (No.2012ZX03001027-002), ZTE Funded Development Projects (No.CON1312050008)

论文引用格式:于佳,王野,吴绍华等. 基于 CoMP 传输的分布式异构网络资源分配. 电信科学, 2015245

Yu J, Wang Y, Wu S H, *et al.* Resource allocation of distributed heterogeneous network based on CoMP transmission. Telecommunications Science, 2015245

## 1 引言

为了满足不断增长的无线通信业务需求,3GPP 在 LTE-Advanced(以下简称 LTE-A)计划中提出了异构网络(heterogeneous network, HetNet)的新型网络架构模型。HetNet 的核心思想是,在现有宏小区覆盖的基础上,灵活地增加多种类型的低功率节点,如 micro、pico、femto、RRH 以及中继等<sup>[1]</sup>。与 LTE-A 的宏基站 eNode B(eNB)相比,这些低功耗节点采用的传输功率较小,部署灵活,成本更低,能够覆盖宏小区的覆盖盲点,并增加频谱资源的复用程度,提高资源的利用效率<sup>[2-7]</sup>。然而,高密度的节点部署会引起小区间同频干扰强度的增加。如果处理不当,会使 HetNet 结构在频谱利用效率等方面的优势无法发挥。为了解决这个问题,LTE-A 又引入了多点协调(coordinated multipoint, CoMP)传输技术<sup>[8-10]</sup>,以期能够有效通过节点之间的合作传输,消除小区间的同频干扰,并进一步增加无线通信系统的资源利用效率。

根据合作传输方式的不同,CoMP 技术可进一步分为协同调度/协同波束成形(coordinated scheduling/coordinated beamforming, CS/CB)CoMP 和联合处理(joint processing, JP)CoMP 两类<sup>[11]</sup>。其中,CS/CB CoMP 传输中,基站根据与指定用户之间的信道条件对发送的数据符号进行联合的预编码,从而减少相邻小区间的同信道干扰。典型的预编码技术包括脏纸编码(dirty paper coding, DPC)<sup>[12]</sup>和线性预编码等。JP CoMP 则侧重于对干扰的主动利用,允许干扰区域内的一个或多个基站同时为同一指定用户服务。典型的技术包括动态小区选择(dynamic cell selection, DCS)CoMP 和联合传输(joint transmission, JT)CoMP。其中, JT CoMP 技术不仅能够有效消除小区间同信道干扰,还能够利用这些干扰信号,生成有用信号副本,增加有用信号的接收强度,是上述 CoMP 技术中最有潜力的候选方案之一。因此,本文主要将研究集中在 JT CoMP 中。

尽管 JT CoMP 相比于其他 CoMP 技术在资源利用效率和干扰消除方面具有更大的潜力,其灵活多变的合作传输策略也给无线资源管理带来了更大的难度。基于 JT CoMP 技术的密集网络涉及的基站数量多,在资源分调度中需要考虑复杂的网络环境和动态的合作基站选择等问题。如果采用集中式的资源分配方法,则对中心控制单元的计算能力和存储能量有极高的要求。与集中式资源分配方式不同,分布式的资源分配可令各个基站分担中心控制

单元的计算量,由此一方面降低了系统对中心控制单元能力的要求,另一方面能够减少算法执行的总时延。本文重点讨论了基于 JT CoMP 技术的 HetNet 的无线资源分配问题,并提出了基于交叉熵的分布式 RB 调度算法。

## 2 系统模型

本文研究的系统模型为一个采用频分双工的异构网络下行传输系统,网络结构如图 1 所示。网络中共有  $M$  个异构的 eNB 或者低功率传输节点(transmission point, TP),每个 TP 上配有  $N_T$  个发射天线。所有传输节点的集合表示为  $\Pi=\{1, \dots, M\}$ 。网络中每个 TP 共同复用  $N_{RB}$  个带宽为 180 kHz、传输时间间隔为 1 ms 的资源块。网络在某一时刻,同时为均匀分布的  $K$  个用户提供传输服务。所有用户的集合表示为  $\Lambda=\{1, \dots, K\}$ ,每个用户设备上配有  $N_R$  个接收天线。

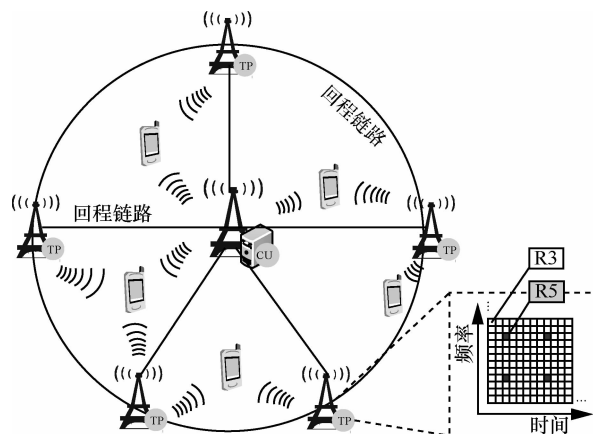


图 1 系统模型

在网络中心存在一个逻辑上的中心控制单元(CU),负责收集用户检测到的信道信息,并以此为依据对系统频率、功率等资源按照一定规则进行分配,以得到最佳的系统性能。CU 通过回程链路连接向各个 TP 发送控制信令、资源分配结果以及待传输的数据信息。由于回程链路的存在,可以合理假设 TP 之间、TP 与中心控制单元之间在各维度(时间、频率等)上完全同步。这也是采用 CoMP 技术的必要条件之一。用户根据其信道状态可分配小区内用户和小区边缘用户。对于一个小区内用户,由于该用户可能在地理位置上接近网络中某个 TP,因此用户接收到的来自邻近 TP 的参考信号(reference signal, RS)强度,明显强于来自其他 TP 的参考信号。相反地,小区边缘用户由于处于多个 TP 覆盖范围的重合区域,其接收到的来自邻近的



若干个 TP 的参考信号强度较弱且差距很小。两种类型的用户都会选择参考强度最大的 TP 作为 home TP, 并将基本信息注册在 home TP 列表中。此外, 本文假设 TP 之间在时间、频率上完全同步。无线信道具有伪平稳的衰落特性, 即在一个传输时间间隔 (transmission time interval, TTI) 内信道特性不发生变化。

## 2.1 CoMP 集合选择

参照 LTE-A 的定义, 系统允许用户根据自身接收到的参考信号情况选择一个 CoMP 集合, 该集合包含可能为用户传输数据的 TP。值得注意的是, CoMP 集合中可能包含一个或者多个 TP。将用户  $k$  的 CoMP 集合记为  $\Pi_k (\Pi_k \subseteq \Pi)$ , LTE-A 中  $\Pi_k$  选择的规则为:

$$\begin{cases} m \in \Pi_k, & m \text{ 为 home TP 或者 } RS(\text{home TP}) - RS(\text{TP } m) \leq \Delta_{\text{thres}} \\ m \notin \Pi_k, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\Delta_{\text{thres}}$  表示 CoMP 集合选择阈值 (dB),  $RS$  表示参考信号的接收强度。

当  $\Delta_{\text{thres}}$  越小时, CoMP 集合中包含的 TP 越多, 在采用合作传输技术时传输得到的合作增益也越大。相应地, CoMP 传输时所需的系统控制开销也随之增加。因此,  $\Delta_{\text{thres}}$  的选择反映了合作增益与系统开销的折中关系, 对于网络环境和系统需求可适当对  $\Delta_{\text{thres}}$  进行调整。按照参考文献[12]中的建议, 令  $\Delta_{\text{thres}} = 5$  dB。

按照式(1)中的准则, 用户  $k$  选出集合  $\Pi_k$  并将选择结果反馈给中心控制单元。如果  $\Pi_k$  中只包含用户  $k$  的 home TP, 即  $|\Pi_k| = 1$ , 则  $k$  为小区内用户, 在下行传输中只有 home TP 为其服务。相反, 如果  $|\Pi_k| > 1$ , 则说明  $k$  为小区边缘用户。CoMP 集合中的若干个 TP 以给定的 CoMP 合作方式联合为用户  $k$  服务, 以提高用户的服务质量。

## 2.2 联合传输 CoMP

联合传输 CoMP 是 JP CoMP 传输的典型实现方式之一。在 JT CoMP 中, 用户  $k$  的 CoMP 集合  $\Pi_k$  中的全部或者多个 TP 在相同 RB 上为用户  $k$  发送相同数据。由于 TP 间的空间分离, 数据从不同 TP 发出后经过空间独立的信道到达用户接收天线, 通过合并使得数据信号的强度随发送 TP 增多而提高, 即得到空间分集增益。可以认为, JT CoMP 技术将用户的主要小区间干扰变为可利用的传输, 既提高了数据信号强度, 又减少了小区间干扰。

JT CoMP 技术的直接实现方式是, 用户  $k$  的每次传输都利用 CoMP 集合  $\Pi_k$  中的全部 TP 作为传输 TP, 这种固定

的策略称为 FJT (fixed JT)。FJT CoMP 没有考虑信道的频选特性, 无法适应网络的动态变化。为了解决这个问题, 系统还可以根据用户的瞬时信道信息动态地在每个 RB 上为用户选择 CoMP 合作集合, 以达到网络总体性能的提升, 这种更为灵活的 JT CoMP 技术也称为动态 JT (DJT) CoMP。令集合  $\Omega_k^n$  表示用户  $k$  在 RBn 上的 CoMP 合作集合, 则在 DJT CoMP 传输中, 用户  $k$  在 RBn 上的传输可表示为:

$$\begin{aligned} y_k^n = & \sum_{m \in \Omega_k^n} H_{m,k}^n w_m^n \sqrt{p_m^n} s_m^n + \\ & \sum_{m' \in \Pi \setminus \Omega_k^n} H_{m',k}^n w_{m'}^n \sqrt{p_{m'}^n} s_{m'}^n + n_k^n \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\Pi \setminus \{m\}$  表示从  $\Pi$  去除元素  $\{m\}$  后的集合;  $y_k^n$  是  $N_R \times 1$  维接收向量, 其中每个元素代表对应位置上天线的接收信号;  $H_{m,k}^n$  为  $N_R \times N_T$  维的信道矩阵, 其中元素  $H_{m,k}^n(i,j)$  代表 TP  $m$  的第  $j$  个天线与用户  $k$  的第  $i$  个天线之间的信道系数;  $w_m^n$  是  $N_T \times 1$  维向量, 表示 TP  $m$  对符号  $s_m^n$  的预编码, 且有  $(w_m^n)^H w_m^n = 1$ ;  $p_m^n$  是 TP  $m$  对该次传输分配的发射功率;  $n_k^n$  是接收天线处的复高斯白噪声向量,  $n_k^n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_{N_R})$ 。

定义调度索引集合  $\{\beta_{m,k}^n\} (\forall m, k, n)$ , 其中  $\{\beta_{m,k}^n\} \in \{0, 1\}$ 。  $\{\beta_{m,k}^n\} = 1$  说明系统中心控制单元在接下来的 TTI 中分配 TP  $m$  的 RBn 为用户  $k$  传输数据, 即  $m \in \Omega_k^n$ 。相应地, 式(2)中接收信号的信干噪比可表示为:

$$\begin{aligned} \gamma_k^n = & \frac{\sum_{m \in \Omega_k^n} \|H_{m,k}^n w_m^n\|^2 p_m^n}{\sum_{m' \in \Pi \setminus \Omega_k^n} \|H_{m',k}^n w_{m'}^n\|^2 p_{m'}^n + \sigma^2} \\ = & \frac{\sum_{m \in \Pi} \beta_{m,k}^n \|H_{m,k}^n w_m^n\|^2 p_m^n}{\sum_{m' \in \Pi} (1 - \beta_{m',k}^n) \|H_{m',k}^n w_{m'}^n\|^2 p_{m'}^n + \sigma^2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\sum_{m \in \Pi} \beta_{m,k}^n = \sum_{m \in \Omega_k^n} \beta_{m,k}^n \geq 1$ 。

## 2.3 优化问题建模

为了同时兼顾系统的吞吐量、能量消耗以及用户间的公平性, 将资源分配的优化目标定义为如下形式:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_{\text{RB}}} \frac{R_k^n}{\bar{R}_k} \bigg/ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_{\text{RB}}} \sum_{k=1}^K \beta_{m,k}^n p_m^n \quad (4)$$

其中,  $R_k^n$  表示用户在 RBn 上的数据速率, 其计算式为:

$$R_k^n = b \lg(1 + \gamma_k^n) \quad (5)$$

$\bar{R}_k$  为用户  $k$  在当前 TTI 位置获得的累积平均数据速

率,其定义为<sup>[13]</sup>:

$$\bar{R}_k = \alpha \bar{R}_k^{\text{before}} + (1-\alpha) R_k \quad (6)$$

其中,  $0 < \alpha < 1$  为遗忘因子, 用来平衡累计平均数据速率和当前数据速率对资源分配的影响;  $\bar{R}_k^{\text{before}}$  为截至当前时刻, 用户  $k$  的累计平均数据速率。

但这样的目标函数会导致极端情况出现: 为了提高能量效率, 系统可能过分地降低了发射功率, 从而严重地破坏了传输的质量。为了避免这种可能性的出现, 本文在约束条件中对传输质量进行限制。综上, 基于 CoMP 技术的异构网络资源分配问题的优化问题模型可表示为:

$$\begin{aligned} \max_{p_m, k, p_m} & \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_{\text{RB}}} \frac{R_k^n}{\bar{R}_k} \bigg/ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_{\text{RB}}} \sum_{k=1}^K \beta_{m,k}^n p_m^n \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1: } 0 \leq p_m^n \leq S, \forall m, n \\ & \text{C2: } \beta_{m,k}^n \in \{0, 1\}, \sum_{k=1}^K \beta_{m,k}^n \leq 1, \forall m, n, k \\ & \text{C3: } \sum_{n=1}^{N_{\text{RB}}} \sum_{k=1}^K \beta_{m,k}^n R_k^n \leq C_m, \forall m \\ & \text{C4: } R_k^n \geq R_{\text{thres}}, \forall k, n \end{aligned} \quad (7)$$

其中, C1 表示最高 TP 的发射功率的限制为  $S$ , C2 表示 RB 不可被重复分配, C3 表示回程链路容量对每 TP 吞吐量的限制;  $R_{\text{thres}}$  为给定的数据速率阈值, 系统的资源分配方案应保证每个传输的数据速率不低于该阈值, 因此 C4 保证了网络中每个传输的质量。

### 3 基于交叉熵方法的分布式资源分配算法

交叉熵 (cross entropy, CE) 算法最初由 Rubinstein 在 1997 年提出, 用于对复杂随机网络中稀有事件的概率进行估计<sup>[14]</sup>。随后, Rubinstein 发现对交叉熵算法进行简单修正, 便可用来对组合优化问题进行求解<sup>[15]</sup>。

为了便于分析, 假定每个 RB 上的功率分配为等值分配, 则 RB 调度问题可简化为:

$$\begin{aligned} \max_{\beta_{m,k}^n} & \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_{\text{RB}}} \frac{R_k^n}{\bar{R}_k} \bigg/ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_{\text{RB}}} \sum_{k=1}^K \beta_{m,k}^n p_m^n \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1: } p_m^n = S, \forall m, n \\ & \text{C2: } \beta_{m,k}^n \in \{0, 1\}, \sum_{k=1}^K \beta_{m,k}^n \leq 1, \forall m, n, k \\ & \text{C3: } \sum_{n=1}^{N_{\text{RB}}} \sum_{k=1}^K \beta_{m,k}^n R_k^n \leq C_m, \forall m \\ & \text{C4: } R_k^n \geq R_{\text{thres}}, \forall k, n \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中的变量  $[\beta_{m,k}^n]$  是一个维度为  $M \times N_{\text{RB}} \times K$  的随机矩阵, 其中  $\beta_{m,k}^n$  是一个比特数, 可视为伯努利随机变量。在交叉

熵方法的每次迭代中, 需要产生足够量的样本。若直接对  $[\beta_{m,k}^n]$  求解, 显然计算量非常大。

为了减少计算复杂度, 考虑针对每个 TP 分别生成样本。记 TP  $m$  上的一个样本为  $X^m = [x^m(1), \dots, x^m(n), \dots, x^m(N_{\text{RB}})]$ , 其中  $x^m(n)$  表示 TP  $m$  将在第  $n$  个 RB 上服务的用户, 即  $\beta_{m, x^m(n)}^n = 1$ 。令每个 TP 的用户集合  $\Lambda_m$ 。样本  $X^m$  中的元素  $x^m(n)$  则根据给定概率分布从集合  $\Lambda_m$  选取。这样的样本设计, 可以有效减小样本空间及计算复杂度。

本文利用上述的样本设计, 提出了一种基于交叉熵方法的启发式调度策略。该策略可大致分为 3 个部分: 概率初始化、样本迭代和结果修正。其中, 样本迭代部分为算法的核心部分, 包括样本生成、筛选和概率分布更新。迭代过程最终使概率分布收敛于一个确定结果, 即调度问题的最优解。算法采用分布式的处理方式将每 TP 的 RB 调度彼此分离, 因此算法可以由每个 TP 独立执行。这样的算法虽然损失了一定的计算精度, 但能够缩短计算所需的时间。

#### 3.1 概率分布初始化

系统中, 每个 TP  $m$  根据当前信道条件及给定策略, 从其集合  $\Lambda'_m = [0, \Lambda_m]$  选取用户在适当的 RB 上进行传输。其中, 0 表示 TP  $m$  在该 RB 上不实施传输。记 TP  $m$  在 RB  $n$  上 TP  $m$  调度策略的概率分布为向量  $q^{m,n} = [q_1^{m,n}, \dots, q_i^{m,n}, \dots, q_{|\Lambda'_m|}^{m,n}]$  ( $1 \leq i \leq |\Lambda'_m|$ ) 表示。其中,  $0 \leq q_i^{m,n} \leq 1$  表示系统在该 RB 上选择向用户  $k = \Lambda'_m(i)$  传输 (即  $\beta_{m, \Lambda'_m(i)}^n = 1$ ) 的概率, 并且满足  $\sum_{i=1}^{|\Lambda'_m|} q_i^{m,n} = 1$ 。根据  $\Lambda'_m$  的定义可知  $\Lambda'_m(1) = 0$ , 而相应的概率  $q_1^{m,n}$  则表示 TP  $m$  在 RB  $n$  上不发生任何传输的概率。在初始化过程中, 将这个概率设定为常数, 即:

$$q_1^{m,n} = Pr\_0 \quad (9)$$

对于  $\Lambda'_m$  中的非零元素, 则根据对用户数据速率的估计对概率赋初值。这样的赋值可在一定程度上加快收敛速度。根据用户的信道情况和合作集合的选择, 采用 JT CoMP 策略时, 可用式(10)对用户  $k$  在 RB  $n$  上的数据速率进行估计:

$$\tilde{R}_k^n = b \lg \left( 1 + \frac{\sum_{m \in \Pi_k} \|H_{m,k}^n w_m^n\|^2 S}{\sum_{m' \in \Pi \setminus \Pi_k} \|H_{m',k}^n w_{m'}^n\|^2 S + \sigma^2} \right) \quad (10)$$

式(8)中的约束条件 C4 对每 RB 传输的 QoS 进行了限制, 不能达到阈值  $R_{\text{thres}}$  被认为是失败的传输。为了节约资源, 系统将不考虑在 RB  $n$  上调度  $\tilde{R}_k^n \leq R_{\text{thres}}$  的用户  $k$ , 即



令  $k$  对应的概率  $q_i^{m,n}(k=\Lambda'_m(i))=0$ ; 而对于能够达到数据速率阈值  $R_{\text{thres}}$  的用户, 则根据其估计的数据速率占总的数据速率的比重进行概率赋值。假设用户  $k$  的数据速率满足 QoS 要求, 其对应的概率  $q_j^{m,n}(k=\Lambda'_m(j))=0$  定义为:

$$q_j^{m,n} = \frac{\tilde{R}_{\Lambda'_m(j)}^n}{\sum_j \tilde{R}_{\Lambda'_m(j)}^n} \times (1 - Pr\_0), \quad (11)$$

$$\left\{ \forall j \mid j=1, \dots, |\Lambda'_m|, \text{且} \tilde{R}_{\Lambda'_m(j)}^n \geq R_{\text{thres}} \right\}$$

其中, 等号右边第 1 项表示用户的数据速率占总数据速率的比重, 需要注意的是, 总数据速率只包含能够满足 QoS 的数据速率; 等号右边的第 2 项则是保证概率分布  $q^{m,n}$  满足  $\sum_{i=1}^{|\Lambda'_m|} q_i^{m,n} = 1$ 。

综上所述, TP  $m$  在 RB  $n$  上 RB 调度的概率分布初值可以表示为:

$$q_j^{m,n} = \begin{cases} Pr\_0, & j=1 \\ \frac{\tilde{R}_{\Lambda'_m(j)}^n}{\sum_j \tilde{R}_{\Lambda'_m(j)}^n} \times (1 - Pr\_0), & 1 < j \leq |\Lambda'_m|, \text{且} \tilde{R}_{\Lambda'_m(j)}^n \geq R_{\text{thres}} \\ 0, & 1 < j \leq |\Lambda'_m|, \text{且} \tilde{R}_{\Lambda'_m(j)}^n < R_{\text{thres}} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12)可得到 TP  $m$  在 RB  $n$  上用户选择的概率分布  $q^{m,n}$ , 进而可得 TP  $m$  在全部 RB 上的用户选择概率分布  $q^m = \{q^{m,n}\}, \forall n \in \{1, 2, \dots, N_{\text{RB}}\}$ 。迭代初期, 算法根据  $q^m$  生成样本, 再根据筛选后的样本情况更新概率分布, 直至概率分布收敛。

### 3.2 样本迭代

在算法的迭代过程中, 系统根据给定的概率分布随机生成若干个样本。随机生成的样本并不能保证是满足约束条件的最优解, 因此需要对样本进行筛选。筛选后的样本被认为是“好”的样本, 而根据“好”的样本更新概率分布, 能够使算法在下次迭代时以更高的概率获得“更好”的样本。具体的样本迭代过程如下所述。

根据已知的概率分布针对 TP  $m$  随机生成样本  $i$ , 记为  $X_i^m = [x_i^m(1), \dots, x_i^m(n), \dots, x_i^m(N_{\text{RB}})]$ 。根据  $X_i^m$  可获得相对应的关于 TP  $m$  的调度索引  $\{\beta_{m,k}^n\}$ :

$$\begin{cases} \beta_{m,k}^n = 1, & k = x_i^m(n) \\ \beta_{m,k}^n = 0, & k \neq x_i^m(n) \end{cases} \quad (13)$$

根据获得的调度结果, 用户  $k$  在 RB  $n$  上传输获得的数

据速率变为:

$$R_k^n = b \lg \left( 1 + \frac{\sum_{m \in \mathcal{I}} \beta_{m,k}^n \|H_{m,k}^n \mathbf{w}_m^n\|^2 p_m^n}{\sum_{m' \in \mathcal{I}} (1 - \beta_{m',k}^n) \|H_{m',k}^n \mathbf{w}_{m'}^n\|^2 p_{m'}^n + \sigma^2} \right) \quad (14)$$

令  $f_m$  表示 TP  $m$  对应的效用函数, 根据式(8)可以知道在样本  $X_i^m$  下 TP  $m$  得到的效用函数值为:

$$f_m(X_i^m) = \frac{\sum_{n=1, x_i^m(n) \neq 0}^{N_{\text{RB}}} \frac{R_{x_i^m(n)}^n}{R_{x_i^m(n)}^n}}{\sum_{n=1, x_i^m(n) \neq 0}^{N_{\text{RB}}} S} \quad (15)$$

其中,  $\sum_{n=1, x_i^m(n) \neq 0}^{N_{\text{RB}}} S$  表示依据样本  $X_i^m$  得到的 TP  $m$  的总功耗。

样本  $X_i^m$  对应的 TP  $m$  上的总吞吐量可表示为:

$$R_m(X_i^m) = \sum_{n=1}^{N_{\text{RB}}} R_{x_i^m(n)}^n \quad (16)$$

合格的样本应该满足两个条件: 第一, 样本的效用函数值足够高; 第二, 样本需满足回程链路容量限制, 即式(8)中的约束条件 C3。随机产生的样本并不能保证满足这两个条件, 因此需要对生成的样本进行筛选。

已知 TP  $m$  回程链路的容量为  $C_m$ , 在生成样本的过程中, 若样本产生的 TP  $m$  的吞吐量  $R_m(X_i^m) > C_m$ , 样本  $X_i^m$  将被直接去除。同样地, 令  $f_{\text{thres}}^{(t)}$  表示第  $t$  次迭代中样本效用函数的阈值, 对于效用函数不能达到要求的样本  $X_i^m$  (即  $f_m(X_i^m) < f_{\text{thres}}^{(t)}$ ) 系统也将不予考虑。系统按照上述要求生成  $N_{\text{SAM}}$  个有效样本, 记为  $X_i^m (1 \leq i \leq N_{\text{SAM}})$ 。

进一步地, 算法按照重要采样的原则在  $N_{\text{SAM}}$  个有效样本中筛选出重要样本。对  $N_{\text{SAM}}$  个有效样本的效用函数进行降序排列, 不失一般性, 可以假设  $f(X_1^m) \geq \dots \geq f(X_i^m) \geq \dots \geq f(X_{N_{\text{SAM}}}^m)$ 。设定一个分位点  $\rho (0 \leq \rho \leq 1)$ , 对于降序排列的样本, 截取其中  $N_{\text{IM}} = \lceil (1 - \rho) N_{\text{SAM}} \rceil$  个样本作为重要样本, 并以这些样本作为更新概率的依据。符号  $\lceil a \rceil$  表示对  $a$  向上取整。为了在每次迭代中使样本结果更接近最优的目标函数, 算法将逐步提高生成有效样本的效用函数阈值  $f_{\text{thres}}^{(t)}$ 。每次迭代后, 该阈值将更新为重要样本中效用函数值中的最小值, 即:

$$f_{\text{thres}}^{(t+1)} = f_m(X_{N_{\text{IM}}}^m) \quad (17)$$

按照这样的更新规则, 样本的效用函数将越来越接近最优解。

接下来, 算法根据重要样本更新概率分布, 使得下次迭代中可以以更好的概率生成“好”的样本。样本  $X_i^m$  中

元素  $x_i^m(n)$  的概率分布  $q^{m,n}$ , 可根据  $N_{\text{IM}}$  中每个用户 (包括  $x_i^m(n)=0$  无用户情况) 出现的次数进行更新, 即:

$$q_u^{m,n} = \frac{\text{Number}(x_i^m(n)=u)}{N_{\text{IM}}}, u \in A'_m \quad (18)$$

其中,  $\text{Number}(x_i^m(n)=u)$  表示在  $N_{\text{IM}}$  个样本中,  $u$  出现在样本的第  $n$  位的次数。在下一迭代中, 算法会根据更新后的概率分布生成新的  $N_{\text{SAM}}$  个样本。经过若干次迭代后, 概率分布  $q^{m,n}$  逐步收敛。当全部  $q^{m,n}$  都以概率 1 收敛于某一用户时, 算法即得到 RB 调度的最优解, 而此时得到的确定的样本 (以概率 1 生成的样本) 即问题的最优解。

算法 1 总结了每一步迭代中的过程。

**算法 1** 基于交叉熵方法的 RB 调度算法一次迭代过程

```

 $f_{\max} = f_{\max\_pre} = 0; \text{counter} = 1;$ 
While  $\text{counter} \leq N_{\text{SAM}}$ 
    根据概率分布  $q^{m,n}$  随机生成样本  $X^m$ 
    根据式(15)计算样本  $X^m$  的效用函数  $f(X^m)$ 
    根据式(16)计算样本  $X^m$  的总容量  $R_m(X^m)$ 
    If  $f(X^m) < f_{\text{thres}}^{(i)}$ 
        Continue;
    End If
    If  $R_m(X^m) > C_m$ 
        Continue;
    End If
     $X_{\text{counter}}^m = X^m;$ 
     $\text{counter} = \text{counter} + 1;$ 
End While
For  $i = 1$  to  $N_{\text{SAM}}$ 
    根据式(15)计算样本  $X_i^m$  的效用函数  $f(X_i^m)$ 
End For
对  $X_1^m, \dots, X_{N_{\text{SAM}}}^m$  按照对应的  $f(X_i^m)$  降序排列, 得到  $\hat{X}_1^m, \dots, \hat{X}_{N_{\text{SAM}}}^m$ 
计算  $N_{\text{IM}} = \lceil (1 - \rho) N_{\text{SAM}} \rceil$ , 令  $f_{\text{thres}}^{(t+1)} = f(\hat{X}_{N_{\text{IM}}}^m)$ 
If  $f(\hat{X}_1^m) > f_{\max}$ 
     $X_{\text{out}}^m = \hat{X}_1^m, f_{\max\_pre} = f_{\max}, f_{\max} = f(\hat{X}_1^m)$ 
End If
根据  $\hat{X}_1^m, \dots, \hat{X}_{N_{\text{IM}}}^m$  及式(18)更新概率  $q^m$ 

```

算法 1 中,  $t$  表示当前的迭代次数,  $X_{\text{out}}^m$  为当概率收敛

时算法输出的 TP  $m$  的调度结果。 $X_{\text{out}}^m$  中的每个元素表示 TP  $m$  对应位置的 RB 上调度的用户, 用调度索引表示即  $\beta_{m, X_{\text{out}}^m(n)}^n = 1$ 。因此, 由  $X_{\text{out}}^m (m=1, \dots, M)$  可以得到调度索引集合  $\{\beta_{m,k}^n, \forall k, n\}$ 。

### 3.3 结果修正

第 3.1 节描述的交叉熵算法得到的结果, 严格地满足了限制条件 C1~C3, 但不能保证全部传输都满足给定的阈值 (即限制条件 C4)。讨论的系统资源优化分配的最终目标是提高能量效率, 出于节省能源的目的, 算法将选择关闭不能满足 QoS 要求的传输。

算法 2 总结了本文提出的基于交叉熵的分布式 RB 调度算法。

**算法 2** 每 TP 的分布式 RB 调度算法

```

根据式(10)计算  $\tilde{R}_k^n \{k \in A_m\}$ 
根据式(12)初始化概率分布  $q^m$ 
For  $t = 1:t_{\max}$ 
    执行算法 1, 输出  $X_{\text{out}}^m$ 
End For
If  $q^m$  收敛
    输出  $X_{\text{out}}^m, (m=1, \dots, M)$ 
    Break;
End If

```

由  $X_{\text{out}}^m$  得到  $\{\beta_{m,k}^n, \forall k, n\}$

注意: 算法 2 是针对某一 TP  $m$  的运算, 只得到 TP  $m$  上的调度结果  $X_{\text{out}}^m$ , 或者说  $\{\beta_{m,k}^n, \forall k, n\}$ 。系统需要对每个 TP 进行算法 2 中描述的分配运算以得到全部调度结果  $\{\beta_{m,k}^n, \forall m, k, n\}$ 。由于每 TP 执行完算法 2 中的运算后仍然得不到对数据速率的准确估计, 即无法获知  $\tilde{R}_k^n$ , 因而分布式的调度算法中不能执行如算法 1 中的结果修正。这导致分布式算法得到的调度结果产生的传输中, 可能存在不能满足 QoS 要求的。仿真实验中认为这样的传输不能被正确接收, 可以说, 不合格的传输既消耗了能量, 又没有得到相应的数据速率, 因而导致了分布式算法中能量效率的降低。

## 4 仿真结果及讨论

仿真利用 SCM (space channel model)<sup>[16]</sup> 模型生成无视线传输城区环境的 MIMO 信道, 采用的主要参数见表 1。图 2 显示了仿真中的密集网络环境。网络中共包含 37 个



表 1 仿真参数

| 参数名称                    | 参数值                         |
|-------------------------|-----------------------------|
| 小区布局                    | 37 个六边形小区;小区绕卷              |
| 小区半径                    | 250 m                       |
| 中心频率                    | 2 GHz                       |
| RB 数量(NRB)              | 100                         |
| TP 的总功率限制               | 46 dBm ( $\approx 40$ watt) |
| 天线数( $N_T \times N_R$ ) | 2×2                         |
| TTI                     | 1 ms                        |
| $\alpha$                | 0.1                         |
| 信道模型                    | SCM                         |
| 最短距离(TP 与用户之间)          | 35 m                        |
| 发射/接收天线的高度              | 35 m/1.5 m                  |
| 穿透损耗                    | 20 dB                       |
| 负载模型                    | full buffer                 |
| 用户速度                    | 10 m/s                      |

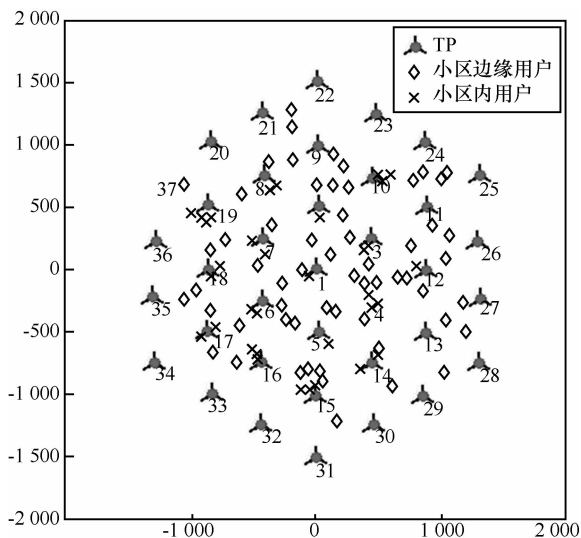


图 2 仿真的拓扑示意(以坐标位置模拟 TP 和用户的相对位置,1 单位=1 m)

覆盖半径为 250 m 的六边形小区,其中最外层的 18 个 TP 并不产生实际的传输,而是内层 TP 的传输以模拟真实场景中的小区间干扰。这种模拟方式被称为小区绕卷,是大规模网络仿真中常用的手段<sup>[17]</sup>。

仿真实验首先讨论了回程链路容量限制对系统性能的影响。实验中考虑无回程链路容量限制、100 Mbit/s 回程链路容量和 50 Mbit/s 回程链路容量 3 种情况。图 3 给出了不同回程链路容量限制下网络中每 TP 的总数据速率。可以看出,在无限制和 100 Mbit/s 回程链路容量的情况下,系统中每 TP 的总数据速率可达到 30 Mbit/s 左右。而当回程链路容量限制在 50 Mbit/s 时,每 TP 的总数据速率

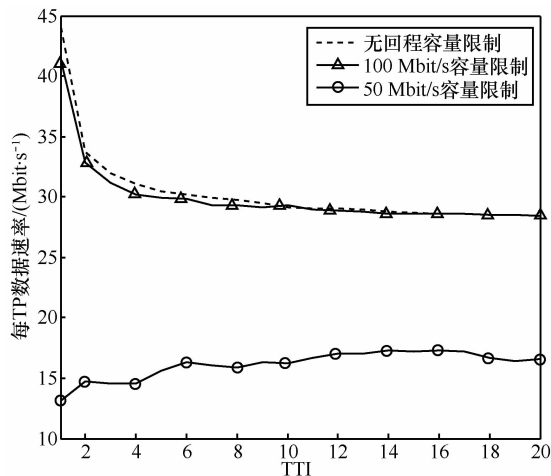


图 3 不同回程链路容量限制下每 TP 的总数据速率

下降到 15~18 Mbit/s。这一结果说明了回程链路容量限制对系统数据速率的严重影响。

为了清楚地观察系统中用户数据率的公平性,本文采用了参考文献[18]中公平性系数  $F$  的定义:

$$F = \frac{\left( \sum_{k \in \Lambda} R_k \right)^2}{K \sum_{k \in \Lambda} R_k^2} \quad (19)$$

图 4 显示了不同回程链路容量限制下系统的用户数据率公平性,结果表明 50 Mbit/s 回程链路容量下系统的公平性出现明显下降。在无限制或 100 Mbit/s 回程链路容量下,系统的公平性系数可高达 0.75。然而,当回程链路容量下降到 50 Mbit/s 时,系统得到的公平性系数最高只有 0.48。这是因为,当回程链路容量受限时,为了减小回程链路的负载,系统不得不减少 CoMP 传输的数量。因此,原本可通过 CoMP 传输得到服务质量提升的小区边缘用户,无法得到足够的数据速率,从而导致了系统整体公平性的下降。

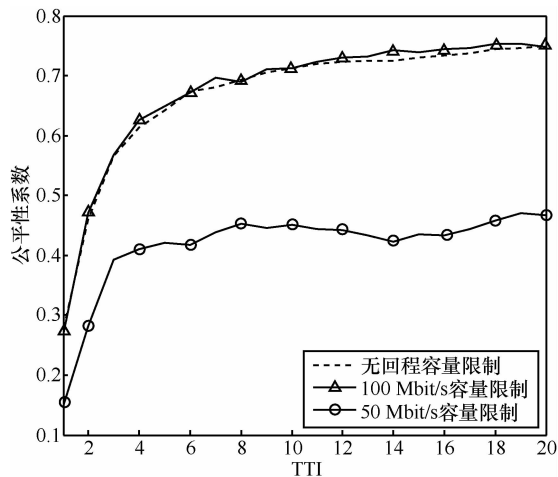


图 4 不同回程效率容量限制下系统的公平性系数

图 5 给出了不同回程链路容量限制下系统的能量效率。不同于图 3 和图 4 中的结果,图 5 中的结果表明回程链路容量限制并不会导致系统能量效率的降低。这是因为,由于回程链路容量有限导致系统在每 TTI 中实施的传输数量下降,因此相应地能量消耗也有所降低,因此系统能量效率得以保障。

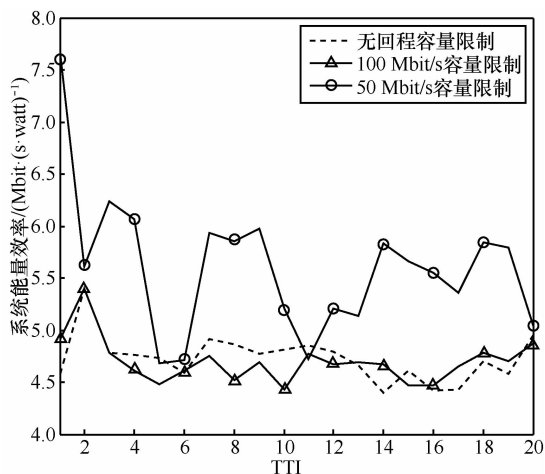


图 5 不同回程链路容量限制下系统的能量效率

仿真实验还探讨了不同 QoS 要求对系统性能的影响。图 6 给出了不同 QoS 要求下,网络中每 TP 的平均数据速率。可以看出,随着 QoS 的增加,系统的数据速率得到了相应的提升。当  $R_{\text{thres}}$  为 180 kbit/s 时,系统每 TP 的平均数据速率只略高于 26 Mbit/s;提升  $R_{\text{thres}}$  到 360 kbit/s 时,每 TP 的平均数据速率上升至 28 Mbit/s 以上;而当  $R_{\text{thres}}$  为 540 kbit/s 时,每 TP 的平均数据速率可接近于 30 Mbit/s。

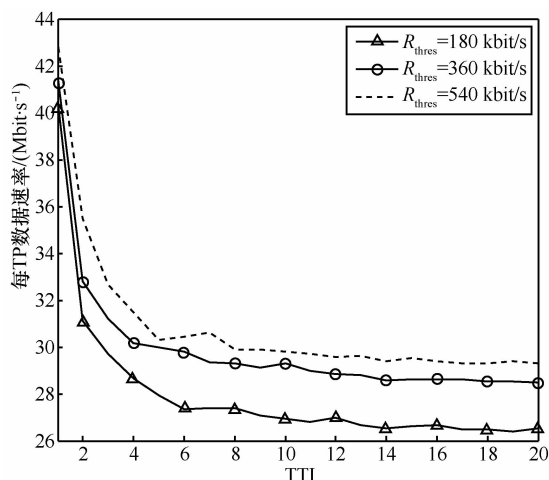


图 6 不同 QoS 要求下每 TP 的总数据速率

图 7 给出了不同 QoS 要求下系统的能量效率。可以看出,  $R_{\text{thres}}$  为 180 kbit/s 和 360 kbit/s 时系统得到的能量效率

相近。然而当  $R_{\text{thres}}$  提高到 540 kbit/s 时,系统的能量效率略有提升。这是因为,当  $R_{\text{thres}}$  提高到 540 kbit/s 时系统在每 TTI 中实施的传输数量减少,相应的能量消耗有所降低。与此同时,由于系统保障了实施的每次传输都能获得较高的数据速率,因此网络的总数据速率较高。系统的高数据速率和低能量消耗最终导致了系统能量效率的提升。

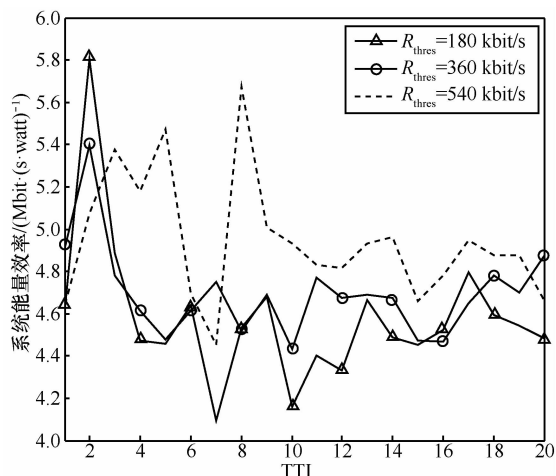


图 7 不同 QoS 要求下系统的能量效率

## 5 结束语

基于 CoMP 的异构网络能够有效提升移动通信系统的频谱效率和能量效率,而合理有效的无线资源分配策略是保障密集网络系统性能的重要前提。本文根据基于 CoMP 的异构网络特点,提出了一种基于交叉熵方法的分布式资源分配算法。算法首先根据预估的用户数据速率设定样本生成概率,有效加快了算法的收敛速度。然后,通过对生成概率的不断迭代,得到了满足回程链路容量限制的最优调度结果。最后,算法根据给定的数据速率阈值对调度结果进行修正,保障了传输的最小数据速率要求。通过仿真实验,验证了本文提出的资源分配算法在提高系统吞吐量、能量效率以及用户公平性等方面的有效性和可行性。

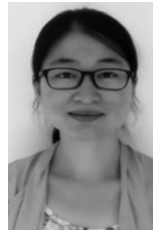
## 参考文献

- 1 Damjanovic A, Montojo J, Wei Y, *et al.* A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3): 10~21
- 2 Bottai C, Cicconetti C, Morelli A, *et al.* Energy-efficient user association in extremely dense small cell networks. *Proceedings of 2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Bologna, Italy, 2014: 1~5



- 3 Zhang J, Feng J, Liu C, *et al.* Mobility enhancement and performance evaluation for 5G ultra dense networks. Proceedings of 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), LA, USA, 2015: 1793~1798
- 4 Hashim W, Anas N M. Power adjustment in dense deployment network an empirical study. Proceedings of TENCON 20-14-2014 IEEE Region 10 Conferece, Bangkok, Thailand, 2014: 1~5
- 5 Gotsis A G, Stefanatos S, Alexiou A. Spatial coordination strategies in future ultra dense wireless networks. Proceedings of 11th International Symposium on Wireless Communications System (ISWCS), Barcelona, Spain, 2014: 801~807
- 6 Hoydis J, Kobayashi M, Debbah M. Green small-cell networks. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2011, 6(1): 37~43
- 7 Hattachi R E, Robson J. NGMN White Paper, Next Generation Mobile Networks Alliance. [https://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN\\_5G\\_White\\_Paper\\_V1\\_0.pdf](https://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf), 2015
- 8 Karakayali M, Foschini G, Valenzuela R. Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems. IEEE Wireless Communication, 2006, 13(4):56~61
- 9 Zhou S, Zhao M, Xu X, *et al.* Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access. IEEE Communication Magazine, 2003, 41(3): 108~113
- 10 Irmer R, Droste H, Marsch P, *et al.* Coordinated multipoint: concepts, performance, and field trial results. IEEE Communications Magazine, 2001, 49(2):102~111
- 11 Costa M H M. Writing on dirty paper (Corresp). IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(3): 439~441
- 12 Mäattänen H, Hämäläinen K, Venäläinen J, *et al.* System-level performance of LTE-Advanced with joint transmission and dynamic point selection schemes. EURSIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012(247): 1~18
- 13 Yu W, Kwon T, Shin C. Multicell coordination via joint scheduling, beam forming, and power spectrum adaptation. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 1~14
- 14 Rubinstein R Y. Optimization of computer simulation models with rare events. European Journal of Operational Research, 1997, 99(1): 89~112
- 15 Rubinstein R Y. The cross-entropy method for combinatorial and continuous optimization. Methodology and Computing in Applied Probability, 1999, 1(2): 127~190
- 16 Salo J, Galdo G D, Salmi J, *et al.* MATLAB Implementation of the 3GPP Spatial Channel Model. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TR 25.996, 2005
- 17 Dinnis A K, Thompson J S. The effects of including wraparound when simulating cellular wireless systems with relaying. Proceedings of IEEE 65th Vehicular Technology Conference, Dublin, Ireland, 2007: 914~918
- 18 Shen Z, Andrews J, Evans B. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2726~2737

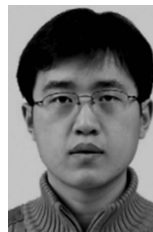
#### [作者简介]



于佳,女,哈尔滨工业大学深圳研究生院博士生,主要研究方向为 5G 移动通信系统。



王野,男,哈尔滨工业大学深圳研究生院在站博士后,主要研究方向为认知无线电。



吴绍华,男,哈尔滨工业大学深圳研究生院副教授,主要研究方向为 5G 移动通信系统。



张钦宇,男,哈尔滨工业大学深圳研究生院教授,主要研究方向为 5G 移动通信系统和深空通信。