

# 基于用户组簇的 LTE 上行链路联合调度和功率分配算法

邹国祺<sup>1</sup>, 徐景<sup>1,2</sup>, 朱元萍<sup>1,2</sup>

(1. 中科院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 上海无线通信研究中心, 上海 201210)

**摘要:**在同频组网的 LTE 系统中,严重的小区间干扰成为限制小区边缘用户性能提升的瓶颈.在 LTE 上行链路中,传统的单小区独立调度算法并未考虑小区间干扰情况.为此,提出了一种基于用户组簇的联合调度和功率分配方案,以抑制小区间干扰,提升系统性能.该方案对来自不同小区的用户组簇,以用户簇为对象执行基于正比例公平(PF)准则的联合调度,并根据簇内用户相互干扰情况建立功率优化模型,通过求解该模型次优解得到联合功率分配方案.系统仿真结果表明,基于用户组簇的联合调度和功率分配方案能够改善边缘用户吞吐量,同时显著提升系统吞吐量.

**关键词:** LTE 上行链路; 用户组簇; 联合调度; 联合功控

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.04.006

**引用格式:** ZOU Guoqi, XU Jing, ZHU Yuanping. Cooperative scheduling and power allocation scheme based on user clustering in LTE uplink[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(4): 294-301.

邹国祺, 徐景, 朱元萍. 基于用户组簇的 LTE 上行链路联合调度和功率分配算法[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(4): 294-301.

## Cooperative scheduling and power allocation scheme based on user clustering in LTE uplink

ZOU Guoqi<sup>1</sup>, XU Jing<sup>1,2</sup>, ZHU Yuanping<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

2. Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** Inter-cell interference is serious in LTE co-channel networks, which becomes the bottleneck of outage performance enhancement in LTE networks. However, inter-cell interference is not considered when applying conventional single-cell scheduling algorithms in LTE uplink. A cooperative scheduling and power allocation scheme based on user clustering was proposed in order to mitigate inter-cell interference and enhance system performance, in which users from different cells who share the same resource blocks were clustered. The cooperative scheduling algorithm based on the proportional fair criterion was developed to allocate resources among user clusters. The cooperative power allocation was achieved by solving a set of power optimization problems formulated with interference among users in the same user cluster. The simulation result shows that the cooperative scheduling and power allocation scheme based on user clustering is efficient in terms of outage throughput, while greatly enhancing system throughput.

**Key words:** LTE uplink; cooperative scheduling; cooperative power control

**收稿日期:** 2014-10-22; **修回日期:** 2014-12-03

**基金项目:** 科技部国际合作项目(2014DFE10160), 国家自然科学基金(61471347), 中国高技术研究发展(863)计划(2014AA01A701), 工业和信息化部重大专项(2015ZX03001032), 上海市重大项目(14511101501), 上海市自然科学基金(15ZR1439700)资助.

**作者简介:** 邹国祺, 男, 1989年生, 硕士生. 研究方向: LTE网络无线资源管理. E-mail: guoqi.zou@wico.sh

**通讯作者:** 徐景, 博士/研究员. E-mail: jing.xu@wico.sh

## 0 引言

LTE上行链路采用单载波频分多址(SC-FDMA)技术,利用子载波的正交性,有效地消除了小区内用户(user equipment, UE)之间干扰。然而,在同频组网方式中,小区间干扰严重,降低了小区边缘用户吞吐量和系统吞吐量。因此,如何有效抑制小区间干扰成为LTE网络中无线资源管理的重要研究方向。

近年来,大量涌现的各类小区间干扰协调技术(inter cell interference coordination, ICIC)力求在时频域上避免相邻小区的边缘用户使用相同的资源,以达到抑制小区间干扰的目的<sup>[1]</sup>。3GPP为LTE上行链路干扰协调定义了高干扰指示(high interference indication, HII)和过载指示(overload indication, OI)两种信息<sup>[2]</sup>,但并没有给出具体的协调方案。文献<sup>[3]</sup>提出了一种联合利用HII和OI的上行ICIC方案,以提高用户满意度为目标,使用小区特定的HII进行频域协调,同时利用OI信息进行小区间功率调整。此类方案能有效抑制小区间干扰,显著改善小区边缘用户性能;但由于限制了边缘用户的可用频率资源,因此在一定程度上降低了系统吞吐量和系统频谱利用率<sup>[4]</sup>。另一方面,小区间HII和OI信息交互存在时延,据此得到的资源分配方式可能不是当前时刻的最优分配。文献<sup>[5]</sup>把多小区上行联合功率控制问题建模成一个全局优化问题,并提出了一种分布式的求解方法,由于该算法对基站的计算能力和所有基站间信息传递的实时性要求较高,在当前的网络环境下难以实现<sup>[6]</sup>。文献<sup>[7]</sup>提出了一种上行多小区聚簇的联合调度算法,该算法根据簇内小区的吞吐量决定簇内小区依次执行调度的顺序,簇内每个小区都会考虑前面已完成调度的小区的干扰信息再进行本小区的调度。在此基础上,文献<sup>[8]</sup>考虑了簇外小区的干扰,并且对优先调度的小区受到后调度的小区的簇内干扰进行估计,改进后的联合调度算法很好地抑制了小区间的干扰,并提升了系统吞吐量。文献<sup>[7-8]</sup>中提出的簇内小区按照一定先后顺序执行调度的方式,由于先调度的小区无法准确获得簇内小区的干扰信息,难以保证小区之间的公平性。而且随着组簇的小区数量增加,这种调度方式的时延愈发难以忽视,不利于系统性能的提升。

通过对小区间上行干扰场景进行分析,不难发

现:对于某个小区的边缘用户而言,其距离相邻小区基站近,且发射功率往往较大,若其占用的资源块(resource block, RB)在相邻小区亦被调度给边缘用户,则会导致相邻小区相应用户的上行链路信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)较低;若该RB在相邻小区被调度给中心用户,由于中心用户的信号链路的损耗比边缘用户低得多,其SINR较之边缘用户要高。由此可见,不同小区之间的资源调度策略相互作用,进而影响系统性能。传统的单小区独立资源分配算法仅考虑本小区的用户资源需求,没有考虑相邻小区调度策略的影响,在提升系统性能方面的效果十分有限。

为了减少强干扰用户的影响,提升系统吞吐量,本文提出一种基于用户组簇的联合调度和功率分配方案。该方案借鉴文献<sup>[9-10]</sup>中对信号发送端分簇的思想,以减少用户相互间干扰影响为目的对不同小区的用户按一定规则组簇,簇内用户使用相同的RB资源,然后根据正比例公平(proportional fairness, PF)准则为各簇分配RB,并利用簇内用户间相互干扰信息建立优化模型优化用户发射功率。

## 1 系统模型

本文考虑的系统模型中,基站采用扇区化天线,用户终端采用全向天线,每个用户终端有1根发射天线,而基站在每个小区配备2根接收天线。如图1所示,每个基站管理三个小区,基站位于三个小区的交界处。小区间的联合调度在同一个基站所辖的三个小区中进行。假设每个小区都有 $M$ 个用户,用户在小区内服从均匀分布。

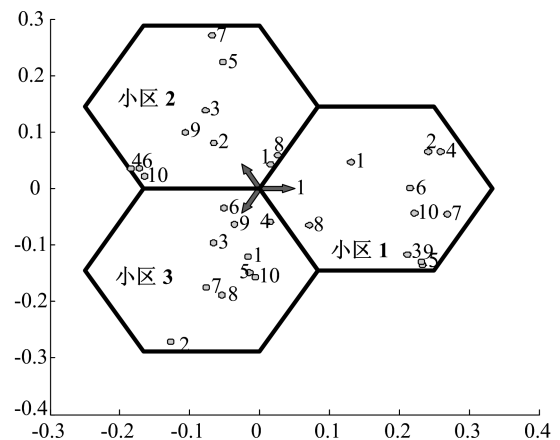


图1 三小区系统模型图

Fig. 1 The system model of 3 cells

基站可以获取站内所有用户的上行链路发射功

率和信道状态信息,然后根据这些信息将用户分簇,继而以簇为单位进行资源的分配.每个簇由来自同一个基站不同小区的 3 个用户组成,同一个簇内的用户使用相同的 RB,因此只有簇内用户之间才存在相互干扰.在固定带宽分配模式下,基站每次为每个用户簇分配  $r$  个连续的 RB.假设基站侧采用最大比合并(maximum ratio combining, MRC)接收机,则用户  $i$  在  $RB_k$  上的 SINR 为:

$$\text{SINR}_{i,k}(\mathbf{P}) = p_{i,k} \left( \frac{g_{i,l,k,1}}{I_1} + \frac{g_{i,l,k,2}}{I_2} \right) \quad (1)$$

式中,

$$I_a = \sum_{n \in C_s, n \neq i} p_{n,k} \cdot g_{n,l,k,a} + I_{\text{inter\_site},l,a} + \sigma_{\text{RB}}^2, a \in \{1,2\} \quad (2)$$

信道增益  $g_{i,l,k,a}$  包含了用户  $i$  到服务小区  $l$  的天线  $a$  在  $RB_k$  上的大尺度和小尺度信道信息,  $C_s$  是用户  $i$  所属用户簇  $s$  的用户集合,  $\mathbf{P}$  是系统用户在  $RB_k$  上的功率分配矢量,  $p_{i,k}$  表示用户  $i$  在  $RB_k$  上的发射功率,  $I_{\text{inter\_site},l,a}$  是小区  $l$  的天线  $a$  受到其他基站的小区的用户干扰的总和,  $\sigma_{\text{RB}}^2$  则是一个 RB 上的平均噪声功率.

## 2 联合资源分配方案

### 2.1 站内用户组簇

在进行多小区联合调度之前,先结合用户在小区中所处的位置及其对相邻小区的上行干扰水平,对用户进行分类,然后再以最小化簇内用户的相互干扰影响为目标,对来自同一个基站所辖的不同小区的用户进行组簇.用户在小区中所处的位置由其到本小区基站天线之间的传播损耗(包含路损、阴影衰落和天线增益)PL 表征,可根据一个给定的门限 PL\_TH 用于区分中心用户和边缘用户.用户对相邻小区的干扰水平可以通过用户到本小区基站天线的传播损耗 PL 和用户到相邻小区基站天线的传播损耗 PL\_adj 的差值(PL-PL\_adj)来表征,差值越大表示用户对相邻小区的干扰越强.类似地,也可根据一个给定的传播损耗差值门限值 interference\_TH 来区分用户对相邻小区的上行干扰水平强弱.根据上述两类门限,可以将一个小区中的用户分成 4 类,具体分类规则如下:

1 类:  $\text{PL} < \text{PL\_TH}, \max(\text{PL} - \text{PL\_adj1}, \text{PL} - \text{PL\_adj2}) < \text{interference\_TH}$ ;

2 类:  $\text{PL} < \text{PL\_TH}, \max(\text{PL} - \text{PL\_adj1},$

$\text{PL} - \text{PL\_adj2}) \geq \text{interference\_TH}$ ;

3 类:  $\text{PL} \geq \text{PL\_TH}, \max(\text{PL} - \text{PL\_adj1}, \text{PL} - \text{PL\_adj2}) < \text{interference\_TH}$ ;

4 类:  $\text{PL} \geq \text{PL\_TH}, \max(\text{PL} - \text{PL\_adj1}, \text{PL} - \text{PL\_adj2}) \geq \text{interference\_TH}$ .

各类用户在小区中分布示例见图 2.

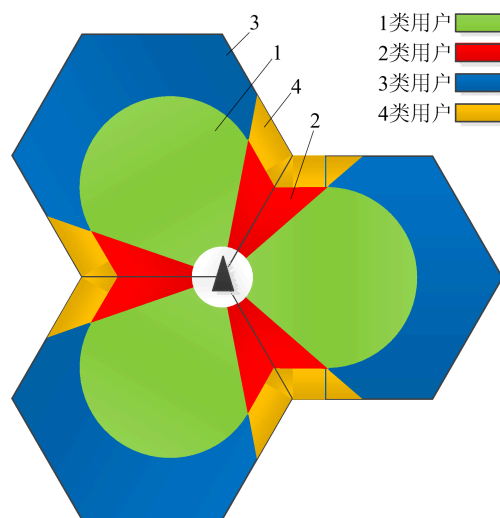


图 2 四类用户分布区域示意图

Fig. 2 The distribution of four kinds of users

根据上述分类结果,三个小区中的用户组成 4 类用户候选集  $CS_1$ 、 $CS_2$ 、 $CS_3$  和  $CS_4$ ,最大用户簇数等于小区内用户数  $M$ .由于 2 类用户和 4 类用户对相邻小区造成的干扰较强,我们将两个相邻小区中受这两类用户干扰较大的小区定义为强干扰对象小区,且在组簇过程中优先考虑对这两类用户进行组簇.具体地,各类用户组簇步骤描述如下:

**步骤 1** 若  $CS_2$  不是空集,从  $CS_2$  选取一个 2 类用户  $u^* = \arg \max_{u \in CS_2} \{\max(\text{PL}_u - \text{PL}_{\text{adj1}}, \text{PL}_u - \text{PL}_{\text{adj2}})\}$ .若当前用户簇数量小于最大用户簇数,从用户  $u^*$  的强干扰对象小区中选取一个用户  $u$  与  $u^*$  组簇,用户  $u$  选择的优先级由高到低依次为:1 类用户,强干扰对象小区不是用户  $u^*$  所在小区的 2 类用户,3 类用户,强干扰对象小区不是用户  $u^*$  所在小区的 4 类用户,除上述用户外的其他用户;否则,将  $u^*$  加入用户簇  $C^*$  且  $C^*$  满足

$$C^* = \arg \max_{C_k} \left\{ \frac{S_i}{I_{u^*, \text{BS}(i)}} + \frac{S_j}{I_{u^*, \text{BS}(j)}} (i, j \in C_k) \right\},$$

其中  $S_j$  是用户  $j$  的接收功率,  $I_{u^*, \text{BS}(j)}$  表示用户  $u^*$  对簇  $C_k$  内用户  $j$  服务基站  $\text{BS}(j)$  的干扰.从对应的

候选集删除已完成组簇的用户. 继续执行步骤1, 为  $CS_2$  中的其他用户组簇, 直至  $S_2$  变为空集;

**步骤2** 按2类用户组簇方法为  $CS_1$  中的4类用户组簇, 直至  $CS_1$  变为空集;

**步骤3** 若  $CS_3$  不是空集, 从  $CS_3$  中选择一个信号链路损耗最小的用户  $u_3$ , 将  $u_3$  加入一个簇  $C^*$ , 要求该簇不存在与  $u_3$  同小区的用户且满足

$$C^* = \arg \max_{C_k} \left\{ \frac{S_{u_3}}{I_{i,BS(u_3)} + I_{j,BS(u_3)}} (i, j \in C_k) \right\},$$

其中  $I_{j,BS(u_3)}$  表示簇内用户  $j$  对用户  $u_3$  服务基站的干扰. 若不存在这样的簇, 从受  $u_3$  干扰最大的相邻小区选择一个用户与  $u_3$  组簇, 用户选择优先级依次为1类用户和3类用户. 从对应的候选集删除已完成组簇的用户. 执行步骤3直至  $CS_3$  变为空集;

**步骤4** 若  $CS_1$  不是空集, 从  $CS_1$  中选择一个信号链路损耗最小的用户  $u_1$ , 将  $u_1$  加入一个簇, 要求该簇不存在与  $u_1$  同小区的用户且满足

$$C^* = \arg \min_{C_k} \left\{ \frac{S_{u_1}}{I_{i,BS(u_1)} + I_{j,BS(u_1)}} (i, j \in C_k) \right\}.$$

若不存在这样的簇, 从  $CS_1$  任意选择  $u_1$  的相邻小区1类用户组簇. 从对应的候选集中删除已完成组簇的用户. 执行步骤4直至  $CS_1$  变为空集.

## 2.2 基于PF准则的簇调度算法

定义  $R_i(t)$  为用户  $i$  在过去  $t$  个时刻的长期平均吞吐量,  $r_{i,k}(t)$  为  $t$  时刻用户  $i$  在资源块  $k$  上的瞬时吞吐量,  $R_i(t+1)$  的更新公式表示为:

$$R_i(t+1) = (1-\tau)R_i(t) + \tau \sum_k r_{i,k}(t+1) \quad (3)$$

其中  $\tau$  是遗忘因子,  $r_{i,k}(t)$  的值跟调度结果有关, 该值由香农公式估算, 即

$$r_{i,k}(t) = \begin{cases} W_{RB} \log_2 [1 + \text{SINR}_{i,k}(\mathbf{P}_t)], & \text{用户 } i \text{ 在 } t \text{ 时刻被调度到 } RB_k \text{ 上} \\ 0, & \text{用户 } i \text{ 在 } t \text{ 时刻没有被调度到 } RB_k \text{ 上} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $W_{RB}$  是一个RB的带宽,  $\text{SINR}_{i,k}(\mathbf{P}_t)$  是  $t$  时刻用户  $i$  在  $RB_k$  上的 SINR,  $\mathbf{P}_t$  表示  $t$  时刻在  $RB_k$  上的用户发射功率矢量.

根据文献[11], 易知PF调度算法的目标函数为关于用户吞吐量的比例公平准则函数:

$$\max \sum_i \log R_i(t) \quad (5)$$

要式(5)成立, 则在  $t$  时刻的调度策略须满足:

$$\max \left\{ \sum_i \log R_i(t) - \sum_i \log R_i(t-1) \right\} \quad (6)$$

将公式(3)代入式(6), 根据线性近似原理<sup>[12]</sup>可得

$$\begin{aligned} & \max \sum_i [\log R_i(t) - \log R_i(t-1)] \\ & \approx \sum_i \frac{1}{R_i(t)} [R_i(t) - R_i(t-1)] \quad (7) \\ & = \sum_i \sum_k \frac{r_{i,k}(t)}{R_i(t)} - U\tau \end{aligned}$$

式中,  $U$  表示系统用户数. 因此, 式(6)可以等价于:

$$\max \sum_i \sum_k \frac{r_{i,k}(t)}{R_i(t)} \quad (8)$$

定义  $C_s$  为第  $s$  个用户簇的用户集合, 式(8)在用户组簇场景下可描述为:

$$\max \sum_s^{cluster\_number} \sum_{i \in C_s} \sum_k \frac{r_{i,k}(t)}{R_i(t)} \quad (9)$$

基于PF准则的簇调度算法就是要寻找合适的用户簇和RB资源组合, 以满足式(9). 然而这是一个非确定多项式(NP)问题, 采用启发式的最大包络迭代搜索方法<sup>[11]</sup>近似求解该问题, 迭代搜索方法的复杂度为  $O(MK_c \cdot \min(M, K_c))$  ( $K_c$  表示小区RB资源数目). 具体地, 基于用户簇的调度准则表示为:

$$(C_s^*, k^*) = \arg \max_{(C_s, k)} \sum_{j \in C_s} \frac{r_{j,k}(t)}{R_j(t)} \quad (10)$$

定义用户簇  $C_s$  在资源块  $k$  上的优先级如下:

$$\omega_{C_s, k} = \sum_{j \in C_s} \frac{r_{j,k}(t)}{R_j(t)} \quad (11)$$

在固定带宽分配模式下, 连续的  $r$  个RB组成一个资源块组RG, 基站每次调度为每个用户分配一个RG. 用户簇  $C_s$  在第  $m$  个RG (即  $RG_m$ ) 的优先级由该用户簇在  $RG_m$  内  $r$  个资源块优先级的均值表示, 即

$$\text{Prior}(C_s, RG_m) = \frac{1}{r} \sum_{k \in RG_m} \omega_{C_s, k} \quad (12)$$

根据所有用户簇和各个RG对应的优先级, 可以建立优先级表  $\text{Prior}(C, RG)$ , 该表中的第  $(s, m)$  个元素为  $\text{Prior}(C_s, RG_m)$ .

基于PF准则的簇调度算法步骤如下:

**步骤1** 根据式(11)计算用户簇优先级  $\omega_{C_s, k}$ , 然后由式(12)计算各用户簇在各个RG的优先级, 建立优先级表  $\text{Prior}(C, RG)$ ;

**步骤2** 在优先级表  $\text{Prior}(C, RG)$  中查找具有最大值的优先级的组合  $\text{Prior}(C_s^*, RG_m^*)$ ;

**步骤3** 把资源块组  $RG_m^*$  分配给用户簇  $C_s^*$ ;

**步骤4** 将优先级表中第  $s^*$  行和第  $m^*$  列的元素置零;

**步骤 5** 重复步骤 2~4 步,直至优先级表元素全为零.

### 2.3 联合功率分配

以系统用户吞吐量比例公平准则为目标函数,设立最小 SINR 和最大发射功率约束条件建立联合功率优化模型如下:

$$\begin{aligned} \max \Gamma(W_{i,s}, P_{i,s}) = & \\ & \sum_{s=1}^M \sum_{i=1}^N \log[W_{i,s} \log_2(1 + \text{SINR}_{i,s})] \\ \text{s. t.} & \\ & \frac{S_{i,s}}{I_{i,s} + N_0} \geq \gamma_{\min}, s \in [1, \dots, M], i \in [1, \dots, N] \\ & W_{i,s} \cdot \text{PSD}_{i,s} \leq P_{\max}, s \in [1, \dots, M], i \in [1, \dots, N] \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $M$  是用户簇数,  $N$  是每个用户簇的用户数,  $S_{i,s}$  表示用户簇  $s$  的用户  $i$  的接收信号功率,  $I_{i,s}$  表示该用户受到的干扰,  $N_0$  是噪声功率,  $W_{i,s}$  是用户使用的频谱带宽,  $\text{PSD}_{i,s}$  表示用户发射功率谱密度,  $\gamma_{\min}$  是簇内最小信干噪比约束值,  $P_{\max}$  是用户最大发射功率. 本文中考虑固定带宽分配场景,故可将(13)式中的  $W_{i,s}$  视为常数,以简化数学模型. 在站内用户组簇场景下,各个用户簇之间不会同时使用相同的频率资源,用户受到的站内干扰仅来自簇内用户,故每个用户簇内功率分配优化的过程可以独立执行. 因此,系统联合功率分配问题可以分解为  $M$  个用户簇的簇内联合功率优化子问题,该优化子问题的简化数学模型如下:

$$\begin{aligned} \max_P \sum_{i=1}^N \log[\log(1 + \text{SINR}_i(\mathbf{P}))] \\ \text{s. t. } \text{SINR}_i(\mathbf{P}) = & \frac{2P_i G_i^{\text{BS}(i)}}{\sigma^2 + I_{\text{inter\_site}} + \sum_{j \neq i}^N P_j G_j^{\text{BS}(i)}}, \\ & i = 1, \dots, N \\ \text{SINR}_i(\mathbf{P}) \geq & \gamma_{\min}, i = 1, \dots, N \\ 0 \leq P_i \leq & P_{\max}/y, i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (14)$$

$\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N]$  是簇内用户在一个 RB 上的发射功率矢量,  $G_n^{\text{BS}(i)}$  表示用户  $n$  到用户  $i$  的服务基站的大尺度信道增益.  $I_{\text{inter\_site}}$  是基站受到的站外干扰功率,该值可以通过基站测量获得. 由于基站端是双天线 MRC 接收机,用户 SINR 可以认为是单天线的两倍.

从凸优化的角度来看,问题(14)不是凸问题,但

可以采用连续凸近似算法<sup>[13]</sup>迭代求得次优解. 具体地,首先用  $e^x$  等价替换优化变量  $\mathbf{P}$ ,使优化变量变为  $\mathbf{x}$ ;然后用不等式

$$\sum_{i=1}^N \log[\log(1 + \text{SINR}_i(e^x))] \geq \sum_{i=1}^N \log[a_i \log(\text{SINR}_i(e^x)) + \beta_i] \quad (15)$$

右边的式子替代原优化问题的目标函数,以构造一个近似的凸问题<sup>[13]</sup>. 式中,

$$a_i = \frac{\text{SINR}_i(\mathbf{P}_m)}{1 + \text{SINR}_i(\mathbf{P}_m)} \quad (16)$$

$$\beta_i = \log(1 + \text{SINR}_i(\mathbf{P}_m)) - a_i \log(\text{SINR}_i(\mathbf{P}_m)) \quad (17)$$

$\mathbf{P}_m$  是给定的功率分配矢量. 近似后的优化问题如下:

$$\begin{aligned} \max_x \sum_{i=1}^N \log[a_i \log(\text{SINR}_i(e^x)) + \beta_i] \\ \text{s. t. } \text{SINR}_i(e^x) = & \frac{2e^{x_i} G_i^{\text{BS}(i)}}{\sigma^2 + I_{\text{inter\_site}} + \sum_{j \neq i}^N e^{x_j} G_j^{\text{BS}(i)}} \quad (18) \\ & i = 1, \dots, N \\ \text{SINR}_i(e^x) \geq & \gamma_{\min}, i = 1, \dots, N \\ x_i \leq x_{\max}, & i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

该凸问题可以通过内点法<sup>[14]</sup>得出最优解  $\mathbf{x}^*$ ,再通过指数函数转换为优化功率矢量  $\mathbf{P}^*$ .

连续凸近似的思想在于通过不断迭代更新近似的凸问题,求解最优值来逼近问题(14)的最优解. 相应的算法描述如算法 1 所示.

**算法 2.1** 连续凸近似算法 Initialize:  $t=0$ , 给定初始功率分配  $\mathbf{P}_0$  和最小 SINR 约束  $\gamma_{\min}$  以及最大迭代次数  $t_{\max}$ ,  $\mathbf{P}_m = \mathbf{P}_0$ ;

repeat:

$\mathbf{P}_m$  代入(16)和(17)分别计算各个 UE 对应的  $a_i$  和  $\beta_i$ ,  $\mathbf{x}_m = \log(\mathbf{P}_m)$ ;

使用内点法求解问题(18),得出最优解  $\mathbf{x}^*$ ;

$t=t+1$ ;

$\mathbf{P}_m = e^{\mathbf{x}^*}$ ;

until  $\|\mathbf{x}^* - \mathbf{x}_m\| \leq 10^{-5}$  或者  $t=t_{\max}$

output:  $\mathbf{P}^* = \mathbf{P}_m$ .

任意设置可行域内的初值点都可以使连续凸近似算法收敛,而且收敛速度与初值点的设置有关,好的初值点能够使算法快速收敛. 由于连续凸近似算法求解非凸问题得到的是近似解,所以求解时没必要等到算法完全收敛,一般只要迭代 5~10 次就可

以得到比较好的近似解<sup>[15]</sup>. 系统联合功率分配算法执行步骤如下:

**步骤 1** 选择基站内一个用户簇;

**步骤 2** 获取簇内用户信道增益信息和干扰信息, 建立如式(14)所示的优化模型;

**步骤 3** 按算法 2.1 求解问题(14)得到簇内用户次优功率分配  $P^*$ ;

**步骤 4** 选择下一个用户簇, 执行步骤 2~3. 直至遍历完所有的用户簇.

### 3 系统仿真及分析

为验证基于 PF 准则的簇调度算法和联合功率分配算法, 本文进行了 LTE 上行链路的系统级仿真. 固定带宽分配模式下每次为被调度的 UE 分配 4 个 RB, 因此在 5 MHz 系统带宽下, 每次调度只能给小区内 6 个 UE 分配资源块组. 具体仿真参数如表 1 所示.

表 1 系统仿真参数

Tab. 1 System simulation parameters

仿真参数	参数设置
基站数目	1
每个基站管理小区数	3
每个小区用户数	10
用户移动速度	3 km/h
系统带宽	5 MHz
系统 RB 数量	24
带宽分配模式	固定带宽分配(4 RB/UE)
簇内用户最小信干噪比	6 dB
PL_TH	117 dB
interference_TH	-40 dB
用户最大发射功率	250 mW
噪声密度	-165 dBm/Hz
信道传输模型	3GPPTypical Urban <sup>[16]</sup>
天线类型	扇区天线
接收机类型	MRC, 2 根接收天线/扇区
调制编码机制	QPSK: 1/3, 1/2, 2/3, 3/4 16QAM: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6
目标 BLER	10%
HARQ	同步 CC, 最大重传次数 8
仿真业务模型	FullBuffer
仿真时间	10 s

为了突显基于簇的联合调度算法和联合功率分配算法(仿真中简称为联合资源分配方案)的效果, 本文将其与两个方案进行了仿真比较. 具体如下:

**方案 1** 小区内独立 PF 调度和开环功控方案(仿真中称为基准方案). LTE 定义开环功率控制方

程如下<sup>[17]</sup>:

$$P = \min\{P_{\max}, P_0 + 10 \log_{10} K + \alpha PL\} \quad (19)$$

式中,  $K$  是用户被分配的 RB 个数,  $PL$  是路径损耗,  $P_0$  是标称功率(其取值范围为  $-126 \sim 24$  dBm),  $\alpha$  是路径补偿因子. 根据经验设置基准方案开环功率控制方程仿真参数为:  $\alpha = 0.8, P_0 = -80$  dBm.

**方案 2** 文献[7]提出的资源管理方案, 该方案在资源调度上提出了一种小区组簇的联合调度算法, 在功率控制方面采用开环功率控制, 本文仿真设置该方案中小区吞吐量滑动平均参数  $\tau = 0.25$ , 开环功控参数设置与基准方案相同.

仿真系统各小区内用户分布情况如图 1 所示. 执行组簇算法后, 用户组簇情况如表 2 所示.

表 2 用户组簇表

Tab. 2 Table of user clusters

用户簇号	小区 1 用户号	小区 2 用户号	小区 3 用户号
1	8	1	9
2	1	8	2
3	10	10	3
4	6	7	4
5	3	3	5
6	9	9	6
7	5	5	1
8	7	4	7
9	4	6	8
10	2	2	10

图 3 给出了采用不同方案时, 用户平均 SINR 累计分布函数. 从图 3 可以看出, 在基准方案下系统中 94% 的用户 SINR 小于 15 dB, 而在联合资源分配方案下 SINR 大于 15 dB 的用户所占比例大于 30%, 约有 3% 的用户的平均 SINR 小于基准方案的最小 SINR(约为 7 dB), 这表明联合资源分配方案通过牺牲小部分用户 SINR 为代价可显著提升系统中大部分用户的 SINR. 文献[7]的方案将绝大部分用户的 SINR 控制在 10~15 dB 范围, 较之基准方案和联合资源分配方案, 在低 SINR 部分性能有一定优势, 但在高 SINR 部分与本文中的联合资源分配方案有较大差距.

图 4 比较了采用不同方案下的用户吞吐量累计分布函数. 由于联合资源分配方案改善了大部分用户的 SINR, 用户可以选择更高阶的调制编码格式来提高吞吐量. 因此联合资源分配方案相对于基准

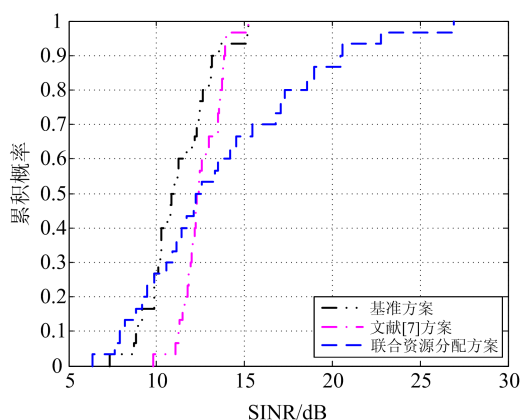


图 3 用户平均 SINR 累计分布函数比较

Fig. 3 Cumulative distribution of user's average SINR

方案在用户吞吐量上有比较明显的改善,高吞吐量用户比例显著提升.文献[7]方案将用户 SINR 控制在比较高的范围,所以低吞吐量用户比例明显比其他两种方案少;然而,联合资源分配方案的高吞吐量用户比例较文献[7]方案大得多,约 25% 的用户吞吐量在 0.7 Mbps 以上,而文献[7]方案的最大用户吞吐量也没有超过 0.7 Mbps.

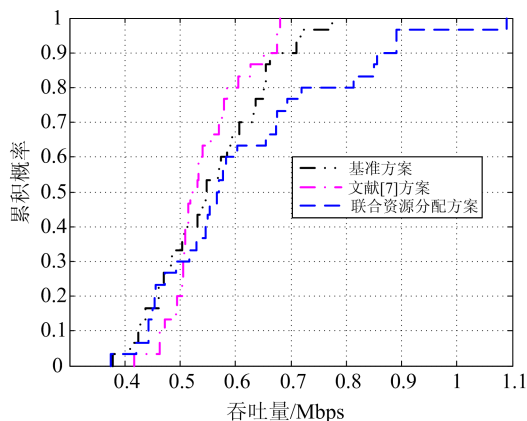


图 4 用户吞吐量累计概率分布比较

Fig. 4 Cumulative distribution of user's throughput

进一步地,图 5 从边缘用户平均吞吐量和系统平均吞吐量两方面来比较三种方案的性能,其中边缘用户吞吐量被定义为累计分布函数中累计概率为 5% 对应的吞吐量.从图 5 可以看出,本文提出的联合资源分配方案在边缘用户平均吞吐量和系统用户平均吞吐量两项指标上均取得比基准方案更好的性能,尤其是对系统用户平均吞吐量的提升,效果非常明显,具体性能增益见表 3;与文献[7]方案相比,联合资源分配方案通过用户组簇调度有效地避免了强干扰用户对系统吞吐量性能的损耗,在系统平均吞吐量性能增益上优势较明显;文献[7]方案的小区组

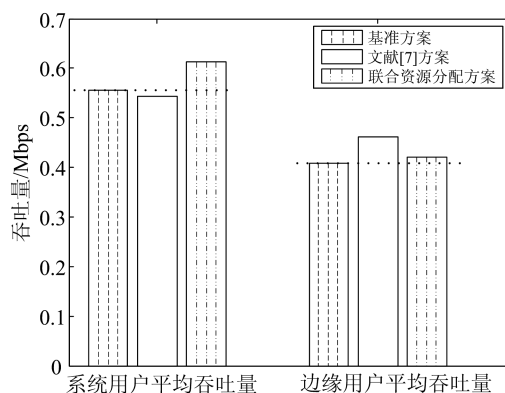


图 5 系统用户平均吞吐量和边缘用户平均吞吐量比较

Fig. 5 Comparison of system average throughput and cell-edge user's average throughput

簇调度算法中,各小区按小区吞吐量按从小到大的顺序先后执行调度,后调度的小区执行调度时考虑了对已完成调度小区用户的干扰影响,能够对所调度小区的边缘用户起到较好的保护作用,所以在边缘用户平均吞吐量上增益比较大,作为代价,其调度优先级的计算复杂度比用户组簇调度算法大得多;并且文献[7]方案对小区间实时信息交互方面具有比较高的要求,对实际系统中的可执行性提出了较大挑战.

表 3 两种方案相对基准方案性能增益对比

Tab. 3 Comparison of performance gains

方案	系统平均吞吐量增益	边缘用户平均吞吐量增益
文献[7]方案	-2.03 %	12.96 %
联合资源分配方案	10.64 %	2.69 %

为衡量方案的公平性,本文采用 Jain's fairness index<sup>[18]</sup>作为公平性指数,其计算公式如下:

$$I_{\text{Jain}} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_i \right|^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (20)$$

式中,  $n$  表示用户数,  $x_i$  表示用户  $i$  已获得分配的资源总数. Jain's 公平指数越高表示资源分配越公平.表 4 列出了三种方案的公平性指数,从对比结果中可以看出,总体上三种方案的公平性指数几乎一致,均体现出良好的公平.

表 4 三种方案公平性指数比较

Tab. 4 Comparison of fairness factor

方案	基准方案	文献[7]方案	联合资源分配方案
$I_{\text{Jain}}$	0.998	0.992 0	0.992 4

以上仿真结果表明,与其他两种方案相比,基于用户组簇的联合资源分配方案能够改善系统中大部分用户的 SINR,在保证边缘用户吞吐量的前提下,取得比较大的系统用户平均吞吐量性能增益,提升了频谱效率。

## 4 结论

本文提出了一种基于用户组簇的联合调度和功率分配方案.其中,基于 PF 准则的联合调度算法考虑了用户簇之间公平性和吞吐量,而联合功率分配优化算法则兼顾了用户簇内的公平性和吞吐量性能.系统仿真结果表明,与传统的单小区独立调度和功控方案相比,该方案有效地避免了强干扰用户和相邻小区的边缘用户使用相同的资源,在保证用户公平性前提下,不仅改善边缘用户性能,同时提升了系统平均性能。

### 参考文献(References)

- [1] Hamza A S, Khalifa S S, Hamza H S, et al. A survey on inter-cell interference coordination techniques in OFDMA-based cellular networks [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 1642-1670.
- [2] 3GPP. Requirements for evolved UTRAN (E-UTRAN) and X2 application protocol (X2AP) V8. 6. 0[R]. Technique Report, 2009.
- [3] 张光荣, 吴文银, 徐茂, 等. 一种联合 HII 和 OI 的上行干扰协调方法[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2012, 29(5): 667-673.  
Zhang G R, Wu W Y, Xu M, et al. An uplink interference coordination scheme by combining HII and OI[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Science*, 2012, 29(5): 667-673.
- [4] Pateromichelakis E, Shariat M, ul Qussus A, et al. On the evolution of multi-cell scheduling in 3GPP LTE/LTE-A[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(2): 701-717.
- [5] Hande P, Rangan S, Chiang M, et al. Distributed uplink power control for optimal SIR assignment in cellular data networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(6): 1420-1433.
- [6] Reider N, Ra cz A, Fodor G. On scheduling and power control in multi-cell coordinated clusters[C]// *Global Telecommunications Conference*. Honolulu, USA: IEEE Press, 2009: 1-7.
- [7] Frank P, Muller A, Droste H, et al. Cooperative interference-aware joint scheduling for the 3GPP LTE uplink[C]// *21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*. Berlin, Germany: IEEE Press, 2010: 2216-2221.
- [8] Niu JP, Lee D, Su T, et al. Multi-cell cooperative scheduling for uplink SC-FDMA systems[C]// *24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*. London, UK: IEEE Press, 2013: 1582-1586.
- [9] Kaviani S, Krzymien W A. Multicell scheduling in network MIMO [C]// *Global Telecommunications Conference*. Miami, USA: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [10] Gong J, Zhou S, Niu Z S, et al. Joint scheduling and dynamic clustering in downlink cellular networks[C]// *Global Telecommunications Conference*. Houston, USA: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [11] Kim H, Han Y. A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems [J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(3): 210-212.
- [12] Stewart J. *Single Variable Calculus; Early Transcendentals* [M]. Belmont: Thomson Higher Education, 2008.
- [13] Wang T, Vandendorpe L. Iterative resource allocation for maximizing weighted sum min-rate in downlink cellular OFDMA systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(1): 223-234.
- [14] Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization*[M]. London: Cambridge university press, 2009.
- [15] Venturino L, Prasad N, Wang X D. A successive convex approximation algorithm for weighted sum-rate maximization in downlink OFDMA networks [C]// *42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems*. Princeton, USA: IEEE Press, 2008: 379-384.
- [16] International Telecommunication Union. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, ITU-R, Report M. 2135-1[S]. 2010.
- [17] Stefania S, Issam T, Matthew B. *LTE-the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*[M]. John Wiley and Sons, 2009. ]
- [18] Jain R, Chiu D M, Hawe W R. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System[M]. Hudson: Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, 1984.