

# 一种适用于 SC-FDMA 多小区系统的协作调度和功率控制算法

牛进平\* 苏涛

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

**摘要:** 该文针对长期演进(LTE)上行单载波频分多址(SC-FDMA)多小区系统的性能受限于小区间干扰的问题,提出一种综合考虑协作调度和功率控制的方案。该方法分步执行小区间的协作调度和功率控制,首先调度各小区中的用户,在此基础上优化用户的发射功率。调度时首先估计小区间的干扰信息并分配频率资源块给每个小区内的用户,在优化用户的发射功率时,同时考虑由于用户功率改变所造成的目标小区和其他干扰小区性能的变化。进一步提出一种低复杂度功率控制方案,在优化目标小区用户的功率时,只考虑受目标小区干扰影响最大的几个小区性能的变化,其他干扰小区性能的变化则通过引入补偿因子来估计。计算机仿真验证了该文所提方法在系统吞吐量和小区边缘吞吐量方面的性能优势显著。

**关键词:** 无线通信; 长期演进; 上行链路; 多小区; 调度; 功率控制

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)02-0411-06

DOI: 10.11999/JEIT140542

## Multi-cell Cooperative Scheduling and Power Control in SC-FDMA Systems

Niu Jin-ping Su Tao

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Inter-cell interference is a major factor that limits the performance of multi-cell systems. In this paper, a cooperative scheduling and power control algorithm for Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA) multi-cell systems is proposed to deal with the inter-cell interference in Long Term Evolution (LTE) uplink. It performs scheduling and power control for each cell separately, which schedules users first and then configures the transmit power for each user. The proposed algorithm performs scheduling by first estimating the inter-cell interference and then assigning resources to users. When optimizing the user's transmit power, the performance variation of both the objective cell and other interfering cells is considered. Furthermore, a power control algorithm with low-complexity is proposed, which only considers the performance change of several cells interfered most by the objective cell and estimates the performance change of all other cells by introducing a compensation factor, when optimizing the transmit power of each user. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm in cell average and cell edge throughput.

**Key words:** Wireless communication; Long Term Evolution (LTE); Uplink; Multi-cell; Scheduling; Power control

### 1 引言

长期演进(LTE)下行系统采用正交频分多址(OFDMA)技术可以有效地对抗多径衰落,提高频谱效率,但是OFDMA技术面临着高峰均功率比问题,对发射端设备中功率放大器的线性度提出了很高的要求,增大了设备的成本。为了降低上行系统中发射端即用户终端设备的成本,并考虑上、下行系统的兼容性,LTE上行系统采用单载波频分多址技术(SC-FDMA)<sup>[1]</sup>。和OFDMA技术相类似,LTE采用SC-FDMA技术时可以利用调度算法给不同的用户

分配不同的信道条件好的频率资源,有效地避免了同一小区内不同用户之间的干扰<sup>[2-8]</sup>,但是不能消除小区之间的干扰。然而,小区间干扰是限制多小区系统性能的主要因素,尤其限制着小区边缘用户的性能。

为了降低小区间干扰的负面效应,文献[9,10]提出利用分数频率复用、软频率复用以及自适应频率复用等技术来应对此问题。这些技术只使用了部分频率资源,没有利用全局频率资源,无法满足高速率数据业务的需求。文献[11,12]采用全局频率资源,利用协作调度方法来调节小区间干扰,但是未考虑闭环功率控制。文献[13]中考虑了功率控制技术,但

是采用迭代方法, 计算复杂度高, 而且忽略了 LTE 标准协议的限制, 不适用于实际的 LTE 系统。

针对上述问题, 该文提出了一种新的适用于 LTE 上行多小区系统的联合协作调度和功率控制方法。首先估计小区间的干扰信息并分配频率资源块给每个小区内的用户, 然后对用户的传输功率进行控制来最大化系统的性能。为了进一步降低计算复杂度, 该文还提出了一种低复杂度功率控制算法, 便于 LTE 上行系统的实际应用和性能提升。因此, 该文的主要创新点可归纳为以下两点: (1) 针对 LTE 系统, 考虑 LTE 协议标准的限制, 提出了一种新的协作调度和功率控制方法; (2) 在上述方法的基础上, 进一步提出了一种低复杂度功率控制方法。

## 2 系统模型

在 LTE 上行多小区系统中, 假设每个基站配置  $N_r$  个接收天线, 每个用户配置一个发射天线。在传输时间间隔  $t$ , 目标小区在频率资源块  $n$  上的接收信号可表示为

$$\mathbf{y}_{n,t} = \underbrace{\mathbf{h}_{n,t} \sqrt{P_{n,t}} x_{n,t}}_{\text{信号}} + \underbrace{\sum_{j \in \mathcal{J}} \mathbf{h}_{j,n,t} \sqrt{P_{j,n,t}} x_{j,n,t}}_{\text{小区干扰}} + \underbrace{\mathbf{z}_{n,t}}_{\text{噪声}} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{h}_{n,t}$  为目标小区在传输时间间隔  $t$  的  $N_r \times 1$  维复信道响应向量, 是从调度在目标小区资源块  $n$  上的用户到目标小区基站的信道;  $P_{j,n,t}$  是从调度在干扰小区  $j$  中的资源块  $n$  上的用户到目标小区的发射功率;  $x_{j,n,t}$  是从调度在干扰小区  $j$  中的资源块  $n$  上的用户到目标小区的功率归一化的发射信号;  $\mathcal{J}$  是干扰小区的小区索引集合;  $\mathbf{h}_{j,n,t}$ ,  $P_{j,n,t}$  和  $x_{j,n,t}$  分别是干扰小区  $j$  中资源块  $n$  上的用户到目标小区的  $N_r \times 1$  维的复信道响应向量、小区  $j$  中资源块  $n$  上的用户的发射功率和功率归一化的发射信号; 发射信号  $x_{j,n,t}$  和  $x_{n,t}$  都是均值为零、方差为 1 的独立随机变量;  $\mathbf{z}_{n,t}$  是目标小区中资源块  $n$  上的  $N_r \times 1$  维复高斯白噪声向量。

从式(1)可以看出, 目标小区的接收信号  $\mathbf{y}_{n,t}$  受到小区间干扰的影响, 因此, 对用户发射功率的配置、用户的调度以及资源分配结果都会影响系统的性能。本文通过考虑多小区协作调度方法和功率控制方案来应对小区间干扰的问题。

## 3 多小区调度和功率控制

由于联合优化多小区协作调度和功率控制复杂度高, 不利于 LTE 系统的实际应用, 本文考虑分布执行用户调度和资源分配以及功率控制。

### 3.1 调度

首先估计在传输时间间隔  $t+1$  时在频率资源块

$n$  上来自其他小区的用户对目标小区所造成的干扰, 可表示为

$$I_{n,t+1} = \sum_{j \in \mathcal{J}} P_{j,n,t} \mathbf{h}_{j,n,t}^H \mathbf{h}_{j,n,t} \quad (2)$$

那么在传输时间间隔  $t$  目标小区用户  $k$  在频率资源块  $n$  上的信干噪比可表示为

$$\gamma_{k,n,t} = \frac{P_{k,t} \mathbf{h}_{k,n,t}^H \mathbf{h}_{k,n,t}}{I_{n,t} + \sigma^2} \quad (3)$$

其中,  $P_{k,t}$  是在传输时间间隔  $t$  只有一个频率资源块分配给用户  $k$  时由开环功率控制所配置的用户  $k$  的发射功率,  $\sigma^2$  为加性高斯白噪声(AWGN)的功率。则在传输时间间隔  $t$  用户  $k$  在频率资源块  $n$  上的数据速率可表示为

$$R_{k,n,t} = G(\gamma_{k,n,t}) \quad (4)$$

其中, 函数  $G(\cdot)$  将信干噪比映射为数据速率<sup>[4]</sup>。为简便起见, 在后续的描述中将省略时间传输间隔  $t$ 。

记  $x_n$  为目标小区在频率资源块  $n$  上的资源分配结果, 即如果频率资源块  $n$  分配给用户  $k$ , 则有  $x_n = k$ 。根据比例公平调度(Proportional Fair Scheduling, PFS)准则, 如果满足:

$$x_n = \hat{k} = \arg \max_k \frac{R_{k,n}}{\bar{T}_k} \quad (5)$$

则在传输时间间隔  $t$  内, 将频率资源块  $n$  将分配给用户  $k$ 。式(5)中,  $\bar{T}_k$  为用户  $k$  在传输时间间隔  $t$  内的指数滑动平均吞吐量, 可表示为

$$\bar{T}_{k,t+1} = (1 - \beta) \bar{T}_{k,t} + \beta T_{k,t} \quad (6)$$

式中,  $T_{k,t}$  为用户  $k$  在传输时间间隔  $t$  的实际吞吐量,  $\beta$  为指数滑动平均因子。

根据 LTE 协议标准<sup>[1]</sup>, 在 SC-FDMA 系统中, 分配给每个用户的频率资源在频域上必须是连续的。因此, 当一个小区初步确定了分配给每个用户的频率资源块之后, 再采用文献[15]中的最大扩展回归(Recursive Maximum Expansion, RME)算法重新调整资源分配结果。

### 3.2 功率控制

当用户调度和资源分配完成之后, 由闭环功率控制配置的用户  $k$  在传输时间间隔  $t$  内每个被分配的频率资源块上的发射功率可表示为<sup>[1]</sup>

$$P_k = \min \left\{ P_{\max}, \underbrace{P_0 + 10 \lg N_k + \alpha P_L}_{\text{开环功率控制部分}} + \underbrace{f(\Delta)}_{\text{闭环功率控制部分}} \right\} \quad (7)$$

式中,  $P_{\max}$  为每个用户的最大发射功率,  $P_0$  为参考功率,  $\alpha$  为路损补偿因子,  $N_k$  为分配给用户  $k$  的频率资源块数,  $P_L$  为下行链路路损, 通过对参考信号接收能量(Reference Signal Received Power,

RSRP)和用户  $k$  的参考信号(Reference Signal, RS)的发射功率的测量获得,  $f(\Delta)$  为闭环功率控制累积量或绝对量修改项, 可以为  $-1, 0, 1$  或者  $3$  dB。

对目标小区利用功率控制后, 式(3)中调度在资源块上  $n$  的用户  $\hat{k} = x_n$  的信干噪比将更新为

$$\gamma_{\hat{k},n} = \frac{P_{\hat{k}} \mathbf{h}_{\hat{k},n}^H \mathbf{h}_{\hat{k},n}}{I_n + \sigma^2} \quad (8)$$

其中,  $P_{\hat{k}}$  是用户  $\hat{k}$  在频率资源块  $n$  上的发射功率, 通过式(7)配置。其他干扰小区  $j \in \mathcal{J}$  的信干噪比更新后的表达式和式(8)基本相同, 只是分母中的干扰项考虑了来自目标小区的用户的功率更新之后的干扰信息。对小区  $j$ , 当目标小区进行功率控制配置时, 其更新之后的干扰项可表示为

$$I_{j,n} = P_{\hat{k}} \mathbf{h}_{\hat{k},j,n}^H \mathbf{h}_{\hat{k},j,n} + \frac{1}{J-1} I_n \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{h}_{\hat{k},j,n}$  是从目标小区分配在频率资源块  $n$  上的用户  $\hat{k}$  到小区  $j$  的干扰信道向量,  $J = |\mathcal{J}|$ , 其中运算符  $|\cdot|$  表示求集合中的元素个数。

因为基于 PFS 准则的调度方法可以折中地考虑用户的吞吐量和用户的公平性问题, 适用于实际的 LTE 系统。本文将基于比例公平准则考查多小区系统的性能, 整个系统的功率控制问题可建模为

$$\max \sum_{n=1}^N \left( \frac{R_{\hat{k},n}}{\bar{T}_{\hat{k}}} + \sum_{j \in \mathcal{J}} \frac{R_{j,n}}{\bar{T}_{j,n}} \right) \quad (10)$$

且满足

$$P_{\hat{k}} \in \mathcal{P}_{\hat{k}} \quad (11)$$

$$P_{j,n} \in \mathcal{P}_{j,n}, \quad j \in \mathcal{J} \quad (12)$$

其中,  $N$  是系统中的总资源块数,  $R_{j,n}$ ,  $\bar{T}_{j,n}$  和  $P_{j,n}$  分别是干扰小区  $j$  中分配在频率资源块  $n$  上的用户的数据速率、平均吞吐量和发射功率,  $\mathcal{P}_{j,n}$  和  $\mathcal{P}_{\hat{k}}$  分别是干扰小区  $j$  和目标小区调度在频率资源块  $n$  上的用户的可能的功率配置值集合。式(10)中的第 1 项计算目标小区的比例公平准则值, 第 2 项计算其他干扰小区的总的比例公平准则值。

上述的问题建模要求联合考虑整个网络中所有小区资源块上所调度用户的功率控制问题, 非常复杂。为了简化问题, 在优化目标小区的功率配置问题时, 进一步假设其他小区中用户的功率配置是固定的, 这样便于依次按单个小区的先后顺序对各个小区的功率进行优化。简化后的问题可建模为

$$\max \sum_{n=1}^N \left( \frac{R_{\hat{k},n}}{\bar{T}_{\hat{k}}} + \sum_{j \in \mathcal{J}} \frac{R_{j,n}}{\bar{T}_{j,n}} \right) \quad (13)$$

且满足

$$P_{\hat{k}} \in \mathcal{P}_{\hat{k}} \quad (14)$$

同一小区内, 不同用户的发射功率是相互独立

的, 这意味着一个用户发射功率的变化不影响本小区内其他用户功率的变化, 因此可以针对每一个用户进行功率控制配置优化, 而不必和式(13), 式(14)一样联合优化一个小区内所有用户的功率。因此, 上述问题建模可进一步简化为

$$\hat{P}_{\hat{k}} = \arg \max_{P_{\hat{k}} \in \mathcal{P}_{\hat{k}}} \sum_{n \in \mathcal{N}_{\hat{k}}} \left( \frac{R_{\hat{k},n}}{\bar{T}_{\hat{k}}} + \sum_{j \in \mathcal{J}} \frac{R_{j,n}}{\bar{T}_{j,n}} \right) \quad (15)$$

式中,  $\mathcal{N}_{\hat{k}}$  为分配给用户  $\hat{k}$  的频率资源块索引集合且  $N_{\hat{k}} = |\mathcal{N}_{\hat{k}}|$ 。根据每个用户的功率配置值和式(7)中  $f(\Delta)$  的变化量范围, 通过搜索确定目标小区内所有被调度的用户发射功率, 然后目标小区将向干扰目标小区的其他小区共享这些功率信息。利用同样的方法即可完成其他小区中用户功率的配置。

因此, 多小区协作调度和功率控制方法可总结为如下几步:

(1) 根据式(2)~式(4)计算用户数据速率;

(2) 根据式(5)完成每个小区内的资源分配, 之后利用 RME 算法重新调整资源分配结果;

(3) 根据式(7)~式(9)更新功率和信干噪比信息;

(4) 根据式(15)来确定每个被分配资源的用户的发射功率。

### 3.3 低复杂度算法

3.2 节中所描述的功率控制算法要求整个网络中的所有小区共享资源分配信息和功率配置信息。在计算目标小区已经被分配资源的用户的功率控制配置信息时, 需要计算所有其他干扰小区相对应的频率资源块上的目标准则值。本节提出一种低复杂度的功率控制方法。

低复杂度功率控制方法的主要思想在于, 只计算受目标小区中已分配资源的用户产生的干扰影响最大的两个邻小区的目标函数准则值。其余小区的目标函数准则值则通过引入目标函数补偿因子  $\lambda$  来估计。

设  $\mathcal{J}_{\max}^{\hat{k}}$  是对目标小区中的用户  $\hat{k}$  产生干扰最大的两个小区的小区索引集合, 则功率控制问题可建模为

$$\hat{P}_{\hat{k}} = \arg \max_{P_{\hat{k}} \in \mathcal{P}_{\hat{k}}} \sum_{n \in \mathcal{N}_{\hat{k}}} \left( \frac{R_{\hat{k},n}}{\bar{T}_{\hat{k}}} + \lambda \sum_{j \in \mathcal{J}_{\max}^{\hat{k}}} \frac{R_{j,n}}{\bar{T}_{j,n}} \right) \quad (16)$$

其中, 补偿因子  $\lambda$  估计了式(16)中所没有考虑的由于用户  $\hat{k}$  功率的变化所引起的其他小区的目标函数准则值的变化。补偿因子  $\lambda$  与整个网络中的小区数、小区布局及其配置, 比如天线方向等信息有关。本文通过仿真选取得到合适的  $\lambda$  值。

式(15)中对问题的建模需要考虑  $J$  个干扰小区由于目标小区功率变化而引起的目标函数准则值的变化情况,共需要计算  $N_k \times J$  项目标准则值,而式(16)中只需要考虑  $J_1 = \left| \mathcal{J}_{\max}^k \right| < J$  (本文中取  $J_1 = 2$ ) 个小区的目标则值,共需要计算  $N_k \times J_1$  项,降低了计算复杂度。另外,式(15)中的问题建模在配置完某个小区中用户的发射功率之后需要向其他的  $J$  个小区分享功率信息来完成其他小区的功率配置,这样的操作需要重复  $J$  次,而式(16)的建模只需要重复  $J_1 < J$  次,降低了系统开销。

多小区调度和低复杂度功率控制方法可以总结为如下几个步骤:

(1)根据式(2)~式(4)计算用户数据速率;

(2)根据式(5)完成每个小区内的资源分配,之后利用 RME 算法重新调整资源分配结果;

(3)根据式(7)~式(9)更新功率和信干噪比信息;

(4)根据式(16)确定每个被分配资源的用户的发射功率。

### 3.4 链路自适应

当整个网络中的所有小区完成调度和功率控制配置之后,资源分配信息和功率控制信息将在整个网络中共享。通过共享的信息,可以重新计算信号、干扰以及信干噪比信息。然后,链路自适应算法将会根据这些更新后的信息为每个用户自适应地选择调制和编码方式(MCS)来进行上行传输。

## 4 仿真结果分析

本节通过 LTE 系统级仿真验证本文算法的有效性。正如引言部分所描述的,已有的算法大多未考虑 LTE 协议标准的限制,因此,本文主要考虑本文算法和基于开环功率控制的单小区调度算法性能的比较。图 1 给出了仿真平台中小区的基本布局:蜂窝布局、7 个站,每站 3 个小区,考虑了环绕式处理技术(wrap around)。本论文中所采用的 LTE 上行系统级仿真根据文献[16]来建模,考虑了 LTE 物理层的规范标准,包括混合自动重传请求(Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)、功率控制、SRS 处理、公用参考信号(Common Reference Signal, CRS)测量以及外环链路适配 (Outer Loop Link Adaptation, OLLA) 算法。仿真中基于外环链路适配算法保证所有用户的首次传输误包率(First packet Error Rate, FER)为 10 %。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数及其配置

| 仿真参数                    | 配置值  |
|-------------------------|--|
| 小区布局                    | 蜂窝布局, 7 个站, 每站 3 个小区, 考虑环绕式处理技术  |
| 每小区的平均用户数               | 10 (210 个用户均匀地撒在整个网络之内)  |
| 信道模型                    | 3GPP Case 1, 空间信道模型 (SCM), 市区宏小区 <sup>[2]</sup>  |
| 小区站间距                   | 500 m  |
| 系统带宽                    | 10 MHz   |
| 载频                      | 2 GHz  |
| 用户速度                    | 3 km/h   |
| 基站接收天线                  | 2 个接收天线: 方向性, 水平半波宽为 $70^\circ$ , 垂直半波束宽为 $10^\circ$ , 垂直波束下倾角为 $15^\circ$ , front to back 比率为 20 dB, 天线增益为 14 dBi, 天线高度为 32 m |
| 基站端噪声                   | 3 dB   |
| 用户发射天线                  | 1 个全向发射天线: 0 dBi 天线增益, 1.5 m 天线高度  |
| 用户位置                    | 100% 室外  |
| 用户最大发射功率                | 23 dBm   |
| 开环功率控制更新时间              | 每 100 ms   |
| 开环功率配置                  | $P_0 = -105$ dBm, $\alpha = 1.0$   |
| 闭环功率控制处理延迟              | 4 ms   |
| 发射角(AoD)                | $15^\circ$   |
| 边缘切换门限                  | 1 dB   |
| HARQ 合并模型               | IR 合并 <sup>[17]</sup>  |
| CRS 处理延迟                | 5 ms   |
| SRS 处理延迟                | 1 ms   |
| 调度延迟(上行 grant 到数据传输的时间) | 4 ms   |
| SRS 传输周期                | 5 ms   |
| 用户到基站的                  | $\geq 35$ m  |
| 最小有效距离                  |  |
| 热噪声谱密度                  | -174 dBm/Hz  |

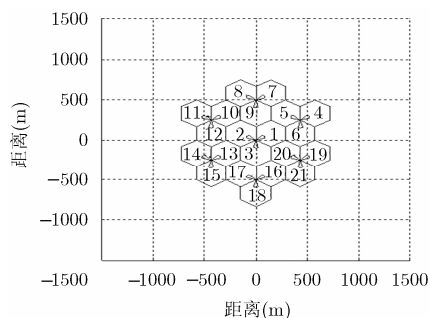


图 1 仿真设置中的小区布局

图 2 分别给出了考虑开环功率控制的单小区调度算法(Single-cell Scheduling, SS), 考虑开环功率控制的多小区协作调度算法(Multi-cell Scheduling, MS), LTE 多小区联合协作调度与功率控制算法(Multi-cell Scheduling and Power Control, MSPC)以及低复杂度LTE多小区联合协作调度与功率控制算法(Low-complexity Multi-cell Scheduling and Power Control, LMSPC)的吞吐量累积量分布函数曲线。从图 2 中可以看出, 多小区协作调度算法的性能优于单小区协作调度算法。多小区协作调度算法性能的增益主要在于小区之间可以共享资源分配信息, 因此可以为用户选择较理想的调制和编码方式。考虑了闭环功率控制之后, 算法的性能相对变好。从图 2 中可以看出, 低复杂度 LTE 多小区联合协作调度与功率控制算法的性能和 LTE 多小区联合协作调度与功率控制算法的性能基本相同。

图 3 给出了本文方法的性能增益, 图中的比较基准为单小区调度算法。从图 3 中可以看出, LTE

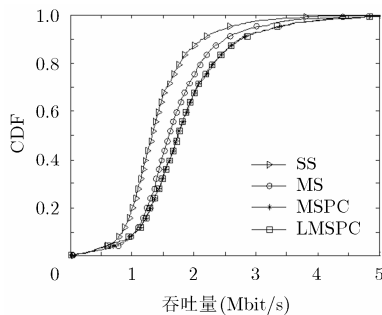


图 2 不同算法的吞吐量的累积量分布函数曲线

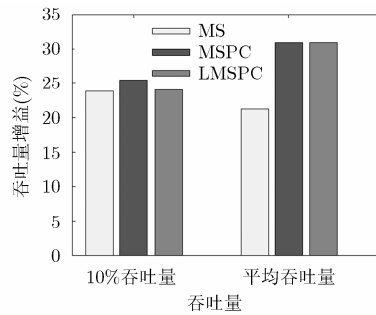


图 3 算法性能增益比较

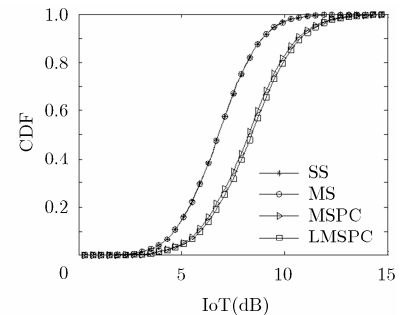


图 4 干扰噪声比 IoT 累积量分布函数曲线

多小区联合协作调度与功率控制算法考虑了来自其他小区的干扰, 其性能最好。相比于单小区算法, 小区边缘性能提升了 26%, 小区平均吞吐量提升了 31%。本文所提出的低复杂度算法的性能优于多小区协作调度算法; 和 LTE 多小区联合协作调度与功率控制算法相比, 系统的 10% 吞吐量有所降低, 但是损失较小, 而二者的系统平均吞吐量性能相当。

图 4 给出了干扰热噪声比(Interference over Thermal, IoT)。从图 4 中可以看出, 不考虑闭环功率控制的单小区调度算法和多小区协作调度算法的干扰热噪声比分布相同, 主要原因在于二者会把相同的频率资源块分配给相同的用户, 而这些用户的功率配置相同。当考虑了闭环功率控制之后, 每个小区的干扰开始增大。基于低复杂度 LTE 多小区联合协作调度与功率控制算法的干扰热噪声比和考虑所有小区干扰的 LTE 多小区联合协作调度与功率控制算法的然绕热噪声比分布相同, 因而导致了二者的性能基本相同。

## 5 结论

本文针对 LTE 上行多小区系统性能受限于小区间干扰的问题, 提出了一种协作调度和功率控制方法和一种低复杂度的功率控制方法。所提算法基于估计的小区间干扰信息来调度每个小区中的用户, 然后考虑 LTE 协议标准的限制, 通过调节已分配资源的用户的功率来最大化目标函数。仿真结果验证了本文算法优于单小区调度算法和未考虑闭环功率控制的多小区协作调度算法。而本文所提出的低复杂度功率控制算法和未降低复杂的算法性能相当。

### 参考文献

[1] 3GPP TS 36.213 V. 11.2.0: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures[S]. 3GPP Standard, 2013.  
[2] Fan J, Li Y G, Yin Q, *et al.* Multiuser pairing and resource allocation with interference avoidance for SC-FDMA cellular

systems[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, Anaheim, CA, 2012: 4993-4997.

[3] Niu Jin-ping, Lee D, Ren X, *et al.* Scheduling exploiting frequency and multi-user diversity in LTE downlink systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(4): 1843-1849.  
[4] Venturino L, Prasad N, and Wang X. Coordinated scheduling and power allocation in downlink multi-cell OFDMA networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(6): 2835-2848.  
[5] Li Y G, Niu Jin-ping, Lee D, *et al.* Multi-Cell Coordinated Scheduling and MIMO in LTE[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2014, 16(2): 761-775.  
[6] 朱元萍, 徐景, 杨旸, 等. 蜂窝系统上行小区间干扰链路统计分析[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(8): 1971-1976.  
Zhu Y, Xu J, Yang Y, *et al.* Statistical analysis of the uplink inter-cell interference for cellular systems[J]. *Journal of*

- Electronics & Information Technology*, 2013, 35(8): 1971-1976.
- [7] Niu Jin-ping, Su Tao, Li Y G, *et al.* Joint transmission mode selection and scheduling in LTE downlink MIMO systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(2): 173-176.
- [8] Lee D, Li Y G, Zhu X, *et al.* Coordinated beamforming for users with multiple antennas in cellular networks[C]. *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, London, 2013: 564-569.
- [9] Huawei. R1-050507, soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE[R]. 3GPP, Technical Report, 2005.
- [10] Nortel. R1-072762, further discussion on adaptive fractional frequency reuse scheme[R]. 3GPP, Technical Report, 2007.
- [11] Frank P, Muller A, Droste H, *et al.* Cooperative interference-aware joint scheduling for the 3GPP LTE uplink [C]. *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, Istanbul, 2010: 2216-2221.
- [12] Kwan R and Leung C. A survey of scheduling and interference mitigation in LTE[J]. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2010, 2010: 1-10.
- [13] Yu W, Kwon T, and Shin C. Multicell coordination via joint scheduling, beamforming and power spectrum adaptation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(7): 1-14.
- [14] Fan J, Yin Q, Li Y G, *et al.* Adaptive block-level resource allocation in OFDMA networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(11): 3966-3972.
- [15] Calabrese F D, Rosa C, Anas M, *et al.* Adaptive transmission bandwidth based packet scheduling for LTE uplink[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Calgary, BC, 2008: 1-5.
- [16] 3GPP TR 25.814 V. 7.1.0 : Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)[S]. 3GPP Standard, 2006.
- [17] Onggosanusi E N, Dabak A G, Hui Y, *et al.* Hybrid ARQ transmission and combining for MIMO systems[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Anchorage, AK, 2003: 3205-3209.
- 牛进平: 女, 1985 年生, 博士, 研究方向为 LTE 无线通信系统中的资源分配问题、跨层优化问题和干扰抑制技术。
- 苏涛: 男, 1968 年生, 教授, 研究方向为资源分配、MIMO 信号处理。