

文章编号:1007-5321(2020)05-0130-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-050

# 多小区下行 NOMA 系统中最大公平的功率分配方案

田心记, 蒋清丽

(河南理工大学 物理与电子信息学院, 焦作 454000)

**摘要:** 对于多小区多簇且每个簇包含任意用户的下行非正交多址接入(NOMA)系统,提出了一种最大公平的功率分配方案. 首先构建了最大公平的功率分配优化问题;推导了单簇内以最大公平为准则的分配功率时,该簇内每个用户的速率与每个簇的总功率之间的关系,并基于该结论,将优化问题中用户间的功率分配转化为簇间功率分配;最后给出了一种基于迭代的簇间功率分配算法,为每个簇平均分配功率并计算单簇内最大公平准则下用户的速率. 通过多次调整最大速率所在小区簇的功率和最小速率所在小区簇的功率,得到该系统中最大公平的功率分配. 仿真结果显示,所提方案的公平性优于相同场景中已有的功率分配方案.

**关键词:** 多小区; 非正交多址接入; 最大公平; 功率分配

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

## Maximum Fairness Power Allocation Scheme in Downlink Multi-Cell NOMA Systems

TIAN Xin-ji, JIANG Qing-li

(School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** A power allocation scheme to maximize fairness is proposed for multi-cell downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems with multi-cluster multi-user. Firstly, the power allocation optimization problem for maximizing fairness is constructed. Then, the relationship between the total power of a signal cluster and the users' rate in the cluster is derived under the criterion of maximum fairness, and based on this conclusion, the power allocation among users in the optimization problem is transformed into that among clusters. Finally, an inter cluster power allocation algorithm based on iterative is presented. This algorithm calculates the user's rate under the maximum fairness criterion by assigning average power for each cluster, and obtains the optimal powers by adjusting the cluster power of the cell with the maximum rate and the cluster power of the cell with the minimum rate. Simulations show that the proposed scheme outperform the existing schemes in terms of fairness.

**Key words:** multi-cells; non-orthogonal multiple access; maximum fairness; power allocation

为适应未来移动数据的指数式增长,第5代移动通信系统(5G, the fifth generation of mobile communications system)应运而生<sup>[1]</sup>. 基于功率域复用

的非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)技术不仅能满足5G在频谱效率和连接数等方面的需求,还可以减少时延,提高系统的可靠性、

收稿日期: 2020-05-20

基金项目: 河南省科技攻关项目(172102210023); 河南省高等学校矿山信息化开放实验室开放基金项目(KY2015-01); 河南省高校基本科研业务费专项资金项目(NSFRF140126)

作者简介: 田心记(1983—),女,副教授, E-mail: tian215216@sohu.com.

公平性和吞吐量,是5G的关键技术之一<sup>[2]</sup>. NOMA 技术的思想是:在发送端采用叠加编码技术将多个用户的信号叠加在相同的时频资源上,在接收端采用连续干扰消除(SIC, successive interference cancellation)技术消减用户间的干扰<sup>[3]</sup>.

NOMA 通过功率区分用户,功率分配直接影响到系统的性能. 对于包含任意用户的单簇 NOMA 系统, Tang 等<sup>[4]</sup>构建了最大化和速率的功率分配优化问题,给出了功率分配的闭式解. Muhammed 等<sup>[5]</sup>在总功率和用户速率需求的约束下,构建了最大化最小能量效率的功率分配优化问题,基于贪婪算法给出了一种低复杂度次优的功率分配方案. Pham 等<sup>[6]</sup>以总功率作为约束条件,研究了包含任意用户的单簇 NOMA 系统的  $\alpha$ -公平性,给出了  $0 < \alpha < 1$  时的功率分配方案. 对于多簇且每个簇包含两用户的 NOMA 系统, Hojeij 等<sup>[7]</sup>以最大公平为目标,提出了一种迭代的功率分配算法. 然而,以上的功率分配方案仅考虑了单小区的场景.

近年来,多小区下行 NOMA 系统中的功率分配方案受到学者的广泛关注. 对于两小区且每小区包含两用户的 NOMA 系统, Fu 等<sup>[8]</sup>构建了最小化总功率的功率分配优化问题,给出了一种迭代的分布式功率分配算法. Ni 等<sup>[9]</sup>提出了多小区多簇,且每个簇包含任意用户的 NOMA 系统中一种集中式最小功率控制算法,给出了一种低复杂度的用户分簇和功率分配方案. Baidas 等<sup>[10]</sup>在用户速率需求约束下,建立了多小区多用户 NOMA 系统中最大化最小能量效率的中继选择和功率分配联合优化问题,给出了一种低复杂度的迭代求解方法. 对于多小区多用户 MIMO-NOMA 系统, Chinnadurai 等<sup>[11]</sup>在用户功率分配系数的约束下,以最大化能量效率为目标,提出了一种用户分簇和动态功率分配的联合优化方案. 对于多小区多簇且每个簇包含任意用户的 NOMA 系统, Wang 等<sup>[12]</sup>构建了最大化和速率的用户分簇和功率分配联合优化问题,给出了2种基于博弈论的用户分簇算法,推导出了功率分配的闭式解. Wali 等<sup>[13]</sup>建立了多小区 NOMA 系统中最大化和速率的功率分配优化问题,给出了一种基于迭代的功率分配算法.

目前,尚未有学者研究多小区下行 NOMA 系统中最大公平的功率分配方案. 为此,提出了多小区下行 NOMA 系统中最大公平的功率分配方案. 首先推导了单簇内以最大公平为准则分配功率

时,该簇内每个用户的速率与每个簇的总功率之间的关系,然后将每个基站的功率平均分配给该小区内的所有簇,计算单簇内最大公平准则下的用户速率,通过多次调整最大速率所在小区簇的功率和最小速率所在小区簇的功率,得到该系统中最大公平的功率分配. 仿真结果显示,所提方案中用户的最低速率高于相同场景中已有的功率分配方案.

## 1 系统模型

多小区下行 NOMA 系统模型如图1所示,共有  $I$  个小区,每个小区有1个基站,每个基站为本小区内的  $JM$  个用户服务. 用  $I = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_I\}$  表示基站  $S$  的集合. 每个小区内的  $JM$  个用户被分为  $M$  个簇,每个簇包含  $J$  个用户. 总带宽  $W$  被等分为  $M$  个子信道,每个子信道的带宽为  $B = W/M$ ,  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$  是子信道的集合. 每个小区共享所有的子信道,每个簇使用一个子信道,同一小区内的簇间子信道正交. 用  $u_{ijm}$  表示第  $i$  个小区中第  $m$  个子信道上的第  $j$  个用户 ( $i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; m = 1, 2, \dots, M$ ). 用  $h_{i,ijm}$  表示  $S_i$  到  $u_{ijm}$  的信道,其中  $i = 1, 2, \dots, I$ , 假设所有的信道都相互独立并且  $|h_{i,i1m}|^2 \leq |h_{i,i2m}|^2 \leq \dots \leq |h_{i,iJm}|^2$ . 用  $q_{im}$  表示  $S_i$  在子信道  $m$  上的总功率,  $q_{im} = \sum_{j=1}^J p_{ijm}$ , 其中:  $u_{ijm}$  的功率为  $p_{ijm}$ ,  $p_{i1m} \geq p_{i2m} \geq \dots \geq p_{iJm}$ .

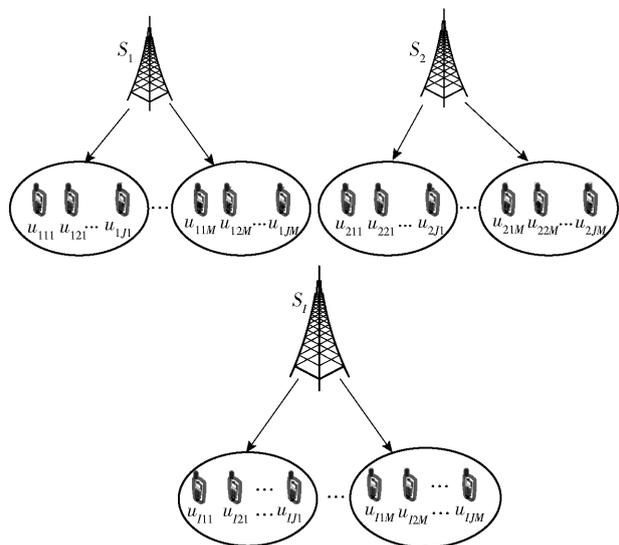


图1 多小区下行 NOMA 系统模型

根据 NOMA 原理,  $S_i$  在子信道  $C_m$  上发送的信号为  $s_{im}, s_{im}$  的表达形式为

$$s_{im} = \sum_{j=1}^J \sqrt{p_{ijm}} s_{ijm} \quad (1)$$

其中  $s_{ijm}$  为  $u_{ijm}$  的期望接收信号。

$y_{ijm}$  为  $u_{ijm}$  的接收信号,  $y_{ijm}$  的表达形式为

$$y_{ijm} = h_{i,ijm} s_{im} + \sum_{k \in I \setminus \{i\}} h_{k,ijm} s_{km} + n_{ijm} = \sum_{l=1}^J h_{i,ijm} \sqrt{p_{ilm}} s_{ilm} + \sum_{k \in I \setminus \{i\}} h_{k,ijm} \sum_{n=1}^J \sqrt{p_{knm}} s_{knm} + n_{ijm} \quad (2)$$

其中:  $h_{k,ijm}$  为  $S_k$  到  $u_{ijm}$  的信道,  $n_{ijm}$  为  $u_{ijm}$  接收到的高斯白噪声, 均值为 0, 方差为  $\sigma^2$ 。

根据 SIC 原理, 用户  $u_{ijm}$  在解码自身的期望接收信号  $s_{ijm}$  之前, 依次解码出同一簇中弱用户  $u_{ilm}$  的期望接收信号  $s_{ilm}$ ,  $l=1, 2, \dots, j-1$ , 并从  $y_{ijm}$  中消除  $s_{ilm}$  造成的干扰, 直至检测出  $s_{ijm}$ 。假定 SIC 过程中每次都能正确检测信号, 不存在错误传播, 则  $u_{ijm}$  受到强用户  $u_{ikm}$  的期望接收信号  $s_{ikm}$  以及其他基站发送的信号的干扰,  $k=j+1, \dots, J$ 。因此, 用户  $u_{ijm}$  在子信道  $C_m$  上的可达速率表示为

$$r_{ijm} = B \log \left( 1 + \frac{p_{ijm}}{\sum_{n=j+1}^J p_{inm} + Z_{ijm}} \right) \quad (3)$$

$$\text{其中 } Z_{ijm} = \frac{\sum_{k \in I \setminus \{i\}} |h_{k,ijm}|^2 q_{km} + \sigma^2}{|h_{i,ijm}|^2}.$$

所提方案的目标是: 通过分配适当的功率, 最大化用户的公平性, 功率分配的目标函数表示为

$$\max_{p_{ijm}} \min \begin{cases} i = 1, 2, \dots, I \\ r_{ijm}, j = 1, 2, \dots, J \\ m = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad \text{s. t. } \sum_{m=1}^M q_{im} \leq P_i^{\max}, \forall i \in I \quad (4)$$

其中约束条件表示第  $i$  个小区中簇的功率之和不能超过基站的最高功率  $P_i^{\max}$ 。

## 2 功率分配方案

若直接求解式(4)中的优化问题, 则需要遍历  $IJM$  个用户的功率, 复杂度极高。为此, 笔者给出了一种简化的求解方法。先求出单簇内所有用户的速率都相等时, 该簇的总功率与该簇内每个用户的速率之间的关系; 然后将式(4)中的优化问题转化为簇间功率分配优化问题, 给出了一种迭代的簇间功率分配方法; 最后根据簇间功率分配的结果为每个用户分配功率。

### 2.1 单簇内最大公平的功率分配

对于第  $i$  个小区中的第  $m$  个簇, 最大公平的功率分配的目标函数表示为

$$\max_{p_{ijm}} \min \{ r_{ijm}, j = 1, 2, \dots, J \} \quad \text{s. t. } \sum_{j=1}^J p_{ijm} = q_{im} \quad (5)$$

其中约束条件表示第  $i$  个小区中第  $m$  个簇的总功率为  $q_{im}$ 。

根据 Yang 等<sup>[14]</sup>的研究, 单簇的总功率与该簇内每个用户速率之间的关系表示为

$$q_{im} = \sum_{j=1}^J (2^{\frac{r_{ijm}}{B}} - 1) 2^{\sum_{s=1}^{j-1} \frac{r_{ism}}{B}} \frac{\sum_{k \in I \setminus \{i\}} |h_{k,ijm}|^2 q_{km} + \sigma^2}{|h_{i,ijm}|^2} \quad (6)$$

最大公平的功率分配使得该簇内每个用户的速率都相等, 即  $r_{i1m} = r_{i2m} = \dots = r_{ijm}$ , 不妨用  $r_{im}$  表示  $r_{ijm}$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ , 此时可将式(6)转化为

$$q_{im} = (2^{\frac{r_{im}}{B}} - 1) \sum_{j=1}^J 2^{\sum_{s=1}^{j-1} \frac{r_{ism}}{B}} \frac{\sum_{k \in I \setminus \{i\}} |h_{k,ijm}|^2 q_{km} + \sigma^2}{|h_{i,ijm}|^2} \quad (7)$$

$$q_{im} - (2^{\frac{r_{im}}{B}} - 1) \sum_{j=1}^J 2^{\sum_{s=1}^{j-1} \frac{r_{ism}}{B}} \frac{\sum_{k \in I \setminus \{i\}} |h_{k,ijm}|^2 q_{km} + \sigma^2}{|h_{i,ijm}|^2} = 0 \quad (8)$$

以  $r_{im}$  作为未知变量, 用 Matlab 求解式(8)中的方程, 得到

$$r_{im} = f_{im}(q_{im}, h_{k,ijm}, \sigma^2, j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, I) \quad (9)$$

式(9)给出了以最大公平为准则分配功率时, 该簇内每个用户的速率与该簇的总功率之间的关系。由于式(9)中函数的表达式较长, 故不在此列出具体公式。

单簇内所有用户的速率都相等时, 由式(3)可得每个用户的功率与速率之间的关系表示为

$$p_{ijm} = (2^{r_{im}/B} - 1) \left( \sum_{n=j+1}^J p_{inm} + Z_{ijm} \right) \quad (10)$$

### 2.2 多小区内最大公平的功率分配

式(9)给出了最大公平准则下单簇内每个用户的速率与该簇总功率之间的关系。然而, 单簇内最大公平的功率分配不能直接应用于多小区内, 因为同一小区簇间的功率相互制约, 且小区间相互干扰。因此, 下面给出最大公平准则下多小区内最大公平的功率分配方法。

第  $i$  个小区的第  $m$  个簇中所有用户的速率都相等且为  $r_{im}$  时,可将式(4)中的优化问题转化为

$$\begin{aligned} & \max_{q_{im}} \min \{f_{im}(q_{im}, h_{k,ijm}, \sigma^2, \\ & j=1, 2, \dots, J; k=1, 2, \dots, I), \\ & m=1, 2, \dots, M; i=1, 2, \dots, I\} \\ & \text{s. t. } \sum_{m=1}^M q_{im} \leq P_i^{\max}, \forall i \in I \end{aligned} \quad (11)$$

其中约束条件表示第  $i$  个小区中簇的功率之和不能超过基站的最大功率  $P_i^{\max}$ 。

式(4)中的优化问题要求解  $IJM$  个用户的功率,而式(11)中的优化问题仅涉及  $IM$  个簇的功率,因此,优化问题式(11)是优化问题式(4)的一种简化表达形式。但是,此时仍无法直接给出式(11)的闭式解,为此给出一种迭代的簇间功率分配方案。该方案的思路如下:首先为每个簇分配初始功率  $q_{im}$ ;由  $q_{im}$  计算第  $i$  个小区中第  $m$  个簇内所有用户速率相等时的  $r_{im}$ ,找出  $\{r_{im}, i=1, 2, \dots, I; m=1, 2, \dots, M\}$  中的最大元素和最小元素,分别用  $r_{la}$  和  $r_{nb}$  表示,分别调整第  $l$  个小区和第  $n$  个小区内簇的功率;然后,根据调整后的功率再次计算得到第  $i$  个小区中第  $m$  个簇的所有用户速率相等时的  $r_{im}$ ,找出此时的最大速率和最小速率,并继续调整功率,直到本次的最小速率低于或等于上次的最小速率。迭代的簇间功率分配方案包括以下步骤:

**步骤1** 将每个基站的功率平均分配给该小区内的所有簇,即第  $i$  个基站为本小区内的第  $m$  个簇分配功率  $q_{im} = P_i^{\max}/M$ ,令  $t=1$ ,且有矩阵

$$Q_t = \begin{bmatrix} q_{11}, q_{12}, \dots, q_{1M} \\ \vdots \\ q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iM} \\ \vdots \\ q_{I1}, q_{I2}, \dots, q_{IM} \end{bmatrix}$$

**步骤2** 将  $q_{im}$  代入式(9),计算第  $i$  个小区中第  $m$  个簇内所有用户速率相等时的  $r_{im}$ ,并组成矩阵

$$V_t = \begin{bmatrix} r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1M} \\ \vdots \\ r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iM} \\ \vdots \\ r_{I1}, r_{I2}, \dots, r_{IM} \end{bmatrix}$$

将  $V_t$  中的最小元素值赋值给变量  $T_{\min}$ ;

**步骤3** 找出  $V_t$  中的最大元素和最小元素  $r_{la}$  和  $r_{nb}$ ,其中,  $r_{la}$  和  $r_{nb}$  的第1个下标表示该元素所在

的行,即对应的簇所在的小区的序号,第2个下标表示该元素所在的列,即对应的簇在该小区内的序号;

**步骤4** 若  $l=n$ ,则增加  $r_{nb}$  对应簇的功率,同时减少  $r_{la}$  对应簇的功率,即令  $q_{la} = q_{la} - \theta$  且  $q_{nb} = q_{nb} + \theta$ ,  $\theta$  是预先设置的一个非常小的正数,然后执行步骤8;否则,执行步骤5~步骤8;

**步骤5** 找出  $V_t$  中第  $l$  行的最小元素  $r_{lb}$  和第  $n$  行的最大元素  $r_{na}$ ;

**步骤6** 调整第  $l$  个小区中簇的功率,减少第  $l$  行中最大元素对应簇的功率,同时增加该行中最小元素对应簇的功率,分别用簇  $la$  和簇  $lb$  表示  $r_{la}$  和  $r_{lb}$  对应的簇,令  $q_{la} = q_{la} - \theta$  且  $q_{lb} = q_{lb} + \theta$ ;

**步骤7** 调整第  $n$  个小区中簇的功率,减少第  $n$  行最大元素对应簇的功率,同时增加该行中最小元素对应簇的功率,分别用簇  $na$  和簇  $nb$  表示  $r_{na}$  和  $r_{nb}$  对应的簇,令  $q_{na} = q_{na} - \theta$  且  $q_{nb} = q_{nb} + \theta$ ;

**步骤8** 令  $t=t+1$ ,根据新的功率再次计算得到第  $i$  个小区中第  $m$  个簇所有用户速率相等时的  $r_{im}$ ,并组成矩阵  $V_t$ ,将  $V_t$  中的最小元素值赋值给变量  $T_{\min}$ ,若  $T > T_{\min}$ ,则令  $T_{\min} = T$ ,且重复步骤3~步骤8,直至  $T \leq T_{\min}$ 。

采用上述方法得到第  $i$  小区中第  $m$  个簇的功率  $q_{im}$  后,将  $q_{im}$  代入式(10)即可得到为每个用户分配的功率。

### 3 复杂度及收敛性分析

步骤1为每个小区内所有簇的平均分配功率,其复杂度为  $O(1)$ 。步骤2根据式(9)需要计算  $IM$  个簇内用户的速率,其总复杂度为  $O(I^2JM)$ 。步骤3找出  $V_t$  中的最大元素值及最小元素值,计算复杂度为  $O(I^2M^2)$ 。步骤4调整单个小区内簇的功率,计算复杂度为  $O(1)$ 。步骤5的计算复杂度为  $O(4M^2)$ 。步骤6和步骤7的计算复杂度均为  $O(1)$ 。步骤8根据调整后的功率再次计算速率,并重复步骤3~步骤8。假设步骤8重复的次数为  $N-1$ ,即迭代的次数为  $N$ ,则所提方案的复杂度为  $O(NI^2JM)$ 。

在实际系统中,小区数量  $I$  以及每个小区内的用户数  $JM$  都是有限的,迭代次数  $N$  也是有限的,因此所提方案的复杂度是有限的,该方案是收敛的。

### 4 性能比较及仿真

仿真了所提功率分配方案的性能,并分别与 Wang 等<sup>[12]</sup> 和 Wali 等<sup>[13]</sup> 所提的方案进行了对比。

假设信道服从独立的瑞利分布, 高斯白噪声的均值为0, 方差为1, 每个子信道的带宽均为1 Hz.

图2(a)和(b)分别为 $I=2, I=3$ 时所提方案的最低速率. 由图2可知,  $I$ 和 $M$ 不变的情况下,  $J$ 越小, 最低速率越高;  $J$ 越大, 最低速率越低;  $I$ 和 $J$ 不变的情况下,  $M$ 越小, 最低速率越高,  $M$ 越大, 最低速率越低. 原因在于: 在小区数量、每小区的簇数量和单个基站的功率一定的情况下,  $J$ 越小, 即单簇内的用户数越少, 分配给每个用户的功率越高, 从而最低速率越高; 在小区数量、每个簇内的用户数量和单个基站的功率一定的情况下,  $M$ 越小, 即每个小区内的簇越少, 分配给单个簇的功率越高, 从而单簇内的最低速率越高. 从图2还能看出,  $M=3$ 且 $J=2$ 时的最低速率高于 $M=2$ , 且 $J=3$ 时的最低速率. 此时每个小区中的用户数相同, 最低速率却不同, 原因在于前者的每个簇包含2个用户, 后者的每个簇包含3个用户, 即前者使用的频段较多, 干扰相对较少, 从而用户的最低速率相对较高. 比较图2(a)和(b)可知,  $I=2$ 时的最低速率高于 $I=3$ 时的最低速率, 这是因为在单个基站总功率相同的情况下, 基站越多, 干扰越大, 从而最低速率越低.

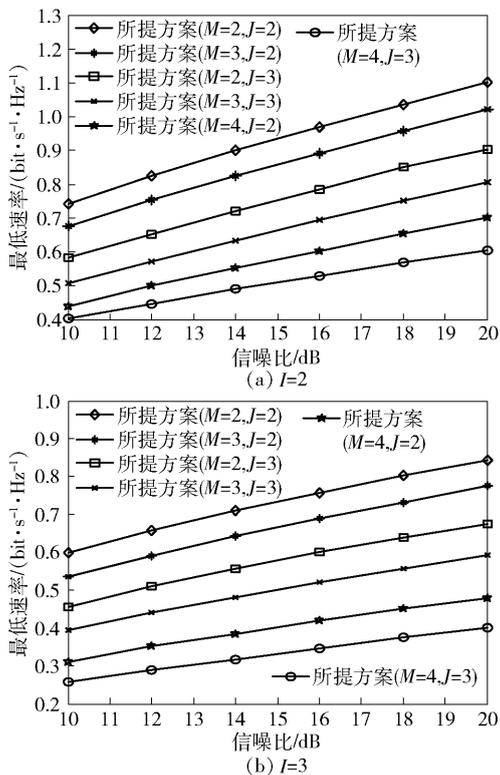


图2  $I=2$ 和 $I=3$ 时所提方案的最低速率

结果. 从图中可知,  $I$ 和 $M$ 不变的情况下,  $J$ 越大, 总速率越高;  $J$ 越小, 总速率越低;  $I$ 和 $J$ 不变的情况下,  $M$ 越大, 总速率越高;  $M$ 越小, 总速率越低. 原因在于: 随着簇中用户数的增加, 在同一时隙内更多的用户使用了相同的频段, 提高了频段利用率, 从而能提高总速率; 随着簇数量的增加, 可用频段随之增加, 从而也能提高总速率. 比较图3(a)和(b)可知,  $I=3$ 时的总速率高于 $I=2$ 时的总速率, 原因在于: 随着小区数量的增加, 用户数量也随之增加, 并且总功率也增加, 从而总速率也得到了提高.

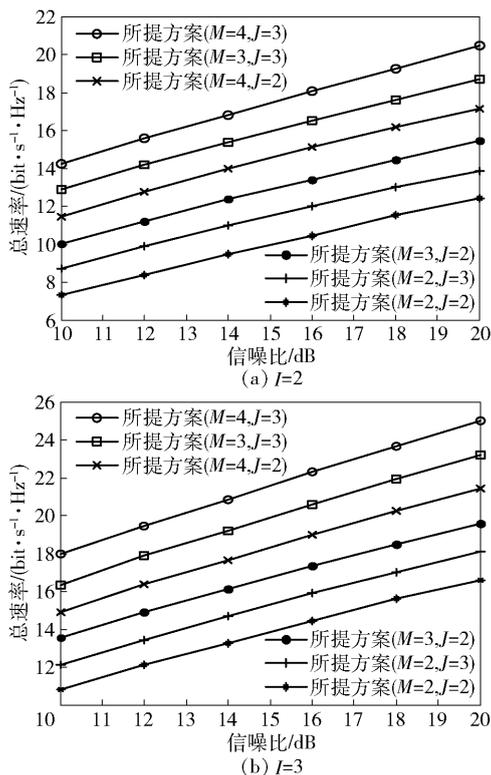


图3  $I=2$ 和 $I=3$ 时所提方案的总速率

图4所示为 $I=2$ 且 $M=2$ 时所提方案的最低速率. 仿真中所提方案和Wang等<sup>[12]</sup>提出方案中 $J$ 的取值分别为2和3. Wali等<sup>[13]</sup>提出的方案中没有对用户分簇, 为使3种方案中用户数量相同, 假设每个小区的用户数量分别为4和6, 在图4中分别用 $MJ=4$ 和 $MJ=6$ 表示. 图5中的表示方法与其类似. 由图4可知, 所提方案的最低速率较高. 信噪比的范围为 $[10, 20]$ , 且 $J=2$ 时, 所提方案的最低速率比Wang等<sup>[12]</sup>和Wali等<sup>[13]</sup>提出的方案分别提高了 $0.22 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 和 $0.36 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ;  $J=3$ 时, 所提方案的最低速率比Wang等<sup>[12]</sup>和Wali等<sup>[13]</sup>提出的方案分别提高了 $0.14 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 和

图3(a)和(b)所示分别为 $I=2, I=3$ 时的仿真

$0.28 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ . 这是因为 Wang 等<sup>[12]</sup>和 Wali 等<sup>[13]</sup>的目标是最大化系统的和速率,而所提方案的目标是最大化用户的最低速率.

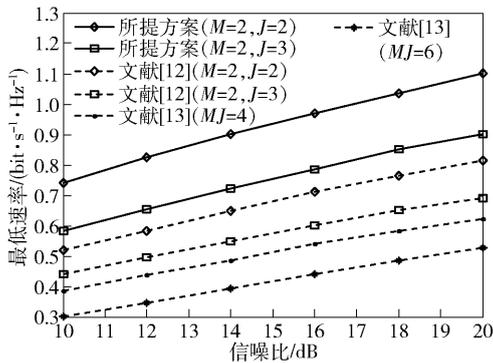


图 4  $I=2$  且  $M=2$  时 3 种方案的最低速率

图 5 所示为  $I=2$  且  $M=3$  时所提方案的最低速率. 可见,所提方案的最低速率均高于 2 种对比方案. 信噪比的范围为  $[10, 20]$ , 且  $J=2$  时,所提方案的最低速率比 Wang 等<sup>[12]</sup>和 Wali 等<sup>[13]</sup>提出的方案分别提高了  $0.21 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  和  $0.37 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ;  $J=3$  时,所提方案的最低速率比 Wang 等<sup>[12]</sup>和 Wali 等<sup>[13]</sup>提出的方案分别提高了  $0.14 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  和  $0.30 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ .

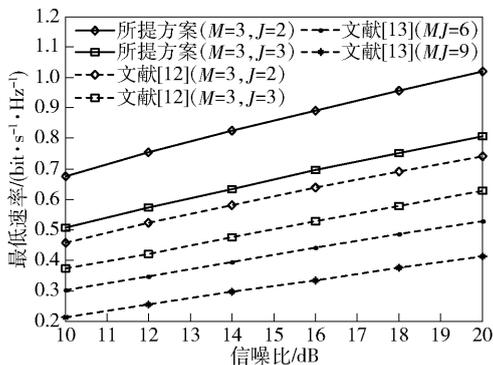


图 5  $I=2$  且  $M=3$  时 3 种方案的最低速率

## 5 结束语

研究了多小区多簇且每个簇包含多个用户的下行 NOMA 系统中最大公平的功率分配方案. 建立了将最大公平的功率分配优化问题中用户间的功率分配转换为簇间功率分配,并给出了一种迭代的簇间功率分配方案,进而得到每个用户的功率. 仿真结果显示,所提方案的公平性优于相同场景中的已有方案. 由于所提功率分配方案是在给定子信道分配下进行的,如何分配子信道以进一步提高系统性能

还有待研究.

## 参考文献:

- [1] 孔庆玉, 商文宇. 5G 核心技术研究发展探析[J]. 中国管理信息化, 2019, 22(19): 159-160.  
Kong Qingyu, Shang Wenyu. Research and development of 5G core technology [J]. Management Informatization in China, 2019, 22(19): 159-160.
- [2] Riazul Islam S M, Avazoy N, Dobre O A, et al. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 721-742.
- [3] Ali M S, Tabassum H, Hossain E. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access(NOMA) systems[J]. IEEE Access, 2016, 4: 6325-6343.
- [4] Tang Jie, Dai Tuwang, Cui Manman, et al. Optimization for maximizing sum secrecy rate in SWIPT-enabled NOMA systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 43440-43449.
- [5] Muhammed A J, Ma Zheng, Diamantoulakis P D, et al, Energy-efficient resource allocation in multicarrier NOMA systems with fairness[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(12): 8639-8654.
- [6] Pham Q V, Hwang W J.  $\alpha$ -Fair resource allocation in non-orthogonal multiple access systems[J]. IET Communications, 2018, 12(2): 179-183.
- [7] Hojeij M R, Nour C A, Farah J, et al. Joint resource and power allocation technique for downlink power-domain non-orthogonal multiple access [C] // IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). Vasteras: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [8] Fu Yaru, Chen Yi, Sung Chiwan. Distributed downlink power control for the non-orthogonal multiple access system with two interfering cells [C] // IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [9] Ni Dadong, Li Hao, Tran Q T, et al. Transmit power minimization for downlink multi-cell multi-carrier NOMA networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(12): 2459-2462.
- [10] Baidas M W, Bahbahani Z, El-Sharkawi N, et al. Joint relay selection and energy-efficient power allocation in downlink multi-cell NOMA networks [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Marrakesh: IEEE Press, 2019: 1-8.
- [11] Chinnadurai S, Selvaprabhu P, Lee M H. A novel joint user pairing and dynamic power allocation scheme in MI-

- MO-NOMA system[C]//International Conference on Information and Communication Technology Con-vergence (ICTC). Jeju: IEEE Press, 2017: 951-953.
- [12] Wang Kaidi, Liu Yuanwei, Ding Zhiguo, et al. User as-sociation and power allocation for multi-cell non-orthogonal multiple access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5284-5298.
- [13] Wali U K, Yu Zhiyuan, Yu Shanshan, et al. Efficient power allocation in downlink multi-cell multi-user NOMA networks[J]. IET Communications, 2019, 13(4): 396-402.
- [14] Yang Zhaohui, Pan Cunhua, Xu Wei, et al. Power control for multi-cell networks with non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(2): 927-942.
- 
- (上接第129页)
- [6] 陈岁生, 卢建刚, 楼晓春. 基于MDS-MAP和非线性滤波的WSN定位算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(5): 866-872.  
Chen Suisheng, Lu Jiangang, Lou Xiaochun. Localization algorithm for wireless sensor networks based on MDS-MAP and nonlinear filtering[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(5): 866-872.
- [7] Li Li, Kunz T. Cooperative node localization using nonlinear data protection[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2009, 5(1): 1-26.
- [8] 龙文, 蔡绍洪, 焦建军, 等. 求解大规模优化问题的改进鲸鱼优化算法[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(11): 2893-2994.  
Long Wen, Cai Shaohong, Jiao Jianjun, et al. Improved whale optimization algorithm for large scale optimization problems[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2017, 37(11): 2893-2994.
- [9] 刘浩然, 张力悦, 范瑞星, 等. 基于改进鲸鱼优化策略的贝叶斯网络结构学习算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1434-1441.  
Liu Haoran, Zhang Liyue, Fan Ruixing, et al. Bayesian network structure learning based on improved whale optimization strategy[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(6): 1434-1441.
- [10] 褚鼎立, 陈红, 王旭光. 基于自适应权重和模拟退火的鲸鱼优化算法[J]. 电子学报, 2019, 47(5): 992-999.  
Chu Dingli, Chen Hong, Wang Xuguang. Whale optimization algorithm based on adaptive weight and simulated annealing [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(5): 992-999.
- [11] 钱志鸿, 孙大洋, Leung Victor. 无线网络定位综述[J]. 计算机学报, 2016, 39(6): 1237-1256.  
Qian Zhihong, Sun Dayang, Leung Victor. A survey on localization model in wireless network [J]. Journal of Computer Science, 2016, 39(6): 1237-1256.
- [12] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.