

文章编号:1007-5321(2021)01-0038-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-031

下行 NOMA 系统中最大化能量效率的功率分配方案

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: 针对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,提出了一种最大化系统能量效率的功率分配方案. 首先推导了满足所有用户连续干扰消除需求的情况下,单个用户及单个簇所需的最低功率,建立最大化系统能量效率的用户间功率分配优化问题,然后采用二分法求解最大化单个簇内能量效率的功率分配优化问题,基于该结论将最大化系统能量效率的用户间功率分配优化问题转换为簇间功率分配优化问题,最后给出了一种迭代的簇间功率分配方案,并根据簇间功率分配的结果为单个用户分配功率. 仿真结果表明,所提方案的系统能量效率高于相同场景中的已有方案.

关键词: 非正交多址接入; 能量效率; 连续干扰消除; 二分法; 功率分配

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

Power Allocation Scheme for Maximizing Energy Efficiency in Downlink 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 energy efficiency is proposed for downlink non-orthogonal multiple access(NOMA) system with multiple clusters and each cluster containing arbitrarily user. Firstly, the minimum powers required for a single user and a single cluster are derived to meet successive interference cancellation. The optimization problem of power allocation among users is established to maximize the energy efficiency of the system. Then, the power allocation optimization problem of maximizing the energy efficiency of a single cluster is solved by using bisection method. Based on this conclusion, the optimization problem of power allocation among users to maximize the energy efficiency of the system is transformed into the optimization problem of power allocation among clusters. Finally, the power for each user is obtained according to the inter-cluster power allocation, which is get by an iterative scheme. Simulations show that the energy efficiency of the proposed scheme is better than that of the existing scheme in the same scenario.

Key words: non-orthogonal multiple access; energy efficiency; successive interference cancellation; bisection method; power allocation

近年来,海量的终端设备接入网络,无线数据业务 量呈爆炸式增长,各类通信新业务和应用场景不断涌

收稿日期: 2020-03-24

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.

现,从而使得第 5 代移动通信系统(5G, the fifth generation of mobile communications system)要满足高频谱效率、低传输时延、高可靠性等需求^[1]. 非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)在功率域中将多个用户的信号叠加在相同的时频资源上,然后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并检测期望接收的信号,从而可以提高系统的频谱效率、公平性等性能^[2]. 因此,支持更多用户连接和更高频谱效率的 NOMA 技术成为产业界和学术界研究的热点.

NOMA 系统中的功率分配直接关系到系统性能的优劣. 对于包含两用户的单簇 NOMA 系统, Kim 等^[3]给出了一种最大公平的功率分配方法. Yaru 等^[4]构建了多簇且每个簇包含任意用户的 NOMA 系统中最大化和速率的资源分配优化问题,给出了一种联合子信道分配和功率分配的解决方案. Tsai 等^[5]以用户的速率需求为约束条件,研究了多簇且每个簇包含任意用户的 NOMA 系统中最大化和速率的功率分配方案. Gleit 等^[6]给出了单簇两用户 NOMA 系统中最大化能量效率的功率分配方案. 对于包含任意用户的单簇 NOMA 系统, Zhang 等^[7]以总功率和单个用户的速率需求为约束条件,提出了一种最大化能量效率的功率分配方法. 陆等^[8]在 Zhang 等^[7]的基础上考虑了用户公平准则,提出了一种单簇 NOMA 系统中最大化能量效率的功率分配方案,该方案最大化系统能量效率的同时也提升了用户的最低速率. Liu 等^[9]研究了多簇 NOMA 系统中最大化能量效率的功率分配方案,给出了一种次优的求解方法,然而该方案中每个簇仅包含两个用户.

对于多簇且每个簇包含任意用户的下行 NOMA 系统,提出了一种最大化系统能量效率的功率分配方案. 建立满足所有用户 SIC 需求的情况下最大化系统能量效率的用户间功率分配优化问题,为简化该问题的求解,先采用二分法求解最大化单个簇内能量效率的功率分配优化问题,基于该结论将用户间功率分配优化问题转换为簇间功率分配优化问题,再求解簇间功率分配并根据簇间功率分配的结果为单个用户分配功率. 仿真结果显示,所提方案的系统能量效率高于相同场景中的已有方案.

1 系统模型

下行 NOMA 系统模型如图 1 所示,包含 1 个基站和 MK 个用户,用户被分为 K 个簇,每个簇包含 M

个用户,基站和用户都配置单根天线. 总带宽 W 被等分为 K 个子信道,每个子信道的带宽为 $B = W/K$. 用 u_{km} 表示第 k 个簇中的第 m 个用户, $k = 1, 2, \dots, K$, $m = 1, 2, \dots, M$. 基站到 u_{km} 的信道为 h_{km} , $|h_{k1}|^2 \geq |h_{k2}|^2 \geq \dots \geq |h_{kM}|^2$. 基站为第 k 个簇分配的总功率为 p_k , 其中 u_{km} 的功率为 p_{km} , $\sum_{m=1}^M p_{km} = p_k$, $p_{k1} < p_{k2} < \dots < p_{kM}$. 基站为每个簇分配一个子频段,簇间子频段正交.

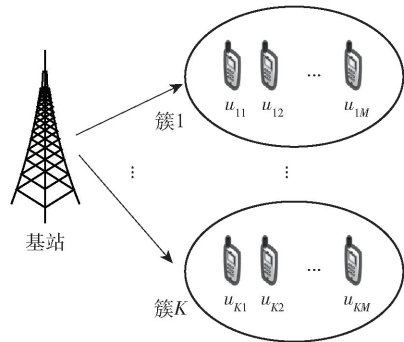


图 1 下行 NOMA 系统模型

用 y_{km} 表示 u_{km} 的接收信号, y_{km} 的表达形式为

$$y_{km} = h_{km} \sum_{i=1}^M \sqrt{p_{ki}} x_{ki} + n_{km} \quad (1)$$

其中: x_{ki} 为 u_{ki} 的期望接收信号, n_{km} 为 u_{km} 接收到的高斯白噪声, 均值为 0, 方差为 1.

u_{k1} 首先检测出 x_{kM} , 并消除该信号对 y_{k1} 造成的干扰, 然后再检测 $x_{k(M-1)}$, 并消除该信号对 y_{k1} 造成的干扰, 依次检测其他信号并消除这些信号对 y_{k1} 造成的干扰, 直至检测出 x_{k1} . u_{kj} 检测 x_{km} 时的信干噪比(SINR, signal to interference and noise ratio)为

$$s_{u_{kj} \rightarrow x_{km}} = \frac{p_{km} |h_{kj}|^2}{|h_{kj}|^2 \sum_{i=1}^{m-1} p_{ki} + 1} \quad (2)$$

其中 $j \leq m$, $m = j, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, M$.

假定 r 是正确检测信号时对 SINR 的最低要求, 为了正确执行 SIC, u_{kj} 检测 x_{km} 时的 SINR 必须不低于 r , 因此, 要求式(3)成立:

$$s_{u_{kj} \rightarrow x_{km}} = \frac{p_{km} |h_{kj}|^2}{|h_{kj}|^2 \sum_{i=1}^{m-1} p_{ki} + 1} \geq r, j \leq m \quad (3)$$

由式(3)可推出, u_{km} 的功率 p_{km} 的取值范围满足:

$$p_{km} \geq \left\{ \frac{r \left(|h_{kj}|^2 \sum_{i=1}^{m-1} p_{ki} + 1 \right)}{|h_{kj}|^2}, j \leq m \right\} \quad (4)$$

则 u_{kj} 的单位带宽速率为

$$R_{kj} = \text{lb} \left(1 + \frac{p_{kj} |h_{kj}|^2}{|h_{kj}|^2 \sum_{i=1}^{j-1} p_{ki} + 1} \right) \quad (5)$$

第 k 个簇内所有用户的单位带宽速率之和为

$$\sum_{j=1}^M R_{kj} = \sum_{j=1}^M \text{lb} \left(1 + \frac{p_{kj} |h_{kj}|^2}{|h_{kj}|^2 \sum_{i=1}^{j-1} p_{ki} + 1} \right) \quad (6)$$

系统中 MK 个用户的单位带宽速率之和为

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M R_{kj} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \text{lb} \left(1 + \frac{p_{kj} |h_{kj}|^2}{|h_{kj}|^2 \sum_{i=1}^{j-1} p_{ki} + 1} \right) \quad (7)$$

用 P_{\min} 表示满足 SIC 需求时系统所需的最低总功率,用 P_{\max} 表示基站的最大总功率. 假设 $P_{\max} \geq P_{\min}$, 否则无法实现 SIC. 所提方案的目标是: 在满足 SIC 需求且基站的总功率不超过 P_{\max} 的情况下, 通过调整用户间功率, 最大化系统的能量效率. 功率分配的目标函数用公式表示为

$$\max_{p_{kj}} \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M R_{kj}}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M p_{kj}} \quad (8)$$

$$\text{s. t. C1: } \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M p_{kj} \leq P_{\max}$$

$$\text{C2: } p_{km} \geq \{\Phi_{kj}, j \leq m\}, \forall k, \forall m$$

其中: $\Phi_{kj} = \left[r \left(|h_{kj}|^2 \sum_{i=1}^{m-1} p_{ki} + 1 \right) \right] / |h_{kj}|^2$, 约束条件 C1 表示系统的总功率不超过 P_{\max} , 约束条件 C2 用于确保 SIC 的正确执行.

2 功率分配方案

2.1 最低总功率 P_{\min} 的推导

本小节推导了满足 SIC 需求时 p_{km} 的取值范围.

令式(4)中 $\left[r \left(|h_{kj}|^2 \sum_{i=1}^{m-1} p_{ki} + 1 \right) \right] / |h_{kj}|^2 = l(|h_{kj}|^2)$, $j \leq m$, $l(|h_{kj}|^2)$ 是 $|h_{kj}|^2$ 的单调递减函数. 由于 $|h_{k1}|^2 \geq |h_{k2}|^2 \geq \dots \geq |h_{kM}|^2$, 当 $j = m$ 时, $l(|h_{kj}|^2)$ 达到最大值, 此时式(4)可转化为

$$p_{km} \geq \frac{r \left(|h_{km}|^2 \sum_{i=1}^{m-1} p_{ki} + 1 \right)}{|h_{km}|^2} \quad (9)$$

令式(9)中的 $m = 1$, 得到 p_{k1} 的取值范围为 $p_{k1} \geq r / |h_{k1}|^2$, 令式(9)中的 $m = 2$, 得到 p_{k2} 的取值范围为

$$p_{k2} \geq r \left[\frac{r}{|h_{k1}|^2} + \frac{1}{|h_{k2}|^2} \right] \quad (10)$$

令式(9)中的 $m = 3$, 得到 p_{k3} 的取值范围为

$$p_{k3} \geq r \left[\frac{r}{|h_{k1}|^2} + \frac{r^2}{|h_{k1}|^2} + \frac{r}{|h_{k2}|^2} + \frac{1}{|h_{k3}|^2} \right] \quad (11)$$

采用归纳法可得, $m = 2, 3, \dots, M$ 时, p_{km} 的取值范围为

$$p_{km} \geq r \left[\sum_{i=1}^{m-1} \frac{r(r+1)^{m-i-1}}{|h_{ki}|^2} + \frac{1}{|h_{km}|^2} \right] \quad (12)$$

用 p_{km0} 表示正确执行 SIC 时 u_{km} 所需的最低功率. $m = 1$ 时, $p_{k10} = r / |h_{k1}|^2$; $m = 2, 3, \dots, M$ 时, p_{km0} 的取值为

$$p_{km0} = r \left[\sum_{i=1}^{m-1} \frac{r(r+1)^{m-i-1}}{|h_{ki}|^2} + \frac{1}{|h_{km}|^2} \right] \quad (13)$$

用 p_{k0} 表示第 k 个簇内的所有用户正确执行 SIC 时所需的最低总功率, 则 p_{k0} 的取值为

$$p_{k0} = \sum_{m=1}^M p_{km0} = r \sum_{m=2}^M \left[\sum_{i=1}^{m-1} \frac{r(r+1)^{m-i-1}}{|h_{ki}|^2} + \frac{1}{|h_{km}|^2} \right] + \frac{r}{|h_{k1}|^2} \quad (14)$$

若第 k 个簇的总功率低于 p_{k0} , 则不能保证该簇内 SIC 的正确执行, 从而无法正确检测所有的期望信号.

P_{\min} 的取值为

$$P_{\min} = r \sum_{k=1}^K \sum_{m=2}^M \left[\sum_{i=1}^{m-1} \frac{r(r+1)^{m-i-1}}{|h_{ki}|^2} + \frac{1}{|h_{km}|^2} \right] + \sum_{k=1}^K \frac{r}{|h_{k1}|^2} \quad (15)$$

2.2 功率分配

求解式(8)中的优化问题就能得到 $P_{\max} \geq P_{\min}$ 时, 最大化系统能量效率的功率分配. 因式(8)中的优化问题是非凸优化问题, 直接求解的复杂度极高. 为此, 先求解第 k 个簇的总功率为 p_k 时, 最大化该簇内能量效率的功率分配, 基于该结论简化式(8)中的优化问题, 将用户间功率分配转换为簇间功率分配, 最后基于簇间功率分配的结果为单个用户分配功率.

2.2.1 单簇内最大化能量效率的功率分配

第 k 个簇的总功率为 p_k 时, 最大化该簇内能量效率的功率分配的目标函数用公式表示为

$$\begin{aligned} \max_{p_{kj}} e_k(p_k) &= \max_{p_{kj}} \frac{\sum_{j=1}^M R_{kj}}{\sum_{j=1}^M p_{kj}} \\ \text{s. t. C1: } &\sum_{j=1}^M p_{kj} = p_k \\ &\text{C2: } p_{km} \geq p_{k0}, \forall m \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $e_k(p_k)$ 为第 k 个簇的功率为 p_k 时, 该簇的能量效率, 约束条件 C1 表示单个簇的总功率为 p_k , 约束条件 C2 用于确保 SIC 的正确执行.

根据 Yang 等^[10]的研究可知, 若单个簇的总功率为 p_k , 为该簇内的第 2 个用户至第 M 个用户分配的功率刚好满足最低速率需求, 同时把其余的功率都分配给第 1 个用户, 此时能最大化该簇内所有用户的和速率, 从而能最大化该簇的能量效率. 因此, 第 k 个簇的总功率为 p_k 时, 最大化该簇内用户和速率的功率分配为

$$p_{k1} = \lceil |h_{k1}|^2(p_k - \Delta_{k1}) \rceil / \Delta_{k2} \quad (17)$$

$$p_{km} = r \left[p_{k1}(1+r)^{m-2} + \sum_{i=2}^{m-1} \frac{r(1+r)^{m-i-1}}{|h_{ki}|^2} \right] + \frac{r}{|h_{km}|^2} \quad (18)$$

其中: $k = 1, 2, \dots, K; m = 2, 3, \dots, M; \Delta_{k1} = \sum_{m=3}^M r \left[\sum_{i=2}^{m-1} \frac{r(1+r)^{m-i-1}}{|h_{ki}|^2} + \frac{1}{|h_{km}|^2} \right] + \frac{r}{|h_{k2}|^2}; \Delta_{k2} = 1 + r + \sum_{m=3}^M r(1+r)^{m-2}$. 此时, 该簇和速率的最大值表示为

$$R_k(p_k) = \text{lb} \left(1 + \frac{|h_{k1}|^2(p_k - \Delta_{k1})}{\Delta_{k2}} \right) + (M-1)\text{lb}(1+r) \quad (19)$$

则该簇能量效率的最大值表示为

$$e_k(p_k) = R_k(p_k) / p_k \quad (20)$$

这样就得出单个簇的总功率为 p_k 时, 该簇能量效率的最大值及其对应的功率分配.

基于该结果, 接下来求解 p_k 变化时, 最大化该簇能量效率的功率分配. 第 k 个簇的最低总功率为 p_{k0} , 第 k 个簇的最大功率为 $p_{k, \max} = P_{\max} - \sum_{l=1, l \neq k}^K p_{l0}$.

因此, $p_k \in [p_{k0}, p_{k, \max}]$ 时, 式(16)中最大化该簇能量效率的功率分配优化问题等价表示为

$$\begin{aligned} \max_{p_k} \{e_k(p_k)\} &= \max_{p_k} \{R_k(p_k) / p_k\} \\ \text{s. t. } &p_{k0} \leq p_k \leq p_{k, \max} \end{aligned} \quad (21)$$

当 $p_k \geq p_{k0}$ 且按照式(17)和式(18)分配功率时,

必定满足式(16)中的约束条件 C2, 因此, 式(21)无需式(16)中的约束条件 C2. 为便于推导, $e_k(p_k)$ 可简化为

$$e_k(p_k) = \frac{\text{lb}(1 + c_k p_k - d_k) + (M-1)\text{lb}(1+r)}{p_k} \quad (22)$$

其中: $c_k = |h_{k1}|^2 / \Delta_{k2}, d_k = \lceil |h_{k1}|^2 \Delta_{k1} \rceil / \Delta_{k2}$. 式(22)中的优化问题是寻找该簇能量效率 $e_k(p_k)$ 最大时对应的 p_k 的取值. 接下来分析 $p_k \geq 0$ 时, $e_k(p_k)$ 的增减性, 再结合 p_k 的取值范围, 分析 $e_k(p_k)$ 最大时 p_k 的取值. 求 $e_k(p_k)$ 关于 p_k 的偏导数:

$$\frac{\partial e_k(p_k)}{\partial p_k} = \frac{\frac{c_k p_k}{\ln 2(1 + c_k p_k - d_k)}}{p_k^2} - \frac{\text{lb}(1 + c_k p_k - d_k) + (M-1)\text{lb}(1+r)}{p_k^2} \quad (23)$$

由式(23)可知, $\partial e_k(p_k) / \partial p_k$ 的分母恒大于零, 但无法直接观察出 $\partial e_k(p_k) / \partial p_k$ 的增减性, 也无法推导出 $\partial e_k(p_k) / \partial p_k = 0$ 时 p_k 的取值, 下面分析 $\partial e_k(p_k) / \partial p_k$ 的分子大于零或小于零的条件. 令

$$\chi(p_k) = \frac{c_k p_k}{\ln 2(1 + c_k p_k - d_k)} - \text{lb}(1 + c_k p_k - d_k) - (M-1)\text{lb}(1+r) \quad (24)$$

求 $\chi(p_k)$ 关于 p_k 的偏导数:

$$\frac{\partial \chi(p_k)}{\partial p_k} = \frac{-c_k^2 p_k}{\ln 2(1 + c_k p_k - d_k)^2} \quad (25)$$

由于 $\partial \chi(p_k) / \partial p_k < 0$ 恒成立, 因此 $\chi(p_k)$ 是 p_k 的单调递减函数. 当 $c_k p_k - d_k$ 趋向于 -1 时, $\chi(p_k)$ 大于零, 当 $c_k p_k - d_k$ 趋向于正无穷时, $\chi(p_k)$ 小于零, 因此, 存在 p'_k 使得 $\chi(p'_k)$ 等于零. 当 $p_k < p'_k$ 时, $\chi(p_k)$ 大于零, 即 $\partial e_k(p_k) / \partial p_k > 0$; 当 $p_k > p'_k$ 时, $\chi(p_k)$ 小于零, 即 $\partial e_k(p_k) / \partial p_k < 0$. 因此, $e_k(p_k)$ 在区间 $[0, p'_k]$ 上单调递增, 在区间 $[p'_k, +\infty]$ 上单调递减, 在 $p_k = p'_k$ 时, $e_k(p_k)$ 达到最大值.

由于无法推导出 p'_k 的闭合表达式, 只能采用二分法找到 p'_k , 并且还要将 p'_k 与 p_k 的取值范围做比较后才能得出式(21)中优化问题的最优解. 根据以上所述, 式(21)中的优化问题的求解过程如下:

步骤 1, 对于第 k 个簇, 令 $s_{k1} = (d_k - 1) / c_k$ 且 $t = 1, k = 1, 2, \dots, K$;

步骤 2, 令 $s_{k2} = t P_{\max}$, 若 $\chi(s_{k2}) > 0$, 执行步骤 3, 否则令 $t = t + 1$, 再次执行该步骤, 直至 $\chi(s_{k2}) > 0, k = 1, 2, \dots, K$;

步骤3,令 $s_{k0} = (s_{k1} + s_{k2})/2$, 若 $\chi(s_{k0}) > \varepsilon$, 则令 $s_{k1} = s_{k0}$ 且重复执行该步骤, 若 $\chi(s_{k0}) < -\varepsilon$, 则令 $s_{k2} = s_{k0}$ 且重复执行该步骤, 若 $|\chi(s_{k0})| < \varepsilon$, 则令 $p'_k = s_{k0}$, 无需重复执行该步骤, 其中, ε 是预先设定的接近于零的正数, $k = 1, 2, \dots, K$;

步骤4, 比较 p'_k 、 p_{k0} 和 $p_{k, \max}$ 的大小, 若 $p'_k \leq p_{k0}$, 则最优解为 p_{k0} , 若 $p_{k0} < p'_k < p_{k, \max}$, 则最优解为 p'_k , 若 $p_{k, \max} \leq p'_k$, 则最优解为 $p_{k, \max}$.

2.2.2 多簇内最大化能量效率的功率分配

根据2.2.1小节中的结论, 式(8)中的优化问题可以简化为

$$\begin{aligned} \max_{p_k} \left\{ \sum_{k=1}^K e_k(p_k) \right\} &= \max_{p_k} \left\{ \frac{\sum_{k=1}^K R_k(p_k)}{\sum_{k=1}^K p_k} \right\} \quad (26) \\ \text{s. t. } C1: \sum_{k=1}^K p_k &\leq P_{\max} \\ C2: p_k &\geq p_{k0}, \forall k \end{aligned}$$

式(26)中的2个约束条件C1等价于式(8)中的2个约束条件C1.

然而, 因式(26)中的优化问题也是非凸优化问题, 因此仍无法直接给出最优解. 为解决该问题, 接下来给出式(26)中优化问题次优的求解方法. 用 \bar{p}_k 表示为第 k 个簇分配的功率, 求次优解的具体步骤如下:

步骤1, 采用二分法找出第 k 个簇的功率不受限制时该簇能量效率的最大值对应的功率, 用 p'_k 表示, $k = 1, 2, \dots, K$;

步骤2, 基站为每个簇分配功率 p_{k0} , 即令 $\bar{p}_k = p_{k0}$, 若 $p'_k \leq p_{k0}$, 将该簇放在集合A中, 否则将该簇放在集合B中;

步骤3, 对于集合B中的任意簇 b , 计算 $[e_b(p'_b) - e_b(p_{b0})]/(p'_b - p_{b0})$, 找出集合 $\{[e_b(p'_b) - e_b(p_{b0})]/(p'_b - p_{b0}), b \in B\}$ 的最大元素对应的簇, 用簇 n 表示, 则令 $\bar{p}_n = \min \left\{ p'_n, p_{n, \max}, P_{\max} - \sum_{a \in A} p_a - \sum_{b \in B, b \neq n} p_b \right\}$, 将簇 n 从集合B中删除;

步骤4, 重复执行步骤3直到将所有的功率分配完毕或者集合B为空集.

采用上述步骤得到 \bar{p}_k 后, 基站为 u_{k1} 分配的功率为 $\bar{p}_k - \sum_{m=2}^M p_{km0}$, 基站为 u_{km} 分配的功率为 p_{km0} , 其中, $k = 1, 2, \dots, K$, $m = 2, 3, \dots, M$, 此时的功率分配

方案能最大化系统的能量效率. 由此可知, 系统能量效率最大时的总功率为 $\sum_{k=1}^K \bar{p}_k$, 即使 $P_{\max} > \sum_{k=1}^K \bar{p}_k$, 最大化系统能量效率的总功率仍为 $\sum_{k=1}^K \bar{p}_k$.

3 复杂度及收敛性分析

采用二分法找到最大化单个簇的能量效率的功率时的复杂度为 $O(NK)$, 然后为每个簇分配最低功率, 其复杂度为 $O(1)$, 最后依次找出增大功率时能量效率增长最快的簇并调整该簇的功率, 步骤3的迭代次数不超过 K , 其复杂度为 $O(K)$, 因此, 所提方案的复杂度为 $O(K(N+1))$. 在实际系统中, 每个小区内的簇的总数 K 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能量效率, 并分别与文献[5]和文献[9]中的功率分配方案进行了对比. 假定单个基站中簇数量的取值分别为 $K = 3, K = 4$, 每个簇中用户的数量 M 取值分别为2, 3, 4和5. 假定 r 有2种取值, $r = 0.3$ 或 $r = 0.5$. 由于文献[9]中仅考虑了多簇且每个簇包含2个用户的场景, 因此, 本节只仿真了该方案 $M = 2$ 时的能量效率.

图2所示为 $r = 0.3$ 时所提方案的能量效率. 由图2可知, 当基站的总功率相同时, 系统的能量效率随着 M 和 K 的增大而增大. 原因在于: 总功率相同时, M 越大, 频段利用率越高, 系统和速率越高, 从而系统的能量效率越高; K 越大, 可用频段增加, 系统的和速率越高, 从而系统的能量效率越高. $M = 4$ 且 $J = 3$ 时的能量效率是 $M = 3$ 且 $J = 4$ 时能量效率的1.12倍. 尽管此时小区中的用户数相同, 能量效率却不同, 原因在于前者的每个簇包含3个用户, 后者的每个簇包含4个用户, 即前者使用的频段较多, 用户的速率相对较高, 从而能量效率相对较高. 当基站功率的范围为 $[2 \text{ dB}, 10 \text{ dB}]$ 时, 能量效率随着基站总功率的增加而增加, 基站功率的范围为 $[10 \text{ dB}, 14 \text{ dB}]$ 时, 能量效率保持不变. 原因在于:

当 $P_{\max} < \sum_{k=1}^K p'_k$ 时, 随着 P_{\max} 的增大, 为部分簇分配

的功率增大,从而增大了能量效率;当 $P_{\max} = \sum_{k=1}^K p'_k$ 时,为第 k 个簇分配功率 p'_k ,此时该簇的能量效率最大;当 $P_{\max} > \sum_{k=1}^K p'_k$ 时,为第 k 个簇分配的功率依然是 p'_k ,因为若为该簇分配的功率高于 p'_k ,反而降低了该簇的能量效率. 所以,总功率提高到一定程度后,为各用户分配功率保持不变,系统的能量效率也保持不变.

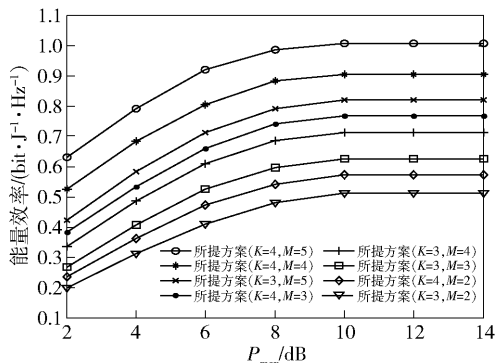


图 2 $r=0.3$ 时所提方案的能量效率

图 3 所示为 $r=0.5$ 时所提方案的能量效率. 由图 3 可知,当基站总功率相同时, M 和 K 越大,系统的能量效率越高. 当 $M=4$ 且 $J=3$ 时的能量效率是 $M=3$ 且 $J=4$ 时能量效率的 1.14 倍. 当基站功率范围为 $[2 \text{ dB}, 10 \text{ dB}]$ 时,所提方案的能量效率随着基站总功率的增加而增加,基站功率范围为 $[10 \text{ dB}, 14 \text{ dB}]$ 时,能量效率保持不变. 与图 2 相比,当其他参数相同时,图 3 中的能量效率的值均低于图 2 相应的能量效率. 原因在于,当簇数量 K 和基站总功率都相同时,随着 r 的增大,基站将更多的功率分配给信道条件较差的用户,而分配给信道条件较好的用户的功率较低,这必然会降低系统和速率以及能量效率.

图 4 所示为 3 种功率分配方案的能量效率,其中 $K=3$. 由于文献[9]中只考虑了功率约束,无速率约束,所以未指定 r 的取值. 由图 4 可知, $r=0.3$ 且 $M=2$ 时,所提方案的能量效率比文献[5]和文献[9]的方案分别提高了 $0.36 \text{ bit} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 和 $0.12 \text{ bit} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$;当 $r=0.3$ 且 $M=3$ 时,所提方案的能量效率比文献[5]的方案提高了 $0.52 \text{ bit} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$. 当 $r=0.5$ 且 $M=2$ 时,所提方案的能量效率比文献[5]的方案提高了 $0.32 \text{ bit} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$,而较文献[9]的方案低了 $0.06 \text{ bit} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$,原因在于所提

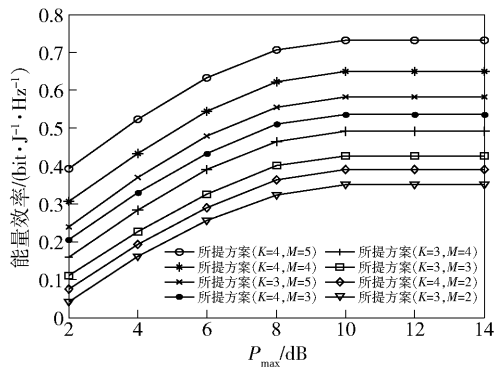


图 3 $r=0.5$ 时所提方案的能量效率

方案考虑了所有用户正确检测信号时对 SINR 的最低需求,文献[9]的方案只考虑了功率约束,未考虑其他约束条件. 当 $r=0.5$ 且 $M=3$ 时,所提方案的能量效率比文献[5]的方案提高了 $0.42 \text{ bit} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$. 此外,由图 4 还可知,基站功率范围为 $[2 \text{ dB}, 10 \text{ dB}]$ 时,所提方案和文献[9]方案的能量效率随着基站总功率的增加而增加,基站功率范围为 $[10 \text{ dB}, 14 \text{ dB}]$ 时,两方案的能量效率保持不变. 基站功率范围为 $[2 \text{ dB}, 14 \text{ dB}]$ 时,文献[5]方案的能量效率随系统总功率的增加而逐渐降低. 原因在于,文献[5]方案的目标是最大化系统的和速率,最优的总功率为基站的最大总功率 P_{\max} ,随着 P_{\max} 的增大,系统的和速率逐渐增大,然而和速率增加的速度低于总功率增加的速度,致使系统的能量效率逐渐下降.

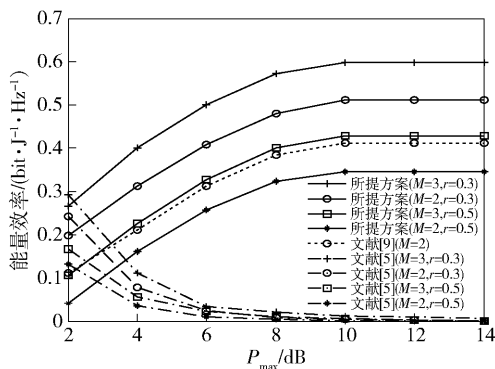


图 4 3 种方案的能量效率

5 结束语

提出了单小区下行多簇且每个簇包含多个用户的 NOMA 系统中最大化能量效率的功率分配方案. 以正确执行 SIC 为约束条件,建立最大化系统能量效率的功率分配优化问题,简化该问题并用迭代算法进行求解. 与已有的方案相比,所提方案

将最大化能量效率的功率分配扩展到每个簇包含任意用户的 NOMA 系统. 仿真结果显示, 所提方案的系统能量效率高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能量效率还有待于研究.

参考文献:

- [1] Dai Linglong, Wang Bichai, Yuan Yifei, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
- [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] Kim S, Kim H, Hong D. Joint power allocation and MCS selection in downlink NOMA system[C]//IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC). Bologna: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [4] Yaru Fu, Salatin L, Sung C W, et al. Subcarrier and power allocation for the downlink of multicarrier NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 11833-11847.
- [5] Tsai Y R, Wei H A. Quality-balanced user clustering schemes for non-orthogonal multiple access systems[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(1): 113-116.
- [6] Gleit N, Chibani R B. Power allocation for energy-efficient downlink NOMA systems[C]//Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). Sousse: IEEE Press, 2019: 611-613.
- [7] Zhang Yi, Wang Huiming, Zheng Tongxing, et al. Energy-efficient transmission design in non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 2852-2857.
- [8] 陆音, 包宽鑫, 谢浩然. 一种基于能量效率和用户公平的 NOMA 下行链路功率分配方案[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2019, 39(4): 9-15.
Lu Yin, Bao Kuanxin, Xie Haoran. NOMA downlink power distribution scheme based on energy efficiency and user equity[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 39(4): 9-15.
- [9] Liu Gongliang, Ruisong, Haijun, et al. Super-modular game-based user scheduling and power allocation for energy-efficient NOMA network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(6): 3877-3888.
- [10] Yang Zhaohui, Wei Cunhua, et al. On the optimality of power allocation for NOMA downlinks with individual QoS constraints[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(7): 1649-1652.