



下行 NOMA 系统中公平的功率分配方案

田心记^{1*}, 张丹青¹, 李晓静²

(1. 河南理工大学物理与电子信息学院 河南 焦作 454150; 2. 黄河科技学院信息工程学院 郑州 450000)

【摘要】已有的非正交多址接入 (NOMA) 系统中最大化公平性的功率分配方案没有考虑到用户的最低速率需求。针对此问题, 该文提出了 NOMA 系统中公平地提高用户速率的功率分配方案。首先根据信道条件以及每个用户的最低速率需求计算每个簇所需的最低功率, 然后以每个簇所需的最低功率以及所有簇所需的最低总功率作为约束条件, 建立满足所有用户最低速率需求的情况下公平地提高每个用户速率的功率分配优化问题, 最后通过多次调整部分簇的功率得到既满足用户最低速率需求又公平地提高用户速率的功率分配方案。仿真结果显示, 用户的最低速率需求不同时, 所提方案中用户提高的速率和中断概率均优于相同场景中已有的功率分配方案。

关键词 最大化公平性; 非正交多址接入; 中断概率; 功率分配; 速率
中图分类号 TN911.22 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2019053

Fairly Power Allocation Scheme in Downlink NOMA Systems

TIAN Xin-ji^{1*}, ZHANG Dan-qing¹, and LI Xiao-jing²

(1. School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University Jiaozuo Henan 454150;
2. School of Information Engineering, Huanghe S & T University Zhengzhou 450000)

Abstract The minimum rate requirements of users are not taken into consideration in the existing power allocation schemes for maximum fairness of non-orthogonal multiple access (NOMA) systems. For this problem, the poa power allocation scheme for fairly improving user rate in NOMA systems is proposed. Firstly, the minimum power required for each cluster is calculated based on channel conditions and rate requirement for each user. Secondly, in the case of meeting the minimum rate requirements of all users, the power allocation optimization problem of improving each user's rate fairly is established with the constraints of minimum power required by each cluster and the total power required by all clusters. Finally, the power allocation scheme, which satisfies the minimum rate demand of the user and maximizes the user's improved minimum rate, is obtained by adjusting the power of the part clusters. The simulation results show that when the minimum rate requirements of users are different, the increased rates of users and the outage probabilities of the proposed scheme both outperform these of the existing schemes in the same scenario.

Keywords maximum fairness; non-orthogonal multiple access; outage probability; power allocation; rate

随着移动通信的迅猛发展, 传统的多址接入技术已难以满足无线数据业务量的爆炸式增长^[1-2]。因此, 第五代移动通信采用具有更高系统吞吐量和更高频谱效率的 NOMA 技术^[3-5]。相较于传统多址接入技术在时域、频域和码域的研究, NOMA 技术引入了一个新的维度-功率域^[6], 在基站端为多个用户分配不同的功率, 然后将这些用户的信号叠加在相同的时频资源上, 用户接收到信号后采用串行干扰消除技术检测期望接收的信号^[7-8]。功率分配不仅关系到各用户信号的检测次序, 还影响到系统的可

靠性和有效性, NOMA 系统中的功率分配是近年的研究热点之一。

很多学者对单小区下行 NOMA 系统中的功率分配方案进行了研究, 其中功率分配的目标有 3 种: 最大化和速率、最大化能量效率以及最大化公平性。文献 [9] 研究了包含两用户的单个 NOMA 簇在用户最低速率需求约束下的功率分配方案, 目标是最大化两个用户的和速率, 给出了功率分配方案的闭式解。文献 [10] 将文献 [9] 中的两用户扩展到任意用户场景, 在总功率约束和用户最低速率需

收稿日期: 2019-02-28; 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 河南省科技攻关项目 (172102210023)

作者简介: 田心记 (1983-), 女, 博士, 副教授, 主要从事 NOMA 技术、干扰消除方面的研究. E-mail: 718213108@qq.com

求约束下, 提出了最大化单输入单输出 (single input single output, SISO) NOMA 系统和速率的功率分配方案。文献 [11] 研究了包含任意用户的单个 NOMA 簇中最大化能量效率的功率分配方案, 文献 [12] 扩展了文献 [11] 的场景, 提出了包含多个簇且每个簇包含任意用户的 NOMA 系统中最大化能量效率的功率分配方案。对于包含多个用户的单个 NOMA 簇, 文献 [13] 以最大最小公平性为准则, 在总功率和强用户最低速率需求约束下, 提出了一种既能满足强用户最低速率需求又能最大化弱用户的最低速率的功率分配方案。文献 [14] 以最大公平性 (maximin fairness, MMF) 为准则, 提出了一种能最大化用户最低速率的功率分配方案。该方案中所有用户的速率都相同, 实现了用户在速率上的公平性。然而, 该方案未考虑单个用户的速率需求, 因此, 有可能导致部分用户的速率高于该用户的速率需求, 一部分用户的速率低于该用户的速率需求。

针对文献 [14] 的不足, 提出了 NOMA 系统中公平地提高用户速率的功率分配方案。根据信道条件以及每个用户的最低速率需求计算每个簇所需的最低功率, 在满足用户最低速率需求的基础上, 推导了单个簇内两个用户提高的最低速率的最大值与该簇的总功率之间的关系, 基于此建立满足用户最低速率需求的情况下公平地提高每个用户速率的功率分配优化问题, 通过多次调整部分簇的功率得到在满足用户最低速率需求的基础上能最大化每个用户提高的最低速率的功率分配方案。仿真结果显示, 当用户的最低速率需求不同时, 所提方案中用户提高的最低速率和中断概率均优于 MMF 方案。

1 系统模型

包含 1 个基站和 $2K$ 个用户的下行 NOMA 系统, 如图 1 所示, 基站和用户都配置单根天线。用户被分为 K 个簇, 每个簇包含两个用户, 分别用 u_{k1} 和 u_{k2} 表示第 k 个簇中的两个用户, $k=1,2,\dots,K$ 。假定 u_{k1} 是近距离用户, u_{k2} 是远距离用户。基站到 u_{k1} 和 u_{k2} 的信道分别为 h_{k1} 和 h_{k2} , $|h_{k1}|^2 \geq |h_{k2}|^2$ 。基站为第 k 个簇分配的功率为 p_k , 其中 u_{k1} 和 u_{k2} 的功率分别为 p_{k1} 和 p_{k2} , $p_k = p_{k1} + p_{k2}$, $p_{k1} < p_{k2}$ 。基站为每个簇分配一个子频段, 簇间子频段正交。

分别用 y_{k1} 和 y_{k2} 表示 u_{k1} 和 u_{k2} 的接收信号, y_{k1} 和 y_{k2} 的表达形式分别为:

$$y_{k1} = h_{k1}(\sqrt{p_{k1}}x_{k1} + \sqrt{p_{k2}}x_{k2}) + n_{k1} \quad (1)$$

$$y_{k2} = h_{k2}(\sqrt{p_{k1}}x_{k1} + \sqrt{p_{k2}}x_{k2}) + n_{k2} \quad (2)$$

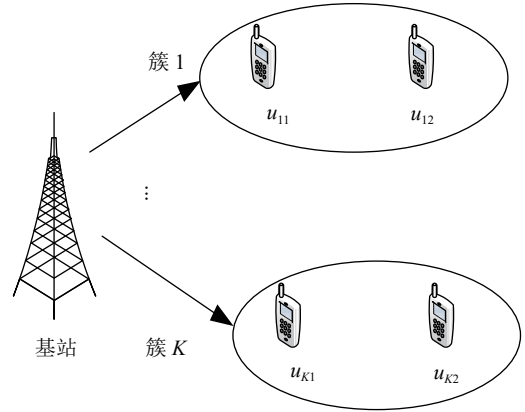


图 1 下行 NOMA 系统模型

式中, x_{k1} 和 x_{k2} 分别是 u_{k1} 和 u_{k2} 的期望接收信号; n_{k1} 和 n_{k2} 分别是 u_{k1} 和 u_{k2} 接收到的高斯白噪声, 均值为零, 方差为 σ^2 。

近距离用户 u_{k1} 首先检测出 u_{k2} 的期望接收信号 x_{k2} , 并消除 x_{k2} 对 y_{k1} 的干扰。 u_{k1} 译码 x_{k2} 时的信干噪比 (signal to interference and noise ratio, SINR) 为:

$$s_{u_{k1} \rightarrow x_{k2}} = \frac{p_{k2}|h_{k1}|^2}{p_{k1}|h_{k1}|^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

若要正确译码 x_{k2} , $s_{u_{k1} \rightarrow x_{k2}}$ 必须高于某一值, 假定该值是 a_0 , 即 $s_{u_{k1} \rightarrow x_{k2}} \geq a_0$ 。 u_{k1} 消除 x_{k2} 对 y_{k1} 造成的干扰后, 译码自身的期望接收信号 x_{k1} 时的 SINR 为:

$$s_{u_{k1} \rightarrow x_{k1}} = \frac{p_{k1}|h_{k1}|^2}{\sigma^2} \quad (4)$$

u_{k2} 是远距离用户, 可直接译码自身的期望接收信号 x_{k2} 。 u_{k2} 译码 x_{k2} 时的 SINR 为:

$$s_{u_{k2} \rightarrow x_{k2}} = \frac{p_{k2}|h_{k2}|^2}{p_{k1}|h_{k2}|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

u_{k1} 和 u_{k2} 的单位带宽速率 R_{k1} 和 R_{k2} 分别为:

$$R_{k1} = \log_2 \left(1 + \frac{p_{k1}|h_{k1}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (6)$$

$$R_{k2} = \log_2 \left(1 + \frac{p_{k2}|h_{k2}|^2}{p_{k1}|h_{k2}|^2 + \sigma^2} \right) \quad (7)$$

分别用 r_{k1} 和 r_{k2} 表示 u_{k1} 和 u_{k2} 所需的最低单位带宽速率。用 P_0 表示满足所有用户最低速率需求所需的最低总功率, 用 P_{\max} 表示基站的总功率。 $P_{\max} \geq P_0$ 时, 基站的总功率能够满足所有用户的最低单位带宽速率需求。所提方案的目标是: 在满足每个用户最低单位带宽速率需求的情况下, 公平地提高每个用户的速率。

根据以上所述, $P_{\max} \geq P_0$ 时, 功率分配的目标用公式表示为:

$$\begin{aligned}
& \max_{p_{k1}, p_{k2}} \min \{R_{k1} - r_{k1}, R_{k2} - r_{k2}\} \quad k = 1, 2, \dots, K \\
& \text{s.t. C1: } \sum_{k=1}^K (p_{k1} + p_{k2}) = P_{\max} \\
& \quad \text{C2: } R_{k1} \geq r_{k1} \\
& \quad \text{C3: } R_{k2} \geq r_{k2} \\
& \quad \text{C4: } s_{u_{k1} \rightarrow x_{k2}} \geq a_0
\end{aligned} \quad (8)$$

式中, C1 表示基站的总功率为 P_{\max} ; C2 表示 u_{k1} 的单位带宽速率不低于 r_{k1} ; C3 表示 u_{k2} 的单位带宽速率不低于 r_{k2} ; C4 表示 u_{k1} 译码 x_{k2} 时对 SINR 的要求。

2 功率分配方案

本节首先推导了满足所有用户最低速率需求时所需的最低总功率 P_0 , 然后再给出 $P_{\max} \geq P_0$ 时公平地提高每个用户速率的功率分配方案。

2.1 最低总功率 P_0 的推导

首先推导每个簇所需的最低功率。由式 (8) 中的 C2 和 C3 可得:

$$p_{k1} \geq \frac{a_{k1}\sigma^2}{|h_{k1}|^2} \quad (9)$$

$$p_{k2} \geq \frac{a_{k2}(p_{k1}|h_{k2}|^2 + \sigma^2)}{|h_{k2}|^2} = a_{k2}p_{k1} + \frac{a_{k2}\sigma^2}{|h_{k2}|^2} \quad (10)$$

式中, $a_{k1} = 2^{r_{k1}} - 1$, 是 u_{k1} 的单位带宽速率为 r_{k1} 时对应的 SINR; $a_{k2} = 2^{r_{k2}} - 1$, 是 u_{k2} 的单位带宽速率为 r_{k2} 时对应的 SINR。

由于 a_0 是 u_{k1} 正确译码 x_{k2} 时对 SINR 的最低要求, 因此 $a_0 = a_{k2}$ 即可。 $f(x) = \frac{p_{k2}x}{p_{k1}x + \sigma^2}$ 是 x 的单调递增函数且 $|h_{k1}|^2 \geq |h_{k2}|^2$, 式 (10) 成立时, 式 (8) 中的 C4 必定成立。因此, p_{k1} 和 p_{k2} 满足式 (9) 和式 (10) 时, 式 (8) 中 C2、C3 和 C4 成立。

用 p_{k0} 表示第 k 个簇所需的最低功率, 由式 (9) 和式 (10) 知 p_{k0} 的取值为:

$$p_{k0} = \frac{a_{k1}\sigma^2}{|h_{k1}|^2} + \frac{a_{k1}a_{k2}\sigma^2}{|h_{k1}|^2} + \frac{a_{k2}\sigma^2}{|h_{k2}|^2} \quad (11)$$

式 (11) 是单个簇满足用户最低速率需求时所需的最低功率, 考虑到每个簇都有最低功率要求, 因此满足所有用户的最低速率需求时所需的最低总功率 P_0 的取值为:

$$P_0 = \sum_{k=1}^K \left(\frac{a_{k1}\sigma^2}{|h_{k1}|^2} + \frac{a_{k1}a_{k2}\sigma^2}{|h_{k1}|^2} + \frac{a_{k2}\sigma^2}{|h_{k2}|^2} \right) \quad (12)$$

2.2 功率分配

求解式 (8) 就能得到 $P_{\max} \geq P_0$ 时的功率分配。

若由式 (8) 直接求解功率, 复杂度极高。

所提功率分配方案的优化目标是公平地提高每个用户的速率, 文献 [14] 中 MMF 方案的优化目标是最大化系统的公平性, 文献 [15] 的优化目标是最大化系统的能量效率。虽然所提功率分配方案与文献 [14-15] 的优化目标不同, 然而三者的场景一致, 故式 (8) 的求解可借鉴文献 [14-15] 的方法, 即先求解第 k 个簇的总功率为 p_k 时公平地提高该簇内两用户速率的功率分配, 然后简化式 (8) 并求解簇间功率分配, 最后根据簇间功率分配的结果为单个用户分配功率。

第 k 个簇的总功率为 p_k 时, 该簇内功率分配的目标用公式表为:

$$\begin{aligned}
& \max_{p_{k1}, p_{k2}} \min \{v_{k1}, v_{k2}\} \\
& \text{s.t. C1: } p_{k1} + p_{k2} = p_k \\
& \quad \text{C2: } p_{k1} \geq \frac{a_{k1}\sigma^2}{|h_{k1}|^2} \\
& \quad \text{C3: } p_{k2} \geq a_{k2}p_{k1} + \frac{a_{k2}\sigma^2}{|h_{k2}|^2}
\end{aligned} \quad (13)$$

式中, v_{ki} 表示用户实际的单位带宽速率与所需的最低单位带宽速率的差值 (即提高的速率), $v_{ki} = R_{ki} - r_{ki}$, $i=1,2$; C1 表示该簇的总功率约束; C2 和 C3 表示 u_{ki} 的速率不低于 r_{ki} 时 p_{ki} 需要满足的条件。

在第 k 个簇的总功率 p_k 保持不变的情况下, 由于 $p_k = p_{k1} + p_{k2}$ 及 $v_{ki} = R_{ki} - r_{ki}$, $i=1,2$, 增大 p_{k1} 时, v_{k1} 增大且 v_{k2} 减小, 增大 p_{k2} 时, v_{k2} 增大且 v_{k1} 减小。所以只有当 $v_{k1} = v_{k2}$ 时, 才能最大化 $\min \{v_{k1}, v_{k2}\}$, 此时在满足用户最低单位带宽速率需求的基础上, 两个用户提高的速率相等, 这样就公平地提高了两个用户的速率。 $v_{k1} = v_{k2}$ 等价于:

$$\log_2 \left(1 + \frac{p_{k1}|h_{k1}|^2}{\sigma^2} \right) - r_{k1} = \log_2 \left(1 + \frac{p_{k2}|h_{k2}|^2}{p_{k1}|h_{k2}|^2 + \sigma^2} \right) - r_{k2} \quad (14)$$

式 (14) 成立时, p_{k1} 与该簇总功率 p_k 之间的关系为:

$$p_{k1} = \frac{-\sigma^2 b + \sigma \sqrt{\sigma^2 b^2 + 4a(|h_{k2}|^2 p_k d + \sigma^2 d - \sigma^2)}}{2a} \quad (15)$$

式中, $a = |h_{k1}|^2 |h_{k2}|^2$; $b = |h_{k1}|^2 + |h_{k2}|^2$; $d = 2^{r_{k1} - r_{k2}}$ 。

此时, v_{k1} 和 v_{k2} 的取值均为:

$$v_{k1} = v_{k2} = \log_2 \left(1 + \frac{-\sigma b + \sqrt{\sigma^2 b^2 + 4a(|h_{k2}|^2 p_k d + \sigma^2 d - \sigma^2)}}{2\sigma |h_{k2}|^2} \right) \quad (16)$$

假定第 k 个簇的总功率为 p_k , MMF 方案中该簇内两个用户的速率相等即 $R_{k1} = R_{k2}$ 时, u_{k1} 的功率 p'_{k1} 与该簇总功率 p_k 之间的关系为:

$$p'_{k1} = \frac{-\sigma^2 b + \sigma \sqrt{\sigma^2 b^2 + 4a|h_{k2}|^2 p_k}}{2a} \quad (17)$$

根据式 (15) 和式 (17), 可得:

当 $r_{k1} > r_{k2}$ 时, $d = 2^{r_{k1}-r_{k2}} > 1$, $p_{k1} > p'_{k1}$;

当 $r_{k1} = r_{k2}$ 时, $d = 2^{r_{k1}-r_{k2}} = 1$, $p_{k1} = p'_{k1}$;

当 $r_{k1} < r_{k2}$ 时, $d = 2^{r_{k1}-r_{k2}} < 1$, $p_{k1} < p'_{k1}$ 。

由文献 [14] 知, 在单个簇的总功率保持不变时, 为簇内强用户分配的功率越大, 簇内两用户的和速率越高。因此, $r_{k1} > r_{k2}$ 时, 所提方案单簇和速率高于 MMF 方案; $r_{k1} = r_{k2}$ 时, 所提方案单簇和速率等于 MMF 方案; $r_{k1} < r_{k2}$ 时, 所提方案单簇和速率低于 MMF 方案。

令 $v_k = \max\{\min\{v_{k1}, v_{k2}\}\}$, 式 (16) 给出了单个簇内的 v_k 与该簇总功率 p_k 之间的关系。接下来简化式 (8) 并求解簇间功率分配。此时, 式 (8) 可转化为:

$$\begin{aligned} & \max_{p_k} \{v_k\} \\ \text{s.t. } C1: & \sum_{k=1}^K p_k = P_{\max} \\ C2: & p_k \geq \frac{a_{k1}\sigma^2}{|h_{k1}|^2} + \frac{a_{k1}a_{k2}\sigma^2}{|h_{k1}|^2} + \frac{a_{k2}\sigma^2}{|h_{k2}|^2} \end{aligned} \quad (18)$$

式中, C1 表示基站的总功率为 P_{\max} ; C2 表示满足单个簇中用户最低速率需求时该簇的总功率需要满足的条件。当式 (18) 中的 C2 成立且按式 (15) 分配功率时, 式 (8) 中 C2、C3 和 C4 必定成立。

式 (8) 要求解 $2K$ 个用户的功率分配, 而式 (18) 仅求解 K 个簇的功率分配, 因此, 式 (18) 是式 (8) 的一种简化表达形式。但是, 此时仍无法直接给出式 (18) 的闭合解, 为此接下来给出一种迭代的簇间功率分配方案。该方案的思路如下: 首先为第 k 个簇分配满足用户最低速率需求的最低功率 p_{k0} , 则 $P_{\max} - \sum_{k=1}^K p_{k0}$ 是用于提高所有用户速率的功率, 再将这些功率平均分配给每个簇作为该簇功率的初始值, 然后开始迭代; 在每次迭代过程中, 计算第 k 个簇中用户提高的速率 v_k 并组成向量 $\mathbf{mv} = \{v_k\}$, 找出 \mathbf{mv} 中的最大元素对应的簇和最小元素对应的簇, 分别用簇 m 和簇 j 表示, 在满足该簇最低速率需求的条件下, 减少第 m 个簇的功率同时增加第 j 个簇的功率, 继续下次迭代并计算得到 \mathbf{mv} ; 若本次迭代中的 $\min\{\mathbf{mv}\}$ 大于等于前一次迭代中的

$\min\{\mathbf{mv}\}$, 则继续迭代, 否则停止迭代, 前一次迭代时的功率即为所提方案为每个簇分配的功率。迭代的簇间功率分配方案的具体步骤如下。

1) 根据信道条件以及用户所需的最低单位带宽速率计算第 k 个簇所需的最低功率 p_{k0} , 令 $\beta = \left(P_{\max} - \sum_{k=1}^K p_{k0} \right) / K$ 且 $p_k = p_{k0} + \beta$, 令 $\text{minrateup} = 0$ 且 $i = 1$, 令矩阵 $\mathbf{U} = [p_1, p_2, \dots, p_K]$, K 是簇的总数, i 表示迭代次数, \mathbf{U} 的每行用来存放每次迭代过程中的 p_k 。

2) 根据 p_k 计算 v_k , 若 $\min\{\mathbf{mv}\} \geq \text{minrateup}$, 令 $i = i + 1$, $\text{index} = 0$ 且 $\text{minrateup} = \min\{\mathbf{mv}\}$, 执行步骤 3) 及其后面的步骤, 若 $\min\{\mathbf{mv}\} < \text{minrateup}$, 则 $\mathbf{U}(i-1, k)$ 就是所提方案为第 k 个簇分配的功率, 即令 $p_k = \mathbf{U}(i-1, k)$, 无需执行步骤 3), 停止迭代。

3) 找出 $\min\{\mathbf{mv}\}$ 对应的簇, 用簇 j 表示, 令 $p_j = p_j + \theta$, $0 < \theta < \beta$ 。

4) 找出 $\max\{\mathbf{mv}\}$ 对应的簇, 用簇 m 表示, 若 $p_m - \theta \geq p_{m0}$, 将 $p_m - \theta$ 赋值给 p_m 且令 $\text{index} = 1$, 若 $p_m - \theta < p_{m0}$, 从 \mathbf{mv} 中删除 v_m , 再次执行该步骤, 直到 $\text{index} = 1$;

5) 将 $[p_1, p_2, \dots, p_K]$ 赋值给 \mathbf{U} 的第 i 行, 再次执行步骤 2)。

minrateup 表示前一次迭代过程中 \mathbf{mv} 的最小元素值, $\min\{\mathbf{mv}\}$ 表示本次迭代过程中 \mathbf{mv} 的最小元素值。若 $\min\{\mathbf{mv}\} < \text{minrateup}$, 则表示前一次迭代时的功率能更公平地提高用户的速率, 停止迭代; 若 $\min\{\mathbf{mv}\} \geq \text{minrateup}$, 则表示此次迭代的功率能更公平地提高用户的速率, 继续进行功率调整以更公平地提高每个用户的速率, 即执行步骤 3)~5)。在步骤 3) 中找到 $\min\{\mathbf{mv}\}$ 对应的簇, 增加该簇的功率; 在步骤 4) 中, 找出 $\max\{\mathbf{mv}\}$ 对应的簇, 用簇 m 表示, 若将第 m 个簇的功率减少 θ 后仍不低于该簇所需的最低功率, 则将 $p_m - \theta$ 赋值给 p_m , 否则不对簇 m 的功率进行调整, 并且从 \mathbf{mv} 中删除 v_m , 采用同样的方法找出可以减少功率的簇。

θ 表示每次迭代过程中功率的调整量, index 表示每次迭代过程中是否调整过功率, $\text{index} = 1$ 表示已经调整过功率, 可以进行下一次迭代。

采用上述方法得到第 k 个簇的功率 p_k 后, 为每个用户分配功率, 其中, u_{k1} 的功率 p_{k1} 与 p_k 的关系如式 (15) 所示, u_{k2} 的功率为 $p_{k2} = p_k - p_{k1}$ 。

3 性能比较及仿真

本节仿真了所提功率分配方案的性能, 并与文

献 [14] 中的 MMF 方案进行了对比。假定单个基站服务了 10 个用户, 每个簇中有 2 个用户, 即簇数目 $K=5$, 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。由 2.2 节中的分析可知: 单个簇的总功率相等的情况下, 当 $r_{k1} \geq r_{k2}$ 时, 所提方案的单簇和速率不低于 MMF 方案, 当 $r_{k1} < r_{k2}$ 时, 所提方案的单簇和速率低于 MMF 方案, 故本节分别仿真了 $r_{k1} > r_{k2}$ 和 $r_{k1} = r_{k2}$ 时, 两种方案下系统提高的最低速率及中断概率。

图 2 仿真了 $r_{k1} > r_{k2}$ 时两种功率分配方案下用户提高的最低速率, 即 $\min\{v_k\}$ 。可以看出, 参数相同时, 所提方案用户提高的最低单位带宽速率高于 MMF 方案。信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 范围为 [10, 20] dB 时, 两种参数下所提方案用户提高的最低速率比 MMF 方案高出了 0.5 bps/Hz。原因在于所提方案在进行功率分配时考虑了每个用户的最低单位带宽速率需求, 在满足用户最低单位带宽速率需求的基础上公平地提高了每个用户的速率, 而 MMF 方案没有考虑用户的最低单位带宽速率需求。从图中还能看出, $r_{k1}=2, r_{k2}=1$ 时用户提高的最低速率高于 $r_{k1}=3, r_{k2}=2$ 时用户提高的最低速率。原因在于当基站总功率 P_{\max} 保持不变时, 一部分功率用来满足用户的最低速率需求, 另一部分功率用于提高用户的速率, 当用户的最低速率需求越低, 用于提高用户速率的功率越高。

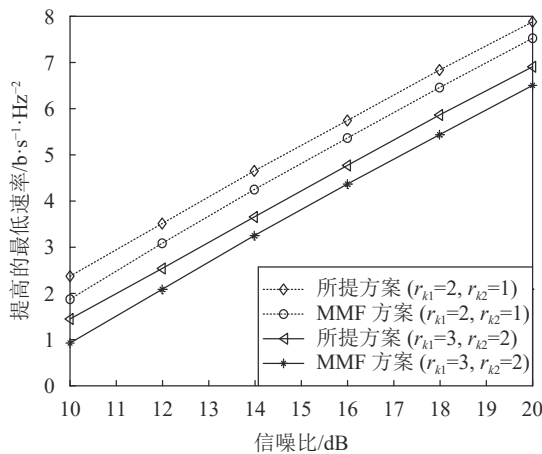


图 2 $r_{k1} > r_{k2}$ 时两种方案用户提高的最低速率

图 3 仿真了 r_{k1} 和 r_{k2} 相等时两种功率分配方案下用户提高的最低速率。可以看出, 参数相同时, 所提方案提高的最低速率与 MMF 方案相同。原因在于 MMF 方案功率分配的目标是最大化用户的最低速率, 所提方案的目标是最大化用户提高的最低速率, 当 $r_{k1}=r_{k2}$ 时, 两种功率分配方案的目标一致。从图 3 中还能看出, $r_{k1}=r_{k2}=1$ 时用户提高的最低速

率高于 $r_{k1}=r_{k2}=2$ 时用户提高的最低速率。原因在于当基站总功率 P_{\max} 保持不变时, 用户的最低速率需求越高, P_0 越高, 从而用于提高用户速率的功率 $P_{\max} - P_0$ 越低。因此, 用户的最低速率需求越高, 提高的速率越低。

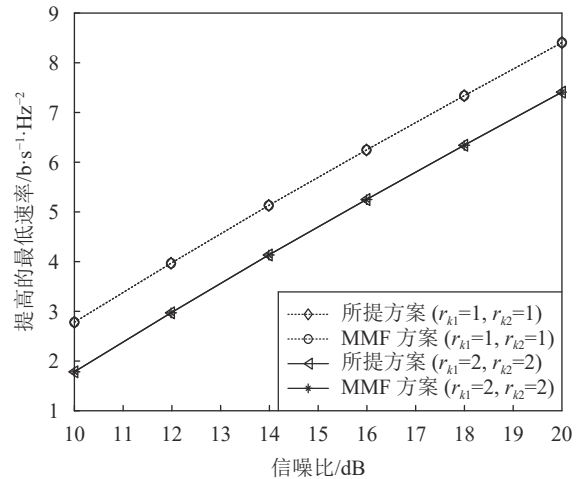


图 3 $r_{k1} = r_{k2}$ 时两种方案用户提高的最低速率

图 4 仿真了 $r_{k1} > r_{k2}$ 时两种功率分配方案的中断概率。中断概率定义为: 用户的速率 $R_{ki} < r_{ki}$ 的概率, 即 $P(R_{ki} < r_{ki}) = 1 - P(R_{ki} \geq r_{ki})$, $i=1,2$ 。仿真参数与图 2 中的相同, $r_{k1}=3$ 且 $r_{k2}=2$ 时, 所提方案用户 u_{k1} 和用户 u_{k2} 的门限值分别为 3 和 2, MMF 方案中两用户门限值均为 2.5; $r_{k1}=2$ 且 $r_{k2}=1$ 时, 所提方案用户 u_{k1} 和用户 u_{k2} 的门限值分别为 2 和 1, MMF 方案两用户门限值均为 1.5。MMF 方案两用户的门限值之和与所提方案两用户的门限值之和相等。从图 4 能看出, 参数相同时, 所提方案的中断概率小于 MMF 方案, 原因在于所提方案在满足用户最低速率需求的基础上公平地提高了每个用户的速率, MMF 方案没有考虑用户的最低速率需求, 当所有用户的速率都相同时, 有可能部分用户的速率超出了该用户所需的速率, 而另一部分用户的速率低于该用户所需的速率。从图 4 中还能看出, $r_{k1}=2$ 且 $r_{k2}=1$ 时两种方案的中断概率均低于 $r_{k1}=3$ 且 $r_{k2}=2$ 时的中断概率。原因在于在其他条件相同的情况下, 门限值越低, 中断概率越低。

图 5 仿真了 r_{k1} 和 r_{k2} 相等时两种功率分配方案的中断概率。仿真参数与图 3 中的相同, $r_{k1}=r_{k2}=2$ 时, 所提方案和 MMF 方案用户的门限值均为 2; $r_{k1}=r_{k2}=1$ 时, 所提方案和 MMF 方案的门限值均为 1。从图 5 中能看出, 参数相同时, 所提方案的中断概率与 MMF 方案相同, 原因在于当 r_{k1} 和 r_{k2} 相等时, 两种功率分配方案的目标一致。从图中还能看

出, $r_{k1}=r_{k2}=1$ 时两种功率分配方案的中断概率均低于 $r_{k1}=r_{k2}=2$ 时的中断概率, 原因如前所述。

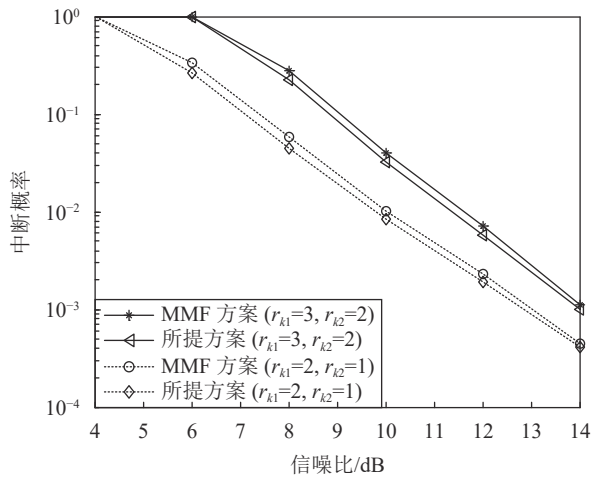


图4 $r_{k1} > r_{k2}$ 时两种方案的中断概率

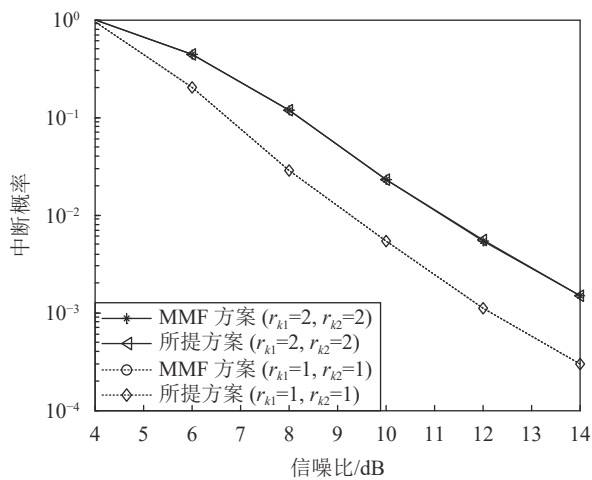


图5 $r_{k1} = r_{k2}$ 时两种方案的中断概率

4 结束语

本文研究了单小区下行 NOMA 系统中的功率分配方案。基于用户的最低速率需求, 建立公平的提高用户速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。所提功率分配方案既满足了用户的最低速率需求, 又公平地提高了用户的速率。由于所提功率分配方案仅考虑了每个 NOMA 簇包含两用户的场景, 如何将该方案扩展到多簇且每个簇包含任意用户的场景有待于进一步研究。

参考文献

- [1] LI Q C, NIU H N, PAPATHANASSIOU A T, et al. 5G network capacity: Key elements and technologies[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2014, 9(1): 71-78.
- [2] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9): 74-81.
- [3] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access[C]//Proceeding of the 77th IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2013: 1-5.
- [4] BI Q, LIANG L, YANG S, et al. Non-orthogonal multiple access technology for 5G systems[J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(5): 20-27.
- [5] BENJEBBOUR A, SAITO Y, KISHIYAMA Y, et al. Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access[C]//Proceeding of the International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems. Piscataway: IEEE, 2013: 770-774.
- [6] ISLAM S M R, AVAZOV N, DOBRE O A, et al. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G Systems: potentials and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016, 19(2): 721-742.
- [7] 张德坤. 非正交多址系统功率分配及干扰消除算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. ZHANG De-kun. Research on power allocation and interference elimination algorithms for non-orthogonal multiple access system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [8] HOJEIJ M R, Farah J, DOUILLARD C, et al. New optimal and suboptimal resource allocation techniques for downlink non-orthogonal multiple access[J]. *Wireless Personal Communications: An International Journal*, 2016, 87(3): 837-867.
- [9] SUN Qi, HAN Shuang-feng, Chin-Lin I, et al. On the ergodic capacity of MIMO-NOMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4(4): 405-408.
- [10] YANG Zhao-hui, XU Wei, PAN Cun-hua, et al. On the optimality of power allocation for NOMA downlinks with individual QoS constraints[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(7): 1649-1652.
- [11] ZHANG Yi, WANG Hui-ming, ZHENG Tong-xing, et al. Energy-efficient transmission design in non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(3): 2852-2857.
- [12] ZENG M, YADAV A, DOBRE O A, et al. Energy-efficient power allocation for MIMO-NOMA with multiple users in a cluster[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 5170-5181.
- [13] 李小瑜, 马文平, 罗炼飞, 等. NOMA 系统在下行链路中的功率分配[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(7): 1595-1599. LI Xiao-yu, MA Wen-ping, LUO Lian-fei, et al. Power allocation for NOMA system in downlink[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(7): 1595-1599.
- [14] ZHU Jian-yue, WANG Jia-heng, HUANG Yong-ming, et al. On optimal power allocation for downlink non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(12): 2744-2757.
- [15] FANG Fang, ZHANG Hai-jun, CHENG Ju-lian, et al. Energy-efficient resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access network[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(9): 3722-3732.