

新的 NOMA 功率分配策略

曹雍, 杨震, 冯友宏

(南京邮电大学宽带无线通信教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 下行链路非正交多址接入技术 (NOMA) 可以有效提高频谱效率和数据速率, 已经广泛应用到第 5 代通信技术的研究中。为了确保用户的服务质量, 针对提高边缘小区用户公平性问题, 提出一种新的功率分配策略。根据比例公平方法, 在保证每个用户最低数据速率约束下, 最大化复用用户中公平性最差的用户的比例公平因子。然后, 将此非凸的目标函数转换成凸函数, 用 KKT 最优约束条件求出问题的最优解。仿真证明, 新的基于 NOMA 的功率分配方案, 系统性能优于传统的正交多址接入 (OMA) 技术。

关键词: 非正交多址; 比例公平; 功率分配; KKT 条件

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

New NOMA power allocation strategy

CAO Yong, YANG Zhen, FENG You-hong

(Key Lab of Broadband Wireless Communication of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Non-orthogonal multiple access (NOMA) has been widely used in the research of the fifth generation communication, due to the advantages of improving the spectrum efficiency and data rate. In order to guarantee the service of users, a new power allocation strategy was proposed to improve the fairness of users in the cell edge. According to the proportional fairness method, the goal was to maximize the proportionality fairness factor among the users with the least fairness in multiplexed users. The nonconvex objective function was transformed into convex function, and the optimal solution of problem was obtained by KKT optimal constraint condition. Simulation results show that the new NOMA-based power allocation strategy proposed outperforms the traditional orthogonal multiple access technology (OMA).

Key words: NOMA, proportional fairness, power allocation, KKT condition

1 引言

随着智能终端的普及和移动新业务的发展, 无线网络各个应用领域的需求呈爆炸性增长, 需要对现有的商用网络进行全面升级, 于是, 新一代移动通信系统 5G 成为全球移动通信领域研究的热点。5G 定位于频谱效率更高、速率更快、容量更大的无线网络, 系统容量在 2020 年要提高 1 000 倍/平方千米, 频谱效率相比 4G 需要提升 5~15 倍^[1]。面对新一代无线网络的需求, 传统的多址技术已经难以满足, 尤其是在系统吞吐量、用户速率体验等

方面。所以, 业内提出在 5G 中采用新型多址接入技术, 即非正交多址接入 (NOMA)。NOMA 可以很好地提高系统吞吐量和频谱效率, 而且还可以成倍地提升系统设备接入量, 在一些 5G 场景, 如上行密集场景和广覆盖多节点接入的场景中, 采用功率复用的 NOMA 较传统的正交接入有明显的性能优势, 更适合未来系统的部署。

NOMA 不同于传统的正交多址传输, 它巧妙地借助连续干扰抵消技术引入了功率域复用概念, 多个用户共享相同的资源块 (如同频率资源), 在发送端, 采用非正交多址方式发送, 主动引入干扰

收稿日期: 2016-11-24; 修回日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671252); 江苏省高校研究生科研创新计划基金资助项目 (No.KYLX15_0833)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61671252), Jiangsu Province University Graduate Research and Innovation Project (No.KYLX15_0833)

信息，信道条件好的用户分配较小的功率，信道条件差的用户分配较大的功率。在接收端通过串行干扰删除（SIC）技术实现正确解调。与正交传输相比，接收机复杂度有所提升，但可以获得更高的频谱效率。非正交传输的基本思想是利用复杂的接收机设计来换取更高的频谱效率，随着芯片处理能力的增强，将使非正交传输技术在实际系统中的应用成为可能。

针对 NOMA 功率分配问题和保证小区边缘用户公平性问题已经有不少学者进行了研究，文献[2]介绍了资源分配中使用比例公平方法的 NOMA 的性能分析，介绍了 3 种功率分配方法：迭代注水法、固定功率分配法和分数功率分配法。文献[3]介绍了基于比例公平调度策略进行的用户集选择方法，该方法可以有效降低用户调度的计算复杂度。文献[4,5]介绍了基于比例公平的功率分配方法，目标函数使多个用户的公平性因子的和最大，文献[4]是针对 2 个用户的 NOMA 的研究，文献[5]是 2 个及以上用户的 NOMA 的研究。文献[6]是在总功率受限、满足每个用户最小速率的条件下，最大化 2 个用户的和速率的方法研究。但文献[2]仅考虑比例公平因子的最大化，并没有涉及用户的 QoS 约束；而文献[4,5]虽然考虑了最大化比例公平因子和用户最低的数据速率，但是当小区边缘用户信道条件很差时，总体和速率还不如相同条件下的传统的正交接入技术；同样，文献[6]虽然考虑了用户的 QoS 以及和速率最大化，边缘用户的公平性得到保证，但是系统和速率仍低于相同条件下传统的正交接入技术。因此，上述研究仍然存在不能权衡用户的公平性和系统数据速率两者间的关系问题，本文针对该问题提出了一种新的下行链路 NOMA 功率分配策略，仿真表明所提方法的性能优于同样场景的文献[6]的性能。

NOMA 由于采用不同用户不同功率的策略，可能导致用户通信质量不均衡，产生不公平问题，影响服务质量，本文主要研究基于 QoS 的非正交多址接入的功率分配问题，并提出了一种新的功率分配策略。主要目标是在下行链路多个用户复用在一个资源块中，保证用户的公平性，即服务质量（QoS, quality of service）。本文的思想是优化比例公平最差的用户，同时尽可能提高所有用户的总速率。在约束上，使子带中复用的用户的数据速率均不小于相同条件下的正交多址接入的数据速率（权衡最低

的公平速率）。

2 系统模型

在下行链路蜂窝系统中，如图 1 所示^[7]，有一个基站， M 个用户，基站和用户均配备一根天线。系统分为 N_{SC} 个子带，总带宽为 W_T ，每个子带的带宽为 $W_{SC} = \frac{W_T}{N_{SC}}$ 。假设每个子带中最大的复用用户数为 m_{max} ，基站向第 n 个子带 ($n \in \{1, 2, 3, \dots, N_{SC}\}$) 中第 m 个用户 ($m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$) 发送信息 $S_{m,n}$ ，发射功率为 $P_{m,n}$ ，其中， $\sum_{j=1}^{N_{SC}} \sum_{i=1}^M P_{i,j} = P_T$ ，总功率受限，则子带 n 中，用户 m 接收信号为

$$y_{m,n} = \sum_{i=1}^{m_{max}} \sqrt{P_{i,n}} h_{m,n} S_{i,n} + N_i$$

$$= \sqrt{P_{m,n}} h_{m,n} S_{m,n} + \sum_{i=1, i \neq m}^{m_{max}} \sqrt{P_{i,n}} h_{m,n} S_{i,n} + N_i \quad (1)$$

其中， $h_{m,n} = g_{L,n} PL^{-1}(d)$ 表示基站到子带 n 中用户 m 的信道参数，假设 $g_{L,n}$ 为瑞利衰落信道增益， $PL^{-1}(d)$ 是路径损耗方程， d 为基站到该用户的距离， N_i 表示加性高斯白噪声。 $y_{m,n}$ 表示用户 m 的接收信息。

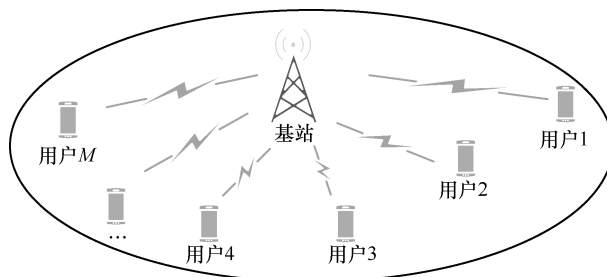


图 1 下行链路 NOMA 的系统模型

在接收端，没有采用串行干扰消除（SIC）技术时，接收端的信号加干扰噪声比（SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio）如式(2)^[7]所示。

$$\gamma_{k,n}^{SINR} = \frac{P_{k,n} |h_{k,n}|^2}{|h_{k,n}|^2 \sum_{i=1, i \neq k}^{m_{max}} P_{i,n} + W_{SC} N_0}$$

$$= \frac{P_{k,n} \varphi_{k,n}}{\varphi_{k,n} \sum_{i=1, i \neq k}^{m_{max}} P_{i,n} + 1} \quad (2)$$

其中, $W_{sc} = \frac{W_T}{N_{sc}}$ 表示子带的带宽, N_0 表示噪声的功率谱密度, $\varphi_{k,n} = \frac{|h_{k,n}|^2}{W_{sc}N_0}$ 表示噪声归一化信道响应 (CRNN, channel response normalized by noise)。

根据香农公式, 可以计算出子带 n 中的吞吐量为

$$R_n = W_{sc} \sum_{i=1}^{m_{max}} \text{lb}(1 + \gamma_{k,n}^{\text{SINR}}) = W_{sc} \sum_{i=1}^{m_{max}} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{k,n} \varphi_{k,n}}{I_{k,n} + 1} \right) \quad (3)$$

其中, $I_{k,n} = \varphi_{k,n} \sum_{i=1, i \neq k}^{m_{max}} P_{i,n}$ 表示用户 $m_{k,n}$ 在子带 n 中受其他用户的干扰。

在接收端, 采用串行干扰消除(SIC)技术^[8-10], 如图 2 所示, 本文假设小区中有 2 个用户 m_1 和 m_2 , 其中, m_1 的信道条件较好 (小区内用户), m_2 的信道条件较差 (边缘小区用户)。即信道条件最差的用户 m_2 直接解调自己的信号, 将其用户 m_1 对它的干扰当成噪声滤除。而信道条件较好的用户 m_1 , 执行 SIC, 先解调用户 m_2 , 将接收到的信号减去已经解调出来的用户信号 m_2 , 然后再解调自己的信号。

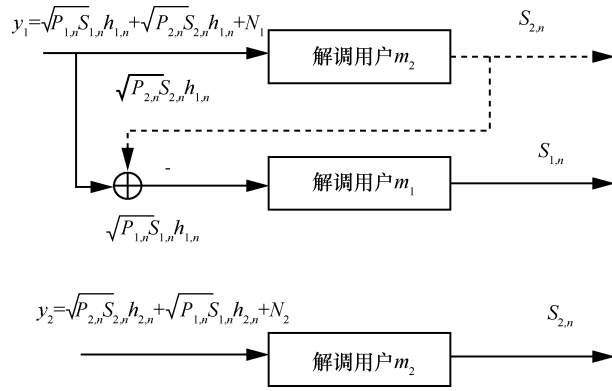


图 2 2 个用户 SIC 解调过程

如果考虑更多用户, 假设在信道 n 中, 复用 m_{max} 个用户 ($m_{max} \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$), 这些用户按照 CRNN 降序排列, 即 $\varphi_{1,n} > \varphi_{2,n} > \varphi_{3,n} > \dots > \varphi_{m_{max},n}$, 则在 SIC 解调后, 第 k 个用户信号加干扰噪声比表示为

$$\tilde{\gamma}_{k,n}^{\text{SINR}} = \frac{P_{k,n} |h_{k,n}|^2}{|h_{k,n}|^2 \sum_{i=1}^{k-1} P_{i,n} + W_{sc}N_0} = \frac{P_{k,n} \varphi_{k,n}}{\varphi_{k,n} \sum_{i=1}^{k-1} P_{i,n} + 1} \quad (4)$$

因此, 用户 $m_{k,n}$ 的吞吐量为

$$R_{k,n} = W_{sc} \text{lb}(1 + \tilde{\gamma}_{k,n}^{\text{SINR}}) = W_{sc} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{k,n} \varphi_{k,n}}{\varphi_{k,n} \sum_{i=1}^{k-1} P_{i,n} + 1} \right) \quad (5)$$

系统整体的吞吐量为

$$R = \sum_{j=1}^{N_{sc}} \sum_{i=1}^{m_{max}} R_{i,j} \quad (6)$$

3 基于比例公平的功率分配

3.1 保证用户最低数据速率的约束范围

假设子带 n 中有 2 个用户, $m_{1,n}$ (用户 1) 有较好的信道条件, $m_{2,n}$ (用户 2) 有较差的信道条件 (小区边缘用户), 即 $\varphi_{1,n} > \varphi_{2,n}$, $P_{sc} = \frac{P_T}{N_{sc}}$ 表示每个子带发射功率, 假设分配 $m_{1,n}$ 的功率分配因子为 α , 即 $P_{1,m} = \alpha P_{sc}$, 则 $P_{2,m} = (1 - \alpha) P_{sc}$ 。考虑到 NOMA 系统相比于 OMA 系统, 在频谱效率和数据速率上都应有较大的提高。假设 $m_{1,n}$ 和 $m_{2,n}$ 的数据速率均不小于相同条件下 OMA 的数据速率^[11], 如图 3 所示, 即 $R_{1,n}^{\text{NOMA}} \geq R_{1,n}^{\text{OMA}}, R_{2,n}^{\text{NOMA}} \geq R_{2,n}^{\text{OMA}}$ 。

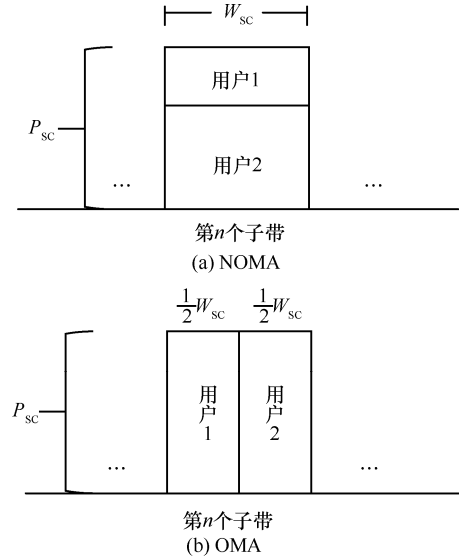


图 3 相同资源条件下的 OMA 和 NOMA 关系

可得

$$\begin{cases} W_{sc} \text{lb} \left(1 + \frac{\alpha P_{sc} |h_1|^2}{N_0 W_{sc}} \right) \geq \frac{1}{2} W_{sc} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{sc} |h_1|^2}{\frac{1}{2} W_{sc} N_0} \right) \\ W_{sc} \text{lb} \left(1 + \frac{(1 - \alpha) P_{sc} |h_2|^2}{N_0 W_{sc} + \alpha P_{sc} |h_2|^2} \right) \geq \frac{1}{2} W_{sc} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{sc} |h_2|^2}{\frac{1}{2} W_{sc} N_0} \right) \end{cases} \quad (7)$$

求解式(1), 可以得出功率分配因子 α 的取值范围。

$$\frac{(1+2\theta_1)^{\frac{1}{2}}-1}{\theta_1} \leq \alpha \leq \frac{(1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}}(1+\theta_2-(1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}})}{\theta_2(1+2\theta_2)} \quad (8)$$

其中, $\theta_1 = \frac{P_{SC} |h_1|^2}{N_0 W_{SC}}$, $\theta_2 = \frac{P_{SC} |h_2|^2}{N_0 W_{SC}}$, 假设 $\alpha_{\max} =$

$$\frac{(1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}}(1+\theta_2-(1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}})}{\theta_2(1+2\theta_2)}, \alpha_{\min} = \frac{(1+2\theta_1)^{\frac{1}{2}}-1}{\theta_1},$$

即 $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$, 根据 NOMA 的理念, 信道条件好的用户分配较少的功率, 信道条件较差的用户分配较大的功率, 因此, $\alpha_{\max} < \frac{1}{2}$ 和 $\alpha_{\min} \leq \alpha_{\max}$ 这 2 个条件同时满足。

上述为子带中复用 2 个用户情况下的约束条件, 但是本文的功率分配方法仍然具有一般性, IEEE 大量的文献也证实了下行链路 NOMA 的系统速率远优于传统的 OMA 系统。因此, 本文中仍然存在针对多个用户的约束, 假设 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_m$ 分别表示这 m 个用户的功率分配因子, 约束条件为

$$\begin{aligned} r_1^{\text{NOMA}} &\geq r_1^{\text{OMA}}, r_2^{\text{NOMA}} \geq r_2^{\text{OMA}}, \dots, \\ r_k^{\text{NOMA}} &\geq r_k^{\text{OMA}}, \dots, r_m^{\text{NOMA}} \geq r_m^{\text{OMA}} \end{aligned} \quad (9)$$

通过计算可以得到如下的约束条件。

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_1 &\geq \frac{(1+m\theta_1)^{\frac{1}{m}}-1}{\theta_1} \\ \alpha_2 &\geq \frac{((1+m\theta_2)^{\frac{1}{m}}-1)(1+\alpha_1\theta_2)}{\theta_2} \\ &\vdots \\ \alpha_k &\geq \frac{((1+m\theta_k)^{\frac{1}{m}}-1)(1+(\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_{k-1})\theta_k)}{\theta_k} \\ &\vdots \\ \alpha_{m-1} &\geq \frac{((1+m\theta_{m-1})^{\frac{1}{m}}-1)(1+(\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_{m-1})\theta_{m-1})}{\theta_{m-1}} \\ \alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_{m-1} &\leq \frac{\theta_m - ((1+m\theta_m)^{\frac{1}{m}}-1)}{\theta_m(1+m\theta_m)^{\frac{1}{m}}} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

其中, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 分别表示 $\frac{P_{SC} |h_1|^2}{N_0 W_{SC}}, \frac{P_{SC} |h_2|^2}{N_0 W_{SC}}, \dots,$

$\frac{P_{SC} |h_m|^2}{N_0 W_{SC}}$, $\alpha_m = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{m-1})$ 。根据

NOMA 理论, 同时也要满足 $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_m$ 。可以根据实际情况求得满足此条件的功率分配系数的解。

3.2 比例公平功率分配策略

比例公平^[2~5] (proportional fairness) 已经被证实可以最大化用户吞吐量的对数和, 因此, 可以保证用户的频谱效率和用户公平。很多文献已经采用这种方法来分配用户功率、用户调度。比例公平考虑到瞬时的用户数据和平均用户数据速率, 它的定义如下。

$$T_m(t+1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_m(t) + \frac{1}{t_c} \sum_{n=1}^{N_{SC}} x_{m,n}(t) R_{m,n}(t) \quad (11)$$

$n = 1, 2, \dots, N_{SC}, m = 1, 2, \dots, M$

其中, t_c 指平均窗长; $R_{m,n}(t)$ 表示在第 t 帧时间, 第 n 个子带中, 第 m 个用户的瞬时数据速率; $x_{m,n}(t)$ 表示用户调度的 0-1 序列, 如果用户 m 在第 t 帧时间, 第 n 个子带被调度, 则 $x_{m,n}(t) = 1$; 否则 $x_{m,n}(t) = 0$ 。

比例公平的调度策略是使一段时间的平均数据速率的对数和最大化, 这等价于几何平均速率, 为了达到这个目标, 用户调度和功率分配需要最大化式(12)的标准。

$$\prod_{m=1}^M \left[1 + \sum_{n=1}^{N_{SC}} \frac{x_{m,n}(t) R_{m,n}(t)}{(t_c - 1) T_m(t)} \right] \quad (12)$$

当 $t_c \gg 1$ 时, 可以近似表示为

$$1 + \frac{1}{t_c - 1} \sum_{n=1}^{N_{SC}} \sum_{m=1}^M x_{m,n}(t) \left[\frac{R_{m,n}(t)}{T_m(t)} \right] \quad (13)$$

通过式(13)可以看出, $\frac{R_{m,n}(t)}{T_m(t)}$ 是一种公平性选

择的因子, 文献[2~5]虽然使子带内复用用户公平因子的和最大化, 但是并没有针对性地考虑最差的用户公平性, 本文针对这一问题提出一种新的功率分配方法, 即选择子带中公平性因子较差的用户作为优化目标, 使该用户公平性最好。由于保证公平性, 势必要牺牲数据速率, 保证数据速率, 势必会降低公平性, 本文针对此问题, 引入相同条件下的 OMA 数据速率作为保证 NOMA 系统的权衡速率,

即在保证最差用户最好的公平性条件下，该用户的数据速率同样也不低于相同条件下的 OMA 的数据速率，实现了公平性和数据速率间的权衡。如式(14)所示。

$$\arg \max_{\alpha} \min \left\{ \frac{R_{1,n}(t)}{T_1(t)}, \frac{R_{2,n}(t)}{T_2(t)}, \dots, \frac{R_{M_{\max},n}(t)}{T_{M_{\max}}(t)} \right\} \quad (14)$$

式(14)中的约束条件在式(10)中给出了详细的解释。

4 最优分配因子的求解

假设有 2 个用户通过 NOMA 的方式复用在一个子带中，为了便于分析，本文省去了式(14)中的时间 t 和子带 n ，则优化表达式为

$$\begin{aligned} \arg \max_{\alpha} \min \left\{ \frac{R_1}{T_1}, \frac{R_2}{T_2} \right\}, \\ \text{subject to: } \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \end{aligned} \quad (15)$$

由于式(15)非凸，很难求解，因此，本文考虑了一种近似的方法。对于一个较大的数 X ，满足 $X > 0$ ，可以做如下近似。

$$X^{-\min_m \left\{ \frac{R_1}{T_1}, \frac{R_2}{T_2}, \dots, \frac{R_m}{T_m} \right\}} \approx \sum_{i=1}^m X^{-\frac{R_i}{T_i}} \quad (16)$$

由于 X^{-k} 是对于 $k \geq 0$ 单调递减的，因此，式(15)中的优化方法可以等价于

$$\begin{aligned} \arg \min_{\alpha} X^{-\frac{R_1}{T_1}} + X^{-\frac{R_2}{T_2}}, \\ \text{subject to: } \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \end{aligned} \quad (17)$$

针对式(17)的目标方程，本文可以进一步化简

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= X^{-\frac{R_1}{T_1}} + X^{-\frac{R_2}{T_2}} = X^{-\frac{W_{SC} \text{lb}(1+\alpha\theta_1)}{T_1}} + X^{-\frac{W_{SC} \text{lb}\left(\frac{1+\theta_2}{1+\alpha\theta_2}\right)}{T_2}} \\ &= (1+\alpha\theta_1)^{-n_1} + m(1+\alpha\theta_2)^{-n_2} \end{aligned} \quad (18)$$

其中， $X > 0$ ， $n_1 = \frac{W_{SC} \text{lb} X}{T_1}$ ， $n_2 = \frac{W_{SC} \text{lb} X}{T_2}$ ，

$$m = X^{-\frac{W_{SC} \text{lb}(1+\theta_2)}{T_2}}.$$

对目标函数 $f(\alpha)$ 求二阶导得

$$f''(\alpha) = n_1(n_1+1)(1+\alpha\theta_1)^{-n_1-2} + m(n_2-1)n_2(1+\alpha\theta_2)^{-n_2-2} \quad (19)$$

对于式(19)，当 $n_1 > 0$ ， $n_2 > 1$ 时， $f''(\alpha) > 0$ 恒成立，则目标函数为凸函数。当然，可以找到某个 X 的值，满足上述条件。

在求解式(17)的问题上，本文使用求解不等式约束的 KKT 条件^[12,13]。

首先，定义拉格朗日表达式为

$$\begin{aligned} L(\alpha, \lambda) &= f(\alpha) + \lambda_1(\alpha_{\min} - \alpha) + \lambda_2(\alpha - \alpha_{\max}) \\ &= X^{-\frac{W_{SC} \text{lb}(1+\alpha\theta_1)}{T_1}} + X^{-\frac{W_{SC} \text{lb}\left(\frac{1+\theta_2}{1+\alpha\theta_2}\right)}{T_2}} + \\ &\quad \lambda_1 \left(\frac{(1+2\theta_1)^{\frac{1}{2}} - 1}{\theta_1} - \alpha \right) + \\ &\quad \lambda_2 \left(\alpha - \frac{(1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}}(1+\theta_2 - (1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}})}{\theta_2(1+2\theta_2)} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

所建立的 KKT 条件为

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(\alpha, \lambda)}{\partial \alpha} &= \left(\frac{W_{SC}}{T_1} \text{lb} X \right) \theta_1 (1+\alpha\theta_1)^{-\frac{W_{SC} \text{lb} X - 1}{T_1}} + \\ &\left(\frac{W_{SC}}{T_2} \text{lb} X \right) X^{-\frac{W_{SC} \text{lb}(1+\theta_2)}{T_2}} \theta_2 (1+\alpha\theta_2)^{\frac{W_{SC} \text{lb} X - 1}{T_2}} - \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0 \quad (22)$$

$$\lambda_1 \left(\frac{(1+2\theta_1)^{\frac{1}{2}} - 1}{\theta_1} - \alpha \right) = 0 \quad (23)$$

$$\lambda_2 \left(\alpha - \frac{(1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}}(1+\theta_2 - (1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}})}{\theta_2(1+2\theta_2)} \right) = 0 \quad (24)$$

$$\frac{(1+2\theta_1)^{\frac{1}{2}} - 1}{\theta_1} \leq \alpha \leq \frac{(1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}}(1+\theta_2 - (1+2\theta_2)^{\frac{1}{2}})}{\theta_2(1+2\theta_2)} \quad (25)$$

对于上述 KKT 问题，分以下 4 种情况讨论。

1) 当 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$ 时，式(22)和式(23)同时成立，即 α 同时等于下界和上界，这种情况在现实中不成立，因此，排除这个条件。

2) 当 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 = 0$ 时，此时，根据式(21)和式(23)可知， $\alpha^* = \alpha_{\min}$ ，由于要满足 $\lambda_1 > 0$ ，因此，式(21)中 $f'(\alpha^*) > 0$ ，即 $f'(\alpha_{\min}) > 0$ 时，可以得到最优值 $\alpha^* = \alpha_{\min}$ 。也可以用一元连续函数导数来解释：由于目标函数 $f(\alpha)$ 的二阶导 $f''(\alpha) > 0$ 恒成立，则 $f'(\alpha)$ 是单调递增函数，根据分析的条件， $\lambda_1 > 0$ 时， $f'(\alpha_{\min})$ ，表明 $f''(\alpha) > 0$ ，则 $f(\alpha)$ 是单调递增函数， $f(\alpha)$ 的最小值在 α_{\min} 处取得，因此，目标函数在

$f'(\alpha_{\min}) > 0$ 时的最优值为 $\alpha^* = \alpha_{\min}$ 。

3) 当 $\lambda_1 = 0, \lambda_2 > 0$ 时, 根据式 (24) 可知, $\alpha^* = \alpha_{\max}$, 当把该 α_{\max} 代入式(21)时, 解得 $\lambda_2 < 0$, 这与假设矛盾, 因此, 忽略此最优值。

4) $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0$, 解式(21)方程式, $\left(\frac{W_{SC}}{T_1} \text{lb} X\right) \cdot \theta_1(1 + \alpha\theta_1)^{-\frac{W_{SC} \text{lb} X - 1}{T_1}} + \left(\frac{W_{SC}}{T_2} \text{lb} X\right) X^{-\frac{W_{SC} \text{lb}(1+\theta_2)}{T_2}} \theta_2(1 + \alpha\theta_2)^{\frac{W_{SC} \text{lb} X - 1}{T_2}} = 0$, 该方程式的解可以通过 Matlab 软件辅助解出, 假设此时的解为 α_{opt} , 由于通过计算 $f'(\alpha_{\max}) > 0$ 恒成立, 因此, 只需要考虑 α_{opt} 与 α_{\min} 之间的关系。如果 $\alpha_{\text{opt}} > \alpha_{\min}$, 则 $\alpha^* = \alpha_{\text{opt}}$, 如果 $\alpha_{\text{opt}} \leq \alpha_{\min}$, 则 $\alpha^* = \alpha_{\min}$ 。

上述介绍的是 2 个用户复用在子带中的情况下的求解, 当然, 理论上满足 m 个用户的求解, 这一部分是本文下一步研究的重点。

5 仿真结果分析

本文通过 Matlab 软件对提出的功率分配方法测试仿真, 信道条件选择瑞利衰落信道, 基站覆盖范围在 500 m 以内, 用户距离基站最近为 50 m, 考虑到接收机的性能条件, 2 个用户间的距离至少 40 m, 本次仿真针对基站中其中一个子带内的 2 个用户数据速率进行比较。 $N_0 = -174 \text{ dBm}$, $W_{SC} = 12 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 为了对仿真的结果有较为直观的对比, 本文定义一个信道条件最差的用户的公平性标准, 即边缘用户的数据速率占系统和速率的百分比。

信道条件最差的用户的公平性

$$= \frac{\text{信道条件最差的用户的数据速率}}{\text{系统的和速率}} \times 100\%$$

1) 第 4 节 KKT 条件分析的情况 2) 中, 即在 $\alpha^* = \alpha_{\min}$ 时 (2 个用户均在距离基站 200 m 以内), 得到如图 4 和图 5 所示的 NOMA 和 OMA 数据速率的比较, 从图 4 可以看出, NOMA 用户 1 的速率刚好达到相同条件下 OMA 的速率, 此时, NOMA 用户 2 的速率相比于 OMA 有了极大提高, 说明 NOMA 可以很好地克服小区边缘用户服务质量差的问题。 com_1 和 com_2 分别表示文献[6]中 NOMA 功率分配方法的用户 1 和用户 2。当用户 2 不在小区边缘时, 将本文提出的方法与文献[6]方法进行比较

(文献[6]中针对信道条件较差的用户 m_2 公平性的方法: 在保证信道条件较好的用户 m_1 的最低速率一定条件下, 最大化系统的和速率, 即使用户 m_2 速率最大, 有最大的公平性), 为了对比数据可靠性, 本文通过大量的仿真实验, 还原了文献[6]的方法, 由于文献[6]中的用户 1 的速率是自己设定的, 因此, 本文将此值设置为不小于相同条件下的 OMA 的速率 (保证和本文有相同的约束条件)。图 4(b) 中, 本文提出的方法得出的和速率在发射功率小于 40 dBm 时略小于文献[6]的结果, 但是边缘用户的速率却远大于文献[6]中的结果, 当发射功率大于 40 dBm 时, 两者的和速率基本相同, 本文得出的边缘用户速率仍然大于文献[6]中的结果。同时, 本文将不同发射功率处的信道条件最差的用户的公平性取平均值, 本文信道条件最差的用户的公平性为 45.39%, 文献[6]边缘用户的公平性为 37.11%, 这就证实了本文方法在公平性上优于文献[6]方法。

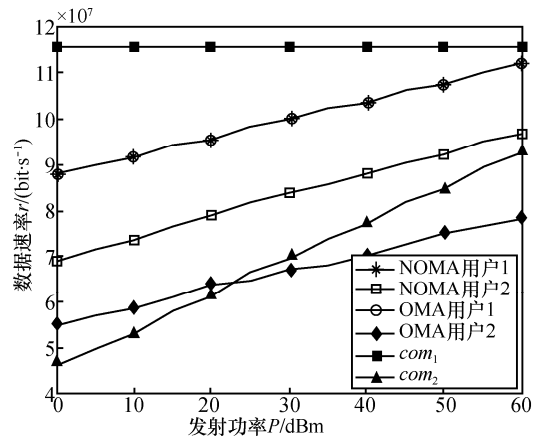


图 4 当 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 = 0$ 时, NOMA 和 OMA 在不同发射功率下的速率比较

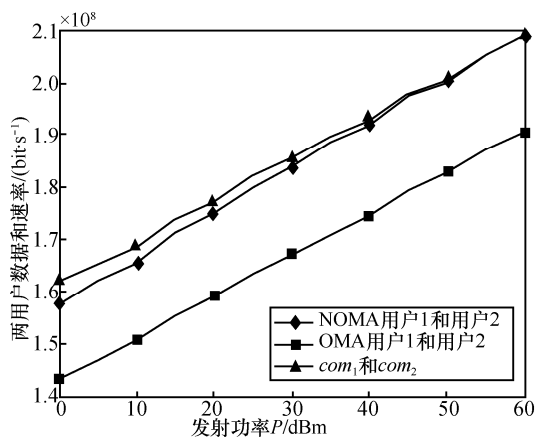


图 5 当 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 = 0$ 时, NOMA 和 OMA 用户和速率的关系

2) 第 4 节 KKT 条件下分析的情况 4) 中, 当 2 个用户信道条件差异性很大时 (如一个靠近基站, 另一个在小区边缘)。此时, 对于每个发射功率 P , 通过 Matlab 解出的 α_{opt} 始终在 $[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$ 范围内, 即 $\alpha^* = \alpha_{opt}$ 。从图 6 可以看出, NOMA 用户 1 的速率增长比较缓慢, NOMA 用户 2 的增长速率较大, 这是由于随着功率的增加, α_{opt} 的值递减, 导致用户 1 增速缓慢, 而用户 2 的功率分配因子为 $1 - \alpha_{opt}$, 因此, 用户 2 增速比用户 1 要大。与文献[6]得出的数据比较发现, 当用户 2 在小区边缘时, 和 1) 中的情况相比, 系统的和速率均降低了, 这是由于此处用户 m_2 更接近于小区边缘, 信道条件较差, 因此, NOMA 用户 2 的速率、OMA 用户 2 的速率、 com_2 的速率均降低。与图 4 相比, 本文提出的 NOMA 功率分配方法虽然用户 m_1 数据速率有所提高, 但是用户 m_2 (小区边缘用户) 和系统的和速率均下降, 即公平性相对降低, 但是, OMA 用户 2 的速率 (小区边缘用户) 的速率也有较大降低, 使本文的约束条件 (NOMA 用户 2 的速率不小于 OMA 用户 2 的速率) 仍然满足, 从而验证了结果的正确性。文献 [6] 方法, 由于用户 m_1 速率的限制, 虽然给边缘用户较大的发射功率, 由于信道条件较差, 损耗较大, 使数据速率没有得到提高。从图 6 中可以直观地看出, 本文的边缘用户的速率始终高于文献[6]的数据。图 7 中, 两者的和速率差距不大, 同时, 本文将不同发射功率处的信道条件最差的用户公平性取平均值, 本文的信道条件最差的用户公平性为 29.27%, 文献[6]信道条件最差的用户公平性为 26.76%, 这就证实了本文方法在公平性上优于文献[6]的方法。

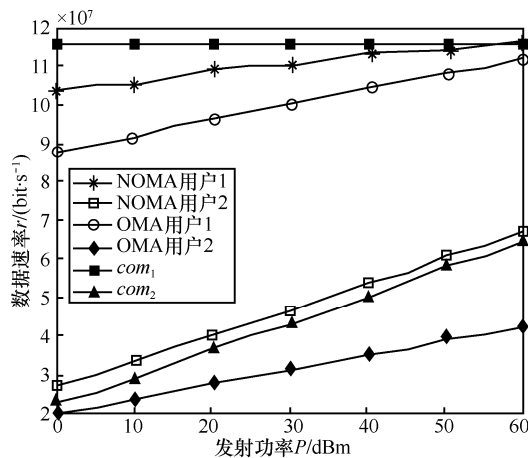


图 6 当 $\lambda_1=0, \lambda_2=0$ 且 $\alpha^*=\alpha_{opt}$ 时, NOMA 和 OMA 在不同发射功率下的速率比较

在 KKT 分析的情况 4) 中, 还存在另外一种情况, 当 2 个用户信道条件差距不大时, 由于随着发射功率的增大, α_{opt} 值递减, 可能会降到 $\alpha_{opt} < \alpha_{min}$ 的情况, 这种情况下取最优值为 α_{min} 。仿真结果如图 8 所示, 当发射功率为大于 44 dBm 时, 同 KKT 条件分析中情况 2) 一样。通过和文献[6]方法比较发现: 从图 8 可以看出, 本文方法中用户 2 的数据速率均大于文献[6]中用户 2 的速率, 但是本文的和速率低于文献[6]中的和速率。同时, 将不同发射功率处的信道条件最差的用户方法公平性取平均值, 本文的信道条件最差的用户公平性为 35.86%, 文献[6]信道条件最差的用户公平性为 27.59%, 这就证实了本文方法在公平性上优于文献[6]的方法。

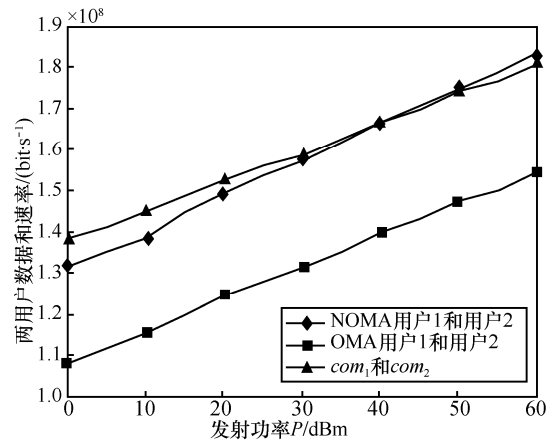


图 7 当 $\lambda_1=0, \lambda_2=0$ 且 $\alpha^*=\alpha_{opt}$ 时, NOMA 和 OMA 用户和速率的关系

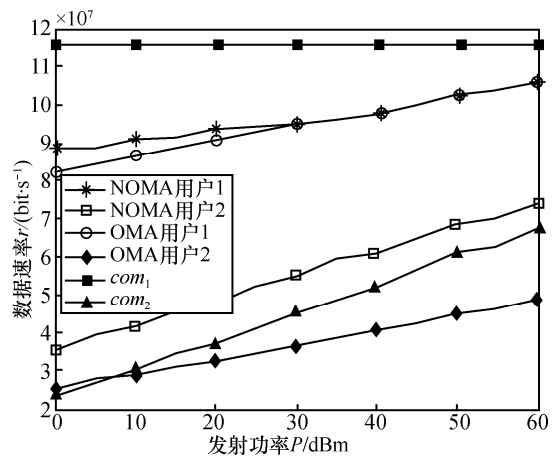


图 8 当 $\lambda_1=0, \lambda_2=0$ 且 $\alpha^*=\alpha_{min}$ 时, NOMA 和 OMA 在不同发射功率下的速率比较

针对 2 个用户和速率与两者之间的距离的大小关系, 假设用户 1 的位置不变, 改变用户 2 的位置, 随着距离的增大, 用户 2 越来越靠近小区边缘, 为保证严谨性, 将文献中用户 1 的数值设置为和本文的数据

相同,从图 10 和图 11 可以看出,和速率呈现下降趋势,NOMA 用户 2 的数据速率下降趋势慢于 OMA 用户 2 的数据速率。从图 10 可以看出,本文方法计算出的用户 2 的速率均大于文献[6]中用户 2 的速率,再一次证明了本文提出的方法在用户的公平性上优于文献[6]的方法。

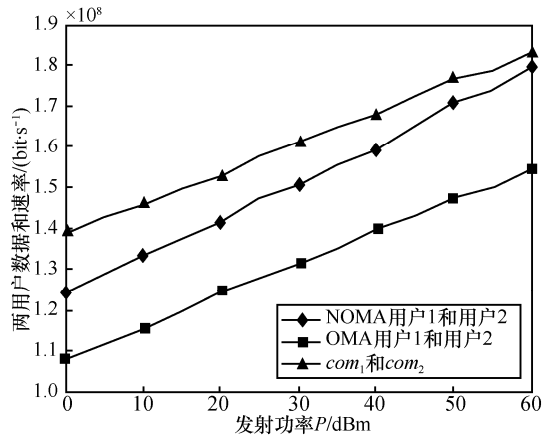


图 9 当 $\lambda_1=0, \lambda_2=0$ 且 $\alpha^*=\alpha_{\min}$ 时, NOMA 和 OMA 用户和速率的关系

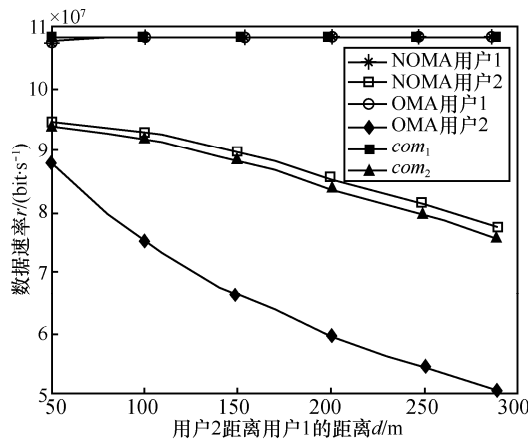


图 10 NOMA 和 OMA 用户的速率与两者之间距离差值的关系

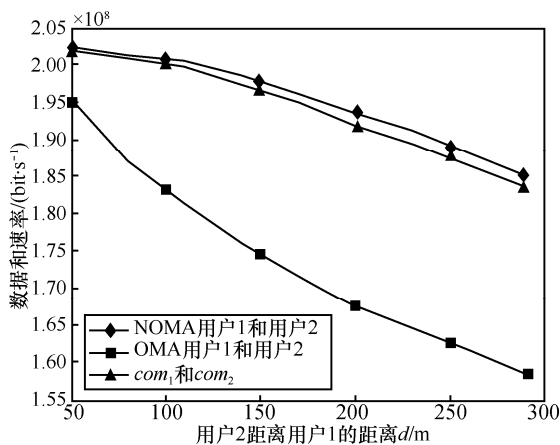


图 11 NOMA 和 OMA 用户和速率与两者之间距离差值的关系

6 结束语

本文主要研究基于比例公平的 NOMA 的功率分配问题,主要是保证小区边缘用户的公平性,目标函数是最大化复用用户中公平性最差的比例公平因子,在约束上,保证 NOMA 场景下,2 个用户均不小于相同条件下的 OMA 场景下的数据速率,同时也要满足 NOMA 基本思想,即信道条件差的用户分配较大功率,信道条件较好的用户分配较小的功率。本文巧妙地将目标函数中的非凸优化问题转化成凸优化问题,通过 KKT 约束优化条件,得出最优值,仿真结果显示,相比于 OMA, NOMA 在数据速率和频谱利用率上都有较大的提高,且相比于文献[6],本文提出的方法在用户公平性上优于文献[6]。

参考文献:

- [1] ISLAM S M R, AVAZOV N, DOBRE O A. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016.
- [2] OTAO N, KISHIYAMA Y, HIGUCHI K. Performance of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation[C]//2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). 2012: 476-480.
- [3] SEYAMA T, DATEKET, SEKI H. Efficient selection of user sets for downlink non-orthogonal multiple access[C]//2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC): MAC and Cross-Layer Design. 2015: 1062-1066.
- [4] LIU F, ONEN P M, PETROVA M. Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access[C]// 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-(PIMRC): MAC and Cross-Layer Design. 2015: 1127-1131.
- [5] LIU F, ONEN P M, PETROVA M. Proportional fairness-based power allocation and user set selection for downlink NOMA systems[C]// IEEE ICC 2016-Mobile and Wireless Networking Symposium. 2016: 1-6.
- [6] WANG C L, CHEN J Y. Power allocation for a downlink non-orthogonal multiple access system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5):532-535.
- [7] FANG F, ZHANG H J, CHENG J L. Energy-efficient resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access network[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(9): 3722-3732.
- [8] BENJEBBOUR A, LI A, SAITO Y. System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements[C]//Globecom 2013

Workshop-Emerging Technologies for LTE-Advanced and Beyond-4G. 2013: 66-70.

- [9] SAITO Y, BENJEBBOUR A, KISHIYAMA Y. System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)[C]// 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: Fundamentals and PHY Track. 2013: 611-615.
- [10] AL-ABBSAI Z Q, DANIEL K S. Power allocation for sum rate maximization in non-orthogonal multiple access system[C]//2015 IEEE 26th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC): Mobile and Wireless Networks. 2015: 1649 - 1653.
- [11] OVIEDO J A, SADJADPOUR H R. A new NOMA approach for fair power allocation[C]//2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). 2016: 843-847.
- [12] DATTA S N, KALYANASUNDARAM S. Optimal power allocation and user selection in non-orthogonal multiple access systems[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2016)-Track 2 - MAC and Cross Layer Design. 2016: 1- 6.
- [13] AL-ABBASI Z Q, DANIEL K C. User-pairing based non-orthogonal multiple access (NOMA) system[C]//2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2016: 1-5.

作者简介:



曹雍 (1992-), 男, 江苏徐州人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信领域的 NOMA 的用户公平性和用户间功率分配等。



杨震 (1961-), 男, 江苏苏州人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信中的通信与信号处理技术、新的压缩感知和非线性自适应语音信号处理理论。



冯友宏 (1979-), 男, 安徽池州人, 南京邮电大学博士生, 安徽师范大学副教授, 主要研究方向为协作通信 NOMA 技术以及物理层安全。