MIMO 系统中基于非正交多址接入的功率分配算法研究

李 云 蔡丽娟 苏开荣

（重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065）

摘 要 随着移动通信技术的发展，通信服务已变成人类日常生活中不可或缺的部分. 尤其是近年来各类智能终端的大众化，使得接入无线通信的用户数和人们对通信服务的需求均呈爆炸式的增长. 但现如今可用的频谱资源是有限的，且传统的正交多址接入系统的用户接入数受限，很难满足用户日益增长的需求. 非正交多址接入允许在同一时频资源上复用多个用户，极大程度地提高了系统的用户接入数和频谱效率. 将非正交多址接入技术运用于多输入多输出系统中，更进一步地提升系统各方面的性能. 针对在 MIMO-NOMA 系统中现有的研究存在的复杂度较高的问题，提出一种基于串行干扰消除残留的功率分配算法. 首先，建立斯坦克尔伯格博弈模型，将基站设置为卖方，小区内各用户设置为买方. 其次，使用拉格朗日函数求出在约束条件下用户购买的最优功率，此功率为关于单位价格的函数. 最后，求解出基站为各用户设置的最优单位功率价格. 在基站和用户双方博弈的过程中，基站动态地调整功率价格，尽量最大化自身收益. 仿真结果表明，所提算法与分数阶功率分配算法相比，吞吐量在系统总功率为 24 dBm 且串行干扰消除因子为 0.001 时有 15.65% 的提升，并且在吞吐量性能与文献[10]相近的基础上，降低了运算复杂度，减小了基站的功率消耗.

关键词 非正交多址接入；多输入多输出；斯坦克尔伯格博弈；功率分配；串行干扰消除

中图法分类号 TN929 **DOI 号** 10.11897/SP.J.1016.2021.01013

Study on Power Allocation Algorithm Based on Non-Orthogonal Multiple Access in MIMO Systems

LI Yun CAI Li-Juan SU Kai-Rong

(*College of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing* 400065)

Abstract With the development of mobile communication technology, communication services have become an indispensable part of human's daily life. As one of the basic technologies of wireless communication, multiple access technology is a necessary means to satisfy the simultaneous communication of multiple users in wireless network, and each generation of mobile communication has a specific multiple access technology. For example, the iconic multiple access technology in the first generation of mobile communications is frequency division multiple access technology, while it is orthogonal frequency division multiple access in fourth generation mobile communication. In recent years, the popularity of various types of intelligent terminals, such as smart phones, laptops, smart glasses and smart watches, has led to an explosive growth in the number of users allowed to access wireless communications, and people's demand for communication services has also increased dramatically. However, the available spectrum is limited, and only one user are allowed in each subchannel in traditional orthogonal multiple access systems, such as orthogonal frequency division multiplexing systems, which limits the number of users allowed to access.

收稿日期：2019-09-03；在线发布日期：2020-02-10. 本课题得到国家自然科学基金(61671096)、重庆市“科技创新领军人才支持计划”(CSTCCXLJRC201710)、重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjBX0005)资助. **李 云**，博士，教授，研究领域为无线移动通信. E-mail: liyun@cqupt.edu.cn. **蔡丽娟**，硕士研究生，研究方向为无线传输技术. **苏开荣**，教授，研究领域为无线移动通信.

Therefore, it is difficult for orthogonal multiple access systems to meet the increasing needs of users. Non-orthogonal multiple access allows multiple users to be multiplexed on the same time or frequency resource. Compared with orthogonal frequency division multiple access systems, the number of users allowed by the system and the spectral efficiency is greatly improved. The application of non-orthogonal multiple-access technology to a multiple-input multiple-output system further can improve the performance of some aspects of the system. Aiming at the problem of high complexity of power allocation algorithms in the existing researches in multiple-input multiple-output non-orthogonal multiple-access systems, considering the imperfect serial interference cancellation, a low complexity power allocation algorithm based on Stackelberg game is proposed. Stackelberg game is a game model in economics, which studies the economic behavior competition between leaders and followers. In Stackelberg game model, the party that makes the decision first is called the leader. The remaining players make decisions based on the leader's decision, and are called followers. To reach the Nash equilibrium, both the leader and the follower of the game choose their own strategies based on the other's possible strategies to ensure that their interests are maximized. Firstly, a Stackelberg game is employed in which the base station is modeled as a seller(leader) and users in the cell are modeled as buyers(followers). Then, the Largrange function is used to find the optimal power under constraints, which is a function of price. Finally, the optimal price set by the station for each user is obtained. In the process of game between the base station and users, the price is dynamically adjusted by the base station to maximize its own revenue. Simulation results show that, compared with the fractional transmit power allocation, the proposed algorithm achieves 15.65% increase in throughput when the system power is 24 dBm and the serial interference cancellation residual factor is 0.001. Besides, the computational complexity and power consumption are reduced on the basis of performance similar to the algorithm proposed in [10].

Keywords non-orthogonal multiple access; multiple-input multiple-output; Stackelberg game; power allocation; successive interference cancellation

1 引 言

随着移动通信技术的发展,其已从单纯的话音业务拓展到移动互联网业务.由于物联网飞速发展,移动流量呈指数级增长[1].预计到2020年,数据流量将至少增加1000倍.而传统的正交多址接入的频谱效率和允许接入的用户是有限的,已经不能满足这种爆炸性的用户增长.

与正交多址接入方式不同,非正交多址接入可在同一频域、码域等资源上叠加复用多个用户,并通过串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术消除其他用户所造成的干扰[2].非正交多址接入技术作为第5代移动通信技术(5th-Generation, 5G)关键技术之一,可以在5G物联网时代满足低时延、高可靠以及海量接入等需求[3].目前,关于对非正交多址接入技术的研究大部分集中于华为所提的稀疏码多址接入(Sparse Code Multiple Access, SCMA)技术,中兴所提的多用户共享多址接入(Multi-User Shared Access, MUSA)技术,大唐所提的基于图样分割的多址接入(Pattern Division Multiple Access, PDMA)技术,以及日本NTT DoCoMo公司所提的NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access)技术[4].本文主要研究NOMA技术的功率分配方法.NOMA技术在功率域叠加多个用户.文献[5]表明,NOMA系统的可达和速率优于正交多址接入系统(Orthogonal Multiple Access, OMA).文献[6]在单输入单输出(Single-Input Single-Output, SISO) NOMA系统中提出一种全搜索算法,理论上可达到吞吐量最优,但复杂度极高.文献[7-8]提出了基于用户信道条件分配功率的分数阶功率分配算法,有效降低了复杂度,但分数阶功率分配因子的选取对系统性能的影响较大.文献[9]考虑系统能效最大化,提出一种基于顺序凸近似的功率分配方法,仿真

结果表明，文献[9]所提方法的吞吐量和能效均优于正交多址系统，但未考虑串行干扰消除残留对系统性能的影响. 文献[10]基于不完美信道状态信息，将分数规划问题转化为等价的减数形式，然后利用凸差规划方法，求解出了下行单小区的最优功率分配策略，旨在最大化 NOMA 系统能效. 文献[11]通过引入辅助变量，将能效函数的分母转化为凸函数，提出了一种可减轻串行干扰消除残留影响的功率分配算法. 文献[12]将非正交多址技术应用到设备到设备(Device-to-Device，D2D)通信中，以最大化系统吞吐量为目标，运用了顺序凸近似的方法将非凸的功率分配问题转化为凸问题，最终获得最优功率分配策略. 文献[13-14]提出一种基于博弈论的功率分配方法，将基站和用户建立为一主多从的斯坦克尔伯格博弈模型，算法复杂度较低. 但以上研究均仅考虑 SISO-NOMA 系统.

而多天线输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output，MIMO)技术是近年来研究的热点，它在第四代移动通信(4th-Generation，4G)中用于提高通信系统的频谱效率，是 4G 的关键技术，并且在 5G 中也同样会作为一项关键技术出现. 为进一步提升系统频谱效率并减小时延，将 NOMA 技术与 MIMO 技术相结合[15]. 文献[16]的理论分析及仿真结果均表明 MIMO-NOMA 与 MIMO-OMA 系统相比可实现更大的系统容量. 文献[17]在统计信道状态的条件下，基于遍历和容量的最大化问题提出了低复杂度的最优功率分配算法. 文献[18]研究了 MIMO-NOMA 系统中基于能效最大化的功率分配策略，但只考虑了两用户的场景. 文献[19]提出一种两阶段的功率分配算法，首先固定波束形成向量，找到最优功率分配，然后固定功率，以迭代的方式得到最优波束形成向量，解决功率最小化问题. 文献[20]针对采用协作多点传输的 MIMO-NOMA 网络，以最大化系统总吞吐量为目标，提出一种波束成形和功率分配联合的设计方案. 在文献[21]中，研究了大规模 MIMO-NOMA 系统中基于能效最大化的功率分配策略. 然而，以上研究均假设系统的 SIC 技术理想，并未考虑 SIC 残留的情况. 目前，在 MIMO-NOMA 系统中对 SIC 残留的研究仍处于起步阶段.

本文所提出的算法引入一种分布式有偿的功率分配模式，首次在 MIMO-NOMA 系统中将基站和用户建立为多个一主一从的斯坦克尔伯格博弈模型，且第一次在 MIMO-NOMA 系统中考虑了串行干扰消除残留对系统吞吐量的影响. 首先，将小区内的各用户定义为买方，并将基站定义为卖方，以小区内单个用户的吞吐量为优化目标，利用拉格朗日乘子法分别求解买方和卖方的最优解，然后基站和用户双方进行博弈，最终达到均衡. 本文所提出的基于斯坦克尔伯格博弈模型的分布式功率分配算法，用户分别同基站交互，提升了系统容量，减少了功率消耗，并降低了算法的时间复杂度.

2 系统模型

采用 MIMO 技术的 NOMA 系统如图 1 所示. 假设基站位于小区中心，基站天线数为 M，基站总功率为 P_{tot}，小区内有 G 个用户，每个用户的天线数为 N. 假设用户已经被分为 M 簇，每簇内共有 L 个用户，则有 $G=M\times L$.

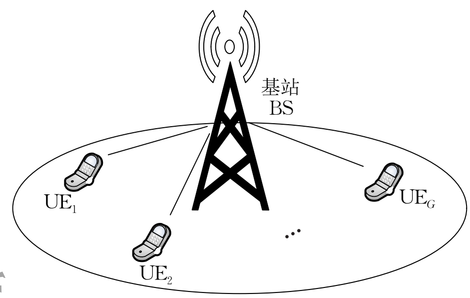

图 1 下行 MIMO-NOMA 系统模型

在上述 MIMO-NOMA 网络中，每簇用户均使用非正交多址接入技术，即每簇的 L 个用户在基站处叠加发送. 在接收端使用 SIC 技术进行多用户检测，以消除同一簇内的其他用户带来的干扰.

基站的发送信号为

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_M \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \sum_{l=1}^{L}\sqrt{p_{1,l}}\,s_{1,l} \\ \sum_{l=1}^{L}\sqrt{p_{2,l}}\,s_{2,l} \\ \vdots \\ \sum_{l=1}^{L}\sqrt{p_{M,l}}\,s_{M,l} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中，$S_m=\sum_{l=1}^{L}\sqrt{p_{m,l}}\,s_{m,l}$ 为第 m 簇用户的叠加信号，$p_{m,l}$ 是基站为第 m 簇中的第 l 个用户分配的功率值，$s_{m,l}$ 为第 m 簇中的第 l 个用户的发送符号.

发送端的叠加信号经过信道，则第 m 簇中的第 l 个用户(记为 $\mathrm{UE}_{m,l}$)在接收端接收到的信号为

$$\boldsymbol{y}_{m,l}=\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{C}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{n} \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{H}_{m,l}\in\mathbb{C}^{N\times M}$ 为 $\mathrm{UE}_{m,l}$ 与基站的信道增益，$\boldsymbol{C}\in\mathbb{C}^{M\times M}$ 为基站使用的预编码矩阵. $\boldsymbol{n}$ 为高斯白噪声向量，且 $\boldsymbol{n}\sim\mathcal{CN}(0,\sigma^2\boldsymbol{I})$.

在接收端，$\mathrm{UE}_{m,l}$ 使用检测矩阵 $\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\in\mathbb{C}^{1\times N}$ 以获得期望得到的信号，接收端接收到的信号为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}_{m,l}&=\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{C}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{n}\\&=\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m S_m+\sum_{j=1,j\neq m}^{M}\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_j S_j+\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{n}\\&=\underbrace{\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m\sqrt{p_{m,l}}\,s_{m,l}}_{\text{期望信号}}+\underbrace{\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m\sum_{k=1,k\neq l}^{L}\sqrt{p_{m,k}}\,s_{m,k}}_{\text{簇内干扰}}+\\&\quad\underbrace{\sum_{j=1,j\neq m}^{M}\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_j S_j}_{\text{簇间干扰}}+\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{n}\end{aligned}\tag{3}$$

其中，$c_m\in\mathbb{C}^{M\times1}$ 为预编码矩阵 $\boldsymbol{C}\in\mathbb{C}^{M\times M}$ 的第 m 列.

由式(3)可知，接收端接收到的信号由期望信号，簇内干扰以及簇间干扰组成. 若令 $\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_j=0$ $(m\neq j)$，理论上可消除其他簇发送的信号对本簇信号所造成的干扰，为保证 $\boldsymbol{v}_{m,l}$ 的存在，需满足 $N\geq M$[15]. 期望信号可以先通过串行干扰消除技术和信号检测技术获得.

假设第 m 簇用户在接收端的有效信道增益排序为

$$|\boldsymbol{v}_{m,1}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,1}\boldsymbol{c}_m|^2\geq\cdots\geq|\boldsymbol{v}_{m,L}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,L}\boldsymbol{c}_m|^2\tag{4}$$

假设 $\eta_{m,l}(0\leq\eta_{m,l}\leq1)$ 为 $\mathrm{UE}_{m,l}$ 的串行干扰残留系数，表示 $\mathrm{UE}_{m,l}$ 的串行干扰消除能力，$\eta_{m,l}=0$ 时表示接收端串行干扰消除理想. 在接收端使用串行干扰消除技术，信道增益强的用户可译码信道增益差的用户，而信道增益差的用户只能将信道增益强的用户的信号视为信道干扰. 故经过串行干扰消除后 $\mathrm{UE}_{m,l}$ 接收到的信号可表示如式(5)所示，其信干噪比如式(6)所示.

令 $h_{m,l}=|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m|^2$，则由香农公式可得 $\mathrm{UE}_{m,l}$ 的速率如式(7)所示. 式(7)计算的结果为单位频谱(1 Hz)的数据速率.

$$\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}_{m,l}=\underbrace{\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m\sqrt{p_{m,l}}\,s_{m,l}}_{\text{期望信号}}+\underbrace{\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m\sum_{k=1}^{l-1}\sqrt{p_{m,k}}\,s_{m,k}}_{\text{未解码的高增益的用户信号}}+\underbrace{\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}\sqrt{p_{m,i}}\,s_{m,i}}_{\text{已解码的低增益用户信号的残留信号}}+\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{n}\tag{5}$$

$$SINR_{m,l}=\frac{p_{m,l}|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m|^2}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m|^2+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m|^2\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}\tag{6}$$

$$R_{m,l}=\log_2\left(1+\frac{p_{m,l}h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}\right)\tag{7}$$

系统内所有用户的总速率可表示为

$$R=\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L}R_{m,l}\tag{8}$$

3 基于斯坦克尔伯格博弈的功率分配算法

假设本文在进行功率分配之前，系统已经对用户分簇，簇间平均分配系统功率，则基站分配给每簇用户的总功率为 P_{tot}/M.

3.1 MIMO-NOMA 网络中的斯坦克尔伯格博弈模型

在斯坦克尔伯格博弈模型中，卖方(主方)和买方(从方)可以是一主一从、一主多从、多主多从的关系[22]，本文中建立多个一主一从博弈模型，从方根据主方的制定的价格做出相应的反应. 定义小区内的用户为买方(从方)，基站为卖方(主方)，基站设置单位功率价格并出售功率给各用户，各用户根据基站制定的价格从基站处购买功率，以最大化自身的效益.

假设簇间平均分配功率，买方 $\mathrm{UE}_{m,l}$ 的效用最大化问题定义如式(9)所示，式(10)～式(14)为约束条件. 式(9)～式(14)中，$\lambda_{m,l}$ 为基站向 $\mathrm{UE}_{m,l}$ 出售单位功率的价格，约束条件式(10)表示单个用户的功率分配值必须大于 0，约束条件式(11)表示基站的总功率约束，约束条件式(12)和式(13)为用户间公平性约束，式(14)为用户的服务质量要求，可转化为式(15)所示.

$$\begin{aligned}&\max U_{m,l}=\\&\log_2\left(1+\frac{p_{m,l}h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}\right)-\\&\lambda_{m,l}p_{m,l}\end{aligned}\tag{9}$$

Subject to:

$$p_{m,l}\geq 0,\ \forall m,l \tag{10}$$

$$\sum_{l=1}^{L}p_{m,l}\geq\frac{P_{\mathrm{tot}}}{M} \tag{11}$$

$$p_{m,l}\leq p_{m,l+1},\forall l\in 1,2,3,\cdots,L-1 \tag{12}$$

$$p_{m,l}\leq\frac{P_{\mathrm{tot}}/M-\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}}{L+1-l} \tag{13}$$

$$R_{m,l}\geq R_{\mathrm{OMA}}=\frac{1}{L}\log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{tot}}h_{m,l}}{G\sigma^2}\right) \tag{14}$$

$$p_{m,l}\geq\frac{\left(1+\frac{P_{\mathrm{tot}}h_{m,l}}{G\sigma^2}\right)^{\frac{1}{L}}-1}{\frac{h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}} \tag{15}$$

基站对于每个用户的收益优化问题为

$$\max_{\lambda_{m,l}>0}U_{\mathrm{BS}}^{m,l}=(\lambda_{m,l}-c_{m,l})p_{m,l} \tag{16}$$

其中，$c_{m,l}$为基站向$\mathrm{UE}_{m,l}$出售单位功率的成本.

3.2 买方策略分析

在无线通信网络环境中，小区内的各用户竞争使用无线网络资源，各用户根据自身的信道情况以及基站的定价决定最终的功率购买量，旨在最大化自身利益，对$\mathrm{UE}_{m,l}$的效用函数$U_{m,l}$关于功率$p_{m,l}$求二阶导数，如式(17)所示.

由式(17)所知，$U_{m,l}$关于$p_{m,l}$的凸函数，因此上述最优化问题可以通过拉格朗日乘子法求解.式(9)的拉格朗日函数如式(18)所示，其中，$u_{m,l}$，$\omega_{m,l}$，$\beta_{m,l}$，$\gamma_{m,l}$为拉格朗日乘子.令$\theta_{m,l}=u_{m,l}+\omega_{m,l}+\beta_{m,l}-\gamma_{m,l}$，且拉格朗日函数对$p_{m,l}$求导可得式(19).令$\frac{\partial L_{m,l}}{\partial p_{m,l}}=0$，求解可得最优功率如式(20)所示.拉格朗日乘子按照式(21)～(24)更新，其中，$[a]^+=\max(0,a)$，α_1，α_2，α_3，α_4分别为拉格朗日乘子$u_{m,l}$，$\omega_{m,l}$，$\beta_{m,l}$，$\gamma_{m,l}$更新的步长.

$$\frac{\partial^2U_{m,l}}{\partial p_{m,l}^2}=-\frac{1}{\ln 2}\frac{\left(\frac{h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}\right)^2}{\left(\frac{p_{m,l}h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}\right)^2}<0 \tag{17}$$

$$\begin{aligned}L_{m,l}=&\left[\log_2\left(1+\frac{p_{m,l}h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}\right)-\lambda_{m,l}p_{m,l}\right]+\\&u_{m,l}\left[\frac{P_{\mathrm{tot}}}{M}-\sum_{l=1}^{L}p_{m,l}\right]+\omega_{m,l}(p_{m,l+1}-p_{m,l})+\beta_{m,l}\left(\frac{P_{\mathrm{tot}}/M-\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}}{L+1-l}-p_{m,l}\right)+\\&\gamma_{m,l}\left(p_{m,l}-\frac{\left(1+\frac{P_{\mathrm{tot}}h_{m,l}}{G\sigma^2}\right)^{\frac{1}{L}}-1}{\frac{h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}}\right)\end{aligned} \tag{18}$$

$$\frac{\partial L_{m,l}}{\partial p_{m,l}}=\frac{1}{\ln 2}\frac{\frac{h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}}{1+\frac{p_{m,l}h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}}-\theta_{m,l} \tag{19}$$

$$p_{m,l}^{*}=\frac{1}{\ln 2}\frac{1}{\lambda_{m,l}+\theta_{m,l}}-\frac{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}{h_{m,l}} \tag{20}$$

$$u_{m,l}(t+1)=\left[u_{m,l}(t)-\alpha_1\left(\frac{P_{\mathrm{tot}}}{M}-\sum_{l=1}^{L}p_{m,l}(t)\right)\right]^+ \tag{21}$$

$$\omega_{m,l}(t+1)=\left[\omega_{m,l}(t)-\alpha_2\left(p_{m,l+1}(t)-p_{m,l}(t)\right)\right]^+ \tag{22}$$

$$\beta_{m,l}(t+1)=\left[\beta_{m,l}(t)-\alpha_3\left(\frac{P_{\mathrm{tot}}/M-\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}(t)}{L+1-l}-p_{m,l}(t)\right)\right]^+ \tag{23}$$

$$\gamma_{m,l}(t+1)=\left[\gamma_{m,l}(t)-\alpha_4\left(p_{m,l}-\frac{\left(1+\frac{P_{\mathrm{tot}}h_{m,l}}{G\sigma^2}\right)^{\frac{1}{L}}-1}{\frac{h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}}\right)\right]^+ \tag{24}$$

3.3 卖方策略分析

将式(20)代入式(16)中,可得卖方的最优化问题为

$$\max_{\lambda_{m,l}>0} U_{\mathrm{BS}}^{m,l}=(\lambda_{m,l}-c_{m,l})p_{m,l}^* \tag{25}$$

$U_{\mathrm{BS}}^{m,l}$对$\lambda_{m,l}$求导,可得式(26),令$\frac{\partial U_{\mathrm{BS}}^{m,l}}{\partial\lambda_{m,l}}=0$,求解可得最优价格如式(27)所示.

$$\frac{\partial U_{\mathrm{BS}}^{m,l}}{\partial\lambda_{m,l}}=\frac{1}{\ln 2}\frac{\theta_{m,l}}{(\lambda_{m,l}+\theta_{m,l})^2}-\frac{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}{h_{m,l}}+\frac{1}{\ln 2}\frac{c_{m,l}}{(\lambda_{m,l}+\theta_{m,l})^2} \tag{26}$$

$$\lambda_{m,l}^*=\sqrt{\frac{\frac{h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}(c_{m,l}+\theta_{m,l})}{\ln 2}}-\theta_{m,l} \tag{27}$$

3.4 均衡存在性分析

在本节中,证明式(20)和式(27)的解为斯坦克尔伯格均衡(Stackelberg equilibrium,SE)并证明均衡解SE为最优解.

定义1. 当基站对于每个用户的单位功率价格$\lambda_{i,l}$固定时,若

$$U_{m,l}\{p_{m,l}^{\mathrm{SE}}\}=\sup_{p_{m,l}>0}U_{m,l}\{p_{m,l}\} \tag{28}$$

且,当功率$p_{m,l}$固定时,有

$$U_{\mathrm{BS}}^{m,l}\{\lambda_{m,l}^{\mathrm{SE}}\}=\sup_{p_{m,l}>0}U_{\mathrm{BS}}^{m,l}\{\lambda_{m,l}\} \tag{29}$$

则$p_{m,l}^{\mathrm{SE}}$和$\lambda_{m,l}^{\mathrm{SE}}$为所提博弈论的均衡[23].

当博弈达到均衡状态时,基站或者任何用户独自改变策略都不能获得比均衡点更大的收益.

下面将通过以下3个引理证明$(p_{m,l}^*,\lambda_{m,l}^*)=(p_{m,l}^{\mathrm{SE}},\lambda_{m,l}^{\mathrm{SE}})$.

引理1. 当单位功率价格$\lambda_{m,l}$固定时,用户效益函数$U_{m,l}$在$p_{m,l}^*(p_{m,l}^*>0)$处取得最大值.

证明. 由式(17)可知,$U_{m,l}$对功率$p_{m,l}$求二阶导,有$\frac{\partial^2 U_{m,l}}{\partial p_{m,l}^2}<0$.

故$U_{m,l}$为关于$p_{m,l}$的凸函数,即$p_{m,l}^*$为$U_{m,l}$的全局最优解,满足定义1,因此$p_{m,l}^*$为均衡解$p_{m,l}^{\mathrm{SE}}$.

证毕.

引理2. 对于基站来说,其为每个用户设置的单位功率价格$\lambda_{m,l}$不能无限制地增长.

证明. 式(20)对价格$\lambda_{m,l}$求导,可得

$$\frac{\partial p_{m,l}^*}{\partial\lambda_{m,l}}=-\frac{1}{\ln 2(\lambda_{m,l}+\theta_{m,l})^2}<0 \tag{30}$$

表明$p_{m,l}^*$为关于$\lambda_{m,l}$的减函数,即当基站提高功率价格时,用户会相应地减少从基站购买的功率.

证毕.

引理3. 当功率$p_{m,l}$固定时,基站的效用函数在$\lambda_{m,l}^*$处取得最大值.

证明. 基站的效用函数对价格$\lambda_{m,l}$求二阶导数得:

$$\frac{\partial^2 U_{\mathrm{BS}}^{m,l}}{\partial\lambda_{m,l}^2}=-\frac{2}{\ln 2}\frac{c_{m,l}+\theta_{m,l}}{(\lambda_{m,l}+\theta_{m,l})^3}<0 \tag{31}$$

故$U_{\mathrm{BS}}^{m,l}$为关于$\lambda_{m,l}$的凸函数,即$\lambda_{m,l}^*$为$U_{\mathrm{BS}}^{m,l}$的全局最优解,满足定义1,因此$\lambda_{m,l}^*$为均衡解$\lambda_{m,l}^{\mathrm{SE}}$.

证毕.

由上述三条引理可知,$(p_{m,l}^*,\lambda_{m,l}^*)=(p_{m,l}^{\mathrm{SE}},\lambda_{m,l}^{\mathrm{SE}})$,即最优解$(p_{m,l}^*,\lambda_{m,l}^*)$同时为均衡解$(p_{m,l}^{\mathrm{SE}},\lambda_{m,l}^{\mathrm{SE}})$.

3.5 迭代功率控制算法

假设基站的报价从成本$c_{m,l}$开始,用户的功率购买量$p_{m,l}$从0开始,首先根据式(27)计算此时功率价格,并将结果代入式(20),更新用户购买功率的数量,此过程不断循环,直至功率和价格达到均衡.详细的算法过程如下.

算法 1.　MIMO-NOMA 中一种基于斯坦克尔伯格博弈的功率分配算法.

输入：各簇用户数 L，簇数 M，各用户等效信道增益 $|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m|^2$

输出：各用户的最优功率分配值 $p_{m,l}^{*}$

1. 将 MIMO-NOMA 系统中每簇用户的等效信道增益 $|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m|^2$ 按照降序排列，排列的结果即为用户的序号
2. 初始化拉格朗日因子 $u_{m,l}$，$\omega_{m,l}$，$\beta_{m,l}$，$\gamma_{m,l}$，最大迭代次数 $I_{\max}$，误差容忍门限值 ε，设置初始迭代次数 $n=0$，初始功率值 $p_{m,l}(0)=0$，初始价格 $\lambda_{m,l}(0)=c_{m,l}$
3. FOR 1 TO M DO
4. 　FOR 1 TO L DO
5. 　WHILE $n\le I_{\max}$ OR $|\theta_{m,l}(n+1)-\theta_{m,l}(n)|\ge\varepsilon$ DO
6. 　根据式(27)计算最优价格 $\lambda_{m,l}^{*}$
7. 　根据式(20)计算最优功率 $p_{m,l}^{*}$
8. 　更新拉格朗日因子 $u_{m,l}$，$\omega_{m,l}$，$\beta_{m,l}$，$\gamma_{m,l}$
9. 　更新迭代次数 $n=n+1$
10. 　END WHILE
11. 　END FOR
12. END FOR

在算法 1 中，由于在信道增益强的用户处存在解码弱用户的 SIC 残留，故 SIC 残留因子 $\eta_{m,l}$ 越大，$U_{m,l}$ 的接收信号质量就越差，其信干噪比也越低. 当 SIC 残留因子 $\eta_{m,l}$ 增大时，算法 1 会调整功率价格，增大 $U_{m,l}$ 此时的功率分配值，达到一个新的均衡，以此提高用户的信干噪比.

3.6　文献[10]所提基于凸差规划的功率分配算法原理

本文的对比算法为文献[10]中基于凸差规划的功率分配算法. 由上节所提出的系统模型可知，系统的速率最大化问题可表示为式(32)，运用对数运算法则，可使得问题(32)转化为式(33). 由式(33)可知，其约束集为凸集，且目标函数为两个凸函数的差，因此可以使用凸差规划来求解，分别令式(33)的第一部分和第二部分如式(34)和式(35)所示.

$$\max R=\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L}\log_2\left(1+\frac{p_{m,l}h_{m,l}}{\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2}\right)\tag{32}$$

Subject to. (10)，(11)，(12)，(13)，(15)

$$\begin{aligned}\max R=&\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L}\log_2\left(\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2+p_{m,l}h_{m,l}\right)-\\&\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L}\log_2\left(\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2\right)\end{aligned}\tag{33}$$

Subject to. (10)，(11)，(12)，(13)，(15)

$$F(\boldsymbol{p})=\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L}\log_2\left(\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2+p_{m,l}h_{m,l}\right)\tag{34}$$

$$G(\boldsymbol{p})=\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L}\log_2\left(\sum_{k=1}^{l-1}p_{m,k}h_{m,l}+h_{m,l}\eta_{m,l}\sum_{i=l+1}^{L}p_{m,i}+|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}|^2\delta^2\right)\tag{35}$$

则式(33)可等效转化为

$$\min_{\boldsymbol{p}}-(F(\boldsymbol{p})-G(\boldsymbol{p}))\tag{36}$$

Subject to. (10)，(11)，(12)，(13)，(15)

其中，$\boldsymbol{p}=[p_{1,1}\,p_{1,2}\cdots p_{1,L}\cdots p_{M,L}]$.

由于式(36)是一个非凸的问题，故采用连续凸近似的方式将非凸问题转化为近似的凸问题，有 $G(\boldsymbol{p})=G(\boldsymbol{p}^{(k)})+\nabla G(\boldsymbol{p}^{(k)})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{p}^{(k)})$，$\nabla G(\boldsymbol{p}^{(k)})^{\mathrm{T}}$ 表示 $G(\boldsymbol{p}^{(k)})^{\mathrm{T}}$ 对 $\boldsymbol{p}$ 在 $\boldsymbol{p}^{(k)}$ 处的一阶偏导值. 故式(36)可表示为

$$\min_{\boldsymbol{p}}-(F(\boldsymbol{p})-G(\boldsymbol{p}^{(k)})-\nabla G(\boldsymbol{p}^{(k)})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{p}^{(k)}))\tag{37}$$

Subject to. (10)，(11)，(12)，(13)，(15)

令

$$J^{(k)}(\boldsymbol{p})=-(F(\boldsymbol{p})-G(\boldsymbol{p}^{(k)})-\nabla G(\boldsymbol{p}^{(k)})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{p}^{(k)}))，$$

则基于 DC 规划的功率分配算法如算法 2 所示.

算法 2.　基于凸差规划的功率分配算法.

输入：各簇用户数 L，簇数 M，各用户等效信道增益 $|\boldsymbol{v}_{m,l}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_{m,l}\boldsymbol{c}_m|^2$

输出：最优功率分配值集合 $\boldsymbol{p}$

1. 初始化 $\boldsymbol{p}(0)=[p_{1,1}(0),p_{1,2}(0),\cdots,p_{1,L}(0),\cdots,p_{M,L}(0)]$，最大迭代次数 $N_{\max}$，误差门限 ε，迭代次数 $n=0$
2. WHILE $|J^{(n)}(\boldsymbol{p})-J^{(n-1)}(\boldsymbol{p})|>\varepsilon$ OR $n\le N_{\max}$ DO
3. 　求解凸问题(37)，获得 $\boldsymbol{p}^{(n)}$
4. 　计算 $J(\boldsymbol{p}^{(n)})$
5. 　更新迭代次数 $n=n+1$
6. END WHILE

3.7 复杂度分析

假设用户分簇数为 M，每簇用户数为 L，则小区内总用户数 $G=M\times L$. 对于文献[10]中提出的基于凸差规划的功率分配算法，当最大迭代次数为 $N_{\max}$ 时，其时间复杂度为 $O(N_{\max}\times G^3)$[24].

在本文所提算法中，每个用户根据基站设定的单位功率价格决定最优功率分配策略，在每一次循环中，将有一个用户基于基站设定的价格做出响应，并通过 1 次计算得到此时的最优功率分配策略. 通过考虑所提功率分配算法的最坏情况，可以分析其计算复杂度. 假设在最坏的情况下，所有的用户在算法达到最大迭代次数时仍未达到均衡状态，此时进行了 $K\times M\times I_{\max}$ 即 $G\times I_{\max}$ 次计算. 故当算法的最大迭代次数为 $I_{\max}$ 时，算法的时间复杂度为 $O(G\times I_{\max})$.

表 1 给出了当 $N_{\max}=I_{\max}=30$ 时，两种算法的时间复杂度对比，通过复杂度分析可知，基于斯坦克尔伯格博弈的分布式功率分配算法的复杂度要明显低于文献[10]所提的功率分配策略.

表 1 本文所提算法与文献[10]所提算法复杂度比较

小区用户数	文献[10]中算法	本文算法
4	1920	120
6	6480	180
8	15360	240
10	30000	300
12	51840	360

4 仿真分析

4.1 仿真参数

在 MIMO-NOMA 系统下行链路的基于能效最大化的功率分配算法的仿真过程中，参数设置如下：基站天线数 $M=2$，用户天线数 $N=2$，小区半径 $R=500\,\mathrm{m}$，用户与基站的最小距离 $d_{\min}=50\,\mathrm{m}$，用户随机分布在小区内，信道噪声功率为 $-70\,\mathrm{dBm}$.

4.2 仿真结果

在本文共设置了 5 组实验对所提算法进行分析，实验 1 将基站总功率设置为 $P_{\mathrm{tot}}=36\,\mathrm{dBm}$，串行干扰消除残留因子 $\eta=0$，总用户数为 $G=4$，由图 2 的仿真结果可知，基站设置的单位功率价格均在 4 次迭代后收敛，此收敛值即为基站向用户售卖功率的价格. 同样地，用户根据基站的卖家的报价不断更新功率购买值，如图 3 所示，以使得各用户的收益最大化.

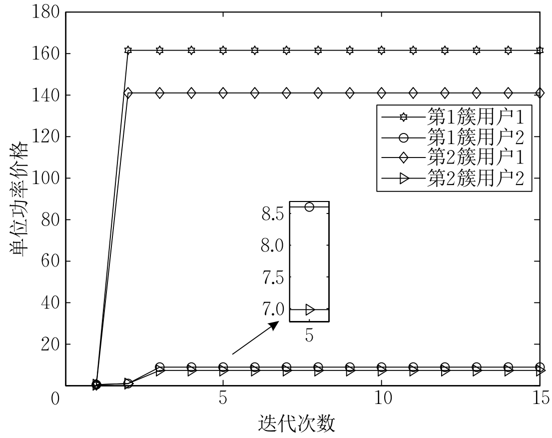

图 2 价格更新

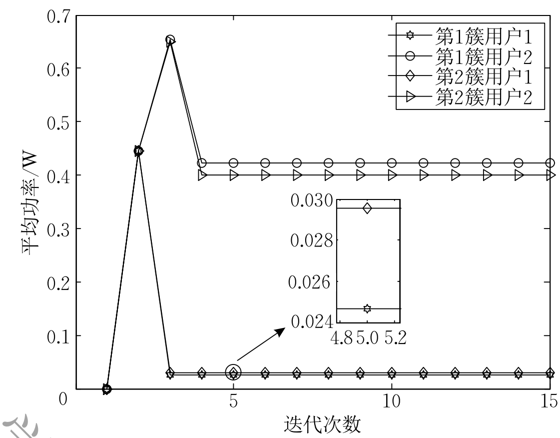

图 3 功率更新

实验 2 验证了当每簇内用户数 $L=4$ 时，即系统总用户数为 8 时，系统总吞吐量随基站总功率的变化情况，并将其与分数阶功率分配算法（Fractional Transmit Power Allocation，FTPA）对比. 对于分数阶功率分配算法，第 m 簇上的第 l 个用户获得的功率为

$$p_{m,l}=\frac{P_{\mathrm{tot}}}{M}*(h_{m,l})^{-arfa_{\mathrm{FTPA}}}\Big/\Big(\sum_{l=1}^{L}(h_{m,l})^{-arfa_{\mathrm{FTPA}}}\Big)\quad(38)$$

其中，$arfa_{\mathrm{FTPA}}$ 为预置的衰减因子，通过调整 $arfa_{\mathrm{FTPA}}$ 的大小来调整功率分配情况，$arfa_{\mathrm{FTPA}}$ 越大，用户间的公平性越高.

图 4 表明，在基站总功率相同的情况下，所提算法系统总吞吐量总是高于分数阶功率分配算法，且随着系统总功率的增加，系统总速率也增加，但增加的速度逐渐减缓，这是由于对于本文所提算法，基站为用户所分配的功率并不会随着系统总功率的增加而无限制地增加.

在实验 3 中，将小区内总用户数分别设置为 $G=4,6,8$，验证了串行干扰消除残留因子 η 对所提算法

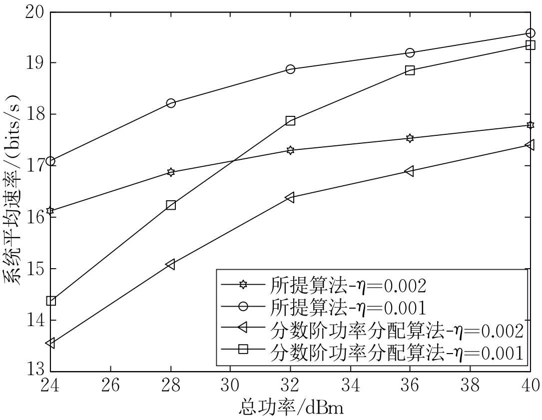

图 4　与 FTPA 的系统总吞吐量对比

的影响. 由图 5、图 6 和图 7 可知，与 $\eta=0$ 相比，$\eta=0.001$、$\eta=0.002$ 和 $\eta=0.005$ 的系统吞吐量都急剧下降. 例如，在图 7 中，当 $G=8$，$P_{\mathrm{tot}}=32\,\mathrm{dBm}$ 时，有 6 bits/s 左右的速率损失. 这是由于基站总功率 P_{tot} 的增加不仅会导致用户传输功率的增加，也会使得 SIC 残留干扰增大. 此外，小区内复用的用户数越多，串行干扰消除残留对系统性能的影响越大. 如图 5 所示，当小区用户数 $G=4$，$P_{\mathrm{tot}}=40\,\mathrm{dBm}$ 时，$\eta=0.001$

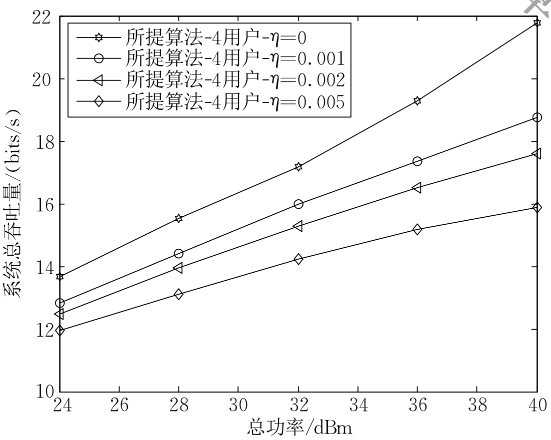

图 5　小区用户数为 4 时 η 与吞吐量的关系

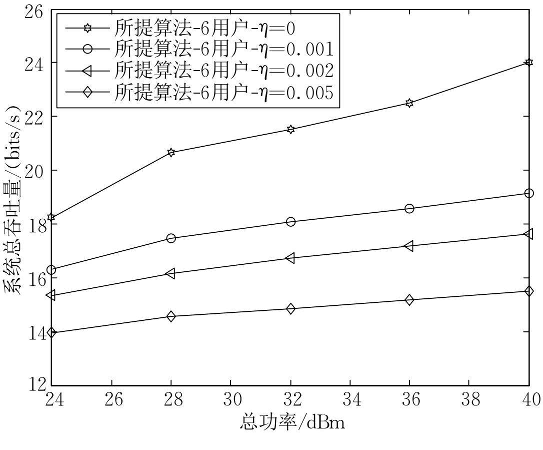

图 6　小区用户数为 6 时 η 与吞吐量的关系

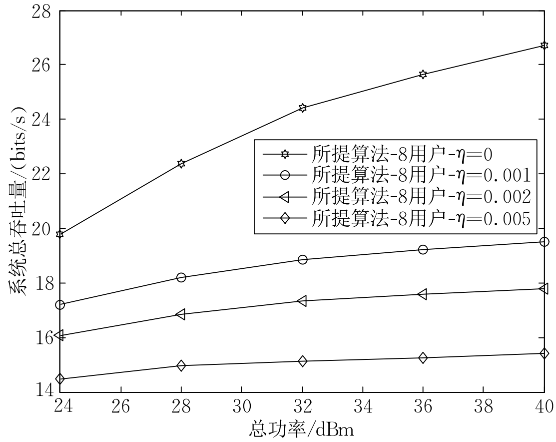

图 7　小区用户数为 8 时 η 与吞吐量的关系

时的系统吞吐量较于 $\eta=0$ 损失了 13.93%，而当小区用户数 $G=6$，8 时，这一数据分别为 20.45% 和 26.91%.

在实验 4 中，将基站总功率设置为 40 dBm，且考虑到接收机设计的复杂度，本文将最大用户数设置为 16，验证了在此条件下，不同用户数和 SIC 残留因子对系统吞吐量的影响. 由图 8 可知，当 SIC 残留因子 $\eta=0$ 时，系统总吞吐量随着用户数的增加而增加，但当用户数达到 14 后，系统吞吐量不再有明显的变化. 这是由于在系统总功率固定的情况下，系统用户数越多，则分配给每个用户的功率值越小，故系统总吞吐量不再随着用户数增加而有明显变化. 当存在 SIC 残留时，在不同用户数的情况下都存在不同程度的吞吐量损耗，且串行干扰消除残留越大，吞吐量损耗越大.

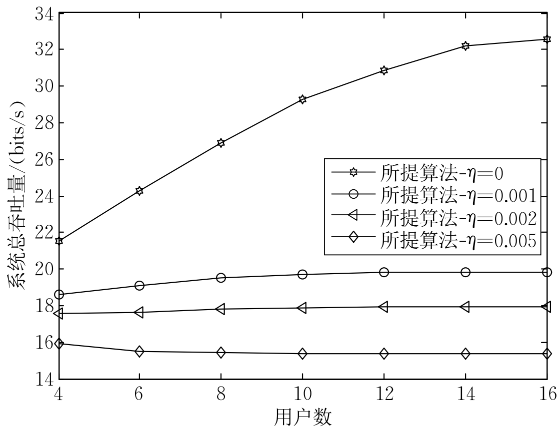

图 8　用户数与吞吐量的关系

在实验 5 中，将小区内总用户数设置为 $G=8$，观察并分析了文献[10]所提算法与本文所提算法在系统总吞吐量方面的性能比较. 图 9 中的仿真结果表明，由文献[10]所提算法所获得的系统总速率略高于本文所提算法. 这是由于文献[10]所提功率分

配算法考虑了系统的全局信息,并以最大化系统总吞吐量为目标,故得到的功率分配策略可使系统总吞吐量最大,其时间复杂度较高.而本文所提功率分配算法仅考虑了个体的利益,不一定能得到全局吞吐量最优,其时间复杂度较低.

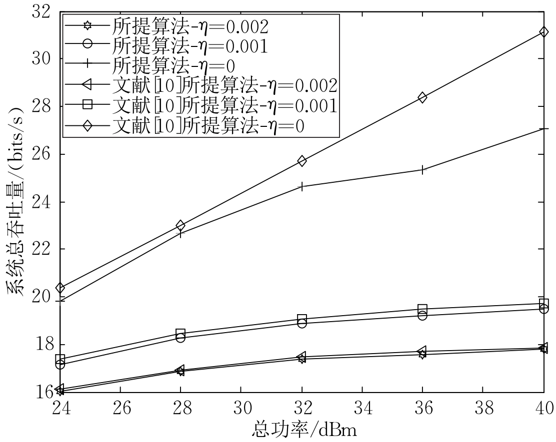

图 9 系统总速率对比

图 10 中的仿真结果可知,本文所提功率分配算法所消耗的功率总是小于文献[10]所提算法,这是由于本文所提出的斯坦克尔伯格博弈模型在效用函数中引入了功率价格,防止用户盲目地竞争功率.表明这两种算法在系统总速率相近的情况下,本文所提功率分配算法有效地减小了基站的功率消耗.

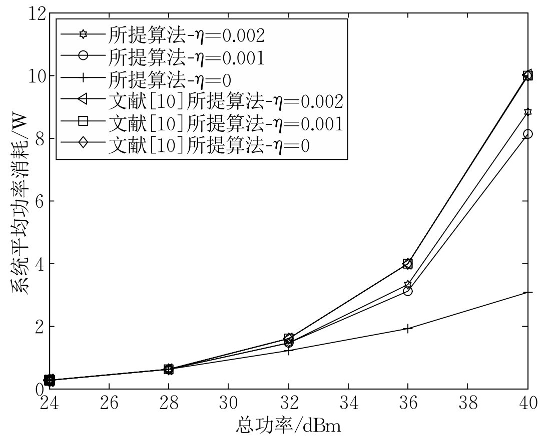

图 10 系统总功率消耗对比

5 总 结

本文针对 MIMO-NOMA 下行中系统吞吐量的提升问题,在考虑串行干扰消除残留的前提下,提出了一种基于斯坦克尔伯格博弈的分布式功率分配算法,将基站设置为卖方,并将用户设置为买方,各个用户分别从基站处购买功率,有效激励用户共享资源.仿真结果表明,所提算法的性能优于分数阶功率分配算法,且在与文献[10]所提基于凸差规划的功率分配算法性能相近的基础上,牺牲了部分系统吞吐量,降低了复杂度,并降低了系统能耗.

致 谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行表示衷心的感谢!

参 考 文 献

[1] Xu Wenjun, Li Xue, Lee Chia-Han, et al. Joint sensing duration adaptation, user matching, and power allocation for cognitive OFDM-NOMA systems. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(2): 1269-1282

[2] Ding Z, Lei X, Karagiannidis G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2181-2195

[3] Andrews J G, Buzzi S, Choi W. What will 5G be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082

[4] Dai Linglong, Wang Bichai, Ding Zhiguo, et al. A survey of non-orthogonal multiple access for 5G. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 12(6): 2294-2322

[5] Saito Y, Kishiyama Y, Benjebbour A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access//Proceedings of the Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden, Germany, 2013: 1-5

[6] Otao N, Kishiyama Y, Higuchi K. Performance of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation//Proceedings of the 2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Paris, France, 2012: 476-480

[7] Hojeij M R, Farah J, Nour C A, et al. Resource allocation in downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access//Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference. Glasgow, UK, 2015: 1-6

[8] Saito Y, Benjebbour A, Kishiyama Y, et al. System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)//Proceedings of the International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. London, UK, 2013: 611-615

[9] Liu Gongliang, Wang Ruisong, Zhang Haijun, et al. Super-modular game based user scheduling and power allocation for energy-efficient NOMA network. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(6): 3877-3888

[10] Zamani M R, Eslami M, Khorramizadeh M, et al. Energy-efficient power allocation for NOMA with imperfect CSI. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 1009-1013

[11] Wang Hong, Zhang Zhaoyang, Chen Xiaoming, et al. Energy-efficient power allocation for non-orthogonal multiple access with imperfect successive interference cancellation//Proceedings of the 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Nanjing,

China, 2017: 1-6

[12] Zhao Jingjing, Liu Yuanwei, Chai Kok Keong, et al. Joint subchannel and power allocation for NOMA enhanced D2D communications. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(11): 5081-5094

[13] Li Chongyang, Zhang Qi, Li Quanzhong, et al. Price-based power allocation for non-orthogonal multiple access systems. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(6): 664-667

[14] Wang Zhengqiang, Wen Chenchen, Fan Zifu, et al. A novel price-based power allocation algorithm in non-orthogonal multiple access networks. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(2): 230-233

[15] Ding Zhiguo, Adachi F, Poor H. The application of MIMO to non-orthogonal multiple access. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 537-552

[16] Zeng Ming, Yadav A, Dobre O A, et al. Capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-OMA with multiple users in a cluster. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2413-2424

[17] Sun Q, Han S, Chin-Lin I, et al. On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 4(4): 405-408

[18] Zeng Ming, Yadav A, Dobre O A, et al. Energy-efficient power allocation for MIMO-NOMA with multiple users in a cluster. IEEE Access, 2018, 6: 5170-5181

[19] Choi J. Minimum power multicast beamforming with superposition coding for multiresolution broadcast and application to NOMA systems. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(3): 791-800

[20] Sun Xiaofang, Yang Nan, Yan Shihao, et al. Joint beamforming and power allocation in downlink NOMA multiuser MIMO networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(8): 5367-5381

[21] Hao Wanming, Zeng Ming, Chu Zheng, et al. Energy-efficient power allocation in millimeter wave massive MIMO with non-orthogonal multiple access. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(6): 782-785

[22] Wang Zeng. Research on Power Control and Multi-dimensional Efficiency optimization of Cellular Network Based on Game Theory [Ph. D. dissertation]. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 2018 (in Chinese)
(王增. 基于博弈论的蜂窝网络功率控制与多维效率优化研究[博士学位论文]. 北京邮电大学，北京，2018)

[23] Yuan Yiling, Yang Tao, Feng Hui, et al. An iterative matching-stackelberg game model for channel-power allocation in D2D underlaid cellular networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(11): 7456-7471

[24] Yang Zhaohui, Pan Cunhua, Xu Wei, et al. Power control for multi-cell networks with non-orthogonal multiple access. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(2): 927-942

LI Yun, Ph. D., professor. His research interest is wireless mobile communication.

CAI Li-Juan, M. S. candidate. Her research interest is wireless communication transmission technology.

SU Kai-Rong, professor. His research interest is wireless mobile communication.

Background

In recent years, the 5G has been developed rapidly. As a key multiple access technology for the 5G networks, NOMA has been proposed to improve the system capacity. Recently, researchers have studied on combining NOMA with MIMO technique, which can further improve the spectral efficiency. However, the existing researches of MIMO-NOMA do not consider the SIC residue, and the research on SIC residue in the MIMO-NOMA system is still in the initial stage. In this paper, considering imperfect SIC, we propose a price-based power allocation algorithm in MIMO-NOMA system. It's the first time to model the base station and the users as a Stackelberg game in MIMO-NOMA system, and it's also the first time to consider SIC residues in a game model. First, we define each user in the cell as a buyer and the BS as a seller. To maximize the data rate of each user, the Lagrange multiplier method is applied to solve the optimal solution of the buyer and the seller respectively. The distributed power allocation algorithm based on the Stackelberg game improves the system throughput and reduces the time complexity of the algorithm. Compared with the FTPA, the proposed algorithm has an improvement in throughput, and the computational complexity and power consumption are reduced on the basis of performance similar to the algorithm proposed in [10].

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China (61671096), "The Support Program for Science and Technology Innovation Leadership Talent" of Chongqing (CSTCCXLJRC201710), the Basic Science and Frontier Technology Research Program of Chongqing (cstc2017jcyjBX0005).