

文章编号:1007-5321(2021)04-0062-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-261

# 基于 QoE 的 MIMO-NOMA 系统功率分配方案

胡相格<sup>1</sup>, 吴广富<sup>1</sup>, 李 涛<sup>2</sup>, 彭德义<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 东方红卫星移动通信有限公司 网络工程部, 重庆 401147)

**摘要:** 在多输入多输出非正交多址接入(MIMO-NOMA)系统中,衡量通信质量时仅仅考虑了用户的服务质量(QoS),而没有考虑用户终端的满意度.为此,提出一种基于 Stackelberg 博弈的优化用户体验质量(QoE)的动态定价功率分配算法.在网页浏览业务场景下,用平均意见分数(MOS)值来衡量用户终端的满意度,将用户设置为买方,基站设置为卖方,小区内各用户从基站处以瞬时单位功率价格购买功率,提升其 MOS 值;同时,卖方基站不断调整单位功率价格,以实现自身最大化收益,最终达到 Stackelberg 均衡.仿真结果表明,所提算法与基于 QoS 的功率分配算法相比,在公平性上提升了 22.73%;与传统的定价算法相比,在吞吐量和 MOS 值上有明显提升;与基于凸差规划的功率分配算法相比,在时间复杂度上有明显降低.

**关键词:** 非正交多址接入;用户体验质量;Stackelberg 博弈;功率分配

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

## Power Allocation Scheme for MIMO-NOMA System Based on QoE

HU Xiang-ge<sup>1</sup>, WU Guang-fu<sup>1</sup>, LI Tao<sup>2</sup>, PENG De-yi<sup>1</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Network Engineering Department, Macro Net Communication Company Limited, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** Multiple input multiple output-non-orthogonal multiple access (MIMO-NOMA) systems typically only consider the quality of service (QoS) of users while omits the satisfaction of users. A dynamic pricing power allocation algorithm based on Stackelberg game is proposed to optimize the quality of experience (QoE). In the scenario of web browsing service, the mean opinion score (MOS) value is used to measure the satisfaction of the user terminal. The user is set as the buyer, and the base station is set as the seller. Each user in the cell purchases power from the base station at the instantaneous unit power price to improve their MOS values. At the same time, the seller base station constantly adjusts the unit power price to maximize their own profits and achieve Stackelberg equilibrium. Simulation results show that the fairness of the proposed algorithm is improved by 22.73% compared with the power allocation algorithm based on QoS, and the system performance is improved significantly compared with the traditional pricing algorithm. The time complexity is also reduced significantly compared with the power allocation algorithm based on convex programming.

**Key words:** non-orthogonal multiple access; quality of experience; Stackelberg game; power allocation

随着移动通信技术的蓬勃发展,无线通信系统的接入用户数量呈爆炸式增长,传统的正交多址接入

收稿日期:2020-12-05

基金项目:重庆市科技创新领军人才支持计划项目(CSTCCXLJRC201710);重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjBX0005)

作者简介:胡相格(1995—),男,硕士生,E-mail:872699867@qq.com;李 云(1974—),男,教授,博士生导师.

(OMA, orthogonal multiple access) 系统已经不能满足系统接入容量日益增大的需求<sup>[1]</sup>. 而非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)系统能在同一时频块上实现多个用户的复用,提高了频谱的利用率. 同时多输入多输出(MIMO, multiple input multiple output)技术在收发两端使用多根天线,能大幅度地提高系统接入用户的数量<sup>[2]</sup>,所以 MIMO 与 NOMA 技术相结合能进一步提高系统的性能.

面对网页浏览、文件下载、视频通话等高速率业务的需求,与仅提升用户的服务质量(QoS, quality of service)不同,第5代移动通信系统(5G, the fifth generation of mobile communications system)需要为这些业务提供较高的用户体验质量(QoE, quality of experience)水平. QoE 作为一种用户对媒体业务的主观感受,是5G中越来越重要的一个指标<sup>[3]</sup>,它能反映出用户对具体应用业务的满意度. 因此,研究 MIMO-NOMA 系统中基于 QoE 的功率分配算法,对5G的发展具有重要价值.

在目前大部分通信系统中,主要是针对 QoS 对功率分配方案进行研究. Bai 等<sup>[4]</sup>在安全多载波全双工中继系统中,提出了一种由 QoS 驱动的具有信道不确定性的鲁棒功率分配策略,仿真结果表明,所提出的鲁棒功率分配策略能够很好地满足统计时延 QoS 要求. Ma 等<sup>[5]</sup>在保证统计时延 QoS 的前提下,在认知无线网络中,提出一种基于能效的联合功率和时间的资源优化方案. Zhang 等<sup>[6]</sup>研究了 NOMA 双向中继无线网络中的子载波和功率分配问题,但依然是基于 QoS 进行研究的. 对基于 QoE 的功率分配算法,Sohraby 等<sup>[7]</sup>提出了以 QoE 为中心的多媒体中继方案,将 NOMA 技术应用在用户到 D2D 的中继链路中,证明了以 QoE 为中心的中继方案能显著提高用户多媒体体验质量. Wang 等<sup>[8]</sup>在 NOMA 系统中提出了一种基于 QoE 的无线视频业务功率分配方法,与传统的 OMA 方案对比,虽然性能得到了提高,但其采用的是集中式算法,复杂度较高. Fan 等<sup>[9]</sup>将基站(BS, base station)和用户建立为一主多从的 Stackelberg 模型,给出了2个用户情况下的闭式解,但提出的算法只考虑了单输入单输出非正交多址接入(SISO-NOMA, single input single output-non-orthogonal multiple access)系统.

基于上述存在的问题,在 MIMO-NOMA 下行网页浏览业务场景中提出一种基于 QoE 的 Stackelberg 博弈的功率分配算法,将传统的以提高用户吞吐量

为优化目标变为以提高平均意见分数(MOS, mean opinion score)为优化目标. 仿真结果表明,相较于已有的功率分配算法,所提算法提高了用户间的公平性且降低了时间复杂度.

## 1 系统模型

### 1.1 MIMO-NOMA 系统模型

假设研究场景由单 BS 和若干用户构成,小区内共有  $G$  个用户,每个用户装有  $N$  根天线. 系统已经将用户分成  $B$  簇,每簇内有  $T$  个用户,BS 内安装有  $B$  根天线,且位于小区中心.

定义  $\mathbf{g}_b$  为所有用户对应的波束成型矩阵的第  $b$  列矩阵,  $\mathbf{H}_{b,t}$  为用户与 BS 间的信道增益.

假设簇间干扰已消除,有效信道增益  $|\mathbf{v}_{b,t}^H \mathbf{H}_{b,t} \mathbf{g}_b|^2$  按降序排列,令  $h_{b,t} = |\mathbf{v}_{b,t}^H \mathbf{H}_{b,t} \mathbf{g}_b|^2$ ,则用户  $U_{b,t}$  在单位带宽下的速率为

$$R_{b,t} = \log \left( 1 + \frac{p_{b,t} h_{b,t}}{\sum_{k=1}^{t-1} p_{b,k} h_{b,k} + |\mathbf{v}_{b,t}^H|^2 \delta^2} \right) \quad (1)$$

其中:  $p_{b,t}$  为 BS 分配给第  $b$  簇中第  $t$  个用户  $U_{b,t}$  的功率,  $\mathbf{v}_{b,t}^H$  为检测矩阵,  $\delta^2$  为加性高斯白噪声功率.

### 1.2 网页浏览业务的 MOS 模型

在衡量 QoE 的标准中, MOS 模型常应用于视频、音频、网页浏览等业务. 网页浏览业务作为无线网络中最普遍的业务之一,受到人们的关注<sup>[10]</sup>. 采用的 MOS 模型将客观指标映射为人类对网页浏览的主观感知质量,有

$$M_{\text{web}} = -C_1 \ln[d(R_{\text{web}})] + C_2 \quad (2)$$

其中:  $M_{\text{web}}$  为用户体验质量的满意度,范围为 1 ~ 5, 值越大表示用户的感知体验质量越好;常数  $C_1$  和  $C_2$  表示网页浏览业务的仿真参数,通过对网络浏览应用的实验结果分析获得,取值分别为 1.112 0 和 4.674 6;  $R_{\text{web}}$  为在信道带宽为  $W$  时,用户的速率,即  $R_{\text{web}} = WR_{b,t}$ ;  $d(R_{\text{web}})$  表示用户发送网页请求和接收到完整网页显示之间的延迟<sup>[11]</sup>. 延迟时间与用户浏览网页的大小、往返时间等多个因素有关. 从文献<sup>[10]</sup>可知,  $d(R_{\text{web}})$  可简化为

$$d(R_{\text{web}}) = F_{b,t}/R_{\text{web}} = F_{b,t}/(WR_{b,t}) \quad (3)$$

其中  $F_{b,t}$  表示浏览网页的大小.

在网页浏览业务的 MOS 模型中,对于单个用户  $U_{b,t}$ ,式(2)可写为

$$\begin{aligned} M_{\text{web}}^{b,t} &= -C_1 \ln[F_{b,t}/(WR_{b,t})] + C_2 = \\ &C_1 [\ln(R_{b,t}) + \ln(W/F_{b,t})] + C_2 = \end{aligned}$$

$$C_1 \ln(R_{b,t}) + C_3^{b,t} \quad (4)$$

其中  $C_3^{b,t} = C_2 + C_1 \ln(W/F_{b,t})$  为一个常数.

## 2 功率分配算法设计

### 2.1 基于 QoE 的博弈策略建模

经过建立网页浏览业务的 MOS 模型,得出了从用户速率到 MOS 函数的映射关系,把提高吞吐量转变为提高用户 QoE 为目标. 可将 MOS 模型应用于 Stackelberg 博弈理论进行建模.

1) 用户(买方)最大化 MOS 效用函数可建模为

$$\begin{aligned} \max_{\{p_{b,t}\}} U_u^{b,t} &= M_{\text{web}}^{b,t} - \lambda_{b,t} p_{b,t} = \\ &C_1 \ln(R_{b,t}) + C_3^{b,t} - \lambda_{b,t} p_{b,t} \end{aligned} \quad (5)$$

Subject to:

$$\sum_{t=1}^T p_{b,t} \leq \frac{p_{\text{tot}}}{B} \quad (6)$$

$$M_{\text{web}}^{b,t} \geq M_{\min} \quad (7)$$

$$p_{b,t} \leq \frac{\frac{p_{\text{tot}}}{B} - \sum_{k=1}^{t-1} p_{b,k}}{T+1-t} \quad (8)$$

$$R_{b,t} \geq R_{\text{OMA}} = \frac{1}{T} \ln \left( 1 + \frac{p_{\text{tot}} h_{b,t}}{G\delta^2} \right) \quad (9)$$

其中:  $\lambda_{b,t}$  为 BS 向  $U_{b,t}$  设置的单位功率价格, 式(6)~式(9)为约束条件. 式(6)为所有用户功率不能大于 BS 的发射功率, 式(7)为用户最小 QoE 限制, 一般  $M_{\min}$  设为 3, 式(8)为同一簇内用户的公平性约束, 式(9)为用户速率, 要好于 OMA 系统.

2) BS(卖方)最大化效用函数可建模为

$$\max_{\{\lambda_{b,t}\}} U_{\text{BS}}^{b,t} = (\lambda_{b,t} - c_{b,t}) p_{b,t} \quad (10)$$

其中  $c_{b,t}$  表示 BS 向  $U_{b,t}$  设置的单位功率成本.

### 2.2 用户策略求解

在求解策略中, 每簇内的用户通过竞争获得功率资源. BS 在开始时以功率的成本价出售功率, 各用户根据自身的信道条件和 BS 的定价来决策买入的功率量. 同时, 设置了惩罚函数  $\lambda_{b,t} p_{b,t}$ , 即当用户买入越多的功率, 在获得越大 MOS 值的同时, 也会受到越大的惩罚, 从而限制了信道条件好的用户贪婪地购买功率, 提升了用户间的公平性.

对  $U_{b,t}$  的效用 MOS 函数  $U_u^{b,t}$  关于功率  $p_{b,t}$  求二阶导数小于 0, 意味着用户端的效用 MOS 函数是凹函数, 且各个约束条件均是凸函数. 所以, 此优化问题为凸优化问题, 可以采用拉格朗日乘数法求解. 构造拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L &= U_u^{b,t} + \alpha_{b,t} \left( \frac{p_{\text{tot}}}{B} - \sum_{t=1}^T p_{b,t} \right) + \omega_{b,t} (M_{\text{web}}^{b,t} - 3) + \\ &\beta_{b,t} \left[ \frac{p_{\text{tot}}/B - \sum_{k=1}^{t-1} p_{b,k}}{T - (t-1)} - p_{b,t} \right] + \\ &\eta_{b,t} \left[ R_{b,t} - \frac{1}{T} \ln \left( 1 + \frac{p_{\text{tot}} h_{b,t}}{G\delta^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $\alpha_{b,t}, \omega_{b,t}, \beta_{b,t}, \eta_{b,t}$  分别为拉格朗日乘数.

给定拉格朗日乘数, 采用 Karush-Kuhn-Tucker 条件,  $\partial L_{b,t} / \partial p_{b,t} = 0$ , 可得用户的最优功率表达式为

$$\begin{aligned} p_{b,t}^* &= \frac{(1 + \omega_{b,t}) C_1 W}{\ln 2 (\lambda_{b,t} + \alpha_{b,t} + \beta_{b,t} - \eta_{b,t}) R_{\text{web}}} - \\ &\frac{\sum_{k=1}^{t-1} p_{b,k} h_{b,t} + |\mathbf{v}_{b,t}^H|^2 \delta^2}{h_{b,t}} \end{aligned} \quad (12)$$

### 2.3 BS 策略求解

为了弥补系统中的网络基本开销, BS 报价不能低于成本价  $c_{b,t}$ ; 否则  $U_{\text{BS}}^{b,t}$  将为负数, 用户不能接入网络. 但如果 BS 报价过高, 用户所获得的效用还不能弥补用户所付出的费用, 用户同样也不会接入网络, 即在初始化时, BS 以成本价  $c_{b,t}$  开始报价.

将  $p_{b,t}^*$  代入式(10)可得到

$$\max_{\{\lambda_{b,t}\}} U_{\text{BS}}^{b,t} = (\lambda_{b,t} - c_{b,t}) p_{b,t}^* \quad (13)$$

将式(13)对  $\lambda_{b,t}$  求偏导, 并令其等于 0, 即可得到卖方最优的单位功率价格表达式为

$$\begin{aligned} \lambda_{b,t}^* &= \sqrt{\frac{(1 + \omega_{b,t}) (c_{b,t} + \alpha_{b,t} + \beta_{b,t} - \eta_{b,t}) C_1 W h_{b,t}}{\ln 2 \left( \sum_{k=1}^{t-1} p_{b,k} h_{b,t} + |\mathbf{v}_{b,t}^H|^2 \delta^2 \right) R_{\text{web}}}} - \\ &\alpha_{b,t} - \beta_{b,t} + \eta_{b,t} \end{aligned} \quad (14)$$

### 2.4 Stackelberg 均衡存在性和唯一性证明

#### 1) 存在性证明

根据 Stackelberg 均衡解的定义<sup>[12]</sup>. BS 和用户在经过有限次的迭代后分别收敛到一个最佳状态, 这时改变任何策略都无法达到更大的收益, 最佳状态即达到 Stackelberg 均衡. 下面将通过 3 个引理证明  $(p_{b,t}^*, \lambda_{b,t}^*) = (p_{b,t}^{\text{SE}}, \lambda_{b,t}^{\text{SE}})$ . 其中:  $p_{b,t}^{\text{SE}}, \lambda_{b,t}^{\text{SE}}$  为 Stackelberg 博弈论的均衡.

**引理 1** 当卖方功率价格报价固定不变时, 买方 MOS 的效用函数  $U_u^{b,t}$  在  $p_{b,t}^*$  这一点取得最大值.

**证明** 由 2.2 节可知,  $U_u^{b,t}$  是关于  $p_{b,t}$  的凹函数, 因此  $p_{b,t}^*$  为买方所分配功率的全局最优解, 满足 Stackelberg 均衡解定义, 所以  $p_{b,t}^* = p_{b,t}^{\text{SE}}$ .

**引理 2** 对于卖方 BS, 买方用户所分配的最优

功率  $p_{b,t}^*$  随卖方单位功率价格  $\lambda_{b,t}$  的增加而减少.

**证明** 最优功率表达式  $p_{b,t}^*$  对  $\lambda_{b,t}$  求导数可得

$$\frac{\partial p_{b,t}^*}{\partial \lambda_{b,t}} = \frac{-(1 + \omega_{b,t}) C_1 W}{(\lambda_{b,t} + \alpha_{b,t} + \beta_{b,t} - \eta_{b,t})^2 (\ln 2 R_{\text{web}} + W)} < 0 \quad (15)$$

由式(15)所示,最优功率表达式是关于价格的减函数,所以当卖方 BS 增加单位功率价格时,买方用户会减少购买功率的量,这也符合实际场景.

**引理 3** 当买方用户所分配的功率  $p_{b,t}$  固定不变时,卖方 BS 的效用函数在  $\lambda_{b,t}^*$  这一点取得最大值.

**证明** 卖方 BS 的效用函数(式(10))对卖方单位功率价格  $\lambda_{b,t}$  求二阶导数,可得

$$\frac{\partial^2 U_{\text{BS}}^{b,t}}{\partial \lambda_{b,t}^2} = \frac{-2(1 + \omega_{b,t})(c_{b,t} + \alpha_{b,t} + \beta_{b,t} - \eta_{b,t}) C_1 W}{\ln 2 (\lambda_{b,t} + \alpha_{b,t} + \beta_{b,t} - \eta_{b,t})^3 R_{\text{web}}} < 0 \quad (16)$$

由式(16)可得 BS 的效用函数  $U_{\text{BS}}^{b,t}$  是关于  $\lambda_{b,t}$  的凹函数,因此  $\lambda_{b,t}^*$  为单位功率价格的全局最优解,满足 Stackelberg 均衡解定义,所以  $\lambda_{b,t}^* = \lambda_{b,t}^{\text{SE}}$ .

2) 唯一性证明

**定义** 令  $\lambda = [\lambda_{1,1}^*, \lambda_{1,2}^*, \dots, \lambda_{B,T}^*]^T$ ,  $\lambda^{(i+1)} = S(\lambda^{(i)})$ , 对于任意  $\lambda \geq 0$ , 如果价格更新函数  $S(\lambda)$  满足如下 3 个条件,则 Stackelberg 均衡解是唯一解<sup>[13]</sup>.

① 正定性:  $S(\lambda) > 0$ .

② 单调性: 如果  $\lambda_1 \geq \lambda_2$ , 则  $S(\lambda_1) \geq S(\lambda_2)$  或者  $S(\lambda_1) \leq S(\lambda_2)$ .

③ 伸缩性: 对于任意  $\phi > 1$ ,  $\phi S(\lambda) \geq S(\phi \lambda)$ .

根据文献[13]中对唯一性的证明,易证得满足以上 3 个条件,即唯一性得证.

综上所述,  $(p_{b,t}^*, \lambda_{b,t}^*)$  为 BS 和用户的全局最优策略,同时也是 Stackelberg 均衡解且是唯一的.

## 2.5 算法步骤

BS 设定单位功率价格并出售给用户,是卖方(主方),在博弈中处于主导地位. 而用户作为功率资源的竞争者,根据 BS 制定的价格做出决策,是买方(从方). 双方通过一主一从博弈,最终达到均衡,取得最大化自身效益. 算法包括 5 个步骤.

1) 将系统所有用户按照每簇内用户数  $T$  随机分簇,每簇之间所分得的功率相等,且每簇内用户按照有效信道增益降序排列.

2) 初始化: 初始迭代次数  $i = 0$ , 初始拉格朗日

乘数分别为 1, 最大迭代次数  $N_{\text{max}} = 30$ , 初始单位功率价格  $\lambda_{b,t}^{(0)} = c_{b,t}$ , 初始用户功率分配  $p_{b,t}^{(0)} = 0$ .

3) 根据式(14)计算最优单位功率价格  $\lambda_{b,t}^*$ , 再把  $\lambda_{b,t}^*$  代入式(12)求得最优功率  $p_{b,t}^*$ .

4) 更新拉格朗日乘数, 重复步骤 3) 进行下次最优价格和功率计算, 直到达到最大迭代次数.

5) 计算并输出  $M_{\text{web}}^{b,t}$ , 进入下一用户迭代.

## 2.6 复杂度分析

所提算法中, 每个用户每一次迭代都会分别更新 1 次  $\lambda_{b,t}^*$ ,  $p_{b,t}^*$  和拉格朗日乘数, 共有  $BT$  个用户, 所以会计算  $BT$  次. 假设遇到最坏的情况, 即每个用户迭代  $N_{\text{max}}$  次才收敛, 所以所提算法的时间复杂度为  $O(BTN_{\text{max}})$ .

Fang 等<sup>[14]</sup>提出了基于凸差规划的功率分配算法, 将原始的非凸问题转化为近似凸优化问题. 假设用户分簇数为  $B$ , 每簇内有  $T$  个用户, 迭代  $I_{\text{max}}$  次才收敛, 可得到时间复杂度为  $O(B^3 T^3 I_{\text{max}})$ .

表 1 给出了  $N_{\text{max}} = I_{\text{max}} = 15$ , 小区总用户数在 4 ~ 10 之间时, 2 种算法复杂度的对比. 从表中可见, 所提算法的时间复杂度远远低于基于凸差规划的集中式功率分配算法<sup>[14]</sup>.

表 1 复杂度比较

| 小区总用户数 | 所提算法 | 文献[14]算法 |
|--------|------|----------|
| 4      | 60   | 960      |
| 6      | 90   | 3 240    |
| 8      | 120  | 7 680    |
| 10     | 150  | 15 000   |

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真参数设置

在所建立的 MIMO-NOMA 系统场景下, 考虑单 BS, 用户在半径为 500 m 的小区内均匀分布. 信道带宽为 75 kHz;  $H_{b,t} = (d_{b,t})^{-\frac{\tau}{2}} g_{b,t}$ , 其中  $d_{b,t}$  为 BS 到  $U_{b,t}$  的距离,  $g_{b,t}$  为高斯随机变量;  $\tau$  为路径损耗指数, 设为 3.7;  $\delta^2$  设为 -70 dBm.

### 3.2 仿真结果

所提算法中功率和价格的迭代收敛更新过程如图 1 和图 2 所示. 其中总用户数为 6, 设定 BS 的发射总功率为 40 dBm, 用户浏览网页平均大小设为 320 KB. 从图 1 中可看出, 所提算法在第 5 次迭代后开始收敛, 收敛值即为用户从 BS 处购买的功率



量.同时,BS 也根据用户的购买量不断调整自己出售的单位功率价格.经过5次迭代,达到收敛.最终,用户与BS 达到 Stackelberg 均衡,此时用户体验质量达到最好,如图2所示.

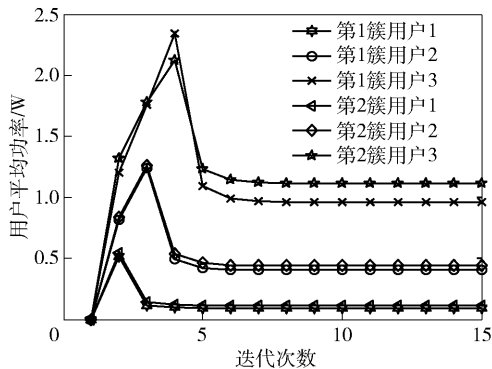


图1 功率的迭代收敛过程

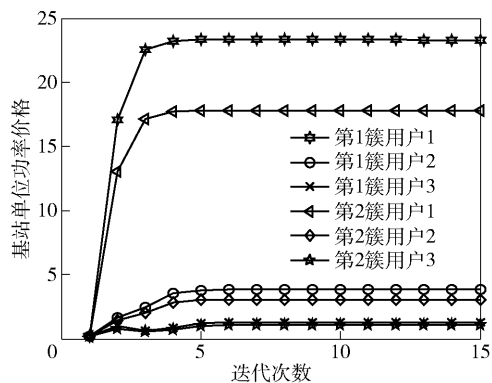


图2 价格的迭代收敛过程

所提算法经过BS 和用户不断博弈,最终获得最优定价,是一种动态定价算法.此外,实现了其他2种定价算法.第2种定价算法是对所有用户采用统一固定的定价方式,所定价格为图2所示各用户最终收敛价格的平均值,经过计算为 $\bar{\lambda}_{b,i} = 8.3$ ,命名为fix-price.第3种定价算法在开始迭代时,不考虑单位功率的成本,采用随机出价的方式,命名为random-price.仿真中总用户数为6,网页浏览大小( $F$ )分别取200 KB和320 KB时,这3种定价算法的系统总MOS值随BS总功率的变化关系如图3所示.从图3可见,所提算法在系统总MOS值上是最优的,其次是random-price算法,最差的是fix-price算法,平均系统总MOS值仅为25.062,这是因为fix-price算法并未根据不同用户的信道条件进行定价,使得用户体验质量较差.从图3和图4可见,所提算法的系统总MOS值和总吞吐量比random-price算法提升了1.88%,比fix-price算法提升了

6.71%.

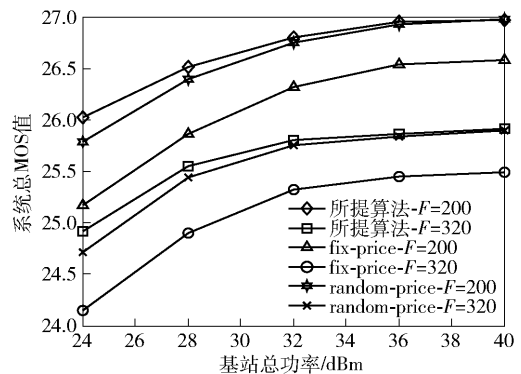


图3 不同BS总功率下3种定价算法的总MOS值比较

当总用户数为6,  $F = 320$  KB时,基于凸差规划的功率分配算法<sup>[14]</sup>与3种定价算法的系统总吞吐量比较如图4所示.从图4可见,固定任意BS功率,文献[14]算法取得的系统总吞吐量最大,其次是所提算法,最差的是fix-price算法.这是因为凸差规划功率分配算法是一种集中式策略,是以牺牲算法时间复杂度为代价,以此考虑了整个系统的全局信息,所以该算法所获得的系统总吞吐量最大.而所提算法是一种分布式策略,考虑了每个用户的效益,并以MOS值为优化目标,所以系统总吞吐量并不一定能达到全局最优,但时间复杂度远远低于文献[14]算法.

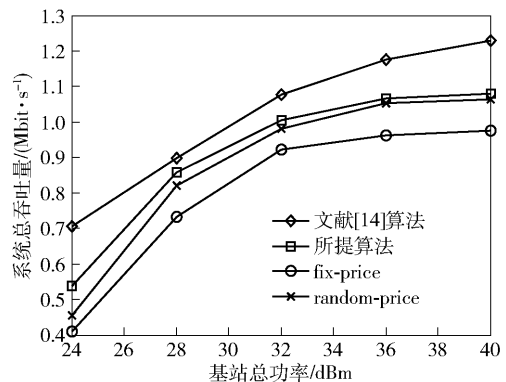


图4 不同BS总功率下4种算法的总吞吐量比较

Jain 公平性指标(JFI, Jain's fairness index)一般用来表示系统的公平性能,取0~1之间的连续值.越接近1表示资源分配越公平<sup>[15]</sup>.采用Stackelberg 博弈算法基于最大化MOS值与最大化吞吐量算法的公平性能对比,如图5所示.可以看出,所提算法的总JFI为3.9384,而基于最大化吞吐量算法的总JFI为3.2091.说明所提算法的用户公平性能更高,总JFI提升了22.73%.这是因

为所采用的 MOS 函数中含有对数函数,能降低用户之间的速率差距. 此外,2 种方案的总 JFI 值均随着系统用户数量的提高而减少,这是因为当系统中的用户不断增加时,用户在小区的位置变得比之前更密集.

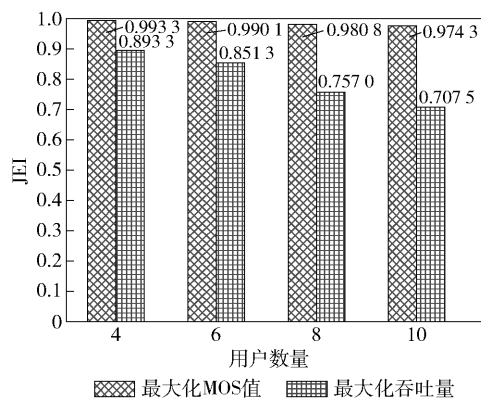


图5 基于最大化 MOS 值与最大化吞吐量算法的 JFI 比较

## 4 结束语

以最大化用户 MOS 值为优化目标,提出了一种基于 QoE 的 Stackelberg 博弈的动态定价功率分配算法. 仿真结果表明,所提算法与只考虑 QoS 的功率分配的传统算法相比公平性能更高,相比固定定价算法和随机定价算法无论在系统总 MOS 值上,还是在总吞吐量上都有很大提高. 相比基于凸差规划的集中式算法<sup>[14]</sup>,在吞吐量相近的基础上,所提的分布式算法在时间复杂度上有明显降低. 由于所提算法是针对单一的网页浏览业务,下一步可研究多种业务下的 QoE 功率分配算法.

### 参考文献:

- [1] Xu Wenjun, Li Xue, Lee C H, et al. Joint sensing duration adaptation, user matching, and power allocation for cognitive OFDM-NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(2): 1269-1282.
- [2] 张舒敏. MIMO-NOMA 系统中的用户分簇与功率分配算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [3] Shao Hongxiang, Zhao Hangsheng, Sun Youming, et al. QoE-aware downlink user-cell association in small cell networks: a transfer-matching game theoretic solution with peer effects[J]. IEEE Access, 2016, 4: 10029-10041.
- [4] Bai Zhiqian, Liang Sui, Ma Piming, et al. QoS driven power allocation in secure multicarrier full-duplex relay systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(2): 929-941.
- [5] Bai Zhiqian, Ma Liuqing, Dong Yanan, et al. Energy-efficient resource allocation for secure cognitive radio network with delay QoS guarantee[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(3): 2795-2805.
- [6] Zhang Haijun, Yang Ning, Long Keping, et al. Secure communications in NOMA system: subcarrier assignment and power allocation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(7): 1441-1452.
- [7] He Shuan, Wang Wei, Sohaby K. QoE-centric multimedia relay in energy efficient NOMA wireless communications[C]// ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [8] He Shuan, Wang Wei. A QoE-optimized power allocation scheme for non-orthogonal multiple access wireless video services[C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [9] Wang Zhengqiang, Wen Chencheng, Fan Zifu, et al. A novel price-based power allocation algorithm in non-orthogonal multiple access networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(2): 230-233.
- [10] 崔静静. 非正交多址接入系统功率分配优化设计与性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [11] Ameigeiras P, Ramos-Munoz J J, Navarro-Ortiz J, et al. QoE oriented cross-layer design of a resource allocation algorithm in beyond 3G systems[J]. Computer Communications, 2010, 33(5): 571-582.
- [12] Yuan Yiling, Yang Tao, Feng Hui, et al. An iterative matching-stackelberg game model for channel-power allocation in D2D underlaid cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(11): 7456-7471.
- [13] Wang An, Cai Yueming, Yang Wendong, et al. A Stackelberg security game with cooperative jamming over a multiuser OFDMA network[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai: IEEE Press, 2013: 4169-4174.
- [14] Fang Fang, Zhang Haijun, Cheng Julian, et al. Energy-efficient resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access network[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(9): 3722-3732.
- [15] 冯洁琼. LTE-A 中基于用户 QoE 公平性的无线资源管理算法研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2016.