

# 基于能量效率的双层非正交多址系统资源优化算法

高东\* 梁子林

(北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029)

**摘要:** 该文针对双层非正交多址系统(NOMA)中基于能量效率的资源优化问题, 该文提出基于双边匹配的子信道匹配方法和基于斯坦科尔伯格(Stackelberg)博弈的功率分配算法。首先将资源优化问题分解成子信道匹配与功率分配两个子问题, 在功率分配问题中, 将宏基站与小型基站层视作斯坦科尔伯格博弈中的领导者与追随者。然后将非凸优化问题转换成易于求解的方式, 分别得到宏基站和小型基站层的功率分配。最后通过斯坦科尔伯格博弈, 得到系统的全局功率分配方案。仿真结果表明, 该资源优化算法能有效地提升双层NOMA系统的能量效率。

**关键词:** 非正交多址; 博弈论; 能量效率; 资源分配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)05-1237-07

DOI: [10.11999/JEIT190048](https://doi.org/10.11999/JEIT190048)

## Energy Efficient Based Resource Optimization Algorithm for Two-tier Non-Orthogonal Multiple Access Network

GAO Dong LIANG Zilin

(College of Information Science and Technology, Beijing University of  
Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A subchannel matching method based on bilateral matching and a power allocation algorithm based on Stackelberg game are proposed for two-tier Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) network. Firstly, the resource optimization problem is decomposed into two subproblems—sub-channel matching and power allocation. In the power allocation, the macro base station layer and small base station layer are regarded as the leader and followers in the Stackelberg game. Then, the non-convex optimization problem is converted into a way to be easily solved, and the power allocation of the both layers are obtained respectively. Finally, the global power allocation scheme of the system is obtained by using Stackelberg game. The simulation results show that the proposed resource optimization algorithms can effectively improve the energy efficiency of the two-tier NOMA system.

**Key words:** Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Game; Energy efficiency; Resource allocation

### 1 引言

随着移动通信和互联网技术的发展, 以及物联网、智慧医疗、无人驾驶等新技术的新起, 越来越多的智能终端开始接入无线网络, 使得网络资源开始变得紧张。尤其频谱资源的稀缺, 使正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)技术的局限性开始显露出来。为了满足用户的需求, 非正交多址技术(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)的研究受到重视<sup>[1-4]</sup>。相比OFDMA中1条信道在1个时间段内只能服务1位用户, NOMA系统中的1条信道可同时服务多个用户, 在发送端通过非正交频率进行发送, 然后

在接受端通过串行干扰消除技术对接收到的信息进行解码。NOMA通过主动引入干扰, 非常大幅度地提高了频谱的使用效率和系统吞吐率, 这些特点使它成为当今无线移动通信中的热点研究技术。同时, 除了提高通信网络系统的容量, 能量使用效率也是在当前环境背景下关注的重点。随着环境压力的增大, 一味地提高性能对资源的消耗过大, 人们开始讲究节能与环保, 注重效率。因此, 提高通信传输过程中系统的能量效率是非常必要的。

文献[5]研究了一个异构OFDMA系统中的信道不确定性, 并通过所提算法使系统达到斯坦科尔伯格博弈的均衡点。文献[6]研究了单基站NOMA网络中的网络容量最大化问题, 并在使用相同功率分配方法的情况下对比了NOMA网络与OMA网络的性能, 仿真结果表明NOMA更具优越性。文

文献[7]研究了NOMA网络中的用户分组问题,提出了一种子带间多用户分组优化算法,减少用户的搜索空间,并提升网络的吞吐量。文献[8]总结了功率域中基于叠加码(superposition coding)的NOMA系统的过去与前沿研究,并对其性能进行了大量的分析。文献[9]研究了NOMA异构网络中的能量效率最大化问题,采用了固定功率分配方法来进行功率分配,并且计算出了信道中用户的最优个数,但该研究只采用了功率这一种维度来进行资源优化。在满足服务需求的情况下,文献[10]研究了NOMA网络中最小化传输功率的问题,提出了一种低复杂度的联合子信道匹配与功率分配的资源优化算法。文献[11]在为了提升频谱效率与网络边缘用户的传输速率,提出了一种新颖的基于注水算法的资源优化方法。文献[12]首次考虑了NOMA网络的非完美信道状态,通过将概率混合非凸优化问题转换成一个非概率问题来进行求解,提出了一种联合子信道匹配与功率分配的迭代算法,但子信道中的用户个数被限制为两个。

绝大部分文献都只考虑单层的NOMA系统,子信道中的用户数量不超过两个,同时在进行资源优化时只考虑了单一资源维度。本文考虑了一个双层NOMA系统为模型,子信道中的用户数量超过两个。应用双边匹配的方法提出了一种子信道与用户分配算法,应用斯坦科尔伯格博弈提出了一种功率分配算法。仿真结果表明,本文算法可以有效提升基站的能量效率,并达到斯坦科尔伯格博弈均衡点,实现能量效率的优化。

## 2 系统模型与博弈论分析

### 2.1 系统模型

在以NOMA技术为基础的异构双层网络中,1个宏基站(Macro Base Station, MBS)下随机分布着 $S$ 个小型基站(Small Base Station, SBS)。系统的带宽为 $B$ ,共分为 $N$ 个子信道。每个子载波可以容纳 $H$ 个用户。令 $g_h^s(n)$ 表示在子信道 $n$ 上,小型基站所属的第 $h$ 个用户到该小型基站的信道增益,其中 $s \in \{1, 2, \dots, S\}$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $h \in \{1, 2, \dots, H\}$ ;令 $g_h^{s,t}(n)$ 表示在子信道 $n$ 上,小型基站 $s$ 所属第 $h$ 个用户到小型基站 $t$ 的信道增益,其中 $t \in \{1, 2, \dots, S\}$ ;令 $g_h^{s,m}(n)$ 表示在子信道 $n$ 上,小型基站 $s$ 所属的第 $h$ 个用户到宏基站的信道增益;令 $g_h^m(n)$ 表示在子信道 $n$ 上,宏基站所属的第 $h$ 个用户到该宏基站的信道增益;令 $g_h^{m,s}(n)$ 表示在信道 $n$ 上,宏基站所属的第 $h$ 个用户到小型基站 $s$ 的信道增益;令 $p_h^s(n)$ 与 $p_h^m(n)$ 分别表示为在子信道 $n$ 上,小型基站 $s$ 和宏基站对其第 $h$ 个用户分配的功率。小型基站 $s$ 和宏基站

在子信道 $n$ 上对第 $k$ 个用户的功率分配分别为 $p_k^s(n)$ 与 $p_k^m(n)$ 。子信道 $n$ 上,小型基站 $s$ 的第 $h$ 个用户所接受到的信号为

$$y_h^s(n) = g_h^s \sqrt{p_h^s(n)} x_h^s(n) + g_h^s(n) \sum_{i \neq h}^H \sqrt{p_i^s(n)} x_i^s(n) + \sum_{t \neq s}^S \sum_{k=1}^H g_h^{s,t}(n) \sqrt{p_k^{s,t}(n)} x_k^t(n) + \sum_{k=1}^H g_h^{s,m}(n) \sqrt{p_k^m(n)} x_k^m(n) + z_h \quad (1)$$

其中, $x_h^s(n)$ 和 $x_i^s(n)$ 分别是子信道 $n$ 上,小型基站 $s$ 的第 $h$ 个用户和第 $i$ 个用户发送的信息; $x_k^t(n)$ 表示在子信道 $n$ 上,小型基站 $t$ 的第 $k$ 个用户发送的信息; $x_k^m(n)$ 表示在子信道 $n$ 上,宏基站的第 $k$ 个用户发送的信息; $z_h$ 是均值为零且方差为 $\sigma_z^2$ 的噪声。在式(1)中, $g_h^s \sqrt{p_h^s(n)} x_h^s(n)$ 为目标用户所需要的有效信息, $g_h^s(n) \sum_{i \neq h}^H \sqrt{p_i^s(n)} x_i^s(n)$ 表示子信道 $n$ 中,小型基站 $s$ 的第 $h$ 个用户受到来自该基站同一子信道中其他用户的干扰, $\sum_{t \neq s}^S \sum_{k=1}^H g_h^{s,t}(n) \sqrt{p_k^{s,t}(n)} x_k^t(n)$ 表示在子信道 $n$ 上,用户受到的来自其他小型基站的同层干扰, $\sum_{k=1}^H g_h^{s,m}(n) \sqrt{p_k^m(n)} x_k^m(n)$ 表示在子信道 $n$ 上,宏基站对小型基站用户的跨层干扰。在式(1)中,等式右边的第1项为目标用户实际所需要的信息,其它几项均为该网络中其它用户对其的干扰。其中等式右边的第2项作为非正交多址系统中特有的干扰,通常使用串行干扰消除技术(Successive Interference Cancellation, SIC)来降低干扰。

串行干扰消除技术被广泛地应用在NOMA系统当中,它能在接受端消除来自非预期用户信息的干扰。假设小型基站 $s$ 的一子信道 $n$ 中有 $H$ 个用户,每个用户到基站的信道增益排序为 $\frac{|g_1^s(n)|^2}{\phi_{\bar{s},1} + \varphi_{s,1} + \sigma_z^2} \leq \frac{|g_2^s(n)|^2}{\phi_{\bar{s},2} + \varphi_{s,2} + \sigma_z^2} \leq \dots \leq \frac{|g_h^s(n)|^2}{\phi_{\bar{s},h} + \varphi_{s,h} + \sigma_z^2} \leq \dots \leq \frac{|g_H^s(n)|^2}{\phi_{\bar{s},H} + \varphi_{s,H} + \sigma_z^2}$ ,其中 $\phi_{\bar{s},h} = \sum_{t \neq s}^S \sum_{k=1}^H g_h^{s,t}(n) \sqrt{p_k^{s,t}(n)} x_k^t(n)$ 为同层干扰, $\varphi_{s,h} = \sum_{k=1}^H g_h^{s,m}(n) \sqrt{p_k^m(n)} x_k^m(n)$ 为跨层干扰[13]。令 $G_h^s(n) = |g_h^s(n)|^2$ 并且 $G_h^{s,t}(n)$ 与 $G_h^{s,m}(n)$ 的定义和 $G_h^s(n)$ 相似。当第 $h$ 个用户对接收到的数据进行解码时,来自用户 $i$ ( $i < h$ )的数据会按照SIC技术的解码顺序而被消除。但是来自用户 $i$ ( $i > h$ )的数据无法被消除将被视作干扰。因此,在子信道 $n$ 上,小型基站 $s$ 的第 $h$ 个用户的信干噪比为

$$\text{SINR}_h^s(n) = \frac{p_h^s(n) G_h^s(n)}{G_h^s(n) \sum_{i=h+1}^H p_i^s + \phi_s + \varphi_s + z_h} \quad (2)$$

其中,  $\phi_s = \sum_{t \neq s}^S \sum_{k=1}^H G_h^{s,t}(n) p_k^s(n)$  为同层干扰,  $\varphi_s = \sum_{k=1}^H G_h^{s,m}(n) p_k^m(n)$  为跨层干扰,  $G_h^{s,t}(n)$  和  $G_h^{s,m}(n)$  的定义与  $G_h^s(n)$  相同。在子信道  $n$  上, 小型基站  $s$  的第  $h$  个用户的信道容量为

$$C_h^s(n) = \frac{B}{N} \log_2(1 + \text{SINR}_h^s(n)) \quad (3)$$

小型基站  $s$  的能量效率为

$$\eta_{EE}^s = \frac{C_s(\mathbf{P}^S, \mathbf{P}^M)}{p_s(\mathbf{P}^S)} \quad (4)$$

其中,  $C_s(\mathbf{P}^S, \mathbf{P}^M) = \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^H C_h^s(n)$ ,  $p_s = \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^H p_h^s(n) + p_{\text{cir}}$ ,  $\mathbf{P}^S = [p_{h,n}^s]_{S \times H \times N}$  和  $\mathbf{P}^M = [p_{h,n}^m]_{H \times N}$  分别为小型基站层和宏基站层在所有子信道和用户上的功率分配矩阵。 $p_{\text{cir}}$  为小型基站的静态电路消耗, 假设其是一个恒定值。

从式(4)中可以看出, 在一个双层异构网络当中, 一个基站的能量效率是受到其他所有基站影响的, 小型基站与宏基站在功率分配上是相互影响的。以小型基站  $s$  为例, 其最优功率分配可表示为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{p>0} \eta_{EE}^s(\mathbf{P}^S, \mathbf{P}^M) \\ & \text{C1: } \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^H p_h^s(n) \leq P_{\text{max}}^S, \forall s \\ & \text{s.t. C2: } \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^H p_h^m(n) \leq P_{\text{max}}^M, \forall m \\ & \text{C3: } C_h^s(n) \geq R_{\text{min}}^s, \forall s, h, n \\ & \text{C4: } C_h^m(n) \geq R_{\text{min}}^m, \forall m, h, n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中,  $P_{\text{max}}^S$  和  $P_{\text{max}}^M$  分别是小型基站和宏基站的 最大传输功率,  $p > 0$  表示传输功率是一个正值, 表示传输速率的下限,  $\mathbf{P}^S$  和  $\mathbf{P}^M$  分别是小型基站与宏基站在所有子信道和用户上的功率分配矩阵。式(5)中,  $\max_{p>0} \eta_{EE}^s(\mathbf{P}^S, \mathbf{P}^M)$  表示在给定宏基站某一功率分配  $\mathbf{P}^M$  的情况下, 求取最优的小型基站功率分配  $\mathbf{P}^S$ , 使小型基站  $s$  的能量效率最大。C1 为小型基站的总功率限制, C2 为宏基站的总功率限制, C3 和 C4 分别为小型基站用户和宏基站用户的最低通信速率要求。

同样, 宏基站的最优功率分配为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{p>0} \eta_{EE}^m(\mathbf{P}^M, \mathbf{P}^S) \\ & \text{s.t. C1, C2, C3, C4} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### 2.2 斯坦科尔伯格博弈

在经济学领域中, 斯坦科尔伯格博弈由两部分组成, 包括领导者和追随者。博弈双方都是为了最大化自身的效用。而小型基站层中的多个小型基站之间同样存在竞争, 每个小型基站同样也要最大化自身的效用。因此, 小型基站层中的内部竞争被建模成追随者非合作子博弈模型。整个博弈的框架表示如下:

**博弈参与者:** 斯坦科尔伯格博弈中的领导者为宏基站, 追随者为小型基站层; 在小型基站层中, 追随者非合作子博弈的参与者为所有小型基站。

**博弈策略:** 每个基站中每位用户的功率分配。

**博弈策略空间:** 在追随者非合作子博弈中, 小型基站的博弈策略空间为  $\mathbf{P}^s = [p_{h,n}^s]_{H \times N}$ ; 在斯坦科尔伯格博弈当中, 领导者的博弈策略空间为  $\mathbf{P}^M = [p_{h,n}^m]_{H \times N}$ , 追随者的博弈策略空间为  $\mathbf{P}^S = [p_{h,n}^s]_{S \times H \times N}$ , 因此整个斯坦科尔伯格博弈的策略空间为笛卡尔积  $\{\mathbf{P}^S \times \mathbf{P}^M\}$ 。

**效用函数:** 小型基站  $s$  的效用函数为  $\eta_{EE}^s(\mathbf{P}^S, \mathbf{P}^M)$ , 宏基站的效用函数为  $\eta_{EE}^m(\mathbf{P}^M, \mathbf{P}^S)$ 。

使用斯坦科尔伯格博弈来求解该优化问题时, 斯坦科尔伯格博弈均衡点为该问题的解。

### 3 基于双边匹配的子信道分配算法

在实际问题当中, 子信道的匹配与功率分配这两个问题是耦合在一起的。为了使能量效率的优化问题能够便于处理, 将该问题解耦成为子信道与用户的匹配和功率分配这两个子问题。

首先考虑一个小型基站中的子信道匹配问题。当用户  $u$  被分配给子信道  $n$  时, 我们称之为用户  $u$  与信道  $n$  匹配在一起。在双边匹配的过程当中, 每一个用户与子信道都有一个参考列表。用户  $u$  的参考列表为一个子信道列表, 该子信道列表按照用户  $u$  最想匹配程度的递减顺序排列。同样, 第  $n$  个子信道的参考列表为一个用户的列表, 该列表按照第  $n$  个子信道最想匹配程度的递减顺序排列。小型基站  $s$  中的用户  $u$  的参考列表可表示为

$$\mathbf{PF\_UE}_s = [\text{PF\_UE}_s(1), \dots, \text{PF\_UE}_s(u), \dots, \text{PF\_UE}_s(NH)]^T \quad (7)$$

其中,  $\text{PF\_UE}_s(u)$  为用户  $u$  的参考列表。  $\text{PF\_UE}_s(u)$  中的子信道顺序由等价信道增益大小排序。当子信道  $n$  被分配给用户  $u$  后, 用户  $u$  在小型基站  $s$  的第  $n$  条子信道上的等价用户增益为

$$\text{ECG}_u^s(n) = \frac{|g_u^s(n)|^2}{\phi + \varphi + \sigma^2} \quad (8)$$

其中,  $g_u^s(n)$  为用户  $u$  与小型基站  $s$  在子信道  $n$  上的信道增益,  $\phi$  和  $\varphi$  为来自其它基站的同层干扰与跨层干扰。如果用户  $u$  在子信道  $n$  上的等价信道增益比在子信道  $i$  上的等价信道增益要高, 那么子信道  $n$  在与用户  $u$  进行双边匹配时, 比起信道  $i$  有更高的优先权。该过程可表示为

$$SC_n(u) \succ SC_i(u) \quad (9)$$

对于小型基站  $s$  中子信道的参考列表可表示为

$$\mathbf{PF\_SC}_s = [\mathbf{PF\_SC}_s(1), \dots, \mathbf{PF\_SC}_s(n), \dots, \mathbf{PF\_SC}_s(N)] \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{PF\_SC}_s(n)$  是子信道  $n$  的参考列表, 参考列表中用户的顺序按照能量效率进行排序。当用户  $u$  被放在子信道  $n$  上时, 那么子信道  $n$  上就会有  $H+1$  个用户。  $H+1$  个用户可以被分成  $C_{H+1}^H$  个有着  $H$  个用户的不同组合。如果用户组  $u_j$  比用户组  $u_k$  能够得到更高的能量效率, 那么在子信道  $n$  上, 用户组  $u_j$  比用户组  $u_k$  有着更高的优先权。可表示为

$$\eta_{EE}^s(u_j) \succ \eta_{EE}^s(u_k) \quad (11)$$

该子信道与用户的匹配方法可以应用到每一个小型基站与宏基站上, 具体算法表示如下:

(1) 初始化功率分配和用户-信道匹配; (2) 初始化  $F_{\text{mat}}^q$  和  $F_{\text{unmat}}^q$  来分别记录基站  $q$  中已经匹配好了的和未匹配的用户; (3) 计算  $\text{ECG}_u^s(n)$  来排列用户的参考序列, 计算  $\eta_{EE}^s$  来排列子信道的参考序列; (4) 如果  $\{F_{\text{unmat}}^q\} \neq \phi$ , 且用户  $u \notin \{F_{\text{mat}}^q\}$ , 根据  $\mathbf{PF\_UE}_s(u)$  为用户选择一个优先级最高的子信道, 在形成的  $C_{H+1}^H$  个子用户集中选择能获得最高能量效率的用户级。如果该子用户集包括用户  $u$ , 则将用户  $u$  添加到  $\{F_{\text{mat}}^q\}$  中, 否则将该子信道移出用户  $u$  的参考列表  $\mathbf{PF\_UE}_s(u)$ ; (5) 重复步骤(2), 步骤(3), 步骤(4), 直到每一个用户与信道都匹配成功。

#### 4 基于能效最优的功率分配

在用户与子信道进行匹配之后, 进行基站的功率分配。在小型基站子博弈中, 每个基站都以最大化自己的能量效率为目标来分配自己的用户功率, 最终得到的子博弈中的纳什均衡点即为追随者做出的博弈策略。由于计算式(5)的复杂度过高, 因此本文将式(5)转换成一个含有参数的非分式子

$$t^* = \frac{C_s(\mathbf{P}^{S^*}, \mathbf{P}^M)}{p_s^*(\mathbf{P}^S)} = \max_{p>0} \frac{C_s(\mathbf{P}^S, \mathbf{P}^M)}{p_s(\mathbf{P}^S)} \quad (12)$$

当且仅当

$$\max_{p>0} C_s(\mathbf{P}^{S^*}, \mathbf{P}^M) - t^* p_s^*(\mathbf{P}^{S^*}) = 0 \quad (13)$$

时, 能够得到小型基站  $s$  的最优能量效率  $t^*$  和最优功率分配  $\mathbf{P}^{S^*}$ 。引入用户传输速率的下界<sup>[14]</sup>

$$v_h^s(n) \log_2(\text{SINR}_h^s(n)) + \omega_h^s(n) \leq \log_2(1 + \text{SINR}_h^s(n)) \quad (14)$$

$$\text{其中, } v_h^s(n) = \frac{\overline{\text{SINR}}_h^s(n)}{1 + \overline{\text{SINR}}_h^s(n)}, \omega_h^s(n) = \log_2\left(1 + \overline{\text{SINR}}_h^s(n)\right) - \frac{\overline{\text{SINR}}_h^s(n)}{1 + \overline{\text{SINR}}_h^s(n)} \log_2\left(\overline{\text{SINR}}_h^s(n)\right)。$$

当  $\text{SINR}_h^s(n) = \overline{\text{SINR}}_h^s(n)$  时式(9)取等号。

则第  $s$  个小型基站的传输速率的下界为

$$\bar{C}_s(\mathbf{P}^S) = \frac{B}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^H \left( v_h^s(n) \log_2 \overline{\text{SINR}}_h^s(n) + \omega_h^s(n) \right) \quad (15)$$

此时, 式(5)中的问题转换成

$$\max_{p_h^s > 0, p_h^m > 0} \bar{C}_s(\mathbf{P}^S, \mathbf{P}^M) - tp_s(\mathbf{P}^S) \quad (16)$$

在给定  $t$  和宏基站功率分配  $\mathbf{P}^M$  的情况下, 式(11)是关于小型基站功率分配  $\mathbf{P}^S$  的优化问题。通过解决它的对偶问题, 从而求得它的解。

对式(11)进行2阶求导, 得到

$$\frac{\partial^2 \bar{C}_s(\mathbf{P}^S, \mathbf{P}^M) - tp_s(\mathbf{P}^S)}{\partial p_h^s(n)^2} = -\frac{B}{N} v_h^s(n) \frac{1}{p_h^s(n)^2 \ln 2} < 0 \quad (17)$$

式(17)说明式(11)是求解凸函数的最值问题。

引入拉格朗日方程:

$$L(\mathbf{P}^S, \alpha^s, \beta_h^s(n)) = C_s(\mathbf{P}^S, \mathbf{P}^M) - tp_s(\mathbf{P}^S) + \alpha^s (\mathbf{P}_{\text{max}}^s - p_s(\mathbf{P}^S)) + \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^H \beta_h^s(n) (C_h^s(n) - C_{\text{min}}) \quad (18)$$

其中,  $\alpha^s$  和  $\beta_h^s(n)$  为拉格朗日乘子。式(11)的对偶问题为

$$d(\alpha^s, \beta_h^s(n)) = \max_{p_h^s(n) > 0} L(\mathbf{P}^S, \alpha^s, \beta_h^s(n)) \quad (19)$$

$$\min_{\alpha \geq 0, \beta_h^s(n) \geq 0} d(\alpha^s, \beta_h^s(n)) \quad (20)$$

给定拉格朗日乘子  $\alpha^s$  和  $\beta_h^s(n)$ , 就能计算出小型基站的功率分配。

式(5)转变为有KKT条件的最优化问题。令

$$\frac{\partial L(\mathbf{P}^S, \alpha^s, \beta_h^s(n))}{\partial p_h^s(n)} = 0 \quad (21)$$

式(16)可转换成

$$-\frac{B}{HN} \sum_{i=1}^{h-1} \frac{(1 + \beta_i^s(n)) \text{SINR}_i^s(n)}{\ln 2 p_i^s(n) (1 + \text{SINR}_i^s(n))} + \frac{B}{HN} \frac{(1 + \beta_h^s(n)) \text{SINR}_h^s(n)}{\ln 2 p_h^s(n) (1 + \text{SINR}_h^s(n))} - (\alpha^s + t) = 0 \quad (22)$$

通过计算得出，在子信道 $n$ 上，小型基站 $s$ 的第 $h$ 个用户的功率为

$$p_h^s(n) = \frac{\text{SINR}_h^s(n)}{(1 + \text{SINR}_h^s(n)) (1 + \beta_h^s(n))} = \frac{\sum_{i=1}^{h-1} \frac{(1 + \beta_i^s(n)) \text{SINR}_i^{s^2}(n)}{p_i^s(n) (1 + \text{SINR}_i^s(n))} + \frac{HN \ln 2}{B} (\alpha^s + t)}{\quad} \quad (23)$$

应用梯度下降法，对拉格朗日乘子 $\alpha^s$ 和 $\beta_h^s(n)$ 进行更新

$$\alpha^s(l+1) = [\alpha^s(l) - \theta_1 (P_{\max}^s - p_s)]^+ \quad (24)$$

$$\beta_h^s(n)(l+1) = [\beta_h^s(n) - \theta_2 (C_h^s(n) - C_{\min})]^+ \quad (25)$$

其中， $l$ 是迭代次数， $[x]^+ = \max(x, 0)$ ， $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 为步长。式(18)计算出新的功率后，更新式(19)和式(20)里的功率数据，新计算出的拉格朗日乘子也会在式(18)里更新，循环迭代直至新计算出的数据收敛，具体算法(算法1)如下所示：

(1) 初始化迭代次数 $l = 0$ ，宏基站与小型基站的功率分配 $\mathbf{P}^M(l)$ 和 $\mathbf{P}^S(l)$ ，迭代结束阈值 $\varepsilon$ ，能量效率 $t$ ，最大迭代次数 $L_{\max}$ ，拉格朗日乘子 $\alpha^s$ 和 $\beta_h^s(n)$ ，步长 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ ；(2)在得到 $\mathbf{P}^{M*}(l)$ 的条件下，通过式(18)，式(19)，式(20)计算小型基站在各个子信道上对每位用户的功率分配，令 $l = l + 1$ ；(3)重复步骤(2)，当 $|C^s(\mathbf{P}^{S*}(l), \mathbf{P}^{M*}(l)) - tp_s| < \varepsilon$ 时停止，此时得到子博弈中的功率分配 $\mathbf{P}^{S*}(l)$ 。

通过算法1，可以计算出在小型基站子博弈中的最优功率分配 $\mathbf{P}^{S*}$ ，在宏基站中使用与算法1同样的数学推理，不过此时宏基站的数量为1，为求解最优值问题，用同样的方法计算出宏基站的最优功率分配 $\mathbf{P}^{M*}$ 。

下面，给出一个实现斯坦科尔伯格博弈均衡点的迭代算法，具体步骤(算法2)如下所示：

(1) 令迭代索引数 $i = 0$ ；(2)初始化宏基站功率分配矩阵 $\mathbf{P}^M(i)$ 和小型基站功率分配矩阵 $\mathbf{P}^S(i)$ ，斯坦科尔伯格博弈最大迭代次数 $I_{\max}$ ；(3)给定宏基站功率分配，通过算法1计算出小型基站的最优能量效率功率分配矩阵 $(\mathbf{P}^{S*}(i+1), \mathbf{P}^M(i))$ ；(4)得到小型基站的功率分配矩阵后，通过算法1计算出宏基站的功率分配矩阵 $(\mathbf{P}^{S*}(i+1), \mathbf{P}^{M*}(i+1))$ ；(5)重复步骤(4)，步骤(5)，直到达到最大迭代次数 $I_{\max}$ 。

### 5 仿真分析

仿真条件的设定为：小型基站的个数 $S = 6$ ，系统带宽 $B = 30$  MHz，每个子信道当中有3个用户，AWGN功率谱密度为 $-174$  dBm/Hz，基站的

电路消耗功率为 $p_{\text{cir}} = 0.3$  W，宏基站的最大功率为 $P_{\max}^M = 15$  W，小型基站的最大功率为 $P_{\max}^S = 10$  W，宏基站与用户之间的最小距离为50 m，小型基站间的最小距离为10 m。

各个基站到各个用户之间的路径衰减公式如表1所示。其中 $r$ 表示基站与用户的距离， $L_w$ 表示墙的渗透衰减。

表1 不同路径衰减公式

路径	公式
宏基站到宏用户	$Pl(r) = 15.3 + 37.6 \lg r$
宏基站到小型基站用户	$Pl(r) = 15.3 + 37.6 \lg r + L_w$
小型基站到其用户	$Pl(r) = 38.46 + 20 \lg r + 0.7r$
小型基站到其他小型基站用户	$Pl(r) = \max \left( \begin{array}{l} (15.3 + 37.6 \lg(r - R_s)) \\ (38.46 + 20 \lg(r - R_s)) \end{array} \right) + 0.7R_s + 2L_w$
小型基站到宏用户	$Pl(r) = \max \left( \begin{array}{l} (15.3 + 37.6 \lg(r - R_s)) \\ (38.46 + 20 \lg(r - R_s)) \end{array} \right) + 0.7R_s + L_w$

仿真参数的值如表2所示。

表2 仿真参数

参数	值
宏基站半径 $R_m$	500 m
小型基站半径 $R_s$	10 m
墙渗透衰减 $L_w$	10 dB
系统带宽 $B$	30 MHz
载波频率	2 GHz
对数正态阴影衰落方差	8 dB

图1展示了在子信道与用户匹配后，使用算法1的情况下，小型基站1中各个子信道的能量效率曲线随迭代次数增加而不断提升的过程。该基站中有10条子信道，在追随者子博弈当中，每个成员以非

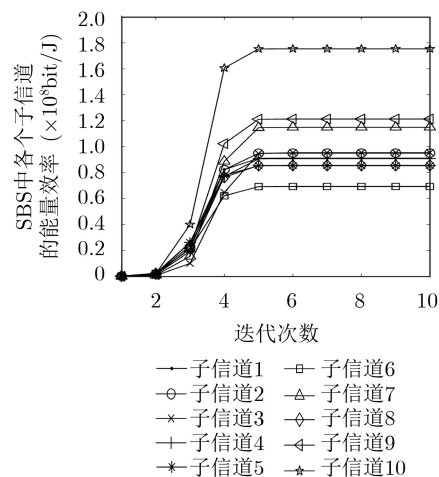


图1 SBS1中各子信道的效率

合作博弈的形式来最大化自己的能量效率, 图中显示, 迭代进行到第6次时, 子信道的能量效率的曲线趋于收敛, 达到最优。因为每条信道的用户分布各不相同, 因此每条信道的曲线都不一致。同理, 我们也可以根据算法1计算出领导者功率分配, 作为斯坦科尔伯格博弈中领导者所作出的决策。

图2与图3分别是宏基站与小型基站在斯坦科尔伯格博弈下的能量效率变化曲线。博弈策略是相互依次做出的, 所以两者的曲线都在同一迭代时刻收敛, 大概在迭代4次后收敛。相比图中曲线最初的位置, 经过斯坦科尔伯格博弈之后的曲线有明显的提升。斯坦科尔伯格博弈能够实现博弈双方之间的均衡, 使博弈双方达到最佳能量效率。相比各自独立的做出决策, 在加入斯坦科尔伯格博弈后, 博弈双方可以在对方做出策略之后动态的改变自己的策略, 使双方收益明显提升。

图4展示了不同方法比较下的能量效率曲线变化以及能量效率随基站中用户数量增加的变化。图中可以看出, 本文方法相比于已经存在的NOMA-EQ(NOMA网络中的等功率分配方法)功率分配方法明显提高。相比与传统的OFDMA网络, NOMA网络的效率有了显著的提升。随着基站中用户数量的增加, 该网络中的能量效率也相应的增加。以用户数量为36的情况为例, 本文方法比已存在的NOMA中等功率方法提升了近27%。

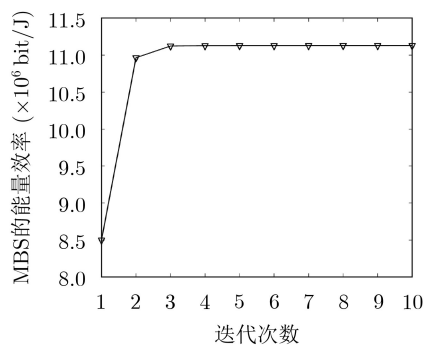


图2 MBS能量效率随迭代次数变化

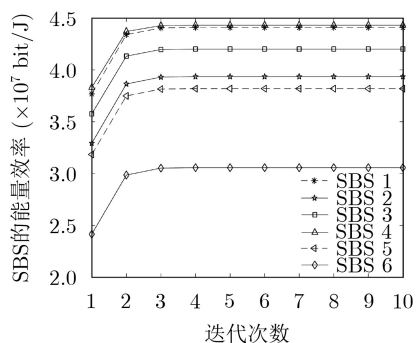


图3 SBS的能量效率随迭代次数变化

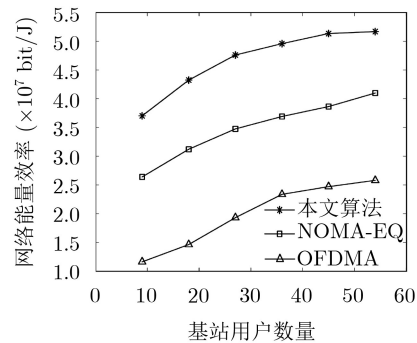


图4 不同功率分配方法的比较

## 6 结束语

本文研究了NOMA双层网络中的能量效率问题, 通过对网络的子信道与用户匹配和下行功率分配, 实现能量效率的优化。本文将网络中的资源优化问题解耦成子信道匹配与功率分配两个子问题, 首先把子信道匹配问题建模成双边稳定匹配问题进行处理。然后将宏基站与小型基站层视作斯坦科尔伯格博弈的博弈双方, 小型基站层在子博弈中通过KKT优化条件求出自己的最优功率分配, 做出自己的博弈策略, 该子博弈为非合作博弈。最后通过斯坦科尔伯格博弈过程来动态地改变自己的策略, 达到斯坦科尔伯格博弈的均衡点。仿真结果表明, 本文算法能实现子博弈中基于能量效率优化的功率分配, 并在斯坦科尔伯格博弈中达到均衡点, 有效地提升能量效率。

## 参考文献

- [1] ZHANG Haijun, FANG Fang, CHENG Julian, *et al.* Energy-efficient resource allocation in NOMA heterogeneous networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(2): 48-53. doi: 10.1109/MWC.2018.1700074.
- [2] XIAO Zhenyu, ZHU Lipeng, CHOI J, *et al.* Joint power allocation and beamforming for Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G millimeter wave communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(5): 2961-2974. doi: 10.1109/TWC.2018.2804953.
- [3] WU Zhanji, LU Kun, JIANG Chengxin, *et al.* Comprehensive study and comparison on 5G NOMA schemes[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 18511-18519. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2817221.
- [4] ZENG Ming, HAO Wanming, DOBRE O A, *et al.* Energy-efficient power allocation in uplink mmWave massive MIMO with NOMA[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(3): 3000-3004. doi: 10.1109/TVT.2019.2891062.
- [5] ZHU Kun, HOSSAIN E, and ANPALAGAN A. Downlink power control in two-tier cellular OFDMA networks under

- uncertainties: A robust Stackelberg game[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(2): 520–535. doi: [10.1109/tcomm.2014.2382095](https://doi.org/10.1109/tcomm.2014.2382095).
- [6] CHEN Zhiyong, DING Zhiguo, DAI Xuchu, *et al.* An optimization perspective of the superiority of NOMA compared to conventional OMA[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(19): 5191–5202. doi: [10.1109/TSP.2017.2725223](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2725223).
- [7] 吴广富, 邓天垠, 苏开荣, 等. 基于非正交多址接入系统的多用户分组优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(9): 2080–2087. doi: [10.11999/JEIT171220](https://doi.org/10.11999/JEIT171220).
- WU Guangfu, DENG Tianyin, SU Kairong, *et al.* Multi-user grouping optimization algorithm based on non-orthogonal multiple access systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(9): 2080–2087. doi: [10.11999/JEIT171220](https://doi.org/10.11999/JEIT171220).
- [8] 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 & Tutorials*, 2017, 19(2): 721–742. doi: [10.1109/comst.2016.2621116](https://doi.org/10.1109/comst.2016.2621116).
- [9] XIANG Lanhua and CHEN Hongbin. Energy-efficient and fair power allocation approach for NOMA in ultra-dense heterogeneous networks[C]. *International Conference on Cyber-enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery*, Nanjing, China, 2017: 89–94. doi: [10.1109/CyberC.2017.54](https://doi.org/10.1109/CyberC.2017.54).
- [10] LI Xunan, LI Chong, and JIN Ye. Dynamic resource allocation for transmit power minimization in OFDM-based NOMA systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(12): 2558–2561. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2612688](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2612688).
- [11] HOJELI M R, FARAH J, NOUR C A, *et al.* Resource allocation in downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for future radio access[C]. *The 81st IEEE Vehicular Technology Conference*, Glasgow, UK, 2015: 1–6. doi: [10.1109/VTCSpring.2015.7146056](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2015.7146056).
- [12] FANG Fang, ZHANG Haijun, CHENG Julian, *et al.* Joint user scheduling and power allocation optimization for energy-efficient NOMA systems with imperfect CSI[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(12): 2874–2885. doi: [10.1109/JSAC.2017.2777672](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2777672).
- [13] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, *et al.* Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for cellular future radio access[C]. *The 7th IEEE Vehicular Technology Conference*, Dresden, Germany, 2013: 1–5. doi: [10.1109/VTCSpring.2013.6692652](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6692652).
- [14] PAPANTRIPOPOULOS J and EVANS J S. SCALE: A low-complexity distributed protocol for spectrum balancing in multiuser DSL networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(8): 3711–3724. doi: [10.1109/tit.2009.2023751](https://doi.org/10.1109/tit.2009.2023751).
- 高东：男，1982年生，副教授，研究方向为流程行业仿真建模、无线通信。
- 梁子林：男，1994年生，硕士生，研究方向为移动无线通信资源管理。