

NOMA 系统异构网络中联合用户关联和功率控制协同优化



程云飞 田红心 刘祖军

西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071

(1921766092@qq.com)

摘要 针对非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access,NOMA)系统的两层异构网络,提出了基于效用函数最大化模型的用户关联与功率控制协同优化问题。在该问题中将系统总能效作为效用函数,在一定的用户服务质量要求(QoS)和最大功率限制约束下,提出一种联合用户关联和功率控制的算法。该算法首先将原问题转换为带参数的多项式形式的问题,在外层循环利用二分法求得最佳的能效因子,然后在内层循环分别利用分布式用户关联算法和功率控制算法得到最佳的用户关联矩阵和最佳传输功率,最终实现系统总能效最大化。仿真结果表明,所提算法在能效方面比单独的固定功率分配方案和固定用户关联方案性能更优。

关键词: NOMA;异构网络;能效;用户关联;功率控制

中图分类号 TN915.6

Collaborative Optimization of Joint User Association and Power Control in NOMA Heterogeneous Network

CHENG Yun-fei, TIAN Hong-xin and LIU Zu-jun

State Key Laboratory of Integrated Service Network Theory and Key Technologies, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract Aiming at the two-layer heterogeneous network of non-orthogonal multiple access(NOMA) system, a cooperative optimization problem of user association and power control based on utility function maximization model is proposed. In this problem, the total energy efficiency of the system is taken as a utility function, and a joint user correlation and power control algorithm is proposed under the constraint of certain QoS and maximum power limit. This algorithm first converts the original problem with parameter polynomial form of the problem. In the outer loop, it uses the dichotomy of optimal energy efficiency factor. Then in the inner loop, respectively, it uses distributed user correlation algorithm and power control algorithm to get the best user incidence matrix and optimal transmission power. Finally, it realizes the system energy efficiency maximization. Simulation results show that the proposed algorithm performs better in energy efficiency than the single fixed power allocation scheme and fixed user association scheme.

Keywords NOMA, Heterogeneous network, Energy efficiency, User association, Power control

随着 5G 商用时代的到来,移动互联网服务和物联网(IoT)将进一步得到迅速发展,未来将会有大量设备接入无线网络,全球无线通信网络能源消耗将会激增。异构网络通过部署小基站(BSs)等低功率传输节点覆盖宏基站,可以有效降低无线通信网络的能耗,越来越受到学术界和工业界的关注^[1]。作为 5G 通信系统正交多址(Orthogonal Multiple Access,OMA)技术的一种潜在替代品,利用功率领域的非正交资源分配,采用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation,SIC)的非正交多址(NOMA)技术,已经得到了广泛的研究。该技术可以同时为同一时频资源块上的多个用户提供服务,不仅能够满足 5G 应用场景中的大规模连接需求,还可以降低传输延迟,提高频谱和能量效率^[2]。将 NOMA 技术

应用到异构网络中,将会更好地提高无线网络性能。

目前,已有很多文献对 NOMA 系统下行链路资源分配进行了研究。文献[3]优化子信道分配和功率分配,使得 NOMA 系统下行链路能效最大化,其讨论的场景是单基站下的情况,没有讨论异构网络。文献[4]以系统能效为目标,提出了功率和带宽分配联合优化,通过引入松弛变量将原来的非凸优化问题转化为等价的凸差规划问题。文献[5]提出了一种功率分配策略,最大限度地提高了在单载波 NOMA 系统中每个用户所需的最小数据速率下的能效,但也没有讨论整个系统的总能效。

用户关联是异构网络必不可少的技术,用户关联决定用户该如何选择基站进行关联,使得系统负载均衡,进而可以提

到稿日期:2019-11-28 返修日期:2020-04-19 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61301170);中央高校基本科研业务费项目(JB150109);111 项目(B08038)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61301170), Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China(JB150109) and Project 111(B08038).

通信作者:田红心(hxtian@mail.xidian.edu.cn)

高系统能效。在传统的蜂窝网络中,最常用的用户关联方案是最大化用户信干噪比(Signal-to-Interference plus Noise Ratio, SINR)的关联方案。但这样单方面地选择信号最强的基站作为服务基站,会使大量用户和宏基站关联,进而导致微基站关联的用户数量受限,影响系统性能。为此需要考虑新的用户关联方案,使得更多的用户与小基站关联,使得宏基站和小基站的负载达到均衡,从而更好地利用小基站带来的无线资源。基站传输功率的合理控制能够减弱用户受到的同层和跨层干扰。在异构 NOMA 系统中,功率控制技术对缓解干扰和降低能耗有着重要作用,进而对系统性能有着重大影响。

目前,已有一些关于异构蜂窝网络中用户关联策略的研究。文献[6]将问题建模为以用户速率为目标的对数效用函数最大化问题。该最大化问题是组合优化问题,可通过松弛约束条件将其转化为容易求解的凸优化问题,将最后得到的凸优化问题的解取整后可得到原问题的用户关联方案。文献[7]提出通过梯度下降法来求解该效用函数的拉格朗日对偶问题。文献[8]提出通过贪心算法求解该组合优化问题的次优解。以上研究均将基站功率设定为最大值不变,并没有考虑将用户关联至小基站后如何调节基站功率,而基站功率的调节会影响效用函数的参数,进而影响效用函数的最优解。文献[9-11]联合用户关联和功率控制,尽量减少在用户服务质量(QoS)约束下的上行总功率。文献[12]针对多用户两层正交频分复用(OFDM)异构网络的上行链路,在满足用户最大传输功率和最小传输速率约束的情况下,提出了联合用户关联和节能资源分配的方案。该方案的目标是在低功率的情况下,将低信噪比的用户从宏单元转移到微基站(Macrocell Base Station, BS),从而使用户在满足 QoS 约束的情况下获得高速度。

本文研究的是下行 NOMA 系统两层异构网络的能量效率和资源分配问题,提出了分布式用户关联方案,以系统总能效最大化为目标,通过联合用户关联和功率控制协同优化使得目标函数最大。

1 系统模型及问题建模

1.1 系统模型

如图 1 所示,两层异构网络由一个宏基站(Macrocell Base Station, MBS)和 M 个微基站(Picocell Base Station, PBS)组成,所有的基站共享相同的频带。 $m \in \{1, 2, 3, \dots, M+1\}$ 表示第 m 个基站,其中 $m=1$ 表示的是 MBS,其余的值表示的是 PBS。该网络中有 N 个随机分布的用户,每个用户关联一个基站, $j \in \{1, 2, \dots, N\}$ 表示第 j 个用户,所有的基站和用户都是单天线节点。本文仅考虑 N 个用户的用户关联情况和功率分配情况,假设信道状态是完美的。

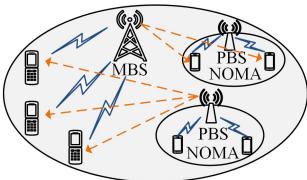


图 1 基于 NOMA 的两层异构网络模型

Fig. 1 NOMA based two-layer heterogeneous network model

基站 m 传输的叠加信号为 $s_m = \sum_{j=1}^N x_{jm} \sqrt{p_{jm}} s_{jm}$, $E[|s_{jm}|^2] = 1, x_{jm} \in \{0, 1\}$ 。当用户 j 关联到基站 m 时, $x_{jm} = 1$, 此时该用户接收到的信号为:

$$y_{jm} = h_{jm} \sqrt{p_{jm}} s_{jm} + h_{jm} \sum_{j'=1, j' \neq j}^N x_{j'm'} \sqrt{p_{j'm'}} s_{j'm'} + \sum_{m'=1, m' \neq m}^{M+1} h_{jm'}' \left(\sum_{j'=1}^N x_{j'm'}' \sqrt{p_{j'm'}} s_{j'm'} \right) + \omega_0 \quad (1)$$

其中, h_{jm} 为用户 j 与基站 m 间的信道增益, $h_{jm'}'$ 为来自基站 m' 的干扰信道系数, ω_0 为加性高斯白噪声, 其功率密度为 σ^2 。

如图 2 所示, 在用户端通过连续干扰消除技术消除来自强用户信号的小区内干扰。假设基站 m 同时在同频带服务 k_m 个用户, 信道增益与小区内干扰加噪声的比值(Channel gain and intercell interference plus noise ratio, CINR)排序为:

$$\frac{|h_{1m}|^2}{I_{1m}^{(2)} + \sigma^2} \geq \dots \geq \frac{|h_{jm}|^2}{I_{jm}^{(2)} + \sigma^2} \geq \dots \geq \frac{|h_{k_m m}|^2}{I_{k_m m}^{(2)} + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $I_{jm}^{(2)}$ 为用户 j 的小区间干扰, σ^2 为噪声功率。令:

$$CINR_{jm} = \frac{|h_{jm}|^2}{I_{jm}^{(2)} + \sigma^2} \quad (3)$$

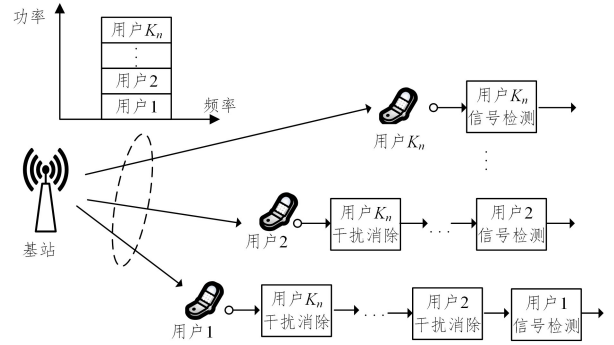


图 2 NOMA 系统下行链路模型

Fig. 2 Downlink model of NOMA system

对于下行信道较弱、干扰较大的用户, 需要为其分配更多的传输功率, 才能达到预期的 QoS。用户分配的功率满足: $0 \leq p_{1m} \leq \dots \leq p_{jm} \leq \dots \leq p_{k_m m}$, $\sum_{j=1}^{k_m} p_{jm} = p_m$, p_m 为基站 m 的总发射功率。

在经过 SIC 之后, 用户 j 的数据速率为 $R_{jm} = W \log_2(1 + r_{jm})$ 。其中, W 为系统带宽, r_{jm} 为用户 j 在基站 m 下的信干噪比(SINR), 可表示为:

$$\begin{aligned} r_{jm} &= \frac{p_{jm} |h_{jm}|^2}{|h_{jm}|^2 \sum_{j'=1}^{j-1} p_{j'm} + \sum_{m'=1, m' \neq m}^{M+1} |h_{jm'}'|^2 p_{m'} + \sigma^2} \\ &= \frac{p_{jm}}{\sum_{j'=1}^{j-1} p_{j'm} + (I_{jm}^{(2)} + \sigma^2) / |h_{jm}|^2} \\ &= \frac{p_{jm}}{\sum_{j'=1}^{j-1} p_{j'm} + \frac{1}{CINR_{jm}}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $j \leq k_m$; $I_{jm}^{(2)} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^{M+1} |h_{jm'}'|^2 p_{m'}$ 为小区间干扰, 令 $I_{jm}^{(1)} = |h_{jm}|^2 \sum_{j'=1}^{j-1} p_{j'm}$ 为小区内干扰; $p_{m'} = \sum_{j'=1}^N x_{j'm'} p_{j'm'}$ 为基站 m' 的总发射功率。

1.2 问题建模

能量效率(比特/焦耳)定义为总网络数据速率与总网络能耗的比值[13]。本文将能效作为用户关联的最优目标, 为了降低干扰和系统能耗, 引入功率控制技术。为满足用户的 QoS,

将用户的信干噪比添加为约束条件,同时添加基站的总功率约束条件,将问题建模为 P1。

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{X}, \mathbf{P}} \eta_{EE}(\mathbf{X}, \mathbf{P}) &= \frac{\sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N x_{jm} R_{jm}}{\sum_{m=1}^{M+1} (\sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} + p_m^c)} \\ \text{P1: } & \text{C1: } x_{jm} \in \{0, 1\}, \forall j, m \\ & \text{C2: } \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} = 1, \forall j \\ & \text{C3: } 0 \leq \sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} \leq p_m^{\max}, \forall j \\ & \text{C4: } \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} r_{jm} \geq \delta, \forall j \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{X}=[x_{jm}]$ 为关联矩阵; $\mathbf{P}=[p_{jm}]$ 为功率分配矩阵; $p_m = \sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm}$ 为基站 m 的总传输功率; p_m^c 为基站 m 消耗的电路功率,即耗散功率,通常为一常量; $p_m^{\max}$ 为基站 m 允许的最大传输功率。C1 和 C2 确保每个用户只关联一个基站; C3 为基站最大传输功率限制; C4 保证用户的 QoS。

2 能效优化方案

本文中问题 P1 是一个混合整数非线性规划问题,并且该问题是非凸的,直接求解比较困难,因此本文将该问题的目标函数转化为带参数的相减形式的规划问题 P2 来求解。

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{X}, \mathbf{P}} \{ & \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N x_{jm} R_{jm} - \eta \sum_{m=1}^{M+1} (\sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} + p_m^c) \} \\ \text{P2: } & \text{C1: } x_{jm} \in \{0, 1\}, \forall j, m \\ & \text{C2: } \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} = 1, \forall j \\ & \text{C3: } 0 \leq \sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} \leq p_m^{\max}, \forall j \\ & \text{C4: } \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} r_{jm} \geq \delta, \forall j \end{aligned} \quad (6)$$

其中, η 是一个非负的参数, $\eta = \max_{\mathbf{X}, \mathbf{P}} \eta_{EE}(\mathbf{X}, \mathbf{P})$ 。

定义 1

$$F(\eta) = \max_{\mathbf{X}, \mathbf{P}} \{ \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N x_{jm} R_{jm} - \eta \sum_{m=1}^{M+1} (\sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} + p_m^c) \}$$

容易证明 $F(\eta)$ 是一个连续的并且随着 η 递减的函数。

2.1 最佳能效参数 η^* 问题

根据以上分析,可将原问题 P1 转化为问题 P2。假设问题 P1 的最佳解为 $\{\mathbf{X}^*, \mathbf{P}^*\}$, 则 P1 等价于在给定 $\eta = \eta^*$ 时 P2 的解为 $\{\mathbf{X}^*, \mathbf{P}^*\}$, 利用二分搜索算法可求得最佳的 η^* , 此时的 η^* 相当于最佳的能效值,对应的 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{P}$ 即为最佳的关联矩阵 $\mathbf{X}^*$ 和传输功率 $\mathbf{P}^*$ 。外层循环通过二分法求得最佳的 η 值,内层循环通过交替优化用户关联矩阵 $\mathbf{X}$ 和传输功率 $\mathbf{P}$ 来求得最优解。

由前文内容可知 η 为一个连续的值,且 η 满足 $0 \leq \eta \leq \eta^{\max}$, 传输速率和传输功率的限制条件可用式(7)和式(8)表示:

$$0 \leq \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N x_{jm} R_{jm} \leq \sum_{j=1}^N R_{jm}^{\max} \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^{M+1} p_m^c \leq \sum_{m=1}^{M+1} (\sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} + p_m^c) \leq \sum_{m=1}^{M+1} (p_m^{\max} + p_m^c) \quad (8)$$

$R_{jm}^{\max} = W \log_2(1 + \frac{p_m^{\max} |h_{jm}|^2}{\sigma^2})$ 是指没有干扰的情况下基

站以最大传输功率传输时用户到基站的可达速率。由式(7)和式(8)可得:

$$\eta^{\max} \leq \sum_{j=1}^N R_{jm}^{\max} / \sum_{m=1}^{M+1} p_m^c \quad (9)$$

为求解该能效优化问题,现提出联合用户关联和功率控制算法,如算法 1 所示。

算法 1 联合用户关联和功率控制算法

1. 对参数进行初始化 $t_1=0, \eta^{\min}=0, \eta^{\max} = \sum_{j=1}^N R_{jm}^{\max} / \sum_{m=1}^{M+1} p_m^c, \epsilon=0.01$ 。
2. 外部循环:
 - 令 $\eta = (\eta^{\min} + \eta^{\max})/2$ 。
 - 初始化 $t_2=0$ 。
 - 内部循环:
 - 2.1. 执行分布式用户关联优化算法。
 - 2.2. 执行功率控制优化算法来更新功率。
 - 2.3. $t_2 = t_2 + 1$ 。
 - 直到 p 和 x 收敛或者 $t_2 = T_2$, 结束内循环。
 - 如果 $F(\eta) \leq 0$, 令 $\eta^{\max} = \eta$; 否则令 $\eta^{\min} = \eta$ 。
 - $t_1 = t_1 + 1$, 直到 $|\eta^{\max} - \eta^{\min}| \leq \epsilon$ 或者 $t_1 = T_1$, 结束外部循环。

2.2 用户关联子算法问题

本节主要求解用户关联子问题,得到用户关联方案。由于用户关联指标 x_{jm} 为一个离散变量,使得问题 P2 为一个非凸混合整数规划,为使问题被更好地解决,采用文献[14]中的方法将离散变量松弛为一个连续的变量,即 $0 \leq x_{jm} \leq 1$ 。问题 P2 可转化为 P3:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{X}, \mathbf{P}} \{ & \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N x_{jm} R_{jm} - \eta \sum_{m=1}^{M+1} (\sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} + p_m^c) \} \\ \text{P3: } & \text{C1: } 0 \leq x_{jm} \leq 1, \forall j, m \\ & \text{C2: } \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} = 1, \forall j \\ & \text{C3: } 0 \leq \sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} \leq p_m^{\max}, \forall j \\ & \text{C4: } \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} r_{jm} \geq \delta, \forall j \end{aligned} \quad (10)$$

在给定功率 $\mathbf{P}$ 的情况下,问题 P3 可转化为问题 P4:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{X}} \{ & \eta(\mathbf{X}) = \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N x_{jm} (R_{jm} - \eta p_{jm}) \} \\ \text{P4: } & \text{C1: } 0 \leq x_{jm} \leq 1, \forall j, m \\ & \text{C2: } \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} = 1, \forall j \\ & \text{C3: } \sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} \leq p_m^{\max}, p_{jm} \geq 0, \forall j \\ & \text{C4: } \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} r_{jm} \geq \delta, \forall j \end{aligned} \quad (11)$$

由拉格朗日分解方法得到拉格朗日函数:

$$L(\mathbf{X}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \eta(\mathbf{X}) + \sum_{j=1}^N \lambda_j (\sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} r_{jm} - \delta) + \sum_{m=1}^{M+1} \mu_m (p_m^{\max} - \sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm}) \quad (12)$$

拉格朗日对偶函数可表示为:

$$\begin{cases} g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \max_{\mathbf{X}} L(\mathbf{X}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ \text{C1, C2} \end{cases} \quad (13)$$

整理 $L(\mathbf{X}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ 可得:

$$L(\mathbf{X}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N x_{jm} [R_{jm} + \lambda_j r_{jm} - (\mu_m + \eta) p_{jm}] + \sum_{m=1}^{M+1} \mu_m p_m^{\max} - \sum_{j=1}^N \lambda_j \delta \quad (14)$$

记:

$$\begin{aligned} L_{jm}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) &= x_{jm} [R_{jm} + \lambda_j r_{jm} - (\mu_m + \eta) p_{jm}] \\ \frac{\partial L_{jm}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})}{\partial x_{jm}} &= R_{jm} + \lambda_j r_{jm} - (\mu_m + \eta) p_{jm} \end{aligned} \quad (15)$$

记:

$$\tilde{H}_{jm} = R_{jm} + \lambda_j r_{jm} - (\mu_m + \eta) p_{jm}$$

给出第 t 次迭代的 $\lambda_j(t)$, $\mu_m(t)$, 用户 j 选择能提供最高的 $\tilde{H}_{jm}$ 的基站。

$$x_{jm}^* = \begin{cases} 1, & m = m^* \\ 0, & m \neq m^* \end{cases} \quad (16)$$

$$m^* = \arg \max(\tilde{H}_{jm}) \quad (17)$$

利用次梯度法更新拉格朗日乘子^[15], 更新公式分别为:

$$\lambda_j(t+1) = [\lambda_j(t) - \xi_1 (\sum_{m=1}^{M+1} x_{jm}(t+1)r_{jm} - \delta)]^+ \quad (18)$$

$$\mu_m(t+1) = [\mu_m(t) - \xi_2 (p_m^{\max} - \sum_{j=1}^N x_{jm}(t+1)p_{jm})]^+ \quad (19)$$

其中, $[a]^+ = \max\{a, 0\}$, ξ_1 和 ξ_2 为数值较小的更新步长。

将本节的用户关联子算法问题总结为分布式用户关联算法, 如算法 2 所示。

算法 2 分布式用户关联算法

1. 在用户侧:

如果 $t=0$, 初始化 $\lambda_j(t)$, 每个用户通过来自所有基站的测试信号测量其接收到的组间干扰 $I_{jm}^{(2)}$, $\forall m, \forall j$, 并将 CINR_{jm} 值反馈给相应的基站, 同时每个用户选择最大的 CINR_{jm} 值的基站。

否则, 用户 j 接收来自基站的 $\tilde{H}_{jm}$ 值和 r_{jm} 值, 并根据 $m^* = \arg \max(\tilde{H}_{jm})$ 来确定服务的基站 m , 更新 $\lambda_j(t)$ 。 $t=t+1$; 每个用户将关联请求反馈给所选择的基站, 广播 $\lambda_j(t)$ 的值。

2. 在基站侧:

如果 $t=0$, 初始化 $\mu_m(t)$, $\forall m$, 否则接收更新的用户关联矩阵 $\mathbf{X}$; 根据 $\mu_m(t+1)$, 更新 $\mu_m(t)$; 在 NOMA 准则下, 计算出每个基站的 $\tilde{H}_{jm}$ 值和 r_{jm} 值。

$t=t+1$; 每个基站广播 $\tilde{H}_{jm}$ 值和 r_{jm} 值。

问题 P1 满足收敛证明的条件^[16], 该算法的收敛性得到了保证。分布式关联算法的复杂度为 $O((M+1)N)$, 低于穷举算法的复杂度 $O((M+1)^N)$ 。

2.3 功率控制子算法问题

本节是在确定用户关联方案后, 求解功率分配问题。在给定关联矩阵 $\mathbf{X}$ 的条件下, 原问题转化为:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} \{ & \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N x_{jm} R_{jm} - \eta \sum_{m=1}^{M+1} (\sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} + p_m^c) \} \\ \text{C3: } & \sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} \leq p_m^{\max}, p_{jm} \geq 0, \forall j \\ \text{C4: } & \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} r_{jm} \geq \delta, \forall j \end{aligned} \quad (20)$$

用户关联的方案确定后, 式(20)中的 x_{jm} 已知则式(20)可以转化为:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} I(\mathbf{P}) = & \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N (x_{jm} R_{jm} - x_{jm} \eta p_{jm}) \\ \text{C3: } & \sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm} \leq p_m^{\max}, \forall j \\ \text{C4: } & \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} r_{jm} \geq \delta, \forall j \end{aligned} \quad (21)$$

为了算法的设计, 类比文献[17]对目标函数进行松弛, 令: $\log_2(1+r_{jm}) \approx \log_2(r_{jm})$, $q_{jm} = \log p_{jm}$ 。

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{Q}} J(\mathbf{Q}) = & \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N (\alpha \log \varphi_{jm}(\mathbf{Q}) - x_{jm} \eta e^{q_{jm}}) \\ \text{C3: } & \sum_{j=1}^N x_{jm} e^{q_{jm}} \leq p_m^{\max}, \forall j \\ \text{C4: } & \sum_{m=1}^{M+1} x_{jm} \log \varphi_{jm}(\mathbf{Q}) \geq \delta, \forall j \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $\alpha = x_{jm} W / \log 2$, $\bar{\delta} = \log \delta$ 。

$$\varphi_{jm}(\mathbf{Q}) = \frac{e^{q_{jm}} |h_{jm}|^2}{|h_{jm}|^2 \sum_{j'=1}^{j-1} e^{q_{j'm}} + \sum_{m'=1, m' \neq m}^{M+1} |h_{jm'}'|^2 e^{q_{m'}} + \sigma^2} \quad (23)$$

将式(22)中的第一个约束条件引入拉格朗日乘子 $\beta = \{\beta_m, \forall m\}$, 第二个约束条件引入拉格朗日乘子 $\theta = \{\theta_{jm}, \forall j, \forall m\}$, 可得拉格朗日方程为:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{Q}, \beta, \theta) = & \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N (\alpha \log \varphi_{jm}(\mathbf{Q}) - x_{jm} \eta e^{q_{jm}}) + \sum_{m=1}^{M+1} \beta_m (p_m^{\max} - \\ & \sum_{j=1}^N x_{jm} e^{q_{jm}}) + \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{j=1}^N \theta_{jm} (x_{jm} \log \varphi_{jm}(\mathbf{Q}) - \bar{\delta}) \end{aligned} \quad (24)$$

令 $\frac{\partial L(\mathbf{Q})}{\partial q_{jm}} = 0$, 可得:

$$e^{q_{jm}} = \frac{\alpha + \theta_{jm}}{x_{jm} \eta + \beta_m + A_m(\mathbf{Q}) + B_{jm}(\mathbf{Q})} \quad (25)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_m(\mathbf{Q}) = & \sum_{s=1}^{M+1} \sum_{u=1}^N \frac{(\alpha + \theta_{mu}) |h_{mu}|^2}{|h_{mu}|^2 \sum_{u'=1}^{u-1} e^{q_{mu'}} + \sum_{m'=1, m' \neq m}^{M+1} |h_{mu'}'|^2 e^{q_{m'}} + \sigma^2} \\ B_{jm}(\mathbf{Q}) = & \sum_{u=j+1}^N \frac{(\alpha + \theta_{mu}) |h_{mu}|^2}{|h_{mu}|^2 \sum_{u'=1}^{u-1} e^{q_{mu'}} + \sum_{m'=1, m' \neq m}^{M+1} |h_{mu'}'|^2 e^{q_{m'}} + \sigma^2} \end{aligned} \quad (26)$$

根据文献[17]中的引理(box-constrained projection)可知, 问题式(22)在 $\mathbf{Q}$ 域中有最佳解, 又因为 $\mathbf{Q}$ 的定义域是 $\mathbf{P}$ 定义域的投影, 故式(21)有最佳解, 将式(25)从 $\mathbf{Q}$ 换到 $\mathbf{P}$, 可得到传输功率更新公式:

$$p_{jm}^{t+1} = \left[\frac{\alpha + \theta_{jm}}{c \eta + \beta_m + C_m(\mathbf{P}') + D_{jm}(\mathbf{P}')} \right]^+ \quad (28)$$

其中:

$$\begin{aligned} C_m(\mathbf{P}) = & \sum_{s=1}^{M+1} \sum_{u=1}^N \frac{(\alpha + \theta_{mu}) |h_{mu}|^2}{|h_{mu}|^2 \sum_{u'=1}^{u-1} p_{mu'} + \sum_{m'=1, m' \neq m}^{M+1} |h_{mu'}'|^2 p_{m'} + \sigma^2} \\ D_{jm}(\mathbf{P}) = & \sum_{u=j+1}^N \frac{(\alpha + \theta_{mu}) |h_{mu}|^2}{|h_{mu}|^2 \sum_{u'=1}^{u-1} p_{mu'} + \sum_{m'=1, m' \neq m}^{M+1} |h_{mu'}'|^2 p_{m'} + \sigma^2} \end{aligned} \quad (29)$$

相应的拉格朗日乘子 $\theta = \{\theta_{jm}, \forall j, \forall m\}$ 的更新公式为:

$$\theta_{jm}^{t+1} = [\theta_{jm}^t - \xi_3 (x_{jm} \log r_{jm}(\mathbf{P}') - \bar{\delta})]^+ \quad (31)$$

拉格朗日乘子 $\beta = \{\beta_m, \forall m\}$ 的更新公式为:

$$\beta_m^{t+1} = [\beta_m^t - \xi_4 (p_m^{\max} - \sum_{j=1}^N x_{jm} p_{jm}^t)]^+ \quad (32)$$

其中, ξ_3 和 ξ_4 为数值较小的更新步长。

将本节的功率控制子算法问题总结为迭代功率控制算法, 如算法 3 所示。

算法 3 迭代功率控制算法

1. 初始化 $t=0$, 设置 θ^t, β^t , 最大迭代次数 T_2 。

2. 循环:

用式(28)更新功率 $\mathbf{P}^t$;

用式(31)和式(32)分别更新 θ^t, β^t ;

更新迭代指标 $t=t+1$ 。

3. 直到 $\mathbf{P}$ 收敛或者 $t=T_2$ 时循环结束。

利用文献[18]和文献[19]可以证明该功率控制算法的收敛性。

3 仿真实验及分析

宏基站覆盖半径为 500 m,每个微基站覆盖半径为 10 m,假设所有的用户都均匀分布在每个微基站覆盖区域,而微基站则均匀分布在宏基站覆盖区域。宏基站的功率分别为 46 dBm,设定每个微基站(PBS)的最大传输功率相同为 MTP(Maximum Transmission Power)。宏基站和微基站的电路消耗功率分别为 10 W 和 0.1 W。

宏基站和微基站的路径损耗模型分别为 $128.1 + 37.6 \log_{10} d(\text{km})$ 和 $140.7 + 36.7 \log_{10} d(\text{km})$ 。其中, d 表示用户到基站的距离。基站到用户间的阴影效应方差为 10 dB,信道衰落由阴影衰落、路径损耗和瑞利衰落 3 部分组成。系统带宽为 10 MHz,噪声功率频谱密度为 -174 dBm/Hz 。将本文所提出的联合用户关联和功率控制(joint user association and power control)的算法记为 JUAPC 算法,该算法是基于 NOMA 的两层异构网络提出的。相比于传统的接入方式,NOMA 能够很好地提高频谱和能量效率,将 NOMA 技术和异构网络相结合可进一步提高系统的能效。将所提算法与文献[20]采用的固定功率分配和固定用户关联的参考方案进行比较,来验证所提算法的有效性。

图 3 给出了当微基站的功率从 8 dBm 增加到 26 dBm 时系统总能效的变化情况。通过观察可知,当更多的用户与微基站相关联时,可获得更好的能效性能。当每个微基站关联 7 个用户时,所提算法的能量效率比固定功率分配方案高出约 7%,比固定用户关联方案高出约 31%。当使用本文算法时,用户数越多,在消耗相同功率时 JUAPC 算法可以获得的吞吐量就越高,而且由于多用户分集增益增大,路径损耗降低的用户增多,能效会相对增加。然后,由于能量效率先增加后降低,因此能效缓慢增加并收敛。当最大发射功率大于最优发射功率时,发射功率不会随着最大发射功率约束的增大而增大。

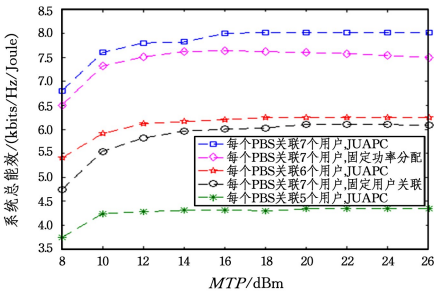


图 3 系统总能效与微基站最大传输功率的关系

Fig. 3 Relationship between total energy efficiency of system and maximum transmitted power of PBS

对于固定功率分配方案,由于能量效率的拟凹性,能效随功率约束先增大后减小。与固定功率分配方案相比,随着功率约束的增加,本文算法可以保持最大的能量效率。

图 3 表明当每个 PBS 关联的用户数相同时,所提的 JUAPC 算法比相同条件下的固定用户分配算法、固定用户关联算法在能效上有较大程度的提高。图 3 只是选取了每个 PBS 关联 7 个用户的情况,每个 PBS 关联 5 个用户以及 6 个

用户的情况也符合该规律。

图 4 给出了每个微基站的关联用户数从 5 增加到 9 时,系统能效的变化情况。当 $MTP = 11 \text{ dBm}$ 和 $MTP = 19 \text{ dBm}$ 时可以得到,当更多的用户与微基站相关联时,在消耗相同功率时 JUAPC 算法可以获得更高的吞吐量,而且多用户分集增益增大,路径损耗降低的用户增多,因此能效相对增加。可以看出,所提算法的性能优于两种参考方案。当 MTP 从 11 dBm 增加到 19 dBm 时,系统能效得到了提高。

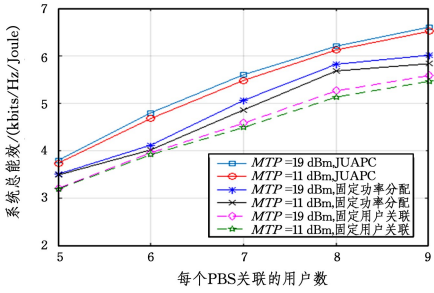


图 4 系统总能效与每个微基站关联的用户数的关系

Fig. 4 Relationship between total energy efficiency of system and number of users associated with each PBS

图 4 表明当 MTP 相同时,所提 JUAPC 算法比相同条件下的固定用户分配算法、固定用户关联算法在能效上有所提高。

图 5 给出了微基站数目从 4 增加到 9, $MTP = 19 \text{ dBm}$ 时所提算法和固定功率分配,以及 MTP 为 19 dBm 和 11 dBm 时固定用户关联方案的能效情况。每个微基站关联 6 个用户。由于基站致密化增益,当更多的微基站部署在两层异构网络中时,有效协调小区间的干扰可以获得更好的能效性能。当 PBS 个数为 8、 MTP 为 19 dBm 时,与固定功率分配方案和固定用户关联方案相比,所提算法提高了约 6% 和 12% 的能量效率,原因是该算法能够获得较大的多用户分集增益。不同的用户经历不同的路径损耗,路径损耗越低的用户越多,整体能效效率就越高。

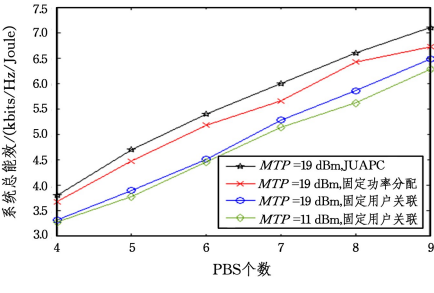


图 5 系统总能效与微基站数的关系

Fig. 5 Relationship between total energy efficiency of system and number of PBSs

图 6 给出了当 $MTP = 11 \text{ dBm}$ 和 $MTP = 19 \text{ dBm}$ 时,所提算法、固定功率分配方案和固定用户关联方案中,当微基站数从 4 增加到 9 时的总系统容量的变化情况。由于基站致密化增益,当更多的微基站部署在两层异构网络中时,总系统容量得到了提高。当 $MTP = 19 \text{ dBm}$ 时,与固定功率分配方案相比,所提算法的总系统容量较低。因为在该算法中,当最大发射功率大于最优发射功率时,发射功率不会随着最大发射功

率约束的增大而增大。当 $MTP=19$ dBm 时,与固定用户关联方案相比,所提算法提高了系统的总容量。

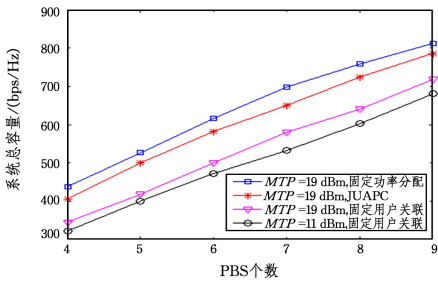


图 6 系统总容量与 PBS 个数的关系

Fig. 6 Relationship between total capacity of system and number of PBSs

结束语 本文研究了 NOMA 系统两层异构网络的能效问题,提出了一种基于能效的联合用户关联和功率控制的算法。在功率约束和 QoS 约束下,该算法建模为效用函数最大化模型。最终将所提的 JUAPC 算法和固定功率分配方案以及固定用户关联方案进行比较,结果证明了所提算法有更高的系统能效。本文考虑的场景是两层的 NOMA 异构网络,通过联合用户关联和功率控制进行能效优化,此外还有一些其他技术可优化能效,如基站休眠技术,将所提算法与基站休眠技术相结合可能会得到更好的节能效果。

参 考 文 献

[1] BHUSHAN N, LI JUNYI, MALLADI D, et al. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 82-89.

[2] DAI L. Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities and Future Research Trends [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.

[3] FANG F, ZHANG H, CHENG J, et al. Energy efficiency of resource scheduling for non-orthogonal multiple access (NOMA) wireless network [C] // 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, 2016: 1-5.

[4] WANG J, XU H, FAN L, et al. Energy-Efficient Joint Power and Bandwidth Allocation for NOMA Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 26(3): 780-783.

[5] ZHANG Y, WANG H M, ZHENG T X, et al. Energy-efficient transmission design in non-orthogonal multiple access [J]. IEEE Trans. Vehicular Technology Conf, 2017, 66(3): 2852-2857.

[6] YE Q Y, RONG B Y, CHEN Y D, et al. User association for load balancing in heterogeneous cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(6): 2706-2716.

[7] SHENK M, YU W. Downlink cell association optimization for heterogeneous networks via dual coordinate descent [C] // Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. Vancouver, Canada: IEEE, 2013: 4779-4783.

[8] PRASAD N, ARSLAN M, RANGARAJAN S. Exploiting cell dormancy and load balancing in LTE HetNets: optimizing the proportional fairness utility [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3706-3722.

[9] CHITTI K, SPEIDEL J. Joint base station association and power allocation for uplink sum-power minimization [C] // IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC Fall). Las Vegas, USA, 2013: 1-5.

[10] LI X, WANG H, LIU N, et al. Dynamic user association for energy minimization in macro-relay network [C] // Int. Conf. Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Huangshan, China, 2012: 1-5.

[11] ZHU H, WANG S, CHEN D. Energy-efficient user association for heterogeneous cloud cellular networks [C] // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Anaheim, USA, 2012: 273-278.

[12] PERVAIZ H, MUSAVIAN L, NI Q. Joint user association and energy-efficient resource allocation with minimum-rate constraints in two-tier HetNets [C] // Int. Symp. Personal Indoor Mobile Radio Communications (PIMRC). London, UK, 2013: 1634-1639.

[13] 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, 2016, 19(2): 721-742.

[14] YE Q, RONG B, CHEN Y, et al. User association for load balancing in heterogeneous cellular networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2013, 12(6): 2706-2716.

[15] XU B, CHEN Y, CARRION J R, et al. Resource Allocation in Energy-Cooperation Enabled Two-tier NOMA HetNets Towards Green 5G [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(99): 2758-2770.

[16] BAGIROV A, KARMITSA N, MARKO M M. Subgradient Methods [M] // Introduction to Nonsmooth Optimization. Springer International Publishing, 2014.

[17] TAN C W, CHIANG M, SRIKANT R. Fast algorithms and performance bounds for sum rate maximization in wireless networks [J]. IEEE ACM Trans on Networking, 2013, 21(3): 706-719.

[18] SUNG C W, LEUNG K K. A generalized framework for distributed power control in wireless networks [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2005, 51(7): 2625-2635.

[19] ZHOU T, ZHAO J, QIN D, et al. Green Base Station Assignment for NOMA-Enabled HCNs [J]. IEEE Access, 2019, 12(7): 53018-53031.

[20] YE G, ZHANG H, LIU H, et al. Energy Efficient Joint User Association and Power Allocation in a Two-Tier Heterogeneous Network [C] // 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2016.



CHENG Yun-fei, born in 1993, post-graduate. His main research interests include non-orthogonal multiple access network and wireless communication.



TIAN Hong-xin, born in 1968, master. His main research interests include communication signal processing, satellite communication and communication countermeasures.