

去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 系统能效优化算法

丁青锋, 李怡浩, 徐梦引

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西南昌 330013)

摘要: 针对去蜂窝大规模多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 系统能耗较大的问题, 提出一种兼顾功率消耗和用户体验质量的能效优化算法. 首先建立下行链路总能效最大化的资源分配模型, 将该非凸能效优化问题分解为用户分组和功率分配两个子问题, 然后利用统计学理论提出最大化信道增益差与最小化信道相关度的用户分组算法. 基于分组结果, 利用连续凸近似法将原非凸功率分配子问题转化为凸优化问题, 求解得到最优的功率分配因子. 仿真结果表明, 与传统的正交多址接入系统相比, 应用所提算法的 NOMA 系统可以获得更高的能效性能和用户吞吐量性能, 同时有效提升用户公平性.

关键词: 非正交多址接入; 用户分组; 功率控制; 连续凸近似

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61961018); 江西省杰出青年人才计划 (No.20192BCB23013); 江西省自然科学基金 (No.20192ACB21003); 江西省研究生创新资金 (No.YC2021-S416)

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)08-2020-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211351

Energy Efficiency Optimization Algorithm for Cell-Free Massive MIMO-NOMA Systems

DING Qing-feng, LI Yi-hao, XU Meng-yin

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: Aiming at the problem of high energy consumption for non-orthogonal multiple access (NOMA) based cell-free massive multiple-input multiple-output (MIMO) system, a energy efficiency optimization algorithm considering both power consumption and users' quality of service is proposed. A total downlink energy efficiency maximization resource allocation model is formulated, the non-convex energy efficiency optimization problem is decomposed into two sub-problems of user grouping and power allocation, and the user grouping algorithm that maximizes the channel gain difference and minimizes the channel correlation is proposed by using the statistical theory. Based on the grouping result, the non-convex power allocation sub-problem is transformed into a convex one by using the successive convex approximation (SCA) method. Simulation results show that, NOMA system with the proposed algorithm can obtain higher energy efficiency performance and user throughput performance compared with traditional orthogonal multiple access (OMA) system, and effectively improve user fairness.

Key words: NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access); user grouping; power allocation; SCA (Successive Convex Approximation)

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61961018); Jiangxi Province Foundation for Distinguished Young Scholar (No.20192BCB23013); Jiangxi Province Natural Science Foundation of China (No.20192ACB21003); Jiangxi Province Postgraduate Innovation Foundation of China (No.YC2021-S416)

1 引言

随着无线通信系统的快速发展,后 5G 和 6G 时代的网络预计将支持高达 1 Tb/s 的数据传输速率、高能量效率以及高网络容量^[1]. 大规模多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技术作为下一代无线通信

网络的关键技术,可以提供较高的数据传输速率和能量效率^[2-4]. 然而,小区间干扰作为 MIMO 网络的典型限制,靠近小区边缘用户会受到严重的信号干扰,极大影响了小区边缘用户的服务质量^[5,6].

为解决小区间干扰问题,文献[7]提出了去蜂窝大

规模 MIMO 网络消除了小区的概念. 在去蜂窝大规模 MIMO 网络中, 大量装备有一根或多根天线的分布式接入点 (Access Points, AP) 分布在一个大的区域里, 所有的 AP 通过回传链路与中央处理单元 (Central Processing Unit, CPU) 相连, 在相同的时频资源块里相互协作, 同时为所有的用户提供服务^[8]. 与大规模 MIMO 类似, 当所有的 AP 数量大于系统所服务的用户数时, 去蜂窝大规模 MIMO 系统利用信道硬化和有利传播来减少用户间干扰^[9,10]. 更重要的是, 分布式 AP 拉近了用户与服务天线之间的距离, 从而获得了高宏分集增益和低路径损耗. 同时, 去蜂窝系统消除了小区边界, 用户可以获得均匀的优质服务质量^[11]. 由于具有这些优点, 去蜂窝大规模 MIMO 系统非常适合部署在室内和热点覆盖场景, 如智能工厂、车站、大学校园等热点区域场景^[8]. 基于上述原因, 去蜂窝大规模 MIMO 有望成为下一代通信网络的候选技术. 去蜂窝大规模 MIMO 系统在时分双工 (Time-Division Duplex, TDD) 模式下工作, 信道相干间隔时间很短, 传统的 OMA (Orthogonal Multiple Access) 技术需要为每个用户分配相互正交的无线资源, 无法满足大量用户的无线接入需求, 限制了系统容量. 因此, 迫切需要引入新的无线接入技术.

非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 作为无线资源共享的有效方法, 通过在功率域、码域上实现资源复用, 可以成倍提升用户速率和接入用户数^[12-14]. 功率域 NOMA 在相同的时频资源上给不同的用户分配非正交信号, 共享相同时频资源的用户组成一个用户组, 在接收端使用连续干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC) 技术对接收到的多用户叠加信号解码, 以减轻组内用户干扰^[15]. 文献[16]基于非完美信道状态信息 (Channel State Information, CSI), 通过设计大规模 MIMO-NOMA 系统的预编码和接收机以最大化系统的和速率. 文献[17]基于无线功率传输的大规模 MIMO-NOMA 网络, 提出了联合功率传输、无线传输时间、天线选择和子载波分配方案, 从而最大化系统的总能量效率. 文献[18]较早地研究了去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 系统性能, 考虑组内干扰、组间干扰和非完美 SIC 等相关影响, 获得了可实现的总和速率闭式表达式. 文献[19]分析了三种线性预编码方案对去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 系统性能的影响, 并计算得到对应用户速率的闭式表达式. 文献[20]提出了最大化系统和速率的功率优化算法, 同时定量比较了 NOMA 和 OMA 系统的性能. 文献[21]提出了基于去蜂窝大规模 MIMO 的 NOMA/OMA 模式选择方案, 这种混合结构比单一的 NOMA 或 OMA 系统能获得更高的数据速率. 文献[22]分析了去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 和 MIMO 的混合系统, 同时提出了一种基于 Jac-

card 距离系数的用户分组方法. 值得注意的是, 上述研究主要分析去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 系统的用户速率, 而对于同样重要的能效分析工作却鲜有文献研究.

基于以上分析, 本文研究去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 系统下行链路能效优化问题. 通过考虑每个 AP 端最大发射功率约束、SIC 功率约束和最小用户速率约束, 构建基于系统总能效最大化的资源分配模型, 并将该问题分解为用户分组和功率分配两个子问题. 首先, 基于统计学中的主成分分析法和皮尔逊相关系数量化任意两个用户信道之间的信道增益差和线性相关程度, 以最大化每个组内两者差值为目标进行用户分组. 然后, 求解基于系统能效最大化的功率分配子问题, 通过连续凸近似法将其转化为凸优化问题求解, 得到每个用户的功率控制系数. 仿真结果表明, 本文算法在不同用户数量、不同 AP 数量、不同发射功率条件下均具有较好的能效性能, 且优于 OMA 系统. 同时, 通过增大最小用户速率阈值, 本文算法可以在不损失能效效率的情况下, 有效提升用户公平性.

2 系统模型

2.1 信道模型

考虑如图 1 所示的系统模型, 一个去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 系统由一定范围内随机分布的 M 个 AP 和 K_{tot} 个单天线用户组成. 每个 AP 装备 L 根天线, 所有 K_{tot} 个用户被分配到 N 个用户组中, 每组有 K 个用户, 满足 $K_{\text{tot}} = KN < ML$, 记第 n 组中第 k 个用户为 u_k^n . M 个 AP 在相同的时频资源上同时服务 K_{tot} 个用户.

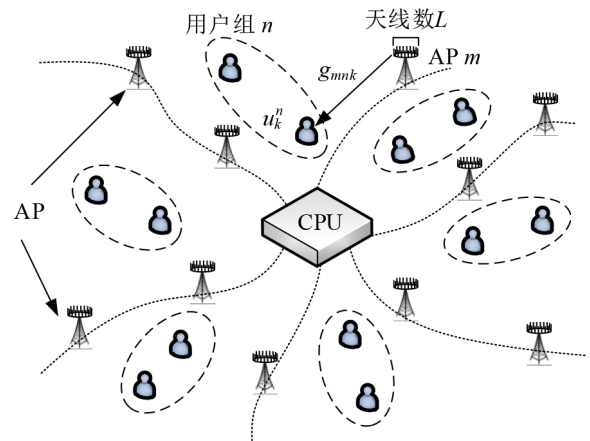


图 1 去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 系统

系统在 TDD 模式下工作, 相干间隔被分为 3 个阶段: 上行信道估计、上行链路数据传输和下行链路数据传输. 第 m 个 AP 与用户 u_k^n 之间的信道矢量 $\mathbf{g}_{mnk} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 表示为

$$\mathbf{g}_{mnk} = \sqrt{\beta_{mnk}} \mathbf{h}_{mnk} \quad (1)$$

其中, \mathbf{h}_{mnk} 表示小尺度衰落, 是独立同分布的随机矢量,

满足 $\mathbf{h}_{mnk} \sim \text{CN}(0, \mathbf{I}_L)$; \mathbf{I}_L 表示维度为 $L \times L$ 的单位矩阵, β_{mnk} 表示大尺度衰落系数. 假设大尺度衰落是先验已知的, 且变化缓慢^[23]. 因此, 每个 AP 通过信道统计知识估计它与用户之间的信道增益并设计预编码.

2.2 上行信道估计

用户在上行数据传输阶段发送导频信号进行信道估计, 利用 TDD 信道互易性获得下行 CSI. 为了在信道估计阶段最小化系统开销, 在同一个用户组中的所有用户共享相同的导频序列, 在不同组之间分配完全正交的导频信号. 用户 u_k^n 发送的导频信号为 $\boldsymbol{\varphi}_n \in \mathbb{C}^{\tau_p \times 1}$, 满足 $\|\boldsymbol{\varphi}_n\|^2 = 1$, 且 $\boldsymbol{\varphi}_n^H \boldsymbol{\varphi}_{n'} = 0 (n \neq n')$. 第 m 个 AP 接收到的导频信号 $\mathbf{Y}_m \in \mathbb{C}^{L \times \tau_p}$ 表示如下:

$$\mathbf{Y}_m = \sqrt{\tau_p \rho_p} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K \mathbf{g}_{mni} \boldsymbol{\varphi}_n^H + \mathbf{n}_m^u \quad (2)$$

其中, τ_p 表示导频序列长度; ρ_p 表示导频信号的归一化信噪比; $\mathbf{n}_m^u \sim \text{CN}(0, \mathbf{I}_L)$ 表示高斯噪声矩阵, 在第 m 个 AP 处, 接收到的导频信号乘以 $\boldsymbol{\varphi}_n$, 以获得更多的信道统计信息, 表示如下:

$$\mathbf{y}_{mn} = \sqrt{\tau_p \rho_p} \sum_{i=1}^K \mathbf{g}_{mni} + \mathbf{n}_m^u \boldsymbol{\varphi}_n \quad (3)$$

利用同一组内用户信道估计的线性组合作为组内每个用户的估计信道, 可以提供更好的性能^[21]. 利用最小均方误差估计线性组合信道为

$$\hat{\mathbf{g}}_{mn} = c_{mn} \left(\sqrt{\tau_p \rho_p} \sum_{i=1}^K \mathbf{g}_{mni} + \mathbf{n}_m^u \boldsymbol{\varphi}_n \right) \quad (4)$$

其中, $c_{mn} = \sqrt{\tau_p \rho_p} \sum_{i=1}^K \beta_{mni} / \left(\tau_p \rho_p \sum_{i=1}^K \beta_{mni} + 1 \right)$.

信道估计 $\hat{\mathbf{g}}_{mn}$ 服从如下分布:

$$\hat{\mathbf{g}}_{mn} \sim \text{CN}(0, \gamma_{mn} \mathbf{I}_L) \quad (5)$$

其中, $\gamma_{mn} = \frac{1}{L} \mathbb{E} \left\{ \|\hat{\mathbf{g}}_{mn}\|^2 \right\} = c_{mn}^2 \left(\tau_p \rho_p \sum_{i=1}^K \beta_{mni} + 1 \right)$.

2.3 下行数据传输

在从上行导频信号中获得信道估计信息后, AP 端采用共轭波束赋形预编码技术发送信号给 K_{tot} 个用户. 第 m 个 AP 发送给用户的信号 \mathbf{x}_m , 即

$$\mathbf{x}_m = \sqrt{\rho_d} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sqrt{\eta_{mnk}} \mathbf{w}_{mn} s_{nk} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{w}_{mn} = \hat{\mathbf{g}}_{mn} / \sqrt{\mathbb{E} \left\{ \|\hat{\mathbf{g}}_{mn}\|^2 \right\}} = \hat{\mathbf{g}}_{mn} / \sqrt{L \gamma_{mn}}$ 表示发送给第 n 个组中用户信号的预编码向量; η_{mnk} 表示第 m 个 AP 处的下行传输功率控制系数; s_{nk} 表示发送的数据信号, 满足 $\mathbb{E} \left\{ |s_{nk}|^2 \right\} = 1, \forall n, k$; ρ_d 表示下行链路归一化信噪比. 第 m 个 AP 的总发射功率为

$$\mathbb{E} \left\{ \|\mathbf{x}_m\|^2 \right\} = \rho_d \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \eta_{mnk} \quad (7)$$

在每个 AP 处, 功率控制系数 η_{mnk} 满足功率限制条件 $\mathbb{E} \left\{ \|\mathbf{x}_m\|^2 \right\} \leq \rho_d$, 得到

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \eta_{mnk} \leq 1, \quad \forall m \quad (8)$$

用户 u_k^n 接收的信号由下式给出:

$$\begin{aligned} z_{nk} &= \sum_{m=1}^M \mathbf{g}_{mnk}^H \mathbf{x}_m + n_{nk}^d \\ &= \sqrt{\rho_d} \sum_{m=1}^M \sum_{n'=1}^N \sum_{k'=1}^K \sqrt{\eta_{mn'k'}} \mathbf{g}_{mn'k'}^H \mathbf{w}_{mn'} s_{n'k'} + n_{nk}^d \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $n_{nk}^d \sim \text{CN}(0, 1)$ 为加性高斯白噪声.

3 性能分析

3.1 下行用户速率

用户 u_k^n 利用 SIC 技术解码得到同一组中信道质量比它更差的用户的信号, 并减去该信号, 得到所需的期望信号. 由于完美 SIC 技术在实际情况中不可行, 同时考虑信道估计误差, 组内导频污染, 缺乏瞬时 CSI 对信号的影响. 执行非完美 SIC 解码后, 式(9)转化为

$$\begin{aligned} z_{nk} &= \sqrt{\rho_d} \left[\underbrace{\mathbb{E} \left\{ \sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mnk}} \mathbf{g}_{mnk}^H \mathbf{w}_{mn} \right\}}_{\text{DS}_{nk}} s_{nk} \right. \\ &\quad + \underbrace{\left(\sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mnk}} \mathbf{g}_{mnk}^H \mathbf{w}_{mn} - \mathbb{E} \left\{ \sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mnk}} \mathbf{g}_{mnk}^H \mathbf{w}_{mn} \right\} \right)}_{\text{BU}_{nk}} s_{nk} \\ &\quad + \underbrace{\sum_{k'=1}^{k-1} \left(\sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mnk'}} \mathbf{g}_{mnk'}^H \mathbf{w}_{mn} \right)}_{\text{RIDI}_{nk'}} s_{nk'} \\ &\quad + \underbrace{\sum_{k'=k+1}^K \sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mnk'}} \left(\mathbf{g}_{mnk'}^H \mathbf{w}_{mn} s_{nk'} - \mathbb{E} \left\{ \mathbf{g}_{mnk'}^H \mathbf{w}_{mn} \right\} \hat{s}_{nk'} \right)}_{\text{ICIS}_{nk'}} \\ &\quad \left. + \underbrace{\sum_{n' \neq n}^N \sum_{k'=1}^K \sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mn'k'}} \mathbf{g}_{mn'k'}^H \mathbf{w}_{mn'} s_{n'k'}}_{\text{ICI}_{nk'}} \right] + n_{nk}^d \end{aligned} \quad (10)$$

在式(10)中, DS_{nk} 和 BU_{nk} 分别表示用户 u_k^n 的期望信号和波束赋形增益带来的不确定性误差项; $\text{RIDI}_{nk'}$ 表示用户组内干扰; $\text{ICIS}_{nk'}$ 表示由于非完美的 SIC 产生的误差传播; $\text{ICI}_{nk'}$ 表示用户组间干扰. $\hat{s}_{nk'}$ 是用户 u_k^n 对用户 $u_{k'}^{n'}$ 的接收信号 $s_{nk'}$ 解码得到的估计信号. 设 $s_{nk'}$ 和它的估计 $\hat{s}_{nk'}$ 服从联合高斯分布, $s_{nk'}$ 和 $\hat{s}_{nk'}$ 有如下关系:

$$s_{nk'} = \rho_{nk'} \hat{s}_{nk'} + e_{nk'} \quad (11)$$

其中, $\hat{s}_{nk'} \sim \text{CN}(0, 1)$ 和 $e_{nk'} \sim \text{CN}(0, \delta_{nk'}^2 / (1 + \delta_{nk'}^2))$ 是估计

误差,与 $\hat{s}_{nk'}$ 统计独立; $\rho_{nk'} = 1/\sqrt{1+\delta_{nk'}^2}$, 相关系数 $0 \leq \rho_{nk'} \leq 1$ 反映了估计质量,并且量化了非完美 SIC 的严重程度, $\rho_{nk'}$ 的值由信道(衰落和阴影)和其他因素决定, $\rho_{nk'}$ 越大, $s_{nk'}$ 和 $\hat{s}_{nk'}$ 之间的关联越大, SIC 性能就越好. 但是,当 $\rho_{nk'} = 1, e_{nk'} = 0$ 时,集群内仍然存在干扰,即拥有较强信道的用户缺乏瞬时 CSI 而造成的干扰.

利用用户的信道状态信息,用户 u_k^n 的可实现下

$$r_{nk}(\boldsymbol{\eta}_{nk}) = \frac{|DS_{nk}|^2}{\mathbb{E}\left\{\left|\text{BU}_{nk}\right|^2\right\} + \sum_{k'=1}^{k-1} \mathbb{E}\left\{\left|\text{RIDI}_{nk'}\right|^2\right\} + \sum_{k'=k+1}^K \mathbb{E}\left\{\left|\text{ICIS}_{nk'}\right|^2\right\} + \sum_{n' \neq n, k'=1}^N \sum_{k'=1}^K \mathbb{E}\left\{\left|\text{ICI}_{n'k'}\right|^2\right\} + 1} \quad (13)$$

$$r_{nk}(\boldsymbol{\eta}_{nk}) = \frac{L \cdot \Psi_{nk}^2(\boldsymbol{\eta}_{nk})}{\Gamma_{nk}(\boldsymbol{\eta}_{nk})} = \frac{L \left| \mathbf{a}_{nk}^T \boldsymbol{\eta}_{nk} \right|^2}{\sum_{n'=1}^N \sum_{k'=1}^K \left\| \mathbf{b}_{nk} \boldsymbol{\eta}_{n'k'} \right\|^2 + L \sum_{k'=1}^{k-1} \left| \mathbf{a}_{nk}^T \boldsymbol{\eta}_{nk'} \right|^2 + L \sum_{k'=k+1}^K (2-2\rho_{nk'}) \left| \mathbf{a}_{nk}^T \boldsymbol{\eta}_{nk'} \right|^2 + 1/\rho_d} \quad (14)$$

其中,

$$\boldsymbol{\eta}_{nk} = \left[\sqrt{\eta_{1nk}}, \sqrt{\eta_{2nk}}, \dots, \sqrt{\eta_{mnk}}, \dots, \sqrt{\eta_{Mnk}} \right]^T$$

$$\mathbf{a}_{nk} = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_{1n}} \beta_{1nk} / \sum_{i=1}^K \beta_{1ni}, \sqrt{\gamma_{2n}} \beta_{2nk} / \sum_{i=1}^K \beta_{2ni}, \\ \dots, \sqrt{\gamma_{Mn}} \beta_{Mnk} / \sum_{i=1}^K \beta_{Mni} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{b}_{nk} = \text{diag} \left(\sqrt{\beta_{1nk}}, \sqrt{\beta_{2nk}}, \dots, \sqrt{\beta_{Mnk}} \right) \in \mathbb{R}^{M \times M}$$

为了应用功率域 NOMA 技术,每个用户组中的用户需按照信道质量排序. 观察式(14),假设 $\mathbf{g}_{nk}^{\text{vir}} = \mathbf{a}_{nk}$ 作为第 n 个用户组中第 k 个用户的模拟信道,基于 $\mathbf{g}_{nk}^{\text{vir}}$ 对 K 个用户排序如式(15)所示,可由 CPU 对组内用户排序,然后 CPU 向 AP 返回用户排序和功率分配信息.

$$\left\| \mathbf{g}_{n1}^{\text{vir}} \right\|_2 \geq \left\| \mathbf{g}_{n2}^{\text{vir}} \right\|_2 \geq \dots \geq \left\| \mathbf{g}_{nK}^{\text{vir}} \right\|_2, \quad \forall n \quad (15)$$

根据功率域 NOMA 原理,应分配给弱信道增益用户更高的功率. 因此,组内用户功率分配因子需满足如下条件^[20]:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k'=1}^{k-1} \eta_{mnk'} \leq \sum_{m=1}^M \eta_{mnk}, \quad \forall n, \forall k > 1 \quad (16)$$

$$\text{EE}(\boldsymbol{\eta}_{nk}) = \frac{B \cdot R_{\text{tot}}(\boldsymbol{\eta}_{nk})}{P_{\text{tot}}(\boldsymbol{\eta}_{nk})} = \frac{B \cdot \left(\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K R_{nk}(\boldsymbol{\eta}_{nk}) \right)}{P_{\text{cir}} + \rho_d N_0 \sum_{m=1}^M \frac{1}{\chi_m} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \eta_{mnk} + \sum_{m=1}^M (LP_{\text{ic},m} + P_{0,m}) + B \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K R_{nk}(\boldsymbol{\eta}_{nk}) \sum_{m=1}^M P_{\text{bt},m}} \quad (20)$$

4 总能效最大化问题

为了最大化去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 系统能量效率,基于系统总能量效率最大的用户分组和功率分配联合优化问题表示如下:

$$\max_{\boldsymbol{\eta}_{nk}} \text{EE}(\boldsymbol{\eta}_{nk}) \quad (21\text{-a})$$

$$\text{s.t. } R_{nk}(\boldsymbol{\eta}_{nk}) \geq R_{\text{ok}}, \quad \forall n, k \quad (21\text{-b})$$

行链路速率计算如下:

$$R_{nk}(\boldsymbol{\eta}_{nk}) = \frac{\tau_c - \tau_p}{\tau_c} \log_2(1 + r_{nk}(\boldsymbol{\eta}_{nk})) \quad (12)$$

其中, τ_c 是相干间隔长度; r_{nk} 表示用户 u_k^n 的信干噪比,由式(13)表示. 式(13)中的各项之间是不相关的. 通过计算式(13),用户 u_k^n 的信干噪比表达式 $r_{nk}(\boldsymbol{\eta}_{nk})$ 由式(14)给出.

3.2 系统总能量效率

去蜂窝大规模 MIMO-NOMA 系统下行链路数据传输总功率消耗^[11]表示为

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{cir}} + \sum_{m=1}^M P_m + \sum_{m=1}^M P_{\text{bh},m} \quad (17)$$

其中, P_{cir} 表示静态电路固定功率消耗; P_m 是第 m 个 AP 的功率放大器的功耗,表示为

$$P_m = \frac{1}{\chi_m} \rho_d N_0 \left(\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \eta_{mnk} \right) + LP_{\text{ic},m} \quad (18)$$

其中, $0 < \chi_m < 1$ 是功率放大器效率; N_0 是噪声功率; $P_{\text{ic},m}$ 是第 m 个 AP 的每根天线的组成元件消耗的功率.

$P_{\text{bh},m}$ 是连接 CPU 与 AP 之间的回传链路的功率消耗,可以表示为

$$P_{\text{bh},m} = P_{0,m} + B \cdot R_{\text{tot}}(\boldsymbol{\eta}_{nk}) \cdot P_{\text{bt},m} \quad (19)$$

其中, $P_{0,m}$ 每条回传链路的固定功率消耗,与 CPU 和 AP 之间的距离及网络拓扑结构有关; $P_{\text{bt},m}$ 是数据传输功率消耗; B 是系统带宽; $R_{\text{tot}}(\boldsymbol{\eta}_{nk})$ 是系统总速率. 系统总能量效率定义为总吞吐量除以总功率消耗,由式(20)给出.

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \eta_{mnk} \leq 1, \quad \forall m \quad (21\text{c})$$

$$\eta_{mnk} \geq 0, \quad \forall m, n, k \quad (21\text{d})$$

$$\sum_{n=1}^N u_k^n = 1, u_k^n \in \{0, 1\}, \quad \forall n, k \quad (21\text{e})$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k'=1}^{k-1} \eta_{mnk'} \leq \sum_{m=1}^M \eta_{mnk}, \quad \forall n, \forall k > 1 \quad (21\text{f})$$

其中,式(21b)表示每个用户最低速率要求;式(21c)表示每个 AP 最大发射功率约束;式(21d)表示用户功率分配因子约束;式(21e)表示一个用户只进行一次分组;式(21f)表示 SIC 功率约束.

式(21)问题是一个混合整数非线性约束问题,难以直接求解.为了最大化总能量效率,需要穷举搜索 $(KN)!/K^N$ 次才能得到全局最优的用户分组方案^[24].显然,当用户数很多时,该方案复杂度过高,难以实际应用.因此,提出一种两步策略来减少复杂度,首先,执行用户分组算法,然后执行功率分配算法来得到功率控制系数.

4.1 基于统计学理论的用户分组算法

本节将同时考虑组内信道增益的差异性和信道的相关程度,提出一种针对 $K=2$ 时去蜂窝 NOMA 系统的用户分组算法.

合理的用户分组方案有利于 NOMA 系统的性能提升.在传统的蜂窝小区系统中,通常基于大尺度衰落对用户进行分组,将信道质量好的用户与信道质量差的用户分配到相同的组内.然而,在去蜂窝系统中,由于每个用户同时与多个 AP 通信,因此,基于大尺度衰落排序的方法不可行. NOMA 系统的性能增益与组内用户信道增益差异度和信道相关程度有关.组内用户间信道增益差距越大,信号间干扰越小;组内用户间信道相关程度越小,复用相同导频用户的信道估计误差越小.

基于统计学中的主成分分析理论,将 M 个 AP 与目标用户之间信道的大尺度衰落系数矩阵 $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M]$ 线性组合作为该用户的信道增益值.其中, $\beta_m = [\beta_{1m}, \beta_{2m}, \dots, \beta_{(2N)m}]^T$. 利用式(22)计算矩阵 β 的标准化协方差矩阵 $S = (S_{ij})_{M \times M}$, 即

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{2N} (\beta_{ki} - \bar{\beta}_i)(\beta_{kj} - \bar{\beta}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{2N} (\beta_{ki} - \bar{\beta}_i)^2 \cdot \sum_{k=1}^{2N} (\beta_{kj} - \bar{\beta}_j)^2}}, \quad \forall i, j \quad (22)$$

其中, $\bar{\beta}_i = \sum_{k=1}^{2N} \beta_{ki} / (2N)$.

计算矩阵 S 的特征值 $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M]$ 、每个特征值的权重 $\tilde{\lambda} = \left[\lambda_1 / \sum_{m=1}^M \lambda_m, \lambda_2 / \sum_{m=1}^M \lambda_m, \dots, \lambda_M / \sum_{m=1}^M \lambda_m \right]^T$ 和特征向量 $q = (q_{ij})_{M \times M}$. 计算 $\tilde{\beta} = \beta \cdot q \cdot \tilde{\lambda}$, 则 $\tilde{\beta} = [\tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \dots, \tilde{\beta}_{2N}]^T$ 表示 $2N$ 个用户的组合信道增益.任意两个用户间的信道增益差值可计算为 $\alpha_{ij}^a = \tilde{\beta}_i - \tilde{\beta}_j$.

基于统计学中皮尔逊相关系数理论,定义用户 i 与用户 j 之间的信道相关系数 α_{ij}^c 为

$$\alpha_{ij}^c = \frac{\text{Cov}(i, j)}{\sqrt{\text{Var}(i) \cdot \text{Var}(j)}} \quad (23)$$

其中,

$$\text{Var}(i) = \sum_{m=1}^M \left(\beta_{im} - \left(\sum_{m=1}^M \beta_{im} \right) / M \right)^2$$

$$\text{Cov}(i, j) = \sum_{m=1}^M \left(\beta_{im} - \left(\sum_{m=1}^M \beta_{im} \right) / M \right) \left(\beta_{jm} - \left(\sum_{m=1}^M \beta_{jm} \right) / M \right)$$

对矩阵 $\alpha^a = (\alpha_{ij}^a)_{2N \times 2N}$ 和 $\alpha^c = (\alpha_{ij}^c)_{2N \times 2N}$ 进行归一化处理得到矩阵 $\tilde{\alpha}^a$ 和 $\tilde{\alpha}^c$, 利用 $\hat{\alpha} = \tilde{\alpha}^a - \tilde{\alpha}^c$ 来作为用户分组的评价指标. 当 $i \neq j$ 时, $\hat{\alpha}_{ij}$ 越大, 用户 i 和 j 之间的信号干扰和导频污染越小. 具体用户分组算法如算法 1 所示.

算法 1 基于统计学理论的用户分组算法

1. 初始化: $k=0$, 用户分组结果 $G=\emptyset$
2. 对 $\hat{\alpha}_{ij}, \forall i, \forall j > i$ 按降序排序, 并将排序后 $\{i, j\}$ 按顺序储存在集合 U
3. 构建未分组用户集合 $Q = \{1, 2, \dots, 2N\}$
4. while ($Q \neq \emptyset$)
5. $k=k+1$
6. if ($U(\text{用户}1, \text{用户}2, k) \in Q$)
7. $Q = Q \setminus U(\text{用户}1, \text{用户}2, k)$
8. $G = G \cup U(\text{用户}1, \text{用户}2, k)$
9. end if
10. end while
11. 返回 G

4.2 基于能效最大化的功率分配算法

能效优化问题[式(21)]是一个非凸约束问题,难以直接求解,因此需要将该问题转化为凸优化问题.将目标函数的分子和分母同时除以分子,目标函数转化为式(24).最大化式(21)等价于最小化式(24)中分子的第一项,即

$$\text{EE}(\eta_{nk}) = \frac{1}{\frac{P(\eta_{mnk})}{B \cdot R_{\text{tot}}(\eta_{nk})} + \sum_{m=1}^M P_{\text{bt}, m}} \quad (24)$$

其中,

$$P(\eta_{mnk}) = P_{\text{fix}} + \rho_d N_0 \sum_{m=1}^M \frac{1}{\chi_m} \left(\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \eta_{mnk} \right)$$

$$P_{\text{fix}} = P_{\text{cir}} + \sum_{m=1}^M (LP_{\text{tc}, m} + P_{0, m})$$

令 $c_{mnk} = \sqrt{\eta_{mnk}}$, $c_{nk} = [c_{1nk}, \dots, c_{mnk}, \dots, c_{Mnk}]^T$, 同时引入松弛变量 t , 则式(21)转化为以下形式:

$$\max_{c_{mnk}, t} t \quad (25a)$$

$$\text{s.t. } t \leq B \frac{(\tau_c - \tau_p)}{\tau_c \ln 2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{\ln(1 + r_{nk}(c_{mnk}))}{P(c_{mnk})} \quad (25b)$$

$$R_{nk}(\mathbf{c}_{nk}) \geq R_{ok}, \quad \forall n, k \quad (25c)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K c_{mnk}^2 \leq 1, \quad \forall m \quad (25d)$$

$$c_{mnk} \geq 0, \quad \forall m, n, k \quad (25e)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{k-1} c_{mnk}^2 \leq \sum_{m=1}^M c_{mnk}^2, \quad \forall n, \forall k > 1 \quad (25f)$$

约束不等式[式(25b)和式(25f)]右边的项是非凸的,需要进行转化. 对凸函数 $\ln(1+1/x)/y$ 进行一阶泰勒展开,得到如下不等式^[6]:

$$\frac{\ln(1+1/x)}{y} \geq 2 \frac{\ln(1+1/\bar{x})}{\bar{y}} + \frac{1}{(1+\bar{x})\bar{y}} - \frac{x}{(1+\bar{x})\bar{x}\bar{y}} - \frac{\ln(1+1/\bar{x})y}{\bar{y}^2} \quad (26)$$

$$\forall x > 0, \bar{x} > 0, y > 0, \bar{y} > 0$$

令 $x = 1/x, \bar{x} = 1/\bar{x}$, 则不等式(26)转化为

$$\frac{\ln(1+x)}{y} \geq 2 \frac{\ln(1+\bar{x})}{\bar{y}} + \frac{\bar{x}}{(1+\bar{x})\bar{y}} - \frac{\bar{x}^2}{(1+\bar{x})\bar{y}} \frac{1}{x} - \frac{\ln(1+\bar{x})}{\bar{y}^2} y \quad (27)$$

$$\forall x > 0, \bar{x} > 0, y > 0, \bar{y} > 0$$

利用不等式(27),得

$$\frac{\ln(1+r_{nk}(\mathbf{c}_{nk}))}{P(\mathbf{c}_{mnk})} \geq A_{nk}^{(n)} - \frac{B_{nk}^{(n)}}{r_{nk}(\mathbf{c}_{nk})} - C_{nk}^{(n)} P(\mathbf{c}_{mnk}) \quad (28)$$

其中,

$$A_{nk}^{(n)} = 2 \frac{\ln(1+r_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))}{P(\mathbf{c}_{mnk}^{(n)})} + \frac{r_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)})}{(1+r_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))P(\mathbf{c}_{mnk}^{(n)})}$$

$$B_{nk}^{(n)} = \frac{(r_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))^2}{(1+r_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))P(\mathbf{c}_{mnk}^{(n)})}$$

$$C_{nk}^{(n)} = \frac{\ln(1+r_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))}{(P(\mathbf{c}_{mnk}^{(n)}))^2}$$

上述3个等式中, $\mathbf{c}_{nk}^{(n)}$ 表示经过第 n 次迭代后优化式(25)的可行解.

不等式(28)的右边项由于有 $1/r_{nk}(\mathbf{c}_{nk})$, 是非凸的.

引入如下不等式^[25]:

$$\frac{x^2}{y} \geq 2 \frac{\bar{x}}{\bar{y}} x - \frac{\bar{x}^2}{\bar{y}^2} y, \quad \forall x > 0, \bar{x} > 0, y > 0, \bar{y} > 0 \quad (29)$$

利用不等式(29), $1/r_{nk}(\mathbf{c}_{nk})$ 可以被重写为

$$\frac{1}{r_{nk}(\mathbf{c}_{nk})} \geq D(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) + E(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) + F(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) + 1/\left(\rho_d L \Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk})^2\right) \quad (30)$$

其中,

$$D(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) = 2 \times \frac{\sum_{n'=1}^N \sum_{k'=1}^K |\mathbf{b}_{nk} \mathbf{c}_{n'k'}| |\mathbf{b}_{nk} \mathbf{c}_{n'k'}^{(n)}|}{(\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))^2}$$

$$E(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) = 2 \times \frac{\sum_{n'=1}^N \sum_{k'=1}^K |\mathbf{b}_{nk} \mathbf{c}_{n'k'}^{(n)}|^2}{(\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))^4} (\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}))^2$$

$$F(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) = 2 \times \frac{L \sum_{k'=1}^{k-1} |\mathbf{a}_{nk}^T \mathbf{c}_{nk'}| |\mathbf{a}_{nk}^T \mathbf{c}_{nk'}^{(n)}|}{(\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))^2}$$

$$- \frac{L \sum_{k'=1}^{k-1} |\mathbf{a}_{nk}^T \mathbf{c}_{nk'}^{(n)}|^2}{(\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))^4} (\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}))^2$$

$$F(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) = 2 \times \frac{L \sum_{k'=k+1}^K (2-2\rho_{nk'}) |\mathbf{a}_{nk}^T \mathbf{c}_{nk'}| |\mathbf{a}_{nk}^T \mathbf{c}_{nk'}^{(n)}|}{(\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))^2}$$

$$- \frac{L \sum_{k'=k+1}^K (2-2\rho_{nk'}) |\mathbf{a}_{nk}^T \mathbf{c}_{nk'}^{(n)}|^2}{(\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}))^4} (\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}))^2$$

最后,引入不等式(31)^[20]:

$$x^2 \geq 2x\bar{x} - \bar{x}^2, \quad \forall x > 0, \bar{x} > 0, 2x \geq \bar{x} \quad (31)$$

利用不等式(31),得

$$(\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}))^2 \geq 2 |\mathbf{a}_{nk}^T \mathbf{c}_{nk}| |\mathbf{a}_{nk}^T \mathbf{c}_{nk}^{(n)}| - |\mathbf{a}_{nk}^T \mathbf{c}_{nk}^{(n)}|^2 \quad (32)$$

根据不等式(31),约束条件式(32)需满足:

$$2\Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}) \geq \Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}^{(n)}), \quad \forall n, k \quad (33)$$

非凸约束式(25-c)可以转化为如下二阶锥形式:

$$\sqrt{\left(2^{\frac{\tau_s}{\tau_s - \tau_p}} R_{ok} - 1\right)} \Gamma_{nk}(\mathbf{c}_{nk}) \leq \sqrt{L} \Psi_{nk}(\mathbf{c}_{nk}) \quad (34)$$

利用不等式(31)对约束条件不等式(25-f)的右边项进行转化,得

$$\sum_{m=1}^M c_{mnk}^2 \geq 2 \sum_{m=1}^M c_{mnk}^{(n)} c_{mnk} - \sum_{m=1}^M (c_{mnk}^{(n)})^2, \quad \forall n, \forall k > 1 \quad (35)$$

式(35)需满足:

$$2 \sum_{m=1}^M c_{mnk}^{(n)} c_{mnk} \geq \sum_{m=1}^M (c_{mnk}^{(n)})^2, \quad \forall n, \forall k > 1 \quad (36)$$

利用不等式(35),约束条件式(25-f)可以转化为

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k'=1}^{k-1} c_{mnk'}^2 \leq 2 \sum_{m=1}^M c_{mnk}^{(n)} c_{mnk} - \sum_{m=1}^M (c_{mnk}^{(n)})^2, \quad \forall n, \forall k > 1 \quad (37)$$

优化问题式(25)的第 $(n+1)$ 次迭代可以表达为式(38).

通过求解一系列凸约束问题来近似非凸约束问题的解,经过 n 次迭代后得到次优解. 将式(32)代入式(30)中,约束条件式(25b)在第 n 次迭代时可以表示为式(38b).

$$\max_{c_{mnk}, t} \quad (38a)$$

$$\text{s.t. } t \leq B \frac{\tau_c - \tau_p}{\tau_c \ln 2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \left(A_{nk}^{(n)} - B_{nk}^{(n)} \left(D(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) + E(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) + F(\mathbf{c}_{nk}, \mathbf{c}_{nk}^{(n)}) + 1 \left/ \left(\rho_d L \varphi_{nk}(\mathbf{c}_{nk})^2 \right) - C_{nk}^{(n)} P(\mathbf{c}_{mnk}) \right) \right) \quad (38b)$$

优化问题式(38)中有 $(MNK+1)$ 个优化变量, $(M+NK+N(K-1)+1)$ 个二次规划, 以及 $(MNK+NK+N(K-1))$ 个线性规划, 因此其每一次迭代的复杂度为

$$\mathcal{O}\left((MNK+1)^2(M+N(2K-1)+1)^{2.5} + (M+N(2K-1)+1)^{3.5}\right)$$

迭代前的初始功率控制系数的选取如下, 并以此作为全功率方案下的功率分配系数^[20].

$$\begin{cases} c_{mnk}^{(0)} = \left(2^{k-1}/(N2^K)\right)^{1/2}, \quad \forall m, n, \forall k \neq K \\ c_{mnK}^{(0)} = \left(1/N - \sum_{k=1}^{K-1} 2^{k-1}/(N2^K)\right)^{1/2}, \quad \forall m, n \end{cases} \quad (39)$$

求解问题式(38)的具体步骤如算法2所示.

算法2 基于SCA的功率分配算法

1. 初始化: 迭代次数 $n=0$, 初始可行解 $c_{mnk}^{(0)}, t$, 最小用户速率 R_{ok} , 误差限 ε 和最大迭代次数 N
2. while $n \leq N$ 或 $|t^{(n+1)} - t^{(n)}| > \varepsilon$ do
3. 求解问题式(39)得到第 n 次迭代的可行解 $c_{mnk}^{(n)}$
4. $n = n + 1$
5. end while

5 仿真分析

本节通过仿真分析比较了本文用户分组算法与文献[22]所提用户分组算法在不同用户数下的能效性能. 在不同用户数、不同AP数、不同天线数、不同发射功率和不同最小用户速率要求等条件下分析比较了全功率和联合优化算法的性能. 同时, 本节还将去蜂窝NOMA与OMA系统进行了对比. 假设系统中 M 个AP和 K_{tot} 个用户随机分布在边长为 D 的正方形区域内, 该正方形区域位于中心位置, 8个同样大小的正方形围着它的边缘环绕, 以避免边界效应, 并模仿具有无限面积的网络结构. 大尺度衰落 β_{mnk} 由路径损耗和阴影衰落构成, 路径损耗采用三斜率模型生成^[7]. 除非特别说明, 系统仿真参数设置如表1所示.

图2展示了不同用户分组方案下系统能量效率随用户数量变化趋势, 采用全功率分配方案. 在图2中, 用户分组I为本文所提算法1, 用户分组II为文献[22]中所提用户分组算法, 用户分组III为2个距离最近的用

表1 仿真参数

参数	数值
N_0	$290 \times \kappa \times B \times NF$
κ, B, NF	$1.381 \times 10^{-23}, 20 \text{ MHz}, 9 \text{ dB}$
τ_p, τ_c	$N(\text{NOMA}), K_{\text{tot}}(\text{OMA}), 200$
M, K, L	20, 2, 15
ρ_p, ρ_d	0.1 W, 0.2 W
σ_{sh}	8 dB
D	1 km
χ_m	0.4
$P_{\text{tc}, m}, P_{0, m}, P_{\text{cir}}$	0.2 W, 0.825 W, 0.1 W
$P_{\text{bt}, m}$	$0.25 \text{ W}/(\text{Gbits} \cdot \text{s}^{-1})$

户分到同一个组中. 从图中可以看出, 在不同用户数量下, 用户分组I始终取得了最高的能量效率, 平均比用户分组II高5.5%, 比用户分组III高20.6%. 所提用户分组算法可以有效增大用户间信道增益差异和减小相关程度, 从而充分提高系统总能效. 同时可以看到, 与完美SIC相比, 非完美SIC明显降低了NOMA系统能效, 且在用户数较少时, 两者的系统总能效差距更大, 这表明 s_{nk} 和 \hat{s}_{nk} 的相关程度更低, 降低了利用SIC技术进行组内干扰消除的效果, 从而增大了组内干扰. 将NOMA与OMA系统进行对比, 可以看出NOMA系统可以服务的最大用户数 $K_{\text{tot}}^{\text{NOMA}} = 400$, 是OMA系统最大用户容量 $K_{\text{tot}}^{\text{OMA}} = 200$ 的两倍, 这是因为OMA要求为每个用户分配相互正交的导频, 而NOMA只需要为每个用户组分配正交导频. 当用户较多时, NOMA系统的能效优于OMA系统, 当 $K_{\text{tot}} < 95$ 时, OMA系统的能效优于NOMA系统. 这表明, 在用户数较少的情况下, NOMA系统增大的数据传输时间 $(\tau_c - \tau_p)$ 带来的用户速率的提升, 不足以抵消组内导频污染、组内数据信号干扰带来的速率降低.

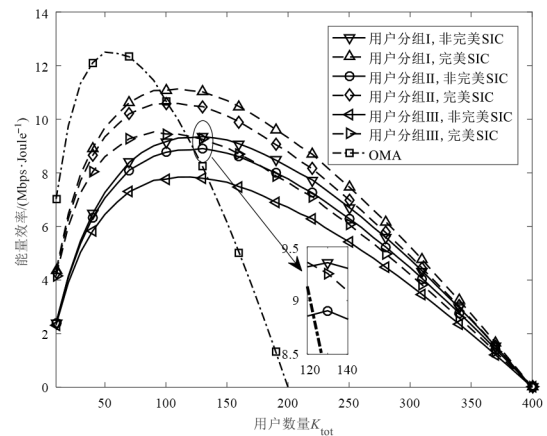


图2 不同用户分组方案下能量效率随用户数量变化曲线

图3对所提出的功率控制算法的收敛性进行了分析. 从图3中可以看出, 所提算法在迭代3次后就基本

收敛到一个确定的最优解。同时,在全功率方案下,即迭代次数为 0 时,完美 SIC 和非完美 SIC 之间的能效性能相差 2.5 Mbps/Joule,差距较大,而经过功率优化后两者的能效相差在 0.2 Mbps/Joule 以内,差距很小。由于在实际系统中完美 SIC 技术不可行,因此,将非完美 SIC 的能效提高到接近完美 SIC 时的能效大小是非常重要的。

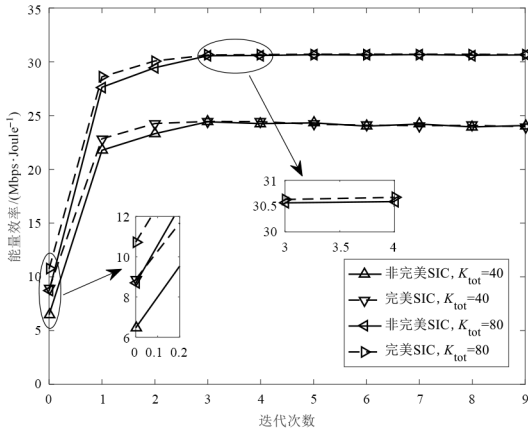


图3 功率优化算法的能量效率随迭代次数变化曲线

图4对所提能效优化算法的优化效果进行了分析。其中,OMA系统的功率优化方案利用与NOMA的功率优化方案相同的分析方法。从图中可以看出,系统能效随着AP数量增加呈现下降趋势,这是因为发射功率消耗随AP数量线性增长,而用户速率的增长速度则越来越缓慢,导致系统能效降低。以 $K_{tot}=40$ 为例,与全功率方案相比,功率优化方案下NOMA和OMA系统平均能量效率均明显增加。这验证了所提功率分配算法的有效性。与OMA系统相比,在功率优化方案下,相同用户数量时,NOMA系统获得更大的能量效率,且用户数越大,所提功率分配算法对NOMA系统的能效性能增益更大。这

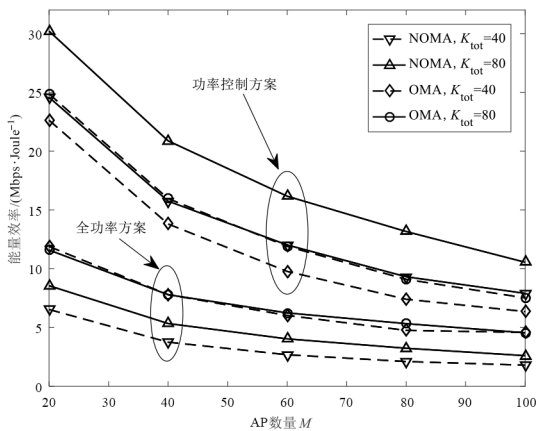


图4 不同功率分配方案下能量效率随AP数量变化曲线

表明应用NOMA系统会带来系统容量的巨大提升。

图5分析了总天线数固定的情况下,功率优化方案下能量效率随AP发射功率变化趋势。从图5中可以看出,随着发射功率增大,系统总能效呈现下降趋势。同时,在总天线数量不变的情况下,AP数量越多,总能效下降越明显。这是因为随着每个AP上的天线数量增加,系统的总AP数量减少。这会导致CPU与AP之间的回传功耗减小。且由于每个AP有最大发射功率限制,不随天线数量变化,AP数量的减少使系统的总发射功率减少。因此,增大发射功率对AP数量更多的场景影响更大。

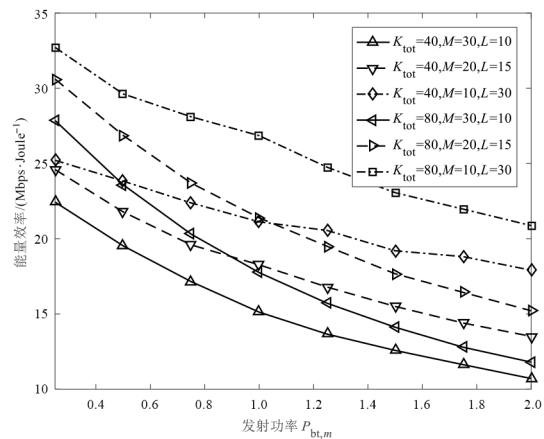


图5 功率优化方案下能量效率随发射功率变化曲线

图6和图7分析了所提出的能效优化算法与设定的最小用户速率阈值之间的关系,从图6中可以看出,当 $K_{tot}=40, R_{ok} \leq 2$ 和 $K_{tot}=80, R_{ok} \leq 1.25$ 时,功率优化方案均能满足最小用户速率要求,且系统总能效大小保持平稳,基本不发生变化。这表明当用户数量较少时,系统能满足更高的最小用户速率要求。同时,与全功率方案相比,功率优化方案下系统能量效率有较大幅度

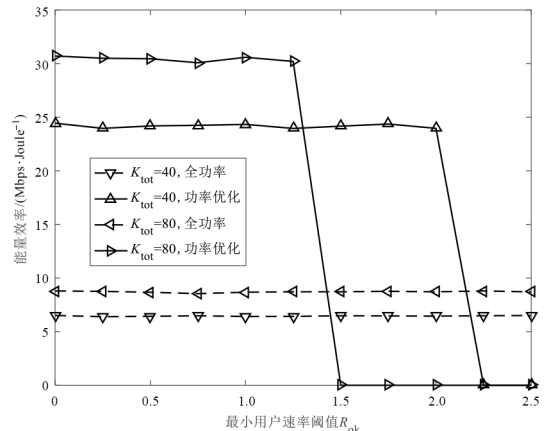


图6 能量效率随最小用户速率阈值变化曲线

的提升. 图7展示了 $R_{ok}=0$ 和 $R_{ok}=1.25$ 这2种情况下系统用户速率的累积分布函数. 从图7可以看出, 当取不同的最小用户速率阈值时, NOMA系统的实际最小用户速率会随阈值动态变化, 而其平均用户速率差距在0.1 bps/Hz以内. 因此, 可以通过增大最小用户速率阈值, 缩小用户间服务质量的差距, 从而提升用户的公平性, 且系统能效不会降低.

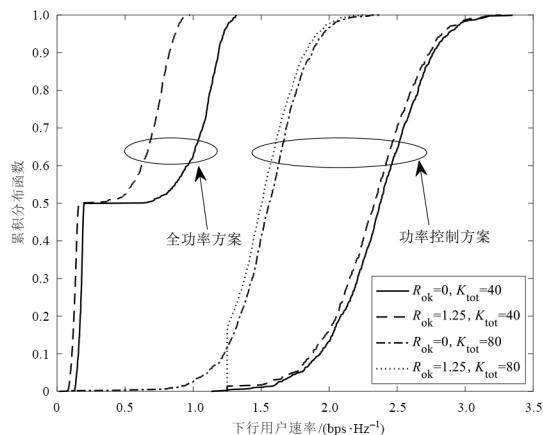


图7 用户下行速率累积分布函数

6 结论

本文研究了去蜂窝大规模MIMO-NOMA系统下行链路能效优化问题. 首先推导出系统的总能量效率闭式表达式. 基于该表达式, 建立了最小用户速率约束、AP发射功率约束、SIC功率约束等条件下的系统总能效最大化的资源分配问题模型, 将该问题分解为用户分组与功率分配两个子问题. 通过任意两用户间信道增益差和相关度作为评价指标来分配用户到不同的组内, 基于分组结果, 采用连续凸近似法将非凸功率分配子问题转化为凸优化问题求解, 得到最优的功率分配因子. 仿真结果表明, NOMA系统的用户吞吐量是传统的OMA系统的 K 倍, 且在不同用户数量和不同AP数量条件下, 应用本文算法的NOMA系统均能获得更高的能效性能, 且随着用户数量的增大, 性能增益更大, 这有利于充分利用NOMA系统的高吞吐量性能. 同时, 发射功率对多AP场景的系统能效性能影响更大. 此外, 在合理的最小用户速率阈值范围内, 增大最小用户速率阈值可以有效提升用户公平性, 且不会明显降低系统的能量效率.

参考文献

[1] LETAIEF K B, CHEN W, SHI Y M, et al. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(8): 84-90.
[2] ZHANG Z Z, CHEN Z Y, SHEN M Y, et al. Spectral and

energy efficiency of multipair two-way full-duplex relay systems with massive MIMO[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4): 848-863.

- [3] YOU L, XIONG J Y, ZAPPONE A, et al. Spectral efficiency and energy efficiency tradeoff in massive MIMO downlink transmission with statistical CSIT[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 2645-2659.
[4] XIN Y X, WANG D M, LI J M, et al. Area spectral efficiency and area energy efficiency of massive MIMO cellular systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3243-3254.
[5] CHEN Z L, SOHRABI F, YU W. Multi-cell sparse activity detection for massive random access: Massive MIMO versus cooperative MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8): 4060-4074.
[6] NGUYEN L D, TUAN H D, DUONG T Q, et al. Energy-efficient multi-cell massive MIMO subject to minimum user-rate constraints[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(2): 914-928.
[7] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1834-1850.
[8] ZHANG J Y, CHEN S F, LIN Y, et al. Cell-free massive MIMO: A new next-generation paradigm[J]. IEEE Access, 7: 99878-99888.
[9] CHEN Z, BJÖRNSON E. Channel hardening and favorable propagation in cell-free massive MIMO with stochastic geometry[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(11): 5205-5219.
[10] POLEGRE A Á, RIERA-PALOU F, FEMENIAS G, et al. Channel hardening in cell-free and user-centric massive MIMO networks with spatially correlated rician fading[J]. IEEE Access, 2020, 8: 139827-139845.
[11] NGO H Q, TRAN L N, DUONG T Q, et al. On the total energy efficiency of cell-free massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(1): 25-39.
[12] CHEN Y, BAYESTEH A, WU Y Q, et al. Toward the standardization of non-orthogonal multiple access for next generation wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(3): 19-27.
[13] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
[14] 郝少伟, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于改进粒子群算法的多

载波 NOMA 功率分配策略[J]. 电子学报, 2020, 48(10): 2009-2016.

HAO S W, LI Y J, ZHAO S H, et al. Multicarrier NOMA power allocation strategy based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(10): 2009-2016. (in Chinese)

- [15] MOUNCHILI S, HAMOUDA S. Pairing distance resolution and power control for massive connectivity improvement in NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 4093-4103.
- [16] 孙彦景, 刘洋, 周家思, 等. 基于非完美信道信息的 MIMO NOMA 系统和速率最大化[J]. 通信学报, 2019, 40(11): 94-100.
- SUN Y J, LIU Y, ZHOU J S, et al. Sum-rate maximization in MIMO NOMA system with imperfect CSI[J]. Journal on Communications, 2019, 40(11): 94-100. (in Chinese)
- [17] WANG Z Y, LIN Z P, LV T J, et al. Energy-efficient resource allocation in massive MIMO-NOMA networks with wireless power transfer: A distributed ADMM approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 14232-14247.
- [18] LI Y K, ARUMA BADUGE G A. NOMA-aided cell-free massive MIMO systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(6): 950-953.
- [19] REZAEI F, TELLAMBURA C, TADAION A A, et al. Rate analysis of cell-free massive MIMO-NOMA with three linear precoders[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(6): 3480-3494.
- [20] ZHANG Y, CAO H T, ZHOU M, et al. Non-orthogonal multiple access in cell-free massive MIMO networks[J]. China Communications, 2020, 17(8): 81-94.
- [21] BASHAR M, CUMANAN K, BURR A G, et al. On the performance of cell-free massive MIMO relying on adaptive NOMA/OMA mode-switching[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(2): 792-810.
- [22] REZAEI F, HEIDARPOUR A R, TELLAMBURA C, et al. Underlaid spectrum sharing for cell-free massive MIMO-NOMA[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(4): 907-911.
- [23] ASHIKHMIN A, LI L B, MARZETTA T L. Interference reduction in multi-cell massive MIMO systems with large-scale fading precoding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2018, 64(9): 6340-6361.
- [24] 李国权, 林金朝, 徐勇军, 等. 无人机辅助的 NOMA 网络用户分组与功率分配算法[J]. 通信学报, 2020, 41(9):

21-28.

LI G Q, LIN J Z, XU Y J, et al. User grouping and power allocation algorithm for UAV-aided NOMA network[J]. Journal on Communications, 2020, 41(9): 21-28. (in Chinese)

- [25] NGUYEN L D, DUONG T Q, NGO H Q, et al. Energy efficiency in cell-free massive MIMO with zero-forcing precoding design[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(8): 1871-1874.

作者简介



丁青锋 男, 1980 年出生, 安徽怀宁人. 现为华东交通大学电气与自动化学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为轨道交通无线通信、智能优化、下一代无线通信技术等. 中国电子学会会员: E190027076M.

E-mail: brandy724@sina.com



李怡浩 男, 1999 年出生, 安徽安庆人. 现为华东交通大学电气与自动化工程学院硕士研究生. 主要研究方向为去蜂窝大规模 MIMO 通信.

E-mail: liyih666@163.com



徐梦引 女, 1996 年出生, 湖北天门人. 现为华东交通大学电气与自动化工程学院硕士研究生. 主要研究方向为去蜂窝大规模多输入多输出系统.

E-mail: xumy1016@foxmail.com