



XXXX

# 莱斯信道下基于 RSMA 的可扩展无蜂窝无线接入网性能研究

蒋瀚成, 殷逸诚, 易柏有, 张余, 刘利兰, 程方, 张治中  
(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

**摘 要:** 可扩展无蜂窝无线接入网 (Cell-Free Radio Access Network, CF-RAN) 通常具有较高视距 (Line-of-Sight, LoS) 链路概率并呈现莱斯衰落特征, 而导频污染与不完美信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 会进一步加剧多用户干扰、限制系统频谱效率。针对莱斯信道下可扩展 CF-RAN 的下行传输性能分析与优化, 引入速率拆分多址 (Rate-Splitting Multiple Access, RSMA), 并在考虑导频污染与不完美 CSI 的前提下, 推导了公有流与私有流可达速率下界的闭式表达式。在此基础上, 构建系统总速率最大化的联合功率与速率分配问题, 并采用连续凸近似 (Successive Convex Approximation, SCA) 进行迭代求解。仿真结果表明, 所提方案在不同发射功率、导频长度和莱斯因子设置下相较于空分多址 (Space-Division Multiple Access, SDMA) 基线均能获得更高的总速率, 在高功率区域可实现约 2.5bit/s/Hz 的性能增益, 且具备良好的收敛性。

**关键词:** 无蜂窝无线接入网; 速率拆分多址; 莱斯信道; 功率分配; 连续凸近似

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.

## Performance Analysis of RSMA-Based Scalable Cell-Free Radio Access Network over Rician Fading Channels

JIANG Hancheng, YIN Yicheng, YI Boyou, ZHANG Yu, LIU Lilan, CHENG Fang, ZHANG Zhizhong

School of electronics and information engineering, Nanjing University of information engineering and technology, Nanjing, 210044, China

**Abstract:** Scalable Cell-Free Radio Access Network (CF-RAN) typically exhibit high Line-of-Sight (LoS) link probabilities and operate under Rician fading channels. However, pilot contamination and imperfect Channel State Information (CSI) exacerbate multi-user interference, thereby limiting spectral efficiency. To address these issues, Rate-

收稿日期: 2025-01-02; 修回日期: 2026-04-13

通信作者: 张余, zhangyu@nuist.edu.cn

基金项目: 江苏省重大科技专项 (BG2024002); 国家自然科学基金 (62401271); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究面上项目 (24KJB510019)

**Foundation Items:** Major Science and Technology Project of Jiangsu Province under Grant BG2024002, The National Natural Science Foundation of China(62401271), Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province under Grant 24KJB510019.



Splitting Multiple Access (RSMA) is adopted to analyze and optimize the downlink transmission performance of scalable CF-RANs over Rician channels. By accounting for the aforementioned pilot contamination and imperfect CSI, closed-form expressions for the achievable rate lower bounds of both common and private streams are derived. On this basis, a joint power and rate allocation problem is formulated to maximize the system sum rate, which is then solved iteratively using Successive Convex Approximation (SCA). Simulation results demonstrate that the proposed scheme consistently outperforms the Space-Division Multiple Access (SDMA) baseline in terms of sum rate across various transmit powers, pilot lengths, and Rician factor settings. In addition to achieving a performance gain of approximately 2.5bit/s/Hz in the high-power regime, the proposed algorithm demonstrates rapid convergence.

**Key words:** cell-free radio access network, rate-splitting multiple access, Rician channel, power allocation, successive convex approximation

## 1 引言

无蜂窝大规模多输入多输出 (Cell-free Massive Multiple-Input Multiple-Output, CF-mMIMO) 作为面向第六代移动网络 (6G) 的关键技术, 通过地理上分散的接入点 (Access Point, AP) 协作服务用户 (User Equipment, UE), 旨在消除小区边界干扰以提升频谱效率<sup>[1][2]</sup>。然而, 传统 CF-mMIMO 依靠全局信道信息交互与集中式处理, 其计算复杂度随网络规模扩大而急剧上升, 严重限制了系统的可扩展性<sup>[3]</sup>。为了突破这一瓶颈, 文献[4]提出了可扩展无蜂窝无线接入网 (Cell-Free Radio Access Network, CF-RAN) 的系统方案, 并验证了以 UE 为中心的分布式架构的可行性。文献[5]和[6]从系统实现的角度阐释了可扩展 CF-RAN 的分布式分层处理, 文献[7]在此基础上实现了通感一体场景与干扰抑制设计: 由中央处理器 (Central Processing Unit, CPU) 承担全局协调, 由靠近前端的边缘分布式单元 (Edge Distributed Unit, EDU) 承担基带处理与局部协作, 从而在保证协作增益的同时降低全局信息交互与集中计算压力, 提高系统的可扩展性。进一步地, 文献[8]在独立瑞利衰落下利用随机几何给出了系统级性能分析框架, 从而实现了可扩展分布协作在复杂度与性能间权衡。这些研究共同为大规模可扩展 CF-RAN 奠定了理论基础。

尽管上述分布式架构解决了网络规模扩展的难题, 但在实际部署场景中, 系统性能的提升仍面临复杂的无线传播环境与有限的频谱资源的双重挑战。一方面, 随着 AP 的密度显著增加, UE 与 AP 之间视距 (Line-of-Sight, LoS) 链路出现概率大幅提升, 导致信道呈现出显著的莱斯衰落<sup>[9]</sup>。相较于描述非视距 (Non-Line-of-Sight, NLoS) 环境的瑞利信道模型, 莱斯信道模型能够更加精确地刻画无蜂窝场景下的链路特性<sup>[10]</sup>。另一方面, LoS 分量的增强会放大导频复用引起的干扰效应并提高残余程度, 使得传统的空分多址 (Space-Division Multiple Access, SDMA) 技术的系统性能出现明显退化<sup>[11]</sup>。面对此困境, 基于速率拆分多址 (Rate-Splitting Multiple Access, RSMA) 因其灵活的干扰管理机制, 在应对干扰和信道不确定性方面展现出了显著的鲁棒性优势<sup>[12]</sup>。现有研究已证实, RSMA 在应对各类非理想因素方面展现出显著优势。在信道老化、异步接收等传播环境损伤下, RSMA 能够有效维持链路可靠性<sup>[13][14]</sup>。此外, 文献[15]在速率分割无蜂窝 (Rate-Splitting Cell-Free) 架构中引入 RSMA, 并在不完美 CSI 条件下联合预编码与功率分配, 以在性能提升与协作开销之间取得折中。进一步地, 文献[16]将 RSMA 拓展至超可靠低时延通信 (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication, URLLC) 场景并给出性能分析, 表明 RSMA 在

严格可靠性与资源受限约束下仍具备优势。

然而,面向可扩展CF-RAN的分布式架构,RSMA的性能分析与联合资源分配仍不完备。首先,CF-RAN的分布式架构使等效信道与干扰项的统计特性更为复杂,难以推导出便于分析与优化的闭式表达;其次,引入RSMA后联合功率与速率分配问题呈现高度耦合的非凸特性,传统方法难以在可接受复杂度内求解<sup>[17]</sup>。基于上述原因,本文对RSMA可扩展CF-RAN中功率速率优化问题与系统性能进行了深入研究。本文的主要贡献如下:

● 构建莱斯信道下RSMA可扩展CF-RAN系统模型,基于用后即忘(Use-and-then-Forget, UatF)策略和最大比传输(Maximum Ratio Transmission, MRT)预编码,推导UE在不完美信道状态信息(Channel State Information, CSI)下可达速率的下界,深入研究莱斯因子对系统模型的影响。

● 考虑EDU级发射功率约束,以联合优化功率和速率为目标,建立下行系统总速率最大化问题。通过引入松弛变量和采用连续凸近似(Successive Convex Approximation, SCA)的方法,将该非凸问题转化为一系列凸子问题,提出一种迭代算法进行求解,并对该算法的收敛性进行分析。

● 仿真结果表明,在可扩展CF-RAN系统中,优化后的RSMA性能明显优于SDMA,从而

验证了算法的有效性。

## 2 系统模型

### 2.1 系统构架与信道模型

如图1所示,基于RSMA的可扩展CF-RAN系统中包含1个CPU、 $M$ 个EDU、 $L$ 个AP和 $K$ 个UE。定义UE集合为 $\mathcal{K}$ ,服务第 $k$ 个UE的EDU集合为 $\mathcal{M}_k$ ;第 $x$ 个EDU下有 $L_x$ 个AP对应集合为 $\mathcal{L}_x$ ,每个AP配置 $N$ 根天线。在该系统架构中,采用时分双工(Time Division Duplex, TDD)模式。AP负责信号的收发功能;EDU负责执行基带信号处理,包括信道估计、多数据流预编码、上下行信道的互易性校准等功能<sup>[4]</sup>。第 $x$ 个EDU基于其本地信道估计计算对应的公共流和私有流预编码向量,其下属AP完成局部波束赋形并实施协同发射。最终,第 $k$ 个UE接收到来自 $\mathcal{M}_k$ 中多个EDU的叠加信号,从而形成UE中心化的分布式下行RSMA传输。在RSMA下行链路中,AP将第 $k$ 个UE的信息 $Q_k$ 拆分为公有部分 $Q_{c,k}$ 和私有部分 $Q_{p,k}$ ,并将所有UE的公有部分 $Q_{c,1}, Q_{c,2}, \dots, Q_{c,K}$ 封装为公有信息 $Q_c$ ,随后编码 $Q_c$ 为公有数据流 $s_c$ ,编码 $Q_{p,k}$ 为私有数据流 $s_k$ ,其中, $s^c$ 和 $s_k^p$ 服从 $\mathcal{CN}(0, 1)$ ,采用单位功率归一化的数据符号建模<sup>[15]</sup>。

第 $k$ 个UE与第 $x$ 个EDU下第 $l$ 个AP的信道建模为

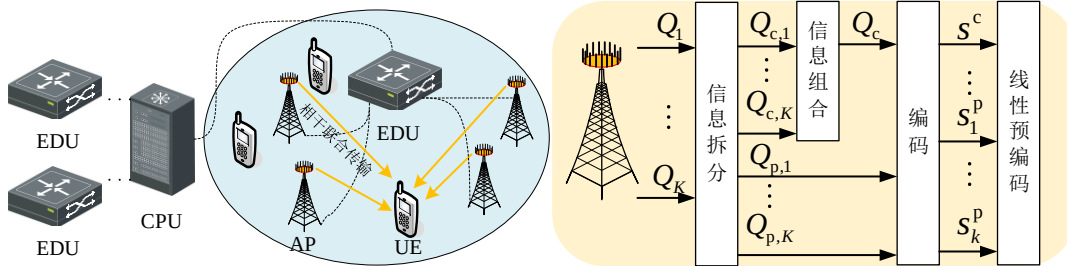


图1 系统模型



$$\mathbf{g}_{x,l,k} = \sqrt{\frac{\kappa_{x,l,k}\beta_{x,l,k}}{\kappa_{x,l,k}+1}} \mathbf{h}_{x,l,k}^{\text{LoS}} e^{j\psi_{x,l,k}} + \sqrt{\frac{\beta_{x,l,k}}{\kappa_{x,l,k}+1}} \mathbf{h}_{x,l,k}^{\text{NLoS}} = \bar{\mathbf{h}}_{x,l,k} + \tilde{\mathbf{h}}_{x,l,k} \quad (1)$$

其中,  $\beta_{x,l,k}$  代表大尺度衰落系数,  $\kappa_{x,l,k}$  为莱斯因子。  $\mathbf{h}_{x,l,k}^{\text{LoS}}$  是 LoS 分量, 用于表示确定性直达路径;  $\mathbf{h}_{x,l,k}^{\text{NLoS}} \sim \mathcal{CN}(0,1)$  表示 NLoS 分量, 用于刻画由散射、反射等引起的随机多径分量。此外,  $\mathbf{h}_{x,l,k}^{\text{LoS}} = \left[1, \dots, e^{-j(N-1)\pi \sin(\varphi_{x,l,k})}\right]^T$  是线性矢量阵列,  $\varphi_{x,l,k}$  为到达角, 为  $\psi_{x,l,k}$  随机初始相位。

## 2.2 上行信道估计

此阶段内的每个帧符号均用于传输导频信号, 共有  $K$  个 UE 同时发送长度为  $\tau$  的导频序列, 发射功率为  $\rho$ , 使用导频  $k$  的 UE 集合为  $\mathcal{P}_k$ , EDU 下的所有 AP 联合接收导频信号, 通过回程链路传给 EDU 进行信道估计。理论上, 若导频资源充足 ( $\tau \geq K$ ), 用户间可保持严格正交。然而, 受

限于相干块长度, 正交导频数通常小于用户数 ( $\tau < K$ ), 导致部分 UE 必须复用导频序列。这种复用使得 EDU 在信道估计时接收到的观测量中叠加了同导频用户的信道分量, 从而引入估计偏差, 即导频污染。假设 EDU 可以获知完整的 LoS 分量和莱斯因子, 而 NLoS 分量由 EDU 估计得到。第  $k$  个 UE 发送正交导频序列  $\phi_{t_k} \in \mathbb{C}^{\tau \times 1}$ , 第  $l$  个 AP 接收到的信号为

$$\mathbf{Y}_{x,l} = \sqrt{\tau\rho} \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{g}_{x,l,k} \phi_{t_k}^H + \mathbf{Z}_{x,l} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{Z}_{x,l} \in \mathbb{C}^{N \times \tau}$  是接收噪声, 每个元素服从  $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 。

接收信号与已知导频序列做相关运算后得到的有效观测量为

$$\mathbf{y}_{x,l,t_k} = \mathbf{Y}_{x,l} \phi_{t_k} = \sqrt{\tau\rho} \mathbf{g}_{x,l,k} + \sqrt{\tau\rho} \sum_{k' \in \mathcal{P}_k \setminus \{k\}} \mathbf{g}_{x,l,k'} + \mathbf{z}_{x,l,t_k} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{z}_{x,l,t_k} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}_N)$  表示加性高斯白噪声,  $t_k$  表示分配的导频索引。

接着, 使用最小均方误差 (Minimum Mean

Square Error, MMSE) 估计, 得到第  $k$  个 UE 与第  $x$  个 EDU 下第  $l$  个 AP 的估计信道  $\hat{\mathbf{g}}_{x,l,k}$  为

$$\hat{\mathbf{g}}_{x,l,k} = \mathbb{E}\{\mathbf{g}_{x,l,k}\} + \frac{\text{cov}(\mathbf{g}_{x,l,k}, \mathbf{y}_{x,l,k})}{\text{cov}(\mathbf{y}_{x,l,k}, \mathbf{y}_{x,l,k})} (\mathbf{y}_{x,l,k} - \mathbb{E}\{\mathbf{y}_{x,l,k}\}) \quad (4)$$

根据上式结果,  $\hat{\mathbf{g}}_{x,l,k} \sim \mathcal{CN}(\bar{\mathbf{h}}_{x,l,k}, \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{x,l,k})$ , 其中  $\mathbf{g}_{x,l,k} = \hat{\mathbf{g}}_{x,l,k} + \mathbf{e}_{x,l,k}$ ,  $\mathbf{e}_{x,l,k} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \boldsymbol{\varepsilon}_{x,l,k})$  是信道估计误差向量,  $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{x,l,k} = \tau\rho \left( \frac{\beta_{x,l,k}}{\kappa_{A,x,l,k}+1} \right)^2 \left/ \left( \tau\rho \left( \sum_{k \in \mathcal{P}_k} \frac{\beta_{x,l,k}}{\kappa_{x,l,k}+1} \right) + \sigma^2 \right) \right. \mathbf{I}_N$  是  $\hat{\mathbf{g}}_{x,l,k}$  的协方差矩阵。

## 2.3 下行 RSMA 数据传输

在下行 RSMA 数据传输阶段, EDU 下的每个 AP 向其服务的所有 UE 发送信号。对于 TDD 系统, 可以通过上行探测和互易性校准来获得下行

CSI, 在 EDU 端使用 CSI 实现相干联合传输。鉴于下行 RSMA 的公有流与私有流预编码均基于该 CSI 构造, 估计偏差将直接嵌入预编码矩阵, 导致下行波束赋形增益受损, 并在多用户间引入非预期的残余干扰, 从而降低系统性能。针对 RSMA 可扩展 CF-RAN 系统, 采用归一化的 MRT。随后, 利用 UatF 处理: 接收端仅利用统计 CSI 获取的期望信道增益进行信号检测 (视为确定性增益), 而将瞬时信道估计误差、波束形成增益的随机波动、多用户干扰及热噪声全部归

入有效噪声项, 从而获得速率下界表达式<sup>[8]</sup>。

每个EDU下的AP通过与EDU之间的回传链路进行协同发射。具体而言, 每个EDU仅基于其下属AP与UE $k$ 之间的本地估计信道进行局部预编码, 但多个EDU共享与UE $k$ 相关的下行数据流, 并依赖TDD互易与系统校准实现分布式相干联合传输。通过合并第 $x$ 个EDU下所有AP的信道, 可将UE $k$ 到第 $x$ 个EDU的等效信道 $\mathbf{g}_{x,k}$ 表示为

$$\mathbf{g}_{x,k} = [\mathbf{g}_{x,1,k}^T, \dots, \mathbf{g}_{x,L_x,k}^T]^T \in \mathbb{C}^{L_x N \times 1} \quad (5)$$

第 $x$ 个EDU发射的信号 $\mathbf{s}_x$ 为

$$\mathbf{s}_x = \sqrt{p_x^c} \mathbf{w}_x^c s^c + \sum_{k \in \mathcal{K}} \sqrt{p_{x,k}^p} \mathbf{w}_{x,k}^p s_k^p \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{w}_x^c = \sum_{k \in \mathcal{K}} \hat{\mathbf{g}}_{x,k} / \sqrt{\mathbb{E}\{\|\sum_{k \in \mathcal{K}} \hat{\mathbf{g}}_{x,k}\|^2\}}$ ,

$$\mathbf{r}_{c,k} = \underbrace{\sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sum_{i \in \mathcal{K}} \sqrt{p_x^c} \mathbb{E}\{\mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_x^c\} s^c}_{\text{DS}_{c,k}^c} + \underbrace{\sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sum_{i \in \mathcal{K}} \sqrt{p_x^c} (\mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_x^c - \mathbb{E}\{\mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_x^c\}) s^c}_{\text{BU}_{c,k}^c} + \underbrace{\sum_{i \in \mathcal{K}} \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sqrt{p_{x,i}^p} \mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_{x,i}^p s_i^p}_{\text{UI}_{p,k}^c} + \mathbf{z}_k \quad (8)$$

其中,  $\text{DS}_{c,k}$ 表示公有相干波束成形增益,  $\text{BU}_{c,k}$ 表示公有流波束成形不确定性, 其本质为瞬时有效信道增益相对于其统计均值的随机偏差,  $\text{UI}_{p,k}$ 表示私有流UE间干扰噪声。导频复用造成的导频污染, 会使预编码方向偏离目标UE信道方向, 其已经包含在私有流预编码 $\mathbf{w}_{x,k}^p$ 与公有流预编码 $\mathbf{w}_x^c$ 之中。

由式(8)得到UE $k$ 的公有流的遍历可达速率为

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{\mathbf{a}_k^H \mathbf{a}_i \mathbf{a}_{i'}^H \mathbf{a}_k\} = & \left\{ \begin{aligned} & \bar{\mathbf{a}}_k^H \bar{\mathbf{a}}_i \bar{\mathbf{a}}_{i'}^H \bar{\mathbf{a}}_k + \bar{\mathbf{a}}_k^H \bar{\mathbf{a}}_i \Phi \Phi^H (\Phi \Phi^H \Phi \Phi^H)^{1/2} \bar{\mathbf{a}}_{i'}^H \bar{\mathbf{a}}_k + \bar{\mathbf{a}}_k^H \bar{\mathbf{a}}_{i'} \Phi \Phi^H (\Phi \Phi^H \Phi \Phi^H)^{1/2} \bar{\mathbf{a}}_i^H \bar{\mathbf{a}}_k \\ & + \text{Tr}(\Phi \Phi^H \bar{\mathbf{a}}_i \bar{\mathbf{a}}_i^H \Phi \Phi^H \Phi \Phi^H (\Phi \Phi^H \Phi \Phi^H)^{1/2}) \text{Tr}(\Phi \Phi^H \bar{\mathbf{a}}_{i'} \bar{\mathbf{a}}_{i'}^H \Phi \Phi^H (\Phi \Phi^H \Phi \Phi^H)^{1/2}) + \text{Tr}(\Phi \Phi^H \bar{\mathbf{a}}_k \bar{\mathbf{a}}_k^H \Phi \Phi^H (\Phi \Phi^H \Phi \Phi^H)^{1/2}) \\ & \bar{\mathbf{a}}_k^H \bar{\mathbf{a}}_i \bar{\mathbf{a}}_{i'}^H \bar{\mathbf{a}}_k + \bar{\mathbf{a}}_k^H \bar{\mathbf{a}}_{i'} \Phi \Phi^H (\Phi \Phi^H \Phi \Phi^H)^{1/2} \bar{\mathbf{a}}_i^H \bar{\mathbf{a}}_k + \text{Tr}(\Phi \Phi^H \bar{\mathbf{a}}_i \bar{\mathbf{a}}_i^H \Phi \Phi^H (\Phi \Phi^H \Phi \Phi^H)^{1/2}) \text{Tr}(\Phi \Phi^H \bar{\mathbf{a}}_{i'} \bar{\mathbf{a}}_{i'}^H \Phi \Phi^H (\Phi \Phi^H \Phi \Phi^H)^{1/2}) \end{aligned} \right. \\ & i, i', k \in \mathcal{P}_k \\ & i \in \mathcal{P}_{i'}, i' \notin \mathcal{P}_k \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)是针对复高斯随机向量四阶矩进行计

$\mathbf{w}_{x,k}^p = \hat{\mathbf{g}}_{x,k} / \sqrt{\mathbb{E}\{\|\hat{\mathbf{g}}_{x,k}\|^2\}}$ , 分别表示对应公有流和私有流的预编码向量,  $\hat{\mathbf{g}}_{x,k} = [\hat{\mathbf{g}}_{x,1,k}^T, \dots, \hat{\mathbf{g}}_{x,L_x,k}^T]^T \in \mathbb{C}^{L_x N \times 1}$ 表示第 $x$ EDU下AP到第 $k$ 个UE估计到的聚合信道,  $p_x^c$ 和 $p_{x,k}^p$ 表示EDU $x$ 的公有和私有发射功率。第 $k$ 个UE接收到的信号为

$$\mathbf{r}_k = \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \mathbf{g}_{x,k}^H \left( \sqrt{p_x^c} \mathbf{w}_x^c s^c + \sum_{i \in \mathcal{K}} \sqrt{p_{x,i}^p} \mathbf{w}_{x,i}^p s_i^p \right) + \mathbf{z}_k \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{z}_k \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}_N)$ 表示加性高斯白噪声。

接收到 $\mathbf{r}_k$ 后, 首先解码 $s^c$ , 通过对(7)采用UatF策略得到

$$R_{c,k} = \mathbb{E} \left\{ \log_2 \left\{ 1 + \frac{|\text{DS}_{c,k}^c|^2}{|\text{BU}_{c,k}^c|^2 + \sum_{i \in \mathcal{K}} |\text{UI}_{p,k}^c|^2 + \sigma^2} \right\} \right\} \quad (9)$$

为了便于得到式(9)的闭式解, 首先给出以下引理<sup>[21]</sup>。

引理1 定义随机向量 $\mathbf{a}_k \sim \mathcal{CN}(\bar{\mathbf{a}}_k, \Phi_k)$ , 可得

算的基础恒等式。通过引理1和Jensen不等式,





可进一步计算采用MRT预编码时式(11)中的 $\mathbb{D}_{c,k}^c$ 、 $\mathbb{B}_{c,k}^c$ 和 $\mathbb{I}_{p,k}^c$ 。

**定理 1** 在莱斯信道下,第 $k$ 个UE公有流可达速率下界的闭式表达式为

$$\hat{R}_{c,k} = \log_2 \left\{ 1 + \frac{\mathbb{D}_{c,k}^c}{\mathbb{B}_{c,k}^c + \mathbb{I}_{p,k}^c + \sigma^2} \right\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{其中, } \mathbb{D}_{c,k}^c &= \left( \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sqrt{p_x^c} \alpha_{x,k} \right)^2, \quad \mathbb{B}_{c,k}^c = \\ &= \sum_{x \in \mathcal{M}_k} p_x^c \lambda_{x,x',i,k} \text{ 和 } \mathbb{I}_{p,k}^c = \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sum_{i \in \mathcal{K}} p_{x,i}^p o_{x,k,i} + \\ &= \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sum_{x' \in \mathcal{M}_k \setminus \{x\}} \sum_{i \in \mathcal{K}} \sqrt{p_{x,i}^p p_{x',i}^p} v_{x,x',k,i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{根据引理 1 得到 } \hat{\chi}_{k,i,i}^x &= \mathbb{E} \left\{ \hat{\mathbf{g}}_{x,k}^H \hat{\mathbf{g}}_{x,i} \hat{\mathbf{g}}_{x,i}^H \hat{\mathbf{g}}_{x,k} \right\} \text{ 和} \\ \omega_{x,k,i,i} &= \mathbb{E} \left\{ \mathbf{e}_{x,k}^H \hat{\mathbf{g}}_{x,i} \hat{\mathbf{g}}_{x,i}^H \mathbf{e}_{x,k} \right\}, \quad \text{其中, } \alpha_{x,k} = \\ &= \frac{1}{v_x} \sum_{i \in \mathcal{K}} \chi_{x,k,i}, \quad \chi_{x,k,i} = \\ &= \begin{cases} \text{Tr} \left( \bar{\mathbf{h}}_{x,k} \bar{\mathbf{h}}_{x,i}^H + \hat{\boldsymbol{\Omega}}_{x,k}^{1/2} \hat{\boldsymbol{\Omega}}_{x,i}^{1/2} \right) & i \in \mathcal{P}_k \\ \text{Tr} \left( \bar{\mathbf{h}}_{x,k} \bar{\mathbf{h}}_{x,i}^H \right) & i \notin \mathcal{P}_k \end{cases}, \quad \lambda_{x,x',i,k} = \\ &= \underbrace{\sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sqrt{p_{x,k}^p} \mathbb{E} \left\{ \mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_{x,k}^p \right\} s_k^p}_{\text{DS}_{p,k}^p} + \underbrace{\sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sqrt{p_{x,k}^p} \left( \mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_{x,k}^p - \mathbb{E} \left\{ \mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_{x,k}^p \right\} \right) s_k^p}_{\text{BU}_{p,k}^p} \\ &+ \underbrace{\sum_{i \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sqrt{p_{x,i}^p} \mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_{x,i}^p s_i^p}_{\text{UI}_{p,k}^p} + \mathbf{z}_k \end{aligned}$$

其中, $\text{DS}_{p,k}^p$ 表示私有流相干波束成形增益, $\text{BU}_{p,k}^p$ 表示私有流波束成形不确定性, $\text{UI}_{p,k}^p$ 表示

$$\begin{aligned} &= \sum_{i \in \mathcal{K}} \sum_{i' \in \mathcal{K}} \frac{1}{v_x} \left( \omega_{x,k,i,i'} + \hat{\chi}_{k,i,i'}^x - \chi_{x,k,i} \chi_{x,k,i'}^* \right), \quad v_x = \\ &= \text{Tr} \left( \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{k' \in \mathcal{K}} \bar{\mathbf{h}}_{x,k} \bar{\mathbf{h}}_{x,k'}^H + \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{k' \in \mathcal{P}_k} \hat{\boldsymbol{\Omega}}_{x,k}^{1/2} \hat{\boldsymbol{\Omega}}_{x,k'}^{1/2} \right) \\ &, \quad o_{x,k,i} = \frac{1}{v_{x,i}} \left( \hat{\chi}_{k,i,i}^x + \omega_{x,k,i} \right), \quad v_{x,x',k,i} = \\ &= \frac{1}{v_{x,i}^{1/2} v_{x',i}^{1/2}} \chi_{x,k,i} \chi_{x',k,i}^*, \quad v_{x,k} = \text{Tr} \left( \bar{\mathbf{h}}_{x,k} \bar{\mathbf{h}}_{x,k}^H + \hat{\boldsymbol{\Omega}}_{x,k} \right). \end{aligned}$$

由于RSMA中的公共流需要被所有目标用户成功解码,因此公共流的总可分配速率不能超过所有用户可支持公共流速率中的最小值。因此,式(11)实际受限于最差UE的可达速率:

$$\text{C1: } \sum_{k \in \mathcal{K}} C_k \leq \min_{k \in \mathcal{K}} \left\{ \hat{R}_{c,k} \right\} \quad (12)$$

其中, $C_k$ 为分配给第 $k$ 个UE的公有速率。

在成功解码公有信息后,假设每个UE通过完美串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)将其从接收信号中移除,继续采用UatF策略得到(13),将其他UE的私有信号全部视作干扰,解码自身私有信息,则第 $k$ 个UE接收的私有信息为 $\mathbf{r}_{p,k}$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{p,k} &= \underbrace{\sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sqrt{p_{x,k}^p} \mathbb{E} \left\{ \mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_{x,k}^p \right\} s_k^p}_{\text{DS}_{p,k}^p} + \underbrace{\sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sqrt{p_{x,k}^p} \left( \mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_{x,k}^p - \mathbb{E} \left\{ \mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_{x,k}^p \right\} \right) s_k^p}_{\text{BU}_{p,k}^p} \\ &+ \underbrace{\sum_{i \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sqrt{p_{x,i}^p} \mathbf{g}_{x,k}^H \mathbf{w}_{x,i}^p s_i^p}_{\text{UI}_{p,k}^p} + \mathbf{z}_k \end{aligned} \quad (13)$$

私有流其他UE干扰。由式(13)得到第 $k$ 个UE的遍历私有流可达速率为

$$R_{p,k} = \mathbb{E} \left\{ \log_2 \left\{ 1 + \frac{|\text{DS}_{p,k}^p|^2}{|\text{BU}_{p,k}^p|^2 + \sum_{i \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} |\text{UI}_{p,k}^p|^2 + \sigma^2} \right\} \right\} \quad (14)$$

通过式(14)和Jensen不等式,按照与定理1相同的步骤给出定理2。

**定理 2** 在莱斯信道下,第 $k$ 个UE私有流可达速

率下界的闭式表达式为

$$\hat{R}_{p,k} = \log_2 \left\{ 1 + \frac{\mathbb{D}_{p,k}^p}{\mathbb{B}_{p,k}^p + \mathbb{I}_{p,k}^p + \sigma^2} \right\} \quad (15)$$

其中,, 以及

$$\mathbb{D}_{p,k}^p = \left( \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \frac{1}{v_{x,k}^{1/2}} \sqrt{p_{x,k}^p} \chi_{x,k,k} \right)^2$$

$$\mathbb{B}_{p,k}^p + \mathbb{I}_{p,k}^p = \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sum_{i \in \mathcal{K}} p_{x,i}^p \bar{o}_{x,k,i} + \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sum_{x' \in \mathcal{M}_k \setminus \{x\}} \sum_{i \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} \sqrt{p_{x,i}^p p_{x',i}^p} \bar{v}_{x,x',k,i} \quad (16)$$

$$\bar{o}_{x,k,i} = \begin{cases} \frac{1}{v_{x,k}} \left( \hat{\chi}_{k,k,k}^x - |\chi_{x,k,k}|^2 \right) + \frac{1}{v_{x,i}} \omega_{x,k,i} & i = k \\ \frac{1}{v_{x,i}} \hat{\chi}_{k,i,i}^x + \frac{1}{v_{x,i}} \omega_{x,k,i} & i \neq k \end{cases} \quad (17)$$

$$\bar{v}_{x,x',k,i} = \frac{1}{v_{x,i}^{1/2} v_{x',i}^{1/2}} \chi_{x,k,i} \chi_{x',k,i}^* \quad (18)$$

**定理 3** 根据定理 1 和定理 2, 在 RSMA 可扩展 CF-RAN 架构下, 第  $k$  个 UE 的可达速率为  $\text{SE}_k = \hat{R}_{p,k} + C_k$ , 其由定理 1 的公共速率与定理 2 私有流速率下界相加得到, 式(12)进一步约束了公共速率。考虑到莱斯因子对  $\text{SE}_k$  的显著影响, 接下来将讨论两个极限 LoS 情形来深入探究其理论含义。

**推论 1** 当  $\kappa_{x,l,k} \rightarrow \infty$ , 对于  $\forall x \in \mathcal{M}_k, \forall l \in \mathcal{L}_x, \forall k \in \mathcal{K}$ , 信道变为 LoS 信道。此时,  $\text{SE}_k = \bar{R}_{p,k} + \bar{C}_k$ ,  $\bar{R}_{p,k}$  和  $\bar{C}_k$  分别代表 LoS 信道下私有速率和公有分配速率。

**推论 2** 当  $\kappa_{x,l,k} = 0$ , 对于  $\forall x \in \mathcal{M}_k, \forall l \in \mathcal{L}_x, \forall k \in \mathcal{K}$ , 信道变为 NLoS 信道。

此时,  $\text{SE}_k = \tilde{R}_{p,k} + \tilde{C}_k$ ,  $\tilde{R}_{p,k}$  和  $\tilde{C}_k$  代表 NLoS 信道下的速率。

推论 1 和推论 2 表明, 本文建立的一般莱斯衰落模型统一包含了 LoS 与 NLoS 两类经典传播环境, 因此定理 3 所得可达速率表达式具有良好的普适性。当莱斯因子由零逐渐增大时, 系统信道将由散射主导场景逐步过渡到 LoS 主导场景, 而本文的理论表达式也可随之连续退化到相应的经典特例。上述两个推论不仅验证了所建模型的合理性, 也为不同传播环境下 RSMA 可扩展 CF-RAN 系统的性能变化提供了理论依据。

### 3 RSMA 下联合功率速率分配

基于上述 RSMA 下行传输模型, 本节构建联合功率与速率分配的优化问题。该问题旨在满足 EDU 最大发射功率约束的条件下, 通过联合优化私有信号功率  $p_{x,k}^p$  公有信号功率  $p_x^c$  以及公共速率分配变量  $C_k$  来最大化系统的总可达速率。

#### 3.1 优化问题构建

建立优化问题为

$$\begin{aligned} \text{P1: } \max_{\{p_{x,k}^p, p_x^c, C_k\}} & \left\{ \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_c} \right) \left( \sum_{k \in \mathcal{K}} \hat{R}_{p,k} + \sum_{k \in \mathcal{K}} C_k \right) \right\} \\ \text{s.t. } & \text{C1, C2: } 0 \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} p_{x,k}^p + p_x^c \leq p_{\text{edu}}, \forall x \in \mathcal{M}_x, \forall k \in \mathcal{K} \end{aligned} \quad (19)$$

其中,  $\tau_c$  为相干块长度, 约束 C1 用于保证公共流分配速率不超过任一 UE 可支持的公共流解码能力, 从而确保公共流可被所有目标 UE 成功解码, 约束 C2 表示各 EDU 总发射功率受限于最大

发射功率阈值  $p_{\text{edu}}$ 。

#### 3.2 优化算法设计

由于问题 P1 中公共速率分配与各 UE 的解码能力密切相关, 而功率分配又直接影响信干噪



比,二者存在显著的耦合关系,使得该优化问题具有非凸特性,难以通过标准凸优化工具直接求解。采用SCA算法构造局部凸近似函数来取代非凸项,并引入松弛变量,将原优化问题P1分解为一系列可行的凸子问题。通过对子问题迭代求解,逐步逼近原问题的局部最优解。目标函数与约束C1均非凸,C2为凸约束。

首先,处理非凸约束C1:引入松弛变量 $q_{x,k}^p$ 和 $p_x^c$ 满足C3: $p_{x,k}^p \geq (q_{x,k}^p)^2, p_x^c \geq (q_x^c)^2$ ,得到 $\hat{R}_{c,k}$ 分子的下界 $\eta_{c,k} = \sum_{x \in \mathcal{M}_k} q_{x,k}^c \alpha_{x,k}$ 。注意,由于 $v_{x,x',i,k}$ 中的元素既可能为正也可能为负,因此对不同符号情形分别讨论,以保证凸近似约束的形

式一致。当 $v_{x,x',i,k} > 0$ ,为了线性化 $\hat{R}_{c,k}$ 分母,引入松弛变量 $l_{x,x',i,k}$ 满足C4: $l_{x,x',i,k}^2 \geq p_{x,i}^p p_{x',i}^p$ ;当 $v_{x,x',i,k} < 0$ 时,C4: $l_{x,x',i,k}^2 \leq p_{x,i}^p p_{x',i}^p$ 最终得到 $\hat{R}_{c,k}$ 分母的上界 $\mu_{c,k}$ ,即

$$\mu_{c,k} = \sum_{x \in \mathcal{M}_k} p_x^c o_{x,k} + \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sum_{x' \in \mathcal{M}_k \setminus \{x\}} \sum_{i \in \mathcal{K}} v_{x,x',i,k} l_{x,x',i,k} \quad (20)$$

最终得到 $\hat{R}_{c,k}$ 的下界为 $\log_2 \left( 1 + |\eta_{c,k}|^2 / \mu_{c,k} \right)$ 。

同理,处理非凸目标函数:引入约束C3和C4得到 $\hat{R}_{p,k}$ 分子的下界 $\zeta_{p,k} = \sum_{x \in \mathcal{M}_k} q_{x,k}^p \frac{1}{v_{x,k}^{1/2}} \chi_{x,k,k}$ 和分母的上界 $\hat{R}_{p,k}$ ,即

$$\zeta_{p,k} = \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sum_{i \in \mathcal{K}} p_{x,i}^p \bar{o}_{x,k,i} + \sum_{x \in \mathcal{M}_k} \sum_{x' \in \mathcal{M}_k \setminus \{x\}} \sum_{i \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} l_{x,x',i} \bar{v}_{x,x',i,k} \quad (21)$$

由此,可得 $\hat{R}_{p,k}$ 的下界为 $\log_2 \left( 1 + |\zeta_{p,k}|^2 / \zeta_{p,k} \right)$ 。进一步引入松弛变量 $\theta_{c,k}$ 和 $\vartheta_{p,k}$ 满足约束C5: $\hat{R}_{c,k} \geq \theta_{c,k}, \hat{R}_{p,k} \geq \vartheta_{p,k}$ ,解耦 $\hat{R}_{p,k}$ 与

$\hat{R}_{c,k}$ ,并将约束C1转换成凸约束C6: $\sum_{k \in \mathcal{K}} C_k \leq \min_{k \in \mathcal{K}} \{\theta_{c,k}\}$ ,从而将问题P1重构为问题P2:

$$\begin{aligned} \text{P2} \quad & \max_{\{p_{x,k}^p, p_x^c, q_{x,k}^p, q_x^c, \theta_{c,k}, \vartheta_{p,k}, C_k\}} \left\{ \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_c} \right) \left( \sum_{k \in \mathcal{K}} \theta_{c,k} + \sum_{k \in \mathcal{K}} C_k \right) \right\} \\ \text{s.t.} \quad & \text{C2 - C6} \end{aligned} \quad (22)$$

其中,C2、C3、C6为凸约束,而C4、C5为非凸约束。

为了处理非凸约束C4,引入以下不

等式<sup>[18][19]</sup>:

$$xy \leq X(x, y) \triangleq 0.5 \left( \frac{y^{(n)}}{x^{(n)}} x^2 + \frac{x^{(n)}}{y^{(n)}} y^2 \right) \quad (23)$$

$$xy \geq Y(x, y) \triangleq -0.25 \left[ (x - y)^2 - 2(x^{(n)} + y^{(n)})(x + y) + (x^{(n)} + y^{(n)})^2 \right] \quad (24)$$

其中, $x, y \in \mathbb{R}$ 。当 $v_{x,x',i,k} > 0$ ,通过式(23)构造 $p_{x,i}^p p_{x',i}^p$ 的上界,得到 $p_{x,i}^p p_{x',i}^p \leq X(p_{x,i}^p, p_{x',i}^p)$ ,对 $p_{x,i}^p p_{x',i}^p$ 进行一阶泰勒展开得到线性函数,得到凸约束C7,即

$$\text{C7: } 2l_{x,x',i,k} t_{x,x',i,k}^{(n)} - \left( t_{x,x',i,k}^{(n)} \right)^2 \geq X(p_{x,i}^p, p_{x',i}^p) \quad (25)$$

当 $v_{x,x',i,k} < 0$ 时,通过式(24)构造 $p_{x,i}^p p_{x',i}^p$ 的下界,得到 $p_{x,i}^p p_{x',i}^p \geq Y(p_{x,i}^p, p_{x',i}^p)$ ,得到约束C8: $l_{x,x',i,k}^2 \leq Y(p_{x,i}^p, p_{x',i}^p)$ 满足凸约束。对 $\bar{v}_{x,x',i,k}$ 同理得到凸约束C9和C10,即



$$\begin{aligned} \text{C9: } 2t_{x,x',i,k}t_{x,x',i,k}^{(n)} - \left(t_{x,x',i,k}^{(n)}\right)^2 &\geq X(p_{x,i}^p, p_{x',i}^p), \bar{v}_{x,x',i,k} > 0 \\ \text{C10: } t_{x,x',i,k}^2 &\leq Y(p_{x,i}^p, p_{x',i}^p), \bar{v}_{x,x',i,k} < 0 \end{aligned} \quad (26)$$

为了处理非凸约束C5，引入以下不等式<sup>[17]</sup>：

$$\log_2 \left( 1 + \frac{|x|^2}{y} \right) \geq F(x, y) \quad (27)$$

其中， $x \in \mathbb{C}, y > 0$ ， $F(x, y) = \log_2 \left( 1 + \frac{|x^{(n)}|^2}{y^{(n)}} \right) - \frac{|x^{(n)}|^2}{y^{(n)}} + 2 \frac{\Re(x^{(n)}x)}{y^{(n)}} - \frac{|x^{(n)}|^2(x^2 + y)}{y^{(n)}(|x^{(n)}|^2 + y^{(n)})}$ 。通过式

(27) 构造  $\hat{R}_{c,k}$  和  $\hat{R}_{p,k}$  的下界，得到  $\hat{R}_{c,k} \geq F(\eta_{c,k}, \mu_{c,k})$  和  $\hat{R}_{p,k} \geq F(\xi_{p,k}, \zeta_{p,k})$ ，进一步将约束C5转化为凸约束C11，即

$$\text{C11: } F(\eta_{c,k}, \mu_{c,k}) \geq \theta_{c,k}, F(\xi_{p,k}, \zeta_{p,k}) \geq \vartheta_{p,k} \quad (28)$$

综上，优化问题P2可重构为问题P3：

$$\begin{aligned} \text{P3} \quad & \max_{\{p_{x,k}^p, p_x^c, q_{x,k}^p, q_x^c, t_{x,x',i,k}, \theta_{c,k}, \vartheta_{p,k}\}} \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_c} \right) \left\{ \sum_{k \in \mathcal{K}} \theta_{c,k} + \sum_{k \in \mathcal{K}} C_k \right\} \\ \text{s.t.} \quad & \text{C2-C3, C6-C11} \end{aligned} \quad (29)$$

如图2所示，所提算法首先基于SCA方法对其非凸目标函数和非凸约束进行逐项凸化处理，从而在每次迭代中构造一个对应的凸子问题P3。算法初始化优化变量后，求解当前迭代下的凸子问题P3，并根据求解结果更新相关变量。随后，通过收敛判据判断相邻两次迭代的目标函数值是否足够接近：若满足收敛条件，则输出最终优化结果；否则继续进入下一轮迭代。

### 3.3 算法收敛性及复杂度分析

通过将原问题P1转化为凸子问题P3，所提算法在每次迭代中构造原非凸问题的凸下界近似并进行求解。所构造的近似函数满足：在当前迭

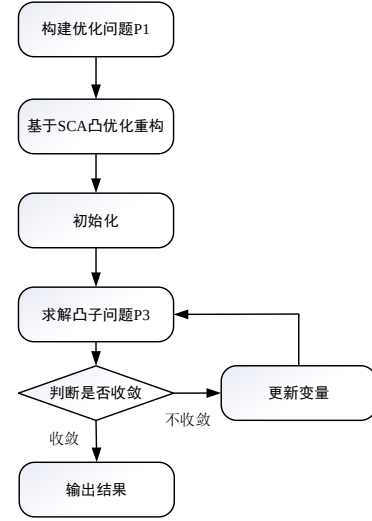


图2 算法框架

代点处与原函数一阶等价，且为原函数的全局下界。因此，每次迭代得到的目标函数值均不小于上一轮迭代，即系统总速率序列是单调非减的。同时，在发射功率约束C2下，系统总速率存在上界，故该单调非减序列必然收敛。根据SCA方法的收敛性理论，在近似函数满足连续性及其一阶一致性的条件下，所提迭代算法可保证收敛至原问题的最优解<sup>[18]</sup>。

所提算法采用SCA对原非凸问题进行逐次凸化。在每次迭代中，需求解一个重构后的凸子问题P3。该子问题的优化变量主要包括各EDU的公有流功率、各用户的私有流功率、公共速率分配变量以及凸化过程中引入的松弛变量。设凸子问题的优化变量总数为 $n_v$ ，则有 $n_v = M + MK + K + n_{aux}$ ，其中 $M$ 表示EDU数量， $K$ 表示用户数量， $n_{aux}$ 表示由分式变换、松弛替换及一阶近似引入的辅助变量个数。设凸子问题的约束总数为 $n_c$ ，其随系统规模和辅助变量数量的增加而增长。重构后子问题的维度主要由EDU数量、用户



数量以及 SCA 重构所引入的辅助变量共同决定<sup>[22]</sup>。采用内点法求解每轮 SCA 对应的凸子问题时，其单次迭代的计算复杂度可表示为  $\mathcal{O}(\sqrt{n_c}(n_v^3 + n_v^2 n_c + n_v n_c^2) \lg \varepsilon)$ ， $\varepsilon$  是一个确定的常数代表求解精度（本文设为 0.0001）。通过将  $n_v$  与  $n_c$  视为同阶量，单轮凸子问题求解复杂度可近似写为  $\mathcal{O}(n_v^{3.5})$ 。设 SCA 算法在  $I$  次迭代后收敛，则所提算法的总体计算复杂度可写为  $\mathcal{O}(I \sqrt{n_c}(n_v^3 + n_v^2 n_c + n_v n_c^2) \lg \varepsilon)$ ，近似为  $\mathcal{O}(I n_v^{3.5})$ 。每轮迭代还需要更新可达速率表达式中的相关统计量和线性化点，但该部分主要涉及标量及低维矩阵运算，其复杂度低于凸子问题的求解开销，因此总体复杂度由内点法求解过程主导，即为  $\mathcal{O}(I n_v^{3.5})$ 。

#### 4 仿真与分析

本文考虑一个  $200 \times 200 \text{m}^2$  的区域，该区域内 AP 环绕分布，UE 随机均匀分布，且离 AP 距离至少 30m。除非另有说明，仿真参数设置具体如表 1 所示，大尺度衰落系数  $\beta$  采用文献[3]的三斜率模型，莱斯因子  $\kappa$  采用文献[20]的模型。SDMA 作为 RSMA 的对照方案，其不进行消息拆分，仅发送各 UE 私有流；预编码结构、信道估计方式、功率约束均与 RSMA 方案保持一致，从而保证比较的公平性。两者的主要差异仅在于是否引入公共流及相应公共速率分配机制<sup>[15]</sup>。

表 1 仿真参数设置

| 参数              | 数值     |
|-----------------|--------|
| EDU 数量 $M$      | 2      |
| AP 数量 $L$       | 16     |
| AP 天线数 $N$      | 4      |
| UE 数量 $K$       | 6      |
| 相干块长度 $\tau_c$  | 200    |
| 噪声功率 $\sigma^2$ | -96dBm |
| 导频功率 $\rho$     | 0.1W   |

图 3 展示了在 AP 天线数  $N = \{4, 8, 16\}$  的情况下，所提出的 RSMA 方案与 SDMA 方案的总速率随迭代次数的变化趋势。所有曲线均在 10 次迭代后趋于稳定，表明本文所采用的 SCA 算法具有良好的收敛性。RSMA 方案的总速率在所有  $N$  值下均高于 SDMA 方案，验证了 RSMA 方案在不同天线配置下的干扰协调能力。此外，系统的总速率随着  $N$  的增加而提高，RSMA 与 SDMA 两个方案都能有效利用空间复用增益。具体而言，RSMA 方案在  $N=16$  时达到最高总速率，约为 37bit/s/Hz。

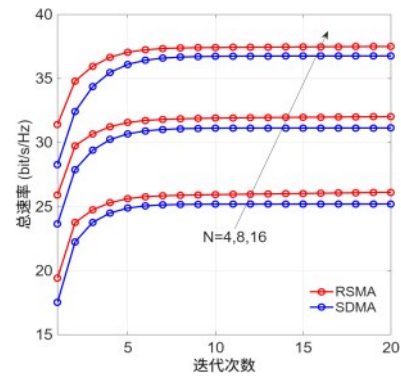


图 3 算法收敛性

图 4 给出了在莱斯和瑞利两种信道衰落模型下，系统总速率随导频数量  $\tau$  变化的趋势，对比了所提 RSMA 方案与 SDMA 方案的性能，蒙特卡洛仿真验证了推导的闭式表达式的正确性。随着导频数量增加，总速率整体呈上升并逐步趋于平缓的趋势，表明导频资源增大能够削弱导频污染、提升信道估计质量，从而提高可达速率。当导频数量达到一定水平后，系统瓶颈逐渐转为多 UE 干扰，导频数量增加边际收益减小。与此同时，莱斯信道曲线整体高于瑞利信道，体现出 LoS 分量带来的更强有效信道增益。更重要的是，在两类信道下 RSMA 均优于 SDMA 方案，说明 RSMA 能够更有效地部分解码干扰，在导频资源受限时仍保持更高的频谱效率与鲁棒性。

图 5 描绘了 RSMA 和 SDMA 方案的系统总速

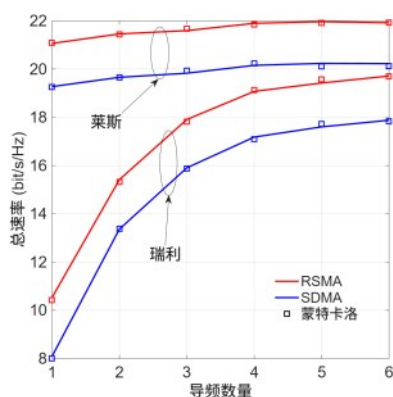


图4 系统总速率和导频数量关系

率随莱斯因子变化趋势。在莱斯因子低值区域 ( $\kappa < 0\text{dBm}$ ), 主要受限於信噪比和路径衰落, 系统的总速率处于较低水平。在  $0 < \kappa < 20\text{dBm}$  时, 随着莱斯因子增大, LoS 分量增强使等效信道更确定、相干增益提升, 总速率快速上升。然而, 在莱斯因子高值区域 ( $\kappa > 20\text{dBm}$ ), 总速率逐渐逼近上限并出现饱和, 反映出当 LoS 已足够强时, 性能瓶颈转已由信道质量转为多 UE 干扰与系统结构性约束。对比两种接入策略可见, RSMA 在整个区间均保持优势, 特别是在莱斯因子区域低值优势更为明显, 这充分验证了 RSMA 在复杂信道条件下具备更强的干扰管理与稳健传输能力。

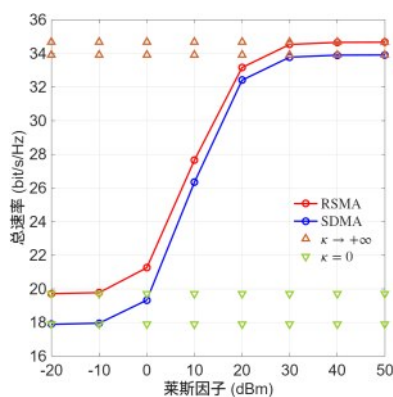


图5 系统总速率和莱斯因子关系

图6展示了在不同数量  $L = \{16, 32\}$  的配置下, 系统总速率随下行发射功率变化的性能曲线。在低功率区域 ( $0\text{dBm}$  至  $20\text{dBm}$ ) 时, 总速率随功

率增加而显著提升, 说明此时系统性能主要受功率限制。随着发射功率进一步增加 (功率大于  $20\text{dBm}$  区域), 系统总速率曲线趋于平稳并达到饱和, 此时系统性能受限因素由功率转变为 UE 间干扰。值得注意的是, 天线数从  $L = 16$  增大到  $L = 32$  带来更高的阵列增益和更强的空间区分能力, 使曲线整体上移。与此同时, 相比 SDMA, RSMA 方案在高功率区域仍可获得约  $2.5\text{bit/s/Hz}$  的性能增益, 表明 RSMA 能够有效地进行私有与公有的功率分配, 从而提升系统的可达速率。

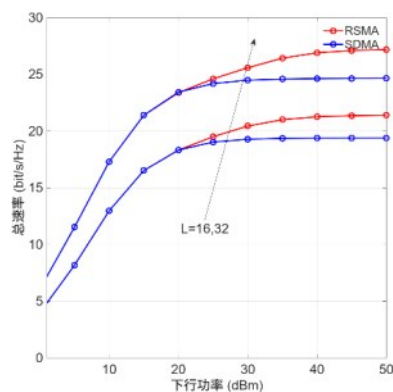


图6 系统总速率和下行功率关系

图7进一步对比了 RSMA 方案与 SDMA 方案的用户速率的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF)。结果显示, 对于所有  $N = \{4, 8, 16\}$  值, RSMA 方案的 CDF 曲线始终位于 SDMA 曲线的右侧, 说明了在给定的速率约束下, RSMA 方案能够满足更高比例的 UE 需求。具体而言, 当  $N = 4$  时, RSMA 的中位速率显著高于 SDMA。此外, 随着天线数  $N$  从 4 增加到 16, 两条曲线都向右侧移动且变得更加陡峭。曲线右移意味着平均速率的提升, 而陡峭程度的增加则反映了 UE 速率分布更为集中, 即系统公平性的改善。这归因于 RSMA 方案在保证系统高吞吐量的同时, 有效地提升了 UE 的公平性和最低可达速率, 在不同天线配置下实现了吞吐量与公平性的双重提升。

为进一步评估所提方案在不同分布和更大规

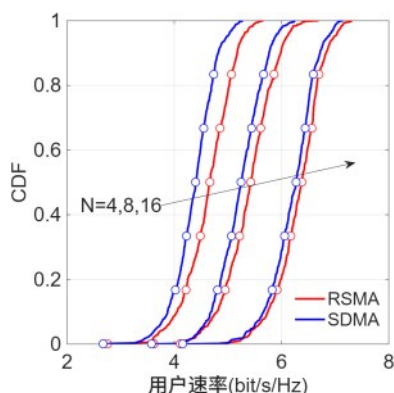


图7 不同天线用户CDF图

模接入场景下性能, 图8比较了EDU数目为 $M=4$ 时, 在AP均匀部署与AP非均匀部署两种分布下RSMA和SDMA传输方案的系统性能(UE与AP距离不限)。当系统规模由( $K=10, L=30$ )扩展到( $K=20, L=60$ )时, 两种方案的总速率均明显提升, 表明随着用户数和AP数同步增加, 系统可获得更强的协作增益。同时, 无论AP均匀部署还是AP非均匀部署场景, RSMA的性能始终优于SDMA, 说明RSMA在干扰受限环境中具有更强的干扰管理能力。与AP均匀部署相比, AP非均匀部署下两种传输方案的性能均出现下降, 这是因为用户集中会加剧局部资源竞争和多用户干扰。由此可见, RSMA在非均匀部署下仍能保持较明显的性能优势, 具有较强鲁棒性。

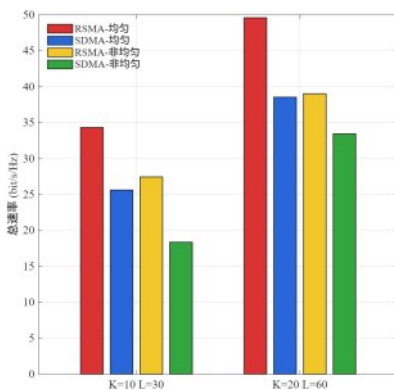


图8 大规模接入场景下系统总速率

## 5 结束语

本文围绕可扩展CF-RAN架构的下行RSMA系统展开研究, 针对导频污染与不完美莱斯信道对系统性能造成的影响。首先, 构建了更贴近实际部署的系统模型, 并利用UatF策略推导了公有与私有流可达速率的闭式下界。在此基础上, 针对EDU级功率约束与公有速率分配之间的耦合关系, 提出了最大化系统总速率的联合资源分配优化框架, 并利用SCA方法将原非凸问题转化为凸子问题以实现高效求解。仿真结果验证了闭式表达式的准确性和SCA算法良好的收敛性。结果进一步表明了RSMA相较于SDMA方案在不同天线、AP数量、导频长度、莱斯因子与发射功率条件下均展现出显著的性能优势。未来可进一步引入天线相关性, 研究其对CF-RAN资源分配策略的影响。

## 参考文献:

- [1] ELHOUSHY S, IBRAHIM M, HAMOUDA W. Cell-free massive MIMO: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 492-523.
- [2] YOU X H, WANG C X, HUANG Jie, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. Science China information sciences, 2021, 64(1): 110-301.
- [3] BJORNSSON E. and SANGUINETTI L. Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(1), 77-90.
- [4] WANG D M, YOU X H, HUANG Y M, et al. Full-spectrum cell-free RAN for 6G systems: System design and experimental results[J]. Science China Information Sciences, 2023, 66(3).
- [5] 吴越,王东明,尤肖虎. 面向6G的无蜂窝无线接入网技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(04): 14-25.  
WU Y, WANG D M, YOU X H. Cell-free wireless access network technologies for 6G[J]. ZTE Communications, 2024, 30 (04): 14 - 25.
- [6] 王博业,夏玮玮,缪巍巍,等. 一种面向资源高效利用的无蜂窝RAN分层协同资源分配算法[J]. 电信科学,2025,41(11):31-46.



- WANG B Y, XIA W W, MIAO W W, et al. A hierarchical cooperative resource allocation algorithm for cell-free RAN toward resource-efficient utilization[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(11): 31-46.
- [7] 田卓岩,王洁,李佳珉,等. 上行无蜂窝通感一体化系统的导频设计与优化[J]. 电信科学, 2026, 42(1): 43-52.
- TIAN Z Y, WANG J, LI J M, et al. Pilot design and optimization in uplink cell-free integrated sensing and communication systems [J]. Telecommunications Science, 2026, 42(1): 43-52.
- [8] 郭云翔,王东明,夏心江,等. 可扩展无蜂窝无线接入网性能分析: 一种随机几何方法[J]. 信号处理, 2024, 40(8): 1440-1451.
- GUO Y X, WANG D M, XIA X J, et al. Performance analysis of scalable cell-free wireless access networks: A stochastic geometry approach[J]. Signal Processing, 2024, 40(8): 1440 - 1451.
- [9] TENTU V, NAIDU A D, PRAKASH B O, et al. Use of downlink pilots for cache-aided Rician-faded cell-free massive MIMO systems: Investigation, analysis and optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(11): 7308-7326.
- [10] OZDOGAN O, BJORNSSON E, LARSSON E G. Massive MIMO with spatially correlated Rician fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(5): 3234-3250.
- [11] FEMENIAS G, RIERA-PALOU F, ÁLVAREZ-POLEGRE A, et al. Short-term power constrained cell-free massive-MIMO over spatially correlated Ricean fading[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15200-15215.
- [12] ZHENG J K, ZHANG J Y, DU H Y, et al. Rate-splitting for cell-free massive MIMO: Performance analysis and generative AI approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(4): 2431-2447.
- [13] DEY S, BHARTI T and BUDHIRAJA R. RSMA in massive MIMO systems: Analysis and optimization in correlated Rician-faded channels with phase shifts and aging. IEEE Transactions on Communications. 2024, 72(1), 239-256,
- [14] ZHENG J K, ZHANG J Y, CHENG J L, et al. Asynchronous cell-free massive MIMO with rate-splitting[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(5): 1366-1382.
- [15] FLORES A R, DE LAMARE R C, MISHRA K V. Clustered cell-free multi-user multiple-antenna systems with rate-splitting: Precoder design and power allocation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(10): 5920-5934.
- [16] ZHANG Y, ZHAO H T, MAO Y J, et al. Rate-splitting multiple access in cell-free massive MIMO-URLLC systems: Achievable rate analysis and optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(11): 6752-6767.
- [17] MOHAMMADI M, TUNG T V, NGO H Q, et al. Network-assisted full-duplex cell-free massive MIMO: Spectral and energy efficiencies[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(9): 2833-2851.
- [18] TRAN L N, HANIF M F, TOLLI A, et al. Fast Converging algorithm for weighted sum rate maximization in multicell MISO downlink[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(12): 872-875.
- [19] NGUYEN V D, DUONG T Q, TUAN H D, et al. Spectral and energy efficiencies in full-duplex wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(5): 2220-2233.
- [20] ZHANG Y, YANG L X, ZHU H B. Cell-free massive MIMO systems with low-resolution ADCs: The Rician fading case[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1): 1471-1482.
- [21] ZHU P C, LI J M, WANG D M, et al. Large system performance and distributed scheme of downlink beamforming in F-RANs with distributed antennas[J]. IEEE Access, 2019, 7: 33441-33453.
- [22] 李亚鹏,马骏宇,李强等. 可重构智能表面辅助的通信抗干扰性能优化[J]. 电信科学, 2025, 41(07):15-29.
- LI Y P, MA J Y, LI Q, et al. Performance optimization on RIS-assisted communication for anti-jamming[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(07):15-29.

#### [作者简介]



蒋瀚成 (2001-), 男, 南京信息工程大学电子与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无蜂窝大规模MIMO技术。



殷逸诚 (2001-), 男, 南京信息工程大学电子与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无蜂窝大规模MIMO技术。



易柏有 (1998-), 男, 南京信息工程大学电子与信息工程学院博士生, 主要研究方向为无蜂窝大规模MIMO技术。



张余 (1987-), 男, 南京信息工程大学电子与信息工程学院讲师, 主要研究方向为无蜂窝大规模MIMO传输理论。



刘利兰 (1992-), 女, 南京信息工程大学电子与信息工程学院讲师, 主要研究方向为高效无线通信技术。





程方 (1972-), 女, 南京信息工程大学电子与信息工程学院教授, 主要研究方向为移动通信网络架构、测试及优化技术。



张治中 (1972-), 男, 南京信息工程大学电子与信息工程学院教授, 主要研究方向为LTE/5G/6G移动通信与信息处理、通信网测试及仪表技术、移动大数据、物联网等。