



下行 NOMA-HetNet 中联合干扰对齐与功率分配的干扰管理方案

景小荣^{1,2*}, 陈怡西¹, 高维¹, 陈前斌²

1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

2. 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065

* 通信作者. E-mail: jingxr@cqupt.edu.cn

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-12-21; 接受日期: 2022-01-24; 网络出版日期: 2023-02-02

国家自然科学基金 (批准号: 61701062) 和重庆市基础与前沿研究计划 (批准号: cstc2019jcyj-msxmX0079) 资助项目

摘要 在基于马特恩簇过程的下行非正交多址接入型异构网 (non-orthogonal multiple access heterogeneous network, NOMA-HetNet) 中, 针对典型宏小区中不同干扰类型, 提出一种联合干扰对齐 (interference alignment, IA) 与功率分配 (power allocation, PA) 的干扰管理方案. 在该方案中, 在分析 IA 可行性的基础上, 通过设计基于干扰信道对齐的两阶段式 IA 算法、微基站 (small base station, SBS) 预编码矢量和宏用户 (macro user, MUE) 检测矢量, 来分别消除宏基站 (macro base station, MBS) 对微用户 (small user, SUE) 的层间干扰、SBS 对 SUE 的簇间干扰和 SBS 对 MUE 的层间干扰. 同时, 为抑制簇内干扰, 以最大化系统和速率为目标, 构建一基于 PA 的非凸优化问题, 并通过非线性最小速率约束条件线性化处理, 将原问题转化为凸优化问题, 进而利用卡罗需-库恩-塔克 (Karush-Kuhn-Tucker) 最优性条件, 从理论上推导出该问题的最优闭式解. 仿真结果验证了所提干扰管理方案的有效性.

关键词 非正交多址接入型异构网, 干扰管理, 干扰对齐, 功率分配, 凸优化

1 引言

由发射功率、覆盖范围和分布密度不同的多种类型基站 (base station, BS) 构成的密集异构网络 (heterogeneous network, HetNet)^[1], 作为一种富有前景的无线网络技术得到了广泛研究. 具体来说, 在 HetNets 中, 对于发射功率相对较高、分布密度相对较小、覆盖区域相对较广的宏基站 (macro base station, MBS), 其部署位置通常经过细致的网络规划, 以对通信区域实现广域覆盖. 而发射功率较小、分布密度较大、覆盖区域相对较窄的小基站 (small base station, SBS) 通常是作为 MBS 的补充部署, 在实现局部覆盖的同时降低网络整体功耗. 传统的 HetNet 通常采用正交多址接入 (orthogonal multiple

引用格式: 景小荣, 陈怡西, 高维, 等. 下行 NOMA-HetNet 中联合干扰对齐与功率分配的干扰管理方案. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 365–386, doi: 10.1360/SSI-2021-0344
Jing X R, Chen Y X, Gao W, et al. Joint interference alignment and power allocation interference management scheme for downlink NOMA-HetNet (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 365–386, doi: 10.1360/SSI-2021-0344

access, OMA) 方式为系统用户 (user, UE) 提供服务, 使得在特定时刻服务的 UE 数量严格受到可用无线资源的限制. 考虑到未来 UE 数量的爆炸式增长, 未来网络承载海量连接, 因此, 亟需采用更为高效的无线接入方案, 以解决有限无线频宽资源与海量数据高速传输需求之间的矛盾. 而非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 技术利用 UE 信道增益的差别, 将多个 UE 复用到功率域进行非正交调度, 使得在同一时频资源上能够为多个 UE 提供服务, 因此, NOMA 技术能以高效的方式缓解频谱资源的稀缺性, 同时又可提升网络吞吐量^[2]. 鉴于此, 在 HetNet 中融合 NOMA 技术, 形成 NOMA-HetNet, 将大幅度提高网络容量和增强网络覆盖, 从而满足海量连接用户的通信需求.

聚焦于 NOMA-HetNet, 学者们从不同角度展开了研究. 从系统角度, 文献 [3] 对并存 NOMA 和 OMA 的 NOMA-HetNet 的网络容量进行了理论分析. 作者在文献 [4] 中对基于非协调联合传输的 NOMA-HetNet 的下行链路吞吐量进行了初步研究. 针对 NOMA-HetNet 中的资源分配问题, Baidas 等^[5] 研究了基于能量收集的双层 NOMA-HetNet 中的联合子载波分配和全局节能功率分配 (power allocation, PA) 问题. 针对非完美下行 NOMA, 文献 [6, 7] 研究了 NOMA 分簇及功率和带宽优化分配等问题. 兼顾能量效率, Zhang 等^[8] 研究了节能资源分配问题. Ali 等^[9] 则兼顾公平性, 提出了一种高效节能资源分配方案. 这些研究工作大都通过资源优化分配来提高 NOMA-HetNet 的覆盖性能及用户服务质量, 然而 NOMA-HetNet 的异构特质及频谱复用等因素, 使 NOMA-HetNet 在干扰管理方面面临着严重的挑战.

为此, 针对 NOMA-HetNet 的干扰管控策略研究逐渐成为学者们关注的焦点. 需要指出的是, 将 NOMA 技术应用在 HetNet 中, 虽会产生一定复用增益, 但同时也会给系统带来额外的簇内干扰^[10]. 簇内干扰管控主要通过 PA 方案进行抑制^[11, 12]. 于是, 在文献 [13] 提出的框架基础上, 文献 [14] 采用启发式差分进化算法, 提出了一种基于 PA 的非协作博弈算法以缓解簇内干扰, 但仅对每簇的总功率分配进行了研究, 未考虑簇内 PA 方案的影响. 以最大化和速率为优化目标, 为使每个 NOMA 簇的总吞吐量最大化, 文献 [15] 采用拉格朗日乘法推导出了分簇 NOMA 系统的最优 PA 策略, 并通过数值仿真比较了 NOMA 和 OMA 的性能. 文献 [16] 在确知全局信道状态信息 (channel state information, CSI) 和平均 CSI 两种情况下, 为最大可能保证下行 NOMA 用户间的公平性, 研究了最优 PA 问题. 然而这些 PA 方案均默认优化问题满足可行性条件, 即存在最优解, 而未考虑系统参数和环境的影响. 根据文献 [16, 17] 所述, 在某些情况下, 优化问题在理论上可能存在无解. 因此, 为了全面分析优化问题, 在求解问题最优解时, 讨论优化问题的可行性条件非常必要. 除此之外, 针对 NOMA-HetNet 中的跨层干扰和层内干扰, 从功率和资源块分配角度出发, 文献 [18] 提出了一种加权受限的快速迭代算法. 在该方法中, 利用资源块分配的稀疏性, 研究了基于压缩感知理论的干扰管理技术, 但该研究中 BS 和 UE 均配置单天线, 且每簇仅包括 2 个 UE. 作为一种能够有效解决小区间干扰问题的方法, 干扰对齐 (interference alignment, IA) 技术在不同信道环境下被广泛研究, 如 X 信道^[19]、多用户干扰信道^[20, 21]、异构网络^[22~24] 和认知无线网络^[25]. 利用大规模 MIMO 提供的自由度, Nasser 等^[13] 针对 NOMA-HetNet 提出一种基于 IA 和协作波束形成的跨层干扰抑制框架, 但该研究仅针对跨层干扰进行了处理.

在上述分析的基础上, 针对现有 NOMA-HetNet 中干扰管理研究工作的不足, 本文提出一种联合 IA 与 PA 的干扰管理方案, 其主要创新工作总结如下.

- 根据随机几何理论, 基于马特恩 (Matérn) 簇过程的正交 NOMA-HetNet, 从理论上对网络中存在的干扰进行了科学分类, 提出了 IA 和 PA 相结合的干扰管控策略. 常规针对 NOMA 系统的干扰消除研究, 大多数没有考虑 BS, 包括 MBS 和 SBS 及其用户, 包括宏用户 (macro user, MUE) 和微用户 (small user, SUE) 的随机分布特性.

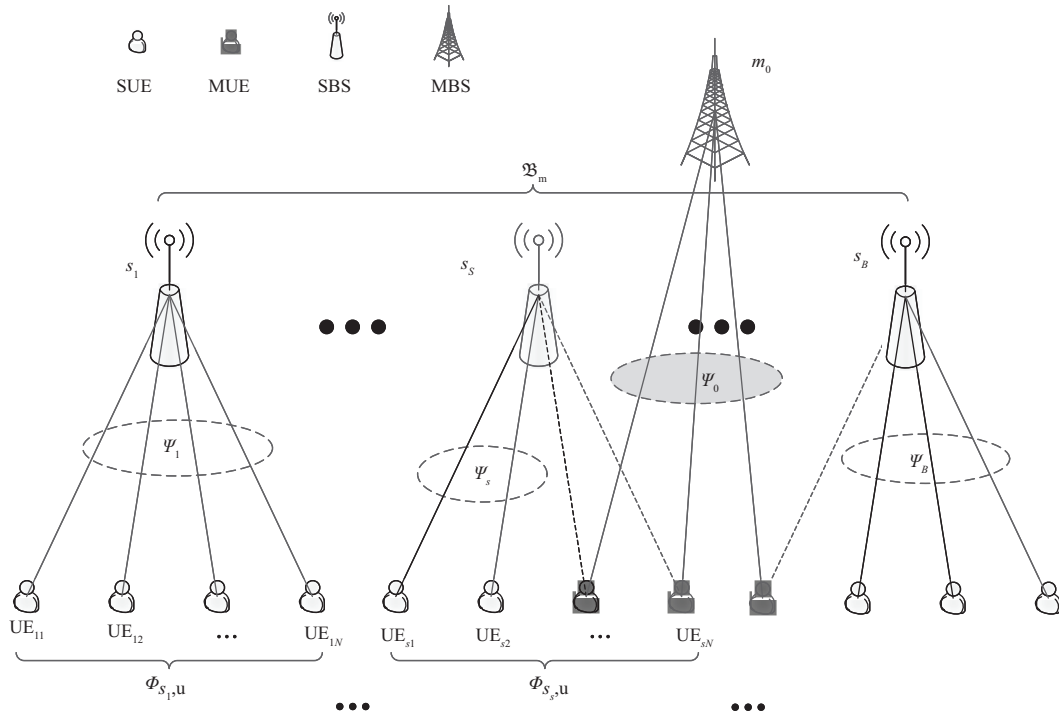


图 1 系统模型
Figure 1 System model

• 针对簇间干扰和层间干扰, 在分析 IA 可行性条件的基础上, 首先采用基于干扰信道对齐的两阶段式 IA 算法消除了 MBS 对 SUE 的层间干扰, 其次设计 SBS 的预编码矢量消除了 SBS 对 SUE 的簇间干扰, 最后设计 MUE 的检测矢量消除了 SBS 对 MUE 的层间干扰. 而在 NOMA 系统中, 对于簇内干扰, 通常仅利用有序干扰抵消 (successive interference cancellation, SIC) 技术来处理.

• 为了缓解簇内干扰, 以最大化系统和速率为目标, 建立基于 PA 的优化问题, 通过将原问题转换为凸优化问题, 利用卡罗需 - 库恩 - 塔克 (Karush-Kuhn-Tucker) 最优性条件, 推导出了待求问题最优解的闭式表达式. 同时, 证明了 NOMA 相较于 OMA 在提升系统和速率方面的优势.

2 系统模型

2.1 系统描述

考虑基于马特恩簇过程的双层 NOMA-HetNet 模型, 具体如图 1 所示, 其中宏小区内 MBS 服从强度为 λ_m 的齐次泊松点过程, 小小区内 SBS 为马特恩簇过程的父过程点, 假设其服从强度为 λ_s 的齐次泊松点过程. UE 为马特恩簇过程的子过程点, 在各小小区内, N 个 UE 均匀地分布在以 SBS 为圆心, R 为簇半径的圆内. 该模型包括两层, 其中宏小区层包含 1 个配备有 M_m 根天线的 MBS, 用 m_0 表示, 其最大发射功率为 P_{tm} . 小小区层包含 B 个 SBS, 以集合 $\mathcal{B}_m = \{s_1, \dots, s_s, \dots, s_B\}$ 表示, 每个 SBS 配备 M_s 根天线, 其最大发射功率为 P_{ts} , 其中 $B = \langle \lambda_s / \lambda_m \rangle$, $\langle \cdot \rangle$ 表示四舍五入取整操作.

令 $\Phi_{s_s, u} = \{UE_{s1}, \dots, UE_{sn}, \dots, UE_{sN}\}$ 表示 SBS s_s 覆盖范围内的用户集合, 则典型宏小区内的用户集合可表示为 $\Phi_u = \{\Phi_{s_1, u}, \dots, \Phi_{s_s, u}, \dots, \Phi_{s_B, u}\}$. 为便于分析, 假设各用户配置 N_t 根天线, 且系

统中每个 UE 存在 2 个候选关联 BS, 分别为父过程点 SBS、父过程点 SBS 所在宏小区内的 MBS. 根据平均接收功率最大化原则, UE 选择其中之一与之相关联. 对于关联同一 BS 的所有 UE, 形成一个簇, 采用 NOMA 方式与关联 BS 进行通信. 将关联到 MBS \mathbf{m}_0 的用户所形成的 NOMA 簇 Ψ_0 定义为 MUE, 用集合 $\Psi_0 = \{\mathbf{u}_{01}, \dots, \mathbf{u}_{0n}, \dots, \mathbf{u}_{0|\Psi_0|}\}$ 表示, 由 MBS \mathbf{m}_0 向其发送下行叠加信号. 由关联到 SBS \mathbf{s}_s 的用户所形成的 NOMA 簇 Ψ_s , 用集合 $\Psi_s = \{\mathbf{u}_{s1}, \dots, \mathbf{u}_{sn}, \dots, \mathbf{u}_{s|\Psi_s|}\}$ 表示, 定义为 SUE, 则由 SBS \mathbf{s}_s 向其发送下行叠加信号, $|\Psi_0|$ 和 $|\Psi_s|$ 分别表示关联到 MBS \mathbf{m}_0 和 SBS \mathbf{s}_s 的用户数, 其中 $s = 1, 2, \dots, B$.

2.2 信号模型

假设 x_{sn} 和 x_{0n} 分别表示 SBS \mathbf{s}_s 和 MBS \mathbf{m}_0 发送给簇内第 n 个用户的原始信号, p_{sn} 和 p_{0n} 分别表示 SBS \mathbf{s}_s 和 MBS \mathbf{m}_0 给簇内第 n 个用户分配的功率, 则 SBS \mathbf{s}_s 和 MBS \mathbf{m}_0 向各自对应的簇内用户发送的叠加信号 (或称作簇信号) 可分别表示如下:

$$\tilde{x}_s = \sqrt{p_{s1}}x_{s1} + \dots + \sqrt{p_{sn}}x_{sn} + \dots + \sqrt{p_{s|\Psi_s|}}x_{s|\Psi_s|}, \quad (1)$$

$$\tilde{x}_0 = \sqrt{p_{01}}x_{01} + \dots + \sqrt{p_{0n}}x_{0n} + \dots + \sqrt{p_{0|\Psi_0|}}x_{0|\Psi_0|}. \quad (2)$$

叠加信号经 BS 预编码处理后进行传输, 接收端 UE 则采用检测矢量对接收信号进行处理. 于是, SUE \mathbf{u}_{sn} 处信号可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{sn} &= \mathbf{w}_{sn}^H y_{sn} \\ &= \mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sns} \mathbf{v}_s \sqrt{p_{sn}} x_{sn} + \mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sns} \mathbf{v}_s \sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_s|} \sqrt{p_{sj}} x_{sj} + \sum_{t=1, t \neq s}^B \mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{snt} \mathbf{v}_t \tilde{x}_t \\ &\quad + \mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sn0} \mathbf{v}_0 \tilde{x}_0 + \mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{n}_{sn}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{v}_s \in \mathcal{C}^{M_s \times 1}$ 表示 SBS \mathbf{s}_s 给簇内用户配置的预编码矢量, $\mathbf{w}_{sn} \in \mathcal{C}^{N_t \times 1}$ 表示 SUE \mathbf{u}_{sn} 对接收信号处理时采用的检测矢量, $\mathbf{H}_{snt} \in \mathcal{C}^{N_t \times M_s}$ 表示 SBS \mathbf{s}_s 簇内 SUE \mathbf{u}_{sn} 与 SBS \mathbf{s}_t 之间的瑞利 (Rayleigh) 衰落信道, $\mathbf{H}_{sn0} \in \mathcal{C}^{N_t \times M_m}$ 表示 SBS \mathbf{s}_s 簇内 SUE \mathbf{u}_{sn} 与 MBS \mathbf{m}_0 之间的瑞利衰落信道. 在式 (3) 中, 等式右边第 1 项为 SUE \mathbf{u}_{sn} 的期望信号, 第 2 项为簇内干扰, 第 3 项为簇间干扰, 第 4 项为 MBS \mathbf{m}_0 产生的层间干扰, 第 5 项为噪声.

同理, MUE \mathbf{u}_{0n} 处信号可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{0n} &= \mathbf{w}_{0n}^H y_{0n} \\ &= \mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0n0} \mathbf{v}_0 \sqrt{p_{0n}} x_{0n} + \mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0n0} \mathbf{v}_0 \sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_0|} \sqrt{p_{0j}} x_{0j} + \sum_{s=1}^B \mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0ns} \mathbf{v}_s \tilde{x}_s + \mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{n}_{0n}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{v}_0 \in \mathcal{C}^{M_m \times 1}$ 表示 MBS \mathbf{m}_0 给簇内用户配置的预编码矢量, $\mathbf{w}_{0n} \in \mathcal{C}^{N_t \times 1}$ 表示 MUE \mathbf{u}_{0n} 对接收信号处理时采用的检测矢量, $\mathbf{H}_{0n0} \in \mathcal{C}^{N_t \times M_m}$ 表示 MBS \mathbf{m}_0 簇内 MUE \mathbf{u}_{0n} 与 MBS \mathbf{m}_0 之间的瑞利衰落信道, $\mathbf{H}_{0ns} \in \mathcal{C}^{N_t \times M_s}$ 表示 MBS \mathbf{m}_0 簇内 MUE \mathbf{u}_{0n} 与 SBS \mathbf{s}_s 之间的瑞利衰落信道. 在式 (4) 中, 等式右边第 1 项为 MUE \mathbf{u}_{0n} 的期望信号, 第 2 项为簇内干扰信号, 第 3 项为层间干扰, 第 4 项为噪声干扰.

根据式 (3) 和 (4), SUE \mathbf{u}_{sn} 和 MUE \mathbf{u}_{0n} 的信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 可分别表示为

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{sn} &= \frac{|\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sns} \mathbf{v}_s|^2 p_{sn}}{|\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sns} \mathbf{v}_s|^2 \sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_s|} p_{sj} + \sum_{t=1, t \neq s}^B |\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{snt} \mathbf{v}_t|^2 p_t + |\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sn0} \mathbf{v}_0|^2 p_0 + |\mathbf{w}_{sn}^H|^2 \sigma^2} \\ &= \frac{p_{sn} g_{sn}}{\sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_s|} p_{sj} g_{sn} + 1}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{0n} &= \frac{|\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0n0} \mathbf{v}_0|^2 p_{0n}}{|\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0n0} \mathbf{v}_0|^2 \sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_0|} p_{0j} + \sum_{s=1}^B |\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0ns} \mathbf{v}_s|^2 p_s + |\mathbf{w}_{0n}^H|^2 \sigma^2} \\ &= \frac{p_{0n} g_{0n}}{\sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_0|} p_{0j} g_{0n} + 1}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 g_{sn} 和 g_{0n} 分别表示 UE \mathbf{u}_{sn} 和 UE \mathbf{u}_{0n} 的归一化信道增益, 分别如式 (7) 和 (8) 所示:

$$g_{sn} = \frac{|\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sns} \mathbf{v}_s|^2}{\sum_{t=1, t \neq s}^B |\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{snt} \mathbf{v}_t|^2 p_t + |\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sn0} \mathbf{v}_0|^2 p_0 + |\mathbf{w}_{sn}^H|^2 \sigma^2}, \quad (7)$$

$$g_{0n} = \frac{|\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0n0} \mathbf{v}_0|^2}{\sum_{s=1}^B |\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0ns} \mathbf{v}_s|^2 p_s + |\mathbf{w}_{0n}^H|^2 \sigma^2}. \quad (8)$$

3 联合 IA 与 PA 的干扰管理方案

在对基于马特恩簇过程的下行 NOMA-HetNet 系统模型和信号模型分析的基础上, 本节针对典型宏小区中不同的干扰类型, 给出一种联合 IA 与 PA 的干扰管理方案. 在该方案中, 在分析 IA 可行性的基础上, 首先利用 IA 技术, 对簇间干扰和层间干扰进行处理. 然后, 在此基础上, 利用 PA 实现簇内干扰抑制. 下面给出详细的分析.

3.1 基于 IA 的簇间干扰和层间干扰管理方案

3.1.1 IA 可行性分析

针对系统中存在的干扰问题, 本小节采用 IA 技术对簇间干扰和层间干扰进行管理. 根据 IA 技术原理, 若要完全消除簇间干扰和层间干扰, 期望信号空间应与干扰信号空间正交. 根据 2.2 小节的信号模型, 必须满足以下条件:

$$\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{snt} \mathbf{v}_t = 0, \quad s = 1, \dots, B; \quad t = 1, \dots, B, \quad t \neq s; \quad n = 1, \dots, |\Psi_s|, \quad (9)$$

$$\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sn0} \mathbf{v}_0 = 0, \quad s = 1, \dots, B; \quad n = 1, \dots, |\Psi_s|, \quad (10)$$

$$\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0ns} \mathbf{v}_s = 0, \quad s = 1, \dots, B; \quad n = 1, \dots, |\Psi_s|, \quad (11)$$

$$\text{rank}(\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0n0} \mathbf{v}_0) = 1, \quad n = 1, \dots, |\Psi_0|, \quad (12)$$

$$\text{rank}(\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sns} \mathbf{v}_s) = 1, \quad s = 1, \dots, B; \quad n = 1, \dots, |\Psi_s|, \quad (13)$$

其中式 (9) 保证各 SBS 传输的簇信号之间干扰为零, 式 (10) 保证 MBS 传输的簇信号对所有 SBS 传输的簇信号的干扰为零, 式 (11) 保证所有 SBS 传输的簇信号对 MBS 传输的簇信号的干扰为零, 式 (12) 和 (13) 保证 MBS 簇用户及所有 SBS 簇用户能顺利接收到期望信号.

根据 Bezout 定理, 在一般多项式方程组中, 只有变量数不少于方程数, 方程组方可能有解. 反之, 则方程组无解. 针对该模型, 记式 (9)~(11) 中的方程数和变量数分别为 N_{e1} , N_{e2} , N_{e3} 和 N_{v1} , N_{v2} , N_{v3} , 并对式 (9)~(11) 的变量数和方程数进行分析, 得到如下结果:

$$N_{e1} = (B - 1) \sum_{s=1}^B |\Psi_s|, \quad (14)$$

$$N_{v1} = (N_t - 1) \sum_{s=1}^B |\Psi_s| + B(M_s - 1), \quad (15)$$

$$N_{e2} = \sum_{s=1}^B |\Psi_s|, \quad (16)$$

$$N_{v2} = (N_t - 1) \sum_{s=1}^B |\Psi_s| + (M_m - 1), \quad (17)$$

$$N_{e3} = B |\Psi_0|, \quad (18)$$

$$N_{v3} = (N_t - 1) |\Psi_0| + B(M_s - 1). \quad (19)$$

因此, 若要完全消除簇间干扰和层间干扰, 必须满足

$$\begin{cases} (B - 1) \sum_{s=1}^B |\Psi_s| \leq (N_t - 1) \sum_{s=1}^B |\Psi_s| + B(M_s - 1), \\ \sum_{s=1}^B |\Psi_s| \leq (N_t - 1) \sum_{s=1}^B |\Psi_s| + (M_m - 1), \\ B |\Psi_0| \leq (N_t - 1) |\Psi_0| + B(M_s - 1), \end{cases} \quad (20)$$

即只有 $N_t \geq B + 1$ 方可保证式 (20) 成立.

3.1.2 IA 方案设计

根据 3GPP 对 5G 网络架构的描述, 在宏-微覆盖场景下, 可通过 SBS 负责容量、MBS 负责覆盖, 以及 SBS 间资源协同管理的方式, 实现接入网间的信息交互共享. 于是, 类似于文献 [15, 16, 20], 文中假设双层 NOMA-HetNet 的工作模式为时分双工模式, 且 BS 确知完美全局 CSI, 即各 BS 确知其与各用户间的 CSI. 在实际中, 所有 BS, 包括 MBS 和 SBS, 可向各类用户发送导频数据, 用户采用信道估计来获得 CSI, 而 BS 可利用信道互易性获得对应的 CSI, 并通过回传链路将获得的 CSI 反馈给中心节点进行共享, 从而保证各 BS 共享其与各用户间的 CSI. 基于此假设, 本小节将针对双层 NOMA-HetNet, 给出基于 IA 的簇间干扰和层间干扰消除算法.

步骤 1. 消除 MBS 对 SUE 的层间干扰. 首先, 针对 MBS 对 SUE 产生的层间干扰, 采用基于干扰信道对齐的两阶段式 IA 算法消除干扰. 在阶段 1, 针对任意 SBS $s_s \in \mathcal{B}_m$, 将来自 MBS m_0 的干扰信号对齐到同一子空间 τ_{s_0} . 具体表述为, 对 SBS s_s 簇内的 $|\Psi_s|$ 个 SUE 而言, 通过设计相应的检测矢量 \mathbf{w}_{s_n} , 将簇内用户的干扰信道对齐到同一子空间, 即将它们受到的层间干扰对齐到干扰空间 τ_{s_0} 内, 具体如下所示:

$$\text{span}(\mathbf{H}_{s_{10}}^H \mathbf{w}_{s_1}) = \cdots = \text{span}(\mathbf{H}_{s_{|\Psi_s|0}}^H \mathbf{w}_{s_{|\Psi_s|}}) = \text{span}(\tau_{s_0}), \quad \forall s = 1, \dots, B. \quad (21)$$

据此分析, \mathbf{w}_{sn} 和 $\boldsymbol{\tau}_{s0}$ 可通过求解方程 (22) 得到:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{I}_{Mm} & \mathbf{H}_{s10}^H & 0 & \dots & 0 \\ -\mathbf{I}_{Mm} & 0 & \mathbf{H}_{s20}^H & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\mathbf{I}_{Mm} & 0 & 0 & \dots & \mathbf{H}_{s|\Psi_s|0}^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_{s0} \\ \mathbf{w}_{s1} \\ \mathbf{w}_{s2} \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{s|\Psi_s|} \end{bmatrix} = \mathbf{0}. \quad (22)$$

在阶段 2, 为保证 MBS \mathbf{m}_0 的发送信号不会对所有 SUE 造成干扰, 对 $\forall s = 1, \dots, B$, \mathbf{v}_0 与 $\boldsymbol{\tau}_{s0}$ 需满足正交, 即 $\mathbf{v}_0 \perp \boldsymbol{\tau}_{s0}$. 据此分析, \mathbf{v}_0 可根据方程 (23) 求得:

$$[\boldsymbol{\tau}_{10} \ \dots \ \boldsymbol{\tau}_{s0} \ \dots \ \boldsymbol{\tau}_{B0}]^H \mathbf{v}_0 = \mathbf{0}. \quad (23)$$

步骤 2. 消除 SBS 对 SUE 的簇间干扰. 若要消除 SBS 对其他簇内 SUE 产生的簇间干扰, 则需 $\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{snt} \mathbf{v}_t = 0, \forall s \neq t, t = 1, \dots, B$. 于是, 对 $\forall s \neq t, t = 1, \dots, B$, 设计 \mathbf{v}_t , 使 $\mathbf{v}_t \perp \mathbf{H}_{snt}^H \mathbf{w}_{sn}$. 据此分析, \mathbf{v}_t 可通过求解方程 (24) 得到:

$$\left[\mathbf{H}_{11t}^H \mathbf{w}_{11} \ \dots \ \mathbf{H}_{snt}^H \mathbf{w}_{sn} \ \dots \ \mathbf{H}_{B|\Psi_B|t}^H \mathbf{w}_{B|\Psi_B|} \right]^H \mathbf{v}_t = \mathbf{0}. \quad (24)$$

步骤 3. 消除 SBS 对 MUE 的层间干扰. 若要消除 SBS 对 MUE 产生的层间干扰, 则需 $\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0ns} \mathbf{v}_s = 0, \forall s = 1, \dots, B$. 因此, 对 $\forall s = 1, \dots, B$, 设计 \mathbf{w}_{0n} 使 $\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0ns} \mathbf{v}_s = 0$, 即要求 $\mathbf{w}_{0n} \in \text{null}\{[\mathbf{H}_{0n1} \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{H}_{0ns} \mathbf{v}_s, \dots, \mathbf{H}_{0nB} \mathbf{v}_B]^H\}$. 据此分析, \mathbf{w}_{0n} 可通过式 (25) 得到:

$$[\mathbf{H}_{0n1} \mathbf{v}_1 \ \dots \ \mathbf{H}_{0ns} \mathbf{v}_s \ \dots \ \mathbf{H}_{0nB} \mathbf{v}_B]^H \mathbf{w}_{0n} = \mathbf{0}. \quad (25)$$

根据秩 - 零度定理, 对 $M_{ma} \times N_{ma}$ 维矩阵 \mathbf{A} , $\text{rank}(\mathbf{A}) + \text{null}(\mathbf{A}) = N_{ma}$, 即矩阵 \mathbf{A} 的秩与其零空间的维度之和等于列数. 结合 3.1.1 小节式 (20) 的约束, 要保证上述 IA 算法能够成功执行, 系统天线配置参数必须满足下列条件:

$$\begin{cases} N_t \geq \max \left\{ \frac{(|\Psi_s| - 1)}{|\Psi_s|} M_m + \frac{1}{|\Psi_s|}, B + 1 \right\}, \\ M_m \geq B + 1, \\ M_s \geq \sum_{s=1, s \neq t}^B |\Psi_s| + 1. \end{cases} \quad (26)$$

3.2 基于 PA 的簇内干扰管理方案

3.2.1 问题描述

消除簇间干扰和层间干扰后, 各类用户的归一化信道增益和 SINR 可表示为式 (27)~(30):

$$g_{sn} = \frac{|\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sns} \mathbf{v}_s|^2}{|\mathbf{w}_{sn}^H|^2 \sigma^2}, \quad (27)$$

$$g_{0n} = \frac{|\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0n0} \mathbf{v}_0|^2}{|\mathbf{w}_{0n}^H|^2 \sigma^2}, \quad (28)$$

$$\text{SINR}_{sn} = \frac{|\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sns} \mathbf{v}_s|^2 p_{sn}}{|\mathbf{w}_{sn}^H \mathbf{H}_{sns} \mathbf{v}_s|^2 \sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_s|} p_{sj} + |\mathbf{w}_{sn}^H|^2 \sigma^2} = \frac{p_{sn} g_{sn}}{\sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_s|} p_{sj} g_{sn} + 1}, \quad (29)$$

$$\text{SINR}_{0n} = \frac{|\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0n0} \mathbf{v}_0|^2 p_{0n}}{|\mathbf{w}_{0n}^H \mathbf{H}_{0n0} \mathbf{v}_0|^2 \sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_0|} p_{0j} + |\mathbf{w}_{0n}^H|^2 \sigma^2} = \frac{p_{0n} g_{0n}}{\sum_{j=1, j \neq n}^{|\Psi_0|} p_{0j} g_{0n} + 1}. \quad (30)$$

假设关联 SBS s_s 和 MBS m_0 的簇内用户按照信道增益降序排列, 即 $g_{s1} \geq \dots \geq g_{sn} \geq \dots \geq g_{s|\Psi_s|}$, $g_{01} \geq \dots \geq g_{0n} \geq \dots \geq g_{0|\Psi_0|}$, 按照信道增益越小的用户应分配更多功率的原则, 簇 Ψ_s 和 Ψ_0 内各用户所分配的功率应满足 $p_{s1} \leq p_{s2} \leq \dots \leq p_{s|\Psi_s|}$ 且 $\sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} \leq P_{ts}$, $p_{01} \leq p_{02} \leq \dots \leq p_{0|\Psi_0|}$ 且 $\sum_{n=1}^{|\Psi_0|} p_{0n} \leq P_{tm}$. 同时, 根据下行 NOMA 技术原理, 簇内 UE 解码时采用 SIC 技术, 先解码信道增益小的弱 UE 信号, 再从接收信号中依次减去信道增益小的弱 UE 信号, 最后才解码自身信号. 于是, SUE \mathbf{u}_{sn} 和 MUE \mathbf{u}_{0n} 处的 SINR 可分别表示为

$$\text{SINR}_{sn} = \frac{p_{sn} g_{sn}}{\sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{sn} + 1}, \quad (31)$$

$$\text{SINR}_{0n} = \frac{p_{0n} g_{0n}}{\sum_{j=1}^{n-1} p_{0j} g_{0n} + 1}. \quad (32)$$

对应地, SUE \mathbf{u}_{sn} 和 MUE \mathbf{u}_{0n} 的可达速率为

$$R_{sn} = \log_2(1 + \text{SINR}_{sn}) = \log_2 \left(1 + \frac{p_{sn} g_{sn}}{\sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{sn} + 1} \right), \quad (33)$$

$$R_{0n} = \log_2(1 + \text{SINR}_{0n}) = \log_2 \left(1 + \frac{p_{0n} g_{0n}}{\sum_{j=1}^{n-1} p_{0j} g_{0n} + 1} \right). \quad (34)$$

另一方面, 根据文献 [15], 不考虑干扰残余时, 为了实现高效的 SIC, 簇内功率分配需要满足下列条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(p_{sn} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} \right) g_{sn-1} \geq \Delta, \\ \left(p_{sn} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} \right) g_{sn-2} \geq \Delta, \\ \vdots \\ \left(p_{sn} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} \right) g_{s1} \geq \Delta, \end{array} \right. \quad (35)$$

其中 Δ 表示为了区分两个不同信号所需的最小功率差. 由于 $g_{s1} \geq g_{s2} \geq \dots \geq g_{s|\Psi_s|}$, 因此, 式 (35) 中只需满足第 1 项, 即 $(p_{sn} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj}) g_{sn-1} \geq \Delta$.

于是, 为了实现高效 SIC, 簇 Ψ_s 和 Ψ_0 内用户功率分配分别需要满足式 (36) 和 (37):

$$\left(p_{sn} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} \right) g_{sn-1} \geq \Delta, \quad (36)$$

$$\left(p_{0n} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{0j} \right) g_{0n-1} \geq \Delta. \quad (37)$$

令 $\mathbf{p}_s = [p_{s1}, \dots, p_{s|\Psi_s|}]$, $\mathbf{p}_0 = [p_{01}, \dots, p_{0|\Psi_0|}]$, 以最大化系统和速率为目标, 构建式 (38) 所示优化问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_s} R_{\text{sum}} = \sum_{s=1}^B \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} R_{sn} + \sum_{n=1}^{|\Psi_0|} R_{0n} \\ \text{s.t. C1: } \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} \leq P_{\text{ts}}, 0 \leq p_{s1} \leq \dots \leq p_{s|\Psi_s|}, \forall s = 1, \dots, B, \\ \sum_{n=1}^{|\Psi_0|} p_{0n} \leq P_{\text{tm}}, 0 \leq p_{01} \leq \dots \leq p_{0|\Psi_0|}, \\ \text{C2: } p_{sn} \geq p_{sn-1}, \forall s = 1, \dots, B, \forall n = 1, \dots, |\Psi_s|, \\ p_{s1} \geq 0, \\ p_{0n} \geq p_{0n-1}, \forall n = 2, \dots, |\Psi_0|, \\ p_{01} \geq 0, \\ \text{C3: } R_{sn} \geq R_{sn}^{\text{th}}, \forall s = 1, \dots, B, \forall n = 1, \dots, |\Psi_s|, \\ R_{0n} \geq R_{0n}^{\text{th}}, \forall n = 1, \dots, |\Psi_0|, \\ \text{C4: } \left(p_{sn} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} \right) g_{sn-1} \geq \Delta, \forall s = 1, \dots, B, \forall n = 2, \dots, |\Psi_s|, \\ \left(p_{0n} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{0j} \right) g_{0n-1} \geq \Delta, \forall n = 2, \dots, |\Psi_0|. \end{array} \right. \quad (38)$$

约束条件 C1 表示簇内用户总功率不得超过 BS 端的总发射功率, 约束条件 C2 表示簇内用户的功率分配结果和用户信道增益顺序相反, 即为升序排列, 约束条件 C3 表示簇内各个用户的数据速率应达到最小速率, 约束条件表示 C4 实现高效 SIC 的约束。

3.2.2 优化问题的转换

通过基于 IA 的干扰管理方案有效地消除了簇间干扰和层间干扰后, 进一步, 由式 (38), 可将最大化系统和速率问题解耦为最大化每个簇的和速率问题。同时, 通过相应的数学变换, 可将最小速率约束转换为线性约束, 最大化簇 Ψ_s 内用户和速率的优化问题可表述如式 (39) 所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\mathbf{p}_s} \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} \log_2 \left(1 + \frac{p_{sn} g_{sn}}{\sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{sn} + 1} \right) \\ \text{s.t. C1: } P_{\text{ts}} - \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} \geq 0, \\ \text{C2: } p_{sn} \geq p_{sn-1}, \forall n = 2, \dots, |\Psi_s|, \\ p_{s1} \geq 0, \\ \text{C3: } p_{sn} \geq \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} (2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1) + \frac{(2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1)}{g_{sn}}, \forall n = 2, \dots, |\Psi_s|, \\ p_{s1} \geq -\frac{(2^{R_{s1}^{\text{th}}} - 1)}{g_{s1}}, \\ \text{C4: } p_{sn} \geq \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} + \varepsilon \sum_{j=n+1}^{|\Psi_s|} p_{sj} + \frac{\Delta}{g_{sn-1}}, \forall n = 2, \dots, |\Psi_s|. \end{array} \right. \quad (39)$$

对 $n = 1$, 根据约束条件 C2 和 C3, 可得

$$\begin{cases} p_{s1} \geq 0, \\ p_{s1} \geq \frac{(2^{R_{s1}^{\text{th}}} - 1)}{g_{s1}}, \end{cases} \Rightarrow p_{s1} \geq \frac{(2^{R_{s1}^{\text{th}}} - 1)}{g_{s1}}. \quad (40)$$

对 $\forall n = 2, \dots, |\Psi_s|$, 根据约束条件 C2 和 C4, 可得

$$\begin{cases} p_{sn} \geq p_{s(n-1)}, \\ p_{sn} \geq \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} + \frac{\Delta}{g_{s(n-1)}}, \end{cases} \Rightarrow p_{sn} \geq \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} + \frac{\Delta}{g_{s(n-1)}}. \quad (41)$$

于是, 由上述分析, 对 $\forall n = 1, 2, \dots, |\Psi_s|$, 优化问题可重新表述为

$$\begin{cases} \max_{p_s} \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} \log_2 \left(1 + \frac{p_{sn} g_{sn}}{\sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{sn} + 1} \right) \\ \text{s.t. C1: } P_{\text{ts}} - \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} \geq 0, \\ \text{C2: } p_{sn} \geq \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} (2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1) + \frac{(2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1)}{g_{sn}}, \forall n = 2, \dots, |\Psi_s|, \\ p_{s1} \geq \frac{(2^{R_{s1}^{\text{th}}} - 1)}{g_{s1}}, \\ \text{C3: } p_{sn} \geq \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} + \frac{\Delta}{g_{s(n-1)}}, \forall n = 2, \dots, |\Psi_s|. \end{cases} \quad (42)$$

可以证明, 式 (42) 所描述的问题为一凸优化问题. 由于 C1~C3 均为线性不等式约束, 要证明该问题是凸优化问题, 只需证明目标函数是凹函数即可, 下面给出具体证明.

令 $q_{sn} = \sum_{j=1}^n p_{sj}$, 则 $q_{sn} - q_{s(n-1)} = p_{sn}$, 目标函数可表示为

$$R_{s,\text{sum}} = \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} R_{sn} = \sum_{n=1}^{|\Psi_s|-1} \log_2 \left(\frac{q_{sn} g_{sn} + 1}{q_{sn} g_{s(n+1)} + 1} \right) + \log_2 (q_{s|\Psi_s|} g_{s|\Psi_s|} + 1). \quad (43)$$

令

$$\begin{cases} h_{sn}(q_{sn}) = \log_2 \left(\frac{q_{sn} g_{sn} + 1}{q_{sn} g_{s(n+1)} + 1} \right), n = 1, \dots, |\Psi_s| - 1, \\ h_{s|\Psi_s|}(q_{s|\Psi_s|}) = \log_2 (q_{s|\Psi_s|} g_{s|\Psi_s|} + 1), n = |\Psi_s|, \end{cases}$$

则 $R_{s,\text{sum}} = \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} h_{sn}(q_{sn})$. 于是, 对 $n = 1, \dots, |\Psi_s| - 1$, 有

$$h'_{sn}(q_{sn}) = \frac{g_{sn}}{\ln 2 (q_{sn} g_{sn} + 1)} - \frac{g_{s(n+1)}}{\ln 2 (q_{sn} g_{s(n+1)} + 1)}, \quad (44)$$

$$\begin{aligned} h''_{sn}(q_{sn}) &= \frac{-g_{sn}^2}{\ln 2 (q_{sn} g_{sn} + 1)^2} + \frac{g_{s(n+1)}^2}{\ln 2 (q_{sn} g_{s(n+1)} + 1)^2} \\ &= \frac{(g_{s(n+1)}^2 - g_{sn}^2) + 2q_{sn} g_{sn} g_{s(n+1)} (g_{s(n+1)} - g_{sn})}{\ln 2 (q_{sn} g_{sn} + 1)^2 (q_{sn} g_{s(n+1)} + 1)^2} \leq 0. \end{aligned} \quad (45)$$

对 $n = |\Psi_s|$, 有

$$h'_{s|\Psi_s}(q_{s|\Psi_s}) = \frac{g_{s|\Psi_s}}{\ln 2 (q_{s|\Psi_s} g_{s|\Psi_s} + 1)}, \quad (46)$$

$$h''_{s|\Psi_s}(q_{s|\Psi_s}) = \frac{-g_{s|\Psi_s}^2}{\ln 2 (q_{s|\Psi_s} g_{s|\Psi_s} + 1)^2} \leq 0. \quad (47)$$

由上可得出 $h_{sn}(q_{sn})$ 为一凹函数. $q_{sn} = \sum_{j=1}^n p_{sj}$ 是仿射变换. 根据复合仿射映射具有保凸运算的性质, 对 $\forall n = 1, \dots, |\Psi_s|$, $h_{sn}(q_{sn}(p_{sj}))$, $j = 1, \dots, n$ 是凹函数. 根据凹函数的和也是凹函数的性质, $R_{s,\text{sum}} = \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} h_{sn}(q_{sn}(p_{sj}))$, $j = 1, \dots, n$ 也是凹函数. 因此, 优化问题 (42) 为凸优化问题.

3.2.3 优化问题可行性讨论

通过确立优化目标, 求解问题的最优解以确定簇内最优功率分配系数时, 大多数文献默认待优化问题满足可行性条件. 然而, 如文献 [16, 17] 所述, 从理论上而言, 在某些情况下, 例如系统总功率较低, 用户数量很多, 最小速率要求比较高时, 优化问题不满足可行性条件, 即优化问题无解. 虽然在实际应用中, 通过网络部署前的性能分析可得到理想的部署参数, 几乎不存在上述极端情况, 从而导致优化问题不可解. 但从问题分析的全面性角度考虑, 在求解问题最优解时, 首先必须对优化问题的可行性进行讨论.

假设 $p_{s1}, p_{s2}, \dots, p_{s|\Psi_s|}$ 需要的最小功率分别为 $f_{s1}, f_{s2}, \dots, f_{s|\Psi_s|}$, 则簇 $|\Psi_s|$ 内所有用户需要的最小功率之和为 $f_s = \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} f_{sn}$.

根据约束条件 C2 和 C3, 可得到

$$\begin{cases} p_{s2} \geq p_{s1}(2^{R_{s2}^{\text{th}}} - 1) + \frac{(2^{R_{s2}^{\text{th}}} - 1)}{g_{s2}}, \\ p_{s2} \geq p_{s1} + \frac{\Delta}{g_{s1}}, \end{cases} \Rightarrow p_{s2} \geq \max \left\{ f_{s1}(2^{R_{s2}^{\text{th}}} - 1) + \frac{(2^{R_{s2}^{\text{th}}} - 1)}{g_{s2}}, f_{s1} + \frac{\Delta}{g_{s1}} \right\}, \quad (48)$$

$$f_{s2} = \max \left\{ f_{s1}(2^{R_{s2}^{\text{th}}} - 1) + \frac{(2^{R_{s2}^{\text{th}}} - 1)}{g_{s2}}, f_{s1} + \frac{\Delta}{g_{s1}} \right\}. \quad (49)$$

依次类推, 可得到

$$f_{sn} = \begin{cases} \frac{(2^{R_{s1}^{\text{th}}} - 1)}{g_{s1}}, & n = 1, \\ \max \left\{ \left(\sum_{j=1}^{n-1} f_{sj} + \frac{1}{g_{sn}} \right) (2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1), \sum_{j=1}^{n-1} f_{sj} + \frac{\Delta}{g_{sn-1}} \right\}, & n = 2, \dots, |\Psi_s|. \end{cases} \quad (50)$$

于是, 若 $P_{\text{ts}} < f_s = \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} f_{sn}$, 则该优化问题一定无解, 即优化问题不满足可行性条件. 若 $P_{\text{ts}} \geq f_s = \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} f_{sn}$, 该优化问题有解, 可行. 也就是说, 为了保证用户所需最小速率和 SIC 所需最小功率差不变, BS 发射功率必须足够大, 才能保证优化问题可行, 进而方可求出最优解. 进一步, 为了说明 BS 发射功率对此优化问题产生的影响, 本文在第 4 节对单小区情况进行了仿真和分析.

3.2.4 优化问题的求解

本小节采用拉格朗日乘子法对满足可行性条件的优化问题进行求解. 与问题 (42) 对应的拉格朗

日函数可表示为

$$\begin{aligned}
 L(\mathbf{p}_s, \lambda_s, \mu_s, \eta_s) = & \sum_{n=1}^{|\Psi_s|-1} \log_2 \left(\frac{\sum_{j=1}^n p_{sj} g_{sn} + 1}{\sum_{j=1}^n p_{sj} g_{sn+1} + 1} \right) + \log_2 \left(\sum_{j=1}^{|\Psi_s|} p_{sj} g_{s|\Psi_s|} + 1 \right) + \lambda_s \left(P_{ts} - \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} \right) \\
 & + \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} \mu_{sn} \left(p_{sn} g_{sn} - \left(\sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{sn} + 1 \right) (2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1) \right) \\
 & + \sum_{n=2}^{|\Psi_s|} \eta_{sn} \left(p_{sn} g_{sn-1} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{sn-1} - \Delta \right). \tag{51}
 \end{aligned}$$

对自变量求偏导可得

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial p_{sn}} = & \sum_{i=n}^{|\Psi_s|-1} \frac{g_{si} - g_{si+1}}{\ln 2 (q_{si} g_{si} + 1) (q_{si} g_{si+1} + 1)} + \frac{g_{s|\Psi_s|}}{\ln 2 (q_{s|\Psi_s|} g_{s|\Psi_s|} + 1)} - \lambda_s \\
 & + \mu_{sn} g_{sn} - \sum_{i=n+1}^{|\Psi_s|} \mu_{si} g_{s,i} (2^{R_{si}^{\text{th}}} - 1) + \eta_{sn} g_{s,n-1} - \sum_{i=n+1}^{|\Psi_s|} \eta_{si} g_{s,i-1}. \tag{52}
 \end{aligned}$$

根据凸优化理论, 凸问题的最优解需要满足卡罗需 - 库恩 - 塔克条件, 即要求

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial p_{sn}} = 0, n = 1, \dots, |\Psi_s|, \\ \lambda_s \geq 0, \\ \mu_{sn} \geq 0, n = 1, \dots, |\Psi_s|, \\ \eta_{sn} \geq 0, n = 2, \dots, |\Psi_s|, \end{cases} \tag{53}$$

$$\begin{cases} \lambda_s \left(P_{ts} - \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} \right) = 0, \\ \mu_{sn} \left(p_{sn} g_{sn} - \left(\sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{sn} + 1 \right) (2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1) \right) = 0, n = 1, \dots, |\Psi_s|, \\ \eta_{sn} \left(p_{sn} g_{sn-1} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{sn-1} - \Delta \right) = 0, n = 2, \dots, |\Psi_s|, \end{cases} \tag{54}$$

$$\begin{cases} P_{ts} - \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} \geq 0, \\ p_{sn} g_{sn} - \left(\sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{sn} + 1 \right) (2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1) \geq 0, n = 1, \dots, |\Psi_s|, \\ p_{sn} g_{s,n-1} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} g_{s,n-1} - \Delta \geq 0, n = 2, \dots, |\Psi_s|. \end{cases} \tag{55}$$

上式中, 式 (53) 表示对偶可行性条件, 式 (54) 表示互补松弛条件, 式 (55) 表示原问题可行性条件.

对于式 (52), 当 $n = |\Psi_s|$ 时,

$$\frac{\partial L}{\partial p_{s|\Psi_s|}} = \frac{g_{s|\Psi_s|}}{\ln 2 (q_{s|\Psi_s|} g_{s|\Psi_s|} + 1)} - \lambda_s + \mu_{s|\Psi_s|} g_{s|\Psi_s|} + \eta_{s|\Psi_s|} g_{s|\Psi_s|-1} = 0, \tag{56}$$

即

$$\frac{g_s|\Psi_s|}{\ln 2 (q_s|\Psi_s|g_s|\Psi_s| + 1)} = \lambda_s - \mu_s|\Psi_s|g_s|\Psi_s| - \eta_s|\Psi_s|g_s|\Psi_s|-1. \quad (57)$$

观察式 (57) 可知, 当 $\lambda_s = 0$ 时, 上式一定不成立, 因此必需满足 $\lambda_s > 0$ 和 $P_{ts} - \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} = 0$. 此时优化问题转化为

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\mathbf{p}_s} \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} \log_2 \left(1 + \frac{p_{sn}g_{sn} + 1}{\sum_{j=1}^{n-1} p_{sj}g_{sn} + 1} \right) \\ \text{s.t. C1: } P_{ts} - \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} = 0, \\ \text{C2: } p_{sn} \geq \max \left\{ \left(\sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} + \frac{1}{g_{sn}} \right) (2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1) \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} + \frac{\Delta}{g_{sn-1}} \right\}, \forall n = 2, \dots, |\Psi_s|, \\ p_{s1} \geq \frac{(2^{R_{s1}^{\text{th}}} - 1)}{g_{s1}}. \end{array} \right. \quad (58)$$

根据凸优化理论, 若不等式约束条件取等号, 则对应的拉格朗日系数非负. 若不等式约束条件不取等号, 可认为优化时不起作用, 其对应的拉格朗日系数为 0. 另一方面, 根据 Bezout 定理, 若方程数不多于变量数, 方程组有解, 当方程数等于变量数时, 通常方程组有唯一解. 于是, 要求出方程组关于 $|\Psi_s|$ 个变量的解, 至少需要 $|\Psi_s|$ 个等式. 根据上文分析, 必有 $P_{ts} - \sum_{n=1}^{|\Psi_s|} p_{sn} = 0$, 因此还需要 $|\Psi_s| - 1$ 个等式. 而对于不等式组 (59) ($n = 2, \dots, |\Psi_s|$), 两个不等式不可能同时取等号, 只能二者之一取等号.

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{sn} \geq \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj}(2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1) + \frac{(2^{R_{sn}^{\text{th}}} - 1)}{g_{sn}}, \\ p_{sn} \geq \sum_{j=1}^{n-1} p_{sj} + \frac{\Delta}{g_{sn-1}}. \end{array} \right. \quad (59)$$

于是, 由上可得到关于拉格朗日乘子的结论: $\lambda_s > 0$, $\mu_{s2} = 0$ 或 $\eta_{s2} = 0, \dots, \mu_{s|\Psi_s|} = 0$ 或 $\eta_{s|\Psi_s|} = 0$.

在本文系统模型下, 假设所有 SUE 的最小速率均为 R_s^{th} , 所有 MUE 的最小速率均为 R_0^{th} , 可将问题 (48) 的最优闭式解的求解过程归纳如算法 1 所示.

3.3 复杂度和收敛性分析

联合 IA 与 PA 的干扰管理方案包括两部分, 其中第 1 部分为利用 IA 消除簇间干扰和层间干扰, 具体包括消除 MBS 对 SUE 的层间干扰、消除 SBS 对 SUE 的簇间干扰和消除 SBS 对 MUE 的层间干扰, 其所需计算复杂度分别为 $\mathcal{O}(M_m(B + |\Psi_s| + |\Psi_s|N_t))$, $\mathcal{O}((M_sN_t + M_s)(BN - |\Psi_0| - |\Psi_t|))$ 和 $\mathcal{O}(BN_t(M_s + 1))$. 第 2 部分为对 SBS 和 MBS 的簇内用户进行 PA, 以消除簇内干扰, 其复杂度分别为 $\mathcal{O}((M_mN_t + M_m)B|\Psi_s| + B|\Psi_s|^2 + B|\Psi_s|)$ 和 $\mathcal{O}((M_mN_t + M_m)|\Psi_0| + |\Psi_0|^2 + |\Psi_0|)$. 因此, 本文提出的联合 IA 与 PA 的干扰管理方案的复杂度为

$$\mathcal{O} \left(\begin{array}{l} M_m(B + |\Psi_s| + |\Psi_s|N_t) + (M_sN_t + M_s)(BN - |\Psi_0| - |\Psi_t|) + BN_t(M_s + 1) \\ + (M_mN_t + M_m)(B|\Psi_s| + |\Psi_0|) + B|\Psi_s|^2 + B|\Psi_s| + |\Psi_0|^2 + |\Psi_0| \end{array} \right). \quad (60)$$

Algorithm 1 Optimal solution for PA

Input: $B, P_{ts}, P_{tm}, R_s^{\text{th}}, R_0^{\text{th}}, \Delta$.

Output: $\mathbf{p}_s = [p_{s1}, p_{s2}, \dots, p_{s|\Psi_s|}]$, $\mathbf{p}_0 = [p_{01}, p_{02}, \dots, p_{0|\Psi_0|}]$.

```

1: for  $s = 1 : B$  //Obtain the PA results in each SBS cluster.
2:   for  $n = |\Psi_s| : -1 : 2$ 
3:     if  $\frac{\Delta}{2g_{sn-1}} + \frac{(P_{ts} - \sum_{j=n+1}^{|\Psi_s|} p_{sj})}{2} \geq \frac{(P_{ts} - \sum_{j=n+1}^{|\Psi_s|} p_{sj})(2^{R_s^{\text{th}}} - 1)}{2^{R_s^{\text{th}}}} + \frac{(2^{R_s^{\text{th}}} - 1)}{2^{R_s^{\text{th}}} g_{sn}}$ ,
4:        $\mu_{sn} = 0$ ,
5:        $p_{sn} = \frac{\Delta}{2g_{sn-1}} + \frac{(P_{ts} - \sum_{j=n+1}^{|\Psi_s|} p_{sj})}{2}$ ,
6:     else
7:        $\eta_{sn} = 0$ ,
8:        $p_{sn} = \frac{(P_{ts} - \sum_{j=n+1}^{|\Psi_s|} p_{sj})(2^{R_s^{\text{th}}} - 1)}{2^{R_s^{\text{th}}}} + \frac{(2^{R_s^{\text{th}}} - 1)}{2^{R_s^{\text{th}}} g_{sn}}$ ,
9:     end
10:  end
11:   $p_{s1} = P_{ts} - \sum_{j=2}^{|\Psi_s|} p_{sj}$ ,
12: end
13: for  $n = |\Psi_0| : -1 : 2$  //Obtain the PA results in MSB cluster.
14:  if  $\frac{\Delta}{2g_{0n-1}} + \frac{(P_{tm} - \sum_{j=n+1}^{|\Psi_0|} p_{0j})}{2} \geq \frac{(P_{tm} - \sum_{j=n+1}^{|\Psi_0|} p_{0j})(2^{R_0^{\text{th}}} - 1)}{2^{R_0^{\text{th}}}} + \frac{(2^{R_0^{\text{th}}} - 1)}{2^{R_0^{\text{th}}} g_{0n}}$ ,
15:     $\mu_{0n} = 0$ ,
16:     $p_{0n} = \frac{\Delta}{2g_{0n-1}} + \frac{(P_{tm} - \sum_{j=n+1}^{|\Psi_0|} p_{0j})}{2}$ ,
17:  else
18:     $\eta_{0n} = 0$ ,
19:     $p_{0n} = \frac{(P_{tm} - \sum_{j=n+1}^{|\Psi_0|} p_{0j})(2^{R_0^{\text{th}}} - 1)}{2^{R_0^{\text{th}}}} + \frac{(2^{R_0^{\text{th}}} - 1)}{2^{R_0^{\text{th}}} g_{0n}}$ ,
20:  end
21: end
22:  $p_{01} = P_{tm} - \sum_{j=2}^{|\Psi_0|} p_{1j}$ .
    
```

同时, 在该方案中, 为了消除 MBS 对 SUE 的层间干扰、消除 SBS 对 SUE 的簇间干扰和消除 SBS 对 MUE 的层间干扰, 分别设计基于干扰信道对齐的两阶段式 IA 算法、SBS 预编码矢量和 MUE 检测矢量, 而在具体设计时, 在满足 IA 可行性条件下, 均以解析形式给出求解的具体过程, 因此这部分不涉及收敛性问题. 对于基于 PA 来消除簇内干扰部分, 无论对于 SBS 簇内, 还是 MBS 簇内, 在对簇内用户进行功率分配时, 均限定总的簇内功率, 且各簇仅需一次循环就可完成簇内用户的功率分配, 从而使算法的收敛性得以保证.

4 数值仿真分析

根据 3GPP 规范中 BS 设定的发射功率和相关文献^[26,27], 基于双层 NOMA-HetNet 模型, 本节对文中提出的 IA 算法和 PA 方案进行了仿真验证和分析. 仿真中, 类似于文献 [14], 假设 MUE 的最小速率为 SUE 最小速率的 2 倍, 其余主要仿真参数如表 1 所示.

设定宏小区内包含 $B = 5$ 个 SBS, 每个 SBS 范围内 $N = 4$ 个 UE 时, 按照本文分簇算法, 分簇结果为 MBS m_0 服务 5 个 MUE, SBS 服务的 SUE 数则分别为 3, 3, 3, 4, 2. 图 2(a) 和 (b) 基于系统和速率 (system sum rate), 对联合 IA 与 PA 的干扰管理方案的实际仿真结果和理论分析结果进行了仿真对比. 在对比实验中, 给定 $\Delta = 10$ dBm, 在几组不同 R_s^{th} 取值下, 图 2(a) 展示了系统和速率随信噪比 (signal to noise power ratio, SNR) 大小变化的曲线图. 给定 $R_s^{\text{th}} = 0.1$ bps/Hz, 在几组不同

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| Parameter name | Value | Parameter name | Value |
|---|-------|--------------------------------------|---------|
| The density of MBS λ_m (km^{-2}) | 1 | The cluster radius R (m) | 100 |
| The density of SBS λ_s (km^{-2}) | 5 | UE number N | 4UE/SBS |
| MBS transmitted power P_{tm} (dBm) | 46 | SBS transmitted power P_{ts} (dBm) | 20 |

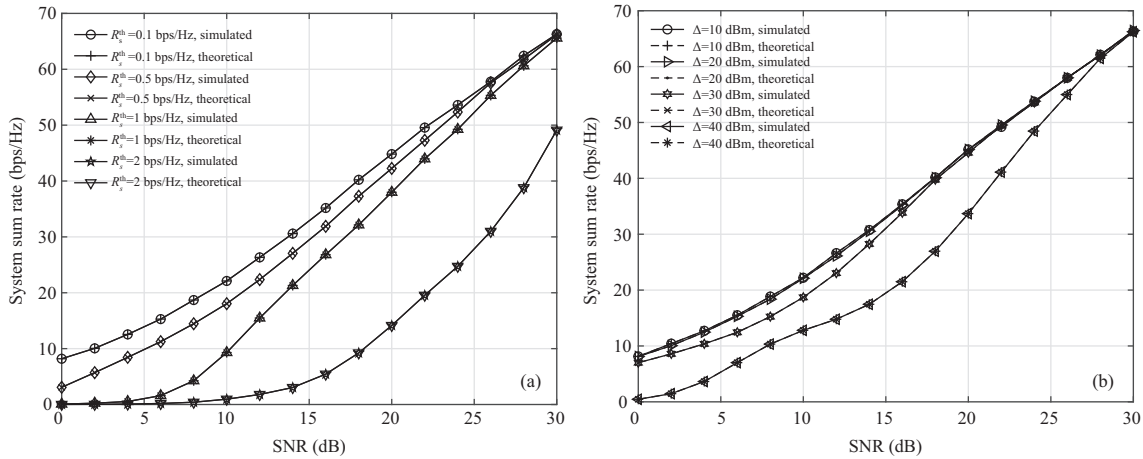


图 2 (a) 不同 R_s^{th} 下, 系统和速率的实际仿真结果与理论结果对比图 ($\Delta = 10$ dBm); (b) 不同 Δ 下, 系统和速率的实际仿真结果与理论结果对比图 ($R_s^{\text{th}} = 0.1$ bps/Hz)

Figure 2 (a) Comparison of the simulated and theoretical system sum rates for different R_s^{th} with $\Delta = 10$ dBm; (b) comparison of the simulated and theoretical system sum rates for different Δ with $R_s^{\text{th}} = 0.1$ bps/Hz

的 Δ 取值下, 图 2(b) 描述了系统和速率随 SNR 大小变化的趋势图. 可以看出, 不同仿真参数下, 实际结果与理论仿真曲线几乎完全重合, 取得了与理论推导一致的结果, 说明了文中理论推导的正确性, 同时也证明了本文提出的基于 IA 的簇间干扰和层间干扰管理方案的有效性. 进一步, 随 Δ 和 R_s^{th} 的增大, 系统和速率逐渐减小. 这是因为随 Δ 和 R_s^{th} 增大, 簇内各用户需要更多功率才能满足约束条件. 然而, 在总功率受限的条件下, 部分用户将很难满足非常严格的约束条件, 从而得不到服务, 进而导致系统和速率降低.

给定 $\Delta = 10$ dBm, 在 R_s^{th} 取不同值时, 图 3(a)~(c) 分别给出了系统和速率、用户平均可达速率 (average achievable rate for UEs) 和系统可服务的平均 UE 数 (average number of UEs served) 随 SNR 变化的仿真结果, 并对比了 NOMA 和 OMA 两种接入方式的差异. 显然, 随 SNR 增大, 无论对于 NOMA 还是 OMA 接入方式, 系统和速率和用户平均可达速率 (包括 SUE 和 MUE 的平均可达速率) 逐渐提高, 系统可服务的平均用户数也逐渐增多. 进一步, 从图 3(a) 可看出, 当 SNR 比较低时, OMA 方式在系统和速率方面占有优势, 但当 SNR 足够大时, NOMA 方式的优势越来越明显. 这是因为, 与 OMA 相比, NOMA 簇内各用户不仅需要满足最低速率限制需求, 还额外存在满足高效 SIC 的需求, 随着 SNR 的增大, 簇内用户更容易满足该需求, 从而可获得更高的功率域复用增益. 此外, 当单个 BS 所服务的 UE 在 OMA 和 NOMA 中占用相同的时频资源时, 由于 NOMA 能将多个 UE 复用到功率域进行非正交调度, 因此, 在同等功率约束条件下, 要满足 R_s^{th} 限制, OMA 方式可服务的用户数量少于 NOMA 方式, 正如图 3(c) 中结果所示.

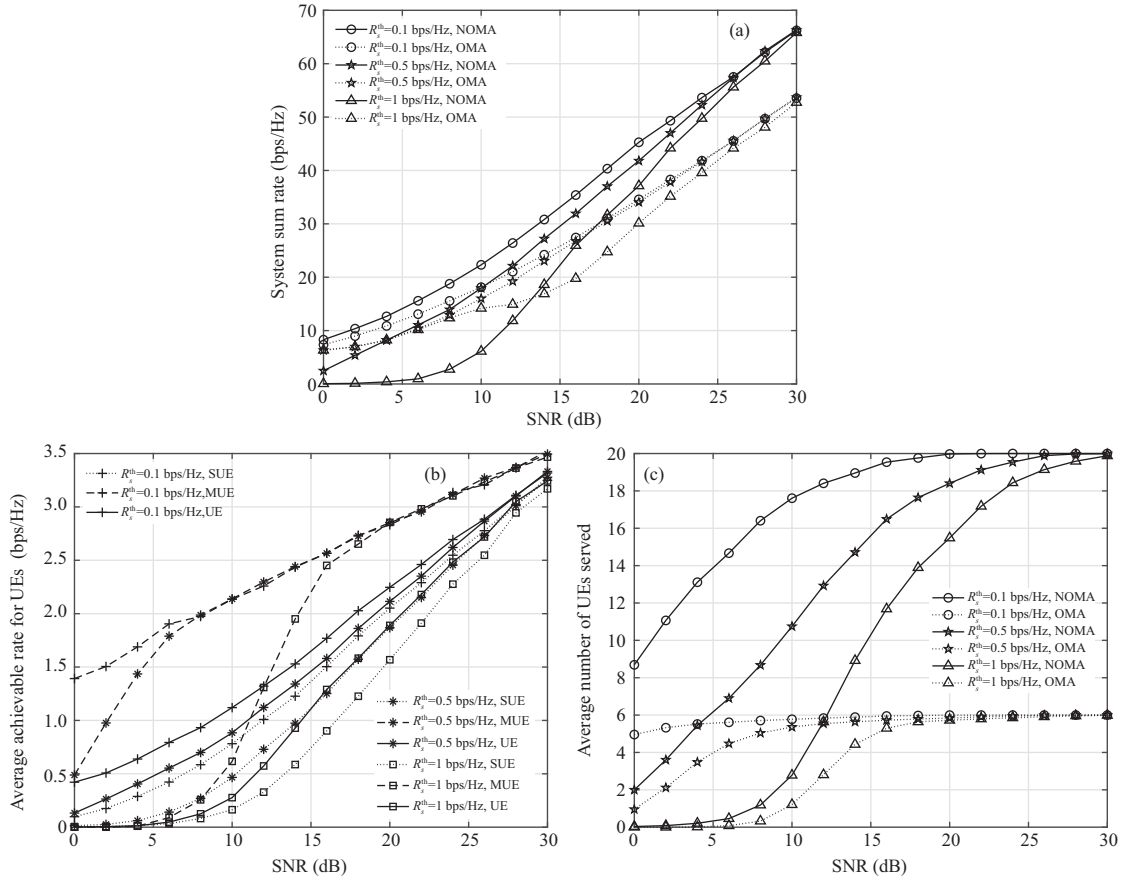


图 3 不同 R_s^{th} 下 (a) 系统和速率随 SNR 变化曲线, (b) 用户平均可达速率随 SNR 变化曲线; (c) 可服务平均 UE 数随 SNR 变化曲线 ($\Delta = 10$ dBm)

Figure 3 (a) System sum rates versus SNR, (b) average achievable rate for UEs versus SNR, and (c) average number of UEs served versus SNR for different R_s^{th} with $\Delta = 10$ dBm

设定 $R_s^{\text{th}} = 0.1$ bps/Hz, 在 Δ 取几组不同值时, 图 4(a)~(c) 分别给出了系统和速率、用户平均可达速率和系统可服务的平均 UE 数随 SNR 变化的仿真结果, 并对比了 NOMA 和 OMA 两种接入方式. 由图中可知, 随 Δ 增大, 系统和速率和用户平均可达速率均呈现逐渐减小的趋势. 这是因为 Δ 的增大导致用户间信号强度差异性更大, 即要求簇内用户之间的功率差异更大, 这样才能满足实现高效 SIC 的条件, 从而导致系统可服务的用户数量减少, 进而引起强用户的可达速率减小, 最后导致系统总的和速率减小. 同时, 在 Δ 不大于 30 dBm 时, 随 SNR 的变化, NOMA 方式的系统和速率性能和可服务的平均 UE 数量几乎总优于 OMA 方式.

给定 $\Delta = 10$ dBm, 在几组不同的 SNR 取值下, 图 5(a)~(c) 分别描述了系统和速率、用户平均可达速率和系统内可服务的平均 UE 数量随 R_s^{th} 变化的仿真结果, 并对 NOMA 和 OMA 进行了对比. 可看出, 在不同的 SNR 下, 当 R_s^{th} 在值域较小范围内变化时, 对系统和速率和用户平均速率几乎无影响. 当 R_s^{th} 在值域较大范围内变化时, 系统和速率、用户平均可达速率和系统内可服务的平均 UE 数量逐渐减小. 在 SNR 较低而 R_s^{th} 足够大时, 系统性能急剧恶化, 甚至服务的平均用户数趋于 0. 这是因为, R_s^{th} 的增大意味着系统中用户的最低速率要求更高, 在功率较少时, 有的小区无法为其内的用户

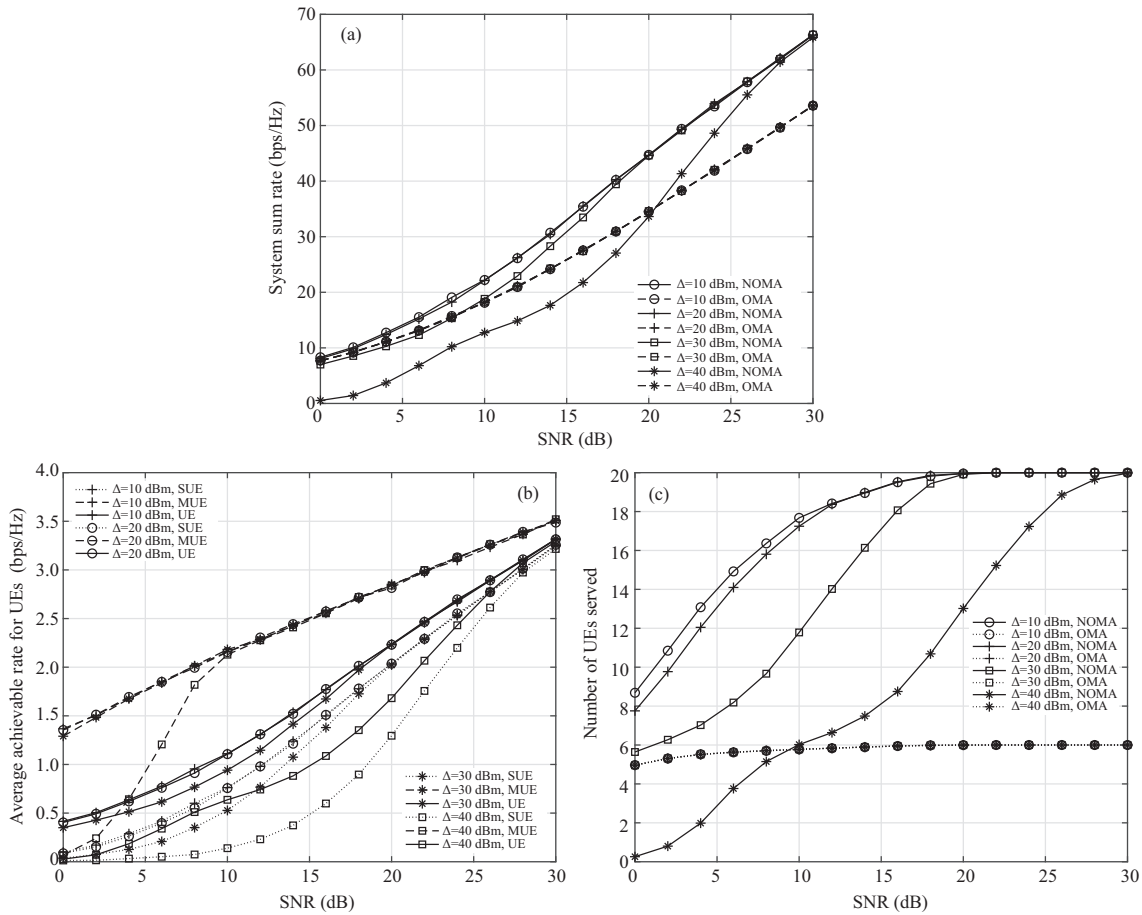


图 4 不同 Δ 下 (a) 系统和速率随 SNR 变化曲线, (b) 用户平均可达速率随 SNR 变化曲线, (c) 可服务平均 UE 数随 SNR 变化曲线 ($R_s^{\text{th}} = 0.1$ bps/Hz)

Figure 4 (a) System sum rates versus SNR, (b) average achievable rate for UEs versus SNR, and (c) average number of UEs served versus SNR for different Δ with $R_s^{\text{th}} = 0.1$ bps/Hz

提供服务, 进而导致系统性能的急剧变差. 同时, 可发现, 在 SNR 较高时, 随着 R_s^{th} 的变化, NOMA 的性能几乎总是优于 OMA.

给定 $R_s^{\text{th}} = 0.1$ bps/Hz, 在几组不同的 SNR 取值下, 图 6(a)~(c) 分别描述了系统和速率、用户平均可达速率和系统内可服务平均 UE 数量随 Δ 变化的仿真结果, 并对 NOMA 和 OMA 方式进行了对比. 可看出, 对于 NOMA 方式, 当 Δ 在值域较小范围内变化时, 对系统和速率、用户平均可达速率和可服务的平均用户数量几乎无影响. 当 Δ 在值域较大范围内变化时, 随着 Δ 增大, 对于 NOMA 方式, 其性能逐渐变差. 而对于 OMA 方式, Δ 的变化对性能几乎完全无影响. 这是因为 Δ 在比较小时, 对于 NOMA 方式, 系统内用户更容易满足高效 SIC 的条件, Δ 变化的幅度对和速率的影响较小. 同时, Δ 的增大意味着簇内两两用户之间的信号强度差异需要更大, 这就需要簇内用户之间的功率之差更大, 也就是说, 弱用户和强用户间的功率差需足够大, 才能满足约束条件, 导致可服务的用户数量减少, 进而引起系统和速率和用户平均速率减小. 而对 OMA 方式, 无需用 SIC 技术消除簇内干扰, 故 Δ 的变化对其性能无影响, 如图 6(a) 和 (c) 所示.

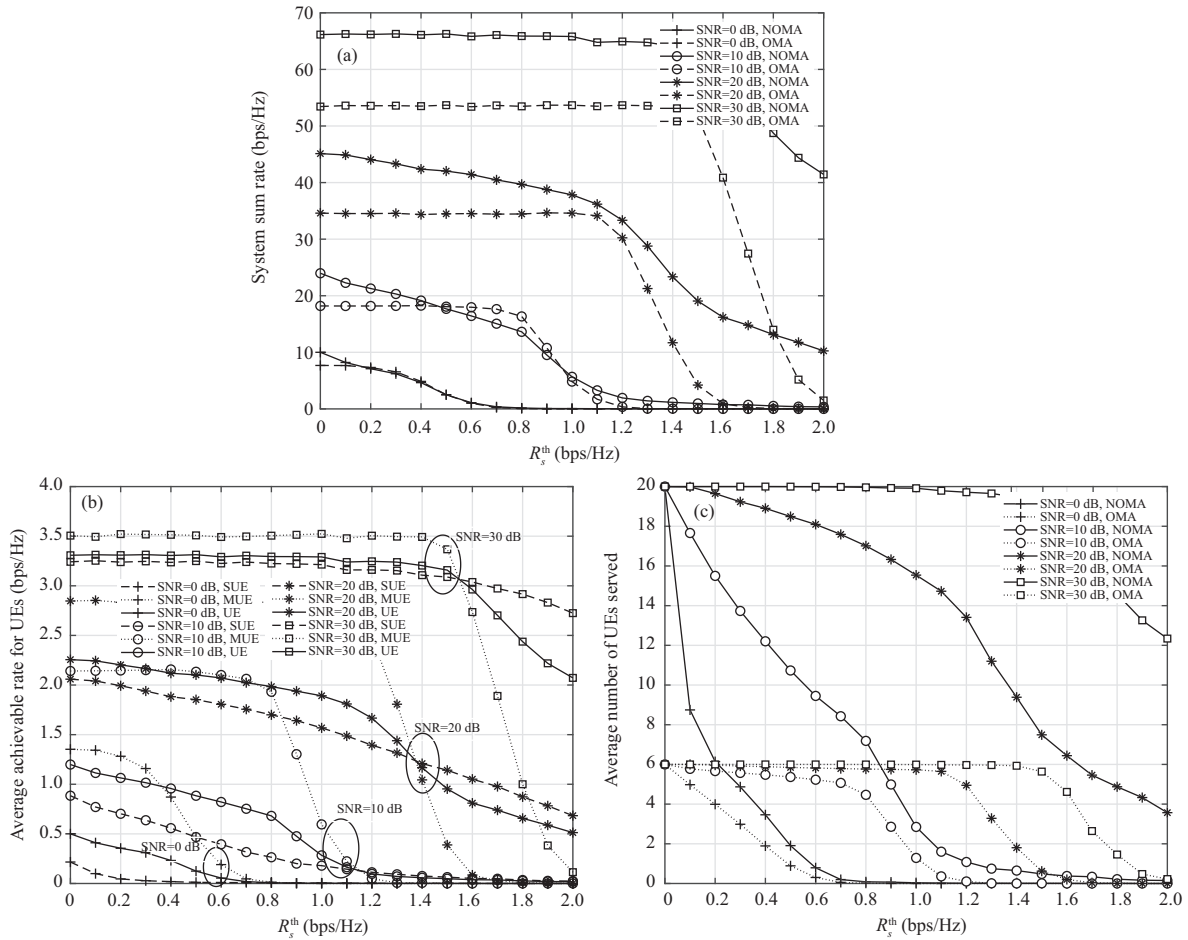


图 5 (a) 不同 Δ 下, 系统和速率随 R_s^{th} 变化曲线; (b) 不同 SNR 下, 用户平均可达速率随 R_s^{th} 变化曲线 ($\Delta = 10$ dBm); (c) 不同 SNR 下, 可服务平均 UE 数随 R_s^{th} 变化曲线 ($\Delta = 10$ dBm)

Figure 5 (a) System sum rates versus R_s^{th} for different Δ ; (b) average achievable rate for UE versus R_s^{th} for different SNR with $\Delta = 10$ dBm; (c) average number of UEs served versus R_s^{th} for different SNR with $\Delta = 10$ dBm

为了分析 BS 总功率对簇内用户性能的影响以及不同 NOMA 系统中的干扰消除方案, 图 7(a) 和 (b) 给出了单小区内总发送功率对系统和速率和可服务的平均 UE 数量的影响. 从图 7(a) 可看出, 当 BS 处的发射功率比较小时, 无论是本文提出的融合 IA 和 PA 的干扰消除方案 (为了和其他方案区别, 图中以 Proposed PA-NOMA 标识), 固定比例系数的 PA-NOMA 方案 (以 fixed PA-NOMA 标识) 还是 OMA 方式, 系统和速率都比较低. 这是因为当发射功率很小时, 很难满足用户的最低速率需求, 即优化问题无解, 这也是文献 [15] 在进行理论分析时未考虑到的因素. 但在不同的系统参数配置下, 当提供的功率使问题可解时, 随着 BS 处的发射功率增大, 本文 PA-NOMA 方案和固定 PA-NOMA 方案相较于 OMA 方案在和速率上的优势越来越明显, 而文献 [28] 中基于极大极小公平 (max-min fairness, MMF) 算法实现 PA 的 NOMA 方案 (图中以 MMF-NOMA 标识) 获得的系统和速率始终必须保证各用户门限速率之和保持不变. 这是因为 MMF 算法为同一信道上的多个用户提供了绝对的公平性, 但其最优解会使得各个用户的可达速率均等于最低门限速率. 正如图 7(b) 所示, MMF-NOMA 方案始终可为系统中的所有用户提供服务. 但固定 PA-NOMA 和 OMA 方案可服务的平均 UE 数量始终低于

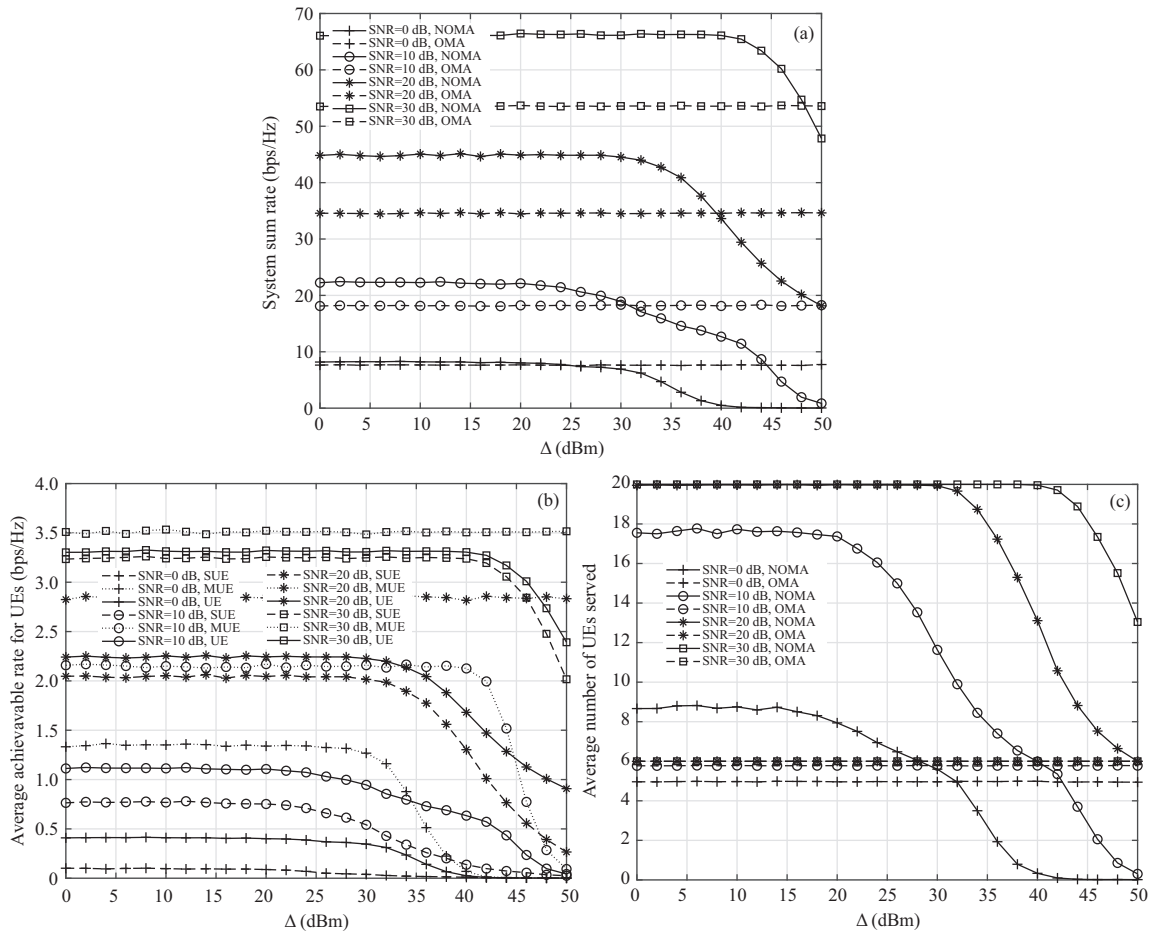


图 6 不同 SNR 下 (a) 系统和速率随 Δ 变化曲线, (b) 用户平均可达速率随 Δ 变化曲线, (c) 可服务平均 UE 数随 Δ 变化曲线 ($R_s^{\text{th}} = 0.1$ bps/Hz)

Figure 6 (a) System sum rates versus Δ , (b) average number of UEs served versus Δ , and (c) average number of UEs served versus Δ for different SNR with $R_s^{\text{th}} = 0.1$ bps/Hz

本文提出的 PA-NOMA 方案, 这是因为固定 PA-NOMA 按照系统约束, 能服务则服务, 否则视为不能满足系统约束, 无法为用户提供服务. MMF-NOMA 方案则不同, 为了获得绝对的公平性, 该方案牺牲了速率性能以获得公平性, 使系统中所有用户都能获得服务, 因而该方案仅适用于对速率要求低、对可容纳用户数量大的系统.

5 结束语

将 NOMA 技术融合到 HetNet 中, 尽管频谱共享和高密度重叠覆盖能带来潜在的频谱复用增益和网络容量增益, 但同时给网络中的干扰带来了严重的挑战. 针对 NOMA-HetNet 中存在的簇间干扰、层间干扰和簇内干扰, 文中提出了一种联合 IA 和 PA 的干扰管理方案. 所提出的方案在消除了簇间干扰和层间干扰的同时, 以最大化系统和速率为优化目标, 通过合理的 PA 方案, 从一定程度上抑制了簇内干扰. 仿真结果验证了所提出的干扰管理方案的高效性, 同时也证明了 NOMA 相较于 OMA 在提

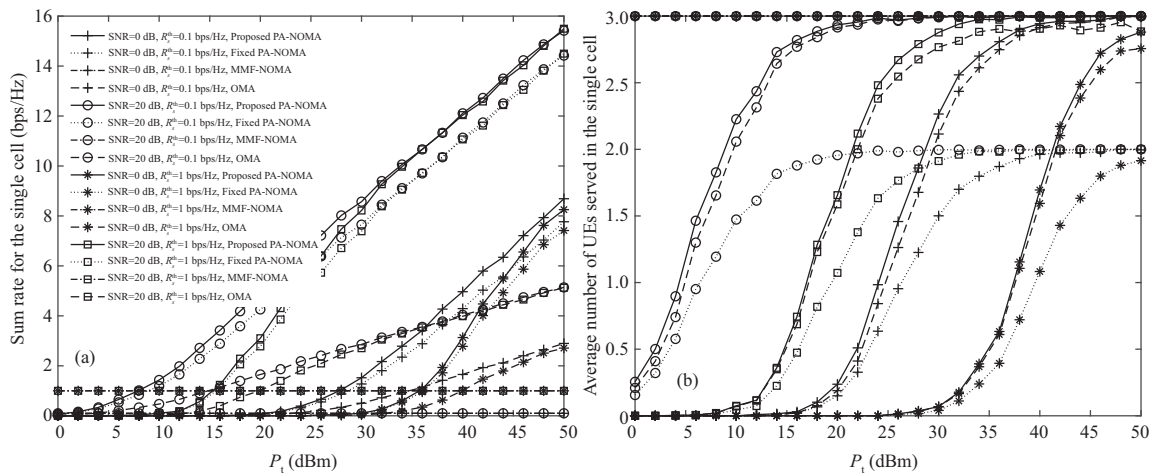


图 7 (a) 单小区和速率随 P_t 变化曲线; (b) 单小区可服务的平均 UE 数量随 P_t 变化曲线 ($N = 3, \Delta = 10$ dBm)

Figure 7 (a) Sum rate of the single cell versus P_t with $N = 3$ and $\Delta = 10$ dBm; (b) average number of UEs served versus P_t with $N = 3$ and $\Delta = 10$ dBm in the single cell

升系统性能方面的优势. 综上, 随着 NOMA-HetNet 技术的发展, 本文研究不失为未来 NOMA-HetNet 技术应用过程中所面临的复杂干扰管控问题提供了一种潜在的候选解决方案.

参考文献

- 1 Ding W T, Yuan L F, Wang D S, et al. Demo: heterogeneous multi-stream integration of access network: scheme and verification. In: Proceedings of the 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Ningbo, 2018. 1–2
- 2 Zhang P, Tao Y Z, Zhang Z. Survey of several key technologies for 5G. J Commun, 2016, 37: 15–29 [张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评. 通信学报, 2016, 37: 15–29]
- 3 Marcano A S, Christiansen H L. Impact of NOMA on network capacity dimensioning for 5G HetNets. IEEE Access, 2018, 6: 13587–13603
- 4 Liu C H, Liang D C. Heterogeneous networks with power-domain NOMA: coverage, throughput, and power allocation analysis. IEEE Trans Wireless Commun, 2018, 17: 3524–3539
- 5 Baidas M W, Al-mubarak M, Alsusa E, et al. A two-stage solution procedure to joint subcarrier assignment and global energy-efficient power allocation in energy-harvesting two-tier downlink NOMA HetNets. In: Proceedings of the 8th International Conference on Communications and Networking (ComNet), Hammamet, 2020. 1–8
- 6 Celik A, Tsai M C, Radaydeh R M, et al. Distributed cluster formation and power-bandwidth allocation for imperfect NOMA in DL-HetNets. IEEE Trans Commun, 2019, 67: 1677–1692
- 7 Celik A, Tsai M C, Radaydeh R M, et al. Distributed user clustering and resource allocation for imperfect NOMA in heterogeneous networks. IEEE Trans Commun, 2019, 67: 7211–7227
- 8 Zhang H J, Fang F, Cheng J L, et al. Energy-efficient resource allocation in NOMA heterogeneous networks. IEEE Wireless Commun, 2018, 25: 48–53
- 9 Ali Z J, Noordin N K, Sali A, et al. Fair energy-efficient resource allocation for downlink NOMA heterogeneous networks. IEEE Access, 2020, 8: 200129
- 10 Zhong Z H, Luo W Y, Peng J H, et al. Secrecy performance analysis of cooperative transmission and cooperative jamming for multi-tier heterogeneous cellular networks. Sci Sin Inform, 2016, 46: 33–48 [钟智豪, 罗文宇, 彭建华, 等. 多层异构蜂窝网协作传输和协作干扰机制的安全性能分析. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 33–48]
- 11 Ni D D, Hao L, Tran Q T, et al. Power allocation for downlink NOMA heterogeneous networks. IEEE Access, 2018, 6: 26742–26752
- 12 Zhu J Y, Wang J H, Huang Y M, et al. On optimal power allocation for downlink non-orthogonal multiple access systems. IEEE J Sel Areas Commun, 2017, 35: 2744–2757

- 13 Nasser A, Muta O, Elsabrouty M. Cross-tier interference management scheme for downlink mMIMO-NOMA HetNet. In: Proceedings of the 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), Kuala Lumpur, 2019. 1–5
- 14 Nasser A, Muta O, Elsabrouty M, et al. Interference mitigation and power allocation scheme for downlink MIMO-NOMA HetNet. *IEEE Trans Veh Technol*, 2019, 68: 6805–6816
- 15 Ali M S, Tabassum H, Hossain E. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems. *IEEE Access*, 2017, 4: 6325–6343
- 16 Timotheou S, Krikidis I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Signal Process Lett*, 2015, 22: 1647–1651
- 17 Wang J H, Peng Q, Huang Y M, et al. Convexity of weighted sum rate maximization in NOMA systems. *IEEE Signal Process Lett*, 2017, 24: 1323–1327
- 18 Nasser A, Muta O, Elsabrouty M, et al. Compressive sensing based spectrum allocation and power control for NOMA HetNets. *IEEE Access*, 2019, 7: 98495–98506
- 19 Ying T D, Feng W J, Liu G L. Space-time interference alignment: DoF of two-user MIMO X-channel with alternating CSIT. *IEEE Commun Lett*, 2017, 21: 1167–1170
- 20 Gomadam K, Cadambe V R, Jafar S A. A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks. *IEEE Trans Inform Theory*, 2011, 57: 3309–3322
- 21 Jing X R, Mo L L, Liu H Q, et al. Linear space-time interference alignment for K -user MIMO interference channels. *IEEE Access*, 2018, 6: 3085–3095
- 22 Rihan M, Elsabrouty M, Muta O, et al. Interference alignment with limited feedback for macrocell-femtocell heterogeneous networks. In: Proceedings of the 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Glasgow, 2015. 1–5
- 23 Rihan M, Elsabrouty M, Muta O, et al. Interference mitigation framework based on interference alignment for femtocell-macrocell two tier cellular systems. *IEICE Trans Commun*, 2015, 98: 467–476
- 24 Vu T T, Kha H H, Muta O, et al. Energy-efficient interference mitigation with hierarchical partial coordination for MIMO heterogeneous networks. *IEICE Trans Commun*, 2017, 100: 1023–1030
- 25 Men H Z, Zhao N, Jin M L, et al. Optimal transceiver design for interference alignment based cognitive radio networks. *IEEE Commun Lett*, 2015, 19: 1442–1445
- 26 Afshang M, Dhillon H S. A new clustered HetNet model to accurately characterize user-centric small cell deployments. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Piscataway, 2017. 1–6
- 27 Wang Y, Zhu Q. Modelling and analysis of heterogeneous cellular networks using a matern cluster process. *IET Commun*, 2017, 11: 2783–2791
- 28 Xu Y J, Hu R Q, Qian Y. Robust max-min fairness energy efficiency in NOMA-based heterogeneous networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, 2020. 1–4

Joint interference alignment and power allocation interference management scheme for downlink NOMA-HetNet

Xiaorong JING^{1,2*}, Yixi CHEN¹, Wei GAO¹ & Qianbin CHEN²

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

2. *Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*

* Corresponding author. E-mail: jingxr@cqupt.edu.cn

Abstract For downlink non-orthogonal multiple access heterogeneous networks (NOMA-HetNet) based on Matérn cluster process, for different kinds of interference existing in a typical macro cell, an interference management scheme performed by jointly performing interference alignment (IA) and power allocation (PA) is proposed. In the scheme, on the basis of IA feasibility analysis, a two-phase IA based on the interference channel alignment algorithm is proposed to eliminate the interlayer interference of macro base stations to small users (SUEs); precoding and detection vectors are designed for small base stations (SBSs) and macro users (MUEs), respectively, to eliminate the former's inter-cluster interference to SUEs and the latter's interlayer interference to MUEs. To suppress intra-cluster interference, a PA-based optimization problem is established to maximize the system and rate. By linearizing the nonlinear minimum rate constraint, the original problem is transformed into a convex optimization problem, and then the optimal closed form solution of the problem is derived. The simulation results verify the validity of the proposed interference management scheme.

Keywords NOMA-HetNet, interference management, interference alignment (IA), power allocation (PA), convex optimization