

基于 NOMA 的全双工多层异构网下行链路覆盖分析

杨小蓉¹, 贾向东^{1,2}, 范巧玲¹, 陈玉宛¹

(1. 西北师范大学计算机科学与工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏南京 210003)

摘要: 针对异构网 (Heterogeneous Network, HetNet) 无线回程, 现有研究主要集中于提升网络吞吐量, 而对回程覆盖性能研究较少. 由此, 本文构造了一种在小小区基站 (Small cell Base Station, SBS) 上结合全双工 (Full-Duplex, FD) 和非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 技术的大规模多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 辅助多层 HetNet 模型. 利用信干比 (Signal-to-Interference Ratio, SIR) 来模拟有源 SBS 的分布, 得出不同类型接收端的干扰; 然后推导了移动用户 (Mobile User, MU) 下行链路覆盖概率闭合表达式. 仿真和数值结果表明, SBS 下行链路覆盖概率会随着小小区下行链路功率共享系数的增加而减小; 此外, 通过对比 NOMA 和正交多址接入 (Orthogonal Multiple Access, OMA) 以及 FD 和半双工 (Half-Duplex, HD) 对下行链路覆盖性能的影响, 本文提出的方案能显著提升网络性能.

关键词: 异构网; 大规模多输入多输出; 非正交多址接入; 全双工; 功率共享

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)06-1169-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.06.018

Coverage Probability Analysis of Downlink About Full-Duplex Multi-tier HetNet Based on NOMA

YANG Xiao-rong¹, JIA Xiang-dong^{1,2}, FAN Qiao-ling¹, CHEN Yu-wan¹

(1. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Wireless Communication Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: For wireless backhaul of heterogeneous networks (HetNet), the existing researches mainly focus on improving the network throughput. However, few research is done on the coverage performance in the backhaul link. Therefore, this paper constructs a massive multiple input multiple output (MIMO) enabled multi-tier heterogeneous network model combing full-duplex (FD) and non-orthogonal multiple access (NOMA) technologies on small cell base stations (SBSs). The signal-to-interference ratio (SIR) is utilized to simulate the distribution of active SBS, and the interference is obtained at different types of receivers. Then, the mobile user (MU) downlink coverage probability closed-form expressions are deduced. Simulation and numerical results show that the SBS downlink coverage probability decreases as the downlink power sharing coefficient of the small cell increases. In addition, by comparing the effects of NOMA and orthogonal multiple access (OMA), FD and half-duplex (HD) on downlink coverage performance, network performance of the proposed scheme is significantly improved.

Key words: heterogeneous networks; massive multiple input multiple output; non-orthogonal multiple access; full-duplex; power sharing

1 引言

在迅速普及的智能移动设备和层出不穷的新型业务的推动下, 无线网络正面临着数据流量指数增长的巨大挑

战^[1]. 为了满足更高的网络性能需求, 异构网络 (Heterogeneous Network, HetNet) 架构成为未来网络主要技术手段之一^[2]. 通过部署 HetNet, 使得路径损耗降低、能量效率和频谱效率增加^[3]. 然而, 在大量部署小小区基站 (Small cell

Base Station, SBS) 的 HetNet 中, 由于实际情况的限制, 将每个接入点连接到核心网络的有线回程方案面临着成本高、维护难的问题, 且在网络升级和扩展等方面都存在极大的弊端. 因此, 易于快速部署、高灵活性、低成本的无线回程方案成为了构建 5G 网络的主流选择.^[4-6]

由于无线回程方案不占用额外的频谱资源, 引起了学术界的广泛关注. Chen^[7] 从用户性能角度, 提出了一种用于全双工 (Full-Duplex, FD) 自回程无线网络的以用户为中心的联合接入-回程传输框架. Ni^[8] 研究了一种利用大型天线阵列的空间自由度, 以最大化 HetNet 中用户设备的下行链路和速率的传输方案; 此外, 在无线回程容量的约束下, 考虑了一种下行协作预编码算法来抑制小小区范围扩展引起的干扰. Wang^[9] 针对 SBS 缓存容量有限的问题, 考虑了大规模多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 辅助宏基站 (Macro Base Station, MBS) 提供无线自回程方案, 得出在没有任何下行链路信道估计的大规模 MIMO 回程可实现速率. Huang^[10] 等人研究了大规模 MIMO HetNet 无线回程的频谱和能效评估框架, 以最大限度地提高频谱效率和能效的加权总和. Nguyen^[11] 提出了一种基于非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 技术的新型协作传输方案来重新设计无线回程双层异构网络架构. 然而以上工作均未考虑将 NOMA、FD 和大规模 MIMO 技术结合在 HetNet 模型中, 也未对 HetNet 无线回程中下行链路覆盖性能做具体分析.

基于上述分析, 本文构造了一种结合 NOMA 和 FD 技术的大规模 MIMO 辅助多层 HetNet 模型. 首先, 利用随机几何和泊松点过程 (Poisson Point Process, PPP) 模拟回程和接入链路的干扰. 然后, 利用随机几何特性, 考虑 NOMA 不同功率共享系数的功率域叠加编码和信道状态信息的性质, 推导了 MU 下行链路覆盖概率解析表达式; 最后通过仿真分析了功率共享系数、NOMA 和正交多址接入 (Orthogonal Multiple Access, OMA) 以及 FD 和半双工 (Half-Duplex, HD) 模式对下行链路覆盖概率的影响.

2 网络模型和信道假设

利用 NOMA 进行无线回程的全双工 HetNet 系统模型如图 1 所示. 同频部署 $K+1$ 层 HetNet, 即第一层宏小区和 K 层小小区. 密集部署的 SBS 通过 MBS 提供的回程连接到核心网. MBS 和 SBS 均采用 FD 技术. SBS 和 MBS, MU 和 SBS, MBS 和 MU 之间的链路分别被称为小小区回程链路, 小小区接入链路和宏小区接入链路.

MBS 的发射天线和接收天线分别有 N_{Tx} 和 N_{Rx} 根, 而 SBS 和 MU 均只配备一根天线. 本文只考虑 MBS 下行链路传输, MBS 可以同时为 MU 提供的最大连接数为

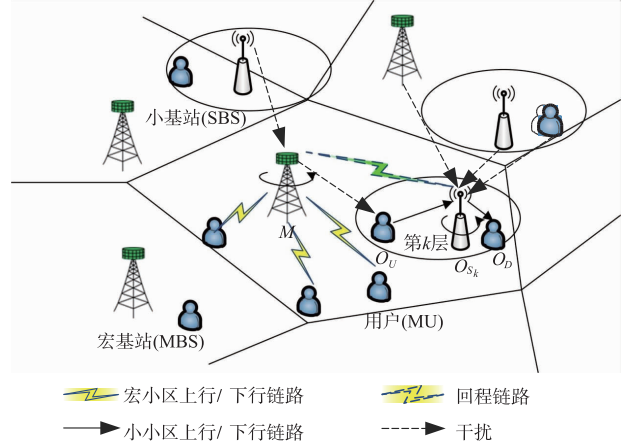


图1 全双工HetNet利用NOMA进行无线回程

N^{MU} . 每个 MBS 能为第 k 层 SBS 同时提供的回程链路数为 $N_{S_k}^B$, N^B 为回程链路最大值, 则有 $N_{S_1}^B + N_{S_2}^B + \dots + N_{S_K}^B = N^B$. MBS 传输信号的功率均为 P_M . 每个 SBS 上结合 FD 和 NOMA 技术, 将小小区下行信号和上行回程信号组合为基于功率共享系数 μ^{BH} 和 μ^{SMU} 的 NOMA 信号, μ^{BH} 和 μ^{SMU} 分别用于回程信号和小小区下行接入链路信号. 所有 SBS 发射功率为 P_{S_k} , 所有 MU 发射功率为 P_U .

MBS 和 SBS 的空间拓扑分别被建模为独立的 PPP Φ_M 和独立的 PPP Φ_{S_k} , 其空间密度分别为 λ_M 和 λ_{S_k} . 使用 $N_{S_k}^B$ 表示与回程链路上给定 MBS 级联的 k 层中 SBS 的实际数量. 为了便于分析, 将 $N_{S_k}^B$ 近似为 $E\{N_{S_k}^B\} = \lambda_{S_k}/\lambda_M$. 第 k 层由 MBS 实际提供的回程数量为 $\min(N^B, \lambda_{S_k}/\lambda_M)$. 将成功回程的 SBS 定义为密度 $\tilde{\lambda}_{S_k} = \min(N^B, \lambda_{S_k}/\lambda_M) \cdot \lambda_M$ 的独立 PPP $\tilde{\Phi}_{S_k}$. 有效上行链路 MU 由强度 $\lambda_{U_k}^{UL} = \tilde{\lambda}_{S_k}$ 的独立 HPPP $\Phi_{U_k}^{UL}$ 建模. 距离为 $|x|$ 的无线信道路径损耗建模为 $\beta|x|^{-\alpha}$, 其中, β 是频率相关的常数值, $\alpha \in \{\alpha_M, \alpha_{S_k}\}$, α_M 和 α_{S_k} 分别是宏小区和第 k 层小小区的路径损耗指数. 小规模衰落被建模为独立同分布准静态瑞利衰落. 假设已知信道状态信息和干扰受限的网络, 信号对于干扰加噪声被替换为信干比 (Signal-to-Interference Ratio, SIR).

假定 MBS 和 SBS 使用预压缩技术^[12], 并将发射天线和接收天线之间干扰表示为自干扰, 信道矩阵建模为 $\mathbf{H}_M \in \mathbb{R}^{N_{Rx} \times N_{Tx}}$. 自干扰链路建模为瑞利衰落信道^[13]. 自干扰矩阵元素被建模为独立同分布 $N(0, \sigma_M^2)$. σ_M^2 为自干扰强度. 接收的自干扰功率为 $P_{LI, M} = \delta_M P_M \cdot \sigma_M^2$, 其中 δ_M 是相同的干扰消除因子. 同样, SBS 的自干扰建模为 $\mathbf{H}_S \sim N(0, \sigma_S^2)$, 自干扰功率为 $P_{LI, S_k} = \delta_{S_k} P_{S_k} \cdot \sigma_S^2$, δ_{S_k} 为第 k 层中 SBS 的相同干扰消除因子.

3 用户级联和干扰分析

考虑下行链路传输,一个 MU 可以与 SBS 或 MBS 级联. 当某一给定 MU 与 MBS 级联时,覆盖概率只由下行链路 SIR 确定. 但当该 MU 与 SBS 级联时,覆盖概率由下行链路 SIR 和回程链路 SIR 联合确定,考虑一个位于 O_d 处的给定 MU.

3.1 用户级联

对于下行链路传输场景,存在两种类型的用户终端级联. 第一种类型是 MU 与 MBS 的下行链路级联,第二种类型是 MU 与 SBS 的上行链路级联. 如图 1 所示,假定位于 O_u 和 O_d 的两个给定 MU 分别与上行链路和下行链路中第 k 层位于 O_{s_k} 的相同 SBS 级联,并且位于 O_{s_k} 的 SBS 与回程链路位于 M 的 MBS 级联.

与文献[12]类似,使用基于最大偏置接收功率(Biased-Received-Power, BRP)规则的用户级联,对于 MU 下行链路级联,位于 O_d 处的一个给定 MU 来自位于 M ($M \in \Phi_M$) 处 MBS 的平均偏置接收功率(Average-Biased-Received-Power, ABRP)表示为

$$P_{R,M} = \zeta_M \frac{G_M P_M}{N^{\text{MU}}} \beta |X_{M,O_d}|^{-\alpha_M} \quad (1)$$

其中 G_M 是迫零波束成形传输的阵列增益,且 $G_M = N_{\text{Tx}} - N^{\text{MU}} + 1$, ζ_M 是 MBS 的偏置因子. 假设所有 MBS 具有相同的偏置因子.

在此 HetNet 中,回程信号和下行链路接入信号在功率域中叠加,具有功率共享系数为 $\mu_{s_k}^{\text{BH}}$ 和 $\mu_{s_k}^{\text{SMU}}$.

因此,位于 O_d 处的一个给定 MU 来自第 k 层位于 j 处 SBS 的 ABRP 为

$$P_{R,S_j} = \zeta_{s_j} \mu_{s_k}^{\text{SMU}} P_{s_j} \beta |X_{S_j,O_d}|^{-\alpha_{s_j}} \quad (2)$$

其中 ζ_{s_k} 是第 k 层 SBS 的相同偏置因子.

然后,根据式(1)和式(2),得到引理 1.

引理 1 使用基于 ABRP 的下行链路 MU 级联规则,位于 O_d 的给定 MU 与 MBS 和第 k 层 SBS 的级联概率分别为

$$A_{\text{MU}}^{\text{M,DA}} = 2\pi\lambda_M \int_0^\infty \exp\left(-\left(\sum_{j=1}^K \pi\lambda_{s_j} \left(\frac{\mu_{s_j}^{\text{SMU}} P_{s_j} \zeta_{s_j} N^{\text{MU}}}{P_M \zeta_M G_M}\right)^{\frac{2}{\alpha_{s_j}}}\right) x^{\frac{2\alpha_M}{\alpha_{s_j}}} + \pi\lambda_M x^2\right) dx \quad (3)$$

$$A_{\text{MU}}^{\text{S}_k,\text{DA}} = 2\pi\lambda_{s_k} \int_0^\infty \exp\left(-\left(\sum_{j=1}^K \pi\lambda_{s_j} \left(\frac{P_{s_j} \zeta_{s_j}}{P_{s_k} \zeta_{s_k}}\right)^{\frac{2}{\alpha_{s_j}}}\right) x^{\frac{2\alpha_{s_k}}{\alpha_{s_j}}} + \left(\frac{G_M}{N^{\text{MU}}} \frac{P_M \zeta_M}{\mu_{s_k}^{\text{SMU}} P_{s_k} \zeta_{s_k}}\right)^{\frac{2}{\alpha_M}} x^{\frac{2\alpha_{s_k}}{\alpha_M}}\right) dx \quad (4)$$

根据式(1)~(4),得到引理 2.

引理 2 MBS 与其服务的给定 MU 之间下行链路

距离 $|X_{M,O_d}|$ 的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)为

$$f_{|X_{M,O_d}|}(x) = \frac{2\pi\lambda_M x}{A_{\text{MU}}^{\text{M,DA}}} \exp\left(-\left(\sum_{j=1}^K \pi\lambda_{s_j} \left(\frac{\mu_{s_j}^{\text{SMU}} P_{s_j} \zeta_{s_j} N^{\text{MU}}}{P_M \zeta_M G_M}\right)^{\frac{2}{\alpha_{s_j}}}\right) x^{\frac{2\alpha_M}{\alpha_{s_j}}} + \pi\lambda_M x^2\right) \quad (5)$$

第 k 层 SBS 与其服务位于 O_d 处的给定 MU 之间距离 $|X_{O_{s_k},O_d}|$ 的 PDF 为

$$f_{|X_{O_{s_k},O_d}|}(x) = \frac{2\pi\lambda_{s_k} x}{A_{\text{MU}}^{\text{S}_k,\text{DA}}} \exp\left(-\left(\sum_{j=1}^K \pi\lambda_{s_j} \left(\frac{P_{s_j} \zeta_{s_j}}{P_{s_k} \zeta_{s_k}}\right)^{\frac{2}{\alpha_{s_j}}}\right) x^{\frac{2\alpha_{s_k}}{\alpha_{s_j}}} + \left(\frac{G_M}{N^{\text{MU}}} \frac{P_M \zeta_M}{\mu_{s_k}^{\text{SMU}} P_{s_k} \zeta_{s_k}}\right)^{\frac{2}{\alpha_M}} x^{\frac{2\alpha_{s_k}}{\alpha_M}}\right) \quad (6)$$

MU 上行链路级联是位于 O_u 处的 MU 与一个 SBS 级联,而 SBS 回程链路的级联是位于 O_{s_k} 处的给定 SBS 与 MBS 级联用于回程.

简单起见,基于最近距离的规则用于两个用户终端的级联,可以最大化下行链路 SINR^[13],得到引理 3.

引理 3 使用没有偏置因子的最近距离级联规则,给定 MU 与第 k 层最近的位于 O_{s_k} 处 SBS 的级联概率为

$$A_{\text{MU}}^{\text{S}_k,\text{UA}} = 2\pi\lambda_{s_k} \int_0^\infty x \exp\left(-\sum_{j=1}^K \pi\lambda_{s_j} x^{\frac{2\alpha_{s_k}}{\alpha_{s_j}}}\right) dx \quad (7)$$

位于 O_u 处的给定 MU 与 k 层级联的 SBS 之间上行链路接入距离 $|X_{O_u,O_{s_k}}|$ 的 PDF 为

$$f_{|X_{O_u,O_{s_k}}|}(x) = \frac{1}{A_{\text{MU}}^{\text{S}_k,\text{UA}}} \times 2\pi\lambda_{s_k} x \exp\left(-\sum_{j=1}^K \pi\lambda_{s_j} x^{\frac{2\alpha_{s_k}}{\alpha_{s_j}}}\right) \quad (8)$$

证明 有关证明,请参阅文献[14].

给定 SBS 与其级联的 MBS 之间距离 $|X_{O_{s_k},M}|$ 的 PDF 为

$$f_{|X_{O_{s_k},M}|}(z) = 2\pi\lambda_M z e^{-\pi\lambda_M z^2} \quad (9)$$

3.2 接收机总干扰的拉普拉斯变换

假设用户终端 u 接收来自干扰终端 $v \in \Phi_p$ 的干扰,其中 Φ_p 是密度为 λ_p 的独立 PPP. 随机变量 $h_{v,u}$ (或 $g_{v,u}$) 是信道增益, $|X_{v,u}|$ 是终端 $v \in \Phi_p$ 与给定接收机终端 u 之间的距离. 相应的路径损耗指数是 α_p . 在不同分布的随机变量 $h_{v,u}$ (或 $g_{v,u}$) 下有干扰聚合的以下命题.

命题 1 在小规模衰落信道增益服从单位功率的瑞利分布且距离 $|X_{v,u}|$ 满足 $|X_{v,u}| \geq 0$ 的情况下,利用等效功率参数 A_p 和路径损耗指数 α_p ,来自干扰终端 $v \in \Phi_p$ 的给定接收机 u 接收到干扰信号的拉普拉斯变换(Laplace Transform, LT)由式(10)给出

$$\begin{aligned} & G_{\text{Ray}}(1, \lambda_p, A_p, \alpha_p, 0, s) \\ &= \exp\left(-2\pi\lambda_p (A_p s)^{\frac{2}{\alpha_p}} \frac{1}{\alpha_p} \pi \csc\left(\frac{2}{\alpha_p} \pi\right)\right) \end{aligned} \quad (10)$$

当距离 $|X_{v,u}|$ 满足 $|X_{v,u}| \geq z$ 时, 相应的 LT 为

$$G_{\text{Ray}}(1, \lambda_p, A_p, \alpha_p, z, s) = \exp\left(-2\pi\lambda_p \frac{(sA_p)^2 z^{2-\alpha_p}}{\alpha_p - 2} {}_2F_1\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha_p}; 2 - \frac{2}{\alpha_p}; -z^{-\alpha_p}(sA_p)\right)\right) \quad (11)$$

命题 2 在等效小规模衰落信道增益 $g_{v,u}$ 服从 $g_{v,u} \sim \Gamma(N, 1)$ 的 Gamma 分布情况下, 距离 $|X_{v,u}|$ 满足 $|X_{v,u}| \geq 0$, 利用等效功率参数 A_p 和路径损耗指数 α_p , 来自终端 $v \in \Phi_p$ 的给定接收机 u 接收到干扰信号的 LT 为

$$G_{\text{Gam}}(N, \lambda_p, A_p, \alpha_p, 0, s) = \exp\left(-2\pi\lambda_p \sum_{v=1}^N \binom{N}{v} \frac{1}{v} (sA_p)^{\frac{2}{\alpha_p}} B\left(v - \frac{2}{\alpha_p}, N - v + \frac{2}{\alpha_p}\right)\right) \quad (12)$$

其中, $\binom{N}{v} = \frac{N!}{v!(N-v)!}$ 是二项式系数.

当距离满足 $|X_{v,u}| \geq z$ 时, 相应的 LT 为

$$G_{\text{Gam}}(N, \lambda_p, A_p, \alpha_p, z, s) = \exp\left(-2\pi\lambda_p \sum_{v=1}^N \binom{N}{v} (sA_p)^v \frac{1}{v\alpha_p - 2} (z)^{2-\alpha_p} {}_2F_1\left(N, v - \frac{2}{\alpha_p}; 1 + v - \frac{2}{\alpha_p}; -sA_p z^{-\alpha_p}\right)\right) \quad (13)$$

4 下行接入链路 SIR 覆盖概率

4.1 MBS 下行链路 SIR 和干扰分布

当某一 MU 与位于 M 处的 MBS 级联时, 该 MU 处接收到的 SIR 表示为

$$\text{SIR}_{O_D}^{M, \text{DA}}(|X_{M, O_D}|) = \frac{P_M^{\text{MU}} g_{M, O_D} |X_{M, O_D}|^{-\alpha_M}}{(I_{O_D}^{S-M} + I_{O_D}^{\text{MDL-M}} + I_{O_D}^{\text{MUUL-M}})} \quad (14)$$

其中, g_{M, O_D} 和 X_{M, O_D} 是小规模衰落信道功率增益和给定 MU 与其级联的位于 M 处 MBS 之间的距离, $g_{M, O_D} \sim \Gamma(G_M, 1)$. $I_{O_D}^{S-M}$, $I_{O_D}^{\text{MDL-M}}$ 和 $I_{O_D}^{\text{MUUL-M}}$ 分别是来自 SBS, MBS 下行链路和 MU 上行链路的传输干扰来自 SBS 的干扰 $I_{O_D}^{S-M}$ 表示为 $I_{O_D}^{S-M} = \sum_{j=1}^K \sum_{y \in \Phi_j} P_{S_j} h_{y, O_D} |X_{y, O_D}|^{-\alpha_{S_j}}, h_{y, O_D} \sim \exp(1)$.

使用 MU 下行链路级联规则, 当给定 MU 与 MBS 级联时, 使用式(11)得到干扰 $I_{O_D}^{S-M}$ 的 LT 为

$$\mathcal{L}_{I_{O_D}^{S-M}}(s) = \prod_{j=1}^K G_{\text{Ray}}(1, \bar{\lambda}_{S_j}, P_{S_j}, \alpha_{S_j}, D_s^{M, \text{DA}}(|X_{M, O_D}|), s) \quad (15)$$

来自其他 MBS 的下行链路传输干扰被表示为

$$I_{O_D}^{\text{MDL-M}} = \sum_{z \in \Phi_u \setminus M} \frac{P_M}{N^{\text{MU}}} g_{z, O_D} |X_{z, O_D}|^{-\alpha_M}, \text{其中小规模衰落信道增益满足 } g_{v,u} \sim \Gamma(N^{\text{MU}}, 1).$$

类似地, 使用式(13)得到干扰 $I_{O_D}^{\text{MDL-M}}$ 的 LT 为

$$\mathcal{L}_{I_{O_D}^{\text{MDL-M}}}(s) = G_{\text{Gam}}\left(N^{\text{MU}}, \lambda_M, \frac{P_M}{N^{\text{MU}}}, \alpha_M, D_M^{\text{MDL-M}}(|X_{M, O_D}|), s\right) \quad (16)$$

来自 MU 的上行链路传输的干扰表示为

$$I_{O_D}^{\text{MUUL-M}} = \sum_{j=1}^K \sum_{w \in \Phi_j \setminus O_D} P_U h_{w, O_D} |X_{w, O_D}|^{-\alpha_{S_j}}, h_{w, O_D} \sim \exp(1).$$

使用文献[14]中的结果, 得到干扰 $I_{O_D}^{\text{MUUL-M}}$ 的 LT 为

$$\mathcal{L}_{I_{O_D}^{\text{MUUL-M}}}(s) = \prod_{j=1}^K G_{\text{Ray}}(1, \bar{\lambda}_{S_j}, P_U, \alpha_M, 0, s) \quad (17)$$

4.2 NOMA 辅助 SBS 下行链路 SIR 和干扰分布

当位于 O_D 处的给定 MU 级联到第 k 层 SBS 时, 其接收的复合信号包含期望信号及从该 SBS 到与 SBS 级联的 MBS 的回程信号. 位于 O_D 处的给定 MU 接收的回程信号 SIR 为

$$\text{SIR}_{O_D}^{S_k, \text{DA} \rightarrow \text{UBH}}(|X_{O_{S_k}, O_D}|) = \frac{\mu_{S_k}^{\text{BH}} P_{S_k} h_{O_{S_k}, O_D} |X_{O_{S_k}, O_D}|^{-\alpha_{S_k}}}{\mu_{S_k}^{\text{SMU}} P_{S_k} h_{O_{S_k}, O_D} |X_{O_{S_k}, O_D}|^{-\alpha_{S_k}} + I_{O_D}^{S-S} + I_{O_D}^{\text{MDL-S}} + I_{O_D}^{\text{MUUL-S}}} \quad (18)$$

如果可以正确地解码回程信号, 那么给定 MU 将尝试恢复自己的期望信号, 则给出相应的 SIR 为

$$\text{SIR}_{O_D}^{S_k, \text{DA} \rightarrow \text{MU}}(|X_{O_{S_k}, O_D}|) = \frac{\mu_{S_k}^{\text{SMU}} P_{S_k} h_{O_{S_k}, O_D} |X_{O_{S_k}, O_D}|^{-\alpha_{S_k}}}{I_{O_D}^{S-S} + I_{O_D}^{\text{MDL-S}} + I_{O_D}^{\text{MUUL-S}}} \quad (19)$$

在式(18)和式(19)中, 小规模衰落信道增益 $h_{O_{S_k}, O_D}$ 满足 $h_{O_{S_k}, O_D} \sim \exp(1)$, $I_{O_D}^{S-S}$, $I_{O_D}^{\text{MDL-S}}$ 和 $I_{O_D}^{\text{MUUL-S}}$ 是来自其他 SBS, MBS 下行链路传输和其他 MU 上行链路传输接收的干扰. 来自其他 SBS 的干扰为

$$I_{O_D}^{S-S} = \sum_{j=1}^K \sum_{a \in \Phi_j \setminus O_{S_k}} \beta_{S_j} h_{a, O_D} |X_{a, O_D}|^{-\alpha_{S_j}}, h_{a, O_D} \sim \exp(1)$$

使用下行链路级联规则, 得到 $|X_{a, O_D}| \geq D_{S_k}^{S, \text{DA}}(|X_{O_{S_k}, O_D}|)$, 因此, 由式(11)得到干扰 $I_{O_D}^{S-S}$ 的 LT 为

$$\mathcal{L}_{I_{O_D}^{S-S}}(s) = \prod_{j=1}^K G_{\text{Ray}}(1, \bar{\lambda}_{S_j}, P_{S_j}, \alpha_{S_j}, D_{S_k}^{S, \text{DA}}(|X_{O_{S_k}, O_D}|), s) \quad (20)$$

来自 MBS 下行链路的干扰为

$$I_{O_D}^{\text{MDL-S}} = \sum_{b \in \Phi_M} \frac{P_M}{N^{\text{MU}}} g_{b, O_D} |X_{b, O_D}|^{-\alpha_M}, g_{b, O_D} \sim \Gamma(N_M, 1)$$

距离满足约束 $|X_{b, O_D}| \geq D_M^{S, \text{DA}}(|X_{O_{S_k}, O_D}|)$, 于是 $I_{O_D}^{\text{MDL-S}}$ 的 LT 为

$$\mathcal{L}_{I_{O_D}^{\text{MDL-S}}}(s) = G_{\text{Gam}}\left(N^{\text{MU}}, \lambda_M, \frac{P_M}{N^{\text{MU}}}, \alpha_M, D_M^{S, \text{DA}}(|X_{O_{S_k}, O_D}|), s\right) \quad (21)$$

来自 MU 上行链路的干扰为

$$I_{O_D}^{\text{MUUL-S}} = \sum_{j=1}^K \sum_{c \in \Phi_c \setminus O_D} P_U h_{c,O_D} |X_{c,O_D}|^{-\alpha_{S_j}},$$

$I_{O_D}^{\text{MUUL-S}}$ 的 LT 与 $I_{O_{S_k}}^{\text{MUUL}}$ 的相同, 即 $\mathcal{L}_{I_{O_D}^{\text{MUUL-S}}}(s) = \mathcal{L}_{I_{O_{S_k}}^{\text{MUUL}}}(s)$.

其中 $I_{O_{S_k}}^{\text{MUUL}}$ 的 LT 为

$$\mathcal{L}_{I_{O_{S_k}}^{\text{MUUL}}}(s) = \prod_{j=1}^K \exp\left(-\int_0^\infty \frac{2\pi \bar{\lambda}_{S_j} (1 - \exp(-\pi \bar{\lambda}_{S_j} x^2 / G_j^{\text{UL}}))}{1 + (sP_U \beta)^{-1} x^{\alpha_{S_j}}} x dx\right) \quad (22)$$

4.3 下行链路的覆盖概率

当位于 O_D 处的给定 MU 与 MBS 级联时, 由式(14)中的 $\text{SIR}_{O_D}^{\text{M,DA}}(|X_{M,O_D}|)$, 对于给定的阈值 τ_M^{DA} , 下行链路 SIR 覆盖概率由式(23)给出

$$P\{\text{SIR}_{O_D}^{\text{M,DA}} > \tau_M^{\text{DA}}\} = P\left\{g_{M,O_D} > \frac{\tau_M^{\text{DA}} |X_{M,O_D}|^{\alpha_M} N^{\text{MU}}}{P_M} (I_{O_D}^{\text{S-M}} + I_{O_D}^{\text{MDL-M}} + I_{O_D}^{\text{MUUL-M}})\right\} \quad (23)$$

其中 $S_M^{\text{DA}} = \tau_M^{\text{DA}} N^{\text{MU}} / P_M$. 使用式(5)以及文献[15]中给出的特性(3.351.2), 得到定理 1.

定理 1 当位于 O_D 处的给定 MU 与下行链路中的 MBS 级联时, 下行链路 SIR 覆盖概率为式(24).

$$P_{\text{Cov,MU}}^{\text{M,DA}} = \frac{2\pi\lambda_M}{A_{\text{MU}}^{\text{M,DA}}} \int_0^\infty \sum_{m=0}^{N_{\text{Tx}} - N^{\text{MU}}} \frac{(S_M^{\text{DA}} x^{\alpha_M})^m}{(-1)^m m!} \sum_{m_1+m_2+m_3=m} \binom{m}{m_1, m_2, m_3} \cdot T_{\text{DL}}(x) (T_{\text{DL}}^{\text{S-M}}(S_M^{\text{DA}} x^{\alpha_M}) \cdot T_{\text{DL}}^{\text{MDL-M}}(S_M^{\text{DA}} x^{\alpha_M}) \cdot T_{\text{DL}}^{\text{MUUL-M}}(S_M^{\text{DA}} x^{\alpha_M})) x dx \quad (24)$$

其中 $1 \cdot q_1^{\text{S}} + 2 \cdot q_2^{\text{S}} + \dots + m_1 \cdot q_{m_1}^{\text{S}} = m_1, 1 \cdot q_1^{\text{M}} + 2 \cdot q_2^{\text{M}} + \dots + m_2 \cdot q_{m_2}^{\text{M}} = m_2, 1 \cdot q_1^{\text{U}} + 2 \cdot q_2^{\text{U}} + \dots + m_3 \cdot q_{m_3}^{\text{U}} =$

m_3 . 令 $\tau_{\text{MU}}^{\text{DAX}} = \max\left(\frac{\tau_{S_k}^{\text{UBH}}}{\mu_{S_k}^{\text{BH}} - \mu_{S_k}^{\text{SMU}} \tau_{S_k}^{\text{UBH}}}, \frac{\tau_{S_k}^{\text{DA}}}{\mu_{S_k}^{\text{SMU}}}\right)$, 得到定理 2.

定理 2 当给定 MU 连接到第 k 层 SBS 时, SBS-MU 下行链路的覆盖概率为式(25).

$$P_{\text{Cov,MU}}^{\text{S}_k, \text{DA}} = \frac{2\pi\lambda_{S_k}}{A_{\text{MU}}^{\text{S}_k, \text{DA}}} \int_0^\infty \mathcal{L}_{I_{O_D}^{\text{S-S}}} \left(\frac{\tau_{\text{MU}}^{\text{DAX}} y^{\alpha_{S_k}}}{P_{S_k}}\right) \mathcal{L}_{I_{O_D}^{\text{MDL-S}}} \left(\frac{\tau_{\text{MU}}^{\text{DAX}} y^{\alpha_{S_k}}}{P_{S_k}}\right) \mathcal{L}_{I_{O_D}^{\text{MUUL-S}}} \left(\frac{\tau_{\text{MU}}^{\text{DAX}} y^{\alpha_{S_k}}}{P_{S_k}}\right) \cdot \exp\left\{-\left[\sum_{j=1}^K 2\pi\lambda_{S_j} \left(\frac{P_{S_j} \zeta_{S_j}}{P_{S_k} \zeta_{S_k}}\right)^{\frac{2}{\alpha_{S_j}}} y^{\frac{2\alpha_{S_k}}{\alpha_{S_j}}}\right] + \left(\frac{G_M}{N^{\text{MU}}} \cdot \frac{P_M \zeta_M}{\mu_{S_k}^{\text{SMU}} P_{S_k} \zeta_{S_k}}\right)^{\frac{2}{\alpha_M}} y^{\frac{2\alpha_{S_k}}{\alpha_M}}\right\} y dy \quad (25)$$

根据定理 1 和 2, 得到定理 3.

定理 3 对于所考虑的大规模 MIMO 和 NOMA 辅助 HetNet, 给定 MU 的总平均覆盖概率为

$$P_{\text{Cov,MU}}^{\text{DA}} = A_{\text{MU}}^{\text{M,DA}} P_{\text{Cov,MU}}^{\text{M,DA}} + \sum_{k=1}^K A_{\text{MU}}^{\text{S}_k, \text{DL}} P_{\text{Cov,MU}}^{\text{S}_k, \text{DA}} \quad (26)$$

5 仿真和数值结果分析

考虑四层 HetNet, 包括一层 MBS 和三层 SBS, 即 $K=3$, 重复模拟并平均超过 10,000 次迭代. 在整个分析过程中, 定义参数数值如表 1 所示.

表 1 仿真系统参数

参数	数值
宏小区半径	1 km
MBS 发射天线数	20
MBS 接收天线数	20
MBS 上服务的回程数	6
MBS 上服务的用户数	8
MBS 发射功率	55 dBm
1, 2, 3 层 SBS 发射功率	45 dBm, 38 dBm, 33 dBm
MBS 密度	$1/(\pi \times 500^2)$
1 层 SBS 密度	$2/(\pi \times 500^2)$
2 层 SBS 密度	$4/(\pi \times 500^2)$
3 层 SBS 密度	$20/(\pi \times 500^2)$
宏小区路径损耗指数	2.2
1, 2, 3 层 SBS 路径损耗指数	3.8, 3.5, 4
MBS 的偏置因子	1
1, 2, 3 层 SBS 的偏置因子	1.1, 1.2, 1.3
接入链路 with 回程链路 SIR 阈值	0.5

图 2(a) 中, 由于每层的网络部署不同, MU 与不同层级联的情况下, 下行链路覆盖概率是不同的. 虽然下行链路覆盖概率随着发射功率 P_U 而下降, 但只有当 P_U 较大时, P_U 的增加才会降低给定 MU 下行链路覆盖性能. 在不同的功率共享系数下, SBS 的下行链路功率分配也不相同. 同时, 由于 MBS 以相同功率发送信号, MBS 的下行链路覆盖概率不受功率共享系数的影响. 因此, 对于 $\mu^{\text{BH}} = 0.5$ 和 $\mu^{\text{BH}} = 0.7$ 这两种情况, MBS 的覆盖概率完全相同.

图 2(b) 给出了不同 μ^{BH} 下总平均下行链路覆盖概率. 虽然图 2(b) 是从图 2(a) 中取不同层的平均值得到的, 但这个图比图 2(a) 更清晰地显示了综合 μ^{BH} 和 P_U 对总平均下行链路覆盖概率的影响.

图 3 给出了下行链路覆盖概率和下行链路用户级联概率与功率共享系数 μ^{SMU} 的关系. 从图 3(a) 可以看出下行链路覆盖概率随 μ^{SMU} 增加. 然而, 即使每个 SBS

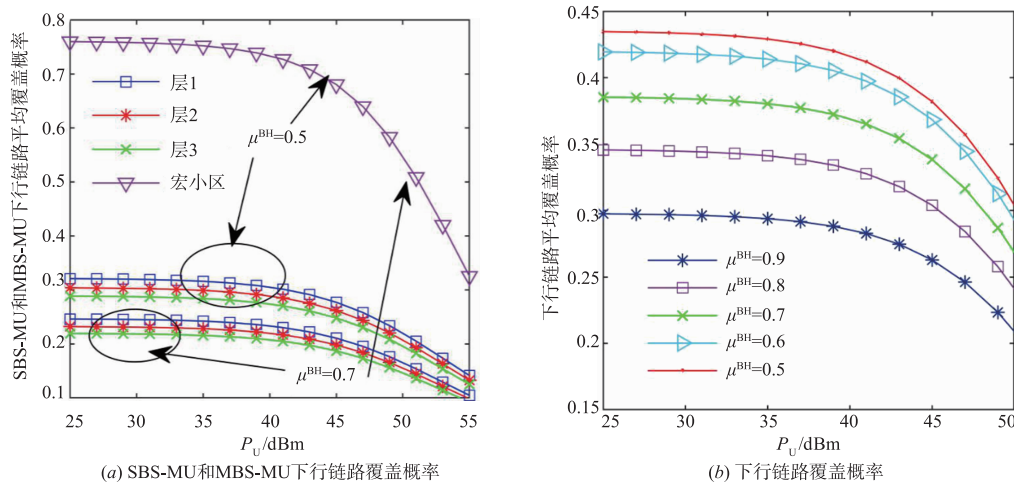
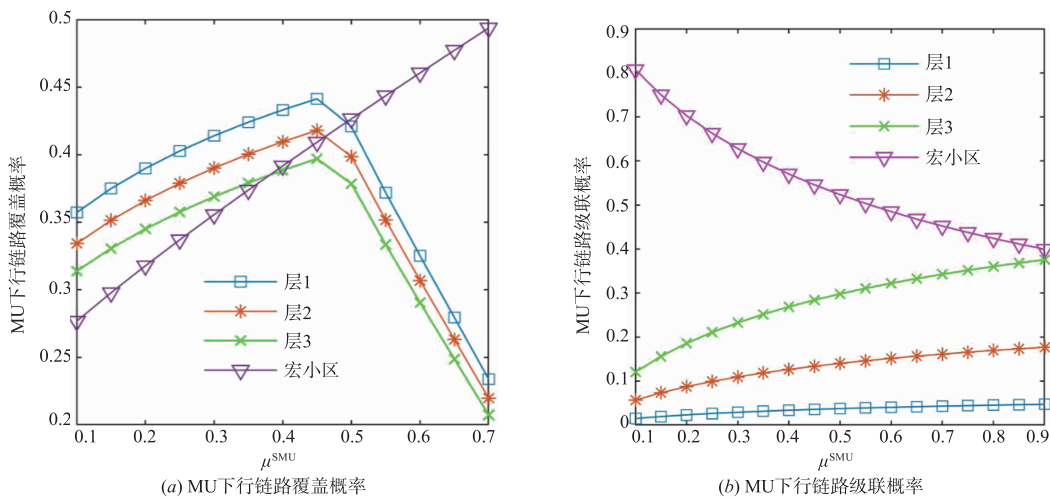


图2 下行链路覆盖概率与MU功率之间的关系

图3 功率共享系数 μ^{SMU} 与MU下行链路覆盖概率的关系

获得更多的功率,在 μ^{SMU} 很大的情况下,会随着 μ^{SMU} 而下降.原因是:首先,当 μ^{SMU} 较小时, μ^{SMU} 的增加导致下行链路发射功率的增加.提高了下行链路覆盖概率;其次,当功率共享系数 $\mu^{SMU} > 0.452$ 时,来自层间或跨层SBS的干扰显著增加,增加的干扰将主导系统性能,下行链路覆盖概率随着 μ^{SMU} 下降.

在图3(b)中,由于多层HetNet下行链路用户级联概率受功率共享系数 μ^{BH} 或 μ^{SMU} 的影响. μ^{SMU} 的增加表明SBS的下行链路获得更多功率,因此MU与第 k 层中最近SBS的级联概率随着 μ^{SMU} 增加.虽然MBS的发射功率不受功率共享系数的影响,但所有下行链路覆盖概率的数量等于1的约束导致MU与最近MBS的级联概率随着 μ^{SMU} 减小.

图4给出了FD模式和HD模式下系统的平均下行链路覆盖概率.假设两种模式下的频谱效率相同,进而

获得FD模式和HD模式各自的阈值.由图4(a)可知,在相同 P_U 下,FD模式下行链路平均覆盖概率明显优于传统HD模式.不同于图4(a),图4(b)研究了第一层(即 $k=1$)SBS发射功率 P_s 对下行链路覆盖概率的影响,可以发现,当 P_s 较小时,FD模式和HD模式具有近似相同的覆盖性能,而当 $P_s > 28$ dBm时,本文提出的FD模式明显要优于HD模式.

图5给出了NOMA系统与OMA系统下行链路覆盖性能的比较.可以发现,当 P_s 较小时,采用NOMA技术可以显著地改善系统的覆盖性能;然而,随着 P_s 增加,NOMA技术带来的增益不再明显.这主要是因为当 P_s 较大时,NOMA系统存在较强的干扰,而OMA由于正交传输可以隔离干扰.当然,在NOMA系统中可以采用干扰消除技术来克服这一问题,由于篇幅的限制,这一问题将在后续的研究中讨论.

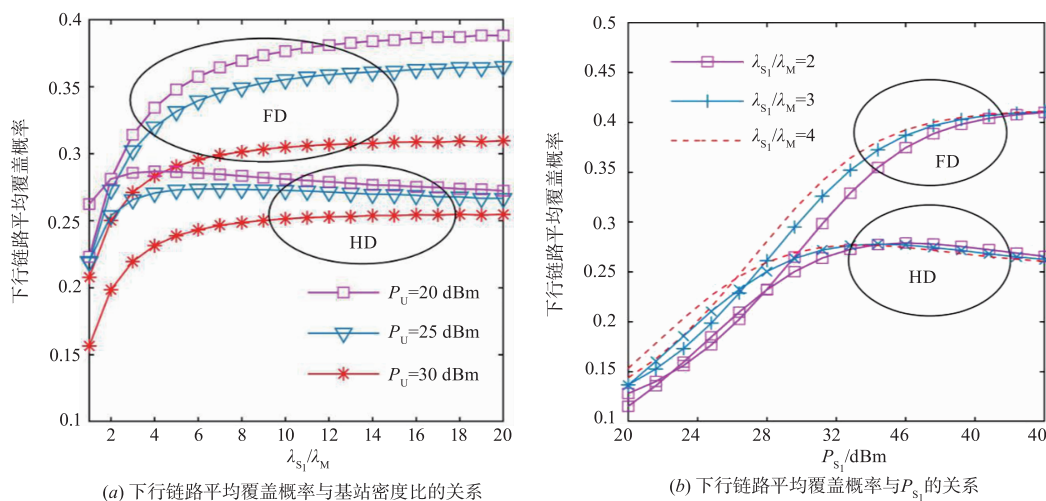


图4 FD与HD模式下行链路覆盖性能比较

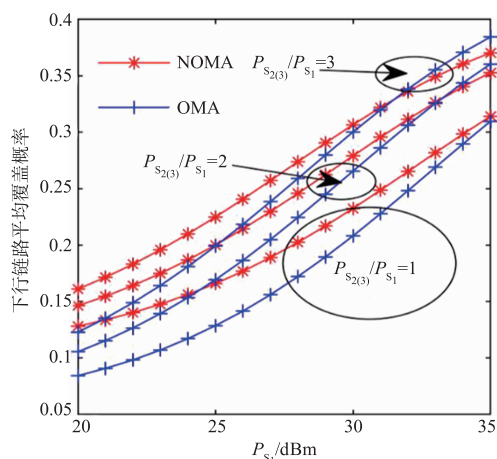


图5 NOMA与OMA系统下行链路覆盖性能比较

6 结论

本文在 SBS 上结合 FD 和 NOMA 技术,构造了一种大规模 MIMO 辅助多层 HetNet 模型,并基于该模型分析了下行链路无线回程覆盖性能.仿真结果表明,所提的模型能很好地表征异构网下行链路传输特性,对给定的 MBS 或 SBS 下行链路传输,当功率共享系数较小时,SIR 覆盖概率随下行接入分配的功率共享系数的增加而降低.最后,对比分析 NOMA 和 OMA 以及 FD 和 HD 对下行链路覆盖性能的影响.在接下来的工作中,将从下行链路频谱效率和能量效率方面做进一步地探讨.

致谢 感谢各位审稿专家提出的修改意见.

参考文献

[1] NI Y F, LIANG J H, SHI X H, et al. Research on key technology in 5G mobile communication network [A]. Proceedings of Intelligent Transportation, Big Data & Smart City [C]. Changsha, China: IEEE, 2019. 199 – 201.

- [2] ANDREWS J G, CLAUSSEN H, DOHLER M, et al. Femtocells: past, present, and future [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 497 – 508.
- [3] 万晓瑜,冯小龙,王正强,樊自甫.基于能量采集异构蜂窝网络的功率分配算法研究[J].电子学报,2017,45(9):2308 – 2312.
- WAN Xiao-yu, FENG Xiao-long, WANG Zheng-qiang, FAN Zi-fu. Research on power allocation algorithm based on energy harvesting heterogeneous cellular network [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(9): 2308 – 2312. (in Chinese)
- [4] SIDDIQUE U, TABASSUM H, HOSSAIN E, et al. Wireless backhauling of 5G small cells: challenges and solution approaches [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(5): 22 – 31.
- [5] AI-KHAFAJI H M R, MAJDI H S. A high throughput architecture for 5G wireless backhaul networks [A]. Proceedings of Electrical Engineering and Photonics [C]. St. Petersburg, Russia: IEEE, 2018. 9 – 12.
- [6] JABER M, LOPEZ-MARTINEZ F J, IMRAN M A, et al. Wireless backhaul: performance modeling and impact on user association for 5G [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(5): 3095 – 3110.
- [7] CHEN E K, TAO M X, ZHANG N. User-centric joint access-backhaul design for full-duplex self-backhauled cooperative networks [A]. Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference [C]. Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE, 2018: 1 – 6.
- [8] NI S J, ZHAO J H, Yang H H, et al. Enhancing downlink transmission in MIMO HetNet with wireless backhaul [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7):

6817 – 6832.

- [9] WANG L F, WONG K-K, LAMBOTHARAN S, et al. Edge caching in dense heterogeneous cellular networks with massive MIMO-aided self-backhaul [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(9): 6360 – 6372.
- [10] HUANG B, GUO A H. Spectral and energy efficient resource allocation for massive MIMO HetNets with wireless backhaul [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 552 – 555.
- [11] NGUYEN T M, AJIB W, ASSI C. A novel cooperative non-orthogonal multiple access (NOMA) in wireless backhaul two-tier HetNets [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(7): 4873 – 4887.
- [12] JO H, SANG Y J, XIA P, et al. Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: a comprehensive downlink SINR analysis [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(10): 3484 – 3495.
- [13] SAKR A H, HOSSAIN E. On user association in multi-tier full-duplex cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 4080 – 4095.
- [14] SINGH S, ZHANG X C, ANDREWS J G. Joint rate and SINR coverage analysis for decoupled uplink-downlink biased cell associations in HetNets [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5360 – 5373.
- [15] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products [M]. San Diego: Academic Press, 2014, 1 – 1184.

作者简介



杨小蓉 女, 1993年3月出生于甘肃省平凉市. 现为西北师范大学计算机科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为无线通信 NOMA、大规模 MIMO 和异构网络等关键技术.
E-mail: 954016199@qq.com



范巧玲 女, 1993年6月出生于甘肃省兰州市. 现为西北师范大学计算机科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为无线通信及其关键技术.
E-mail: 965347284@qq.com



贾向东 (通信作者) 男, 1971年8月出生于甘肃省定西市. 教授, 博士. 发表 SCI、EI 论文 90 余篇. 研究方向为移动与无线通信关键理论与技术.
E-mail: jiaxd@nwnu.edu.cn



陈玉宛 女, 1994年10月出生于河南省南阳市. 现为西北师范大学计算机科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为无线通信及其关键技术.
E-mail: 1256373765@qq.com