

基于非正交多接入的多层全双工异构网回程方案及性能研究

贾向东^{*①②} 纪珊珊^① 范巧玲^① 杨小蓉^①

^①(西北师范大学计算机科学与工程学院 兰州 730070)

^②(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室 南京 210003)

摘要: 为解决多层异构网(HetNet)中全双工小小区基站(SBS)的回程问题, 该文提出一种基于非正交多址接入(NOMA)技术的带内无线回程方案。首先构造出由大规模多输入多输出(MIMO)宏小区基站(MBS)和 K 层单天线SBS组成的 $K+1$ 层HetNet, 网络中所有基站均工作在全双工模式。特别考虑了MBS下行传输模式, 允许全双工SBS采用先进的NOMA技术在下行链路移动用户信号上叠加回程信号。接着利用随机几何知识和齐次泊松点过程模型, 在此HetNet模型上研究移动用户的小小区上行和回程传输信干比覆盖概率, 并讨论SBS的吞吐量。最终结果表明小小区回程传输覆盖概率尽管随着功率共享系数单调变化, 但与移动用户的功率的关系并不满足单调性; 当满足一定功率分配时, 与没有采用NOMA的SBS系统相比, NOMA小小区网络可获得吞吐量增益。

关键词: 5G网络; 异构网; 非正交多址接入; 全双工; 无线回程

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)04-0945-07

DOI: [10.11999/JEIT180463](https://doi.org/10.11999/JEIT180463)

Backhaul Scheme and Performance Study of Full-duplex Multi-tier Heterogeneous Networks Based on Non-orthogonal Multiple Access

JIA Xiangdong^{①②} JI Shanshan^① FAN Qiaoling^① YANG Xiaorong^①

^①(College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

^②(Wireless Communication Key Laboratory of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: To establish effective backhaul connection in multi-tiers Heterogeneous Network (HetNet), by exploiting advanced Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) a novel in-band wireless backhaul scheme is proposed at full-duplex Small cell Base Stations (SBSs). Firstly, a $K+1$ HetNet is investigated, where the first tier consists of Macro Base Stations (MBSs) that are equipped with massive MIMO antennas and the remainder K tiers consist of the different types of single-antenna SBSs. The base stations of the whole network operate in full-duplex mode. Specially, the downlink transmission of MBSs is considered. Hence, at each SBS the backhaul signal is superposed over the downlink signal. Then, by using the method from stochastic geometry and modeling all network's elements as independent homogeneous Poisson Point Processes (PPPs) in this HetNet model, the coverage probabilities of up access link and backhaul link of SBSs are investigated as well as the throughput of small cells. Finally, the presented simulations and numerical results show that the coverage probability of small cell backhaul is changing monotonously with the power sharing efficient, but the monotony is not held for the power of mobile users. Compared with the systems without NOMA, it is found that with reasonable power allocation factor, the NOMA-deployed ones achieve the evident throughput gain.

收稿日期: 2018-05-15; 改回日期: 2018-11-16; 网络出版: 2018-12-05

*通信作者: 贾向东 jiaxd@nwnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61861039, 61561043, 61261015), 甘肃省科技计划资助(18YF1GA060), 甘肃省属普通高校基本科研业务费专项资金项目, 西北师范大学学生创新能力提升计划(CX2018Y043)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61861039, 61561043, 61261015), The Science and Technology Plan Foundation of Gansu Province (18YF1GA060), The Fundamental Research Fund for Gansu Provincial Colleges and Universities, The Student Innovation Ability Promotion Program of Northwest Normal University (CX2018Y043)

Key words: Fifth generation network; Heterogeneous Networks (HetNet); Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Full-duplex; Wireless backhaul

1 引言

随着异构网^[1,2]中小小区基站(Small Base Station, SBS)密集地部署在宏基站(Macro Base Station, MBS)覆盖范围,超密集和大量回程需要连接到核心网,这使得回程问题成为具有高频谱效率要求的5G异构网络的主要挑战之一^[3]。为此,研究人员提出了带内无线自回程方案^[4-6],这种带内无线回程方案因不需要额外的回程硬件和频谱划分吸引了研究人员的极大兴趣,其不仅易于实现,而且工程造价较低。然而,该方案很难在联合全双工(Full-Duplex, FD)和大规模MIMO^[7,8]技术的异构网络中实现,其主要原因是SBS的全双工同时收、发不允许在同一资源块上提供额外的回程服务^[4,5],如果采用带外回程^[6],将降低网络的频谱效率^[9,10]。幸运的是,该联合FD和大规模MIMO技术的5G网络回程问题可以通过使用非正交多址(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术^[11]得以解决。NOMA技术基于叠加编码在发射端将多个不同目标用户的调制符号叠加发送^[12],在接收端利用连续干扰消除技术可分离不同用户的信号,获得期望信号^[13]。本文采用NOMA的思想,提出了一种新颖的全双工大规模MIMO HetNets无线回程方案,利用随机几何和齐次泊松点过程(Poisson Point Process, PPP)方法获得了网络覆盖性能和传输速率比较。

2 系统模型

图1为干扰受限、同频配置的 $K + 1$ 层异构网,第1层网络由大规模MIMO MBS构成,其余 K 层由不同类型的单天线SBS构成。MBS和SBS工作在FD, SBS采用NOMA与MBS建立回程。FD大规模MIMO MBS配备有 N_{Tx} 根发射天线和 N_{Rx} 根接收天线,为了方便讨论,本文只考虑MBS下行链路(Down Link, DL)传输。则在同一时、频块上,

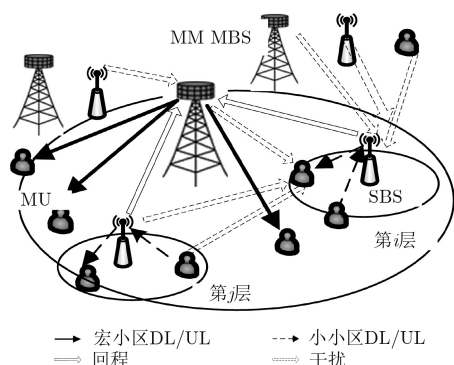


图1 基于NOMA技术的全双工HetNets无线自回程方案

SBS采用FD技术同时接收1个MU的上行信号和发送基于NOMA技术组合的回程信号和1个MU DL信号,而MBS则同时发送下行信号到MU和接收SBS的NOMA信号。

1个MBS可同时为 N_M 个MU提供服务,允许最大回程链路数为 N^B ;假设每个MBS能为第 k 层网络提供的最大回程数为 $N_{S_k}^B$,则 $N_{S_1}^B + N_{S_2}^B + \dots + N_{S_K}^B = N^B$ 。MBS发射功率为 P_M ,每个SBS将下行回程信号和上行回程分别基于功率共享系数 $\mu_{BH,k}$ 和 $\mu_{SMU,k}$ 组合为NOMA信号,第 k 层网络SBS发射功率为 P_{S_k} ,MU的发射功率为 P_U 。网络中MBS和第 k 层SBS的空间拓扑分别建模为强度是 λ_M 和 λ_{S_k} 的独立PPP Φ_M 和 Φ_{S_k} 。假定网络满载,则每层网络中有效的(或被激活的)上行链路MU建模为另一个独立的PPP $\Phi_U^{S_k}$ 。网络中任意两点 a 和 b 间的距离为 $|\mathbf{X}_{a,b}|$,无线信道路径损耗建模为 $\beta|\mathbf{X}_{a,b}|^{-\alpha}$, β 是频率相关的常数,路径损耗指数 $\alpha \in \{\alpha_M, \alpha_{S_k}\}$, α_M 是宏小区路径损耗指数, α_{S_k} 是第 k 层网络的路径损耗;小规模信道衰落建模为独立同分布(independent and identically distributed, i.i.d)单位功率准静态瑞利衰落, $h_{a,b} \sim \exp(1)$;MBS使用迫零预编码。全双工MBS和SBS采用自干扰消除^[8],残余环路干扰(Loop Interference, LI)建模为瑞利衰落^[13]。

本文假设在MU上行链路和SBS回程使用最近距离级联准则^[14],有引理1,详细证明可查阅文献^[14]。

引理 1 网络中任一位于 z 点的MU与第 k 层SBS级联的概率为

$$A_{S_k}^{UA,MU} = 2\pi\lambda_{S_k} \int_0^\infty x \exp\left(-\sum_{j=1}^K \pi\lambda_{S_j} x^{2\alpha_{S_k}/\alpha_{S_j}}\right) dx \quad (1)$$

相应的上行链路级联距离 $|\mathbf{X}_{z,O_{S_k}}|$ 的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)为

$$f_{|\mathbf{X}_{z,O_{S_k}}|}(x) = \frac{1}{A_{S_k}^{UA,MU}} \times 2\pi\lambda_{S_k} x \cdot \exp\left(-\sum_{j=1}^K \pi\lambda_{S_j} x^{2\alpha_{S_k}/\alpha_{S_j}}\right) \quad (2)$$

在回程链路,假设该SBS O_{S_k} 基于最近距离级联到位于 y 的MBS,则级联距离 $Y = |\mathbf{X}_{O_{S_k},y}|$ 的PDF为 $f_Y(y) = 2\pi\lambda_M y e^{-\pi\lambda_M y^2}$ 。基于最近距离准则,假设在第 k 层网络实际级联到一个MBS的SBS数为

$N_{SS_k}^B$ ，是一个随机变量，均值为 $\{N_{SS_k}^B\} = E\lambda_{S_k}/\lambda_M$ ，则每个MBS能够为第 k 层网络提供 $\min(N_{S_k}^B, \lambda_{S_k}/\lambda_M)$ 个回程服务。同时，由于假设网络MU满载，则与给定MBS级联的MU的数量应该等于最大服务数量 N_M 。

3 移动用户上行回程链路SIR覆盖

3.1 小小区MU上行SIR

根据文献[15]，对于一个给定的MU，其上行链路回程SIR覆盖概率由MU-SBS和SBS-MBS的SIR覆盖概率共同决定。不失一般性，下面将考虑位于空间 z 的一个MU，该MU级联到第 k 层网络位于 O_{S_k} 的SBS，该SBS在回程链路又级联到位于 y 的MBS。则对于位于空间 O_{S_k} 处的SBS，其接收SIR可写为

$$\text{SIR}_{S_k}^{\text{UA,MU}}(z) = \frac{P_U h_{z,O_{S_k}} |\mathbf{X}_{z,O_{S_k}}|^{-\alpha_{S_k}}}{I_{O_{S_k}}^{\text{MDL}} + I_{O_{S_k}}^{\text{SDL}} + I_{O_{S_k}}^{\text{SUL}} + P_{\text{LI},S_k}/\beta} \quad (3)$$

其中， $I_{O_{S_k}}^{\text{SDL}} = \sum_{j=1}^K \sum_{l \in \tilde{\Phi}_{S_j} \setminus O_{S_k}} P_{S_j} h_{l,O_{S_k}} |\mathbf{X}_{l,O_{S_k}}|^{-\alpha_{S_j}}$ 表示其他SBS的DL干扰， $I_{O_{S_k}}^{\text{MDL}} = \sum_{i \in \Phi_M} \frac{P_M}{N_M} \cdot g_{i,O_{S_k}} |\mathbf{X}_{i,O_{S_k}}|^{-\alpha_M}$ 表示MBS的DL干扰， $I_{O_{S_k}}^{\text{SUL}} = \sum_{j=1}^K \sum_{m \in \Phi_U^{S_j} \setminus z} P_U h_{m,O_{S_k}} |\mathbf{X}_{m,O_{S_k}}|^{-\alpha_{S_j}}$ 为其他MU的上行干扰； $h_{z,O_{S_k}}$ 和 $\mathbf{X}_{z,O_{S_k}}$ 分别是从小小区MU到SBS O_{S_k} 的信道增益和接入距离， $h_{l,O_{S_k}}$ 和 $\mathbf{X}_{l,O_{S_k}}$ 是从第 j 层的第 l 个SBS到该SBS O_{S_k} 的信道增益和距离， $g_{i,O_{S_k}}$ 和 $\mathbf{X}_{i,O_{S_k}}$ 是从该SBS O_{S_k} 到第 i 个MBS的相应参数， $h_{m,O_{S_k}}$ 和 $\mathbf{X}_{m,O_{S_k}}$ 则是从小小区MU到第 j 层小小区中的第 m 个MU的相应参数。 $g_{i,O_{S_k}}$ 服从参数为 $(N_M, 1)$ 的Gamma分布，信道增益 $h_{z,O_{S_k}}$ ， $h_{l,O_{S_k}}$ ， $h_{m,O_{S_k}}$ 都满足 $h_{a,b} \sim \exp(1)$ 。 $\tilde{\Phi}_{S_j}$ 代表第 j 层小小区网络有回程级联和传输的SBS的集合，其建模为强度为 $\tilde{\lambda}_{S_j} = \lambda_M \cdot N_{S_j}$ 的独立PPP。

3.2 小小区SBS回程链路SIR

SBS处采用NOMA技术同时发送回程信号和SBS下行链路信号，由于MBS有较远的距离，故将级联的MBS看作给定SBS的远用户，而MU看作近用户。因此，位于 y 处MBS从SBS O_{S_k} 接收到的SIR为

$$\text{SIR}_{S_k}^{\text{BH,MU}}(y) = \frac{\mu_{\text{BH},k} P_{S_k} g_{O_{S_k},y} |\mathbf{X}_{O_{S_k},y}|^{-\alpha_{S_k}}}{\left(\mu_{\text{SMU},k} P_{S_k} g_{O_{S_k},y} |\mathbf{X}_{O_{S_k},y}|^{-\alpha_{S_k}} + I_y^{\text{MDL}} + I_y^{\text{SDL}} + I_y^{\text{SUL}} + P_{\text{LI},M}/\beta \right)} \quad (4)$$

其中， $\mu_{\text{SUM},k} P_{S_k} g_{O_{S_k},y} |\mathbf{X}_{O_{S_k},y}|^{-\alpha_{S_k}}$ 是该SBS处叠加的MU DL信号， $I_y^{\text{SDL}} = \sum_{j=1}^K \sum_{l \in \tilde{\Phi}_{S_j} \setminus O_{S_k}} P_{S_j} h_{l,y} \cdot |\mathbf{X}_{l,y}|^{-\alpha_{S_j}}$ 为其他SBS的DL干扰， $\tilde{\Phi}_{S_j}$ 是强度为 $\tilde{\lambda}_{S_j} = \lambda_M \cdot N_{S_j}$ 的独立PPP， $I_y^{\text{MDL}} = \sum_{i \in \Phi_M \setminus y} \frac{P_M}{N_M} \cdot g_{i,y} |\mathbf{X}_{i,y}|^{-\alpha_M}$ 为其他MBS的下行干扰，MU的上行传输干扰为 $I_y^{\text{SUL}} = \sum_{j=1}^K \sum_{m \in \Phi_U^{S_j}} P_U h_{m,y} |\mathbf{X}_{m,y}|^{-\alpha_M}$ ； $g_{O_{S_k},y}$ 和 $\mathbf{X}_{O_{S_k},y}$ 是从该SBS O_{S_k} 到与之级联的MBS之间的信道增益和回程距离， $h_{l,y}$ 和 $\mathbf{X}_{l,y}$ 是第 j 层的第 l 个SBS到该MBS间的信道增益和距离， $g_{i,y}$ 和 $\mathbf{X}_{i,y}$ 是第 i 个MBS到该MBS间的信道增益和距离， $h_{m,y}$ 和 $\mathbf{X}_{m,y}$ 是与第 j 层小小区基站级联的第 m 个MU与该MBS间的信道增益和距离。传输链路增益 $g_{O_{S_k},y}$ 和干扰链路增益 $g_{i,y}$ 分别服从参数为 $(G_{R_x}, 1)$ 和 $(N_M, 1)$ 的Gamma分布，其中接收天线增益为 $G_{R_x} = N_{R_x} - \min(N_{S_k}^B, \lambda_{S_k}/\lambda_M) + 1$ ， $h_{l,y}$ 和 $h_{m,y}$ 满足 $h_{a,b} \sim \exp(1)$ 。这里需要说明的是不同于回程链路，考虑到MU是近端用户且拥有较好的链路条件，当其对从SBS接收的NOMA信号进行解码时，基于连续干扰消除思想，其先对叠加的回程信号进行解码，再尝试恢复期望信号。

3.3 SBS和MBS接收干扰的拉普拉斯变换

这里计算干扰项的拉普拉斯变化(Laplace Transform, LT)。对于 $I_{O_{S_k}}^{\text{SDL}}$ 和 I_y^{SDL} ，根据文献[14]有引理2。

引理 2 对于位于 O_{S_k} 的SBS和位于 y 的MBS，其从其他SBS接收到的干扰 $I_{O_{S_k}}^{\text{SDL}}$ 和 I_y^{SDL} 的LT为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{O_{S_k}}^{\text{SDL}}}(S) &= \exp\left(-\sum_{j=1}^K 2\pi \tilde{\lambda}_{S_j} (SP_{S_j}\beta)\right) \\ &\quad \cdot \left(\left(|\mathbf{X}_{z,O_{S_k}}| \right)^{2-\alpha_{S_j}} \frac{1}{\alpha_{S_j} - 2} {}_2F_1\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha_{S_j}}; \right. \right. \\ &\quad \left. \left. 2 - \frac{2}{\alpha_{S_j}}; - \left(|\mathbf{X}_{z,O_{S_k}}| \right)^{-\alpha_{S_j}} (SP_{S_j}\beta) \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_y^{\text{SDL}}}(S) &= \exp\left(-\sum_{j=1}^K \pi \tilde{\lambda}_{S_j} (SP_{S_j}\beta)^{2/\alpha_{S_j}} (2\pi/\alpha_{S_j})\right) \\ &\quad \cdot \text{csc}\left(2\pi/\alpha_{S_j}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中， ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$ 表示高斯超几何函数[16]。类似地，对于由MBS下行传输所引起的干扰 $I_{O_{S_k}}^{\text{MDL}}$ 和 I_y^{MDL} ，有引理3。

引理 3 对于给定的SBS O_{S_k} 和MBS y , 其从MBS下行传输接收到的干扰 $I_{O_{S_k}}^{\text{MDL}}$ 和 I_y^{MDL} 的LT分别为

$$\mathcal{L}_{I_{O_{S_k}}^{\text{MDL}}}(S) = \exp\left(-2\pi\lambda_M \sum_{v=1}^{N_M} \binom{N_M}{v} \left(S \frac{P_M\beta}{N_M}\right)^{2/\alpha_M} \Gamma(v - 2/\alpha_M) \Gamma(N_M - v + 2/\alpha_M) / \Gamma(N_M)\right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_y^{\text{MDL}}}(S) = & \exp\left(-2\pi\lambda_M \sum_{v=1}^{N_M} \binom{N_M}{v} \left(\frac{S\beta P_M}{N_M}\right)^v \frac{1}{\alpha_M} \left(\frac{S\beta P_M}{N_M}\right)^{-v + \frac{2}{\alpha_M}}\right. \\ & \left. \cdot B\left(-S\beta P_M \left(\|\mathbf{X}_{O_{S_k}, y}\right)^{-\alpha_M} / N_M, v - \frac{2}{\alpha_M}, 1 - N_M\right)\right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\binom{N_M}{v} = \frac{N_M!}{v!(N_M - v + 1)!}$ 是二项式系数, $\Gamma(\cdot)$ 表示Gamma函数[16]。为了计算 $I_{O_{S_k}}^{\text{SUL}}$, 本文采用如下近似 $\Phi_U^{S_j}$ 。考虑第 k 层一位于 V 的SBS, 位于 U 的一个MU能以概率 $P = \exp(-\lambda_{S_k} r^2 / G_k^{\text{UL}})$ 与 V 级联, r 是 U 和 V 之间的距离, $G_k^{\text{UL}} = \lambda_{S_k} / \sum_{i=1}^K \lambda_{S_i}$, 则第 j 层中干扰MU的最大密度为 $\tilde{\lambda}_{S_j}$ 。由于其父过程是一个PPP, MU到该SBS的传播过程的密度测量函数为 $2\pi\lambda_{S_j} r$; 但考虑到没有级联到SBS的MU, 该过程是父过程的一个瘦过程, $\Phi_U^{S_j}$ 的密度随着到该SBS的距离的增加而增加且近似为

$$\lambda_{\Phi_U^{S_j}}(r) = \tilde{\lambda}_{S_j} \left(1 - \exp\left(-\pi\tilde{\lambda}_{S_j} r^2 / G_j^{\text{UL}}\right)\right) \quad (9)$$

因此, 根据式(3)定义 $I_{O_{S_k}}^{\text{SUL}}$ 和式(4)定义的 I_y^{SUL} , 有引理4。

引理 4 移动用户上行传输在SBS O_{S_k} 处和MBS y 处的干扰 $I_{O_{S_k}}^{\text{SUL}}$ 和 I_y^{SUL} 的LT分别为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{O_{S_k}}^{\text{SUL}}}(S) = & \exp\left(-\sum_{j=1}^K 2\pi\tilde{\lambda}_{S_j} \int_0^\infty \frac{1}{1 + (SP_U\beta)^{-1} r^{\alpha_{S_j}}}\right. \\ & \left. \cdot \left(1 - \exp\left(-\pi\tilde{\lambda}_{S_j} \frac{r^2}{G_j^{\text{UL}}}\right)\right) r dr\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathcal{L}_{I_y^{\text{SUL}}}(S) = \exp\left(-\sum_{j=1}^K \pi\tilde{\lambda}_{S_j} (SP_U\beta)^{\alpha_{S_j}} \frac{2}{\alpha_M} \text{csc}\left(\frac{2\pi}{\alpha_M}\right)\right) \quad (11)$$

其中, $\text{csc}(\cdot) = 1/\sin(\cdot)$ 。

3.4 MU上行回程链路的覆盖概率

与第 k 层SBS级联的MU上行回程传输覆盖概率由MU-SBS接入链路SIR和SBS处的NOMA回程传输联合确定。本文基于实际考虑将与SBS的级联MBS视为远端用户, 根据NOMA叠加调制和连续

干扰消除技术原理[12], MBS将叠加的DL信号视为噪声直接解码回程信息。考虑到式(3)中的 $\text{SIR}_{S_k}^{\text{UA, MU}}(z)$ 和式(4)中的 $\text{SIR}_{S_k}^{\text{BH, MU}}(y)$ 的独立性, 与第 k 层中位于 O_{S_k} 的SBS级联的MU的上行回程传输SIR覆盖概率可表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{Cov, MU}}^{S_k, \text{BH}}(\tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}}, \tau_{\text{MU}, k}^{\text{UPB}}) \\ = \Pr\left\{\text{SIR}_{S_k}^{\text{UA, MU}} \geq \tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}}\right\} \\ \cdot \Pr\left\{\text{SIR}_{S_k}^{\text{BH, MU}} \geq \tau_{\text{MU}, k}^{\text{UPB}}\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}}$ 和 $\tau_{\text{MU}, k}^{\text{UPB}}$ 分别是MU-SBS和SBS-MBS链路的SIR门限。首先在式(12)中, $\Pr\left\{\text{SIR}_{S_k}^{\text{UA, MU}} \geq \tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}}\right\}$ 可写为

$$\begin{aligned} P_{\text{Cov}, k}^{\text{UPA}}(\tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}}) = & \Pr\left\{\text{SIR}_{S_k}^{\text{UA, MU}} \geq \tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}}\right\} \\ = & \mathcal{L}_{I_{O_{S_k}}^{\text{MDL}}}(\tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}} \mid \mathbf{X}_{z, O_{S_k}} \mid^{\alpha_{S_k}} / P_U) \\ & \cdot \mathcal{L}_{I_{O_{S_k}}^{\text{SDL}}}(\tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}} \mid \mathbf{X}_{z, O_{S_k}} \mid^{\alpha_{S_k}} / P_U) \\ & \cdot \mathcal{L}_{I_{O_{S_k}}^{\text{SUL}}}(\tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}} \mid \mathbf{X}_{z, O_{S_k}} \mid^{\alpha_{S_k}} / P_U) \end{aligned} \quad (13)$$

其次, 基于式(4), 可有位于 O_{S_k} 的SBS上行回程链路SIR覆盖概率为

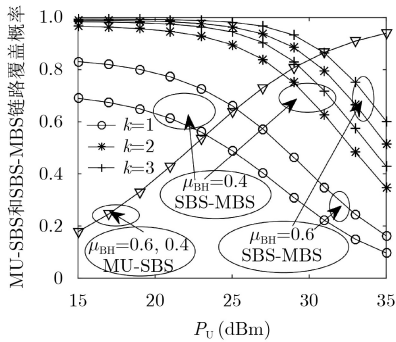
$$\begin{aligned} P_{\text{Cov}, k}^{\text{UPB}}(\tau_{\text{MU}, k}^{\text{UPB}}) \\ = \Pr\left\{\text{SIR}_{S_k}^{\text{BH, MU}} \geq \tau_{\text{MU}, k}^{\text{UPB}}\right\} \\ = \Pr\left\{g_{O_{S_k}, y} > \left(\tau_{\text{MU}, k}^{\text{UPB}} \mid \mathbf{X}_{O_{S_k}, y} \mid^{\alpha_{S_k}}\right.\right. \\ \left.\left. / \left(P_{S_k}(\mu_{\text{BH}, k} - \tau_{\text{MU}, k}^{\text{UPB}} \mu_{\text{SMU}, k})\right)\right)\right\} \\ \cdot \left(I_y^{\text{MDL}} + I_y^{\text{SDL}} + I_y^{\text{SUL}} + P_{\text{LLM}}/\beta\right) \end{aligned} \quad (14)$$

MBS采用迫零收发器, 有 $g_{O_{S_k}, y}$ 的PDF为 $f_{g_{O_{S_k}, y}}(x) = e^{-x} x^{G_{R_x}-1} / \Gamma(G_{R_x})$, 将其代入式(14), 可有覆盖概率

$$\begin{aligned}
P_{\text{Cov},k}^{\text{UPB}}(\tau_{\text{MU},k}^{\text{UPB}}) &= \mathbb{E}_{|X_{O_{S_k},y}|} \left\{ \sum_{n=0}^{G_{R_x}-1} \frac{1}{n!} \left(\tau_{\text{MU},k}^{\text{UPB}} |X_{O_{S_k},y}|^{\alpha_{S_k}} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. / \left(P_{S_k}(\mu_{\text{BH},k} - \tau_{\text{MU},k}^{\text{UPB}} \mu_{\text{SMU},k}) \right) \right)^n \right. \\
&\quad \cdot \sum_{n_1+n_2+n_3+n_4=n} \binom{n}{n_1, n_2, n_3, n_4} \\
&\quad \cdot \left(\left(\frac{P_{\text{LLM}}}{\beta} \right)^{n_1} e^{-S_{\text{UPB}} \frac{P_{\text{LLM}}}{\beta}} \right) \\
&\quad \cdot \left((I_y^{\text{MDL}})^{n_2} e^{-S_{\text{UPB}} I_y^{\text{MDL}}} \right) \\
&\quad \cdot \left((I_y^{\text{SDL}})^{n_3} e^{-S_{\text{UPB}} I_y^{\text{SDL}}} \right) \\
&\quad \cdot \left. \left((I_y^{\text{SUL}})^{n_4} e^{-S_{\text{UPB}} I_y^{\text{SUL}}} \right) \right\} \quad (15)
\end{aligned}$$

其中， $S_{\text{UPB}} = \tau_{\text{MU},k}^{\text{UPB}} |X_{O_{S_k},y}|^{\alpha_{S_k}} / \left(P_{S_k}(\mu_{\text{BH},k} - \tau_{\text{MU},k}^{\text{UPB}} \mu_{\text{SMB},k}) \right)$ ， $\binom{n}{n_1, n_2, n_3, n_4} = \frac{n!}{n_1! n_2! n_3! n_4!}$ 是多项式系数， $\sum_{n_1+n_2+n_3+n_4=n}$ 表示满足常数 $n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = n$ 的非负整数 (n_1, n_2, n_3, n_4) 的所有 n 元组。利用拉普拉斯变换的高阶微分性质，式(15)可写为

$$\begin{aligned}
P_{\text{Cov},k}^{\text{UPB}}(\tau_{\text{MU},k}^{\text{UPB}}) &= \mathbb{E}_{|O_{S_k},y|} \left\{ \sum_{n=0}^{G_{R_x}-1} \frac{1}{(-1)^n n!} (S_{\text{UPB}})^n \right. \\
&\quad \cdot \sum_{n_1+n_2+n_3+n_4=n} \binom{n}{n_1, n_2, n_3, n_4} \\
&\quad \cdot (P_{\text{LLM}}/\beta)^{n_1} e^{-S_{\text{UPB}} \frac{P_{\text{LLM}}}{\beta}} \\
&\quad \cdot \left(\frac{d^{(n_2)} I_y^{\text{MDL}}(S)}{d^{n_2}(S)} \right) \left(\frac{d^{(n_3)} \mathcal{L}_{I_y^{\text{SDL}}}(S)}{d^{n_3}(S)} \right) \\
&\quad \cdot \left. \left(\frac{d^{(n_4)} \mathcal{L}_{I_y^{\text{SUL}}}(S)}{d^{n_4}(S)} \right) \right\}_{S=S_{\text{UPB}}} \quad (16)
\end{aligned}$$

(a) 不同链路覆盖概率比较($k=1,2,3$)

SBS与MBS的级联距离 $Y = |X_{O_{S_k},y}|$ 的PDF为 $f_Y(y) = 2\pi\lambda_M y e^{-\rho\lambda_M y^2}$ 。由式(16)、式(13)和式(12)得到定理1。

定理 1 网络中任一给定用户上行回程传输由小小区接入链路传输和小小区基站到宏基站的回程传输构成，该上行回程传输总的平均覆盖概率为

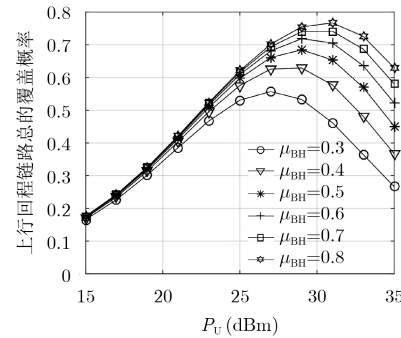
$$\begin{aligned}
P_{\text{Cov,Tot}}^{\text{SBS,BH}} &= \sum_{k=1}^K A_{S_k}^{\text{UA,MU}} \times P_{\text{Cov},k}^{\text{UPA}}(\tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}}) \\
&\quad \times P_{\text{Cov},k}^{\text{UPB}}(\tau_{\text{MU},k}^{\text{UPB}}) \quad (17)
\end{aligned}$$

其中， $P_{\text{Cov},k}^{\text{UPA}}$ 由式(13)给出， $P_{\text{Cov},k}^{\text{UPB}}$ 由式(16)给出， $A_{S_k}^{\text{UA,MU}}$ 在式(1)中给出。用类似的方法，可得网络吞吐量等。

4 数值结果和讨论

考虑了一个4层HetNets的MBS下行传输模式，取网络区域为 $\pi(1000)^2 \text{ km}^2$ ，其它参数： $\alpha_M = 2.2$ ， $\alpha_{S_1} = 3.8$ ， $\alpha_{S_2} = 3.5$ 和 $\alpha_{S_3} = 4.0$ ； $P_M = 55 \text{ dBm}$ ， $P_{S_1} = 45 \text{ dBm}$ ， $P_{S_2} = 48 \text{ dBm}$ 和 $P_{S_3} = 43 \text{ dBm}$ ； $\lambda_M = 1/\pi \times 500^2$ ， $\lambda_{S_1} = 2\lambda_M$ ， $\lambda_{S_2} = 4\lambda_M$ ， $\lambda_{S_3} = 20\lambda_M$ ；所有SBS都使用具有相同功率分配因子的NOMA方案，即 $\mu_{\text{SMU},k} = \mu_{\text{SMU}}$ ， $\mu_{\text{BH},k} = \mu_{\text{BH}}$ ，且 $\tau_m = \tau_{\text{MU},k}^{\text{UPB}} = \tau_{\text{MU}}^{\text{UPA}} = 0.5$ 。取 $N_{T_x} = 20$ ， $T_{R_x} = 20$ ， $N_U = 8$ ， $N_{S_1}^B = N_{S_2}^B = \dots = N_{S_K}^B$ ， $N^B = 4$ 。

图2给出了SBS上行回程链路SIR覆盖概率与发射功率 P_U 的关系。从图2(a)中可以发现，随着MU发射功率 P_U 的增加，SBS-MBS链路的平均SIR覆盖概率在下降，而MU-SBS链路的平均SIR覆盖概率在增加。原因在于SBS-MBS回程链路受到MU上行传输的严重干扰，而增加MU的功率 P_U 有助于MU-SBS上行链路的改善。从图2(b)可以发现当 P_U 相对较小时， P_U 的增加导致SBS上行回程链路性能的提高；但是，当MU功率 P_U 较大时， P_U 的



(b) 总覆盖概率比较

图 2 上行回程链路覆盖对比分析

增加将导致总性能的损失。这是由于任一MU的上行回程链路由MU-SBS和SBS-MBS两跳构成,总的覆盖概率是这两跳链路覆盖概率的乘积。从图2(a)可以发现,当 P_U 相对较小时,由于MU的干扰较小SBS-MBS链路的覆盖概率基本保持不变,而MU-SBS链路覆盖概率随 P_U 的增加而增加,因此有图2(b)所示总的覆盖概率随 P_U 的增加而增加;然而,当 P_U 较大时, MU的干扰将增强,这不仅使得SBS-MBS链路的覆盖概率下降,而且MU-SBS的覆盖概率的增加也将减缓,因此有图2(b)所示,当 P_U 较大时总的覆盖概率随 P_U 的增加而减小。图2还清楚地显示随着 μ_{BH} 的增加, SBS-MBS上行回程传输功率增加, SBS-MBS覆盖概率增加。由本文给出的网络模型可知, MU-SBS的上行接入链路不受NOMA方案的影响,因此有MU-SBS链路的覆盖概率不受功率共享因子 μ_{BH} 的影响。从图2(b)还可以看出,最佳的上行回程覆盖概率不仅取决于MU的功率 P_U ,也取决于功率共享因子 μ_{BH} 等。

图3研究了上行回程链路覆盖概率与 μ_{BH} 的关系。因为在本文给出的基于NOMA技术的异构网中, MBS被视为远端用户终端, 上行门限不受功率共享系数的影响, 功率共享系数 μ_{BH} 的增加仅影响回程链路的发射功率, 因此有上行链路覆盖概率随着 μ_{BH} 的增加而单调递增。

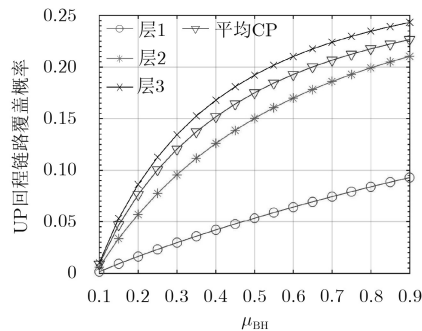


图3 上行回程链路覆盖概率与 μ_{BH} 的关系

图4(a)首先对回程链路和SBS下行传输速率和做了比较, 可以发现当回程链路获得的功率达到一定程度时, NOMA技术的采用可提高回程链路速度与SBS下行链路速率和, 这表明在实际应用中应仔细考虑主、从信号间的功率分配问题。不同于图4(a), 图4(b)给出了小小区吞吐量比较, 吞吐量更能反映小小区性能, 其不仅包括SBS回程和下行传输, 而且还包括SBS上行传输, 可以发现图4(b)和图4(a)有类似的结论。另外, MU的发射功率也对速率有一定的影响, 特别是当MU的发射功率较大时, 回程链路和SBS下行链路速率和将随MU发射功率的增加有所降低, 但由于上行链路的改进使得整个小小区的吞吐量将有所增加。

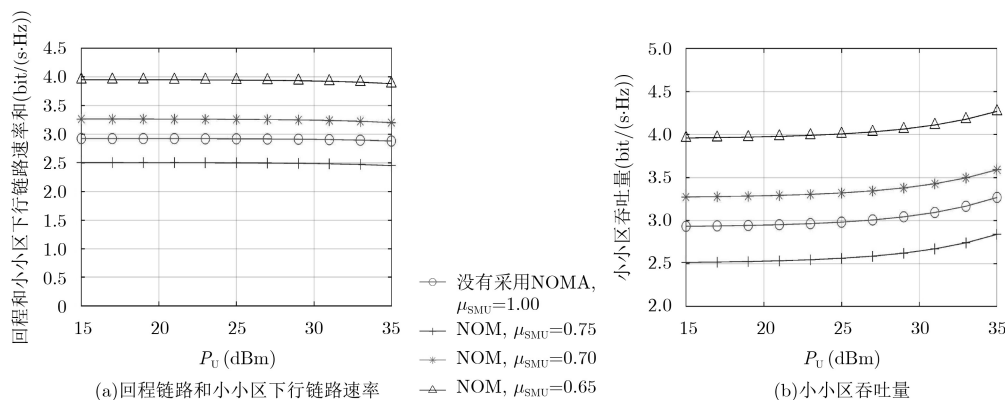


图4 NOMA和非NOMA小小区网络传输速率(频谱效率)比较

5 结束语

通过在SBS上使用FD和NOMA技术, 本文提出了一种用于大规模MIMO多层异构网的新带内无线自回程方案。该方案不仅保证了全双工大规模MIMO系统较高的频谱效率, 而且还利用NOMA技术巧妙地解决了大规模异构网的回程传输问题, 一方面, 无线回程具有较高的经济效益, 另一方面, NOMA技术的采用还能改善网络平均吞吐

量等性能。基于此研究, 下一步将研究此系统模型下的能量效率等问题。

参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, *et al.* What will 5G be?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065–1082. doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
- [2] 李云, 王俊伟, 赵为粮, 等. 基于基站密度和业务负载的异构蜂窝网络能效优化[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(4): 854–859.

- doi: [10.11999/JEIT160192](https://doi.org/10.11999/JEIT160192).
- LI Yun, WANG Junwei, ZHAO Weiliang, *et al.* Optimizing the energy efficiency of heterogeneous cellular networks based on the base station density and traffic load[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(4): 854–859. doi: [10.11999/JEIT160192](https://doi.org/10.11999/JEIT160192).
- [3] SAPOUNTZIS N, SPYROPOULOS T, NIKAEIN N, *et al.* User association in HetNets: Impact of traffic differentiation and backhaul limitations[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(6): 3396–3410. doi: [10.1109/TNET.2017.2746011](https://doi.org/10.1109/TNET.2017.2746011).
- [4] JABER M, LOPEZ-MARTINEZ F J, IMRAN M A, *et al.* Wireless backhaul: Performance modelling and impact on user association for 5G[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(5): 3095–3110. doi: [10.1109/TWC.2018.2806456](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2806456).
- [5] TABASSUM H, SAKR A H, and HOSSAIN E. Analysis of massive MIMO-Enabled downlink wireless backhauling for full-duplex small cells[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(6): 2354–2369. doi: [10.1109/TCOMM.2016.2555908](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2555908).
- [6] WANG Ning, HOSSAIN E, and BHARGAVA V K. Joint downlink cell association and bandwidth allocation for wireless backhauling in two-tier HetNets with large-scale antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(5): 3251–3268. doi: [10.1109/TWC.2016.2519401](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2519401).
- [7] JIA Xiangdong, DENG Pengfei, YANG Longxiang, *et al.* Spectrum and energy efficiencies for multiuser pairs massive MIMO systems with full-duplex amplify-and-forward relay[J]. *IEEE Access*, 2015, 3: 1907–1918. doi: [10.1109/ACCESS.2015.2486039](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2486039).
- [8] AKBAR S, DENG Yansha, NALLANATHAN A, *et al.* Massive multiuser MIMO in heterogeneous cellular networks with full duplex small cells[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(11): 4704–4719. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2728536](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2728536).
- [9] 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. doi: [10.1109/MWC.2015.7306534](https://doi.org/10.1109/MWC.2015.7306534).
- [10] DHILLON H S and CAIRE G. Wireless backhaul networks: Capacity bound, scalability analysis and design guidelines[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(11): 6043–6056. doi: [10.1109/TWC.2015.2447534](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2447534).
- [11] MARCANO A S and CHRISTIANSEN H L. Impact of NOMA on network capacity dimensioning for 5G HetNets[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 13587–13603. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2799959](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2799959).
- [12] JIA Xiangdong, FU Haiyang, YANG Longxiang, *et al.* Superposition coding cooperative relaying communications: Outage performance analysis[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2011, 24(3): 384–397. doi: [10.1002/dac.1160](https://doi.org/10.1002/dac.1160).
- [13] RODRIGUEZ L J, TRAN N H, and LE-NGOC T. Performance of full-duplex AF relaying in the presence of residual self-interference[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(9): 1752–1764. doi: [10.1109/JSAC.2014.2330151](https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2330151).
- [14] SINGH S, ZHANG Xinchun, and 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. doi: [10.1109/TWC.2015.2437378](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2437378).
- [15] SHARMA A, GANTI R K, and MILLETH J K. Joint backhaul-access analysis of full duplex self-backhauling heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(3): 1727–1740. doi: [10.1109/TWC.2017.2653108](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2653108).
- [16] GRADSHTEYN I S and RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 7th Edition, Orlando: Academic Press, 2007: 34–87.
- 贾向东：男，1971年生，博士，教授，研究方向为移动与无线通信关键理论与技术。
- 纪珊珊：女，1994年生，硕士生，研究方向为5G网络。
- 范巧玲：女，1993年生，硕士生，研究方向为异构网络。
- 杨小蓉：女，1994年生，硕士生，研究方向为异构网络。