

基于带内回程的全双工大规模 MIMO 异构网覆盖分析

贾向东^{1,2}, 颀满刚¹, 周 猛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: 在大规模多输入多输出(MIMO)系统中,带内全双工无线回程方案能够有效复用无线电接入频谱,大幅提高网络性能。为此,基于该方案构建大规模 MIMO 异构蜂窝网络模型,并假设网络元素分别服从独立齐次泊松过程,利用随机几何理论分别研究宏蜂窝下行和小蜂窝上行链路信号干扰噪声比(SINR)的覆盖概率,分析不同参数对覆盖性能的影响。仿真结果表明,带内全双工无线回程方案能够有效提高系统频谱效率,但不能改善宏蜂窝和小蜂窝网络的 SINR 覆盖概率。

关键词: 大规模多输入多输出系统;全双工;蜂窝网;无线回程;覆盖概率;随机几何

中文引用格式:贾向东,颀满刚,周 猛. 基于带内回程的全双工大规模 MIMO 异构网覆盖分析[J]. 计算机工程, 2017, 43(7): 124-128, 135.

英文引用格式:Jia Xiangdong, Xie Mangang, Zhou Meng. Coverage Analysis for Full-Duplex Massive MIMO Heterogeneous Network Based on In-band Backhaul[J]. Computer Engineering, 2017, 43(7): 124-128, 135.

Coverage Analysis for Full-Duplex Massive MIMO Heterogeneous Network Based on In-band Backhaul

JIA Xiangdong^{1,2}, XIE Mangang¹, ZHOU Meng¹

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

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

【Abstract】 In massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) system, In-Band (IB) Full-Duplex (FD) wireless backhaul scheme can reuse the radio access spectrum and greatly improve the network performance. With this consideration, this paper proposes a massive MIMO heterogeneous cellular network model based on IB FD wireless backhaul. By assuming that the network elements are subject to independent Homogeneous Poisson Point Process (HPPP) and using the stochastic geometry theory, it researches the Signal-to-Interference-Noise Ratio (SINR) coverage probabilities of the macro cell downlink and small cell uplink transmission respectively, and analyzes the impacts of different parameters on the coverage performance. Simulation results show that the IB FD wireless backhaul scheme can effectively improve the spectral efficiency of the system, but it cannot improve the SINR coverage probability of the macro cell and small cell networks.

【Key words】 massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) system; Full-Duplex (FD); cellular network; wireless backhaul; coverage probability; stochastic geometry

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.07.020

0 概述

随着智能手机、平板电脑和一些新兴服务的迅速发展,移动蜂窝数据业务量急剧增长^[1]。截至 2014 年底,全球移动数据流量达到每月 2.5 EB,并且将会持续增长达到 2019 年的每月 24.3 EB^[2],这

对学术界和工业界提出了巨大挑战,同时激发了研究者对于 5G 技术的研究。与当前的 4G 相比,5G 网络能提高 1 000 倍的系统容量,10 倍的能量效率、频谱效率以及数据速率,25 倍的小区平均吞吐量,使网络性能大幅提升。

在 5G 网络众多技术中,大规模多输入多输出

基金项目:国家自然科学基金(61261015,61561043);甘肃省普通高校基本科研业务费专项资金“面向 5G 的 Massive MIMO 毫米波段信道建模及其估计”。

作者简介:贾向东(1971—),男,副教授、博士,主研方向为无线通信;颀满刚、周 猛,硕士研究生。

收稿日期:2016-10-24 **修回日期:**2016-12-05 **E-mail:**jiaxd@nwnu.edu.cn

(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)、异构蜂窝网 (Heterogeneous Cellular Network, HCN) 和全双工 (Full-Duplex, FD) 是 3 种极具潜力的关键技术^[3-6]。文献[4]提出的大规模 MIMO 是一种大规模多用户多入多出传输机制。相比传统的单天线用户, 大规模 MIMO 基站 (Base Station, BS) 配备了几十个甚至几百个天线, 大幅提高了系统的自由度, 增强了空间复用和波束赋形增益。当基站天线数量足够多时, 根据大数定理, 基站和不同用户之间的无线信道矢量趋于正交, 小规模衰落、热噪声和非相关干扰消失。

异构蜂窝网也是 5G 关键技术之一。超密集小蜂窝部署于传统的宏蜂窝之上, 小蜂窝基站 (Small Cell Base Station, SBS) 能为附近众多用户提供服务。这种技术主要依赖于低成本低功率的基站, 其拥有更高的密度和更强的用户负载, 使得基站和用户终端 (User Equipment, UE) 距离更近, 增加了区域吞吐量, 降低了信号发射功率, 减轻了宏蜂窝基站 (Macro Cell Base Station, MBS) 负载。在 HCN 中, MBS 拥有较大的覆盖范围, 控制用户调度和资源分配, 为更多的移动 UE 提供服务; 而超密集 SBS 覆盖范围较小, 主要服务室内外低移动性 UE。

另一种重要技术是全双工技术。传统的半双工通信收发信号必须在不同的时频资源实现, 而全双工技术能够在相同的信道 (或频率、时隙) 实现同时收发信号。显然, 相比传统的半双工通信, 全双工技术能够大幅提高系统容量。但在单天线或小规模 MIMO 系统中, 全双工技术最主要的障碍就是严重的自干扰现象。然而, 根据最近全双工大规模 MIMO 技术的研究可知, 适当的功率分配能够有效抑制大规模 MIMO 系统全双工的自干扰^[5-6]。

大规模 MIMO、全双工和 HCN 3 种技术的结合能够有效发挥其各自的优点, 同时提供更好的系统性能。为此, 本文构建一种基于带内无线回程的全双工大规模 MIMO 异构蜂窝网络模型, 并在此模型下研究宏蜂窝下行和小蜂窝上行的信号干扰噪声比 (Signal-Interference-Noise Ratio, SINR) 覆盖概率。

1 相关研究

随着小蜂窝的大规模部署, 回程问题变得日趋重要, 这主要是由于超密集小蜂窝重负荷都需要通过回程链路反馈到核心网^[7-8]。文献[9]指出, 基于蜂窝通信技术的解决方案有带内 (In-Band, IB) 和带外 (Out-Band, OB) 回程 2 种模式。OB 方案需要回程链路和接入链路连接到 2 个正交频带。考虑到正交性, 回程链路和接入链路之间的干扰被有效抑制, 两者容量同时提高。在

IB 模式下, 回程链路和接入链路共享频带。相比 OB 模式, IB 模式具有更高的频谱效率。

文献[9-11]对无线回程方案进行了研究。文献[11]设计一个双层 MIMO 异构蜂窝网, 在上下行传输链路中利用了 OB 回程, 借助随机几何, 得到了宏蜂窝、小蜂窝以及回程链路的上下行速率, 根据得到的数据速率, 研究了 HCN 的能量效率。然而, 该文献仅考虑了 OB 半双工模式, 并未考虑全双工。不同于文献[11], 文献[9]研究了全双工 SBS 模式下的大规模 MIMO 异构蜂窝网的性能。在 IB-FD 和 OB-FD 2 种模式下, 分别就接入和回程链路的覆盖概率进行了研究。研究结果表明, 仅利用 IB 或 OB 回程模式不能达到最佳覆盖概率。相反, 当 OB 和 IB 模式以适当比例结合时, 系统性能最佳。文献[10]仅研究了 IB 模式, 考虑了 IB 模式下的 3 种策略, 即时分双工 (Time-Division Duplex, TDD)、零分双工 (Zero-Division Duplex, ZDD) 和带有干扰抑制的零分双工 (ZDD with Interference Rejection, ZDD-IR)。此外, 文献[10]还研究了小区联合下行问题和双层大规模 MIMO 异构蜂窝网的无线回程带宽分配问题。

2 网络模型及信道假设

如图 1 所示, 全双工大规模 MIMO HCN 由宏蜂窝 UE、小蜂窝 UE、MBS 和 SBS 组成。小蜂窝部署在宏蜂窝网络之上并减轻宏蜂窝负载。MBS 与 UE、SBS 与 UE 和 MBS 与 SBS 之间的链路分别为宏蜂窝下行链路、小蜂窝上行链路和回程链路。小蜂窝通过 MBS 连接到核心网, MBS 通过无线回程连接到小蜂窝, MBS 和 SBS 都工作在全双工模式。MBS 配备的发送和接收天线数分别为 M_{Tx} 和 M_{Rx} , 而 SBS 和 UE 均配备单天线。同时, MBS 能够服务的最大 UE 数为 N_m , 最大回程数为 N_n , 那么有 $\min(M_{Tx}, M_{Rx}) \gg N_n, \min(M_{Tx}, M_{Rx}) \gg N_m$ 。

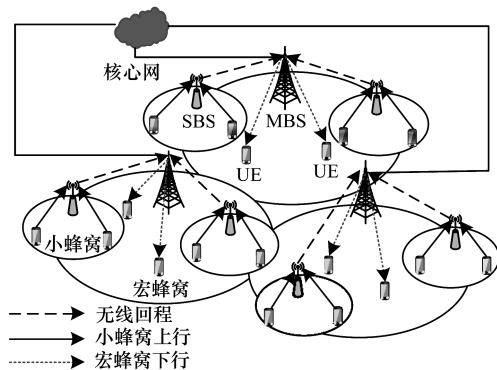


图 1 全双工大规模 MIMO 异构蜂窝网结构

MBS, SBS 和 UE 的空间拓扑都被建模为独立齐次泊松点过程 (Homogeneous Poisson Point Process, HPPP) Φ_M, Φ_S 和 Φ_{UE} , 其强度分别为 λ_M, λ_S 和 λ_{UE} 。HCN 中所有的无线信道相互独立, 并且都经历路径损失和瑞利衰落。对任意 2 个网络元素 a 和 b, h_{ab} 和 r_{ab} 分别表示 a 与 b 之间小规模衰落信道功率增益和距离, 路径损失为 $r_{ab}^{-\beta}, \beta \in (\alpha_M, \alpha_S)$, 其中, α_M 为宏蜂窝路径损失指数; α_S 为小蜂窝路径损失指数。此外, 假设随机分布的 UE 只对应一个 SBS, 根据 HPPP 的性质^[12], 可以定义一个新的 HPPP $\tilde{\Phi}_{UE}$ 表示与 SBS 对应的 UE, 显然 $\tilde{\Phi}_{UE}$ 与 Φ_S 有相同的强度。

本文仅考虑宏蜂窝下行和小蜂窝上行传输, 宏蜂窝和小蜂窝共享带宽。假设系统有可靠的信道状态信息, 且 MBS 采用迫零接收和迫零发送, 那么有以下信号传输方案: 对于小蜂窝上行, 在相同的时频资源块, 一个 SBS 以功率 P_{SB} 发送回程数据到 MBS, 同时接收距离最近的 UE 以功率 P_{UE} 发送的数据。对于宏蜂窝下行, 一个 MBS 以功率 P_{MB} 传输数据到相应的 UE, 同时接收来自于 SBS 的回程数据。为方便表示, 将本文主要符号总结如表 1 所示。

表 1 符号及定义

符号	定义
$\Phi_M, \Phi_S, \Phi_{UE}$	MBS, SBS 和 UE 空间位置模型
$\lambda_M, \lambda_S, \lambda_{UE}$	MBS, SBS 和 UE 空间位置强度
M_{Tx}, M_{Rx}	MBS 的发送和接收天线数
N_m	与 MBS 通信的最大 UE 数
N_n	MBS 所支持的最大回程链路数
P_{MB}, P_{SB}, P_{UE}	MBS, SBS 和 UE 发送功率
α_M, α_S	宏蜂窝和小蜂窝路径损失指数
h_{ab}, r_{ab}	任意 2 个网络元素 a 和 b 之间的小规模衰落信道功率和距离
$\beta_{th}^c, \beta_{th}^s$	宏蜂窝和小蜂窝传输的覆盖门限值

3 SINR 覆盖概率分析

上文构建了全双工带内回程大规模 MIMO HCN 模型, 本节将研究该模型的 SINR 覆盖概率。为节约篇幅, 主要研究宏蜂窝下行和小蜂窝上行链路的 SINR 覆盖概率。一般地, SINR 覆盖概率是指任一链路接收到的 SINR 大于成功接收数据门限值的概率, 覆盖概率的门限值取决于目标传输速率。

3.1 宏蜂窝下行链路 SINR 覆盖概率

考虑一 MBS 位于点 x 处, 位于原点 o 处的 UE 从该 MBS 接收到的 SINR 可以表示为:

$$SINR_c^c(x) = \frac{\tilde{P}_{MB} h_{ox} r_{ox}^{-\alpha_M}}{I_{MBS}^{cc} + I_{SBS}^{cc} + I_{UE}^{cc}} \quad (1)$$

其中, $\tilde{P}_{MB} = \frac{P_{MB}}{\min(N_m, K_m)}$, K_m 是与 MBS 级联的最大用户数; h_{ox} 是 UE 和 MBS 之间的小规模衰落信道功率增益, 且满足 $h_{ox} \sim \Gamma(M_{Tx} - \min(N_m, K_m) + 1, 1)$ ^[13-14]。来自于其他 MBS 的干扰为 $I_{MBS}^{cc} = \sum_{l \in \Phi_M \setminus x} \tilde{P}_{MB} h_{lo} r_{lo}^{-\alpha_M}$, 其中 $h_{lo} \sim \Gamma(\min(N_m, K_m), 1)$ ^[13-14]; 来自于 SBS 回程传输的干扰为 $I_{SBS}^{cc} = \sum_{i \in \Phi_S} P_{SB} h_{jo} r_{jo}^{-\alpha_S}$, 其中 $h_{jo} \sim \exp(1)$; 来自于 UE-SBS 上行传输的干扰为 $I_{UE}^{cc} = \sum_{i \in \Phi_{UE}} P_{UE} h_{io} r_{io}^{-\alpha_M}$, 其中 $h_{io} \sim \exp(1)$ 。因此, 对于任一宏蜂窝下行传输, 式(1)中定义的 $SINR_c^c(x)$ 覆盖概率可以表示为:

$$P_{Cov}^c(\beta_{th}^c) = \Pr \{ SINR_c^c(x) > \beta_{th}^c \} \quad (2)$$

其中, β_{th}^c 是宏蜂窝链路成功接收数据的门限值。结合式(2)和式(1), 即可得到定理 1。

定理 1 在基于带内无线回程的全双工大规模 MIMO 异构蜂窝网络中, MBS 采用迫零传输方案, 任一宏蜂窝下行传输链路 SINR 覆盖概率可以表示

为式(3)。其中, $s_c = \frac{\beta_{th}^c}{\tilde{P}_{MB} r^{-\alpha_M}}$; $\frac{d^k}{ds^k}$ 表示 k 阶导数; 二

项式系数 $\binom{k}{k_1, k_2, k_3} = \frac{k!}{k_1! k_2! k_3!}$; $f_{r_{ox}}(\cdot)$ 是 r_{ox} 的概率密度函数。 $I_{SBS}^{cc}, I_{UE}^{cc}, I_{MBS}^{cc}$ 的拉普拉斯变换分别如式(4)和式(5)所示。

$$P_{Cov}^c(\beta_{th}^c) = \int_0^\infty \sum_{k=0}^{M_{Tx} - \min(N_m, K_m)} \frac{1}{k!} \left(\frac{\beta_{th}^c}{\tilde{P}_{MB} r^{-\alpha_M}} \right)^k \sum_{k_1+k_2+k_3=k} \binom{k}{k_1, k_2, k_3} \left((-1)^{k_1} \frac{d^{k_1} \mathcal{L}_{f_{SBS}^{cc}}(s_c)}{ds_c^{k_1}} \right) \left((-1)^{k_2} \frac{d^{k_2} \mathcal{L}_{f_{UE}^{cc}}(s_c)}{ds_c^{k_2}} \right) \left((-1)^{k_3} \frac{d^{k_3} \mathcal{L}_{f_{MBS}^{cc}}(s_c)}{ds_c^{k_3}} \right) f_{r_{ox}}(r) dr \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_{f_{SBS}^{cc}}(s) = \exp\left(-\frac{\pi \lambda_S (s P_{SB})^{\frac{1}{\alpha_S}}}{\sin(2/\alpha_S)}\right), \mathcal{L}_{f_{UE}^{cc}}(s) = \exp\left(-\frac{\pi \lambda_S (s P_{UE})^{\frac{1}{\alpha_S}}}{\sin(2/\alpha_S)}\right) \quad (4)$$

$$\mathcal{L}_{f_{MBS}^{cc}}(s) = \exp\left\{-2\pi \lambda_M \sum_{k=1}^{\min(N_m, K_m)} \binom{\min(N_m, K_m)}{k} {}_2F_1\left(\min(N_m, K_m), k - \frac{2}{\alpha_M}; 1 + k - \frac{2}{\alpha_M}; -s \tilde{P}_{MB} r^{-\alpha_M}\right) \frac{(s \tilde{P}_{MB})^k}{\alpha_M (k - 2/\alpha_M)} r^{-\alpha_M (k - \frac{2}{\alpha_M})}\right\} \quad (5)$$

证明: 将式(1)代入式(2), MBS 对应的任一 UE 的 SINR 覆盖概率可以表示为:

$$P_{\text{Cov}}^c(\beta_{\text{th}}^c) = \Pr\left\{\frac{\tilde{P}_{\text{MB}} h_{ox} r_{ox}^{-\alpha_M}}{I_{\text{MBS}}^{\text{cc}} + I_{\text{SBS}}^{\text{cc}} + I_{\text{UE}}^{\text{cc}}} > \beta_{\text{th}}^c\right\} \\ = \Pr\left\{h_{ox} > \frac{\beta_{\text{th}}^c}{\tilde{P}_{\text{MB}} r_{ox}^{-\alpha_M}} (I_{\text{MBS}}^{\text{cc}} + I_{\text{SBS}}^{\text{cc}} + I_{\text{UE}}^{\text{cc}})\right\} \quad (6)$$

其中, $h_{ox} \sim \Gamma(M_{\text{Tx}} - \min(N_m, K_m) + 1, 1)$, 那么 h_{ox} 的概率密度函数为:

$$f_{h_{ox}}(y) = \frac{1}{\Gamma(M_{\text{Tx}} - \min(N_m, K_m) + 1)} \times y^{M_{\text{Tx}} - \min(N_m, K_m) - 1} e^{-y} \quad (7)$$

$$P_{\text{Cov}}^c(\beta_{\text{th}}^c) = E_{I_{\text{MBS}}^{\text{cc}}, I_{\text{SBS}}^{\text{cc}}, I_{\text{UE}}^{\text{cc}}, r_{ox}} \left\{ \frac{1}{\Gamma(M_{\text{Tx}} - \min(N_m, K_m) + 1)} \times \exp(-s_c (I_{\text{MBS}}^{\text{cc}} + I_{\text{SBS}}^{\text{cc}} + I_{\text{UE}}^{\text{cc}})) \right. \\ \times \sum_{k=0}^{M_{\text{Tx}} - \min(N_m, K_m)} \frac{[M_{\text{Tx}} - \min(N_m, K_m)]!}{k!} \times (-s_c^k (I_{\text{MBS}}^{\text{cc}} + I_{\text{SBS}}^{\text{cc}} + I_{\text{UE}}^{\text{cc}})^k) \left. \right\} \\ \stackrel{(a)}{=} E_{r_{ox}} \left\{ \sum_{k=0}^{M_{\text{Tx}} - \min(N_m, K_m)} \frac{-s_c^k}{k!} \sum_{k_1+k_2+k_3=k} \binom{k}{k_1, k_2, k_3} E_{I_{\text{MBS}}^{\text{cc}}} \{ (I_{\text{MBS}}^{\text{cc}})^{k_1} e^{-s_c I_{\text{MBS}}^{\text{cc}}} \} E_{I_{\text{SBS}}^{\text{cc}}} \{ (I_{\text{SBS}}^{\text{cc}})^{k_2} e^{-s_c I_{\text{SBS}}^{\text{cc}}} \} E_{I_{\text{UE}}^{\text{cc}}} \{ (I_{\text{UE}}^{\text{cc}})^{k_3} e^{-s_c I_{\text{UE}}^{\text{cc}}} \} \right\} \quad (8)$$

$$\mathcal{L}_{I_{\text{MBS}}^{\text{cc}}}(s) = E\{\exp(-s I_{\text{MBS}}^{\text{cc}})\} = \exp\left\{-\lambda_M \int_{R^2} (1 - E_{h_{io}}\{\exp(-s \tilde{P}_{\text{MB}} h_{io} r_{io}^{-\alpha_M})\}) dr_{io}\right\} \\ \stackrel{(b)}{=} \exp\left\{-2\pi\lambda_M \sum_{k=1}^{\min(N_m, K_m)} \binom{\min(N_m, K_m)}{k} \frac{(s \tilde{P}_{\text{MB}})^k}{\alpha_M} \times \frac{r_{lo}^{-\alpha_M (k - \frac{2}{\alpha_M})}}{k - 2/\alpha_M} {}_2F_1\left(\min(N_m, K_m), k - \frac{2}{\alpha_M}; 1 + k - \frac{2}{\alpha_M}; -s \tilde{P}_{\text{MB}} r_{lo}^{-\alpha_M}\right)\right\} \quad (9)$$

观察式(3)不难发现, SINR 覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^c(\beta_{\text{th}}^c)$ 随着 M_{Tx} 的增大而增大。此外, $P_{\text{Cov}}^c(\beta_{\text{th}}^c)$ 还随着 λ_s 的增大而增大。

3.2 小蜂窝上行链路 SINR 覆盖概率

为得到小蜂窝上行传输的 SINR 覆盖概率, 考虑一位于原点 o 处的 UE, 当 UE 传输信号到位于 z 处的 SBS 时, 其接收到的 SINR 可以表示为:

$$\text{SINR}_c^s(z) = \frac{P_{\text{UE}} h_{oz} r_{oz}^{-\alpha_s}}{I_{\text{MBS}}^{\text{cs}} + I_{\text{SBS}}^{\text{cs}} + I_{\text{UE}}^{\text{cs}}} \quad (10)$$

$$\mathcal{L}_{I_{\text{UE}}^{\text{cs}}}(s) = E\{\exp(-s I_{\text{UE}}^{\text{cs}})\} = \exp\left\{-2\pi\lambda_s \int_{r_{oz}}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{1 + s P_{\text{UE}} r^{-\alpha_s}}\right) r dr\right\} = \exp\left\{-2\pi\lambda_s \times \frac{1}{\alpha_s} \int_{r_{oz}^{-1/\alpha_s}}^{\infty} \frac{x^{\alpha_s - 1}}{1 + s^{-1} P_{\text{UE}}^{-1} x} dx\right\} \\ = \exp\left\{2\pi\lambda_s \times \frac{1}{\alpha_s} \times \frac{r_{oz}^{\alpha_s} \times (\frac{2}{\alpha_s} - 1)}{(s^{-1} P_{\text{UE}}^{-1}) \left(1 - \frac{2}{\alpha_s}\right)} {}_2F_1\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha_s}; 1 - \frac{2}{\alpha_s} + 1; -\frac{1}{s^{-1} P_{\text{UE}}^{-1} r_{oz}^{\frac{1}{\alpha_s}}}\right)\right\} \\ = \exp\left\{-2\pi\lambda_s \times \frac{s P_{\text{UE}}}{\alpha_s - 2} r_{oz}^{\alpha_s} \times (\frac{2}{\alpha_s} - 1) \times {}_2F_1\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha_s}; 2 - \frac{2}{\alpha_s}; -s P_{\text{UE}} r_{oz}^{\frac{1}{\alpha_s}}\right)\right\} \quad (11)$$

$$P_{\text{Cov}}^s(\beta_{\text{th}}^s) = \Pr\{\text{SINR}_c^s(x) > \beta_{\text{th}}^s\} \quad (12)$$

其中, β_{th}^s 是小蜂窝链路门限值。结合式(10)和式(12), 即可得到定理 2。

定理 2 在基于带内无线回程的全双工大规模 MIMO 异构蜂窝网络中, 任一小蜂窝上行传输链路的 SINR 覆盖概率可以表示为:

根据文献 [15] 中给出的公式 $\int_0^{\infty} x^n e^{-\mu x} dx = e^{-\mu} \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!} \mu^{-n-k+1}$, 式(6)可以表示成式(8), 其中 s_c $= \frac{\beta_{\text{th}}^c}{\tilde{P}_{\text{MB}} r_{ox}^{-\alpha_M}}$; (a) 满足为多项式期望。对于式(8), 利用拉普拉斯变换的导数特性, 可以转换为式(3)。

对于 $I_{\text{MBS}}^{\text{cc}}$ 的拉普拉斯变换, 根据定义 $I_{\text{MBS}}^{\text{cc}} = \sum_{l \in \Phi_{\text{M}} \setminus x} \tilde{P}_{\text{MB}} h_{lo} r_{lo}^{-\alpha_M}$ 可以得到式(9), 其中, (b) 满足文献 [15] 中的结果; ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$ 是超几何函数。

其中, 小规模衰落信道功率增益 $h_{oz} \sim \exp(1)$; $I_{\text{MBS}}^{\text{cs}}$ 是来自于 MBS 下行的干扰; $I_{\text{SBS}}^{\text{cs}}$ 是来自于 SBS 回程传输的干扰; $I_{\text{MBS}}^{\text{cs}}$ 和 $I_{\text{SBS}}^{\text{cs}}$ 的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_{I_{\text{MBS}}^{\text{cs}}}(s)$ 和 $\mathcal{L}_{I_{\text{SBS}}^{\text{cs}}}(s)$ 与式(4)有相似形式; $I_{\text{UE}}^{\text{cs}}$ 是来自于其他 UE 的干扰, $I_{\text{UE}}^{\text{cs}} = \sum_{i \in \tilde{\Phi}_{\text{UE}} \setminus o} P_{\text{UE}} h_{iz} r_{iz}^{-\alpha_s}$, $I_{\text{UE}}^{\text{cs}}$ 的拉普拉斯变化可以表示为式(11)。类似于式(2), $\text{SINR}_c^s(z)$ 的覆盖概率可以表示为式(12)。

$$P_{\text{Cov}}^s(\beta_{\text{th}}^s) = \int_0^{\infty} \mathcal{L}_{I_{\text{MBS}}^{\text{cs}}}\left(\frac{\beta_{\text{th}}^s}{P_{\text{UE}} r_{oz}^{-\alpha_s}}\right) \mathcal{L}_{I_{\text{SBS}}^{\text{cs}}}\left(\frac{\beta_{\text{th}}^s}{P_{\text{UE}} r_{oz}^{-\alpha_s}}\right) \\ \times \mathcal{L}_{I_{\text{UE}}^{\text{cs}}}\left(\frac{\beta_{\text{th}}^s}{P_{\text{UE}} r_{oz}^{-\alpha_s}}\right) f_{r_{oz}}(r_{oz}) dr_{oz} \quad (13)$$

其中, $\mathcal{L}_{I_{\text{UE}}^{\text{cs}}}(s)$ 在式(11)中已给出; $\mathcal{L}_{I_{\text{MBS}}^{\text{cs}}}(s)$ 和 $\mathcal{L}_{I_{\text{SBS}}^{\text{cs}}}(s)$ 与式(5)和式(4)有类似形式; $f_{r_{oz}}(r_{oz})$ 是 r_{oz} 的概率

密度函数。

4 仿真分析

基于前面所得结果,此节对基于无线回程的全双工大规模 MIMO 异构蜂窝网覆盖概率进行数值仿真分析。MBS 和 UE 之间的路径损失指数 $\alpha_M = 4$, SBS 和 UE 之间路径损失指数 $\alpha_S = 3.5$ 。发送功率分别为 $P_{MB} = 10 \text{ W}$, $P_{SB} = 3 \text{ W}$, $P_{UE} = 1 \text{ W}$ 。网络元素强度分别为 $\lambda_M = 0.4 \times 10^{-6}$, $\lambda_S = 2 \times 10^{-6}$ 和 $\lambda_{UE} = 10 \times 10^{-6}$ 。

图 2 为 MBS-UE 下行链路 SINR 覆盖概率与 MBS 天线数量和不同发送功率 P_{MB} 的关系。该图表明,随着 MBS 天线数 M_{Tx} 的增加,系统覆盖概率增大,这主要是由于大规模 MIMO 天线阵列提供了巨大的波束赋形增益。同时,增大 MBS 发送功率 P_{MB} 能够提高宏蜂窝传输的覆盖性能,其原因是分配给每个用户数据流的功率随着 P_{MB} 增大。然而,观察图 2 可以发现,当 MBS 天线数量足够大时, MBS 天线数将不再对系统覆盖概率产生影响,并且宏蜂窝下行链路覆盖概率趋近于一个常数。显然,此结论与实际模型相吻合,证明本文所得结论正确。

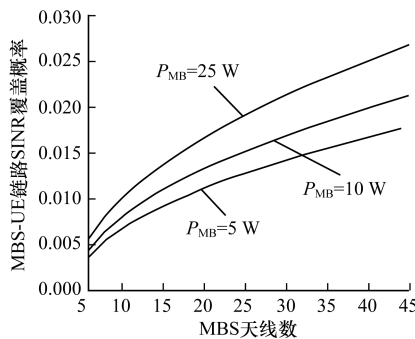


图 2 MBS 天线数对 MBS-UE 链路 SINR 覆盖概率的影响

图 3 显示了 λ_S 与 λ_M 对 UE-SBS 小蜂窝上行链路 SINR 覆盖概率的联合影响。可以看出,小蜂窝上行 SINR 覆盖概率随着 λ_S 的增加而增大。然而,随着 λ_M 的增加,小蜂窝 SINR 覆盖概率逐渐降低。

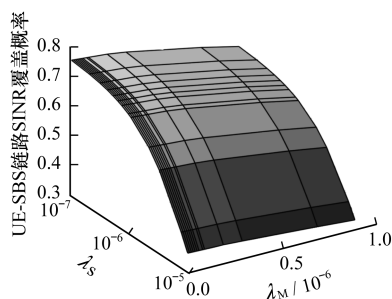


图 3 UE-SBS 链路 SINR 覆盖概率与 λ_S 和 λ_M 的关系

图 4 显示了 N_m 、UE 的发送功率 P_{UE} 以及 λ_M 对宏蜂窝下行链路 SINR 覆盖概率的影响。通过观察可以发现,系统的覆盖概率随着发送功率 P_{UE} 的增大而降低,其原因是当考虑下行传输时,UE 接收到的功率由与其对应的 MBS 的发送功率所决定,而与 UE 的发送功率 P_{UE} 无关。在这种情况下,UE-SBS 上行传输是一种干扰。特别地,图 4 清楚地呈现了 N_m 和 λ_M 对覆盖概率的影响。对于任意给定的一条曲线,很容易发现当 N_m 较小时,宏蜂窝下行传输链路的 SINR 覆盖概率随着 N_m 的增大而增加。然而,当 N_m 足够大时,SINR 覆盖概率为一常数,这是因为在提出的全双工大规模 MIMO 异构蜂窝网模型中, MBS 服务的用户数由 $\min(N_m, K_m)$ 决定。同时,定义 $K_m = \lambda_{UE}/\lambda_M$ 。显然,当满足条件 $N_m < K_m$ 时, $\min(N_m, K_m) = N_m$,由此导致 N_m 对 SINR 覆盖概率产生影响。相反地,当 $\min(N_m, K_m) = K_m = \lambda_{UE}/\lambda_M$,覆盖概率与 N_m 无关,仅取决于 λ_M 。

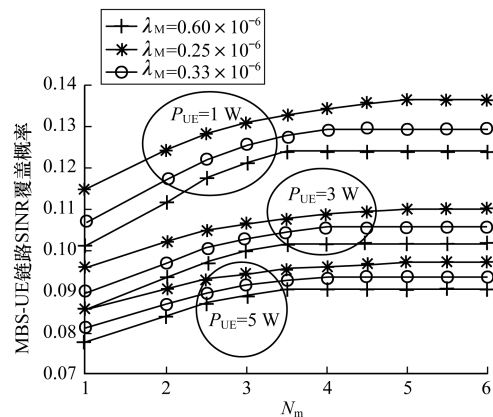


图 4 N_m 与 P_{UE} 对 MBS-UE 链路 SINR 覆盖概率的影响

5 结束语

为满足 5G 网络相对现有网络系统容量 1 000 倍的增长需求,合理分配系统资源并保持与核心网之间的通信,本文利用无线回程,同时结合 5G 网络中的 3 种关键技术,构建一个新的混合异构网络模型。假设网络元素各自服从独立泊松点过程,利用随机几何工具分别得到宏蜂窝下行和小蜂窝上行的 SINR 覆盖概率,并通过数值仿真讨论不同参数对覆盖性能的影响。分析结果表明,利用无线回程是一种有效的异构网方案。下一步将基于本文结论研究如何提高窃听者场景下系统物理层的安全性能。

参考文献

- [1] Andrews J G, Buzzi S, Choi W. What Will 5G Be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1065-1082.
- [2] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019[Z]. 2015.

(下转第 135 页)

- [3] Peng Q, Walid A, Hwang J S, et al. Multipath TCP: Analysis, Design, and Implementation [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 24(1) : 596-609.
- [4] Le T A. Improving the Performance of Multipath Congestion Control over Wireless Networks [C]//Proceedings of International Conference on Advanced Technologies for Communications. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2013: 60-65.
- [5] Cao Y, Xu M, Fu X. Delay-based Congestion Control for Multipath TCP [C]//Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Network Protocols. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2012: 1-10.
- [6] Liu X, Ren F, Shu R, et al. Mitigating Bufferbloat with Receiver-based TCP Flow Control Mechanism in Cellular Networks [C]//Proceedings of the 24th International Conference on Computer Communication and Networks. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2015: 836-844.
- [7] Chen X, Jin R, Suh K, et al. Network Performance of Smart Mobile Handhelds in a University Campus WiFi Network [C]// Proceedings of 2012 ACM Conference on Internet Measurement Conference. New York, USA: ACM Press, 2012: 315-328.
- [8] 刘 镇, 谭毓银, 符 发, 等. MPTCP 与 CMT-SCTP 拥塞控制机制研究 [J]. 计算机工程, 2015, 41(4) : 117-124.
- [9] Internet Engineering Task Force. Coupled Congestion Control for Multipath Transport Protocols [EB/OL]. (2010-11-15). <http://www.rfc-base.org/rfc-6356.html>.
- [10] Le T A, Hong C S, Huh E N. Coordinated TCP Westwood Congestion Control for Multiple Paths over Wireless Networks [C]//Proceedings of International Conference on Information Networking. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2012: 92-96.
- [11] Lee J S, Lee J. Multipath TCP performance improvement in mobile network [C]//Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Ubiquitous and Future Networks. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2015: 710-714.
- [12] Im H, Joo C, Lee T, et al. Receiver-side TCP Countermeasure to Bufferbloat in Wireless Access Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 15(8) : 2080-2093.
- [13] Kuhn N, Lochin E, Mifdaoui A, et al. DAPS: Intelligent Delay-aware Packet Scheduling for Multipath Transport [C]// Proceedings of International Conference on IEEE Communications. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2014: 1222-1227.
- [14] Yang F, Wang Q, Amer P D. Out-of-Order Transmission for In-Order Arrival Scheduling for Multipath TCP [C]//Proceedings of the 28th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2014: 749-752.
- [15] Cui Y, Wang L, Wang X, et al. FMTCP: A Fountain Code-based Multipath Transmission Control Protocol [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(2) : 465-478.

编辑 刘 冰 金胡考

(上接第 128 页)

- [3] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 18(5) : 551-563.
- [4] Marzetta T L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11) : 3590-3600.
- [5] 邓鹏飞, 王 丹, 贾向东. 全双工大规模 MIMO AF 中继系统频谱与能量效率研究 [J]. 计算机工程, 2016, 42(5) : 139-145.
- [6] Ngo H Q, Suraweera H A, Matthaiou M, et al. Multipair Full-duplex Relaying with Massive Arrays and Linear Processing [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(9) : 1721-1737.
- [7] Jaber M, Imran M A, Tafazolli R, et al. 5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: A Survey [J]. IEEE Access, 2016, 4: 1743-1766.
- [8] Ge Xiaohu, Cheng Hui, Guizani M, et al. 5G Wireless Backhaul Networks: Challenges and Research Advances [J]. IEEE Network, 2014, 28(6) : 6-11.
- [9] Tabassum H, Sakr A H, Hossain E. Massive MIMO-enabled Wireless Backhauls for Full-duplex Small Cells [C]// Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [10] Li Boyu, Zhu Dengkui, Liang Ping. Small Cell In-band Wireless Backhaul in Massive MIMO Systems: A Cooperation of Next-generation Techniques [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(12) : 7057-7069.
- [11] Yang H H, Geraci G, Quek T Q S. Energy-efficient Design of MIMO Heterogeneous Networks with Wireless Backhaul [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(7) : 4914-4927.
- [12] Chiu S N, Stoyan D, Kendall W S, et al. Stochastic Geometry and Its Applications [M]. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- [13] Wang L, Wong K K, ElKashlan M, et al. Secrecy and Energy Efficiency in Massive MIMO Aided Heterogeneous C-RAN: A New Look at Interference [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(8) : 1375-1389.
- [14] He Anqi, Wang Lifeng, ElKashlan M, et al. Spectrum and Energy Efficiency in Massive MIMO Enabled HetNets: A Stochastic Geometry Approach [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12) : 2294-2297.
- [15] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series, and Products [M]. [S. l.]: Academic Press, 2007.

编辑 金胡考