

多天线全双工中继辅助的异构蜂窝网物理层安全性能分析

钟州, 张波, 戚晓慧, 黄开枝

(国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对随机异构网络频谱资源紧张及微基站层安全性能不足的问题, 通过在微基站层引入多天线全双工中继辅助微基站用户通信, 由此提高网络的整体安全性能。基于随机几何理论, 构建针对该网络的安全性能分析模型, 推导出了用户接入中继基站或宏基站、中继接入微基站的安全中断概率闭式表达式; 基于此进一步给出了系统全局安全中断概率闭式表达式, 以评估系统参数对其安全性的影响。仿真分析了宏基站功率和天线数、中继功率和天线数, 以及两者的密度对网络安全性能的影响。仿真结果验证了引入多天线全双工中继能够提高所研究网络的安全性能。

关键词: 物理层安全; 多天线; 安全中断概率; 全双工中继

中图分类号: TN918.82

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019074

Physical layer security performance analysis of multi-antenna full-duplex relay aided heterogeneous cellular network

ZHONG Zhou, ZHANG Bo, QI Xiaohui, HUANG Kaizhi

National Digital Switching System Engineering and Technological Research and Department Center, Zhengzhou 450002, China

Abstract: To alleviate the spectrum shortage problem and security threats in heterogeneous network (HetNet), multi-antenna full-duplex relay was introduced for communication between femto base station (FBS) and legitimate user. With the aid of multi-antenna full-duplex relay in FBS network, the secrecy performance of HetNets could be improved. Under a stochastic geometry framework, the fundamental analysis model to evaluate the secrecy performance in multi-antenna full-duplex relay aided HetNet was set up. To be specific, the exact expressions for the secrecy outage probability of the typical user, serving relays and HetNet were derived respectively. Then, based on the theoretical analyses and simulation results, the influences of transmit power and antenna number of both macro base station and FBS on secrecy performance in HetNet were examined. Finally, the results show that introducing multi-antenna full-duplex relay for FBS networks improves the secrecy performance of HetNet.

Key words: physical layer security, multi-antenna, secrecy outage probability, full-duplex relay

1 引言

随着 5G 脚步的日益临近, 异构蜂窝网络作为能够满足下一代无线网络对无缝覆盖和高网络吞吐量需求的有效手段而备受瞩目^[1-2]。由于无线信道的广播特性, 窃听者能够轻易地截获无线通信信

号, 而异构蜂窝网络的开放性系统结构和密集部署也为窃听者带来了更多便利。随着无线数据流量和无线业务价值量的不断增长, 蜂窝网络所面临的频谱资源紧张及数据安全问题的压力越发凸显^[1]。近年来, 新兴的物理层安全技术作为传统安全手段的补充, 能够利用无线信道的物理特性为无线通信提

收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2019-02-02

通信作者: 戚晓慧, zb100403@126.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61871404, No.61601514, No.61701538)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61871404, No. 61601514, No. 61701538)

供不同层面的安全保障^[3], 受到学术界的广泛关注。

多天线技术作为物理层安全的重要手段之一, 是一种能够提高异构蜂窝网络安全性能的有效方法, 在波束成形、人工噪声、分布式多天线等^[4-6]多天线领域的研究均有建树。文献[4]研究了人工噪声辅助多天线异构网络的安全传输性能, 提出了基于安全移动连接准则的接入门限, 并在该准则下, 推导了随机用户的接入概率和安全概率表达式。文献[5]针对上行多天线异构蜂窝网络提出了安全性理论分析框架, 并分别对采用最大比合并(MRC, maximal ratio combining)和最优合并(OC, optimum combining)情况下的基站安全性能进行比较。文献[6]对利用多点协作传输方法提高异构网络安全覆盖进行了研究。物理层安全技术的另一重要手段——全双工中继, 能够有效地提高异构网络的通信容量和频谱使用的灵活性^[7-9], 并且能够提高网络通信的安全性能^[10-12]。文献[10]研究了源节点在与其目的节点通信时, 利用一种新型半双工和全双工中继混合机制, 以增强中继信道的安全性。文献[11]研究了无缓存单天线全双工中继网络的物理层安全性能。文献[12]基于网络中次级消息源的信道状态信息, 提出了全双工异构网络的中继选择机制。

尽管围绕多天线技术与全双工中继的物理层安全研究相继取得突破, 但将两者相结合并应用于异构网络中提高网络整体安全性能的研究尚待推进。受此启发, 本文致力于多天线全双工中继辅助异构网络物理层安全问题的研究, 探索通过在能力较弱的微基站层部署多天线全双工中继, 以提升整体异构网络的安全性能。本文主要工作包括: 首先, 基于随机几何对多天线全双工中继辅助的双层异构蜂窝网络进行建模, 推导了合法接收端处接收信干比(SIR, signal-to-interference ratio)的累积分布函数(CDF, cumulative distribution function)和最危险窃听者接收SIR的概率密度函数(PDF, probability density function); 然后, 以安全中断概率(SOP, secrecy outage probability)为安全性能评价指标, 针对多天线全双工中继辅助的双层异构蜂窝网络提出了物理层安全性能分析框架; 最后分别分析了宏基站和全双工中继的发射功率、天线数、密度以及安全速率门限对异构网络安全性能的影响。

2 系统模型

多天线全双工中继辅助的异构网络由宏基站、

单天线微基站、全双工中继基站(简称为中继节点)及合法用户构成, 其中, 全体宏基站 Φ_1 、微基站 Φ_2 和全双工中继 Φ_3 的位置分布分别服从密度为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的泊松点过程(PPP, Poisson point process), 并且存在多个窃听者试图截获来自发射端的信号, 窃听者的位置分布服从密度为 λ_e 的PPP。宏基站配置天线数为 M_1 , 发射功率为 P_1 ; 微基站配置天线数为 M_2 , 发射功率为 P_2 ; 全双工中继基站配置天线数为 M_3 , 发射功率为 P_3 ; 用户配置单天线, 所有发射节点均只服务一个接收节点, 并且假设各个节点间的信道为独立同分布的瑞利衰落信道^[4]。根据文献[13], 中继节点协作策略的安全性在很大程度上依赖于中继节点与窃听者相对于发送端的相对距离。本文假设宏/微基站、中继节点及窃听者位置均是随机分布的, 节点之间距离的相对关系无从确定。而且, 考虑中继节点给系统安全性带来提升与其自身处理负荷增加的相对关系, 考虑全双工中继均采用译码转发的情形, 在接收端配置MRC解码器对接收信号进行处理。为了方便研究, 本文以典型用户所处位置作为坐标原点 O 展开分析。

在该异构网络中的用户能够直接接入宏基站, 或者通过全双工中继节点接入微基站。换言之, 宏基站直接与用户通信, 而单天线微基站只通过中继节点与用户建立连接。令 z_s 表示基站向典型用户发送的消息, 宏基站 $x_1 \in \Phi_1$ 及中继 $x_3 \in \Phi_3$ 发射信号可统一表示为

$$s_i = \mathbf{w}_i \sqrt{P_i} z_s \quad (1)$$

其中, $i \in \{1, 3\}$ 分别对应信号源 x_i , $\mathbf{w}_i = \frac{\mathbf{h}_i^H}{\sqrt{\mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H}}$ 是维度为 $M_i \times 1$ 的波束向量, $\mathbf{h}_i = [h_1^{(i)}, h_2^{(i)}, \dots, h_{M_i}^{(i)}]$ 表示信号源 x_i 到典型用户的 $1 \times M_i$ 维小尺度衰落向量, 并且 $h_j^{(i)} \sim \text{CN}(0, 1)$, $1 \leq j \leq M_i$ 。由于随机异构网络中的干扰较强, 此时噪声与干扰相比可以忽略, 因此为了便于计算, 假设合法接收方和窃听者接收信号的噪声功率为零^[4], 则典型用户接收来自 x_i 的信号可以表示为

$$y_i = \mathbf{h}_i s_i l_{x_i, o}^{-\frac{\alpha}{2}} + \sum_{z \in \frac{\Phi}{x_i}} h_{z, o} s_z l_{z, o}^{-\frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

其中, $i \in \{1, 3\}$, $\sum_{z \in \frac{\Phi}{x_i}} h_{z, o} s_z l_{z, o}^{-\frac{\alpha}{2}}$ 为其他信号源对典型

用户的总干扰, s_z 为信号源 z 的发射信号, $\Theta = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}$, $h_{z,o}$ 表示 z 到 o 之间的信道衰落增益, 并且有 $h_{z,o} \sim \text{CN}(0,1)$, $l_{a,b}$ 表示节点 a 到 b 的距离, $l_{a,b}^{-\alpha}$ 表示系数为 α 的路径衰落损耗。因此当典型用户接入 $x_i (i \in \{1,3\})$ 时, 其接收 SIR 为

$$\text{SIR}_i = \frac{P_i g_{x_i,o} l_{x_i,o}^{-\alpha}}{I_i} \quad (3)$$

其中, $g_{x_i,o} = \|h_{x_i,o}\|^2 \sim \Gamma(M_i, 1)^{[14]}$, $I_i = I_i^{\text{MBS}} + I_i^{\text{FBS}} + I_i^{\text{relay}}$, $I_i^{\text{MBS}} = P_1 \sum_{z \in \frac{\Phi_1}{x_i}} g_{z,o} l_{z,o}^{-\alpha}$ 为宏基站对典型用户干扰的功

率, $I_i^{\text{FBS}} = P_2 \sum_{z \in \frac{\Phi_2}{x_i}} g_{z,o} l_{z,o}^{-\alpha}$ 为微基站对典型用户干扰的

功率, $I_i^{\text{relay}} = P_3 \sum_{z \in \frac{\Phi_3}{x_i}} g_{z,o} l_{z,o}^{-\alpha}$ 为中继节点对典型用户干

扰的功率, $g_{z,o} = \|h_{z,o}\|^2 \sim e^{[14]}$ 。

同理, 微基站 x_2 发射信号可表示为

$$s_2 = \sqrt{P_2} z \quad (4)$$

此时多天线中继转发来自 x_2 的信号时, 其接收向量可以表示为

$$y_2 = h_2 s_2 l_{x_2,x_3}^{-\frac{\alpha}{2}} + \sum_{z \in \frac{\Theta}{x_2}} h_{z,x_3} x_z l_{z,x_3}^{-\frac{\alpha}{2}} + n_{\text{SI}} \quad (5)$$

其中, $h_2 = [h_2^{(1)}, h_2^{(2)}, \dots, h_2^{(M_3)}]$ 表示服务微基站 x_2 到中继节点 x_3 接收天线的 $1 \times M_3$ 维小尺度衰落向量;

$\sum_{z \in \frac{\Theta}{x_2}} h_{z,x_3} x_z l_{z,x_3}^{-\frac{\alpha}{2}}$ 为其他信号源对 x_3 的总干扰;

$h_{z,x_3} = [h_{z,x_3}^{(1)}, h_{z,x_3}^{(2)}, \dots, h_{z,x_3}^{(M_3)}]$ 表示 z 到 x_3 的信道衰落增益, 并且有 $h_{z,x_3}^{(j)} \sim \text{CN}(0,1)$, $1 \leq j \leq M_3$; n_{SI} 为全双工中继的自干扰向量。当中继节点转发来自 x_2 的信号时, 由于接收端的多天线配置了 MRC 解调器^[15], 译码向量为 $w_2 = \frac{h_2^H}{\|h_2\|}$ 。因此经过 MRC 后的

信号 (即 $y_2 = y_2 w_2$) 的 SIR 为

$$\text{SIR}_2 = \frac{P_2 g_{x_2,x_3} l_{x_2,x_3}^{-\alpha}}{I_2 + N_{\text{SI}}} \quad (6)$$

其中, $g_{x_2,x_3} = \|h_2\|^2 \sim \Gamma(M_2, 1)^{[14]}$, $I_2 = I_2^{\text{MBS}} + I_2^{\text{FBS}} + I_2^{\text{relay}}$, $I_2^{\text{MBS}} = P_1 \sum_{z \in \frac{\Phi_1}{x_3}} g_{z,x_3} l_{z,x_3}^{-\alpha}$ 为宏基站对 x_3 干扰的功

率, $I_2^{\text{FBS}} = P_2 \sum_{z \in \frac{\Phi_2}{x_3}} g_{z,x_3} l_{z,x_3}^{-\alpha}$ 为微基站对 x_3 干扰的功率,

$I_2^{\text{relay}} = P_3 \sum_{z \in \frac{\Phi_3}{x_3}} g_{z,x_3} l_{z,x_3}^{-\alpha}$ 为其他中继节点对 x_3 干扰的功

率, $g_{z,x_3} = \left| h_{z,x_3} \frac{h_2^H}{\|h_2\|} \right|^2 \sim e^{[14]}$, N_{SI} 为自干扰功率。

本文假设全双工中继的自干扰为线性残余自干扰, 即 $N_{\text{SI}} = \beta P_3$, β 表示自干扰消除 (SIC, self-interference cancellation) 能力^[1-2]。

考虑各个窃听者独立窃听的场景, 并且均不主动攻击合法节点, 任意窃听者 $E \in \Phi_E$ 截获 x_i 的信号的 SIR 为

$$\text{SIR}_{E,i} = \frac{P_i g_{x_i,E} l_{x_i,E}^{-\alpha}}{I_{E,i}} \quad (7)$$

其中, $g_{x_i,E} \sim e^{[14]}$, $I_{E,i} = I_{E,i}^{\text{MBS}} + I_{E,i}^{\text{FBS}} + I_{E,i}^{\text{relay}}$,

$I_{E,i}^{\text{MBS}} = P_1 \sum_{z \in \frac{\Phi_1}{x_i}} g_{z,E} l_{z,E}^{-\alpha}$ 为宏基站对 E 干扰的功率,

$I_{E,i}^{\text{FBS}} = P_2 \sum_{z \in \frac{\Phi_2}{x_i}} g_{z,E} l_{z,E}^{-\alpha}$ 为微基站对 E 干扰的功率,

$I_{E,i}^{\text{relay}} = P_3 \sum_{z \in \frac{\Phi_3}{x_i}} g_{z,E} l_{z,E}^{-\alpha}$ 为中继节点对 E 干扰的功率,

$g_{z,E} \sim e'$ 。本文针对最危险的窃听者进行研究, 即接收 SIR 最大的窃听者。当窃听者窃听的典型用户接入 x_i 时, 最危险窃听者的接收 SIR 为

$$\text{SIR}_i^E = \max_{E \in \Phi_E} \{ \text{SIR}_{E,i} \} \quad (8)$$

本文采用的接入策略是用户依据基站层偏置 $\hat{B}_{i,j}$ 选择接入各层基站, 而在各层基站中, 用户则接入离其最近的基站或者中继节点, 而中继节点则选择距离最近的微基站接入。假设接入概率为 A_k , $k \in \{1,3\}$ 分别对应宏基站层和微基站层, 其表达式为^[16]

$$A_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{j \in \{1,3\}} \lambda_j \left(\hat{P}_{j,k} \hat{\Delta}_{j,k} \hat{B}_{j,k} \right)^{\frac{2}{\alpha}}} \quad (9)$$

其中, $\hat{P}_{i,j} = \frac{P_i}{P_j}$, $\hat{\Delta}_{i,j} = \frac{M_i}{M_j}$, $\hat{B}_{i,j} = \frac{B_i}{B_j}$, $B_i = \sqrt{\frac{1}{M_i}}$ 。

3 安全性能分析

当窃听者的信道条件优于门限值时, 合法接收

方会发生安全中断以确保私密信息的安全性。当用户接收来自宏基站 x_1 或中继节点 x_3 的信号或全双工中继节点接收来微基站 x_2 的信号时，安全中断概率为

$$P_{\text{SOP},x_i}(R_s) = \Pr\left\{\left[\text{lb}(1 + \text{SIR}_i) - \text{lb}(1 + \text{SIR}_i^E)\right]^+ < R_s\right\} \quad (10)$$

其中, $[\cdot]^+ = \max\{\cdot, 0\}$, R_s 是目标安全速率。当合法接收方接入 x_i ($i \in \{1, 2, 3\}$) 时, 其安全中断概率为^[17]

$$P_{\text{SOP},x_i}(R_s) = \int_0^\infty f_{\text{SIR}_i^E}(t) F_{\text{SIR}_i}(2^{R_s}(1+t)-1) dt \quad (11)$$

其中, $F_{\text{SIR}_i}(\gamma)$ 为合法用户接收的 SIR 的 CDF, $f_{\text{SIR}_i^E}(t)$ 为最危险窃听者接收 SIR 的 PDF。为了求得安全中断概率, 将在引理 1 和引理 2 中给出 $F_{\text{SIR}_i}(\gamma)$ 的推导结果, 并在引理 3 中给出 $f_{\text{SIR}_i^E}(t)$ 的表达式。

引理 1 当典型用户接入 x_i ($i \in \{1, 3\}$) 时, 即宏基站 x_1 或中继节点 x_3 , 合法用户接收 SIR 的 CDF 可以表示为

$$F_{\text{SIR}_i}(\gamma) = 1 - \pi \lambda_i \sum_{n=0}^{M_i-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\gamma}{P_i}\right)^n \sum_{\bar{m} \in M(n)} \frac{C(\bar{m}) F_i(\bar{m}, \gamma) \Gamma(\sum m_l + 1)}{\left[\sum_{j=1}^3 \tilde{C}'_{j,i} + \pi \sum_{j \in \{1,3\}} \lambda_j (\hat{P}_{j,i} \hat{\Delta}_{j,i} \hat{B}_{j,i})^{\frac{2}{\alpha}}\right]^{\sum m_l + 1}} \quad (12)$$

其中, $\tilde{C}'_{j,i} = \lambda_j (\gamma \hat{P}_{j,i})^{\frac{2}{\alpha}} \frac{2\pi}{\alpha} B'\left(\frac{2}{\alpha}, 1 - \frac{2}{\alpha}, u_{j,i}^\gamma\right)$;

$$B'(a, b, z) = \int_z^1 t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt; u_{j,i}^\gamma = \left(1 + \frac{\gamma}{\hat{\Delta}_{j,i} \hat{B}_{j,i}}\right)^{-1},$$

$$j \in \{1, 3\}; \tilde{C}'_{2,i} = \lambda_2 (\gamma \hat{P}_{2,i})^{\frac{2}{\alpha}} \frac{2\pi}{\alpha} B\left(\frac{2}{\alpha}, 1 - \frac{2}{\alpha}\right);$$

$$B(a, b) = \int_0^1 t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt; C(\bar{m}) = \frac{n!}{\prod_k (m_k! (k!)^{m_k});$$

$$D_j(l) = \frac{lB\left(1 + \frac{2}{\alpha}, l - \frac{2}{\alpha}\right)}{\lambda_j^\alpha}; F_i(\bar{m}, \gamma) = \frac{\prod_{l=1}^n \left[\sum_{j=1}^3 D_j(l) P_j^\alpha\right]^{m_l}}{(\gamma P_i^\alpha)^{\sum m_l} (2\pi)^{-\sum m_l}};$$

$$M(n) = \left\{\bar{m} = (m_1, m_2, \dots, m_n) : \sum_{k=1}^n k m_k = n\right\}.$$

证明 当典型用户接入 x_i ($i \in \{1, 3\}$) 时, 合法用

户接收 SIR 的 CDF 的推导如下

$$\begin{aligned} F_{\text{SIR}_i}(\gamma) &= \Pr\{\text{SIR}_i < \gamma\} = \Pr\left\{\frac{P_i g_{x_i,o} I_i^{-\alpha}}{I_i} < \gamma\right\} = \\ &= 1 - \int_0^\infty \Pr\left\{g_{x_i,o} > \frac{I_i \gamma}{P_i x^{-\alpha}}\right\} f_{I_i,o}(x) dx = \\ &= 1 - \int_0^\infty \sum_{n=0}^{M_i-1} \frac{1}{n!} (-\hat{s}_i)^n \frac{d^n}{d\hat{s}_i^n} (L_i(\hat{s}_i)) f_{I_i,o}(x) dx = \\ &= 1 - \pi \sum_{n=0}^{M_i-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\gamma}{P_i}\right)^n \cdot \\ &\quad \sum_{\bar{m} \in M(n)} \frac{\sum_{j \in \{1,3\}} \lambda_j (\hat{P}_{j,i} \hat{\Delta}_{j,i} \hat{B}_{j,i})^{\frac{2}{\alpha}} C(\bar{m}) F_i(\bar{m}, \gamma) \Gamma(\sum m_l + 1)}{\left[\sum_{j=1}^3 \tilde{C}'_{j,i} + \pi \sum_{j \in \{1,3\}} \lambda_j (\hat{P}_{j,i} \hat{\Delta}_{j,i} \hat{B}_{j,i})^{\frac{2}{\alpha}}\right]^{\sum m_l + 1}} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\frac{d^n L_i(\hat{s}_i)}{d\hat{s}_i^n} = e^{-\sum_{j=1}^3 \tilde{C}'_{j,i} x^2} \sum_{\bar{m} \in M(n)} C(\bar{m}) x^{-n\alpha + 2\sum m_l}$.

$$(-1)^n F_i(\bar{m}, \gamma), \hat{s}_i = P_i^{-1} x^\alpha \gamma, f_{I_i,o}(x) = \frac{2\pi \lambda_i x}{A_i}$$

$e^{-\sum_{j \in \{1,3\}} \lambda_j (\hat{P}_{j,i} \hat{\Delta}_{j,i} \hat{B}_{j,i})^{\frac{2}{\alpha}} x^2}$, $L_i(\hat{s}_i)$ 表示 I_i 的拉普拉斯 (Laplace) 变换, 其推导如式(14)所示。

$$L_i(\hat{s}_i) = \mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_i I_i^{\text{MBS}}}\right] \mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_i I_i^{\text{FBS}}}\right] \mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_i I_i^{\text{relay}}}\right] \quad (14)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_i I_i^{\text{MBS}}}\right] &= e^{\int_0^\infty 2\pi \lambda_1 (1 - (1 + \hat{s}_i P_1 x^{-\alpha})^{-1}) x dx} = \\ &= e^{-\frac{2\pi}{\alpha} \lambda_1 (\hat{s}_i P_1)^{\frac{2}{\alpha}} B\left(\frac{2}{\alpha}, 1 - \frac{2}{\alpha}, u_{1,i}^\gamma\right)} = e^{-\tilde{C}'_{1,i} x^2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_i I_i^{\text{FBS}}}\right] &= e^{\int_0^\infty 2\pi \lambda_2 (1 - (1 + \hat{s}_i P_2 x^{-\alpha})^{-1}) x dx} = \\ &= e^{-\frac{2\pi}{\alpha} \lambda_2 (\hat{s}_i P_2)^{\frac{2}{\alpha}} B\left(\frac{2}{\alpha}, 1 - \frac{2}{\alpha}, 0\right)} = e^{-\tilde{C}'_{2,i} x^2} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_i I_i^{\text{relay}}}\right] &= e^{\int_0^\infty 2\pi \lambda_3 (1 - (1 + \hat{s}_i P_3 x^{-\alpha})^{-1}) x dx} = \\ &= e^{-\frac{2\pi}{\alpha} \lambda_3 (\hat{s}_i P_3)^{\frac{2}{\alpha}} B\left(\frac{2}{\alpha}, 1 - \frac{2}{\alpha}, u_{3,i}^\gamma\right)} = e^{-\tilde{C}'_{3,i} x^2} \end{aligned} \quad (17)$$

将式(14)~式(17)代入式(13), 引理 1 证毕。

引理 2 当全双工中继节点 x_3 接入微基站 x_2 时, 全双工中继接收 SIR 的 CDF 可以表示为

$$F_{\text{SIR}_2}(\gamma) = 1 - \sum_{p=0}^{M_3-1} \sum_{n=0}^p \sum_{\bar{m} \in M(n)} \frac{2\pi\lambda_2 C(\bar{m}) F_2(\bar{m}, \gamma) \left(\frac{P_2}{\gamma}\right)^p}{n!(p-n)!(N_{\text{SI}})^{n-p}} \int_0^\infty x^{-\alpha p+1-n\alpha+2\sum m_i} e^{-\sum_{j=1}^3 \tilde{C}'_{j,2} x^2 - \pi\lambda_2 x^2 - P_2 \gamma^{-1} N_{\text{SI}} x^{-\alpha}} dx \quad (18)$$

证明 当全双工中继节点 x_3 接入微基站 x_2 时, 中继接收 SIR 的 CDF 的推导如下。

$$\begin{aligned} F_{\text{SIR}_2}(\gamma) &= \Pr\{\text{SIR}_2 < \gamma\} = \\ &= 1 - \int_0^\infty \Pr\left\{g_{x_2, x_3} > \frac{(I_2 + N_{\text{SI}})\gamma}{P_2 x^{-\alpha}}\right\} f_{I_{x_2, x_3}}(x) dx = \\ &= 1 - \sum_{p=0}^{M_3-1} \int_0^\infty e^{-\hat{s}_2 N_{\text{SI}}} \sum_{n=0}^p \frac{(\hat{s}_2 N_{\text{SI}})^{p-n}}{(p-n)!} \frac{1}{n!} (-\hat{s}_2)^n \cdot \\ &\quad \frac{d^n}{d\hat{s}_2^n} (L_{I_2}(\hat{s}_2)) f_{I_{x_2, x_3}}(x) dx = \\ &= 1 - \sum_{p=0}^{M_3-1} \int_0^\infty \sum_{n=0}^p \frac{2e^{-\hat{s}_2 N_{\text{SI}} - \sum_{j=1}^3 \tilde{C}'_{j,2} x^2}}{(p-n)! n! (\hat{s}_2 N_{\text{SI}})^{n-p}} \cdot \\ &\quad \sum_{\bar{m} \in M(n)} C(\bar{m}) x^{-n\alpha+2\sum m_i} (-1)^n F_2(\bar{m}, \gamma) \pi\lambda_2 x e^{-\pi\lambda_2 x^2} dx = \\ &= 1 - \sum_{p=0}^{M_3-1} \sum_{n=0}^p \sum_{\bar{m} \in M(n)} \frac{2\pi\lambda_2 C(\bar{m}) F_2(\bar{m}, \gamma) \left(\frac{P_2}{\gamma}\right)^p}{n!(p-n)!(N_{\text{SI}})^{n-p}} \int_0^\infty x^{-\alpha p+1-n\alpha+2\sum m_i} e^{-\sum_{j=1}^3 \tilde{C}'_{j,2} x^2 - \pi\lambda_2 x^2 - P_2 \gamma^{-1} N_{\text{SI}} x^{-\alpha}} dx \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $L_{I_2}(\hat{s}_2)$ 表示 I_2 的拉普拉斯变换, 其推导与式(14)

相同, 这里直接给出其表达式 $L_{I_2}(\hat{s}_2) = e^{-\sum_{j=1}^3 \tilde{C}'_{j,2} x^2}$;

$$\frac{d^n L_{I_2}(\hat{s}_2)}{d\hat{s}_2^n} = e^{-\sum_{j=1}^3 \tilde{C}'_{j,2} x^2} \sum_{\bar{m} \in M(n)} C(\bar{m}) x^{-n\alpha+2\sum m_i} (-1)^n F_2(\bar{m}, \gamma);$$

$$\hat{s}_2 = P_2^{-1} x^\alpha \gamma, \quad \tilde{C}'_{j,2} = \lambda_j (\gamma \hat{P}_{j,2})^\alpha \frac{2\pi}{\alpha} B\left(\frac{2}{\alpha}, 1 - \frac{2}{\alpha}\right),$$

$$j=1, 3; \quad \tilde{C}'_{2,2} = \lambda_2 (\gamma \hat{P}_{2,2})^\alpha \frac{2\pi}{\alpha} B\left(\frac{2}{\alpha}, 1 - \frac{2}{\alpha}, \frac{1}{1+\gamma}\right);$$

$$f_{I_{x_2, x_3}}(x) = 2\pi\lambda_2 x e^{-\pi\lambda_2 x^2}.$$

综上, 引理 2 证毕。

引理 3 当合法接收方接入 x_i ($i \in \{1, 2, 3\}$) 时, 最危险窃听者接收 SIR 的 PDF 可以表示为

$$f_{\text{SIR}_i^E}(t) = \frac{2\pi\lambda_E}{\alpha t \sum_{j=1}^3 \tilde{C}_{j,i}} e^{-\frac{\pi\lambda_E}{\sum_{j=1}^3 \tilde{C}_{j,i}}} \quad (20)$$

$$\text{其中, } \tilde{C}_{j,i} = \lambda_j (t \hat{P}_{j,i})^\alpha \frac{2\pi}{\alpha} B\left(\frac{2}{\alpha}, 1 - \frac{2}{\alpha}\right).$$

证明 当合法接收方接入 x_i ($i \in \{1, 2, 3\}$) 时, 最危险窃听者接收 SIR 的 CDF 推导如下

$$\begin{aligned} F_{\text{SIR}_i^E}(t) &= \Pr\{\text{SIR}_i^E < t\} = \Pr\left\{\max_{E \in \mathcal{O}_E} \{\text{SIR}_{E,i}\} < t\right\} = \\ &= \mathbb{E}_{\mathcal{O}_E} \left[\prod_{E \in \mathcal{O}_E} \Pr\left\{\frac{P_i g_{x_i, E} I_{x_i, E}^{-\alpha}}{I_{E,i}} < t\right\} \right] = \\ &= \mathbb{E}_{\mathcal{O}_E} \left[\prod_{E \in \mathcal{O}_E} \left(1 - \mathbb{E}\left[e^{-\frac{t I_{E,i}}{P_i I_{x_i, E}^{-\alpha}}}\right]\right) \right] = \\ &= e^{-2\pi\lambda_E \int_0^\infty L_{I_{E,i}}(\hat{s}_{E,i}) dx} = e^{-2\pi\lambda_E \int_0^\infty \exp\left[-\sum_{j=1}^3 \tilde{C}_{j,i} x^2\right] dx} = e^{-\sum_{j=1}^3 \tilde{C}_{j,i}} \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $\hat{s}_{E,i} = P_i^{-1} x^\alpha t$, $L_{I_{E,i}}(\hat{s}_{E,i})$ 是 $I_{E,i}$ 的拉普拉斯变换, 其推导与式(14)类似, 可以表示为

$$L_{I_{E,i}}(\hat{s}_{E,i}) = \mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_{E,i} I_{E,i}^{\text{MBS}}}\right] \mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_{E,i} I_{E,i}^{\text{FBS}}}\right] \mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_{E,i} I_{E,i}^{\text{relay}}}\right] \quad (22)$$

其中,

$$\mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_{E,i} I_{E,i}^{\text{MBS}}}\right] = e^{\int_0^\infty 2\pi\lambda_1 \left(1 - (1 + \hat{s}_{E,i} P_1 x^{-\alpha})^{-1}\right) dx} = e^{-\tilde{C}_{1,i} x^2} \quad (23)$$

$$\mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_{E,i} I_{E,i}^{\text{FBS}}}\right] = e^{\int_0^\infty 2\pi\lambda_2 \left(1 - (1 + \hat{s}_{E,i} P_2 x^{-\alpha})^{-1}\right) dx} = e^{-\tilde{C}_{2,i} x^2} \quad (24)$$

$$\mathbb{E}\left[e^{-\hat{s}_{E,i} I_{E,i}^{\text{relay}}}\right] = e^{\int_0^\infty 2\pi\lambda_3 \left(1 - (1 + \hat{s}_{E,i} P_3 x^{-\alpha})^{-1}\right) dx} = e^{-\tilde{C}_{3,i} x^2} \quad (25)$$

将式(23)~式(25)代入式(22), 即可得到 $L_{I_{E,i}}(\hat{s}_{E,i})$ 。对式(21)求导可得到 SIR_i^E 的 PDF, 由此引理 3 证毕。

定理 1 用户的全局 SOP 可以表示为

$$P_{\text{SOP}}(R_s) = A_1 P_{\text{SOP}}^{\text{MBS}}(R_s) + A_3 P_{\text{SOP}}^{\text{FBS}}(R_s) \quad (26)$$

其中, $P_{\text{SOP}}^{\text{MBS}}(R_s)$ 和 $P_{\text{SOP}}^{\text{FBS}}(R_s)$ 分别是用户接入宏基站层和微基站层的安全中断概率, 表达式分别为

$$P_{\text{SOP}}^{\text{MBS}}(R_s) = P_{\text{SOP}, x_1}(R_s) \quad (27)$$

$$P_{\text{SOP}}^{\text{FBS}}(R_s) = P_{\text{SOP}, x_2}(R_s) + (1 - P_{\text{SOP}, x_2}(R_s)) P_{\text{SOP}, x_3}(R_s) \quad (28)$$

A_k 已在式(9)给出, $P_{\text{SOP}, x_i}(R_s)$ 则可以通过将式(12)、式(18)和式(20)代入式(11)得到。此时获取的表达式虽然仍然含有积分等形式, 但已经可以根据已知的系统参数直接利用现有计算工具获取理论

结果。为避免冗余，此处不再给出具体的 SOP 表示式 [3,6]。

4 仿真结果与分析

基于第 2 节所述的异构网络模型，本节通过对比理论推导结果与蒙特卡洛仿真，验证第 3 节所得到的理论推导，并展开进一步分析。图 1 中“M”所对应的曲线为相应条件下通过 100 000 次蒙特卡洛仿真取平均所得到的实验结果，“T”所对应的曲线为根据第 3 节理论推导所得出的数值结果。以下各个仿真均考虑 $\alpha = 3$ ， $\beta = 0.01$ 。

图 1 显示了宏基站层和微基站层的 SOP 随中继节点功率 P_3 变化情况，通过蒙特卡洛仿真验证了理论推导的准确性，其中 $\lambda_1 = 10^{-5} \text{ m}^2$ ， $\lambda_2 = 2\lambda_1$ ， $\lambda_3 = 4\lambda_1$ ， $\lambda_E = 2\lambda_1$ ， $M_1 = 4$ ， $M_3 = 4$ ， $R_s = 0.2 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ， $P_1 = 4 \text{ dBm}$ ， $P_2 = 2 \text{ dBm}$ 。由图 1 可以看出， $P_{\text{SOP}}^{\text{MBS}}(R_s)$ 和 $P_{\text{SOP}}^{\text{FBS}}(R_s)$ 随中继节点功率的增大而明显减小，这是因为中继节点功率的提高增加了窃听者截获的宏基站和微基站的信号中的干扰功率，尽管中继节点功率的提高同时增加了中继服务的合法用户和其窃听者接收的有用信号的功率，使 $P_{\text{SOP},x_2}(R_s)$ 与 P_3 的关系较为复杂，但当 P_3 较大时，对合法用户的信道质量增益更大。

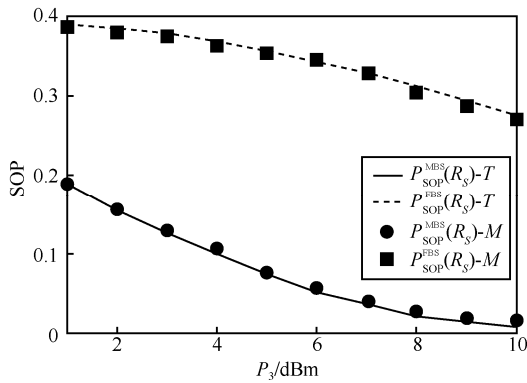


图 1 宏基站层和微基站层的 SOP 随中继节点功率 P_3 变化情况

图 2 显示了全局 SOP 在不同的中继天线数下随 $\frac{\lambda_3}{\lambda_1}$ 变化情况，其中 $\lambda_1 = 10^{-5} \text{ m}^2$ ， $\lambda_2 = 2\lambda_1$ ， $\lambda_E = 7\lambda_1$ ， $M_1 = 4$ ， $R_s = 0.5 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ， $P_1 = 7 \text{ dBm}$ ， $P_2 = 5 \text{ dBm}$ ， $P_3 = 3 \text{ dBm}$ ，图 2 中横坐标表示网络中中继节点分布密度与宏基站分布密度的比值，实际上，该比值可以看作在一个宏基站覆盖范围内中继节点数目的变化情况，即单个宏小区内中继节点的部署密

度。由图 2 可以看出，全局 SOP 随中继天线数的增加而降低，这是因为天线波束增益的增加能提高被服务的合法用户的信道质量。而中继节点密度的增加能够有效地减小中继节点到其服务的合法用户的平均距离，从而降低全局 SOP。尽管中继节点密度的增加会对其他合法用户带来一定的干扰，但其同时也对窃听者造成干扰，因此，这部分的影响基本上可以相互抵消。

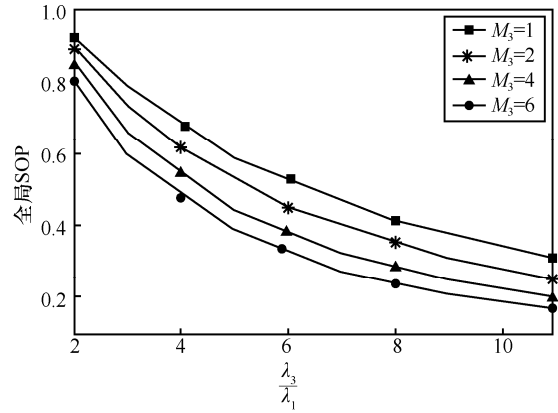


图 2 全局 SOP 在不同的中继天线数下随 $\frac{\lambda_3}{\lambda_1}$ 变化情况

图 3 显示了全局 SOP 随 $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ 和宏基站功率 P_1 变化情况，其中 $\lambda_2 = 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ， $\lambda_3 = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ， $\lambda_E = 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ， $M_1 = 4$ ， $M_3 = 6$ ， $R_s = 0.5 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ， $P_2 = 1 \text{ dBm}$ ， $P_3 = 3 \text{ dBm}$ 。当异构网络中不存在中继节点时，用户可以直接接入微基站。图 3 对比了是否存在中继节点对异构蜂窝网的安全性能的影响，并比较了中继节点的天线数对于系统安全性能的影响。对于无中继节点协作的情况，为了进行公平性比较，仿真中将原中继节点所处位置均替换为微基站，以保持系统节点数总量一致。显然，与无中继节点协作且微基站为单线 ($M_2 = 1$) 的网络相比，中继节点的协作传输有效地降低了异构网络的全局 SOP。例如，当 $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 4$ ， $P_1 = 20 \text{ dBm}$ 时，本文方案比无中继节点方案时的全局 SOP 低 0.05；当 $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 2$ ， $P_1 = 15 \text{ dBm}$ 时，本文方案比无中继节点方案时的全局 SOP 低 0.15。这是由于引入中继节点缩短了用户到微基站的平均距离，并且多天线全双工中继节点赋予了波束更好的指向性，减少了私密信号的可截获范围。与无中继节点协作且微

基站配置与中继节点相同天线数 ($M_2 = 6$) 的网络相比, 中继节点的协作传输在宏基站发射功率较高的情况下仍然能够降低异构网络的全局 SOP, 其他情况下虽然未能降低全局 SOP, 但两者的全局 SOP 十分接近。原因主要是中继协作传输扩展了单个基站的覆盖能力, 使在宏基站干扰较强的情况下, 保持较好的信道质量。虽然部分情况下中继协作传输的安全性能不及微基站配置与中继相同天线数 ($M_2 = 6$) 的情况, 但两者的安全性能较为接近。

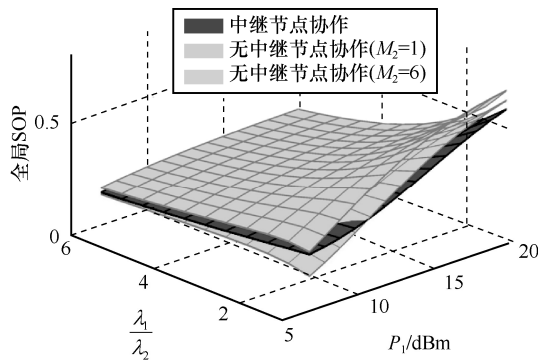


图 3 全局 SOP 随 λ_1/λ_2 和宏基站功率 P_t 变化情况

图 4 显示了全局 SOP 在不同的宏基站天线数 M_1 下随 R_s 变化情况, 其中 $\lambda_1 = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, $\lambda_2 = \lambda_1$, $\lambda_3 = \lambda_1$, $\lambda_E = 2\lambda_1$, $M_3 = 4$, $P_1 = 5 \text{ dBm}$, $P_2 = 2 \text{ dBm}$, $P_3 = 3 \text{ dBm}$ 。由图 4 可以看出, 全局 SOP 随 M_1 的增加而减小, 这是由于 R_s 较小时, M_1 的增加降低了宏基站层的 SOP, 并且不影响其他基站层的安全性能, 因此全局 SOP 随之减小。同时还可以看出, 全局 SOP 随 R_s 的增加而增加, 这是因为 R_s 增加提高了对网络中用户信号质量的要求, 因此安全中断的概率增加。

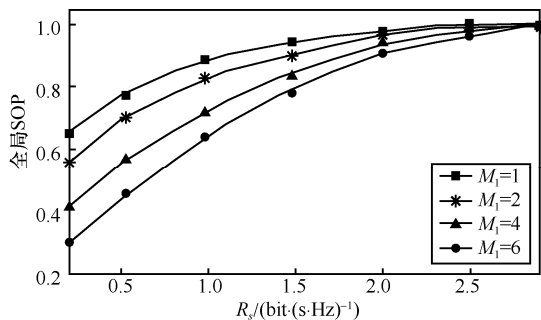


图 4 全局 SOP 在不同的宏基站天线数 M_1 下随 R_s 变化情况

在计算复杂度及开销方面, 引入中继节点增加

了对中继节点接收信号的一次译码计算过程, 仅仅增加了部分计算开销。增加的计算开销主要在中继节点进行译码转发过程中。在该过程中, 中继节点需要设计出译码向量并对接收的信号进行一次相乘译码处理。

5 结束语

本文针对异构网络中微基站层安全性能较弱以及频谱资源紧张的问题, 将多天线全双工中继引入微基站层辅助其信号传递, 从而提高了网络的整体安全性能。本文利用 PPP 对各层基站和中继节点进行建模, 并基于随机几何理论推导了目的节点与源节点通信的安全中断概率, 从而得到异构网络的全局安全中断概率。仿真实验通过蒙特卡洛仿真验证了理论推导的正确性。多组仿真结果表明, 全双工中继的引入能够有效降低网络的全局 SOP, 并且中继和宏基站的天线数增加以及部署密度提高均可提升网络的安全性能。

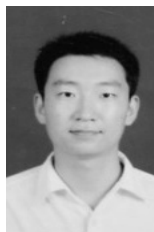
参考文献:

- [1] TANG W, FENG S, DING Y, et al. Physical layer security in heterogeneous networks with jammer selection and full-duplex users[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(12): 7982-7995.
- [2] LEE J, QUEK T Q S. Hybrid full/half-duplex system analysis in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(5): 2883-2895.
- [3] WAND H M, ZHENG T X, YUAN J, et al. Physical layer security in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(3): 1204-1219.
- [4] LI B, FEI Z, CHEN H. Robust artificial noise-aided secure beamforming in wireless-powered non-regenerative relay networks[J]. IEEE Access, 2016, 4: 7921-7929.
- [5] RENZO M D, GUAN P. Stochastic geometry modeling and system-level analysis of uplink heterogeneous cellular networks with multi-antenna base stations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(6): 2453-2476.
- [6] XU M, TAO X, YANG F, et al. Enhancing secured coverage with CoMP transmission in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(11): 2272-2275.
- [7] ZHANG L, LIU J, XIAO M, et al. Performance analysis and optimization in downlink NOMA systems with cooperative full-duplex relaying[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2398-2412.
- [8] WANG J, YU H, WU Y, et al. Pilot optimization and power allocation for OFDM-based full-duplex relay networks with IQ-imbalances[J]. IEEE Access, 2017(5): 24344-24352.
- [9] ZHAO L, WANG X, RIIHONEN T. Transmission rate optimization of

- full-duplex relay systems powered by wireless energy transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(10): 6438-6450.
- [10] SHAFIE A E, SULTAN A, AL-DHAHIR N. Physical-layer security of a buffer-aided full-duplex relaying system[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(9): 1856-1859.
- [11] CHEN G, GONG Y, XIAO P, et al. Physical layer network security in the full-duplex relay system[J]. IEEE Transactions Information Forensics Security, 2015, 10(3): 574-583.
- [12] NGUYEN N P, KUNDU C, NGO H Q, et al. Secure full-duplex small-cell networks in a spectrum sharing environment[J]. IEEE Access, 2016, 4: 3087-3099.
- [13] LI L, HESHAML G. The relay-eavesdropper channel: cooperation for secrecy[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(9): 4005-4019.
- [14] DHILLON H S, KOUNTOURIS M, ANDREWS J G. Downlink MIMO HetNets: modeling, ordering results and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(10): 5208-5222.
- [15] ZHANG T, HUANG Y, CAI Y, et al. Secure transmission in spectrum sharing relaying networks with multiple antennas[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(4): 824-827.
- [16] GUPTA A K, DHILLON H S, VISHWANATH S, et al. Downlink coverage probability in MIMO HetNets with flexible cell selection[C]// Global Communication Conference. IEEE, 2014: 1534-1539.
- [17] DENG Y, WANG L, ZAIDI S A R, et al. Artificial-noise aided secure transmission in large scale spectrum sharing networks[J]. IEEE Trans-

actions on Communications, 2016, 64(5): 2116-2129.

[作者简介]



钟州(1982-), 男, 吉林吉林人, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为移动通信、通信信号处理及信息安全。



张波(1993-), 男, 安徽亳州人, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士生, 主要研究方向为移动通信网络及信息安全。

戚晓慧(1990-), 女, 河南郑州人, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士生, 主要研究方向为移动通信及物理层安全。

黄开枝(1973-), 女, 安徽滁州人, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心教授、博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理及无线通信安全。