

全维度天线异构网物理层安全微基站部署研究

赵伟*, 骆亚菲, 鲍慧, 王辉

(华北电力大学电气与电子工程学院 河北 保定 071003)

【摘要】异构网络配置全维度多天线利用垂直维度能够有效提高系统的传输速率,然而也会造成信号的泄露,影响系统的物理层安全性能。基于此,该文在异构网络下行链路中,全维度天线采用波束成形方法消除干扰,应用随机几何的分析方法,得到合法用户的安全连接概率闭合表达式,其安全连接概率与异构网络基站密度有关。仿真结构验证了安全连接概率结论的正确性,同时在给定的场景中,确定了异构网络基站的密度值。

关键词 基站部署; 全维度天线; 随机几何; 安全连接概率

中图分类号 TN911.22 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.03.007

Research on the Deployment of Small Cell Base Stations for Physical Layer Security in Full-Dimensional MIMO Heterogeneous Network

ZHAO Wei*, LUO Ya-fei, BAO Hui, and WANG Hui

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University Baoding Hebei 071003)

Abstract Heterogeneous network with full-dimensional (FD) multiple-input multiple-output (MIMO) can effectively improve the transmission rate by developing vertical dimensions; however, it can cause the signal leakage and decrease the system's physical layer security performances. In this paper, using the beamforming to eliminate the interference in the downlink of the heterogeneous network, we propose an analysis method with stochastic geometric theory to obtain the closed-form expression of the secure connection probability on the legitimate users. The secure connection probability is related to the density of heterogeneous network small cell base stations (BSs). Simulation results verify the correctness of the safety connection probability, and determine the density value of heterogeneous network BS in a given scenario.

Key words base station deployment; FD MIMO; stochastic geometric; physical layer security probability

大规模天线作为第五代移动通信的关键技术^[1],能够有效的提高频谱利用率,同时异构网能提高系统的覆盖范围^[2],并且可以提高整个网络的吞吐量。故异构网络中宏基站和微基站均配置大规模天线,以提高系统的传输速率^[3]。大规模天线在部署中,受尺寸限制,一般采用矩形天线阵列,称之为全维度天线阵列^[4]。全维度天线阵列除了可以调节水平维度外,还能调节垂直维度角度,从而消除微蜂窝之间信号的干扰,提高系统的容量。

在异构蜂窝网络中部署全维度天线可以动态调整用户信号垂直到达的方向(direction of arrival, DOA),增加垂直维度的空间自由度,从而有利于波

束对准异构网络中的用户^[5]。然而,正是增加了垂直维度的空间自由度,也为窃听用户得到合法信息提供了方便,从而影响异构网络的物理层安全性能。若微基站部署密度过大,则会带来更多被窃听的风险,而密度过小,则会导致整个异构网络的吞吐量下降,影响用户的服务质量^[6]。因此研究全维度天线异构网络的基站部署问题,以提高整个网络的物理层安全性能是十分必要的。

配置多天线的无线系统中,主要通过波束成形算法^[7]、发送人工噪声以及天线选择算法^[8]等技术来优化物理层安全性能。配置多天线的异构网采用随机几何的方法,分析异构网络的能效问题以及吞吐

收稿日期: 2017-10-18; 修回日期: 2018-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(61501185; 61302105); 北京市自然科学基金(4164101); 河北省自然科学基金(F2016502062); 中央高校基本科研业务专项资金(2015MS95)

作者简介: 赵伟(1980-),男,博士,主要从事无线通信中波束成形方面的研究。E-mail: andyzaoster@163.com

量问题,通过基站休眠等手段^[9-10],提高系统的能效和中断容量。文献[11]采用随机几何的分析方法,分析了无线传感器网络的物理层安全性能,通过增加接入点的个数来提高系统的平均安全速率。然而在以上的研究中,均未考虑配置全维度天线异构网络的安全性能问题,而全维度天线系统研究也主要集中在多用户场景下信道估计以及波束成形方法的研究。

针对以上的研究现状,本文分析配置全维度天线异构网络下行信道物理层安全性能,利用平均信漏噪比下界的最优波束成形算法,利用每个用户信道统计状态信息和随机几何分布信息推导了用户安全连接概率,根据用户安全连接概率,确定微基站的分布密度。仿真结果表明,微基站与宏基站的密度比在25~35之间时,微基站用户的安全连接概率最大,此结果为全维度天线异构网基站的部署提供了有益的参考。

1 系统模型

考虑配置全维度天线下行两层异构网络系统中,其基站服从二维随机泊松独立点过程(poisson point process, PPP),宏基站发射功率为 ρ ,变量 Φ_m 分布服从密度 λ_m 的泊松分布。微基站发射功率为 ρ' ,变量 Φ_f 分布服从密度为 λ_f 的泊松分布。宏基站和微基站所配置的天线都是 $M \times N$ 的均匀矩形天线(uniform rectangular antenna, URA)阵列,每行有服从均匀线性阵列的 N 个天线,垂直方向有均匀线性阵列的 M 个天线,每个微小区服务 K 个单天线用户,并且用户位置服从密度为 λ_u 的独立泊松点过程 Φ_u 。

1.1 下行信道传输模型

对于所考虑的多用户下行链路传输系统,用户终端 k 接收到的信号表示为:

$$y_k = \sum_{i=1}^K \sqrt{P} \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_i x_i + n_k \quad (1)$$

式中, $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 表示基站和用户 k 之间的下行链路信道向量; $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 是用户 k 的波束成形向量; $n_k \sim \text{CN}(0, \sigma_k^2)$ 是归一化复杂加性高斯白噪声; x_k 是传输给用户 k 的信息,且 $\text{E}[|x_i|^2] = 1$ 。通过式(1)可知用户 k 的信噪比可以表示为:

$$\text{SINR}_k = \frac{P |\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k|^2}{\sigma_k^2 + \sum_{i=1, i \neq k}^K P |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_k|^2} \quad (2)$$

1.2 全维度天线信道模型

对于配置的URA全维度天线,其信道向量 \mathbf{h}_k 可以写成:

$$\mathbf{h}_k = \mathbf{a}_t^{(v)}(\theta_k) \otimes \mathbf{a}_t^{(h)}(\theta_k, \varphi_k) \quad (3)$$

$$\mathbf{a}_t^{(v)}(\theta_k) = \left[1, e^{-j2\pi \frac{d_t^{(v)}}{\lambda} \sin \theta_k}, \dots, e^{-j2\pi(M-1) \frac{d_t^{(v)}}{\lambda} \sin \theta_k} \right]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{a}_t^{(h)}(\theta_k, \varphi_k) = \left[1, e^{-j2\pi \frac{d_t^{(h)}}{\lambda} \sin \phi_k}, \dots, e^{-j2\pi(N-1) \frac{d_t^{(h)}}{\lambda} \sin \phi_k} \right]^T \quad (5)$$

式中, $\phi_k = \cos \theta_k \sin \varphi_k$; $\theta_k \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 和 $\varphi_k \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 分别代表用户 k 在垂直和水平方向的发射角; $d_t^{(v)}$ 和 $d_t^{(h)}$ 是每行和每列两个相邻天线间的距离; λ 是载波波长。假定每行和每列两个相邻天线间的距离都是 $\lambda/2$ 。因此可以把式(4)和式(5)写成:

$$\mathbf{a}_t^{(v)}(\theta_k) = \left[1, e^{-j\pi \sin \theta_k}, \dots, e^{-j\pi(M-1) \sin \theta_k} \right]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{a}_t^{(h)}(\theta_k, \varphi_k) = \left[1, e^{-j\pi \phi_k}, \dots, e^{-j\pi(N-1) \phi_k} \right]^T \quad (7)$$

1.3 波束成形算法

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{R}_{V,k}^{1/2} \mathbf{H}_{w,k} \mathbf{R}_{H,k}^{1/2} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{R}_{V,k} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 和 $\mathbf{R}_{H,k} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 是垂直信道和水平信道相关矩阵,可以表示为:

$$\mathbf{R}_{V,k} = \mathbf{U}_{V,k} \mathbf{A}_{V,k} \mathbf{U}_{V,k}^H \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{H,k} = \mathbf{U}_{H,k} \mathbf{A}_{H,k} \mathbf{U}_{H,k}^H \quad (10)$$

式中,对角矩阵 $\mathbf{A}_{V,k} = \text{diag}\{\lambda_{V,k}^{(1)}, \lambda_{V,k}^{(2)}, \dots, \lambda_{V,k}^{(M)}\}$ 和 $\mathbf{A}_{H,k} = \text{diag}\{\lambda_{H,k}^{(1)}, \lambda_{H,k}^{(2)}, \dots, \lambda_{H,k}^{(N)}\}$ 的元素由奇异值组成; $\mathbf{U}_{H,k}$ 和 $\mathbf{U}_{V,k}$ 是酉矩阵; $\mathbf{H}_{w,k}$ 是一个 $M \times N$ 的零均值和单位方差独立同分布的随机复杂高斯矩阵。当 $k1 \neq k2$ 时 $\mathbf{H}_{w,k1}$ 和 $\mathbf{H}_{w,k2}$ 是独立的。

假设天线阵列很大, $M \gg 1$, $N \gg 1$ 。大规模天线阵列时,相关矩阵的特征向量可以用统一的离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)矩阵近似表示。所以 $\mathbf{R}_{V,k}$ 和 $\mathbf{R}_{H,k}$ 可以近似表示为:

$$\mathbf{R}_{V,k} \stackrel{M \rightarrow \infty}{\approx} \mathbf{F}_M \mathbf{A}_{V,k} \mathbf{F}_M^H \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{H,k} \stackrel{N \rightarrow \infty}{\approx} \mathbf{F}_N \mathbf{A}_{H,k} \mathbf{F}_N^H \quad (12)$$

式中, $[\mathbf{F}_M]_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{j2\pi(m-1)\left(n-\frac{M}{2}\right)/M}$; $[\mathbf{F}_N]_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j2\pi(m-1)\left(n-\frac{N}{2}\right)/N}$, 有:

$$\mathbf{F} \triangleq \mathbf{F}_N \otimes \mathbf{F}_M^c \quad (13)$$

根据定义,推导出用户 k 的信漏噪比下限,从而推导出最大化此下限的波束成形矢量 \mathbf{w}_k :

$$E[\text{SLNR}_k] = E \left[\frac{|h_k^T w_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K P |h_i^T w_k|^2 + 1} \right] \geq \frac{E \left[|h_k^T w_k|^2 \right]}{E \left[\sum_{i=1, i \neq k}^K P |h_i^T w_k|^2 + 1 \right]} \quad (14)$$

$$E[\text{SLNR}_k] \geq \frac{w_k^H F A_k F^H w_k}{w_k^H F \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K A_i \right) F^H w_k + 1} \stackrel{\Delta}{=} L_k \quad (15)$$

式中, $A_i \triangleq A_{H,i} \otimes A_{V,i}$, $i = 1, 2, \dots, K$ 。

根据文献[11]可以得出: 在这种情况下, 最优波束成形向量 $w_k = (F_N)_{i_k} \otimes (F_M^c)_{j_k}$, $h_k w_k \sim \text{CN}(0, 1)$ 。

2 合法用户安全连接概率

考虑窃听用户的分布也是服从密度为 λ_e 的独立泊松点分布, 合法用户接收到的信号为:

$$y_m = \sqrt{\rho' l^{-\alpha}} h_1 w_1 x_1 + \sum_{i=1}^K \sqrt{\rho' d^{-\alpha}} h_i w_i x_i + \sum_{k \in \Phi_m} \sqrt{\rho D^{-\alpha}} h_m w_m x_m + n_m \quad (16)$$

式中, ρ' 为微基站发射功率; l 为微基站到用户1的距离; d 为微基站到同小区其他用户的距离; D 为宏基站到用户的距离; ρ 为宏基站的发射功率。

同时, 窃听用户接收到的信号为:

$$y_e = \sqrt{\rho' G^{-\alpha}} h_e w_1 x_1 + \sum_{j \in \Phi_m} \sqrt{\rho D^{-\alpha}} h_m w_m x_m + \sum_{i=2}^K \sqrt{\rho' d^{-\alpha}} h_i w_i x_i + n_f \quad (17)$$

忽略合法信道与窃听信道噪声功率, 则可达安全速率为:

$$R_s = \log_2 \left(1 + \frac{\rho' l^{-\alpha} |h_1 w_1|^2}{\sum_{i=2}^K \rho' d^{-\alpha} |h_i w_i|^2 + \sum_{k \in \Phi_m} \rho D^{-\alpha} |h_m w_m|^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{\rho' G^{-\alpha} |h_e w_1|^2}{\sum_{k \in \Phi_m} \rho D^{-\alpha} |h_m w_m|^2 + \sum_{i=2}^K \rho' d^{-\alpha} |h_i w_i|^2} \right) \quad (18)$$

设安全速率限制指标常数为 $\delta (\delta \geq 0)$, 如果满足 $R > \delta$, 则认为基站与合法用户间可实现安全连接, 否则, 标记为安全中断事件。因此, 定义安全连接概率为:

$$\Pr(R_s > \delta) = \Pr\{R_m - R_e > \delta\} \stackrel{(a)}{\approx} \Pr\{\text{SINR}_m > 2^{\delta + E(R_e)} - 1\} \quad (19)$$

式中, 窃听者的位置都是相互独立的, R_e 只与部署基站的位置和窃听者有关。所有 R_m 和 R_e 是相互独立的。为了获得计算结果, 本文使用 $E(R_e)$ 来取代 R_e 。根据文献[12], 此近似符合一致收敛, 可以推导出:

$$E(R_e) = 2\pi\lambda_e \int_0^\infty \int_0^\infty x dx \times \exp\left\{-\frac{(2^x - 1)}{\rho'} x^\alpha - \pi x^2 y(2^x - 1, \alpha, 1)\right\} \quad (20)$$

式中,

$$y(2^x - 1, \alpha, 1) = \frac{2(2^x - 1)}{\alpha - 2} {}_2F_1\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha}, 2 - \frac{2}{\alpha}, -(2^x - 1)\right) \quad (21)$$

用 β 代替 $2^{\delta + E(R_e)} - 1$, 这时式(19)可以写成:

$$\Pr\left\{\frac{\rho' l^{-\alpha} |h_1 w_1|^2}{\sum_{i=2}^K \rho' d^{-\alpha} |h_i w_i|^2 + \sum_{k \in \Phi_m} \rho D^{-\alpha} |h_m w_m|^2} > \beta\right\} \quad (22)$$

式中,

$$I_{\Phi_f} = \sum_{i=2}^K \rho' d^{-\alpha} |h_i w_i|^2, I_{\Phi_m} = \sum_{k \in \Phi_m} \rho D^{-\alpha} |h_m w_m|^2 \quad (23)$$

因此安全连接概率为:

$$P\left\{|h_1 w_1|^2 > \frac{\beta l^\alpha}{\rho'} (I_{\Phi_f} + I_{\Phi_m})\right\} \quad (24)$$

式中, $|h_1 w_1|^2$ 服从 $\frac{1}{2} \chi_{(2)}^2$, 令 $s = \frac{\beta l^\alpha}{2\rho'}$, 因此有:

$$\Pr\{\text{SINR}_m > \beta\} = \frac{1}{4} E \left[e^{-\frac{\beta l^\alpha}{2\rho'} (I_{\Phi_f} + I_{\Phi_m})} \right] = \frac{1}{4} L_{I_{\Phi_f}}(s) L_{I_{\Phi_m}}(s) \quad (25)$$

$$L_{\Phi_f} = E_{\Phi_f} \left[\prod_{k \in \Phi_f \setminus \{0\}} (\rho' |h_i w_i|^2 d^{-\alpha}) \right] \quad (26)$$

由独立的泊松点分布, 可知:

$$L_{\Phi_f}(s) = \exp(-2\pi\lambda_f \int_r^\infty (1 - L_{|h_i w_i|^2}(s\rho' r^{-\alpha})) r dr) \quad (27)$$

式中, $|h_i w_i|^2$ 服从 $\frac{1}{2} \chi_{(2)}^2$, 有:

$$L_{\phi_f}(s) = \exp(-2\pi\lambda_f \int_r^\infty (1 - L_{|h_w|^2}(s\rho'r^{-\alpha}))r dr) = \exp\left(-2\pi\lambda_f \int_l^\infty \left(\frac{rdr}{1 + \frac{2}{\beta}\left(\frac{r}{l}\right)^\alpha}\right)\right) \quad (28)$$

根据超几何函数定义数学推导:

$$\int_l^\infty \left(\frac{rdr}{1 + \frac{2}{\beta}\left(\frac{r}{l}\right)^\alpha}\right) = \frac{\beta l^2}{\alpha - 2} {}_1F_2\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha}; 2 - \frac{2}{\alpha}, \frac{2}{\beta}\right) \quad (29)$$

将式(29)带入式(28)可得:

$$L_{\phi_f}(s) = \exp\left(-\frac{\pi\lambda_f\beta l^2}{\alpha - 2} {}_1F_2\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha}; 2 - \frac{2}{\alpha}, \frac{2}{\beta}\right)\right) \quad (30)$$

可以推导出:

$$L_{\phi_m}(s) = \exp\left(-\frac{\pi\lambda_m\beta l^2\rho}{(\alpha - 2)\rho'} {}_1F_2\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha}; 2 - \frac{2}{\alpha}, \frac{2}{\beta}\right)\right) \quad (31)$$

将式(30)和式(31)带入式(25), 得到安全连接概率为:

$$\Pr(R_s > \delta) = \frac{1}{4} e^{-\frac{\pi\lambda_f\beta l^2}{\alpha - 2} {}_1F_2\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha}; 2 - \frac{2}{\alpha}, \frac{2}{\beta}\right)} e^{-\frac{\pi\lambda_m\beta l^2\rho}{(\alpha - 2)\rho'} {}_1F_2\left(1, 1 - \frac{2}{\alpha}; 2 - \frac{2}{\alpha}, \frac{2}{\beta}\right)} \quad (32)$$

由式(32)可得, 安全连接概率与宏基站、微基站的部署密度、大尺度衰落的损耗系数 α 、设定的安全给定速率限制值 δ 等多个因素有关。

3 仿真分析

建模两层的异构网络, 包括宏基站和微基站; 其中整个仿真异构网络的系统带宽为10 MHz, 发送频率为900 MHz, 其频率复用因子为1。设定路径损耗指数为典型的两个数值 $\alpha = 3$ 或 $\alpha = 4$, 考虑信道小尺度衰落为瑞利衰落, 其均值为0, 方差为1。

对于宏基站和微基站的发送功率, 采用固定的数值, 宏基站发送功率为 $\rho = 46$ dBm; 微基站发送功率为 $\rho' = 30$ dBm, 而宏基站和微基站功率消耗分别为1 000 W和50 W, 而仿真中, 设整个异构网络的范围为半径200 km, 而宏基站和微基站的位置通过应用Matlab的泊松独立点分布的函数进行随机撒点, 其服从随机独立泊松点分布, 由于后续仿真结果图中, 其强度分别为 λ_m 和 λ_f , 其中 $\lambda_m = 10^{-6} \text{ m}^{-2}$, 而 λ_f 根据宏基站和微基站的密度比可以得到; 仿真采用蒙特卡洛方法, 通过不同的参数设置, 每种条件下进行10 000次的基站撒点。设合法用户分布强

度相同, 即 $\lambda_u = 0.001 \text{ m}^{-3}$, 在宏基站和微基站分别配置URA天线, 其中宏基站和微基站配置水平64个天线, 垂直列配置32个天线, 安全传输速率频谱利用率门限为 $\delta = 1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

如图1所示, 不同微基站密度 λ_f 所对应的安全传输连接概率。路径损耗 $\alpha = 3$ 或 $\alpha = 4$, 宏基站的密度 $\lambda_m = 10^{-6} \text{ m}^{-2}$ 、窃听用户的密度设为 $\lambda_e = 0.001 \text{ m}^{-3}$ 、安全传输频谱利用率门限为 $\delta = 1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。由图1可知随着微基站密度的增加, 在固定的安全传输频谱利用率门限下, 物理层安全连接概率逐渐减小。此仿真结果也符合实际的物理意义, 微基站密度越大, 其他微基站的干扰越强, 其潜在的窃听用户越多, 从而降低了物理层安全连接概率。同时可知路径损耗指数增加, 其系统安全连接概率会随之减小; 也说明物理层安全传输概率取决于微基站与用户之间的距离, 故需要从微基站和宏基站的部署密度方面进行研究。

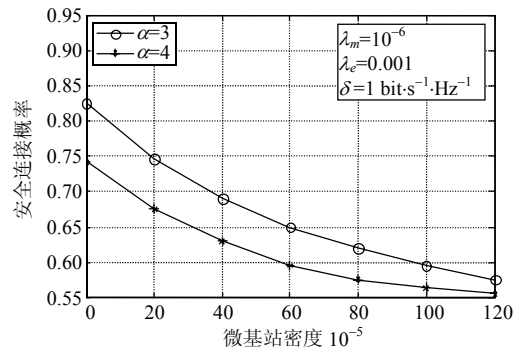


图1 微基站密度与安全连接概率关系图

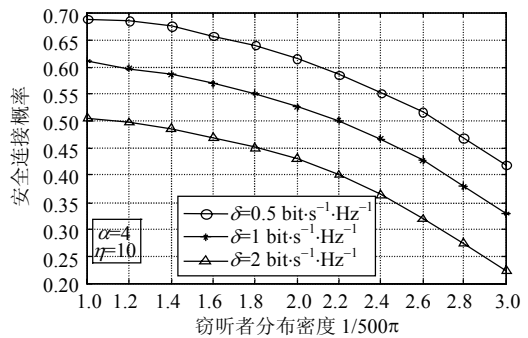


图2 窃听器分布密度与安全连接概率连接图

如图2所示, 当微基站密度与宏基站密度之比为 $\eta = 10$ 时, 在不同窃听器密度($1/500\pi \sim 3/500\pi$)下给出了任意选定的合法用户物理层安全连接概率。选取路径损耗 $\alpha = 4$, 随着窃听器分布密度的增加, 物理层安全连接概率逐渐减小。同时, 图2显示设定的物理层安全连接门限越小, 任意选定的合法用户能获得较好的安全连接性能。由此结果可以看出, 物

理层安全连接概率同样受到窃听者分布密度以及物理层安全连接门限的影响。

图3给出了任意一个微基站服务合法用户的安全连接概率与不同基站密度比的关系图。其中微基站与宏基站的密度之比为 $\eta = \lambda_f / \lambda_m$ ，文献[13]分析了对微基站与宏基站密度比为20、50、100这三种情况下的宏基站覆盖率，本文选取密度比为10~70。在路径损耗 $\alpha=4$ 的条件下，安全连接概率随基站密度比的增加先增加后减少，因为微基站和宏基站对合法用户的共同作用使合法用户在一定的比值下有更好的速率，所以存在安全连接概率最大值所对应的小区密度比最优值。因此可以通过设置合适的小区区间的密度，从而达到最优的安全连接概率。

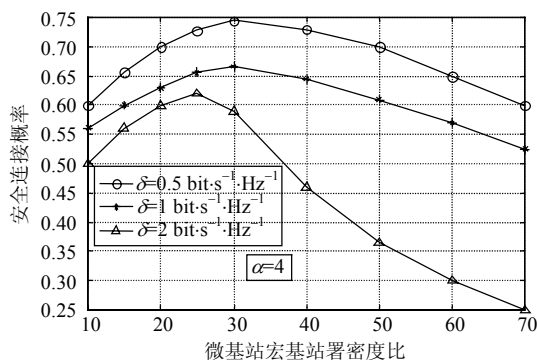


图3 宏基站与微基站密度比与安全连接概率关系图

4 结束语

本文在配置全维度天线的异构网下行条件下，分析了微小区用户的安全连接概率，根据安全连接概率的表达式，得到微基站和宏基站部署密度之比为影响其性能的重要指标，可以通过调整微基站与宏基站的密度比增加用户的安全连接概率，为异构网的部署提供了理论参考。

参考文献

[1] LIN H, GAO F, JIN S, et al. A new view of multi-user hybrid massive MIMO: Non-orthogonal angle division multiple access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2268-2280.

[2] CHEN Z, QIU L, LIANG X. Area spectral efficiency analysis of multi-antenna two-tier cellular networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(1): 108-111.

[3] HAO W, YANG S. Small cell cluster-based resource allocation for wireless backhaul in two-tier heterogeneous networks with massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(1): 509-523.

[4] YAACOUB E, AL-HUSSEINI M. Achieving physical layer security with massive MIMO beamforming[C]//European Conference on Antennas and Propagation. Pairs, France: IEEE, 2017: 1753-1757.

[5] WANG 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.

[6] ZHONG Z H, PENG J H, LUO W Y, et al. A tractable approach to analyzing the physical-layer security in k-tier heterogeneous cellular networks[J]. China Communications, 2015, 12(s1): 166-173.

[7] WANG W, TEH K C, LI K H. Artificial noise aided physical layer security in multi-antenna small-cell networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2017, 12(6): 1470-1482.

[8] LI X, JIN S, SURAWEEERA H A, et al. Statistical 3-D beamforming for large-scale mimo downlink systems over rician fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(4): 1529-1543.

[9] LIU C, NATARAJAN B, XIA H. Small cell base station sleep strategies for energy efficiency[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(3): 1652-1661.

[10] LI Z, GRACE D, MITCHELL P. Traffic-aware cell management for green ultra-dense small cell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 2600-2614.

[11] DENG Y, WANG L, ELKASHLAN M, et al. Physical layer security in three-tier wireless sensor networks: a stochastic geometry approach[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2016, 11(6): 1128-1138.

[12] JO H S, 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, 2011, 11(10): 3484-3495.

[13] HERNANDEZ A R, ZAIDI S A R, MCLERNON D, et al. Tilt angle optimization in two-tier cellular networks-a stochastic geometry approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(12): 5162-5177.