

基于多天线立体异构网络的物理层安全性能研究

赵伟, 骆亚菲, 鲍慧, 王辉, 李保罡

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071000)

摘要:异构网络性能分析研究中, 基站和用户分布大多数是平面分布模型, 其拓扑结构不适用于建筑物密集的超密度网络场景; 同时, 垂直维度上的窃听者直接影响异构网络物理层安全性; 针对此问题, 作者调整了基站天线的垂直维度, 通过倾斜、基站与用户的空间分布得到合法用户和窃听者的信干噪比表达式、累积分布函数, 对异构网络的物理层安全性能进行了分析。在立体异构网络下行传输链路中增加对基站天线垂直维度的调整, 给出了增加基站天线倾斜角变量后合法用户以及窃听用户的信干噪比表达式; 并且根据基站和用户的空间随机泊松点过程分布, 推导出合法用户和窃听用户的信干噪比累积分布函数, 利用此累积分布函数得到系统的平均安全速率闭合表达式。仿真结果验证了微基站密度、下倾角和平均安全速率函数关系闭合表达式的正确性, 验证了通过调整垂直下倾角提高物理层安全性能的可行性, 并能够得到具体场景的基站密度比。

关键词:物理层安全; 天线倾斜角; 平均安全速率函数; 立体随机几何

中图分类号: TN929

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2018)06-0212-05

Research on Physical Layer Security Performance Based on MIMO 3D Heterogeneous Network

ZHAO Wei, LUO Yafei, BAO Hui, WANG Hui, LI Baogang

(School of Electrical and Electronic Eng., North China Electric Power Univ., Baoding 071000, China)

Abstract: In the previous research on performance analysis of heterogeneous network, the distributions of base stations (BSs) and users are usually modeled as the horizontal distributions, which are not suitable for hyper-density network surrounded by dense buildings. Meanwhile, the physical layer security of the heterogeneous network is directly affected by the eavesdroppers on the vertical dimension. To address this problem, the vertical dimension of the base station antenna was adjusted, the signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) and the cumulative distribution function (CDF) of legitimate users and eavesdroppers was obtained by using the tilt angle, the spatial distribution of base stations and users, and the physical layer security performance of heterogeneous network was analyzed. An adjustment in three-dimensional heterogeneous network was proposed that the vertical dimension of the base station full dimension antenna is controlled. The SINR of the legitimate users and the eavesdroppers with the tilt angle of the BS antenna available were formulated, and the cumulative distribution functions of SINR were deduced according to spatial random Poisson point process distribution of the BSs and the users. Finally, the closed expressions of average secret rates of the heterogeneous network were obtained. The simulation results validated the correctness of the closed expression among the density of the small cells, the down tilt angles and the average security rates. The feasibility of the physical layer security can be improved by adjusting the vertical tilt angle. Meanwhile the reasonability of the distribution of small cells was validated.

Key words: physical layer security; antenna tilt angle; average security rate function; 3D stochastic geometry

目前, 异构网络分析研究通常是在2维随机几何分布模型下进行的, 其主要适用于乡村或者近郊地区等场景, 但不适用于分布密度大的城市中心区域环境^[1]。在城市的中心区域, 微基站和用户分布密度大, 并且垂直维度分布所占比重较大; 使用平面随机

分布的异构网络模型已经无法准确地分析异构网络的相关性能; 同时, 随着全维度多天线在异构网的基站中进行部署, 可以利用垂直维度灵活调整信号的发射角度^[2], 进一步提高异构网络的传输速率。由此可见, 传统的2维随机几何分布模型, 已经无法准确

收稿日期: 2017-10-19

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

作者简介: 赵伟(1980—), 男, 讲师, 博士。研究方向: 无线通信。E-mail: andyzaoster@163.com

网络出版时间: 2018-10-22 15:13:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20181022.0927.007.html>

地分析异构网络的相关性能,需要用立体随机几何分布^[3]建立模型进行性能分析和优化。物理层安全性能是异构网络重要的传输性能之一^[4],由于全维度多天线的利用垂直维度传输信息,使得分布在立体空间的窃听者更容易窃听到有用信息,从而降低异构网络的物理层安全性能。

传统的2维异构网络性能分析中,包括了诸如覆盖率^[5]、系统的中断概率容量^[6]、能效性能^[7]、物理层安全性能^[8-9]等方面的研究;在提高物理层安全性能的方法研究中,主要采用发送人工噪声,优化波束成形矩阵提高系统的物理层安全性能;Feng等^[10]在大规模天线异构网络中提出一种天线选择方法,以提高异构网的物理层安全容量。然而,以上研究均是通过2维随机几何分布建模进行分析的;即使配置大规模天线的异构网,也是基于线阵进行分析的;由此可知,以上研究均忽略了垂直维度窃听用户对异构网络物理层安全性能的影响。Pan等^[11]将异构网络分布模型由平面扩展到立体,并根据立体模型,推导了微基站覆盖率的闭合表达式。Pan等^[12]给出了一种立体异构网模型下的基站休眠方案,以提高异构网络的能源利用效率。Gong^[13]、Ge^[14]等主要研究了具有隐藏窃听装置的异构网络中物理层安全的资源分配问题。Fang等^[15]提出了一种在两层异构网络系统中用于物理层安全的干扰管理机制,最大化服务用户的物理层安全速率。以上研究均采用立体异构网络分布模型,但是所研究的基站均配置单天线,没有考虑全维度多天线的部署,从而只能被动地通过增加发射功率和基站休眠分别提高微基站覆盖率及系统的能源利用效率。

基于以上研究现状,作者以宏基站、微基站和用户服从3维泊松点过程分布的异构网络为模型,通过优化基站的全维度多天线的垂直维度的倾斜角优化物理层安全传输速率;首先,推导出了考虑基站垂直维度倾斜角的合法用户和窃听用户的信干噪比,并利用随机几何分析方法推导了合法用户与窃听用户信干噪比的累积分布函数;其次,根据累积分布函数求得合法用户的平均安全速率的闭合表达式。仿真结果验证了所推导表达式的正确性,并能够根据仿真结果得到最优的垂直维度下倾角。

1 系统模型

考虑的异构网中微基站在3维空间上服从泊松点过程分布 Φ_p ,其密度为 λ_p ;并且宏基站同样在3维空间上服从泊松点过程分布 Φ_m ,其密度为 λ_m 。以此类推,合法用户和潜在的窃听用户也在3维空间上服从泊松点过程分布,并且在空间的分布密度分别为 λ_u 和

λ_e 。由于考虑城市密集区域用户分布于高层建筑,信道需要考虑地面衰减因子路径损耗。目标合法用户 u 位于原点,其他用户分布在3维空间中。 r 为基站与目标用户之间的距离。因此,根据文献^[1]使用Motley-Keenan路径损耗模型,可以得到路径损耗为:

$$PL(r) = PL(r_0) + 10\alpha \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + n_w WAF + n_f FAF \quad (1)$$

式中: $PL(r_0)$ 是单位长度的路径损耗,dB,频率为2.4 GHz下, $PL(r_0 = 1\text{m}) = 40\text{ dB}$; α 为路径损耗指数; n_w 和 n_f 分别代表发射和接收天线之间的墙壁和地板的数量; WAF 和 FAF 是平均每层墙和地板的路径损耗, WAF 和 FAF 通常根据墙壁和地板的材料选择在1~30 dB之间。根据大量墙壁和地板的情况,可以使用Devasiratham模型^[11],路径损耗的模型可以简化为:

$$PL(r) = PL(r_0) + 10\alpha \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + AF(r) \quad (2)$$

式中, $AF(r)$ 为平均的墙壁和地板的影响因子, r 的函数表达式为:

$$AF(r) = 10\lg(\mu r) \quad (3)$$

式中,参数 μ 为衰减路径的常数。因此,根据式(3)由路径损耗带来的信号衰减可以表示为:

$$AF(r) = Kr^{-(\alpha+1)} \quad (4)$$

式中,

$$K = \frac{r_0^\alpha}{\mu 10^{PL(r_0)/10}} \quad (5)$$

作者考虑的小尺度的衰落为瑞利衰落,用户由最近的基站提供服务。垂直维度的衰减幅度 G_{dB} 为:

$$G_{dB}(\phi_{\text{tilt}}) = -\min\left(12\left(\frac{\phi + \phi_{\text{tilt}}}{\phi_{3dB}}\right)^2, A_{dB}\right) \quad (6)$$

式中: $\phi < 0$ 代表基站和用户接收角, $\phi_{\text{tilt}} > 0$ 代表倾斜角, ϕ_{3dB} 代表3 dB波束宽度; A_{dB} 是泄露到目的小区之外的最小功率,一般取值为20 dB。考虑在水平平面上的全向天线模型,基站和目标用户天线的角度 ϕ 可以通过包含有效高度 H_{eff} (发射基站和接收基站的高度差)、传输基站和用户之间的距离 R 的函数表达,即:

$$\phi = -\arctan\left(\frac{H_{\text{eff}}}{R}\right) \quad (7)$$

式中, $H_{\text{eff}} = H_a - H_{ue}$ 代表有效高度,即用户设备的高度 H_{ue} 和基站天线的高度 H_a 之间的差。根据此定义,将衰减幅度转换成线性比例,得到^[6]:

$$G_{dB}(R, \phi_{\text{tilt}}) = 10 \left[-\min\left(12\left(\frac{-\arctan\left(\frac{H_{\text{eff}}}{R}\right) + \phi_{\text{tilt}}}{\phi_{3dB}}\right)^2, A_{dB}\right) \right]^{1/10} \quad (8)$$

式中,高度之间的几何关系如图1所示。

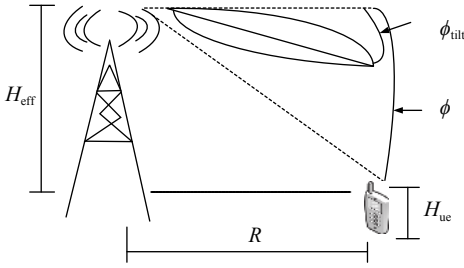


图 1 高度之间几何关系

Fig. 1 Geometric relationships among the various heights

任意一个合法用户均由最近的基站提供服务, 不仅收到基站的有用信号, 也收到其他用户和基站的干扰, 则合法用户接收到的信干噪比 (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) 为:

$$\gamma_u = \frac{P_i |h_{0,0}|^2 K r^{-(\alpha+1)} G(r, \phi_{ult})}{I_p + I_m + \delta^2} \quad (9)$$

式中: $I_p = \sum_{e \in \Phi_p \setminus \{0\}} P_i |h_{j,0}|^2 G(r_{j,0}, \phi_{ult}) K d_i^{-(\alpha+1)}$, $I_m = \sum_{k \in \Phi_m} P_m |g_{j,0}|^2 K l_j^{-(\alpha+1)}$; P_i 为微基站的发射功率, P_m 为宏基站的发射功率; δ^2 是噪声功率; $h_{j,0}$ 和 $g_{j,0}$ 分别为微基站、宏基站到合法用户小尺度衰落系数, 均为瑞利衰落。

因为, 未考虑窃听者之间协作机制, 所以, 考虑窃听者获得有用信息最少情况下的安全传输速率。任意窃听者不但能够接收合法用户的信号, 同时, 接收其他基站发送的干扰信号。因此, 窃听者接收到的信干噪比为:

$$\gamma_e = \max_{e_k \in \Phi_e} \left\{ \frac{P_i |h_{0,e_k}|^2 K r_e^{-(\alpha+1)}}{I_{p,e} + I_{m,e} + \delta^2} \right\} \quad (10)$$

式中, $I_{p,e} = \sum_{i \in \Phi_p \setminus \{0\}} P_i |h_{i,e_k}|^2 K d_i^{-(\alpha+1)}$, $I_{m,e} = \sum_{k \in \Phi_m} P_m |g_{j,e_k}|^2 K l_j^{-(\alpha+1)}$ 。

2 物理层安全性能分析

衡量物理层安全性能的指标是平均安全速率, 下面推导了平均安全速率解析表达式, 并分析影响总体平均安全速率的因素。对于一个合法用户的瞬间物理层安全传输速率可以表示为:

$$C = [C_u - C_e]^+ \quad (11)$$

式中, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$, $C_u = \ln(1 + \gamma_u)$ 是基站和合法用户之间的容量, $C_e = \ln(1 + \gamma_e)$ 为窃听者窃听到的最大互信息。

由式(11)可知, 合法用户和窃听者接收到信号的 SINR 估算最为重要, 故下面重点推导合法用户和窃听者 SINR 的累积分布函数。微基站和毫微微基站的分布为独立的。考虑目标合法用户 u 到最近的发射基站的距离 r , 也就是在半径 R 的球形空间内, 其没有

分布基站的概率为:

$$P\{R < r\} = P\left\{F\left(\frac{4}{3}pR^3\right) = 0\right\} = \exp\left(-\frac{4}{3}pLR^3\right) \quad (12)$$

由式(12)的累积分布概率, 可以推导出关于 r 的概率密度函数约为:

$$f(r) \approx 4\pi\lambda r^2 \exp\left(-\frac{4}{3}\pi\lambda r^3\right), r \geq 0 \quad (13)$$

则根据式(9)可推导合法用户 SINR 的累积分布函数为:

$$F_{\gamma_u}(\gamma_u) = \int_0^\infty P\left\{\frac{P_i |h_{0,0}|^2 G(r, \phi_{ult}) K r^{-(\alpha+1)}}{I_p + I_m} < \gamma_u\right\} = \int_0^\infty P\{|h_{0,0}|^2 < \varsigma(I_p + I_m)\} f(r) dr \quad (14)$$

式中, 定义 $\varsigma = \gamma_u P_i^{-1} G^{-1}(r, \phi_{ult}) K^{-1} r^{(\alpha+1)}$ 。

通过 r 和 $|h_{0,0}|^2$ 的概率密度函数表达式, 式(14)可写成:

$$F_{\gamma_u}(\gamma_u) = 1 - \int_{r \geq 0} 4\pi r^2 \exp\left(-\frac{4}{3}\pi\lambda r^3\right) \int_{I_{p \geq 0}} \int_{I_{m \geq 0}} \exp(\sigma) f_p(I_p) f_m(I_m) dI_p dI_m dr \quad (15)$$

式中, 定义 $\sigma = -\varsigma(I_p + I_m + \delta^2)$, $f_p(I_p)$ 和 $f_m(I_m)$ 分别为 I_p 和 I_m 概率密度函数。根据拉普拉斯变换, 式(15)可表示为:

$$F_{\gamma_u}(\gamma_u) = 1 - \int_{r \geq 0} 4\pi r^2 \exp\left(-\frac{4}{3}\pi\lambda_p r^3\right) \exp(-\gamma_u P_i^{-1} G^{-1}(r, \phi_{ult}) K^{-1} r^{(\alpha+1)} \delta^2) L_{I_p} \left[-\gamma_u P_i^{-1} G^{-1}(r_{j,0}, \phi_{ult}) K^{-1} r^{(\alpha+1)} \right] L_{I_m} \left[-\gamma_u P_i^{-1} K^{-1} r^{(\alpha+1)} \right] dr \quad (16)$$

式中, $L_{I_p}[\cdot]$ 和 $L_{I_m}[\cdot]$ 分别是 I_p 和 I_m 的拉普拉斯变换。由于 I_p 和 I_m 独立, 令 $s = \gamma_u P_i^{-1} K^{-1} r^{(\alpha+1)}$, 通过推导可得:

$$L_{I_p} = E_{\{I_{\Phi_p}, |h_{j,0}|^2\}} \left[\exp\left(-s \sum_{i \in \Phi_p \setminus \{0\}} \zeta\right) \right] = E_{\Phi_p} \left[\prod_{i \in \Phi_p \setminus \{0\}} E[\exp(-s\zeta)] \right] = \exp\left(-4\pi\lambda_p \int_r^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + \lambda_s \zeta K} v^2 dv\right)\right) \quad (17)$$

式中, 定义 $\zeta = P_i |h_{j,0}|^2 G(r_{j,0}, \phi_{ult}) K d_i^{-(\alpha+1)}$ 。

并且

$$L_{I_m}[s] = E_{\{\Phi_m\}} \left[\exp\left(-s \sum_{j \in \Phi_f} P_m K l_j^{(\alpha+1)}\right) \right] = E_{\Phi_m} \left[\prod_{i \in \Phi_m \setminus \{0\}} E[\exp(-s P_m K l_j^{(\alpha+1)})] \right] = \exp\left(-4\pi\lambda_m \int_r^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + \lambda_s \gamma_u P_m^{-1} r^{\alpha+1}} v^2 dv\right)\right) \quad (18)$$

式中, c_0 为用户所在位置。则将式(17)和(18)代入式(16)可得:

$$F_u(\gamma_u) = 1 - \frac{4}{3}\pi\lambda \cdot \int_0^\infty \exp\left(-\frac{4}{3}\pi x(\lambda + \xi) - \gamma_u P_t^{-1} K^{-1} \delta^2 x^{\frac{\alpha+1}{3}}\right) dx \cdot \int_{r \geq 0} 4\pi r^2 \exp\left(-\frac{4}{3}\pi \lambda r^3\right) \exp(-\zeta \delta^2) \cdot \exp\left(-4\pi\left[\lambda_p \int_r^\infty \frac{\lambda_s \gamma_u P_t^{-1} x^2}{\lambda_s \gamma_u P_t^{-1} x^{\alpha+1} + G(v, \phi_{\text{tilt}})} dx + \lambda_m \int_r^\infty \frac{\lambda_s \gamma_u P_t^{-1} x^2}{\lambda_s \gamma_u P_t^{-1} + x^{\alpha+1}} dx\right]\right) dx \quad (19)$$

最终得到合法用户SINR的累积分布函数为:

$$F_u(\gamma_u) = 1 - \int_{r \geq 0} 4\pi r^2 \exp\left(-\frac{4}{3}\pi \lambda r^3\right) \exp(-\zeta \delta^2) \cdot \exp\left(-4\pi\left[\lambda_p \int_r^\infty \frac{\lambda_c \gamma_u P_t^{-1} v^2}{\lambda_c \gamma_u P_t^{-1} + (v/r)^{\alpha+1}} dv + \lambda_m \int_r^\infty \frac{\lambda_c \gamma_u P_t^{-1} v^2}{\lambda_c \gamma_u P_t^{-1} + (v/r)^{\alpha+1}} dv\right]\right) dr \quad (20)$$

接下来,分析窃听用户SINR的累积分布函数:

$$F_e(\gamma_u) = 1 - \int_{r \geq 0} 4\pi r^2 \exp\left(-\frac{4}{3}\pi \lambda r^3\right) \cdot \int_{I_{p,e} \geq 0} \int_{I_{m,e} \geq 0} \exp(-\gamma_u P_t^{-1} K^{-1} r^{(\alpha+1)} \cdot (I_{p,e} + I_{m,e} + \delta^2)) f_{p,e}(I_{p,e}) \cdot f_{m,e}(I_{m,e}) dI_{p,e} dI_{m,e} dr \quad (21)$$

与合法用户的累积分布函数类似,可以推导出窃听者的累积分布函数为:

$$F_e(\gamma_u) = 1 - \int_{r \geq 0} 4\pi r^2 \exp\left(-\frac{4}{3}\pi \lambda r^3\right) \cdot \exp(-\gamma_u P_t^{-1} K^{-1} r^{(\alpha+1)} \delta^2) \cdot \exp\left(-4\pi\left[\lambda_p \int_r^\infty \frac{\lambda_c \gamma_u P_t^{-1} x^2}{\lambda_c \gamma_u P_t^{-1} + (x/r)^{\alpha+1}} dx + \lambda_m \int_r^\infty \frac{\lambda_c \gamma_u P_t^{-1} x^2}{\lambda_c \gamma_u P_t^{-1} + (x/r)^{\alpha+1}} dx\right]\right) dx \quad (22)$$

由平均安全速率的定义,平均安全速率表示为:

$$\bar{C} = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{F_{\gamma_e}(x)}{1+x} (1 - F_{\gamma_u}(x)) dx \quad (23)$$

由式(20)和(21)可以得到合法用户的平均安全速率为:

$$\bar{C} = \frac{\pi(\lambda_p + \lambda_m)}{\ln 2} \int_0^\infty \psi dx \quad (24)$$

式中,定义

$$\psi = \frac{\exp\left\{-\pi \lambda_c / (\lambda_s \gamma_u P_t^{-1} G^{-1}(x, \phi_{\text{tilt}}) r^{\alpha+1}) x^{\frac{\alpha}{\alpha+1}}\right\}}{(1+x)(\lambda_s \gamma_u P_t^{-1} G^{-1}(x, \phi_{\text{tilt}}) r^{\alpha+1}) x^{\frac{\alpha}{\alpha+1}} + \pi(\lambda_p + \lambda_m)}$$

由式(24)可得,平均安全速率与宏基站和微基

站的密度、大尺度衰落的损耗系数 α 、全维度多天线下倾角 ϕ_{tilt} 、半径距离 r 等多个因素有关,由于大尺度衰落系数、半径距离等参数决定于实际场景,而能够调整的是全维度多天线倾角 ϕ_{tilt} 。

3 仿真分析

立体空间中部署异构网的宏基站、微基站进行仿真。在用户密度固定时,设定参数如下:宏基站的覆盖半径10 km、微基站的覆盖半径为50 m;宏基站的发射功率 $\rho=20$ W、微基站的发射功率 $\rho'=100$ mW;URA天线阵列设定行天线数128个、列天线数64个;发射频率为900 MHz。此条件下,仿真异构网络中合法用户的平均安全速率与微基站分布密度之间的关系,以及合法用户的平均安全速率与全维度多天线下倾角之间的关系。

图2为不同微基站分布密度 λ_p ($10^{-4} \sim 10^{-1}$)所对应的平均安全速率。考虑了不同宏基站的密度 λ_m 、窃听节点的密度设为 $\lambda_e = 0.001$ 、物理层安全传输速率门限值为 $\gamma_u = 1$ bit/s/Hz。

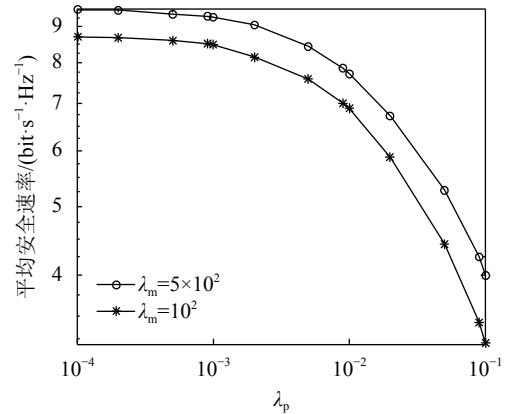


图2 微基站分布密度与平均安全速率关系

Fig. 2 Average security rate versus density of small cells

由图2可以得到,随着微基站密度逐渐增加,其平均安全速率逐渐降低;此结果可以说明随着微基站的增加,其信息泄露的机会增加,从而降低了异构网的平均安全速率。

图3给出了在不同下倾角和不同基站密度比条件下,任意选定的微基站服务的合法用户的平均安全速率的变化情况。其中, α_m 为宏基站大尺度衰落的损耗系数, α_f 为微基站大尺度衰落的损耗系数。其中,基站密度比为微基站分布密度与宏基站分布密度之比 $\eta = \lambda / \lambda_m \alpha \phi$,选取路径损耗因子为 $\alpha=4$ 。

由图3可以看出,在不同密度比的条件下,平均安全速率随着下倾角由小到大的变化而先变大后变小。由图3可得下倾角最优解约为 5° 和 10° ,故可以通过调整天线倾角以提高物理层安全性能。同时,可以合理布置微基站,得到合适的基站分布密度比,从

而达到最优的平均安全速率。

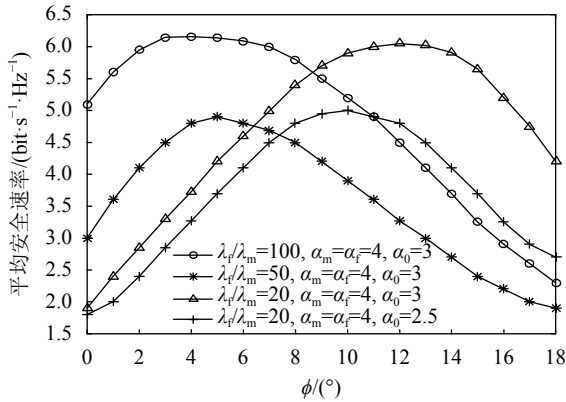


图 3 宏基站与微基站密度比和天线下倾角与平均安全速率关系

Fig. 3 Average security rate versus antenna tilt angle for the different density ratio between macro-base stations and small cells

4 结 论

研究基站与用户立体分布的异构网合法用户的平均安全传输速率。推导合法用户和窃听者的信干噪比的累积分布函数;以随机几何分析出的累积分布函数为基础,得到平均安全速率的闭合表达式;根据闭合表达式分析影响平均安全速率的因素,从而可以通过优化全维度天线下倾角提高系统的平均安全速率。研究结果表明全维度天线的下倾角度是影响异构网络物理层安全性能的重要因素,并通过仿真得到了特定条件下的最优下倾角度。后续将研究在3维超密集网络中部署全维度多天线,利用空间自由度进行干扰消除,从而提高系统能效和物理层安全性能。

参考文献:

- [1] Kamel M, Hamouda W, Youssef A. Performance analysis of multiple association in ultra-dense networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(9): 3818–3831.
- [2] Kim Y, Ji H, Lee J, et al. Full dimension MIMO (FD-MIMO): The next evolution of MIMO in LTE systems[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(2): 26–33.
- [3] Omri A, Hasna M O. Modelling and performance analysis of 3-D heterogeneous cellular networks[C]//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications. Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 1–5.
- [4] Chen Xiaoming, Ng D W K, Gerstacker W H, et al. A survey on multiple-antenna techniques for physical layer security[J].

IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 19(2): 1027–1053.

- [5] Wang Ying, Zhu Qi. Modeling and analysis of small cells based on clustered stochastic geometry[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(3): 576–579.
- [6] Vuppala S, Biswas S, Ratnarajah T. Secrecy outage analysis of k th best link in random wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(10): 4478–4491.
- [7] Zhang Tiankui, Zhao Jiaojiao, An Lu, et al. Energy efficiency of base station deployment in ultra dense HetNets: A stochastic geometry analysis[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(2): 184–187.
- [8] Deng Yansha, Wang Lifeng, Elkashlan M, et al. Physical layer security in three-tier wireless sensor networks: A stochastic geometry approach[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, 11(6): 1128–1138.
- [9] Wang Huiming, Zheng Tongxing, Yuan Jinhong, et al. Physical Layer security in heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(3): 1204–1219.
- [10] Feng Mingjie, Mao Shiwen. Interference management and user association for nested array-based massive MIMO HetNets[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(1): 454–466.
- [11] Pan Ziyu, Zhu Qi. Modeling and analysis of coverage in 3-D cellular networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(5): 831–834.
- [12] Pan Ziyu, Zhu Qi. Energy efficiency optimization in 3-D small cell networks-based sleep strategy[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(5): 1131–1134.
- [13] Gong Shiqi, Xing Chengwen, Fei Zesong, et al. Resource allocation for physical layer security in heterogeneous network with hidden eavesdropper[J]. *China Communications*, 2016, 13(3): 82–95.
- [14] Ge Mengyao, Wang Shaowei. Fast optimal resource allocation is possible for multiuser OFDM-based cognitive radio networks with heterogeneous services[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(4): 1500–1509.
- [15] Fang Dongfeng, Qian Yi, Hu R Q Y. Interference management for physical layer security in heterogeneous networks[C]// Proceedings of the 2017 IEEE 15th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 15th International Conference on Pervasive Intelligence and Computing, 3rd International Conference on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress. Orlando: IEEE, 2017: 133–138.

(编辑 赵 婧)

引用格式: Zhao Wei, Luo Yafei, Bao Hui, et al. Research on physical layer security performance based on MIMO 3D heterogeneous network[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(6): 212–216. [赵伟, 骆亚菲, 鲍慧, 等. 基于多天线立体异构网络的物理层安全性能研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(6): 212–216.]