

基于三维空间模型的毫米波异构蜂窝网络性能分析

李中捷 林雅雄

(中南民族大学 电子信息工程学院 智能无线通信湖北重点实验室 武汉 430074)

摘要 针对城市环境下毫米波异构基站密集分布情况,采用三维空间模型分析毫米波异构蜂窝网络的性能.首先各层基站分布建模为三维泊松点过程,推导出三维空间下 D 球阻碍模型的路径损耗强度函数.然后采用最大偏置接收功率接入准则,假设收发端使用大规模天线阵列获得最大的波束成形增益.在 Nakagami 衰落信道下,推导出目标用户的覆盖概率表达式.最后通过蒙特卡罗仿真和二维空间模型的性能进行了对比,并分析了 D 球阻碍模型、基站偏置因子和天线增益等参数变化对覆盖概率的影响.实验结果表明,三维空间模型对毫米波异构蜂窝网络的性能分析更加精确.

关键词 异构蜂窝网络;毫米波;覆盖概率;随机几何

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2019)01-0088-07

DOI 10.12130/znmzdk.20190116

引用格式 李中捷,林雅雄.基于三维空间模型的毫米波异构蜂窝网络性能分析[J].中南民族大学学报(自然科学版) 2019,38(1):88-94.

LI Zhongjie, LIN Yaxiong. Performance analysis of millimeter wave heterogeneous cellular networks based on three dimensional space model [J]. Journal of South-Central University for Nationalities(Natural Science Edition), 2019, 38(1): 88-94.

Performance analysis of millimeter wave heterogeneous cellular networks based on three dimensional space model

LI Zhongjie, LIN Yaxiong

(Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless Communications, College of Electronic and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract Aiming at the dense distribution of millimeter wave heterogeneous base stations in urban environment, the performance of millimeter wave heterogeneous cellular network is analyzed by using three dimensional spatial model. Firstly, the distribution of base stations in each layer is modeled as three dimensional Poisson point process, and the path loss intensity function of D-ball blockage model in three dimensional space is derived. Secondly, the coverage probability expression of the target user is derived in Nakagami fading channel based on maximum bias receiving power access criterion assuming that the transmitter and receiver use large scale antenna arrays to obtain the maximum beamforming gain. Finally, the performance is compared between three dimensional model and two dimensional model through Monte Carlo simulation, and the impact of parameters such as D-ball blockage model, base station bias factor and antenna gain on coverage probability is analyzed. The simulation results show that the performance of three dimensional space model for millimeter wave heterogeneous networks is more precise.

Keywords heterogeneous cellular networks; millimeter wave; coverage probability; stochastic geometry

由于智能手机、便携式设备和数字多媒体的广泛使用,移动通信数据和流量呈指数增长,可以预见

当前有限的频谱资源无法满足未来无线通信的需求.因此,5G 移动网络将使用毫米波来获得更大的

收稿日期 2018-10-17

作者简介 李中捷(1974-)男,副教授,博士,研究方向:无线通信网络,Email: lizhongjie@mail.scuec.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(61379028,61671483);湖北省自然科学基金资助项目(2016CFA089);中央高校基本科研业务费专项资金资助(CZY19003)

通信容量^[1-2]. 近几年的研究表明, 在 30GHz 到 300GHz 频段中, 有大量的频谱资源可以用来支持未来的无线通信. 毫米波通信与现有的微波通信相比存在三个根本差异^[3]: (1) 毫米波在自由空间中传播具有较高的路径损耗; (2) 极易受到阻碍的影响; (3) 收发端都需要极高的方向性. 这三个差异是在分析毫米波蜂窝网络性能时必须考虑的因素.

泊松点过程在描述基站的实际网络拓扑时具有易处理性和准确性^[4-5], 因此在蜂窝网络建模和性能研究中被广泛使用. 文献 [6] 和文献 [7] 采用泊松点过程对毫米波蜂窝网络中的基站分布建模, 推导出一个评估毫米波蜂窝网络覆盖概率和速率性能的通用框架. 此外, 毫米波蜂窝网络中一个预期的关键特性是异构性, 可以获得更高的速率和覆盖概率. 因此如何建模基于毫米波的异构蜂窝网络成为一个重要问题. 文献 [8] 在二维空间中, 采用泊松点过程对毫米波异构网络中的基站分布进行建模, 分析了覆盖概率、速率和能量效率等性能指标. 基于二维空间的模型易于分析, 但是对各种基站密集分布的城市环境来说, 二维模型对其性能的分析并不精确. 因为在各种高建筑物密集的城市环境中, 高度差会使基站与用户间的距离有较大变化, 忽略高度影响的二维模型不能精确的模拟实际蜂窝系统的性能. 文献 [9] 分析了毫米波异构网络的三维空间模型, 假设衰落信道为 Rayleigh 衰落, 而 Rayleigh 衰落信道适合 Sub-6GHz 传统微波通信, 并不适合毫米波通信^[3].

本文针对城市环境下异构基站密集分布情况, 构建了毫米波异构蜂窝网络的三维空间模型. 该模型中, 毫米波异构网络各层基站的分布建模为三维泊松点过程. 链路分为视距链路和非视距链路, 信道为 Nakagami 衰落信道, 基站和目标用户的天线阵列执行定向波束形成. 本文基于该模型推导出 K 层毫米波异构网络的覆盖概率理论表达式, 并且分析了各个参数对其性能的影响.

1 系统模型

在毫米波异构蜂窝网络中, 将同类型基站归为同一层, 例如将微蜂窝作为第一层, 微微蜂窝作为第二层, 家庭基站作为第三层, 每层基站的密度、偏置因子、发射功率和 D 球阻碍模型参数不同. 假设各层

基站的空间分布服从独立的三维齐次泊松点过程, 其中, λ_k 表示第 k 层网络的基站密度, P_k 表示第 k 层网络的基站发射功率, α_k 表示第 k 层网络的基站偏置因子. 移动用户的空间分布也服从三维泊松点过程. 不失一般性, 根据 Slivnysk 理论^[10], 假定目标用户位于三维空间的坐标原点. 基站和用户的空间分布如图 1 所示.

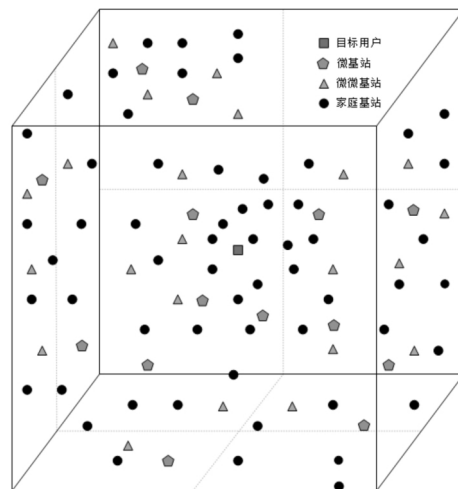


图 1 三维毫米波异构蜂窝网络的基站分布图

Fig.1 Diagram of base station distribution in three dimensional millimeter wave heterogeneous networks

1.1 天线模型

每层网络的基站与目标用户的天线阵列执行定向波束成形. 为了便于分析, 用扇形天线模型近似表示天线模型, 即天线阵列角度在主瓣角度内获得较大天线增益 M , 在旁瓣角度内天线增益为 m . 假定服务基站与目标用户之间完美波束对准, 因此可获得最大的天线总增益 MM . 另外, 干扰链路的波束方向仅考虑了水平面上的角度, 被建模成在 $[0, 2\pi]$ 的一个均匀随机变量, 所以干扰基站与目标用户间的天线总增益可以表示成一个离散的随机变量:

$$G = \begin{cases} MM & P_{MM} = \left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^2 \\ Mm & P_{Mm} = 2 \frac{\theta}{2\pi} \frac{2\pi - \theta}{2\theta} \\ mm & P_{mm} = \left(\frac{2\pi - \theta}{2\pi}\right)^2 \end{cases} \quad (1)$$

公式 (1) 中 θ 是波束的主瓣宽度, P_G , $G \in \{MM, Mm, mm\}$ 是对应天线总增益的概率.

1.2 D 球阻碍模型

基站与用户之间的链路分为视距 (line of sight, LOS)、非视距 (non line of sight, NLOS) 和中断 3 种状态. 在视距状态下, 基站与用户之间没有阻碍. 在

非视距状态下,链路中存在阻碍,如果这种阻碍导致非常高的路径损耗,则发生中断,即基站和用户之间不建立链路。

本文采用文献[6]中的D球阻碍模型,如图2所示,当基站与目标用户的链路距离 $r < R_1$ 即基站处于第一球内,链路为视距链路的概率 $P(r) = \beta_1$,为非视距链路的概率为 $1 - \beta_1$ 。类似的,当 $r \in [R_{d-1}, R_d)$ 时,链路为视距链路的概率 $P(r) = \beta_d$,为非视距链路的概率为 $1 - \beta_d$ 。如果 $r > R_D$,则该链路处于中断。

根据上述阻碍模型,第 k 层网络中每条链路的路径损耗可以表示为:

$$L_k(r) = \begin{cases} \kappa r^{a_L} & P(r) = \beta_{kd} \\ \kappa r^{a_N} & P(r) = (1 - \beta_{kd}) \\ \text{中断} & r \geq R_{kD} \end{cases} \quad r \in [R_{k(d-1)}, R_{kd}) \quad (2)$$

公式(2)中 a_L 是视距链路的路径损耗指数, a_N 是非视距链路的路径损耗指数, κ 是单位距离的路径损耗, R_{kd} 是第 k 层网络中第 d 球的半径,其中 $d = 1, \dots, D$ 注意 $R_{k0} = 0$ 。

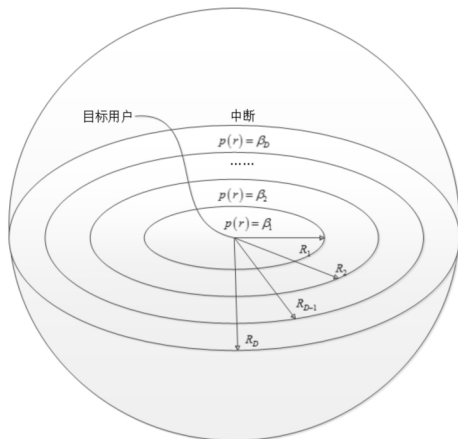


图2 D球阻碍模型

Fig.2 D-ball blockage model

1.3 路径损耗的统计特征

定义 $N_k = \{L_k(r)\}_{r \in \Phi_k}$ 为第 k 层网络的基站与目标用户路径损耗的点过程。

引理1: 目标用户到第 k 层网络基站路径损耗的互补累积分布函数可由泊松点过程空概率推导出^[10]。

$$\bar{F}_{L_k}(x) = P(L_k(r) > x) = \exp(-\Lambda_k([0, x])) \quad (3)$$

公式(3)中 $\Lambda_k([0, x])$ 为三维空间下的D球路

径损耗模型的强度函数,由公式(4)计算得出。

$$\Lambda_k([0, x]) = \int_{\mathbb{R}^3} P(L_k(r) < x) = 4\pi\lambda_k \int_0^\infty P(\kappa r^{a_L} < x) r^2 dr = 4\pi\lambda_k (\beta_{k1} \int_0^{R_{k1}} r^2 1(\kappa r^{a_L} < x) dr + (1 - \beta_{k1}) \int_0^{R_{k1}} r^2 1(\kappa r^{a_N} < x) dr + \dots + \beta_{kD} \int_{R_{k(D-1)}}^{R_{kD}} r^2 1(\kappa r^{a_L} < x) dr + (1 - \beta_{kD}) \int_{R_{k(D-1)}}^{R_{kD}} r^2 1(\kappa r^{a_N} < x) dr) = 4\pi\lambda_k \sum_{d=1}^D (\beta_{kd} \int_{R_{k(d-1)}}^{\min\{R_{kd}, (x/\kappa)^{1/a_L}\}} r^2 dr + (1 - \beta_{kd}) \int_{R_{k(d-1)}}^{\min\{R_{kd}, (x/\kappa)^{1/a_N}\}} r^2 dr) = (4/3)\pi \sum_{d=1}^D (\beta_{kd} (R_{kd}^3 - R_{k(d-1)}^3) 1(x > \kappa R_{kd}^{a_L}) + (x/\kappa)^{3/a_L} - R_{k(d-1)}^3) 1(\kappa R_{k(d-1)}^{a_L} < x < \kappa R_{kd}^{a_L}) + (1 - \beta_{kd}) ((R_{kd}^3 - R_{k(d-1)}^3) 1(x > \kappa R_{kd}^{a_N}) + ((x/\kappa)^{3/a_N} - R_{k(d-1)}^3) 1(\kappa R_{k(d-1)}^{a_N} < x < \kappa R_{kd}^{a_N})) \quad (4)$$

公式(4)中,第(1)步是根据路径损耗点过程 $N_k = \{L_k(r)\}_{r \in \Phi_k}$ 的强度函数定义得出,第(2)步是将D球模型的参数代入,公式中的 $1(\cdot)$ 为指示函数即括号中事件为真则为1,不为真则为0。

根据公式(4)的推导,可得D球路径损耗模型视距链路的强度函数 $\Lambda_{k,LOS}([0, x])$ 和非视距链路的强度函数 $\Lambda_{k,NLOS}([0, x])$ 。

$$\Lambda_{k,LOS}([0, x]) = (4/3)\pi\lambda_k \sum_{d=1}^D \beta_{kd} ((R_{kd}^3 - R_{k(d-1)}^3) 1(x > \kappa R_{kd}^{a_L}) + ((x/\kappa)^{3/a_L} - R_{k(d-1)}^3) 1(\kappa R_{k(d-1)}^{a_L} < x < \kappa R_{kd}^{a_L})) \quad (5)$$

$$\Lambda_{k,NLOS}([0, x]) = (4/3)\pi\lambda_k \sum_{d=1}^D (1 - \beta_{kd}) ((R_{kd}^3 - R_{k(d-1)}^3) 1(x > \kappa R_{kd}^{a_N}) + ((x/\kappa)^{3/a_N} - R_{k(d-1)}^3) 1(\kappa R_{k(d-1)}^{a_N} < x < \kappa R_{kd}^{a_N})) \quad (6)$$

引理2: 目标用户到第 k 层网络视距或非视距基站路径损耗的互补累积分布函数为:

$$\bar{F}_{L_{k,s}}(x) = P(L_{k,s}(r) > x) = \exp(-\Lambda_{k,s}([0, x])) \quad (7)$$

公式(7)中 $s \in \{LOS, NLOS\}$, $\Lambda_{k,s}([0, x])$ 由公式(5)和(6)给出。

同时,路径损耗 $L_{k,s}(r)$ 的概率密度函数为:

$$f_{L_{k,s}}(x) = -\frac{d\bar{F}_{L_{k,s}}(x)}{dx} = \Lambda'_{k,s}([0, x]) \exp(-\Lambda_{k,s}([0, x]))$$

$x))$. (8)

公式(8)中 $\Lambda'_{k,s}([0,x])$ 是 $\Lambda_{k,s}([0,x])$ 对 x 求导得到.

1.4 小区接入

本文采用的接入机制为最大偏置接收功率接入,即目标用户与提供最大偏置接收功率的基站关联.

引理 3: 根据最大偏置接收功率接入机制以及引理 1 和引理 2,可以推导出目标用户接入第层网络的视距基站或非视距基站的概率.

$$\begin{aligned}
 A_{k,s} &= P(P_k G_k B_k L_{k,s}^{-1} \geq \max_{j \neq k} P_j G_j B_j L_j^{-1}) P(L_{k,s'} > L_{k,s}) \\
 &= \left(\prod_{j=1}^3 P\left(L_j \geq \frac{P_j G_j B_j}{P_k G_k B_k} L_{k,s}\right) \right) P(L_{k,s'} > L_{k,s}) \\
 &\stackrel{(1)}{=} \int_0^\infty \prod_{j=1}^3 P\left(L_j \geq \frac{P_j G_j B_j}{P_k G_k B_k} l_{k,s}\right) P(L_{k,s'} > L_{k,s}) f_{L_{k,s}} dl_{k,s} \\
 &\stackrel{(2)}{=} \int_0^\infty e^{-\sum_{j=1}^3 \lambda_j \left(\frac{P_j G_j B_j}{P_k G_k B_k} l_{k,s}\right)} e^{-\Lambda_{k,s'}([0,l_{k,s}])} \Lambda'_{k,s}([0, l_{k,s}]) e^{-\Lambda_k([0,l_{k,s}])} dl_{k,s} \\
 &\stackrel{(3)}{=} \int_0^\infty e^{-\sum_{j=1}^3 \lambda_j \left(\frac{P_j G_j B_j}{P_k G_k B_k} l_{k,s}\right)} e^{-\Lambda_k([0,l_{k,s}])} \Lambda'_{k,s}([0, l_{k,s}]) dl_{k,s} = \int_0^\infty e^{-\sum_{j=1}^3 \lambda_j \left(\frac{P_j G_j B_j}{P_k G_k B_k} l_{k,s}\right)} \Lambda'_{k,s}([0, l_{k,s}]) dl_{k,s}. \tag{9}
 \end{aligned}$$

公式(9)中 $s, s' \in \{LOS, NLOS\}$ 并且 $s \neq s'$. 第(1)步求路径损耗 $L_{k,s}$ 的均值,第(2)步由引理 2 得出,第(3)步则由公式(4)(5)(6)可知 $\Lambda_{k,s}([0, l_{k,s}]) + \Lambda_{k,s'}([0, l_{k,s}]) = \Lambda_k([0, l_{k,s}])$.

2 性能分析

本节根据第一节的系统模型以及接入机制推导出目标用户的覆盖概率表达式.

2.1 信号干扰噪声比 (signal interference noise ratio SINR)

目标用户接入第 k 层网络的基站,链路距离为 r , SINR 可以表示为:

$$\text{SINR}_k = \frac{P_k G_0 h_{k,0} L_k^{-1}(r)}{\sigma^2 + \sum_{j=1}^3 \sum_{i \in \Phi_j \setminus B_{k,0}} P_j G_j h_{j,i} L_j^{-1}(r)}. \tag{10}$$

公式(10)中 G_0 表示服务基站与目标用户之间天线总增益,假定为 MM , $h_{k,0}$ 为服务基站与目标用户之间的小尺度衰落增益, σ^2 为加性高斯白噪声的

方差, $G_{j,i}$ 表示第 j 层网络中干扰链路的的天线总增益, $h_{j,i}$ 表示第 j 层网络中干扰链路的小尺度衰落增益. 由于毫米波蜂窝网络中部署定向天线,链路的小尺度衰落不如传统系统严重,因此可以假定所有链路服从独立的 Nakagami 衰落(即小尺度衰落增益服从伽马分布). N_{LOS} 和 N_{NLOS} 分别表示视距和非视距链路的 Nakagami 衰落参数.

2.2 覆盖概率

定义 $P_C^k(\Gamma_k)$ 为目标用户接入第 k 层网络的基站时 SINR 大于阈值 Γ_k 的概率,即 $P_C^k(\Gamma_k) = P(\text{SINR}_k > \Gamma_k; t = k)$,其中 t 代表接入的网络层.每层网络中描述基站分布的齐次泊松点过程可以分为视距基站点过程 $\Phi_{k,LOS}$ 和非视距基站点过程 $\Phi_{k,NLOS}$ 两个独立的非齐次泊松点过程.因此,根据总概率定律可以计算出 K 层异构网络目标用户的覆盖概率:

$$\begin{aligned}
 P_C &= \sum_{k=1}^K \sum_{s \in \{LOS, NLOS\}} [P(\text{SINR}_{k,s} > \Gamma_k; t = k) P(L_{k,s'} > L_{k,s})] = \\
 &\sum_{k=1}^K \sum_{s \in \{LOS, NLOS\}} [P(\text{SINR}_{k,s} > \Gamma_k) \\
 &\underbrace{P(P_k G_k B_k L_{k,s}^{-1} \geq \max_{j \neq k} P_j G_j B_j L_j^{-1}) P(L_{k,s} > L_{k,s})}_{A_{k,s}}], \tag{11}
 \end{aligned}$$

公式(11)中 $A_{k,s}$ 在引理 3 中给出, $P(\text{SINR}_{k,s} > \Gamma_k)$ 表示目标用户接入点过程 $\Phi_{k,s}$ 中基站的条件覆盖概率.

$$P(\text{SINR}_{k,s} > \Gamma_k) =$$

$$\begin{aligned}
 &P\left(\frac{P_k G_0 h_{k,0} L_k^{-1}}{\sigma^2 + \sum_{j=1}^3 \sum_{i \in \Phi_j \setminus B_{k,0}} P_j G_j h_{j,i} L_j^{-1}(r)} > \Gamma_k\right) = \\
 &P\left(h_{k,0} > \frac{\Gamma_k L_{k,s}}{P_k G_0} \left(\sigma^2 + \sum_{j=1}^3 (I_{j,LOS} + I_{j,NLOS})\right)\right) \approx \\
 &\sum_{n=1}^{N_s} (-1)^{n+1} \binom{N_s}{n} e^{u\sigma^2} \prod_{j=1}^3 (L_{j,LOS}(u) L_{j,NLOS}(u)). \tag{12}
 \end{aligned}$$

公式(12)推导的最后一步是根据参考文献[7]的附录 C 采用 Nakagami 衰落信道推导得出.公式中

$u = \frac{n\Gamma_s \Gamma_k L_{k,s}}{P_k G_0}$, $I_{j,s} = \sum_{i \in \Phi_j \setminus B_{k,0}} P_j G_j h_{j,i} L_j^{-1}(r)$ 是第 j 层网络中视距干扰基站和非视距干扰基站对目标用户产生的干扰, $L_{j,s}(u)$ 是 $I_{j,s}$ 基于变量 u 的拉普拉斯变换, $s \in \{LOS, NLOS\}$. 根据文献[10]中的细化定律,可以将 $I_{j,s}$ 分为三个独立的泊松点过程,表示如下:

$$I_{j,s} = I_{j,s}^{MM} + I_{j,s}^{Mm} + I_{j,s}^{mm}. \quad (13)$$

公式(13)中 $I_{j,s}^G$ 表示天线增益为 G 的干扰基站的干扰, G 在公式(1)中给出. 因此, 干扰的拉普拉斯变换可以表示为:

$$L_{I_{j,s}}(u) = E_{I_{j,s}}(e^{-uI_{j,s}}) = E_{I_{j,s}}[e^{-u(I_{j,s}^{MM} + I_{j,s}^{Mm} + I_{j,s}^{mm})}] = \prod_G E_{I_{j,s}}^G(e^{-uI_{j,s}}). \quad (14)$$

公式(14)中 $G \in \{MM, Mm, mm\}$, $\mu = \frac{n\eta_s \Gamma_k L_{k,s}}{P_k G_0}$. 最后一步根据独立泊松点过程的细化理论推导出. 根据随机几何理论, 可以计算出天线增益为 G 的视距干扰基站和非视距干扰基站干扰的拉普拉斯变化为:

$$E_{I_{j,s}}^G(e^{-uI_{j,s}}) \stackrel{(1)}{=} e^{-P_k G \int_0^\infty \frac{P_k G_k B_{k,s}}{P_k G_k B_{k,s}} (1 - E_{h,s}(e^{-uP_k G_k h_j s^{-1}})) A'_{j,s}(dx)} \stackrel{(2)}{=} e^{-P_k G \int_0^\infty \frac{P_k G_k B_{k,s}}{P_k G_k B_{k,s}} (1 - 1/(1 + uP_k G_k x^{-1}/N_s)^{N_s}) A'_{j,s}(dx)}. \quad (15)$$

公式(15)中, 公式变换的第(1)步可由三维泊松点过程的概率生成函数得到概率生成函数, 第(2)步计算随机变量 $h_{j,i}$ 中的伽马随机变量的矩量函数 $A'_{j,s}$ 由公式(9)给出, $s \in \{LOS, NLSO\}$, 积分的下限根据接入方式可得.

结合公式(9) (11) (12) (14) (15), 可计算出 K 层异构网络的覆盖概率 P_c .

3 仿真结果与分析

假设基站分布在半径 R 为的三维空间球体内, 本文由 MATLAB 软件得到第二节推导出的覆盖概率理论解, 并且通过蒙特卡罗仿真验证了该理论解得准确性.

表 1 基本仿真参数

Tab.1 Basic simulation parameters

参数	取值
K	3
a_L, a_N	2, 4
N_{LOS}, N_{NLOS}	3, 2
M, m, θ	10 dB, -10 dB, 30°
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	$10^{-6}, 10^{-5}, 5 \times 10^{-5} (1/m^3)$
P_1, P_2, P_3	53 dBm, 33 dBm, 23 dBm
$[R_{11}, R_{12}], [\beta_{11}, \beta_{12}]$	[50, 200], [0.8, 0.2]
$[R_{21}, R_{22}], [\beta_{21}, \beta_{22}]$	[40, 60], [1, 0]
$[R_{31}, R_{32}], [\beta_{31}, \beta_{32}]$	[20, 40], [1, 0]
F_c	28 GHz
W	1 GHz
κ	$(F_c/4\pi)^2$
σ^2	$-174 + 10\log_{10}(W) + 10$ dB

表 1 列出了基本的仿真参数及取值. 下列实验中, 当研究某个参数的改变对系统性能影响时, 会特别说明. 为了三维模型和二维模型比较的公平性, 在二维模型中, 假设基站分布在半径为 $R = 200$ m 的圆内. 本文二维模型的分析结果由参考文献 [4] 给出.

图 3 对比了 $a_L = 2$ 和 $a_L = 2.5$ 下二维模型与三维模型的覆盖概率理论分析结果和蒙特卡罗仿真结果. 实验结果表明, 毫米波异构蜂窝网络的三维模型覆盖概率的分析结果与蒙特卡罗仿真结果, 比二维模型更加拟合. 因为在密集的城市环境中, 基站高度对于距离的影响较大, 二维模型不再能精确的模拟实际基站分布情况. 同时还可以看出, 视距链路参数 a_L 变化仅在中高阈值时对覆盖概率有较大影响.

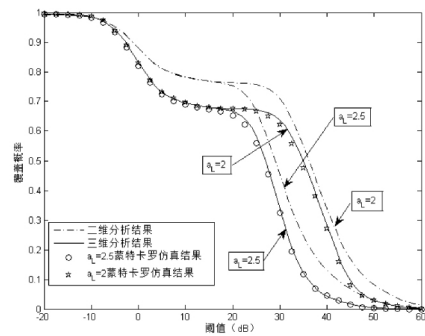


图 3 三维模型与二维模型覆盖概率比较

Fig.3 Average coverage probability comparison of three dimensional model and two dimensional model

图 4 通过改变天线主瓣增益的仿真参数研究天线主瓣增益对覆盖概率的影响, 其它参数参考表 1. 从图 4 中可以看出, 随着天线主瓣增益的增加, 覆盖概率有明显的提升. 因此, 在毫米波异构蜂窝网络的实际部署中, 可以通过提高天线主瓣增益来获得更大的覆盖概率.

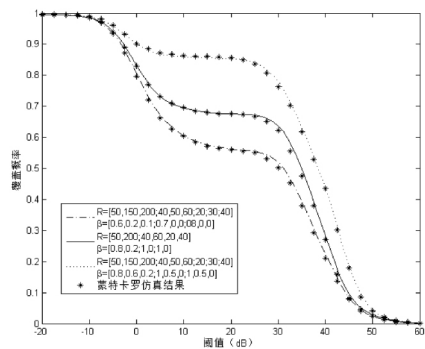


图 4 天线主瓣增益对覆盖性能的影响

Fig.4 Influence of antenna main lobe gain on coverage probability

图 5 通过改变了 D 球阻碍模型的参数研究视

距基站概率的变化对覆盖概率的影响,其它参数参考表 1.从图 5 的仿真结果可以看出,当视距基站的概率提高,覆盖性能有所提高.虽然视距基站的概率提高时,干扰会更加严重,但是服务链路的质量也会更好,可以抵消干扰增加的影响.随着日益变化的城市环境,相比常用的视距球模型(圆内为视距基站,圆外为非视距基站),D 球阻碍模型能更好的模拟实际情况.

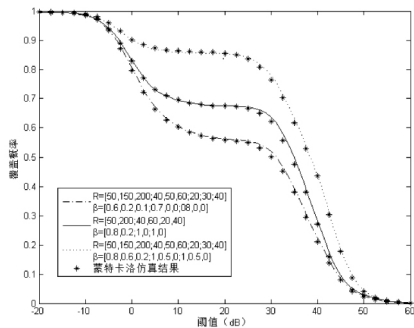


图 5 D 球阻碍模型参数对覆盖性能的影响
Fig.5 Influence of D-ball blockage model parameters on coverage probability

图 6 研究了阈值为 0dB 时偏置因子对覆盖概率的影响.微微蜂窝偏置因子为 0dB,改变微微蜂窝和家庭蜂窝偏置因子,其它参数参考表 1.从图中可以观察到,随着微微蜂窝和家庭蜂窝的偏置因子的增加,其相应地增加了微微蜂窝和家庭蜂窝的覆盖范围.

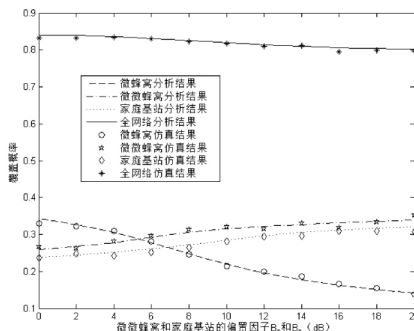


图 6 微微蜂窝和家庭基站的偏置因子对小区覆盖概率的影响
Fig.6 Influence of the biasing factor of picocells and femtocells on coverage probability

图 7 研究了微微蜂窝和家庭基站的偏置因子对小区接入概率的影响,其它参数参考表 1.从图 7 中可以观察到,随着微微蜂窝和家庭基站的偏置因子的增加,用户接入微微蜂窝和家庭蜂窝的概率逐渐增加,接入微微蜂窝的概率逐渐减低.通过使用小区偏置技术,可以将更多的用户接入到小基站中来,从而达到减轻大基站的工作压力.

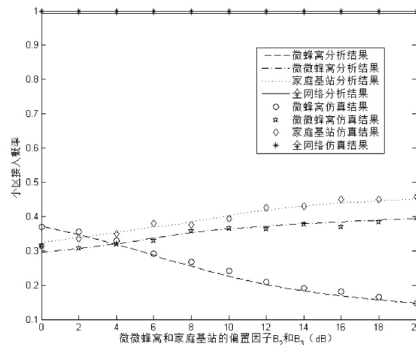


图 7 微微蜂窝和家庭基站的偏置因子对小区接入概率的影响
Fig.7 Influence of the biasing factor of picocells and femtocells on cell association probability

4 结语

本文在三维空间模型中,采用独立的齐次泊松点过程,分别对毫米波异构蜂窝网络中的各层基站进行建模.根据毫米波无线通信的相关特性,推导出覆盖概率的理论结果,并通过蒙特卡罗仿真验证了理论结果的准确性.仿真结果表明:(1) 三维空间模型更加符合基站密集分布的城市环境;(2) 通过提高天线主瓣增益,可以提升系统性能;(3) D 球阻碍模型能更好的模拟实际视距链路的情况;(4) 视距链路概率的提高,也可以提升系统性能;(5) 小区正向偏置能提高用户接入概率和小区的覆盖性能.

参 考 文 献

[1] YONG N ,YONG L ,DEPENG J ,et al. A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges [J]. Wireless Networks , 2015 ,21(8) : 2657-2676.

[2] GHOSH A ,THOMAS T A ,ÇUDAK M C ,et al. Millimeter-wave enhanced local area systems: A high-data-rate approach for future wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication. 2014 ,32 (6) : 1152-1163.

[3] ANDREWS J G ,BAI T ,KULKAMII M N ,et al. Modeling and analyzing millimeter wave cellular system [J]. IEEE Transactions on Communication 2017 ,65(1) : 403-430.

[4] ELSAWY H ,SALEM A S ,ALOUINI M S ,et al. Modeling and analysis of cellular networks using stochastic geometry: A tutorial [J]. IEEE Communication Survey & Tutorial 2017 ,19(1) : 167-203.

- [5] 李中捷,黄传虎. 基于随机几何理论的多层异构蜂窝网络性能分析[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2017, 36(1): 76-80.
- [6] BAI T, HEATH R W. Coverage and rate analysis for millimeter wave cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications 2014, 14(2): 1100-1114.
- [7] 李中捷,陈焱雷,谢东鹏. 基于三维空间模型的毫米波蜂窝网络覆盖概率分析[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版) 2017, 29(5): 309-316.
- [8] TURGUT E, GURSOY M C. Coverage in heterogeneous downlink millimeter wave cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(10): 4463-4477.
- [9] BACHTOBJI S, OMRI A, BOUALLEGUE R, et al. Modelling and performance analysis of 3-D mmwaves based heterogeneous networks [C]//IEEE. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. PAPHOS: IEEE 2016: 72-76.
- [10] HAENGGI M. Stochastic geometry for wireless network [M]. New York: Cambridge University Publishers 2012.

(责任编辑 雷建云)