

doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2018.05.005

基于泊松洞过程建模的异构蜂窝网络信干比增益与近似覆盖率分析

鲍梓永¹, 杨洁², 胡晗³, 曹雪虹²

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003
2. 南京工程学院 通信工程学院, 江苏 南京 211167
3. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要:移动通信业务的高速增长使得传统同构蜂窝网络结构不能满足用户对通信质量的要求,而异构网络架构可以有效解决这种问题。文中对泊松洞过程下异构蜂窝网络的覆盖率进行研究。首先,利用泊松洞过程(Poisson Hole Process, PHP)对异构蜂窝网络进行建模;然后以信干比(Signal to Interference Ratio, SIR)分布为研究目标,利用泊松点过程的近似SIR分析方法,推导出PHP模型下网络SIR增益的具体表达式;最后,通过缩放泊松网络的信干比门限得到PHP模型下的近覆盖率。通过实验仿真,验证了所求近似增益的正确性。

关键词:异构蜂窝网络;泊松洞过程;平均干扰比;覆盖率

中图分类号:TN919.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-5439(2018)05-0035-06

Analysis on signal to interference ratio gain and approximate coverage in heterogeneous cellular networks based on Poisson hole process modeling

BAO Ziyong¹, YANG Jie², HU Han³, CAO Xuehong²

(1. College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2. Department of Communication Engineerings, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China
3. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The rapid growth of mobile communication services makes the traditional homogeneous cellular network structure be unable to meet users' requirements for communication quality, but the heterogeneous network architecture can effectively solve this problem. This paper studies the coverage of heterogeneous cellular networks in the Poisson hole process (PHP). Firstly, the heterogeneous cellular network is modeled by Poisson hole process. Then, the signal to interference ratio (SIR) distribution is used as a research target, and the approximate SIR analysis using the Poisson point process is used. In this way, the concrete expression of the network SIR gain on the PHP model is derived. Finally, the near coverage ratio on the PHP model is obtained by scaling the SIR in the Poisson network. the experimental simulation verifies the correctness of the approximated gain.

Keywords: heterogeneous cellular network; Poisson hole process (PHP); average interference ratio; coverage

收稿日期:2018-06-12;修回日期:2018-09-29 本刊网址: <http://nyzr.njupt.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金(61701221,61401225)、江苏省自然科学基金(BK20160781)和江苏省高校自然科学基金(16KJB510013)资助项目

通讯作者:曹雪虹,女,教授,博士生导师,E-mail:caoxh@njupt.edu.cn

引用本文:鲍梓永,杨洁,胡晗,等.基于泊松洞过程建模的异构蜂窝网络信干比增益与近似覆盖率分析[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2018,38(5):35-40.

随着科学技术的飞速发展,智能手机、平板电脑和智能手表等新型移动处理设备迅速普及,导致移动网络数据量快速增长。异构蜂窝网络(Heterogeneous Cellular Network, HCN)可以满足人们对大规模的移动性数据业务的需求。与传统蜂窝网不同的是,HCN 由具有不同发射功率和覆盖范围的基站节点构成。其中,宏小区的特点是占地面积大,发射功率强,部署成本高,用于偏远地区的大面积覆盖;与宏小区相比,微小区(即“小小区”)[¹]的发射功率低很多,相应的开销成本也低,覆盖面积较小。

Andrews 最先采用齐次泊松点过程对蜂窝网络的基站进行建模,并推导出系统性能简单理论表达式,相比于传统六边形网络模型,这样的建模形式更易于进行数学表达与数学分析。鉴于泊松点过程(Poisson Point Process, PPP)模型对蜂窝网络建模的一些优点,人们开始研究如网络建模[²]、上行链路性能评估[³]、用户接入策略分析[⁴]、多小区协作和干扰抵消[⁵]等相关技术。由于齐次泊松点过程中的点与点之间的分布是完全独立随机的,而在实际基站部署中,各个基站位置之间肯定存在一定的关联,因此该模型与现实不完全相符。最近,许多新的点过程被提出对异构网络进行建模,例如硬核过程(Hard-Core Processes, HCP)[⁶]、施特莱斯过程(Strauss Process, SP)[⁷]、泊松簇过程(Poisson Cluster Processes, PCP)[⁸]等等。相比于齐次泊松点过程建模的异构蜂窝网络即六边形规则网格模型,这些新的点过程更加适合建模,由于点与点之间存在一定的相关性,因此可以更好地捕捉实际网络部署的空间特性[⁹]。

与泊松网络模型相比,实际的基站部署中站点的空间分布存在一定的随机性与空间相关性。因此,带有空间排斥特性的 PHP 网络模型更适用于实际蜂窝网络部署,更能体现实际基站的分布特点,但是 PHP 最主要的缺点是难以进行理论分析,由于干扰统计特性难以获得,从而限制了网络性能的进一步分析。文献[10-11]指出非泊松点过程,如硬核过程(Hard-Core Processes)、扰动格型、 β -Ginibre 点过程(β -GPP)等比 PPP 更适合描述实际基站部署的网络分布特性。SIR 特性是异构蜂窝网络系统最基本的性能指标,是获取覆盖率、容量和吞吐量等的基础,幸运的是,在文献[12-14]中对于正方形扰动格型、 β -GPP 等非泊松模型,证明了一般性的单层蜂窝网络的覆盖率, $P_c(\theta) \triangleq P(\text{SIR} > \theta)$, 可以通过缩放泊松网络的信干比门限 θ 到 θ/G 近似得到,

$P_c(\theta) \approx P_c^{\text{PPP}}(\theta/G)$, 其中 G 是渐进增益,它可以通过平均干扰信号比定量获取。

本文主要研究 PHP 模型下异构蜂窝网络的覆盖率。PHP 通过对筛选区域半径的设计可以保证在以宏基站为圆心,筛选区域为半径的范围内不会有微基站,这样就保证了微基站不会影响宏基站用户的状态。本文研究基于 PHP 模型的 HCN 网络的 SIR 分布特性,推导了 PHP 模型下网络 SIR 相对于 PPP 模型下网络 SIR 的渐进增益 G , 并通过缩放 PPP 模型下网络覆盖率的 SIR 门限来得到 PHP 网络的近似覆盖率。

1 系统模型

本文考虑两层异构蜂窝网络模型,即由宏基站、微基站和用户构成,在宏小区范围内,微基站以泊松点分布的方式部署,每层基站的传输功率、分布密度和传输的数据速率都不同。本文主要研究 PHP 模型,通过人为地对 PPP 进行“去点”的操作,模拟宏基站与微基站之间的相关性,即每个宏基站都存在一个屏蔽区域,落入屏蔽区域内的微基站都将被去掉从而提高服务质量。本文研究的网络假设是干扰受限系统,网络接入方式为开放式接入,即所有用户都可以接入能为其提供最大瞬时接收 SIR 的基站,并且假设系统在瑞利衰落信道环境下,路径损耗函数为 $l(x) = |x|^{-\alpha}$, $\alpha > 2$, 其中 α 为路径损耗因子。

定义 1: 泊松洞过程(PHP)

PHP 可以根据两个均匀独立的 PPP 来定义。基站分布图如图 1 所示,记 $\varnothing_m$ 为密度是 λ_m 的 PPP, 记 $\tilde{\varnothing}_p$ 为密度是 $\tilde{\lambda}_p$ 的 PPP, 且 $\tilde{\lambda}_p > \lambda_m$ 。对于每个 $x \in \varnothing_m$, 去除在 $\tilde{\varnothing}_p \cap b(x, D)$ 区域中的所有点, 其中 $b(x, D)$ 是指以 x 为圆心, D 为半径的一个圆。 $\tilde{\varnothing}_p$ 剩下的点构成的点过程称为泊松洞过程 $\varnothing_p$, 且密度为 $\lambda_p = \tilde{\lambda}_p \exp(-\lambda_m \pi D^2)$ 。

假设 P_k, μ_k, α_k 分别为第 k 层服务基站的发射功率、分布密度以及路径损耗因子。本文我们假设用户是基于实时 SIR 接入选择方式,即由提供最大平均接收功率的 BS 服务,为分析简单,在本文中典型用户位于原点位置。功率路损模型为 $l(x) = |x|^{-\alpha_k}$, 其中 k 为接入点 x 所在的层,在瑞利衰落信道环境下, h_x 为独立同分布的指数分布形式且 $E(h_x) = 1$ 。所以典型用户的接收 SIR 可以表示为

$$\text{SIR} \triangleq \frac{s}{I} = \frac{h_{x_0} l(x_0)}{\sum_{x \in \mathcal{H} \setminus \{x_0\}} \mu_x h_x l(x)} \quad (1)$$

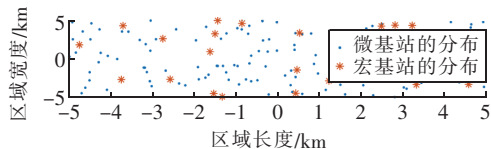
其中, $k = \{1, 2, \dots, k\}$, x_0 表示典型用户服务基站的位置, μ_x 表示节点 x 的发射功率。假设 $x \in \mathcal{O}_k$, 则 $\mu_x = \mu_k$ 。覆盖率可以被表示在小区内一个用户可以达到 SIR 的概率或者是连接成功的概率, 即

$$P_c(\theta) = P(\text{SIR} > 0) = \sum_{k \in K} P(\text{SIR} > \theta, x_0 \in \mathcal{O}_k) \quad (2)$$

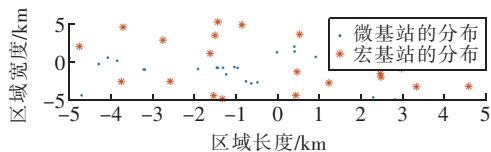
其中, θ 是 SIR 门限值。SIR 的互补累积分布函数 (CCDF) 为:

$$\overline{F}_{\text{SIR}}(\theta) \triangleq P(\text{SIR} > \theta) \quad (3)$$

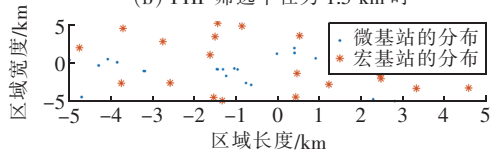
基于 SIR 门限模型, 覆盖率 $P_c(\theta)$ 与 SIR 的互补累积分布函数 $\overline{F}_{\text{SIR}}(\theta)$ 是等价的, 即 $P_c(\theta) = \overline{F}_{\text{SIR}}(\theta)$ 。



(a) PPP-宏基站密度为 0.3 km^{-2} , 微基站密度为 0.8 km^{-2} 时



(b) PHP 筛选半径为 1.5 km 时



(c) PHP 筛选半径为 2.5 km 时

图1 PPP与PHP基站分布图

图1中, 设定 PPP 与 PHP 的宏基站和微基站密度均相同, 宏基站密度为 0.3 km^{-2} , 微基站密度为 0.8 km^{-2} 。

2 单层网络的泊松近似方法

当前关于 SIR 分布的理论分析主要是基于独立齐次泊松点过程的网络模型。但是, 实际基站部署的位置并非具有泊松性, 即空间分布存在相关性, 或存在排斥性或聚集性。

本文我们主要研究单层蜂窝网络模型, 并假设路径损耗因子恒定, 为方便计算, α 设置为 4。一般性的单层蜂窝网络的覆盖率可以通过泊松网络的覆盖率对 SIR 门限进行缩放, 从 θ 缩放到 θ/G 的方式获取, 即 $P_c(\theta) \approx P_c^{\text{PPP}}(\theta/G)$, 其中 $P_c^{\text{PPP}}(\theta)$ 是泊松网络的覆盖率, G 是渐进增益, 它可以通过平均干扰信号比 (Mean Interference-to-Signal Ratio, MISR) 得到。这种方法在 SIR 门限上平移有效增益即可, 因此称为有效增益近似泊松 (Approximate SIR Analysis

based on PPP, ASAPP) 方法, 这种近似在信干比门限 $\theta \rightarrow 0$ 时更精确。

2.1 MISR

定义 2: 信号干扰比 (Interference-to-Average-Signal Ratio, $\overline{\text{ISR}}$)

$$\overline{\text{ISR}} \triangleq \frac{I}{E_h(s)} \quad (4)$$

其中, I 表示所有干扰功率的总和, $\bar{S} = E_h(S)$ 是平均信号功率。它可以表示为 $R_{\text{MISR}} \triangleq E(\overline{\text{ISR}})$ 。 $\overline{\text{ISR}}$ 中 S 上面的横杠表示对衰落进行平均, 由于 BS 相对于典型用户的位置是随机变化的, 所以 $\overline{\text{ISR}}$ 是一个随机变量。本文假定所需信号是来自距离为 R 的单个 BS, 而干扰源位于位置 R_k , 并且它们的发射功率 (相对于一个服务 BS) 是 P_k 。在这种情况下, $\overline{\text{ISR}}$ 可以表示成下面形式:

$$\overline{\text{ISR}} = R^\alpha \sum_{k \in l} h_k P_k R_k^{-\alpha} \quad (5)$$

这里的 l 表示干扰指标集, h_k 表示信道 (功率) 增益, 它的平均值如下:

$$\text{MISR} \triangleq E(\overline{\text{ISR}}) = \sum_{k \in l} P_k E\left(\frac{R^\alpha}{R_k^\alpha}\right) \quad (6)$$

PPP 网络模型中, 假设 R_k 是从典型用户到第 k 个最近 BS 的距离, 距离比 $v_k = R_1/R_k$ 的分布遵循:

$$F_{v_k} = 1 - (1 - x^2)^{k-1}, x \in [0, 1] \quad (7)$$

并且其 α 阶矩是

$$E(v_k^\alpha) = \frac{\Gamma(1 + \alpha/2) \Gamma(k)}{\Gamma(k + \alpha/2)} \quad (8)$$

当功率恒定, 即 $P_k \equiv 1$ 时, PPP 网络模型的 MISR 可以表示为下面形式:

$$\text{MISR} = E(\overline{\text{ISR}}) = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{\Gamma(1 + \alpha/2) \Gamma(k)}{\Gamma(k + \alpha/2)} = \frac{2}{\alpha - 2}, \alpha > 2 \quad (9)$$

2.2 渐进增益

由于泊松模型的可分析性, 泊松网络可以作为获取其他模型覆盖率的基准, 其中 SIR 增益可以定义为关于目标概率 p 的函数,

$$G_p(p) \triangleq \frac{\overline{F}_{\text{SIR}}^{-1}(p)}{\overline{F}_{\text{SIR, PPP}}^{-1}(p)}, p \in (0, 1) \quad (10)$$

其中, $\overline{F}_{\text{SIR}}^{-1}$ 是 SIR 的 CCDF 的反函数。水平间隔也可以被定义为 SIR 门限 θ 的函数,

$$G(\theta) \triangleq G_p(P_c^{\text{PPP}}(\theta)) = \frac{\overline{F}_{\text{SIR}}^{-1}(P_c^{\text{PPP}}(\theta))}{\theta} \quad (11)$$

当极限存在时, 渐进增益 G 定义为:

$$G \triangleq \lim_{p \rightarrow 1} G_p(p) = \lim_{\theta \rightarrow 0} G(\theta) \quad (12)$$

对于瑞利指数 h 与 $\theta \rightarrow 0$ 时, $P(h < \theta \bar{I}SR) \sim \theta x$, 因此,

$$p(h < (\theta \bar{I}SR | \bar{I}SR)) \sim \theta \bar{I}SR \tag{13}$$

所以在瑞利衰落的条件下, 当 $\theta \rightarrow 0$ 时, SIR 分布可以满足 $F_{\text{SIR}}(\theta) \sim \text{MISR} \cdot \theta$, 并且当 $p \rightarrow 1$ 时, $\bar{F}_{\text{SIR}}^{-1}(p) \sim (1-p)/\text{MISR}$, PHP 模型中 SIR 互补累积分布函数的渐进增益 G 为:

$$G = \frac{\text{MISR}_{\text{PPP}}}{\text{MISR}_{\text{PHP}}} \tag{14}$$

2.3 单层 PHP 覆盖率

覆盖率通常由用户接收信噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 的 CCDF 来表示, 也就是 SINR 大于某一门限值的概率。当用户接入到非泊松层时, 首先把该层按照 PPP 计算覆盖率, 然后把 SIR 分布中相应的门限值由 θ 变成 θ/G 。本文研究单层 PHP 网络模型, 其覆盖率可以利用渐进增益直接获取近似结果。

在干扰受限的网络中, 即无噪声 PPP 模型, 典型的移动用户的覆盖概率简化为:

$$P_c^{\text{PPP}}(i) = \frac{\pi}{c(\alpha)} \frac{\sum_{i=1}^K \lambda_i P_i^{2/\alpha} \alpha_i^{-2/\alpha}}{\sum_{i=1}^K \lambda_i P_i^{2/\alpha}}, \alpha_i > 1 \tag{15}$$

其中 $c(\alpha) = 2\pi^2 \csc\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right) \alpha^{-1}$, λ_i 为第 i 层 PPP 的密度, P_i 为第 i 层 PPP 的发送功率, α_i 为第 i 层 PPP 的路径指数。当 $K=1$ 时, 其为单层 PPP 模型, 经过化简, 得到单层 PPP 的覆盖率, 如下:

$$P_c^{\text{PPP}} = \frac{\pi}{c(\alpha) \theta^{2/\alpha}} \tag{16}$$

因此可以得到单层 PHP 的覆盖率为:

$$P_c^{\text{PHP}} = P_c^{\text{PPP}}(\theta/G) = \frac{\pi}{c(\alpha) (\theta/G)^{2/\alpha}} \tag{17}$$

由式(17)可以看出, 单层 PHP 的覆盖率与基站的密度、发射功率无关。因此增加基站密度和发射功率不会对覆盖率有影响。这是因为用户接收到的有用信号的功率和干扰信号的功率变化趋势大致相同, 所以信干噪比几乎保持不变。

3 仿真与分析

3.1 PPP 覆盖率与单层 PHP 覆盖率的对比

本部分通过 MATLAB 仿真对上述理论进行分析, 由于本文研究单层 PHP 网络模型, 仿真结果是在正方形区域内随机撒点得到的。如果没有特别说明, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 PPP 覆盖率与单层 PHP 覆盖率的系统仿真参数

参数	数值
系统区域	10 000 m ² 正方形区域
信干比门限范围/dB	-5 ~ 15
宏基站的密度	0.01
微基站的密度	0.1
路径损耗因子	4
筛选半径/m	2

图 2 是当筛选半径为 2 m 时得到的仿真图, 从图 2 中可以看出, 随着信干比门限的不断增大, PPP 与单层 PHP 的覆盖率都在减小, 另外当筛选半径变大时, 由于微基站个数会减少, 用户接入基站的可能性降低, 导致覆盖率也减小。单层 PHP 的覆盖率比 PPP 的覆盖率高, 这表明 PHP 模型比 PPP 的网络性能更好, 更适用于实际基站部署。并且比较两条曲线可以看出, 它们之间的偏差近似是恒定值, 因此可以通过平移得到另一条曲线。

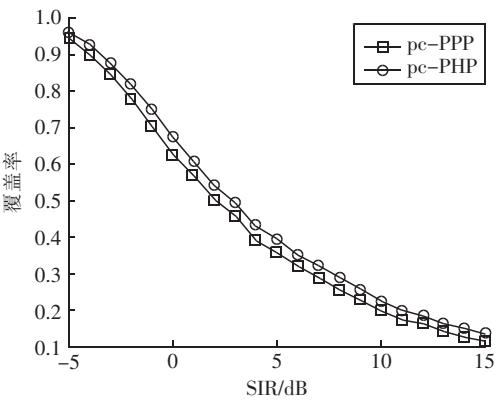


图 2 当 $\alpha=4$ 时, PPP 与单层 PHP 覆盖率仿真图

3.2 MISR 与路径损耗因子的关系

由于 MISR 增益可以对整个 SIR 分布提供一个良好的近似, 因此需要得到 MISR 的具体表达式。为方便计算, 本文在给定宏基站和微基站密度, 筛选半径情况下仿真出 MISR 与路径损耗因子之间的函数曲线。仿真参数如表 1 所示, 其中路径损耗因子的范围为 3 ~ 6, 以 0.5 为间隔均匀递增。

由图 3 可以看出当路径损耗因子 α 变大时, PHP 网络模型的路径损耗因子不断减小, 这是因为用户接收到服务基站的有用功率变小, 并且两者之间大概呈指数分布关系, 因此可以通过 MATLAB 拟合得到 MISR 与路径损耗因子之间的关系式。本文选择 MATLAB 中的 cftool 工具箱进行函数拟合, 选择指数函数作为参考函数: $f(x) = a \cdot x^b$, 根据拟合可知参数 $a = 14.31$, $b = -1.99$, 分别代入参考函数, 可

以得到 MISR 的公式:

$$\text{MISR}_{\text{PHP}} = 14.31 \cdot \alpha^{-1.99} \quad (18)$$

将式 (18) 代入式 (14), 得到渐进增益 G 的表达式为:

$$G = \frac{\text{MISR}_{\text{PPP}}}{\text{MISR}_{\text{PHP}}} = \frac{2}{\alpha - 2} \times \frac{1}{14.31 \cdot \alpha^{-1.99}} \quad (19)$$

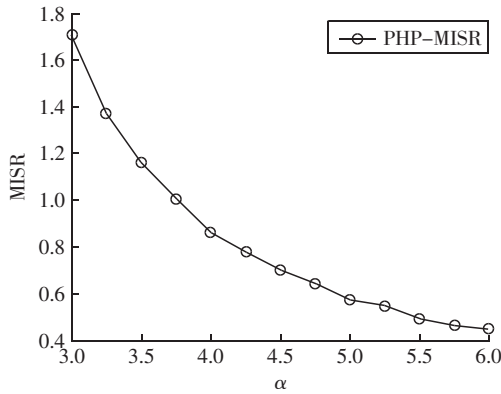


图 3 MISR 与 α 之间的关系

3.3 单层 PHP 的仿真与理论覆盖率对比

在本节中,我们利用所推导出的单层 PHP 的覆盖率公式以及 MATLAB 仿真方法分析单层 PHP 网络的覆盖率。仿真中所用到的相关参数值见表 1, 本算法主要比较通过渐进近似方法得到的单层 PHP 的覆盖率与仿真得到的 PHP 覆盖率的精确度。图 4 给出了不同信干比门限下 PHP 的覆盖率。

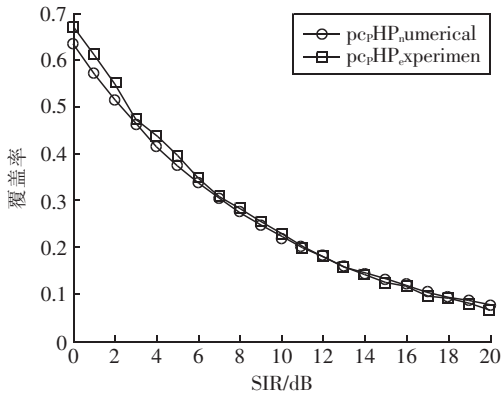


图 4 当 $\alpha=4$ 时,单层 PHP 仿真覆盖率与理论覆盖率

图 4 中微基站的密度是宏基站的 2 倍,筛选半径设置为 2,路损指数因子为 4。从单层 PHP 的理论结果曲线和仿真曲线可以看出两者大致吻合,这证明了单层 PHP 模型的覆盖率可以通过缩放 PPP 网络门限的方式获取紧密近似。随着门限值的逐渐增加,PHP 的覆盖率随之减小。另外,当门限值较小时,近似结果与仿真结果之间的微小差距可能是由于 PHP 模型的覆盖率通过 PPP 缩放近似得到时,单层 PPP 模型的理论公式所引起的一定偏差。

4 结束语

本文将异构蜂窝网络的空间点过程推广到一般性的非泊松点过程,主要研究单层 PHP 网络模型,以最基本的性能指标信干比分布为研究目标。本文根据非泊松单层网络的泊松近似方法,通过仿真拟合得到 MISR,进一步定量获取有效增益 G 的表达式,在泊松网络简单的 SIR 分布基础上,缩放门限 θ 到 θ/G 可以得到单层 PHP 的覆盖率,通过实验仿真与理论对比证明了所得到的近似增益 G 的正确性,并且可以得出 PHP 网络的覆盖率比 PPP 覆盖率高,因此更适应于实际基站部署。

参考文献:

- [1] KISHORE S, GREENSTEIN L J, RATASUK R, et al. Uplink user capacity in a CDMA microcell with a hotspot microcell: exact and approximate analyses [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2 (2): 364 - 374.
- [2] AKOUM S, EI AYACH O, HEATH R W. Coverage and capacity in mmWave cellular systems[C]//the 46th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR). 2012:688 - 692.
- [3] NOVLAN T D, ANDREWS J G. Analytical evaluation of uplink fractional frequency reuse[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(6): 2669 - 2679.
- [4] KEELER H P, BLASZCAYSZYN B, KARAY M K. SINR-based k-coverage probability in cellular networks with arbitrary shadowing[C]//IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT). 2013: 1167 - 1171.
- [5] HUANG K, ANDREWS J G. An analytical framework for multicell cooperation via stochastic geometry and large deviations[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(4): 2501 - 2516.
- [6] HAENGGI M. Mean interference in hard-core wireless networks[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(8): 792 - 794.
- [7] HAENGGI M, ANDREWS J, BACCELLI F, et al. Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(7): 1029 - 1046.
- [8] DENG N, ZHOU W, HAENGGI M. The Ginibre point process as a model for wireless networks with repulsion [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 14(1): 107 - 121.
- [9] NAKATA I, MIYOSHI N. Spatial stochastic models for analysis of heterogeneous radio access networks with repulsively deployed base stations[J]. Performance Evaluation,

2014,68:7-17.

- [10] GUO A, HAENGGI M. Spatial stochastic models and metrics for the structure of base stations in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013,12(11):5800-5812.
- [11] SURYAPRASH V, MOLLER J, FETTWEIS G. On the modeling and analysis of heterogeneous radio access networks using a Poisson cluster process[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2):1035-1047.
- [12] HAENGGI M. The mean interference-to-signal ratio and its key role in cellular and amorphous networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014,3(6):597-600.
- [13] GUO A, HAENGGI M. Asymptotic deployment gain: a simple approach to characterize the SINR distribution in general cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015,63(3):962-976.
- [14] GANTI R K, HAENGGI M. Asymptotic and approximation of the SIR distribution in general cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016,15(3):2130-2143.

作者简介:



鲍梓永(1992-),男,江苏徐州人。南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生。研究方向为异构蜂窝通信、绿色通信。

本刊编委赵强教授荣获 2018 年度“国家杰出青年科学基金”项目资助

近日,接国家自然科学基金委员会正式通知,本刊编委、我校材料科学与工程学院赵强教授获得 2018 年度“国家杰出青年科学基金”项目资助,资助期限为 5 年,资助直接经费为 350 万元。这是我校自主培养产生的第一位国家杰出青年科学基金获得者,标志着我校在高水平科研项目和高端人才队伍建设方面取得了重大突破。

赵强教授长期从事有机光电子学研究,重点围绕金属有机半导体的结构设计、性能调控与光电应用开展了创新性和系统性的研究工作。近年来,作为通讯或第一作者在 Nature Communications、Chemical Reviews、Advanced Materials、Journal of the American Chemical Society、Angewandte Chemie International Edition、Light: Science & Applications 等国际顶级期刊共发表 SCI 论文 100 余篇,论文被他人 SCI 引用 6 000 余次,h 因子为 46。研究成果多次被 Nature、Nature Asia、Chemical & Engineering News、Phys. org、MaterialsViews 等作为研究亮点进行专题评述。获授权中国发明专利 24 件。研究成果获教育部自然科学奖一等奖、江苏省科学技术奖一等奖、江苏高校自然科学奖一等奖、江苏青年光学科技奖等奖励。入选国家“万人计划”青年拔尖人才、教育部新世纪优秀人才等计划。