

基于随机几何的无线中继网络上行链路精细化性能分析

孙海华¹ 周思源^{1,2} 谭国平^{1,2} 张 芝²

1 河海大学计算机与信息学院 南京 211100

2 江苏智能交通及智能驾驶研究院 南京 210019

(shh_96@163.com)

摘要 无线网络用户呈现数量剧增、分布灵活多变的趋势,而传统蜂窝网络的拓扑结构已不能满足所有用户的服务需求。为改善小区边缘区域的上行覆盖率,构建了一种基于随机几何的无线中继网络模型,其中基站服从泊松点过程分布,中继节点围绕基站服从截断式聚类过程分布。在此网络中,中继节点通过放大转发策略将小区边缘用户的数据上传至基站。为了精细化分析网络模型的性能,文中基于信干比理论推导出每跳链路的条件覆盖率的矩,从而获得信干比 meta 分布的解析表达式,即条件覆盖率的分布。相比传统的针对覆盖率期望值的性能分析,基于信干比 meta 分布的分析能够揭示出条件覆盖率大于一定阈值的网络用户比例。实验仿真结果验证了所推导出的理论表达式的正确性。另外,通过调整中继节点分布的半径以及方差参数等,研究了中继节点的分布参数对信干比 meta 分布的影响。最后,通过比较上行功率控制的功率补偿因子对网络覆盖率的影响,为后期研究网络性能优化提供了帮助。

关键词: 中继网络; meta 分布; 覆盖率; 随机几何; 功率控制

中图法分类号 TN925

Fine-grained Performance Analysis of Uplink in Wireless Relay Network Based on Stochastic Geometry

SUN Hai-hua¹, ZHOU Si-yuan^{1,2}, TAN Guo-ping^{1,2} and ZHANG Zhi²

1 School of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China

2 Jiangsu Intelligent Transportation and Intelligent Driving Research Institute, Nanjing 210019, China

Abstract As the number of wireless network users increases dramatically, the network topology of traditional cellular networks can't meet the performance requirements of all users. In order to improve the uplink coverage probability in the cell-edge area, an uplink amplify-and-forward (AF) relay network model in which relays are deployed around the base station is established. The base stations and relays are respectively modeled as the Poisson point process (PPP) and the truncated Thomas cluster process (TCP), and relay node amplifies and forwards the data of cell-edge users to the base station. We drive a fine-grained performance analysis of the network model, i. e., SIR meta distribution which is the distribution of the conditional coverage probability (CCP). The moments of the CCP in the relays network are analytically derived and the approximation of SIR meta distribution is presented in semiclosed-form expression. In contrast to the conventional performance analysis based on the coverage probability, meta distribution can intuitively show the proportion of uplinks in the network whose CCP is greater than a certain value. And the accuracy of the theoretical analysis is verified by simulations. Besides, the effect of the relay distribution parameters on the meta distribution is studied by adjusting the parameters of the relay distribution, such as radius and variance. Finally, the effects of power compensation factor of the uplink power control on the network coverage probability are compared, which provides help for the later research on network performance optimization.

Keywords Relay network, meta distribution, Coverage probability, Stochastic geometry, Power control

到稿日期:2020-08-31 返修日期:2020-11-27 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61701168,61832005);中央高校基本科研业务费(2019B15614);中国博士后科研基金(2019M651546);江苏省交通运输科技项目(2018Y45)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61701168,61832005), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2019B15614), China Postdoctoral Science Funded Project (2019M651546) and Jiangsu Province Transportation Technology Transformation Project (2018Y45).

通信作者:周思源(siyuan.zhou@hhu.edu.cn)

1 引言

随着联网无线设备的海量增长,网络数据流量呈现急剧增长的趋势,驱使无线网络向提供更高速率、更高频带利用率、更高能量利用率以及更低时延的方向发展。当前的蜂窝网络已经不能满足如此巨大的流量需求,即使密集地部署小基站也不能彻底解决流量需求问题,且网络拓扑结构不灵活,因而 3GPP(3rd Generation Partnership Project)提出了部署中继以增强小区覆盖范围、提高系统吞吐量的相关标准。

1.1 背景及相关工作

中继协作通信使网络拓扑具有更大的灵活性,可以将基站覆盖范围扩展到被遮盖的区域中,提高网络频谱利用率和能效,减少传输延迟,减轻基站的流量负载,并缓解蜂窝核心网络中的拥塞,即使在最不利的信道条件下也可以为用户提供良好的覆盖服务,从而提高了小区边缘用户的通信质量,因此其在未来无线系统中的应用前景非常可观。LTE 标准允许部署固定无线中继,以辅助小区边缘移动设备通信。在 5G 系统中使用移动中继、多跳中继以及用户辅助中继等中继模式可以改善蜂窝网络的拓扑结构并降低功耗^[1-2]。

现有大多数关于中继网络的研究工作主要是围绕网络的通信中断概率、链路可达速率、能效等网络性能展开。例如,文献[3]研究了中继通信对毫米波蜂窝网络的覆盖率以及频谱效率的影响;文献[4]通过权衡考虑中继节点的布置和功率分配,来实现最大能源效率;文献[5]分析了具有多用户的车载中继网络的传输容量问题;文献[6]介绍了网络编码在无线中继网络中应用的研究进展;文献[7]讨论了协作通信的复用增益的优势;文献[8]针对全双工解码转发中继网络中的安全传输问题,在最大传输功率和最小安全速率的限制下,提出一种功率分配策略,以提高安全速率。然而,目前很少有工作中继网络更精细化的性能指标,如信干比(Signal to Interference Ratio, SIR)meta 分布。信干比 meta 分布是一种细粒度的性能指标,可捕获重要的网络性能指标,如网络覆盖率,这种分布能直观地反映出中继网络系统中覆盖率大于某值的用户占比情况,而这正是网络优化所关心的性能指标之一。

对于传统蜂窝网络分析,随机几何是一种功能强大的数学工具,能够对基站服从均匀泊松点过程(Poisson Point Process, PPP)分布的下行蜂窝网络进行简易分析^[9]。但是,使用随机几何对上行链路进行分析比对下行链路进行分析更为复杂,由于功率控制,干扰源的发射功率与通信链路的距离有关,即使基站和用户的位置遵循 PPP,干扰用户的位置也不遵循 PPP,因此难以获得精确的分析^[10]。PPP 的一个显著特点是每个节点的位置分布是相互独立的,即可能有多个节点同时位于某一区域,然而在 OFDM 网络中,这意味着在其他基站所覆盖的小区中最多只存在单个干扰用户,即干扰用户的位置与基站的位置耦合,并且不服从 PPP 分布。

文献[11-13]分析了上行链路的频带分配、功率控制以及对上下行共享信道的优化问题,但并未对如何刻画干扰源的位置分布进行讨论。文献[14]通过将干扰用户的位置近似为在整个平面上服从均匀 PPP 来分析部分功率控制上行网络的性能。然而,采用这种分析方法,一些干扰用户到典型基站经历的路径损耗可能比到其关联的基站所经历的路径损耗更

小,这种情况是不现实的。文献[15]根据用户和基站的位置成对出现推导了用户和基站的对相关函数,并用相关函数精确地近似了上行网络中用户的位置分布。综上所述,虽然研究上行网络的工作很多,但有关中继上行网络的研究工作较少。

1.2 本文主要工作

由于入网用户数量的指数式增长和物联网智能采集网络的兴起,热点区域中的用户密度日益增大。远离服务基站的边缘用户借助基站周围的中继节点协作通信,在不增大基站密度的情况下,可以提高基站的服务覆盖范围以及小区边缘用户的通信质量。将协作通信与功率控制相结合,可以减少能耗,克服“双远近”效应,从而减少网络系统中的干扰,并改善整个系统的性能。受到这些启发,本文提出了基于 OFDM 接入机制的上行中继网络,并推导出条件覆盖率及信干比 meta 分布。本文的主要工作概述如下。

(1)构建了能改善边缘用户通信质量的上行双跳网络,假设基站服从均匀的 PPP 分布,并且在基站周围部署中继节点,用于协助边缘用户向基站通信。

(2)根据构建的网络模型,采用关联最近中继节点的调度策略,分别推导出两跳链路距离分布的解析表达式。

(3)采用非均匀的 PPP 近似干扰用户的分布,其密度强度取决于强度函数;干扰用户的分布近似为以基站为父过程的簇过程。基于距离分布和功率控制,我们推导了 SIR 条件覆盖率的矩。

(4)利用矩匹配法,用 beta 分布近似网络的信干比 meta 分布。

2 系统模型

2.1 网络拓扑

考虑一个单层基站的中继上行网络,其中基站的空间位置按照均匀独立的 PPP 分布在 \mathbf{R}^2 平面上,密度为 λ_B ,所有基站组成的点集表示为 $\Phi_B = \{x_0, x_1, \dots\}$ 。由于热点区域的集群特性,潜在中继节点围绕基站分布,因此本网络系统中中继节点的位置建模成截断式 Thomas 簇过程(Thomas Cluster Process, TCP),记为 Φ_r 。用户的空间位置独立于基站,是一个均匀的 PPP。本文主要研究边缘用户通过中继节点协助上行通信,且边缘用户与关联基站距离大于 R ,因此,本文中边缘用户的空间位置可以理解为一个泊松洞过程,记为 ϕ_u ,如图 1 所示。

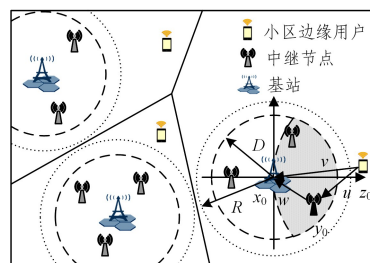


图 1 系统模型图

Fig. 1 System model

截断式 TCP 分布 Φ_r 是以 Φ_B 为父过程的簇过程,每个簇内的子节点密度为 λ_r ,簇内子节点位置服从方差为 σ^2 的高斯

分布,分布半径为 $D < R$,各子节点的位置分布相互独立,簇内中继节点位置分布的概率密度函数(Probability Density Function,PDF)表示如下:

$$f_{Y_p}(y_p) = \begin{cases} \frac{\exp(-\frac{\|y_p\|^2}{2\sigma^2})}{2\pi\sigma^2[1-\exp(-\frac{D^2}{2\sigma^2})]}, & \|y_p\| \in [0, D] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\|y_p\|$ 是中继节点到其簇心的欧几里得距离,令 $l = \|y_p\|$, 则 l 的 PDF 表示如下:

$$f_l(x) = \begin{cases} \frac{x \exp(-\frac{x^2}{2\sigma^2})}{\sigma^2[1-\exp(-\frac{D^2}{2\sigma^2})]}, & 0 \leq x \leq D \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

在本网络系统中,边缘用户关联与其距离最近的基站进行上行传输;考虑所有用户及中继节点都配备单天线且采用相同 OFDM 接入机制;假设边缘用户的密度足够大并考虑满载情况,即每个小区都有一个活跃的边缘用户被分配到典型资源块。令边缘用户与其关联基站的距离为 v ,由文献[16]可得 v 的 PDF 为:

$$f_v(x) = 2\lambda_B \pi x e^{-\lambda_B \pi(x^2 - R^2)}, x > R \quad (3)$$

2.2 传输模型

考虑双跳中继网络的上行链路,我们假设每个传输时隙为 T ,将每个时隙都划分为两个阶段,并在两跳传输中使用相同的资源块。在时间长度为 τT ($0 < \tau < 1$) 的第一阶段中,边缘用户 $z_i \in \psi_B$ 传输数据给关联的中继节点;然后,中继节点在剩余的时间段 $(1-\tau)T$ 内以放大转发的方式向其关联的基站转发边缘用户的数据。节点之间的传输是根据小区中的正交接入方案实现的,因此不存在小区内干扰,并且中继节点和基站的共信道干扰源分别是相邻小区中的边缘用户和中继节点。考虑系统满载的情况,由于频率复用,相邻小区中总有一个干扰边缘用户和一个干扰中继节点,分别用 $\hat{\Psi}$ 和 $\hat{\Phi}_r$ 表示使用相同资源块的小区边缘用户和中继节点。

本文考虑信号经历系数为 $\alpha > 2$ 的路径损耗以及均值为 1 的小尺度瑞利衰落,并忽略白噪声的影响。考虑具有最大发送功率约束的部分功率控制机制,则发送节点的发射功率为:

$$P^T(L) = \begin{cases} P_o L^\alpha, & L < (\frac{P_{\max}}{P_o})^{\frac{1}{\alpha}} \\ P_{\max}, & L \geq (\frac{P_{\max}}{P_o})^{\frac{1}{\alpha}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, L 是传输节点与所关联接收节点之间的距离, P_o 是接收机接收信号的目标功率, P_{\max} 是最大发射功率。 $\epsilon \in [0, 1]$ 是功率补偿因子,当 $\epsilon = 0$ 时表示没有功率控制,即发送功率为定值;当 $\epsilon = 1$ 时表示完全功率控制,即补偿所有的路径损耗。

2.3 SIR 模型

本上行网络中,边缘用户到其关联基站的一次完整通信过程可分为两个阶段:边缘用户至中继节点的第一跳链路及中继节点至其关联基站的第二跳链路。

在第一跳链路上,典型中继节点处的 SIR 为:

$$\gamma_w = \frac{P_{z_0} r_{z_0}^{-\alpha} h_{z_0}}{I_r} \quad (5)$$

其中, P_{z_0} 是典型边缘用户的发送功率, r_{z_0} 表示典型边缘用户到典型中继节点的距离, h_{z_0} 是小尺度瑞利衰落, $I_r = \sum_{z_i \in \Psi \setminus z_0} P_{z_i} \tilde{r}_{z_i}^{-\alpha} \tilde{h}_{z_i}$ 是典型中继节点处接收到的共信道干扰。

与第一跳相似,典型基站处的 SIR 可表示如下:

$$\gamma_{r_b} = \frac{P_{y_0} r_{y_0}^{-\alpha} h_{y_0}}{I_b} \quad (6)$$

其中, P_{y_0} 表示典型中继节点的发送功率, r_{y_0} 是典型中继节点到典型基站的距离, h_{y_0} 是小尺度瑞利衰落, $\sum_{y_i \in \hat{\Phi}_r \setminus y_0} P_{y_i} \tilde{r}_{y_i}^{-\alpha} \tilde{h}_{y_i}$ 是典型基站处接收到的共信道干扰。

文献[17]研究了基于放大转发工作方式的 MIMO 中继网络的网络性能。可知,所构建的中继网络模型的总链路 SIR 可表示为:

$$\gamma_{\text{tot}} = \frac{\gamma_w \gamma_{r_b}}{\gamma_w + \gamma_{r_b} + 1} \quad (7)$$

3 距离分布及信干比 meta 分布

3.1 距离分布

如图 1 所示,典型边缘用户 z_0 与关联基站 x_0 之间的距离用 v 表示,供 z_0 选择的潜在中继节点包括簇内与 z_0 的距离小于 v 的所有中继节点,即潜在的中继节点位于两个圆所产生的相交区域中,其中一个圆的圆心为 z_0 ,半径为 v ,另一个圆的圆心为 x_0 ,半径为 D 。如果存在多个潜在中继节点,则 z_0 关联距离最近的中继节点 y_0 。

给定距离 v ,令任意一个潜在中继节点到典型边缘用户的距离为 q 。由于中继节点的位置服从高斯分布,为了推导 q 的分布,不妨假设典型基站位于原点,边缘用户位于 $(v, 0)$,相应地,与边缘用户的距离为 q 的中继节点位置可表示为 $(v - q \cos \omega, q \sin \omega)$,根据中继节点的分布函数 $f_{Y_p}(y_p)$ 及余弦定理可推导 q 的 PDF 为:

$$f_{d_R}(q|v) = \frac{q \exp(-\frac{q^2 + v^2}{2\sigma^2})}{\sigma^2 [1 - \exp(-\frac{R^2}{2\sigma^2})]} \int_0^{\zeta(q,v)} \frac{1}{\pi} \times \exp(\frac{qv \cos \omega}{\sigma^2}) d\omega, q \in [v - D, v] \quad (8)$$

其中, $\zeta(q, v, D) = \arccos((q^2 + v^2 - D^2)/2qv)$ 。对 q 求积分可以得到对应的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF),即 $F_{d_R}(q|v) = \int_0^q f_{d_R}(x|v) dx$ 。

由于每个簇内潜在中继节点的数目是服从泊松分布的,假设典型边缘用户到最近中继节点的距离为 u ,则推导 u 的 CDF 可转化为求解在相交区域至少存在一个潜在中继节点的概率问题。因此,典型边缘用户与最近中继节点的距离 u 的 CDF 和 PDF 分别如式(9)和式(10)所示:

$$F_u(u|v) = 1 - \exp(-\pi D^2 \lambda_B F_{d_R}(u|v)) \quad (9)$$

$$f_u(u|v) = \pi D^2 \lambda_B f_{d_R}(u|v) \exp(-\pi D^2 \lambda_B F_{d_R}(u|v)) \quad (10)$$

基于距离 v 和 u ,令中继节点到典型基站的距离为 w ,由余弦定理可知 $w(\omega) = (u^2 + v^2 - 2uv \cos \omega)^{1/2}$,因此, w 的 PDF 与 ω 的分布有关,由 $f_{d_R}(q|v)$ 可得 ω 的 PDF 为:

$$f_w(\omega|u,v) = \frac{\exp(\frac{u\omega \cos \omega}{\sigma^2})}{\int_0^{\zeta(u,v,D)} \exp(\frac{u\omega \cos \beta}{\sigma^2}) d\beta} = \frac{\exp(\cos \omega)}{\int_0^{\zeta(u,v,D)} \exp(\cos \beta) d\beta}, \omega \leq \zeta(u,v,D) \quad (11)$$

因此,通过对 $f_w(\omega|u,v)$ 求积分并归一化可以推出 w 的 CDF,再对 CDF 求微分可以得到 w 的 PDF.

$$F_w(w|u,v) = \frac{\int_0^{\zeta(u,v,w)} w(\omega) \exp(\cos \omega) d\omega}{\int_0^{\zeta(u,v,D)} w(\beta) \exp(\cos \beta) d\beta}, w \in [v-u, D] \quad (12)$$

$$f_w(w|u,v) = \frac{w \exp(\frac{u^2 + v^2 - w^2}{2uw})}{\int_0^{\zeta(u,v,D)} w(\beta) \exp(\cos \beta) d\beta}, w \in [v-u, D] \quad (13)$$

其中, $\zeta(u,v,w) = \arccos((u^2 + v^2 - w^2)/2uv)$.

3.2 SIR 条件覆盖率及矩

基于点过程实现 $\Phi = \Phi_B \cup \hat{\Phi}_r \cup \hat{\Psi}$, 假设发送端在某一时刻正在发送信息,且接收端 SIR 的阈值为 θ ,则其关联的接收设备处的 SIR 条件覆盖率可定义^[18]如下:

$$P^\Phi(\theta) = \mathbb{P}(\gamma \geq \theta | \Phi) \quad (14)$$

3.2.1 第一跳

第一跳链路的 SIR 条件覆盖率表示如下:

$$P_{w_r}^\Phi(\theta) = P(\gamma_{w_r} \geq \theta | \Phi) = P(h_{z_0} \geq \theta \sum_{z_i \in \hat{\Psi} \setminus z_0} \frac{P_{z_i} \tilde{r}_{z_i}^{-\alpha} \tilde{h}_{z_i}}{P_{z_0} r_{z_0}^{-\alpha}} | \Phi) \stackrel{(a)}{=} \mathbb{E}_\Phi[\exp(-\theta \sum_{z_i \in \hat{\Psi} \setminus z_0} \frac{P_{z_i} \tilde{r}_{z_i}^{-\alpha} \tilde{h}_{z_i}}{P_{z_0} r_{z_0}^{-\alpha}}) | \Phi] \stackrel{(b)}{=} \prod_{z_i \in \hat{\Psi} \setminus z_0} (1 + \theta \frac{P_{z_i} \tilde{r}_{z_i}^{-\alpha}}{P_{z_0} r_{z_0}^{-\alpha}})^{-1} \quad (15)$$

其中,(a),(b)均为对瑞利衰落求期望。

尽管基站和边缘用户的位置服从 PPP,但干扰用户不服从 PPP,使得上行链路的性能分析难以推导精确解析式。为了准确地捕捉上行网络中干扰用户的空间分布,本文采用了对联函数来刻画干扰用户分布的密度强度。

在单层上行链路网络中,基站与其他小区干扰源的对关联函数 $g_{\lambda_B}(r)$ 定义^[15]如下:

$$g_{\lambda_B}(r) = \frac{dK(r)}{2\pi r dr} = \frac{d}{2\pi r N \lambda_B dr} [\mathbb{E}^0[\Phi_I(b(o,r))]] \quad (16)$$

其中, $\mathbb{E}^0[\Phi_I(b(o,r))]$ 表示典型基站半径 r 范围内的其他小区干扰节点数目的均值, N 表示每个簇内子节点的数目。在文献[15]中,通过拟合验证给出了上行链路干扰节点分布最佳近似密度函数: $g_{\lambda_B}(r) = 1 - e^{-(5/12)\pi\lambda_B r^2}$, $K(r) = \pi r^2 + 5/12e^{-(5/12)\pi\lambda_B r^2} - 5/12$ 。因此,干扰节点可建模成密度函数为 $\lambda_B g_{\lambda_B}(r)$ 的 PPP。

由于采用了功率控制,因此第 k 个干扰用户的发送功率 P_{b_r} 与其到所选择的中继节点的距离相关。为了简化模型和分析,我们对距离其关联基站为 v_k 的干扰用户发送功率求期望,即发送功率 P_{b_r} 只取决于其与所关联的基站的距离 v_k ,则 P_{b_r} 可被近似为:

$$P_z(v_k) = \int_{v_k-D}^{v_k} f_u(u|v_k) P^T(u) du。$$

因此, $P_w^\Phi(\theta)$ 的 b 阶矩 $M_{w_r}(b)$ 可表示如下:

$$M_{ab}(b) = \mathbb{E}_\Phi[\prod_{z_i \in \hat{\Psi} \setminus z_0} (1 + \theta \frac{P_{z_i} \tilde{r}_{z_i}^{-\alpha}}{P_{z_0} r_{z_0}^{-\alpha}})^{-b}] \stackrel{(a)}{=} \mathbb{E}_{u,w}[\exp(-\lambda_B \int_0^{2\pi} \int_R x g_{\lambda_B}(x) (1 - \int_R \frac{f_v(t)}{F_v(x)} (1 + \theta \frac{P_z(t) d_{ir}^{-\alpha}}{P_{z_0} u^{-\alpha}})^{-b}) dt dx d\theta)] \stackrel{(b)}{=} \mathbb{E}_{u,w}[G(u,w)] = \int_R^\infty f_v(v) \int_{v-D}^v f(u|v) \int_{v-u}^D G(u,w) \times f_w(w|v,u) d\omega du dv \quad (17)$$

其中,(a)遵循 PPP 的概率生成函数, x, w 分别表示典型基站到干扰用户、典型中继节点的距离, $d_{ir} = (x^2 + w^2 - 2xw \cos t)^{1/2}$ 表示干扰用户到典型中继节点的距离,(b)是对典型用户到典型基站的距离 v 以及两跳链路距离 u, w 求期望。尽管 $M_{w_r}(b)$ 不是闭式表达式,但可通过数值积分的方法求解,其正确性将通过第 4 节的仿真进行验证。

3.2.2 第二跳

在第二跳链路中,共信道干扰源是其他小区的中继节点,并且每个干扰中继节点都是分布在以各自关联的基站为中心、 D 为半径的圆形区域内。因此,干扰中继节点的位置分布可以看成以基站为父过程的特殊簇过程,即每个簇中只有一个子节点。同理,为了简化表达分析,我们用 $P_r = \mathbb{E}_w[P^T(w)]$ 近似第 y 个干扰中继节点的发送功率 P_r ,其中, $\mathbb{E}_w[K(w)] = \int_R^\infty f_v(v) \int_{v-D}^v f_u(u|v) \int_{v-u}^D K(w) f_w(w|u,v) d\omega du dv$ 。因此,与第一跳链路中 $P_w^\Phi(\theta)$ 的推导类似,第二跳链路的 SIR 条件覆盖率 $P_{r_b}^\Phi(\theta)$ 表示如下:

$$P_{r_b}^\Phi(\theta | \Phi) = \prod_{y \in \hat{\Phi}_r \setminus y_0} (1 + \theta \frac{P_r \tilde{r}_{y_i}^{-\alpha}}{P_{y_0} w^{-\alpha}})^{-1} \quad (18)$$

尽管簇间干扰节点分布在每个簇内的不同位置,但对于上行网络的大规模分析,相对于典型基站的点位置,其他簇中的子节点与簇心可视为在同一位置^[19]。对上行网络中簇过程的这种处理也可理解为复杂的非均匀 PPP^[16]。因此, $P_{r_b}^\Phi(\theta)$ 的 b 阶矩 $M_{r_b}(b)$ 表示如下:

$$M_{r_b}(b) = \mathbb{E}_\Phi[\prod_{y \in \hat{\Phi}_r \setminus y_0} (1 + \theta \frac{P_r \tilde{r}_{y_i}^{-\alpha}}{P_{y_0} w^{-\alpha}})^{-b}] \stackrel{(a)}{=} \mathbb{E}_w[\exp(-2\pi\lambda_B \int_0^\infty (1 - (1 + sx^{-\alpha})^{-b}) x dx)] = \mathbb{E}_w[\exp(-2\pi\lambda_B \int_0^\infty \sum_{n=1}^b \binom{b}{n} (-1)^{n+1} (1 + s^{-1} x^\alpha)^{-n} x dx)] \stackrel{(b)}{=} \mathbb{E}_w[\exp(-\frac{2}{\alpha} \pi\lambda_B s^{2/\alpha} \sum_{n=1}^\infty \binom{b}{n} (-1)^{n+1} B(\frac{2}{\alpha}, n - \frac{2}{\alpha}))] \quad (19)$$

其中,(a)遵循 PPP 的概率生成函数, s 表示 $\theta P_r / (P_{y_0} w^{-\alpha})$, (b)根据 beta 函数的定义获得,即:

$$\int_0^\infty x^{\nu-1} (1 + \beta x^\rho)^{-\nu} dx = \frac{1}{\rho} \beta^{-\frac{\nu}{\rho}} B(\frac{\nu}{\rho}, \nu - \frac{\nu}{\rho}) \quad (20)$$

3.3 信干比 meta 分布

信干比 meta 分布 $\bar{F}_{P_{tot}}(x)$ 是总链路 SIR 条件覆盖率

$P_{\text{tot}}^{\Phi}(\theta)$ 的互补累积函数,定义如下^[14]:

$$\bar{F}_{P_{\text{tot}}}^{\Phi}(x) = \mathbf{P}(P_{\text{tot}}^{\Phi}(\theta) > x), x \in [0, 1] \quad (21)$$

由于系统模型中的点过程具有遍历性,因此,信干比 meta 分布的物理含义可理解为所有链路中 SIR 条件覆盖率 $P_{\text{tot}}^{\Phi}(\theta)$ 大于 x 的链路所占的比例。其中 $P_{\text{tot}}^{\Phi}(\theta)$ 的上界可由 γ_w, γ_{rb} 表示,即:

$$\begin{aligned} P_{\text{tot}}^{\Phi}(\theta) &= \mathbf{P}\left(\frac{\gamma_w \cdot \gamma_{rb}}{\gamma_w + \gamma_{rb} + 1} \geq \theta \mid \Phi\right) \\ &= \mathbf{P}\left(\gamma_{rb} \geq \frac{\theta(\gamma_w + 1)}{\gamma_w - \theta} \mid \Phi\right) \\ &= \int_{\theta}^{\infty} f_{\gamma_{rb}}(y \mid \Phi) P(\gamma_{rb} \geq \frac{\theta(y+1)}{y-\theta} \mid \Phi) dy \\ &< \int_{\theta}^{\infty} f_{\gamma_{rb}}(y \mid \Phi) P(\gamma_{rb} \geq \theta \mid \Phi) dy \\ &= P_w^{\Phi}(\theta) P_{rb}^{\Phi}(\theta) \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $P_{\text{tot}}^{\Phi}(\theta)$ 对应的 b 阶矩 $M_{\text{tot}}(b)$ 的上界可表示为 $M_{\text{tot}}(b) < M_w(b) M_{rb}(b)$ 。结合 Gil-Pelaez 定理及虚阶矩 $M_{\text{tot}}(j\omega)$ 可以求出信干比 meta 分布的精确解,但计算十分困难。为降低计算复杂度,我们使用矩匹配法,利用 beta 分布近似 $\bar{F}_{P_{\text{tot}}}^{\Phi}(x)$ ^[20], 并使用 M_1, M_2 分别表示 $P_{\text{tot}}^{\Phi}(\theta)$ 的一阶矩和二阶矩。由于 $\bar{F}_{P_{\text{tot}}}^{\Phi}(x)$ 的取值在 $[0, 1]$ 之间,因此上行中继传输的信干比 meta 分布可以用如下的 beta 分布近似:

$$\bar{F}_{P_{\text{tot}}}^{\Phi}(x) \approx 1 - I_x\left(\frac{\beta M_1}{1 - M_1}, \beta\right), x \in [0, 1] \quad (23)$$

其中, $\beta = (M_1 - M_2)(1 - M_1)(M_2 - M_1^2)^{-1}$; $I_x(a, b)$ 是归一化的不完全 beta 函数,即 $I_x(a, b) = B^{-1}(a, b) \int_0^x t^{a-1}(1-t)^{b-1} dt$, 其中, $B(a, b)$ 是 beta 函数。

4 实验分析

我们利用蒙特卡洛仿真实验对以上理论推导结果的正确性进行验证,对比了所提出的放大转发中继传输模型的仿真与理论结果,并展示了小区边缘用户直接与基站通信的性能仿真结果,以比较直接通信与中继通信的性能差异。模拟实验在 100 km^2 的区域中进行,除非特别指定,我们使用以下实验参数作为默认值: $\lambda_B = 0.08 \text{ BSs/km}^2$, $R = 2 \text{ km}$, $\lambda_r = 20 \text{ relays/km}^2$, $P_{\text{max}} = 100 \text{ mW}$, $P_o = 10^{-9} \text{ mW}$, $\alpha = 4$, $\theta = 0 \text{ dB}$, $\epsilon = 0.5$ 。

图 2 给出了中继节点的分布参数对中继网络 SIR 覆盖率的影响,其中 D 表示中继节点围绕基站分布的半径, σ 是高斯分布的标准差。

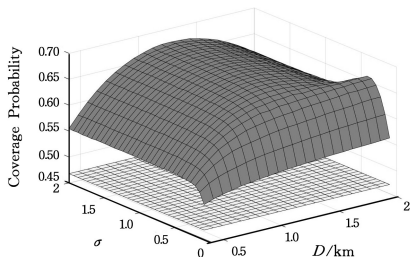


图 2 上行 SIR 覆盖率随中继节点分布参数变化图

Fig. 2 Uplink SIR coverage probability varies with distribution parameters of relay nodes

首先,图中底部的浅灰色平面表示边缘用户直接与基站

通信的 SIR 覆盖率,显而易见,对于边缘用户而言,由于中继节点参与传输减小了目标链路的通信距离,使得接收端接收到的有用信号功率增加,因此中继协作传输的覆盖率性能要优于直接通信。其次,图中的曲面展现了中继节点分布参数的变化对中继网络覆盖率的影响趋势,这对后续优化网络性能的工作提供了很好的帮助。由图中的曲面图可知,在本网络设定的参数下,当 D 约取 1.2 km , σ 约取 2 时,系统的覆盖率性能最优。

图 3 给出了中继节点分布参数对网络信干比 meta 分布的影响。可知,理论结果和仿真结果的曲线基本吻合,表明了理论推导的准确性。通过对比几组中继节点分布参数下的信干比 meta 分布,可以发现,当 D 为 1.2 km , σ 为 2 时,信干比 meta 分布最好,此时网络中覆盖率大于 0.6 的链路约占 65% ;而当 D 为 0.4 km , σ 为 0.1 时,网络中覆盖率大于 0.6 的链路减少至 38% 左右,但依然优于直接通信时的 30% ,这同时也验证了图 2 的结果分析。

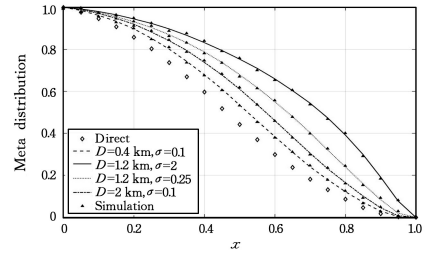


图 3 中继节点分布参数对信干比 meta 分布的影响

Fig. 3 Impact of relay nodes distribution parameters on SIR meta distribution

图 4 比较了 SIR 覆盖率的阈值 θ 对信干比 meta 分布的影响,描述了网络中覆盖率大于某一值的用户占比情况随 θ 的不同发生变化。由图 4 可知,随着 θ 增加,信干比 meta 分布下降,说明网络性能变差。例如,当 $\theta = -10 \text{ dB}$ 时,网络中 SIR 覆盖率大于 0.8 的边缘用户占 86% 左右;而当 $\theta = 10 \text{ dB}$ 时,只有约 3% 的边缘用户的 SIR 覆盖率能达到 0.8 。产生这种差异的主要原因是,对于高阈值 θ 的通信链路,接收端需要接收更多的有用信号功率才能成功解调出目标信号。

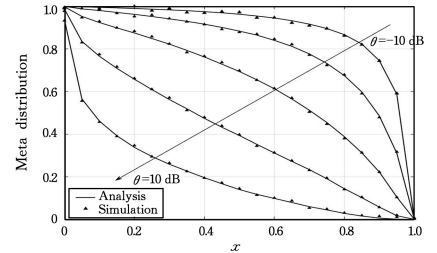


图 4 SIR 阈值 θ 对信干比 meta 分布的影响

Fig. 4 Impact of SIR threshold θ on SIR meta distribution

图 5 给出了在不同的功率补偿因子 ϵ 下, SIR 覆盖率随阈值 θ 的变化情况。观察图中曲线的变化可以发现,曲线在阈值 θ 约为 7 dB 处相交,当 θ 小于 7 dB , 功率补偿因子 ϵ 为 0.5 时的覆盖率性能相比于其他两种 ϵ 取值最优;然而,当 θ 大于 7 dB 时,情况正好相反, ϵ 取 1 时覆盖率相对最大。这是因为当链路成功通信所需的 SIR 阈值小时,接收端只需要接收很小的信号的功率就能成功接收,此时,通过适当地减小功率补

偿因子可以减小接收端处接收到的共信道干扰。当阈值 θ 较大时,接收端需要接收更大的有用信号功率,虽然增加补偿因子 ϵ 会同时增加典型用户以及干扰用户的发送功率,但干扰信号经历的大尺度路径衰落会大大削弱干扰用户发送功率增加所带来的影响。

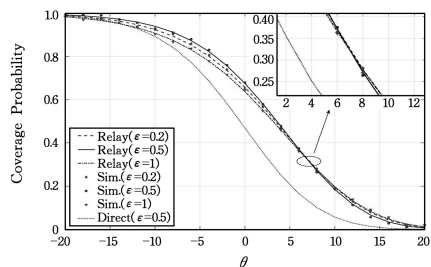


图5 功率补偿因子 ϵ 对 SIR 覆盖率的影响

Fig. 5 Impact of ϵ on SIR coverage probability

结束语 本文研究了基于随机几何的放大转发中继网络的信干比 meta 分布,为了改善小区边缘用户的通信质量,构建了一个在基站周围部署中继节点的网络模型,使边缘用户关联距离最近的中继节点进行上行通信。我们利用 beta 分布近似信干比 meta 分布,并对比了理论结果与仿真结果,验证了理论推导以及 beta 近似的准确性。除此之外,本文还研究了不同参数设置对网络性能的影响,为后续研究网络性能优化的工作提供了参考。

参考文献

- [1] SHAMGANTH K, SIBLEY M J N. A survey on relay selection in cooperative device-to-device (D2D) communication for 5G cellular networks[C]// 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). Chennai: IEEE, 2017: 42-46.
- [2] ELKOTBY H, VU M. Uplink User-Assisted Relaying in Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5468-5483.
- [3] WU S, ATAT R, MASTRONARDE N, et al. Improving the Coverage and Spectral Efficiency of Millimeter-Wave Cellular Networks Using Device-to-Device Relays[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(5): 2251-2265.
- [4] XIAO S, ZHOU X, YUAN W Y, et al. Energy-efficient relay placement and power allocation for two-hop D2D relay networks [C]// 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Paris: IEEE, 2017: 1-6.
- [5] WU G, XU P. Analysis of capacity in vehicular device-to-device relay networks with multi-user case[J]. IET Communications, 2018, 12(12): 1460-1467.
- [6] LI W, FAN B Y. Applications Research of Network Coding in Wireless Relay Networks [J]. Computer Engineering, 2011, 37(7): 15-17.
- [7] DENG G H, SHAO Y B, XIA T F. Cooperation Multiplexing: Research on Realizing Higher Spectrum Efficiency in Multi-antenna Relay Network[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2011(12): 94-99.
- [8] CHU W S, ZHANG Q G. Power Allocation Optimization Strategy Based on Full-du185plex Relay Network [J]. Computer En-

gineering, 2018, 44(1): 149.

- [9] ELSAWY H, HOSSAIN E, HAENGGI M. Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(3): 996-1019.
- [10] SINGH S, ZHANG X, ANDREWS J G. Joint rate and SINR coverage analysis for decoupled uplink-downlink biased cell associations in HetNets[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5360-5373.
- [11] YU J F, SUN C, WANG S X, et al. Research on Uplink Interference Coordination Technology in LTE[J]. Computer Engineering, 2012, 38(20): 56-59.
- [12] ZHONG H D, XU K, HOU L Y. Uplink Adaptive Power Control in Ka Band Satellite Communication [J]. Computer Engineering, 2009, 35(10): 107-108.
- [13] LIU F, SHANG Q F, HUANG L F, et al. TD-LTE Terminal Performance Optimization [J]. Computer Engineering, 2011, 37(19): 255-257.
- [14] MARTIN-VEGA F J, GOMEZ G, AGUAYO-TORRES M C, et al. Analytical Modeling of Interference Aware Power Control for the Uplink of Heterogeneous Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(10): 6742-6757.
- [15] HAENGGI M. User Point Processes in Cellular Networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(2): 258-261.
- [16] HAENGGI M. Stochastic Geometry for Wireless Networks [M]. Cambridge, U. K: Cambridge Univ. Press, 2012.
- [17] ZHOU S, NORDIO A, CHIASSERINI C, et al. MIMO Relay Networks: Scheduling and Outage Probability [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(4): 1256-1259.
- [18] HAENGGI M. The meta distribution of the SIR in poisson bipolar and cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2577-2589.
- [19] SALEHI M, TABASSUM H, HOSSAIN E. Meta Distribution of SIR in Large-Scale Uplink and Downlink NOMA Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(4): 3009-3025.
- [20] IBRAHIM H, TABASSUM H, NGUYEN U T. Meta Distribution of SIR in Dual-Hop Internet-of-Things (IoT) Networks [C]// ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai: IEEE, 2019: 1-7.



SUN Hai-hua, born in 1996, postgraduate. His main research interests include wireless communication theory and cooperative communications.



ZHOU Si-yuan, born in 1985, Ph.D., associate professor. His main research interests include wireless communication theory, cooperative communications, beyond 5G communication and Internet of Things.