

移动边缘计算增强的超密集网络上行传输性能分析与基站配置设计^①周天琪^{②*} 吴文君^{③*} 李海灵^{**} 董君宇^{*} 高 巨^{*}

(* 北京工业大学信息学部 北京 100124)

(** 国家计算机网络应急技术处理协调中心 北京 100029)

摘 要 在引入移动边缘计算(MEC)技术的超密集网络(UDN)中,网络性能受无线传输链路质量和基站计算资源部署的共同影响。本文以小型基站接收干扰信号的统计特性分析为基础,对 UDN 与 MEC 结合场景的上行空间遍历容量进行分析,并根据空间业务强度和小基站计算服务排队系统的稳定性约束关系,进行小基站配置设计。首先,采用空间泊松点过程对干扰源用户分布进行建模,同时考虑无线信道的多天线与小尺度衰落特性,以小基站部署密度为变量分析上行用户信干比的统计特性及变化规律;然后,根据排队论计算空间业务强度与 MEC 服务器计算能力之间的约束关系;最后,采用数值仿真验证了信干比与基站密度关系分析的正确性,得出了空间遍历容量的收敛趋势,并给出了小基站与 MEC 服务器配置设计的例子。

关键词 超密集网络(UDN);移动边缘计算(MEC);空间泊松点过程(SPPP);遍历容量

0 引言

在 5G 移动通信网络中,超密集网络(ultra-dense network,UDN)与移动边缘计算(mobile edge computing,MEC)技术备受关注。一方面,UDN 通过密集的基站部署,能够大幅提升频率复用率,提供更高的传输速率^[1];另一方面,MEC 技术在靠近用户的网络边缘快速分析处理用户数据^[2],能够降低用户服务时延,缓解大量数据回传带给核心网的压力。两者的结合能够有效满足新兴应用对高传输带宽和低时延的要求。

在 UDN 中,由于小型基站密集部署,干扰性能分析研究颇受重视。基于小基站随机部署特点而引入的空间泊松点过程(space Poisson point process,SPPP)模型对该领域的分析研究起到了极大的推动作用。与传统网格型基站建模对比,泊松分布建模

在性能分析和干扰建模方面均具有较高的应用价值^[3]。文献[4]在采用正交频分多址技术的无线蜂窝网络中采用 SPPP 对 femto 基站和用户分布进行建模,在考虑路径损耗和阴影衰落的情况下研究由 femto 基站引起的跨层干扰,得到对 femto 层配置的约束条件。文献[5]以减轻宏小区用户受到来自 femtocell 下行传输干扰为目的,对用户空间分布进行了 SPPP 建模,分析了由干扰造成的用户中断概率,并以此为基础设计允许 femtocell 与宏小区复用频率资源的最小距离,提出了围绕受干扰宏小区用户的动态 femtocell 排除区域方案。文献[6]将异构网络中小基站和移动用户的空间位置分布建模为独立的 SPPP 模型,在考虑包含直射路径和非直射路径的多径信道模型的情况下,分析了异构网络下行链路覆盖概率的表达式,并以此为基础计算了网络的空间频谱效率和能量效率。文献[7]运用各向同

① 国家自然科学基金民航联合研究基金(U1633115),北京市教委科技计划一般项目(KM201810005027)和北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金(L192002)资助项目。

② 女,1994年生,硕士生;研究方向:无线通信与移动边缘计算;E-mail: zhoutianqi1994@163.com

③ 通信作者,E-mail: wenjunwu@bjut.edu.cn

(收稿日期:2020-09-03)

性的 SPPP 模型建模小基站的随机位置,进行干扰性能分析,并以用户中断概率为约束条件,提出了一种基于概率的小基站自适应选择传输与否的方案。

在 MEC 增强的 UDN 场景下,研究方向主要集中在计算卸载、移动性管理、任务资源分配等方案设计。其中文献[8]提出了一种有效的基于任务和资源协同分配的卸载方案,在保证用户设备电池寿命的前提下,最大限度地减少延迟。文献[9]提出了一种以用户为中心的能量感知移动性管理方案,在上行链路数据传输的用户总能耗约束下,最小化任务的平均时延。文献[10]针对 UDN 中的任务卸载和信道资源分配问题,将任务卸载描述为非线性规划问题,并提出了一种基于差分进化算法的高效任务卸载和信道资源分配方案,具有良好的收敛性。

然而,当前针对 MEC 增强的 UDN 系统理论性能分析研究尚不充分。现有理论分析主要关注 UDN 中的干扰,考虑 UDN 传输性能和 MEC 服务器排队性能的网络整体性能分析研究则并不充分。文献[11]虽针对密集部署多天线射频拉远头的云计算接入网遍历容量进行了研究,但其分析中关注的重点是单链路通信的性能,并没有建模用户与基站的空间分布,对小区空间统计性能的研究不足。

针对上述问题,本文从 MEC 增强的 UDN 空间统计性能角度出发,采用 SPPP 对空间节点分布进行建模,同时考虑无线信道的多天线与小尺度衰落特性,以小基站部署密度为变量分析上行用户信干比的统计特性及变化规律;然后,考虑 MEC 场景特点,根据排队论计算空间业务强度与 MEC 服务器计算能力之间的约束关系。论文通过仿真验证了信干比与基站密度之间理论关系分析的正确性,并最终确定了在移动边缘计算服务器排队系统稳定前提下的最大化空间遍历容量小基站部署方案。

本文的主要贡献如下:(1)在采用 SPPP 建模移动用户和通信设备的空间分布的基础上,增加了无线信道大规模多天线特性和小尺度衰落特性的建模与分析,得到了网络在空间上的干扰统计特性。(2)针对 MEC 技术,采用排队论分析其计算服务的排队系统稳定性条件,并结合超密集网络的干扰特性,得到了任务请求、计算资源和传输资源相匹配的

基站配置参数。

本文第1节介绍 SPPP 及其相关定理;第2节介绍了系统模型;第3节针对各类信号统计特性进行分析,包括上行接收有效信号统计特性、上行干扰信号统计特性和信干比的统计特性,并分析移动边缘计算服务器与任务计算请求的排队系统稳定性边界条件;第4节对理论分析进行了数值仿真验证,并通过仿真方法进行了系统配置参数选择;第5节给出了论文的结论。

1 空间泊松点过程

1.1 空间泊松点过程的定义

泊松过程是描述具有完全随机性的随机过程的重要理论模型^[12]。定义一个可能取值为正整数的一维随机变量 X 服从泊松分布,则有:

$$P\{X = n\} = \pi_n(u) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

其中, μ 为泊松分布参数,表示数学期望 $E(X) = \mu$, 对于任意 $\mu > 0$, 有:

$$\sum_{n=0}^{\infty} n \pi_n(u) = \mu \quad (2)$$

在二维的情况下,定义 Π 为一个在区域 S 上的可数集,对于 S 上的测试集 A , 定义计数函数:

$$N(A) = \#\{\Pi \cap A\}$$

表示 Π 落在 A 上的点的数量。若 $N(A)$ 服从均值为 μ 的泊松分布,则 Π 为 S 上的 SPPP。

在利用 SPPP 进行空间干扰分析的过程中,涉及到 2 个非常重要的定理,即 Campbell 定理和 Marking 定理^[12]。

1.2 Campbell 定理

针对在空间 S 上平均测度为 μ 的泊松过程 Π , 定义可测函数 $f: S \rightarrow R$ 。当满足条件:

$$\int_S \min(|f(x)|, 1) \mu(dx) < \infty \quad (4)$$

时,对 Π 中所有点的函数 f 求和:

$$\Sigma = \sum_{X \in \Pi} f(X) \quad (5)$$

绝对收敛。此时,该求和的矩母函数为

$$E(e^{\theta \Sigma}) = \exp\left\{\int_S (e^{\theta f} - 1) \mu(dx)\right\} \quad (6)$$

进一步地,可以得到其数学期望和方差分别为

$$E(\Sigma) = \int_S f(x) \mu(dx) \quad (7)$$

$$\text{var}(\Sigma) = \int_S f^2(x) \mu(dx) \quad (8)$$

1.3 Marking 定理

对集合 Π 上任意一点 Y , 为其关联一个取值在 M 空间上的随机变量 m_Y (Y 的标记)。 m_Y 的分布取决于 Y , 且不受 Π 上其他点影响。对于不同的 Y , m_Y 相互独立。则 (Y, m_Y) 可以看作空间 $S \times M$ 上的随机点 Y^* , 全体 Y^* 形成一个任意可数集

$$\Pi^* = \{(Y, m_Y); Y \in \Pi\} \quad (9)$$

且 Π^* 是空间 $S \times M$ 上的泊松过程。

根据 Marking 定理,令 $\mathbb{C} = S \times B$, 集合 Π^* 的平均测度 μ^* 可以表示为

$$\mu^*(\mathbb{C}) = \iint_{(y, m) \in \mathbb{C}} \mu(dy) p(y, dm) \quad (10)$$

2 系统模型

本文针对 MEC 增强的 UDN 进行研究,关注一个宏小区中部署多个小小区的场景,主要分析小小区层内的干扰以及部署在小基站 (small eNB, SeNB) 的 MEC 服务器排队系统稳定性,进而指导网络部署。

2.1 节点空间分布模型

假设小基站和用户在空间中均完全随机分布,采用 SPPP 对节点空间分布进行建模。设空间中用户的集合为 Π_u , 其密度为 λ_u , 小基站的集合为 Π_s , 其密度为 λ_s 。每个基站服务区域相当于小小区,考虑到 UDN 网络特点,小基站覆盖区域允许交叠。

根据常见的正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术特点,单个基站在单个子信道上通常只服务一个用户。因而,在只考虑同频干扰的干扰分析时,可以对单个子信道进行观察,考虑每个小区在观测子信道上服务的一个用户即可。

由于空间中所有节点具有对等性,本文可任意选定一个用户作为观察目标。由于存在小小区之间重叠覆盖,且所有用户的位置具有完全随机性,因而该观察目标用户的同频干扰用户空间分布可视为

Π_u 的一个随机分解 Π'_u , 根据 SPPP 性质, Π'_u 仍然是一个 SPPP, 且其密度为 λ_s 。UDN 节点空间部署的示意图如图 1 所示。

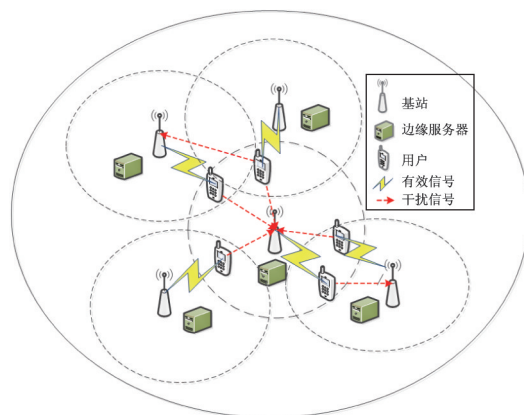


图 1 UDN 节点空间部署图

2.2 无线信道模型

根据 5G 特点,本文考虑采用大规模多天线技术的无线通信链路。在计算接收信号和干扰功率强度时,考虑无线信道的路径损耗和小尺度衰落特性。

以观察目标用户的服务基站为中心,确定干扰用户的空间分布坐标点,则上行传输中心基站接收来自任意位置用户 i 的功率为

$$P_i = P_t r_i^\alpha H_i \quad (11)$$

其中, P_t 为用户上行发射功率, r_i 为用户 i 距离中心基站的距离, α 为路径损耗系数, H_i 为考虑小尺度衰落的多天线功率包络。设定天线数目为 L , 则第 i 个干扰用户的小尺度衰落值 H_i 表示为

$$H_i = \sum_{l=1}^L |h_{il}|^2 \quad (12)$$

其中, h_{il} 为基站和第 i 个用户第 l 根天线的小尺度衰落值,建模为均值为 0、方差为 1 的高斯随机变量,此时 H_i 服从 gamma 分布 $H_i: \Gamma(L, 1)$ [11]。

2.3 无线传输服务模型

本文将单基站对传输业务请求的服务建模为 M/M/1 排队模型。

对于系统中的每个用户进行对等建模,假设需要卸载到 MEC 服务器的业务服从泊松到达,且传输业务请求的平均速率为 $\overline{D_{r,u}}$ bit/s。因而在单位面积内,所有用户传输业务请求的平均速率为 $\lambda_u \overline{D_{r,u}}$ bit/s。考虑到小基站与用户位置的随机性,在理想的接入

选择条件下,每个基站平均服务的用户量相同,因而,单个基站服务的传输业务请求平均速率为 $D_{r,u} = \lambda_u \overline{D_{r,u}} / \lambda_s$ bit/s。

本文采用香农公式对单个基站的平均传输服务能力进行建模,即

$$\overline{R_s} = B_w \int \log_2(1 + v) f(v) dv \quad (13)$$

其中, v 表示上行传输的信干比,而 $f(v)$ 表示 v 的概率密度分布函数 (probability density function, PDF), B_w 表示基站带宽。

在单基站平均传输服务能力的基础上可以进一步计算得到空间遍历容量为

$$\overline{R_{\text{area}}} = \lambda_s \overline{R_s} \quad (14)$$

2.4 MEC 计算服务模型

MEC 服务器部署在小基站,当业务请求通过信道传输到达小基站节点后,将卸载到 MEC 服务器上进行计算服务。不失一般性,本文将单基站 MEC 服务器对计算业务请求的服务同样建模为 M/M/1 排队模型。

本文采用 CPU cycles/s (cc/s) 表示计算请求速率和计算服务能力。设单基站 MEC 服务器的平均计算服务能力为 $\overline{C_s}$ cc/s。与传输业务请求模型类似,假设每个用户的计算业务请求服从泊松到达,其平均速率为 $\overline{D_{c,u}}$ cc/s,则单基站 MEC 服务器的计算业务请求平均速率为 $D_{c,u} = \lambda_u \overline{D_{c,u}} / \lambda_s$ cc/s。

3 性能分析

本节先对上行传输信干比统计特性进行分析,在此基础上得到 UDN 中单基站传输服务的平均速率,进一步根据排队系统稳定性条件,得到系统中业务请求与资源配置之间的约束关系。

3.1 上行传输信干比统计特性分析

多基站多用户通信场景中信干比 (signal to interference ratio, SIR) v 可以表示为

$$v = \frac{P'_s}{P'_I} \quad (15)$$

P'_s 表示观察目标用户传输到其服务基站的有用信号功率,表示为

$$P'_s = P_t r_s^\alpha H_s \quad (16)$$

其中 r_s 为观察目标用户到其服务基站的距离, H_s 表示观察目标用户与其服务基站之间无线信道的小尺度衰落。

P'_I 表示目标用户服务基站接收到的所有干扰信号功率之和,表示为

$$P'_I = \sum_{i \in \Pi'_u} P_i \quad (17)$$

为了简化分析,对 SIR 公式进行适当转化,得到:

$$v = \frac{P_t r_s^\alpha}{\sum_{i \in \Pi'_u} P_t r_i^\alpha \frac{H_i}{H_s}} \quad (18)$$

此时,令

$$P_s \triangleq P_t r_s^\alpha \quad (19)$$

$$P_I \triangleq \sum_{i \in \Pi'_u} P_t r_i^\alpha \frac{H_i}{H_s} \quad (20)$$

接下来分析 P_s 的统计特性。观察用户可以等概率出现在系统中任意位置,其与服务基站的距离 r_s 的 PDF 表示为

$$f_r(r_s) = \frac{2r_s}{R_{\max}^2 - R_{\min}^2}, R_{\min} < r_s < R_{\max} \quad (21)$$

其中, $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 分别为小基站的覆盖半径和基站与用户间的最小距离限制。令 $\beta = R_{\max}^2 - R_{\min}^2$, 计算可得 P_s 的 PDF 为

$$\begin{aligned} f_{P_s}(P_s) &= f_r \left[\left(\frac{P_s}{P_t} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right] \left| \frac{1}{\alpha} \left(\frac{P_s}{P_t} \right)^{\frac{1}{\alpha}-1} P_t^{-1} \right| \\ &= -\frac{2}{\alpha\beta} P_t^{-\frac{2}{\alpha}} P_s^{\frac{2}{\alpha}-1} \end{aligned} \quad (22)$$

下一步分析 P_I 的统计特性。由于同频干扰用户集合 Π'_u 是 SPPP, 干扰用户与观察目标用户服务基站之间距离 r_i 的 PDF 可表示为

$$f(r_i) = 2\pi\lambda_s e^{-\lambda_s \pi r_i^2}, r_i > 0 \quad (23)$$

定义

$$\tilde{H}_i = \frac{H_i}{H_s} \quad (24)$$

则 $\tilde{H}_i$ 对 Π'_u 中各点独立, 根据 Campbell 定理, 可以得到 P_I 的矩母函数为

$$\begin{aligned} \Phi_{P_I}(\omega) &= E[e^{j\omega P_I}] \\ &= \exp \left[\iint_{(i, \tilde{H}) \in \mathbb{C}} (e^{j\omega P_t r_i^\alpha \tilde{H}_i} - 1) \mu(di, d\tilde{H}_i) \right] \end{aligned} \quad (25)$$

当 $\alpha = -4$ 时,可以得到 $\Phi_{P_I}(\omega)$ 和干扰信号的 PDF 为(推导过程见附录 I)

$$\Phi_{P_I}(\omega) = \exp\left\{-\pi\sqrt{\frac{\pi}{2}}(1-j)B_2\lambda_s\omega^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (26)$$

$$f_{P_I}(P_I) = \frac{\pi}{2}B_2\lambda_sP_I^{-\frac{3}{2}}\exp\left(-\frac{\pi^3B_2^2\lambda_s^2}{4P_I}\right) \quad (27)$$

其中

$$B_2 = \frac{1}{2}\pi P_I^{\frac{1}{2}}\prod_{k=1}^{L-1}\left(1-\frac{1}{4k^2}\right) \quad (28)$$

根据式(22)和式(27)可以进一步分析得到计算 SIR 在对数域(dB)的累积概率分布(cumulative distribution function, CDF)和 PDF(推导过程见附录 II)。

$$\begin{aligned} F(v) &= \Pr\left\{10 \cdot \lg \frac{P_s}{P_I} \leq v\right\} \\ &= [\exp(B_3R_{\max}^4 10^{\frac{v}{10}}) - \exp(B_3R_{\min}^4 10^{\frac{v}{10}})] \\ &\quad B_5 10^{-\frac{v}{20}} + \frac{R_{\max}^2}{\beta} \operatorname{erf}(B_4R_{\max}^2 10^{\frac{v}{20}}) \\ &\quad - \frac{R_{\min}^2}{\beta} \operatorname{erf}(B_4R_{\min}^2 10^{\frac{v}{20}}) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} f(v) &= \left[\frac{\ln 10}{10}B_3B_5R_{\max}^4 10^{\frac{v}{20}} - \frac{\ln 10}{20}B_5 10^{-\frac{v}{20}}\right. \\ &\quad \left.+ \frac{\ln 10}{10} \frac{B_4R_{\max}^4}{\beta\sqrt{\pi}} 10^{\frac{v}{20}}\right] \exp(B_3R_{\max}^4 10^{\frac{v}{10}}) \\ &\quad - \left[\frac{\ln 10}{10}B_3B_5R_{\min}^4 10^{\frac{v}{20}} - \frac{\ln 10}{20}B_5 10^{-\frac{v}{20}}\right. \\ &\quad \left.+ \frac{\ln 10}{10} \frac{B_4R_{\min}^4}{\beta\sqrt{\pi}} 10^{\frac{v}{20}}\right] \exp(B_3R_{\min}^4 10^{\frac{v}{10}}) \end{aligned} \quad (30)$$

其中,

$$B_3 = -\frac{1}{4}\pi^3P_I^{-1}B_2^2\lambda_s^2 \quad (31)$$

$$B_4 = \frac{1}{2}\pi^{\frac{3}{2}}P_I^{-\frac{1}{2}}B_2\lambda_s \quad (32)$$

$$B_5 = 2\pi^{-2}P_I^{\frac{1}{2}}\beta^{-1}B_2^{-1}\lambda_s^{-1} \quad (33)$$

在 SIR 统计特性分析的基础上,可以根据式(13)和式(14)进一步得到单个基站的平均传输服务能力和空间遍历容量。进一步的理论分析较困难,因此本文将结合数值仿真确定具体数值。

3.2 MEC 服务器排队系统稳定性分析

根据 M/M/1 模型特点,当任务平均到达速率

为 μ 、系统平均服务速率为 τ 、按照先到先服务准则进行服务时,排队系统稳定状态存在的条件是 $\eta = \mu/\tau < 1$ 。如果 $\eta \geq 1$,则系统中业务量趋于无限增长,此时系统不稳定。

为保证系统正常运行,单基站传输服务系统应当满足 M/M/1 模型的排队系统稳定性条件。因此,单基站传输服务系统中用户传输业务请求的平均速率与基站传输服务能力之间应满足:

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_s} \overline{D_{r,u}} \leq \overline{R_s} \quad (34)$$

类似地,单基站 MEC 服务器对计算业务请求的服务系统也应当满足 M/M/1 模型的排队系统稳定性条件。因此,单基站 MEC 服务器中用户计算业务请求平均速率和平均计算服务能力之间满足:

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_s} \overline{D_{c,u}} \leq \overline{C_s} \quad (35)$$

4 数值仿真

本节首先对 MEC 增强的 UDN 中上行 SIR 统计特性理论分析进行数值仿真验证,然后结合数值仿真,利用式(34)和式(35)得出系统容量达到最优时的计算资源配置。系统基本仿真参数如表 1 所示,在仿真中,小基站密度 λ_s 、用户密度 λ_u 、传输业务请求的平均速率为 $\overline{D_{r,u}}$ 、用户计算业务请求平均速率 $\overline{D_{c,u}}$ 将作为参量进行调整设置。同时,分析中设置的干扰观测区域半径无限,为了便于仿真,设定干扰用户分布在半径为 100 km 的圆形区域内。

表 1 系统基本仿真参数

符号	描述	取值
B_w	带宽	9 MHz
L	天线数	100
P_t	发射功率	23 dBm
α	路径损耗系数	-4
$R_{\max}$	小基站覆盖半径	200 m
$R_{\min}$	用户与基站的最小距离限制	0.1 m

4.1 干扰性能分析的验证

本节采用数值仿真,验证干扰理论分析结果的

正确性。仿真中,选择小基站密度 $\lambda_s = 4, 8, 16$ (个/ km^2) 进行测试,在每个选定的 λ_s 取值撒点用户和基站,构造 50 000 个快拍,并进行 SIR 数据统计,绘制出 SIR 的 PDF 曲线,如图 2 中实线所示。同时,根据理论分析结果,计算绘制对应的 λ_s 取值下 SIR 的 PDF 理论曲线,如图 2 中虚线所示。

对比结果可知,仿真结果与理论值契合度较高,既验证了理论分析的正确性,又证明了系统建模仿真合理准确。具体来看,当 $\lambda_s = 4$ 时,信干比取值出现在 10 dB 左右出现峰值,随着 λ_s 增加,信干比 PDF 曲线左移,说明干扰增加导致了用户上行传输 SIR 的下降。

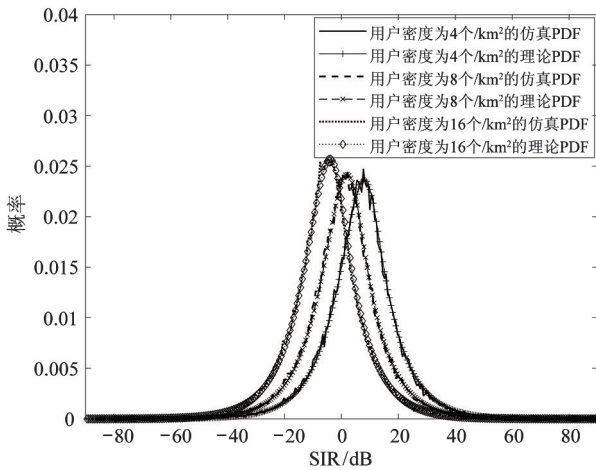


图2 仿真与分析 SIR 概率密度函数曲线对比

4.2 系统遍历容量数值仿真

在理论验证的基础上,进一步通过数值仿真进行系统空间遍历容量的分析。

在仿真过程中,设置半径为 100 km 的圆形干扰观测区域小基站数量为 50 ~ 10 000 之间间隔 100 取值,此时小基站密度 λ_s 变化范围为 0.16 ~ 31.67 个/ km^2 ,即相同子载波上的上行干扰用户密度变化范围为 0.16 ~ 31.67 个/ km^2 。每个小基站密度下随机生成 50 000 个小基站与用户空间分布的快拍,计算每个快拍中每个用户上行 SIR 值(基站上行服务的 SIR 值),并根据香农公式计算每个基站的上行传输容量,统计得到每个快拍中单个基站的平均传输服务速率,根据小基站密度计算得到每平方公里支持的上行传输速率,即空间遍历容量。

图 3 和图 4 分别给出了上行平均 SIR 和单基站平均传输容量与小基站基站密度的关系。与理论分析的趋势一致,随着 λ_s 增加,同频干扰更加严重,此时上行平均 SIR 和单基站平均传输容量急剧下降。但当 $\lambda_s > 10$ 时,由于香农公式中在取对数前先计算 $1 + \nu$,故单基站平均传输容量下降速度减缓。

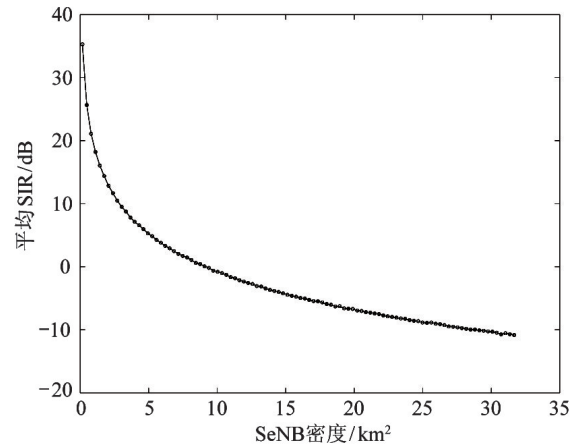


图3 上行平均 SIR 与小基站基站密度关系

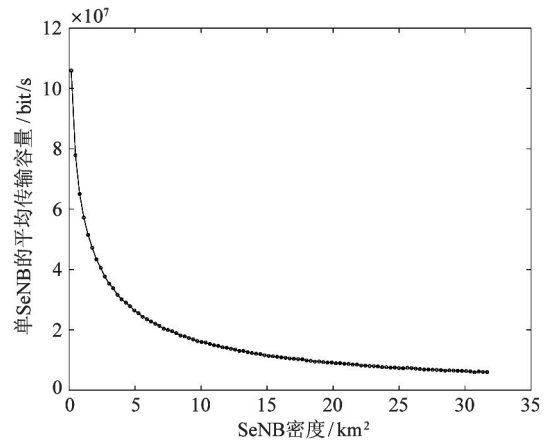


图4 单基站平均传输容量与小基站密度关系

图 5 统计了在不同 λ_s 取值下系统的空间遍历容量。尽管随着 λ_s 增加单基站平均传输容量下降,但与此同时空间中频谱资源的复用效率提升,因而空间遍历容量呈现上升趋势。可以看到,当 $\lambda_s < 10$ 时,随着基站密度的增加,空间遍历容量提升迅速,但在 $\lambda_s > 15$ 时,空间中频谱资源的复用效率提升带来的效益被严重的干扰冲抵,空间遍历容量增速放缓并呈现出收敛趋势。

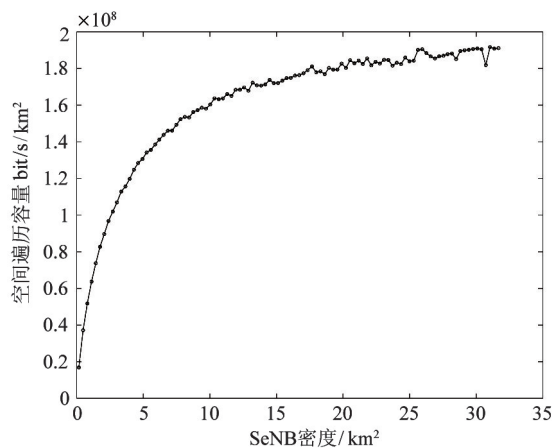


图 5 空间遍历容量与小基站密度关系

考虑到基站部署的成本,当空间遍历容量增速放缓后,继续通过增加基站数量提升空间传输服务能力是不经济的。但同时又考虑到更多的基站能够部署更多的边缘计算服务器、提供更好的计算服务能力,推荐设置基站部署密度 λ_s 取值在10~15个/ km^2 之间。

4.3 系统部署设计

本节根据式(34)和式(35)得到的排队服务系统稳定条件,根据全体用户密度、用户传输业务请求的平均速率和用户计算业务请求平均速率,通过数值计算设计小基站部署密度。为了便于表述,定义

$\rho_u \triangleq \frac{\lambda_u}{\lambda_s}$,其含义为在完全均衡的接入选择下平均每个小基站服务的用户数量。此时式(34)和式(35)可以重新写为

$$\overline{D_r} = \rho_u \overline{D_{r,u}} \leq \overline{R_s} \quad (36)$$

$$\overline{D_c} = \rho_u \overline{D_{c,u}} \leq \overline{C_s} \quad (37)$$

其中 $\overline{D_r}$ 和 $\overline{D_c}$ 分别表示单基站的平均传输请求速率和平均计算请求速率。表2设置了 $\rho_u \in \{5, 10, 15, 20\}$, $\overline{D_{r,u}} \in \{0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3\}$ 的取值,并通过图6曲线观测得到了一组满足传输请求需要的小基站密度值上限 λ_s^* ,即当 $\lambda_s \leq \lambda_s^*$ 时,可以满足给定的用户密度下用户传输的传输请求。

根据传输容量约束的测量结果,结合上节空间遍历容量分析给出的 λ_s 取值在10~15个/ km^2 之间的建议,选择 $\rho_u = 5$, $\overline{D_{r,u}} = 2.5 \text{ Mbps}$, $\lambda_s = 13.5$ 个/ km^2 这一组参数,进一步说明计算资源的配置计算过程。

表 2 ρ_u 和 $\overline{D_{r,u}}$ 与 λ_s 上限值关系

单基站 传输请求 平均速率 $\overline{D_r}$ (Mbps)	小基站 平均服务 用户数量 $\rho_u = \lambda_u/\lambda_s$	用户传输 请求平均 速率 $\overline{D_{r,u}}$ (Mbps)	小基站 密度上限值 λ_s^* (1/ km^2)
2.5	5	0.5	--
5	5	1	--
7.5	5	1.5	24
10	5	2	17.5
12.5	5	2.5	13.5
15	5	3	10.5
20	10	1	7.2
22.5	10	1.5	6.2
25	10	2	5.3
30	15	0.5	4
37.5	15	1	2.7
40	15	1.5	2.4
45	15	2	1.85
50	20	0.5	1.4
60	20	1	0.94

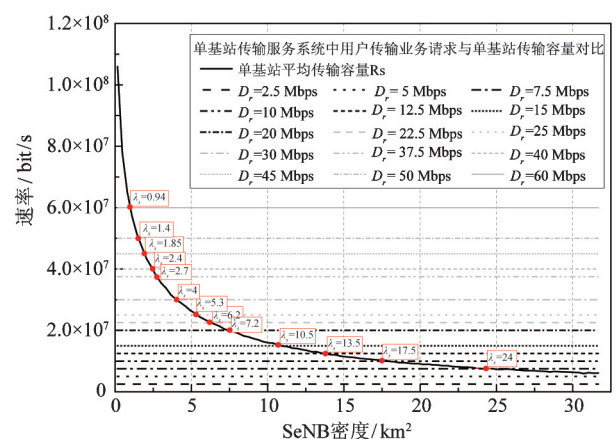


图 6 单基站用户传输请求与基站传输容量对比

根据传输容量选定的参数 $\rho_u = 5$ 和 $\lambda_s = 13.5$ 个/ km^2 ,可知此时能够服务的用户密度为 $\lambda_u = 67.5$ 个/ km^2 ,进一步根据式(37)中的计算资源约

束条件,当用户计算请求的平均速率 $\overline{D_{c,u}}$ 给定时,对基站平均计算能力的要求是 $\overline{C_s} \geq 5 \overline{D_{c,u}}$ 。由以上结论可结合实际计算业务的统计特性得出 UDN 场景下的空间节点部署。

5 结 论

本文针对 MEC 增强的 UDN 中多用户多基站多天线场景的上行传输性能进行了分析,以 SPPP 模型为基础分析了上行传输中的有用信号、干扰信号和 SIR 的统计特性,并通过数值仿真验证了理论分析的正确性。在此基础上,结合数值仿真得出了空间遍历容量的变化趋势,得到了随着基站密度的增加,空间遍历容量增加但增速逐渐放缓并最终呈现收敛趋势的结论,并综合基站部署的成本、计算服务能力需求等因素,给出了基站部署密度 λ_s 取值在 $10 \sim 15$ 个/ km^2 之间的推荐参数设置。进一步利用排队系统稳定性约束条件,根据全体用户密度、用户传输业务请求的平均速率和用户计算业务请求平均速率,通过数值计算对小基站部署密度和资源配置的设计进行了举例说明。

由于在多天线下结合信道衰落模型进行有用信号、干扰信号和 SIR 的统计特性分析的过程和结论已经非常复杂,本文在探讨空间遍历容量特点时采用了数值仿真验证,未来还可以继续深入开展理论研究,从理论上分析空间遍历容量的统计特性,提供数学上更简便有效的 MEC 增强的 UDN 配置设计方法。

参考文献

- [1] Song S S, Li H, Fan Y J, et al. Downlink interference rejection in ultra dense network[C]//2018 10th International Conference on Communication Software and Networks, Chengdu, China, 2018: 361-364
- [2] Shi W S, Cao J, Zhang Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(5): 637-646
- [3] Dhillon H S, Ganti R K, Baccelli F, et al. Modeling and analysis of K-Tier downlink heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communi-*
- cations*, 2012, 30(3): 550-560
- [4] Wu W J, Xie L L, Wang W B, et al. Average interference analysis in two-tier wireless networks[C]//2011 IEEE Global Communications Conference, Houston, USA, 2011: 208-213
- [5] Zhou F, Deng S M, Wang B, et al. Dynamic cross-tier interference management in heterogeneous network[C]//2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, 2013: 2045-2050
- [6] Wang J Q, Chu X L, Ding M, et al. On the performance of multi-tier heterogeneous networks under LoS and NLoS transmissions[C]//2016 IEEE Global Communications Conference, Washington, USA, 2016: 1-6
- [7] Zhang J, Tian H. An isotropic SPPP model for femtocells networks with outage probability constraints[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2015, 24(4): 824-831
- [8] Chen M, Hao Y X. Task offloading for mobile edge computing in software defined ultra-dense network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(3): 587-597
- [9] Sun Y X, Zhou S, Xu J, et al. EMM: energy-aware mobility management for mobile edge computing in ultra dense networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(11): 2637-2646
- [10] Liu Y M, Li X, Ji H, et al. Joint APs selection and resource allocation for self-healing in ultra dense network[C]//2016 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems, Kunming, China, 2016: 1-5
- [11] Peng M G, Yan S, Poor H V. Ergodic capacity analysis of remote radio head associations in cloud radio access networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(4): 365-368
- [12] Kingman J F C. Poisson Processes[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993
- [13] Sousa E S, Silvester J A. Optimum transmission ranges in a direct-sequence spread-spectrum multihop packet radio network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1990, 8(5): 762-771

附录 I 小基站接收干扰信号的统计特性分析

同频用户的集合 Π_u 为观测区域 Π 上的一个均匀的 SPPP, 其密度为 λ_s 。对任意的 $i_1 \in \Pi$ 和 $i_2 \in \Pi$, H_{i_1} 和 H_{i_2} 相互独立且 $H_i \in \mathbb{R}^+$, 得到乘积空间 $\mathbb{C} = \Pi \times \mathbb{R}^+$ 上的一个可数子集 $\Pi_i^* = \{(i, H_i); i \in \Pi_u\}$, 根据 Marking 定理, Π_i^* 在空间 $\mathbb{C}$ 上仍然是一个 SPPP, 其平均测度为

$$\mu^*(\mathbb{C}) = \iint_{(i, \tilde{H}) \in \mathbb{C}} \mu(\mathrm{d}i) \rho(\mathrm{d}\tilde{H}_i) = \iint_{(i, \tilde{H}) \in \mathbb{C}} \lambda_s \mathrm{d}i f(\tilde{H}_i) \mathrm{d}\tilde{H}_i \quad (\text{I-1})$$

根据 Campbell 定理, P_I 的矩母函数可表示为

$$\begin{aligned} \Phi_{P_I}(\omega) &= E[e^{j\omega P_I}] \\ &= \exp\left[\iint_{(i, \tilde{H}) \in \mathbb{C}} (e^{j\omega P_i r_i^\alpha \tilde{H}_i} - 1) \mu^*(\mathrm{d}i, \mathrm{d}\tilde{H}_i)\right] \\ &= \exp\left[\iint_{(i, \tilde{H}) \in \mathbb{C}} (e^{j\omega P_i r_i^\alpha \tilde{H}_i} - 1) \lambda_s \mathrm{d}i f(\tilde{H}_i) \mathrm{d}\tilde{H}_i\right] \end{aligned} \quad (\text{I-2})$$

为推导 P_I 的分布函数, 将 (I-2) 给出的 P_I 的特征函数变换为

$$\Phi_{P_I}(\omega) = \exp\left\{E_H\left[\left(\int_{r_i \in (0, \infty)} e^{j\omega P_i r_i^\alpha \tilde{H}_i} - 1\right) 2\pi\lambda_s r_i \mathrm{d}r_i\right]\right\} \quad (\text{I-3})$$

定义中间变量 $u = P_i r_i^\alpha \tilde{H}_i$, 由于 α 为负数, 考虑实际情况, 则有 $R_{\min} \rightarrow 0^+$, 近似有 $u \in (\infty, 0)$, 将该变量代入式 (I-3), 得到:

$$\begin{aligned} \Phi_{P_I}(\omega) &= \exp\left(E_H\left(\int_{r_i \in (0, \infty)} (e^{j\omega u} - 1) 2\pi\lambda_s r_i \mathrm{d}r_i\right)\right) \\ &= \exp[\pi\lambda_s P_i^{-\frac{2}{\alpha}} A_1 A_2] \end{aligned} \quad (\text{I-4})$$

其中,

$$A_1 = \int_{u \in (\infty, 0)} (e^{j\omega u} - 1) \frac{2}{\alpha} u^{\frac{2}{\alpha}-1} \mathrm{d}u \quad (\text{I-5})$$

$$A_2 = E_H[\tilde{H}_i^{-\frac{2}{\alpha}}] = E_H\left[\left(\frac{H_i}{H_s}\right)^{-\frac{2}{\alpha}}\right] \quad (\text{I-6})$$

对 A_1 进行化简为

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_{u \in (\infty, 0)} (e^{j\omega u} - 1) \mathrm{d}u^{\frac{2}{\alpha}} \\ &= j\omega \left[\int_0^\infty u^{\frac{2}{\alpha}} \cos\omega u \mathrm{d}u + j \int_0^\infty u^{\frac{2}{\alpha}} \sin\omega u \mathrm{d}u \right] \end{aligned} \quad (\text{I-7})$$

记 $u' = \omega u$, 则有:

$$\begin{aligned} A_1 &= j\omega^{-\frac{2}{\alpha}} \int_0^\infty (u')^{\frac{2}{\alpha}} \cos u' \mathrm{d}u' - \omega^{-\frac{2}{\alpha}} \int_0^\infty (u')^{\frac{2}{\alpha}} \sin u' \mathrm{d}u' \\ &= -\omega^{-\frac{2}{\alpha}} e^{j\frac{\pi}{\alpha}} \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \end{aligned} \quad (\text{I-8})$$

设 $X \sim \Gamma(L, \theta)$ 服从 gamma 分布, 概率密度分布函数为

$$f_X(x) = \frac{x^{L-1} e^{-\frac{x}{\theta}}}{\theta^L (L-1)!} \quad (\text{I-9})$$

令 $Y = \frac{1}{X} = g(x)$, $x = \frac{1}{y}$ 且 $\theta = 1$

$$f_Y(y) = f_X\left(\frac{1}{y}\right) \left| -\frac{1}{y^2} \right| = \frac{y^{-L+1} e^{-\frac{1}{y\theta}}}{\theta^L (L-1)!} \frac{1}{y^2} = \frac{y^{-L-1} e^{-\frac{1}{y}}}{(L-1)!} \quad (\text{I-10})$$

$$\begin{aligned} A_2 &= E_H\left[\left(\frac{H_i}{H_s}\right)^{-\frac{2}{\alpha}}\right] = E_H[(XY)^{-\frac{2}{\alpha}}] \\ &= \int_0^\infty x^{-\frac{2}{\alpha}} \frac{x^{L-1} e^{-x}}{(L-1)!} \mathrm{d}x \int_0^\infty y^{-\frac{2}{\alpha}} \frac{y^{-L-1} e^{-\frac{1}{y}}}{(L-1)!} \mathrm{d}y \\ &= \int_0^\infty \frac{x^{L-\frac{2}{\alpha}-1} e^{-x}}{(L-1)!} \mathrm{d}x \int_0^\infty \frac{y^{-(L+\frac{2}{\alpha})-1} e^{-\frac{1}{y}}}{(L-1)!} \mathrm{d}y \\ &= \frac{1}{[(L-1)!]^2} \Gamma\left(L - \frac{2}{\alpha}\right) \cdot \Gamma\left(L + \frac{2}{\alpha}\right) \end{aligned} \quad (\text{I-11})$$

由于 $\Gamma(n+1) = n!$ 可以得到:

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{\pi(-\frac{2}{\alpha})[(L-1)!]^2 \prod_{k=1}^{L-1} (1 - \frac{4}{\alpha^2 k^2})}{\sin(-\pi \frac{2}{\alpha})[(L-1)!]^2} \\ &= \frac{2\pi}{\alpha \sin(\frac{2\pi}{\alpha})} \prod_{k=1}^{L-1} (1 - \frac{4}{\alpha^2 k^2}) \end{aligned} \quad (\text{I-12})$$

$$\begin{aligned} \Phi_{P_I}(\omega) &= \exp[\pi\lambda_s P_i^{-\frac{2}{\alpha}} A_1 A_2] \\ &= \exp\left\{-\pi\lambda_s P_i^{-\frac{2}{\alpha}} e^{j\frac{\pi}{\alpha}} \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \omega^{-\frac{2}{\alpha}} A_2\right\} \\ &= \exp\left\{-A e^{j\frac{\pi}{\alpha}} \omega^{-\frac{2}{\alpha}}\right\} \end{aligned} \quad (\text{I-13})$$

其中,

$$A = -\pi\lambda_s P_i^{-\frac{2}{\alpha}} A_2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \quad (\text{I-14})$$

与文献[13]中的式(22)类似, 可以得到干扰功率和 P_I 的 PDF 为

$$f_{P_I}(P_I) = \frac{1}{\pi P_I} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Gamma\left(1 - \frac{2k}{\alpha}\right)}{k!} \left(\frac{A}{P_I^{-\frac{2}{\alpha}}}\right)^k \sin k\pi \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \quad (\text{I-15})$$

当 $\alpha = -4$ 时, 有

$$\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) = \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi} \quad (\text{I-16})$$

$$A_2 = \frac{\pi}{2} \prod_{k=1}^{L-1} \left(1 - \frac{1}{4k^2}\right) \quad (\text{I-17})$$

此时, P_I 的特征函数为

$$\begin{aligned} \Phi_{P_I}(\omega) &= \exp\left\{-\pi\lambda_s P_i^{-\frac{2}{\alpha}} e^{j\frac{\pi}{\alpha}} \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \omega^{-\frac{2}{\alpha}} A_2\right\} \\ &= \exp\left\{-\pi\lambda_s P_i^{\frac{1}{2}} \frac{\sqrt{2}}{2} (1-j) \sqrt{\pi} \omega^{\frac{1}{2}} A_2\right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \exp \left\{ -\pi \sqrt{\frac{\pi}{2}} (1-j) \lambda_s P_t^{\frac{1}{2}} A_2 \omega^{\frac{1}{2}} \right\} \\
&= \exp \left\{ -\pi \sqrt{\frac{\pi}{2}} (1-j) \tilde{\lambda} \omega^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (\text{I-18})
\end{aligned}$$

其中,

$$\tilde{\lambda} = \frac{\pi}{2} \lambda_s P_t^{\frac{1}{2}} \prod_{k=1}^{L-1} \left(1 - \frac{1}{4k^2}\right) \quad (\text{I-19})$$

干扰功率和 P_I 的 PDF 为

$$\begin{aligned}
f_{P_I}(P_I) &= \frac{\pi}{2} \tilde{\lambda} P_I^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\pi^3 \tilde{\lambda}^2}{4P_I}\right) \\
&= \frac{\pi}{2} B_2 \lambda_s P_I^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\pi^3 B_2^2 \lambda_s^2}{4P_I}\right) \quad (\text{I-20})
\end{aligned}$$

其中,

$$B_2 = \frac{1}{2} \pi P_t^{\frac{1}{2}} \prod_{k=1}^{L-1} \left(1 - \frac{1}{4k^2}\right) \quad (\text{I-21})$$

附录II 上行传输信干比统计特性分析

将 P_s 和干扰功率 P_I 转换到对数域, 定义 $P_{\lg, S} = 10 \lg P_s$, $P_{\lg, \Sigma} = 10 \lg P_I$, 通过换算得到 $10 \cdot \lg(P_s/P_I) = P_{\lg, S} - P_{\lg, \Sigma}$ 。由 3.1 节得出的 $f_{P_s}(P_s)$, 可得 P_s 在对数域的 PDF:

$$\begin{aligned}
f_{P_{\lg, S}}(P_{\lg, S}) &= f_{P_s}(10^{\frac{P_{\lg, S}}{10}}) \left| \left(10^{\frac{P_{\lg, S}}{10}}\right)' \right| \\
&= \frac{1}{2\beta} P_t^{\frac{1}{2}} \left(10^{\frac{P_{\lg, S}}{10}}\right)^{-\frac{3}{2}} \frac{1}{10} \ln 10 10^{\frac{P_{\lg, S}}{10}} \\
&= \frac{\ln 10 P_t^{\frac{1}{2}}}{20\beta} 10^{-\frac{P_{\lg, S}}{20}} \quad (\text{II-1})
\end{aligned}$$

由式 (I-18) 可得 P_I 在对数域的 PDF:

$$\begin{aligned}
f_{P_{\lg, \Sigma}}(P_{\lg, \Sigma}) &= f_{P_I}(10^{\frac{P_{\lg, \Sigma}}{10}}) \left| \left(10^{\frac{P_{\lg, \Sigma}}{10}}\right)' \right| \\
&= \frac{\ln 10}{20} \pi B_2 \lambda_s 10^{-\frac{P_{\lg, \Sigma}}{20}} \exp\left(-\frac{\pi^3 B_2^2 \lambda_s^2}{4} 10^{-\frac{P_{\lg, \Sigma}}{10}}\right) \quad (\text{II-2})
\end{aligned}$$

记 $x = P_{\lg, S}$, $y = P_{\lg, \Sigma}$, 信干比 (dB) 的 CDF 为

$$\begin{aligned}
F(v) &= \Pr\{x - y \leq v\} \\
&= \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha}) - v}^{\infty} f_{P_{\lg, \Sigma}}(y) \left[\int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha}) - y}^{y+v} f_{P_{\lg, S}}(x) dx \right] dy \\
&\quad - \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\min}^{\alpha}) - v}^{\infty} f_{P_{\lg, \Sigma}}(y) \left[\int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\min}^{\alpha}) - y}^{y+v} f_{P_{\lg, S}}(x) dx \right] dy \\
&= A_3 - A_4 \quad (\text{II-3})
\end{aligned}$$

其中,

$$A_3 = \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha}) - v}^{\infty} f_{P_{\lg, \Sigma}}(y) A_5 dy \quad (\text{II-4})$$

$$A_5 = \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha})}^{y+v} f_{P_{\lg, S}}(x) dx \quad (\text{II-5})$$

首先对 A_5 进行化简:

$$A_5 = \left[\int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha})}^{y+v} \frac{\ln 10}{20\beta} P_t^{\frac{1}{2}} 10^{-\frac{x}{20}} dx \right]$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha})}^{y+v} \left(-\frac{1}{\beta} P_t^{\frac{1}{2}} 10^{-\frac{x}{20}} \right)' dx \\
&= \frac{R_{\max}^2}{\beta} - \frac{P_t^{\frac{1}{2}}}{\beta} \cdot 10^{-\frac{y+v}{20}} \quad (\text{II-6})
\end{aligned}$$

根据式 (II-2), 可得:

$$f_{P_{\lg, \Sigma}}(y) = M_1 10^{-\frac{y}{20}} \exp(-M_2 10^{-\frac{y}{10}}) \quad (\text{II-7})$$

$$\text{且 } M_1 = \frac{\ln 10}{20} \pi B_2 \lambda_s, \quad M_2 = \frac{\pi^3 B_2^2 \lambda_s^2}{4}.$$

$$\begin{aligned}
A_3 &= \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha}) - v}^{\infty} f_{P_{\lg, \Sigma}}(y) A_5 dy \\
&= M_1 \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha}) - v}^{\infty} 10^{-\frac{y}{20}} \exp(-M_2 10^{-\frac{y}{10}}) A_5 \cdot dy \\
&= \frac{M_1 R_{\max}^2}{\beta} \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha}) - v}^{\infty} 10^{-\frac{y}{20}} \exp(-M_2 10^{-\frac{y}{10}}) dy \\
&\quad - \frac{M_1 P_t^{\frac{1}{2}}}{\beta} \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha}) - v}^{\infty} 10^{-\frac{y+v}{20}} \exp(-M_2 10^{-\frac{y}{10}}) dy \\
&= A_6 - A_7 \quad (\text{II-8})
\end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned}
A_6 &= \frac{M_1 R_{\max}^2}{\beta} \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha}) - v}^{\infty} 10^{-\frac{y}{20}} \exp(-M_2 10^{-\frac{y}{10}}) dy \\
&= \frac{R_{\max}^2}{\beta} \text{erf}\left(\frac{1}{2} \pi^{\frac{3}{2}} P_t^{\frac{1}{2}} R_{\max}^2 B_2 \lambda_s 10^{\frac{v}{20}}\right) \quad (\text{II-9})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_7 &= \frac{M_1 P_t^{\frac{1}{2}}}{\beta} \int_{10 \cdot \lg(P_t R_{\max}^{\alpha}) - v}^{\infty} 10^{-\frac{y+v}{20}} \exp(-M_2 10^{-\frac{y}{10}}) dy \\
&= -\frac{2P_t^{\frac{1}{2}} 10^{-\frac{v}{20}}}{\pi^2 \beta B_2 \lambda_s} [\exp(-M_2 P_t^{-1} R_{\max}^4 10^{\frac{v}{10}}) - 1] \quad (\text{II-10})
\end{aligned}$$

于是可求得:

$$\begin{aligned}
A_3 &= A_6 - A_7 \\
&= \frac{R_{\max}^2}{\beta} \text{erf}\left(\frac{1}{2} \pi^{\frac{3}{2}} P_t^{\frac{1}{2}} R_{\max}^2 B_2 \lambda_s 10^{\frac{v}{20}}\right) - \frac{2P_t^{\frac{1}{2}} 10^{-\frac{v}{20}}}{\pi^2 \beta B_2 \lambda_s} \\
&\quad + \frac{2P_t^{\frac{1}{2}} 10^{-\frac{v}{20}}}{\pi^2 \beta B_2 \lambda_s} \exp(-M_2 P_t^{-1} R_{\max}^4 10^{\frac{v}{10}}) \quad (\text{II-11})
\end{aligned}$$

类似于 A_3 的积分形式, 同理可写出 A_4 。

$$\begin{aligned}
A_4 &= \frac{R_{\min}^2}{\beta} \text{erf}\left(\frac{1}{2} \pi^{\frac{3}{2}} P_t^{\frac{1}{2}} R_{\min}^2 B_2 \lambda_s 10^{\frac{v}{20}}\right) - \frac{2P_t^{\frac{1}{2}} 10^{-\frac{v}{20}}}{\pi^2 \beta B_2 \lambda_s} \\
&\quad + \frac{2P_t^{\frac{1}{2}} 10^{-\frac{v}{20}}}{\pi^2 \beta B_2 \lambda_s} \exp(-M_2 P_t^{-1} R_{\min}^4 10^{\frac{v}{10}}) \quad (\text{II-12})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F(v) &= A_3 - A_4 \\
&= [\exp(B_3 R_{\max}^4 10^{\frac{v}{10}}) - \exp(B_3 R_{\min}^4 10^{\frac{v}{10}})] \\
&\quad B_5 10^{-\frac{v}{20}} + \frac{R_{\max}^2}{\beta} \text{erf}(B_4 R_{\max}^2 10^{\frac{v}{20}}) - \frac{R_{\min}^2}{\beta} \text{erf}(B_4 R_{\min}^2 10^{\frac{v}{20}}) \quad (\text{II-13})
\end{aligned}$$

其中,

$$B_2 = \frac{\pi}{2} P_t^{\frac{1}{2}} \prod_{k=1}^{L-1} \left(1 - \frac{1}{4k^2}\right) \quad (\text{II-14})$$

$$B_3 = -\frac{1}{4} \pi^3 P_t^{-1} B_2^2 \lambda_s^2 \quad (\text{II-15})$$

$$B_4 = \frac{1}{2} \pi^{\frac{3}{2}} P_t^{-\frac{1}{2}} B_2 \lambda_s \quad (\text{II-16})$$

$$B_5 = 2 \pi^{-2} P_t^{\frac{1}{2}} \beta^{-1} B_2^{-1} \lambda_s^{-1} \quad (\text{II-17})$$

对 $F(v)$ 求导, 于是可得到信干比的 PDF

$$\begin{aligned} f(v) &= \frac{dF(v)}{dv} \\ &= \left[\frac{\ln 10}{10} B_3 B_5 R_{\max}^4 10^{\frac{v}{20}} - \frac{\ln 10}{20} B_5 10^{-\frac{v}{20}} + \frac{\ln 10}{10} \frac{B_4 R_{\max}^4}{\beta \sqrt{\pi}} 10^{\frac{v}{20}} \right] \\ &\quad \exp(B_3 R_{\max}^4 10^{\frac{v}{10}}) - \left[\frac{\ln 10}{10} B_3 B_5 R_{\min}^4 10^{\frac{v}{20}} - \frac{\ln 10}{20} B_5 10^{-\frac{v}{20}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\ln 10}{10} \frac{B_4 R_{\min}^4}{\beta \sqrt{\pi}} 10^{\frac{v}{20}} \right] \exp(B_3 R_{\min}^4 10^{\frac{v}{10}}) \end{aligned} \quad (\text{II-18})$$

Analysis of uplink transmission performance and design of SeNB deployment in mobile edge computing enhanced ultra dense networks

Zhou Tianqi^{*}, Wu Wenjun^{*}, Li Hailing^{**}, Dong Junyu^{*}, Gao Ju^{*}

(^{*} Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

(^{**} National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China, Beijing 100029)

Abstract

In mobile edge computing (MEC) enhanced ultra dense networks (UDN), inter-cell interference has become one of the key problems as the small eNBs (SeNBs) are densely deployed. Based on the analysis of the statistic characteristics of uplink interference to the SeNB, the spatial ergodic capacity and the deployment of SeNB are discussed. First, the interfering users are modeled as a spatial Poisson point process (SPPP), and the statistic characteristics of uplink signal to interference ratio (SIR) are analyzed with the consideration of multi-antenna and small-scale fading characteristics of wireless channels. Then, the queuing theory is adopted to analyze the constraints between the spatial traffic loads and the transmission and computation capabilities of SeNBs and MEC servers. Numerical results verify the theoretical analysis and show the convergency trends of the spatial ergodic capacity. The example of the SeNB deployment design is also given by numerical simulations.

Key words: ultra dense network(UDN), mobile edge computing(MEC), spatial Poisson point process(SPPP), spatial ergodic capacity