

一种超密集异构网中联合干扰协调方法研究

李莉* 叶鹏 彭张节 唐延枝

(上海师范大学信息与机电工程学院 上海 200234)

摘要: 针对5G超密集异构网中严重的跨层干扰问题, 该文提出一种基于现有的增强型小区间干扰协调技术和协同多点传输技术的联合干扰协调方法。运用随机几何理论工具推导了两层超密集异构网下用户的中断概率, 频谱效率和网络平均遍历容量表达式。仿真结果表明: 该文提出的联合的干扰协调方案, 相比于传统协同多点传输技术, 不仅降低了协作用户数, 同时使得用户在信干比阈值为0 dB时的中断概率降低了15%; 相比较于增强型小区间干扰协调技术, 在偏置值为10 dB时, 扩展区域的频谱效率改善为35%, 整个网络平均遍历容量提升了3.4%。

关键词: 异构网络; 随机几何理论; 增强型小区间干扰协调; 协同多点传输

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0009-07

DOI: 10.11999/JEIT180290

Research on Joint Interference Coordination Approach in Ultra-dense Heterogeneous Network

LI Li YE Peng PENG Zhangjie TANG Yanzhi

(College of Information, Mechanical and Electrical Engineering,
Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: This paper presents an approach of combining the existing enhanced inter-cell interference coordination technology and the downlink joint transmission scheme of coordinated multi-point transmission technology to solve the problem of serious cross-layer interference in 5G ultra-dense heterogeneous network. With using tools from stochastic geometry theory, the expressions such as the outage probability, spectrum efficiency and network average ergodic capacity of two-layer ultra-dense heterogeneous network are derived. Simulation results show that the proposed joint interference coordination scheme not only reduces the number of cooperative users compared with the traditional coordinated multi-point transmission technology, but also reduces the outage probability of users by 15% in the network at 0 dB. Compared with the enhanced inter-cell interference coordination technology, when the bias value is 10 dB, the user spectrum efficiency in the extended area is improved to 35% and the average traversal capacity of the entire network is increased by 3.4%.

Key words: Heterogeneous network; Stochastic theory; Enhanced inter-cell interference coordination; Coordinated multipoint transmission

1 引言

为满足移动数据业务日益增长的需求, 超密集异构网络通过在现有的宏基站覆盖区域中叠加密集的小基站被认为是具有前景的措施之一^[1,2]。这种

小基站通常由微微基站, 毫微微基站或中继等低功率节点组成, 通过空间服务距离缩短和频谱复用的方式提高热点地区的覆盖和网络容量^[3,4]。然而小基站采用了较低的发射功率, 覆盖范围有限, 无法有效卸载宏基站负载。为解决这一问题, 小区范围扩展(Cell Range Expansion, CRE)技术^[5]通过在用户接收来自小基站的平均功率上乘以一个大于1的小区范围扩展偏置值, 使用户倾向于接入小基站扩展区域, 从而卸载宏基站的负载, 但其会导致CRE区域用户的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)降低。此外, 超密集异构网中宏基站和小基站采用全频率复用部署方式, 加

收稿日期: 2018-03-28; 改回日期: 2018-10-10; 网络出版: 2018-10-25

*通信作者: 李莉 lilyxuan@shnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61701307), 上海高校青年教师培养资助计划(ZZssd16044)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholar (61701307), The Excellent Young Teachers Program in Higher Education Institutions of Shanghai (ZZssd16044)

上基站相互间距离缩短, CRE区域用户也会受到来自宏基站更严重的跨层干扰。

针对这一问题, 增强型小区域干扰协调(enhanced Inter-Cell Interference Coordination, eICIC)技术^[6]在时间域上静默一些子帧(仍传输一些广播信号)并预留受强干扰的小基站传输, 这些静默子帧被称为几乎空白子帧(Almost Blank Subframes, ABS)。文献^[7]采用eICIC技术方案来解决CRE技术均衡宏基站负载时扩展区域的干扰问题, 并对用户连接选择和资源分配的优化问题, 给出了一种接近最优的分布式负载均衡算法, 但算法复杂度受限于基站和用户数目。文献^[8]结合小区范围扩展偏置值与eICIC技术中ABS模式设置之间的相关性, 给出了两种参数的联合动态调整算法。文献^[9]针对eICIC技术中用户接入选择和时域资源分配方法过于复杂的情况, 给出了一种动态分配ABS比率算法。但文献^[8, 9]仍无法解决高偏置值下CRE区域用户频谱效率降低, 以及过高的增加ABS比例会抵消卸载用户带来性能增益的问题。而多点协作传输技术^[10](Coordinated MultiPoint transmission, CoMP)中联合传输方案通过基站空间协作方式来减少用户的小区域干扰, 提高了基站覆盖范围和边缘用户频谱效率。文献^[11]重点讨论了异构网络基站CoMP技术下行联合传输场景, 通过基站协作为用户传输数据, 减少CRE区域用户的跨层干扰问题。但偏置值设置过大, 会使协作基站数增加, 导致回程网络的开销过大。文献^[12]将多点协作传输和分簇算法相结合的方式应用于超密集异构网。根据用户接收到干扰的强弱程度, 将基站分簇。同一个簇内的基站为用户提供协作传输服务, 减少了小区域干扰, 但无法解决簇的规模与簇间干扰问题。

针对现有干扰协调技术的上述缺陷问题, 以及为了适应未来更加密集复杂的异构网络, 本文提出了一种联合eICIC和CoMP的干扰协调方案。此外, 超密集异构网络基站部署呈现密集化和随机化的特点, 将基站建模为平面上随机放置的点并利用随机几何理论工具进行研究已经被广泛地使用^[13-15]。本文将基于随机几何理论的齐次泊松点过程(Poisson Point Process, PPP)来对基站位置分布建模, 给出基于所提联合eICIC和CoMP的干扰协调方法下两层超密集异构网的下行链路中用户的平均中断概率、用户频谱效率以及网络平均遍历容量的表达式。基于这些性能指标与传统的干扰协调技术进行了仿真对比。

2 下行系统模型与性能分析

本节将给出超密集两层异构网络模型, 及在所

提联合干扰协调方案下用户连接策略和网络性能分析。

2.1 下行系统模型

考虑超密集两层异构网下行链路环境, 且网络采用正交频分多址方式。假设超密集异构网由宏基站覆盖区域内叠加上密集部署的小基站构成, 第1层为宏基站, 第2层为采用开放接入的小基站, 且各层基站均工作在同一频段。各层基站和整个网络中用户位置分布分别满足密度为 $\lambda_k(k=1, 2)$ 和 λ_u 的2维平面独立齐次PPP, 分别记作 ϕ_k 和 ϕ_u , 且 ϕ_k 与 ϕ_u 彼此互相独立。每一层内的基站为相同的发射功率 $P_k(k=1, 2)$ 。现考虑在平面坐标原点 o 处有一个典型用户 u_o 形成点过程 $\phi_u \cup \{o\}$, 由Slivnyak定理^[13]可知, 从 u_o 所反映的网络特性与点过程 ϕ_u 中任意用户的特性一致, 故本文以 u_o 为分析对象。假设 u_o 接收来自各层基站信号功率均经历瑞利衰落和路径损耗因子为 α 的路径损耗, 且衰落系数的功率包络 $|h_i|^2$ 满足均值为1的指数分布。

如图1所示, 为了均衡宏基站与小基站的负载, 小基站采用偏置值为 B_l 的CRE技术使小基站覆盖区域向外围扩展形成扩展区域。同时, 在小基站扩展范围的外围, 设置合作阈值为 β 的协作区域。图1中两层异构网拓扑模型被划分成4个覆盖区域的用户集合 $\Omega_m(m \in \{1, 2, 3, 4\})$: 即单独由宏基站及小基站提供原始覆盖服务区域的用户集合 Ω_1 和 Ω_2 ; 小基站扩展区域的用户集合 Ω_3 , 以及协作区域的用户集合 Ω_4 。

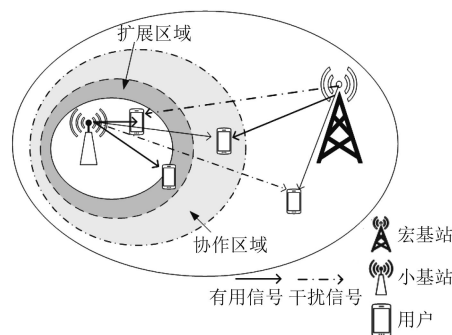


图1 基于联合干扰协调方案两层异构网络模型

2.2 基于联合干扰协调方案的用户接入策略及信干比分析

假设每个用户基于接收来自基站的平均功率乘以小区范围扩展偏置值后所得到的最大偏置接收功率接入每层的基站, 此时最大偏置接收功率与基站发射功率、偏置值和到基站距离有关。令偏置值 $B_h = B_l + \beta$, 则 u_o 接入各区域的准则可以表示为

$$\left. \begin{aligned} P_1 R_1^{-\alpha} &\geq B_h P_2 R_2^{-\alpha}, & u_o \in \Omega_1 \\ P_2 R_2^{-\alpha} &> P_1 R_1^{-\alpha}, & u_o \in \Omega_2 \\ B_l P_2 R_2^{-\alpha} &> P_1 R_1^{-\alpha} > P_2 R_2^{-\alpha}, & u_o \in \Omega_3 \\ B_h P_2 R_2^{-\alpha} &\geq P_1 R_1^{-\alpha} \geq B_l P_2 R_2^{-\alpha}, & u_o \in \Omega_4 \end{aligned} \right\} (1)$$

其中, R_1 和 R_2 分别表示 u_o 到第 k 层最强基站 $x_k (k=1,2)$ 的距离。令 Bs_1 , Bs_2 和 \mathbb{B} 分别为宏基站集合, 小基站集合和服务基站集合, 则 u_o 属于用户集合 Ω_1 时, 仅由宏基站 $\mathbb{B} = \{x_i | x_i \in Bs_1\}$ 提供服务; u_o 属于用户集合 Ω_2 或 Ω_3 时, 仅由小基站 $\mathbb{B} = \{x_i | x_i \in Bs_2\}$ 提供服务; 而当 u_o 属于用户集合 Ω_4 时, 则由小基站和宏基站 $\mathbb{B} = \{x_i, x_j | x_i \in Bs_1, x_j \in Bs_2\}$ 共同提供数据传输服务。

由于 u_o 可能位于不同 Ω_m 且采用的干扰协调方式不同, 故 u_o 从服务基站接收到的信号经历的干扰可以分为两种情况: 一是 u_o 属于 Ω_1, Ω_2 或者 Ω_4 时, u_o 接收到除提供服务基站集合 \mathbb{B} 外所有其他基站的干扰。因所考虑网络是干扰受限系统, 噪声功率 N 为零。 u_o 的信干比 (Signal to Interference Ratio, SIR) 表示为

$$\gamma_o = \frac{P_r}{I_o} = \frac{\left| \sum_{x_i \in \mathbb{B}} \sqrt{P_i R_i^{-\alpha}} |h_i| \right|^2}{\left(\sum_{k=1}^2 \sum_{x_j \in Bs_k / \mathbb{B}} P_j |h_j|^2 R_j^{-\alpha} \right)} \quad (2)$$

其中, P_r 为 u_o 的接收来自服务基站的有用功率, I_o 为 u_o 处接收到的累积干扰。 x_i 和 x_j 分别表示服务基站和干扰基站, 且 $|h_i|^2$ 和 $|h_j|^2$ 均表示服务基站和干扰基站到用户间信道衰落系数的功率包络。另一种是当 u_o 属于 Ω_3 时, 仅采用 eICIC 干扰协调方式, 系统为扩展区域用户单独分配 ABS, 故此时 u_o 除提供服务的基站 x_i 外, 仅需考虑来自同层基站的干扰 I'_o , SIR 可以表示为

$$\gamma'_o = \frac{P_r}{I'_o} = P_i |h_i|^2 R_i^{-\alpha} / \left(\sum_{x_j \in Bs_2 / x_i} P_j |h_j|^2 R_j^{-\alpha} \right) \quad (3)$$

2.3 性能分析

为便于分析系统模型下的网络性能, 首先基于式(1)接入准则推导 u_o 属于不同 $\Omega_m (m \in \{1, 2, 3, 4\})$ 的概率 $\rho_m (m \in \{1, 2, 3, 4\})$ 。文献[16]中给出基于小区范围扩展偏置值的用户连接到不同层基站概率, 采用同样的推导过程可以得到 u_o 属于 Ω_m 的概率:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= \lambda_1 / \left(\sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{B_k^c P_k}{P_1} \right)^{2/\alpha} \right) \\ \rho_2 &= \lambda_2 / \left(\sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{P_k}{P_2} \right)^{2/\alpha} \right) \\ \rho_3 &= \lambda_2 \left(\left(\sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{B_k^e P_k}{B_l P_2} \right)^{2/\alpha} \right)^{-1} - \left(\sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{P_k}{P_2} \right)^{2/\alpha} \right)^{-1} \right) \\ \rho_4 &= 1 - \rho_1 - \rho_2 - \rho_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\text{其中, } B_k^c = \begin{cases} 1, & k=1 \\ B_h, & k=2 \end{cases}, B_k^e = \begin{cases} 1, & k=1 \\ B_l, & k=2 \end{cases}$$

从式(4)可见用户选择服务基站与该层基站的分布密度 λ_k , 发射功率 P_k , 以及偏置值 B_h 和 B_l 相关, 用户更倾向于接入高发射功率的基站覆盖区域; 当每层基站分布密度及发射功率一定时, 随着小区范围扩展偏置值的增加, 越多的用户被卸载到扩展区域和协作区域的用户集合内。

本文模型中基站是按照泊松点分布的随机点, 所以用户与服务基站间距离的统计特性可通过统计距离的概率密度函数来刻画。考虑到 u_o 可能位于不同的 Ω_m , 故令 $X_m (m \in \{1, 2, 3, 4\})$ 表示位于不同 Ω_m 时 u_o 到不同层服务基站的统计距离。当 u_o 属于 $\Omega_m (m \leq 3)$ 时, 由小基站或宏基站单独提供服务, 用 $f_{X_m}(r)$ 表示 u_o 到服务基站间距离 X_m 的概率密度函数。而当 u_o 属于 Ω_4 时, 用 $f_{X_4}(r_1, r_2)$ 表示由小基站和宏基站协同传输时距离的联合概率密度函数。则 u_o 属于不同 Ω_m 时服务距离 X_m 的概率密度函数为

$$f_{X_1}(r) = \frac{2\pi\lambda_1}{\rho_1} r \exp \left\{ -\pi r^2 \sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{B_k^c P_k}{P_1} \right)^{2/\alpha} \right\} \quad (5)$$

$$f_{X_2}(r) = \frac{2\pi\lambda_2}{\rho_2} r \exp \left\{ -\pi r^2 \sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{P_k}{P_2} \right)^{2/\alpha} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} f_{X_3}(r) &= \frac{2\pi\lambda_2}{\rho_3} r \left(\exp \left\{ -\pi r^2 \sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{B_k^e P_k}{B_l P_2} \right)^{2/\alpha} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \exp \left\{ -\pi r^2 \sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{P_k}{P_2} \right)^{2/\alpha} \right\} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

$$f_{X_4}(r_1, r_2) = \frac{4\pi\lambda_1\lambda_2}{\rho_4} r_1 r_2 \exp \left\{ -\pi (\lambda_1 r_1^2 + \lambda_2 r_2^2) \right\} \quad (8)$$

其中, ρ_m , B_k^e 和 B_k^c 已在式(4)给出, r_1 和 r_2 分别表

示到提供最强接收功率宏基站和小基站的距离, 根据式(1)中 u_o 属于 Ω_4 的准则, r_1 和 r_2 需满足 $r_1 > 0$ 且 $(B_h P_2/P_1)^{1/\alpha} r_1 \geq r_2 \geq (B_l P_2/P_1)^{1/\alpha} r_1$ 。

下面证明 u_o 属于 Ω_3 时到服务基站距离 X_3 的概率密度函数 $f_{X_3}(r)$, 当 u_o 属于 Ω_3 时, 服务基站距离 X_3 是已经假设用户在 Ω_3 , 故 $\mathbb{P}(X_m > r)$ 是一个条件概率:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(X_3 > r) &= \mathbb{P}(X_3 > r | m = 3) \\ &= \frac{\mathbb{P}(X_3 > r, m = 3)}{\mathbb{P}(m = 3)} \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\mathbb{P}(m = 3)$ 是 u_o 属于 Ω_3 时的概率 ρ_3 , $\mathbb{P}(X_3 > r, m = 3)$ 是 $X_3 > r, m = 3$ 的联合概率:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(X_3 > r, m = 3) &= \mathbb{P}(X_3 > r, B_l P_2 R_2^{-\alpha} > P_1 R_1^{-\alpha} > P_2 R_2^{-\alpha}) \\ &= \int_r^\infty \mathbb{P}\left[\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/\alpha} R_2 > R_1 > \left(\frac{P_1}{B_l P_2}\right)^{1/\alpha} R_2\right] f_{R_2}(x) dx \\ &= 2\pi\lambda_2 \int_r^\infty x \exp\left(-\pi x^2 \sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{B_k^e P_k}{B_l P_2}\right)^{2/\alpha}\right) dx \\ &\quad - 2\pi\lambda_2 \int_r^\infty x \exp\left(-\pi x^2 \sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{P_k}{P_2}\right)^{2/\alpha}\right) dx \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $f_{R_2}(x)$ 由泊松点过程性质得 $f_{R_2}(x) = 2\pi\lambda_2 x \exp(-\lambda_2 \pi x^2)$ ^[17], 将式(4)中 ρ_3 和式(10)代入式(9), 可得到 u_o 属于 Ω_3 时到服务基站距离 X_3 的分布函数 $F_{X_3}(r) = 1 - \mathbb{P}(X_3 > r)$, 对 $F_{X_3}(r)$ 求导 $f_{X_3}(r) = dF_{X_3}(r)/dr$ 即得式(7)。采用同样的推导过程可得 u_o 属于 $\Omega_m (m = 1, 2)$ 时的 $f_{X_m}(r)$ 及属于 Ω_4 时的 $f_{X_4}(r_1, r_2)$ 。

本文中中断概率定义为对任意位置用户的瞬时SIR小于给定阈值 τ 的概率。考虑到本文中 u_o 可能属于不同的 Ω_m , 故 u_o 的中断概率 \mathcal{O}_o 表示为

$$\mathcal{O}_o = \sum_{m=1}^4 \eta_m \rho_m \mathcal{O}_m \quad (11)$$

其中, ρ_m 是 u_o 属于 Ω_m 的概率, η_m 是时域子帧资源分配比例, 假定分配的ABS比例为 μ , 则 u_o 属于 Ω_1 和 Ω_4 时, η_1 和 η_4 均为 $1 - \mu$; u_o 属于 Ω_2 和 Ω_3 时, η_2 和 η_3 分别为1和 μ 。

\mathcal{O}_m 表示 u_o 位于 Ω_m 时, 从距离为 R 的服务基站获得瞬时SIR小于给定阈值 τ 的概率。则 \mathcal{O}_m 可表示为

$$\mathcal{O}_m = \mathbb{E}_R [\mathbb{P}[\gamma_m(R) \leq \tau]] \quad (12)$$

其中, $\gamma_m(R)$ 是 u_o 属于 Ω_m 时 u_o 处的SIR。即 u_o 属于 Ω_1, Ω_2 或者 Ω_4 时, $\gamma_m(R) = \gamma_o$; 当 u_o 属于 Ω_3 时,

$\gamma_m(R) = \gamma_o'$ 。 $\mathbb{E}_R[\cdot]$ 是对 u_o 到基站距离 R 的统计意义上的平均。

当 u_o 属于 Ω_4 时, 由式(1)可知需满足 $r_1 > 0$ 和 $(B_h P_2/P_1)^{1/\alpha} r_1 \geq r_2 \geq (B_l P_2/P_1)^{1/\alpha} r_1$, 令 $a = (B_l P_2/P_1)^{1/\alpha} r_1$, $b = (B_h P_2/P_1)^{1/\alpha} r_1$ 且根据定义式(12)可以得到

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_4 &= 1 - \int_0^\infty \int_a^b \mathbb{E}_{I_o} [\mathbb{P}[\gamma_o > \tau]] f_{X_4}(r_1, r_2) dr_1 dr_2 \\ &= 1 - \int_0^\infty \int_a^b \mathbb{E}_{I_o} \left[\mathbb{P} \left[\left| \sqrt{P_1 r_1^{-\alpha}} |h_1| + \sqrt{P_2 r_2^{-\alpha}} |h_2| \right|^2 > \tau I_o \right] \right] f_{X_4}(r_1, r_2) dr_1 dr_2 \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $f_{X_4}(r_1, r_2)$ 在式(8)中给出。其中 $|h_1|^2$ 和 $|h_2|^2$ 均服从均值为1的指数分布, 并且相互独立, 故 $\left| \sqrt{P_1 r_1^{-\alpha}} |h_1| + \sqrt{P_2 r_2^{-\alpha}} |h_2| \right|^2$ 满足均值为 $P_1 r_1^{-\alpha} + P_2 r_2^{-\alpha}$ 的指数分布。故式(13)可以写成

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_4 &= 1 - \int_0^\infty \int_a^b \prod_{k=1}^2 \mathcal{L}_{I_k}[\tau / (P_1 r_1^{-\alpha} + P_2 r_2^{-\alpha})] \\ &\quad \cdot f_{X_4}(r_1, r_2) dr_1 dr_2 \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\mathcal{L}_{I_k}[\tau / (P_1 r_1^{-\alpha} + P_2 r_2^{-\alpha})]$ 表示第 k 层的累积干扰 I_k 的拉普拉斯变换, 该变换的函数形式可以表示为 $\mathcal{L}_{I_k}(s) = \mathbb{E}_{I_k}[\exp(-s I_k)]$ ^[16]。令 $s = \tau / (P_1 r_1^{-\alpha} + P_2 r_2^{-\alpha})$, u_o 到各基站的信道衰落是独立同分布的性质以及根据泊松点过的概率生成泛函(Probability Generating Functional, PGF)的性质^[17]可得

$$\mathcal{L}_{I_k}(s) = \exp \left\{ -2\pi\lambda_j \int_{z_j}^\infty [1 - 1/(1 + s P_j v^{-\alpha})] v dv \right\} \quad (15)$$

其中, z_j 表示最近干扰基站距离的下界, 具体可由式(1)得到。令 $u = (s P_j)^{-2/\alpha} v^2$, 式(15)可改写为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_k}(s) &= \exp \left\{ -\pi\lambda_k (s P_j)^{2/\alpha} \int_{(s P_j)^{-2/\alpha} z_j^2}^\infty 1/(1 + u^{\alpha/2}) du \right\} \\ &= \exp \left\{ -\pi\lambda_k (s P_j)^{2/\alpha} F(\alpha, (s P_j z_j^{-\alpha})^{-2/\alpha}) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $F(\alpha, (s P_j z_j^{-\alpha})^{-2/\alpha})$ 的一般函数形式为 $F(\alpha, y) = \int_y^\infty 1/(1 + u^{\alpha/2}) du$ 。将式(16)和式(8)代入式(14)得

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_4 = & 1 - \frac{4\pi^2\lambda_1\lambda_2}{\rho_4} \int_0^\infty \int_a^b r_1 r_2 \exp \left\{ -\pi \sum_{k=1}^2 \left[\lambda_k r_k^2 \right. \right. \\ & \left. \left. + \lambda_k \left(\frac{P_k \tau}{\sum_{j=1}^2 P_j r_j^{-\alpha}} \right)^{2/\alpha} \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot F \left(\alpha, \left(\frac{\tau P_k r_k^{-\alpha}}{\sum_{j=1}^2 P_j r_j^{-\alpha}} \right)^{-2/\alpha} \right) \right] \right\} dr_2 dr_1 \end{aligned} \quad (17)$$

类似地可得出, 当 u_o 属于 Ω_1, Ω_2 或者 Ω_3 时的中断概率为

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_1 = & 1 - \frac{\lambda_1}{\rho_1} \left(\sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{P_k}{P_1} \right)^{2/\alpha} \right. \\ & \left. \cdot \left(\tau^{2/\alpha} F \left(\alpha, \left(\frac{\tau}{B_k^c} \right)^{-2/\alpha} \right) + (B_k^c)^{2/\alpha} \right) \right)^{-1} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_2 = & 1 - \\ & \frac{\lambda_2}{\rho_2} \left(\sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{P_k}{P_2} \right)^{2/\alpha} \left(\tau^{2/\alpha} F \left(\alpha, \tau^{-2/\alpha} \right) + 1 \right) \right)^{-1} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_3 = & 1 \\ & - \frac{\lambda_2}{\rho_3} \left(\left(\lambda_2 \tau^{2/\alpha} F \left(\alpha, \tau^{-2/\alpha} \right) + \sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{B_k^e P_k}{B_l P_2} \right)^{2/\alpha} \right)^{-1} \right. \\ & \left. - \left(\lambda_2 \tau^{2/\alpha} F \left(\alpha, \tau^{-2/\alpha} \right) + \sum_{k=1}^2 \lambda_k \left(\frac{P_k}{P_2} \right)^{2/\alpha} \right)^{-1} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

本文将给出的另一重要性能指标是用户的频谱效率。与中断概率同样推导过程, 首先给出 u_o 属于 Ω_m 的平均遍历速率 $V_m (m \in \{1, 2, 3, 4\})$, 定义式可以表示为^[16]

$$V_m = \mathbb{E}_{r, \gamma_m} [\ln(1 + \gamma_m(r))] \quad (21)$$

用户的平均遍历速率描述了用户的频谱效率, 为用户到不同层服务基站间距离 R 和接收的干扰在统计意义下的平均。则 u_o 分别属于 Ω_m 时平均遍历速率 V_m 为

$$\begin{aligned} V_m = & \int_0^\infty \mathbb{E}_{\gamma_m} [\ln(1 + \gamma_m(R))] f_{X_m}(r) dr \\ = & \int_0^\infty \int_0^\infty \mathbb{P}[\gamma_m(R) > (e^t - 1)] f_{X_m}(r) dr dt \end{aligned} \quad (22)$$

结合式(13)–式(17)中 \mathcal{O}_4 的推导, 且令 $\tau = e^t - 1$ 可得

$$V_m = \int_0^\infty 1 - [\mathcal{O}_m]_{\tau=e^t-1} dt \quad (23)$$

其中, \mathcal{O}_m 在式(17)–式(20)中已经给出, $[\cdot]_{\tau=e^t-1}$ 表示将中断概率的变量 τ 用 $e^t - 1$ 进行变量替换。

假定整个2维平面 \mathbb{R}^2 为有限区域且面积为 A , 则系统模型下平均意义上各层基站的数目为 $N_{b,k} = \lambda_k A$, 总的用户数 $N_u = \lambda_u A$ 。此时不同层基站的负载(平均用户数)可以表示为

$$L_k = \frac{\rho_{b,k} N_u}{N_{b,k}} = \rho_{b,k} \frac{\lambda_u}{\lambda_k} \quad (24)$$

其中, $\rho_{b,k} (k = 1, 2)$ 表示为第 k 层基站用户的概率, 由式(4)中的 ρ_m 可得到 $\rho_{b,1} = \rho_1 + \rho_4$ 和 $\rho_{b,2} = \rho_2 + \rho_3 + \rho_4$ 。

为分析小基站扩展区域和协作区域的用户频谱效率, 现将 Ω_3 和 Ω_4 统称为边缘用户集合 $\Omega_e = \Omega_3 \cup \Omega_4$ 。为了简单起见, 本文采用轮询方式的资源分配方案, 因此用户集合 Ω_m 的总频谱效率为 $S_m = \eta_m V_m$ 。当 u_o 属于 Ω_e 时, 单个用户频谱效率可以表示为

$$S_e = \frac{\rho_3 S_3 + \rho_4 S_4}{(\rho_3 + \rho_4) N_{u,e}} = \frac{\rho_3 \eta_3 V_3 + \rho_4 \eta_4 V_4}{(\rho_3 + \rho_4)^2} \frac{\lambda_2}{\lambda_u} \quad (25)$$

其中, $N_{u,e}$ 是 Ω_e 中平均用户数目, 且时域资源比例 η_3 和 η_4 已经在式(11)给出。

而整个网络的平均遍历容量 C_{avg} 可以表示成

$$C_{\text{avg}} = W \sum_{m=1}^4 \rho_m \eta_m V_m \quad (26)$$

其中, W 为系统带宽, 由于采用轮询的资源调度方案, 故 C_{avg} 表示整个异构网络平均遍历容量。

3 仿真与分析

本节对联合干扰协调方案推导出来的用户中断概率, 用户频谱效率及网络平均遍历容量进行仿真数值分析。假设系统中每个宏基站和小基站的发送功率分别为 $P_1 = 37$ dBm, $P_2 = 20$ dBm。噪声功率 N 为0, 路径损耗因子 $\alpha = 4$, 网络中宏基站和小基站分布密度满足 $\lambda_1 = 1/(\pi \times 500^2)$, $\lambda_2 = 5\lambda_1$, 且用户分布密度为 $\lambda_u = 400\lambda_1$, 系统带宽 $W = 10$ MHz。

图2为网络中用户发生中断的概率与设置的SIR门限的关系图, 其中小基站的偏置值(或合作阈值)均设为10 dB, ABS比例 $\mu = 0.4$ 。图2中将本文所提干扰协调方案与eICIC技术方案, CoMP下行基站联合传输方案, 以及文献[16]未采用干扰协调方案情况做了对比。从图2中看出, 当不采用任何干扰协调技术时用户的中断概率最高; 而采用eICIC技术方案和本文所提的联合干扰协调方案时用户中断概率均小于仅采用CoMP下行基站联合传输方案。在 $\tau = 0$ dB时, 所提方案相对于CoMP下行

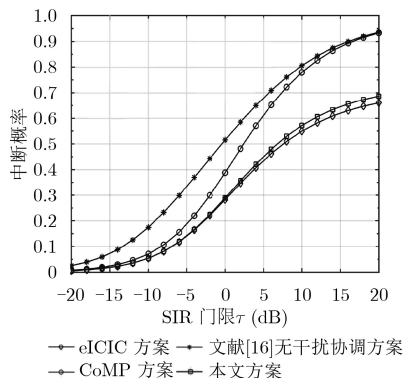


图2 不同SIR门限下的网络用户平均中断概率

基站联合传输方案用户发生中断减少幅度为15%左右。由于所提方案融入eICIC技术,因而更多的用户从宏基站分流到小基站,降低了宏基站负载。此外,ABS技术也为扩展区域用户提供保护,减少跨层干扰。

图3表示偏置值(或合作阈值)与不同层基站负载的关系。在相同的偏置值或合作阈值下所提方案和单独使用eICIC方案或CoMP的下行基站联合传输方案相比,卸载到小基站的户数相同且均随着偏置值的增加而增多。然而,仅采用CoMP联合传输方案时,由于卸载到小基站的户数仍需宏基站和小基站共同传输数据,所以宏基站负载用户没有减少。本文方案结合eICIC技术和CoMP技术的特点,随着偏置值的增加,部分用户会被卸载到小基站扩展区域从而降低了宏基站负载。

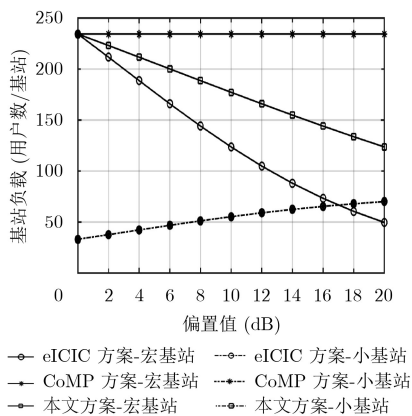


图3 不同偏置值(合作阈值)下每个基站平均负载

图4给出了不同偏置值(或者合作阈值)下,小基站边缘区域用户集合 Ω_e 中用户频谱效率的变化,其中ABS比率设为 $\mu = 0.4$ 。随着偏置值(或者合作阈值)的增加,宏基站边缘区域用户也不断增加,从而降低边缘用户的频谱效率。相比仅采用eICIC技术方案,仅采用CoMP联合传输方案可以有效改善边缘用户效率,但从图3中可以看出其牺

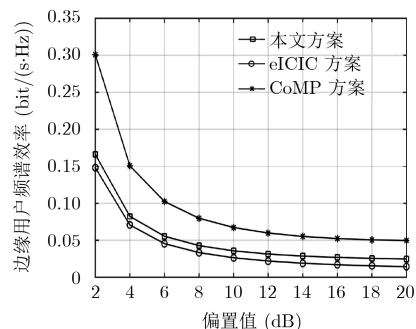


图4 不同偏置值下的边缘用户频谱效率变化图

牲了宏基站的负载。而本文所提的联合干扰协调方案,既降低了宏基站负载也使偏置值 $B_h = 10$ dB ($\beta = 5$ dB, $B_l = 5$ dB)时,频谱效率提升了35%。

图5为采用eICIC方案和本文方案时,整个网络平均遍历容量与小基站密度的关系图,其中ABS比率设为 $\mu = 0.4$,偏置值 $B_h = 10$ dB ($\beta = 5$ dB, $B_l = 5$ dB)。从中看出,随着小基站密度不断增加,网络平均遍历容量也增加;但由于小基站过于密集部署,小区间干扰增加,使网络平均遍历容量增加放缓。图5中将所提联合干扰协调方案与仅采用eICIC技术方案比较,在 $\lambda_2 = 5\lambda_1$ (≈ 14 dB)时整个网络的平均吞吐量提高了3.4%。由于所提联合干扰协调方案不仅可以通过eICIC技术分流宏基站用户,还可为部分扩展区域用户采用CoMP联合传输方式,使得边缘用户的频谱效率改善,进而提高整个网络的平均遍历容量。

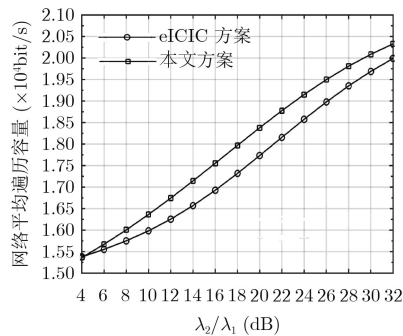


图5 不同小基站密度下的网络平均吞吐量变化图

4 结论

本文首先利用随机几何理论的齐次点过程对超密集异构网基站和用户位置分布建模,为解决现有的eICIC干扰协调技术和CoMP技术,消除超密集异构网络中跨层小区间干扰的不足,提出了联合eICIC和CoMP技术的干扰协调方案。基于此方案分别推导了用户中断概率,用户连接不同区域用户集合时的概率以及用户的频谱效率等性能指标。仿真结果表明,相比CoMP技术的联合传输方案,所

提方案降低了用户的平均中断概率;相比eICIC方案,所提方案中也改善了扩展区域用户的频谱效率。但本文所提的联合干扰协调方案中偏置值和协作阈值均是等比例设置,相比仅采用相同偏置值时eICIC技术方案,会增加宏基站的负载,从而损害宏基站用户频谱效率。然而,所提方案虽然损失了宏基站用户部分的频谱效率但换取了跨层严重干扰的边缘用户频谱效率的提升,以及网络综合性能网络平均遍历容量的改善。

参考文献

- [1] HAO Peng, YAN Xiao, RUYUE Y, *et al.* Ultra dense network: Challenges, enabling technologies and new trends[J]. *China Communications*, 2016, 13(2): 30–40.
- [2] NGUYEN V M and KOUNTOURIS M. Performance limits of network densification[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(6): 1294–1308. doi: [10.1109/JSAC.2017.2687638](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2687638).
- [3] KAMEL M, HAMOUDA W, and YOUSSEF A. Ultra-dense networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2522–2545. doi: [10.1109/COMST.2016.2571730](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2571730).
- [4] 孙强, 徐晨, 吴泳澎. 密集小蜂窝网络上性能分析与导频调度[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(11): 2541–2547. doi: [10.11999/JEIT170161](https://doi.org/10.11999/JEIT170161).
SUN Qiang, XU Chen, and WU Yongpeng. Uplink performance analysis and pilot scheduling for dense small-cell networks[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2017, 39(11): 2541–2547. doi: [10.11999/JEIT170161](https://doi.org/10.11999/JEIT170161).
- [5] JIANG Huilin, PAN Zhiwen, LIU Nan, *et al.* Gibbs-sampling-based CRE bias optimization algorithm for ultra-dense networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(2): 1334–1350. doi: [10.1109/TVT.2016.2560900](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2560900).
- [6] PEDERSEN K I, WANG Y, STRZYZ S, *et al.* Enhanced inter-cell interference coordination in co-channel multilayer LTE-advanced networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(3): 120–127. doi: [10.1109/MWC.2013.6549291](https://doi.org/10.1109/MWC.2013.6549291).
- [7] YE Qiaoyang, RONG Beiyu, CHEN Yudong, *et al.* User association for load balancing in heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(6): 2706–2716. doi: [10.1109/TWC.2013.040413.120676](https://doi.org/10.1109/TWC.2013.040413.120676).
- [8] DEB S, MONOIOUDIS P, MIERNIK J, *et al.* Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in LTE HetNets[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2014, 22(1): 137–150. doi: [10.1109/TNET.2013.2246820](https://doi.org/10.1109/TNET.2013.2246820).
- [9] 叶鹏, 李莉, 李海萍, 等. 超密集异构网络下的系统建模和时域干扰协调分析[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 47(2): 164–170. doi: [10.3969/J.ISSN.1000-5137.2018.02.005](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1000-5137.2018.02.005).
YE Peng, LI Li, LI Haiping, *et al.* Modeling of ultra-dense heterogeneous network and analysis by time-domain interference coordination[J]. *Journal of Shanghai Normal University(Natural Sciences)*, 2018, 47(2): 164–170. doi: [10.3969/J.ISSN.1000-5137.2018.02.005](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1000-5137.2018.02.005).
- [10] LEE D, SEO H, CLERCKX B, *et al.* Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: Deployment scenarios and operational challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(2): 148–155. doi: [10.1109/MCOM.2012.6146494](https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6146494).
- [11] CAO Yu, XIA Hailun, and FENG Chunyan. Evaluation of diverse cell range expansion strategies applying CoMP in heterogeneous network[C]. The 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, 2013: 1962–1966. doi: [10.1109/PIMRC.2013.6666465](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666465).
- [12] 朱晓荣, 朱蔚然. 超密集小蜂窝网中基于干扰协调的小区簇和功率分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(5): 1173–1178. doi: [10.11999/JEIT150756](https://doi.org/10.11999/JEIT150756).
ZHU Xiaorong and ZHU Weiran. Interference coordination-based cell clustering and power allocation algorithm in dense small cell networks[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2016, 38(5): 1173–1178. doi: [10.11999/JEIT150756](https://doi.org/10.11999/JEIT150756).
- [13] ALAMMOURI A, ANDREWS G, and BACCELLI F. SINR and throughput of dense cellular networks with stretched exponential path loss[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(2): 1147–1160. doi: [10.1109/TWC.2017.2776905](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2776905).
- [14] CHUN Y J, COTTON S L, DHILLON H S, *et al.* A stochastic geometric analysis of device-to-device communications operating over generalized fading channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(7): 4151–4165. doi: [10.1109/TWC.2017.2689759](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2689759).
- [15] EISAWY H, DAI W, ALOUINI M S, *et al.* Base station ordering for emergency call localization in ultra-dense cellular networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 301–315. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2759260](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2759260).
- [16] JO H S, SANG Y J, XIA P, *et al.* Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: A comprehensive downlink SINR analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(10): 3484–3495. doi: [10.1109/TWC.2012.081612.111361](https://doi.org/10.1109/TWC.2012.081612.111361).
- [17] STOYAN D, KENDALL W, and MECKE J. *Stochastic Geometry and Its Applications*[M]. New York: Wiley, 2013: 107–120.

李莉:女,1962年生,博士,教授,研究方向为认知异构网络资源分配和干扰管理。

叶鹏:男,1993年生,硕士生,研究方向为异构网干扰协调方案和无线通信。

彭张节:男,1982年生,博士,副教授,研究方向为大规模MIMO技术与无线通信协作传输。

唐延枝:女,1993年生,硕士生,研究方向为异构网干扰协调方案和无线通信。