

基于多点协作联合传输的超密集组网性能分析

曾孝平^{*①} 余丰^① 简鑫^① 李诗琪^① 杜得荣^① 蒋欣^② 方伟^②

^①(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

^②(北京民用飞机技术研究中心 北京 102211)

摘要: 超密集组网的基站高密度特性会带来严重的小区间干扰, 多点协作联合传输应用于超密集组网进行干扰管理是目前的研究热点, 该文对多点协作联合传输时基站密度对网络性能的影响进行了分析。首先采用随机几何方法推导了3维空间基站与用户距离的概率密度函数, 为选取距离用户最近的多个基站联合传输的协作机制提供了基础; 然后结合有界双斜率路径损耗模型, 进行用户下行链路的干扰建模, 进一步推导出用户下行链路覆盖率和网络区域频谱效率的表达式, 并分析了协作基站数、基站密度等参数对网络性能的影响。数值仿真表明: 协作基站数为2时就可使下行链路覆盖率增加10%, 且实现2到3倍的频谱效率的增益, 当协作基站数为3时, 费效比更优, 同时可得到多点协作下的基站密度极限使区域频谱效率最高。该文工作可为下一代移动通信网络的基站部署提供理论支持。

关键词: 超密集组网; 多点协作联合传输; 基站密度; 下行链路覆盖率; 区域频谱效率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)03-0563-08

DOI: 10.11999/JEIT180398

Performance Analysis of Ultra-dense Networks Based on Coordinated Multiple-points Joint Transmission

ZENG Xiaoping^① YU Feng^① JIAN Xin^① LI Shiqi^① DU Derong^①

JIANG Xin^② FANG Wei^②

^①(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

^②(Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: The high-density characteristic of base stations in Ultra-Dense Networks (UDN) brings serious inter-cell interference. It is the current research hotspot that Coordinated Multiple-Points Joint Transmission (CoMP-JT) is applied to UDN for interference management. The impact of base station density on network performance with CoMP-JT is analyzed. Firstly, the probability density function of the distance between the base station and the user in 3D space is derived using the stochastic geometric method. It provides the cooperation mechanism's basis for CoMP-JT that selecting the multiple base stations closest to the user to joint transmission. Then, the downlink interference model is carried out based on the bounded dual-slope path loss model, and the downlink coverage probability and network area spectrum efficiency are further derived. Thereafter, the impact of the parameters such as the number of cooperating base stations and the base station density on the performance of the system is investigated. Numerical simulations show that when the number of cooperative base stations is 2, the downlink coverage probability increases by 10%, and the network area spectral efficiency achieves a gain of 2 to 3 times. When the number of cooperating base stations is 3, the cost-effectiveness ratio is better, and the density of base stations that maximizes the network area spectral efficiency under CoMP-JT can be obtained. This paper provides theoretical support for the deployment of base stations in next-generation mobile communication networks.

收稿日期: 2018-04-27; 改回日期: 2018-11-14; 网络出版: 2018-11-22

*通信作者: 曾孝平 zxp@cqu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61501065, 61571069, 61701054, 61601067), 中央高校基本科研业务费(106112017CDJQJ168817), 重庆市基础科学与前沿技术研究专项(cstc2016jcyjA0021)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501065, 61571069, 61701054, 61601067), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112017CDJQJ168817), The General Project of Basic Science and Frontier Technology Research in Chongqing (cstc2016jcyjA0021)

Key words: Ultra-dense networks; Coordinated Multiple-Points Joint Transmission (CoMP-JT); Base station density; Downlink coverage probability; Network area spectral efficiency

1 引言

未来5G移动通信数据流量将井喷式增长,相比增加频谱带宽和改善物理层技术,超密集组网(Ultra-Dense Networks, UDN)通过高密度的频率空间复用来改善网络覆盖,是提高频谱利用率和无线网络容量更有效的办法^[1]。然而,网络密集化导致对目标用户产生同信道干扰的基站数持续增加^[2],小区间干扰成为制约网络容量增长的主要因素,因此在不考虑有限网络资源(如回程容量^[3]、数据传输时延^[4]等)的限制条件下,超密集组网也存在基本的密度极限,超过这个极限水平,单位面积(或单位体积)内再增加更多的基站对提升网络性能没有帮助^[5,6]。

基站密度因其能直接影响网络整体性能,一直是基站规划中研究的重点^[7]。在超密集组网场景中,基站与用户之间的距离 d 急剧缩短,常用的自由空间路径损耗模型 $d^{-\alpha}$ ($\alpha > 2$)是无界单斜率路损模型,不适用于研究超密集组网的网络性能,应采用更符合信号在短距离传播场景,如超密集组网^[6]、室内办公环境^[8]、毫米波网络^[9]下传播特性的有界双斜率路径损耗模型^[10]。若采用自由空间路损模型,一方面,在干扰受限情况下,单用户的平均速率与基站密度无关,网络总吞吐量和区域频谱效率随基站密度线性递增^[11,12];另一方面,当 $d < 1$ 时,得出接收信号功率大于发送功率的结论,显然与实际情况不符,不能准确观察网络覆盖率和区域频谱效率随基站密度的变化趋势^[13,14]。同时,无线信号在近距离传播时经历的障碍物更少,也即近场区的衰减会比远场区更慢,当基站密度超过一定界限时,网络区域频谱效率会减缓增长甚至减小^[15]。

运用有界双斜率路损模型,有研究者对影响超密集组网密度极限的参数进行了更深入的研究。文献^[16]研究用户与信号最强基站相连时,得出5G超密集组网的用户性能会依据近场路径损耗因子和信道衰落分布的不同,而随着基站密度的增加而单调增加或饱和或减小。同时,当基站密度足够大时,用户密度与基站密度的相对大小也会影响用户覆盖率和区域频谱效率的变化趋势^[17]。文献^[18]则将双斜率路损模型下的超密集组网的潜在吞吐量的计算推广到3维场景。然而,针对小区间干扰的问题,将干扰协调技术应用于超密集组网的研究目前还不充分。

多点协作联合传输技术通过共享信道信息和用户数据信息,由多个基站同时为同一用户提供服

务,将邻区干扰由被动抑制转为主动利用,能有效降低小区间干扰^[19],在超密集组网中具有广泛应用前景^[20],且当基站密集部署时,无信道状态信息共享的协作模式远远不及共享信道状态信息的联合传输有效^[21]。文献^[22]将干扰强的小区划为一个簇来共享频谱资源,协作为用户服务,簇与簇之间实现频谱复用来减小干扰。文献^[23,24]则分别在基站规则部署与随机部署的网络模型中,利用多点协作技术改善上行链路状况来减小基站密度,并对协作区域内的每个基站总的覆盖速率得出准确的闭式解。同时,基于有界双斜率路损模型,文献^[25]在随机部署全向单天线基站后,用户仅选取距其最近的两个基站作为协作基站,分析了多点协作联合传输对用户覆盖率的提升。文献^[26]通过在随机部署的基站平面上划分正六边形网格,处于一个网格内的基站组成协作簇,并利用随机几何和大偏差理论分析了移动用户的通信中断率。文献^[21]考虑在基站密度大于用户密度的情况下,使临近空闲基站用于多点协作传输,进而研究不同协作数对网络能量效率的影响。然而,目前仍缺乏研究在多点协作联合传输条件下,超密集组网中基站密度对网络性能的影响。

综上所述,目前关于基站密度极限的研究多考虑在有限网络资源条件下,实现网络性能最优的基站密度,以及在非协作情况下基站基本密度极限的研究。所提模型通常属于经典六边形蜂窝小区框架且采用自由空间路损模型。但在超密集组网中基站覆盖半径、发射功率、覆盖层次等更加随机化,不再符合简单的规则分布,且自由空间路损模型也缺少对近场区传播特性的考虑;而常见的2维网络模型在建模乡村或郊区的宏基站是足够准确的,但对于密集市区尤其是基站位于高层中心时,3维网络模型会更加准确^[27]。

为了弥补以上研究的不足,本文针对热点区域超密集组网的场景,利用空间泊松过程反映基站在3维空间分布的随机性^[28],采用有界双斜率路损模型描述超密集组网中信号近距离传输特性,将多点协作联合传输运用于基站的超密集部署来改善小区间干扰,推导了用户下行链路覆盖率和网络区域频谱效率的积分表达式,据此表达式进行数值仿真分析了协作基站数、基站密度、信干噪比阈值等参数对网络性能的影响,并以区域频谱效率作为网络性能的评价指标,得出多点协作联合传输下超密集组网的基站密度极限。

2 网络模型

考虑热点区域超密集蜂窝网络基站的随机化分布,使基站BS(Base Station)在3维空间内的位置分布服从泊松点过程(Poisson Point Process, PPP) Φ ,泊松点过程强度为 λ ,点过程强度反映了基站的分布密度。这里假设所有基站均有服务用户,不存在空闲基站。空间中用户服从随机分布或确定性分布,以单目标用户为中心,网络模型如图1所示。

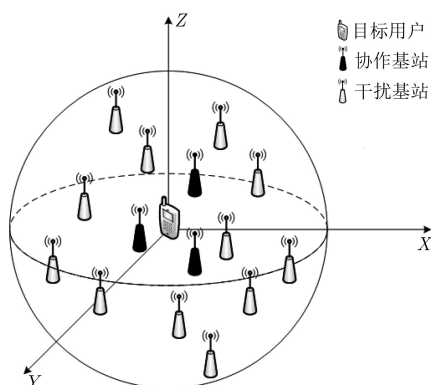


图1 3维多点协作蜂窝网络模型

下行链路的多点协作联合传输采用全频率复用,除协作基站外的所有基站均构成干扰,则对于需要协作的目标用户来说,通过空间分集来提高下行链路的通信质量。由于室内办公室等热点场景具有理想回程链路,以及可以运用5G平滑虚拟小区(Smooth Virtual Cell, SVC)和无线自回程技术传输节点间的信令(Signaling over The Air, SoTA)等技术来减少多点协作所带来的网络成本(选址/回程链路部署)^[29],因此本文不考虑回程容量的限制。为了简化分析,假设基站和用户都装有全向单天线,且基站发送功率相同,归一化为1。

多点协作联合传输时,以目标用户为中心,选取距离目标用户最近的 n 个基站作为协作基站进行服务,其中第 $i(1 \leq i \leq n)$ 近协作基站与目标用户之间的距离为 r_i ,泊松点过程保证了变量 r_i 之间的独立性。非协作情况下,仅选取距离目标用户最近的一个基站作为服务基站。

在超密集组网中依据基站与用户之间的距离 d 确定协作基站后,基站发送功率的大尺度路径损耗 $L(d)$ 采用有界双斜率路径损耗模型,信号传输范围根据临界距离 R_c 分为近场区和远场区,近场区信号传播经历更少的障碍物散射,其路损因子 α_1 比远场区路损因子 α_2 小,其具体取值与实际应用场景有关^[17]。而在近场区中更小的范围内,即 $d \in [0, 1)$ 时,信号传输不经历衰减,其路损因子为

常数0。这种有界双斜率路损模型的分段函数表达式为

$$L(d) = \begin{cases} 1, & 0 \leq d < 1 \\ d^{-\alpha_1}, & 1 \leq d < R_c \\ \tau d^{-\alpha_2}, & d \geq R_c \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\tau = R_c^{\alpha_2 - \alpha_1}$ 以保证函数的连续性,路损因子满足 $2 < \alpha_1 < \alpha_2$ 。

同时,考虑协作基站 i 与目标用户的信道小尺度衰落为瑞利衰落 h_i ,其功率服从相互独立的均值为1的指数分布。则对于目标用户来说,接收到来自协作基站 i 的有用信号功率为 $P_i = h_i L(r_i)$ 。多点协作时有用信号总功率是 n 个协作基站的信号功率之和,所以目标用户收到的总的有用功率 P 表示为

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n h_i L(r_i) \quad (2)$$

除协作基站外,其他基站的发送信号为干扰信号,总干扰信号功率 I 表示为

$$I = \sum_{j \in \Phi/B(0, r_n)} g_j L(r_j) \quad (3)$$

其中, $B(0, r_n)$ 代表以目标用户为球心,以最近服务基站与目标用户的距离 r_n 为半径的球域,该球域内的基站均为协作基站,而点集 $\Phi/B(0, r_n)$ 代表球域外的基站,均视为干扰基站。随机变量 g_j 代表干扰基站 j 到目标用户之间的瑞利衰落,其功率服从相互独立的均值为1的指数分布,随机变量 r_j 表示干扰基站 j 与目标用户之间的距离。

在上述建立的网络模型的基础上,重点关注目标用户的下行链路的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)覆盖率和网络的区域频谱效率两项性能指标。

3 下行链路覆盖率和区域频谱效率

下行链路覆盖率和区域频谱效率是评价网络性能的重要指标,推导多点协作下的下行链路覆盖率和区域频谱效率的解析式可为分析基站密度对网络性能的影响提供理论支撑。本节在前节3维场景下基站部署模型和双斜率路损模型的基础上,推导下行链路覆盖率和区域频谱效率的解析式。

根据泊松点过程的性质,可不失一般性地随机选取用户作为目标用户分析网络性能。下行链路覆盖率 P_c 定义为信干噪比SINR大于门限值 T 的概率^[3,17],表达式为

$$P_c = P_r(\text{SINR} > T) = P_r\left(\frac{P}{I + \sigma^2} > T\right) \quad (4)$$

其中,常数 σ^2 为加性噪声。式(4)反映了任意时刻

达到SINR门限值的平均用户比例,也表示任意时刻网络区域的平均覆盖率,同时也是SINR的互补累积分布函数的表达式。

根据下行链路覆盖率的定义,以及泊松点过程保证了随机变量 r_i 之间的相互独立,用函数 $f_i(r_i)$ 表示第 i 近协作基站与用户之间距离的概率密度函数,则下行链路覆盖率进一步可表示为

$$\begin{aligned} P_c &= E_{(r_1, \dots, r_n)} [P_r(\text{SINR} > T) | r_1, \dots, r_n] \\ &= \int_{r_1 > 0} \int_{r_2 > r_1} \dots \int_{r_n > r_{n-1}} P_r \left(\frac{P}{I + \sigma^2} > T \right) \\ &\quad \cdot f_1(r_1) f_2(r_2) \dots f_n(r_n) dr_n \dots dr_2 dr_1 \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} &P_r \left(\frac{P}{I + \sigma^2} > T \right) \\ &= E_I \left[P_r \left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i L(r_i)}{I + \sigma^2} > T \right) \right] \\ &\stackrel{(a)}{=} E_I \left[P_r \left(\frac{h \sum_{i=1}^n L(r_i)}{I + \sigma^2} > T \right) \right] \\ &\stackrel{(b)}{=} E_I \left[\exp \left(-\frac{TI}{\sum_{i=1}^n L(r_i)} \right) \right] \exp \left(-\frac{T\sigma^2}{\sum_{i=1}^n L(r_i)} \right) \\ &\stackrel{(c)}{=} L_I \left[\frac{T}{\sum_{i=1}^n L(r_i)} \right] \exp \left(-\frac{T\sigma^2}{\sum_{i=1}^n L(r_i)} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

变换(a)由各路径信号经历的瑞利衰落相互独立的性质得到,变换(b)由瑞利衰落 h 的功率服从均值为1的指数分布,并由指数分布的性质得到,变换(c)则根据拉普拉斯变换定义得到。

由式(5),式(6)可知,求解下行链路覆盖率,需计算各协作基站与用户之间的距离 r_i 的概率密度函数 $f_i(r_i)$,和用户接收到的干扰信号功率的拉普拉斯变换。下面分别介绍概率密度函数以及干扰信号功率的求解。

首先推导各协作基站与用户之间的距离 r_i 的概率密度函数 $f_i(r_i)$,文献[30]推导了2维场景中第 i 近协作基站到用户的距离 r_i 的概率密度函数,本文则

将其结果扩展到3维空间。由于第 i 近协作基站到用户的距离 r_i 的概率密度函数为

$$f_i(r_i) = e^{-\Lambda(\lambda, r_i)} \frac{d\Lambda(\lambda, r_i)}{dr_i} \frac{\Lambda^{i-1}(\lambda, r_i)}{(i-1)!} \quad (7)$$

令 $\Lambda(\lambda, r_i)$ 表示强度为 λ 的空间泊松点过程在球域 $B(0, r_i)$ 内的测度,根据泊松点过程性质有

$$\Lambda(\lambda, r_i) = \int_{B(0, r_i)} \lambda dr = \frac{4}{3} \lambda \pi r_i^3 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),得到第 i 近的协作基站到目标用户的距离 r_i 的概率密度函数为

$$f_i(r_i) = 4\pi\lambda r_i^2 e^{-\frac{4}{3}\lambda\pi r_i^3} \frac{\left(\frac{4}{3}\lambda\pi r_i^3\right)^{i-1}}{(i-1)!} \quad (9)$$

根据式(3)进一步计算干扰信号的拉氏变换,有

$$\begin{aligned} L_I(s) &= E_I [e^{-sI}] \\ &= E_{\Phi/B(0, r_n)} \left\{ \prod_{j \in \Phi/B(0, r_n)} E_{g_j} [\exp(-s g_j L(r_j))] \right\} \\ &\stackrel{(d)}{=} \exp \left\{ -4\pi\lambda \int_{r_n}^{+\infty} [1 - E_{g_j} [\exp(-s g_j L(v))]] v^2 dv \right\} \\ &\stackrel{(e)}{=} \exp \left[-4\pi\lambda \int_{r_n}^{+\infty} \left(\frac{sv^2 L(v)}{1 + sL(v)} \right) dv \right] \end{aligned} \quad (10)$$

其中,变换(d)根据泊松点过程在3维空间的概率母泛函得到[31],变换(e)则由干扰基站 j 到目标用户之间的瑞利衰落功率 g_j 服从相互独立的均值为1的指数分布得到。

将式(10)干扰信号功率的拉普拉斯变换代入式(6),再代入下行链路覆盖率表达式(5)中,最终得到多点协作联合传输情况下的下行链路覆盖率 P_c 的表达式为

$$\begin{aligned} P_c &= E_{(r_1, \dots, r_n)} \left\{ \exp \left[-4\pi\lambda \int_{r_n}^{+\infty} \left(\frac{sv^2 L(v)}{1 + sL(v)} \right) dv \right] \right. \\ &\quad \left. \cdot \exp(-s\sigma^2) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $s = T / \sum_{i=1}^n L(r_i)$ 。由式(11)便可在具体参数设置下计算下行链路覆盖率 P_c 。

在超密集基站部署中采用随机几何的方法,使基站站址随机化分布,区域频谱效率能更好地表征网络的传输性能。在3维空间中区域频谱效率定义为:单位体积、单位频谱所提供的所有用户吞吐量的总和[17],单位为bps/(Hz·m³),表示为

$$F_c(\lambda, n, T) = \lambda P_c(\lambda, n, T) \log_2(1 + T) \quad (12)$$

其中， $\lambda P_c(\lambda, n, T)$ 表示单位体积内可成功传输信息给用户的基站密度。区域频谱效率反映了小区密集化增益，也可看作是潜在(最大)网络吞吐量。

4 仿真结果与分析

基于第2节所述网络模型，本节通过对比蒙特卡洛仿真结果与理论推导的数值结果，验证第3节的理论推导并作进一步分析。仿真平台采用Matlab，由于收发端天线增益与网络性能成线性关系，将其归一化为1。为避免同信道干扰^[32]，固定发送功率为1。设置信噪比为20 dB，则噪声功率 $\sigma^2=0.01$ 。具体仿真参数依照文献^[18]设置 $R_c=10$ m， $\alpha_1=2$ ， $\alpha_2=4$ ，使双斜率路损模型更符合室内、LTE、毫米波应用场景的测量值。在下行链路中，只考虑协作数 n 为1, 2, 3, 4的情况。

图2展示了协作数 $n=2$ 时，下行链路覆盖率随基站密度的变化情况，“无限空间”对应曲线表示基站分布在无限空间内，即式(11)积分部分积分上限为 ∞ ；“有限空间”对应曲线表示基站分布在以用户为中心，半径为50 m的有限球体空间内，即式(11)积分部分中积分上限为50；“蒙特卡洛”所对应曲线表示在以用户为中心，半径为50 m的有限球体空间内，在相同参数设置下通过蒙特卡洛仿真取平均所得到的实验结果，用以验证理论推导的准确性。由图2可见，有限空间内覆盖率高于无限空间，这是因为无限空间内干扰基站数更多，用户SINR更小，导致覆盖率的降低。因此无限空间的理论推导可作为网络性能分析的理论下限。同时，在有限空间的情况下，理论分析曲线与蒙特卡洛曲线贴合较为紧密，验证了第3节理论推导的准确性。

图3令基站密度 λ 为 -20 dB，即 0.01 BSs/m³，得到下行链路覆盖率随阈值 T 的变化情况。从图中可知，随着阈值的增大，下行链路覆盖率逐渐下降。同时，协作基站数的增加有利于提高覆盖率，这是因为基站协作可增大有用信号功率，减小干扰信号功率，提高用户SINR。

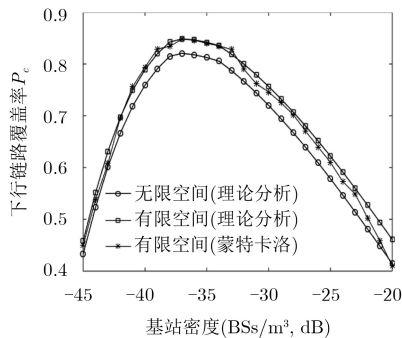


图2 $n=2$ 时下行链路覆盖率随基站密度变化情况

图4令阈值 T 为 -10 dB，得到下行链路覆盖率随基站密度变化情况。从图4中可知，覆盖率随基站密度的增大而先递增后递减，存在一个极限基站密度使得覆盖率取得极大值。这是因为一方面，当基站密度较小时，网络处于噪声受限的状态，网络密集化通过缩短收发端的距离可以显著提高有用信号功率，改善频谱的空间复用，提升覆盖率。另一方面，网络过于密集使用户周围干扰源急剧增多，产生严重的小区间干扰，降低了覆盖率。同时，多点协作时增加协作基站数能显著提升覆盖率，协作基站数为2时就可使下行链路覆盖率增加10%。横向来看，为满足相同的覆盖率，多点协作可减小所需基站密度；纵向来看，相同的基站密度下，多点协作可有效增加覆盖率。除此之外，协作基站数每增加一个所带来的覆盖率增加幅度越来越小，协作数为4比协作数为3时对覆盖率的改善很小，即在考虑基站实际成本和部署难度与效用的折中关系时，协作基站数为3个左右时，费效比更优。

在下行链路覆盖率的基础上，进一步研究网络的区域频谱效率。图5令基站密度 λ 为 -20 dB，得到区域频谱效率随阈值 T 的变化情况。从图5中可知，频谱效率随阈值的增大先递增后递减，由式(12)可知，这主要是由覆盖率随阈值单调递减，而区域频谱效率随阈值单调递增所决定。

图6令阈值 T 为 -10 dB，得到区域频谱效率随

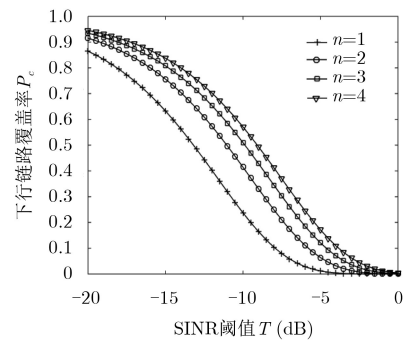


图3 下行链路覆盖率随SINR阈值 T 变化情况

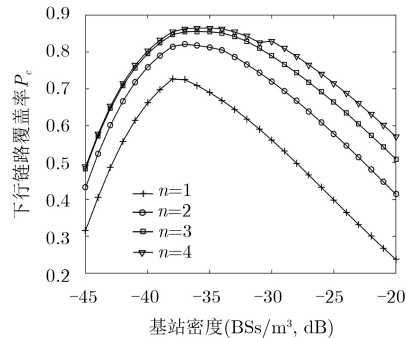


图4 下行链路覆盖率随基站密度变化情况

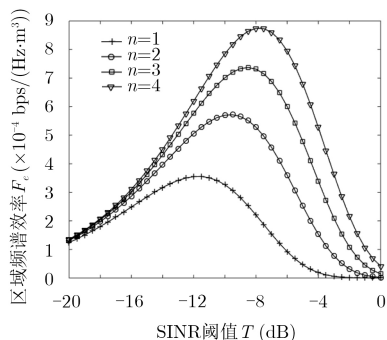


图5 区域频谱效率随SINR阈值 T 的变化情况

基站密度变化情况。从图6中可知，多点协作可大幅改善区域频谱效率，两个协作基站数时就可以实现2到3倍的频谱效率的增益，同时区域频谱效率随着基站密度的增大先递增后递减，存在一个极限基站密度(-8 dB左右)使得频谱效率取得极大值。也可发现，不同协作基站数时，区域频谱效率取得峰值所对应的基站极限密度差别不大，仅数dB，这是由于式(12)中考虑的协作基站数有限，而对于干扰基站的考虑则是整个无限3维空间，协作基站数的少量增加对整体网络由噪声受限过渡到干扰受限的影响不大。

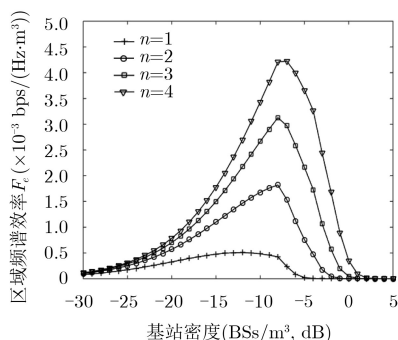


图6 区域频谱效率随基站密度的变化情况

5 结束语

本文利用空间随机几何理论，建立了超密集组网中多点协作联合传输的网络模型，结合有界双斜率路径损耗模型，推导了多点协作下目标用户下行链路覆盖率和网络区域频谱效率的数学表达式，并利用蒙特卡洛仿真结果与理论推导结果的一致性验证了理论推导的准确性，然后研究了基站密度对网络性能的影响，得到多点协作下的基站密度极限。仿真结果显示：多点协作能有效改善网络性能，即可以用较小的基站密度实现目标覆盖，也可进一步增加基站密度，实现更大的区域频谱效率，但每额外增加一个协作基站带来的性能增益逐渐减小，基站协作数为3个左右时最为理想。同时，在网络由

噪声受限到干扰受限时，存在基站密度极限使网络性能达到最优，并可获得对应基站极限密度的数值解。本文是对多点协作下超密集组网中基站密度对网络性能影响的深入研究，理论分析结果可根据具体应用环境调整参数设置，为下一代移动通信网络的基站实际部署提供理论支持。

参考文献

- [1] LOPEZ-PEREZ D, DING Ming, CLAUSSEN H, *et al.* Towards 1 Gbps/UE in cellular systems: understanding ultra-dense small cell deployments[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2078–2101. doi: [10.1109/COMST.2015.2439636](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2439636).
- [2] ANANG K A, RPAJIC P B, ENEH T I, *et al.* Minimum cell size for information capacity increase in cellular wireless network[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Yokohama, Japan, 2011: 1–6. doi: [10.1109/VETECS.2011.5956350](https://doi.org/10.1109/VETECS.2011.5956350).
- [3] GE Xiaohu, TU Song, MAO Guoqiang, *et al.* 5G ultra-dense cellular networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(1): 72–79. doi: [10.1109/MWC.2016.7422408](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7422408).
- [4] VAZE R and IYER S K. Capacity of cellular wireless network[C]. *15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, Paris, France, 2017: 1–8. doi: [10.23919/WIOPT.2017.7959907](https://doi.org/10.23919/WIOPT.2017.7959907).
- [5] ANDREWS J G, ZHANG Xinchun, DURGIN G D, *et al.* Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification?[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(10): 184–190. doi: [10.1109/MCOM.2016.7588290](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7588290).
- [6] ZHANG Xinchun and ANDREWS J G. Downlink cellular network analysis with multi-slope path loss models[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(5): 1881–1894. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2413412](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2413412).
- [7] GE Xiaohu, DU Bangzheng, LI Qiang, *et al.* Energy efficiency of multiuser multi-antenna random cellular networks with minimum distance constraints[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 66(2): 1696–1708. doi: [10.1109/TVT.2016.2557359](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2557359).
- [8] XU Ding, ZHANG Jianhua, GAO Xinying, *et al.* Indoor office propagation measurements and path loss models at 5.25 GHz[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Baltimore, USA, 2007: 844–848. doi: [10.1109/VETECS.2007.185](https://doi.org/10.1109/VETECS.2007.185).
- [9] KORRAI P K and SEN D. Downlink SINR coverage and rate analysis with dual slope pathloss model in mmWave networks[C]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, San Francisco, USA, 2017: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2017.7925834](https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925834).

- [10] LIU Junyu, SHENG Min, LIU Lei, *et al.* Network densification in 5G: From the short-range communications perspective[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(12): 96–102. doi: [10.1109/MCOM.2017.1700487](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700487).
- [11] ANDREWS J G, BACCELLI F, and GANTI R K. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(11): 3122–3134. doi: [10.1109/TCOMM.2011.100411.100541](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2011.100411.100541).
- [12] DING Ming, LOPEZ-PEREZ D, MAO Guoqiang, *et al.* Will the area spectral efficiency monotonically grow as small cells go dense?[C]. *IEEE Global Communications Conference*, San Diego, USA, 2015: 1–7. doi: [10.1109/GLOCOM.2015.7416981](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2015.7416981).
- [13] LIU Junyu, SHENG Min, LIU Lei, *et al.* Effect of densification on cellular network performance with bounded pathloss model[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(2): 346–349. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2615298](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2615298).
- [14] ARNAU J, ATZENI I, and KOUNTOURIS M. Impact of LOS/NLOS propagation and path loss in ultra-dense cellular networks[C]. *ICC 2016 IEEE International Conference on Communications*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2016.7511506](https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7511506).
- [15] DING Ming, WANG Peng, LOPEZ-PEREZ D, *et al.* Performance impact of LoS and NLoS transmissions in dense cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 15(3): 2365–2380. doi: [10.1109/TWC.2015.2503391](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2503391).
- [16] 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).
- [17] YANG Yanpeng, PARK J, and SUNG K W. On the asymptotic behavior of ultra-densification under a bounded dual-slope path loss model[C]. *To Appear in European Wireless*, Dresden, Germany, 2017: 229–235.
- [18] GUPTA A K, ZHANG Xinchun, and ANDREWS J G. Potential throughput in 3D ultradense cellular networks[C]. *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, USA, 2015: 1026–1030. doi: [10.1109/ACSSC.2015.7421294](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2015.7421294).
- [19] LI Qian, HU Qingyang, and QIAN Yi. Cooperative communications for wireless networks: Techniques and applications in LTE-advanced systems[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(2): 22–29. doi: [10.1109/MWC.2012.6189409](https://doi.org/10.1109/MWC.2012.6189409).
- [20] LIU Junyu, SHENG Min, LIU Lei, *et al.* Interference management in ultra-dense networks: Challenges and approaches[J]. *IEEE Network*, 2017, 31(6): 70–77. doi: [10.1109/MNET.2017.1700052](https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1700052).
- [21] YANG Yanpeng, SUNG K W, PARK J, *et al.* Cooperative transmissions in ultra-dense networks under a bounded dual-slope path loss model[C]. *European Conference on Networks and Communications*, Oulu, Finland, 2017: 1–6. doi: [10.1109/EuCNC.2017.7980732](https://doi.org/10.1109/EuCNC.2017.7980732).
- [22] 朱晓荣, 朱蔚然. 超密集小蜂窝网中基于干扰协调的小区分簇和功率分配算法[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 Electronics & Information Technology*, 2016, 38(5): 1173–1178. doi: [10.11999/JEIT150756](https://doi.org/10.11999/JEIT150756).
- [23] BANANI S A and ADVE R S. Analyzing the reduced required BS density due to CoMP in cellular networks[C]. *Global Communications Conference*, Atlanta, USA, 2013: 2015–2019. doi: [10.1109/GLOCOM.2013.6831371](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2013.6831371).
- [24] BANANI S A and ADVE R S. The density penalty for random deployments in uplink CoMP networks[C]. *Wireless Communications and Networking Conference*, Istanbul, Turkey, 2014: 577–582. doi: [10.1109/WCNC.2014.6952092](https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6952092).
- [25] BACCELLI F and GIOVANIDIS A. A stochastic geometry framework for analyzing pairwise-cooperative cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 14(2): 794–808. doi: [10.1109/TWC.2014.2360196](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2360196).
- [26] HUANG Kaibin and ANDREWS J G. An analytical framework for multicell cooperation via stochastic geometry and large deviations[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 59(4): 2501–2516. doi: [10.1109/TIT.2012.2232966](https://doi.org/10.1109/TIT.2012.2232966).
- [27] PAN Ziyu and ZHU Qi. Modeling and analysis of coverage in 3-D cellular networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(5): 831–834. doi: [10.1109/LCOMM.2015.2411599](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2411599).
- [28] STREIT R L, 史习智, 龚光鲁, 等. 泊松点过程: 成像、跟踪和感知[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 69–73.
- STREIT R L, SHI Xizhi, GONG Guanglu, *et al.* Poisson Point Process: Imaging, Tracking, and Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2013: 69–73.
- [29] 杨立, 黄河, 袁弋非, 等. 5G UDN (超密集网络)技术详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018: 233–244.
- YANG Li, HUANG He, YUAN Yifei, *et al.* Ultra Dense Networks of 5th Generation Mobile Communications[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2018: 233–244.
- [30] 蔡杰, 刘陈, 陆峰. 基于随机几何理论的多点协作网络分析[J]. *计算机技术与发展*, 2016, 26(6): 200–204. doi: [10.3969/j.issn.1673-629X.2016.06.045](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-629X.2016.06.045).

- CAI Jie, LIU Chen, and LU Feng. Analysis of multi-cell coordination network based on stochastic geometry approach[J]. *Computer Technology and Development*, 2016, 26(6): 200-204. doi: [10.3969/j.issn.1673-629X.2016.06.045](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-629X.2016.06.045).
- [31] GUPTA A K, ZHANG Xinchun, and ANDREWS J G. SINR and throughput scaling in ultradense urban cellular networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4(6): 605-608. doi: [10.1109/LWC.2015.2472404](https://doi.org/10.1109/LWC.2015.2472404).
- [32] WEBB W T and STEELE R. Variable rate QAM for mobile radio[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, 43(7): 2223-2230. doi: [10.1109/26.392965](https://doi.org/10.1109/26.392965).
- 曾孝平: 男, 1956年生, 教授, 研究方向为下一代移动通信、无线通信、空间信息网.
- 余 丰: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为下一代移动通信、无线通信.
- 简 鑫: 男, 1987年生, 副教授, 研究方向为下一代移动通信、多入多出网络.
- 李诗琪: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为下一代移动通信、空间信息网.
- 杜得荣: 男, 1986年生, 博士, 研究方向为移动无线信道建模、空间信息网.
- 蒋 欣: 男, 1970年生, 博士, 研究员, 研究方向为航空电子系统综合设计技术和机载系统技术.
- 方 伟: 男, 1978年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为航空电子系统、机载宽带通信技术等.