

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

朱晓荣^{*①②} 朱蔚然^①

^①(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210003)

摘要: 干扰的有效管理是超密集小蜂窝网中的一个研究难点。该文提出将超密集小蜂窝网中的小区干扰协调和分簇相结合的算法,通过分配最优的功率降低干扰,最大化系统吞吐量。根据干扰的程度,将干扰强的小蜂窝划为一个簇,同一个簇内的小蜂窝共享频谱资源,协作为用户服务,簇与簇之间实现频谱复用。仿真结果表明,该算法在网络密集部署时,有效地减小干扰,提高系统吞吐量。

关键词: 超密集网络;分簇;功率分配;干扰管理

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)05-1173-06

DOI: 10.11999/JEIT150756

Interference Coordination-based Cell Clustering and Power Allocation Algorithm in Dense Small Cell Networks

ZHU Xiaorong^{①②} ZHU Weiran^①

^①(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210003, China)

Abstract: Effective interference management is one of research difficulties in dense small cell network. This paper proposes a new algorithm in which inter-cell interference is combined with clustering. And the system achieves maximizing system throughput by the optimal power allocation. According to the degree of interference, the cells are divided into several clusters and the cells with the bigger inter-cell interference are divided in the same cluster. The cells within a cluster share the spectrum and serve the user terminals with cooperation and the cells within different clusters may reuse the spectrum. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively decrease the interference and improve system throughput in densely deployed small networks.

Key words: Dense small cell network; Clustering; Power allocation; Interference management

1 引言

随着互联网应用的快速发展以及数据业务需求的爆发式增加,无线网络面临着巨大的挑战。在第五代(5G)移动系统中,大规模 MIMO 天线和超密集部署网络是提高吞吐量的两种方式。为了满足大量的数据通信需求,需要在一些热点区域大规模地部署小基站,以提高网络覆盖率减轻宏蜂窝的超重负

载服务^[1]。然而,在超密集网络中,各个小基站距离很近,又使用相同的频谱资源,各个小区之间会造成很大的干扰,而能否对小区间干扰(Inter Cell Interference, ICI)进行有效管理成为超密集网络大面积部署走向商用的挑战之一。

现阶段很多国内外学者对小区间干扰、功率分配问题进行了研究^[2-15]。文献[2]提出了由飞蜂窝网关(Femto Gateway, FG)负责分簇,然后利用簇头节点对簇中节点进行子信道及功率分配的方法,该文给出了两层网络中的资源分配问题,但没有给出具体的资源分配算法。文献[3]提出了基于图论的动态协作算法,通过用户提供的干扰信息创建关于接入点(Access Point, AP)的干扰图,在考虑传输过程中的大尺度衰落的同时,对用户分簇进行协同通信。该分簇算法复杂度较高,计算量较大。文献[4]提出了一种基于动态分簇的子带宽资源分配算法,将资源分配问题分为几个小问题,首先构造权重干扰图,

收稿日期: 2015-06-24; 改回日期: 2016-03-03; 网络出版: 2016-03-30

*通信作者: 朱晓荣 xrzhu@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61372125), 973 计划(2013CB329104), 国家 863 计划(2015AA01A705), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2013D01)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61372125), The National 973 Project of China (2013CB329104), The National 863 Project of China (2015AA01A705), The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2013D01)

然后基于干扰图建立分簇,为其进行带宽分配,从而使得网络吞吐量有所提升。文献[5]将多点协作(Coordinated Multiple-Points, CoMP)技术用于演进型 node B 之间的协作以减小小区间的干扰,同时采用设备与设备(Device to Device, D2D)通信技术提高网络边缘的可靠性。文献[6]提出一种 CoMP 联合传输方式,利用波束成形技术和时空/频率编码或预编码技术来获取数据,将数据映射到不同的传输节点,这种方法能够有效降低用户设备(User Equipment, UE)接收复杂度及密码本的设计复杂度。文献[7]是在长期演进超密集小蜂窝网环境下,提出一个在考虑网络回程前提下评估功率消耗的网络模型,通过考虑这些回程信息约束和功率消耗,使得超密集 LTE 网络的开销平衡,节省能量。文献[8]提出一个重要位置超密集域(Significant Local Dense Area, SLDA)的新结构,利用空间统计测试方法来确定重要位置区域,之后通过贪婪搜索算法在数据库中搜索合适 SLDA,最后综合搜索结果提出一个较高性能的分簇结果。文献[9]考虑了小基站对宏蜂窝用户的干扰通过 Stackberg 博弈解决了小基站功率分配问题。文献[10]考虑多载波宏基站和微基站之间存在频偏的实际情况,提出一种通过设计微基站发射预编码对宏用户进行干扰协调的方法。

文献[11]在小基站密集部署场景下提出了首先将小基站分簇,然后在每一簇中完成功率和频谱分配的观点。文献[12]提出一种在 LTE 异构网络中基于小区覆盖增强技术的上行干扰识别与协调机制方法,能够准确识别上行干扰源及其强度,并进行相应的干扰协调处理。文献[13]考虑小基站之间的最大最小公平性,研究了分布式频谱分配算法。文献[14]以能量效率为目标以博弈论的方法研究了小蜂窝的功率和频谱分配算法,却忽略用户的业务需求。文献[15]考虑用户的最小吞吐量要求,以最小发射功率为目标,设计了分布式功率和频谱分配算法。

针对超密集网络中干扰增强而导致资源利用率不高的问题,本文将超密集网络中的小区干扰协调和分簇相结合,提出最优的功率分配算法以最大化系统整体吞吐量。具体来说,在考虑信道分配的基础上,对超密集网络中的小区间进行干扰分析,将干扰强的多个接入点(Access Point, AP)点划为一个簇,这些 AP 点可以协作为用户服务,将干扰转换为特定的代价信息,通过干扰图,动态更新干扰代价信息,根据干扰强度,选择合适的协作 AP,通过动态的功率分配来减小相邻小区之间的信道干扰。仿真实验结果表明,该算法能够在网络密集部署时,有效地减小相邻小区之间的干扰,提高系统吞吐量。

2 系统模型

本文主要考虑 OFDMA 系统的上行链路,系统中有 F 个 AP, X 个 UE 构成超密集网络。为了减小干扰,优化网络性能,首先对超密集网络进行动态分簇,同一个簇内的多个 AP 共享频谱资源,簇与簇之间实现频谱复用。超密集网络中基于成簇的网络模型如图 1 所示。

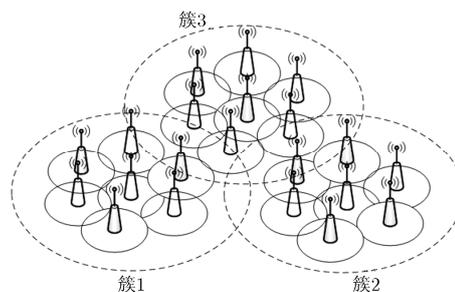


图1 超密集网络中基于成簇的网络模型

定义 C 是超密集网络的分簇集合。对于某个分簇 C_i , C 是一个长度为 l , 也就是拥有 l 个 AP 的集合。假设系统带宽为 B , 划分为等带宽的 N 个子信道。这 N 个子信道分别对于每个簇可用, 每个分簇中的两个 AP 不能同时使用同一个子信道。对于小的簇来说, 最极端的情况就是一个簇只有一个 AP, 这样它可使用的频谱带宽最大, 然而它和相邻的分簇之间的干扰也最大; 相反, 当簇的规模很大时, 每个 AP 点可用的频谱带宽就会变小, 但簇间干扰也会变小。因此, 簇的规模与簇间干扰之间存在一个折中平衡, 而如何分簇以确定簇的规模使得簇间干扰最小化是一个最优化问题。

本文将干扰程度作为分簇的依据, 将干扰强的多个 AP 划为一个簇, 这些 AP 可以协作为用户服务, 这样将把干扰转变为有用功率。因此, 分簇问题就等价于将干扰区域划分为几个子图, 每个子图代表一个多点协作传输的分簇。

同一个簇内的 AP 节点之间可以互相协作进行通信, 本小区的 UE 在该小区 AP 忙或者受到临近 AP 干扰较大时的时候, 可以选择簇内最适合的 AP 进行协作通信。UE 选定相应 AP 进行数据传输, 每隔一段时间系统刷新传输状态, 重新确定下一时刻任务的协作 AP。

3 基于干扰协调的动态小区分簇

分簇问题就等价于将干扰区域划分为几个子图, 每个子图代表一个多点协作传输的分簇。每个 AP 都寻找对自己最有利的 AP 进行合作, 为通信中的 UE 提供最大传输功率。首先对通信中产生的各种

干扰进行分析，建立干扰图，然后将超密集网络之间的干扰程度作为簇的依据，通过删除最强干扰，将干扰转变为有用功率，来提升UE的SINR，利用协作传输模型，可以同时把数据传输给单用户或多用户。

令 $P_{j_i,i}^n$ 为 AP i 分配给用户 UE j 在子信道 n 上的功率， $g_{k_j,j}^n$ 为其信道增益，则用户 UE j 在 AP i 子信道 n 链路上的 SINR $\gamma_{j_i,i}^n$ 可表示为

$$\gamma_{j_i,i}^n = \frac{g_{j_i,i}^n P_{j_i,i}^n}{\sum_{k \neq i, k \in F} p_{k_j,j}^n g_{k_j,j}^n + N_0} \quad (1)$$

因此，用户 UE j 在 AP i 链路上的传输速率 R_{j_i} 可以表示为

$$R_{j_i} = B \log_2 \left(1 + \gamma_{j_i,i}^n \right) \quad (2)$$

则系统的总传输速率为

$$R = \sum_{i,j,n} B \log_2 \left(1 + \gamma_{j_i,i}^n \right) \quad (3)$$

本文的目标就是让总传输速率最大，即使式(3)最大。由式(1)知，每个 UE 的速率都是由网络中 AP i 到 UE j 之间的链路功率和链路上的信噪比 SINR 决定的，问题就转化为寻求最优的分配功率 $P_{j_i,i}^n$ 使得式(3)最大。

在上行链路中，当 UE j 连接到 AP i 时，UE j 接收到的信号可以写成：

$$r_j = h_{i,j} d_j + \sum_{k \neq i} h_{k,j} d_m + z_j \quad (4)$$

其中， $h_{i,j} = g_{i,j} \Gamma_{i,j}$ 是从 AP i 与 UE j 之间的信道增益，衰落 $g_{i,j}$ 包含路径损耗和阴影衰落， $\Gamma \in C^{i \times Nt}$ 代表符合独立复高斯分布(均值和单位方差为0)的小范围衰落。 d_j 和 d_m 分别是 AP i 与 UE j 之间的距离与 AP k 与 UE j 之间的距离， z_j 是加性高斯白噪声。

对于被服务的 UE j 来说，AP i 与 AP k 之间的干扰可以表示为

$$I_{i,k} = \sum_{k \neq i} h_{k,j} d_m + z_j \quad (5)$$

其中， $h_{k,j}$ 是 AP k 与 UE j 之间的信道增益，它包含了路径损耗和阴影衰落。

令 AP i 服务的 UE 构成集合 U_i ，我们可以对围

绕 UE j 周边一定范围 d 内的所有 AP 进行统计，将获得的干扰功率 $I_{i,k}$ ($k \in 1, 2, \dots, F$) 依次排列组合，选择干扰功率最大的点 AP 进行协作(标记为 co)，通过将最强干扰纳入自己传输的簇内，将其变为有效的传输功率，从而加强 SINR。因此，簇根据式(6)所示的条件进行：

$$I_{co} = \max I_{i,k} \quad (6)$$

也就是，在所有干扰里找到最大的干扰 AP 点，将其选为协作节点。根据式(1)和式(2)，使得式(7)达到最大解的簇方式即通过为 UE 分配合适的功率使得 AP 点在满足功率资源约束的限制条件下用户的总传输速率最大，即各个 UE 的 R_{j_i} 之和最大，即求解式(7)所示的最优化问题：

$$\max \sum_{k_j=1}^M \omega_{k_j} \sum_{l=1}^{|C|} \sum_{n=1}^N \Gamma_{k_j,f}^n \Delta f \cdot \log_2 \left(1 + \frac{g_{k_j,f}^n (P_{k_j,f}^n)^2 + I_{co}}{\sum_{j \neq f, i, j \in F} p_{k_j,j}^n g_{k_j,j}^n + P_{k_m,m}^n g_{k_f,m}^n + N_0} \right) \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^N \Gamma_{k_j,f}^n P_{k_j,f}^n \leq P_{f,max}, \forall f \quad (8)$$

$$P_{k_f,f}^n \geq 0, \forall n, f \quad (9)$$

其中， ω_j 代表 UE j 的权值，当 UE 处于小区边缘时，信道传输质量差，因此设置高优先级；当 UE 处在距离 AP 较远的地方，信道条件较好时，可是将其优先级调低。 Δf 为网络中的带宽， $\Gamma_{k_j,f}^n$ 为 1 时，代表子信道 n 分配给用户 f 链路，反之为 0。

4 动态功率分配算法

本文的目标是通过为 UE 分配合适的功率使得 AP 在满足功率资源约束的限制条件下用户的总传输速率最大，即各个 UE 的 R_{j_i} 之和最大。

目标函数是一个关于 P 连续可分的，因此他的每个局部最优解满足 KKT 定理^[16]：

定理 1 对于式(7)，其局部最优解为 $P^* = (P^{1*}, P^{2*}, \dots, P^{F*})$ ，存在唯一的一组非负拉格朗日乘数 $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_i^*$ 和 $\mu_{1,1}^*, \dots, \mu_{x,n}^{f*}, \dots, \mu_{X,N}^{F*}$ ，使得对于 $\forall f \in D$ ，有

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{n=1}^N \Gamma_{k_j,f}^n \log_2 \left(1 + \frac{g_{k_j,f}^n (P_{k_j,f}^n)^2 + I_{co}}{\sum_{j \neq f, i, j \in F} p_{k_j,j}^n g_{k_j,j}^n + P_{k_m,m}^n g_{k_f,m}^n + N_0} \right) \right) / \partial P_{k_j,f}^n \\ & + \partial \left(\sum_{k_j=1}^M \omega_k \sum_{l=1}^{|C|} \sum_{n=1}^N \Gamma_{k_j,f}^n \log_2 \left(1 + \frac{g_{k_j,f}^n (P_{k_j,f}^n)^2 + I}{\sum_{j \neq f, i, j \in F} p_{k_j,j}^n g_{k_j,j}^n + P_{k_m,m}^n g_{k_f,m}^n + N_0} \right) \right) / \partial P_{k_j,f}^n - \lambda_f^* + \mu_{x,n}^{f*} = 0, \forall f \in M \quad (10) \end{aligned}$$

$$\lambda_f^* \left(\sum_{n=1}^N \Gamma_{k_f,f}^n P_{k_f,f}^n - P_{f,\max} \right) = 0 \quad (11)$$

$$\mu_{x,n}^{f*} P_{k_f,f}^n = 0, \forall n, f \quad (12)$$

将系统干扰功率定义为除协作 AP i 之外的能收到的周边 AP 功率之和, 即

$$\sum_{i \in F, i \neq \text{co}} h_{i,j} d_j + \sum_{k \neq i} h_{k,j} d_m + z_j \quad (13)$$

而且可知, 当协作点选定时, 式(13)为定值。因此, 式(11)是相邻小区对本小区造成的干扰, 也就是系统吞吐量的负值。所以综合前面式(8), 目标函数演变成:

$$\frac{\partial \left(\sum_{n=1}^N \Gamma_{k_f,f}^n \log_2 \left(1 + \frac{g_{k_f,f}^n (P_{k_f,f}^n)^2 + I_{\text{co}}}{\sum_{j \neq f, i, j \in F} p_{k_j,j}^n g_{k_j,j}^n + P_{k_m,m}^n g_{k_f,m}^n + N_0} \right) \right)}{\partial P_{k_f,f}^n} - \left(\sum_{i \in F, i \neq \text{co}} h_{i,j} d_j + \sum_{k \neq i} h_{k,j} d_m + z_j \right) - \lambda_f^* = 0 \quad (14)$$

约束条件为

$$\sum_{n=1}^N \Gamma_{k_f,f}^n P_{k_f,f}^n \leq P_{f,\max}, \forall f \quad (15)$$

$$P_{k_f,f}^n \geq 0, \forall n, f \quad (16)$$

式(14)等价于最大化小区的吞吐量。因此, 利用注水算法可求得每个信道 n 上的功率分配的最优解为

$$P_{k_f,f}^n = \frac{1}{\ln 2 \left(\lambda_f + \sum_{i \in F, i \neq \text{co}} h_{i,j} d_j + \sum_{k \neq i} h_{k,j} d_m + z_j \right) + \frac{\sum_{j \neq f, i, j \in F} p_{k_j,j}^n g_{k_j,j}^n + P_{k_m,m}^n g_{k_f,m}^n + N_0}{g_{k_f,f}^n}} \quad (17)$$

基于以上分析, 基于分簇的小区功率分配算法流程如图 2 所示。

现在讨论算法的复杂度, 其复杂度与有业务需求的用户数量 X 和服务的 AP 个数 F 有关, 在初始化阶段完成 AP 点的载波分配及用户设备位置设定, 其复杂度为 $O(F+X)$, 然后对于设备传输干扰子图更新的计算复杂度 $O(FF)$ 。而在确定干扰子图之后, 通过对比, 选择最有效的协作组合实现网络资源的最优化利用, 对比产生的复杂度为 $O(FX)$ 。这些步骤都是在一个同一次循环中做的, 迭代次数由用户数量 X 决定, 因此本算法的复杂度为 $O(X(FX+F))$ 。

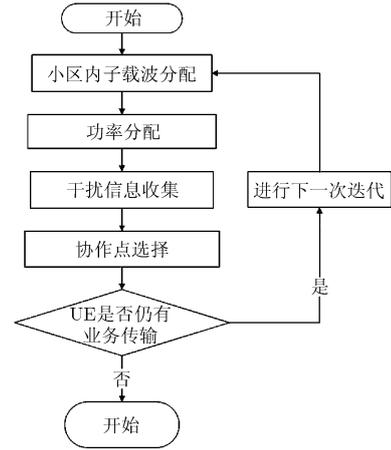


图 2 小区功率分配算法流程图

5 性能评估分析

5.1 仿真场景和参数设置

现在通过仿真来评估本文所提出的算法的性能, 假设有 20 个 AP 覆盖热点区域, 每个 AP 的覆盖范围是半径为 5 m 的圆形, 相邻 AP 之间覆盖范围有重叠, 具体的仿真参数如表 1。根据本文提出的分簇算法把小区分成不同的簇, 同一簇内的小区共享系统带宽, 每个小区任意分布 10 个用户。假设初始状态每个 AP 负责对应的一个小区中用户的接入, 具体仿真场景如图 3 所示。本文将干扰代价统一设定为硬干扰所产生的需要直接放弃使用该子信道的情况, 便于之后的参数设定。

5.2 仿真结果与分析

图 4 给出本文提出的算法与无干扰约束算法吞

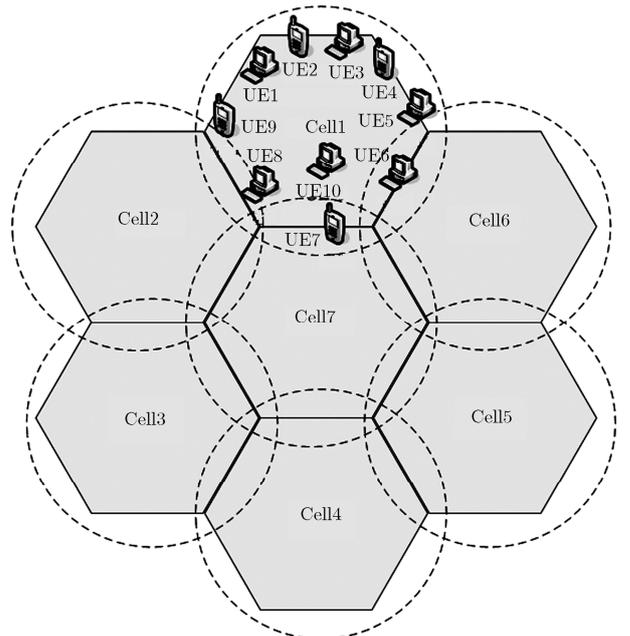


图 3 仿真场景

表 1 仿真参数设置

系统带宽 B	3.2 MHz
子载波数 N	32
信道增益 g	4
高斯白噪声 N_0	-170 dBm/Hz
数据传输要求 R_i	20 Mbps
最大传输功率 $P_{i, \max}$	30 mW
AP 覆盖半径 r	5 m
AP 个数 F	20
每个 AP 点接入的用户个数 X	10
用户位置分布	随机
ω	0.5

吞吐量，从图中比较可以看出，利用本文提出的算法进行功率分配时，各个 AP 节点的吞吐量比无约束算法的吞吐量大约平均提高了 50%，这一仿真数据表明本文提出的算法利用 AP 之间的协作确实提升了小区边缘用户的速率，从而提高了网络吞吐量。

图 5 显示了业务密度与吞吐量之间的关系，4 种情况分别表示当 AP 分配的功率为定值 22.5 mW, 25.0 mW, 27.5 mW 以及按本文算法动态分配功率时的系统吞吐量。仿真结果表明，在这 4 种情况下，随着业务密度的增加系统吞吐量都在增加，但其增加的速率会越来越平缓，最终会趋近平稳。同时也可以看出，本文提出的动态功率分配算法明显的优于其他 3 种情况，这是因为本文算法能够根据用户

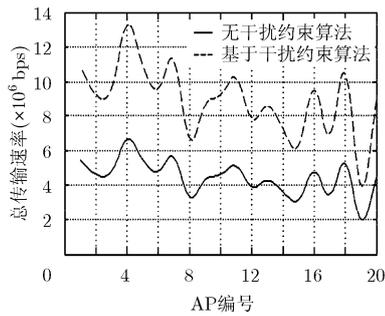


图 4 不同算法中 AP 点的速率比较

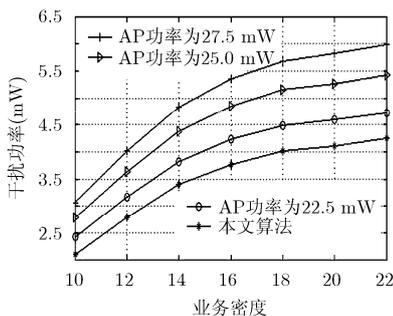


图 6 业务密度和超密集网络干扰之间的关系

需求自适应地调节发射功率，而且通过同一簇内 AP 之间的协作，把干扰转化成有用功率，提高了用户的吞吐量。

图 6 表示了业务密度和超密集网络干扰之间的关系。由图可以看出，网络中的干扰随着业务密度的增加而增大，随着功率的增大也增大，但是本文提出的算法的干扰程度明显低于其他算法的干扰，与当 AP 分配的功率为定值 22.5 mW, 25.0 mW, 27.5 mW 时相比，干扰程度平均分别低 33%, 62%, 71%，这说明系统能量在合理分配后获得了比较小的干扰。

图 7 表示了业务密度与吞吐量在 AP 的个数分别为 12 个、16 个以及 20 个之间的关系。仿真结果表明，随着业务密度的增加，网络吞吐量有所提高，但是随着 AP 分布的更加密集，当 AP 个数达到一定值，或是业务密度增加到某个值的时候，系统的吞吐量就不再增加，达到饱和值。

6 结束语

本文提出了在超密集小蜂窝网环境下，将干扰协调和分簇两种方式相结合的方法。对超密集网络中各 AP 节点进行干扰分析，然后根据干扰的程度进行分簇，把干扰较大的 AP 分在同一个簇内，将干扰转换为一定的代价信息，并提出最优的功率分配算法使得系统吞吐量最大。仿真实验结果表明，该算法对于超密集网络场景下能够动态分配网络资源，优化 AP 功率分配，减小干扰，显著提升吞吐量。

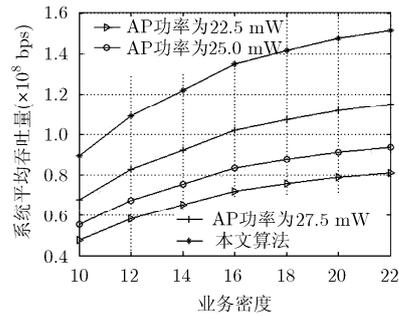


图 5 业务密度与系统吞吐量之间的关系

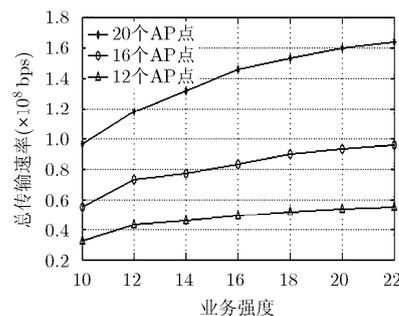


图 7 不同 AP 点个数情况下业务密度与吞吐量之间的关系

参考文献

- [1] 3GPP RP-090536, New SI proposal: LTE heterogeneous network deployments[S]. Qualcomm, Nokia, NSN, 2009.
- [2] ABDELNASSER A, HOSSAIN E, and DONG I K. Clustering and resource allocation for dense femtocells in a two-tier cellular OFDMA network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(3): 1628–1641.
- [3] CHENG Qin and TIAN Hui. A greedy dynamic clustering algorithm of joint transmission in dense small cell deployment [C]. The 11th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, 2014: 629–634.
- [4] LI Wei, ZHENG Wei, WEN X, *et al.* Dynamic clustering based sub-band allocation in dense femtocell environments[C]. IEEE Vehicular Technology Conference. Yokohama, 2012, 1–5.
- [5] MUMTAZ S, SAIDUL HUQ K M, and RODRIGUEZ J. Coordinated paradigm for D2D communications[C]. 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Toronto, ON, 2014: 718–723.
- [6] SUN Y F, JIANG Jing, and HU LiuJun. Joint transmission coordinated multi-Point transmission and reception systems [J]. *ZTE Communications*, 2010, 8(1): 1–5.
- [7] BOTTAI C, CICONETTI C, MORELLI A, *et al.* Energy-efficient user association in extremely dense small cell networks[C]. European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Bologna, 2014: 1–5.
- [8] ZONG Y, XU G, JIU P, *et al.* A projective clustering algorithm based on significant local dense areas[C]. The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Brisbane, QLD, 2012: 1–8.
- [9] KANG X, ZHANG R, and MONTANI M. Price-based resource allocation for spectrum-sharing femtocell networks: a Stackelberg game approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(3): 538–549.
- [10] 李林, 洪佩琳, 薛开平, 等. 基于小区覆盖增强技术的 Macro-Pico 异构网络上行干扰识别与干扰协调机制[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2823–2829. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00744.
- LI Lin, HONG Peilin, XUE Kaiping, *et al.* Uplink interference identification and coordination scheme based on range expansion in macro-pico heterogeneous networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2823–2829. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00744.
- [11] ABDELNASSER A, HOSSAIN E, and KIM D I. Clustering and resource allocation for dense femtocell in a two-tier cellular OFDMA network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(3): 1628–1641.
- [12] 凌为, 韩圣千, 徐志昆, 等. 异构网中宏、微基站间存在频偏时的干扰协调方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 670–676. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00515.
- LING Wei, HAN Shengqian, XU Zhikun, *et al.* Interference coordination with frequency offset between macro and micro base station in heterogeneous networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 670–676. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00515.
- [13] HA V N and LE L B. Fair Resource allocation for OFDMA femtocell networks with macrocell protection[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(3): 388–401.
- [14] XIE R, YU F R, JI H, *et al.* Energy-efficient resource allocation for heterogeneous cognitive radio networks with femtocells[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 1(11): 3910–3920.
- [15] LOPEZ-PEREZ D, CHU X, VASILAKOS A V, *et al.* Power minimization based resource allocation for interference mitigation in OFDMA femtocell networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(2): 333–344.
- [16] 解可新, 韩健, 林友联. 最优化方法[M]. 天津: 天津大学出版社: 125–135.
- 朱晓荣: 女, 1977 年生, 博士, 教授, 研究方向为超密集无线网络、异构网络、无线传感器网络.
- 朱蔚然: 女, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为超密集无线网络.