

硕士学位论文

密集热点区域无线网络性能分析与优化

**PERFORMANCE ANALYSIS AND
OPTIMIZATION IN DENSE HOT POINT
WIRELESS NETWORKS**

麻津铭

哈尔滨工业大学

2018 年 6 月

国内图书分类号: TN929.53
国际图书分类号: 621.3

学校代码: 10213
密级: 公开

工程硕士学位论文

密集热点区域无线网络性能分析与优化

硕士研究生: 麻津铭

导 师: 陈晓华教授

申 请 学 位: 工程硕士

学 科: 电子与通信工程

所 在 单 位: 电子与信息工程学院

答 辩 日 期: 2018 年 6 月

授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: TN929.53

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Master Degree in Engineering

PERFORMANCE ANALYSIS AND OPTIMIZATION IN DENSE HOT POINT WIRELESS NETWORKS

Candidate:	Ma Jin-Ming
Supervisor:	Prof. Hsiao-Hwa Chen
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Specialty:	Electronics and Communication Engineering
Affiliation:	School of Electronics and Information Engineering
Date of Defence:	June, 2018
Degree-Confering-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

5G 将于 2020 年前后开始商用,这对通信人提出了新的挑战——在未来的网络中,网络的容量要求大大增加。相比于 4G,5G 网络的容量需求将有 1000 倍的增长。超密集组网在区域面积内放置了更多的基站,这是能够提供巨大容量增益一种十分可靠的技术。通过在宏基站的热点区域放置小的基站,也可以实现在小区内的任何地点都可以流畅通信的愿景。超密集组网将用于满足区域面积内超高的容量需求,让用户在无论何时,无论何地都能拥有超高速的上网和通话体验。但密集的网络使得基站之间的距离更近,随之带来的小基站之间干扰问题越发明显。并且在现代的通信系统中,由于移动用户多,接入事件长,用户需求多样,导致系统的业务量需求很大,但频谱资源却是有限的。因此结合根据密集热点区域无线网络的特性,对无线网络进行有效合理的建模,并设计一个好的资源分配算法来协调干扰,增加单位频谱的利用效率,保证系统的正常运行。

首先,本文结合密集热点区域无线网络的特性。根据基站与用户的统计特性,基于随机几何模型,得到了覆盖率和区域面积谱效率的表达式。并采用蒙特卡洛仿真的方法验证了表达式的正确性。通过得到覆盖率和区域面积谱效率的表达式,可以很清楚的看出网络的密集程度,热点的热度,以及路径损耗因子对整个密集热点区域网络的性能影响。并得到了覆盖率与区域面积谱效率相对于这些参数的仿真与分析曲线。可以看到,基于随机几何模型的覆盖率和区域面积谱效率的表达式,该表达式求解简单,且可以很好的估计密集热点区域无线网络的指标,便于分析网络中各个相关参数对性能的影响。

接着,本文首先根据场景的特性,提出基于 CRAN 的网络架构,并基于图论中的优化策略,将基站、用户看成节点,将基站与用户之间的链路看成变,构造二分图。通过对二分图进行合理的剪枝,得到既可以表达基站与用户之间的连接关系,又不失一般性的图模型。在该图模型的基础之上,提出基于二分图的图模型的频谱与功率资源的优化算法,提高密集热点区域无线网络场景下的性能。本文对提出的频谱与功率资源调度算法进行了理论分析和仿真,并与传统的频谱与功率资源调度算法进行了比较。结果表明该算法相比传统的调度算法,可以显著降低密集热点区域无线网络的小区间干扰,提高区域的覆盖率与接入用户数、进而提升该区域的单位面积谱效率。

关键词: 超密集组网; 无线网络建模; 随机几何; 资源调度; 图模型

Abstract

5G will begin commercial use around 2020, which poses new challenges for communicators - in the future, the network's capacity requirements will greatly increase. Compared to 4G, the capacity requirement of 5G networks will increase by a factor of 1,000. The ultra-dense networking places more base stations in the area, which is a very reliable technology that can provide huge capacity gain. By placing a small base station in a hot spot area of a macro base station, it is also possible to realize a vision of smooth communication anywhere in the cell. The ultra-dense networking will be used to meet the ultra-high capacity requirements in the area, allowing users to have ultra-high-speed Internet access and call experience whenever and wherever they are. However, the dense network makes the distance between the base stations closer, and the problem of interference between the small base stations becomes more and more obvious. In modern communication systems, there are many mobile users, long access events, and diverse user demands, resulting in a large amount of system traffic, but spectrum resources are limited. Therefore, according to the characteristics of the wireless network in dense hotspots, an effective and reasonable wireless network model is established, and a good resource allocation algorithm is designed to coordinate interference, increase the utilization efficiency of the unit spectrum, and ensure the normal operation of the system.

First, this paper combines the characteristics of wireless networks in dense hotspots. According to the statistical characteristics of the base station and the user, based on the stochastic geometric model, the expressions of the coverage rate and the area spectrum efficiency are obtained. Monte Carlo simulation method was used to verify the correctness of the expression. By obtaining the expressions of coverage and area area spectrum efficiency, it can be clearly seen that the density of the network, the hotness of the hot spots, and the path loss factor affect the performance of the entire dense hot spot network. The simulation and analysis curves of the coverage and area area spectrum efficiency relative to these parameters were obtained. It can be seen that based on the expressions of the coverage rate of the random geometric model and the efficiency of the area spectrum, the expression is simple to solve, and the indexes of the wireless network in the dense hot spot area can be well estimated, and it is convenient to analyze the relevant parameters of the network for performance.

Then, according to the characteristics of the scene, this paper first proposes a CRAN-based network architecture. Based on the optimization strategy in graph theory, the base station and users are regarded as nodes, and the link between the base station and the user is regarded as a variable, and a bipartite graph is constructed. By pruning the bipartite graph reasonably, the graph model that can express the connection between the base station and the user without losing the generality can be obtained. Based on the model in this figure, an optimization algorithm for the spectrum and power resources of the graph model based on the bipartite graph is proposed to improve the performance in dense wireless network scenarios in hot spots. In this paper, the proposed spectrum and power resource scheduling algorithms are theoretically analyzed and simulated, and compared with the traditional spectrum and power resource scheduling algorithms. The results show that compared with the traditional scheduling algorithm, this algorithm can significantly reduce the inter-cell interference in wireless networks in dense hotspots, increase the coverage and access users of the area, and then increase the spectral efficiency per unit area of the area.

Keywords: Ultra Dense Networks, Wireless Network Modeling, Stochastic Geometry, Resource Allocation, Graphical Model

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT	II
第一章 绪 论	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.2 国内外研究现状与分析	2
1.2.1 超密集组网的研究现状	2
1.2.2 小区资源管理和调度算法的研究现状	4
1.2.3 国内外研究现状简析	6
1.3 本文研究内容及组织结构	7
第二章 超密集组网的网络架构和系统模型	8
2.1 超密集组网的定义	8
2.2 超密集组网的网络架构	9
2.2.1 异构网络	9
2.2.2 CRAN	10
2.2.3 软件定义无线网络	12
2.3 超密集组网通信的性能指标	13
2.3.1 信干噪比	13
2.3.2 用户的遍历容量	14
2.3.3 区域覆盖率	14
2.3.4 区域面积谱效率	14
2.4 本章小结	15
第三章 密集热点区域无线网络的性能分析	17
3.1 密集热点区域无线网络的系统建模	17
3.1.1 基站的参数与拓扑结构	18
3.1.2 用户终端的统计特性	20
3.2 超密集组网的性能分析	21
3.2.1 小区中用户的遍历容量	21
3.2.2 小区中用户的覆盖率	22
3.2.3 小区中用户的单位面积频谱效率	29

3.3 密集热点区域无线网络性能的仿真分析	30
3.3.1 对网络遍历容量性能的仿真分析	30
3.3.2 对网络覆盖率性能的仿真分析	32
3.3.3 对网络的单位面积谱效率的数值分析	36
3.4 本章小结	37
第四章 密集热点区域无线网络的优化	38
4.1 密集热点区域无线网络的干扰管理算法的架构	38
4.2 密集热点区域无线网络的基站分簇	41
4.2.1 基于深度优先搜索的微基站分簇算法	42
4.2.2 基于 k - 均值的微基站分簇算法	44
4.3 密集热点区域无线网络优化的性能分析	44
4.3.1 网络分簇算法的分析	44
结 论	48
参考文献	50
攻读硕士学位期间发表的论文及其他成果	52
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明及使用授权说明	53
致 谢	54

第1章 绪 论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

在未来的 5G 网络中,将会涌现出大量的智能移动终端,对网络的容量要求大大增加^[1]。相比于 4G,5G 网络的容量需求将有 1000 倍的增长,届时,终端无处不在,并且在大型的热点区域,如商场,露天展台等存在着大量的连接设备。同时,不同的移动终端也会有不同的业务需求,这也就导致了业务需求的多样化。基站的密集部署迫在眉睫。超密集组网应运而生。超密集组网将用于满足区域面积内超高的容量需求,为移动终端提供无缝的网络切换,让用户在无论何时,无论何地都能拥有超高速的上网和通话体验。超密集组网在区域面积内放置了更多的基站,这是能够提供巨大容量增益一种十分可靠的技术^[2]。通过在宏基站的热点区域放置小的基站,也可以实现在小区内的任何地点都可以流畅通信的愿景。超密集组网,在分层异构网络的基础上,部署高密度低功耗的小型网络来实现系统容量的大幅提升。

微小区网络和异构网络提供了更高的频谱自由度,有效的提高了系统的单位面积谱效率,从而提升了系统的性能。微小区和异构网络也是实现超密集组网,应对未来高单位面积频谱利用率挑战的一种重要可行的手段^[3]。但微小区和异构网络的部署收到当地地形地貌的影响:有的地方地貌平坦,遮挡较少,适宜部署基站,有些地方地形崎岖,遮挡明显,不适宜部署基站。微小区和异构网络的部署也受到当地人流的影响,有的地方客流量大,对容量的需求也就更加的高,因此该区域就需要密集的部署。不仅如此,微小区和异构网络的部署也呈现自组织性。种种原因导致了对微小区和异构网络的建模不能采用传统的基于格点的建模方式。^[4]。同时由于用户在小区中的不同位置的概率不同,比如在某些热点区域,如展会中心区,景观区,用户分布较多,呈现从中间向四周蔓延的趋势,而在其他区域,用户不会有明显的集聚效应。小区中的用户密度在不同时间也是不同的,如在高峰期,用户数远远大于基站数。而在夜晚夜深人静的时候,用户数可能和基站数目相当甚至小于基站数。因此要考虑联合统筹考虑基站和用户的统计分布特性,进而设计一个比格点分布更加可靠合理的模型。去估计密集热点区域无线网络的性能。得到准确的网络性能边界。

密集组网在带来好处的同时,也带来了新的挑战,密集的网络使得基站之间的距离更近,随之带来的小基站之间干扰问题越发明显。不仅如此,网络复杂程

度的增高也导致了小区中的频谱资源，功率资源的调度与协调变得越发复杂。密集的组网也导致了很高的能耗^[5]，小基站能提供的功率也不会像宏基站提供的功率那么强，有一定的约束，如何将有限的功率很好的利用，服务的用户更多，提供的容量更大，基站的耗能却更小，也是现在亟需解决的热点问题。因此需要有新的干扰管理技术，新的资源分配和功率控制算法，充分协调现有的或者将要部署的小基站之间的关系，从而消除小基站之间的干扰，提升系统对用户的统计覆盖率，提升网络的单位面积频谱利用率，达到容量提升的目的。

本课题来源于国家自然科学基金，项目名称《超密集组网中区域频谱效率理论上界及干扰管理算法研究》（项目号：61671186）。

1.2 国内外研究现状分析

1.2.1 超密集组网的研究现状

2009 年，业界提出了第五代移动通信技术（5G）的概念。在继承和发扬第四代移动通信技术（4G）的基础之上，5G 系统的目标是提升几十倍的频谱效率，百倍左右的能量效率，同时为了便于推广，5G 系统也需要在成本上做出考虑。5G 中的关键技术——超密集组网技术，是目前业界各个知名厂家争相研究的热点 [6]。网络异构化和密集化已经成为了当下移动无线组网的一个大趋势。

当前超密集组网的研究，由于超密集组网即是一种技术，优势一种场景，因此需要对该场景进行合理有效的建模并进行分析。5G 中的超密集组网，由于网络的拓扑结构复杂，呈现异构化，随机化，多层次，因此，不能按照传统的移动蜂窝网络，将基站建模成六边形格点的拓扑结构。网络的建模要呈现随机性。文献 [4] 最早提出了能够体现随机化的无线多基站网络模型。该篇文章考虑到由于网络的密集程度的提升，受到地理位置，区域对网络的需求等等随机化的影响，因此网络中基站的部署呈现随机性。为了反应这种随机性，基于随机几何^[7]，提出了将基站的分布服从泊松点过程，而用户在区域内随机分布的网络拓扑模型。并得到一种简单可行的方法，求解该场景下的终端概率、区域面积谱效率等等性能。但该篇文章只考虑了单小区单层单天线多基站，用户数量远远大于基站数量的情况^[2]。文献 [8] 提出了单小区双层多基站超密集无线网络模型，并分析了该场景下的能耗特性。文献 [9] 在前两篇文章的基础上，提出了单小区多层异构的网络，小区中的基站配备多根天线。该文献还考虑了基站数量和用户数量的关系。并重点分析了基站和用户数量相当的情况下网络的性能。并给出了在该场景下的基站睡眠和唤醒机制

的算法。给出了能达到最大单位面积谱效率下，小区内部署基站的密度。文献 [10] 提出了以用户为中心的超密集组网的网络模型。该模型假设小区中的基站服从泊松点过程，小区中的用户随机分布，小区中的用户的数量与基站的数量相当，或者小于基站的数量。该模型假设网络采用了干扰协调算法，并假设距离用户最近的基站为用户进行服务，并设定一个距离门限，将距用户距离不超过距离门限的基站作为干扰协调基站。用于协调其他用户和基站所建立的链路对该用户的影响。

随着通信技术的发展，移动通信无线网络的架构不断的更新改进。网络的架构是网络中最关键的一个部分。针对超密集组网网络场景，需要选择一种合理的架构，并在该架构的基础上进行改进，更好的与超密集组网场景和现有的技术进行适配。在当前主流的网络架构中，软件定义网络 (SDN)、云接入网络 (CRAN)、雾接入网络 (FRAN) 等架构各自具有优势，适合与现有的超密集组网网络场景进行结合。

软件定义网络技术是未来网络设计和资源管理方法的一个很有潜力的参考方法，它可以将网络的控制层与数据层分开^[11]。它将软件层面设计从硬件系统上剥离开来，使得不同的服务、不同的应用都可以采用一套软件系统进行处理。文献 [3] 探索了软件定义网络架构应用在超密集组网网络场景下的可能。通过统一的控制中心，让网络能够正常可靠的运转。同时每个边缘的基站负责传输数据，保证系统的高速有效的运行。在超密集组网网络场景下，采用软件定义无线网络的架构，引用了博弈论和经济学的手段，设计了一种新的协议，该协议可以达到纳什均衡，优化了超密集组网场景的性能，使得网络中可以承载的最大用户数提升，并均衡了负载，提升了系统的鲁棒性。文献 [12] 探索了 CRAN 网络架构应用于超密集无线组网网络场景下的可能性。

CRAN 即云接入网络，最早由美国 IT 业的巨头公司 IBM 提出^[13]，该网络架构将小区的基带处理单元 (BBU) 整合在一起，构成 BBU 池放在控制中心，在需要部署基站的位置放置低复杂度的远拉射频头 (RRH)，远拉射频头用来对分布在小区中的需求用户进行服务，是一种非常有效的网络密集化的手段。CRAN 应用于超密集组网的场景下有很多的优点。CRAN 网络架构是干扰协调和频谱资源管理的一种有效的方法，同时，由于 RRH 结构简单，RRH 可以以较低的硬件成本进行密集的布放。由于中心化的架构，多用户干扰可以被诸如 CoMP 这样的多点协作技术有效的解决掉，这样将会有很有效的性能增益。在传统的 CRAN 架构中 (4G)，C-RAN 被部署用于连接宏基站和 BBU 池，由于 BBU 和 RRH 之间的传输路径长，这种传统的基站会造成很大的传输时延，而在密集热点区域采用 C-RAN 架构，延迟也会被大大的缩短。BBU 池化后资源统一调度，有助于解决网络需求随时间改

变的潮汐效应,有利于提高能量效率。同时,CRAN 技术应用在超密集组网网络场景下还有很多的方面有待改进,由于超密集组网的密集部署,网络系统需要进一步的减小功耗。主要的手段是增加 RRH 睡眠与活跃状态的切换功能,并设计出合理的选择算法。同时 CRAN 由于模拟端和数据端的分离,使得网络的正常运转需要前向链路对数字原始信号进行回传。为了适应超密集组网网络场景的需求,也需要设计低花费前向链路。同时 CRAN 架构应用于超密集组网网络场景还需要进一步降低当前算法的计算复杂度,降低训练开销,并研究在不完整的 CSI 下的传输策略。FRAN 为最新提出的思想,在 CRAN 网络架构下,提出了去中心化和分布式思想,在云接入网络架构的基础上,引入边缘计算技术,改进网络架构。

1.2.2 小区资源管理和调度算法的研究现状

OFDM 小区间干扰严重,与 CDMA 的区别,都有那些减小的技术

小区中的资源管理和调度算法,是伴随移动无线网络诞生开始就面临的一个难点。由于频谱资源,时间资源,空间资源都是有限的,为了利用有限的网络资源,我们不得不采用将空间划分成为许多个小区,每个小区中放置基站对小区中的用户进行服务。在前几代蜂窝移动通信网络中,采用频率复用技术解决小区之间的干扰问题。

蜂窝移动通信网络初期,由于网络中服务的用户量较小,网络众多用户对容量的需求较低,设备较为落后。小区之间多采用较为简单的频率复用的调度方法。相邻的小区之间采用不同的频谱资源,每个小区所分配的频谱资源相同。这样的好处是可以几乎彻底的解决小区之间的干扰。但是同样的,由于每个小区所分配的频谱资源相同且固定不利于针对不同小区之间容量需求的不均匀的情况,网络的自适应调节能力较差。由于相邻的小区采用不同的频谱资源,导致小区的可用频谱资源降低一倍以上,因此虽然提升了小区内用户的统计覆盖率,但是,去使小区的单位面积谱效率有较大的损失。而超密集组网网络场景下,网络系统需要满足大连接,高速率的需求,区域面积频谱利用率显然是一个非常重要的指标。在静态频率复用的基础之上,出现了更加复杂的基于频率复用的小区资源管理和调度算法。

在众多频率复用算法中,软频率复用是一种可靠的频率复用技术,该技术由华为提出^[14],并应用与 4G 组网的场景下。软频率复用是传统的复用技术的改进。软频率复用技术,通过设定发射功率门限,区分不同频率的使用。这样做,使得相邻的小区不一定要使用完全不同的频率资源,而是只需要相邻小区的边缘用户使用不同的频率。而小区中心的用户距离相邻基站的距离较远,收到相邻基站的影

响较小，因此虽然使用相同的频率资源，但实际上用户与服务基站构成的通信链路并不会受到相邻基站的干扰的强烈的影响。

软频率复用的方法虽然解决了之前频率复用系统频谱利用率较低的问题，但是用于小区中的频谱资源是固定的，并没有考虑小区与小区之间的网络容量需求不均匀的问题，因此网络的动态性较差。由于硬件性能的提升，网络机构的逐渐发展。小区与小区之间可以共享一部分信息，并且中心控制器也可以控制多个小区，因此，可以采用单个中心控制器控制多个小区，将多个小区的资源混合在一起做一个统筹。多个小区之间进行动态的频率复用。基于该思想，文献 [2] 提出了一种多小区动态频率资源分配的算法，该算法基于图论的思想，应用贪婪算法对图中的节点进行着色，完成频率资源的分配。但是该频率资源分配算法采用贪婪算法，不能达到性能的最优，需要进一步的引入小区中基站的分布规律和分布特点，以及用户的分布规律和特点。引入比贪婪算法更优秀的图论优化的算法达到性能的最优。

预编码技术也是进行干扰管理和消除的一个重要的技术。预编码最早由 Tomlinson 提出，用于单输入单输出 (SISO) 系统当中。预编码的主要思想是由于发射机多为基站，其提供的功率很高，这就允许了基站可以做的很复杂，许多算法可以在基站端实现的话，就可以减少很多手机终端的负担。除此之外，由于基站端知道所有用户的信道状态信息，因此，基站可以利用所得到的信道状态信息进行干扰消除。由于不同的用户和基站构成的信道链路不相同，因此由信道状态因数构成的信道矩阵可以构成一个向量空间，根据预编码技术，用户所发送的信息可以等效为向量空间中的一个向量，可以利用向量与向量之间的相关性来刻画不同链路之间的干扰。预编码就是利用信道状态信息，使得多个天线之间组成的链路尽可能的正交。文献 [15] 发明了一种分布时预编码的预编码算法，由于超密集组网的特性，网络中的基站较为密集，这也就使得不同的基站之间可以共享部分信道状态信息。系统可以等效为一个多输入多输出 (MIMO) 系统。应用预编码技术，用户之间的干扰会有显著的降低。文献 [16] 和 [17] 采用分层的方法，首先进行单小区的分析，之后进行多小区的预编码，虽然采用分层次的预编码技术不能够使得性能达到最优。但是采用层次化的设计，可以在每一层都可以达到局部的最优或次优，却显著的降低了算法的复杂度。

不仅如此，基于超密集组网场景的特性，基站的部署较为密集，因此，经常会出现用户的数量与基站的数量相当，或者用户的数量与基站的数量相比更少。因此在 5G 系统中，引入了以用户为中心的联合传输策略。其主要的思想是去距离用户近信道信息较好的基站为服务基站。而其他的接收功率大于预设门限的基站作为干扰协调的基站，协调其他用户与基站之间构成的链路对该用户的干扰。文献

[18] 提出了以用户为重新的干扰管理算法, 并且引入了联合传输技术, 用户的总的接收功率有了显著的提升, 干扰的功率有了显著的降低。文献 [19] 提出了基于多点联合传输 (CoMP) 的干扰管理算法, 提出以用户为中心的干扰管理算法。通过仿真, 文中证明以用户为中心的干扰管理算法有效的缓解了小区间的干扰。文献 [20] 采用以用户为中心的策略, 针对超密集组网网络场景, 结合最新的非正交多址 (NOMA) 调制技术。文章通过仿真证明了系统的单位面积频谱效率有了显著的提升。

虽然小区资源管理和调度算法已经被研究多年, 但由于超密集组网网络场景的提出, 网络的场景越来越复杂, 再加上近几年许多新的网络架构的出现。为了解决当下稀缺的频谱资源与不断增加的用户和用户需求之间的矛盾。必须要设计出一套新的干扰管理和资源分配算法, 协调小区间的干扰, 增加单位面积的频谱利用率, 提高网络的能量效率。

1.2.3 国内外研究现状简析

超密集组网是 5G 中的重要技术, 5G 要覆盖主要的三个场景, 即高速率场景, 大连接场景, 低时延场景。而超密集组网网络是解决在大连接的情况下, 满足网络中的用户能在很高的速率之下运行。因此研究超密集组网网络场景下的技术, 在 5G 中有着至关重要的作用。在当下, 调制技术, 编码技术等 5G 中关键的技术都已经基本的确定了, 5G 研究的中心也逐渐转移至网络层。

网络层面上, 随着第五代移动通信技术的发展与推广以及计算机领域和电子硬件领域的进步, 网络架构层面上, 也有了很大发展。其中 CRAN 技术、FRAN 技术、异构网络技术、软件定义网络 (SDN) 技术都有潜力为超密集组网的网络架构提供网络架构层面的参考。但是现在还没有一个已经确定的针对超密集组网网络场景下的一个很好的优化方案。在超密集组网的网络架构中, 要避免网络消耗过大, 前向链路容量需求过大, 计算复杂度过高, 延时过高的现有网络架构的不足。还有能够支持大连接高速率的需求。

由于网络的资源分配调度和干扰管理算法从移动蜂窝网络发明和推广开始就一直是组网的重点问题。但目前并没有很好的针对超密集组网网络场景的特性, 进行合理优化的比较有效的算法。

1.3 本文研究内容及组织结构

本文首先对超密集组网中用到的基本的技术进行阐述和探究。对超密集组网网络场景中有潜力的技术进行了总结，对关键参数进行了深入的讨论。接着，根据超密集组网网络场景的特性。针对网络中基站和用户的统计特性，对密集热点区域无线网络的网络场景进行了建模分析，得到了理论上的网络覆盖率和单位面积频谱利用效率的边界。最后，针对超密集组网的网络场景，网络拓扑结构，网络统计特性，基于二分图模型，提出了一种低复杂度的资源分配和干扰管理算法。仿真证明，该资源分配和干扰管理算法复杂度较之前算法更低，并且支持的用户数和系统的和容量好于传统同复杂度的算法。章节安排如下：

第1章：介绍课题背景及研究的目的和意义，叙述国内外在超密集组网和干扰管理和资源分配算法两方面的研究现状以及存在的问题，给出本文的研究内容。

第2章：对超密集组网网络场景中可行的网络架构和合理的系统模型进行了介绍，对关键参数进行了深入的讨论。

第3章：针对网络中基站和用户的统计特性，对密集热点区域无线网络的网络场景进行了建模分析，得到了理论上的网络覆盖率和单位面积频谱利用效率的边界。

第4章：针对超密集组网的网络场景，网络拓扑结构，网络统计特性，基于二分图模型，提出了一种低复杂度的资源分配和干扰管理算法。

第2章 超密集组网的网络架构和系统模型

超密集组网技术是 5G 中的关键的技术,用于满足大量用户的区域内,用户的高速率传输的需求。密集热点区域无线网络场景下,由于系统中的用户较多,容量需求大,因此,需要网络能够提供更高的单位面积的频谱利用率。同时,通信已经成为世界上最耗能的应用,因此要想办法在满足用户要求的同时,尽可能的降低能耗,从而得到较高的能耗比,即网络需要有很高的单位面积能量谱效率。

本章首先介绍了超密集组网的定义,接着结合超密集组网的网络的基本特性,介绍超密集组网场景中可能用到的网络架构,其中包括异构网络、CRAN 架构和基于软件定义无线网络的架构,最后超密集组网的重要的性能指标。为接下来的理论分析和算法优化打下基础。

2.1 超密集组网的定义

超密集组网 (UDN) 作为 5G 的关键技术之一,对其概念的描述,网络布置的探索,再到性能分析、具体干扰管理算法的研究,随着对 5G 标准的不断探索,这些方面的研究也越来越深入。未来通信系统服务需求的增加,且需要满足更好的用户体验,系统容量的增加就显得日益迫切。

根据现有的研究结果进行分析,超密集组网 UDN 在 5G 中的定义是:发射功率较低的小型接入点,网络的拓扑结构不做精确的规划要求,网络中基站的密集程度很高的区域部署,即可以构成一个超密集网络^[21]。采用超密集组网技术,发射机和接收机之间的距离大大降低,减少了路径损耗,单位面积内可以服务的用户量大增多,提高频谱效率,小区中的流量的分配更加灵活,有效的提升了网络效率^[22]。总结来说,超密集组网就是通过提高单位面积频谱效率的方式来提高整体的系统容量。超密集网络中单个小区提升系统容量的方式又分为以下两种:其一为增加带宽,为现有网络提供新的频谱资源;其二为使用 Massive MIMO、高阶调制等方式提高每个小区的频谱效率。超密集组网的网络部署方式仍处于探索阶段,但有几点已经达成共识。第一,单一层次的蜂窝网部署方式无法满足 5G 移动通信系统的通信需求,多层次、多种接入方式并存的无线接入网络 (Heterogeneous and Small Cell Networks, HetSNETs) 是蜂窝网发展的必然趋势。多层次是指传统宏小区 (Macrocell) 和包括微小区 (Picocell)、家庭小区 (Femtocell)、中继 (Relay Nodes) 在内的低功耗小区共存的体系结构。除了传统蜂窝网接入方式以外,也包括无线局域网、无线个

域网等多种接入技术。第二,办公区域、居住区域、旅店商场等室内热点区域以及机场等室外热点区域需要高密度的小区部署,从而支持满足 QoS 要求的用户服务。第三,除了手机等蜂窝网用户设备 (UE) 以外,还需要支持机器间通信,这种通信业务也要与核心网络相连。同时,对于大量的微小基站的接入,光纤和无线都应该被认为是合适的传输资源。

UDN 需要以非常灵活的方式来使用各类传输资源,如有线传输,无线传输,或混合传输,这样才能从时域,频域,空域等各个维度来全面地利用传输,以达到对资源的最大使用效率。UDN 的网络拓扑结构应该是灵活的,以便动态地适应各种热点地区的部署,适应大量网络节点的接入,并适应多种无线技术。因此,先进的自配置算法将被大量地使用在 UDN 网络中,以获得自动的小区参数配置,自动容量优化,自动负载均衡,自动资源分区及自主协调等能力。

2.2 超密集组网的网络架构

本小节中介绍超密集组网网络架构中较有潜力的,可以被应用的具有前景的网络架构,其中包括异构网络架构、CRAN 架构和 SDN 架构。

2.2.1 异构网络

密集无线异构网络融合多种无线接入技术(如 5G、4G、UMTS、Wi-Fi 等),由覆盖不同范围、承担不同功能的大/小基站在空间中以极度密集部署的方式组合而成的一种全新的网络形态。在超密集无线异构网络中,多种无线接入技术共存,大/小基站多层覆盖,既有负责基础覆盖的在传统蜂窝网络中所使用的宏基站,也有承担热点覆盖的低功率小基站,如 micro、pico、relay、femto 等。为了解决 1 000 倍容量挑战,为用户提供极致化的业务体验,未来实际部署的超密集无线异构网络会远远超出现网的布设密度和规模。据预测,在未来无线网络中,在宏基站的覆盖区域中,各种无线传输技术的各类低功率节点的部署密度将达到现有站点部署密度的 10 倍以上,站点之间的距离将降至 10m 甚至更小,支持高达 25 000 个用户/km²,甚至将来激活用户数和站点数的比例达到 1:1,即每个激活的用户都将有一个服务节点。

广义的异构网络是指存在多种无线接入技术(Radio Access Technology, RAT)的混合型网络,包括 LTE 网络、5G 网络、WIFI 网络、个域网通信以及物联网等。LTE 提出了狭义的异构网络概念,即 LTE 系统内的 HetNet,实现在一个目标区域内重叠部署不同类型的小区,如在一个宏蜂窝小区覆盖范围内部署多个家庭小区和微

微蜂窝小区等。Micro eNB、PeNB、HeNB、Relay 等的部署可以降低站点获取难度，解决覆盖盲区、盲区的问题。

微蜂窝 Micro 小区发射功率和覆盖半径比 Macro 小区小，用于密集城区局部区域的深度覆盖，作为街道站应用。

微微蜂窝 Pico 小区可以用来增加对非对称用户分布小区热点区域的覆盖。微微基站可以看成是一个发射功率较低、覆盖范围较低的宏基站，微微基站可以和宏基站在覆盖区域上相互重叠。部署微微基站需要重新设计射频信号强度和质量相关的算法、过程和参数，以及优化切换流程，实现网络负载均衡。

毫微微蜂窝，即家庭基站小区，主要服务于家庭用户，它可以通过用户的宽带拨号或者 HeNB 网关接入核心网，家庭基站可以部署在较高的频段，提高高频段频谱资源的利用率。家庭基站是属于用户私有的付费基站，各种参数配置和宏基站之间很难进行协调操作，干扰管理、资源分配、基站切换、接入控制等难题亟待解决。

中继节点 Relay 和普通基站一样为用户提供无线接入，有独立的小区标识，是基站和用户之间中专数据和信令的节点，用于保证广覆盖，同时也能减少部署基站的成本。Relay 有两种模式，若基站到 Relay 的链路使用的频率和 Relay 到用户使用的相同，则称为带内中继 (Inband Relay)；若基站到 Relay 的链路使用的频率和 Relay 到用户的链路不同，则称为带外中继 (Outband Relay)。Relay 技术实现较为复杂，但是节省传输，安装灵活方便。

分布式天线系统，即无线射频拉远 (Remote Radio Head, RRH)，包括基带控制单元和射频拉远单元，可以根据不同环境构建链型、树型、环型、星型结构的网络，增强网络部署的灵活性。

异构网络的架构如图所示。

2.2.2 CRAN

C-RAN 架构最大的特点是基带资源池化特性，基带资源可以在不同的基站之间共享。基于虚拟基带处理单元池和遥控射频端的联合，相比于其他的蜂窝网络，C-RAN 架构有更低的网络延时。根据 LTE 的协议栈，C-RAN 架构一共有 L1, L2, L3 三个层级，L1 为物理层，主要功能是实现信道编码、速率匹配、MIMO 以及为高层提供数据传输服务。L2 层负责媒体接入控制、射频链路控制以及主要提供数据链路控制的分组数据汇聚协议 (PDCP)。L3 层是射频资源控制 (RRC) 层，主要提供信令和射频资源控制。根据 L1 层的位置可以把 C-RAN 架构分为两种。分

别是“全中心化 (full centralization)”和“部分中心化 (partial centralization)”。其中“全中心化”架构将 L1、L2、L3 三层全部放在了基带信号处理单元池端。“部分中心化”将 L1 层与遥控射频头相结合。二者的共同点是均需要强大的前向回传链路为其提供高速的发送速率。虚拟的基带信号处理单元池和云端的基站负责限制射频信号的发送和接收。遥控射频头用来收集和管理来自终端信号通过数字信号处理 (DSP) 控制器。在第一种架构中, 所有的 C-RAN 层结构和基带功能全部整合到基带数据处理单元池当中。由于协议存储在虚拟的基带数据处理单元池中, 该架构的协议层对安全威胁有更好的抵抗能力, 如窃听和干扰攻击、身份盗窃攻击等, 同时也使用户接入控制、频谱分配和连接建立更加的便捷。除此之外, 基于虚拟的基带数据处理池, 多标准的数字信号可以灵活有效地被多小区协作信号处理技术分类。在第二种架构中, 仅整合协作功能、L2、L3 层的调度和无线资源分配到基带数据处理单元池当中。该架构调度可以感知到物理层的联合传输和联合发送, 从而合适地调度频谱资源来提升小区边缘的性能。该架构与当前的 4G 网络架构类似, 可以使现存的传输网络改变最小。C-RAN 现在也代指具有云化、中心处理、共享频谱、协作、清洁性质的网络架构。

CRAN 是干扰协调和频谱资源管理的有效的方法。由于 RRH 结构简单, RRH 可以以较低的硬件成本进行密集的布放, BBU 池化后资源统一调度, 能量效率更高。由于中心化的架构, 多用户干扰可以被诸如 CoMP 这样的多点协作技术有效的解决掉, 这样将会有很有效的性能增益。在传统的 CRAN 架构中 (4G), C-RAN 被部署用于连接宏基站和 BBU 池, 由于 BBU 和 RRH 之间的传输路径长, 这种传统的基站会造成很大的传输时延, 而在密集热点区域采用 C-RAN 架构, 延迟也会被大大的缩短。不仅如此, 它还是有效解决潮汐效应的一种方式。

但 CRAN 架构也不是完美的。若要将 CRAN 架构应用与超密集组网当中, 需要减小功耗, 建立 RRH 睡眠与活跃状态的选择机制。不仅如此, 还要实现低花费的前向链路, 因为前向链路能够提供的能量资源是有限的。同时也要降低网络中算法的复杂度, 降低训练开销。

CRAN 网络架构如图 2-1 所示。

可以看到图中, CRAN 架构分为三个主要部分: BBU 池、中央控制器和 RRH。其中 BBU 池和中央控制器通过后向回程链路相连接, BBU 池和 RRH 通过前向回程链路相互连接。其中小区中包括宏基站, 为了满足网络中的大连接和高速率, 小区中还布置了很多微基站, 微基站的数据通过前向回程链路传至 BBU 池做基带信号的处理。通过中央控制器完成网络层的协议, 如小区切换, 跨区访问等等。

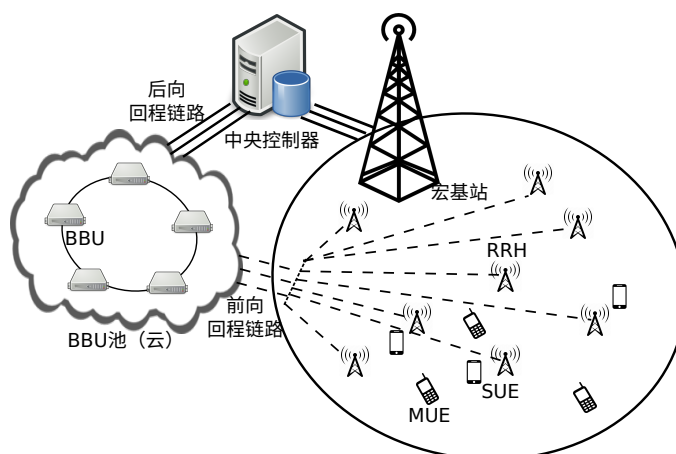


图 2-1 CRAN 网络架构的示意图

2.2.3 软件定义无线网络

为了应对封闭、僵化、难以在传输速率和容量上做出突破的传统网络，研究者提出软件定义网络（Software-Defined Networking, SDN）的概念，SDN 将控制功能从数据转发层中分离出来，使得终端接入、数据转发等功能统一由控制器控制，同时开放网络设备的可编程接口，提高了网络的灵活性和可控性。SDN 与无线网络相结合，形成软件定义无线网络（Software-Defined Wireless Networking, SDWN）。SDWN 相对于原有的无线网络架构，是对原有无线网络技术的全面升级，而不是简单的将控制平面与数据平面分离。主要体现在如下几个方面：

(2) 切换管理

切换管理一直是无线通信中的重点和难点。由于终端节点的移动将引起节点切换问题。同时，在 SDWN 网络中，随着网络控制功能的丰富，终端会因为各种不同的部署进行切换，在使用不同业务时可能也涉及到节点切换问题。节点切换的速度以及切换前后用户得到服务的变化，是 SDWN 性能评价的重要指标之一。

(2) 负载均衡

SDWN 中，AP 的负载能力有限，若单个 AP 上有过多的业务时，则会使 AP 过载，从而无法保证服务质量。针对此问题，软件定义无线网络提出，当某一区域内同时包含有负载较小和较大的 AP 时，控制器应将更多客户端（包括已经连接到负载较大 AP 上的）接入到负载较小的 AP。也可以让控制器在获取网络状况（拓扑结构、负载等）的同时，可以重定向服务请求，为终端选择更加适合的服务器，实现流量均衡。

(3) 无线网络虚拟化

为了解决当前互联网面临的固有的问题传统的网络虚拟化技术以虚拟局域网 (Virtual Local Area Network, VLAN) 与虚拟专用网 (Virtual Private Network, VPN) 为代表, 通过协议封装在物理网络上提供互相隔离的虚拟专用网络。近年来, 网络虚拟化已扩展到移动和无线网络的情况下, 形成了无线网络虚拟化 (Wireless Network Virtualization, WNV)。WNV 中, 物理节点和物理链路被虚拟化为不同虚拟网络的虚拟节点和虚拟链接。SDWN 解耦控制层面与数据平面, 引入控制中心化, 这些思想可以显著提高 WNV 的可编程性和定制性, 同时为 WNV 提供最优的控制和操作策略。另一方面, 虚拟化思想增强了网络的灵活性和伸缩性, 能大幅提高 SDWN 的网络资源利用率。因此, 虽然 WNV 和 SDWN 的研究动机、目标、技术细节、实现方法等不尽相同, 但 WNV 与 SDWN 高度互补, 为未来的移动和无线网络研究指明了方向。

2.3 超密集组网通信的性能指标

超密集组网的网络部署方式仍然处于探索阶段, 但采用异构网络的方式已经达成共识。单一层次的蜂窝网部署方式无法满足 5G 的通信需求, 多层次、多种接入方式并存的无线接入网络 (Heterogeneous and Small Cell Networks, HetSNets) 是蜂窝网发展的必然趋势。多层次是指传统宏小区 (Macrocell) 和包括微小区 (Picocell)、家庭小区 (Femtocell)、中继 (Relay Nodes) 在内的低功耗小区共存的体系结构。

2.3.1 信干噪比

可靠性和有效性一直是评定通信性能的一个重要指标。其中有效性可以通过网络的信道容量进行衡量。而网络的信道容量是一个直接与信干噪比有关的量。信干噪比的表达式如 (2-1) 所示:

$$\text{SINR} = \frac{S}{I + N} \quad (2-1)$$

其中 S 为通信链路中接收机的接收功率, I 为其他的通信链路对该通信链路所造成的干扰。SINR 表示该通信链路的信干噪比。

超密集组网区域用户与基站之间距离比较近, 因此干扰占有几乎全部的比重, 反之噪声的影响几乎可以忽略不计。也就是说, 密集无线网络是一个干扰受限的信道。其信干比近似等于信干噪比。信干比的表达式如 (2-2):

$$\text{SIR} = S / I \quad (2-2)$$

其中 SIR 表示该通信链路的信干比。

2.3.2 用户的遍历容量

给定一个用户的接收信干比，即可以求出一个用户的遍历容量，在平稳的瑞利信道下，用户的遍历容量如式 2-3 所示：

$$C_{Rayleigh} = \int_0^{\infty} B \log_2(1 + \text{SINR}(h)) f(h) dh \quad (2-3)$$

其中 $C_{Rayleigh}$ 为瑞利信道的遍历容量， $f(h)$ 为 h 的概率密度分布函数， B 为信道的带宽。信道的遍历容量表示一个用户在一段时间内，遍历所有可能性下的信道容量的统计平均值。因为信道为瑞利信道，因此在固定位置上的用户，由于受到了信道系数的影响，其信干噪比在不同的时间点上也是不同的，又由于瑞利信道是平稳的信道，因此可以采用遍历所有信道系数的可能性得到的统计均值代替时间上的遍历，用 $\text{SINR}(h)$ 表示。

遍历容量可以反应一个用户在一段时间内通信的有效性，是反应网络性能的重要指标。

2.3.3 区域覆盖率

为保证用户的服务质量与速率要求，用户的接收信干比需要维持在一个固定的门限上，而到底有多少用户在该时刻上有很好的信干比，或者说在瞬时上能达到所要求的信干比的用户一共有多少呢？区域覆盖率是评定的有效的指标。区域覆盖率的定义如 (2-4) 所示：

$$p_c(T) = \mathbb{P}[\text{SINR} > T] \quad (2-4)$$

其中 T 为给定的信干噪比的门限， SINR 为通信链路的信干噪比， \mathbb{P} 表示概率。根据定义，可对其物理意义做出以下的三种解释：

- (1) 服务用户的信干噪比为以上的概率。
- (2) 信干噪比为以上的用户占总用户的百分比。
- (3) 信干噪比为以上的区域占总区域的百分比。

覆盖率是评定无线网络性能的一个重要的概念，并且根据覆盖率，可以很容易的得到有能达到给定的速率要求在整个区域中的所有用户的占比。同时该物理量也是单位区域上信干噪比的概率分布函数的补函数。

2.3.4 区域面积谱效率

香农定理给出了通信系统的理论容量上界^[23]，表达式如 (2-5) 所示：

$$C = B \log_2(1 + \text{SINR}) \quad (2-5)$$

式 (2-5) 中, C 代表理论的容量的上界也即系统最大的传输速率, B 代表信道的带宽, SINR 代表接收端信号的信干噪比。香农定理可以解释现代各种无线制式由于带宽不同, 所支持的单载波最大吞吐量的不同。香农公式表达了在给定带宽下, 噪声和干扰都服从高斯分布的情况下, 系统所能达到的理论最大容量。

频谱效率的定义为单位带宽上所能承载的最大的吞吐量, 如 (2-6) 所示:

$$\eta_{SE} = C/B = \log_2(1 + \text{SINR}) \quad (2-6)$$

上式中 C/B 就是单位带宽的容量, 单位为 bps/Hz 体现信道链路的传输性能。式 (2-6) 给出了理论上频谱效率的理论最大值。

在密集热点区域无线网络的场景中, 单个链路的容量已经不再是衡量一个网络的好坏的唯一指标, 在超密集热点区域无线网络的场景中, 还要考虑在一段时间内, 网络中服务的用户的和容量。同时, 考虑到不同区域上的频谱效率相差可能非常悬殊。因此在密集热点的网络环境下, 频谱效率将不能够完全反映整个区域的无线网络的性能, 取而代之的是单位面积谱效率这一物理量, 其定义为在单位面积上的频谱效率, 表达式如 (3.2) 所示:

$$\eta_{ASE} = C/(B \cdot S) = \lambda \mathbb{E}[\log_2(1 + \text{SINR})] \quad (2-7)$$

单位为 bps/Hz/m^2 。其中 λ 为服务区域内基站的密度。区域面积谱效率的物理意义为单位面积上所承载的平均的和容量。

2.4 本章小结

本章主要对超密集组网现阶段的研究基础进行了分析, 为后续章节的深入分析打下基础。首先给出了超密集组网的定义, 在分层异构的网络架构下, 通过部署高密度低功耗的节点, 来极大的提升系统容量, 达到下一代移动通信 5G 满足 1000 倍速率提升的要求。同时给出通信性能的衡量指标, 一般通过区域频谱效率, 区域能量效率, 成本效率来衡量超密集组网。核心性能指标和典型场景指标则从实用性的角度给出了系统需要符合的性能参数, 对于实际系统的规划与部署具有指导意义。为了进一步明确超密集组网的网络构架, 多址接入技术以及实现大容量的可行性, 本章的第三部分给出了超密集组网中的主要技术, 大规模天线技术可以带赋形增益和频谱效率的提升; 新型的非正交稀疏码分多址技术 SCMA 可以在利用同等资源的情况下, 接入更大量的用户, 提升系统容量; 以去蜂窝网化为核心理念的 C-RAN 技术, 可以进行信息的集中处理, 降低能耗; D2D 技术作为超密集组网中最具潜力的

技术,使得大规模密集通信成为可能。文章对这四种技术进行简要介绍和说明,确定在超密集组网中的使用方式,所能取得的性能优势。

第3章 密集热点区域无线网络的性能分析

论文的第二章已经介绍了密集热点区域无线网络的定义，根据密集热点区域无线网络的定义，我们就可以构造密集热点区域无线网络的网络模型。构造密集热点区域无线网络的模型需要从四个方面考虑，即基站的拓扑结构，用户统计分布，信道建模与网络架构建模。在本章中，主要考虑前三个方面。

在第三章，通过对密集热点区域无线网络的系统建模，即可对密集热点区域无线网络的下行链路进行分析。通过性能分析，我们可以得到用户的信干比，网络的覆盖率，网络的单位面积频谱利用率等性能指标。

在第四章，着重考虑密集热点区域无线网络的网络架构，对密集热点区域无线网络的性能进行优化，引入提出的资源管理和调度算法，网络的覆盖率，服务用户数，单位面积频谱利用率，单位面积能量谱利用率将进一步提高。

3.1 密集热点区域无线网络的系统建模

本小节对密集热点区域无线网络进行系统建模，主要包括基站的参数与拓扑结构的分析与建模，用户的在服务区内的统计特性建模以及信道建模。本论文主要考虑单小区，小区中配备有多个微基站。本论文主要对下行链路的性能进行分析，即信源在基站侧，在基站中完成调制、编码发送等信号处理过程，经过信道传送至用户侧，用户在进行接收、解调、解码等过程将信息接收。宏基站和微基站采用不同的频谱资源。假设小区为的区域面积为 A 。用户与发射基站建立的链路受到大尺度衰落的影响，路径损耗系数为 α ，信道噪声为加性高斯白噪声，噪声的功率为 N ，信道类型为瑞利信道，信道系数 h 服从单位指数分布，记做 $h \sim \exp(1)$ 。 h 的概率密度分布函数为：

$$f_H(h) = \exp(-h) \quad (3-1)$$

概率累计分布函数为：

$$F_H(h) = \mathbb{P}[H \leq h] = 1 - \exp(-h) \quad (3-2)$$

用户选择距离自己最近的微基站作为服务基站。

3.1.1 基站参数与拓扑结构

为了便于以后的性能分析，需要根据之前对超密集组网定义的描述，对基站的参数指标进行说明。

假设微基站的发射功率为 P 、每个基站配备有单根天线，小区中有多个微基站，微基站的个数为 n ，小区中微基站的密度为 λ ，小区密度和小区基站之间的关系如 (3-3) 所示：

$$n_s = \left\lfloor \lambda_s S \right\rfloor \quad (3-3)$$

其中 $\left\lfloor \cdot \right\rfloor$ 表示向下取整。所有微基站构成的集合为 \mathcal{S} ，第 i 个微基站的编号为 S_i ，即 $\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_{n_s}\}$ 。微基站 S_i 服务的用户数为 k_i 个。

基站的拓扑结构即为微基站的部署方法微基站的部署则相对灵活，部署方式主要有两种，第一种为传统的格点分布，即在对微基站部署前，需要选定一种格形，如六边形格形，四边形格形等，然后将基站部署在格点上。第二种为小区中的微基站部署是一个泊松点过程。该方法最先由 J. G. Andrews 提出^[4]，用于刻画地貌对基站部署的影响。将微基站的部署过程考虑为一个泊松点过程是更加合理的，主要有一下三个方面的原因：

(1) 基于格形的基站模型过于理想化

由于微基站的密度很高，容易受到外界因素的干扰。如地形地貌的影响，如果按照格点部署，但是选定的格点周围恰好不适合部署基站，那么格点模型对该区域的刻画就不够准确，就得不到可信的性能分析。微基站的部署也受附近的用户的统计特性的影响，如果格点周围刚好没有什么用户，显然也不会在格点上部署基站。此时将网络中的基站建模成为格点分布也是不合理的。

(2) 微基站和家庭基站的部署呈现自组织性

在当前的小基站场景下，网络是密集部署的，许多微基站和家庭基站，其部署是自由部署的而不是由运营商统一部署的，这就体现了一定的随机性。而泊松点过程就是对这种随机性的一种刻画。

(3) 方便对网络进行性能分析

将基站的部署看成泊松点过程，就可以应用随机几何中已经得到的很多定理简化分析过程。通过随机几何这一数学工具，可以简化网络中的信息指标的求解，如覆盖率和单位面积频谱利用率的求解。而基于格形的基站建模，相关性能参数的精确值只能通过蒙特卡洛仿真得到。

基站部署方式的示意图如图 3-3 所示：

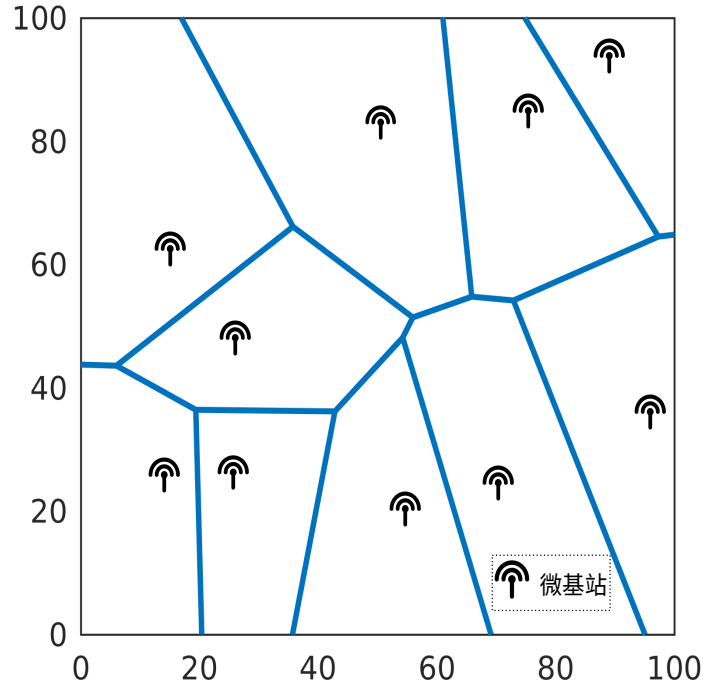


图 3-1 基站的拓扑结构示意图

从图 3-3 是密集热点区域无线网络的基站的拓扑结构的示意图，图中，区域大小为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ ，模拟单个小区的情况，小区中有 10 个微基站，微基站的密度为 $\lambda = 10^{-3}\text{m}^{-2}$ 。由于用户选择距离自己最近的基站进行服务，图中也采用 Voronoi 图对每个基站的服务区域进行了标注，即基站的服务区域为其所属的泰森多边形所占的区域。如图中描述，微基站的部署是一个泊松点过程 ϕ ，图 3-3 是泊松点过程的一次实现。从图中也可以看出，该种基站部署方式的拓扑结构更加符合实际的情况。

当基站的部署过程为泊松点过程时，在直角坐标系下，基站的部署可以近似的看成二维随机分布，即在给定的区域内，基站在每个位置上的概率相同。同时，根据泊松点过程的性质，已知区域的面积 A ，那么区域内的微基站的个数 n 是一个随机变量，该随机变量服从与面积有关的泊松分布，泊松分布的参数为 λA 。即：

$$\mathbb{P}(n_s = i) = \frac{e^{-\lambda A} (\lambda A)^i}{i!} \quad (3-4)$$

根据泊松分布的性质，已知区域的面积 A ，微基站的密度为 λ ，则区域内的基站数量的均值为：

$$\overline{n_s} = \lambda A \quad (3-5)$$

3.1.2 用户终端的统计特性

超密集组网场景是客观世界中普遍存在的一类场景。网络区域中人物的活动规律复杂，每个人的容量需求也是十分复杂的。但我们也可以从微基站的部署以及客观实际出发，对小区中用户的统计分布做出合理的假设。

由于微基站服务于热点区域，区域内用户多，用户对容量的需求较高。因此在微基站附近的用户数量和容量需求是远高于宏基站覆盖的其他的范围的。一般来说，微基站会部署在区域容量需求最高的地方，用户数量和容量需求随着距离微基站的距离越来越远而逐渐的变小。根据微基站的这一特性，我们引入概率统计学中非常著名的二维混合高斯模型。二维混合高斯模型广泛的应用于人工智能，模式识别，机器学习等领域当中，用于描述事件对行为或决策的影响。为不是一般性，此处假设二维混合高斯模型的两个维度是相互独立的。

综上所述，对于微基站 S_i ，用户的集合为 \mathcal{U}_i ，用户的个数为 k_i 个，用 U 表示用户的，即 $\mathcal{U}_i = \{U_1, U_2, \dots, U_{k_i}\}$ 微基站用户的密度为 μ 。用户围绕着基站服从二维高斯分布，二维高斯分布的方差为 σ^2 。由于泊松点过程是一个平稳的随机过程，因此可以不是一般性的假设微基站的坐标为原点，则此时，用户的概率密度分布函数即为：

$$\begin{aligned} f_{X,Y}(x,y) &\stackrel{(a)}{=} f_X(x)f_Y(y) \\ &\stackrel{(b)}{=} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (3-6)$$

其中 (a) 根据随机变量的独立性，(b) 为高斯分布的概率密度函数，X，Y 分别为用户的横纵坐标。用户的分布的概率密度分布函数为如图 3-2 所示：

在图中给出了距基站 30m 内的用户的概率密度函数图，其中二维高斯分布的标准差为 10。根据高斯分布的特性，用户多集中在 2 个标准差范围内，即距离基站的距离为 20m 以内。

可以通过将直角坐标系转换为极坐标系，即可得到用户距基站的距离的概率密度分布函数，分布函数如式 (3-7) 所示：

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-7)$$

其中 R 为用户距基站的距离。

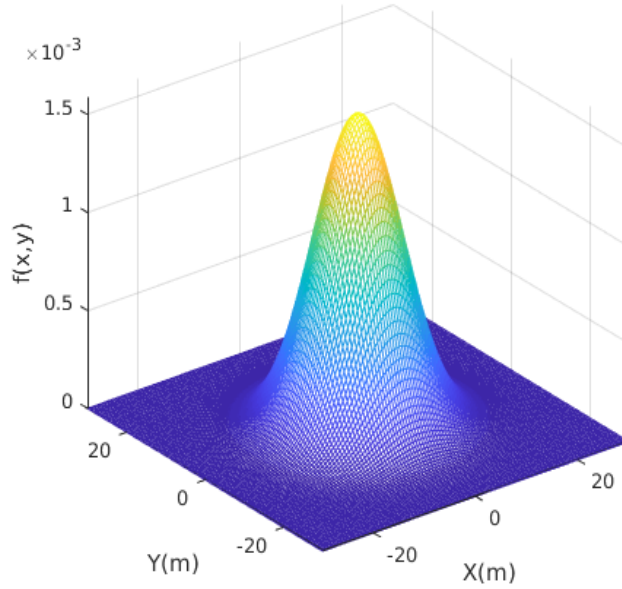


图 3-2 微基站用户的统计分布的概率密度函数

3.2 超密集组网的性能分析

本小节对超密集组网场景的模型进行性能分析。主要分析网络的信干噪比，网络的覆盖率以及网络的单位面积频谱利用率。覆盖率和单位面积频谱利用率的概念已在第二章中给出。

小区与用户的参数表总结如下：

3.2.1 小区中用户的遍历容量

信干噪比的定义如式 (2-1)，可以看出信干噪比是一个与用户的接收功率，用户与服务基站建立的信道上的噪声以及收到其他微基站的干扰功率的和共同决定的。

对于微基站 S_i ，其所属的用户 U_k 的接收功率用 $P_{i,k}$ 表示，如式 (3-8)：

$$P_{i,k} = R_{i,k}^{-\alpha} h_{i,k} P \quad (3-8)$$

其中 $R_{i,k}$ 为用户 U_k 距基站 S_i 的距离， α 为信道衰减系数， $h_{i,k}$ 是用户 U_k 与基站 S_i 构成的链路的信道系数，服从单位的指数分布， $h_{i,k} \sim \exp(1)$ ， P 为基站的发射功率。式 (3-8) 说明用户的接收功率为基站的发送功率经过大尺度衰减和小尺度衰减之后的结果。

微基站 S_i 中的用户 U_k 会受到其他基站的干扰，同样用户接收到其他基站的功率也是基站的发送功率经过大尺度衰减和小尺度衰减之后的结果，如式 (3-9)

$$I_{i,k} = \sum_{\substack{S_j \in \mathcal{S} \\ j \neq i}} R_{j,k}^{-\alpha} h_{j,k} P \quad (3-9)$$

其中 $R_{j,k}$ 为用户 U_k 距基站 S_j 的距离， α 为信道衰减系数， $h_{j,k}$ 是用户 U_k 与基站 S_j 构成的链路的信道系数，服从单位的指数分布， $h_{j,k} \sim \exp(1)$ ， P 为基站的发射功率。

被微基站 S_i 服务的用户 U_k 的信干噪比的表达式即为：

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{i,k} &\stackrel{(a)}{=} \frac{P_{i,k}}{I_{i,k} + N} \\ &\stackrel{(b)}{=} \frac{R_{i,k}^{-\alpha} h_{i,k} P}{\sum_{\substack{S_j \in \mathcal{S} \\ j \neq i}} R_{j,k}^{-\alpha} h_{j,k} P + N} \end{aligned} \quad (3-10)$$

其中 $S_i \in \mathcal{S}$, $U_k \in \mathcal{U}_i$ 。(a) 为信干噪比的定义，(b) 为将式 (3-8) 和 (3-9) 带入后的结果。可以看出信干噪比是一个与基站距离，基站的发射功率，噪声，信道衰减系数，信道系数有关的物理量。

由于在超密集组网的场景中，基站与用户之间的距离比较近，因此用户的接收功率在一般情况下是远远大于噪声的，即系统是一个干扰受限的系统。因此信道的噪声可以忽略不计，忽略后即可得到用户的信干比这一物理量，如式 (3-11) 所示：

$$\begin{aligned} \text{SIR}_{i,k} &\stackrel{(a)}{=} P_{i,k} / I_{i,k} \\ &\stackrel{(b)}{=} \frac{R_{i,k}^{-\alpha} h_{i,k}}{\sum_{\substack{S_j \in \mathcal{S} \\ j \neq i}} R_{j,k}^{-\alpha} h_{j,k}} \end{aligned} \quad (3-11)$$

其中 (a) 为信干比的定义，(b) 为将式 (3-10) 中忽略噪声之后的结果。

3.2.2 小区中用户的覆盖率

覆盖率的定义式为式 (2-4)，由于基站的部署是泊松点过程，泊松点过程是独立平稳的随机过程，因此可以对单个基站的覆盖率进行分析，即可得到网络的覆盖率性能。因此，不失一般性，可以假设对基站 $S_0 \in \mathcal{S}$ 进行分析，定义用户距基站 S_0 的距离为 r ，根据前面的分析可知， r 服从二维高斯分布，用户与基站 S_0 建立的链路的信道系数为 h ， h 服从单位指数分布，记做 $h \sim \exp(1)$ 。

覆盖率是一个与基站的密度 λ 、给定的信干噪比门限 T 、信道的衰落系数 α 、用户的统计分布的参数 σ 有关系。可以对式 (2-4) 做进一步的推导。

$$\begin{aligned}
 p_c(T, \lambda, \alpha, \sigma) &\stackrel{(a)}{=} \mathbb{P}[\text{SINR} > T] \\
 &\stackrel{(b)}{=} \mathbb{E}_r[\text{SINR} > T | r] \\
 &\stackrel{(c)}{=} \int_0^\infty \mathbb{P}[\text{SINR} > T | r] \frac{r}{\sigma^2} \exp(-\frac{r^2}{2\sigma^2}) dr
 \end{aligned} \tag{3-12}$$

其中 T 为给定的信干噪比的门限, λ (a) 为覆盖率的定义式, (b) 表示网络的覆盖率是一个与距离有关的量, 覆盖率的值等于基站中的用户遍历所有可能出现的位置得到的覆盖率的统计平均值, (c) 为将式 (3-7) 代入后的结果。

为了得到覆盖率的表达式, 需要知道当给定微基站 S_0 与用户的距离 r 以后信干噪比大于门限的概率, 即 $\mathbb{P}[\text{SINR} > T]$ 。此处假设用户距除 S_0 以外最近的基站的距离为 D , 则概率可以被拆解成为两个部分。

(1) 微基站 S_0 的用户恰好被 S_0 服务, 即用户距基站 S_0 的距离 $r < D$ 。此时, S_0 为用户的服务基站, 其他基站为干扰基站, 即用户受到除 S_0 以外的其他基站的干扰。

(2) 微基站 S_0 的用户被其他的微基站进行服务, 即用户距离基站 S_0 的距离 $r \geq D$ 。此时, S_0 为干扰基站, 即用户受到 S_0 基站的干扰, 和除服务的微基站以外的其他基站的干扰。

即根据全概率公式, 总的覆盖率可以分解为

(1) 事件 1: 所观测用户的服务基站即为所属的热点的基站, 且该用户能达到覆盖所需的信干噪比。

(2) 事件 2: 当所观测用户的服务基站为其他基站且该用户能达到覆盖所需的信干噪比。

这两个事件概率的加和。根据 (1) 和 (2), 可以将信干噪比大于门限的概率改写为两个部分, 表达式如式 (3-13) 所示:

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}[\text{SINR} > T | r] &= \mathbb{P}[\text{SINR} > T | r, r < D] \mathbb{P}[r < D] \\
 &\quad + \mathbb{P}[\text{SINR} > T | r, r > D] \mathbb{P}[r > D]
 \end{aligned} \tag{3-13}$$

对于 $r < D$ 的部分, 用户受到除了 S_0 以外的其他基站的干扰, 由于超密集组网系统是一个干扰受限的系统, 噪声对系统的影响相比于干扰很小, 因此采用信干比, 对信干噪比近似。将信干噪比的表达式 (3-11) 带入到式 (3-13) 的前半部分, 其概率的表达式如式 (3-14) 所示:

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}[\text{SINR} > T \mid r, r < D] &= \mathbb{P}\left[\frac{r^{-\alpha}h}{\sum_{S_j \in \mathcal{S} \setminus S_0} R_{j,0}^{-\alpha} h_{j,0}} > T \mid R_{j,0} \geq D > r\right] \\
 &= \mathbb{P}\left[h > Tr^\alpha \sum_{S_j \in \mathcal{S} \setminus S_0} R_{j,0}^{-\alpha} h_{j,0} \mid R_{j,0} \geq D > r\right]
 \end{aligned} \tag{3-14}$$

为了简化公式，令：

$$I_0 = \sum_{S_j \in \mathcal{S} \setminus S_0} R_{j,0}^{-\alpha} h_{j,0} \tag{3-15}$$

I_0 表示用户接收到的干扰的功率，是一个与基站部署和用户位置有关的随机变量。公式 (3-14) 可以简化为式 (3-16)：

$$\mathbb{P}[\text{SINR} > T \mid r, r < D] = \mathbb{P}[h > Tr^\alpha I_0 \mid R_{j,0} \geq D > r] \tag{3-16}$$

其中 h 是信道增益系数，是一个随机变量，该随机变量服从单位指数分布 $h \sim \exp(1)$ 。可以看到，在给定 $r < D$ 的情况下，信噪比大于门限 T 的概率可以等效为表示用户与基站 S_0 之间的信道系数大于 $Tr^\alpha I_0$ 的值。其中 T 为给定门限， r 为基站 S_0 与用户之间的距离， α 为信道的损耗系数， I_0 为用户接收到的干扰的功率。

由于基站的部署是泊松点过程，因此干扰基站距离用户的距离 $R_{j,0}$ 是一个随机变量，干扰基站和用户之间的信道系数 $h_{j,0}$ 是一个服从单位指数分布的随机变量。又由于干扰 I_0 是通过 $R_{j,0}$ 和 $h_{j,0}$ 这两个随机变量求得，因此信噪比在 $r < D$ 的情况下大于门限值的概率为式 (3-16) 对干扰 I_0 求均值。式 (3-16) 可以展开为式 (3-17)：

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}[h > Tr^\alpha I_0 \mid R_{j,0} \geq D > r] &= \mathbb{E}_{I_0} [\mathbb{P}[h > Tr^\alpha I_0 \mid R_{j,0} \geq D > r, I_0]] \\
 &\stackrel{(a)}{=} \mathbb{E}_{I_0} \left[\int_{Tr^\alpha I_0}^{\infty} \exp(-h) dh \mid R_{j,0} \geq D > r, I_0 \right] \\
 &= \mathbb{E}_{I_0} [\exp(-Tr^\alpha I_0) \mid R_{j,0} \geq D > r, I_0] \\
 &\stackrel{(b)}{=} \mathcal{L}_{I_0}(Tr^\alpha)
 \end{aligned} \tag{3-17}$$

其中，(a) 为将式 (3-2) 带入后的结果，对 (a) 求积分，即可得到 $\mathbb{E}_I[\exp(-sI_0)]$ 的形式，即随机函数 $\exp(-sI_0)$ 对随机变量 I_0 求均值，即求随机变量 I_0 的聚生成函数，其求法可等效为对随机变量 I_0 的概率密度函数求拉普拉斯变换。在 (b) 中， $\mathcal{L}(\cdot)$ 表示拉普拉斯变换，等号右侧为拉普拉斯变换的定义式。将式 (3-15) 带入式 (3-17) 中，做进一步的推导，得到式 (3-18)：

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{I_0}(Tr^\alpha) &= \mathbb{E}_{I_0} \left[\exp(-Tr^\alpha I_0) \mid R_{j,0} \geq D > r, I_0 \right] \\
 &= \mathbb{E}_{\Phi, h_{j,0}} \left[\exp(-Tr^\alpha \sum_{S_j \in \mathcal{S} \setminus S_0} R_{j,0}^{-\alpha} h_{j,0}) \right] \\
 &\stackrel{(a)}{=} \mathbb{E}_{\Phi, h_{j,0}} \left[\prod_{S_j \in \mathcal{S} \setminus S_0} \exp(-Tr^\alpha R_{j,0}^{-\alpha} h_0) \right] \\
 &\stackrel{(b)}{=} \mathbb{E}_{\Phi} \left[\prod_{S_j \in \mathcal{S} \setminus S_0} \frac{1}{1 + Tr^\alpha R_{j,0}^{-\alpha}} \right] \\
 &\stackrel{(c)}{=} \exp \left(-2\pi\lambda_s \int_r^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + Tr^\alpha v^{-\alpha}} \right) dv \right)
 \end{aligned} \tag{3-18}$$

其中 (a) 根据信道系数的独立同分布的特性，根据独立同分布的特性，可以将不同干扰基站的信道系数 $\{h_{1,0}, h_{2,0}, \dots, h_{n,0}\}$ 等效为单个指数分布的随机变量 h_0 。(b) 为对指数分布的随机变量 h_0 求均值。(c) 根据泊松点过程的概率生成函数的性质，即 $\mathbb{E} [\prod_{x \in \Phi} f(x)] = \exp(-\lambda_s \int_{\mathbb{R}^2} (1 - f(x)) dx)$ 。

对于式 (3-13) 中 $r > D$ 的部分，因为用户选择距离自己最近的基站作为服务基站，所以基站 S_0 不再是用户的服务基站。令用户距离自己最近的基站为 S_i ，由于用户距除 S_0 以外最近的基站的距离为 D ，可知 $R_{i,j} = D$ 。此时用户收到来自除了干扰基站以外的其他基站的干扰如式 (3-19) 所示：

$$I_i = \sum_{S_j \in \mathcal{S} \setminus \{S_0, S_i\}} R_{j,0}^{-\alpha} h_{j,0} + r^{-\alpha} h \tag{3-19}$$

用户数选择 S_i 作为服务基站，用户的接收功率为如式 (3-20) 所示：

$$P_i = D^{-\alpha} h_{i,0} \tag{3-20}$$

式 (3-13) 中 $r > D$ 的部分，其概率的表达式如式 (3-22) 所示：

$$\mathbb{P}[\text{SINR} > T \mid r, r < D] = \mathbb{P}[h_{i,j} > TD^\alpha I_i \mid r > D] \tag{3-21}$$

与式 (3-17) 的推导方法类似，对信道系数 $h_{i,0}$ 求积分可以得到，在 $r > D$ 的情况下，信干噪比大于给定门限 T 的概率：

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P} \left[h_{i,j} > Tr^\alpha I_i \mid r > D \right] &= \mathbb{E}_{I_i} \left[\mathbb{P} \left[h_{i,j} > TD^\alpha I_i \mid r > D \right] \right] \\
 &= \mathbb{E}_{I_i} \left[\int_{TD^\alpha I_i}^\infty \exp(-h_{i,j}) dh_{i,j} \mid r > D, I_i \right] \\
 &= \mathbb{E}_{I_i} \left[\exp(-TD^\alpha I_i) \mid r > D, I_i \right] \\
 &= \mathcal{L}_{I_i}(TD^\alpha)
 \end{aligned} \tag{3-22}$$

式 (3-22) 说明，当 $r > D$ 时，信干噪比大于给定门限的概率可以写成对干扰 I_i 求均

值，从而可以转化成随机变量 I_i 的聚生成函数，进一步的演化为对 TD^α 求拉普拉斯变换。

将式 (3-19) 带入式 (3-22) 中，做进一步的推导，推导的方法与式 (3-18) 的推导方法类似，即首先将式 (3-19) 带入，再利用用户和基站之间建立的信道链路的信道系数满足独立同分布的性质，将不同的基站的信道系数等效为同一个随机变量，再将该随机变量积分，最后带入到二维泊松点过程的概率生成函数中，即可以得到式 (3-23)。

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{I_i}(Tr^\alpha) &= \mathbb{E}_{I_i} \left[\exp(-Tr^\alpha I_i \mid R_{j,0} \geq D > r, I_i) \right] \\
 &= \mathbb{E}_{\Phi, h_{j,0}} \left[\exp \left(-TD^\alpha \left(\sum_{S_j \in \mathcal{S} \setminus \{S_0, S_i\}} R_{j,0}^{-\alpha} h_{j,0} + r^{-\alpha} h \right) \right) \right] \\
 &\stackrel{(a)}{=} \mathbb{E}_{\Phi, h_{j,0}} \left[\exp(-TD^\alpha r^{-\alpha} h) \prod_{S_j \in \mathcal{S} \setminus \{S_0, S_i\}} \exp(-TD^\alpha R_{j,0}^{-\alpha} h_0) \right] \\
 &\stackrel{(b)}{=} \mathbb{E}_{\Phi} \left[\frac{1}{1 + TD^\alpha r^{-\alpha}} \prod_{S_j \in \mathcal{S} \setminus \{S_0, S_i\}} \frac{1}{1 + TD^\alpha R_{j,0}^{-\alpha}} \right] \\
 &\stackrel{(c)}{=} \frac{1}{1 + TD^\alpha r^{-\alpha}} \exp \left(-2\pi\lambda_s \frac{n}{n-1} \int_D^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + TD^\alpha v^{-\alpha}} \right) dv \right)
 \end{aligned} \tag{3-23}$$

其中 (a) 根据信道系数的独立同分布的特性，根据独立同分布的特性，可以将不同干扰基站的信道系数 $\{h_{1,0}, h_{2,0}, \dots, h_{n,0}\}$ 等效为单个指数分布的随机变量 h_0 。(b) 为对指数分布的随机变量 h_0 和 h 分别求均值。(c) 根据泊松点过程的概率生成函数的性质，即 $\mathbb{E}[\prod_{x \in \Phi} f(x)] = \exp(-\lambda_s \int_{\mathbb{R}^2} (1 - f(x)) dx)$ 。

由于 $D < r$ ，有 $T(\frac{D}{R})^\alpha \rightarrow 0$ 并且有 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{1+x} = 1$ ，又由于在超密集组网中，微基站的数量很多， n 的值很大。因此 $\frac{n}{n-1} \rightarrow 1$ 因此式 (3-23) 可以简化为式 (3-24)：

$$\mathcal{L}_{I_i}(Tr^\alpha) \approx \exp \left(-2\pi\lambda_s \int_D^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + TD^\alpha v^{-\alpha}} \right) dv \right) \tag{3-24}$$

将式 (3-17) 和式 (3-22) 带入到式 (3-13) 中，可以得到网络中某一个点上的用户，其信干噪比大于给定门限的概率为式 (3-25)：

$$\mathbb{P}[\text{SINR} > T \mid r] = \mathcal{L}_{I_0}(Tr^\alpha) \mathbb{P}[r < D] + \mathcal{L}_{I_i}(TD^\alpha) \mathbb{P}[r > D] \tag{3-25}$$

即给定用户距离微基站 S_0 的距离 r 后，用户的信干噪比 SINR 大于预设门限的概率需要分为两个部分进行讨论。当微基站 S_0 为距离用户最近的基站，即 $r < D$ ，用户的服务基站为 S_0 的情况下，用户的信干噪比 SINR 大于预设门限的概率和微基站 S_0 不是距离用户最近的基站，即 $r > D$ ，用户的服务基站为除 S_0 之外的其他基站 S_i 的情况下，用户的信干噪比 SINR 大于预设门限的概率。信干噪比大于预设

门限的概率可以通过对干扰求聚生成函数的值，其在形式上等于对干扰求拉普拉斯变换。

对式 (3-25) 做进一步的展开，将式 (3-18) 和式 (3-23) 的结果带入到式中，可以得到给定用户距离微基站 S_0 后，信干噪比大于预设门限的概率关于 r , D , λ_s , α , T 的函数。如式 (3-27) 所示：

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[\text{SINR} > T \mid r] &= \exp\left(-2\pi\lambda_s \int_r^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + Tr^\alpha v^{-\alpha}}\right) dv\right) \mathbb{P}[r < D] \\ &\quad + \frac{1}{1 + TD^\alpha r^{-\alpha}} \exp\left(-2\pi\lambda_s \frac{n}{n-1} \int_D^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + TD^\alpha v^{-\alpha}}\right) dv\right) \mathbb{P}[r > D] \end{aligned} \quad (3-26)$$

将式 (3-18) 和式 (3-24) 的结果带入到式 (3-25) 中即可得到可以得到给定用户距离微基站 S_0 后，信干噪比大于预设门限的概率关于 r , D , λ_s , α , T 的近似函数。

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[\text{SINR} > T \mid r] &\approx \exp\left(-2\pi\lambda_s \int_r^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + Tr^\alpha v^{-\alpha}}\right) dv\right) \mathbb{P}[r < D] \\ &\quad + \exp\left(-2\pi\lambda_s \int_D^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + Tr^\alpha v^{-\alpha}}\right) dv\right) \mathbb{P}[r > D] \end{aligned} \quad (3-27)$$

根据 [4] 中的结果，对等式的两个部分分别做变量替换 $u = \left(\frac{v}{rT^{\frac{1}{\alpha}}}\right)$ 和 $u = \left(\frac{v}{DT^{\frac{1}{\alpha}}}\right)$ ，可以得到式 (3-27) 的更精简的表达，如式 (3-28) 所示：

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[\text{SINR} > T \mid r] &= \exp\left(-\pi r^2 \lambda_s \rho(T, \alpha)\right) \mathbb{P}[r < D] \\ &\quad + \frac{1}{1 + TD^\alpha r^{-\alpha}} \exp\left(-\pi D^2 \lambda_s \frac{n}{n-1} \rho(T, \alpha)\right) \mathbb{P}[r > D] \\ &\approx e^{-\pi r^2 \lambda_s \rho(T, \alpha)} \mathbb{P}[r < D] + e^{-\pi D^2 \lambda_s \rho(T, \alpha)} \mathbb{P}[r > D] \end{aligned} \quad (3-28)$$

其中，

$$\rho(T, \alpha) = T^{1/\alpha} \int_{T^{-2/\alpha}}^\infty \frac{1}{1 + u^{\alpha/2}} du \quad (3-29)$$

将式 (3-28) 带入到式 (3-12) 中，并对变量 r , D 积分，即可得到覆盖率最后的表达式 (3-30)：

$$\begin{aligned} &p_c(T, \lambda, \alpha, \sigma) \\ &\stackrel{(a)}{=} \int_0^\infty \int_D^\infty \exp\left(-\pi r^2 \lambda_s \rho(T, \alpha)\right) f(D) dD f(r) dr \\ &\quad + \int_0^\infty \int_D^\infty \frac{1}{1 + TD^\alpha r^{-\alpha}} \exp\left(-\pi D^2 \lambda_s \frac{n}{n-1} \rho(T, \alpha)\right) f(D) dD f(r) dr \\ &\stackrel{(b)}{\approx} \int_0^\infty \int_D^\infty \exp\left(-\pi r^2 \lambda_s \rho(T, \alpha)\right) f(D) dD f(r) dr \\ &\quad + \int_0^\infty \int_D^\infty \exp\left(-\pi D^2 \lambda_s \rho(T, \alpha)\right) f(D) dD f(r) dr \end{aligned} \quad (3-30)$$

其中,

$$f(D) = e^{-\lambda_s} \pi D^2 2\pi \lambda_s D \quad (3-31)$$

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-32)$$

分别为用户距离最近的基站和距离和微基站 S_0 距离最近的基站 S_i 的距离的概率密度分布函数。(a) 为覆盖率 $p_c(T, \lambda, \alpha, \sigma)$ 的表达式, (b) 是根据式 (3-28) 进行合理近似后的简化的表达式。

对于 (b), 对等式的右边求积分, 可以得到更加简化的结果, 如式 (3-38):

$$p_c(T, \lambda, \alpha, \sigma) = \frac{1}{1 + \rho(T, \alpha)} + \frac{\rho(T, \alpha)}{1 + \rho(T, \alpha)} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2\lambda_s(1 + \rho(T, \alpha)) + 1} \quad (3-33)$$

$\rho(T, \alpha)$ 的定义式为式 (3-37)。 T 为给定的信干噪比的门限, λ_s 为服务区域内基站的密度。 α 为信道衰落系数。 σ 为用户围绕热点分布的标准差的参数。等式的前半部分与 [4] 给出的公式相同, 为当用户的分布为随机分布时的覆盖率。通过前面的分析推导, 可以得到定理 3.1:

定理 3.1 在二维的自由空间中, 微基站的部署是泊松点过程 Φ , 微基站的密度为 λ_s , 基站的个数为 n 。用户的分布服从以其所围绕的基站的坐标为均值, σ^2 为方差的二维高斯分布。用户选择距离其最近的基站作为服务基站, 其他的基站作为干扰基站。则网络的覆盖率为:

$$\begin{aligned} p_c(T, \lambda, \alpha, \sigma) &= \int_0^\infty \int_D \exp(-\pi r^2 \lambda_s \rho(T, \alpha)) f(D) dD f(r) dr \\ &+ \int_0^\infty \int_D \frac{1}{1 + TD^\alpha r^{-\alpha}} \exp\left(-\pi D^2 \lambda_s \frac{n}{n-1} \rho(T, \alpha)\right) f(D) dD f(r) dr \end{aligned} \quad (3-34)$$

其中,

$$f(D) = e^{-\lambda_s} \pi D^2 2\pi \lambda_s D \quad (3-35)$$

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-36)$$

分别为用户距离最近的基站和距离和微基站 S_0 距离最近的基站 S_i 的距离的概率密度分布函数。

$$\rho(T, \alpha) = T^{1/\alpha} \int_{T^{-2/\alpha}}^\infty \frac{1}{1 + u^{\alpha/2}} du \quad (3-37)$$

可对 p_c 进行合理的近似, 得到渐进的上界, 近似的表达式为:

$$p_c(T, \lambda, \alpha, \sigma) = \frac{1}{1 + \rho(T, \alpha)} + \frac{\rho(T, \alpha)}{1 + \rho(T, \alpha)} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2\lambda_s(1 + \rho(T, \alpha)) + 1} \quad (3-38)$$

可以看到, 该场景下的区域覆盖率主要与微基站用户分布的方差, 基站的密

度，信道的路径损耗因数有关系。

(1) 当用户覆盖所需的信干比较小的时候，第一项起主导的作用，当用户覆盖所需的信干比较大的时候，第二项起主导作用。在覆盖所需的信干比较大的时候，覆盖率与密度成反比，与用户分布的方差成反比。

(2) 覆盖率随着热点区域的密度的增加而减少。当基站的密度趋于无穷大的情况下，小区的覆盖率将近似等于在小区中用户服从随机分布的情况的覆盖率。如式 (3-39)：

$$\lim_{\lambda_s \rightarrow \infty} p_c(T, \lambda_s, \alpha, \sigma) = \frac{1}{1 + \rho(T, \alpha)} \quad (3-39)$$

(3) 覆盖率随着用户分布的方差的增大而减少，当表示用户分散程度的用户分布的方差趋于无穷大的情况下，小区的覆盖率将近似等于在小区中用户服从随机分布的情况的覆盖率。如式 (3-40)：

$$\lim_{\sigma \rightarrow \infty} p_c(T, \lambda_s, \alpha, \sigma) = \frac{1}{1 + \rho(T, \alpha)} \quad (3-40)$$

覆盖率是评定无线网络性能的一个重要的概念，并且根据覆盖率，可以很容易的得到有能达到给定的速率要求在整个区域中的所有用户的占比。同时该物理量也是单位区域上信干噪比的概率分布函数的补函数。

3.2.3 小区中用户的单位面积频谱效率

考虑到不同区域上的频谱效率相差可能非常悬殊，因此在密集热点的网络环境下，频谱效率将不能够完全反映整个区域的无线网络的性能，取而代之的是单位面积谱效率这一物理量，其定义为在单位面积上的频谱效率，其数学表达式为：

$$\eta_{ASE} = C / (B \cdot S) = \lambda_s \mathbb{E}[\log_2(1 + \text{SINR})] \quad (3-41)$$

求取的方法和覆盖率的求取方法基本相同。根据公式：

$$\mathbb{E}(X) = \int_{t>0} \mathbb{P}(X > t) dt \quad (3-42)$$

将式 (3-41) 中的均值用式 (3-42) 进行替换，得到公式 (3-43)：

$$\begin{aligned} \eta_{ASE} &= \lambda_s \int_{t>0} \mathbb{P}[\log_2(1 + \text{SINR}) > t] dt \\ &= \lambda_s \int_{t>0} \mathbb{P}[\text{SINR} > 2^t - 1] dt \\ &= \lambda_s \int_{t>0} p_c(2^t - 1, \lambda_s, \alpha, \sigma) dt \end{aligned} \quad (3-43)$$

带入公式 (3-38)，即可得到定理 3.2：

定理 3.2 在二维的自由空间中，微基站的部署是泊松点过程 Φ ，微基站的密度为 λ_s ，

基站的个数为 n 。用户的分布服从以其所围绕的基站的坐标为均值， σ^2 为方差的二维高斯分布。用户选择距离其最近的基站作为服务基站，其他的基站作为干扰基站。则网络的单位面积频谱效率 η_{ASE} 为：

$$\eta_{ASE} = \lambda_s \int_{t>0} \frac{1}{1 + \rho(2^t - 1, \alpha)} + \frac{\rho(2^t - 1, \alpha)}{1 + \rho(2^t - 1, \alpha)} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2\lambda_s(1 + \rho(2^t - 1, \alpha)) + 1} dt \quad (3-44)$$

可以看出，随着方差逐渐增大，场景的区域面积谱效率越来越接近均匀分布的场景。在热点场景下，区域面积谱效率首先随着基站密度的增加迅速增加，之后随着基站密度的增加区域面积谱效率呈现线性的增加。

3.3 密集热点区域无线网络性能的仿真分析

基于前两节的阐述和分析，这一节对密集热点区域无线网络的系统性能应用 Python3.5 进行仿真分析，对第二小节得到的结果给出理论曲线和仿真曲线，对性能分析的结果进行验证与定性定量的分析。具体的仿真参数如表 3-1 所示。

表 3-1 密集热点区域无线网络的仿真参数设定

参量	设置
基站的分布	泊松点过程
用户的分布	混合二维高斯分布
区域的大小	100m × 100m
微基站的天线数	1
基站的发射功率	1 W
用户的天线数	1
上行/下行	下行
服务基站的选择方式	就近原则
是否有联合传输	否
SINR	-10 ~ 20 dB

3.3.1 对网络遍历容量性能的仿真分析

由于用户的接收信干噪比是一个和用户在网络中的位置和用户与基站建立的信道链路的信道系数有关系，下面针对泊松点过程的基站，对基站中的每个位置的遍历容量进行定性的分析，附加的仿真参数如表 3-2 所示：

表 3-2 网络中的遍历容量的仿真参数设定

参量	设置
基站的个数 n	100
基站的密度 λ_s	$0.01/\text{m}^2$
信道衰落系数 α	2, 4

根据公式 (3-11)，在干扰受限信道的情况下，用户的接收信干噪比近似等于用户的接收信干比，接收信干比与信道的衰减系数 α ，用户距离服务基站和干扰基站的距离，链路的信道系数共同决定。由于场景为平稳的瑞利信道，因此可以通过遍历容量去反映在网络中的不同位置上用户的信干噪比性能。在区域内，各个位置的遍历容量示意图如图 3.3.1 所示。给定了泊松点过程的一次实现，既可以确定网

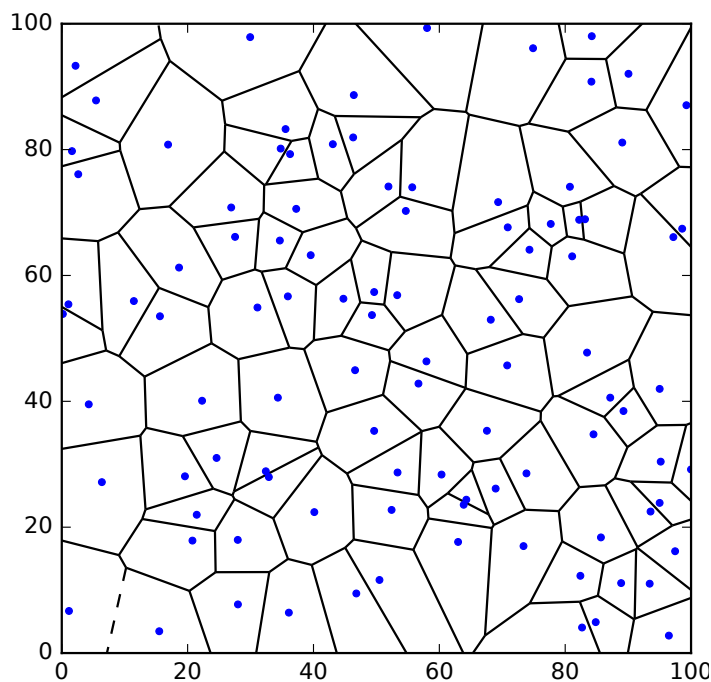
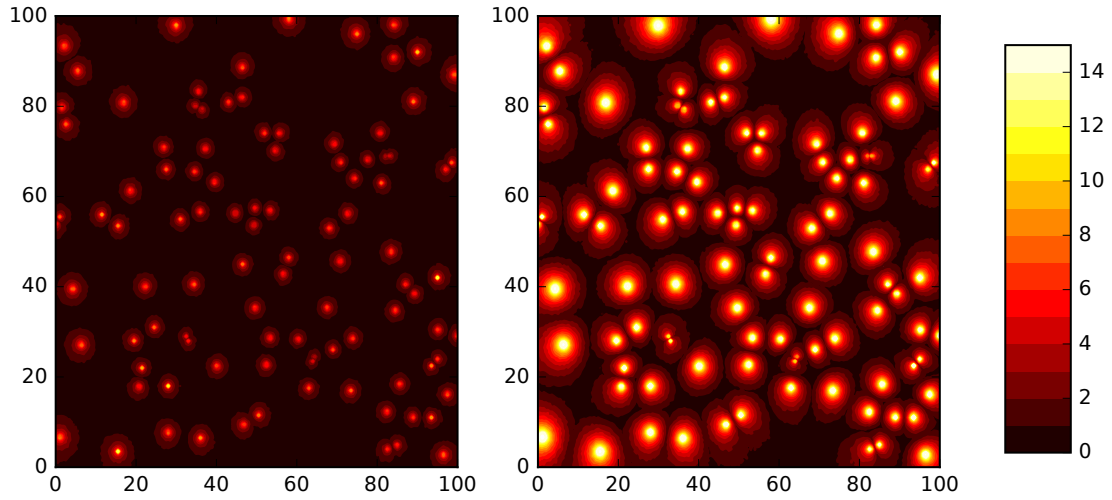


图 3-3 网络的拓扑示意图

络的遍历容量，遍历容量的表达式如 (2-3)。网络的遍历容量的示意图如图 3-5 所示。图 3-5 显示了当 $\alpha = 2$ 和当 $\alpha = 4$ 的情况下，网络中各个位置的遍历容量，其中遍历容量是一个与网络中的接收信干噪比直接有关的一个量。因此也可以大体上反应区域内接收信噪比的分布，接收信噪比和网络中不同位置的遍历容量共同反应了网络的有效性。信道的衰减系数 α 反应了网络的大尺度衰减的效果的强弱，仿真所选取的 α 是两个典型值，当 $\alpha = 2$ 时，反应了自由空间中的网络的情况，当 $\alpha = 4$ 时，反应了在城市环境中的网络的大尺度衰减的效果。 α 越大，随着


 图 3-4 网络中每个位置的遍历容量示意图: (左) $\alpha = 2$ (右) $\alpha = 4$

用户距离基站的距离逐渐边缘，用户的接收功率下降越快。导致了用户的接收到的有用信号的功率是降低的，但是与此同时，由于 α 的增大也使得用户接收到干扰基站功率也会变小，因此，给定了用户的位置，用户的遍历容量随着信道衰减系数 α 的变化需要做进一步的讨论。

从图 3-5 中可以很清楚的看出，在 $\alpha = 4$ 的情况下的网络中的遍历容量是好于在 $\alpha = 2$ 的情况下网络的遍历容量的。这也说明了信道系数 α 对干扰功率的影响大于对接收功率的影响，导致了随着 α 的增大，网络的遍历容量性能更好。在 $\alpha = 2$ 的情况下，区域内的遍历容量 $C_{Rayleigh} < 2 \text{ bps/Hz}$ 占区域面积的 50% 以上，而当 $\alpha = 4$ 时，区域内的遍历容量 $C_{Rayleigh} < 2 \text{ bps/Hz}$ 占整个区域的面积大于 50%，且处在大多数的微基站的中心区域的用户的遍历容量大于 $C_{Rayleigh} > 14 \text{ bps/Hz}$ 。

3.3.2 对网络覆盖率性能的仿真分析

本小节将对网络的覆盖率性能进行仿真分析，根据定理 3.1 得到了网络中的覆盖率的表达式，其中式 (3-34) 为准确的表达式，(3-38) 为近似的表达式。从表达式中我们可以看出，可以看到，该场景下的区域覆盖率主要与微基站用户分布的方差，基站的密度，信道的路径损耗因数有关系。下面将分别针对不同的微基站的密度，不同的路径损耗因数，用户分布的不均匀程度分别对网络的覆盖率性能进行分析。

(1) 不同的信道衰减系数对网络的覆盖率性能的影响根据式 (3-34) 和式 (3-38)，随着小区的信道衰减系数的增加，覆盖率逐渐增加。对不同的微基站的密度对网络的覆盖率性能的影响的仿真参数如表 3-3 所示：

表 3-3 衰减系数对覆盖率性能影响的仿真参数

参量	设置
基站的个数 n	100
基站的密度 λ_s	$0.01/\text{m}^2$
信道衰落系数 α	2, 4
用户的分散程度 σ	5.0 m
仿真点数	10^4

对公式 (3-38) 进行数值分析, 给出数值曲线。并对如表中给出的参数所构成的网络进行蒙特卡洛仿真, 得到区域中网络的仿真曲线, 将得到的结果作比较, 对不同信道衰减系数下的网络的覆盖率性能进行了比较。曲线图如图 3.3.2 所示:

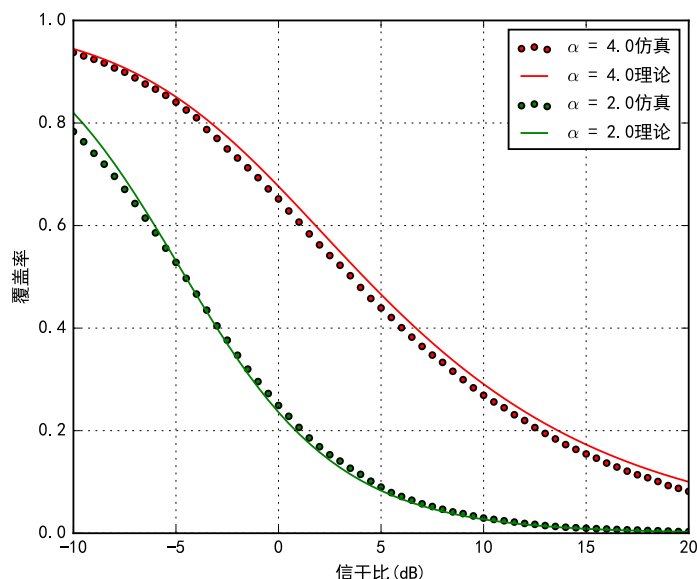


图 3-5 不同衰减系数下的网络覆盖率性能的比较

从图中可以看出, 推导出的覆盖率的近似表达式, 与网络通过仿真得到的覆盖率的情况吻合较好。这验证了推导出的结果的正确性。也可以看到, 由于随着信道的衰减系数的增加, 信道衰减系数对干扰的影响相较于对接收有用信号功率的影响更明显, 因此随着信道的衰减系数的增加, 网络的覆盖率的性能逐渐的变好, 这与推导出的覆盖率的公式所反应出的性质是一致的。这也表明, 在城市区域内, 由于衰减系数较大, 增加网络的密集度以换取高的网络的性能的可行性。

(2) 不同的微基站的密度对网络的覆盖率性能的影响

根据式 (3-34) 和式 (3-38), 随着小区的微基站的密度的增加, 覆盖率逐渐降低, 随着基站密度的增加, 基站的密度对覆盖率的影响将越来越小。对不同的微基站

的密度对网络的覆盖率性能的影响的仿真参数如表 3-4 所示：

表 3-4 信道衰减系数对覆盖率性能的影响的仿真参数

参量	设置
基站的个数 n	25, 50, 100
基站的密度 λ_s	$0.0025/\text{m}^2$, $0.005/\text{m}^2$, $0.01/\text{m}^2$
信道衰落系数 α	4
用户的分散程度 σ	5.0 m
仿真点数	10^4

对公式 (3-38) 进行数值分析，给出数值曲线。并对如表中给出的参数所构成的网络进行蒙特卡洛仿真，得到区域中网络的仿真曲线，将得到的结果作比较。并且对不同基站密度下的网络的覆盖率性能进行了比较。曲线图如图 3-6 所示：从图

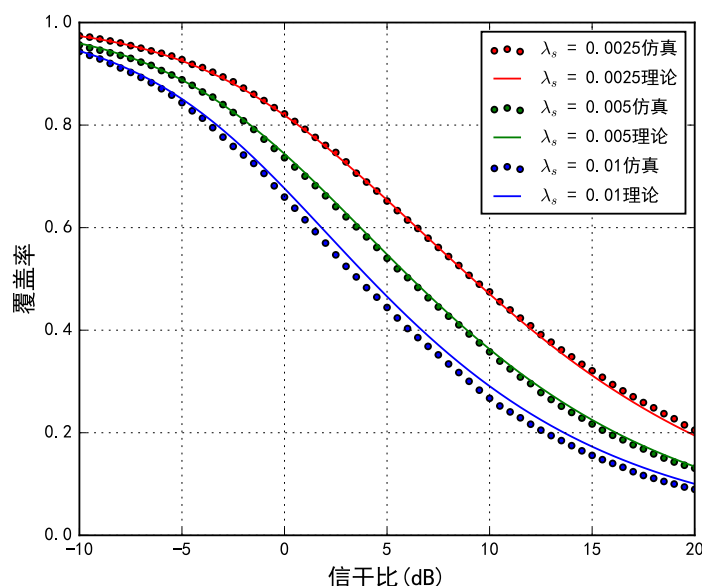


图 3-6 不同微基站密度下的网络覆盖率性能的比较

中可以看出，推导出的覆盖率的近似表达式，与网络实际的覆盖率的情况吻合较好，推导出的近似式是与真实情况很接近的上界，在图中也得到了体现。这验证了推导出的结果的正确性。也可以看到，由于随着微基站的密度的增加，处在边缘区域的用户的数量逐渐增多，因此随着微基站的密度的增加，网络的覆盖率的性能逐渐的变差。从图中可以看出，当基站的密度为 0.01m^{-2} 时，约有 66% 的用户的信干比超过 0dB，约有 44.5% 的用户的信干比超过 5dB。

通过图中的结果也可以说明，在不采用任何算法进行干扰管理的情况下，网络中的中断概率较高，网络的整体性能较差，不能满足超密集组网场景下的高接

入量，低终断概率的要求，因此在基站密度较高的情况下，需要采用干扰管理算法进行干扰协调。

(3) 不同的用户的离散程度对网络的覆盖率性能的影响

根据式 (3-34) 和式 (3-38)，随着微基站的用户的离散程度的增加，覆盖率逐渐降低，随着基站密度的增加，基站的密度对覆盖率的影响将越来越小。对不同的微基站的密度对网络的覆盖率性能的影响的仿真参数如表 3-5 所示：

表 3-5 用户离散程度对覆盖率性能的影响的仿真参数

参量	设置
基站的个数 n	100
基站的密度 λ_s	$0.01/\text{m}^2$
信道衰落系数 α	4
用户的分散程度 σ	5.0 m, 10.0 m, ∞
仿真点数	10^4

其中用户的分散程度为 ∞ 表示用户的分布服从均匀分布。

对公式 (3-38) 进行数值分析，给出数值曲线。并对如表中给出的参数所构成的网络进行蒙特卡洛仿真，得到区域中网络的仿真曲线，将得到的结果作比较。并且对不同用户的离散程度下的网络的覆盖率性能进行了比较，并且对当用户服从均匀分布的情况下的覆盖率的性能，以及仿真结果进行了比较。

曲线图如图 3-7 所示：

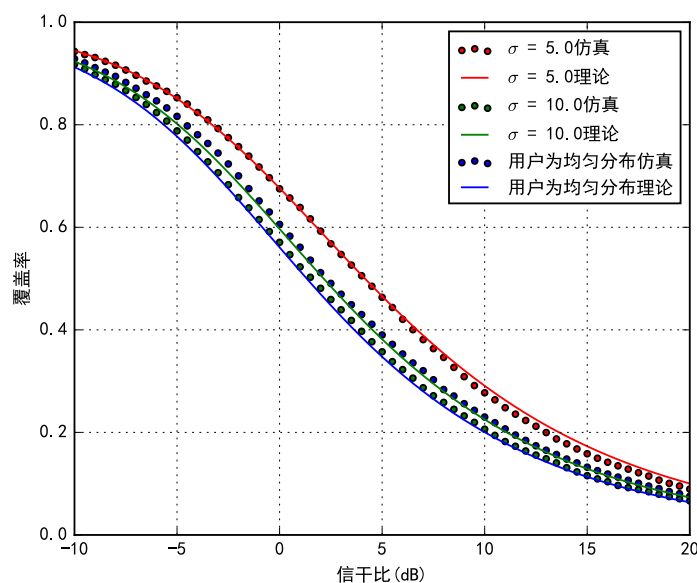


图 3-7 不同用户分散程度下的网络覆盖率性能的比较

可以看到，由于随着用户的分散程度增加，处在边缘区域的用户的数量逐渐增多，因此用户分散程度的增加，网络的覆盖率的性能逐渐的变差。并且从图中也可以看出，随着用户的分散程度的逐渐增加，网络的覆盖率的性能逐渐趋于均匀分布的情况。从图中可以看出，当用户的分散程度 $\sigma = 5.0$ 时，用户的信干比超过 0dB 的概率较均匀分布的情况高 10% 左右，用户的信干比超过 5dB 的概率较均匀分布的情况高 13% 左右。也可以看出，式 (3-38) 更好的反映出了用户在分布不均匀的情况下的覆盖率性能。由于微基站多布放在用户量大的热点区域，微基站也就是为了热点区域服务的，因此微基站附近的用户多于区域的其他位置是合理的。在这种情况下，式 (3-38) 得到的结果更能反应这种特性。

3.3.3 对网络的单位面积谱效率的数值分析

本小节考虑在不同的用户的分散程度的情况下，区域的单位面积谱效率随着微基站部署的密度的增加的变化情况，对其性能进行数值分析，式 (3-43) 为小区中单位面积频谱效率的表达式，可以看到单位面积频谱效率是一个与基站密度，小区中用户的发散程度都有关的量，小区中的单位面积频谱效率随小区微基站密度的变化曲线图如图 3-8 所示：

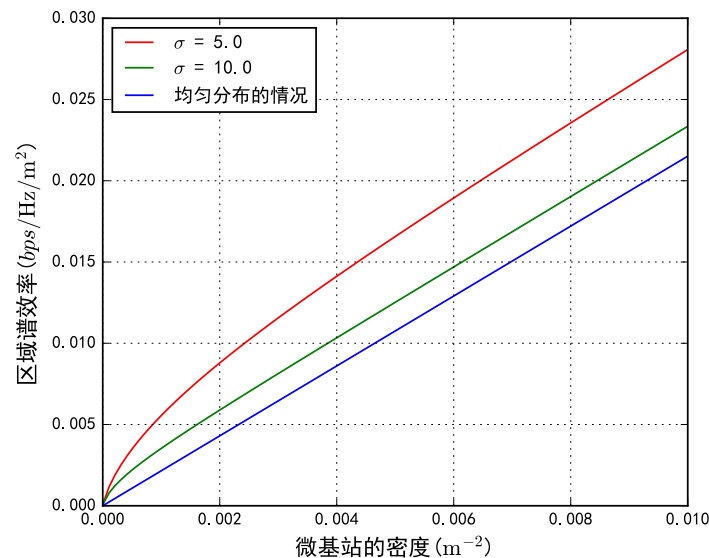


图 3-8 小区的单位面积谱效率与基站密度的关系

从图 3-8 中可以看出，小区网络的单位面积频谱效率随着微基站的密度的增加而逐渐的增加，增长速度逐渐降低最后趋于平稳，呈现随着微基站密度的增加而线性增加。区域面积频谱效率也和用户的发散程度有关系，发散程度越小，则单位面积频谱效率就越大，并且随着为基站密度的增长速度越晚的趋于平稳。这与

式 (3-43) 中所反映的性质是一致的。

3.4 本章小结

本章主要对密集热点区域无线网络的网络性能进行了分析。

首先，给出了密集热点区域无线网络的网络模型，给出了基于泊松点过程的基站网络拓扑结构。引入用户的发散程度 σ 来表示用户在区域中的不均匀性，更好的反应了热点区域相较于小区其他区域的用户量，容量需求量更大这一特点。

接着给出了小区中用户的接收信干噪比的表达式，对网络的覆盖率，单位面积频谱效率性能进行了理论分析。

最后，通过对小区的遍历容量，覆盖率和单位面积频谱效率进行了仿真，并验证了理论分析的正确性，对小区的性能进行了定性定量的分析，讨论了微基站的密度、小区中用户的分散程度、信道的衰落系数对网络性能的影响。

第4章 密集热点区域无线网络的优化

根据第三章的分析,在不采用任何干扰管理和协调算法的情况下,网络中能达到正常工作的信干噪比的用户占总共的用户量的百分比很低。从而导致了反应网络中所有用户有效性的平均的性能的单位面积谱效率也很低。因此需要设计一种干扰管理和协调算法提升网络的性能。

本章从两个角度进行分析,即将分两步进行干扰管理和协调,第一步对小区中的微基站进行分簇,从而达到边缘用户减少,第二步对每个簇中的基站采用 CRAN 网络架构进行联合,由于 CRAN 架构可以将不同微基站的基带信号传输至云化的 BBU 池进行统筹处理。在 BBU 池侧,可以采用联合传输预编码的方法将发送给不同用户的信息在空域上相互正交,从而达到干扰消除的目的。

4.1 密集热点区域无线网络的干扰管理算法的架构

根据图 3-5 显示的结果,在小区中心的用户,收到的干扰较小,遍历容量较好,能达到正常通信的遍历容量需求。小区边缘的用户的遍历容量较差,反应了小区边缘收到的干扰较为强烈,接收信干噪比较低,处于边缘的终端出现中断的概率很大,因此要想办法去让边缘用户的性能提升,从而降低网络的中断概率,提高网络覆盖率。

联合传输技术是伴随第四代移动通信 (4G) 提出的一个关键技术。其主要的思想是以用户为中心,将基站联合起来,进行协作,共同对用户进行服务。由于基站间相互联合共同服务区域内的用户用户,处在基站边缘的用户的干扰功率也能被用户利用成为有用的接收功率,从而使得边缘用户的有效性大大提升。联合传输的示意图如图 4-1 所示,在图中,网络由用于处理数字信号的 BBU 池,用户传输信号的微基站和前向回程链路组成。传送给用户的信息首先通过 BBU 池进行数据处理,在通过前向回程链路传输到基站端,由于采用了干扰消除算法,因此两个基站传送给用户的信息均为用户可以利用的有效信号,实现两个基站联合传输共同服务区域内的用户的目的。

在第三章中,定义了网络的网络中基站的拓扑结构,用户的统计特性,信道的基本模型。即在面积为 \mathcal{A} 的区域中,基站的分布 Φ 是一次泊松点过程的实现,其密度参数为 λ_s ,基站的个数为 n 个,用户在网络中的分布在微基站附近的分布更多,随着距离基站越来越远,用户出现的概率越小。假设用户服从以基站位置为均

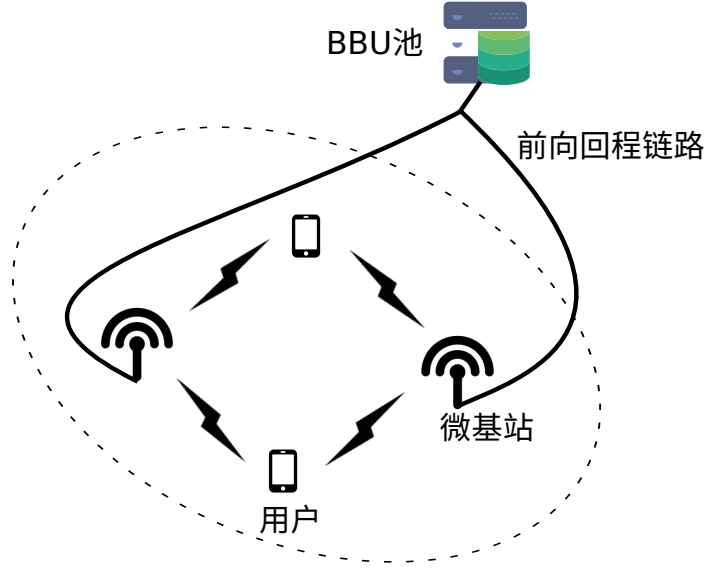


图 4-1 联合传输网络架构示意图

值的混合二维高斯分布，定义物理量 σ 表示用户的发散程度，量纲为米。其中 σ 表示混合二维高斯分布的标准差。在之前的分析中，由于没有采用多用户联合传输技术，因此所有基站的功率假设是等功率的，而采用了联合传输以后，可以对所有的基站进行统一的调度，因此网络可以进一步通过功率控制的方法进行优化。现假设基站 S_i 的最大发射功率为 P 。除此之外，本文采用的多用户联合传输中，为了进行干扰管理，采用预编码的技术进行干扰消除，预编码矩阵为 \mathbf{W} 。用户 U_j 接收到基站 S_i 的接收功率受到基站 S_i 的最大的发射功率 P ，预编码矩阵 \mathbf{W} ，描述信道的大尺度衰落的信道衰减系数 α ，描述瑞利信道的随机变量 h 决定。

假设采用 BPSK 调制方式，在小区中一共有 k 个用户 n 个基站，基站发射给用户的信息为 $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_k\}$ ，其中 $q_j \in \{1, -1\}$ 表示用户 U_j 想要接收到的信号。在进行预编码之前需要首先要确定每个用户所需要分配的功率。在进行功率分配后，待发射的信号 $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_k\} = \{p_1 q_1, p_2 q_2, \dots, p_j q_j, \dots, p_k q_k\}$ 。其中为 $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_k\}$ 为功率分配权重。因此用户 j 分配到的功率的值为 p_j^2

预编码矩阵为 $\mathbf{W} = \{w_{ij}\}_{n \times k}$ 。其中 w_{ij} 表示第 j 个用户所发送的信息在第 i 个基站所占的权值。则基站的发射信号向量 \mathbf{s} 可表示为：

$$\mathbf{s} = \mathbf{W}\mathbf{x} \quad (4-1)$$

其中 \mathbf{x} 为发射信号的向量， \mathbf{W} 为预编码矩阵，可将预编码矩阵 \mathbf{W} 表示为 $n \times 1$ 的分块矩阵 $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_k\}^T$ 。在联合传输的过程中，所有的基站共享用户的发

送信息和信道状态信息，以得到状态信息作为参数，得到的预编码矩阵，即可以对网络的有效性进行优化，通过预编码矩阵修改发送每个用户信息的权重，将加权后的信号交由基站进行发送。

基站发送的信号受到大尺度衰落和小尺度衰落的影响。定义系数矩阵 $\mathbf{G} = \{g_{ij}\}_{k \times n}$ ，其中 $g_{ij} \in \mathbb{R}$ ， $g_{ij} = h_{ij}R_{ij}^{-\alpha}$ ，其中 h_{ij} 和 R_{ij} 分别表示基站 S_i 和用户 U_j 之间的信道系数和距离。用户的接收信号向量 \mathbf{y} 为：

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{s} + \mathbf{z} \quad (4-2)$$

其中 \mathbf{G} 为信道的系数矩阵， $\mathbf{z} \in \mathbb{R}$ 为加性高斯白噪声，噪声的功率谱密度为 N_0 。

若采用基于 ZFBF 的多用户联合传输技术，则预编码矩阵 \mathbf{W} 为：

$$\mathbf{W} = \mathbf{G}^T(\mathbf{G}\mathbf{G}^T)^{-1} \quad (4-3)$$

其中 T 表示转置，即采用基于 ZFBF 的多用户联合传输技术的情况下，预编码矩阵为信道系数矩阵的广义逆。

将式 (4-1) 和式 (4-3) 带入到式 (4-2) 中，可以得到接收信号关于发送信号 \mathbf{x} 和噪声 \mathbf{z} 的表达式：

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (4-4)$$

由于干扰通过基于 ZFBF 的多用户联合传输技术已将消除了，因此用户的接收信干噪比与信噪比相同，用户 j 的信干噪比 γ_j 如式 (4-5) 所示：

$$\gamma_j = \frac{x_j^2}{N_0} = \frac{p_j^2}{N_0} \quad (4-5)$$

用户 U_j 的容量的表达式为：

$$R_j = \log_2(1 + \gamma_j) \quad (4-6)$$

若要提升网络的覆盖率，则需要让所有的用户都能达到较高的信噪比，则目标函数就会发生相应的变化，为了反应网络的覆盖率这一性能，需采用最大最小的目标函数，及最大化最小的用户的容量，每个基站均要满足功率约束条件，且为每个用户分配的功率的系数不能为负值。优化问题的表达式如式 (4-7) 所示：

$$\begin{aligned} & \max \min\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k\} \\ & s.t. \quad \begin{cases} 0 \leq (\mathbf{w}_i \mathbf{x})^2 \leq P, & j = 1, 2, 3, \dots, k, \\ p_j \geq 0, & j = 1, 2, 3, \dots, k. \end{cases} \end{aligned} \quad (4-7)$$

为了得到更高的单位面积频谱效率，需要让区域内的所有用户的容量的和达到最大值，但是每个基站的发送功率不能超过基站所能提供的功率的门限 P 。基于 ZFBF 的多用户联合传输技术，要得到最优的单位面积频谱效率，需要解决如下

的优化问题：

$$\begin{aligned} \max \quad & R = \sum_{j=1}^n \gamma_j \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} 0 \leq (\mathbf{w}_i \mathbf{x})^2 \leq P, & j = 1, 2, 3, \dots, k, \\ p_j \geq 0, & j = 1, 2, 3, \dots, k. \end{cases} \end{aligned} \quad (4-8)$$

联合传输可以统筹信道状态信息，用户的发送信息，可以采用多基站写作的方法对干扰进行抑制，达到提升网络性能的目的。不仅如此，由于基站可以通过一个中心控制器进行统一的调度，可以选取不同的目标函数，使网络的某些特定性能，如覆盖率，单位面积频谱效率达到最优，实现网络优化的目的。

虽然联合传输可以提升边缘用户的通信性能，提高覆盖率，提升网络的和速率，最大化单位面积频谱效率，但是联合传输技术并不能直接用于密集热点区域无线网络当中，在密集热点区域无线网络中，区域内的基站较为密集，基站的分布是不均匀的，且一般情况下数量较多，如果将区域内的所有基站全部都联合在一起，系统的复杂度很高，实现难度太大。

为改进联合传输技术，使其不但能增加使处在服务区域边缘的用户的传输可靠性，提升网络的性能，又能有较低的复杂度。本文提出的干扰管理算法分为两个步骤，首先，对小区中的微基站进行分簇，将簇内的基站整体作为协作集，共享信道的发送信息与信道状态信息。然后再对每个簇中的基站采用 CRAN 网络架构进行联合，对同一个簇中的用户采用联合传输策略，将簇内发送给各个用户的有用信号在空域上尽可能的正交，增强发送给用户的有用信号，抑制用户接收到的干扰，达到增加网络的覆盖率，提升网络的区域面积频谱效率的目的。网络的示意图如图 4-2 所示：在图中，将小区内的 5 个基站分成了三个簇，分别为簇 A，簇 B 和簇 C，当簇内含有多个基站时多用户联合传输的网络架构，通过云服务器对发送的信号进行集中的数字信号处理。对簇内采用干扰管理和协调算法，但不同簇的基站之间会产生簇间干扰。

4.2 密集热点区域无线网络的基站分簇

本小节对密集热点区域无线网络的基站的分簇算法进行研究，提出基于深度优先搜索的网络中微基站分簇算法。将距离相聚过近的基站进行联合，消除由基站过近导致的强烈的干扰，也避免由于基站之间相距过近而导致边缘用户较多的情况发生。

本节将深度优先搜索算法和 k - 均值算法应用到网络的分簇当中。下面分别介

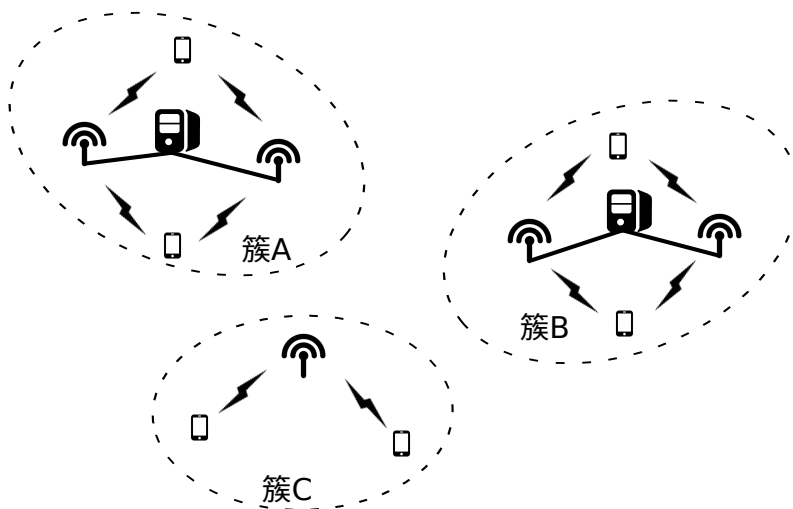


图 4-2 密集热点区域无线网络的干扰管理架构示意图

4.2.1 基于深度优先搜索的微基站分簇算法

根据图 3-5 所示，相邻的基站之间如果距离过近，则由于基站之间的干扰强烈，小区中用户的遍历容量性能，网络的覆盖率和单位面积频谱效率性能将会受到巨大的影响，除此之外，如果两个基站的距离过近，由于微基站服务的区域用户量需求大，容量要求高，因此两个基站之间会存在大量的边缘用户，从而极大的影响了系统的性能。

为了避免基站相聚过近而导致的基站之间的干扰强烈，边缘用户过多。本小节提出了基于深度优先搜索的基站分簇算法。深度优先搜索算法是计算机科学当中的基础算法，也是图论当中比较经典的算法之一。

下面介绍基于图的深度优先搜索的为基站分簇算法，为了应用按深度优先的搜索，首先需要在将网络中的基站拓扑映射成为一个图结构。给定区域 \mathcal{D} 中的所有基站 $\mathcal{S}(x, y) = \{S_1(x_1, y_1), S_2(x_2, y_2), \dots, S_i(x_i, y_i), \dots, S_n(x_n, y_n)\}$ ，其中 x, y 分别表示基站的横、纵坐标。对任意的 $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，基站 S_i 与基站 S_j 之间的距离为 R_{ij} ，根据微基站集合 \mathcal{S} 和基站之间的距离 R_{ij} ， $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 构造图 \mathcal{G} ，其中图 \mathcal{G} 的节点集合 $\mathcal{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n\}$ 为微基站集合 \mathcal{S} 的一一映射，即对任意给定的 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，存在映射关系 $S_i \rightarrow v_i$ 。图 \mathcal{G} 的所有边构成的集合 \mathcal{E} 根据微基站之间的距离是否小于门限 τ 决定，即对任意的 $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，若 $R_{ij} < \tau$ ，则存在边 $e_{ij} \in \mathcal{E}$ ，表示图 \mathcal{G} 中存在边 e_{ij} 将节点 v_i 和节点 v_j 连接。根据图 \mathcal{G} 的边集合 \mathcal{E} ，可以构造邻接矩阵 $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}_{n \times n}$ ，其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & e_{ij} \in \mathcal{E}, \\ 0, & e_{ij} \notin \mathcal{E}. \end{cases} \quad (4-9)$$

在 \mathcal{G} 中，定义两个节点 v_i 和 v_j 是连通的，则从定点 i 到定点 j 有路径相连。基于深度优先搜索的基站分簇算法将所有连通的节点划归为一簇，将图 \mathcal{G} 划归为由不同子图构成的不交并，由于图上的节点和微基站之间有一一映射的关系，属于同一个子图的节点相互连通。可将处在同一个子图上的节点对应的基站划分成为一个簇。即 $\mathcal{S} = \dot{\bigcup}_{i=1}^m \mathcal{C}_i$ ，表示将基站的集合 \mathcal{S} 分成了 m 个子集合，每个集合里的基站构成一簇。完整的描述如算法 4-1 所示：

算法的输入为距离门限 τ 和基站的坐标参数 $\mathcal{S}(x, y)$ ，算法分为四个步骤执行。

其中第一步为初始化步骤，将邻接矩阵 \mathbf{A} 初始化为 $\mathbf{0}_{n \times n}$ ，将网络中微基站簇的个数 c 设置为 0 个，微基站簇的集合 \mathcal{K} 设置为空集 \emptyset ，用于标识是否与微基站一一映射的节点是否访问过的向量 \mathbf{v} 设置为 $\mathbf{0}_{n \times 1}$ ，对应位置为 0 表示未被访问，为 1 表示已经被访问。

算法的第二步为构造邻接矩阵，对任意的基站 S_i 和 S_j ， $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，当基站之间的距离小于门限 τ ，则邻接矩阵对应的位置 $a_{ij} = a_{ji} = 1$ ，否则邻接矩阵对应的位置 $a_{ij} = a_{ji} = 0$ 。

算法的第三步为构造邻接矩阵的深度优先搜索的矩阵，深度优先搜索用于将与给定的节点 i 的所有连通的节点全部搜索出来，构成集合 \mathcal{C} 。首先将节点 i 对应的基站 S_i 放入集合 \mathcal{C} 中，并将向量 \mathbf{v} 中的第 i 位 v_i 置 1，接着采用递归的方法依次遍历所有除给定节点 i 以外的节点，如果存在节点 j 与给定节点 i 相连通且未被遍历，则将微基站 S_j 放入集合 \mathcal{C} 中，并将向量 \mathbf{v} 中的第 j 位 v_j 置 1，从节点 j 开始继续执行按深度搜索的遍历，直到所有与给定节点 i 连通的节点都被找到为止。通过深度优先搜索函数可以得到网络中的一簇基站。

算法的第四步应用第三步给出的深度优先搜索函数，从 1 到 n 依次开始遍历整张图，如果节点 i 未被分簇，通过函数找到与节点 i 连通的所有节点作为一簇。直到所有的节点均被分簇为止。

算法通过给定距离门限，将小于距离门限的所有基站连接在了一起。这些基站共同给所覆盖区域内的用户进行服务。从而极大的降低了边缘用户的数量，增大了用户所接收到的有用功率，减小了用户接收到的干扰。

但是，由于小区中基站的部署是泊松点过程，因此，小区中的基站的分布并不均匀，因此可能会出现某个协作集当中的基站过多，从而可能导致多用户簇内的多用户联合传输的复杂度过高。不仅如此，由于小区中的微基站采用了以基站为

中心的分簇方式。小区中的服务范围依然存在明显的边界，处在边界上的用户依然可能会受到比较严重的干扰。

4.2.2 基于 k - 均值的微基站分簇算法

呵呵呵呵呵呵呵呵

4.3 密集热点区域无线网络优化的性能分析

4.3.1 网络分簇算法的分析

在第三章，我们给出了网络仿真的网络示意图 3.3.1，对基于深度优先搜索算法的基站分簇算法得到的分簇结果进行仿真，方针参数如表 4-1 所示：

选取的区域的大小为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的正方形的区域，正方形的区域中的基站的部署为泊松点过程，密度参数为 $\lambda_s = 0.01\text{m}^{-2}$ 。对生成的这片区域采用基于深度优先搜索的分簇算法，得到的网络示意图如图 4-3 所示：

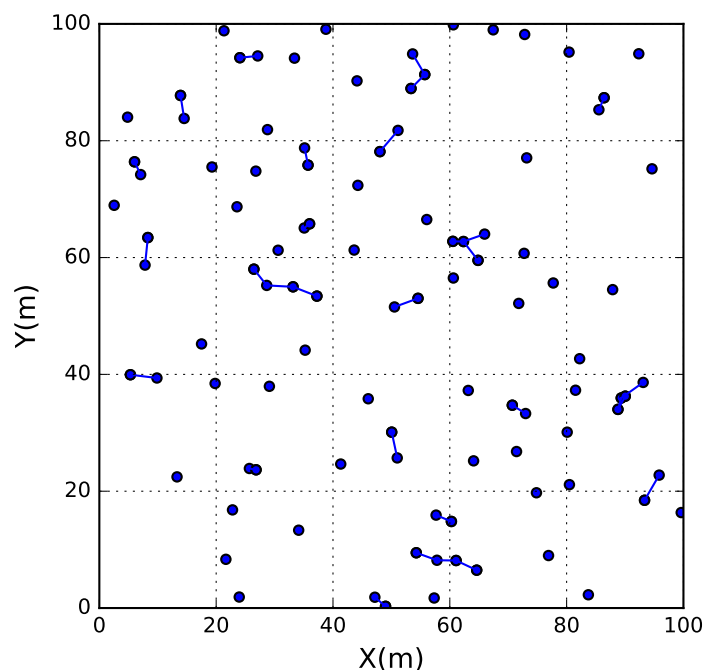


图 4-3 基于深度优先搜索的分簇算法的效果图

其中的蓝色的点表示微基站，如果微基站的节点之间有一条边相连，则两个基站同属于一个簇。可以看到，当两个基站的距离 $R_{i,j} < 5$ 时，基站就会被连接在一起，共同的归于一个簇。验证了算法的正确性。由于密集热点区域的用户具有集

中性，因此当两个基站之间的距离过远时，处在边缘的用户更少。除此之外，基站之间的距离较远，所服务的用户距离干扰基站的距离更远，有效的避免了基站相聚过近的干扰，以及处在边缘的用户数量过多对性能的影响。

算法 4-1 基于深度优先搜索的基站分簇算法

Input: τ ; $S(x, y)$

Output: \mathcal{K}

begin

 第一步：初始化

$\mathbf{A} = \{a_{ij}\}_{n \times n} = \{0\}_{n \times n}$; $c = 0$; $\mathcal{K} = \emptyset$; $\mathbf{v} = \{v_i\}_n = \{0\}_n$

 第二步：构造邻接矩阵 \mathbf{A} :

for $i = 1$ to n **do**

for $j = 1$ to n **do**

$a_{ij} = (\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} < \tau)$

end

end

 第三步：构造深度优先搜索函数：

Function $DFS(node\ i, C_c)$

for $j = 1$ to $n, j \neq i$ **do**

if $v_j == 0$ and $a_{ij} == 1$ **then**

$v_j = 1$

$C_c = C_c \cup \{S_j\}$

$DFS(i, C_c)$

end

end

end

 第四步：基于深度优先搜索的基站分簇 **for** $i = 1$ to n **do**

if $v_i == 0$ **then**

$c++ = 1$

$C_c = \{S_i\}$

$v_i = 1$

$DFS(i, C_c)$

$\mathcal{K} = \mathcal{K} \cup \{C_c\}$

end

end

end

表 4-1 基于深度优先搜索的分簇算法的仿真参数

参量	设置
基站的分布 Φ	泊松点过程
泊松点过程的密度参数 λ_s	0.01 m^{-2}
区域的大小	$100\text{m} \times 100\text{m}$
基站的个数 n	100
深度搜索的距离门限 τ 设定	5m

结 论

本文首先给出了不同信道环境不同调制方式下的 Shannon 限，从理论上说明了编码在不同信道下误码率性能有差异的原因；其次，将 LDPC 码与 MIMO 系统相结合，提出一种基于 LDPC 码的 MIMO 分集系统，并且利用 LDPC 码信息位与校验位的对应关系，提出一种基于信号处理和信息传递的软译码算法；最后分别对时间选择性衰落信道、频率选择性衰落信道和时频双选信道下的系统性能进行了仿真分析。具体分为如下几个方面：

(1) 给出了高斯信道、非频选快衰落信道和非频选慢衰落信道下，不同调制方式的信道容量和 Shannon 限。对于高斯信道，本文给出了适用于不同调制方式的信道容量通用表达式，并且给出了常见的几种调制方式（PAM、PSK、QAM 和 正交信号调制）的信道容量和 Shannon 限。在非频选快衰落信道中，本文假设接收机完全已知信道状态信息，给出了不同调制方式的信道容量和 Shannon 限。针对非频选慢衰落信道，借鉴中断概率的概念和计算方法，对非频选慢衰落信道建立了数学模型，将信道容量分为连续和离散两部分，并对其容量和 Shannon 限进行了推导和计算。结果表明，在调制方式和信噪比相同的前提下，高斯信道的容量最大，快衰落信道次之，慢衰落信道最小；在调制方式和码速率相同的前提下，高斯信道 Shannon 限最小，快衰落信道 Shannon 限次之，慢衰落信道 Shannon 限最大。也就是说要想达到无误传输，高斯信道所需要的信噪比最小，而慢衰落信道需要的最大，这也从理论上说明了信道编码在慢衰落信道中误码率性能差的原因；在时间选择性衰落信道中，衰落系数变化越快，信道容量越大，Shannon 限越小，从侧面证明了交织在信道编码系统中是非常有效的提高可靠性的手段。

(2) 提出一种基于 LDPC 码的 MIMO 分集系统。分别考虑时间选择性衰落信道和频率选择性衰落信道，以时间分集 $L = 2$ 、 $L = 3$ 和空间分集 2×2 MIMO 为例，对基于 LDPC 码的 MIMO 分集系统的原理和实现方案进行了详细介绍，由于本文使用的是码速率为 $1/2$ 的 LDPC 码，因此，与传统分集系统相比，传输效率完全一样，但是误码率性能有很大的提升；此外，给出了不同信道下，不同分集系统中 LDPC 码的 LLR 计算方法。仿真结果表明，在时间选择性衰落信道下，随着信道衰落速度的增加，本文提出的分集系统误码率性能越来越好，且性能优于传统分集系统，同时随着信噪比的增加，误码率下降速度加快；在频率选择性衰落信道下，当信噪比较大时，本文提出的分集系统误码率性能明显好于传统分集系统，且

随着信噪比的增加性能增益越来越大；在时频双选信道下，本文提出的分集系统具有更优异的误码率性能。

(3) 提出一种基于信号处理和信息传递的软译码算法。由于本文使用的是码速率为 $1/2$ 的 LDPC 码，其信息位和校验位的长度相同，存在唯一映射关系，考虑这一对应关系和不同信道之间相互独立的特性，提出一种基于信号处理和信息传递的软译码算法，这一软译码算法将信息位和校验位之间的关系看作是 SPC 码，仿照 SPC 码之间的信息传递过程，对 LDPC 码信息位和校验位的 LLR 进行了合并和修正。仿真结果表明，在时间选择性衰落信道下、频率选择性衰落信道和时频双选衰落信道下，与直接计算 LLR 译码相比，这一软译码算法都可以有效降低系统误码率。

本文还存在一些问题尚未解决。比如在时间分集 $L > 2$ 时，实际上可以根据分集增益的大小，来设计码速率为 $1/N$ 的 LDPC 码，还可以采用与 Turbo 码级联的方式。这些问题可以作为后续研究的方向。

参考文献

- [1] Hu W C, Huang N H, Chiueh T D. Software Defined Radio Implementation of an LTE Downlink Transceiver for Ultra Dense Networks[J]. 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2018:1-5.
- [2] Sadr S, Adve R S. Partially-Distributed Resource Allocation in Small-Cell Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12):6851-6862.
- [3] Du J, Gelenbe E, Jiang C, et al. Contract Design for Traffic Offloading and Resource Allocation in Heterogeneous Ultra-Dense Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(11):2457-2467.
- [4] Andrews J G, Baccelli F, Ganti R K. A Tractable Approach to Coverage and Rate in Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(11):3122-3134.
- [5] Sokun H U, Bedeer E, Gohary R H, et al. Optimization of Discrete Power and Resource Block Allocation for Achieving Maximum Energy Efficiency in OFDMA Networks[J]. IEEE Access, 2017, 5:8648-8658.
- [6] 张洪. 超密集组网中区域频谱效率及区域能量效率的研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] D. Stoyan W K, Mecke J. Stochastic Geometry and Its Applications[J]. John Wiley and Sons, 1996.
- [8] Chandrasekhar V, Andrews J G, Muharemovic T, et al. Power control in two-tier femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(8):4316-4328.
- [9] Li C, Zhang J, Letaief K B. Throughput and Energy Efficiency Analysis of Small Cell Networks with Multi-Antenna Base Stations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5):2505-2517.
- [10] Li C, Zhang J, Haenggi M, et al. User-Centric Inter-cell Interference Nulling for Downlink Small Cell Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(4):1419-1431.

- [11] Ding J, Yu R, Zhang Y, et al. Service provider competition and cooperation in cloud-based software defined wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(11):134-140.
- [12] Pan C, Zhu H, Gomes N J, et al. Joint User Selection and Energy Minimization for Ultra-Dense Multi-channel C-RAN With Incomplete CSI[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(8):1809-1824.
- [13] Stephen R G, Zhang R. Millimeter-Wave CRAN with Lens Antenna Arrays[J]. 2017:1-6.
- [14] Huawei. Soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE[J]. 2005:1-3.
- [15] Xue Y, Tian Y, Yang C. Distributed precoding in ultra-dense network with dynamic user access[J]. 2016:1-6.
- [16] Kurras M, Shehata M, Hassan K, et al. Spatial interference management with hierarchical precoding in ultra-dense heterogeneous networks[J]. 2015:520-526.
- [17] Thiele L, Kurras M. Hierarchical precoding for ultra-dense heterogeneous networks[J]. 2014:1286-1290.
- [18] Zhang Y, Bi S, Zhang Y J A. User-Centric Joint Transmission in Virtual-Cell-Based Ultra-Dense Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5):4640-4644.
- [19] Chen Y H, Chao H L, Wu S H, et al. Resource allocation with CoMP transmission in ultra dense cloud-based LTE small cell networks[J]. 2017:1-5.
- [20] Liu Y, Li X, Yu F R, et al. Grouping and Cooperating Among Access Points in User-Centric Ultra-Dense Networks With Non-Orthogonal Multiple Access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10):2295-2311.
- [21] IMT-2020(5G) 推进组. 5G 愿景与需求白皮书 [J]. <http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/listByQuery>, 2015.
- [22] Yu Q, Wang J, Yang X, et al. Inter-operator interference coordination for co-primary spectrum sharing in UDN[J]. China Communications, 2015, 12(Supplement):104-112.
- [23] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(4):623-656.

攻读硕士学位期间发表的论文及其他成果

(一) 发表的学术论文

- [1] Cao Fengfeng, Yu Qiyue, Xiang Wei, Meng Weixiao. BER Analysis of Physical-Layer Network Coding in the AWGN Channel with Burst Pulses[J]. IEEE Access, 2016, 4:9958-9968. (SCI 收录, IDS 号为 EU6IN, IF=1.270)
- [2] 曹凤凤, 智小楠, 于启月. 基于 MFSK 的物理层网络编码在衰落信道中的性能分析 [J]. 中国科技论文在线, 2016.
- [3] 何东杰, 曹凤凤, 于启月. 多址接入信道容量边界的理论分析 [J]. 中国科技论文在线, 2016.

(二) 申请及已获得的专利

- [1] 于启月, 曹凤凤, 蔺泓如, 何东杰, 周永康, 孟维晓. 一种基于 LDPC 码的 MIMO 传输分集方法: 中国, 201710457361.2[P]. 2015-06-16.
- [2] 于启月, 宋天鸣, 曹凤凤, 孟维晓, 何东杰. 物理层网络编码同步方法: 中国, 201510823133.3[P]. 2015-11-23.

(三) 参与的科研项目及获奖情况

- [1] 参与国家自然科学基金《基于近世代数的 SCMA 多维码本设计及其宽带无线传输理论》(项目编号: 61671171)
- [2] 参与国家自然科学基金《联合数据区分编码理论的有记忆物理层网络编码方法》(项目编号: 61201148)

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明及使用授权说明

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《基于 LDPC 码的 MIMO 分集系统的理论研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

(1) 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；(2) 学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；(3) 研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。

本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

致 谢

写到致谢，才真真切切的感受到学生生涯的结束，提笔沉思，六年象牙塔生活就像电影画面一样扑面而来，猝不及防间就到了谢幕的今天。

首先，衷心感谢我的导师于启月老师，于老师亦师亦友亦家人。在学术上，于老师态度严谨，学识广博，在三年间对我悉心指导，迷茫时为我指路，消沉时给我鼓励；在生活上，于老师像亲密无间的朋友，也像无微不至的家人，一直关心并照顾着我，还教会我许多做人的道理，这些我都将受用一生。

感谢通信所孟维晓老师和韩帅老师，两位老师严于律己，宽以待人，学术方面眼界宽广，思想前瞻，给了我很多宝贵的意见，而且两位老师乐观的生活态度也值得我学习。

感谢秋香之家的所有人。感谢各位师兄师姐对我的指导，愚笨如我，这三年也取得了一些成就；感谢李亚添师兄，在我本科期间为我答疑解惑；感谢同届同学对我的包容、肯定和鼓励；感谢师弟、师妹，认识你们倍感荣幸；特别感谢何东杰，三年并肩作战，为人善良正直，积极乐观，对我帮助很大。

感谢我最亲爱的室友贾彤、谭璐、宋晨希。六年来我们相依相伴，快乐时相互分享，困难时相互帮助，一起上过的自习、熬过的夜、吃过的美食、看过的书、追过的剧都将是我们的美好回忆。

感谢我的家人。感谢你们对我的培养和教育，你们是我最大的心理依靠，无论我身在何方你们都是我最大的牵挂，希望你们幸福安康。感谢我的男朋友田斯，学习上帮助我，生活上照顾我，余生请多指教。

最后，感谢参与我毕业论文评审和答辩的各位老师，为我提出宝贵的建议和意见。