

华北电力大学

专业硕士学位论文

异构无线网络中基站分簇方法研究

**Research on Clustering Method for Base Station in
Heterogeneous Wireless Networks**

丁莎莎

2015 年 12 月

国内图书分类号：TN929.5

学校代码：10079

国际图书分类号：621.3

密级：公开

专业硕士学位论文

异构无线网络中基站分簇方法研究

硕 士 研 究 生：丁莎莎

导 师：余萍

申 请 学 位：工程硕士

专 业 领 域：电子与通信工程

培 养 方 式：全日制

所 在 学 院：电气与电子工程学院

答 辩 日 期：2016 年 3 月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TN929.5

U.D.C: 621.39

Thesis for the Master Degree

**Research on Clustering Method for Base Station in
Heterogeneous Wireless Networks**

Candidate:	Ding Shasha
Supervisor:	Yu Ping
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	March, 2016
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《异构无线网络中基站分簇方法研究》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士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

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《异构无线网络中基站分簇方法研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以下相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

为不断满足 IMT-A 规定的关于 4G 性能指标,第三代伙伴项目(3rd Generation Partnership Project,3GPP)在 LTE 的基础上,启动了 LTE-A(LTE-Advanced)的研究。通过在 LTE-A 中引入一系列的关键技术,旨在实现最大带宽可达 100MHz,上下行速率均突破 1Gbps 的目标。其中的异构网络(Heterogeneous Networks,HetNet)技术、多点协作(Collaboration Multi-Point,CoMP)传输技术、MIMO(Multiple Input Multiple Output)等相关技术的引入,为用户带来了更好的体验和更高的系统吞吐量。但是在移动通信技术不断发展的过程中,小区间干扰一直是需要解决的关键问题,尤其目前异构网络的组网结构,会随着更多站点的加入带来更大的小区间干扰(inter-cell interference,ICI)和更频繁的小区切换。协作多点传输技术的引入为解决上述问题开启新的思路,该技术通过干扰利用的思想,把干扰信号转变为有效信号,提高边缘用户的传输速率,进而提高系统整体的吞吐量。

本文针对异构网络多小区下行链路进行研究,建立了基于位置坐标的异构网络仿真模型;并在此模型的基础上,提出了基于阈值的基站分簇方法和分步基站分簇方法;以此把系统中的小区分为一系列的小区簇,处于这些簇内的基站共同为用户传输有效信号。基于阈值的基站分簇方法综合考虑系统中基站个数、目标用户所处小区的信号强度、系统中其它基站的干扰情况等影响因素,设置基站选择阈值来确定可以协作的基站;分步基站分簇通过缩小用户选择范围,运用先整体后局部的思路进行基站分簇,首先依据期望用户受到的除主服务基站之外的其余基站的信号干扰强度,确定待分簇基站集合;然后根据期望用户接收到待选集合中各个基站的信号强度,确定最终参与协作的基站集合。仿真结果表明,通过最大化接收端传输速率为性能指标,本文提出的基站分簇方案在异构网络组网结构中,使边缘用户获得较高的传输性能。

关键词: 异构网络; 协作多点传输; 小区间干扰; 分簇; 信号强度阈值; 分步

Abstract

In order to meet the performance requirements of 4G,3GPP based on the LTE,LTE-Advanced was launched.By introducing a series of key technologies to achieve the target of maximum bandwidth of up to 100 MHz,and the rate breakthrough 1Gbps,and the application of heterogeneous network, collaboration multi-point transmission technology, MIMO technology will bring a better experience for users and higher system throughput.In the process of the development of mobile communication technology, the inter-cell interference is always the key problems needed to be solved, especially the network structure of the heterogeneous network, for the addition of more sites, will lead to greater inter-cell interference(ICI) and more frequent switching.The collaboration multi-point transmission technology gives a new way to the above problems, with the application of CoMP technology, which could change the interference signal into effective signal,then improve the edge of the user's transmission rate, and improve overall system throughput.

This paper research on the downlink transmission system in heterogeneous networks,The simulation model is established Based on the position coordinates in heterogeneous networks.And on the basis of this model,proposing clustering method of threshold and fractional step. To put in the system area is divided into a series of residential cluster, in these clusters base stations within the common effective signal transmission for the user.The clustering method based on threshold considering the effect factors of base station numbers, the base station signal intensity target user belongs to, and the system of interference,and then setting the threshold value , when the user receives the base station signal strength is higher than the threshold, then the base station was elected to the base station clustering.By reducing the user's selection range,the fractional step clustering method firstly analysis the signal interference of the rest of the base stations in addition to the main service stations of the desired user,and determine the collection for clustering base station;Then according to the signal intensity of each base station in the collection of the desired user received to determine the final participate collection of the collaborative base station.The simulation results show that the base station clustering scheme in the heterogeneous network structure, which makes the edge users obtain higher transmission performance.

Keywords: HetNet;CoMP;ICI;Clustering;Signal Intensity Threshold;Fractional Step

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 研究目的和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 静态基站分簇方法.....	3
1.2.2 动态基站分簇方法.....	3
1.3 论文研究的主要内容.....	4
1.3.1 论文的主要内容.....	4
1.3.2 章节安排.....	5
第 2 章 相关技术分析及系统模型研究.....	6
2.1 LTE-A 及关键技术.....	6
2.1.1 HetNet 异构网络.....	7
2.1.2 协作多点传输 CoMP 技术.....	9
2.1.3 MIMO 传输技术.....	12
2.2 无线信道.....	14
2.2.1 路径损耗.....	15
2.2.2 阴影衰落.....	15
2.2.3 多径衰落.....	16
2.3 多小区异构系统.....	16
2.3.1 多小区异构系统模型.....	16
2.3.2 多小区异构系统信干噪比计算模型.....	18
2.4 本章小结.....	20
第 3 章 阈值基站分簇方法.....	21
3.1 阈值基站分簇方法.....	21

3.1.1 分簇步骤.....	22
3.1.2 算法流程.....	24
3.2 仿真平台及仿真结果.....	25
3.2.1 仿真结果.....	25
3.2.2 阈值和协作基站个数对传输速率的影响.....	28
3.3 本章小结.....	30
第 4 章 分步法基站分簇方案.....	31
4.1 分步法基站分簇方法.....	31
4.1.1 系统数学模型.....	31
4.1.2 分步法分簇过程.....	32
4.2 系统性能仿真.....	34
4.3 本章小结.....	38
第 5 章 结论与展望.....	39
5.1 总结.....	39
5.2 展望.....	40
参考文献.....	42
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果.....	45
致谢.....	46

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的和意义

如今,世界通信技术突飞猛进,对人类生产、生活正产生着十分深刻的影响。尤其是移动通信技术的发展,在促进世界各国之间的交流、丰富世界人民的生活、生产方面发挥着重要作用,而且移动通信市场的全球化,满足了人们随时随地进行通信的需求。但是,频率资源的稀缺限制了需求不断增加的多样化数字业务的发展。为了应对高频谱利用率及数字多样化业务带来挑战,3GPP 于 2004 年 11 月提出了 LTE (Long Term Evolution, 长期演进技术) 概念,并在 2005 年 3 月,正式启动了 LTE 的标准化工作^[1]。目前,第四代移动通信系统(the 4 Generation mobile communication technology, 4G) 已经进入商用,然而目前商用 LTE 的下行速率并没有达到规定的低速移动下行速率超过 1Gbps、高速移动速率在 100Mbps 以上的目标要求。因此, LTE 发展到加强版的 R10 版本,也就是 LTE-A (LTE-Advanced)。通过在 LTE-A 中引入异构网络 HetNet, 协作多点 CoMP 传输技术, 载波聚合 (Carrier Aggregation, CA), 多输入多输出 (MIMO) 等关键技术, 将达到 IMT-A 关于 LTE 技术的最高上下行速率要求^[2]。LTE-A 技术也将在今后一段时间成为主流移动通信技术。未来移动通信将满足人们在工作、休闲、娱乐等各种场所的多样化业务需求, 不管是在室内, 还是在高铁、地铁、体育场、商场等高流量密集区域, 都将为用户提供无缝的、高速的极致业务体验^[3]。

由于低频段资源的匮乏, 未来无线通信系统将开发利用新的更高的频段 (5GHz 左右), 但是频段越高, 信号衰耗越严重, 若不增加基站发射功率, 那么小区覆盖面积将有较大幅度的缩小; 运营商若是部署更多的宏基站, 又将会增加建设成本, 还会带来更频繁的小区切换^[4]。因此, 需要一种能够分流宏基站流量、低成本的、简易布网的网络设备。异构网络应运而生, 它是通过在小区中部署大量的低功率基站实现信号的连续覆盖, 这种密集组网方式能缩短用户和基站之间的距离, 还能带来局部热点区域容量的显著提升以及更大的小区分裂增益, 进而提高整个网络的容量和边缘用户的信号接收质量, 同时还可以降低宏基站的发射功率, 异构网络将是移动通信系统网络结构的发展方向。

为了更好的节约频率资源, LTE-A 系统更多的是采用同频组网的方式, 通过在小区内采用正交频分多址复用 (OFDMA) 技术, 使各用户的子载波正交来消除小区内干扰^[2]。但是, 由于相邻小区之间的频率复用因子是 1, 造成小区之间严重的

小区间干扰，也就是共信道干扰（Co-Channel Interference, CCI）。尤其对于距离基站较远的边缘区域用户来说，接收到所处小区基站的有效信号很弱。相反，来自相邻小区的同频干扰造成用户接收信号质量下降，用户体验很差。尤其是在异构网络中，更多的小区意味着将会带来更多的小区间干扰。为提高边缘用户体验，考虑到强干扰主要来自周围基站，如果能与这些干扰强的基站进行协作，将干扰信号变为有用信号为边缘用户共同传输数据，将极大可能提高边缘用户的接收信干噪比^[5]。为此，在 LTE-A 系统中通过应用 CoMP 传输技术，来协作分布在不同地理位置的站点共同为边缘用户传输数据。协作多点传输技术就是联合多个小区的基站进行协作通信，通过减小相邻小区的干扰，提高用户端的接收信干噪比，进而提高系统的吞吐量及小区边缘用户的频谱效率；同时，还能减小由于小区面积减小带来的频繁小区切换问题。它的主要思想是多个基站通过光纤连接^[6]，通过协作的方式提高系统的性能。目前，对于多基站协同处理技术的研究工作更多的是处于理论探索阶段，但是多基站协同处理已是当前无线通信技术的研究热点问题，这其中，协同基站的分簇是实现多基站协作处理的前提和基础。因为协作基站之间共享信道状态信息和用户数据信息，若在整个系统进行协作通信，就会产生大量的信道、用户交互信息，造成很大的链路开销^[7]，尤其是在异构组网中，如何使宏站和宏站、宏站和微站、微站和微站之间协作成为目前需要研究的问题。本文正是在异构多小区系统中研究基站之间分簇方法来使这些小区簇之间进行协作，这样很大程度上避免了大量的信息交互情形。因此，探究如何选择多基站进行协作具有重要的理论和实际意义。

1.2 国内外研究现状

移动通信系统在网络规划和优化过程中，要使移动用户接收到优质的服务：通话清晰不掉线，下载、上传资源速度快，视频图像观看流畅等，尤其是需要解决处于基站覆盖盲点区中的用户服务问题和小区边缘部分的用户传输速率问题。为满足用户对服务质量的诉求，尤其是边缘用户的服务质量，移动通信系统的网络结构也正发生着巨大变化，小区由最初只有单类型基站构成的同构网络，向小区中存在多类型基站的异构网络结构发展。

目前，针对下行协作多点 CoMP 传输技术的协作基站分簇算法主要有两种方案：静态基站分簇形式^[7-10]和动态基站分簇^[11-26]形式。静态基站分簇方法^[7-10]是在网络规划初期进行基站簇的划分，根据地理分布位置相邻的基站划分为一簇。

静态分簇方案主要在网络规划前期进行小区的划分，分簇的数据是通过网络统计方式获得的；动态分簇方案是根据用户端反馈的信道状态信息情况进行动态分簇。

1.2.1 静态基站分簇方法

扇区位置法：该方法是比较常见的理论分析方法，该方法把小区划分成理想六边形形状，并通过扇区的划分，将地理位置相邻的多个扇区划分为一簇。在进行理论研究过程中该方法十分很简便，但是却脱离实际小区覆盖情况，六边形的小区结构过于简便，在目前异构网络组网不能进行小区分裂，且在分析过程中，形成的小区固定，时变性差。

选择因子法^[7]：该分簇方法是在同构六边形网络结构联合传输场景下进行分簇研究，同时分析了由于扇区分布使得信号强度分布不均，造成用户公平性差和造成协作增益较差的问题，对传统基于地理位置的静态分簇方法进行改进。并定义“簇选择因子”CSF(Cluster Choose Factor)，通过簇选择因子这一参数情况，决定可以参加协作的扇区，以此提高无线资源的利用率和用户的公平性，但是该方法对于多基站不同功率情况并没有进行分析。

定量分簇法^[8]：该方法是比较常用的静态分簇方法，并且不再基于工程师的实际经验，而是根据小区分簇过程中的影响因素进行分析，综合地貌和承载业务的相似度来进行簇划分，并且可以分别结合电子地图和网络统计得到相关的基础数据。该分簇方法充分考虑了网络发展中面临的地形地物环境以及业务发展状况。将小区承载条件和地物条件情况，将网络一定区域内具有相对较强相似度的小区归为一簇。该方法实施简单，但是当加入新的站址情况下，对数据的测量有很大影响，同时不适应用户实时变化的场景。

1.2.2 动态基站分簇方法

平均信干比增益法^[14]：动态基站分簇过程中，需要以提前获得的CSI情况为指导进行分簇，但是CSI获取过程中，由于噪声等的影响会使得CSI获取失败，那么这就会造成形成的簇结构不佳。平均信干比增益法是用基站协同的平均信干比增益来度量基站间协同程度，通过定义基站与系统中其它基站的协同度，来分析该基站加入协作簇后，此时的信道容量的大小，进而得到满足协同度的基站加入协作簇。该方法在理论分析过程中实现简单，易于测量，但是对涉及到的不同基站类型造成的影响并没有进行全面分析。

基站群利益树法^[15]：基站间相互合作会给双方带来信干噪比增益的提高，在利益树分簇方法中，通过引入协同度来表示基站间相互合作的愿望程度，并将分簇问题建模为有向带权连通图的利益树生成问题。并提升了分簇过程中的顺序性及单向性基站选择问题对形成的簇结构性能，但是该方法建立的模型较复杂，计算量较大，可能会对系统传输造成一定延时。

近邻传播分簇法^[16]: 协作的基站之间, 其地理位置间距较近, 因此对于任意基站, 与超过一定地理区域外的基站之间的协作可以忽略, 这样可以减少 CSI 的先验信息量, 进而在部分 CSI 条件下进行基站分簇。该方法依据近邻传播的思想, 首先需要系统中的基站提前知道一定地理区域内基站的 CSI, 通过近邻传播在系统中传播提前定义的基站之间的吸引度和归属感, 进而形成协作簇。该方法收敛快, 比较适用于蜂窝系统。但是, 随着异构网络的发展, 其组网结构不断向分层结构发展, 其在异构网中的适应程度和效率仍是需要进一步探究的问题。

路径损耗门限法^[26]: 分析功率分配时, 首先进行协作基站的选择。通过设置路径损耗门限来选择可以协作的基站。首先将路径损耗最小的基站作为主基站, 然后将目标用户到主服务基站和其余基站的路损差值与设置的门限值比较, 选择满足条件的基站进行协作。该方法计算简单, 且易实施。但只计算路径损耗对信号的衰减并不是很全面, 这也造成选择出的协作基站效果不佳。

综上所述, 静态分簇方法计算相对简单, 但没有考虑系统的 CSI 信息, 这样无法适应信道的时变特性, 造成频谱利用率不高。同时这种方式也不适和异构网络中每个小区有多种类型基站的异构网络结构; 动态基站分簇主要是通过用户端反馈的信道状态信息情况进行实时基站分簇的。动态分簇算法是需要提前获知信道信息 CSI 的。因此, 通过分析目前已有分簇方法的局限性和不足, 以及解决边缘用户体验效果差的问题, 提出了基于阈值的分簇方法和分步分簇方法来形成协作簇, 进而簇中基站共同向用户传输有效信号。

协作处理模型是协作分簇的基础, 目前这些基站分簇方法采用的协作基站分簇模型都是基于同构组网结构进行的, 并没有对目前异构小区中基站类型的不同造成的分簇性能进行分析, 针对目前多种类型基站共存的组网结构显得不足。随着异构网络在 LTE-A 中的应用发展, 在宏基站覆盖区域内又加入微基站。现有小区分析模型对于小区重叠区特性不能很好的描述, 造成分析结果效果并不是很好^[27-29]。为此, 针对异构网络结构基站不规则部署的特点, 提出了分层的网络结构模型。在分层结构的多基站模型中, 根据基站的发送功率, 基站密度, 小区内用户分布情况, 支持的数据传输速率不同等情况进行小区模型建立, 这能充分反应不同类型基站在网络中的部署情况, 使网络模型更接近实际的部署情况, 同时用户能够体验到覆盖无缝隙, 数据传输速率快, 灵活性好的多业务诉求^[30]。

1.3 论文研究的主要内容

1.3.1 论文的主要内容

论文主要研究了异构网络多小区下行系统基站分簇问题。针对目前异构网络

的组网结构，建立了适应异构网络特点的基于位置坐标的多基站、多小区异构网络模型。通过分析目前同构网络中基站分簇方法现状，结合提出的基于位置坐标的异构网络模型，在此模型基础上提出了基于阈值的基站分簇方法和分步基站分簇方法。在基于阈值的基站分簇方法中，通过与现有分簇方法进行分析对比，综合考虑系统中基站个数、用户所属主服务小区的基站信号强度、非所属小区的基站干扰大小等因素对系统中基站进行分簇。随后，根据提出的全局阈值基站分簇方法，通过缩小用户选择协作基站的范围，提出了分步基站分簇方法，最后对提出的两种分簇方法与已有分簇方法进行的性能仿真比较，仿真结果表明，论文提出的两种分簇方法能明显提高边缘用户的传输速率。

1.3.2 章节安排

第一章介绍了课题研究背景、意义以及国内外研究现状，从而为后面章节引出论文的主要研究内容作了铺垫。

第二章介绍本文中将要用到的相关技术和基于异构网络的多小区系统模型及对应的数学描述，并针对异构网络结构，建立了基于坐标位置的异构网络多小区系统模型。

第三章是基于建立的异构网络多小区模型，提出了阈值基站分簇方法，并与目前已有的方法进行了性能比较。阈值法以最大化接收端传输速率为目标，设置阈值时综合考虑了异构组网特点和对基站分簇过程中的影响因素，最后比较了不同分簇方法下的系统性能。

第四章在提出的阈值基站分簇方法指导下，提出了分步基站分簇方法。分步法中，考虑用户反馈的系统中各个基站的长期 CSI，将满足条件的基站存入待选基站集合，然后根据实时 CSI 信息，在该待选基站集合中选择满足条件的最终的与用户的主服务基站协作的基站，共同为用户传输有效数据。最后在建立的异构网络多小区模型中进行的性能仿真。

第五章是结束语，是对全文的总结和展望，该部分是对本文工作内容的回顾，同时提出了一些有待改进和需要进一步研究的问题。

第 2 章 相关技术分析及系统模型研究

在本章中对需要用到的 LTE-A 中的关键技术和无线信道进行研究，并针对异构网络的特点建立了基于位置坐标的多小区异构网络系统的拓扑结构模型。

2.1 LTE-A 及关键技术

LTE 网络结构主要包括：演进的分组核心网(Evolved Packet Core, EPC)和演进的无线接入网 E-UTRAN。3GPP 关于 LTE 的技术规范中^[31]，LTE 的网络结构如图 2-1 所示：

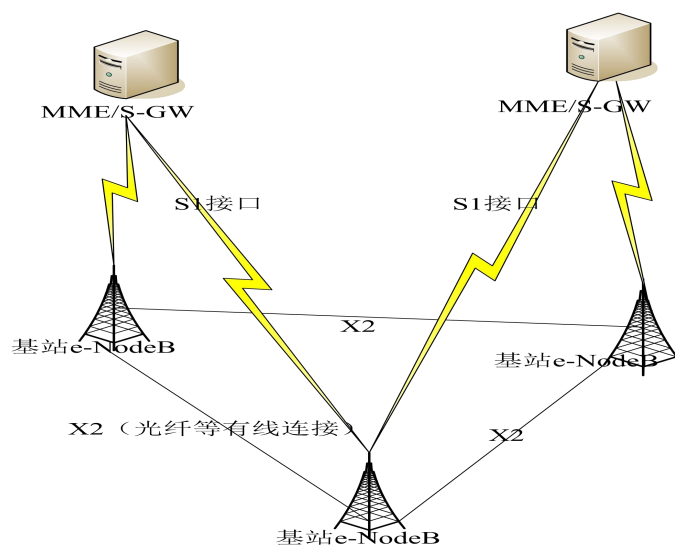


图 2-1 LTE 无线网络的组成结构

论文研究的基站分簇方法属于无线接入网部分，是 eNB 中的一部分功能，主要是基站动态资源配置^[32]，这样就可以不用在网络中设置基站控制器单元，减小了网络设计成本。用户端需估测信道状况信息，以有限反馈的形式，通过反馈信道反馈到用户主服务基站，eNB 根据信道状况信息，选择合适的基站进行分簇，并通知相应的基站共同为目标用户传输数据。

协作传输过程如图 2-2 所示，在图 2-2 中的基站控制器是宏基站 eNB 中的实体单元，图 2-2 中协作传输结构图的描述方式为了明确表示出该功能单元。这里假设用户 u_1 的主基站为基站 1，其中最窄折线链路为服务基站的有效信号传输链路，直线链路为其余基站的干扰信号链路。在协作传输过程中，用户端需反馈信道状态信息到基站控制器，基站控制器根据协作方法通知相应的基站进行协作，虚线框中表示基站簇 1，里面的基站共同为用户传输有效信号。因此，用户端可

接收多个基站发送的有效信号，这样可以明显增强接收端的信号强度，有利于提升用户的信号质量。

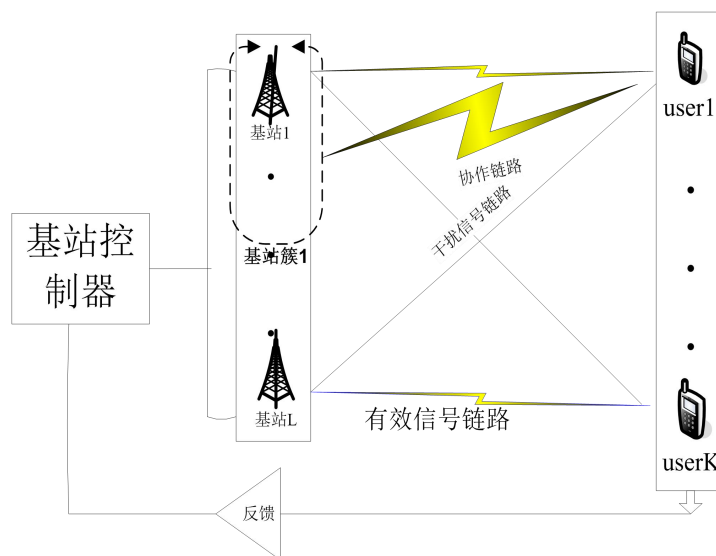


图 2-2 协作传输过程图

2.1.1 HetNet 异构网络

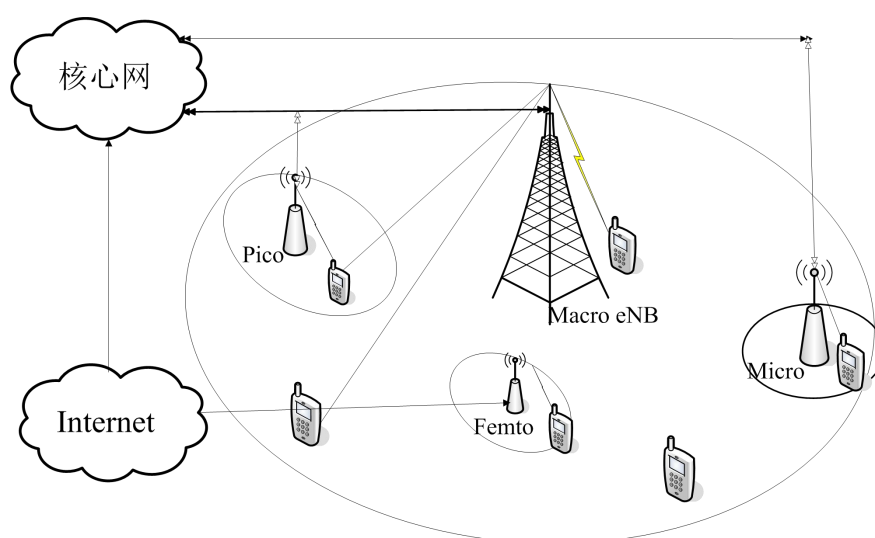
由于 LTE 采用较高的频段进行信息传输，若仅凭借宏站覆盖模式已无法实现深度广域覆盖。为使小区有更大容量和更广覆盖，提出在网络中加入更多的低功率节点来实现网络连续覆盖。相较于同构网络中采用演进的 eNB 来通过高发射功率提供广域覆盖，异构网络就是在这些传统宏小区之上，以层叠覆盖的形式加入大量的低功率节点，如 Micro、Pico、Femto 等，形成分层的异构网络组网形式，能在容量和覆盖上对宏站进行有效补充，分流吸收宏站的话务量，降低网络成本，实现了移动网络覆盖和容量的双重提升^[32-34]。在一些商务大楼、大型商场、机场等这些人员密集地区，有很高的话务密度；并且，由于建筑物对高频信号的衰减更强，使得室内信号强度严重衰减。所以，利用微蜂窝基站来吸收话务密度，还能提供良好的室内覆盖，是宏蜂窝小区的补充^[35]。

异构小区中的站点主要是宏基站、Pico 基站和 Femto 基站，其主要特性：

(1) Femto 基站：主要应用在家庭和企业环境中。家庭和企业可以根据需要灵活部署低功率节点，然后通过 Internet 连接到运营商部署的核心网，进而进行数据的下载和上传。用户能感受到较高的数据传输速率，从而有很好的用户体验。Femto cell 与其余低功率基站的主要区别是，Femto cell 会对用户设置访问权限，只有有访问权限的用户，称之为闭合用户组（Closed User Group, CGS），才能接入该网络。对于 Femto cell 的标准化工作和新的问题的研究也正在进行^[32]。

(2) Pico 基站：主要是对室内场所如机场、火车站、地铁、购物场所等热点区

域进行覆盖，由于在这些场所，人流量非常大，对数据速率要求也很高，Pico 可以为这些热点区域提供深度覆盖，支持用户的不同业务需求。Pico cell 与传统的宏基站的主要区别是发射功率较低，可以与 eNB 宏基站之间通过 X2 接口进行信息的交互，为不同类型基站之间协作提供了可能。尤其目前部署的基站数量正不断增加，站址的选择成为需要考虑的主要问题。例如对于市区中的幼儿园、学校、医院等区域，一般不部署发射功率较大、占地较大的宏基站，而采用这些低功率基站，能节约很大的成本、同时带来更大的安全感，这些站点可以安装在街灯柱上，电线杆上，建筑物的墙上等，部署安装十分方便^[30]。3GPP 关于异构网络部署^[34]如图 2-3 所示：



异构网络中几种基站类型特点^[36]如表 2-1 所示：

表 2-1 不同基站类型的特点

站点类型	发送功率/dBm	用户接入情况	部署位置	相邻站点互联接口
宏 eNB 站点	46-49	所有用户可接	室外较多	X2
Pico	24-30	所有用户可接	室外或室内	X2
Femto	20	只 CGS 用户接	室内较多	OAM 信令交互

在表 2-1 中，CGS 表示封闭用户组（Closed User Group）；OAM 是分别是操作（Operation），管理(Administration)，维护(Maintenance)首字母组成。

总的来说，微基站可以看成是微型化的基站，将所有设备浓缩在一个比较小的机箱内，方便安装，易于维护。研究表明，在每个宏站中包含 10 个微基站，微基站吸收业务量可达该区域的 75%，说明了异构网络的部署将为网络的连续覆盖和增容提供更广阔的前景。虽然进行异构网络部署可以提高整网效率，但是由于异构组网，宏站、微站复用同一频率资源带宽，这就会造成更多的不同基站类型

之间的干扰。并且，对于 LTE 数据业务来说，小区中心和边缘区别明显，尤其是边缘主信号弱，收到来自其他基站的小区间干扰信号强^[5]。图 2-4 表示异构网络下行传输场景中干扰示意图：

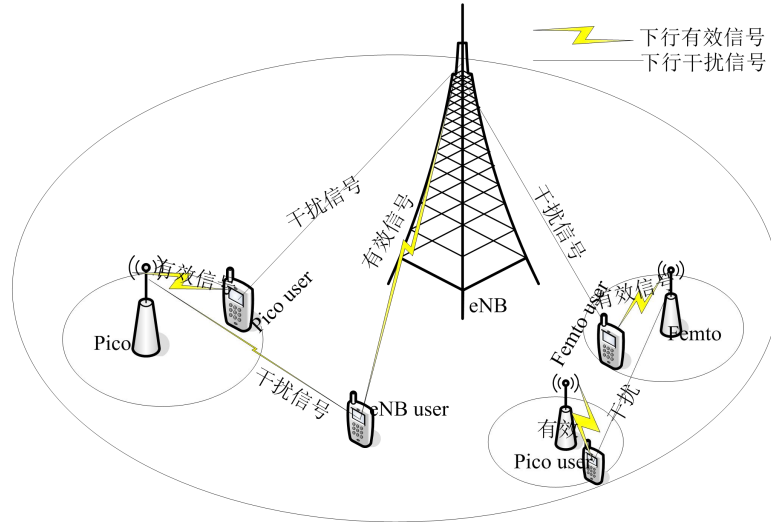


图 2-4 异构网络下行干扰示意图

由图 2-4 所示，主要干扰类型是：Macro-Pico 干扰场景；Macro-Femto 干扰场景；Pico-Macro 干扰场景。由于，Pico 站点和宏基站 eNB 性能相似，只是发射功率较低使得覆盖面积较小，所以，在本文中讨论的低功率节点为 Pico 类型的低功率节点，并统称为微基站，它们形成的小区称为微小区，处于其中的用户称为微用户。论文中讨论的干扰主要是 Macro-Pico 下行干扰场景。

在 LTE-A 系统中，针对小区间严重的干扰，3GPP 引入了增强型的小区间干扰协调（enhanced Inter-cell Interference Coordination, eICIC）技术，同时考虑到时域和频域两个方面，在时域引入 ABS（几乎空白子帧）思想来降低干扰^[37]。eICIC 技术通过在干扰小区中配置 ABS 子帧，另被干扰小区使用这些 ABS 子帧，为原来在小区中受到较强干扰的用户提供服务，从而实现了小区间干扰的协调。在 ABS 中仍会广播一些必要的信令和消息，但这些信号功率很低^[38]。eICIC 方法是从干扰协调角度进行干扰消除提升系统性能的，本论文将通过干扰抑制的方式，从把干扰信号转化为有用信号的角度进行小区间干扰的消除，就是把产生强信号干扰的基站与目标用户主服务小区基站进行协作，应用协作多点传输 CoMP 的理论进行基站分簇，簇内基站共同为用户传输有效信号，通过转变干扰信号为有效信号，来提升期望信号强度，进而提高边缘用户接收端的信干噪比。

2.1.2 协作多点传输 CoMP 技术

CoMP 通过消除小区间干扰来提升边缘频谱效率。通过接收来自不同物理小

区的多个天线（或站点）的信号，利用原属于干扰的基站为目标用户传输有用信号，不但增强接收端的信号质量，同时减小了小区间干扰。CoMP 还能够有效解决由于载频提高导致小区面积较小而带来的频繁切换^[4]。

一般意义上来说，一个用户终端，在一个时间，只跟一个小区进行连接通信。在 LTE 小区选择中，终端通常选择有最高参考信号接收功率（Reference Signal Receiving Power, RPRS）的小区作连接通信，这个小区就是用户的服务小区。下行协作多点传输的核心思想是：通过高速的光纤技术或无线微波链路，把多小区基站通过控制器连接在一起，及时交换信息，共同为目标边缘用户传输有效数据。

3GPP 规定的 CoMP 网络拓扑结构[34]为：

- (1) 单个宏基站控制下的不同扇区之间协作
- (2) 多个宏基站控制下的不同扇区之间协作
- (3) 由一个宏基站小区控制的不同 radio sites 之间协作，主要针对分布式天线系统
- (4) 宏基站和低功率节点之间协作，且他们各有自己的控制小区

图 2-5 是四种网络拓扑结构示意图：

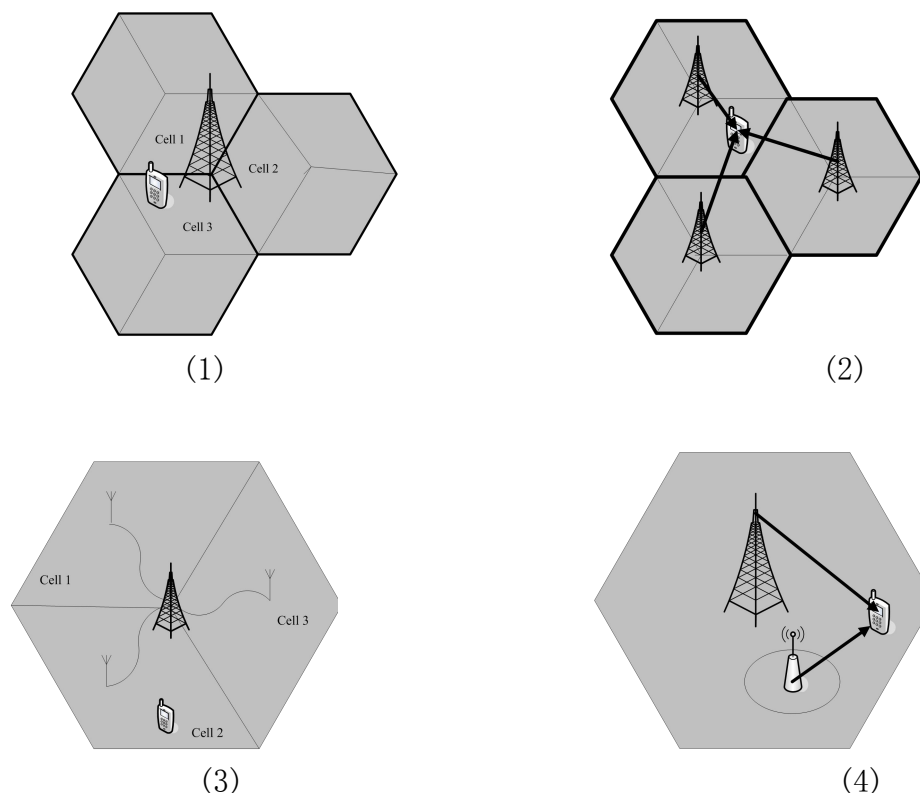


图 2-5 不同协作场景

本文主要在异构网络中进行研究，所以本文主要研究的是场景(4)中的情况：宏基站和低功率节点之间的协作，并且把低功率节点统称为微基站，宏基站和微基站都有自己的控制小区。图 2-6 表示了宏站和微站协作形成基站簇场景示意图：

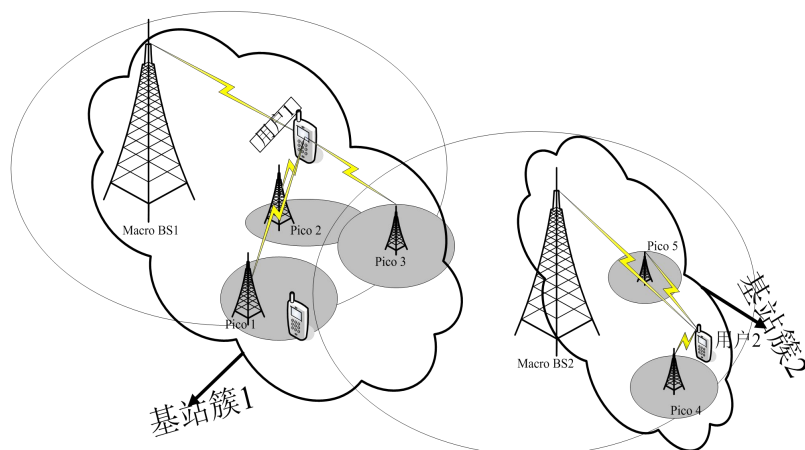


图 2-6 异构网络基站分簇示意图

从图 2-6 中可以看出, Macro BS1 和 pico1、pico2、pico3 组成基站簇 1, 共同为用户 1 传输有效数据; Macro BS2 和 pico1、pico2 组成基站簇 2, 共同为用户 2 传输有效数据。在协作传输中, 所有的基站可以共享信道状态信息, 但是每个用户的信息只能在用户的协作簇中共享。

根据数据能否在多个协调点上获取, CoMP 还可分为: 联合处理(Joint Processing, JP)和协作调度/波束赋形(Cooperative Scheduling/Beamforming, CS/CB)。CS/CB 方式是多个协作的站点共享多个用户终端的信道状态信息 CSI, 通过选择 CSI 好的站点, 进而将数据包发送给这个站点下的用户。所以调度的是有最好接收信号 SINR 的一个站点。JP 方式则是多个站点之间的协作共同为用户传输相同的数据包, 单个用户的数据是从多个传输节点同时进行传输的, 多个小区传输相同的信息给目标用户^[39]。图 2-7 是两种协作传输方式示意图:

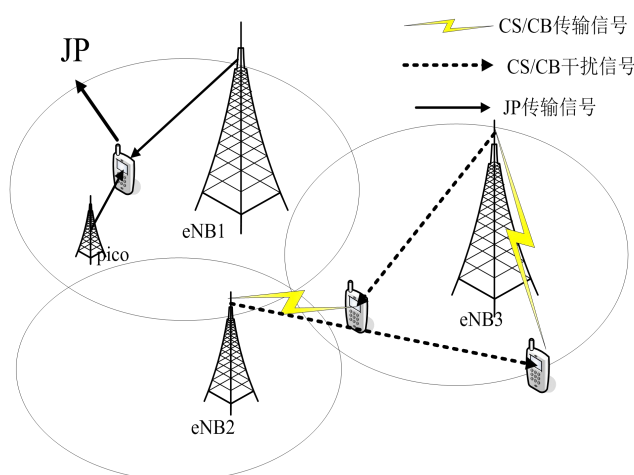


图 2-7 CoMP-JP 和 CoMP-CS/CB 传输示意图

论文研究异构组网结构下行多基站 JP 协作方式。JP 方式是联合多个协作站

点同时传输相同的数据到目标用户，把干扰信号变成有效信号传输，增加了系统的吞吐量和边缘用户的吞吐量。在协作传输中，协作信息需要通过 eNB 之间的 X2 接口，因此，大量的信息交互会造成协作传输中时延问题的存在。若在整个系统中进行协作，这会由于大量信息的交互共享造成更大的延时。所以论文对系统中的基站按照一定的方法进行分簇，把系统划分成更小的基站群，在这些簇中进行基站协作。

在一个密集的小区中，部署宏基站和大量的微基站，这就可能使用户从多个站点接收到有效信号，但是，由于干扰的影响，有些站点加入协作，并不会对目标用户的传输速率有很大提升，且还会造成 X2 接口的信令拥塞。所以，需要选择其中信号强度好、协作后收到干扰小的站点作为协作基站，所以基站分簇是实现的一种方式。但是，簇越大（簇中基站个数越多）虽然能提高接收端 SINR，但是回程链路的容量等问题还是限制簇的大小。因此，研究的协作小区选择方法要有效选择哪些基站进入协作小区簇。CoMP 传输要求在发送端具有当前所有链路的全部 CSI，以便于基站端进行预编码消除共信道干扰，所以本文研究的 CoMP 传输系统中，假设所有发送端以及终端用户能完美同步，反馈信息没有时延，也就是基站端发送信息能同时到达用户接收端^[5]。在协作基站选择方法中，这就要求具有 CoMP 功能的终端不仅能测量最强的站点信道状态，还能测量远处的站点。并将获得的 CSI 准确反馈到基站端。

2.1.3 MIMO 传输技术

MIMO 是指在发送端和接收端有多根天线的系统，也是 LTE 系统中最主要的技术，应用 MIMO 技术，可以成倍的增加系统容量^[41]。

MIMO 传输基本系统模型如图 2-8 所示：

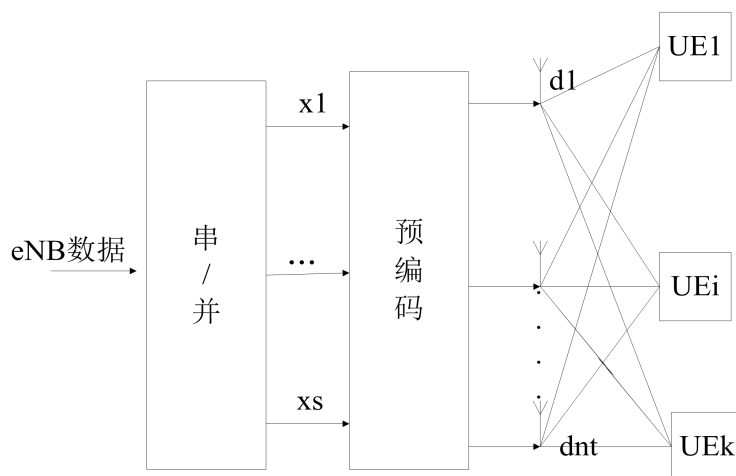


图 2-8 MIMO 下行传输示意图

论文讨论 MIMO 系统下行传输场景。如图 2-8 所示，设基站端有 N_t 根天线进行数据的发送，用户端有 N_r 根接收天线，系统中接收端用户数为 K ，基站个数为 B ，并且，基站在同一时频资源上能与这些用户进行通信。考虑窄带平坦衰落信道模型，数据在传输过程中的噪声为高斯白噪声。此时，基站端发送信息矩阵为： $X=[x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{N_t}]^T$ ，其中 x_i 表示第 i 根天线上发送的数据，用 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_{N_r}]^T$ 表示用户接收信号矩阵，这里 y_j 表示第 j 根天线接收的数据。那么，用户接收到的信号可记为：

$$Y = HX + z \quad (2-1)$$

在式(2-1)中， H 表示信号传输过程中的信道矩阵，在用户接收端可以采用加入导频信号或盲估计的形式获得，再将其量化后通过反馈信道反馈到基站端。这里 H 可表示为：

$$H = [H_1, H_2, \dots, H_K] = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & \dots & h_{N_r N_t} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

在式(2-2)中， h_{ij} 表示从发送天线 i 到用户 n 的接收天线 j 的复信道衰落系数。 z 表示均值为 0、方差为 α^2 的高斯白噪声， $z=[z_1, z_2, \dots, z_{N_r}]^T$ ，且 $z_z \sim Z(0, \alpha^2)$ ，其中 z 中的每个分量值都满足独立同分布。

由上分析，可知第 k 个用户接收到基站 b 发送的信号可以表示为：

$$y_k = H_{b,k}x + z_k \quad (2-3)$$

由于 LTE 系统频率复用因子为 1，这就造成由于资源块的重叠造成的多用户干扰，图 2-9 表示了下行多用户干扰的情况：

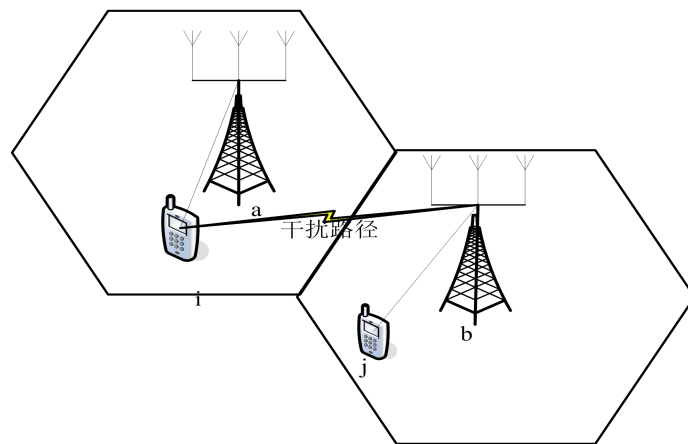


图 2-9 下行多用户干扰示意图

为消除共信道干扰，通常需要在基站端对需要发送的数据进行预编码。预编

码处理示意图如 2-10 所示：

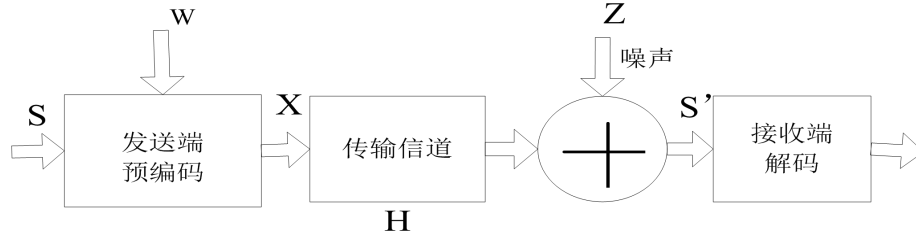


图 2-10 预编码过程示意图

如 2-10 图情景：基站 a 向用户 i 发送数据，设天线数为 N_t ，那么多天线单接收信道矩阵： $h^{a,i} = [h_1^{a,i}, h_2^{a,i}, \dots, h_{N_t}^{a,i}]$ ；由于共信道干扰，基站 b 由于对用户 j 发送数据，对处于基站 a 中用户 i 产生干扰，干扰矩阵为： $h^{b,i} = [h_1^{b,i}, \dots, h_{N_t}^{b,i}]$ ；所以，用户 i 的信道矩阵为： $h_i = [h^{a,i}, h^{b,i}]$ ，预编码的目的可以使将干扰矩阵 $h^{b,i}$ 变为 0，进而消除干扰。

假设对于发送给用户 k 的数据 d_k 在基站端进行预编码的编码矩阵为 $W_k \in \mathbb{R}^{N_t \times N_r}$ ，那么从基站 j 发送给用户 k 的数据经过预编码处理后，在接收端收到的信号为：

$$y_k = H_{b,k} \cdot W_k \cdot x_{b,k} + z_k \quad (2-4)$$

设系统中每个基站 b 的发送功率为 P_b ，其满足的限制条件为：

$$E[x_{b,k}^H x_{b,k}] \leq P_b, b = 1, 2, \dots, B \quad (2-5)$$

假设用户端能正确反馈 CSI 到基站端，则 MIMO 信道容量公式为^[42]：

$$C = \max_{R_s: Tr(R_s)=1} \log_2 \left(\det \left[I_{N_r \times N_t} + \frac{P}{\alpha^2} H R_s H^H \right] \right) \quad (2-6)$$

这里， $R_s = E[xx^H]$ 表示输入信号的协方差， $Tr(R_s) = 1$ 表示相应的功率约束。

2.2 无线信道

在移动通信系统中，信息承载在载波上在自由空间传输，由于传输环境的复杂性，造成移动通信系统信号易衰减、受到干扰强、信号不稳定等特点。传输环境的复杂性、随机性，使得对无线信道的实时测量难度很大。因此，可以通过长期的试验统计，建立一些数学模型对无线信道进行分析。总的来说，无线信道中，对信号的衰减主要来自路径损耗、阴影衰落和多径衰落。无线信道使基站发送端的信号造成严重衰减，使得接收端信号的降低，因此，需要分析无线信道的情况。

2.2.1 路径损耗

在无线通信系统中，由于传输距离的原因，使得发送端的信号经过复杂的传输环境，会使得信号强度产生严重衰减。设基站端发送信号功率为 P_T ，接收端信号强度为 P_R ，那么，信号强度关于距离的衰减量化可以表示为：

$$PL = \frac{P_T}{P_R} \quad (2-7)$$

该值主要与信号传输过程中环境复杂性、传输距离、无线电波长等因素有关^[43]。路径损耗通常用分贝为单位表示：

$$PL_{(dB)} = 10 \lg \frac{P_T}{P_R} \quad (2-8)$$

常见的路径损耗模型主要有：Okumura-Hata 模型，Cost231 Hata 模型，LTE 中常采用 Cost231 Hata 模型^[44]：

$$L = 46.3 + 33.9 \lg f_c - 138.2 \lg h_{te} - \alpha(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \lg h_{te}) \lg d + C_M \quad (2-9)$$

中小城市： $\alpha(h_{re}) = (1.11 \lg f_c - 0.7) \cdot h_{re} - (1.56 \lg f_c - 0.8)$

大城市、郊区、乡村：

$$\begin{aligned} \alpha(h_{re}) &= 8.29(\lg 1.54 h_{re})^2 - 1.1 (f_c \leq 300 \text{MHz}) \\ \alpha(h_{re}) &= 3.2(\lg 11.75 h_{re})^2 - 4.7 (f_c \geq 300 \text{MHz}) \end{aligned} \quad (2-10)$$

C_M ：大中城市中心校正因子；中等城市，郊区： $C_M = 0 \text{dB}$ ；大城市： $C_M = 3 \text{dB}$
 f_c ：电磁波工作频率（MHz）； h_{te} ：基站天线有效高度； h_{re} ：移动台有效先天高度。 d ：基站天线和移动台天线之间的水平距离； $\alpha(h_{re})$ ：有效天线修正因子。
 根据路径损耗分贝值的转换关系，进而可以得到发送信号功率和接收信号功率值之间的关系。

2.2.2 阴影衰落

阴影衰落主要是因为信号在传输过程中，由于障碍物的遮挡造成的信号强度衰减，因为这些障碍物会吸收一部分能量，使信号强度退化。根据实验测量，阴影衰落造成的信号功率的变化一般可以建模为对数正态分布随机变量，其概率密度函数（PDF）由参考文献^[45]给出：

$$f\varphi(\psi) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi\alpha_{\varphi_{dB}}\psi}} \exp\left(-\frac{(10\lg\psi - \mu_{\varphi_{dB}})^2}{2\alpha_{\varphi_{dB}}^2}\right), \quad \psi > 0 \quad (2-11)$$

在式(2-11)中, $\xi = \frac{10}{\ln(10)}$ 为常数; $\varphi_{dB} = 10 \lg \varphi$ 表示接收信号强度的分贝表示。

由于路径损耗和阴影衰落都属于大尺度衰落对信号造成的衰减, 一般将对数正太分布的阴影效应和平均路径损耗相结合, 可以表示为:

$$\frac{P_R}{P_T (dB)} = 10 \lg K - 10 \alpha \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) - \psi_{dB} \quad (2-12)$$

这里, K 是与天线增益和平均信道衰减相关的常数; d_0 为参考距离, 一般室内取值 1-10m, 室外取值 10-100m^[46]; α 是路径损耗指数。

2.2.3 多径衰落

多径衰落即多径效应造成的信号衰落, 主要是由于传输环境复杂, 使得信号经直射、反射、折射等多条路径到达接收端, 由于反射路径造成的时延, 会造成直射信号与反射信号的相位不同, 造成信号强度的大幅度衰减。

一般, 多径效应的两种常见表现形式: 瑞利衰落和莱斯衰落。瑞利衰落是多条反射路径叠加的结果, 可以用瑞利分布来描述, 莱斯衰落是一条主导路径和多条反射路径叠加的结果, 可以用莱斯分布描述。由此可见, 莱斯衰落可以看成瑞利衰落的一种特例, 瑞利衰落更具一般性。在 LTE 系统中, 也经常采用瑞利分布进行建模。因此, 本文讨论瑞利衰落对信号强度造成的影响。在进行试验仿真时, 将实验环境建模为幅度为 η 的瑞利衰落, 其中该模型的概率密度函数^[47]表示为:

$$f(\eta, \gamma) = \frac{\eta}{2\pi\eta^2} \exp\left(-\frac{\eta}{2\eta^2}\right) \quad (2-13)$$

其中 γ 为相位, 且服从均匀分布, η 服从瑞利分布。

2.3 多小区异构系统

2.3.1 多小区异构系统模型

目前, 移动通信系统具有多基站、多小区、多用户的特点, 并且异构网络中基站是不规则部署的。因此, 根据基站传输功率的不同、支持数据速率的不同、小区中基站和用户分布密度的不同, 将小区分成多层的结构, 每层基站随机分布^[29]。根据电磁波向外是呈球面辐射的特点, 令基站的覆盖范围呈圆形区域。因此, 考虑一个无线异构网络系统, 系统中每个宏基站形成一个小区, 系统中共有 B 个宏基站。每个小区的边缘和热点区域有多个随机分布的微小区, 用户随机分布在一个微小区中。如图 2-11 所示为两小区下行传输的场景示意图:

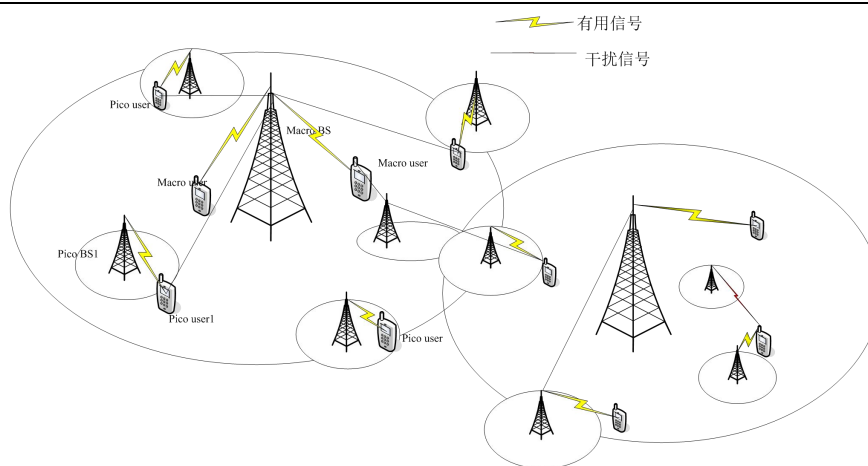


图 2-11 异构多小区下行传输示意图

在图 2-11 中，折线表示有用信号链路，直线表示干扰信号链路。图 2-11 所示的传输场景中，微用户 $user_1$ 不仅接收到所在微基站发送信号，还受到宏基站 BS 的干扰。

为在试验仿真中能方便表示各个基站之间以及与用户之间的位置关系，本文采用坐标系建模方式来进行研究，如图 2-12 所示：

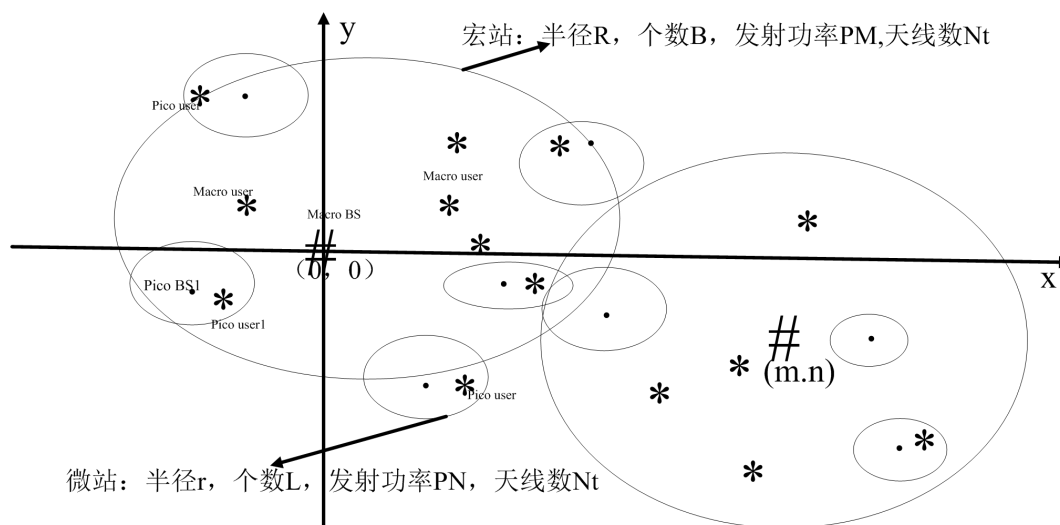


图 2-12 基于坐标系的异构多小区系统示意图

在图 2-12 中，#表示宏基站，*表示用户，•表示微基站；其中宏基站分布在小区中心，微基站在边缘区域随机部署。

当小区拓扑结构确定以后，进而可以得到^[48]：

- (1)各宏基站形成的小区的位置坐标，可以称之为小区 ID
- (2)各类型基站、用户在直角坐标系中的位置
- (3)各类型基站个数
- (4)各类型基站到目标用户之间的距离

(5)各类型基站发送功率大小

(6)各类型基站发送天线数目

2.3.2 多小区异构系统信干噪比计算模型

信干噪比（Signal Interfere plus Noise Ratio, SINR）常被用作进行实验仿真性能比较指标。在本文后续仿真中，采用基于坐标位置的多小区异构系统模型计算接收端 SINR，如图 2-13 所示：

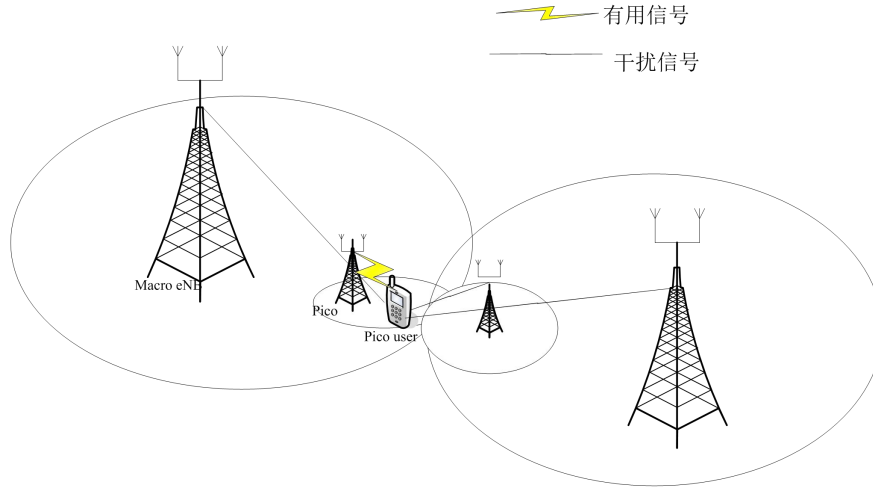


图 2-13 异构多小区下行协作传输示意图

现考虑一个下行异构多基站场景:假设在小区 m 中心有一宏基站 m ，小区数为 M ，覆盖区域是半径 R 的圆形区域，该宏基站的发送信号功率为 P_M ，在该小区随机分布 L 个微基站，第 m 小区中第 i 个微基站记为 L_{mi} ，微基站的发送信号功率记 P_N ，这些微基站覆盖半径为 r_{pico} 。在小区 m 中随机分布 K 个用户，小区 m 中第 i 个微小区的边缘用户 j 记为 K_{mij} 。宏基站和微基站 N_t 根发送天线（后续仿真中宏、微基站的发送天线数可以不同），用户有 N_r 根接收天线。基站通过无线广播信道向用户传输信息，那么，用户 K_{mij} 第 z 根接收天线上的接收信号强度 P_{mij}^z 为：

$$P_{mij}^z = \underbrace{P_{mij}^{z,a} \cdot H_{mij_loss}^{z,a}}_{\text{所有微小区有用信号}} + \underbrace{\sum_{s=1, g=1; s \neq m, g \neq i}^{M+L-1} P_{sgj}^{z,a} \cdot H_{sgj_loss}^{z,a}}_{\text{系统中干扰和噪声}} + \alpha_{mij}^2 \quad (2-14)$$

在移动通信系统中，信号利用载波传输，所以常用载波与干扰强度的比值，载干比(Crrier/Interference,C/I)表示接收端信号质量。载波功率大小由发射机的发送功率和传播衰耗确定，是目标用户接收到的对应服务基站的纯有效信号强度；干扰功率由系统中对目标用户的所有干扰，即传输过程中的噪声、小区内干扰、

小区间干扰，共同决定^[2]。所以，本论文中信干噪比的计算实为对载干比的计算。

首先计算目标用户每根天线上的载波 $SINR_z$ ($z=1,2,\dots,N_r$)，每根天线上发送相同的数据，在接收端通过最大比合并的方式进行信号的叠加，叠加后的 $SINR_{z-sum}$ 为：

$$SINR_{z-sum} = \sum_{z=1}^{N_r} SINR_z \quad (2-15)$$

那么，用户 K_{mij} 第 z 根接收天线上的信干噪比（SINR）计算公式为：

$$SINR_{mij}^z = \frac{P_{mij}^{z,a} \cdot H_{mij_loss}^{z,a}}{\sum_{s=1, g=1; g \neq i, s \neq m}^{M+L-1} P_{sgj}^{z,a} \cdot H_{sgj_loss}^{z,a} + \alpha_{mij}^2} \quad (2-16)$$

其中： $P_{mij}^{z,a}$ 表示 mi 小区基站的第 a 根天线对用户第 z 根天线的载波发送功率。 $H_{mij_loss}^{z,a}$ 表示 mi 小区基站的第 a 根天线对用户第 z 根天线的传输信号中环境造成的衰落。 $P_{sgj}^{z,a}$ 表示干扰小区 sgj 基站的第 a 根天线对用户第 z 根天线的载波发送功率。 $H_{sgj_loss}^{z,a}$ 表示干扰小区 sg 基站的第 a 根天线对用户第 z 根天线的传输信号中环境造成的衰落。 α_{mij}^2 表示系统中噪声功率。

在下文的 SINR 计算过程中，依据式（2-15）和（2-16）的原理，直接表示出了所有载波叠加后的接收信号功率，也就是 $SINR_{z-sum}$ 的值。

论文以多点协作传输为理论基础，依据上文中异构网络模型进行协作基站分簇，基站分簇的思想是将产生干扰的基站作为协作基站，与目标用户的主服务基站共同为用户传输数据，分析香农公式：

$$Rate = B \cdot \ln(1 + SINR) = B \cdot \ln\left(1 + \frac{P_{Sig}}{P_{In} + P_{Noi}}\right) \quad (2-17)$$

P_{Sig} 表示目标用户接收到的主服务基站的有效信号功率。 P_{In} 表示目标用户受到的系统中干扰信号强度， P_{Noi} 表示系统中噪声功率。

根据香农容量公式，可以估计出在不考虑其他小区的干扰时，基于簇结构的小区群的平均香农容量为^[4]：

$$C = \iint_S p(x,y) B \ln\left(1 + \sum_{j=1}^N \frac{P_z}{N} L_i(x,y) / N_0 B\right) dx dy \quad (2-18)$$

N_0 表示噪声的功率谱密度； B 为带宽； S 是形成的小区簇的面积； P_z 表示总发送功率，其中 N 为小区簇中的所有小区发送天线数， $N = n \cdot N_t$ ， n 为簇中小区数； $L_i(x,y)$ 表示第 i 个天线单元到处于位置 (x,y) 的用户的路径损耗；

$p(x,y)$ 表示处于位置 (x,y) 的用户其概率分布密度。

由于小区间干扰的存在，所以需要完整考虑非理想状态下的系统容量。分析(2-18)式，其中

$$\sum_{i=1}^{n \cdot N_t} \frac{P_{\text{总}}}{n \cdot N_t} L(x,y) / N_0 B = \text{SNR} \quad (2-19)$$

所以，当用户位置固定时， $L_i(x,y)=1$ ， $p(x,y)=1$ ，结合式(2-17)考虑干扰存在时，处于小区簇中的目标边缘用户近似速率为：

$$R=B \cdot \log \left(1 + \sum_{i=1}^{n \cdot N_t} \frac{P_z}{n \cdot N_t} / (N_0 B + P_{in}) \right) \quad (2-20)$$

由式(2-14)可知：

$$P_{in} = \sum_{s=1, g=1; s \neq m, g \neq i}^{M+L-1} P_{sg}^{z,a} H_{sg_loss}^{z,a} \quad (2-21)$$

为了提高边缘用户的信号速率可以增加带宽 B ，或者提高接收端信干噪比。但是频率资源十分匮乏，一般都是通过提高接收端信干噪比来提升传输速率。通过以上对系统平均容量的分析，本文将通过把干扰基站变为可以协作的基站来传输有用信号，即是多个基站共同为用户端传输有效信号，提高接收端信号的有效功率，同时降低干扰来实现传输速率的提升。这同时说明系统中除主基站之外的基站信号强度和产生的干扰大小都会影响接收端传输速率，需要综合考虑。

2.4 本章小结

在本章中，主要介绍了 LTE-A 中的关键技术：异构网络 HetNet、协作多点传输 CoMP、MIMO 技术和无线通信信道模型（路径损耗、阴影衰落、多径衰落），并根据异构网络的组网特点，建立了多小区异构系统分析模型，以及相应的数学描述，为第 3 章和第 4 章进行基站分簇方法的研究做了相应的理论铺垫。

第3章 阈值基站分簇方法

第2章建立的基于多小区异构网络系统模型，在第3章和第4章讨论下行系统基站分簇方案，以最大化接收端的传输速率为优化目标。提出了阈值基站分簇方法和分步基站分簇方法。在进行基站分簇过程中，假设：发送端和接收端可以准确获得CSI，并且用户端能正确反馈CSI，反馈信道不发生错误和延时。为消除多用户干扰造成的接收端信号质量下降，在基站端应用预编码技术对发送数据进行处理。

3.1 阈值基站分簇方法

在阈值基站分簇方法中，是以最大化接收端传输速率为目标，通过选择满足设定阈值的基站进行协作，形成基站簇。该方法综合考虑到系统中的基站个数、目标边缘用户所属服务基站的信号强度以及周围基站的干扰大小，比目前已有的基于全局的简单分簇方法 Nearest Bases Clustering[18]具有更好的系统性能，因为 Nearest Bases Clustering 方法是通过选择距离最近的基站加入协作簇，距离值通过接收功率的大小来表现。但是，实际信号的传输受到环境因素、噪声的实时影响，距离基站最近的用户接收到的信号质量可能不是最佳的，因此，需要考虑信道传输链路的影响以及周围基站发送信号的干扰情况。图3-1描述了基站分簇后，下行数据传输的系统模型：

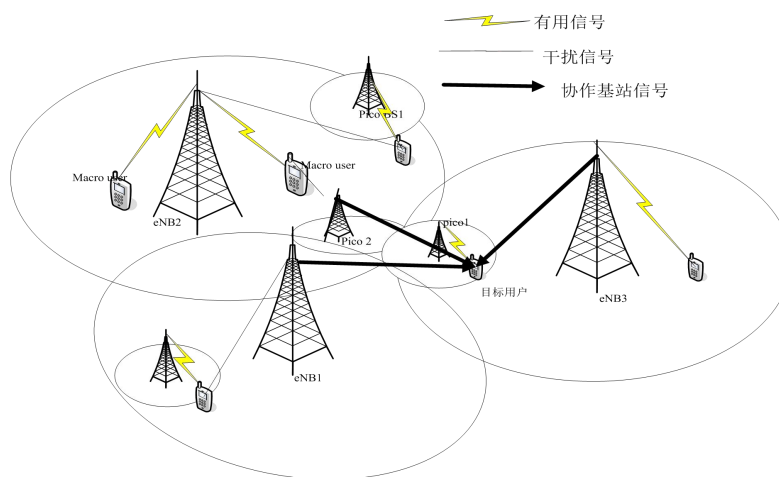


图 3-1 系统传输模型

图 3-1 详细描述了通过基站分簇，微站 pico2、宏站 eNB1 和 eNB3 参与协作为目标用户传输有效信息。这些基站和目标用户的所属基站 pico1 组成了基站簇。其中，宏站之间可以通过光纤连接来进行多小区信号的协同传输和接收^[2]，宏基

站或微基站之间协作信令通过毫米波技术进行传输。

近几年已有很多预编码应用到多小区系统中来消除共信道干扰，其中利用脏纸编码能够极大改善基站协作传输系统的性能。但是，脏纸编码计算复杂在实际应用中很难实现，本文将采用应用广泛的线性迫零(Zero Forcing,ZF)预编码技术消除干扰，并在仿真中对比了非线性预编码 THP 方式与线性 ZF 预编码对传输速率的影响。

3.1.1 分簇步骤

(1)不失一般性，根据已建立的多小区异构网络模型，现考虑一个异构多小区下行传输系统，目标边缘用户处于第 m 小区，第 i 个微站覆盖范围内，为 K 个用户中的第 j 个，那么该用户 K_{mij} 在未进行协作基站选择时，接收到所处小区的基站信号强度为：

$$P_{mij} = P_N \cdot \|h_{mij}^{N_r \times N_t}\|^2 \cdot \|w_{mij}^{N_r \times N_t}\|^2 \quad (3-1)$$

接收到其余小区的所有干扰信号强度为：

$$\begin{aligned} P_G = & \underbrace{P_M \sum_{n=1, n \neq m}^M \|H_{nij}^{N_r \times N_t}\|^2 \cdot \|w_{nij}^{N_r \times N_t}\|^2}_{\text{小区间宏站干扰}} \\ & + \underbrace{P_N \sum_{d=1, d \neq i}^L \sum_{x=1, x \neq m}^M \|h_{ndj}^{N_r \times N_t}\|^2 \cdot \|w_{ndj}^{N_r \times N_t}\|^2}_{\text{小区间微站干扰}} \\ & + \underbrace{P_N \sum_{d=1, d \neq i}^L \|h_{mdj}^{N_r \times N_t}\|^2 \cdot \|w_{mdj}^{N_r \times N_t}\|^2}_{\text{小区内微站干扰}} \end{aligned} \quad (3-2)$$

式中， $\|\bullet\|$ 表示 Frobenius 范数， $w_{(\bullet)}$ 为迫零预编码矩阵，若用 H 表示信道矩阵，则 w 满足：

$$w = \beta \cdot q = \beta \cdot H^H (HH^H)^{-1} \quad (3-3)$$

$\beta = \sqrt{\frac{N_t}{\text{trace}(q \cdot q^H)}}$ 为功率控制系数，要考虑实际技术和经济方面的因素，常

称为缩放因子。 $(\bullet)^H$ 表示矩阵的共轭转置， $(\bullet)^{-1}$ 表示矩阵的逆。

(2)设置基站分簇的阈值。

根据异构网络模型，可知系统中共有宏基站和微基站的总个数为：

$$Z_s = M + M \times L \quad (3-4)$$

那么，除用户的主服务基站外，用户可以接收到信号的剩余基站总个数为：

$$Z_{s-f} = Z_s - 1 = M + M \times L - 1 \quad (3-5)$$

用 I_A 表示用户 K_{mij} 接收到除主服务基站 L_{mi} 之外的其余基站发送的干扰信号强度，那么，干扰集合为：

$$I_A = \{I_1, \dots, I_q, \dots, I_T; T = Z_s - 1\} \quad (3-6)$$

其中， I_q 表示基站发送信号经过预编码之后再信道中传输，经历衰减之后再接收端的限号强度：

$$I_q = P_q \cdot \|h_q\|^2 \cdot \|w_q\|^2 \quad (3-7)$$

这里， P_q 表示不同类型基站发送功率， h_q 表示不同类型基站与用户之间的信道矩阵， w_q 表示不同基站的预编码矩阵。根据式 (3-2) 和式 (3-6) 可得出不同小区不同基站的干扰强度 I_q 。这里，用下标 q 表示系统中的基站 q ， P_q 为系统中的基站 q 发送信号功率，当 q 为宏基站时，则 $P_q = P_M$ ，当 q 为微基站时，则 $P_q = P_N$ 。 h_q 表示基站 q 和用户之间的信道矩阵，当 q 为宏基站时，则 h_q 为 $H_M^{N_r \times N_t}$ ， q 为微基站时，则 h_q 为 $h_L^{N_r \times N_t}$ ， w_q 表示用户的信道矩阵 h_q 对应变换得到的预编码矩阵。

在最近基站分簇方法中，通过选择接收信号最强的基站来与用户主服务基站协作，也就是从 I_A 中选择信号强度的最大值：

$$I_{\max} = \max(I_A) = \max(I_1, \dots, I_q, \dots, I_T) \quad (3-8)$$

若 I_{\max} 对应的基站为 B_{\max} ，则该基站与用户主服务基站协作，其协作功率为：

$$P_{coop} = I_{\max} + P_{mij} \quad (3-9)$$

协作后的传输速率为：

$$R'_{coop} = B \log \left(1 + \frac{P_{coop}}{P_G - P_{coop} + \alpha^2} \right) \quad (3-10)$$

由上分析可知，功率最大法得到的协作基站个数式始终为 2 个。然而，基站个数、户所属主服务小区的基站信号强度、非所属小区的基站干扰大小等都会对基站分簇结果产生影响，所以本文将通过设置阈值的方法，来为用户选择基站进行协作。其中，目标边缘用户的确定根据用户距离基站的距离来确定。

计算 Z_{s-f} 个基站的接收信号平均值为：

$$\overline{SIG_A} = \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_q + \dots + I_T}{Z_{s-f}} \quad (3-11)$$

那么，设定接收信号阈值为：

$$SIG_{YZ} = \overline{SIG_A} + P_{mij} = a \cdot \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_B + \dots + I_T}{ZS - 1} + P_N \|h^{N_r \times N_t}_{mij}\|^2 \|w^{N_r \times N_t}_{mij}\|^2 \quad (3-12)$$

其中, a 为设定权重, 根据本文设置的仿真场景, 在后续性能仿真过程中得出, 当 $a=2$ 时, 只有一个基站满足条件, 也即是存在可以协作的基站的 a 的最大值为 2。所以 a 的取值范围是: $0 \leq a \leq 2$ 。 $a=0$ 表示不选择基站协作, 只有目标用户所处基站为用户传输数据,

(3) 筛选符合条件的基站, 形成基站协作集合。

将式 (3-6) 中计算的每个值与式 (3-12) 设定的阈值进行比较, 如果:

$$I_q = P_q \cdot \|h_q\|^2 \cdot \|w_q\|^2 > SIG_{YZ} \quad (3-13)$$

则将选择 I_q 对应的基站 q 与用户 K_{mij} 所处小区的微基站 L_{mi} 进行协作, 共同为用户传输有效数据。

(4) 形成协作基站集。

选择满足式 (3-12) 的基站作为协作簇中的基站。

$$U^{C_Base} = \{q \in (M + M \times L - 1) | I_q > T, T = SIG_{YZ}\} \quad (3-14)$$

U^{C_Base} 为满足条件的基站集合, 也是最终得到协作基站簇。

根据式 (2-19) 可知, 此时用户接收到信号的协作传输速率为:

$$Rate_{mij} = B \cdot lb(1 + \frac{P_N \|h_{mij}^{N_r \times N_t}\|^2 \|w_{mij}^{N_r \times N_t}\|^2 + \sum_{q=1}^{Z_s-1} I_q}{P_G - \sum_{q=1}^{Z_s-1} I_q + \alpha^2}) \quad (3-15)$$

而用户没有应用协作的传输速率为:

$$R^{no-coop} = B \cdot lb(1 + \frac{P_N \|h_{mij}^{N_r \times N_t}\|^2 \cdot \|w_{mij}^{N_r \times N_t}\|^2}{P_G + \alpha^2}) \quad (3-16)$$

3.1.2 算法流程

根据提出的设置阈值分簇方法过程, 算法流程如图 3-2 所示。在图 3-2 中, 通过设置初始参数、阈值, 进行协作基站的选择, 具体步骤如下:

(1) 首先根据设定的参数建立小区拓扑结构, 初始化数据, 可以得到基站初始集合:

$$b = \{1, 2, \dots, m, \dots, M \times L + M\} \quad (3-17)$$

(2) 进而计算用户 K_{mij} 接收到微基站 L_{mi} 的有效信号功率 P_{mij} , 并根据 I_q 计算非基站 L_{mi} 集合:

$$b_f = \{1, 2, \dots, m, \dots, L \times M + M - 1\} \quad (3-18)$$

对应发送的干扰信号集合 I_A 。

(3)设定阈值 SIG_{yz} ，建立约束条件。

(4)判断目标边缘用户接收到每个非基站 L_{mi} 发送信号功率是否满足约束条件，即判断集合 I_A 中的每个元素 I_q 是否大于 SIG_{yz} 。

(5)若满足条件，则从基站初始集合 b 中选择满足条件的基站，存入新集合：

$$b_{mz} = \{1, 2, \dots, m\}, m \leq M + M \times L - 1 \quad (3-19)$$

否则，设置 I_q 为 0。

(6)多次循环后得到平均协作传输速率 $Rate_{mij}$ ，进行实验仿真。

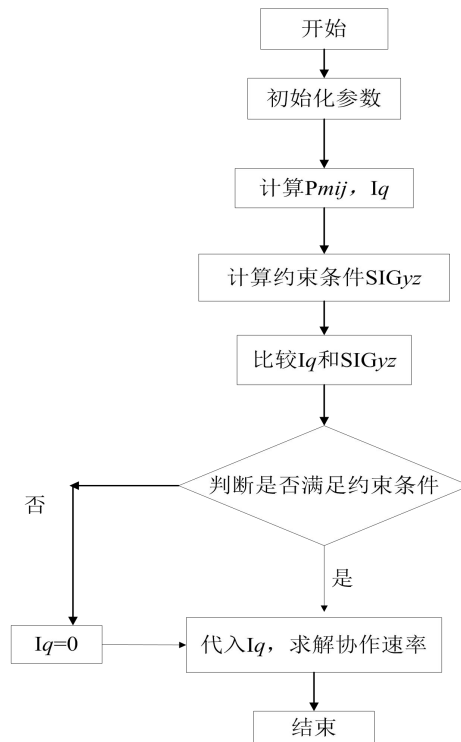


图 3-2 算法流程图

3.2 仿真平台及仿真结果

3.2.1 仿真结果

本文在 Windows 操作系统下，应用 MATLAB 编程语言进行系统仿真。该仿真平台是在 LTE-A 系统特点和 3GPP 关于 LTE-A 系统中标准的制定为指导搭建的。其中，小区拓扑结构、基站分布及个数、移动台位置、天线数等都需要在仿真中考虑。本系统考虑一个宏基站形成一个小区，每个小区边缘随机分布一个微基站的情形。系统的仿真参数设置如表 3-1 所示：

表 3-1 仿真参数设置

参数	数值
宏基站发送功率 (dBm)	46
微基站发送功率 (dBm)	30
小区拓扑	圆形, 10 个宏基站、每个宏站中 1 个微基站
宏基站天线数/根	2
微基站天线数/根	2
用户天线数/根	1
宏基站到用户的路径损(dB)	$128.1+37.6\lg dh$ (dh 为宏站和用户之间的距离:km)
微基站到用户的路径损(dB)	$140.7+36.7\lg dw$ (dw 为微站和用户之间的距离:km)
带宽/bps	1
宏基站覆盖半径 (km)	15
微基站覆盖半径 (m)	30-300

根据设置的仿真参数, 通过 Malab 平台进行仿真后得到实验结果如图 3-3、3-4、3-5 所示。依据本文建立的异构网络模型和提出的基于阈值的基站分簇方法, 设置阈值权重 $\alpha=1$ 进行系统仿真, 验证方法的性能, 将微小区中的边缘用户传输速率作为性能指标。在仿真图 3-3 中, 绿色、蓝色和红色三条仿真曲线, 分别表示了不进行协作分簇、功率最大法协作分簇和基于阈值的基站分簇方法对应的接收端传输速率的情况, 这里绿色曲线表示出了不进行协作分簇的情况, 由曲线的变化趋势, 可以看出通过基站协作分簇, 比较不进行协作, 可以在接收端获得更高的信号传输速率, 这主要是目标接受用户能够获得协作基站共同向用户传输的有效信号, 提高了有效信号强度, 周围干扰信号强度减弱, 进而提高了接收端信噪比。因此可得出通过协作传输能明显提高接收端传输速率。在图 3-3 中, 随着信噪比的增加, 参考文献[18]所提方法(功率最大法)与本文所提方法(阈值设定法)得到的用户传输速率都增加, 且阈值设定法的用户速率高于功率最大法的用户速率。在信噪比为 18 dB 时, 阈值设定法用户的传输速率为 4.96 bit/s, 功率最大法为 4.297 bit/s, 阈值设定法用户传输速率有 14%的性能提升。如图 3-4 所示, 两种方法用户传输速率之间的差距随着信噪比提高不断变大, 但是在信噪比大于 25 dB 时变化较平缓。分析式 (3-15) 可知, 当信干噪比变大时, 阈值变大, 此时满足式 (3-12) 的可以协作基站个数变少, 此时选择出来的基站与用户所处小区的微基站协作, 共同向用户发送数据得到的传输速率, 与功率最大法得

到的可以协作的基站向用户发送数据的传输速率基本相同，进而使得平均速率差值变化变缓。所以可以得出，当信噪比在 10dB-25 dB 变化时，阈值设定法能获得较好的系统性能。

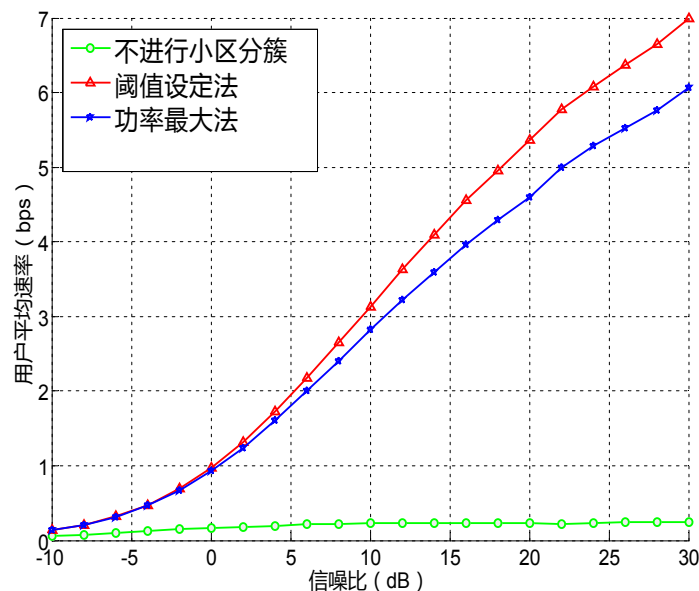


图 3-3 不同方法下传输速率比较示意图

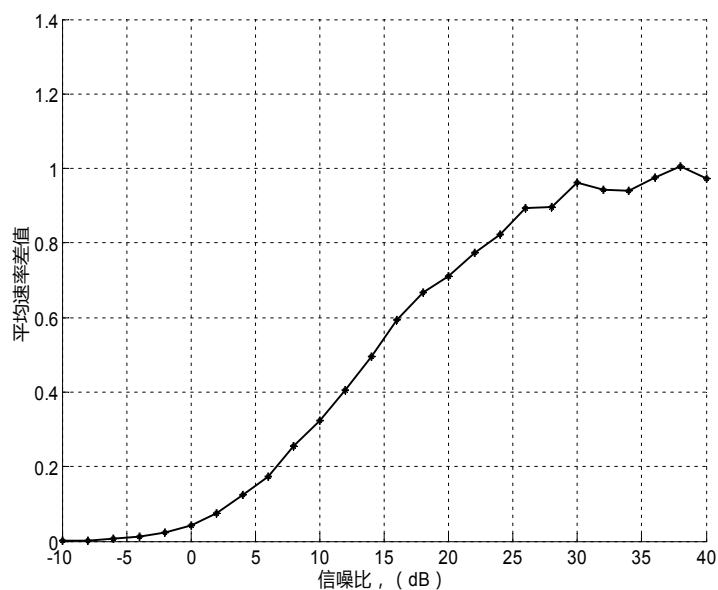


图 3-4 基于阈值分簇法和功率最大分簇法的用户速率差值

图 3-5 是线性预编码和非线性预编码下，不同分簇方法对应的用户传输速率的比较。仿真中分别采用了线性 ZF 预编码和基于 ZF 的非线性 THP 预编码[49]方法，从曲线变化的情况可知，在两种类型的预编码方式下，阈值设定法的传输速率大于功率最大法的传输速率，说明阈值设定法不受预编码方式的影响。分簇方法在线性 ZF 预编码方式下得到的用户传输速率比非线性预编码方式得到的传输速率高。根据参考文献[50]可知，当进行 THP 预编码时，会出现功率损失的情

况，造成有效信号功率变小。从式(3-15)得出边缘用户的传输速率变小，造成通过 THP 预编码后得到的传输速率低于 ZF 预编码得到的传输速率。

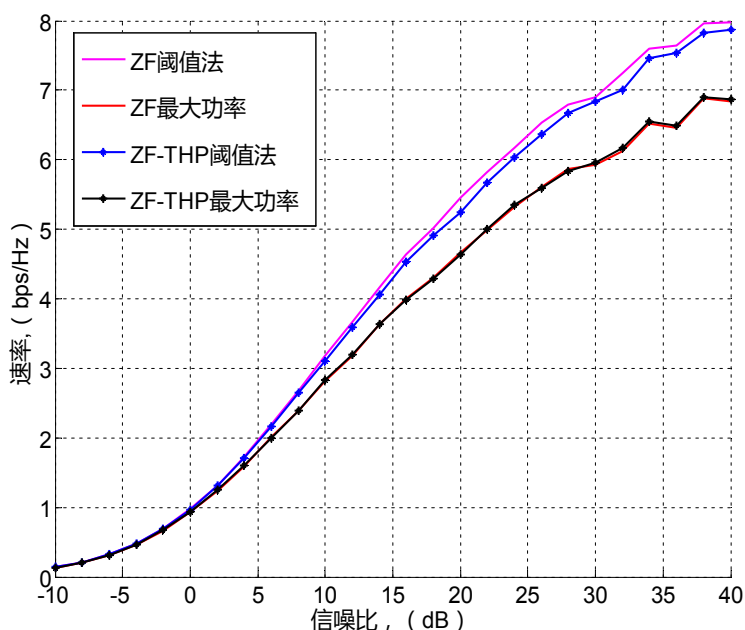


图 3-5 不同预编码下对应的用户传输速率

图 3-5 是线性预编码和非线性预编码下，不同分簇方法对应的用户传输速率的比较。仿真中分别采用了线性 ZF 预编码和基于 ZF 的非线性 THP 预编码[49]方法，从曲线变化的情况可知，在两种类型的预编码方式下，阈值设定法的传输速率大于功率最大法的传输速率，说明阈值设定法不受预编码方式的影响。分簇方法在线性 ZF 预编码方式下得到的用户传输速率比非线性预编码方式得到的传输速率高。根据参考文献[50]可知，当进行 THP 预编码时，会出现功率损失的情况，造成有效信号功率变小。从式(3-15)得出边缘用户的传输速率变小，造成通过 THP 预编码后得到的传输速率低于 ZF 预编码得到的传输速率。

3.2.2 阈值和协作基站个数对传输速率的影响

在文献[24]中，作者通过设置路径损耗阈值，来进行协作基站的选择，但是路径损耗并不能完整反映出大尺度和小尺度衰落对接收信号强度的整体影响。由[24]分析出，不同的阈值对协作基站分簇是有影响的。因此，异构网络的分析场景不同，阈值的设置原则不同，选择出的协作基站是不同的，接收端的传输速率也会有变化。针对用户端接收信号强度、干扰信号强度共同影响，改变权重 α 的值，比较不同阈值下的基站分簇结果对接收端传输速率的影响。根据表 3-1 中的设置参数，在 MATLAB 下进行仿真，得到如图 3-6 和 3-7 所示仿真结果：

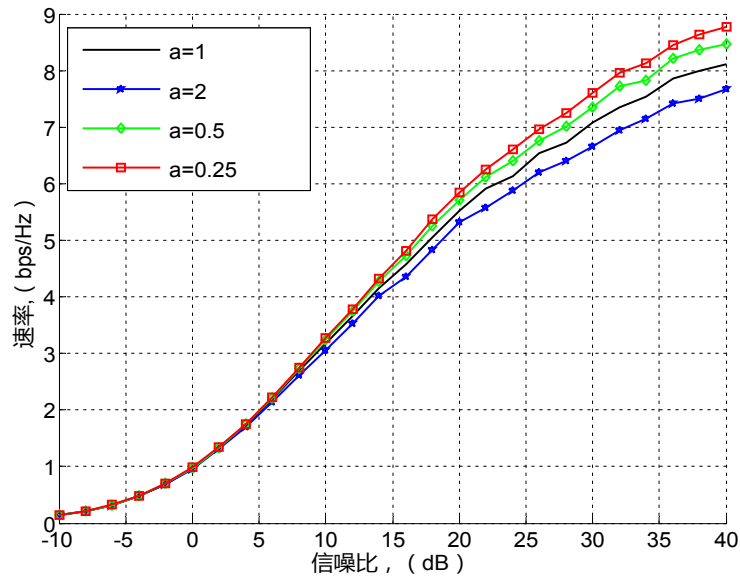
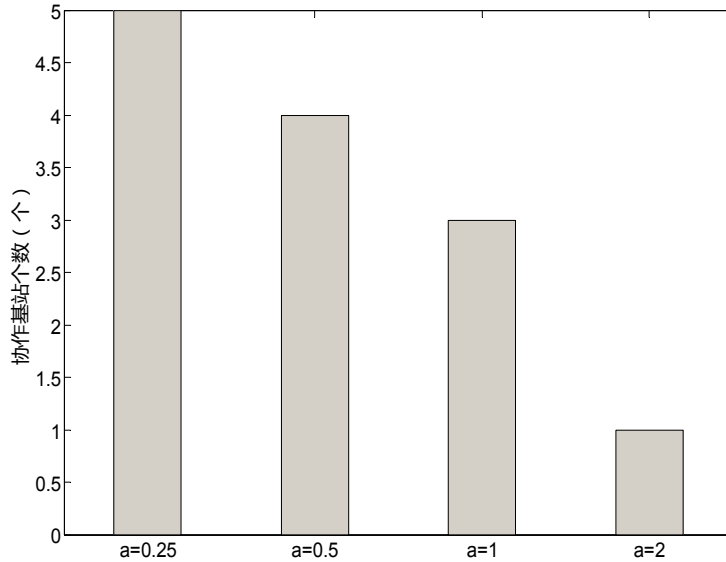

 图 3-6 改变权重 a 得到的不同阈值对应的协作传输速率

 图 3-7 不同 m 值对应的协作基站个数柱形图

图 3-6 和 3-7 表示了改变权重 a 后，不同阈值下接收端传输速率的变化曲线和选择的协作基站个数柱形图。从仿真图 3-6 可以看出，随着 a 值由 0.25 变化到 2 的过程中，目标用户的协作传输速率也逐渐变大。结合不同 a 值对应的协作基站个数柱形图可以看出，当 $a=0.25$ 时，满足设置阈值的协作基站个数为 5 个；当 $a=2$ 时，满足条件的协作基站个数为 1 个，也就是只有目标用户的主服务基站为其传输数据，并没有在周围小区中选择出满足条件的基站参与协作，结合(3-15)式，可以分析出当 $a=2$ 时，阈值变大，周围小区中基站的信号强度都小于此设置的阈值，只能由用户的主基站为其服务。所以可以得出，参与协作的基站越多，对系统性能的提升就越大。但有参与协作的基站数越多，基站间交互的数据量就越大，负担也会越重。因此，需要结合 X2 接口的开销和实际情况，找到一个合

适的阈值，可以使参与协作的基站数目适中，同时可以提高系统的传输性能，又不至于导致很大的开销。从上文中的理论验证仿真过程中，可以进行估测，当设置 α 值在(0.5-1]之间时，选择出的协作基站个数为 3 个比较适中，且传输速率大于只有一个主服务基站为目标用户传输数据的情况，所以可以参考本文理论仿真进行阈值设置。

3.3 本章小结

第 3 章通过分析目前基站分簇方法的不足，提出了基于异构网络设定阈值的分簇方法，该方法实现较简单、适用性较好。仿真结果表明，通过设定功率阈值可以提高协作小区边缘用户的传输速率，并且基站分簇算法不受预编码方式的影响，同时验证了协作传输能显著提高系统的传输速率。但由于阈值法基于全局考虑，并且需要实时获取系统中所有基站的 CSI，对系统要求极高，所以，可以通过目标用户获得的系统中所有基站的 CSI 信息，选择满足条件的部分基站存入待选集合，每次目标用户从这些待选集合中选择基站进行协作。

第 4 章 分步法基站分簇方案

分步基站分簇方法是在第 3 章提出的阈值方法为指导，在单小区多基站异构系统中进行小区内的基站分簇。该方法是以缩小基站选择范围进行分簇为考虑前提，首先依据期望用户受到的除主服务基站之外的其余基站的信号干扰强度，确定待分簇基站集合；然后根据期望用户接收到待选集合中各个基站的信号强度，确定最终参与协作的基站集合。该方法同时考虑系统中有用信号的信号强度和干扰信号强度，最大限度的提高系统的性能。

4.1 分步法基站分簇方法

4.1.1 系统数学模型

根据 2-10 和 2-11 建立的多小区异构网络模型，现考虑多基站异构网络下行传输系统，目标边缘用户处于第 m 小区，第 i 个微站覆盖范围内，为 K 个用户中的第 j 个，那么该用户 K_{mij} 接收到的各个基站信号强度为：

$$\begin{aligned}
 P_{mij} = & \underbrace{P_N \cdot (h_{mij}^N) \cdot (w_{mij}^N) \cdot s_{mij}^N}_{\text{所在微小区有用信号}} + \underbrace{P_M \cdot (H_{mij}^M) \cdot (w_{mij}^M) \cdot s_{mij}^M}_{\text{所在小区的宏基站干扰信号}} + \underbrace{P_N \cdot \sum_{L=1, L \neq i}^L (h_{Lj}^L) \cdot (w_{Lj}^L) \cdot s_{Lj}^L}_{\text{所在小区微基站干扰信号}} \\
 & + \underbrace{P_M \cdot \sum_{M=1, M \neq m}^M (H_{Mij}) \cdot (w_{Mij}) \cdot s_{Mij}}_{\text{小区间的宏基干扰信号}} + \underbrace{P_N \cdot \sum_{M=1, M \neq m}^M \sum_{L=1, L \neq i}^L (h_{MLj}^{ML}) \cdot (w_{MLj}^{ML}) \cdot s_{MLj}^{ML}}_{\text{小区间的微基站干扰信号}} + \underbrace{N_{mij}}_{\text{加性噪声}}
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

在式(4-1)中， $H_{mij}^M \in \mathfrak{R}^{M_T \times M_R}$ 表示处于小区 m 中的宏基站和用户之间的信道矩阵， $w_{mij}^M \in \mathfrak{R}^{M_T \times M_R}$ 表示针对用户 K_{mij} 设计的预编码矩阵， s_{mij}^M 表示处于小区 m 中的宏基站向用户发送的信号， $E[\|s_{mij}^M\|^2] = 1$ 。 $h_{mij}^N \in \mathfrak{R}^{M_F \times M_R}$ 表示处于微基站 L_{mi} 与用户之间传输数据的信道矩阵， w_{mij}^N 表示针对用户 K_{mij} 设计的预编码矩阵， s_{mij}^N 表示微基站 L_{mi} 向用户发送的数据流。 $h_{Lj}^L \in \mathfrak{R}^{M_F \times M_R}$ 表示用户接收到该小区 m 中的非 L_{mi} 微基站发送数据的信道矩阵， w_{Lj}^L 表示针对用户设计的预编码矩阵， s_{Lj}^L 表示向用户发送的数据流。 $H_{Mij} \in \mathfrak{R}^{M_T \times M_R}$ 表示用户接收非小区 m 中的宏基站

发送信息的信道矩阵， w_{Mij} 表示预编码矩阵， s_{Mij} 表示向用户发送的数据流。

$h_{MLj}^{ML} \in \mathfrak{R}^{M_F \times M_R}$ 表示用户接收到非 m 小区的微基站发送数据的信道矩阵， w_{MLj}^{ML} 表示预编码矩阵， s_{MLj}^{ML} 表示基站向用户发送的数据流。 N_{mij} 为信号传输过程中均值为 0，方差为 1 的高斯白噪声。

那么，用户 K_{mij} 接收信号的信干噪比（SINR）为：

$$SINR_{mij} = \frac{P_N \cdot \|h_{mij}^N \cdot w_{mij}^N\|^2}{P_M \cdot (\|H_{mij}^M \cdot w_{mij}^M\|^2 + \sum_{M=1, M \neq m}^M \|H_{Mij} \cdot w_{Mij}\|^2) + P_N \cdot \sum_{M=1, M \neq m}^M \sum_{L=1, L \neq i}^L \|h_{MLj}^{ML} \cdot w_{MLj}^{ML}\|^2 + \alpha_{mij}^2} \quad (4-2)$$

用户 K_{mij} 的信号接收速率为：

$$rate_{mij} = Blb (1 + SINR_{mij}) = Blb (1 + \frac{P_N \cdot \|h_{mij}^N \cdot w_{mij}^N\|^2}{P_{hr} + P_{wr} + N_{mij}}) \quad (4-3)$$

在式(4-3)中，

$$P_{hr} = P_M \cdot (\|H_{mij}^M \cdot w_{mij}^M\|^2 + \sum_{M=1, M \neq m}^M \|H_{Mij} \cdot w_{Mij}\|^2) \quad (4-4)$$

$$P_{wr} = P_N \cdot \sum_{M=1, M \neq m}^M \sum_{L=1, L \neq i}^L \|h_{MLj}^{ML} \cdot w_{MLj}^{ML}\|^2 \quad (4-5)$$

在分步基站分簇方法中，把期望用户所处小区的基站 L_{mi} 作为其主服务基站，在单小区中，通过分步法，选择可以与目标用户所处小区的基站协作的微站。分步协作基站分簇方法是通过确定协作集合的方式，找到可以协作的 A 个基站，这 A 个满足分簇方法的基站和用户的主服务基站共同为用户传输数据。在本文中进行微站的协作基站分簇。所以，根据图 2-2 中描述的协作传输过程图，用户端反馈信息所到的基站控制器为宏站中结构单元，宏站再通过毫米波技术与微站之间进行协作信令的传输，通知相应的微站协作为用户服务^[51,52]。

4.1.2 分步法分簇过程

在协作基站选择过程中，用集合 B_L 表示小区内所有微基站集合；用 B_{1CP} 表示待选协作基站集合，用 B_{CP} 表示最终的协作集合。初始状态， $B_L = \{1, 2, \dots, L\}$ ， $B_{1CP} = \Phi$ ， $B_{CP} = \Phi$ 。分步协作基站分簇步骤如下：

第一步：分析用户 K_{mij} 的主服务基站 L_{mi} 和其余基站分别进行协作得到协作簇后，非簇中基站对协作簇的干扰情况，选出干扰值最小的基站集合，并将基站编

号存入待选协作基站集合 $B_{(L)}$ 。

(1)考虑到用户 K_{mij} 的主基站 L_{mi} 以广播形式发送数据，为消除多用户干扰，信号首先在基站端进行预编码。因此，主基站发送信号形式为：

$$s = s_{mij} \cdot w_{mij} \cdot h_{mij} + s_1 \cdot w_1 \cdot h_{mij} + \dots + s_{K-1} \cdot w_{(K-1)} \cdot h_{mij} \quad (4-6)$$

式 (4-6) 表示了微基站 L_{mi} 向小区中其它用户发送的数据信号也经过信道 h_{mij} 到达用户 K_{mij} 。其中， $s_{mij}, s_1, \dots, s_{(K-1)}$ 分别表示用户 $j, 1, \dots, K-1$ 的请求数据流， $w_{mij}, w_1, \dots, w_{(K-1)}$ 表示相应用户 $j, 1, \dots, K-1$ 的预编码矩阵。

本文用信干噪比表示用户的主服务基站和每个非主服务基站协作形成的协作簇受到的干扰大小。因此用户的主服务基站和每个非主服务基站进行协作传输时，期望用户受到的信干噪比集合为：

$$G_{g-r} = \{G_{g-r_1}, G_{g-r_2}, \dots, G_{g-r_p}, \dots, G_{g-r_{L-1}}\} \quad (4-7)$$

其中：

$$G_{g-r_p} = \frac{P_N \cdot \|H_{mij} \cdot W_{mij} + H_{mij} \cdot W_{mpj}\|^2}{\sum_{v=1, v \neq L_{mi}, v \neq p}^L P_N \cdot \|H_{mvj}\|^2} \quad (4-8)$$

这里， p 表示非 L_{mi} 基站，式 (4-8) 表示除去主服务基站之外的每个基站和主基站协作时受到的剩余基站的干扰情况。

(2)对计算得到的信干噪比大小进行排序，得出由大到小排列的干扰集合：

$$G_{p-x} = \{G_{g-r_{e_1}}, \dots, G_{g-r_{e_{L-1}}}\} \quad (4-9)$$

相应的基站编号集合：

$$B_{b-h} = \{e_1, e_2, \dots, e_{L-1}\} \quad (4-10)$$

从集合 G_{gr} 中选出较大的 e_c 个基站，并将它们的编号存入待选集合 B_{1CP} 。

此时待选集合为：

$$B_{1CP} = \{e_1, \dots, e_c\} \text{ 且 } 1 \leq A < e_c < L \quad (4-11)$$

初始集合变为：

$$B_L = \{1, 2, \dots, M\} \text{ 且 } M = L - e_c \quad (4-12)$$

此时，协作集和 B_{1CP} 不再是空集，其集合元素就为式 (4-10) 中得到的待选基站编号。

第二步：分析用户 K_{mij} 接收到集合 B_{1CP} 中的基站信号强度大小，最终选出 A 个可以协作的基站，并将编号存入最终集合 B_{CP} 。

(1)由于无线传输环境复杂,大尺度衰落和小尺度衰落都会造成基站发送信号强度发生衰减。因此,考虑衰落对期望用户接收信号强度的影响,计算期望用户接收到来自初始待选集合 B_{1CP} 中的发送信号强度,并将强度值存入集合 p_{q-d} , 那么:

$$P_{q-d} = \{P_{q-d_1}, \dots, P_{q-d_p}, \dots, P_{q-d_{e_c}}\} \quad (4-13)$$

计算得:

$$p_{q-d_p} = P_N \cdot \left\| \sum_{p=1}^{e_c} W_{mpj} \cdot H_{mpj} \right\|^2 \quad (4-14)$$

(2)对得到的信号强度进行排序,得出由大到小排列的信号强度集合:

$$p_{p-x} = \{P_{q-d_{f_1}}, P_{q-d_{f_2}}, \dots, P_{q-d_{f_{e_c}}}\} \quad (4-15)$$

相应的基站编号:

$$B_{q-d}^{b-h} = \{f_1, f_2, \dots, f_{e_c}\} \quad (4-16)$$

从集合 B_{q-d}^{b-h} 中选出 A 个信号强度最大的基站存入集合 B_{CP} ,

那么,最终得出的有 A 个基站的可以参与协作的基站集合:

$$B_{CP} = \{f_1, \dots, f_A\} \quad (4-17)$$

由(4-2)式可得协作后的接收端信干噪比为:

$$SNR_{c-p} = \frac{P_{mij} + (P_{f_1} + \dots + P_{f_A})}{P_N \cdot (\|h_{mij} \cdot w_{mij}\|^2 + \dots + \|h_{mij} \cdot w_{m1j}\|^2 + \dots + \|h_{mij} \cdot w_{m(L-1)j}\|^2) - (P_{f_1} + \dots + P_{f_A}) + \alpha^2} \quad (4-18)$$

分步基站分簇方法同时考虑到系统中非主服务基站发送信号强度对期望用户的影响以及非主服务基站对协作簇的干扰大小,能最大限度提升系统性能。

4.2 系统性能仿真

结合表 3-1 中的仿真参数,在 MATLAB 中进行仿真实验验证。其中小区拓扑结构为单小区,基站的发送天线数也将在仿真图中进行详细表示。基于第三章阈值分簇方法中对参与协作基站个数对协作传输速率的影响分析,在分步协作基站分簇中设置 $A=2$,也就是找到除主服务基站之外的 2 个基站进行基站分簇为边缘用户共同传输数据。以协作后接收端传输速率 R_{C-P} 随信噪比 SNR 变化情况进行性能分析。仿真图 4-1 是设置宏基站发送天线数 $M_T = 2$,微基站天线数 $M_F = 1$,微基站个数 $L = 10$ 时,比较现有接收功率最大法、第三章所提阈值法和本文提出的分步法得出的接收端协作传输速率的变化曲线。

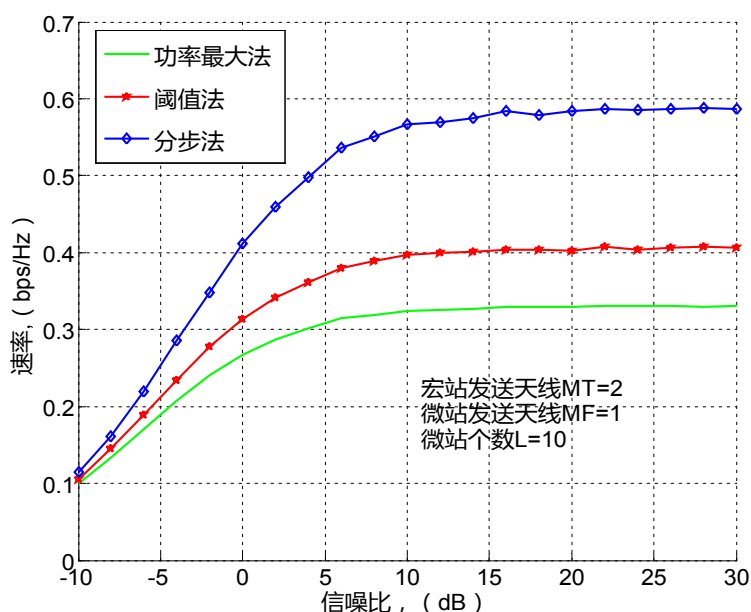


图 4-1 不同分簇方法下的传输速率变化曲线

从曲线变化可以看出，本文提出的分步法得到的接收端传输速率较高。在已提出的接受功率最大方法中，是用户的主服务基站和接收到相邻基站中信号强度最大的基站之间协作，但是没考虑周围基站的干扰影响。阈值法是通过设置接收信号强度阈值来选择高于该阈值的基站进行协作，当从 L 个微基站中选出可以协作的基站时，选择出的满足条件的基站协作后，传输速率小于分步法得到的传输速率，这是由于阈值法选择出的基站个数对接收端传输速率造成的影响，因此也使得阈值法和功率最大法得到的接收端传输速率较小。由仿真曲线的变化趋势可以看出，当 $SNR = 15dB$ 左右时，本文方法的 R_{C-P} 基本达到最大，以后的变化趋于稳定变化；而另两种方法是在 $SNR = 10dB$ 时 R_{C-P} 达到最大，以后趋于稳定变，即使再提高信噪比，接收端传输速率也不会有明显变化。本文方法得到的协作传输速率最大值约为 $0.58bps/Hz$ ，其余两种方法得到的 R_{C-P} 大约为 $0.4bps/Hz$ 和 $0.32bps/Hz$ ，虽然协作传输速率较早趋于稳定，但最大协作传输速率 R_{C-P} 都小于 $0.58bps/Hz$ 。所以，由仿真图 4-1 可以看出，在信噪比小于 $15dB$ 时，分步法得到的传输速率随着信噪比增加会显著提高。

目前，多天线技术的采用，能显著提升信道容量，仿真图 4-2 描述分析了基站天线数改变后，三种方法的传输速率变化情况。图 4-2 中表示的是当基站多天线发送，即宏基站发送天线数 $M_T = 8$ ，微基站发送天线数 $M_F = 2$ 时，得到不同分簇方法下的接收端传输速率变化曲线，从曲线变化趋势可以得出，本文方法得到的协作传输速率最大，系统性能最好。并且比较图 4-1 中传输速率变化情况，在该设置场景下，三种方法得出的 R_{C-P} 达到最大并趋于稳定变化时的 SNR 与图 4-1

中的变化趋势相同,分别是 $SNR = 10dB$ 和 $SNR = 15dB$ 时 R_{C-P} 有最大值并在以后趋于稳定变化。但是,在相同 SNR 值下,三种方法对应的 R_{C-P} 都小于图 4-1 中对应的协作速率,其中本文方法中最大协作传输速率 R_{C-P} 约为 0.46bps/Hz;最大功率法和阈值法得到的 R_{C-P} 约为 0.24bps/Hz 和 0.23bps/Hz,并且后两种方法得到的协作传输速率曲线之间的差距变小。比较图 4-1 中的情况,传输速率都变小主要是由于天线数增多,每根天线等功率发送后,非协作集合中的基站发送的干扰信号功率增加,并且增加的总和大于有效信号功率增加总和,使得信干噪比 $SINR_{c-p}$ 降低,接收端协作速率 R_{C-P} 变小。由图 4-1 和图 4-2 可以得出,基站端发送天线的个数影响协作后传输速率,并且随着天线数增多, R_{C-P} 变小。

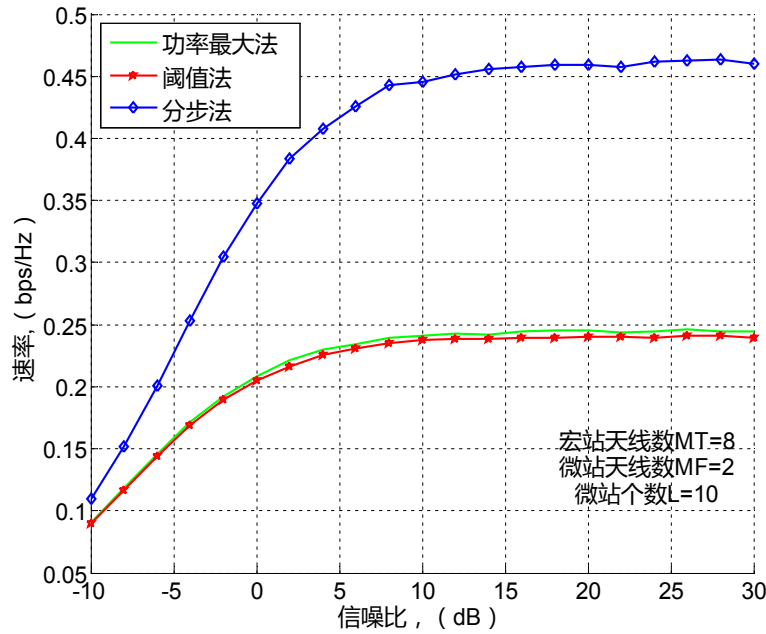


图 4-2 改变发送天线数后传输速率变化曲线

基站个数会影响最终选择的可以协作的协作传输速率情况,仿真图 4-3 是通过改变系统中基站个数,随着得到的系统中基站个数增加后,三种方法对应的传输速率的变化情况。仿真图 4-3 是在宏基站发送天线数 $M_T = 2$,微基站发送天线数,系统中基站个数分别为 $L = 15$ 和 $L = 20$ 时三种分簇方法对应的协作传输速率变化曲线。从图中可以看出, $L = 15$, $e_c = 5$ 时,得到的协作传输速率 R_{C-P} 最大,但是当 L 增加,待选基站个数 e_c 增加时,协作速率降低,这是由于基站个数增加,在选择出可以协作的基站 A 后,剩余基站产生的干扰增加,致使信干噪比 $SINR_{c-p}$ 减小,所以协作速率降低。阈值法速率曲线位于 $L = 15$ 和 $L = 20$ 时的分步法速率曲线之间,并且阈值法得到的协作速率值也是随着 L 的增加而减小的,同时说明阈值法在基站个数较少时比分步法有优势。从曲线的变化趋势可以看出,当

$SNR \geq 10dB$ 时三种方法的协作传输速率 R_{C-P} 逐渐趋于稳定；由仿真图 4-1 和 4-3 可知，系统中的基站个数影响协作后传输速率的大小，并且当系统中基站的个数较少时，本文提出的方法性能比较好。

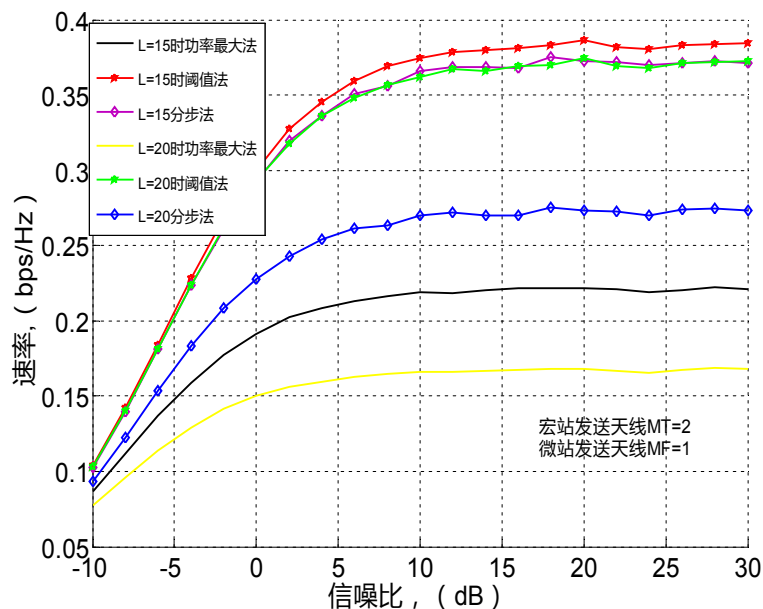


图 4-3 改变基站数后的传输速率变化曲线

由 4-3 可知，基站个数会影响接收端传输速率，分步法需要进行两次选择得到最终的协作基站集合。所以，仿真图 4-4 分析了改变待选集合 B_{ICP} 中基站个数 e_c 的值，分步法得到的协作传输速率变化情况。

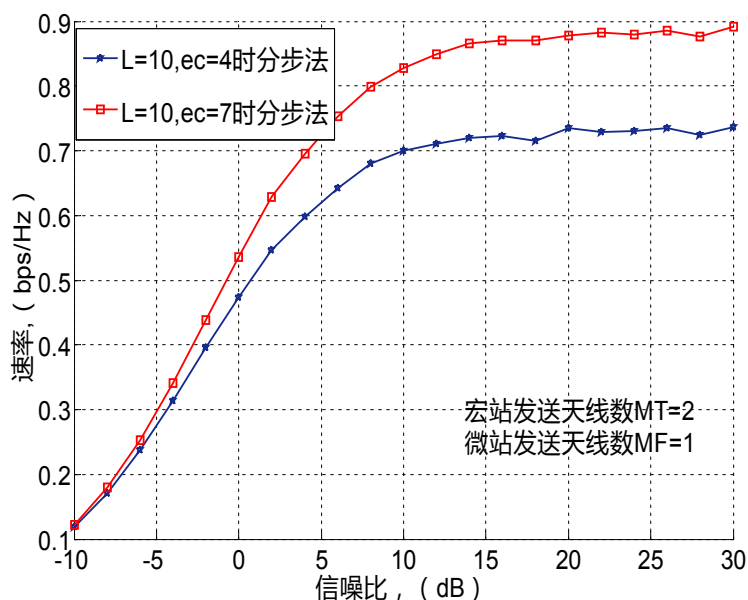


图 4-4 改变待选基站个数后传输速率变化

仿真图 4-4 是在系统中基站个数 $L=10$ 时，改变待选集合中基站个数 e_c 后得到的协作传输速率变化曲线。从仿真曲线中可以看出，待选集合中基站个数 $e_c=7$

时的速率曲线高于 $e_c = 4$ 时的速率曲线。这是由于待选集合中基站个数越多，可以选择的机会越大，那么能够选择的满足条件的可协作基站概率变大。由此可见待选集合的大小影响选择出的可协作基站的协作传输速率。

4.3 本章小结

第 4 章详细介绍了分步法进行协作基站选择的过程，该方法根据系统中基站的信道状态情况动态选择可以协作的基站，并把可以协作的基站编号反馈给用户的主服务基站。仿真结果表明，随着基站的发送天线个数增加，非协作簇中的干扰信号功率增加，使得接收端传输速率是降低的；而当系统中待选协作基站个数较少时，分步法获得的用户端传输速率高于现有方法，有较好的系统性能。

第 5 章 结论与展望

5.1 总结

随着宽带数据用户、移动通信用户的不断迅速发展，窄带语音通信向宽带高速数据通信发展的趋势，如何在一定频谱资源上更好的提高网络容量、在一定的站点数目下更高的提升网络覆盖能力，成为将来通信网络建设需要重点考虑的问题。随着移动流量需求的增加，在今后将部署更多的低功率节点来达到小区深度覆盖，低功率节点的部署还可以拉近用户和基站之间的距离，平衡宏微之间的负载，成为今后网络部署的发展方向。异构网络的部署带来严重的小区间干扰，为消除小区间干扰，提升边缘频谱效率，提出了多点协作传输技术。通过接收来自不同物理小区的多个天线/站点的信号来增强信号质量，减小小区间干扰。协作多点传输技术能够有效解决由于载频提高导致小区面积较小，进而带来的频繁切换问题，这样，用户在服务小区簇内移动时，就不需进行切换。

本文通过阅读大量国内外相关文献，分析了基站分簇方法的研究现状以及当前的研究热点，针对可能存在的待研究问题和创新点进行了分析，针对异构网络的组网结构，利用协作多点 CoMP 传输理论，提出了两种基站分簇方法。基站分簇方法是以最大化接收端传输速率为目标，通过把干扰信号转变为有效信号共同为用户传输有效信号的方式，来达到干扰利用的目的。

首先，介绍了目前已有基站分簇方法，对其中的局限性进行了分析，提出了两种基站分簇方法，同时建立了基于坐标位置信息的多小区异构网络模型进行系统性能的分析。两种分簇方法主要基于全局考虑，对系统中的主要影响因素如基站个数、各个基站干扰等进行综合分析，计算方法简单，参数易于测量，能显著降低协作过程中需要传输的信令开销问题。

阈值基站分簇方法，是以最大化接收端传输速率为目标，通过选择满足设定阈值的基站进行协作，形成基站簇。该方法以目标边缘用户为研究对象，综合考虑系统中的基站个数、目标边缘用户所属服务基站的信号强度以及周围基站的干扰大小，通过在文中对距离最近法和阈值法对系统性能的影响进行仿真和比较，得出本文方法比基于全局的分簇方法——最近基站法（Nearest Bases Clustering）具有更好的系统性能，因为最近基站法是通过选择距离最近（通过信号强度最大表现）的基站加入协作簇，具有一定局限性。实际信号的传输受到环境因素、噪声的实时影响，距离基站最近的用户接收到的信号质量可能不是最佳的。

但由于阈值法基于全局考虑，并且需要实时获取系统中所有基站的 CSI，对

系统要求极高,所以,可以通过目标用户获得的系统中所有基站的长期 CSI 信息,选择满足条件的部分基站存入待选集合,每次目标用户从这些待选集合中选择基站进行协作。

分步基站分簇方法首先依据期望用户受到的除主服务基站之外的其余基站的信号干扰强度,确定待分簇基站集合;然后根据期望用户接收到待选集合中各个基站的信号强度,确定最终参与协作的基站集合。该方法同时考虑系统中有用信号的信号强度和干扰信号强度,最大限度的提高系统的性能。

5.2 展望

目前,4G 技术已进入商用阶段,面向 2020 年及未来的第五代移动通信(5G)也已成为全球研究的热点。这其中包括欧盟 METIS、中国 IMT-2020(5G)推进组、韩国 5G 论坛、日本 ARIB 等 5G 研究组织,已经开始了对 5G 技术的标准化、关键技术、频谱规划等方面的前瞻性研究。预计 2016 年将启动国际标准制定工作,2018 年会有一个初步的 5G 标准推出。中国 IMT-2020(5G)推进组在 2013 年制定了 5G 概念白皮书。5G 将是在 LTE 演进再加上一些新技术,是 4G 技术的演进,其创新主要来源于无线技术、网络技术两个方面。其中在无线技术领域中,大规模天线、超密集组网、新型多址、全频谱接入等成为业界关注焦点;基于软件定义网络(Software Defined Network, SDN)和网络功能虚拟化(Network Functions Virtualization, NFV)的新型网络架构将是网络技术方面的研究创新。但是,一些芯片厂商认为,目前的 LTE 网络还未处于一个最佳状态,其网络潜力还待充分挖掘,其网络性能还需进一步优化,在推出 5G 之前,首先对 4G LTE 网络进行完善,在不断优化中,进一步提升网络速率。因此,论文对 LTE 系统中的异构网络和协作多点传输技术进行了研究。

在论文的研究分析中,由于需要获得信道状态信息,并根据 CSI 进行进一步的计算,所以,本文中的研究是以用户端能准确获得本小区基站和周围小区基站的信道状态信息,同时能准确估计、无延时反馈到基站端为基础进行模型的简化分析和讨论,仿真模型以分层的圆形拓扑结构为系统模型,相比较理想的蜂窝结构,本文中建立的网络模型更接近实际的异构组网结构,结果具有一定的理论依据。但是由于时间和水平的有限,研究工作还不够完善,也还有许多问题需要考虑和研究,今后可以在以下几方面进行进一步的研究:

(1)实际传输环境的复杂多变,反射、折射等多径传输的影响都会使得基站分簇结果存在一定误差。因此,建立更接近实际的信道传输模型是需要进一步研究的课题。并且由于基站分簇过程中需要考虑全局基站的信号强度影响,信令开销还是比较大的,因此,进一步减小信令开销,减小延迟是需要在基站协作中进一

步讨论的研究热点。

(2)实际网络环境中存在多个用户，并且用户可能是以不同的速度不断移动的，用户个数、移动速度大小都会影响信道状态信息，因此，在这种情况下如何进行多用户的联合预编码消除小区间干扰、用户间干扰是需要进行更深的讨论和研究的。

(3)本文讨论的基站分簇情形没有考虑基站簇有重叠的情况，而在实际中，由于基站所处位置的影响，当进行基站分簇后，会存在有些基站同时在多个基站簇的情形，而这种当基站簇有重叠时，在重叠区域部分的用户如何选择小区簇、预编码矩阵的设计等方面，都需要进一步详细考虑和分析。

参考文献

- [1] 王映民, 孙韶辉. TD-LTE-Advanced 移动通信系统设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012
- [2] 孙宇彤. LTE 教程: 原理与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014
- [3] IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2015
- [4] 陶小峰, 崔琪楣, 许晓东, 等. 4G/B4G 关键技术及系统[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011
- [5] 黄诗晴. LTE-Advanced 系统中基于簇结构的多小区协作研究[D]. 武汉理工大学, 2012
- [6] M Dehghani, K Arshad, R MacKenzie. LTE-Advanced Radio Access Enhancement: A Survey[J]. Wireless Pers Commun, 2015, 80: 891-921
- [7] 姜伟. LTE-A 中协作多点传输的方案研究[J]. 微型机与应用, 2014, 33(2): 55-59
- [8] 赵培, 周胜, 高鹏. 小区分簇方法在 3G 网络规划与优化中的应用[J]. 邮电设计技术, 2009, (9): 6-10
- [9] Boccaedi F, Huang H. Limited downlink network coordination in cellular networks[C]. Proceedings of IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, 2007
- [10] Venkatesan S. Coordinating base stations for greater uplink spectral efficiency in a cellular network[C]. Proceedings of IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, 2007
- [11] Papadogiannis A, Gesbert D, Hardouin E. A dynamic clustering approach in wireless networks with multi-cell cooperative processing[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Beijing, China, 2008
- [12] Liu J X, Wang D M. An improved dynamic clustering algorithm for multi-user distributed antenna system[J]. Proceedings of the Wireless Communications & Signal Processing, Nanjing, China, 2009
- [13] Zhou S, Gong J, Niu Z S, et al. A decentralized framework for dynamic downlink base station cooperation[C]. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, Honolulu, Hawaii, USA, 2009: 1-6
- [14] 李坤, 黄开枝, 鲁国英, 等. 基于平均信干比增益的基站群分簇模型[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(12): 4699-4702
- [15] 黄开枝, 郑丽清, 李坤, 等. 基于协同度的基站群利益树动态分簇算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1469-1475
- [16] 郑丽清. 协同基站群的动态分簇算法研究[D]. 解放军信息工程大学, 2012
- [17] Boccardi F, Huang H. Limited Downlink Network Coordination in Cellular Networks [C]. in Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC)Athens, Greece, 2007: 1-5
- [18] Ng C T K, Huang H. Linear Precoding in Cooperative MIMO Cellular Networks with Limited Coordination Clusters [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, R(91): 1446-1454
- [19] Zhang J, Chen R, Andrews J. Networked MIMO with Clustered Linear

-
- Precoding [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1910-1921
- [20] Feng M, She X, Chen I, et al. Enhanced Dynamic Cell Selection with Muting Scheme for DL.CoMP in LTE-A[C]. in Proceedings of the IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC). Taipei Taiwan, 2010: 1-5
- [21] Jiang W Z, Zhang X. Base station cooperation based on location-aided in cellular system [C]. in Proceedings of the Electrical and Computer Engineering(CCECE), Canadian, 2009: 157-160
- [22] Kamoun M, Mazet I. Base-station selection in cooperative single frequency cellular network[C]. in Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications(SPAWC), Helsinki, Finland, 2007
- [23] Wang L, Yeh C. Cell grouping and autonomous channel assignment for cooperative multi-cell MIMO systems[C]. in Proceedings of the 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Istanbul, Turkey, 2010: 1432-1436
- [24] Wang L, Yeh C. A Three-Cell Coordinated Network MIMO with Frequency Reuse and Directional Antennas[C]. in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Dresden, Germany, 2009: 1-5
- [25] Seki Y, Takyu O, Umeda Y. Performance evaluation of user selection based on average SNR in base station cooperation multi-user MIMO[C]. in Proceedings of the Radio and Wireless Symposium(RWS), New Orleans, LA, 2010: 685-688
- [26] 肖海林, 王 鹏, 聂在平, 等. 基于遗传算法的多基站协作通信功率分配方案[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(1): 26-41
- [27] Papadogiannis A, Hardouin E, Gesbert D A. Framework for Decentralising Multi-Cell Cooperative Processing on the Downlink [C]. in Proceedings of the Global Telecommunications Conference(GLOBECOM), New Orleans, LA, USA, 2008: 1-5
- [28] Gupta P, Vishwannath A, Kalyanaraman S, et.al. Unlocking Wireless Performance with Co-operation in Co-located Base Station Pools[C]. in Proceedings of the Second International Conference on Communication Systems and Networks(COMSNETS), Bangalore, India, 2010: 1-8
- [29] 孙璨, 杨晨阳. 下行多点协作传输系统中基于大尺度信道的协作用户选择[J]. 信号处理, 2011, 10: 1489-1497
- [30] Dhillon H S, Ganti R K, Baccelli F, et al. Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 550-560
- [31] TS36.300 Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA)and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network(E-UTRAN): Overall description[S]. 3GPP Std. Rev.10.11.0, 2013
- [32] (韩) 尹圣君等著, 张鸿涛等译. LTE 及 LTE-Advanced 无线协议[M]. 机械工业出版社, 2015
- [33] Peng Tian, Hui Tian, Liqi Gao, et al. Deployment analysis and optimization of Macro-Pico heterogeneous networks in LTE-A system[J]. International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2012, 53(10): 3413-3431
- [34] 3GPP TS25.469(V9.1.0): UTRAN Intra interference Home NodeB(HNB)

- Application Part(HNBAP)signaling[S]: 2010
- [35] Chandrasekhar V, Andrews G. Femtocell Networks:A Survey[J]. IEEE Communication Magazine, 2008, 46(9): 59-69
- [36] TR36.814 Further Advancements for E-UTRA:Physical Layer Aspects[S]. 3GPP Std, Rev.2.0.0, March: 2010
- [37] 科讯广电网 alina. 微基站: 专为 LTE 深度覆盖而生 [OL]. <http://bc.tech-ex.com/2014/tbusiness/57727.html>, 2014
- [38] S Deb, P Monogioudis, J Miernik, et al. Algorithms for Enhanced Inter-Cell Interference Coordination in LTE Hetnets[J]. IEEE Acm Transactions on networks, 2014.(1): 137-150
- [39] Daewon Lee, Hanbyul Seo, Bruno Clerckx, et al. Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE-Advanced:Deployment Scenarios and Operational Challenges.LTE-Advanced and 4G wireless communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2012: 148-155
- [40] 张琛, 栗欣, 王文清, 等. 异构网络跨层协作传输技术研究[J]. 通信学报, 2014.35(8): 198-205
- [41] 金颖妮. 基于 3GPP LTE 的 MIMO 信道建模与信道测量[D]. 华东师范大学, 2010
- [42] Teletar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. European Transactions on Telecommunications[EB]. 1999, 10(6): 585-595
- [43] (美)洪乐文, 黄苑珍, 郭宗杰著, 徐平平, 田锦等译. 协作通信与网络:技术与系统设计[M]. 东南大学出版社, 2014
- [44] 中国通信建设集团设计院有限公司. 4G 丛书:LTE 组网与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014
- [45] Hong Y W, Scaglione A. Energy-efficient broadcasting with cooperative transmissions in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(10): 2844-2855
- [46] Goldsmith A. Wireless Communications[M]. Cambridge University Press. 2005
- [47] Scaglione A, Goeckel D L, Laneman J N. Cooperative communications in mobile adhoc networks.Rethinking the link abstraction[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(15): 18-29
- [48] 王彦龙. LTE/LTE-Advanced 系统异构网中的无线资源管理技术研究[D]. 北京邮电大学, 2013
- [49] 增加生, 田宝玉. MU-MIMO THP 预编码技术的研究[EB/OL]. (2011-11-15). [2015-11-10]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201111-260>
- [50] 祁美娟. MIMO 系统中预编码技术研究[D]. 重庆大学, 2012
- [51] 李远东. 5G 毫米波通信网络架构及平台[R]. 上海科学技术情报研究所. 2014
- [52] Geng Wu. 5G mm Wave Communication: Network Architectures and Platforms [R]Tokyo: CEATEC Workshop 2014. 2014-10

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

（一）发表的学术论文及专利

- [1] 韩东升,丁莎莎,余萍.一种基于阈值的无线异构网络基站分簇方法[J].电信科学,2015,31(4): 2015086.
- [2] 一种异构网络中基于阈值的协作基站分簇方法。（发明专利）受理号：201510008978.8 第二发明人
- [3] 无线异构网络中的协作基站分簇方法和装置。（发明专利）受理号：201510698294.4 第二发明人
- [4] 赵振东,牛伟娇,韩东升,丁莎莎.异构无线网络中边缘用户小区选择算法[J].电信科学,2015,31(12):60-65.
- [5] 韩东升,袁华璐,丁莎莎,余萍.一种无线异构网络中的分步协作基站分簇方法[J].电信科学（已录用）

（二）参加的科研工作

- 1.国家自然科学基金：异构无线网络中协作多点 MIMO-OFDMA 传输技术方案及资源分配技术研究。项目编号：613021
- 2.南方电网横向项目：基于无线 MESH 的高压输电线路监测数据通信传输系统研究与应用。项目编号：CGY01XT0303140411
- 3.中央高校基本科研业务费专项资金资助项目：绿色通信系统中多基站协作关键技术研究。项目编号：2014MS100
- 4.河北省自然科学基金资助项目：一体化多基站协作 MIMO 联合资源分配技术研究。项目编号：F2014502029

致谢

时光飞逝，回想进入华北电力大学攻读硕士学位期间的点点滴滴，感触颇深，余生难忘。在这里，我要衷心的感谢我的导师余萍副教授和课题指导老师韩东升讲师在我学习和生活中给予的悉心指导、关心、帮助和支持。此时此刻，希望能用这朴素的话语，表达我内心的由衷感谢。

首先，衷心的感谢余萍老师在过去两年多的时间里教给我的诸多科学研究思想和方法，使我最终能顺利完成硕士学位论文。余老师严谨的治学态度、平易近人的态度，强大的人格魅力，都深深的感染着我，更是我学习的楷模，并将时刻激励着我要努力工作、刻苦钻研。余老师不仅细心指导我的学术专业知识，还经常用自己的人生经历教给我做人的道理，这些都让我受益匪浅，终生受用。感谢余老师在我学习和生活中给予的无私帮助，在今后的生活中，我将牢记余老师的谆谆教诲。再次向余老师表示最诚挚的谢意。

感谢韩东升讲师两年多来对我课题工作给予的无私帮助和悉心指导。正是您在课题研究方向上的悉心指导，才让我得以对课题进行学习和研究；正是您对我的严格要求和无私的支持、帮助，才促使我的文章顺利完成。每当我的课题遇到困难时，您都会为我指点迷津，为我讲解，鼓励我不要放弃，时刻对我充满信心，由衷的感谢韩老师对我论文研究给予的宝贵意见和对我的用心指导。韩老师执着不懈、精益求精的学术追求、敬业刻苦的治学态度都将是我一生学习的榜样。

感谢在实验室一起工作和学习的同学们，感谢他们在生活中给予真诚的帮助，他们刻苦努力的学术态度深深感染着我。感谢这个集体在这两年多时间里给我带来的欢乐与进步。

最后，感谢我的家人对我的支持和鼓励，不管我在生活、学习中遇到多大的困难，他们都一如既往的给我最大的支持。这两年多的学习生活中，他们都在各个方面给我信心和力量，感谢我的家人。

最后，再一次深深的感谢所有关心和帮助过我的师长、同学和家人！