



Y1865401

## 摘要

多点协作 (CoMP) 技术是 LTE-A 的关键技术之一, 能够显著提高小区吞吐量和边缘用户速率, 但是要实现 CoMP 传输, 基站需要获得协作区域内所有用户与基站间的全部信道信息。虽然信道信息的反馈可以使系统进行精确的资源调度以及良好的链路自适应来提高下行链路的性能, 但是反馈信息作为一种额外的开销, 占用了物理上行共享信道 (PUSCH) 的资源, 降低了上行链路的频谱效率。因此, 在基站可以获得精确的信道信息的前提下, 需要设计合理的反馈方案来降低系统的反馈量, 以及提高系统频谱效率。

文中简单介绍了 CoMP 相关技术, 主要研究了 CoMP 技术下的反馈机制, 并且针对现有反馈方案的不足, 提出了改进方案。在 CoMP 单用户多输入多输出 (SU-MIMO) 场景中设计了资源块分簇结合固定门限反馈方案, 在 CoMP 多用户多输入多输出 (MU-MIMO) 场景中设计了资源块择优处理结合基于中断概率预设门限的反馈方案。仿真结果表明, 这两种反馈方案与传统的反馈方案相比, 在系统吞吐量基本不变的情况下, 用户数较多时能明显减少系统反馈量。

**关键词:** LTE-A    多点协作    有限反馈    多输入多输出

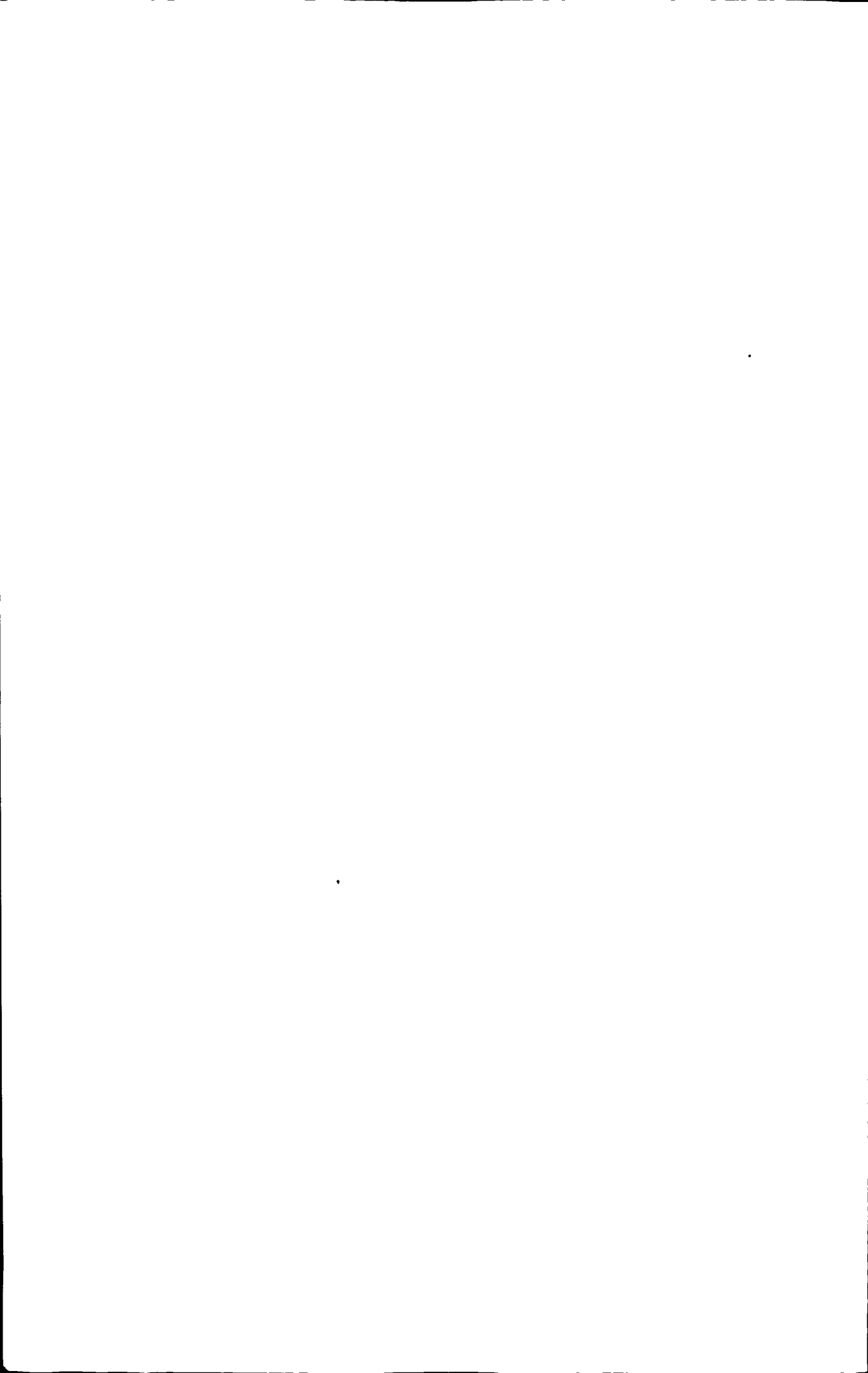


## Abstract

As a promising candidate technique of LTE-A, CoMP has potential benefit to improve the coverage of high data rates and to increase both the average cell throughput and cell edge user throughput. For a CoMP transmission, eNodeB needs to get all the channel information of the links between users and the cooperative cells, which is reported by UE. Channel feedback information is crucial for link adaptation and accurate scheduling. But as a system overhead, it consumes the resources of PUSCH, leading to poor frequency efficiency of Up-Link. Hence, it is necessary to design rational feedback scheme to reduce feedback overhead and then to increase the frequency efficiency given that eNodeB knows the accurate channel information.

In this thesis, the feedback mechanisms are investigated for CoMP systems. Specifically, we propose two novel limited feedback schemes with the extension of the traditional approaches. For a CoMP-SU-MIMO scenario, the clustered and fixed threshold SNR limited feedback scheme is developed. While for the CoMP-MU-MIMO model, the best feedback physical resource blocks are chosen and dynamic threshold SNR is selected under the criteria of outage probability. Simulation results demonstrate that the proposed schemes can reduce the feedback greatly in contrast to the traditional algorithm, but merely sacrifice little capacity degradation under heavy load.

**Keywords:** LTE-A   CoMP   Limited feedback   MIMO



# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 研究现状.....	2
1.3 本文研究目的及意义.....	3
1.4 本文研究内容及章节安排.....	4
第二章 CoMP 基本原理.....	7
2.1 CoMP 概述.....	7
2.1.1 CoMP 基本概念.....	7
2.1.2 CoMP 系统模型.....	7
2.1.3 CoMP 的分类.....	8
2.2 CoMP 协作簇选择.....	12
2.3 CoMP 基本传输方案.....	13
2.4 CoMP 反馈机制.....	16
2.4.1 CoMP 反馈机制的分类.....	16
2.4.2 CoMP 反馈结构设计原则.....	17
2.5 本章小结.....	18
第三章 CoMP-SU-MIMO 有限反馈方案设计.....	19
3.1 引言.....	19
3.2 系统模型.....	20
3.2.1 可变服务集合.....	21
3.2.2 选择协作簇.....	22
3.2.3 建立系统模型.....	23
3.3 传输链路信息 SNR 计算.....	25
3.4 协作传输结构 (TPCC 结构).....	26
3.5 有限反馈方案设计.....	28
3.5.1 资源块分簇.....	29
3.5.2 门限判决.....	30
3.5.3 系统吞吐量和反馈量的计算.....	31
3.6 仿真结果及其分析.....	32
3.6.1 仿真参数.....	32
3.6.2 仿真结果分析.....	33
3.7 本章小结.....	35
第四章 CoMP-MU-MIMO 有限反馈方案设计.....	37
4.1 引言.....	37
4.2 系统模型.....	37
4.3 有限反馈方案设计.....	38
4.3.1 最优物理资源块选择.....	39

4.3.2 反馈中断 .....	39
4.3.3 动态门限判决 .....	40
4.4 资源调度.....	41
4.4.1 轮询调度算法 (RR, Round Robin) .....	41
4.4.2 最大载干比调度算法 (Max C/I) .....	42
4.4.3 正比公平调度算法 (PF, Proportional Fair) .....	42
4.4.4 资源调度流程 .....	43
4.4.5 系统吞吐量和反馈量计算 .....	44
4.5 仿真结果及分析.....	45
4.5.1 仿真参数 .....	45
4.5.2 仿真结果分析 .....	46
4.6 本章小结.....	48
第五章 结束语.....	49
致谢.....	51
参考文献.....	53
作者在读期间的研究成果.....	57

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

通用移动通信系统 (Universal Mobile Telecommunication System, UMTS) 技术的长期演进 (Long Term Evolution, LTE) 是第 3 代合作伙伴计划 (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, 3GPP) 近几年来启动的最大的新技术研发项目, 这项技术已经具有某些第 4 代 (4G) 通信技术的特征, 甚至可以被看成是“准 4G”技术<sup>[1]</sup>。它改进并增强了 3G 的空中接入技术, 采用正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 和多输入多输出 (Multi-Input Multi-Output, MIMO) 作为其无线网络演进的基础性技术, 实现了更高的网络容量、更大的峰值速率和更广的网络覆盖<sup>[2-4]</sup>。

与 3G 相比, 3GPP 启动的 LTE 更具技术优势, 具体体现在高数据速率、分组传送、延迟降低、广域覆盖和向下兼容等方面。此外, 随着 LTE 系统的发展和日益成熟, 2008 年 3 月, 国际电信联盟 ITU 开始征集 4G 系统的 IMT-Advanced 候选技术提案。为了满足 IMT-Advanced 的要求, 2008 年 6 月 3GPP 制定了 LTE-Advanced (简称 LTE-A) 标准的研究目标, 开始了基于 Rel-8 LTE 的一系列技术发展方向上的讨论<sup>[5]</sup>。

为了满足 LTE-A 系统在频点、带宽、峰值速率、平均吞吐量、边缘用户吞吐量、时延以及兼容性等各方面的新需求, 3GPP 在 LTE-A 系统中引入了协作多点传输与接收 (Coordinated Multiple Point transmission and reception, CoMP)、多载波聚合 (Carrier Aggregation, CA)、上下行 MIMO 扩展、中继 (relay)、分布式天线等关键技术进行平滑演进, 其 CoMP 技术作为提高小区边缘用户的性能和满足小区边缘频率要求的关键技术之一是 LTE-A 系统研究的一项主要内容<sup>[6-7]</sup>。

在 LTE-A 中, 为了满足系统性能的要求, 系统必须传输更多的反馈, 设计更为复杂的控制信令, 并使更多的信息在小区间被交互使用, 而由此提出的 CoMP 技术是基于各协作基站对链路信道状态信息 (channel state information, CSI) 和用户数据信息不同程度的共享, 通过小区间基站的协作将原本来自邻小区的干扰转变为有用信息, 本质上突破了单点传输对频谱效率的限制。同时, CoMP 技术不仅能实现小区间多个基站之间的协作, 也可以实现单个小区内多个传输节点之间的协作。因此, 从本质上来说 CoMP 技术是对传统单基站 MIMO 技术的补充和扩展, 通过基站协同传输来提高小区吞吐量尤其是小区边缘吞吐量, 以达到改善小区边缘覆盖、提高传输速率的效果<sup>[8-9]</sup>。



目前, 3GPP 讨论的 CoMP 技术包括上行 CoMP 接收和下行 CoMP 传输。上行 CoMP 接收通过多个小区对用户数据的联合接收来提高小区边缘用户吞吐量, 其对 RAN1 协议影响比较小, 因此在该技术研究上基本不涉及上行 CoMP 技术, 而主要局限在下行 CoMP 技术, 而且 CoMP 也仅仅是指数据上的 CoMP, 也就是说, 物理下行共享信道 (Physical Downlink Shared CHannel, PDSCH) 中传输的数据信息在多个节点上进行 CoMP, PDSCH 中传输的控制信息并不进行 CoMP, 而是由终端所在的服务小区 eNodeB (Evolved Node B) 单独进行传送<sup>[10]</sup>。根据数据信息是否在多个传输节点直接进行共享, 可以将 CoMP 技术分为两类: 联合处理 (Joint Processing, JP) 技术和协调调度/波束赋形 (Coordinated Scheduling/Beamforming, CS/CB) 技术; 根据协作基站共同服务的用户数, CoMP 技术又可以分为单用户 CoMP (SU-CoMP) 和多用户 CoMP (MU-CoMP)<sup>[11]</sup>。

## 1.2 研究现状

当前, CoMP 技术及应用的主要研究来自 3GPP 组织的推动, 许多厂商、运营商、设计院及高校都有在进行 CoMP 的研究, 3GPP RAN1 的每一次会议都会有相当数量的技术提案, 从当前研究现状来看, CoMP 研究的热点主要集中在以下几个方面<sup>[12-15]</sup>:

1) RRC 层: 信令设计, 逻辑信道设计, 定时技术研究及 eNodeB 间信息交互过程等, 以满足 CoMP 交互及信令控制的需要;

2) MAC 层: 协作用户的确定, 协作区域的生成, 协作频率资源划分, 功率分配, HARQ 技术及反馈机制等;

3) PHY 层: 参考信号的设计, CSI 及 PMI 的涉及, 传输技术研究, 包括 JP 下的预编码方法及 CS/CB 下的波束赋形技术, 其他 MIMO 技术。

针对上述研究热点, 可以从 3GPP 的标准化历程对其进行总结, 从 2009 年底, RAN 工作组 (Radio Access Network Work Group) 进行 LTE-A 相关 WI (Work Item) 的立项工作, 将各技术点分成独立的研究项目, 当前 Rel-10 版本已经进入第三阶段中的各接口定义的具体协议规范阶段。在 LTE-A 关键技术中载波聚合、上行多天线、增强型下行多天线和中继技术进入到 WI 阶段, 而 CoMP 仍然处于 SI (Study Item) 的方案评估阶段。预计 LTE-A Rel-10 版本将于 2010 年 12 月对标准功能冻结, 后续 Rel-11 版本也将在 2011 年展开, 其功能将进一步增强和提升<sup>[16]</sup>。

在 CoMP 技术单独立项后, 3GPP RAN1 #54~3GPP RAN1 #59 会议期间讨论了包括 JP、CS/CB、SU-MIMO、MU-MIMO 等各个方面, 并确定了参考信号、集合、反馈等一些术语, 同时开始评估 Intra-eNodeB CoMP 技术的性能和方案设计。当前, 3GPP RAN1 定义了 CoMP 的服务小区、协作小区集合和测量小区集合,

服务小区与 Rel-8 中的服务小区的定义相同,是用来传输物理下行控制信道 (Physical Downlink Control Channel, PDCCH) 的单个小区, CoMP 协作小区集合是一组直接或者间接给用户发送 PDSCH 的小区集合,这个集合可以对用户透明,也可以对用户不透明, CoMP 测量集合是一组上报与用户连接的信道状态信息的小区集合, CoMP 测量集合有可能和 CoMP 协作集合一致<sup>[17]</sup>。

为了支持不同的 CoMP 传输方式,用户需要反馈各种不同形式的信道状态信息,由此 3GPP 中出现了若干种增强型的反馈方案,包括信息的反馈方式以及反馈内容。在 RAN1 #57 及 #57bis 次会议上,将 CoMP 的反馈机制定义了三种类型<sup>[18]</sup>:显性的信道状态/统计信息反馈 (Explicit channel state/statistical information feedback)、隐性的信道状态/统计信息反馈 (Implicit channel state/statistical information feedback) 和基于探测参考符号 (Sounding Reference Symbol, SRS) 的反馈。

显性反馈是指终端不对信道状态信息进行预处理,反馈诸如信道系数和信道秩等信息,显性反馈的内容包括信道部分和噪声干扰部分。隐性反馈是指终端在一定假设的前提下对信道状态信息进行一定的预处理后反馈给基站,如预编码矩阵指示信息和信道质量指示信息等,即针对不同的假设,定义不同的反馈模式,如单用户 MIMO 还是多用户 MIMO、单小区传输还是协作传输、单点 CB/CS 传输还是多点 JP 传输等,并且隐性反馈可能需要用户通知基站所使用的假设 (向 eNodeB 发送具体的信令),及半静态的配置该假设 (向 UE 发送具体的信令),预编码的参考符号可以帮助 UE 对 CQI/RI 反馈进行处理<sup>[19]</sup>。基于 SRS 的反馈是指利用信道的互易性, eNodeB 根据终端发送的 SRS 获取等效的下行信道状态信息,这种方法在 TDD 系统中尤为适用<sup>[20]</sup>。

作为 3GPP LTE-A 系统的关键技术,协作式多点传输技术有效地降低了小区间干扰,提高了小区的总体性能,尤其是边缘用户的性能,在这一方面有着其他关键技术不可比拟的优势。但是在协作式多点传输技术正式应用之前,仍然存在着很多需要解决的问题,还面临着许多挑战,如考虑协作区域间干扰协调的协作区域的生成及 CoMP 频率资源的划分,反馈机制和基站间交互机制的设计、基站间信息的交互等,如何在性能、复杂度、反馈量以及后向兼容性等各个方面取得平衡等,都是 CoMP 需要解决的问题,也是将来主要研究的工作。

### 1.3 本文研究目的及意义

LTE-A 系统中提出 CoMP 技术重点关注了小区的平均吞吐量和边缘用户吞吐量这两个性能指标,通过接收端的预编码算法,很好地消除了小区间的干扰,保证了边缘用户的链路质量,提升用户的频谱效率。用户反馈作为其中的关键环节,

可以提供单小区或多小区的信道状态信息或信道质量信息,支持闭环的预编码技术,能够显著提高系统吞吐量。因此,反馈方案的设计一直深受业界关注。

在 DL CoMP 联合处理模式下,为了实现多个小区和用户之间协作传输,需要服务基站获得协作区域基站的全部信道信息,这就需要用户将全部的信道状态信息反馈给服务基站,并通过服务基站和协作基站之间协调,选择合适的传输链路。其显著缺点是,反馈信道状态信息的数据量随着用户数和天线数的增加呈线性增长。从系统开销和性能等方面考虑,为保证反馈用户的信道响应信息的精确性,同时能够大幅度降低上行信道的信令开销,本文在比较当前各种反馈方案的基础上,分析仿真模型,搭建仿真平台,并对其方案做了一些改进,使对系统吞吐量影响不大的前提下,以实现在用户数和资源块数目较多的情况下能极大地减少系统反馈量,为标准推进提供依据。

## 1.4 本文研究内容及章节安排

本文主要讨论了在 LTE-A 系统中,为了改善小区边缘用户的系统性能,采用 CoMP 技术而引入的反馈方案设计。首先是研究了当前在 CoMP 技术下的全反馈机制和部分反馈机制,再总结了相关反馈方案设计的理论知识,并在此基础上进行改进得到新的有限反馈设计方案,能够在相对较少的系统吞吐量损失下,极大程度上减少反馈量,最后进行了仿真验证和性能分析。

对于有限反馈方案的设计,一般按照以下步骤进行:

①建立系统模型(CoMP-SU-MIMO 模型/CoMP-MU-MIMO 模型);②用户计算物理资源块的 SNR 值;③协作传输结构(TPCC 结构);④用户对物理资源块进行处理或筛选(分簇、固定门限、最优选择、从反馈中断概率角度设置门限等);⑤资源调度,调度算法提升系统吞吐量;⑥计算系统吞吐量和系统反馈量;⑦仿真验证,评估方案性能。

根据上述研究内容,本文章节安排如下:

第一章:绪论部分。主要描述了课题研究的意义、研究背景及发展现状,概要地阐述了 LTE 及 LTE-A 系统,并分析了 CoMP 技术及其在 LTE-A 系统中的定位。

第二章:CoMP 的基本原理。首先介绍了 CoMP 的基本概念,明确 CoMP 中涉及的相关定义及术语,然后简单地描述了系统模型的建立和 CoMP 的几种分类,接着概括了 CoMP 的基本传输方案,最后从不同的角度来给 CoMP 的反馈机制进行分类,为本文在 CoMP-SU-MIMO 和 CoMP-MU-MIMO 两种场景中的有限反馈方案的设计奠定理论基础。

第三章:CoMP-SU-MIMO 有限反馈设计。首先介绍了在 CoMP-SU-MIMO

场景中当前研究的反馈方案，再针对其不足提出新的有限反馈设计，主要是从物理资源块的分簇入手，并通过固定门限设置，对物理资源块进行处理，从而减少系统的反馈量，最后通过计算机仿真验证，给出了性能分析结果。

第四章：CoMP-MU-MIMO 有限反馈设计。首先介绍了在 CoMP-MU-MIMO 场景中目前研究的反馈方案，再针对其不足提出新的有限反馈设计，主要是先通过对物理资源块进行择优处理，接着从反馈中断概率间接反映系统吞吐量损失的角度进行门限设置，然后进行动态门限判决，对物理资源块进行筛选，从而减少系统的反馈量，再通过基站对用户进行资源调度，得出本方案对系统吞吐量的性能的影响，最后通过计算机仿真验证，给出了性能分析结果。

第五章：结束语。对全文研究内容进行了总结，指出本文设计的两种方案中需要改进的地方，并对相关问题的进一步研究进行了分析与展望。



## 第二章 CoMP 基本原理

在 LTE-A 系统中, 为了满足系统性能的要求, 进一步提高小区平均吞吐量和小区边缘吞吐量, 3GPP 引入了 CoMP 技术, 由于 CoMP 技术可以在多个小区间共享信道和数据信息并在这些信息的基础上优化多个小区的整体系统性能, 相比于在单小区基础上确定传输方案的 LTE 系统, 更有效地改善了边缘用户的性能。

### 2.1 CoMP 概述

#### 2.1.1 CoMP 基本概念

CoMP 是 LTE-A 中提供高速数据覆盖, 增加小区边缘吞吐量和系统吞吐量的一种技术。多点是指发射或接收来自天线之间距离比较大的天线 (大于几个波长, 这样所有天线有不同的长期衰落), CoMP 传输系统又称为分布式天线系统, 以下几种应用场景都可以看作是 CoMP 操作: 小区内部扇区之间协作为扇区边缘的用户服务; 小区之间协作为小区边缘的用户服务; 多个射频 (Radio Frequency, RF) 集中信号处理, 相当于分布式天线; 基站和中继协作; eNodeB 和 home-eNodeB 协作。所以 CoMP 既可以是小区间基站之间的协作, 也可以是小区内多个传输点之间的协作<sup>[21]</sup>。

CoMP 技术可以分为上行多点接收和下行多点传输<sup>[22]</sup>。上行多点接收是一个相对比较广的概念, 是指一个用户发送的上行信号被多个基站接收, 一般来说, 用户并不需要知道信号是如何被基站接收和处理的, 只需要知道与上行信令有关的下行信令是如何被提供的。在本文中, 主要讨论下行多点协作传输技术。

#### 2.1.2 CoMP 系统模型

设协作的基站数和用户数分别为  $N$ 、 $M$ , 基站发送、接收天线分别为  $n_T$ 、 $n_R$ , 每个用户发送、接收天线数分别为  $m_T$ 、 $m_R$ ,  $M$  个协作用户称为配对用户, 第  $k$  个用户支持的独立数据流数为  $r_k$ , 其中  $1 < r_k \leq m_R$ <sup>[23]</sup>。这样, 下行 CoMP 模型就等效为  $N * n_T$  发  $M * m_R$  收的虚拟 MIMO 系统, 如图 2.1 所示。

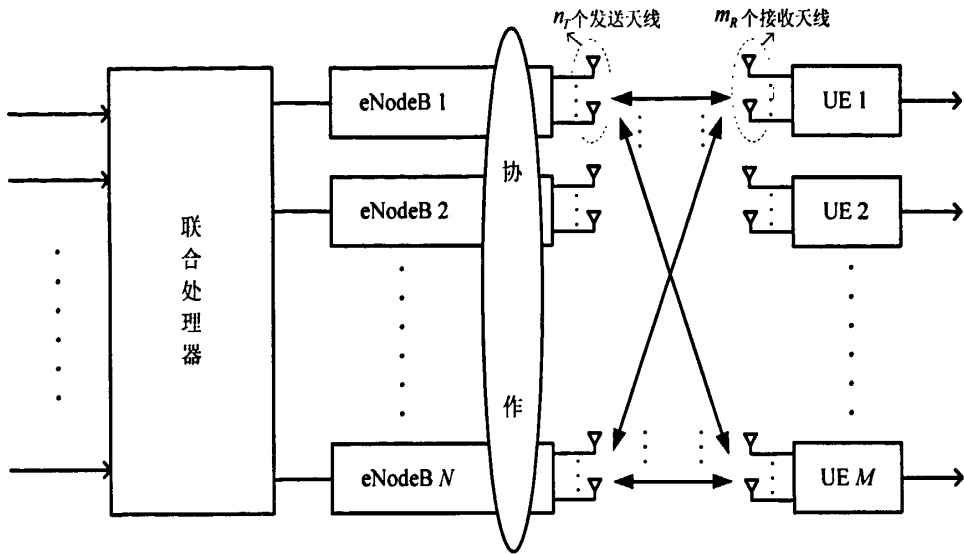


图 2.1 下行 CoMP 系统模型

### 2.1.3 CoMP 的分类

传统的多小区系统<sup>[24]</sup>，如图 2.2 所示，由于小区间存在同频干扰，这就导致边缘用户的性能下降。

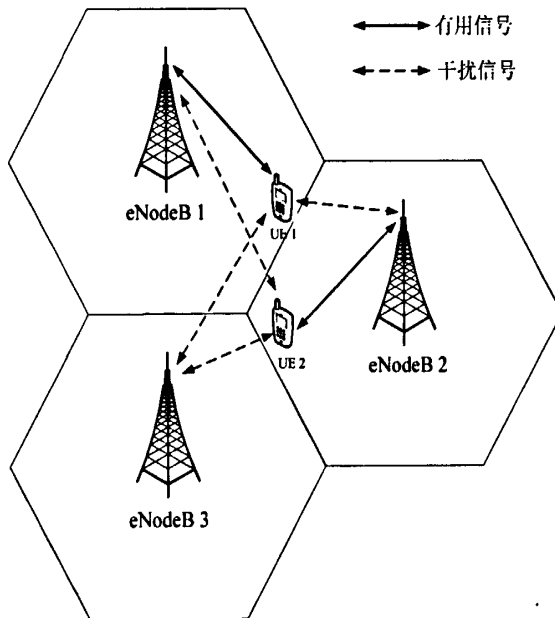


图 2.2 传统 MIMO 系统模型

在 3GPP 规范的 Rel-10 版本中，由于 CoMP 技术可以在多个小区间共享信道信息，所以能有效地改善边缘用户性能。如图 2.3 所示，相邻的几个基站通过 X2 接口交互信息，为小区边缘的用户同时提供服务，因而不仅极大地提高了小区边

缘用户的性能，而且也增加了系统的吞吐量，同时将邻区干扰变为有用信号，消除小区中心和边缘的差别。

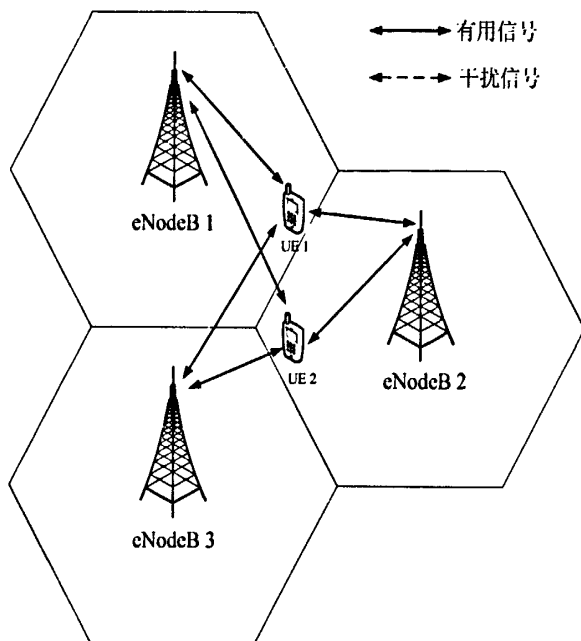


图 2.3 CoMP 系统模型

1) 根据协调节点间的关系<sup>[25]</sup>，将 CoMP 分为两种：

(1) 小区内 CoMP (Intra-site CoMP)

Intra-site CoMP 协作发生在一个站点 (site, eNodeB) 内，如图 2.4 所示，此时因为没有回传 (Backhaul) 容量的限制，可以在同一个站点的多个小区 (cell) 间交互大量的信息。

(2) 小区间 CoMP (Inter-site CoMP)

Inter-site CoMP 协作发生在多个站点间，如图 2.4 所示，对回传容量和时延提出了更高要求。反过来说，Inter-site CoMP 性能也受限于当前 Backhaul 的容量和时延。

从上述内容分析可知，对于 Intra-eNodeB CoMP，参与协作的小区都属于相同的 eNodeB，eNodeB 拥有各协作小区所有的信息，实现 CoMP 较为简单。但对于 Inter-eNodeB CoMP，由于参与协作的小区属于不同的 eNodeB，不同 eNodeB 之间必须要经过必要的信息交互才能保证 CoMP 的顺利实施。eNodeB 之间使用 X2 接口进行信息交互，Inter-eNodeB CoMP 的引入，必然对原有 Release8 的 X2 接口无论是用户平面 (U-Plane) 还是控制平面 (C-Plane) 都产生很大影响。因此，在 CoMP 场景下，eNodeB 间需要共享什么信息，如何通过 X2 接口共享这些信息都是非常重要的研究点。



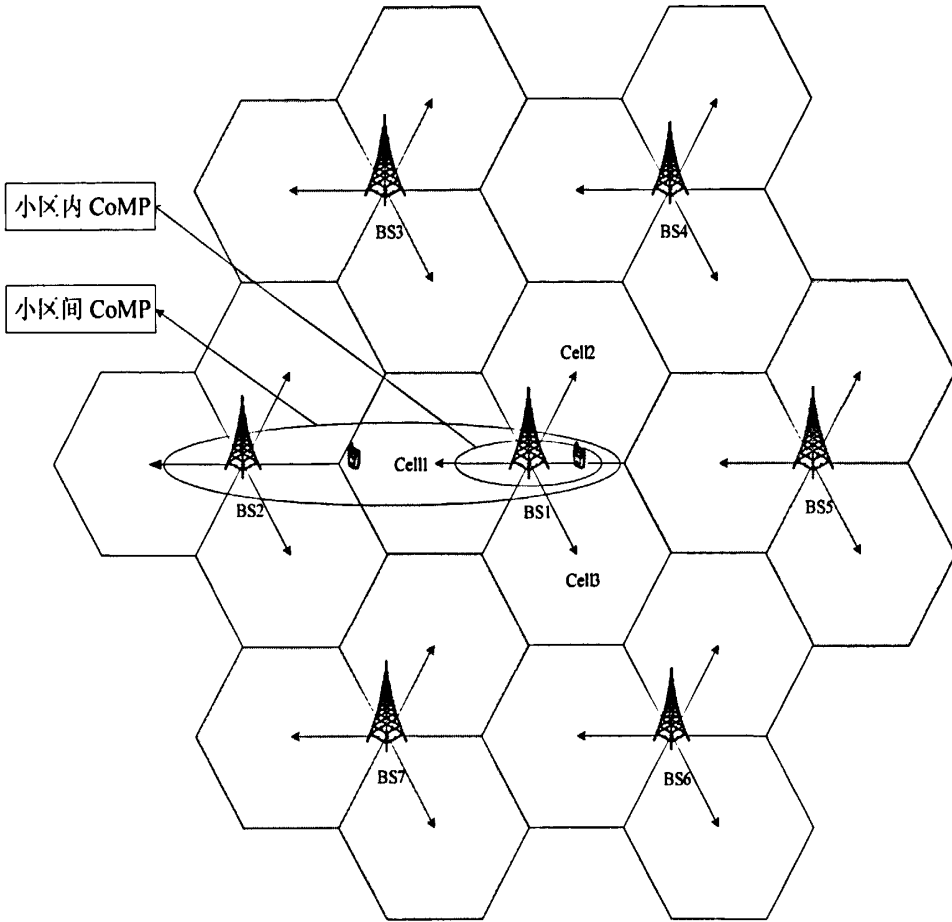


图 2.4 小区内 CoMP 和小区间 CoMP 系统模型

2) 根据 PDSCH 中传输的信息是否在多个传输节点之间进行共享<sup>[26]</sup>, 又可将下行 CoMP 技术分为两类:

(1) 协调调度/波束赋形技术 (Coordinate Schedule/Beamforming, CS/CB)

在此类技术中, 传给特定用户的数据信息只能由该用户所在服务小区的基站进行发送, 但是调度决策和波束赋形是协作的, 而尽可能地避免小区边缘用户使用的资源在时频资源上产生的冲突。该方式下, 特定用户的数据不共享, 协作集合的多个基站 (也称协作簇) 内只需要共享信道信息。CoMP 协作簇内的基站各自服务各自的用户, 也就是说, 一个用户只由一个基站服务, 如图 2.5 所示。

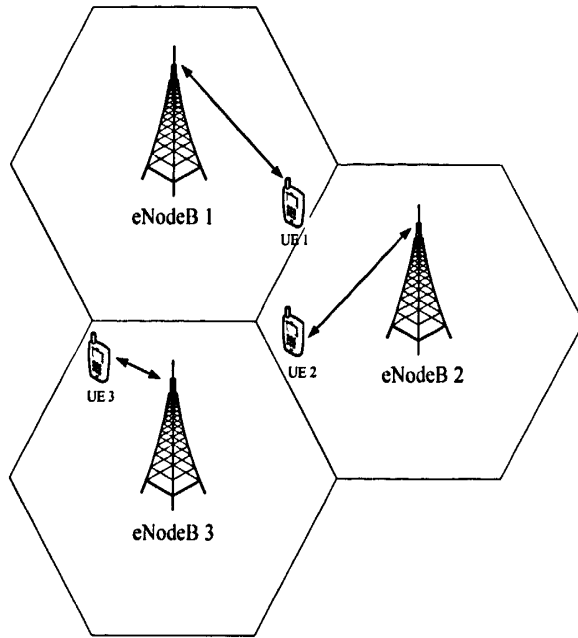


图 2.5 协作调度/波束赋形

### (2) 联合处理 (Joint Processing, JP)

在此类技术中，协作簇对特定用户的数据进行联合处理，提高接收信号的质量或消除基站间的干扰。一个特定用户的数据和信道信息在协作簇内不同的小区间是共享的，整个协作簇同时为一个或多个用户服务，如图 2.6 所示。

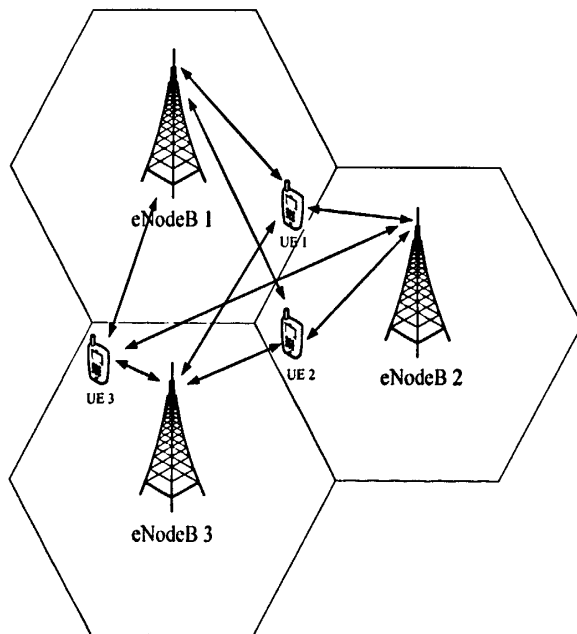


图 2.6 联合处理

按照数据信息是否同时由多个传输节点（部分或整个 CoMP 协作簇）进行传送，又可将 JP 技术分为两种：

(a) 联合传输技术 (Joint Transmission, JT): 用户一次接收从多个基站发送的 PDSCH 信息, 并对这些信息进行相干或非相干合并, 从而提高接收信号的质量并抑制其它 UE 对此 UE 的干扰;

(b) 动态小区选择技术: 用户不能同时接收从多个基站发送的 PDSCH 信息, 而是每次只能接收一个基站发送的 PDSCH 信息, 但是基站可以根据信道质量的好坏在 CoMP 协作簇中的多个基站间进行交换。

## 2.2 CoMP 协作簇选择

在所有的基站之间协作能够提供很大的平均小区吞吐量和小区边缘吞吐量, 但是在所有的基站之间共享数据信息需要很高的回程容量, 复杂度也太高而难以实现。为了降低复杂度, 协作只能在有限数目的基站之间为特定的用户服务。因此, 在实际的场景中需要选择合适的协作簇, 其原则是在一个可接受的调度复杂度和回程容量的前提下最大化小区吞吐量。

对于 CoMP 协作簇的选择<sup>[27-29]</sup>, 主要有以下几种:

### 1) 固定协作区域 (静态协作)

固定协作区域是根据一定的准则固定地选择几个基站协作, 尽量合并相互之间有最强干扰的那些小区, 这样有利于消除最强的几个小区间干扰。该方式选择的协作簇固定而且不相交, 调度只需在簇内基站间进行, 复杂度低, 容易实现。但相同簇内的基站只为对应簇内的用户服务, 这样对于处于不同地理位置的用户来说, 最强的小区间干扰不一定可以被消除, 公平性不能得到保障, 吞吐量增益也有限, 同时当用户移动时, 最强干扰源也会改变, 而该方式不能满足其动态变化。

### 2) 用户特定协作区域 (动态协作)

用户特定协作区域是基于每个用户最强的干扰源信息而定, 其主服务基站动态地选择对该用户服务的协作簇。根据用户向基站反馈的信息, 协作簇可以是半动态变化的, 可以根据长期或短期的 CSI 统计信息进行动态的变化。

这种协作区域的确定方法对于每个用户来说, 得到的是每个用户最合适的协作集合, 都是最大程度上消除了小区间干扰, 因而有较高的性能增益, 但是由于该方式是基于用户确定的, 协作簇的大小或形状是不确定的, 同一个基站的不同用户对应的协作簇有可能是重叠的, 而所有重叠协作区域之间需要协调, 从调度的角度看, 该方式是非常复杂的, 实现起来代价高。而且 CoMP 用户需要测量周围比较多的小区的信道状况或干扰情况, 因此反馈量比较大, 系统开销也比较多。

### 3) 半动态协作区域

半动态协作区域是指预先定义一个可供选择的协作集 (预协作集), 然后用户

在预协作集中基于信息的反馈动态地选择参与协作的基站，服务于该用户的基站簇是预协作集的子集，调度发生在预协作集内的基站间，而且每隔一定时间，根据用户的反馈将重新划分协作区域，由此增加系统的灵活性。该方式明显比静态协作的适应性更强，相对动态协作复杂度又小，是 3GPP 讨论较多的一种协作区域划分方式。

### 2.3 CoMP 基本传输方案

在 JP-CoMP 情况下，根据用户数分为两种传输方案：CoMP-SU-MIMO (CoMP Single User MIMO) 和 CoMP-MU-MIMO (CoMP Multiple User MIMO)；在 CS/CB-CoMP 情况下，可采用协调预编码方案<sup>[30]</sup>。

#### 1) CoMP-SU-MIMO 联合传输方案

该方案中协作基站簇在一个时频资源块上同时为一个用户服务，传输相同的信息，如图 2.7 所示。由于相同的信息经过不同的信道在接收端被合并起来，用户有效地利用了信道提供的分集增益，提高了 CoMP 用户接收信号的质量，获得分集增益。

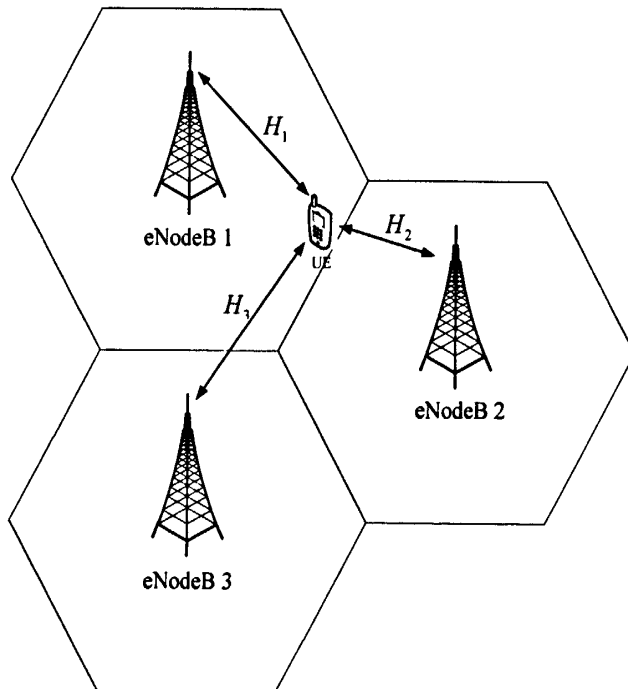


图 2.7 下行 CoMP-SU-MIMO 联合传输方案

CoMP-SU-MIMO 联合传输方案对受到邻小区干扰较为严重的小区边缘用户有很大的增益，但是在该模式下系统更多的资源只对一个用户服务，而造成了资源利用率的下降。为此提出了可变服务集合的 CoMP-SU-MIMO，将小区内用户

划分为中心用户和边缘用户，对于小区的中心用户，不采用协作方式，而仅有其对应的主服务基站服务，那么协作集合也不需要共享它们的数据信息和信道信息，降低了其交互的信息量，同时可以拿出协作资源来为边缘用户服务，从而提高资源利用率。

## 2) CoMP-MU-MIMO 联合传输方案

该方案中协作基站簇在一个时频资源块上同时为多个用户服务，每个协作基站簇都拥有多个用户的数据信息，但是每个协作基站簇拥有的预编码矩阵不同，如图 2.8 所示。

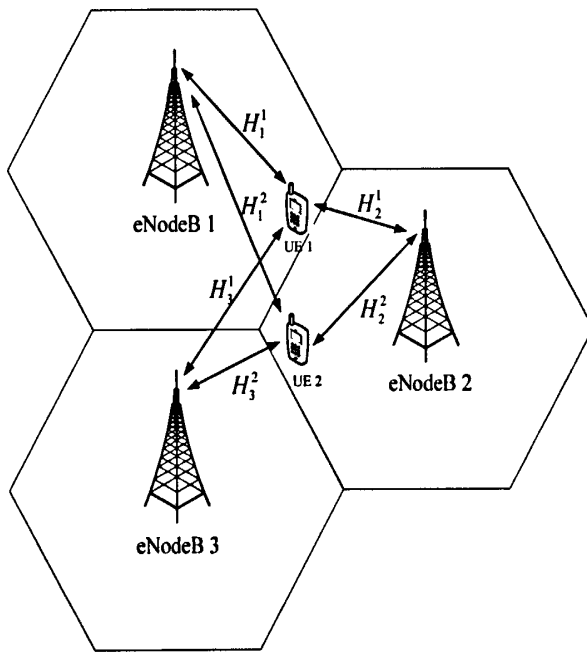


图 2.8 下行 CoMP-MU-MIMO 联合传输方案

该方案下，如果每个用户到所有协作基站的信道信息能够被每个协作基站簇获取的话，就会产生簇内多用户之间干扰，故基站需要利用预编码方案抑制簇内干扰，常用的预编码方案有 BD/ZF/DPC 算法等，从而提升系统性能。通过消除簇内多用户干扰，CoMP-MU-MIMO 方案能够获得比 CoMP-SU-MIMO 方案更好的系统增益。虽然预编码方案可以有效地抑制簇内多用户干扰，但是由于协作基站簇需要获取每个用户到所有协作基站的精确短时信道信息，这就要求用户的反馈机制达到很高的要求，而且簇内交互信息量过大，也在很大程度上增加了系统的复杂性，因而更合适能有效利用信道对称性的 TDD 系统。

为了提高频谱利用率，降低系统复杂度，在 CoMP-MU-MIMO 中，可以采用和 CoMP-SU-MIMO 类似的可变服务集合方案，即每个小区的中心用户不参与协作，只对小区边缘用户采用 CoMP-MU-MIMO 方案，对于用户的划分可以采用吞吐量法则、Geometry 法则等。

### 3) 协调预编码方案

在传统的 LTE 系统中没有预编码矩阵的协调, 每个用户仅仅反馈自己最优的预编码矩阵, 而不考虑其他小区对自己造成的干扰, 因此有可能导致不同小区使用相同资源的用户之间干扰较大。为了降低小区间的干扰, LTE-A 系统中采用了 CS/CB 协调预编码方案。在该协调预编码方案中, 每个用户终端反馈一组预编码矩阵 (PMI) 来提高系统性能, 在这组 PMI 中, 不仅包括使自己性能最优的预编码矩阵, 而且还反馈推荐其他协作小区使用的预编码矩阵, 使其他相邻小区对自己造成的同频干扰大大减小, 每个用户反馈的预编码矩阵的数目与协作集合的大小相关。这样, 在进行实际传输时, 多个协作小区间彼此共享这些预编码矩阵集, 并通过合适的协调调度算法来综合考虑这些预编码矩阵集合, 为每个用户选择合适的预编码矩阵, 从而降低用户所受到的干扰, 达到系统整体性能的最优化。协调预编码方案如图 2.9 所示, 通过预编码矩阵协调, 使小区边缘用户的干扰降低。

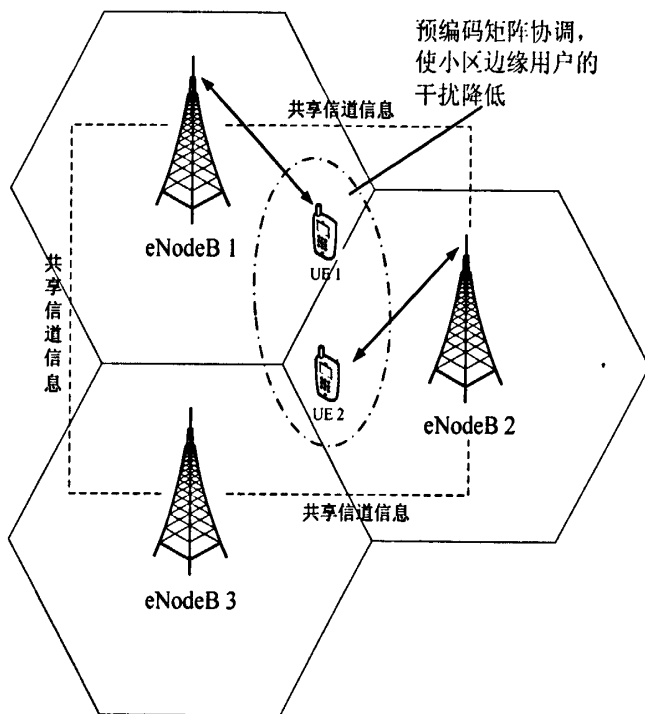


图 2.9 协调预编码方案

为了提高信号质量和降低反馈量, 这三种模式的灵活转换也在最近的几次会议中进行了大量的讨论。根据用户反馈的 CSI (Channel State Information) 以及时频资源的利用状况等信息, 动态地选择合理的传输模式, 也是进一步需要研究的问题。

## 2.4 CoMP 反馈机制

在传统的单小区 MIMO 场景中,用户只需要向服务基站反馈自己所属的服务小区的信道状态信息,而在 LTE-A 系统的 CoMP 技术下,由于涉及基站间的协作,则要求知道所有协作小区的信道状态信息,因此 3GPP 中出现了若干种增强型的反馈机制<sup>[31-34]</sup>,以支持反馈多个协作小区的信道状态信息。

### 2.4.1 CoMP 反馈机制的分类

1) 3GPP 根据信息的反馈方式不同,将 CoMP 反馈机制分为两种。

#### (1) 联合反馈

联合反馈是指用户将多个小区的信道状态信息作为一个整体集合向基站进行反馈。在这种反馈方式下,用户反馈的信道信息包括了所有协作小区的信道信息,它的信息反馈量极大,并且基站在接收到反馈信息后很难准确地恢复出这些协作小区内任意一个子集的信道信息,由此可见该反馈方式的标准设计复杂,灵活性较低。

#### (2) 独立反馈

独立反馈是指用户向基站分别反馈每个协作小区的信道状态信息。在这种反馈方式下,基站能够准确地恢复出这些协作小区的信道信息,其标准设计简单,灵活性高。

2) 3GPP 根据信息反馈的颗粒度,主要是针对时间/频谱资源而言,又可将 CoMP 反馈机制分为两种。

#### (1) 长期信道反馈

该反馈方式减少了反馈频率,降低了反馈量,适用于相关性较强的信道。

#### (2) 短期信道反馈

该反馈方式反馈的信道较精确,但反馈频率较高,因此反馈负担较大。

3) 3GPP 根据信息的反馈内容不同,将 CoMP 反馈机制分为三种。

#### (1) 显性的信道状态/统计信息反馈

a) 用户观测到信道状态信息后,没有对该信道信息进行任何处理,直接反馈给基站,使得基站获得完全的信道响应信息。反馈内容包括两部分:①信道部分——反馈信道矩阵/协方差矩阵、反馈信道矩阵/协方差矩阵的主要特征值分量;②噪声干扰部分——反馈噪声干扰的协方差矩阵、反馈噪声干扰协方差矩阵的主要特征值分量。

b) 这种反馈方式从理论上来说,由于反馈了更多的信息,可以获得比隐性反馈更好的性能,基站也能够设计出更为灵活的 CoMP 方案。

c) 用户可以通过 CSI-RS 测量来获得 CoMP 协作簇中的下行信道状态信息, 并直接将其反馈给基站, 但是这样的反馈信息量过大, 会给反馈信道带来很大的压力, 因此对于信道的快速变化和反馈时延比较敏感。

d) 与直接反馈信道状态信息相比, 采用反馈信道的统计信息可以减少系统对信道快速变化和反馈时延的敏感性, 而且由于信道的统计信息反映的是信道一种长期趋势, 因此可以减少反馈的频率, 也可以降低反馈信道的压力。

### (2) 隐性的信道状态/统计信息反馈

a) 用户观测到信道状态信息后, 对得到的信道信息进行处理, 转化成特定的量化数值后 (如 CQI、PMI、RI 等), 反馈给基站。

b) 这种反馈方式从理论上来说, 基站端的 CoMP 方案必须基于反馈的 CQI/PMI/RI, 在设计 CoMP 方案的灵活性方面比不上显性的信息反馈。

c) 由于 CQI/PMI/RI 反映的是长期的信道状况, 因此对于信道的快速变化和反馈时延不太敏感。

d) 隐性反馈会在一定程度上造成预编码性能的损失, 但是可以有效地减少反馈量, 它是性能与反馈量之间的一个折中, 而且与显性的信息反馈相比, 该反馈方式对于上行反馈信道的负担较小。因此如何在性能损失最小的情况下最大程度上减少反馈量, 是现在研究的一个热点问题。

### (3) 基于 SRS 信道的反馈

a) 该反馈方式根据上行 Sounding 参考信号, 利用互异性获得下行信道状态信息。

b) 利用 TDD 系统的信道对称性, 适应于 TDD 系统。

在 LTE-A 系统中, 由于需要测量来自多个小区的信道信息, 针对 LTE 系统设计的上行 Sounding 参考信号是否能适用于 LTE-A 系统还需要进一步研究。

## 2.4.2 CoMP 反馈结构设计原则

在最近的 RAN1 #58、59 及 60 次会议上, 3GPP 提出了反馈结构设计的基本原则<sup>[35]</sup>, 主要分两方面讨论:

### 1) 不同传输模式反馈的统一

(1) 无论是 CoMP 还是非 CoMP 的不同传输方案, 接收端不需要知道, 也即“透明”。

(2) 对于 CoMP 和非 CoMP, 保持统一的反馈结构。

(3) 对于不同的 CoMP 方案, 如 CoMP-SU-MIMO、CoMP-MU-MIMO、协作调度等, 可以灵活地转换。

### 2) 反馈模式的灵活性



(1) 显性反馈、隐性反馈和基于 SRS 的反馈，这三种不同的反馈并不相互排斥，可以相互融合、灵活转换。

(2) 以单小区反馈为基础，以多小区联合反馈作为补充。

## 2.5 本章小结

本章首先介绍了 CoMP 的基本概念，包括系统模型和 CoMP 的分类，比较了传统的单用户 MIMO 与 CoMP 的差异；然后简单介绍了几种 CoMP 协作簇选择的方案，指出了这些方案的优缺点；接着对 CoMP 的基本传输方案进行简单描述，同时对几种方案下系统灵活性和复杂度进行讨论；最后详细地介绍了 CoMP 的反馈机制，从不同的角度来给 CoMP 的反馈机制进行分类，并分析了在各种反馈机制下系统的性能，指出了其优劣性，同时给出了整个系统反馈结构设计的原则。通过本章介绍，从整体上对 CoMP 的基本原理形成初步认识，并为后续的研究提供了必需的理论依据。

## 第三章 CoMP-SU-MIMO 有限反馈方案设计

### 3.1 引言

在 LTE-A 系统中, 3GPP 要求高频率复用因子甚至是全频复用, 以满足其高频谱利用率的需求, 从而导致的小区间干扰成为进一步提高系统性能的瓶颈。目前业界研究的 CoMP 技术能充分利用多基站、多用户和多天线资源提高小区平均吞吐量和小区边缘吞吐量, 以达到 IMTA 系统对高频谱利用率的要求。

在传统 MIMO 技术中, 用户仅仅处于蜂窝网的某个区域, 只有服务小区的基站为其提供通信服务, 现在提出的 CoMP 技术是所有的基站之间以协作的方式进行无线资源优化配置, 来提供最大效率的数据传输, 通过这种方式可以大大地降低小区的传输覆盖, 具有非常高的频谱效率。根据协作程度的不同, CoMP 包括以下两类: 联合处理 (JP) 和协作调度/协作波束赋形 (CS/CB), 式中, JP 能充分利用多基站、多用户和多天线资源进行协调处理, 从而极大地提升系统吞吐量和频谱效率。但是, 在下行多点协作联合接收场景中, 要实现多个小区和用户之间协作传输, 需要服务基站获得协作区域内所有用户与基站间的全部信道信息, 这就需要用户将全部的信道状态信息反馈给服务基站, 并通过服务基站和协作基站之间协调, 选择合适的传输链路。

对于 LTE-A 系统, 基站所需要的信道信息需要通过上行反馈获得, 并且基站间需要交互这些信道信息, 而反馈全部信道状态信息将占用大量的上行资源, 给上行信道带来巨大的压力, 同时也会引起信道损耗和系统性能的降低, 从而在一定程度上限制了 CoMP 方法在蜂窝系统的应用。为了降低反馈信道信息所占用的上行资源, Rel-10 中支持下行 CoMP 技术的反馈方案在最近的几次会议中被广泛的讨论。Rel-8、Rel-9 中虽然支持下行 JP-CoMP 的传输模式, 但是性能不够理想, 因此研究支持下行 JP-CoMP 的反馈及开销是有必要的。在过去的会议中确定了 Rel-10 中的反馈应该延续 Rel-8 中 PMI/RI/CQI 的机制, 同时有限反馈机制也应该作为一个重要方式来减小下行链路多点协作反馈开销以达到 Rel-10 中的要求。

在 JP-CoMP 场景下, 通过用户反馈多个小区的信道方向信息 (CDI) 以及信道质量信息 (CQI), 使得协作的多个小区能更好地进行预编码、调度及链路自适应。反馈机制的设计要基于 CoMP 反馈的设计准则来考虑, 国内外很多公司提到的有限反馈在系统容量和反馈压缩量上取得了较好的折中, 引起了广泛讨论, 有待进一步的扩展研究。

在 3GPP RAN1 #57 次会议上, 以下三种多点协作下的反馈模式被会议通过:

显性反馈、隐性反馈和基于 SRS 的反馈。

毫无疑问,显性反馈必然能带来更好的多点协作下的性能增益,但是,由于要将全部的信道响应信息反馈给基站,给系统带来的开销将会是非常巨大的,因此目前采用的更多的是隐性反馈,例如将信道响应信息量化为 CQI/PMI/RI 等进行反馈。在单用户情况下,通过隐性反馈可以完成多点协作中的主要操作,例如动态小区选择、协作抑制干扰等<sup>[36]</sup>。

从反馈的数据形式来看,目前信道信息反馈方法主要是基于 CQI 的信道质量指示反馈方法,如反馈信噪比 SNR 值,这种反馈方法有较少反馈量。CQI 反馈信息虽然通过精确地资源调度以及良好的链路自适应提高下行链路的系统性能,但是它作为一种额外地开销,降低了上行链路的频谱利用效率。因此,有效的 CQI 反馈信息压缩就显得非常重要。

提案“3GPP TSG R1-092654”<sup>[37]</sup>是一种在下行链路多点协作联合处理模式下,只需向主服务基站反馈单个用户到各个基站间单条链路的 CQI 值,而不必反馈所有 Transmission Points Configuration for CoMP (TPCC) 情况下的 CQI 值,基站通过反馈的单条链路 CQI 值和 TPCC 结构就可以计算出在 TPCC 不同情况下的 CQI 值,从而减小反馈量。但是该方案只能减小少量的反馈开销,并且在协作小区数目较多且资源块数量大的情况下,效果并不明显。本章在基于上述方案研究基础上,对反馈方案进行改进,讨论 CoMP-SU-MIMO 场景中,引入一种固定分簇结合预设门限的隐性 CQI 反馈机制,使对系统吞吐量影响不大的前提下,进一步降低系统的反馈量,提高频谱利用率。

### 3.2 系统模型

考虑一个由  $N$  个正六边形小区构成的 LTE-A 下行 CoMP 多小区系统,基站位于每个小区中心并且有一个全向发射天线,每个基站的总发射功率为  $E_{\max}$ 。在每个小区内,分布  $G$  个多天用户,定义  $U_G = \{1, 2, \dots, G\}$  为每个小区内的用户成员编号集合<sup>[38]</sup>,如图 3.1 所示。

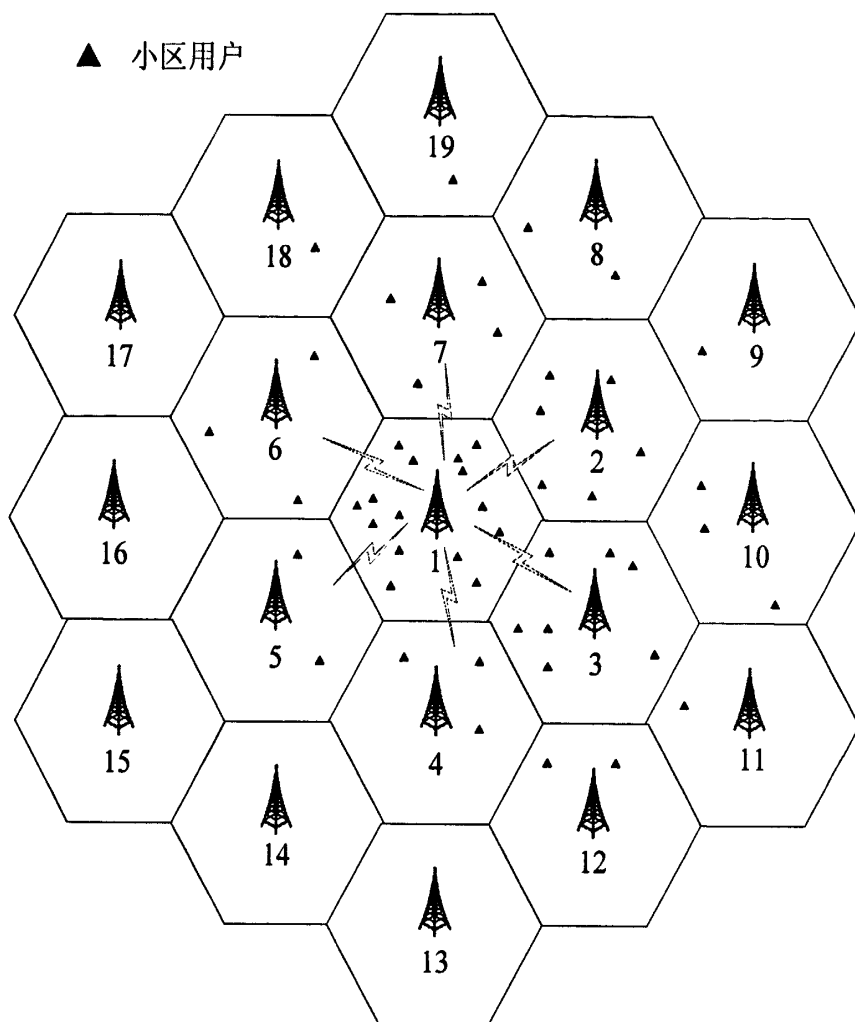


图 3.1 LTE-A 下行 CoMP 多小区系统

### 3.2.1 可变服务集合

为了提高频谱利用率，降低系统复杂度，不论是 CoMP-SU-MIMO 系统还是 CoMP-MU-MIMO 系统，都采用可变服务集合方案<sup>[39]</sup>，即对小区边缘用户和小区中心用户做不同的处理。对于每个小区的中心用户，由于来自相邻小区的干扰较小，将不参与协作，而仅有其对应的主服务基站服务，那么协作集合也不需要共享它们的数据信息和信道信息，降低了其交互的信息量，同时可以拿出协作资源来为边缘用户服务，从而提高资源利用率；对于小区的边缘用户采用 CoMP 模式来增强这些用户的性能。

采用可变服务集合方案，是根据在每个小区内的分布位置，将用户划分为小区中心用户和小区边缘用户。从大量的研究提案中分析得出，有很多种方法可以被用来将服务小区内用户划分为中心用户和边缘用户，包括地理位置因素及接收

信号测量方法等。而采用不同的划分方式，将会得到不同的仿真结果，为了便利起见，在本文中采用按照地理位置的划分方式进行。

首先定义半径为 500m 的正六边形为一个小区，接着位于以基站为中心，半径为 300m 的范围内的用户划分为中心用户，而位于范围为 300m-500m 区域的用户则是边缘用户，最后进一步分别定义每个小区的中心用户成员编号集合与边缘用户成员编号集合为  $U_{GT}$  和  $U_{GK}$ ，并且有  $U_{GT} \cup U_{GK} = U_G$  和  $U_{GT} \cap U_{GK} = \emptyset$ 。每个集合的用户数目为  $G = |U_G|$ ， $G_T = |U_{GT}|$  和  $G_K = |U_{GK}|$ ，并且  $G = G_T + G_K$ 。如图 3.2 所示。

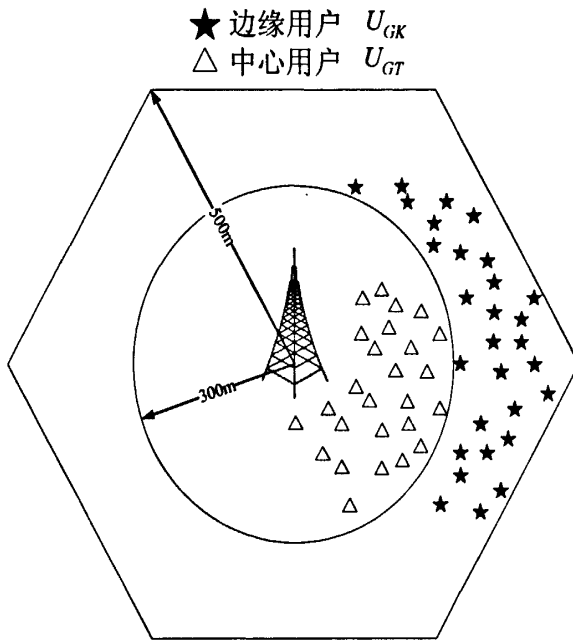


图 3.2 划分中心用户和边缘用户

对于中心用户  $U_{GT}$ ，只有主服务基站为用户提供服务，而对于边缘用户  $U_{GK}$ ，由于存在路径损耗，将选择协作簇为用户提供服务，本文中仅针对用户位于边缘区域时的情况进行下行 CoMP 技术下的反馈研究。

### 3.2.2 选择协作簇

在下行 CoMP 技术过程中，随着协作基站个数的增加，对协作基站与服务基站之间共享信道数据信息的回传信道容量的要求将大大增加，同时协作所需的信令和反馈开销迅速增加，预编码和资源分配的实现复杂度也急剧增长，而协作带来的性能增益却在逐步地减小。因此，为了降低协作传输系统的复杂度，需要将蜂窝网中的大量基站划分为不同的协作簇<sup>[40]</sup>，然后在各个协作簇内进行基站间的协作传输。

固定分簇是最简单的协作簇划分方法，但是由于在该方法下相同簇内的基站只为对应簇内的用户服务，这样会造成当用户移动时，小区间的干扰不一定能够被消除，公平性不能得到保障，吞吐量增益也有限，因此不能满足其动态变化。而动态分簇确实能够得到每个用户最合适的协作集合，在最大程度上消除了小区间干扰，也能获得较高的性能增益，但是由于该方式是基于用户确定的，协作簇的大小或形状是不确定的，可能会造成重叠区域，而所有重叠协作区域之间需要协调，从调度的角度看，该方式实现起来太过复杂，并且反馈量也过大。因此，在本文中采用更适合实际场景应用的半动态分簇。

半动态协作簇选择是指针对边缘用户地理位置，选择距离该用户最近的三个小区为用户进行协调服务，如图 3.3 所示。

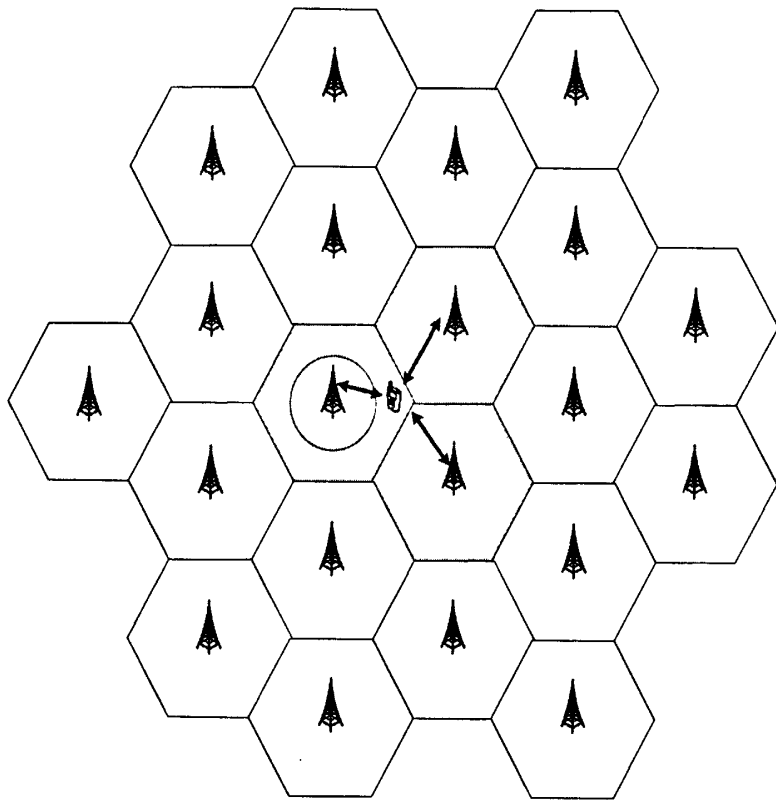


图 3.3 选择协作簇

### 3.2.3 建立系统模型

在下行 CoMP 技术中，通过定义可变服务集和半动态选择协作簇可以得到边缘用户集合  $U_{GK} = \{U_1, U_2, \dots, U_K\}$ ，协作簇  $C = \{C_0, C_1, C_2\}$ ，其中  $H_{0k}$ 、 $H_{1k}$ 、 $H_{2k}$  分别为小区  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  到第  $k$  个用户的信道矩阵，如图 3.4 所示。

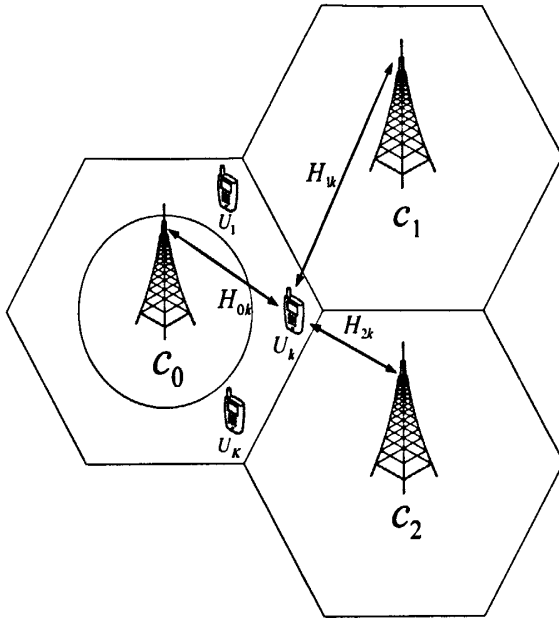


图 3.4 CoMP-SU-MIMO 系统模型

假设基站发送功率  $E_{\max}$  都相等, 则第  $k$  个用户接收到的信号为

$$y_k = H_{0k} w_{0k} s + H_{1k} w_{1k} s + H_{2k} w_{2k} s + n_k \quad (3-1)$$

式中,  $H_{ik} (i=0,1,2)$  为第  $k$  个用户在第  $i$  条链路上的信道增益;  $H_{ik} (N_T \times N_R)$  表示用户和基站间的信道,  $N_T$  为发送端天线数,  $N_R$  为接收端天线数,  $N_T \times N_R = 8 \times 2$ ;  $w_{ik} (N_T \times L_k) (i=0,1,2)$  为第  $k$  个用户在第  $i$  条链路上的预编码矩阵,  $L_k$  是基站向第  $k$  个用户发送的数据流;  $s$  为发送信息;  $n_k$  为第  $k$  个用户的加性高斯白噪声。

预编码矩阵  $w_k (N_T \times L_k)$  是本小区基站到第  $k$  个用户的信道  $H_k$  进行 SVD 分解后最大  $L_k$  个奇异值对应的右奇异矢量组成的矩阵。

对用户  $k$  的信道矩阵  $H_k$  进行 SVD 分解<sup>[41]</sup>, 得到

$$H_k = U_k \Lambda_k V_k^H \quad (3-2)$$

式中,  $U_k = [u_{k,1} \ u_{k,2}]$  和  $V_k = [v_{k,1} \ \dots \ v_{k,8}]$  分别是  $H_k$  的左、右奇异矩阵,

$\Lambda_k = \text{diag}([\lambda_{k,1} \ \lambda_{k,2}])$  是  $H_k$  的奇异值矩阵,  $[\lambda_{k,1} \ \lambda_{k,2}]$  是  $H_k$  的奇异值向量,

$\text{diag}(\bullet)$  表示向量的对角化。

其协方差矩阵为

$$\begin{aligned}
 R_k &= H_k^H H_k = V_k \Lambda_k V_k^H \\
 &= \begin{bmatrix} v_{k,1} & v_{k,2} & \cdots & v_{k,8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{k,1}^2 & & & & & & & \\ & \ddots & & & & & & \\ & & \lambda_{k,4}^2 & & & & & \\ & & & 0 & & & & \\ & & & & \ddots & & & \\ & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{k,1}^H \\ v_{k,2}^H \\ \vdots \\ v_{k,8}^H \end{bmatrix} \quad (3-3)
 \end{aligned}$$

### 3.3 传输链路信息 SNR 计算

在 RAN1 #58 会议上已经同意在隐性反馈机制下能够通过传统的 CQI 反馈方式来支持下行 CoMP 传输, 因此考虑将每一个基站与用户间的信道信息量化为 SNR 值并反馈, 在基站端利用反馈的信道信息就可以得到用户在资源块上的频域信道信息, 而重构得到 CoMP 信道。

下行 CoMP 链路中, 基站以一定的时间间隔将拟要发送的导频信息传输给用户, 用户根据这些导频信息来测量  $M$  个下行链路传输物理资源块, 并向基站反馈下行信道质量的 CQI 值<sup>[42]</sup>, 则第  $m$  个物理资源块上的瞬时状态信息 SNR 计算公式为

$$SNR(m) = \frac{\|H_m \omega_m\|^2 E}{N} \quad (3-4)$$

式中,  $m=1, 2, \dots, M$ ;  $H_m$  为瑞利信道的信道增益;  $\omega_m$  为传输第  $m$  个物理资源块时的预编码矩阵;  $E$  为发送功率;  $N$  为加性高斯白噪声功率。

在 CoMP 信道中还需要考虑路径的传播损耗, 在本文的系统模型中需要考虑的传播损耗可以分为大尺度衰落, 阴影衰落和小尺度衰落。

大尺度衰落是指电波在空间传播时产生的损耗, 它反映出宏观大范围的空间距离上的接收信号电平平均值的变化趋势。其衰落主要决定于传播的环境和条件, 同时受到传播距离的影响, 而且还与传播中的地形、地貌、传播的载波频率, 以及收发天线高度等因素密切相关。因此要想从理论角度给出一个确切完整的公式很困难, 一般在工程上多采用一些经验公式与模型。

阴影衰落主要是指电磁波传播路径上受到建筑物等的阻挡所产生阴影效应而带来的损耗, 反映了在中等范围内 (数百波长量级) 的接收信号电平平均值起伏变化的趋势。由于其变化率比传送信息率慢, 因此又称为慢衰落。

快衰落损耗反映了微观小范围 (数十波长以下量级) 的接收信号电平平均值起伏变化的趋势, 其电平幅度分布一般遵从瑞利分布。由于其变化速率比慢衰落



快, 因此又称为快衰落。

由于存在路径损耗, 用户接收到的信号会随着用户与基站间的距离增大而衰减, 本文采用的大尺度衰落路径损耗公式为

$$Pathloss = 30.18 + 16 \log(r) \quad (3-5)$$

式中,  $Pathloss$  是衰落值, 单位为  $dB$ ;  $r$  是用户与基站的距离, 单位为  $km$ 。

则用户估计的实际 SNR 值大小为

$$\begin{aligned} SNR(m) &= \frac{\|H_m \omega_m\|^2 E}{N} * Pathloss \\ &= \frac{\|H_m \omega_m\|^2 E}{N} * (30.18 + 16 \log(r)) \end{aligned} \quad (3-6)$$

### 3.4 协作传输结构 (TPCC 结构)

在下行 CoMP 系统模型中, 为了降低反馈开销, 本文采用了隐性 CQI 反馈机制, 并且用户反馈给基站的 CQI 值是根据实际的 CoMP 传输点计算。在 3.2.3 建立系统模型这一小节中, 选择了合适的协作簇, 包括一个主服务小区  $c_0$  和两个协作小区  $c_1$ 、 $c_2$ , 这三个小区的基站之间进行协作传输可以得到 7 种不同的传输点结构 (Transmission Points Configuration for CoMP, TPCC), 并且不同的 TPCC 结构对应不同的 CQI 值<sup>[43]</sup>。

$c_0$ 、 $c_1$  和  $c_2$  三个小区之间 CoMP 得到 TPCC 可能的结构, 见表 3.1。

- 1) 单个小区 CoMP 传输的 CQI 值: TPCC1, TPCC2 和 TPCC3 的 CQI 值;
- 2) 两个小区 CoMP 传输的 CQI 值: TPCC4, TPCC5 和 TPCC6 的 CQI 值;
- 3) 三个小区 CoMP 传输的 CQI 值: TPCC7 的 CQI 值。

表 3.1 TPCC 可能的结构

TPCC 结构编号	CoMP 传输端
1	$c_0$
2	$c_1$
3	$c_2$
4	$c_0$ and $c_1$
5	$c_0$ and $c_2$
6	$c_1$ and $c_2$
7	$c_0$ 、 $c_1$ and $c_2$

一般情况下，CQI 反馈可以分为两类：

1) 联合 CQI 反馈：用户计算出协作簇内所有小区 CoMP 的 CQI 值作为一个整体集合向基站进行反馈。

2) 独立 CQI 反馈：用户计算出协作簇内每个小区 CoMP 的 CQI 值分别向基站反馈。

在 LTE-A 系统下，根据目前的 CQI 反馈定义，反馈 CQI 值要比反馈 TPCC 的结构更为困难，若用户反馈三个单小区 CoMP 下的 CQI 值和 TPCC 可能的结构，服务基站可以通过反馈信息计算出其余的 CQI 值，在一定程度上能够减少系统负担，但是在这种方式下，用户需要计算三个 CQI 值，而如果用估计的 SNR 值来代替 CQI 值反馈，服务基站通过 SNR 值就能够计算出所有的 CQI 值，能大幅度地降低反馈信道的压力。

在这种反馈方式下，只需反馈单条链路的  $SNR_i$  ( $i=1, 2, 3$ )，便可计算出所有的 CQI 值 ( $SINR_j$ ,  $j=1, 2, \dots, 7$ )，并可以决定合适的下行传输机制，如图 3.5 所示。

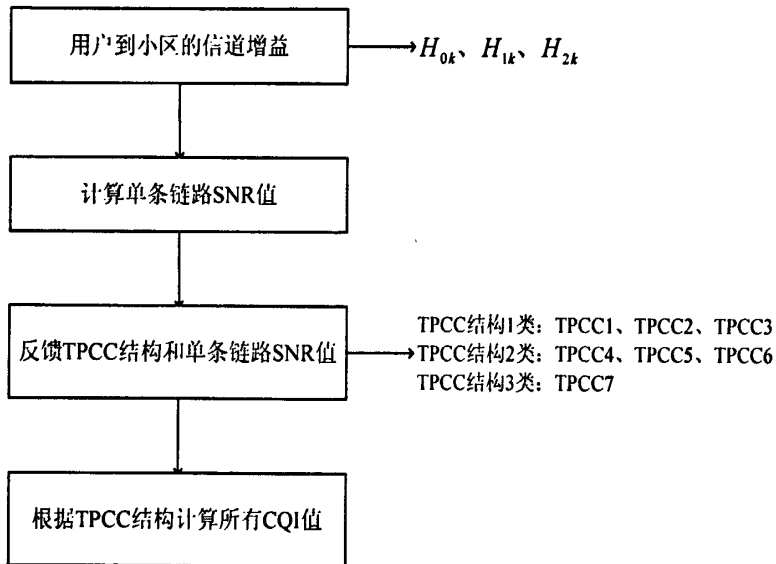


图 3.5 CoMP 系统 CQI 反馈流程图

测出用户分别到主服务基站和两个协作基站之间三条链路的信道状态信息，则第  $i$  条链路第  $m$  个簇的  $SNR_i$  值为

$$SNR_i(m) = \frac{\|H_m \omega_m\|^2 E}{N} * Pathloss \quad (3-7)$$

式中， $i=1,2,3$ ； $m=1, 2, \dots, M$ 。

基站根据单条链路的  $SNR_i$  值计算出对应 TPCC 结构下的 CQI 值 ( $SINR_j$ ,  $j=1,2,\dots,7$ ) 为

$$SINR_1 = \frac{SNR_1}{SNR_2 + SNR_3 + 1} \quad (3-8)$$

$$SINR_2 = \frac{SNR_2}{SNR_1 + SNR_3 + 1} \quad (3-9)$$

$$SINR_3 = \frac{SNR_3}{SNR_1 + SNR_2 + 1} \quad (3-10)$$

式中,  $SINR_1$  是用户到主服务小区的信干噪比;  $SINR_2$ 、 $SINR_3$  分别是用户到两个协作小区的信干噪比。

计算其余对应 TPCC 结构下的  $SINR_j$  值为

$$SINR_4 = \frac{SNR_1 + SNR_2}{SNR_3 + 1} \quad (3-11)$$

$$SINR_5 = \frac{SNR_1 + SNR_3}{SNR_2 + 1} \quad (3-12)$$

$$SINR_6 = \frac{SNR_2 + SNR_3}{SNR_1 + 1} \quad (3-13)$$

$$SINR_7 = SNR_1 + SNR_2 + SNR_3 \quad (3-14)$$

在 CoMP-SU-MIMO 场景中, 从上述的七种 TPCC 结构可以看出, 整个系统的工作机制是, 当主服务小区  $c_0$  中的主服务基站 eNodeB1 将第  $m$  个物理资源块分配给用户  $U_k$ , 而  $U_k$  不能满足 QoS 要求时, 则 eNodeB1 通过 X2 接口向协作小区  $c_1$  和  $c_2$  发起协作请求; 协作小区  $c_1$  和  $c_2$  中的协作基站 eNodeB2 和 eNodeB3 分别接收到 eNodeB1 发送的协作请求后, 判断与主服务小区相同频率的物理资源块是否有空闲, 若该物理资源块空闲, 则 eNodeB2 或/和 eNodeB3 向 eNodeB1 发送确认 (ACK) 信息, 表示同意参与协作传输; 若该物理资源块非空闲, 则 eNodeB2 或/和 eNodeB3 向 eNodeB1 发送否定 (NACK) 信息, 表示不同意参与协作传输; eNodeB1 在收到协作小区发回的 ACK 信息后, 向参与协作传输的协作小区基站发送需要给用户  $U_k$  传输的数据信息, 最后主服务基站 eNodeB1 和参与协作传输的协作基站联合为用户  $U_k$  传输数据信息。

### 3.5 有限反馈方案设计

在下行 CoMP 系统中, CQI 反馈信息可以通过精确的资源调度以及良好的链

路自适应提高下行 CoMP 链路的系统性能,但是它作为一种额外的开销,会降低上行 CoMP 链路的频谱效率,因此在设计反馈压缩方案时要综合考虑系统性能和系统开销之间的平衡。

### 3.5.1 资源块分簇

对于边缘用户数为  $U_k$ , 物理资源块数为  $M$  的下行 CoMP 系统, 当  $U_k$ 、 $M$  比较大的时候, 反馈量就会很大。为了解决这个问题, 可以将相邻的物理资源块分簇, 以簇为反馈单元, 将每个簇中所有物理资源块上测得的平均 SNR 值作簇的状态信息反馈给服务基站, 该方法可以大幅度地降低反馈量。

对下行链路传输的  $M$  个物理资源块进行分簇, 即将相邻的 4 个物理资源块划分为一个簇, 见表 3.2。

表 3.2 物理资源块分簇

1	2	3	4	.....	M-3	M-2	M-1	M
1				.....	M'			

则划分后总共可获得簇的个数为

$$M' = (M/4)_+ \quad (3-15)$$

式中,  $(\bullet)_+$  表示取上整。

由式 (3-15) 可知, 第  $m'$  个簇对应于  $(m, m+1, m+2, m+3)$  这 4 个物理资源块, 则簇信道状态信息  $SNR(m')$  的平均值为

$$\overline{SNR(m')} = (SNR(m) + SNR(m+1) + SNR(m+2) + SNR(m+3)) / 4 \quad (3-16)$$

将式 (3-6) 代入式 (3-16) 可改写为

$$\overline{SNR(m')} = \frac{1}{4} \left( \frac{\|H_m \omega_m\|^2 E}{N} * Pathloss + \frac{\|H_{m+1} \omega_{m+1}\|^2 E}{N} * Pathloss + \frac{\|H_{m+2} \omega_{m+2}\|^2 E}{N} * Pathloss + \frac{\|H_{m+3} \omega_{m+3}\|^2 E}{N} * Pathloss \right) \quad (3-17)$$

式中,  $SNR(m')$  表示簇信道状态信息,  $m' = 1, 2, \dots, M'$ ;  $SNR(m)$  表示一个物理资源块上的状态信息,  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  $H_m$  为瑞利信道增益;  $\omega_m$  为第  $m$  个物理资源块的预编码矩阵;  $E$  为发送功率;  $N$  为加性高斯白噪声功率;  $Pathloss$  为路径损耗。

根据上述过程, 举例说明在下行 CoMP 系统隐性 CQI 反馈中, 通过对物理资源块分簇的方法。对于单用户来说, 整个频带内测得的 48 个物理资源块上的 SNR 值就可以用 12 个簇的平均 SNR 值来代替, 因此, 只需给服务基站反馈回 12 个簇

的平均 SNR 值即可。用户反馈时需要占用上行链路的频带资源, 设定每一个反馈 SNR 值占用 5bit, 式中, 物理资源块的频带位置为 1bit, 物理资源块上测得的 SNR 值为 4bit, 则不采用分簇方法时, 用户总共需要反馈 48 个物理资源块上的 SNR 值, 即一个用户在一个时间间隔内需要的反馈信息为 240bit, 而采用分簇方法后, 一个用户在一个时间间隔内需要的反馈信息为 96bit, 由此可见, 通过分簇方法可以降低反馈量, 从而提高上行链路的频谱利用率。

### 3.5.2 门限判决

在 3.5.1 小节中, 采用了分簇的方法来降低系统的反馈量, 而本小节中提出在分簇的基础上设定门限信噪比的方法来进一步减少反馈开销。

门限信噪比技术是通过在用户端预先设置门限, 当测得的信道状态大于门限时, 将该状态信息反馈给服务基站, 否则, 丢弃该信道状态信息。该技术的目的是, 仅仅反馈信道条件好的物理资源块上的信道状态信息, 而不反馈信道条件差的物理资源块上的信道状态信息, 从而使得在资源分配时, 用户能以较大的概率分配到信道条件好的物理资源块。

在用户端预先设置 SNR 门限值  $\gamma$ , 然后将物理资源块分簇后每个簇内所测得的最小 SNR 值和预设门限值  $\gamma$  进行比较, 若该簇上测得的最小 SNR 值大于预设门限值  $\gamma$ , 则计算簇平均 SNR 值, 并反馈给服务基站; 若该簇上测得的最小 SNR 值小于预设门限值  $\gamma$ , 则将该簇的 4 个物理资源块上的 SNR 值都设为 0, 即不反馈该物理资源块上的 SNR 值, 服务基站就不对这些物理资源块进行调度。

预设门限判决步骤:

1) 选择第  $m'$  个簇中最小的 SNR 值

$$SNR_{\min}(m') = \min(SNR(m), SNR(m+1), SNR(m+2), SNR(m+3)) \quad (3-18)$$

将式 (3-6) 代入式 (3-18) 可改写为

$$SNR_{\min}(m') = \min \left( \frac{\|H_m \omega_m\|^2 E}{N} * Pathloss, \frac{\|H_{m+1} \omega_{m+1}\|^2 E}{N} * Pathloss, \dots, \frac{\|H_{m+3} \omega_{m+3}\|^2 E}{N} * Pathloss \right) \quad (3-19)$$

2) 门限值判决原则:

若  $SNR_{\min}(m') > \gamma$ , 则反馈该簇信噪比的平均值  $\overline{SNR(m')}$ ;

若  $SNR_{\min}(m') < \gamma$ , 则反馈该簇信噪比  $SNR(m') = 0$ 。

3) 统计分簇和门限判决后簇上物理资源块的 SNR 值。

## 3.5.3 系统吞吐量和反馈量的计算

1) 求解全反馈时系统吞吐量  $Capacity$  和反馈量  $R_f$

在全反馈中, 即系统不采用分簇且不预设门限, 反馈所有的信道状态信息时, 第  $k$  个用户的吞吐量为

$$Capacity_k = \sum_{m=1}^M B \log_2(1 + SNR(m)) \quad (3-20)$$

式中,  $M$  为物理资源块个数;  $B$  为系统带宽;  $SNR(m)$  为第  $m$  个物理资源块的信噪比。

则全反馈时系统总吞吐量为

$$Capacity = \sum_{k=1}^K Capacity_k \quad (3-21)$$

式中,  $K$  为用户个数。

采用波束为用户传输信息, 假设所有反馈量用 8 bit 量化, 反馈量大小为

$$R_f = MKb \quad (3-22)$$

式中,  $M$  为物理资源块个数;  $K$  为用户个数;  $b = (\log_2 M)_+ + (\log_2 N)_+ + 8$  表示每个资源块所需的 bit 数,  $(\bullet)_+$  表示取上整,  $N$  表示预编码码本数目。

2) 求解有限反馈 (分簇+门限方案) 时系统吞吐量  $Capacity'$  和反馈量  $R_f'$

在下行 CoMP 隐性反馈系统中, 通过分簇和门限方法, 得到第  $k$  个用户的吞吐量为

$$Capacity'_k = \sum_{m=1}^{M'} B \log_2(1 + 4 * \overline{SNR(m')}) \quad (3-23)$$

式中,  $M' = (M/4)_+$ ,  $(\bullet)_+$  表示取上整,  $M$  为物理资源块个数;  $B$  为系统带宽;  $\overline{SNR(m')}$  为分簇+门限后的第  $m'$  个簇的平均信噪比。

系统总吞吐量为

$$Capacity' = \sum_{k=1}^K Capacity'_k \quad (3-24)$$

式中,  $K$  为用户个数。

采用波束为用户传输信息, 假设所有反馈量用 8 bit 量化, 反馈量大小为

$$R_f' = pM'Kb \quad (3-25)$$

式中,  $p$  为簇的反馈概率, 大小为  $SNR_{\min}(m') > \gamma$  的概率, 根据用户预设的门限值  $\gamma$  的不同, 各小区反馈概率的大小也不同;  $M' = (M/4)_+$ ,  $(\bullet)_+$  表示取上整,  $M$  为物

理资源块个数;  $K$  为用户个数;  $b' = (\log_2 M')_+ + (\log_2 N)_+ + 8$  表示每个簇内物理资源块所需的  $bit$  数,  $(\bullet)_+$  表示取上整,  $N$  表示预编码码本数目。

### 3.6 仿真结果及其分析

为了验证 3.5 节中所设计的有限反馈方案的有效性, 本节进行下面的计算机仿真。

#### 3.6.1 仿真参数

在 CoMP-SU-MIMO 场景中, 得出有限反馈系统吞吐量和反馈量的计算公式, 则需要采用合适的仿真参数对设计方案进行验证, 本方案仿真参数选取参考当前 LTE-A 系统架构下标准参数, 具体的仿真参数选取见表 3.3。

表 3.3 仿真参数表

仿真参数	具体数值
发送天线数目	8
接收天线数目	2
小区拓扑	六边形小区形状, 3 个小区
中心区域半径	0~300 m
边缘区域半径	300~500 m
带宽	10 MHz
物理资源块总数目	48
每个物理资源块上发送功率	17 dBm
噪声功率	18.75 dBm
每个小区边缘用户数目	20
信道	瑞利信道
SNR 门限值	4, 8, 12, 16, 20
路径损耗公式	$30.18 + 26 * \log(r)$ dB
TTI	4000
阴影衰落	6 dB

在仿真过程中,参数的选择会整体影响系统的性能,因此对上述参数选择详细说明:

1) 带宽:根据 LTE-A 系统协议规定,每个物理资源块大小为 180KHz,上下行各有 50 个物理资源块,并且相邻物理资源块之间留有保护间隔,因此,带宽选取为 10MHz 带宽。

2) 每个物理资源块分配的发送功率:本文没有考虑功率分配问题,每个物理资源块上分配得到的功率是相等的,考虑到给边缘用户分配功率时,如果分配的功率过大,造成的干扰也会随之增大,因此,本文选取为每个物理资源块分配 17dBm 大小的功率。

3) 噪声及其功率:信道中的噪声及其功率是影响信道信噪比值的重要参数之一,本文中选取信道噪声为高斯白噪声,噪声服从  $N(0, \sigma^2)$  分布,  $\sigma^2$  大小为 18.75dBm。

4) 信道:瑞利衰落模型适用于描述建筑物密集的城镇中心地带的无线信道。密集的建筑和其他物体使得无线设备的发射机和接收机之间没有直射路径,而且使得无线信号被衰减、反射、折射、衍射,因此本文采用瑞利信道作为信道模型。

5) TTI: TTI 为发送时间间隔,它的选取影响系统仿真性能曲线的平滑度,若 TTI 仿真次数较少的话,无法真实反映长期的系统仿真算法性能,本章采用 TTI 次数为 4000 次。

6) 阴影衰落:通信过程中存在阴影衰落,阴影衰落大小是路径衰减中一个重要指标,考虑实际情况,本文选取阴影衰落大小为 6dB。

### 3.6.2 仿真结果分析

图 3.6 给出了 CoMP-MU-MIMO 场景中本章设计的有限反馈方案和现有的全反馈方案在系统吞吐量上的比值,从图中可以看出随着 SNR 门限值的增大,有限反馈方案和全反馈方案相比系统吞吐量会有所下降,这是由于 SNR 门限值越高,质量差的信道信息被丢弃的概率越大,导致物理资源块不被用户使用而浪费掉,系统总的吞吐量就有所下降。



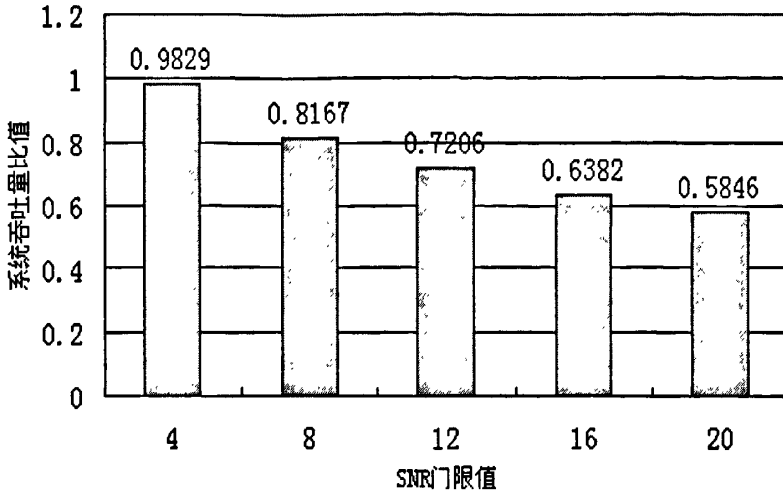


图 3.6 有限反馈和全反馈的系统吞吐量比值

图 3.7 给出了 CoMP-MU-MIMO 场景中本章设计的有限反馈方案和现有的全反馈方案在系统反馈量上的比值，从图中可以看出随着 SNR 门限值的增大，有限反馈方案和全反馈方案相比系统反馈量大幅度地降低，这是由于 SNR 门限值越高，需要反馈的信道状态信息越少，反馈量也随之降低。

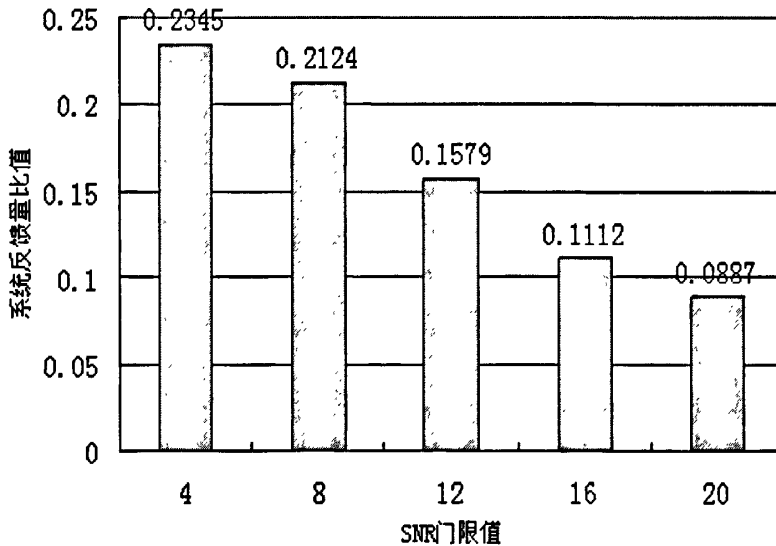


图 3.7 有限反馈和全反馈的系统反馈量比值

上述的仿真结果表明，在 CoMP-MU-MIMO 场景中本章设计的有限反馈方案与先前全反馈技术相比，由于对物理资源块进行分簇，并且在用户端预设合适的 SNR 门限值，可以使在损失少量的系统吞吐量情况下，大幅地减小反馈开销，因此，该反馈方案适合多点协作边缘用户使用，并且随着以后网络复杂度的提高和用户业务量的增加，其性能要远优于原有技术方案。

### 3.7 本章小结

本章首先介绍了目前在 CoMP-MU-MIMO 场景中的反馈设计,再针对现有技术不足,改进了其反馈设计方案。该方案主要是对系统的物理资源块进行处理和筛选,先是对物理资源块分簇,然后在用户端预设 SNR 门限值,用来对信道状态信息进行判决,从而减少反馈开销,最后从系统的反馈量和系统的吞吐量两个角度进行仿真验证,仿真结果表明,本章设计的有限反馈方案在损失少量的系统吞吐量前提下,能够大幅度地降低系统反馈量。



## 第四章 CoMP-MU-MIMO 有限反馈方案设计

### 4.1 引言

在 LTE-A 下行 CoMP 中, 与 SU-MIMO 相比较, MU-MIMO 被认为可以极大的提升系统吞吐量和频谱效率<sup>[44]</sup>, 并且 MU-MIMO 更适合用于相关性弱, 也就是频率选择性弱的场景下。LTE Rel-8 中 SU-MIMO 和 MU-MIMO 采用隐性反馈的方法, LTE Rel-9 中采用透明 MU-MIMO (用户不知道自己是处于 SU-MIMO 还是 MU-MIMO), 并且无论是 TDD 还是 FDD 均支持隐性的反馈方法, 以及发射分集的发送方式 (无需反馈 PMI 和 RI)。因此在 CoMP-MU-MIMO 的传输模式下, 更多的还是采用隐性反馈机制。

针对隐性反馈机制的探讨, 最近几次会议中都提出了如何解决无线网络中 CoMP 架构下用户反馈信息量大且反馈精度不够精确的问题, 国内许多提案都讨论了在不影响系统性能的前提下, 采用了何种反馈压缩方案来减小 DL CoMP 隐性反馈开销。例如, 在提案 “IMT-A\_LTE+\_09309”<sup>[45]</sup>中提到的技术方案。

该技术方案主要是基于 CQI 的信道质量指示反馈方法, 它在隐性反馈机制下, 采用了反馈单条链路的信噪比 SNR 值来代替 CQI 信息的反馈方案, 由此降低了信道信息的反馈量, 但是该技术方案并没有对信道信息进行压缩处理, 从而导致频谱利用率较低, 同时也没有考虑到用户不反馈时产生的中断情况, 并且反馈开销仍然比较大。因此本章针对该技术方案的不足之处, 在将该技术方案应用于 CoMP-MU-MIMO 场景的基础上, 对物理资源块进行有效的处理, 并采用合适的调度算法进行系统性能评估, 使其达到高系统吞吐量和低反馈开销之间的折中。

### 4.2 系统模型

在第三章中已经建立了 LTE-A 下行 CoMP 多小区系统, 并且给出了获得可变服务集合和半动态选择协作簇的方法, CoMP-SU-MIMO 系统和 CoMP-MU-MIMO 系统在主服务小区划分和协作簇选择上是一致的, 因此本章不再详细叙述如何获得可变服务集合与协作簇, 而是直接给出 CoMP-MU-MIMO 的系统模型: 边缘用户集合  $U_{GK} = \{U_1, U_2, \dots, U_K\}$ , 协作簇  $C = \{C_0, C_1, C_2\}$ ,  $C_0$  为主服务小区,  $C_1$ 、 $C_2$  为协作小区, 其中  $H_{0k}$ 、 $H_{1k}$ 、 $H_{2k}$  分别为小区  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  到第  $k$  个用户的信道矩阵<sup>[46]</sup>, 如图 4.1 所示。

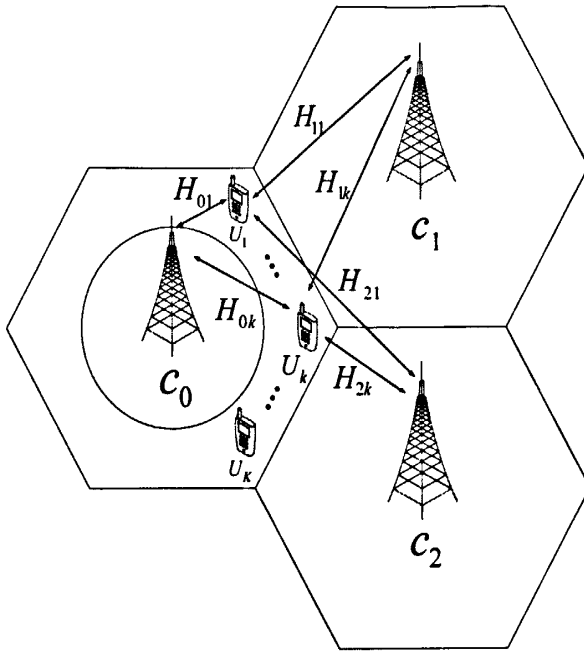


图 4.1 CoMP-MU-MIMO 系统模型

假设基站发送功率  $E$  都相等, 预编码采用双码本方式得到的第  $k$  个用户接收到的信号为

$$y_k = Q_{0k} H_{0k} P_{0k} s + Q_{1k} H_{1k} P_{1k} s + Q_{2k} H_{2k} P_{2k} s + n_k \quad (4-1)$$

式中,  $H_{ik} (i=0,1,2)$  为第  $k$  个用户在第  $i$  条链路上的信道增益;  $H_{ik} (N_T \times N_R)$  表示用户和基站间的信道,  $N_T$  为发送端天线数,  $N_R$  为接收端天线数,  $N_T \times N_R = 8 \times 2$ ;  $Q_{ik}$ 、 $P_{ik} (i=0, 1, 2)$  为第  $k$  个用户第  $i$  条链路上的预编码矩阵, 第  $i$  个小区基站到第  $k$  个用户的信道  $H_{ik}$  进行 SVD 分解后  $H_{ik} = U_{ik} \Sigma_{ik} V_{ik}^H$ ,  $U_{ik}$  和  $V_{ik}$  为酉矩阵, 预编码矩阵  $Q_{ik}$ 、 $P_{ik}$  的大小分别为  $U_{ik}$ 、 $V_{ik}$  的第一列元素;  $s$  为发送信息;  $n_k$  为第  $k$  个用户的加性高斯白噪声。

### 4.3 有限反馈方案设计

对于 CoMP-MU-MIMO 系统, 理想反馈下的反馈信息量会严重影响其效率, 因此考虑有限反馈更具有实际意义, 有限反馈方案就是在用户估计和预测得到的所有物理资源块的 CQI 值后, 对这些信息进行处理或筛选, 最后只是将部分信息通过反馈信道传输给基站。当基站端物理资源块调度表上出现没有用户反馈信息的情况时, 该物理资源块将不传输任何数据, 称为反馈中断。根据对 CQI 处理或是筛选的方法不同, 有很多种有限信道反馈算法, 本章中在 CoMP-MU-MIMO 场

景下, 引出的有限反馈方案是根据一定的中断概率, 并经过最优物理资源块选择和动态门限设置而得到。

#### 4.3.1 最优物理资源块选择

CoMP-MU-MIMO 系统模型和 CoMP-SU-MIMO 系统模型的区别仅仅在于物理资源块上数据流的分配问题上, 而对物理资源块上的 SNR 值计算是没有影响的, 因此可以直接利用第三章的式 (3-6) 计算物理资源块上的 SNR 值。

物理资源块择优的具体步骤如下:

- 1) 基站以一定时间间隔给用户发送导频信号, 用户在接收到的导频信号中检测出  $M$  个物理资源块上的信道状态信息。
- 2) 通过式 (3-6) 计算出  $M$  个物理资源块上的 SNR 值。
- 3) 用户对所有物理资源块的 SNR 值按照从大到小的顺序进行排列。
- 4) 从左至右选择最优的  $L$  ( $0 < L < M$ ) 个物理资源块上信道信息进行反馈, 则基站端  $M$  个物理资源块上有  $x$  个用户反馈信息的概率为

$$\Pr(x) = \binom{K}{x} \left(\frac{L}{M}\right)^x \left(1 - \frac{L}{M}\right)^{K-x} \quad (4-2)$$

式中,  $K$  是边缘用户个数;  $M$  是物理资源块个数。

#### 4.3.2 反馈中断

在 CoMP-MU-MIMO 场景中, 有限反馈方案和全反馈方案相比, 系统吞吐量的损失就在于有些时候没有用户反馈, 因为只要有用户反馈, 就可以选择信道增益最大的用户, 所以反馈中断概率是一个和系统吞吐量的损失直接相关的量, 反馈中断概率越大, 系统吞吐量损失越多。

在多用户 CoMP 系统中, 随着用户数的增加, 在合适的调度机制下, 系统的吞吐量也会随之增加, 那么信道条件最好的用户其信道增益值较大的概率也会增大, 然而为了降低系统反馈量, 将选择信道增益较大的用户反馈。假设用户的信道是瑞利衰落信道, 则边缘用户  $U_{GK}$  的信道增益小于  $\alpha$  的概率为

$$P_K(U_{GK} < \alpha) = P_K(U_1, \dots, U_K < \alpha) = \prod_{i=1}^K P(U_i < \alpha) = \left(1 - e^{-\frac{\alpha^2}{2\delta^2}}\right)^K \quad (4-3)$$

式中,  $K$  为边缘用户个数;  $\delta^2$  为瑞利衰落信道方差。

本章提出的是基于门限的信道有限反馈, 如果每个用户只反馈大于某个门限的若干信道信息, 那么很可能会出现某个物理资源块上没有用户反馈的情况, 本章定义一个反馈中断概率  $\gamma_{target}$  来反映没有用户反馈的概率, 为了简单起见, 当

用户反馈中断时, 本文的处理是将该物理资源块丢弃不用, 那么该物理资源块上的吞吐量为 0。设定的系统门限为  $R(K)$ , 则由式 (4-3) 可知  $K$  个用户的中断概率为

$$\gamma_{target} = P_K(R(K)) = \left(1 - e^{-\frac{R(K)^2}{2\delta^2}}\right)^K \quad (4-4)$$

则参与反馈的边缘用户数为

$$K' = (K * \gamma_{target})_- \quad (4-5)$$

式中,  $(\bullet)_-$  表示取下整。

### 4.3.3 动态门限判决

在第三章中提出的门限设置有限反馈方案, 其设定的门限值固定, 随着系统中用户数的增加, 大于门限的用户数增多, 需要反馈的用户数也会增加, 为了抑制反馈量的线性递增, 本章中将设置门限  $R(K)$  是关于总用户数  $K$  的递增函数, 即随着用户数变化的动态门限。

由式 (4-4) 不难得出  $R(K)$ , 即

$$R(K) = \left\{ -2\delta^2 \ln \left[ 1 - \gamma_{target}^{\frac{1}{K}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4-6)$$

式中,  $\delta^2$  为瑞利衰落信道方差;  $\gamma_{target}$  为中断概率;  $K$  为小区边缘所有用户数;  $R(K)$  为在用户数为  $K$  的条件下的门限值。

对最优的  $L$  个物理资源块进行动态门限设置, 即将用户测得的物理资源块上的 SNR 值和动态门限  $R(K)$  进行比较, 若该物理资源块上的 SNR 值大于  $R(K)$ , 反馈给服务基站; 若该物理资源块上的 SNR 值小于  $R(K)$ , 则将该物理资源块上的 SNR 值设为 0, 也就是不反馈该物理资源块上的 SNR 值, 服务基站就不对这个物理资源块进行调度。

动态门限判决步骤如下:

1) 选择最优  $L$  个物理资源块上的 SNR 值。

2) 根据中断概率设置动态门限  $R(K)$ 。

3) 门限值判决原则:

若  $SNR(m) > R(K)$ , 则反馈该物理资源块  $SNR(m)$  值;

若  $SNR(m) < R(K)$ , 则反馈该物理资源块  $SNR(m) = 0$ 。

4) 统计经筛选判决后的物理资源块上 SNR 值, 进行反馈。

5) 主服务基站根据反馈回的 SNR 值列出物理资源调度表, 再采用调度算法将处理后的物理资源块分配给参与反馈的用户。

## 4.4 资源调度

在 CoMP-MU-MIMO 场景中, 用户向主服务基站反馈处理后的物理资源块反馈, 并在基站形成新的物理资源调度表, 接着主服务基站通过适当的调度准则将物理资源块分配给参与反馈的用户, 可以使得整个系统的吞吐量得到进一步的提高。因此在本章中为了实现反馈量和系统性能的折中, 通过用户调度方案来验证。

常用的基本调度算法有三种<sup>[47-50]</sup>: 轮询 (RR) 调度算法、最大载干比 (Max C/I) 调度算法、正比公平 (PF) 调度算法。

### 4.4.1 轮询调度算法 (RR, Round Robin)

轮询算法是公平性的上界以及系统吞吐量的下界, 在考虑公平性时, 一般都把轮询算法作为衡量的标准与其他算法进行比较。

循环调度就是基站轮流地为扇区内的终端提供服务, 其优先级计算函数为:

$$k = \arg \max_{j=1, \dots, K} \{T_j(t)\} \quad (4-7)$$

该算法的基本思想是: 循环地调用每个用户, 就被调度的概率而言, 对于 K 个用户, 一次循环中每个用户被调用的概率都是  $1/K$ , 也就是说, 保证以均等的机会为系统中的所有用户分配资源, 使用户按照某种确定的顺序占用无线资源进行通信。轮询算法认为不同用户的传输优先等级是平等的, 因而实现了用户间的最佳公平性。

该算法执行的原则是, 以牺牲吞吐量为代价, 公平地为系统内的每个用户提供资源。从占用资源角度而言, 轮询调度算法是最公平的, 不仅可保证用户的长期公平性, 也可以保证用户的短期公平性。轮询算法在每次调度时, 与最大 C/I 算法相同, 并不考虑用户以前被调度的情况, 因此轮询调度算法是无记忆的。

轮询算法是最简单和最容易实现的, 然而该算法也存在致命的缺点, 即轮询算法没有考虑无线信道的时变特点, 也没有利用无线信道所提供的的相关信息 (如信噪比 SNR 值) 等, 因此难以充分利用系统资源以达到较高的系统资源利用率。此外, 该算法没有考虑用户之间存在不同 QoS 需要的情况, 如对数据报延时要求严格的用户和延时要求相对较松的用户一视同仁, 因此在很多情况下不能满足部分通信系统的要求。



#### 4.4.2 最大载干比调度算法 (Max C/I)

如果调度器不是采用有序的无线资源分配 (Round Robin 算法), 而是采用依赖于信道质量的调度算法 (Max C/I 算法), 即按信道瞬时状况好坏区分优先次序向终端发送数据, 系统容量将会有显著增加。

Max C/I 算法的基本原则是: 在每个传输间隔, 基站依据用户发送的信道状况报告, 只选择 C/I 最大的用户, 并将下一传输时隙分配给该用户。Max C/I 的优先级计算为:

$$k = \arg \max_{j=1, \dots, K} \left\{ \left( \frac{C}{I} \right)_j (t) \right\} \quad (4-8)$$

Max C/I 调度算法其本思想是: 在选择传输用户时, 只选择信道状况最好的用户, 即让信道条件最好的用户作为一个集合进行传输, 因而能够适应无线信道的时变特性, 充分利用了多用户分集的效果。正因为这样, Max C/I 算法的吞吐量基本上是吞吐量的极限值, 无论采用任何其他调度算法, 吞吐量都不可能超过它。Max C/I 算法是吞吐量性能的上界以及公平性的下界。从占用资源角度而言, Max C/I 调度算法是最公平的。但是, 由于每个用户所处的位置不同, 其接收的信号强度就有所不同。Max C/I 算法带来的弊端也是显而易见的, 即距离基站较近, 也就是信道状况较好的用户得到更多的传输机会。这将不可避免的使处于小区边缘的用户的 C/I 较低, 按照这种调度算法, 这些用户将得不到服务的机会, 因此这种算法是最不公平的, 这一点在仿真过程中可以明显的看到。

Max C/I 算法虽然能够达到较高的系统容量和资源利用率, 但是从算法复杂度考虑, 需要对用户的 SNR 值进行排序选择, 因此其复杂度高于 Round Robin 算法, 而且该算法由于没有考虑用户的公平性, 在系统运行中, 可能会出现一些信道条件相对较差的用户长时间得不到服务的情况, 也就很难提供时延保障。

#### 4.4.3 正比公平调度算法 (PF, Proportional Fair)

正比公平调度算法在用户公平性和系统吞吐量间提供了一个非常好的折中。在该算法中, 每个用户都会分配到一个优先级, 任意时刻优先级最高的用户接收服务。

PF 调度算法的优先级计算函数为:

$$k = \arg \max_{j=1, \dots, K} \left\{ \left( \frac{r_j(t)}{R_j(t)} \right) \right\} \quad (4-9)$$

式中,  $R_j(t+1) = (1 - \frac{1}{T_c})R_j(t) + \frac{r_j(t)}{T_c}$ ;  $r_j(t)$  为当前时刻用户的瞬时速率, 由用户的

信道状态信息决定;  $R_j(t)$  为用户在时间窗  $T_c$  内的平均速率。

在 PF 调度算法中, 随着用户获得传输机会的增多, 平均传输速率提高, 其优先级降低, 就使原来低优先级的用户获得更多的传输机会, 从而保证用户间的公平性, 并且本身也利用了多变的信道状况, 达到了维持吞吐量较高的效果。因而, PF 算法实现了使系统吞吐量最大化与尽可能保持各用户之间公平性的折中。利用了信道的时变特性, 该算法使得信道条件较差的移动台也能得到一定的服务速率。从算法的复杂度来看, PF 调度算法除了要对调度优先级指标进行排序之外, 还要在每帧计算所有用户的平均速率和调度优先级指标, 因此其复杂度要高于 Max C/I 调度。

#### 4.4.4 资源调度流程

在 4.4.1-4.4.3 这三小节中, 讨论了常见的三种用户调度算法, 根据它们各自的优缺点, 再结合 4.3 节设计的有限反馈方案, 选择轮询调度算法进行用户资源调度, 这是由于在本方案的多用户场景中用户处于小区边缘, 必须考虑到用户之间公平性问题, 否则会出现很多用户分配不到资源而导致通信中断的情况。在本小节中将举例说明用户资源调度的整个流程。

1) 用户将处理后的信道状态信息反馈回主服务小区 eNodeB1, eNodeB1 对信道状态信息进行解码, 解出信道原来的状态信息。

2) eNodeB1 将各用户的信道状态信息进行汇总, 列出资源调度的表单, 例如表 4.1 所示。

表 4.1 资源调度表

	PRB1	PRB2	PRB3	...	PRB47	PRB48
UE <sub>1</sub>	4	7	2	...	6	10
UE <sub>2</sub>	8	2	3	...	4	8
UE <sub>3</sub>	0	1	0	...	4	5
...	...	...	...	...	...	...
UE <sub>k</sub>	12	4	8	...	6	3

3) eNodeB1 采用轮询算法将物理资源块分配给用户。

eNodeB1 以用户总数按轮次分配, 从第一个资源块 PRB1 开始调度, 先选择 PRB1 上 SNR 值不为 0 的第一个用户, 查表 4.1 可知第一个用户为 UE<sub>1</sub>, 那么将 PRB1 分配给 UE<sub>1</sub>, 接着分配第二个物理资源块, 分配时不考虑本轮前面已经分到的用户, 即将第二个资源块分配给除 UE<sub>1</sub> 以外的下一个物理资源块上 SNR 值不为 0 的用户, 查表 4.1, 那么 PRB2 分配给 UE<sub>2</sub>, 同样方法将这一轮中 K 个用户依次进行分配, 若 48 个物理资源块都分配完, 则结束, 若没有分配完, 则进行第二轮资源分配, 同样从第一个用户 UE<sub>1</sub> 开始选择, 依次轮询, 直到所有资源块分配完。

#### 4.4.5 系统吞吐量和反馈量计算

在 3.5.3 节中已经得出计算全反馈的公式, 因此本节就只计算在物理资源块择优处理结合动态门限下的有限反馈的系统吞吐量和反馈量的公式。

1) 求本方案有限反馈的系统吞吐量 *Capacity*'

第 *k* 个用户的系统吞吐量为

$$Capacity'_k = \sum_{m=1}^{M'} B \log_2(1 + SNR_k(m)) \quad (4-10)$$

式中, *M'* 为分给第 *k* 个用户的物理资源块数目; *B* 表示系统带宽; *SNR*(*m*) 表示第 *m* 个物理资源块信噪比。

所有参与反馈的用户系统吞吐量为

$$Capacity' = \sum_{k=1}^{K'} Capacity'_k \quad (4-11)$$

式中,  $K' = (K * \gamma_{target})_-$  表示参与反馈的用户数, *K* 表示小区边缘所有用户数目。

2) 求本方案有限反馈的系统反馈量 *R<sub>f</sub>'*

采用波束为用户传输信息, 假设所有反馈量用 8 bit 量化, 反馈量大小为

$$R_f' = M' K' b' \quad (4-12)$$

式中, *M'* 可用于调度的物理资源块数目;  $K' = (K * \gamma_{target})_-$  表示参与反馈的用户数, *K* 表示小区边缘所有用户数目;  $b' = (\log_2 M')_+ + (\log_2 N_{code})_+ + 8$  表示每个资源块所需的 bit 数, (•)<sub>+</sub> 表示取上整, *N<sub>code</sub>* 表示预编码码本数目。

## 4.5 仿真结果及分析

为了验证 4.3 节中所设计的有限反馈方案的有效性, 本节进行下面的计算机仿真。

### 4.5.1 仿真参数

在 CoMP-MU-MIMO 场景中, 得出有限反馈系统吞吐量和反馈量的计算公式, 则需要采用合适的仿真参数对设计方案进行验证, 本章仿真参数选取和第三章仿真参数的选取基本一致, 具体的仿真参数选取见表 4.3。

表 4.3 仿真参数表

仿真参数	具体数值
发送天线数	8
接收天线数	2
小区拓扑	六边形小区形状, 3 个小区
中心区域半径	0~300m
边缘区域半径	300~500m
带宽	10MHz
物理资源块总数	48
最优物理资源块数	36
每个物理资源块上发送功率	17dBm
噪声功率	18.75dBm
每个小区边缘用户数	20-50 个
信道	瑞利信道
路径损耗公式	$30.18+26*\log(r)$
TTI	8000
阴影衰落	6dB
中断概率	5%
调度算法	轮询调度

### 4.5.2 仿真结果分析

图 4.2 给出了 CoMP-MU-MIMO 场景中本章设计的有限反馈方案和现有反馈技术方案在系统吞吐量上的比值, 显而易见, 随着用户数的增加有限反馈方案的系统吞吐量和现有反馈技术方案的系统吞吐量基本上没有变化, 因此在本文设计的有限反馈方案下, 系统并没有损失太大的容量, 从而表明在降低了上行信道的信令开销同时, 能保证反馈用户的信道响应信息的精确性。

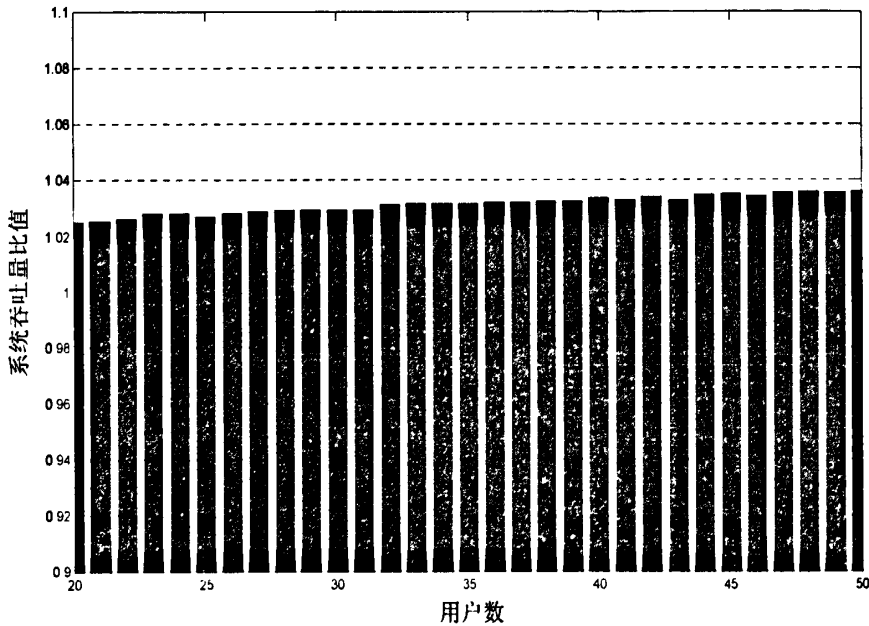


图 4.2 有限反馈与全反馈系统吞吐量比值

图 4.3 给出了 CoMP-MU-MIMO 场景中本章设计的有限反馈方案和现有反馈技术方案在系统反馈量上的比值, 从图中可以看出, 随着用户数的增加有限反馈方案的反馈量明显下降, 并且用户数越大效果越显著, 由反馈带来的上行链路的额外开销也随之降低, 上行链路的额外开销降低的同时, 提高了上行链路的频谱利用效率, 使得 CoMP-MU-MIMO 动态门限反馈方案在实际中可以有效应用。

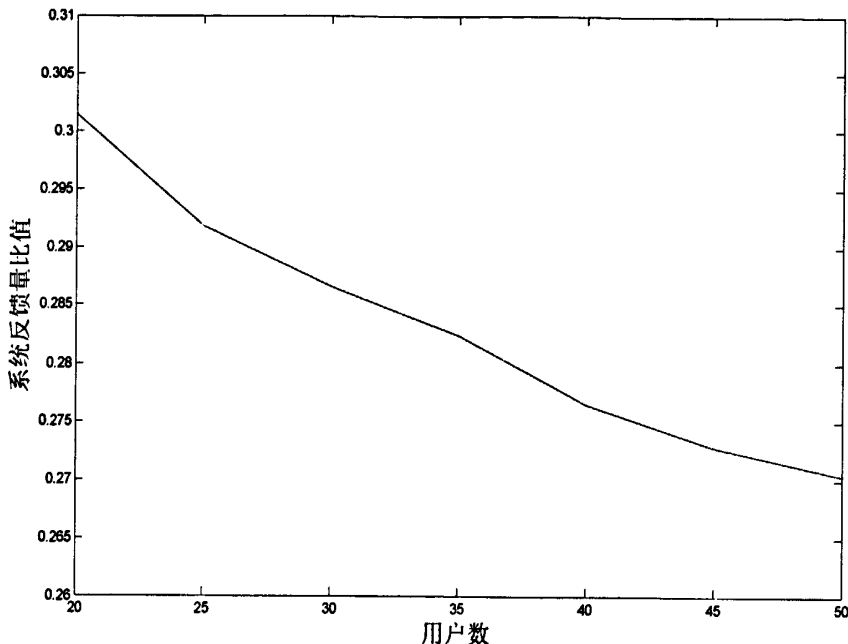


图 4.3 有限反馈与全反馈系统反馈量比值

对上述的仿真结果详细分析如下:

1) 本方案在 MU-MIMO 条件下协作基站在一个时频资源块上能够同时服务多个用户, 因此较之于 SU-MIMO 能提供更高的小区平均频谱利用率, 同时获得比 SU-MIMO 更好的系统增益。

2) 本方案在信道信息用 SNR 值表示时, 预编码采用了双码本, 比起现有技术采用单码本进行预编码的方案, 由于可共选择的码本更多, 与信道更匹配, 精度更高, 反馈信息质量将更好。

3) 本方案对物理资源块进行重排后选择最优的  $L$  个物理资源块, 比起现有技术不进行物理资源块重排的方案, 由于相邻的物理资源块 SNR 值更加接近, 从而使物理资源块分配产生的误差更小, 并且对物理资源块进行处理和筛选后, 能够获得更高的效率。

4) 本方案采用中断概率, 对信道较差的用户进行限定, 使之不参与反馈, 从而获得更好的信道增益; 同时通过中断概率得到随用户数变化的动态门限, 比起现有技术使用固定门限方案, 由于从统计意义上进行动态门限设置, 可以在相对较少的容量损失下, 很大程度上减少反馈量。

因此, 在 CoMP-MU-MIMO 系统模型下采用本反馈方案, 用户向基站反馈的信道信息越少, 对上行信道带来的压力也越小, 系统的性能也得到提升, 而系统吞吐量的提高表示小区所能提供数据速率越大, 小区就能够为更多的用户提供传输业务。

## 4.6 本章小结

本章首先介绍了目前 CoMP-MU-MIMO 场景中的反馈设计,再针对现有技术的不足,提出了新的有限反馈设计方案。该反馈方案首先对所有的物理资源块进行择优处理,然后从系统的反馈中断概率的角度得出门限设置,再根据动态门限对信道状态信息进行判决,因此在很大的程度上减少了反馈量,接着从资源调度的角度来分析系统吞吐量,最后根据计算出的系统反馈量和吞吐量这两个方面进行仿真验证,分析其性能。

## 第五章 结束语

LTE-A 系统中信道状态信息精确的反馈是主服务小区基站对资源调度的主要参照,在通信过程中具有重要的意义。然而大量的信息反馈给系统造成了巨大开销,在反馈信道带宽受限的情况下,大量的反馈可能成为系统支持用户数的限制因素。因此,为了提高系统的频谱效率,就需要降低反馈开销,而减少反馈量可以从部分信道信息反馈策略入手,本文先对 LTE-A 系统 CoMP 技术下现有的反馈机制和反馈设计原则进行了详细的讨论,在此基础上,对当前业界广泛提出的 CQI 反馈方案实施改进,设计了 CoMP-SU-MIMO 场景下一种物理资源块分簇结合固定门限的反馈算法,以及 CoMP-MU-MIMO 场景下一种物理资源块择优结合动态门限的反馈算法,并仿真分析了这两种算法的性能。

本文主要工作有:

1) 阐述了 LTE-A 系统发展概况,包括 LTE-A 系统的需求和采用的新技术,着重分析了 CoMP 技术及其在 LTE-A 系统中的定位,并总结了现有 LTE-A 系统中对反馈机制的要求,同时提出了现有反馈机制的缺点与不足。

2) 介绍了 CoMP 的基本原理,简单地描述了系统模型的建立以及 CoMP 的几种分类和基本传输方案,从不同的角度详细叙述了 CoMP 的反馈机制的设计,并总结了这些反馈机制的优劣性,为后续研究提供理论基础。

3) 在 CoMP-SU-MIMO 场景中设计了一种物理资源块分簇结合固定门限减小反馈量的算法。主要是从物理资源块的分簇入手,然后在用户端预设门限对信道状态信息进行处理,从而减少系统的反馈量,并详细分析了该方法对系统吞吐量的影响,最后通过计算机仿真验证了该反馈方案的正确性及有效性,并给出了性能分析结果。

4) 在 CoMP-MU-MIMO 场景中设计了一种物理资源块优化结合动态门限减小反馈量的算法。主要是先对物理资源块进行择优处理,然后从反馈中断概率间接反映系统吞吐量损失的角度进行门限设置,从而减少系统的反馈量,接着又通过基站对用户进行资源调度,得出该反馈方案对系统吞吐量性能的影响,最后通过计算机仿真验证了本文反馈方案的正确性及有效性,并给出了性能分析结果。

结合仿真程序的运行结果可以得出,本文在 CoMP-SU-MIMO 场景和 CoMP-MU-MIMO 场景中分别提出的有限反馈方案能够很好地解决 LTE-A 系统中用户反馈量大的问题,并且提高了小区边缘用户的系统吞吐量,是实用可行的。本文中的有限反馈方法也适用于复杂的网络系统和用户业务量大的场合,并且其分析技术在 LTE-Advanced 系统、保险、金融、证券军事、计算机、以及整个通



信领域有很广阔的应用前景。但本文的仿真结果均是在理想信道模型的前提下进行的,未考虑信道的多径、协作小区之间同步延时、以及用户之间的干扰等问题。这些问题有待于以后进一步解决,这也是未来移动通信发展中需要关注的重点,引领了未来移动通信的发展方向。

## 致 谢

我的硕士学习生活即将结束，回首这令人难忘的三年时光，我在学业上取得的每一次进步，都离不开老师、同学、家人、朋友的关心、支持和帮助。在此我向他们表示最衷心和最诚挚的谢意。

本文的工作是在导师傅丰林教授和杨清海副教授的悉心指导下完成的。傅老师和杨老师严谨的治学态度、丰富的科研经验、一丝不苟的工作作风、儒雅的学者之姿以及平易近人、和蔼可亲、诲人不倦的师者风范，给我留下了极为深刻的印象和永久的回忆。他们使我不仅在科学知识上、科研工作中得到了极大的长进与提高，更重要的是让我学会了很多为人处世的道理。他们对我学习上和生活上的关心和照顾我永远铭记于心。在此谨向傅老师和杨老师表示由衷的谢意。

谢谢你们！

感谢陈健老师和阔永红老师对我学习和工作上的关心和照顾，谢谢！

感谢吕磊、李静磊同学，在学习上对我不厌其烦的帮助，他们无私的鼓励和指点，以及与他们自由的探讨和交流，使我在课题进行过程中深受启发，论文的顺利完成离不开他们的帮助！

感谢张海超、刘语乔、李东、宋海路同学，在学校生活中陪我一起学习，娱乐，生活！

感谢池文静、郭润霞、余菁等朋友，在学习之余充实了我的生活，你们的关心与帮助是我快乐的源泉！

感谢 329 实验室所有同学以及 137 实验室的所有师弟师妹们，我会永远怀念和你们在一起的欢乐时光！

最后衷心的感谢我的父母，他们不仅是我人生的启蒙老师，也是我生活中的良师益友，父亲的教诲给了我学习和生活中严谨的态度，母亲的爱和无限的付出与牵挂，使我深深懂得关爱他人与感恩之心，是你们在我生活中无私的爱与学习中严谨正确的管教，推动我一步一步走到今天。谢谢你们，我的父母！

再一次感谢所有给予我帮助、鼓励、关心的人，谢谢你们，谢谢！



## 参考文献

- [1] 沈嘉, 等. 3GPP 长期演进 (LTE) 技术原理与系统设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008, pp: 1.
- [2] 3GPP TS 36.211(2008-05) 3<sup>rd</sup> Generation partnership project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation.
- [3] 3GPP TS 36.213. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedure[S].
- [4] Eiko Seidel, CTO. Initial thoughts on LTE Advanced for 3GPP Release 10. LTE World Summit, Berlin, May 19th 2009.
- [5] ITU-R M. 2134. Requirements Related to Technical Performance for IMT-Advanced Radio Interface(s).
- [6] P.E.Mogensen, T.Koivisto, K.I.Pedersen, et al. LTE-Advanced: The path towards gigabit/s in wireless mobile communications. Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on. 2009, pp: 147~151.
- [7] 林辉. LTE-Advanced 的标准化情况. 电信科学, 2009 年第 1 期.
- [8] 3GPP TSG R1-082024. A discussion on some technology components for LTE-Advanced. Ericsson. June 30-July 4, 2008.
- [9] 3GPP TSG R1-083229. LTE-A Multiple Point Coordination and Its Classification. Motorola. August 18-22, 2008.
- [10] 3GPP TSG R1-082469. LTE-Advanced Coordinated Multipoint transmission/reception. Ericsson. June 30-July 4, 2008.
- [11] 3GPP TSG R1-093036. Practical Analysis of CoMP Coordinated Beamforming. Huawei, August 24-28, 2009.
- [12] 3GPP TSG R1-084400. Coordinated Multi-Point downlink transmission in LTE-Advanced. Qualcomm Europe. Nov.10th-14th, 2008.
- [13] 张从青、张天魁等. LTE-Advanced 中 CoMP 技术研究. 北京邮电大学信息与通信工程学院.
- [14] 3GPP TS36.211 V8.2.0 Physical Channels and Modulation. 03, 2008.
- [15] 3GPP TSG R1-091617. Summary of email discussions for CoMP. Qualcomm Europe. 2009.
- [16] 比特网. <http://network.chinabyte.com/223/11652723.shtml> LTE-A 未来通信领跑

者 (2)。

- [17]3GPP TSG R1-084144. Coordinated Multipoint Transmission/Reception (COMP). Nov.10th-14th, 2008.
- [18]3GPP TSG R1-091835. Consideration on UE Feedback in Support of CoMP. San Francisco. May 04-08, 2009.
- [19]3GPP TSG R1-092655. Comparison between Explicit and Implicit Feedbacks for CoMP. Shenzhen, China, August 24-28, 2009.
- [20]3GPP TSG R1-092776. Analysis of SRS scheme for CoMP. Shenzhen, China, August 24-28, 2009.
- [21]3GPP TR 36.912. Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced). Mar 26, 2009.
- [22]3GPP TSG R1-082469. LTE-Advanced Coordinated Multipoint transmission/reception. Ericsson. Warsaw, Poland, June 30-July 4, 2008.
- [23]林崇圣。LTE-Advanced 系统多点协作传输技术研究。Features 技术专题, July 2010, pp: 38~40。
- [24]刘晶、常永宇等。LTE-A 系统协作多点传输技术的性能分析和算法研究。现代电信科技, 2010 年 3 月第 2-3 期, pp: 85~90。
- [25]华为技术有限公司。LTE-Advanced 关键技术及标准进展。电信技术网 [http://www.cww.net.cn/3G/html/2010/11/12/201011121035579015\\_4.htm](http://www.cww.net.cn/3G/html/2010/11/12/201011121035579015_4.htm) 2010 年 11 月 12 日。
- [26]3GPP TSG RAN1, TR36.814. Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects. ver1.0.0, Mar. 2009.
- [27]3GPP TSG R1-090725. Setup of CoMP cooperation areas. Nokia Siemens Networks. February 9-13, 2009.
- [28]3GPP TSG R1-084464. Cell Clustering for CoMP Transmission/Reception. Nortel. Nov.10th-14th, 2008.
- [29]3GPP TSG R1-090657. Dynamic Cell Clustering for CoMP. LG Electronics. Feb.9th-13th. 2009.
- [30]3GPP TSG R1-092429. Different Types of DL CoMP Transmission for LTE-A. Fujitsu. Shenzhen, China, 24-28 August, 2009.
- [31]3GPP TSG R1-100856. Standardization impact of downlink CoMP[C].Ericsson, ST-Ericsson, Feb.22-26, 2010.
- [32]3GPP TSG R1-094962. LTE-Advanced Rapporteur (NTT DOCOMO). 7.5.2. Jeju, Korea, 9th-13th November, 2009.
- [33]3GPP TSG R1-092304. UE feedback for downlink CoMP[C]. ETRI, Los Angeles,

- USA, June 29-July 3, 2009.
- [34]3GPP TSG R1-092585. Analysis of Feedback Mechanisms for CoMP. InterDigital. Los Angeles, USA, June 29<sup>th</sup>-July 3<sup>rd</sup>, 2009.
- [35]3GPP TSG R1-092369. Feedback Design Principles for Downlink CoMP. Huawei. Los Angeles, USA, June 29-July 3, 2009.
- [36]3GPP TSG R1-094655. Performance of Explicit Feedback and Implicit Feedback in Supporting DL Multi-Antenna. Nokia, Nokia Siemens Networks. Jeju, Korea, 9th – 13th November, 2009.
- [37]3GPP TSG R1-092654. CoMP Implicit CQI Feedback Discussions. Samsung. Los Angeles, USA, June 29-July 3, 2009.
- [38]3GPP TSG R1-090099, Discussions on CoMP SU-MIMO. Samsung, Jan. 2009.
- [39]3GPP TSG R1-092429. Different Types of DL CoMP Transmission for LTE-A. Fujitsu. Shenzhen, China, 24-28 August, 2009.
- [40]3GPP TSG R1-094921. Consideration on Feedback for Adaptive Cell Clustering. Hitachi Ltd. Jeju, Korea, November 9-13, 2009.
- [41]3GPP TSG R1-094584. Explicit Feedback Support for SU/MU-MIMO in LTE-A. Samsung Jeju, Korea, November 9-November 13, 2009.
- [42]3GPP TSG R1-092304. UE feedback for downlink CoMP. ETRI. Los Angeles, USA, June 29-July 3, 2009.
- [43]3GPP TSG R1-092654. CoMP Implicit CQI Feedback Discussions. Samsung. Los Angeles, USA, June 29- July 3, 2009.
- [44]IMT-A\_LTE+\_09xxx. Complement Utilization Explicit and Implicit for Feedback Design of LTE-A. 清华大学, 2009年8月12~14日.
- [45]IMT-A\_LTE+\_09309 CoMP Implicit CQI Feedback Options for Joint Processing. LTE+子工作组第17次会议2009年8月12~14日.
- [46]吴梅、黄帆等. 协作式多点传输在LTE-Advanced 系统中的应用. 移动通信, 2010年第10期, pp: 43~47.
- [47]Matthias Malkowski, Andreas Kemper, Xiaohua Wang. Performance of Scheduling Algorithms for HSDPA. Communication and Networking in China, 22-24 Aug. 2007. pp: 1052~1056.
- [48]M. Boaretto, D. Angelini, M. Zorzi. Fast Scheduling Policies using WCDMA High Speed Downlink Packet Access. Vehicular Technology Conference, 6-9 Oct. 2003, VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th Volume 4. pp: 2650~2654.
- [49]Nilo Casimiro Ericsson. Adaptive Modulation and Scheduling for Fading Channels. Global Telecommunications Conference-Globecom'99. pp: 2688~2772.

- [50] A. Jalali, R. Padovani, R. Pankaj. Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency- High Data Rate Personal Communication Wireless System. VTC 2000-Spring Tokyo. IEEE 51 stv01.3. pp: 1854~1858.

## 作者在读期间的研究成果

- [1] 杨清海, 张海超, 刘语乔, 吕磊, 李东, 吕潇潇。“Type II Relay 参与的小区 CoMP 的思考”。讨论&文字提案。
- [2] 杨清海, 吕磊, 吕潇潇, 李明齐。“Down-Link CoMP 隐式反馈分簇+预设门限减小反馈开销方案”。讨论&文字提案。
- [3] 杨清海, 吕磊, 吕潇潇。“减小下行链路多点协作隐式反馈开销方法”。专利申请号: 201010013573.X。
- [4] 杨清海, 吕磊, 吕潇潇。“动态分簇减小隐式反馈开销方法”。专利申请号: 201010505134.0。
- [5] 杨清海, 吕潇潇, 吕磊, 傅丰林。“MU-MIMO 下动态门限减小隐式反馈开销方法”。专利申请号: 201010567973.5。



