

学习重点和要求

本章主要介绍 4G 移动通信系统,内容包括:系统的设计目标;网络结构、系统的协议栈、系统消息、网络标识、承载等的基本概念;无线网络接口;EPC 网络原理;LTE 系统的关键技术及 LTE-A 系统的增强技术。要求:

- 掌握 4G 移动通信系统中的概念及应用;
- 了解 4G 移动通信的系统的设计目标、网络结构;
- 理解 EPC 网络原理;
- 掌握 4G 移动通信系统的关键技术。

随着信息技术发展及宽带业务需求的不断增长,虽然 3G 较 2G 相比有很多优点,但是 3G 还是存在着很多不尽人意的地方,如 3G 缺乏全球统一的标准;3G 所采用的语音交换架构仍然承袭了 2G 系统的电路交换,而不是纯 IP 的方式;3G 的业务提供和业务管理不够灵活;流媒体(视频)的应用难以满足人们的需求;等等。无线技术的种类越来越多,迫切需要将无线技术整合到一个统一的网络环境中去,保障通信系统可以提供宽带接入,实现全球无缝漫游和无处不在的数据及语音业务。LTE 正是在此背景下应运而生的,LTE 并不是标准的 4G,属于 3G 到 4G 的过渡期,被称为 3.9G。2005 年 10 月,ITU 正式将 4G 命名为 IMT-Advanced。

5.1 4G 系统的设计目标

4G 移动通信系统主要有以下基本特征。

- (1) 通信速率大幅提高,应具备 100Mb/s~1Gb/s 的峰值传输速率和连续覆盖能力。
- (2) 带宽灵活配置。能够支持 1.4MHz、3MHz、5MHz、10MHz、15MHz 及 20MHz 等不同系统带宽,并支持成对和非成对的频谱分配,系统部署更灵活。
- (3) 高的频谱效率。频谱效率下行链路为 5bit/s/Hz,是 HSDPA 的 3~4 倍,此时的 HSDPA 天线是 1 发 1 收,而 LTE 天线是 2 发 2 收;上行链路 2.5bit/s/Hz,是 HSUPA 的 2~3 倍,而 HSUPA 天线是 1 发 2 收,LTE 天线也是 1 发 2 收。
- (4) 更低网络时延。控制面的传输时延 $\leq 100\text{ms}$,用户面时延 $\leq 5\text{ms}$ 。
- (5) 移动性更能得到保障,能为 0~15km/h 的低速移动用户提供最优的网络性能;能为 15~120km/h 的移动用户提供高性能的服务;对 120~350km/h(甚至在某些频段下,可

以达到 500km/h)速率移动的移动用户能够保持蜂窝网络的移动性。

(6) 支持多种接入。支持 3GPP(如 GSM、WCDMA 等)与非 3GPP(如 WiFi、WiMAX 等)的多种接入方式,同时支持多模终端的无缝移动。

(7) 控制与承载分离。控制与承载分离是指控制面的信令和用户面的承载分别由独立的网元负责,优化了用户面的性能,同时节约网络节点和承载网的投资。

(8) 取消 CS 域,EPC 成为移动通信业务的基本承载网络。

为了定量反映 4G 的基本特征,ITU 制定了 LTE 基础版本(R8 版本)的主要设计目标及实现方法,如表 5-1 所示。

表 5-1 LTE 基础版本的主要设计目标及实现方法

目标分项	目标要求	主要实现方法
峰值速率	在 20MHz 带宽下,下行峰值速率可达 100Mb/s	下行 MIMO,高阶 QAM
	在 20MHz 带宽下,上行峰值速率可达 50Mb/s	UE 配置 1 根发送天线,高阶 QAM
频谱灵活使用	支持的系统带宽,包括 1.4MHz、3MHz、5MHz、10MHz、15MHz、20MHz 带宽	可扩展的 OFDMA 技术
成本	减小 CAPEX 和 OPEX	体系结构的扁平化和中间节点的减少
更高的频谱效率	在 20MHz 带宽下,LTE 下行链路频谱效率达到 5b/s/Hz,是 HSDPA 的 3~4 倍	下行采用 MIMO、高阶 QAM
	在 20MHz 带宽下,LTE 上行链路频谱效率达到 2.5b/s/Hz,是 HSUPA 的 2~3 倍	UE 配置 1 根发送天线、高阶 QAM
低时延	控制平面的时延应小于 50ms,用户平面的时延要小于 100ms	取消 RNC 节点,采用扁平化网络结构,优化设计空中接口中的层 2、层 3 设计
	从 UE 到服务器的用户平面时延应小于 10ms	
移动性	对低于 15km/h 的移动条件进行优化设计	采用了相对较宽的 15kHz 子载波间隔,采用开环 MIMO、导频密度
	对低于 120km/h 的移动条件应该保持高性能	
	对达到 350km/h 的移动条件应该能够保持连接	
天线配置	下行支持: 4×4、2×2、1×2、1×1	高效的控制信令设计,支持天线端口数为 2/4 的高效导频图案
	上行支持: 1×2、1×1	
覆盖性能	针对覆盖半径≤5km 的场景优化设计	OFDM 采用了长、短两种 CP 长度以适应不同的覆盖范围
	针对覆盖半径为 5~30km 的场景,允许性能略有下降	
	针对覆盖半径达为 30~100km 的场景,仍应该能够工作	

虽然 LTE 是在基础版本 R8 中提出的,但在 R9 中得到了进一步增强。R9 中包含了 LTE 的大量特性,其中最重要的一个方面是支持更多的频段。R10 包含了 LTE-Advanced 的标准化,即 3GPP 的 4G 要求,R10 对 LTE 系统进行了一定的修改来满足 4G 业务。3GPP 要求 LTE 支持的主要特性和性能指标如图 5-1 所示。

LTE 从驻留状态到激活状态,控制面的传输时延小于 100ms;从睡眠状态到激活状态,控制面传输时延小于 50ms。空载条件,单用户单个数据流情况下,小的 IP 包传输时延小于 5ms。

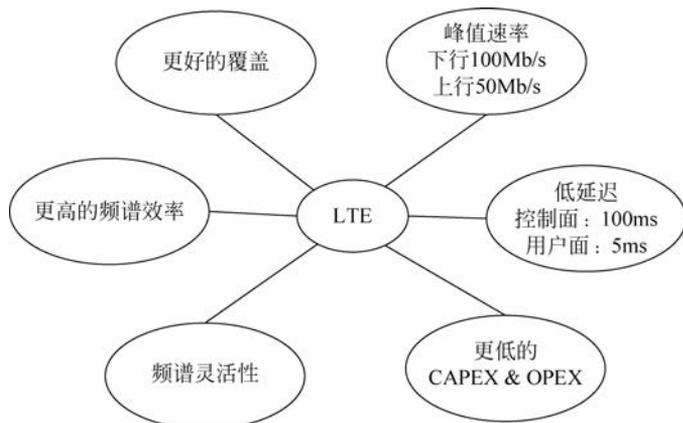


图 5-1 3GPP 要求 LTE 支持的主要特性和性能指标

5.2 基本概念

5.2.1 4G 系统的网络结构

LTE 网络结构的最大特点就是“扁平化和 IP 化”。无线接入网 E-UTRAN 部分取消 RNC,只保留基站节点 eNodeB(3G 的无线接入网元包含 RNC 和 NodeB 两部分);取消核心网电路域 CS(MSC Server 和 Media Gateway),语音业务也全部由 IP 承载(VoIP);核心网分组域 PS 采用 IP 交换的架构,实行承载与业务分离的策略。各网络节点之间的接口使用 IP 传输,通过 IMS 承载综合业务,原 UTRAN 的 CS 域业务均可由 LTE 网络的 PS 域承载。其目的是简化信令流程、缩短延迟和降低成本。所有网元都通过接口相连,通过对接口的标准化可以满足众多供应商产品间的互操作性。

整个系统架构演进 LTE/SAE 由核心网(EPC)、基站(eNodeB)和用户设备(UE)三部分组成,其中 EPC 和 E-UTRAN 两大系统合称演进分组系统(EPS)。

EPC 负责核心网部分,主要包括移动性管理实体(MME)、服务网关(S-GW)和分组数据网关(P-GW)等网元。EPC 主要网元的功能如下。

(1) MME 主要负责信令处理。包括移动性管理(存储 UE 控制面上下文、UEID、状态、跟踪区 TA 等)、承载管理、用户的鉴权认证、信令的加密、完整性保护、SGW 和 PGW 的选择等功能。

(2) S-GW 主要负责用户面处理。负责数据包的路由和转发等功能,包括发起寻呼、LTE_IDLE 态 UE 信息管理、移动性管理,用户面加密处理、分组数据汇聚协议(PDCP)、SAE 承载控制、NAS 信令的加密和完整性保护、承载网络全 IP 化。

(3) P-GW 主要负责管理 3GPP 和 Non-3GPP 间的数据路由等 PDN 网关功能。

基站 eNodeB 负责无线接入功能及 E-UTRAN 的地面接口功能,包括实现无线承载控制、无线许可控制和连接移动性控制;完成上下行 UE 的动态资源分配;IP 头压缩及用户数据流加密;UE 附着时的 MME 选择;S-GW 用户数据的路由选择;MME 发起的寻呼和广播消息的调度传输;完成有关移动性配置和调度的测量与测量报告等。LTE 的网络架



构如图 5-2 所示。

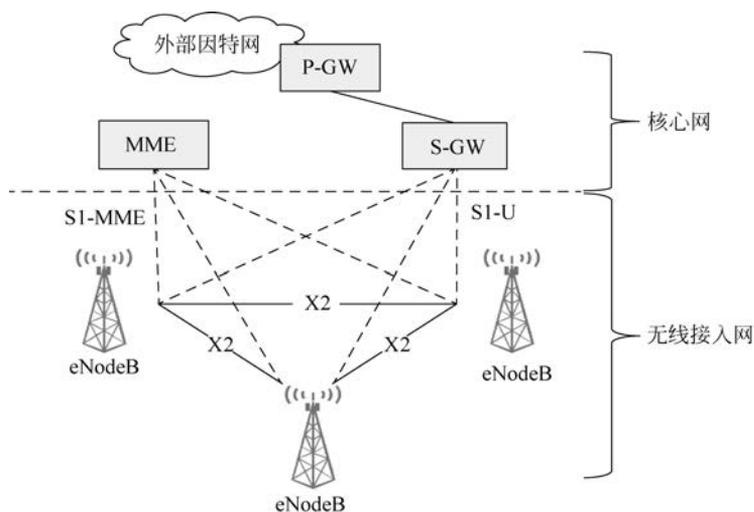


图 5-2 LTE 的网络架构

简化的网络架构具有以下优点。

- (1) 网络扁平化使得系统延时缩短,从而改善用户体验,可开展更多业务。
- (2) 网元数目减少,使得网络部署更为简单,网络的维护更加容易。
- (3) 取消了 RNC 的集中控制,避免单点故障,有利于提高网络稳定性。

eNodeB 与 EPC 通过 S1 接口连接,eNodeB 间通过 X2 接口连接,UE 与 eNodeB 通过 Uu 接口连接。与本系统相关的外部系统及接口说明如表 5-2 所示。

表 5-2 外部系统及接口说明

相关系统	相关系统功能概述	对应接口
MME	EPC 演进报文核心网的控制中心,主要完成呼叫接续及控制功能	S1 接口
S-GW	作为媒体网关,完成无线接入、传输与媒体流的转换等承载功能	S1 接口
EPC	核心网,实现业务交换和业务管理	S1 接口
eNodeB	演进基站	X2 接口
UE	用户设备	Uu 接口



第 25 集

5.2.2 4G 系统的协议栈

1. 网络功能划分

E-UTRAN 与 EPC 之间的功能划分如图 5-3 所示,在 E-UTRAN 和 EPC 各方框中的方块代表逻辑节点。其中 E-UTRAN 中(7)~(11)长方形条代表逻辑节点中的各层无线协议,其余长方形条代表逻辑节点中控制平面的功能实体。

演进型基站 eNodeB(简称 eNB)、移动性管理实体 MME、服务网关 S-GW、网关 P-GW 各自实现的功能如下。

(1) eNodeB 实现的功能主要包括无线资源管理;用户数据流 IP 头压缩和加密;UE 附着时 MME 选择功能;寻呼消息的调度和发送功能;用户面数据到 S-GW 的路由选择功

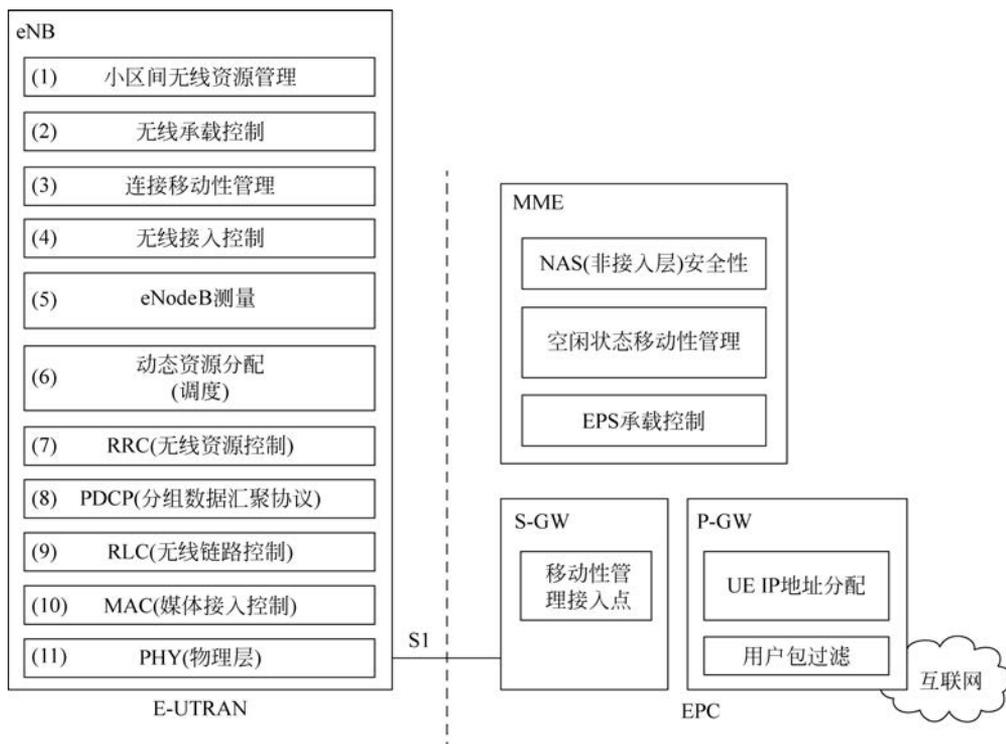


图 5-3 E-UTRAN 与 EPC 功能划分

能；寻呼消息的调度和发送功能；广播消息的调度和发送功能；基于聚合最大比特率 (AMBR) 和最大比特率 (MBR) 上行承载级速率的整形；上行传输层数据包的分类型标示等。

(2) MME 实现的功能主要包括支持非接入层 (NAS) 信令及其安全；跟踪区域 (TA) 列表的管理；3GPP 不同接入网络的核心网络节点之间的移动性管理；空闲状态下 UE 的可达性管理；P-GW 和 S-GW 的选择；跨 MME 切换时进行 MME 的选择；向 2G/3G 接入系统切换时进行 SGSN 的选择；用户的鉴权、漫游控制及承载管理等。

(3) S-GW 实现的功能主要包括 eNodeB 间切换时可作为本地移动性锚点；3GPP 不同接入系统切换时可作为移动性锚点；空闲状态下，下行分组缓冲和发起网络触发的服务请求功能；完成数据包的路由 (SGW 连接多个 PDN 时) 和转发功能；切换时进行数据包的路由和前传功能；上行/下行传输层数据包进行分组标示；在漫游时，实现基于 UE、PDN 和 QCI (OoS 级别标识符) 粒度的上行/下行计费；执行合法侦听功能等。

(4) P-GW 实现的功能主要包括基于单个用户的数据包过滤；UE 的 IP 地址分配功能；上行/下行传输层数据包的分类型标示功能；进行上行/下行业务等级计费及业务等级门控。

2. 协议架构

4G 网络的协议架构分为三层两面。三层是指物理层 (L1)、数据链路层 (L2) 和网络层 (L3)；两面是指控制面和用户面，用户面负责业务数据的传送和处理，控制面负责协调和控制信令的传送和处理。其中，数据链路层又分为三个子层，分组数据汇聚协议子层 (PDCP)、无线链路控制子层 (RLC) 和媒体访问控制子层 (MAC)。

用户面协议栈和控制面协议栈均包含 PHY、MAC、RLC 和 PDCP 层,控制面向上还包含 RRC 层和 NAS 层。网元间的控制面协议栈如图 5-4 所示,用户面协议栈如图 5-5 所示。

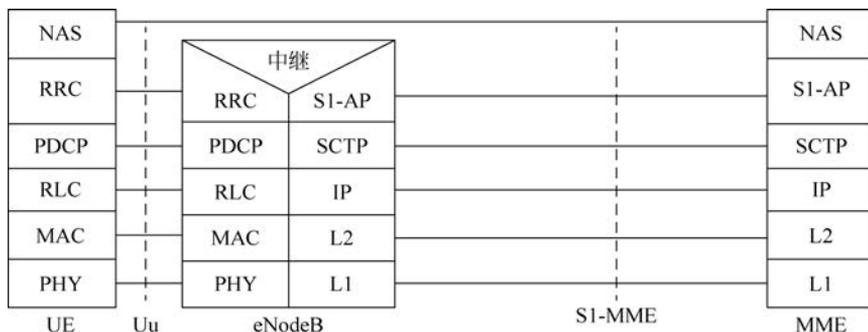


图 5-4 控制面协议栈

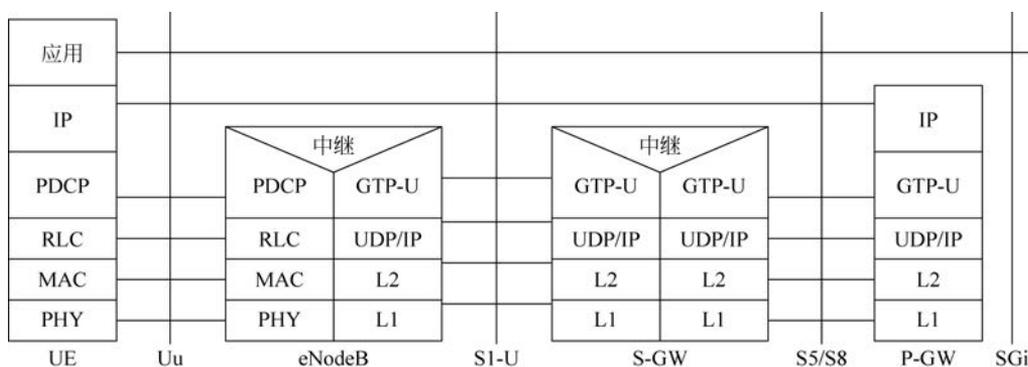


图 5-5 用户面协议栈

1) 功能

(1) L1(PHY)层负责信道编码、调制解调、天线映射等,不区分用户面和控制面。

(2) L2 层用户面的主要功能是处理业务数据。在发送端,将承载高层业务应用的 IP 数据流,通过头压缩(PDCP 层)、加密(PDCP 层)、分段(RLC 层)、复用(MAC 层)、调度等过程变成物理层可处理的传输块。在接收端,将物理层接收到的比特数据流,按调度要求,解复用(MAC 层)、级联(RLC 层)、解密(PDCP 层)、解压缩(PDCP 层),成为高层应用可识别的数据流。L2 层控制面的功能模块和用户面一样,也包括 MAC、RLC、PDCP 三个功能模块。MAC、RLC 功能与用户面一致,PDCP 与用户面略有区别,除了对控制信令进行加解密,还要对控制信令数据进行完整性保护和完整性验证。

(3) L3 层的用户面没有定义自己的协议,直接使用 IP 协议栈。而 L3 层的控制面包括无线资源控制(RRC)和 NAS 两部分。UE 和 eNodeB 之间的控制信令主要是 RRC 消息。RRC 就相当于 eNodeB 内部的一个司令部,RRC 消息携带建立、修改和释放 L2 和 L1 协议实体所需的全部参数;另外,RRC 还要给 UE 透明传达来自核心网的指示。

2) 接口

(1) S1 接口。S1 用户平面接口位于 eNodeB 和 S-GW 之间,S1 接口的用户面协议如图 5-6(a)所示,建立在 IP 传输之上,用 GPRS 隧道协议(GTP-U)来携带用户面的协议数据

单元组(PDUs),不是面向连接的可靠传输。S1 控制平面接口位于 eNodeB 和 MME 之间,控制平面协议栈如图 5-6(b)所示,传输网络层也利用 IP 传输;为了可靠传输信令消息,在 IP 层之上添加了流控制传输协议(SCTP),应用层的信令协议为 S1-AP。

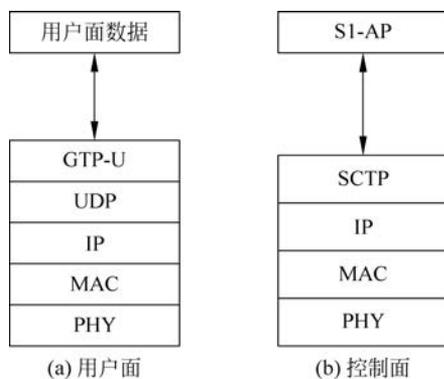


图 5-6 S1 接口用户面和控制面

① S1 接口控制面的功能。包括 SAE 承载管理功能(包括 SAE 承载建立、修改和释放);连接状态下 UE 的移动性管理功能(包括 LTE 系统内切换和系统间切换);S1 寻呼功能;NAS 信令传输功能;S1 接口 UE 上下文释放功能;S1 接口管理功能(包括复位、错误指示以及过载指示等);网络共享功能;网络节点选择功能;初始上下文建立功能;漫游和接入限制支持功能。

② S1 接口用户面的功能。提供 eNodeB 与 S-GW 之间用户面 PDU 非可靠传输,基于 UDP/IP 和 GTP-U 协议。

(2) X2 接口。X2 用户平面接口是 eNodeB 之间的接口,用户平面协议如图 5-7(a)所示。X2 接口的用户面是在切换时 eNodeB 之间转发业务数据的接口,是一个 IP 化的接口。X2 用户平面的传输网络层是基于 IP 传输的,UDP/IP 上利用 GTP-U 来传送用户平面 PDU。

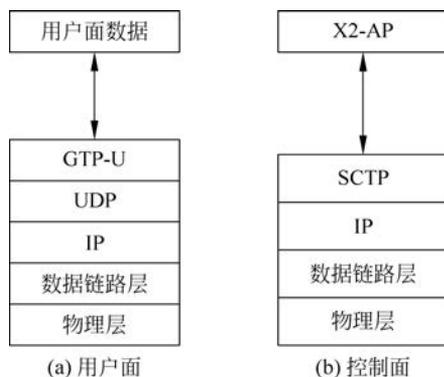


图 5-7 X2 接口用户面和控制面

X2 控制平面接口是 eNodeB 之间的接口,控制平面协议栈如图 5-7(b)所示。传输网络层利用 IP 和流控制传输协议(SCTP),SCTP 的设计是为了解决 TCP/IP 网络在传输实时信令和 数据时所面临的不可靠传输、时延等问题。X2 接口的控制面的应用层信令协议为 X2-AP。

X2 接口控制面的主要功能是支持在 LTE 系统内, UE 在连接状态下从一个 eNodeB 切换到另一个 eNodeB 的移动性管理。X2 接口控制面的功能包括连接状态 (RRC CONNECTED) 下 UE 的移动性管理功能 (针对 LTE 系统内切换), 上行负荷管理功能, 小区间干扰协调, X2 接口管理功能和错误处理功能, eNodeB 间应用级数据交换, 跟踪功能等。

(3) Uu 接口。UE 与 eNodeB 之间的接口, 也称作空中接口, 可支持 1.4~20MHz 的可变带宽。大写字母 U 表示用户与网络接口, 即 User to Network Interface, 小写字母 u 则表示通用的, 即 universal。

通过空中接口, UE 和 eNodeB 进行通信, 它们之间交互的数据可以分为用户面数据和控制面消息两类。用户面数据即用户的业务数据, 如上网数据流、语音、视频等多媒体数据包; 控制面消息即信令, 比如接入、切换等过程的控制数据包。通过控制面的 RRC 消息, 无线网络可以实现对 UE 的有效控制。

在逻辑上, Uu 接口可以分为控制面和用户面。控制面有两个, 一个由 RRC 提供, 用于承载 UE 与 eNodeB 之间的信令; 另一个用于承载 NAS 层信令消息, 并通过 RRC 传送到 MME。Uu 口控制面协议栈如图 5-8(a) 所示, 用户面协议栈如图 5-8(b) 所示。

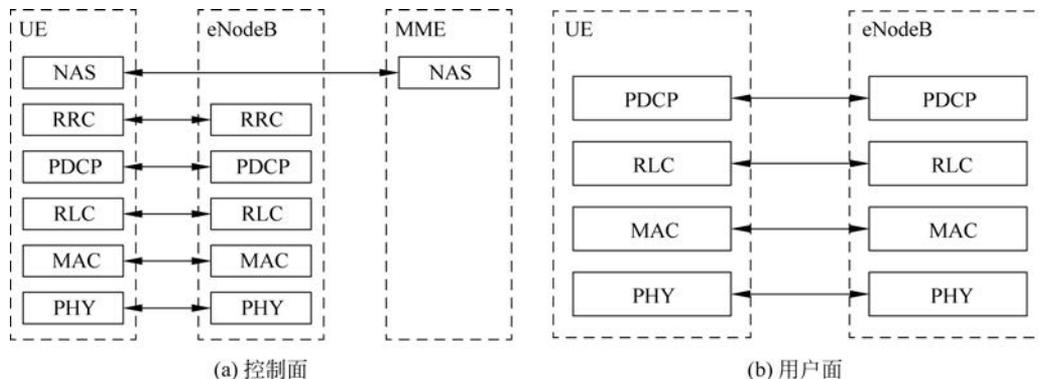


图 5-8 Uu 接口的协议栈

从图 5-8 中可以看出, NAS 信令使用 RRC 承载, 并映射到 PDCP 层; 在用户面上, IP 数据包也映射到 PDCP 层。RRC 完成广播、寻呼、RRC 连接管理、RB 控制等。RLC 和 MAC 子层在用户面和控制面执行功能没有区别, 它们都使用 PDCP 层、RLC 层、MAC 层和 PHY 层。用户面各协议体主要完成信头压缩、加密、调度、ARQ 和 HARQ 等功能。

5.2.3 LTE 系统消息

小区搜索过程之后, UE 已经与小区取得下行同步, 得到小区的物理小区识别 (PCI) 并检测到系统帧的时间。UE 需要获取到小区的系统信息 (SI), 这样才能知道该小区是如何配置的, 以便接入该小区并在该小区内正确地工作。LTE 的系统消息由主消息 (MIB) 和多个系统消息块 (SIBs) 组成, 每个系统信息包含了与某个功能相关的一系列参数集合。

MIB 承载于广播控制信道 (BCH) 上, 包括有限个 UE 用以读取其他小区信息的最重要、最常用的传输参数 (如系统带宽、系统帧号、PHICH 配置信息), UE 必须使用这些参数来获取其他的系统信息。时域上位置紧邻同步信道, 以 10ms 为周期重传 4 次; 频域上位于系统带宽中央的 72 个子载波。

系统消息中除 MIB 以外的系统消息统称 SIBs,包括 SIB1-SIB12。SIB1 是除 MIB 外最重要的系统消息,固定以 20ms 为周期重传 4 次,即 SIB1 在每两个无线帧(20ms)的子帧中的第 5 个时隙($SFN \bmod 2=0, SFN \bmod 8 \neq 0$)上重传一次,如果满足 $SFN \bmod 8=0$,SIB1 的内容可能改变,需重新传一次。SIB1 和所有 SI 消息均传输在下行同步信道(DL-SCH)上,SIB1 的传输通过携带 SI-RNTI(SI-RNTI 在每个小区中都是相同的)的 PDCCH 调度完成,SIB1 中的调度信息表(SIL)携带所有 SI 的调度信息,接收 SIB1 以后,即可接收其他 SI 消息。除 SIB1 外,SIB2-SIB12 均由 SI 承载。

LTE 的系统消息作用如图 5-9 所示。



图 5-9 LTE 的系统消息作用

从图 5-9 可知,并不是所有的 SIB 都必须存在,对运营商部署的基站而言,就不需要 SIB9;小区会不断地广播这些系统信息,有三种类型的 RRC 消息用于传输系统信息,包括 MIB 消息、SIB1 消息及一个或者多个 SI 消息块。小区是通过逻辑信道 BCCH 向该小区内所有 UE 发送系统信息的。逻辑信道 BCCH 会映射到传输信道 BCH 和 DL-SCH,其中 BCH 只用于传输 MIB 信息,并映射到物理信道 PBCH;DL-SCH 用于传输各种 SIB 信息,并映射到物理信道 PDSCH。系统消息信令流程如图 5-10 所示。

UE 通过 E-UTRAN 广播消息获取 AS 和 NAS 系统消息,此过程适用于无线资源管理空闲态(RRC_IDLE)和无线资源管理连接态(RRC_CONNECTED),如开机选网、小区重选、切换完成或从另一个无线接入技术切换到 E-UTRAN、重新返回覆盖区域、系统消息改

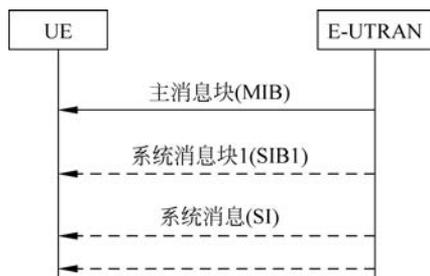


图 5-10 系统消息信令流程

变、出现接收 ETWS(地震、灾情通知等)指示等。



第 27 集

5.2.4 4G 网络用户标识

1. PLMN

PLMN(公共陆地移动网络)是由政府或它所批准的经营者,为公众提供陆地移动通信业务目的而建立和经营的网络,该网络必须与公众交换电话网(PSTN)互连,形成整个地区或国家规模的通信网。

PLMN 的唯一标识由 MCC 和 MNC 组合而成,可以表示为 $PLMN = MCC + MNC$,其中 MCC 为移动用户国家码,由三位十进制数组成,编码范围为 000~999,全球范围内按国家或地区分配,由 ITU 统一分配和管理,唯一识别移动用户所属的国家;MNC 为移动网络码,由两位十进制数组成,编码范围为 00~99,一个国家或地区范围内按不同运营商或运营商网络分配,用于识别移动客户所属的移动网络。例如,中国移动的 PLMN 为 46000,中国联通的 PLMN 为 46001。对于一个特定的终端来说,通常需要维护几种不同类型的 PLMN 列表,每个列表中会有多个 PLMN。

RPLMN(已登记 PLMN)是终端在上次关机或脱网前登记的 PLMN,其保存在终端的内存中。

EPLMN(等效 PLMN)为与终端当前所选择的 PLMN 处于同等级别的 PLMN,其与 PLMN 优先级相同。

EHPLMN(等效本地 PLMN)为与终端当前所选择的 PLMN 处于同等地位的本地 PLMN。

HPLMN(归属 PLMN)为终端用户归属的 PLMN,即终端 USIM 卡上的 IMSI 号中包含的 MCC 和 MNC 与 HPLMN 上的 MCC 和 MNC 是一致的,对于某一用户来说,其归属的 PLMN 只有一个。

VPLMN(访问 PLMN)为终端用户访问的 PLMN,其 PLMN 和存在 SIM 卡中的 IMSI 的 MCC/MNC 是不完全相同的。当移动终端丢失覆盖后,一个 VPLMN 将被选择。

UPLMN(用户控制 PLMN)是储存在 USIM 卡上的与 PLMN 选择有关的参数。

OPLMN(运营商控制 PLMN)是储存在 USIM 卡上的与 PLMN 选择有关的参数。

FPLMN(禁用 PLMN)为被禁止访问的 PLMN,通常终端在尝试接入某个 PLMN 被拒绝以后,会将其加到本列表中。

APLMN(可捕获 PLMN)为终端能在其上找到至少一个小区,并能读出其 PLMN 标识

信息的 PLMN。

不同类型的 PLMN 优先级别不同,终端在进行 PLMN 选择时将按照以下顺序依次进行: RPLMN、EPLMN、HPLMN、EHPLMN、UPLMN、OPLMN、其他 PLMN。

2. MSISDN

MSISDN 为移动台国际用户的号码,类似于 PSTN 中的电话号码,是在呼叫接续时所需拨的号码,其编号规则应与各国的编号规则相一致。此号码是供用户拨打的公开号码,具有全球唯一性。CCITT 建议其结构为 $MSISDN=CC+NDC+SN$ 。其中,CC 为国家码,即在国际长途电话通信网中的号码(中国+86),NDC 为国内目的地码,SN 为用户号码。

3. IMSI

IMSI 为国际移动用户识别码,是区别移动用户的标志,储存在 SIM 卡中,可用于区别移动用户的有效信息。

$IMSI=MCC+MNC+MSIN$,其总长度不超过 15 位,使用 0~9 十进制数字。其中,MSIN 为移动用户识别码,用以识别某一移动通信网中的移动用户,一般包括 10 位,由运营商自定义分配,通过核心网的 HLR 或 HSS 定义注册登记。

MSIN 是组成 IMSI 的一部分,具有 9~10 位十进制数字,其结构为 $CC+M_0M_1M_2M_3+ABCD$ 。其中,CC 为国家码, $M_0M_1M_2M_3$ 和 MDN 号码中的 $H_0H_1H_2H_3$ 可存在对应关系,ABCD 为移动用户号码,可自由分配。MSIN 由运营商根据自身需要进行分配。

IMSI 和 MSISDN/MDN 会进行一对一配对。不同的 PLMN 运营商会根据自身的 $MCC+MNC$ 来生产并写入 SIM 卡,最终派发给用户。因为 IMSI 中具有 MCC,所以可以区别出每个移动用户来自的国家,因此可以实现国际漫游。

4. GUTI

GUTI 为全球唯一临时 UE 标识,在网络中唯一标识 UE。系统使用 GUTI 可以减少 IMSI、IMEI 等用户私有参数暴露在网络传输中。GUTI 由核心网分配,在 Attach Accept(附着请求)、TAU Accept(跟踪区域更新请求)、RAU Accept(路由区域更新请求)等消息中带给 UE。第一次 Attach(附着)时 UE 携带 IMSI,而之后 MME 会将 IMSI 和 GUTI 进行一个对应,以后就一直用 GUTI,通过 Attach Accept 带给 UE。GUTI 的组成如图 5-11 所示,在一个 MME 下,GUTI 等同于 M-TMSI(MME 的临时用户识别码),该参数由 MME 指派。

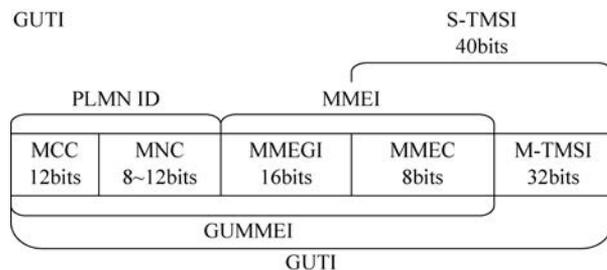


图 5-11 GUTI 的组成

5. TAI

TAI 为追踪区标识,该参数等同于 2G/3G CS 域的 LA(位置区)概念和 PS 域的 RA(路由区)概念,因为 LTE 只有 PS 域,所以只有 TA 的概念,用于网络侧跟踪 UE 位置,支持

IDLE(空闲)态移动性(比如重选等)和寻呼。

$TAI=MCC+MNC+TAC$,其中 TAC 为追踪区码,属于小区级别参数,16 位二进制数折算成十进制取值范围为 0~65535。

6. ECGI

ECGI 为 E-UTRAN 小区标识,该 ID 用于全球唯一标识一个 LTE 无线小区。

$ECGI=PLMN(MCC+MNC)+eNodeBID+CellID$,其中 eNodeBID 占用 20bit,取值范围为 0~1048575,要求一个 PLMN 网络下唯一; CellID 占用 8bit,取值范围为 0~255,要求在一个 eNodeB 内唯一。

7. 小区内 UE 标识

小区内的 UE 标识如表 5-3 所示。

表 5-3 小区内的 UE 标识

标识类型	应用场景	获得方式	有效范围	是否与终端/卡设备相关
RA-RNTI(随机接入无线网络临时标识符)	对应 PRACH 的位置,随机接入中用于指示接收随机接入响应消息	根据占用的时频资源计算获得(0001-003C)	小区内	否
T-CRNTI(临时小区级无线网络临时标识符)	随机接入中,没有进行竞争裁决前的 CRNTI	eNodeB 在随机接入响应消息中下发给终端(003D-FFF3)	小区内	否
C-RNTI(小区无线网络临时标识)	用于标识 RRC Connect 状态的 UE,在一个小区内用来唯一标识一个 UE	初始接入时获得(T-CRNTI 升级为 C-RNTI, 003D-FFF3)	小区内	否
SPS-CRNTI(半静态调度 CRNTI)	半静态调度标识,用于半静态持续调度的 PDSCH 传输	eNodeB 在调度 UE 进入 SPS 时分(003D-FFF3)	小区内	否
P-RNTI(寻呼 RNTI)	用于解析寻呼信息,对应于寻呼的 PCCH	调度寻呼消息 FFFE(固定标识)	全网相同	否
SI-RNTI(系统消息 RNTI)	系统广播,用于 SIB 信息(系统信息)的传输,对应于 BCCH	调度系统消息 FFFF(固定标识)	全网相同	否

需要说明的是,C-RNTI 和 UE 接入请求的起因和状态有关,是使用最多的 RNTI。C-RNTI 并不是一开始就有,而是在用户入网之后,基站给入网成功的用户分配的。UE 若处于 RRC_CONNECTED 模式,说明已经分配到了 C-RNTI,接入时需要上报;UE 若处于 IDLE 模式,说明还没有 C-RNTI,如果是请求 RRC 连接,eNodeB 会在后续的 MSG4 里同意的话,可能分配一个 C-RNTI;在用户切换时,用户可以将本小区分配的 C-RNTI 带入下一个小区,不用再重新分配 C-RNTI。在 MSG2 里,eNodeB 给用户分配一个 T-CRNTI,用于随后的 MSG 中标识 UE。当然 UE 有 C-RNTI 也可以不用 T-CRNTI,此时的这个用户已经在网络中,并且分配过 C-RNTI。用户获取 T-CRNTI 后,会在 MSG3 传输中使用此 RNTI。MSG2 中包含的内容有:基站检测到的 UE 发出的前导序列的索引号(其与 RA-RNTI 一起共同决定 UE 该获取的 MSG2);用于上行同步的时间调整信息;初始上行资源

的分配(用于发送随后的 MSG3,此处 MSG2 包含了普通上行数据发送时 DCI0 的作用); 以及一个临时的 C-RNTI。

5.2.5 UE 的工作模式与状态

UE 的工作模式包括空闲(IDLE)模式和连接(CONNECTED)模式两种。

(1) 空闲模式。UE 处于待机状态,没有业务存在,UE 和 E-UTRAN 之间没有连接,E-UTRAN 内没有任何有关此 UE 的信息;通过非接入层标识如 IMSI、TMSI 或 P-TMSI 等标志来区分 UE。

(2) 连接模式。当 UE 完成 RRC 连接建立时,UE 才从空闲模式转移到连接模式。UE 在 RRC 状态下的工作模式如表 5-4 所示。

表 5-4 UE 在 RRC 状态下的工作模式

状 态	作 用
RRC_INACTIVE (去激活模式)(R13 版本之后)	PLMN 选择
	广播系统信息
	小区重选移动性
	通过上层或者 RRC 配置 UE 特定 DRX
	通过 RRC 层配置基于通知的区域的无线接入网络(RAN)
	除非特别指定,否则使用 IDLE 态的流程
	在 UE 跨基于通知区域内的 RAN 移动时,执行相应的更新(UPDATE)流程
	监听寻呼信道以获得使用 5G-S-TMSI 的 CN Paging(核心网寻呼)及使用 I-RNTI(INACTIVE RNTI)的 RAN Paging(无线接入网络寻呼)
RRC_IDLE(空闲状态下的无线资源管理)	执行周期性的基于通知的区域的无线接入网络更新
	PLMN 选择
	NAS 配置的非连续接收(DRX)过程
	系统信息广播和寻呼
	邻小区测量
	小区重选的移动性
	UE 获取 1 个 TA 区内的唯一标识
eNodeB 内无终端上下文	
RRC_CONNECTED (连接状态下的无线资源管理)	网络侧有 UE 的上下文信息
	网络侧知道 UE 所处小区
	网络和终端可以传输数据
	网络控制终端的移动性
	邻小区测量
	存在 RRC 连接: UE 可以从网络侧收发数据; 监听共享信道上指示控制授权的控制信令; UE 可以上报信道质量给网络侧; UE 可以根据网络配置进行 DRX

5.2.6 承载

1. 承载概念

EPS 的接入网结构更加扁平化,同时由于希望更好地实现“永远在线”,引入默认承载



等新概念。LTE 的端到端服务可以分为 EPS 承载和外部承载, EPS 承载又包括 E-UTRAN 无线接入承载(E-RAB)和 S5/S8 承载。E-RAB 又分为无线承载(RB)和 S1 承载,如图 5-12 所示。

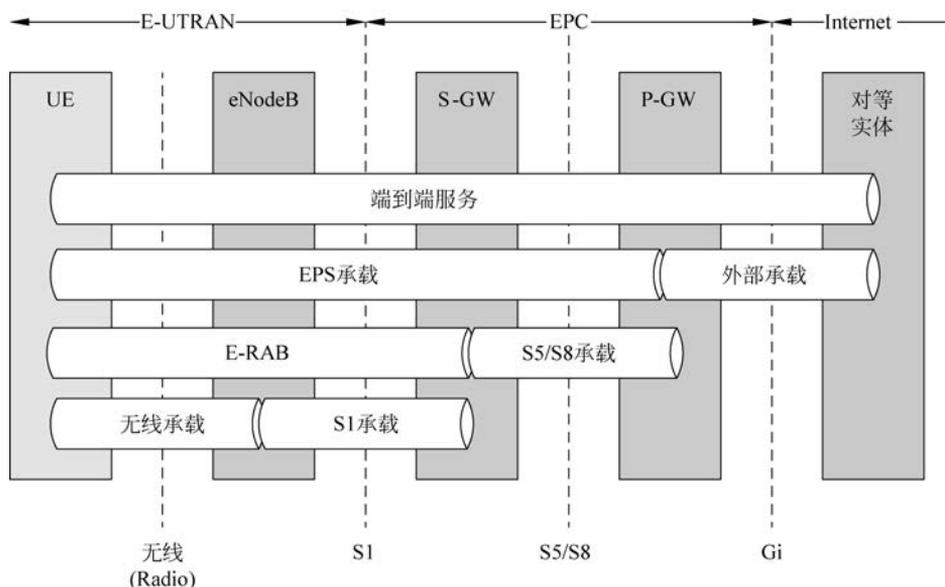


图 5-12 LTE 承载结构图

EPS 承载是指在 UE 和 PDN 之间提供某种特性的 QoS 传输保证,分为默认承载和专用承载。

默认承载是指一种满足默认 QoS 的数据和信令的用户承载。默认承载是一种提供尽力而为 IP 连接的承载,随着 PDN 连接的建立而建立,随着 PDN 的连接的拆除而销毁。默认承载是在 UE 和网络完成附着的时候,如果没有其他数据传送,系统自己建立的一个承载,为用户提供永久在线的 IP 传输服务。

专用承载是在 PDN 连接建立的基础上建立的,是为了提供某种特定的 QoS 传输需求而建立的(是默认承载无法满足的)。一般情况下,专用承载的 QoS 要求比默认承载的 QoS 高。专用承载在 UE 中关联了一个 UL 业务流模板(TFT),在 P-GW 关联了一个 DL TFT(下行的 TFT),TFT 中包含业务数据流的过滤器,而这些过滤器只能匹配符合某些准则的分组。

GBR/Non-GBR 承载: GBR 是指承载要求的比特速率被网络“永久”恒定的分配,即使在网络资源紧张的情况下,相应的比特速率也能够保持不变。否则,若不能保证一个承载的速率不变,则是一个 Non-GBR 承载。GBR 这种等级相对比较高的 QoS,一般是分给专用承载,而默认承载使用的是 Non-GBR。对同一用户同一链接而言,专用承载可以是 GBR 承载,也可以是 Non-GBR 承载。而默认承载只能是 Non-GBR 承载。专用承载和默认承载共享一条 PDN 链接(UE 地址和 PDN 地址),即专用承载一定是在默认承载建立的基础上建立的,二者必须绑定。

在一个 PDN 链接中,只有一个默认承载,但可以有多多个专用承载。一般来说,一个用户最多建立 11 个承载。每当 UE 请求一个新的业务时,S-GW/P-GW 将从 PCRF 收到 PCC

规则,其中包括业务所要求的 QoS。如果默认承载不能提供所要求的 QoS,则需要另外的承载服务,即建立专用承载以提供服务。

无线承载将承载空口 RRC 信令和 NAS 信令,S1 Bearer 承载 eNodeB 与 MME 间 S1-AP 信令,NAS 消息也可作为 NAS PDU 附带在 RRC 消息中发送。

无线接入承载(RAB)为用户提供从核心网到 UE 的数据连接能力,在 LTE 中 RAB 更名为 E-RAB,LTE 的 E-RAB 从 SGW 开始到 UE 结束,由 S1-U 承载和无线承载(RB)串联而成,进入 LTE 系统的业务数据主要通过 E-RAB 进行传输,因此 LTE 对于业务的管理主要是在 E-RAB 层次上进行的。

2. 承载信令

为了管理 E-RAB,在 LTE 系统内需要相应的信令连接传输网元间的控制信令来完成,LTE 的信令主要包括 NAS 信令、RRC 信令和 S1AP 信令,以及用来传输信令的各种实际的承载。E-RAB 管理主要体现在 S1 接口的信令中,包括 E-RAB 的建立、修改和释放;RB 的管理,即空口连接的管理可以看作 E-RAB 管理过程的子过程。DRB(数据无线承载)在 UE 和 eNodeB 之间传输 E-RAB 数据包,在 DRB 和 E-RAB 之间有点到点的映射,属于空口的内容,同时在 U_u 中还包括 SRB(信令无线承载)。作为 eNodeB 和 UE 之间数据传输的通道,RB 是通过 RRC 信令来进行管理的 eNodeB 和 UE 通过 RRC 信令的交互,完成各种 RB 的建立、重配和释放等功能。S1-U 承载在 eNodeB 和 S-GW 之间传输数据,通过 S1-AP 信令进行管理,包括 S1 承载的建立、修改和释放。S1-AP 有专门建立、修改和释放信令这几个功能。RB 是 eNodeB 为 UE 分配的一系列协议实体及配置的总称,包括 PDCP 协议实体、RLC 协议实体及 MAC 和 PHY 分配的一系列资源等。RB 是 U_u 接口连接 eNodeB 和 UE 的通道,任何在 U_u 接口上传输的数据都要经过 RB。RB 包括 SRB 和 DRB,SRB 是系统的信令消息实际传输的通道,DRB 是用户数据实际传输的通道。

3. RB 管理

RB 管理主要是在 RRC 连接的信令传输上完成的,U_u 口上的 SRB 包括 SRB0、SRB1、SRB2 和 DRB。

DRB 是用于传输用户数据的无线承载,DRB 只有一种,协议规定每个 UE 可以最多有 8 个 DRB 用来传输不同的业务。SRB 仅用于 RRC 和 NAS 消息传输的无线承载。

LTE 系统中定义了三种 SRB。

(1) SRB0 用于 RRC 消息,使用 CCCH 逻辑信道,系统消息 MSG3、MSG4 均使用 SRB0。

(2) SRB1 用于 RRC 消息(可能包括 NAS 消息),SRB1 先于 SRB2 的建立,使用 DCCH 逻辑信道进行传输,系统消息 MSG5 使用 SRB1。

(3) SRB2 用于 NAS 消息,使用 DCCH 逻辑信道。SRB2 要后于 SRB1 建立,并且总是由 E-UTRAN 在安全激活后进行配置。

5.3 LTE 系统的无线接口

5.3.1 无线接口协议栈功能

UE 与 eNodeB 之间通过 E-UTRA 的无线接口连接。在逻辑上,E-UTRAN 接口可以



分为控制面和用户面。控制面有两个,第一个控制面由 RRC 提供,用于承载 UE 与 eNodeB 之间的信令;第二个控制面用于承载非接入层 NAS 信令消息,并通过 RRC 传送到 MME。用户面主要用于在 UE 和 EPC 之间传送 IP 数据包,其中 EPC 包括 S-GW 和 P-GW,无线接口协议栈如图 5-8 所示。

1. NAS 信令

NAS 是接入层(AS)的上层。AS 定义了与无线接入网(RAN)中的 E-UTRAN 相关的信令流程和协议。NAS 层主要包含两个方面内容,即上层信令和用户数据。NAS 信令指的是在 UE 和 MME 之间传送的消息,包括 EPS 移动性管理(EMM)和 EPS 会话管理(ESM)。

2. RRC 层

RRC 是 LTE 空中接口控制面主要协议栈。UE 与 eNodeB 之间传送的 RRC 消息依赖于 PDCP、RLC、MAC 和 PHY 层的服务。RRC 处理 UE 与 E-UTRAN 之间的所有信令,包括 UE 与核心网之间的信令,即由专用 RRC 消息携带的 NAS 信令。携带 NAS 信令的 RRC 消息不改变信令内容,只提供转发机制。其传输的主要信息包括系统消息、PLMN 和小区选择、准入控制、安全管理、小区重选、测量上报、切换和移动性、NAS 传输和无线资源管理等。

3. PDCP 层

LTE 在用户面和控制面均使用 PDCP。这主要是因为 PDCP 在 LTE 网络里承担了安全功能,即进行加密/解密和完整性校验。在控制面,PDCP 负责对 RRC 和 NAS 信令消息进行加密/解密和完整性校验;在用户面,PDCP 的功能略有不同,它只进行加密/解密,而不进行完整性校验。另外,用户面的 IP 数据包还采用 IP 头压缩技术以提高系统性能和效率。同时,PDCP 也支持排序和复制检测功能。

4. RLC 层

RLC 是 UE 和 eNodeB 间的协议,它主要提供无线链路控制功能。RLC 最基本的功能是向高层提供三种服务。

(1) 透明模式(TM)用于某些空中接口信道,如广播信道和寻呼信道,为信令提供无连接服务。

(2) 非确认模式(UM)与 TM 模式相同,UM 模式也提供无连接服务,但同时还提供排序、分段和级联功能。

(3) 确认模式(AM)提供 ARQ 服务,可以实现重传。

除以上模式和 ARQ 特性,RLC 层还提供信息的分段和重组、级联、纠错等。

5. MAC 层

MAC 层主要功能包含映射、复用、HARQ 及无线资源分配。

(1) 映射。MAC 负责将从 LTE 逻辑信道接收到的信息映射到 LTE 传输信道上。

(2) 复用。MAC 层的信息可能来自一个或多个无线承载,MAC 层能够将多个 RB 复用到同一个传输块(TB)上以提高效率。

(3) HARQ(混合自动重传请求)。MAC 利用 HARQ 技术为空中接口提供纠错服务;HARQ 的实现需要 MAC 层与物理层的紧密配合。

(4) 无线资源分配。MAC 提供基于 QoS 的业务数据和用户信令的调度。MAC 层和物理层需要互相传递无线链路质量的各种指示信息及 HARQ 运行情况的反馈信息。

6. PHY 层

PHY 层按照 MAC 层的配置,实现数据的最终处理(主要是 MAC 层的动态配置,如编码、MIMO 及调制等)。其主要功能包括错误检测、FEC 编码/解码、速率匹配、物理信道的映射、功率加权、调制和解调、频率同步和时间同步、无线测量、MIMO 处理发射分集、波束赋形及射频处理等。

总之,LTE 空中接口的特点主要包括确保无线发送的可靠性(采用重传、编码等方式来实现),灵活地适配业务活动及信道的多变(MAC 动态决定编码率及调制方式,采用 RLC 分段、级联,适配 MAC 调度等)和实现差异化的 QoS 服务(对不同业务应用不同的 RLC 工作模式,对不同业务应用不同 PDCP 的头压缩功能,在 MAC 层实现灵活的基于优先级的调度等)。

5.3.2 LTE 系统的无线帧结构

LTE 系统下行多址方式为 OFDMA,上行的多址方式是基于 OFDM 传输技术的 SC-FDMA。LTE 系统的双工方式包括 FDD 和 TDD 两种。LTE 系统支持的无线帧结构包括两种类型,分别为 Type1(类型 1,即 FDD 模式)和 Type2(类型 2,即 TDD 模式)。类型 1 的无线帧结构如图 5-13 所示。

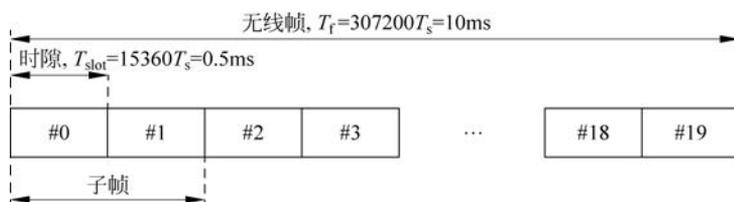


图 5-13 类型 1 的无线帧结构

Type1 适用于全双工和半双工的 FDD 模式。每个无线帧长 $T_f = 307200 \cdot T_s = 10\text{ms}$, 一个无线帧包括 20 个时隙,序号为 0~19,每个时隙长 $T_{\text{slot}} = 15360 \cdot T_s = 0.5\text{ms}$,一个子帧由相邻的两个时隙组成,时长为 1ms。其中, T_s 是采样点周期,是 LTE 系统的最小时间单位,其大小需要具体考虑子载波间隔和进行 FFT 运算时所使用的周期。时隙(slot)有两种方式: Normal CP(常规循环前缀)和 Extended CP(扩展循环前缀)。Normal CP 中的一个 slot 有 7 个符号; Extended CP 中的一个 slot 有 6 个符号。Extended CP 的每个符号前的 CP 保护时长较大,抗干扰能力更强。

LTE 中子载波间隔有两种,分别为 15kHz 和 7.5kHz。15kHz 的载波间隔用于单播(Unicast)和多播(MBSFN)传输; 7.5kHz 的载波间隔仅可以应用于独立载波的 MBSFN 传输。LTE 系统一般采用 15kHz。FFT 的采样点数随着带宽的不同有所不同,在 20MHz 带宽配置的情况下,FFT 运算的采样点数为 2048。在 15kHz 子载波间隔(OFDM 符号长度是 $1/15000\text{s}$)和 FFT 采用 2048 采样点运算的情况下,采样间隔 $T_s = \text{时间}/\text{点数} = 1/(15000 \times 2048) = 1/30720000 = 1/30.72\text{MHz} = 32.55\text{ns}$ 。一个子帧定义为两个连续时隙,即子帧 i 包括时隙 $2i$ 和 $2i+1$ 。对于 FDD,在每 10ms 的间隔内,10 个子帧可用于下行链路传输也可用于上行链路传输,上下行传输按频域隔离。在半双工 FDD 操作中,UE 不能同时发送和接收,而全双工 FDD 中没有这种限制。

TDD 双工方式需要考虑保护间隔,Type2 的无线帧结构如图 5-14 所示。

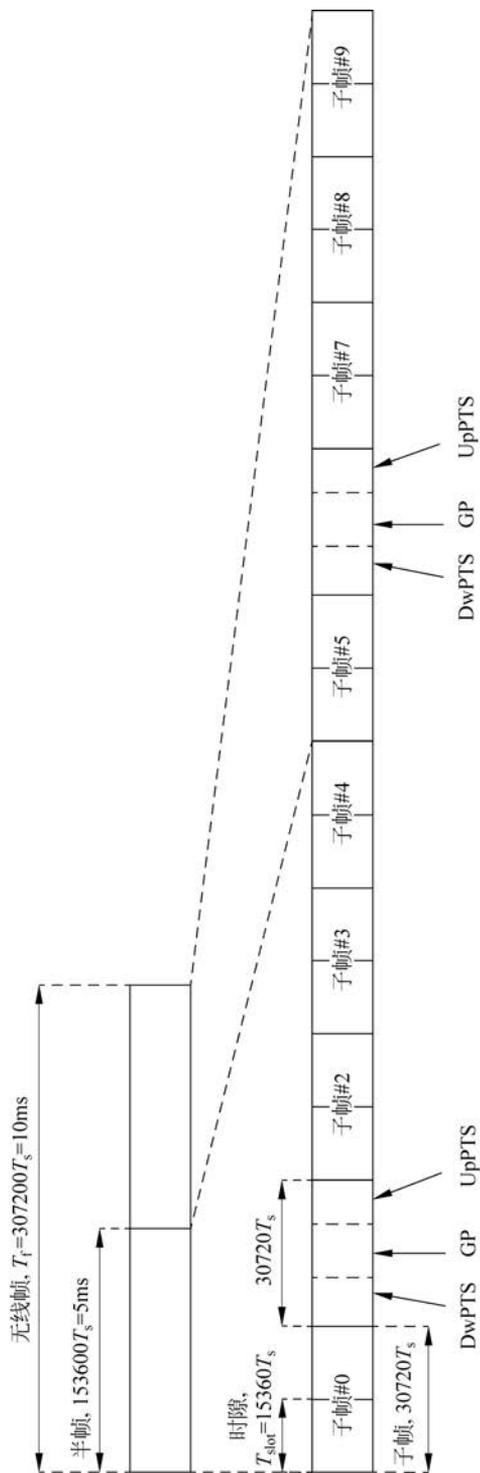


图 5-14 Type2 的无线帧结构

Type2 中帧结构的每个无线帧由两个半帧(HF)构成,每个 HF 长度为 5ms。每个 HF 包括 4 个常规子帧和一个特殊子帧。常规子帧由 2 个长度为 0.5ms 的时隙组成,每个特殊子帧由 DwPTS(下行导频时隙)、GP(保护周期,用于避免下行信号对上行信号造成干扰)和 UpPTS(上行导频时隙)3 个特殊时隙组成。一个常规时隙的长度为 0.5ms,而 DwPTS 和 UpPTS 的长度是可配置的,并且要求 DwPTS、GP 及 UpPTS 的总长度等于 1ms。通常,子帧 1 和子帧 6 包含特殊时隙 DwPTS、GP 及 UpPTS,而其他子帧包含两个相邻的时隙。其中,子帧 0、子帧 5 及 DwPTS 永远预留为下行传输,因为这两个子帧中包含了主同步信号(PSS)和从同步信号(SSS),同时子帧 0 中还包含了广播信息。TDD 模式支持 5ms 和 10ms 的切换点周期。在 5ms 切换周期情况下,UpPTS、子帧 2 和子帧 7 预留为上行传输。在 10ms 切换周期情况下,DwPTS 在两个半帧中都存在,但是 GP 和 UpPTS 只在第一个半帧中存在,在第二个半帧中的 DwPTS 长度为 1ms,UpPTS 和子帧 2 预留为上行传输,子帧 7 和子帧 9 预留为下行传输。

TDD 模式上下行子帧切换点配置如表 5-5 所示。表 5-5 中 D 表示用于下行传输的子帧,U 表示用于上行传输的子帧,S 表示包含 DwPTS、GP 及 UpPTS 的特殊子帧。

表 5-5 TDD 模式上下行子帧切换点配置

上下行配置	上下行比例	切换周期 /ms	子帧序号									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3 : 1	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	1 : 1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	1 : 3	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	1 : 2	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	2 : 7	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	1 : 8	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 : 3	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

上下行转换周期为 5ms,表示每 5ms 有一个特殊时隙。这类配置因为每 10ms 有两个上下行转换点,所以 HARQ 的反馈较为及时,适用于对时延要求较高的场景。

上下行转换周期为 10ms,表示每 10ms 有一个特殊时隙。这种配置对时延的保证略差一些,但是好处是每 10ms 只有一个特殊时隙,所以系统损失的容量相对较小。

特殊子帧的时隙配置如表 5-6 所示。

表 5-6 特殊子帧的时隙配置

特殊子帧配置	常规 CP(符号数)			扩展 CP(符号数)		
	DwPTS	GP	UpPTS	DwPTS	GP	UpPTS
0	3	10	1	3	8	1
1	9	4	1	8	3	1
2	10	3	1	9	2	1
3	11	2	1	10	1	1
4	12	1	1	3	7	2
5	3	9	2	8	2	2
6	9	3	2	9	1	2
7	10	2	2	—	—	—
8	11	1	2	—	—	—

5.3.3 物理资源相关概念

4G 系统的物理资源包括基本时间单位、天线端口、无线帧、子帧、时隙及 OFDM 符号，与 4G 系统的物理资源相关的概念包括物理资源块、资源粒子、资源单元组和控制信道。

1. 4G 系统基本时间单位

LTE 定义基本时间单元为 $T_s = 1/(15000 \times 2048) = 32.55\text{ns}$ 。 T_s 表示的是一个 OFDM 符号的采样时间，是 LTE 最小的基本时间单位，15000 表示的是每个子载波的宽度为 15kHz，2048 表示一个 OFDM 符号采样点数量。

2. 资源粒子

资源粒子(RE)表示一个符号周期长度的子载波，可以用来承载调制信息、参考信息或不承载信息。RE 在频域上占一个子载波，时域上占一个 OFDM 符号，是上下行传输使用的最小资源单位。

3. 物理资源块

物理资源块(PRB)是 LTE 系统中调度用户的最小单位，一个 PRB 由频域上连续 12 个子载波(子载波宽度 15kHz)、时域上连续 7 个 OFDM 符号构成。PRB 是 LTE 系统为业务信道分配的资源单元，用于描述物理信道到资源单元的映射，如表 5-7 所示。

表 5-7 物理资源块

子载波间隔	CP 长度	子载波个数	符号个数	RE 个数
$\Delta f = 15\text{kHz}$	常规 CP	12	7	84
	扩展 CP	12	6	72
$\Delta f = 7.5\text{kHz}$	常规 CP	24	3	72

4. 资源栅格

一个时隙中传输的信号所占用的所有资源单元构成一个资源栅格(RG)，它包含整数个 PRB，也可以用包含的子载波个数和 OFDM 或者 SC-FDMA 符号个数来表示。LTE 的物理资源如图 5-15 所示。

5. 资源粒子组和控制信道粒子

每个资源粒子组(REG)包含 4 个资源粒子 RE。每个控制信道粒子(CCE)对应 9 个 REG。REG 和 CCE 主要用于下行一些控制信道的资源分配，比如物理 HRAQ 指示信道(FHICH)，物理控制格式指示信道(PCFICH)和物理下行控制信道(PDCCH)等。

5.3.4 LTE 系统的物理信道

LTE 系统的物理信道包括上行物理信道和下行物理信道。

1. 下行物理信道

下行物理信道包括物理下行共享信道(PDSCH)、物理多播信道(PMCH)、物理下行控制信道(PDCCH)、物理广播信道(PBCH)、物理控制格式指示信道(PCFICH)、物理 HARQ 指示信道(PHICH)。

1) PDSCH

下行物理信道 PDSCH 的一般处理流程如图 5-16 所示。

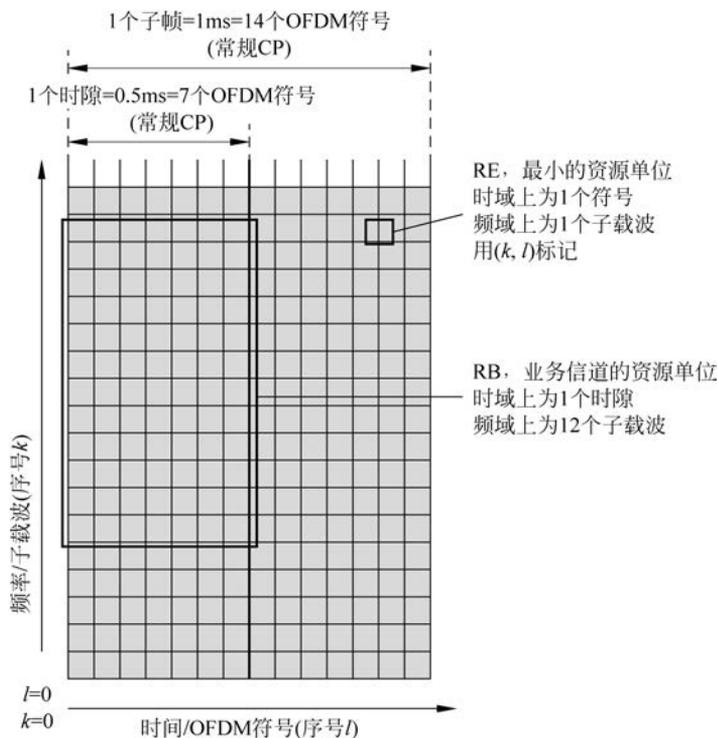


图 5-15 LTE 的物理资源

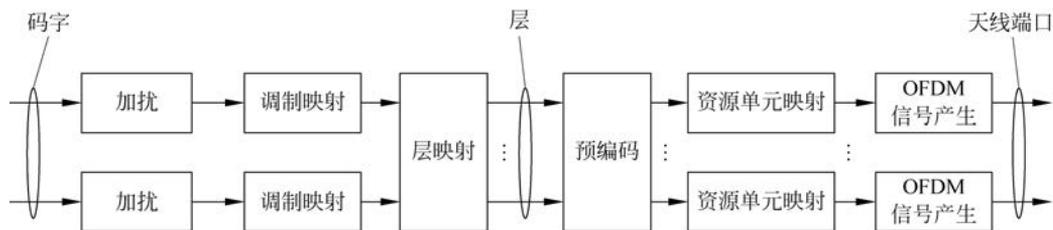


图 5-16 下行物理信道 PDSCH 的一般处理流程

图 5-16 处理流程中各模块的作用如下。

(1) 码字。来自上层的业务流进行信道编码后的数据。在 LTE 标准中,每个码字与来自 MAC 层的 TB 对应,是 TB 经信道编码之后的比特流。

(2) 层。对应于空间复用的空间流,每层对应一个预编码映射形成的映射模型,层的符号经过一个预编码向量映射到发送天线端口。传输的层数被称作传输的秩, LTE R8 的下行支持 2×2 的基本天线配置,传输层数为 2。

(3) 加扰。对在一个物理信道上传输的每个码字中的编码比特进行加扰,对输入的码字使用伪随机序列进行随机化;同时可以避免成串的“0”或者“1”出现,使信号流更均匀,降低峰均比。

(4) 调制。对加扰后的比特进行 QPSK/16QAM/64QAM 调制,使其产生复值调制符号。

(5) 层映射。将串行的数据流空间化,完成码字数据到层数据的串并变换,即将复值调制符号映射到一个或者多个传输层上,为后面的预编码做准备。

(6) 预编码。将每层上的复值调制符号进行预编码(将信道矩阵对角化),用于天线端口上的传输。LTE 系统中的开环空间复用、闭环空间复用、闭环传输分集以及多用户 MIMO 等 MIMO 传输模式都需要预编码操作。

(7) 资源粒子映射。将每个天线端口上的复值调制符号映射到资源粒子上。用户数据放置在 RB 过程中,先放置频率列然后放置符号列。在用户数据填充过程中,避开参考信号、控制信道的 RE 占用。

(8) 天线端口。天线端口是一个逻辑上的概念,它与物理天线并没有一一对应的关系。在下行链路中,天线端口与下行参考信号(RS)是一一对应的。如果通过多个物理天线来传输同一个 RS,那么这些物理天线就对应同一个天线端口;而如果有两个不同的 RS 是从同一个物理天线中传输的,那么这个物理天线就对应两个独立的天线端口。同一天线端口传输的不同信号所经历的信道环境是一样的,每个天线端口都对应了一个资源栅格。天线端口与物理信道或者信号有着严格的对应关系。

LTE R9 协议中定义了四种下行参考信号,天线端口与这些参考信号的对应关系如下。

(1) 小区特定参考信号(CRS),或小区专用参考信号。CRS 支持 1 个、2 个或 4 个三种天线端口配置,对应的端口号分别是 $p=0$, $p=\{0,1\}$, $p=\{0,1,2,3\}$ 。

(2) MBSFN 参考信号,只在天线端口 $p=4$ 中传输,这种信号用得不多。

(3) UE 特定参考信号或 UE 专用参考信号,或称作解调参考信号(DMRS)。可以在天线端口 $p=5$, $p=7$, $p=8$, 或 $p=\{7,8\}$ 中传输。

(4) 定位参考信号(PRS),只在天线端口 $p=6$ 中传输,这种信号用得不多。

(5) OFDM 信号产生。为每个天线端口产生复值的时域 OFDM 信号。

下行物理信道的调制方式如表 5-8 所示。

表 5-8 下行物理信道的调制方式

物理信道	调制方式	物理信道	调制方式
PDSCH	QPSK/16QAM/64QAM	PBCH	QPSK
PMCH	QPSK/16QAM/64QAM	PCFICH	QPSK
PDCCH	QPSK		

2) PBCH

PBCH 承载的是小区 ID 等系统信息,用于小区搜索过程。广播信道中的 MIB 在 PBCH 上发布的信息内容很少,原始的 MIB 只有 10bit 左右。包含接入 LTE 系统所需要的最基本的信息:下行系统带宽、PHICH 资源指示、系统帧号(SFN)、天线信息映射在 CRC 的掩码及天线数目等。

PBCH 在时域上映射到每帧的第 1 个子帧的第 2 个时隙的前 4 个符号;在频域位置,PBCH 映射到中心频带的 72 个子载波上。

PBCH 的传输周期为 40ms,每 10ms 发送一个可以自解码的 PBCH。自解码指的是这些无线帧的解码不依赖 PBCH 上后续发送的传输块信息。

3) PCFICH

PCFICH 作用是指出 PDCCH 上的控制信息在资源块上的位置、数量(引导 UE 读取 PDCCH 信息),携带控制格式指示(CFI 是一串二进制数)信息,指示 PDCCH 占用的 OFDM 符号的数量(1,2 或 3)。UE 在接收 PCFICH 后,就可以知道 PDCCH 位置,并进行 PDCCH 解调。采用 QPSK 调制,携带一个子帧中用于传输 PDCCH 的 OFDM 符号数及传输格式。

PCFICH 在时域上位于每个子帧的 Symbol0(符号 0);在频域上具有固定的占用数量,需要占用 4 个 REG,即占用 16 个 RE,PCFICH 占用的 16 个 RE 尽量分散在频域内,目的是得到更好的频率分集作用。

4) PDCCH

PDCCH 在频域上占用的具体数量由 PDCCH 格式(或叫 DCI 格式)决定。不同的格式,PDCCH 占用不同的 CCE 的数量。PDCCH 承载下行控制信息(DCI),每个用户占用一个 PDCCH。其作用是可以告知用户的信息 PDSCH 安排在了资源格的什么位置;PDCCH 用来承载下行控制信息 DCI,如上行调度指令、下行数据传输指示、公共控制信息等。

与其他控制信道的资源映射以 REG 为单位不同,PDCCH 资源映射的基本单位是控制信道单元 CCE,1 个 CCE 包括 9 个连续的 REG。PDCCH 聚合度采用多少个 CCE 由基站决定,取决于负载量和信道条件因数。

(1) 当包含 1 个 CCE 时,PDCCH 可以在任意 CCE 位置出现,即可以在 0、1、2、3、4 号等位置出现。

(2) 当包含两个 CCE 时,PDCCH 每两个 CCE 出现一次,即可以在 0、2、4、6 号等位置出现。

(3) 当包含 4 个 CCE 时,PDCCH 每 4 个 CCE 出现一次,即可以在 0、4、8 号等位置出现。

(4) 当包含 8 个 CCE 时,PDCCH 每 8 个 CCE 出现一次,即可以在 0、8 号等位置出现。

PDCCH 在时域上的位置一般由 PCFICH 告知具体的占用符号数,正常子帧占用 1~3 个 OFDM 符号,特殊子帧占用 1~2 个 OFDM 符号。

5) PHICH

PHICH 作用是当用户发送了上行的 PUSCH 数据后,eNodeB 通过 PHICH 向 UE 发送 HARQ 的 ACK/NACK 消息。多个 PHICH 叠加之后可以映射到同一个 PHICH 组,一个 PHICH 组对应 12RE。对于 TDD 模式,不同子帧中的 PHICH 组数目不同。

2. 上行物理信道

上行物理信道包括物理上行共享信道(PUSCH)、物理上行控制信道(PUCCH)、物理随机接入信道(PRACH)。

1) PUSCH

物理上行共享信道是承载上层传输信道的主要物理信道。PUSCH 符号与资源粒子之间的映射关系同下行一样,也为参考信号和控制信令预留 RE 资源。

PUSCH 的处理流程如图 5-17 所示。

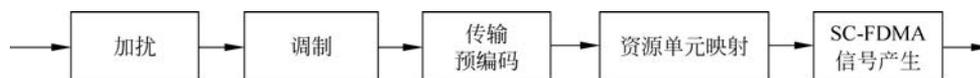


图 5-17 PUSCH 的处理流程

PUSCH 的处理流程的加扰、调制、预编码及资源单元映射的功能与下行的 PDSCH 信道相似,资源单元映射为每个天线端口生成复值时域 SC-FDMA 信号,在 RE 映射时,PUSCH 映射到子帧中的数据区域上。PUSCH 的调制方式如表 5-9 所示。

表 5-9 PUSCH 的调制方式

物理信道	调制方式
PUSCH	QPSK/16QAM/64QAM

2) PRACH

随机接入过程用于各种场景,如初始接入、切换和重建等。UE 在 PRACH 上向基站发送随机接入前导,从而获得上行的时间提前量(TA)及授权,进而在 PUSCH 上发送高层数据。为了降低随机接入冲突的概率(比如,几个 UE 选择相同的前导序列且同时发送),小区有 64 个随机接入前导序列供 UE 随机选择,这 64 个前导序列是根据小区配置的根序列经过循环移位生成的。相邻的小区应该配置不同的根序列索引,以避免 UE 发送的前导序列被相邻小区收到而误判。同时,由于上行信号的往返时延(RTT)不确定,因此必须通过保护时间接收延迟的上行信号。这样能使小区边缘 UE 发出的前导序列,在抵达基站时,落在窗口范围内。

协议定义了 5 种 PRACH Preamble 前导码结构,每种格式的帧都包括一个循环前缀和一个 ZC(Zadoff Chu)序列。前导码 Preamble 是 UE 在物理随机接入信道中发送的实际内容,由长度为 T_{CP} 的循环前缀 CP 和长度为 T_{SEQ} 的序列 Sequence 组成。频域上占用 6 个 PRB(72 个子载波)。Preamble 基本结构如图 5-18 所示。

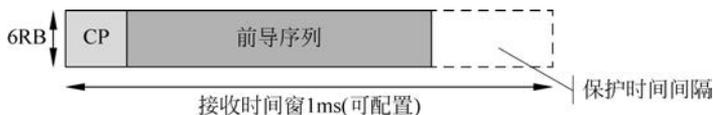


图 5-18 Preamble 基本结构

Preamble 的其他参数如表 5-10 所示。

表 5-10 Preamble 的其他参数

Preamble 格式	时间长度	T_{CP}	T_{SEQ}	序列长度
0	1ms	$3168 \times T_s$	$24576 \times T_s$	839
1	2ms	$21024 \times T_s$	$24576 \times T_s$	839
2	2ms	$6240 \times T_s$	$2 \times 24576 \times T_s$	839(传输两次)
3	3ms	$21024 \times T_s$	$2 \times 24576 \times T_s$	839(传输两次)
4(只能用于 TDD)	$\approx 157.3 \mu s$	$448 \times T_s$	$4096 \times T_s$	139

(1) 前导码的持续时间。前导码由循环前缀(CP)和序列(SEQ)组成,因此前导码持续时长 = $T_{CP} + T_{SEQ}$ 。比如, Preamble 格式 0,它的前导码持续时间 = $3168 \times T_s + 24576 \times T_s = 27744 \times T_s = 0.9031ms$ 。

(2) 前导码格式占用的子帧个数。TDD-LTE 的每个子帧时长是 $30720T_s$,前导码格式 0 的 Preamble 时间 $27744T_s < 30720T_s$,因此只需要占用 1 个上行子帧,同样可以计算得

到其他格式的子帧占用情况。

(3) 保护时间。在 OFDM 符号发送前,在码元间插入保护时间(GT),当保护时间足够大时,多径时延造成的影响不会延伸到下一个符号周期内,从而消除了符号间干扰和多载波间干扰。保护时间的长短和距离有关,GT 和小区半径是强相关的。GT 时间越长,小区的覆盖面积越大。

每个子帧的长度是 $30720T_s$,去掉前导码占用的时间就是保护时间,比如前导码格式 0 的保护时间 $GT = (30720 - 3168 - 24576) \times T_s = 2976 \times T_s = 2976 \times [1 \div (15000 \times 2048)]s = 96.875\mu s$ 。

(4) 每种前导码支持的最大小区半径的计算。在计算小区半径时,需要空出一部分的保护间隔。这是因为 UE 在随机接入之前,还没有和 eNodeB 完成上行同步,UE 在小区中的位置还不确定,因此需要预留一段时间,这样可以避免和其他子帧间发生干扰。考虑 eNodeB 和 UE 之间的往返传输需要时间,因此最大小区半径 $R = c \times GT \div 2 = (3.0 \times 10^8) \text{m/s} \times 96.875\mu s \div 2 = 14.53 \text{km}$ 。其中, R 为小区半径、GT 为保护间隔、 c 表示光速。同理,可以计算得到其他前导码格式的最大小区覆盖半径。因此,不同的小区覆盖半径,可以选择不同的前导码格式,这也是为什么前导码要分不同格式的原因。Preamble 的其他参数如表 5-11 所示。

表 5-11 Preamble 的其他参数

Preamble 格式	时间长度 (子帧个数)	支持最大小区 半径/km	PRACH 持续 时间/ms	保护时间/ms
0	1ms(1)	14.53	0.9031	0.0869
1	2ms(2)	77.34	1.4844	0.5156
2	2ms(2)	29.53	1.8031	0.1969
3	3ms(3)	100.16	2.2844	0.7156
4(只能用于 TDD)	$\approx 157.3\mu s(\text{UpPTS})$	1.406	0.1479	0.009

Preamble 格式 0: 持续 1ms,序列长度 $800\mu s$,适用于小、中型的小区,此格式满足网络覆盖的多数场景。

Preamble 格式 1: 持续 2ms,序列长度 $800\mu s$,适用于大型的小区,最大小区半径为 77.34km。

Preamble 格式 2: 持续 2ms,序列长度 $1600\mu s$,适用于中型小区。

Preamble 格式 3: 持续 3ms,序列长度 $1600\mu s$,适用于超大型小区,一般用于海面、孤岛等需要超长距离覆盖的场景。

Preamble 格式 4: TDD 模式专用的格式,持续时间 $157.3\mu s$ (2 个 OFDM 符号的突发),适用于小型小区,一般应用于短距离覆盖,特别是密集市区、室内覆盖或热点补充覆盖等场景。它是对半径较小的小区的一种优化,可以在不占用正常时隙资源的情况下,利用很小的资源承载 PRACH 信道,有助于提高系统上行吞吐量,某种程度上也可以认为有助于提高上行业务信道的覆盖性能。

Preamble 格式 4 在帧结构类型 2 中的 UpPTS 域中传输。Preamble 使用 Zadoff Chu (简称 ZC)序列产生,一个小区需要支持 64 个 Preamble。一个小区的 Preamble 由一个 Zadoff Chu 根序列通过不同的循环移位产生,如果这种方式不能提供足够的 Preamble 数

目,可以使用逻辑序号与其相邻的 Zadoff Chu 根序列产生。系统共使用 838 个 ZC 序列作为前导的物理根序列,共分为 32 个序列组,每组中的根序列按照 CM 值(Cubic Metric,立方度量,是上行功率放大器非线性影响的衡量标准,比 PAPR 更准确,直接表征功放功率的降低,也称为功率退化的程度,CM 越低,对射频硬件要求越低)排序,位置连续的根序列 CM 值始终接近,可以实现一致的小区覆盖,重新排序后的根序列序号称为根序列的逻辑序号。根据 CM 值的大小将 838 个序列可以分为低 CM 组和高 CM 组。根序列逻辑序号 0~455 为低 CM 组,根序列逻辑序号 456~837 为高 CM 组,CM 值越低,越有利于小区覆盖,因此低 CM 值的根序列优先使用。对于 Preamble 格式 0~3,存在 838 个根序列;对于 Preamble 格式 4,存在 138 个根序列。

Preamble 信号采用的子载波间隔与上行其他 SC-FDMA 符号不同,如表 5-12 所示。

表 5-12 Preamble 的子载波间隔

Preamble 格式	子载波间隔/Hz	Preamble 格式	子载波间隔/Hz
0~3	1250	4	7500

3) PUCCH

UE 通过 PUCCH 上报必要的上行控制信息,包括下行发送数据的 ACK/NACK、信道质量指示(CQI)报告、调度请求(SR)、MIMO 反馈、预编码矩阵指示(PMI)及秩指示(RI)。

PUCCH 在频域位于上行子帧的两侧,对称分布。PUCCH 信道可以在多个维度上进行进一步划分,可以通过 RB 进行划分。不同的 PUCCH 资源块在上行子帧的时隙间跳频,从而实现频率分集的效果。

UE 的大部分物理层控制信息可以通过 PUSCH 发送,但是当 PUSCH 没有被调度时,UE 需要 PUCCH 进行上行控制比特的发送,比如发送“调度请求”。为了接入更多的 UE,每个 PUCCH 资源块又可以被多个用户复用(通过使用不同的序列进行区分)。在 PUCCH 上,每个 UE 可以拥有其固定的资源(不需要基站调度)。

5.3.5 LTE 系统的物理信号

信道是信息的通道,不同信息类型需要经过不同的处理过程。物理信号是物理层产生并使用的、有特定用途的一些无线资源粒子(RE)。物理信号不携带从高层而来的任何信息,它们对高层而言不是直接可见的,即不存在与高层信道的直接映射关系。

LTE 的物理信号分为上行物理信号和下行物理信号。

1. 下行物理信号

下行物理信号包括同步信号和参考信号。同步信号又分为 PSS 和 SSS,同步信号用来确保小区内 UE 获得下行同步。同时,同步信号也用来表示物理小区 ID(PCID),以便区分不同的小区。参考信号又分为小区专用参考信号(CRS)、MBSFN 参考信号、终端专用参考信号(DRS)。下行物理信号主要用于信道估计(用于相干解调和检测,包括控制信道和数据信道)、信道质量的测量(用于调度、链路自适应)及导频强度的测量(为切换、小区选择提供依据)。在设计下行参考信号时需要考虑的因素包括:图样的时/频密度,在时域上要求导频间隔小于相干时间、在频域上要求导频间隔小于相干带宽;序列(相关性、序列数量、复杂度等)。

1) CRS

CRS 在支持非 MBSFN 传输的小区中所有下行子帧中传输,以小区为单位,全频带广播发送的参考信号,是小区内用户进行下行测量、调度下行资源及数据解调的参考信号。当子帧用于 MBSFN 传输时,CRS 仅在一个子帧第一个时隙的前两个 OFDM 符号中传输。CRS 最多支持 4 个天线端口,在天线端口 0~3 中的一个或者多个端口上传输。天线端口 0~1 的每个时隙有 2 个 OFDM 符号携带 RS; 天线端口 2~3 的每个时隙有 1 个 OFDM 符号携带 RS,RS 的频域间隔为 6 个子载波。

RS 映射初始位置与小区 ID、RB 序号、天线端口号及 OFDM 符号序号等有关。CRS 参考信号子载波在频域的起始位置与小区的 ID 有关,不同的小区形成频域相对偏移,避免不同小区 RS 之间的同频干扰。任何一个天线端口的某个时隙中用来传输参考信号的 $RE(k,l)$,在另一个天线端口的同一个时隙和时隙零上不能用于任何信息传输。在时域位置固定的情况下,下行参考信号在频域有 6 个频移,如果 PCI 模 6 值相同,会造成下行 RS 的相互干扰。

总之,CRS 用于下行信道估计及非波束赋型模式下的解调、调度上下行资源、切换测量及小区搜索,如图 5-19 所示。

2) MBSFN 参考信号

MBSFN 参考信号要求同时传输来自多个小区具有完全相同的波形。因此,UE 接收机可以将多个 MBSFN 小区视为一个大的小区。MBSFN 分成两种,专用载波的 MBSFN 和与单播混合载波的 MBSFN。MBSFN 参考信号用于 MBSFN 的信道估计和相关解调,只能在 PMCH 传输时通过天线端口 4 上发送。MBSFN 只支持扩展 CP,只在分配给 MBSFN 传输的子帧中传输。MBSFN 参考信号序列由 PN 序列产生,相邻 RS 间的频域间隔是 30kHz, $\Delta f=15\text{kHz}$ 时 MBSFN 参考信号示意图如图 5-20 所示。

3) DRS

DRS 可用于 PDSCH 的天线端口传输,并与 UE 特定参考信号在天线端口 5 或者端口 7/8 发送。DRS 主要用于下行信道的估计和相关解调,且其只有在 PDSCH 传输与相应的天线端口一致时,才作为 PDSCH 解调用的有效参考信号。DRS 用于波束赋形传输,只在 UE 分配的 PDSCH 所在 RB 中传输,用于 UE 解调,如图 5-21 所示。

4) PSS/SSS

UE 可根据 PSS 获得符号同步、部分 Cell ID 检测。

(1) 时域上的位置。对于 LTE-FDD 制式,PSS 周期出现在时隙 0 和时隙 10 的最后一个 OFDM 符号上,SSS 周期出现在时隙 0 和时隙 10 的倒数第二个符号上;对于 LTE-TDD 制式,PSS 周期出现在子帧 1、6 的第三个 OFDM 符号上,SSS 周期出现在子帧 0、5 的最后一个符号上。如果 UE 在此之前并不知道当前是 FDD 还是 TDD,那么可以通过这种位置的不同来确定制式。

(2) 频域上的位置。PSS 和 SSS 映射到整个带宽中间的 6 个 RB 中,因为 PSS 和 SSS 都是 62 个点的序列,所以这两种同步信号都被映射到整个带宽(不论带宽是 1.4MHz 还是 20MHz)中间的 62 个子载波(或 62 个 RE)中,即序列的每个点与 RE 一一对应。在 62 个子载波的两边各有 5 个子载波,不再映射其他数据。

在 LTE-FDD 制式中,同步信号用于小区搜索过程中 UE 和 E-UTRAN 的时频同步,如图 5-22 所示。UE 根据 SSS 最终获得帧同步、CP 长度检测和小区组 ID 检测。

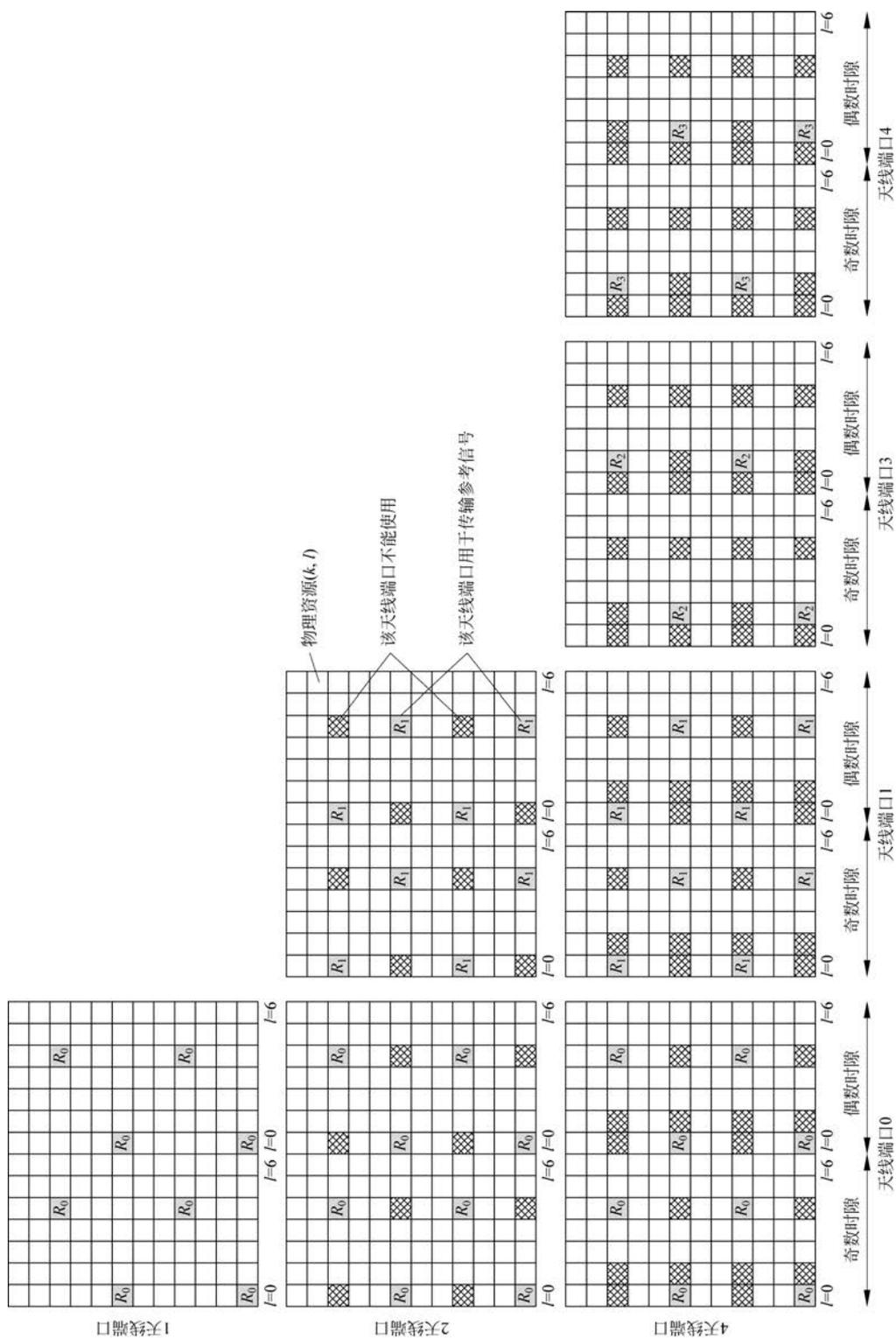


图 5-19 小区专用参考信号分布示意图



图 5-20 $\Delta f = 15\text{kHz}$ 时 MBSFN 参考信号

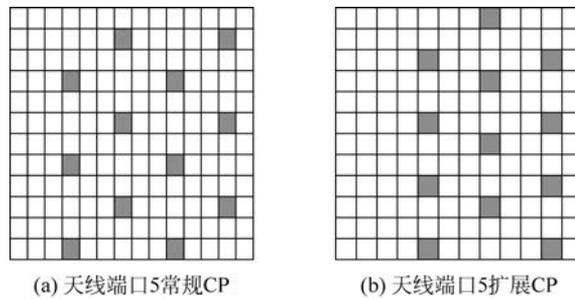


图 5-21 DRS 示意图

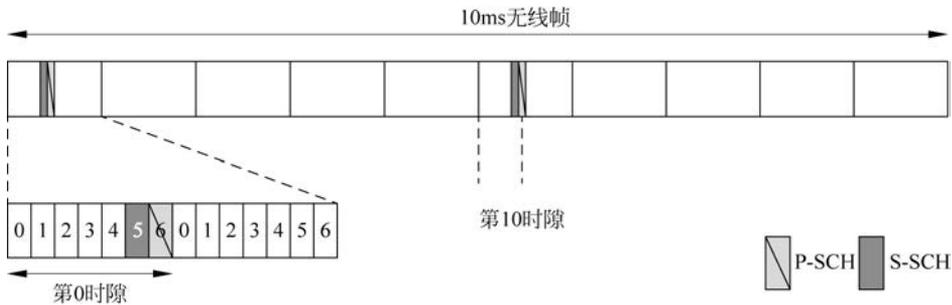


图 5-22 同步信号发射时隙

PSS 使用 Zadoff-Chu 序列, SSS 使用的序列由两个长度为 31 的二进制序列通过交织级联产生, 并且使用由 PSS 决定的加扰序列进行加扰, 长度为 31 的二进制序列及加扰序列都由 m 序列产生。

对于 TDD-LTE 制式, 同步信号 (PSS/SSS) 占用的 72 子载波位于系统带宽中心位置 1.08MHz 位置, 如图 5-23 所示。

同步过程通过两步完成, 即首先检测 PSS, 完成半帧定时 (获得半帧 5ms 边界)、频偏校正并获得组内 ID (利用 3 条 ZC 序列区分 3 个组内 ID); 然后再检测 SSS, 完成长/短 CP 检测 (符号同步)、帧定时, 即获得一个无线帧 10ms 边界 (SSS 由两条短码序列交叉组成, 用不

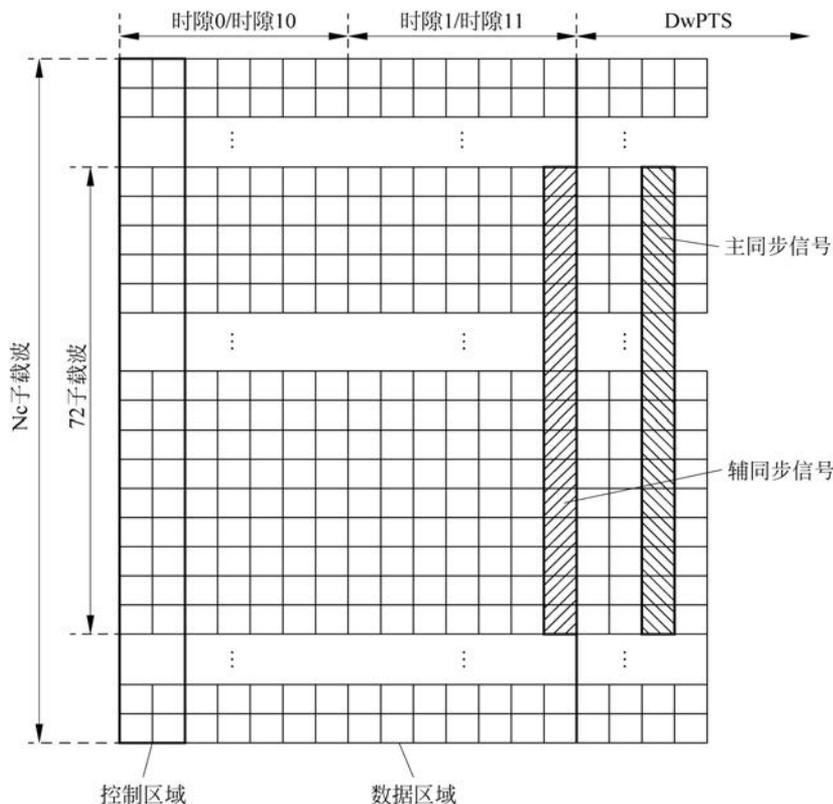


图 5-23 主/辅同步信号位置示意图(TDD-LTE,常规 CP)

同的顺序区分两个半帧并获得组 ID)。

5) PCI 规划

PCI 总数有 504 个,分为 168 组,每组有 3 个,其中组号对应为 SSS,组内本地号对应为 PSS。PCI 规划应遵循以下原则:同一基站的 PCI 建议连续规划(按自然序列号依次分配);初始 PCI 规划时,PCI 模 3 可与小区序列保持一定的规律性(如第一小区模 3 为 0,第二小区模 3 为 1,第三小区模 3 为 2),可为优化预留 10%~20%的 PCI。

除此之外,由于 PCI 被用于决定小区中 PSS、RS 和 PCFICH 等信号的频域位置,因此规划时还应考虑一般性原则:避免相同的 PCI 分配给邻区;避免模 3 相同的 PCI 分配给邻区,规避相邻小区的 PSS 序列相同,或规避双端口小区 RS0 和相邻另一双端口小区 RS1 信号之间的频域位置相同;避免模 6 相同的 PCI 分配给邻区,规避相邻小区 RS0 信号的频域位置相同;避免模 30 相同的 PCI 分配给邻区,规避相邻小区的 SRS 和 DMRS 频域位置相同;规避模 50 相同的 PCI 分配给邻区,规避相邻小区的 PCFICH 频域位置相同。如果 PCI 模 3 值相同,会造成 PSS 的干扰;如果 PCI 模 6 值相同,会造成下行 RS 的相互干扰;PUSCH 信道中携带了 DMRS 和 SRS 的信息,这两个参考信号对于信道估计和解调非常重要,它们由 30 组基本的 ZC 序列构成,即有 30 组不同的序列组合,所以如果 PCI 模 30 值相同,那么会造成上行 DMRS 和 SRS 的相互干扰。

2. 上行物理信号

上行物理信号包括解调用参考信号(DMRS)、探测用参考信号(SRS)。

解调参考信号与 PUSCH 或 PUCCH 相关联；探测参考信号与 PUSCH 或 PUCCH 不关联。DMRS 和 SRS 具有相同的基本序列集合。由于 LTE 上行采用 SC-FDMA 技术，因此参考信号和数据是采用 TDM 方式复用在一起的。上行物理信号的作用主要是进行上行信道估计，即 DMRS 用于 eNodeB 端的相干检测和解调；SRS 用于上行信道质量测量。

由于上行物理信号发送是在取得上行同步后进行的，因此和下行相似，也可以设计正交的上行物理信号，用于支持 UE 的上行多流 MIMO，实现 eNodeB 内不同 UE 之间的正交参考信号。

1) DMRS

DMRS 用于 LTE 上行解调的参考信号。由于不同 UE 的信号在不同的频带内发送，因此如果每个 UE 的参考信号是在该 UE 的发送带宽内发送，则这些参考信号会自然以 FDM 方式相互正交，类似下行的 DRS。对于 PUSCH，其解调用参考信号占用每个时隙中的第 4 个 SC-FDMA 符号。不同用户使用参考信号序列的不同循环移位值进行区分，普通 CP 的上行解调参考信号如图 5-24 所示。

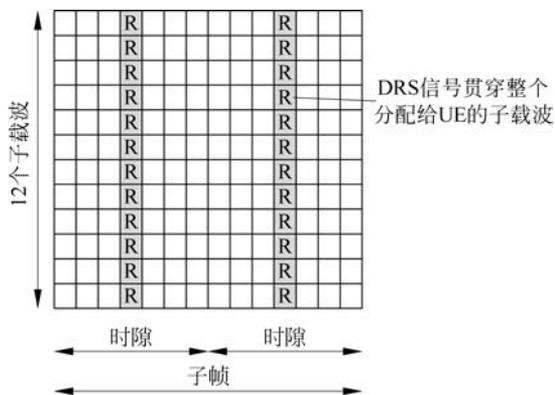


图 5-24 普通 CP 的上行解调参考信号

2) SRS

SRS 主要用于上行调度。为了支持频率选择性调度，UE 需要对较大的带宽进行探测，远超过其传输数据的带宽。换句话说，SRS 是一种“宽带的”参考信号。多个用户的 SRS 可以采用分布式 FDM 或 CDM 的方式复用在一起。在 UE 数据传输带宽内的 SRS 也可以考虑用作数据解调，类似下行的 CRS，如图 5-25 所示。

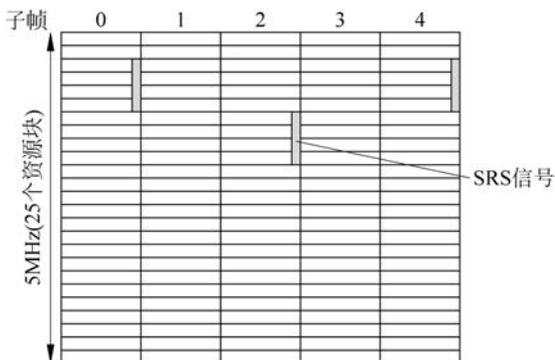


图 5-25 探测参考信号

5.4 EPC 网络原理

3GPP 在 2004 年底制订了长期演进计划(LTE),包括无线侧和网络侧两个部分。网络侧的工作目标主要包括以下几个方面:时延、容量、吞吐量的性能提高;核心网简化;基于 IP 业务和服务的优化;对非 3GPP 接入技术的支持和切换的简化。

5.4.1 EPC 网络

1. EPC 网络结构

EPC 是 LTE 系统的整个网络体系的总称,主要分为三个部分:① UE 是移动用户设备,可以通过空中接口发起、接收呼叫;② LTE 的无线接入网部分,又称为 E-UTRAN,处理所有与无线接入有关的功能;③ SAE 的核心网部分,即 EPC,主要包括 MME、S-GW、P-GW、HSS 等网元。EPC 作为 LTE 系统的核心网,在整个网络架构中承担了非常重要的角色。EPC 网络架构如图 5-26 所示。

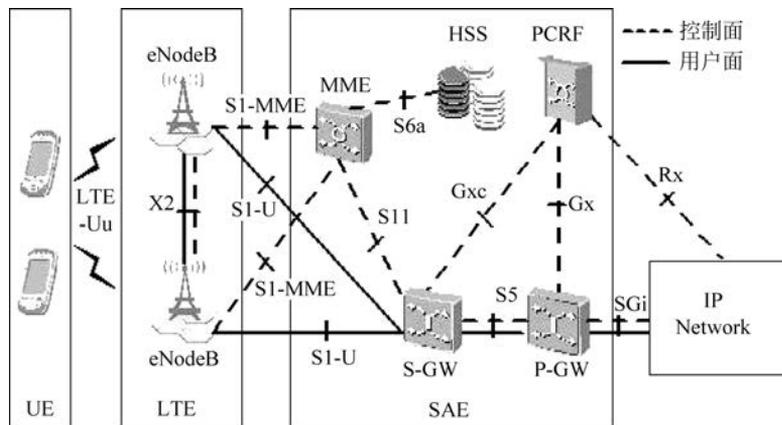


图 5-26 EPC 网络架构

2. EPC 网络功能

EPC 网络实现的逻辑功能主要包括:网络接入控制功能;数据路由和转发功能;移动性管理功能;安全功能;无线资源管理功能;网络管理功能。

网络接入控制功能主要包括:网络选择/接入网络选择;鉴权和授权功能;准入控制功能(准入控制功能的目的是确定用户请求的资源是否可获取并保留这些资源);增强的策略和计费功能;合法监听。无线资源管理功能是由接入网实施的,关注无线通信链路的分配和维护。网络管理功能则提供相关的操作维护。

3. EPC 主要逻辑网元功能

1) MME 移动性管理实体

负责控制面的移动性管理、用户上下文和移动状态管理、分配用户临时身份标识等。MME 相当于 LTE 网络总管家,所有内部事务和外部事务均由 MME 总协调完成。

MME 控制 UE 如何通过 NAS 信令与网络进行交互。对 UE 进行鉴权并控制其是否能接入网络;控制 UE 对网络的接入(如分配网络资源);维持所有 UE 的 EPC 移动性管理

(EMM)状态,支持寻呼、漫游和切换。

MME 控制 SGW 执行承载管理功能。承载平面的用户数据不经过 MME; MME 支持对 P-GW 和 S-GW 的选择功能,以便决定 UE 所使用的承载的路径; MME 支持对 MME 的选择功能,以决定 MME 改变时的切换路径; MME 支持对演进的高速分组数据(eHRPD)接入节点的选择功能,以实现 LTE 到 eHRPD 的切换;支持信令流的合法监听。

2) S-GW

S-GW 服务网关是 3GPP 内不同接入网络间的用户锚点,负责用户在不同接入技术之间移动时用户面的数据交换,用来屏蔽 3GPP 内不同接入网络的接口。S-GW 承担 EPC 的网关功能,终结 E-UTRAN 方向的接口。

S-GW 是本地数据的移动性锚定点,其包括 eNodeB 之间切换的本地锚定点;空闲模式下的下行链路数据缓存;分组路由与转发;传输层上下行链路上基于 QCI 对数据包做标记;eNodeB 与其他网络之间切换的本地锚定点;非 3GPP 接入系统的本地切换锚点;合法监听等。

3) P-GW

PDN 是 Packet Data Network,指采用分组协议(基本是 IP 协议)的数据网络,泛指移动终端访问的外部网络。P-GW 是 3GPP 接入网络和非 3GPP 接入网络之间的用户锚点。P-GW 是与外部 PDN 连接的网元,P-GW 承担着 EPC 的网关功能,终结与外部 PDN 相连的 SGi 接口(P-GW 跟外部网络互联的接口)。一个终端可以同时通过多个 P-GW 访问多个 PDN。

P-GW 是 EPS 承载在 IP 层面的锚定点,负责 UE 的 IP 地址的管理和分配,控制上行和下行链路承载的绑定,在传输层上/下行链路上基于 QCI 对数据包做标记,对每用户每业务的 QoS 控制和分组包过滤,QoS 策略执行,支持计费,合法监听等。

4) HSS

HSS 归属用户服务器,存储了 LTE 网络中用户所有与业务相关数据,提供用户签约信息管理和用户位置管理。类似于 2G/3G 网络的 HLR,签约、鉴权信息都保存在 HSS 中。HSS 具有用户签约数据存储功能,包括附着过程中用的鉴权向量、默认 TFT、每 UE 每 APN 汇聚 MBR(AMBR)、存储 PCRF 用户策略配置、提供 PDN 签约信息、RAT/频率检测级别索引,用于建立 RRC 连接的用户位置信息;HSS 还可以触发去附着流程(如对欠费用用户进行去附着流程)。

5) PCRF

PCRF 可以对用户业务 QoS 进行控制,为用户提供差异化的服务,并且能为用户提供业务流承载资源保障以及流计费策略,以合理利用网络资源,创造最大利润,为 PS 域开展多媒体实时业务提供可靠的保障。

4. EPC 网络接口

整个 EPC 网络接口分成如下三大类。

(1) 纯控制面接口。S1-MME(eNodeB 与 MME 间接口)、S10(MME 与 MME 间接口)、S11(MME 与 S-GW 间接口)、S6a(MME 与 HSS 间接口)、Gx(P-GW 与 PCRF 间接口)、Gxc(S-GW 与 PCRF 间接口)、Rx(PCRF 与 PCSCF(代理呼叫会话控制功能)间)接口。

(2) 纯用户面接口。S1-U(eNodeB 与 SGW 间接口)。

(3) 既是控制面又是用户面接口。Uu(UE 与 eNodeB 间接口)、S1(eNodeB 与 EPC 间接口)、X2(eNodeB 与 eNodeB 间接口)、S5/S8(SGW 与 PGW 间接口)、SGi(PGW 与 PDN 间接口)。

各接口功能如表 5-13 所示。

表 5-13 EPC 网络接口功能

接口	协议	物理承载方式	功能
S1-MME	S1-AP SCTP	IP	E-UTRAN 与 MME 间控制平面参考点,用于各种控制信令的传输。S1-AP 是 MME 和 eNodeB 间的应用层协议; SCTP 保证 MME 和 eNodeB 间的信令可靠传递
S1-U	GTP-U	IP	E-UTRAN 和 S-GW 之间为每个承载建立用户面隧道和 Enode B 间切换时路径交换的参考点
S5	GTP-C GTP-U	IP	S-GW 和 P-GW 之间的参考点,支持网关之间的承载管理和用户面隧道管理,用于 S-GW 建立到 P-GW 的连接过程及 UE 移动性管理中 S-GW 重定位过程
S6a	Diameter	IP	该接口用于 MME 和 HSS 之间的鉴权和认证
Gx	Diameter	IP	P-GW 与 PCRF 之间的参考点,支持从 PCRF 向 EPC 提供策略控制和计费规则传递
S8	GTP-C GTP-U	IP	与 S5 相同,用于漫游架构,在 VPLMN 和 HPLMN 的 P-GW 之间提供用户面控制
S10	GTP-C	IP	MME 之间用于 MME 重定位的参考点,提供 MME 之间的信息传递
S11	GTP-C	IP	MME 和 S-GW 之间控制面的参考点,支持承载管理
SGi	TCP/UDP	IP	P-GW 和 PDN 网络之间的参考点。这里的 PDN 网可以是外部公共数据网,也可以是内部私有数据网(比如运营商的 IMS 网络)

5.4.2 EPC 网络工作原理

1. EPC 的典型业务流程

1) 典型的分组业务

EPC 网络典型的分组业务流程如图 5-27 所示。

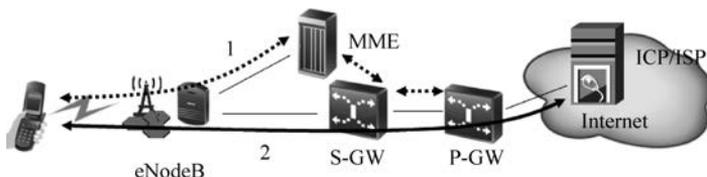


图 5-27 EPC 网络典型的分组业务流程

(1) 信令(虚线表示): 用户完成 MME 的注册, MME 会为用户选择一个 S-GW 和 P-GW, 并分配资源。P-GW 会给 UE 分配一个 IP 地址, 当一切准备就绪, MME 会发接收消息给 UE, 并为 UE 建立好相关承载通道。

(2) 数据(实线表示): UE 使用由核心网分配的 IP 地址和上一步建立的承载接入网络

进行数据通信,比如 Internet。

2) 典型的语音业务

EPC 网络典型的语音业务流程,如图 5-28 所示。

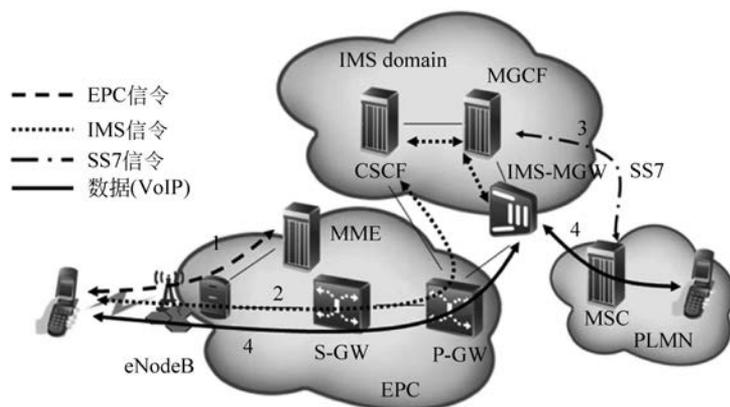


图 5-28 EPC 网络典型的语音业务流程

(1) VoLTE 终端通过开机,完成 EPC 和 IMS 网络注册,并建立 IMS 默认承载。

(2) UE 通过 IMS 承载,向被叫 UE 发送 INVITE Requests(发起请求),被叫信息被封装进会话初始协议(SIP)消息中。

(3) IMS 网络通过域选试图找到被叫方,并在主被叫之间完成语音业务专有承载建立。

(4) 通过语音业务专有承载通道,主被叫 UE 就可以进行通话了。

2. 移动管理流程

下面介绍几个与移动管理流程相关的概念。

1) 追踪区域(TA)

TA 是 LTE/SAE 系统为 UE 的位置管理设立的概念,其被定义为 UE 不需要更新服务的自由移动区域。TA 功能可以实现对终端位置的管理,分为寻呼管理和位置更新管理。UE 通过跟踪区注册告知 EPC 自己的跟踪区。当 UE 处于空闲状态时,核心网络能够知道 UE 所在的跟踪区,同时当处于空闲状态的 UE 需要被寻呼时,必须在 UE 所注册的跟踪区的所有小区进行寻呼。TA 是小区级的配置,多个小区可以配置相同的 TA,且一个小区只能属于一个 TA。

跟踪区设计的原则是对于 LTE 的接入网和核心网应保持相同的位置区域的概念;当 UE 处于空闲状态时,核心网能够知道 UE 所在的跟踪区;当处于空闲状态的 UE 需要被寻呼时,必须在 UE 所注册的跟踪区中的所有小区进行寻呼;在 LTE 系统中应尽量减少因位置改变而引起的位置更新信令。

2) 多注册 TA

多个 TA 组成一个 TA 列表,同时分配给一个 UE,UE 在该 TA 列表内移动时不需要执行 TA 更新。当 UE 进入不在其所注册的 TA 列表中的新 TA 区域时,需要执行 TA 更新,MME 给 UE 重新分配一组 TA,新分配的 TA 也可包含原有 TA 列表中的一些 TA。

3) EPS 移动性管理(EMM)

EMM 是在移动网络中针对用户移动所涉及的管理问题,是移动网络支持用户移动性



的关键技术,是移动网络不同于固定网络的一个重要方面。移动性管理的主要目的是实现资源均衡、频率复用,使用户始终在网络质量较好的小区进行业务。移动性管理根据 UE 状态的不同分为空闲态的移动管理和连接态的移动管理。空闲态下的移动管理主要通过小区选择或者重选来实现小区的转换,由 UE 控制转换的发生;连接态下的移动性管理主要通过小区切换实现,由基站控制切换的发生。移动性管理能够辅助 LTE 系统实现负载均衡,提高用户体验及系统整体性能。

小区选择、重选属于空闲状态下的移动性。基本沿用 UMTS 系统的原则,仅修改了测量属性、小区选择/重选的准则等。切换属于连接状态下的移动性。LTE 系统内的切换采用网络控制、UE 协助的方式。LTE 的切换指源基站主动将 UE 上下文(Context)发送给目标基站,是网络控制/终端辅助的切换。

(1) EMM 取消注册状态(EMM-DEREGISTERED):在此状态下,UE 对 MME 来说不可达,因为 EMM 上下文中不包括用户的有效位置和路由信息。UE 的部分上下文仍可保存在 UE 和 MME 中,这样做的目的就是避免在每次附着的时候发起认证和密钥协商(AKA)过程,也就是鉴权过程。

(2) EMM 注册状态(EMM-REGISTERED):UE 可以通过一次成功的附着流程(附着/位置更新)来进入此状态。这种状态下,MME 知道 UE 的确切位置或者是用户所在的追踪区列表。

4) EPS 连接管理(ECM)

ECM 状态描述了 UE 和 EPC 之间的信令连接状态。

(1) EPS 连接管理空闲态(ECM-IDLE):一个用户与网络没有 NAS 信令连接时,用户进入了 IDLE 态。此状态下的 UE 在 eNodeB 内没有上下文,也没有 S1-MME、S1-U 连接。

(2) EPS 连接管理连接态(ECM-CONNECTED):这种状态下,UE 和网络有 NAS 信令连接,有上下文。UE 处在这个状态下,MME 将会知道为它服务的 eNodeB 的 ID。

ECM 和 EMM 状态是互相独立的。从 EMM-REGISTERED 到 EMM-DEREGISTERED 的状态转换可以不管 ECM 的状态如何,比如通过 ECM-CONNECTED 状态下的显式分离流程,或者通过 ECM-IDLE 状态下的 MME 隐式分离流程。当然,也会存在一定的联系,比如从 EMM-DEREGISTERED 到 EMM-REGISTERED 状态的转换,UE 必须位于 ECM-CONNECTED 状态。

5) 移动性管理 UE 的状态

移动性管理 UE 的状态包括 RRC 状态(RRC_IDLE 状态和 RRC_Connected 状态)、EMM 状态和 ECM 状态。

移动管理各状态迁移图如图 5-29 所示。

6) LTE 测量

参考信号接收功率(RSRP)表示每个 RB 上 RS 的接收功率,提供了小区 RS 信号强度度量。系统根据 RSRP 对 LTE 候选小区排序,且 RSRP 作为切换和小区重选的输入。载波接收信号强度(RSSI)指示表示 UE 对所有信号来源观测到的总接收带宽功率。参考信号接收质量(RSRQ), $RSRQ = N \times RSRP / RSSI$, N 为 RSSI 测量带宽的 RB 个数,其反映了小区 RS 信号的质量。当仅根据 RSRP 不能提供足够的信息来执行可靠的移动性管理时,

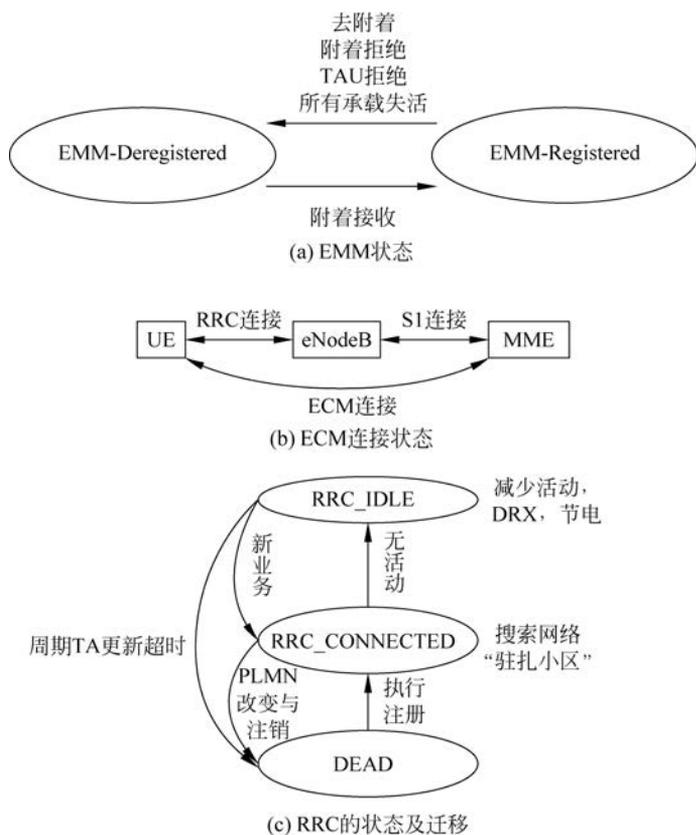


图 5-29 移动管理各状态迁移图

根据 RSRQ 对 LTE 候选小区排序,作为切换和小区重选的输入。

3. LTE 小区选择/重选

1) LTE 小区选择

(1) 空闲状态。空闲状态指 EPS 连接管理(ECM)空闲状态,即 ECM-IDLE。其主要特征为: UE 和网络之间没有信令连接,在 E-UTRAN 中不为 UE 分配无线资源并且没有建立 UE 上下文; UE 和网络之间没有 S1-MME 和 S1-U 连接; UE 在有下行数据到达时,数据应终止在 S-GW,并由 MME 发起寻呼;网络对 UE 位置所知的精度为 TA 级别;当 UE 进入未注册的新 TA 时,应执行 TA 更新;应使用非连续接收(DRX)等节省电力的功能。

(2) 小区选择类型。UE 对小区的选择分为不同场景和不同时机。不同场景包括初始小区选择和存储信息的小区选择。不同时机包括 UE 开机、从 RRC_CONNECTED 返回到 RRC_IDLE 模式、重新进入服务区等。

(3) 小区选择相关概念。包括 IDLE 模式下的服务类型和小区分类。IDLE 模式下的服务类型分为受限服务(在一个可接受的小区上进行紧急呼叫)、正常服务(合适小区上普遍使用)、操作人员服务。按可提供的服务使用小区可以分为可接受小区(可获得受限服务,如紧急呼叫)、合适的小区(UE 可驻留并获得正常服务)、禁止的小区(系统信息中指示小区为 Barred)、保留的小区(系统信息中指示小区为 Reserved)。

(4) 小区选择标准采用 S 准则,即小区搜索中的接收功率 $S_{rxlev} > 0$ dB 且小区搜索中接

收的信号质量 $S_{\text{qual}} > 0$ dB。

$$S_{\text{rxlev}} = Q_{\text{rxlevmeas}} - (Q_{\text{rxlevmin}} + Q_{\text{rxlevminoffset}}) - P_{\text{compensation}} \quad (5-1)$$

$$P_{\text{compensation}} = \max(P_{\text{emax}} - P_{\text{umax}}, 0) \quad (5-2)$$

$$S_{\text{qual}} = Q_{\text{qualmeas}} - (Q_{\text{qualmin}} + Q_{\text{qualminoffset}}) \quad (5-3)$$

式(5-1)~式(5-3)中的各参数含义如表 5-14 所示。

表 5-14 S 准则各参数含义

名 称	含 义
S_{rxlev}	小区选择接收电平值,单位 dB
$Q_{\text{rxlevmeas}}$	测量小区接收电平值,单位 dBm
Q_{rxlevmin}	小区要求的最小接收电平值,该参数的取值应使得被选定的小区能够提供基础类业务的信号质量要求,单位 dBm
$Q_{\text{rxlevminoffset}}$	最低接收电平偏置,即相对于 Q_{rxlevmin} 的偏移量,防止“乒乓”选择,单位 dB
$P_{\text{compensation}}$	用于惩罚达不到小区最大功率的 UE,单位 dB
P_{emax}	小区允许 UE 的最大上行发射功率,单位 dBm
P_{umax}	UE 能发射的最大输出功率,单位 dBm
Q_{qualmeas}	测量小区信号质量 RSRQ 值,单位 dBm
Q_{qualmin}	最小接收信号质量,单位 dB
$Q_{\text{qualminoffset}}$	最小接收信号接收质量偏置值,单位 dB

2) LTE 小区重选

(1) 概念。小区重选指 UE 在空闲模式下通过监测邻区和当前小区的信号质量以选择一个最好的小区提供服务信号的过程。当邻区的信号质量及电平满足 S 准则且满足一定重选判决准则时,终端将接入该小区驻留。UE 成功驻留后,将持续进行本小区测量。RRC 层根据 RSRP 测量结果计算 S_{rxlev} ,并将其与 $S_{\text{intrasearch}}$ (同频测量启动门限)和 $S_{\text{nonintrasearch}}$ (异频/异系统测量启动门限)比较,作为是否启动邻区测量的判决条件。小区重选包括小区重选时机和小区重选原则。

(2) 小区重选过程。UE 评估基于优先级的所有 RAT 频率; UE 用排序的准则并基于无线链路质量来比较所有相关频率上的小区;一旦重选目标小区,UE 验证该小区的可接入性;无接入受限,重选到目标小区。

(3) 小区重选测量启动准则。系统消息指出的优先级高于服务小区时,UE 总是执行对这些高优先级小区的测量;对于同频/同优先级小区,若服务小区小于或等于同频测量启动门限 $S_{\text{intrasearch}}$,UE 执行测量,若低于此门限则不测量;系统消息指出优先级低于服务小区时,若服务小区的 S_{rxlev} 值小于或等于异频/异系统测量启动门限 $S_{\text{nonintrasearch}}$,执行测量,大于不测量;若 $S_{\text{nonintrasearch}}$ 参数没有在系统消息内广播,UE 开启异频小区测量。

(4) 小区重选准则。如果最高优先级上多个邻小区符合条件,则选择最高优先级频率上的最优小区。对于同等优先级频点(或同频),采用同频小区重选的 R 准则。

① 高优先级频点的小区重选,需满足以下条件:

- ◆ UE 驻留原小区时间超过 1s;
- ◆ 高优先级频率小区的 S_{rxlev} 值大于预设的门限(高优先级重选门限值),且持续时间超过重选时间参数 T 。

② 同频或同优先级频点的小区重选,需满足以下条件:

- ◆ UE 驻留原小区时间超过 1s;
- ◆ 没有高优先级频率的小区符合重选要求条件;
- ◆ 同频或同优先级小区的 S_{rxlev} 值小于或等于预设的门限(同频测量启动门限)且在 T 时间内持续满足 R 准则。

③ 低优先级频点的小区重选,需满足以下条件:

- ◆ UE 驻留原小区的时间超过 1s;
- ◆ 没有高优先级(或同等优先级)频率的小区符合重选要求条件;
- ◆ 服务小区的 S_{rxlev} 值小于预设的门限(服务频点低优先级重选门限),并且低优先级频率小区的 S_{rxlev} 值大于预设的门限(低优先级重选门限),且持续时间超过重选时间参数值。

对于同频小区或者异频但具有同等优先级的小区,UE 采用 R 准则对小区进行重选排序。R 准则是指目标小区在重选 $T_{reselection}$ 时间内(同频和异频的 $T_{reselection}$ 可能不同), R_t (目标小区)持续超过 R_s (服务小区),那么 UE 就会重选到目标小区。

$$\text{服务小区} \quad R_s = Q_{meas,s} + Q_{hyst} \quad (5-4)$$

$$\text{目标小区} \quad R_t = Q_{meas,t} - Q_{offset} \quad (5-5)$$

式(5-4)和式(5-5)中的各参数含义如表 5-15 所示。

表 5-15 R 准则各参数含义

名称	含义
$Q_{meas,s}$	测量小区 RSRP 值,单位 dBm
Q_{hyst}	小区重选迟滞值,减少“乒乓效应”,单位 dB
$Q_{meas,t}$	目标小区 RSRP 值,单位 dBm
Q_{offset}	小区偏置,单位 dB

4. LTE 切换

1) 切换概述

切换是指在连接状态下,UE 在不同的小区间移动,完成 UE 上下文的更新。在无线的移动环境中,由于 UE 位置的不断变化以及每个小区覆盖范围的有限性,UE 可以通过覆盖的切换来保证 UE 业务的连续性。eNodeB 通过控制消息下发相关配置信息,UE 据此完成切换测量,并在 eNodeB 控制下完成切换的过程,保证不间断的通信服务。切换前后的 UE 连接切换分硬切换和软切换两种,如图 5-30 所示。其区别在于,在软切换过程中,源小区和目标小区均与 UE 有 RRC 连接。目前,LTE 采用硬切换方式进行系统内切换。

对于 LTE 网络,系统内切换包含三种,如图 5-31 所示。站内切换,连接态的 UE 从某基站的一个小区切换至另一个小区;站间 X2 切换,连接态的 UE 从某基站的一个小区切换至另一个基站的一个小区,这两个基站存在并配置了 X2 接口;站间 S1 切换,连接态的 UE 从某基站的一个小区切换至另一个基站的一个小区,这两个基站未配置 X2 接口。

(1) 连接状态。连接状态指 ECM-CONNECTED 状态,其主要特征包括:UE 和网络之间有信令连接,这个信令连接包括 RRC 连接和 S1-MME 连接两部分;网络对 UE 位置所知精度为小区级;UE 移动性管理由切换过程控制;S1 释放过程将使 UE 从 ECM-



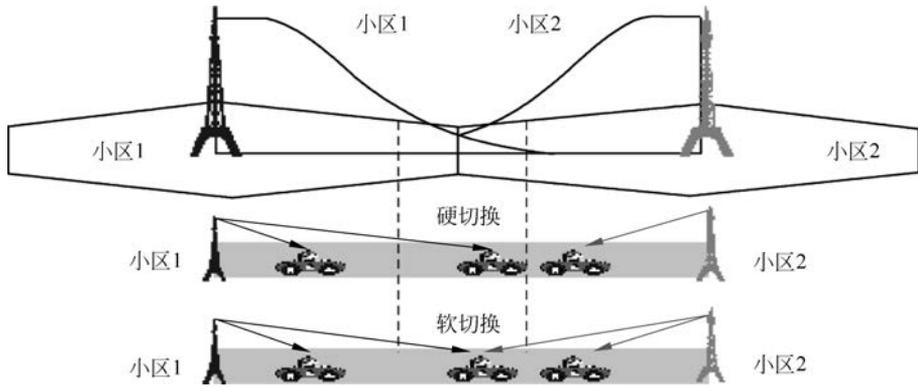


图 5-30 切换分类

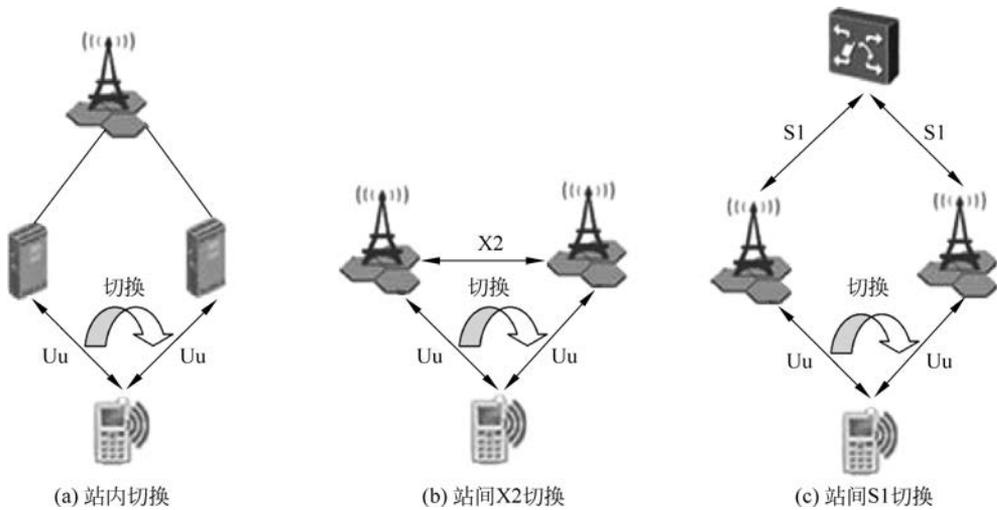


图 5-31 系统内切换分类

CONNECTED 状态迁移到 ECM-IDLE 状态。

(2) 切换目的。切换目的包括基于当前网络服务质量的切换、基于当前网络覆盖的切换和基于当前网络负荷的切换。基于当前网络服务质量的切换将指示 UE 切换到比当前服务小区信道质量更好的小区通信，为 UE 提供连续的无中断的通信服务，包括同频切换和异频切换。基于当前网络覆盖的切换指当 UE 失去当前 RAT 的覆盖时，进行异系统切换。基于当前网络负荷的切换指当覆盖当前区域小区负载不平衡时，会资源共享，进行同频/异频/异系统切换。

(3) 切换的三个阶段。切换的三个阶段包括测量、决策和执行。测量包括测量控制，测量的执行与结果的处理，测量报告，主要由 UE 完成，UE 根据 eNodeB 下发的测量配置消息进行相关测量，并将测量结果上报给 eNodeB。决策包括以测量为基础的资源申请与分配，其主要由网络端完成，eNodeB 根据 UE 上报的测量结果进行评估，决定是否触发切换。执行包括信令过程、支持失败回退和测量控制更新，eNodeB 根据决策结果，控制 UE 切换到目标小区，由 UE 完成切换。

(4) 切换的测量对象及测量值。同频测量包括 RSRP、RSRQ、Pathloss(路径损耗); 异频测量包括 RSRP、RSRQ、Pathloss; 异系统测量包括 PCCPCH RSCP(公共物理控制信道接收信号功率)、CPICH(公共导频信道)的 RSCP、CPICH 的 E_c/N_0 (E_c/N_0 是 WCDMA 无线网络优化最重要的一个指标)定义为导频信道 RSCP 与 RSSI(RSSI 是终端频点内的接收总功率)的比值、GSM Carrier RSSI、BSIC Identification(基站标识码)、BSIC Reconfirmation(BSIC 再确认)。

(5) 测量报告。UE 满足测量报告条件时,会通过事件报告给 E-UTRAN。测量报告包括测量 ID、服务小区的测量结果(RSRP 和 RSRQ 的测量值)以及邻小区的测量结果(可选)。

(6) 同系统内测量事件。同系统内的测量事件采用 AX 来标识。①事件 A1 指服务小区比绝对门限好,用于停止正在进行的异频/IRAT 测量,在 RRC 控制下激活测量间隙。②事件 A2 指服务小区比绝对门限差,指示当前频率的较差覆盖,可以开始异频/IRAT 测量,在 RRC 控制下激活测量间隙。③事件 A3 指邻小区比服务小区质量好,用于频内/频间切换。④事件 A4 指邻小区比绝对门限好,可用于负载平衡,与移动到高优先级的小区重选相似。⑤事件 A5 指服务小区比绝对门限 1 差,邻小区比绝对门限 2 好,可用于负载平衡,与移动到低优先级的小区重选相似。

(7) 异系统测量事件。异系统测量事件用 BX 来标识。①事件 B1 指邻小区比绝对门限好,用于测量高优先级的 RAT 小区。②事件 B2 指服务小区比绝对门限 1 差,邻小区比绝对门限 2 好,用于相同或低优先级的 RAT 小区的测量。

整个切换流程采用 UE 辅助网络控制的思路,基站下发测量控制,UE 进行测量上报,基站执行切换判决、资源准备、切换执行和原有资源释放。即当 UE 在已连接模式下时,eNodeB 可以根据 UE 上报的测量信息来判决是否需要执行切换,如果需要切换,则发送切换命令给 UE,UE 执行切换到目标小区。

2) 切换流程

LTE 切换的发起总是由源侧决定,源侧的 eNodeB 控制并评估 UE 和 eNodeB 的测量结果,并考虑 UE 的覆盖限制情况,判定是否发起切换。LTE 会在目标系统中预留切换后所需的资源,待切换命令执行后再为 UE 分配这些预留的资源。当 UE 同步到目标系统后,网络控制释放源系统中的资源。对于 eNodeB 站内小区切换,此类切换只是更新 Uu 口资源,源小区和目标小区的资源申请和资源释放都通过 eNodeB 内部消息实现,没有 eNodeB 间的数据转发,同时也没有 UE 的随机接入过程,也不需要与核心网有信令交互。

站内小区切换信令流程如图 5-32 所示,切换流程如图 5-33 所示。当 eNodeB 源小区收到 UE 的测量上报,并判决 UE 向目标小区切换时,eNodeB 自行调配资源,完成目标小区的资源准备,之后通过空口的重配消息通知 UE 向目标小区切换,在切换成功后,eNodeB 通知源小区释放原来小区的无线资源。



图 5-32 站内小区切换信令流程

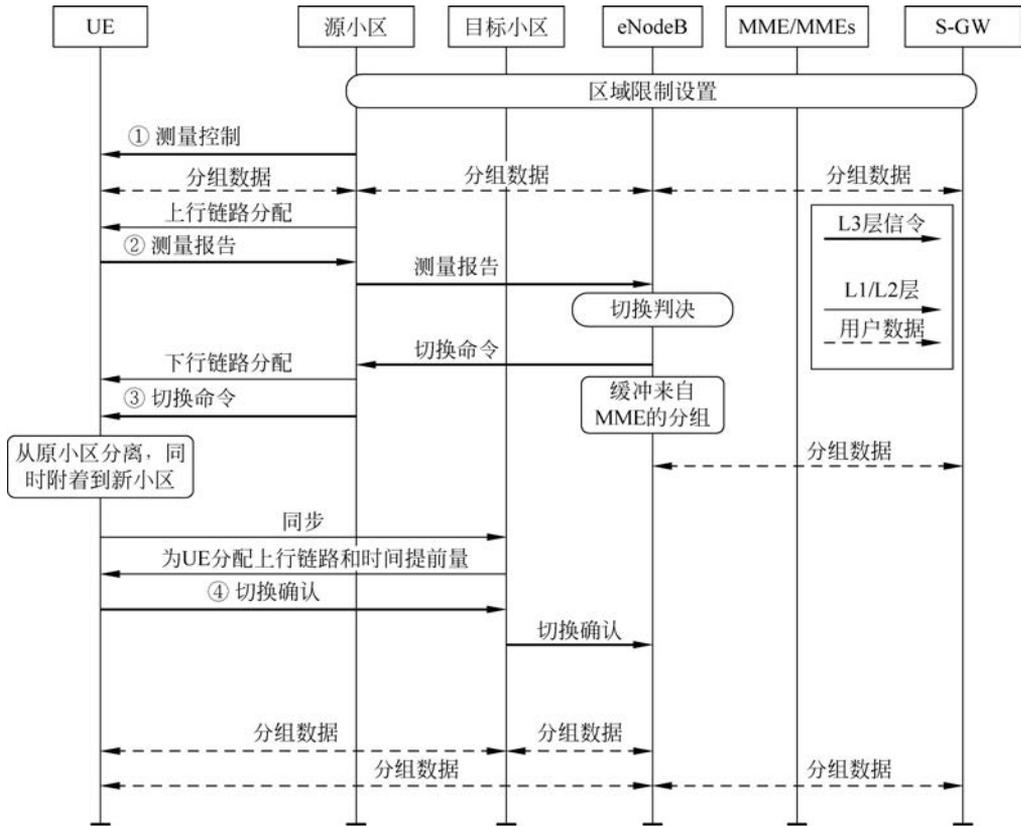


图 5-33 站内小区间切换流程

源 eNodeB 决定发起基于 S1 接口的切换,原因可能是源 eNodeB 和目标 eNodeB 之间没有 X2 连接,或者源 eNodeB 发起的基于 X2 接口的切换没有成功,或者源 eNodeB 通过一些动态信息作为基于 S1 接口发起切换的决定。S1 口切换流程和信令流程如图 5-34 和图 5-35 所示。

S1 接口的切换过程从信令流程上分为切换准备、切换资源分配、切换通知等过程。切换准备过程由源 eNodeB 发起,通过核心网节点,要求目标 eNodeB 为本次切换准备资源。切换资源分配过程由 MME 发起,在目标 eNodeB 中为本次切换准备和预留所需要的资源。在 UE 成功接入目标 eNodeB 后,由目标 eNodeB 发起切换通知过程,通知 MME 这个 UE 已经成功转移到目标小区。

详细流程解析如下:

(1) Measurement Reports(测量报告)。

方向: UE→Source eNodeB(源 eNodeB)。

解析: UE 在执行测量过程中,如果发现测量环境满足 Measurement Control(测量控制)中描述的事件,则通过 Measurement Reports(测量报告)消息上报给 eNodeB。

(2) Handover Required(切换需求)。

方向: Source eNodeB→MME。

解析: 源 eNodeB 参考 UE 上报的测量结果,根据自身切换算法,进行切换判决。判决

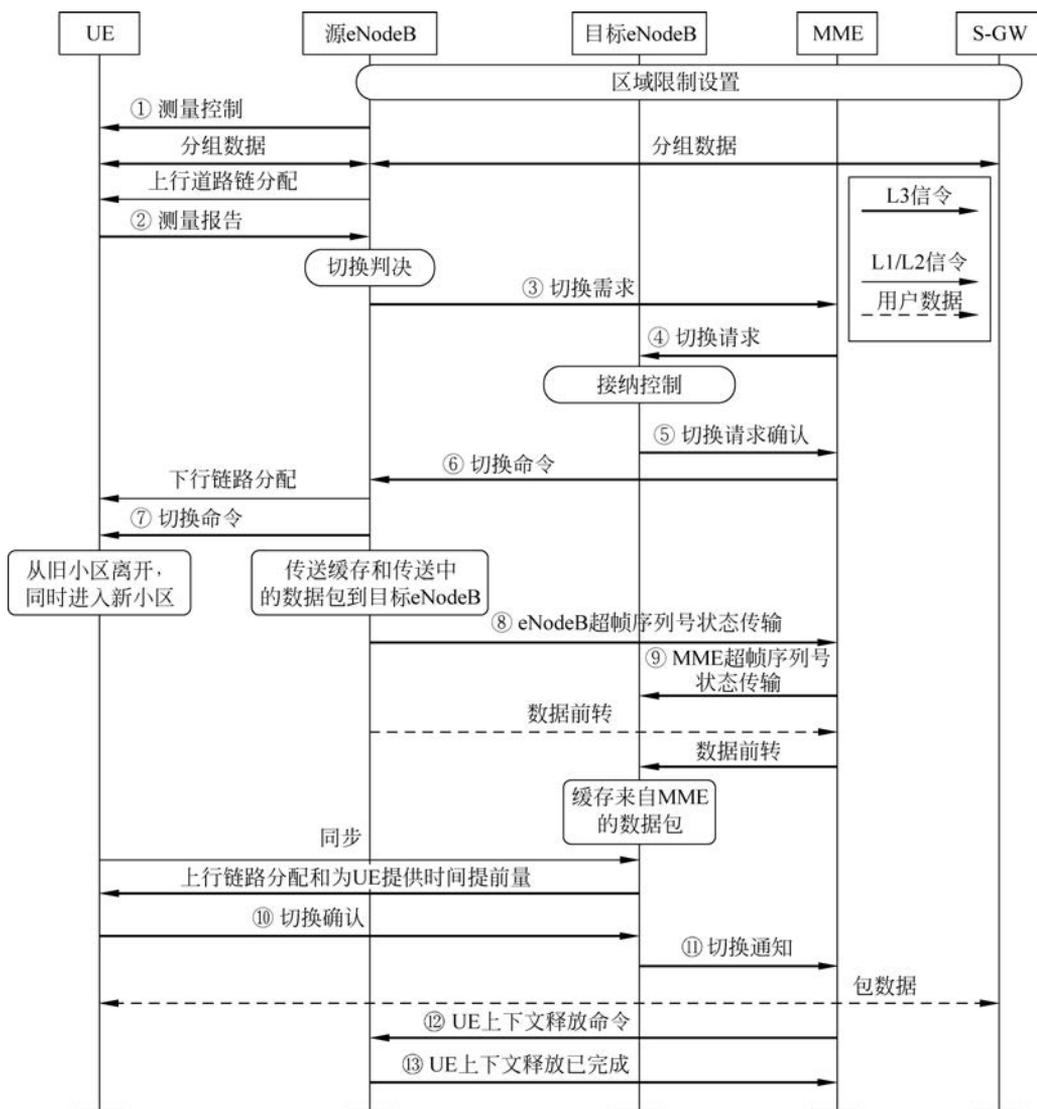


图 5-34 S1 口切换流程

切换后,向 MME 发送 Handover Required 消息。

(3) Handover Request(切换请求)。

方向: MME→Target eNodeB(目标 eNodeB)。

解析: MME 接收到源 eNodeB 的 Handover Required 消息后,将其作为 Handover Request 消息转发给目标 eNodeB。

(4) Handover Request ACK(切换请求响应)。

方向: Target eNodeB→MME。

解析: 目标 eNodeB 接收到 Handover Request 后,开始进行 L1/L2 的切换准备,同时向 MME 发送切换请求 ACK 消息。

(5) Handover Command(切换命令)。

方向: MME→Source eNodeB。

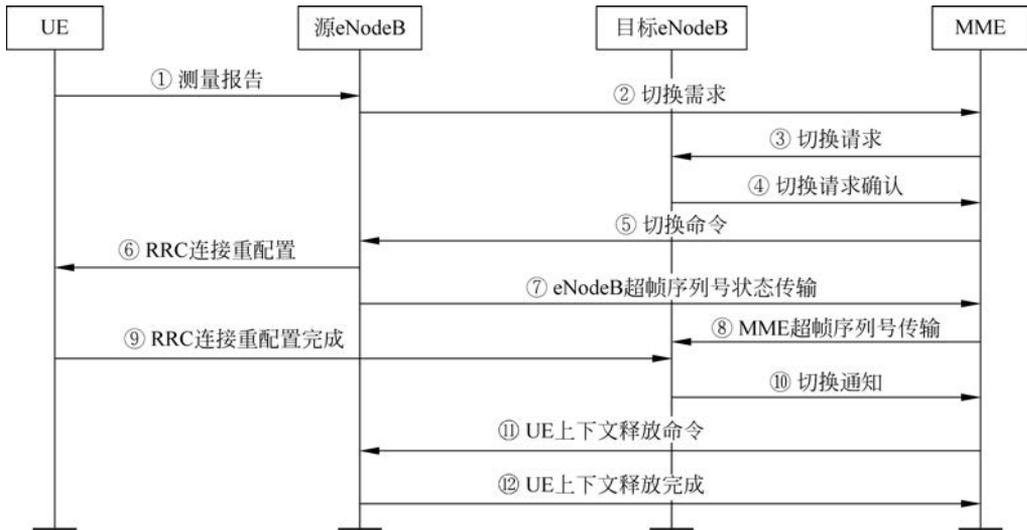


图 5-35 S1 口信令流程

解析：MME 收到目标 eNodeB 的切换请求 ACK 后，向源 eNodeB 下发切换命令。

(6) Handover Command。

方向：Source eNodeB→UE。

解析：源 eNodeB 接收到 MME 的切换命令后，通过 RRC Connection Reconfiguration(RRC 连接重配置)消息向 UE 下发切换命令，携带了移动性控制信息的 RRC 连接重配置消息。

(7) eNodeB Status Transfer(eNodeB 状态转换)。

方向：Source eNodeB→MME。

解析：源 eNodeB 发送序列号(Sequence Number, SN)状态传输消息到 MME，其目的是将无损切换的 EPS Bearer 的 PDCP 状态通知目标 eNodeB。

(8) MME Status Transfer(MME 状态转换)。

方向：MME→Target eNodeB(目标 eNodeB)。

解析：MME 发送序列号状态传输消息到目标 eNodeB。

(9) Handover Confirm(切换确认)。

方向：UE→Target eNodeB。

解析：UE 接到切换命令后，从源 eNodeB 中去附着，并执行与目标小区的同步。如果在切换命令中配置了随机接入专用 Preamble 码，则使用非竞争随机接入流程接入目标小区，如果没有配置专用 Preamble 码，则使用竞争随机接入流程接入目标小区。UE 通过 L1/L2 消息获取目标 eNodeB 提供的相关上行资源分配和时间提前 TA 信息后，开始发送 RRC Connection Reconfiguration Complete 消息，向目标 eNodeB 确认切换过程完成。

(10) Handover Notify(切换通知)。

方向：Target eNodeB→MME。

解析：UE 接入目标 eNodeB 后，目标 eNodeB 发送 Handover Notify 消息给 MME。

(11) UE Context Release Command(UE 上行文释放命令)。

方向：MME→Source eNodeB。

解析：MME 收到 Handover Notify 消息确认切换完成，马上发送 UE Context Release Command 消息给源 eNodeB，通知其切换成功并释放 UE 上下文。

(12) UE Context Release Completed(UE 上行文释放完成)。

方向：Source eNodeB→MME。

解析：源 eNodeB 收到 MME 的 UE Context Release Command 消息开始释放 UE 上下文，并回复该消息通知 MME 切换 UE 的上下文已释放完成。

以上流程为 MME 内 S1 口切换流程，如果是 MME 间切换，则存在源 MME 和目标 MME 的区别，两者之间互传源 eNodeB 和目标 eNodeB 的上下行信令，而且还涉及 MME 或 S-GW 的选择。

5. TAU 信令流程与信令解析

当 UE 进入一个小区，该小区所属 TAI 不在 UE 保存的 TAI list(列表)内时，UE 发起正常追踪区更新(TAU)流程，分为 IDLE(空闲)和 CONNECTED(连接时)。如果 TAU Accept 分配了一个新的 GUTI，则 UE 需要回复 TAU Complete(完成)，否则不用回复。



第 31 集

1) CONNECTED 下发起的 TAU

CONNECTED 下发起的 TAU，如图 5-36 所示。

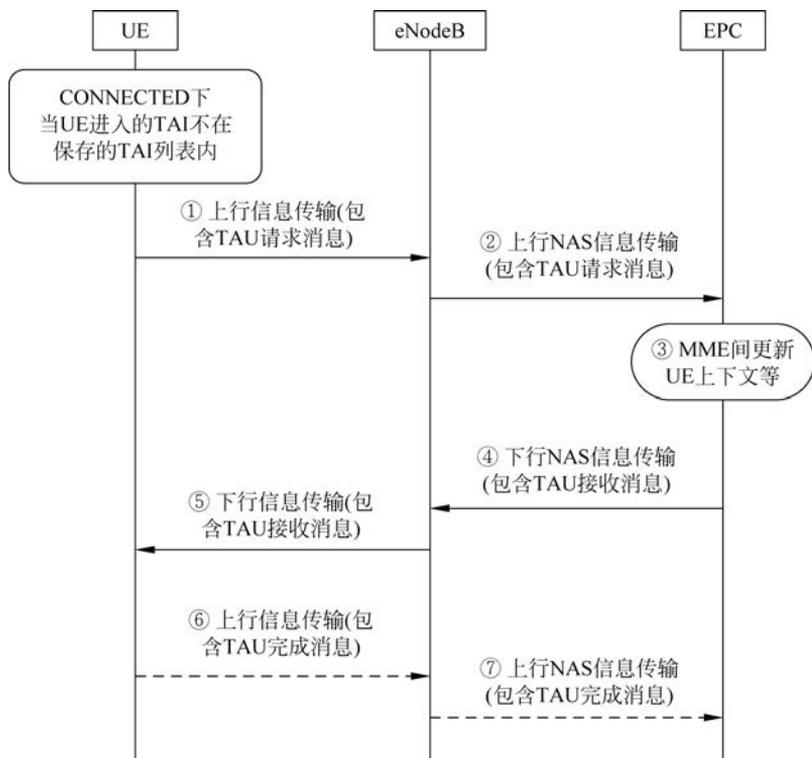


图 5-36 CONNECTED 下发起的 TAU

2) IDLE 下发起的 TAU

IDLE 下，如果有上行数据或者上行信令(与 TAU 无关的)发送，UE 可以在 TAU request 消息中设置 Active 标识，来请求建立用户面资源，并且 TAU 完成后保持 NAS 信令连接。如果没有设置 Active(激活)标识，则 TAU 完成后释放 NAS 信令连接。IDLE 下发

起的 TAU 也可以带 EPS bearer context status IE (EPS 承载上下文状态的 IE), 如果 UE 携带该 IE, MME 回复消息也携带该 IE, 双方 EPS 承载通过这个 IE 保持同步。IDLE 下发起的不设置 Active 标识的正常 TAU 流程如图 5-37 所示。

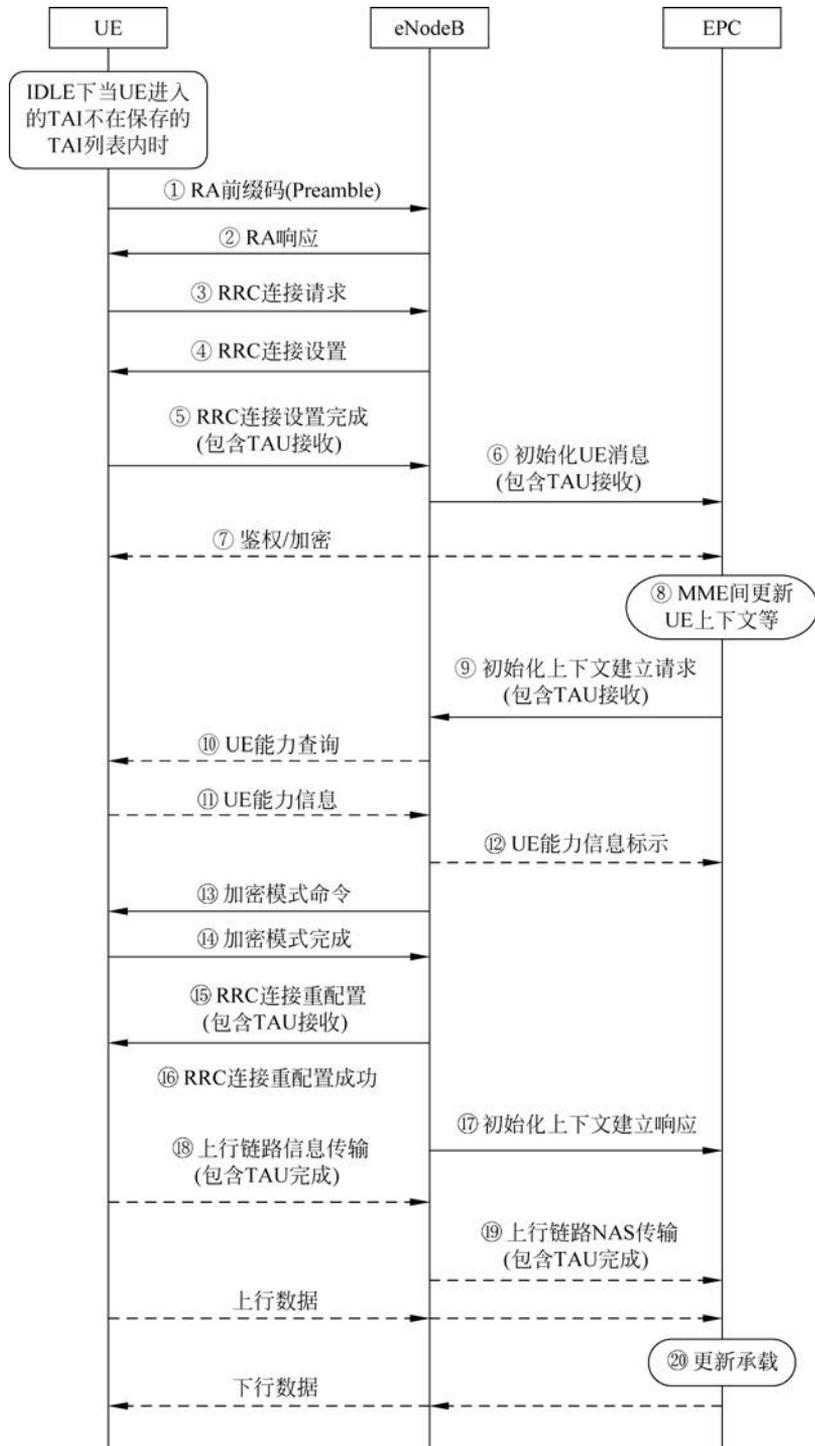


图 5-37 IDLE 下发起的 TAU 流程

解析如下：

- (1) 如果 TAU 接收未分配一个新的 GUTI,则无过程⑥、⑦；
- (2) 切换下发起的 TAU,完成后不会释放 NAS 信令连接；
- (3) CONNECTED 下发起的 TAU,不能带 Active 标识。

6. UE 接入信令流程

UE 刚开机时,先进行物理下行同步,搜索测量进行小区选择,选择一个合适或者可接纳的小区后,驻留并进行附着。协议定义的 UE 接入的信令流程如图 5-38 所示。



第 32 集

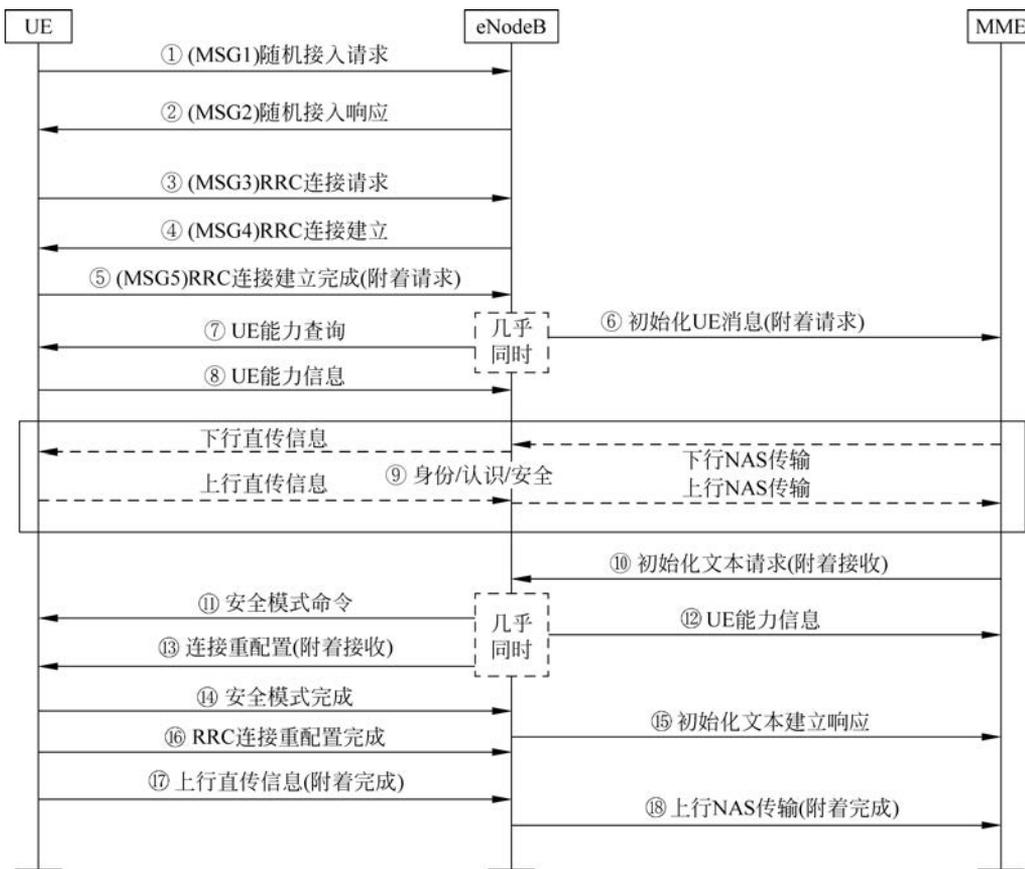


图 5-38 UE 接入信令流程

UE 接入信令流程进行解析如下：

- (1) (MSG1)Random Access Request(随机接入请求)。

方向：UE→eNodeB。

解析：MSG1 为 UE 在小区 RACH 信道上发送的随机接入前缀。

- (2) (MSG2)Random Access Response(随机接入响应)。

方向：eNodeB→UE。

解析：eNodeB 接收到 UE 的 MSG1 后,在 MAC 层产生随机接入响应,在 DL SCH 上发送给 UE。

- (3) (MSG3)RRC Connection Request(RRC 连接请求)。

方向: UE→eNodeB。

解析: UE 接收到 eNodeB 的 MSG2 后,在 RRC 层产生 RRC Connection Request 消息,映射到在上行共享信道 ULSCH 上的 CCCH 逻辑信道发送给 eNodeB。

(4) (MSG4)RRC Connection Setup(RRC 连接建立)。

方向: eNodeB→UE。

解析: eNodeB 接收到 UE 的 MSG3 后,在 RRC 层产生 RRC Connection Setup 消息,映射到在 DL SCH 上的 CCCH 或 DCCH 逻辑信道发送给 UE。

(5) (MSG5)RRC Connection Setup Complete(RRC 连接建立完成)。

方向: UE→eNodeB。

解析: UE 接收到 eNodeB 的 MSG4 后,根据 eNodeB 指示的资源建立 RRC 连接,并回复 RRC Connection Setup Complete 消息给 eNodeB,包含 Attach Request(附着请求)、PDN Connective Request(PDN 连接请求)等消息。

(6) INITIAL UE MESSAGE(初始化 UE 消息)。

方向: eNodeB→MME。

解析: eNodeB 接收到 UE 的 MSG5 消息,表示 RRC 链路建立完成,此后便开始建立 S1 通道和 NAS 通道;该步骤为 eNodeB 向核心网发出初始 UE 消息,将 UE 在 RRC Connection Setup Complete 上报的 NAS 消息透传给核心网,即 Attach Request。

(7) UE Capability Enquiry(UE 能力查询)。

方向: eNodeB→UE。

解析: eNodeB 接收到 UE 的 MSG5 消息,表示 RRC 链路建立完成,此后便开始建立 S1 通道和 NAS 通道;该步骤为 eNodeB 向 UE 发起 UE 能力查询。

(8) UE Capability InfoRMation(UE 能力消息)。

方向: UE→eNodeB。

解析: UE 接收到 eNodeB 的 UE Capability Enquiry 后,在此信令中上报本 UE 的实际能力,包括 UE 能力等级、PDCP 层的 ROHC(健壮性头压缩)支持情况、物理层能力、支持频段能力及 Feature Group 信息。

(9) Identity/Authentication/Security(标识/鉴权/安全)。

方向: UE↔eNodeB↔MME。

解析: Identity/Authentication/Security 为 UE 与 MME 之间的 NAS 层鉴权加密信息交互,eNodeB 负责中间的透传,MME 发给 UE 的 NAS 层消息经过 eNodeB 中转,UE 回复给 MME 的 NAS 层消息也经过 eNodeB 中转,因此 MME 与 UE 信息交互的一个来回包含有四条信令,依次为 DL NAS TRANSPORT(下行 NAS 传输)(MME → eNodeB)、DL InfoRMation Transfer(下行信息传输)(eNodeB→UE)、UL InfoRMation Transfer(上行信息传输)(UE → eNodeB)、UL NAS TRANSPORT(上行 NAS 传输)(eNodeB→MME),一般情况下,UE 与 MME 之间的 NAS 层鉴权加密信息交互需要两个来回,第一个为鉴权,第二个为 NAS 层加密。

(10) INITIAL CONTEXT SETUP REQUEST(初始化上下文建立请求)。

方向: MME→eNodeB。

解析: MME 完成 UE 鉴权加密之后,确认 UE 合法,准备与 UE 建立上下文,向

eNodeB发出初始上下文建立请求,包含了 Attach Accept(附着接收)消息,请求 eNodeB 建立承载资源,同时带安全上下文、用户无线能力、切换限制列表等参数。

(11) Security Mode Command(安全模式命令)。

方向: eNodeB→UE。

解析: eNodeB 接收到 MME 的 INITIAL CONTEXT SETUP REQUEST 后,准备建立 UE 上下文,因此向 UE 发起加密模式命令。

(12) UE CAPABILITY INFO INDICATION(UE 能力信息指示)。

方向: eNodeB→MME。

解析: eNodeB 接收到 MME 的 INITIAL CONTEXT SETUP REQUEST 后,向 MME 反馈 UE 的无线能力消息。

(13) RRC Connection Reconfiguration(RRC 连接重配置)。

方向: eNodeB→UE。

解析: eNodeB发出 Security Mode Command(安全模式命令)消息后,不用等待 UE 的反馈,直接向 UE 发 RRC 重配请求,携带 Attach Accept 消息告诉 UE 核心网已经同意 Attach。

(14) Security Mode Complete(安全模式完成)。

方向: UE→eNodeB。

解析: UE 收到 eNodeB 发出 Security Mode Command 消息后,回复 Security Mode Complete 消息表示空口的加密完成。

(15) INITIAL CONTEXT SETUP RESPONSE(初始化上下文建立响应)。

方向: eNodeB→MME。

解析: eNodeB 接收到 UE 的加密完成信令后,说明建立上下文的条件已具备,因此向 MME 反馈初始上下文建立响应。

(16) RRC Connection Reconfiguration Complete。

方向: UE→eNodeB。

解析: UE 接收到 eNodeB 的 RRC 重配后,开始重配 RRC 连接,完成后向 eNodeB 反馈 RRC 重配置完成。

(17) ULInfoRMationTransfer。

方向: UE→eNodeB。

解析: UE 完成 RRC 重配后,激活相关准备,并在 NAS 层向核心网反馈 Attach Complete 消息。

(18) UPLINK NAS TRANSPORT(上行 NAS 传输)。

方向: eNodeB→←MME。

解析: eNodeB 将 NAS 层中 UE 向核心网反馈的 Attach Complete 消息转发给 MME。

5.5 4G 系统的关键技术

LTE 的主要设计目标是高峰值速率、高频谱效率和高移动性,采用低时延、低成本和扁平化的网络架构。为了实现这样的目标,LTE 运用了多种关键技术。



5.5.1 正交多址接入技术

LTE 系统下行采用 OFDMA 技术,上行采用 SC-FDMA 技术。

1. 下行 OFDMA

1) OFDM 原理

OFDM 的主要思想是将信道分成若干正交子信道,将高速数据信号转换成并行的低速数据流,调制到每个子信道上进行传输,如图 5-39 所示。

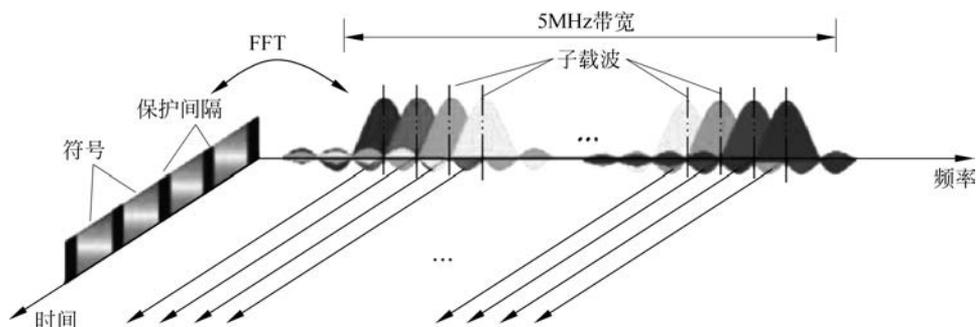


图 5-39 OFDM 基本原理

OFDM 可以利用快速傅里叶反变换 (IFFT) 和快速傅里叶变换 (FFT) 来实现调制和解调,如图 5-40 所示。

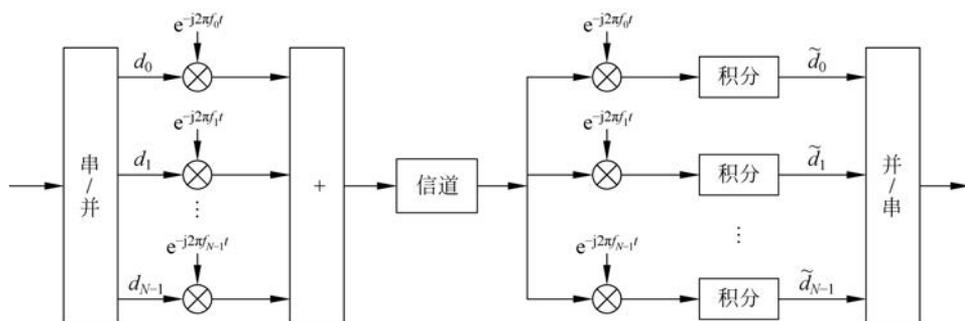


图 5-40 OFDM 调制解调过程

OFDM 的调制解调流程如下:

- (1) 发射机在发射数据时,将高速串行数据转为低速并行数据,利用正交的多个子载波进行数据传输;
- (2) 各个子载波使用独立的调制器和解调器;
- (3) 各个子载波之间要求完全正交,各个子载波收发完全同步;
- (4) 发射机和接收机要精确同频、同步,准确进行位采样;
- (5) 接收机在解调器的后端进行同步采样,获得数据,然后转为高速串行。

在向 B3G/4G 演进的过程中,OFDM 是关键的技术之一,可以结合分集、时空编码、信道间干扰抑制及智能天线技术,最大限度地提高系统性能。OFDM 具体原理在第 3 章抗衰落技术中已经进行描述,这里不再赘述。

2) LTE 中 OFDM 参数

基本 OFDM 参数包括：子载波间隔 $\Delta f = 1/T_u$ (T_u 为时域有用符号的时间)；子载波数目 N_c (频域可用子载波数目)； N_c 与 Δf 一起可以确定 OFDM 信号的传输带宽 B_w ；循环前缀长度 T_{CP} ； T_{CP} 与 T_u 一起可以确定整个 OFDM 符号的时间长度 $T = T_{CP} + T_u$ 。

对于 LTE 的下行传输，其基本的 OFDM 参数如下：

(1) 子载波间隔。LTE 系统下行支持两种子载波间隔，分别为 $\Delta f = 15\text{kHz}$ ，用于单播和 MBSFN 传输； $\Delta f = 7.5\text{kHz}$ 仅可以应用于独立载波的 MBSFN 传输。

(2) 子载波数目 N_c 。不同的系统带宽，其子载波数目不同，LTE 系统规定的子载波数目如表 5-16 所示。

表 5-16 LTE 系统规定的子载波数目

信道带宽/MHz	1.4	3	5	10	15	20
子载波数目 N_c	72	180	300	600	900	1200

(3) 循环前缀长度 T_{CP} 。对于 $\Delta f = 15\text{kHz}$ ，LTE 支持两种长度的循环前缀：常规 CP 和扩展 CP 分别适用于不同的传输环境。对于 $\Delta f = 7.5\text{kHz}$ ，LTE 仅支持扩展 CP。同时，为了保证一个时隙的长度为 0.5ms ，一个时隙中不同 OFDM 符号的循环前缀长度不同，如表 5-17 所示。

表 5-17 LTE OFDM 循环前缀长度

配置		循环前缀长度 $N_{CP,l}$
常规 CP	$\Delta f = 15\text{kHz}$	160, $l = 0$ 144, $l = 1, 2, \dots, 6$
	$\Delta f = 15\text{kHz}$	512, $l = 0, 1, \dots, 5$
扩展 CP	$\Delta f = 7.5\text{kHz}$	1024, $l = 0, 1, 2$

其中， $N_{CP,l}$ 表示一个时隙中第 l 个 OFDM 符号对应的循环前缀包含的样点值。

2. SC-FDMA

LTE 上行传输采用 SC-FDMA (单载波频分多址)。SC-FDMA 信号可以在时域生成，也可以在频域生成。为了和下行链路兼容，LTE 选择了在频域生成 SC-FDMA 技术，采用 DFT-S-OFDM 技术。该技术在 OFDM 的 IFFT 调制之前对信号进行 DFT 扩展，这样系统发射的是时域信号，从而可以避免 OFDM 系统发送频域信号带来的高 PAPR 问题。

1) DFT-S-OFDM 原理

DFT-S-OFDM 传输的基本原理如图 5-41 所示。 M 个调制符号首先进行 M 点的 DFT 变换，然后进行 N 点的 IDFT 变换，其中 $N > M$ ，其他点设置为 0。特别需要说明的是，IDFT 的大小应该选择为 $N = 2^n$ ，从而可以使用基数为 2 的 IFFT 来实现。与 OFDM 类似，循环前缀将被插入每个传输块中，使用循环前缀可以更方便地在接收端应用低复杂度的频域均衡来抵抗衰落。

如果 DFT 的采样大小 M 与 IDFT 的采样大小 N 相同，那么两个相互级联的 DFT 和 IDFT 可以互相抵消。如果 $N > M$ ，IDFT 的输出信号将是一个具有单载波特性的信号，即信号具有低的峰均比，信号带宽取决于 M 。更准确地说，假设 IDFT 输出的采样率为 f_s ，那

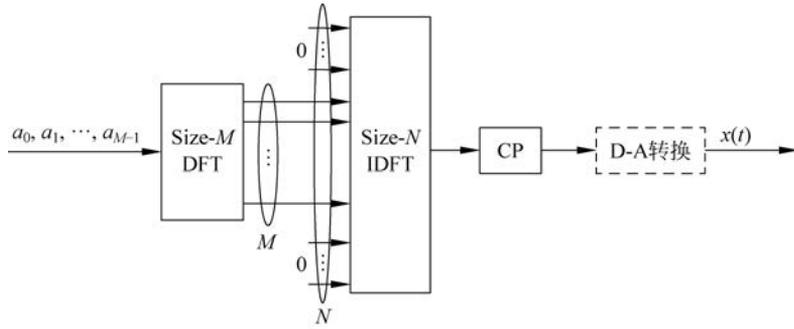


图 5-41 DFT-S-OFDM 传输的基本原理

么传输信号名义上的带宽将为 $B_w = M/N \cdot f_s$ 。这样,通过改变块大小 M ,就可以改变传输信号的瞬时带宽。

为了保证瞬时带宽的高灵活性,不能确保 DFT 大小, M 可以表示为 2^m ,且 m 是整数。但是,只要保证 M 可以表示为相对小的素数乘积,DFT 依旧可以使用相对低复杂度的基数非 2 的 FFT 来实现。比如,DFT 的采样大小为 $M = 144$,可以通过基数为 2 和基数为 3 的 FFT 处理来实现($144 = 3^2 \times 2^4$)。

DFT 的输出到 IDFT 的输入进行映射时,可以采用两种方式,分别为 Localized DFT-S-OFDM(集中式 DFT-S-OFDM)和 Distributed DFT-S-OFDM(分布式 DFT-S-OFDM),其中 Localized DFT-S-OFDM 是指将 DFT 的输出映射到 IDFT 的多个连续的输入上;而 Distributed DFT-S-OFDM 是指将 DFT 的输出映射到 IDFT 的多个等间隔的输入上,其他输入补零,如图 5-42 所示。

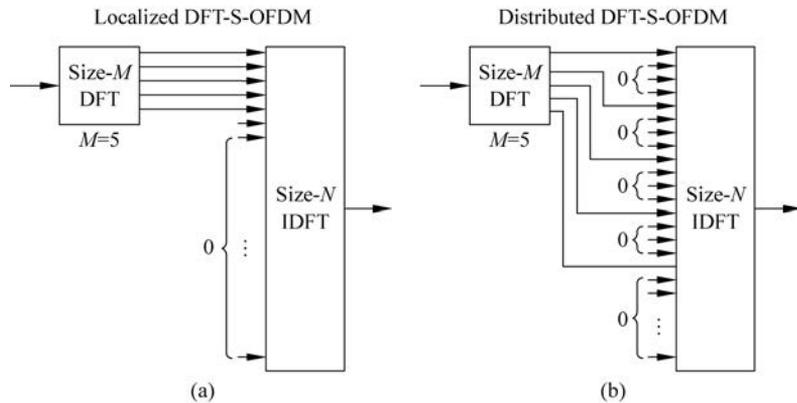


图 5-42 Localized DFTS-OFDM 与 Distributed DFTS-OFDM

Localized DFTS-OFDM 和 Distributed DFTS-OFDM 信号的频谱如图 5-43 所示。虽然 Distributed DFTS-OFDM 信号的频谱分散在整个系统带宽内,但是其同样具有单载波的特性。

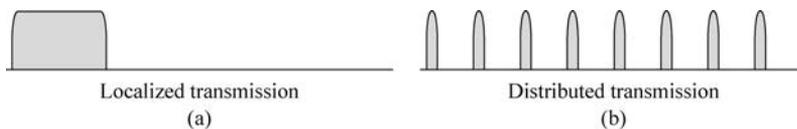


图 5-43 Localized DFTS-OFDM 与 Distributed DFTS-OFDM 信号的频谱

特别需要注意的是, LTE 中并不支持采用 Distributed DFT-S-OFDM 方式进行信号传输。

2) LTE DFT-S-OFDM 参数

与 OFDM 类似, DFTS-OFDM 的基本参数包括: 子载波间隔 $\Delta f = 1/T_u$; 子载波数目 N_c ; N_c 与 Δf 一起可以确定 DFT-S-OFDM 信号的传输带宽 B_w ; 循环前缀长度 T_{CP} ; T_{CP} 与 T_u 一起可以确定整个 OFDM 符号的时间长度 $T = T_{CP} + T_u$ 。

LTE 系统上行仅支持一种子载波间隔, 即 $\Delta f = 15\text{kHz}$ 。不同的系统带宽, 其子载波数目 N_c 不同, 目前 LTE 系统规定的子载波数目如表 5-18 所示。

表 5-18 LTE 系统规定的子载波数目

信道带宽/MHz	1.4	3	5	10	15	20
子载波数目 N_c	72	180	300	600	900	1200

LTE 支持两种长度的循环前缀, 即常规 CP 和扩展 CP。为了保证一个时隙的长度为 0.5ms, 一个时隙中不同 DFT-S-OFDM 符号的循环前缀长度不同, 如表 5-19 所示。

表 5-19 LTE DFT-S-OFDM 循环前缀长度

配置	循环前缀长度 $N_{CP,l}$
常规 CP	160, $l=0$
	144, $l=1, 2, \dots, 6$
扩展 CP	512, $l=0, 1, \dots, 5$

其中, $N_{CP,l}$ 表示一个时隙中第 l 个 DFT-S-OFDM 符号对应的循环前缀包含的样点值。

3. OFDMA 与 SC-FDMA 对比

SC-FDMA 的用户原始信息符号在时域传输, 可以利用时域选择性衰落, OFDMA 的用户原始信息在频域传输, 可以利用频率选择性衰落; SC-FDMA 比 OFDMA 多了一个 DFT 预编码过程。实际上, 信道大都是慢衰落信道(时域选择性不强), 但多径延时严重(频率选择性强), 所以利用频率选择性的 OFDMA 的性能一般比利用时域选择性的 SC-FDMA 要好。

SC-FDMA 在任何时刻传输的都是单个符号, 但带宽却是所分配的整个带宽, 而 OFDMA 在任何时刻都是多个独立符号的叠加。从 IDFT 前端来看, SC-FDMA 的频域子载波信号是相关的数据, OFDMA 则将相互独立的信息符号直接输入子载波上, 存在多个独立符号叠加的问题。所以, 应用统计分析或者从直观上看, SC-FDMA 的峰均比会比 OFDMA 低。

现举例说明两者差别, 如图 5-44 所示。

假设图 5-44 满足条件: ①只用 4 个子载波, 实际上的 LTE 最小分配 12 个子载波; ②只演示 2 个符号周期; ③只用 QPSK 调制。

从图 5-44 中可以看出, OFDM 中一个符号占用一个载波, 但是 SC-FDMA 中一个符号占用了整个带宽, 更像是单载波。需要注意的是, OFDM 和 SC-FDMA 的每个符号长度均为 $66.7\mu\text{s}$, 但是 SC-FDMA 中的每个符号包含了 M 个子符号。OFDM 的时域数据并行传

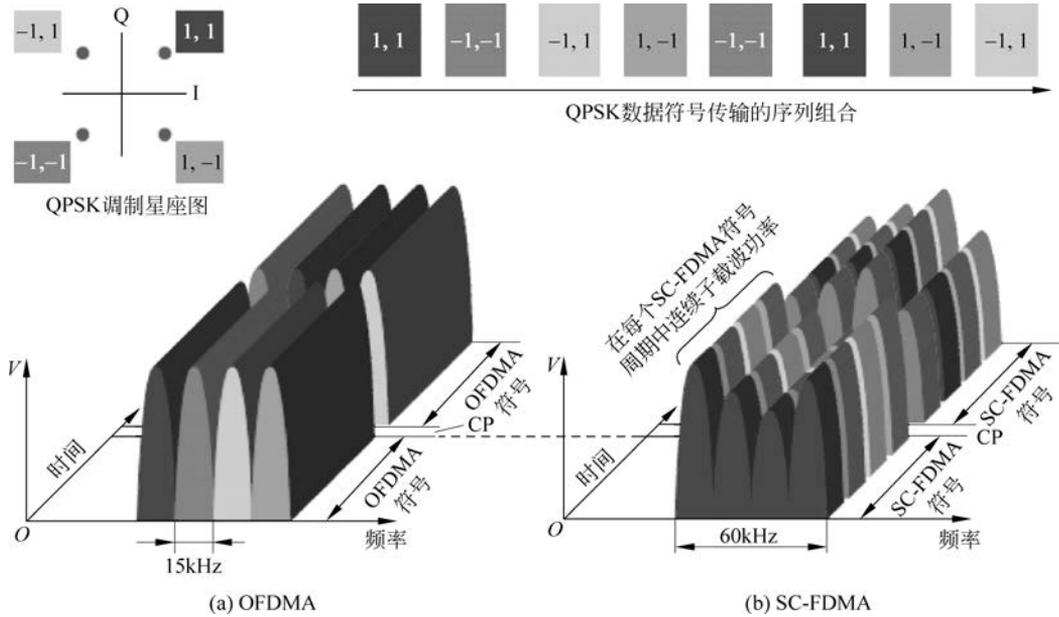


图 5-44 OFDMA 与 SC-FDMA 对比示意图

输导致了很高的峰均比产生,而 SC-FDMA 则是 M 倍速率的串行传输,虽然占用了与 OFDM 一样的带宽,但是其峰均比却和原始数据的峰均比大小一样,在终端侧比较容易实现。

5.5.2 多天线技术

1. 传输分集

传输分集包括发射分集和接收分集,其优点是易获得相对稳定的信号、提高信噪比及获得分集处理增益。

1) 循环时延分集

传统延时分集是指在不同天线上传输同一个信号的不同时延副本,从而人为增加信号所经历的信道的时延扩展值。CDD 是通过不同天线传输同一个信号的不同时延副本,该信号本身等效于经过一个时延扩展增大的无线信道,即增加了信道的频率选择性。此时传输天线分集被转换为频率分集。图 5-45 所示是两天线情况下的时延分集示意图。

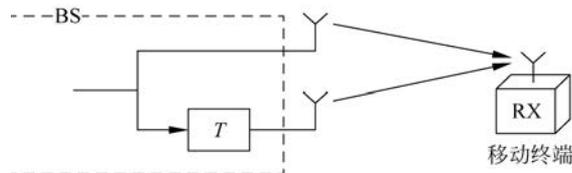


图 5-45 两天线情况下的时延分集示意图

原则上,在应用时延分集的情况下,终端只看到一个发送信号,所有时延分集可以很方便地应用到任何一个无线通信系统中,并且不需要标准支持。此时,需要参考信号也进行 CDD 才可以估计出等效的空间信道。这就对参考信号提出了较强的要求,使其可以估计出

较大时延扩展的信道。所以,一般情况下,使用时延分集时只能延时较小的时延。

对于 OFDM 传输,可以很方便地应用循环时延分集,即可以在增加 CP 之前,将在不同天线上发送的信号时域样点值进行循环移位,获得频率分集增益,如图 5-46 所示。其中,在 OFDM 传输情况下,时域信号的循环移位对应频域的相位偏移。

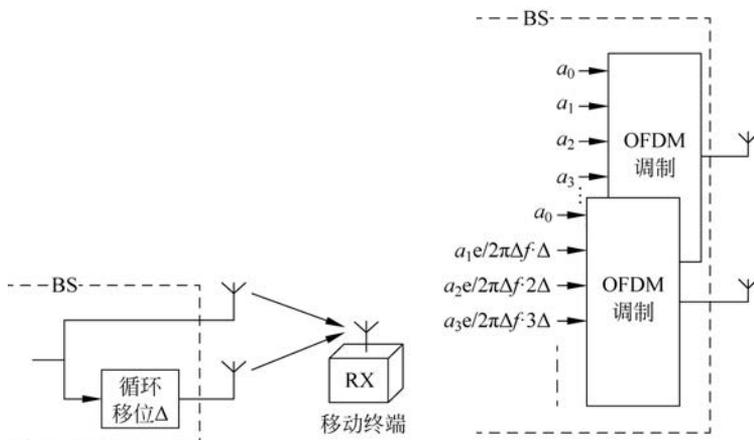


图 5-46 循环分集示意图

2) 空时/频编码

对于两根传输天线的 STBC 来说,可以在第一根天线上传输原始信号,而在第二根天线上以两个符号为一组变换信号的传输顺序并进行共轭和/或取反的操作,如图 5-47 所示。

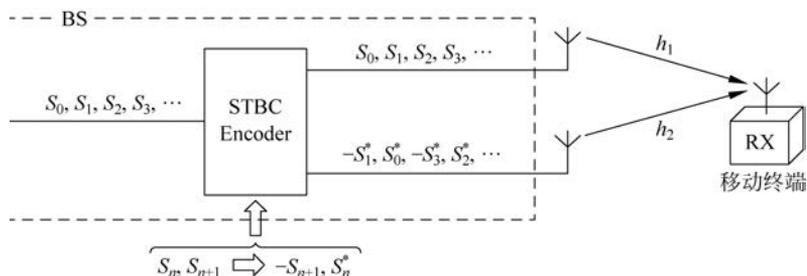


图 5-47 STBC 示意图

如果上述符号对应的是不同子载波上的符号,而不是时域上的符号,即 SFBC,如图 5-48 所示,其中图 5-48(a)为 SFBC,图 5-48(b)为 CDD 的频域描述。可以发现,SFBC 与两天线 CDD 的差别在于其第二根天线上的符号映射方法。SFBC 相对于 CDD 的好处是,SFBC 可以提供调制符号级别的分集,而 CDD 必须依靠信道编码及频域交织来提供分集。

LTE 在两天线发送时,采用的发射分集技术为 SFBC。特别强调的是,与上述描述不同的是,LTE 明确了 SFBC 的传输方式,如图 5-49 所示。

LTE 在四天线发射时,采用 SFBC 与 FSTD 结合的方式。四天线 LTE 支持 SFBC 与频率切换传输分集技术(FSTD)结合的传输分集方式,如图 5-50 所示。FSTD 可使用在 LTE 中的 PBCH 和 PDCCH 上,不同的天线支路使用不同的子载波集合进行发送,减少了子载波之间的相关性,使等效信道产生了频率选择性,因而可以利用纠错编码方式降低误码

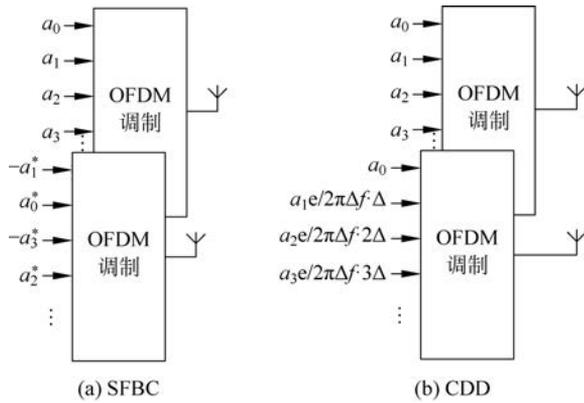


图 5-48 SFBC 与 CDD 的区别

率,提高系统性能。

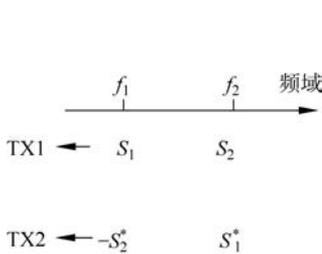


图 5-49 LTE 两天线发射的 SFBC

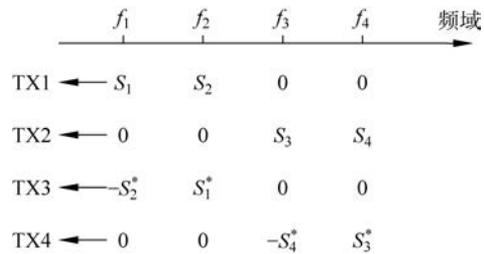


图 5-50 SFBC+FSTD 发射

3) 天线切换分集

天线切换分集技术是指当发射端存在多根传输天线时,从时间上或者频率上按照一定的顺序依次选择其中一根天线进行传输的技术。如果在不同的时间上进行天线的切换,即时间切换传输分集(TSTD);如果在不同的子载波上进行天线的切换,即 FSTD,如图 5-51 所示。

2. 波束赋形

波束赋形的主要原理是利用空间的强相关性及波的干涉原理产生强方向性的辐射方向图,使辐射方向图的主瓣自适应地指向用户来波方向,从而提高信噪比,提高系统容量。

根据应用波束赋形的天线之间的相关性,波束赋形可以分为传统的波束赋形和基于预编码的波束赋形。

当天线之间相关性比较高时,一般天线阵列为小间距的天线阵列,可以应用传统的波束赋形,如图 5-52(a)所示。同一个信号可以应用不同的相位偏移,映射到不同的天线上进行发送。由于天线之间的高相关性,可以在发射机端形成一个具有特定指向的较大的波束,如图 5-52(b)所示。通过调整不同天线上使用的相位偏移值,可以调整波束的方向,从而使得该方向的信号强度得到提高,并降低对其他方向的干扰,该相位偏移值可以通过估计信号的来波方向获得。

传统的波束赋形通常使用专用参考信号来实现,这是因为为了保证传统波束赋形的性能,一般需要较大的天线数目,如果在每根天线上都传输彼此正交的公共参考信号,其参考

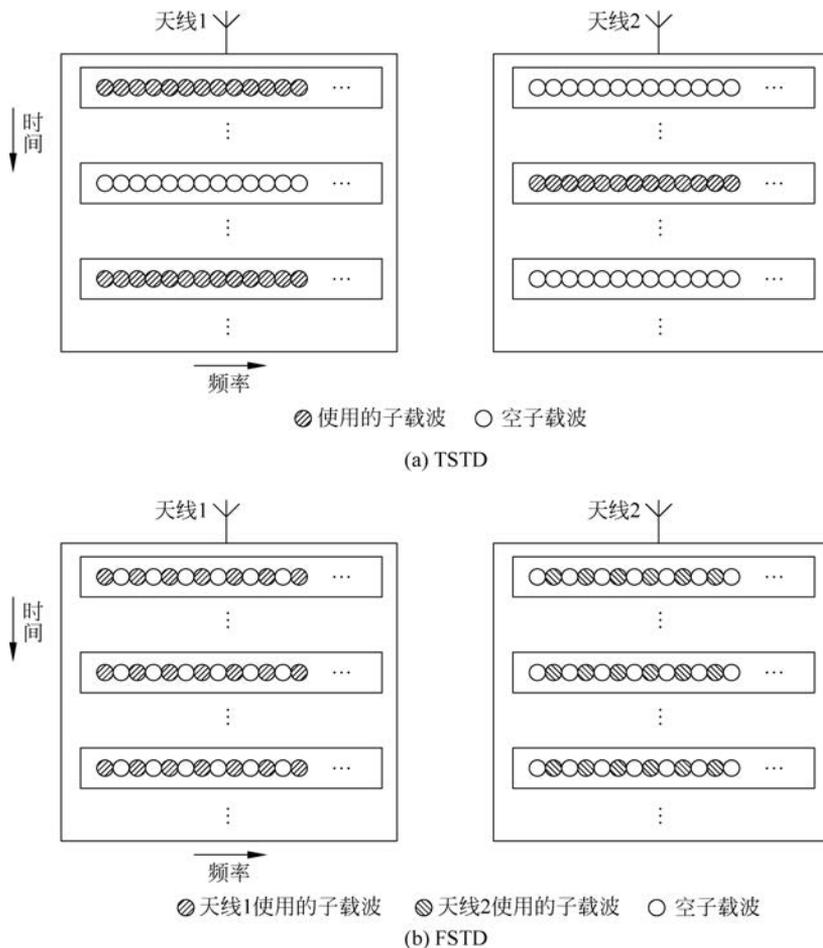


图 5-51 天线切换分集示意图

信号的开销过大。

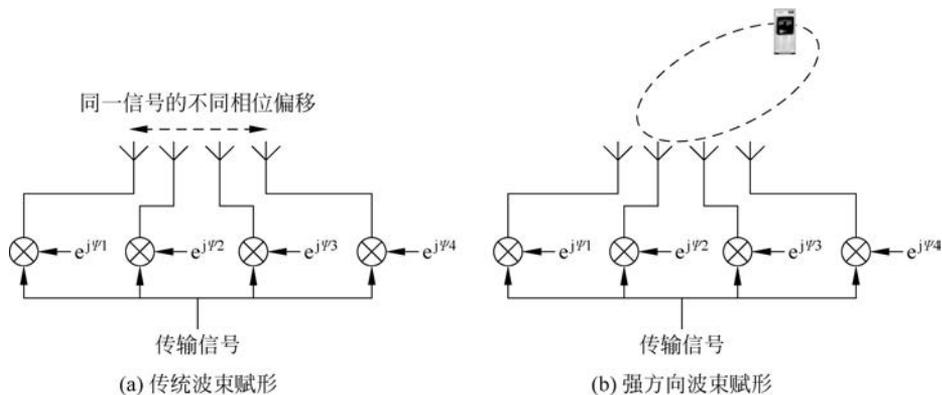


图 5-52 波束赋形示意图

如果天线之间的相关性较小,一般天线阵列为大间距的天线阵列,或者是信号在不同极化方向上传输的极化天线阵列。与传统的波束赋形类似,天线之间的相关性较小时,基于预

编码的波束赋形也是在不同的天线上应用不同的传输权值,不同之处在于,这里的权值不仅包括相位上的调整,也包括幅度上的调整,如图 5-53 所示。

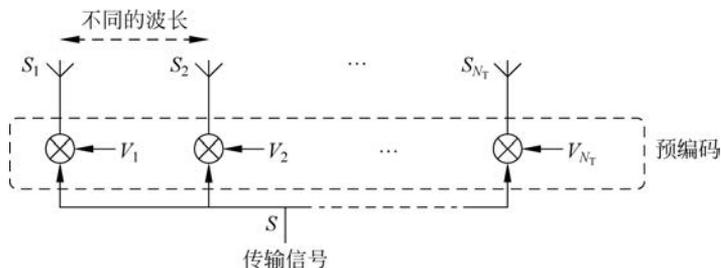


图 5-53 基于预编码的波束赋形示意图

相对于传统的波束赋形,基于预编码的波束赋形需要更详细的信道信息来进行其赋形权值的计算,比如瞬时的信道衰落。其赋形权值的更新需要在相对短的时间内完成,用来捕获衰落的变化。因此,基于预编码的波束赋形不仅可以提供赋形增益,还可以提供分集增益。基于预编码的波束赋形可以采用码本的方式实现,也可以采用非码本的方式实现。对于 TDD 系统来说,由于上下行信道之间的对称性,可以直接利用上行信道估计,进行下行方向赋形权值的计算,所以不需要使用码本方式。另外,使用码本方式进行基于预编码的波束赋形,需要在不同发射天线上传输彼此正交的参考符号。当天线数目较大时,其参考符号的开销可能过大。而使用非码本方式进行基于预编码的波束赋形,则需要使用专用参考信号,这与传统的波束赋形类似。

LTE R8 中仅支持基于专用导频的单流波束赋形技术。在传输过程中,UE 需要通过专用导频的测量来估计波束赋形后的等效信道,并进行相干检测。为了能够估计波束赋形后传输所经历的信道,基站必须发送一个与数据同时传输的波束赋形参考信号,这个参考信号是用户专用的。LTE R9 中将波束赋形扩展到了双流传输,实现了波束赋形与空间复用技术的结合。为了支持双流波束赋形,LTE R9 中定义了新的双端口专用导频,并引入了新的控制信令。在双流赋形中,UE 基于对专用导频的测量估计波束赋形后的等效信道,其中预编码模块并不进行任何预处理操作。

3. 空间复用

发射的高速数据被分成几个并行的低速数据流,在同一频带从多个天线同时发射出去。由于多径传播,每个发射天线对于接收机产生不同的空间签名,接收机利用这些不同的签名分离出独立的数据流,最后再复用成原始数据流。因此,空间复用可以成倍提高数据传输速率。LTE 的空间复用具有多码字传输、采用预编码技术、与 CDD 结合使用和支持 MU-MIMO 的特征。

1) 多码字传输

一个码字就是在一个 TTI 上发送的包含 CRC 位并经过了编码和速率匹配之后的独立传输块。LTE 规定了每个终端在一个 TTI 上最多可以发送两个码字。通俗来说,码字就是带有 CRC 的传输块。所谓多码字传输,即复用到多根天线上的数据流可以独立进行信道编码和调制。而单码字传输是一个数据流进行信道编码和调制之后再复用到多根天线上。多码字传输可以使用每个码字的传输速率控制及 SIC(串行干扰消除)接收机来实现,如图 5-54 所示。

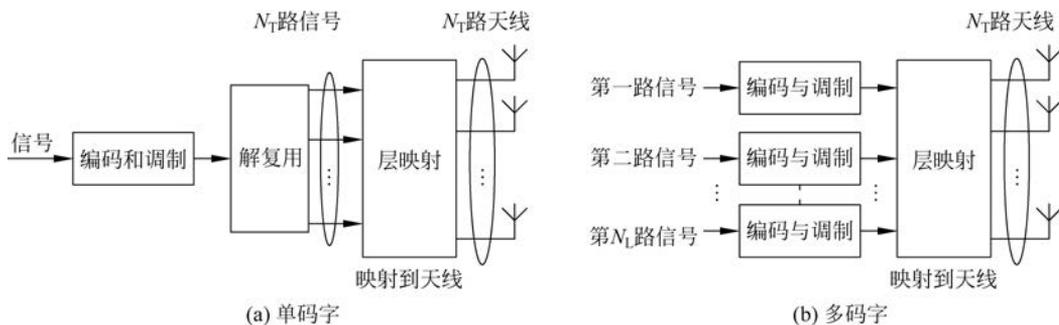


图 5-54 单码字和多码字传输示意图

2) 预编码技术

预编码的主要目的是使传输的信号更好地匹配信道条件,以获得更好的传输质量。预编码有基于码本和非码本两种方式。LTE-FDD 主要使用基于码本的预编码方式,主要是因为 LTE-FDD 工作时上下行链路使用不同的频率,当有较大的双工间隔时,不能够直接使用反向信道的测量来估计正向信道的条件,所以主要依靠终端的反馈来辅助预编码。由于信道互易性,因此 TD-LTE 更容易实现基于非码本的预编码工作方式。与基于预编码的波束赋形类似,基于预编码的空间复用是将多个数据流在发送之前使用一个预编码矩阵进行线性加权,如图 5-55 所示。

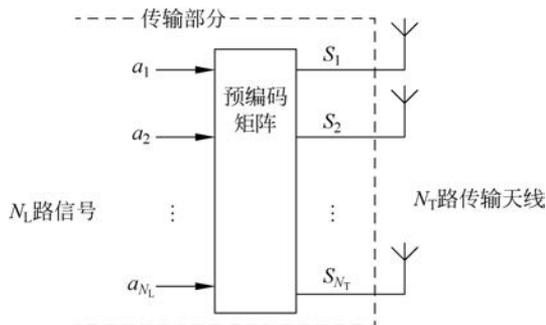


图 5-55 基于预编码的空间复用

使用基于预编码的空间复用有两个目的:①当被空间复用使用的信号数目 N_L 等于发送天线数目 N_T 时($N_L = N_T$),预编码可以用来对多个并行传输进行正交化,从而增加在接收端的信号隔离度;②当被空间复用使用的信号数目 N_L 小于发送天线数目 N_T 时,预编码还起到增益的作用,即将 N_L 个空间复用信号映射到 N_T 个传输天线上,提供空间复用和波束赋形增益。

3) 与 CDD 结合使用

空间复用与 CDD 结合有两种方式,当 CDD 的时延较小或者为 0 时,传输信号首先进行预编码操作,再进行 CDD 操作,如图 5-56 所示(以 2 天线发送为例)。

当 CDD 的时延较大时,传输信号首先进行 CDD 操作,再进行预编码操作,如图 5-57 所示(以 2 天线发送为例)。

4. MU-MIMO

当基站将占用相同时频资源的多个数据流发送给同一个用户时,就是单用户 MIMO

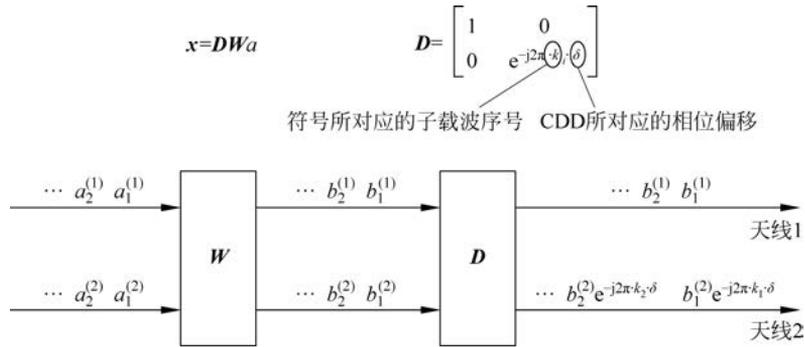


图 5-56 空间复用与小时延 CDD 的结合方式

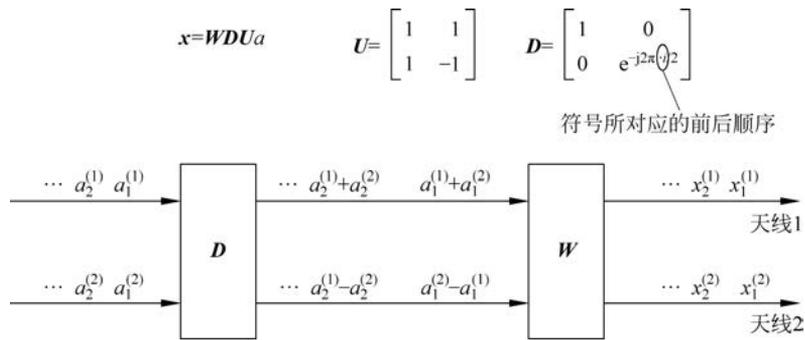


图 5-57 空间复用与大时延 CDD 的结合方式

(SU-MIMO), 或者叫作空间复用(SDM), 如图 5-58(a)所示; 当基站将占相同频资源的多个数据流发送给不同的用户时, 就是多用户 MIMO(MU-MIMO), 或者叫作空分多址(SDMA), 如图 5-58(b)所示。

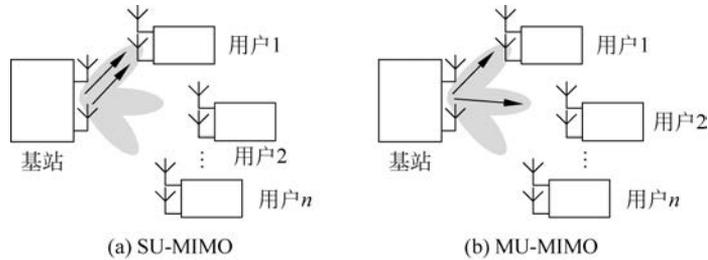


图 5-58 下行 SU-MIMO 与 MU-MIMO

两种实现 MU-MIMO 方式的主要差别是如何进行空间数据流的分离。一种方式是数据流的分离是在接收端进行的, 它利用接收端的多根天线对干扰数据流进行取消和零陷达到分离数据流的目的。另外一种方式是在发射端使用波束赋形, 此时空间数据流的分离是在基站进行的。基站利用反馈的信道状态信息, 为给定的用户进行波束赋形, 并保证对其他用户不会造成干扰或者只有很小的干扰, 即传输给给定用户的波束对其他用户形成了零陷。此时, 理论上终端只需要使用单根天线就可以工作。

与下行多用户 MIMO 不同, 上行多用户 MIMO 是一个虚拟的 MIMO 系统, 即每个终

端均发送一个数据流,但是两个或者更多的数据流占用相同的时频资源,这样从接收机来看,这些来自不同终端的数据流,可以被看作来自同一个终端上不同天线的数据流,从而构成一个 MIMO 系统。如图 5-59 所示,其中图 5-59(a)为传统的 MIMO 系统,即 SU-MIMO,图 5-59(b)为 MU-MIMO。

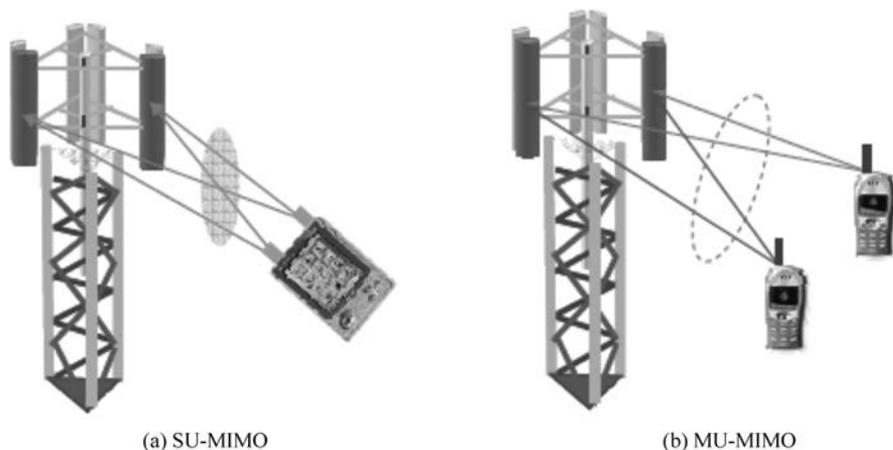


图 5-59 上行 SU-MIMO 及 MU-MIMO

与 SU-MIMO 相比, MU-MIMO 可以获得多用户分集增益。即对于 SU-MIMO,所有的 MIMO 信号都来自同一个终端上的天线;而对于 MU-MIMO,信号是来自不同终端的,它比 SU-MIMO 更容易获得信道之间的独立性。

5. LTE 系统中的多天线技术

为了满足 LTE 在高数据率和高容量方面的需求, LTE 系统采用的下行 MIMO 技术包括空间复用、波束赋形和传输分集, MIMO 技术下行基本天线配置为 2×2 , 即 2 天线发送和 2 天线接收, 最大支持 4 天线进行下行方向四层传输。

上行 MIMO 技术包括空间复用和传输分集, MIMO 技术上行基本天线配置为 1×2 , 即 1 天线发送和 2 天线接收。MIMO 天线数据为虚拟天线数目。

在典型的信道容量曲线中, 低信噪比区域的斜率比较大, 应用传输分集技术和波束赋形技术可以有效提高接收信号的信噪比, 从而提高传输速率或者覆盖范围; 而在高信噪比区域, 容量曲线接近平坦, 再提高信噪比也无法明显改善传输速率, 可以应用空间复用技术来提高传输速率。

LTE 系统下行多天线技术如图 5-60 所示, 由层映射和预编码两个模块及一个标准中未规定的天线端口映射模块来实现。

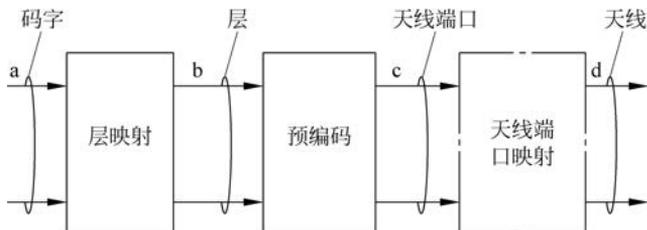


图 5-60 LTE 系统下行多天线技术

由于码字数量和发送天线数量不一致,需要将码字流映射到不同的发送天线上,因此需要使用层映射。层映射模块完成码字到层的映射操作,其中层有不同的解释,在使用单天线传输、传输分集及波束赋形时,层数目等于天线端口数目;在使用空间复用传输时,层数目等于空间信道的秩数目,即实际传输的流数目。

预编码是将信道矩阵对角化的方式,预编码模块完成层到天线端口的映射操作,空间复用中的预编码操作、传输分集操作主要在这个模块中完成。

天线端口是逻辑概念,一个天线端口可以是一个物理发射天线,也可以是多个物理发射天线的合并。在这两种情况下,终端的接收机都不会去分解来自一个天线端口的信号,因为从终端的角度来看,不管信道是由单个物理发射天线形成的,还是由多个物理发射天线合并而成的,这个天线端口对应的参考信号就定义了这个天线端口,终端都可以根据这个参考信号得到这个天线端口的信道估计。天线端口映射模块完成天线端口到物理天线单元的映射操作,波束赋形操作主要在这个模块中完成。

码字个数(C)、阶(秩, R)和天线端口数(P)之间的关系如下:

$$\text{传输块个数} = \text{码字个数}(C) \leq \text{阶}(R) \leq \text{天线端口数}(P)$$

对于 R8/R9 的终端,主要配置为双天线,但是采用单发双收的工作模式。上行链路 MIMO 的工作方式主要包括以下几种。

- (1) 单天线传输:采用上行单天线传输方式,使用固定天线发送(端口 0)。
- (2) 开环发送天线选择分集:采用上行单天线传输方式,终端选择天线进行上行传输。
- (3) 闭环发送天线选择分集:网络侧通过下行物理控制信道上承载的下行控制信息通知终端采用特定天线进行上行传输。
- (4) 上行 MU-MIMO:网络侧能够根据信道条件变化自适应地选择多个终端共享相同的时频资源进行上行传输。

在 3GPP R8/R9 版本中,上行未使用空间复用技术,主要是考虑到射频实现复杂度高、MIMO 信道非相关性实现较难、天线数量越多终端耗电越大、与其他无线通信系统(如 GPS、蓝牙等)的干扰问题严重等因素。以射频实现为例,若要保证终端上行可以实现空间复用技术,一般情况下要求天线间至少要保证半个波长的空间隔离。假如此时上行传输使用 2.6GHz 的载波,空间隔离约为 5cm,同市面的手持终端尺寸可比拟,相对容易实现;但是当载波低到 1GHz 以下,如 700MHz 时,半波长超过 10cm,大于目前市面销售的一般手持终端的尺寸,所以对于 1GHz 以下的频率,实现手持终端的上行 MIMO 工作方式难度相对较大。上行只支持采用 MU-MIMO,其每个终端的上行传输即单天线传输。

5.5.3 链路自适应

移动无线通信信道的一个典型特征就是其瞬时信道变化较快,并且幅度较大,信道调度及链路自适应可以充分利用信道这种变化的特征,提高无线链路传输质量。

链路自适应技术包含两种,功率控制技术及速率控制技术。功率控制是指通过动态调整发射功率,维持接收端一定的信噪比,从而保证链路的传输质量。当信道条件较差时,增加发射功率,当信道条件较好时降低发射功率,从而保证恒定的传输速率,如图 5-61(a)所示。链路自适应技术在保证发送功率恒定的情况下,通过调整无线链路传输的调制方式与编码速率,确保链路的传输质量。当信道条件较差时选择较小制数的调制方式与编码速率,

当信道条件较好时选择较大制数的调制方式,从而最大化传输速率,如图 5-61(b)所示。显然,速率控制的效率要高于使用功率控制的效率,这是因为使用速率控制时总是可以使用满功率发送,而使用功率控制则没有充分利用所有的功率。

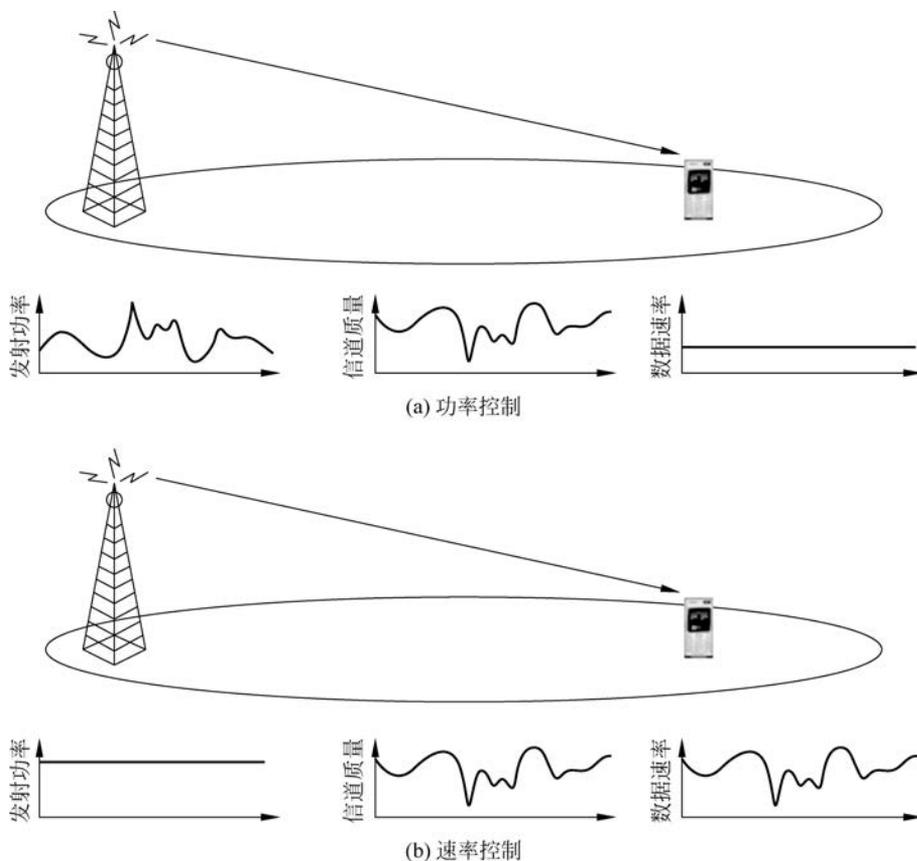


图 5-61 功率控制与速率控制

上述结论并不意味着不需要使用功率控制,在采用非正交的多址方式(比如 CDMA)时,功率控制可以很好地避免小区内用户间的干扰。

对于 LTE 的链路自适应技术,下行链路支持自适应调制编码技术;上行链路支持自适应调制编码技术、功率控制技术及自适应传输带宽技术,这个可以认为是信道调度技术的一部分。在进行 AMC 时,一个用户的一个码字中所对应的资源块使用相同的调制与编码方式。

5.5.4 快速分组调度

对于同一块资源,由于移动通信系统用户所处的位置不同,其对应的信号传输信道也是不同的。LTE 的调度分为上行调度与下行调度。

1. 下行调度

下行调度主要负责为 UE 分配 PDSCH 上的资源,并选择合适的调制与编码策略(MCS),以便用于系统消息和用户数据的传输。下行调度的输入参数包括 UE 能力级别、

信道状态信息(CSI)、下行发射功率、ACK/NACK 反馈及 QoS 要求。UE 能力级别对应每个 TTI 能够传输的最大比特数和层数；CSI 是指调度器调度用户并给用户分配资源时会考虑信道质量信息,CSI 包括秩指示 RI、预编码矩阵指示和 CQI；下行发射功率由小区所有用户共享,调度也要考虑下行可用功率；ACK/NACK 反馈是指调度器依据 ACK/NACK 反馈决定是否重传数据或新传数据；QoS 要求是指调度器要考虑 QoS 参数,分配资源和计算优先级等。

下行调度的基本功能包括优先级计算、MCS 选择及资源分配。优先级计算是指根据调度输入的因素,确定承载的调度优先级并选定调度的用户,保证用户 QoS 的同时,最大化系统吞吐量；MCS 选择是指根据调度输入的信息,确定每个选定用户的 MCS；资源分配是指根据用户数据量和确定的 MCS,确定用户分配的 RB 数和 RB 的位置。调度的输出通过调度器来决定被调度的 UE、分配的 RB 数、RB 的位置、MCS 大小和 MIMO 模式等。

下行调度支持四种调度算法,包括最大载干比算法(Max C/I)、轮询算法(RR)、比例公平算法(PF)和增强型比例公平算法(EPF)。四种调度算法的差异主要体现在选择调度用户的优先级计算方面。

1) Max C/I 调度算法

Max C/I 调度算法分配空口资源时只考虑信道质量因素,即每个调度时刻只调度当前信道质量最优的业务。此算法可以最大化系统吞吐量,但由于系统中用户不可能都处于相同信道质量的情况,因此不能保证小区各用户之间的公平性。若用户持续处于信道质量差的条件,将永远得不到调度,小区用户感受差。此调度算法不支持用户业务的 QoS。

2) RR 调度算法

RR 调度算法分配空口资源时,只保证各用户之间调度机会的公平,和 Max C/I 相比,此算法可以保证小区各用户的调度公平性,但是不能最大化系统的吞吐量。此调度算法不支持用户业务的 QoS。

3) PF 调度算法

PF 调度算法分配空口资源会同时考虑业务的调度公平性和用户的信道质量及用户历史传输比特数,是 Max C/I、RR 调度算法的折中,但没有考虑业务的 QoS 信息,无法保证用户的业务感受。

4) EPF 调度算法

EPF 调度算法在 PF 调度算法的基础上进一步考虑用户的业务感受,保证业务的 QoS。

2. 上行调度

上行调度用于 UE 分配 PUSCH 资源,流程较下行调度复杂。主要区别为以下几个方面：上行调度由 UE 触发和维持；上行调度包括两个调度器,一个位于 eNodeB 侧,针对每个 UE 的逻辑信道组进行调度,另一个位于 UE 侧,针对逻辑信道组内的逻辑信道进行调度；上行调度的 MCS 算法和 RB 计算协议里没有规定,由各厂家定义。上行调度器在每 TTI 里按照优先级依次调度。上行动态调度的初传包括调度用户选择、调度资源获取、MCS 选择和调度用户资源块 RB 数及位置选择等功能。

1) 调度用户选择

上行调度和下行调度类似,也支持四种调度方式：Max C/I、RR、PF 和 EPF。与下行调度不同的是,下行调度输入的信道质量信息为 UE 上报的 CQI 信息,上行调度输入的信道

质量信息为系统测量的上行 SINR。

2) 上行调度资源获取

PUSCH、PUCCH、PRACH 共享上行带宽。PUSCH 可通过参数配置占用 PUCCH 的资源。

3) 上行调度资源类型

上行资源调度类型包括频选方式、非频选方式和干扰随机化方式。非频选调度方式采用顺序方式分配 RB 资源,所有小区的用户都从频带高端开始顺序分配 RB 资源;干扰随机化调度下的每个小区选择不同的频域资源分配起始位置,可以在一定程度上避开不同小区的干扰。其中,物理小区标识(PCI)为奇数的小区从频带低端开始分配资源;PCI 为偶数的小区从频带高端开始分配资源;频选调度基于信道质量,通过利用 UE 频带上的信道质量差异,可以获得信道的频率选择性调度增益。每个用户根据所需 RB 数来设定滑动窗口宽度,在所有可选资源上选择预期增益最大的资源组合。

频选调度虽然能够跟踪信道波动或者干扰波动而获得增益,但可能会产生频带碎片,从而导致 RB 利用不充分。同时,频选调度的实现复杂度偏高,处理开销较大。

4) 上行调度用户 RB 数的确定

上行调度器根据 UE 上报的缓冲区状态、QoS 保证的令牌桶状态、功率余量状态及单载波允许的 RB 个数等确定该 UE 在本 TTI 内所需的 RB 资源。至于调度的 RB 位置,需要综合 eNodeB 测量的 UE 的 SINR 值、系统资源利用率等进行选择。

5) 上行调度用户 MCS 的确定

SINR 反映了 UE 业务的上行信道质量,LTE 系统根据 SINR 选择上行调度的 MCS。上行调度用户 MCS 的选择分为 SINR 调整、MCS 初选和 MCS 调整三个部分。

MAX C/I 调度如图 5-62 所示。假设资源块是时分的,每一时刻只有一个用户被调度,那么采用最大 C/I 调度时,尽管每个用户所经历的信道在不同时刻有好有坏,但是从基站角度来看,任何一个时刻总是能够找到一个用户的信道质量接近峰值,这种通过选择最好信道质量的进行信号传输的方法通常叫作多用户分集。信道的选择性越大,小区中的用户越多,多用户分集越大。

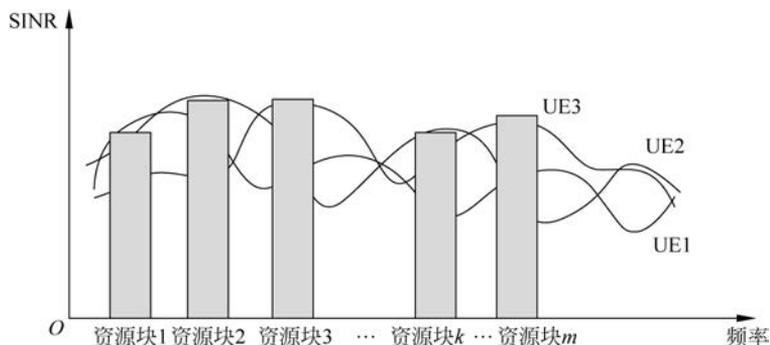


图 5-62 MAX C/I 调度

Max C/I 调度优先级计算函数可以表示为

$$k = \arg \max_{j=1,2,\dots,k} \left\{ \left(\frac{C}{I} \right)_j (t) \right\} \quad (5-6)$$

轮询调度的优先级计算函数为

$$k = \arg \max_{j=1,2,\dots,k} \{T_j(t)\} \quad (5-7)$$

比例公平调度算法的优先级计算函数为

$$k = \arg \max_{j=1,2,\dots,k} \left\{ \left(\frac{r_j(t)}{R_j(t)} \right) \right\} \quad (5-8)$$

$$R_j(t+1) = \left(1 - \frac{1}{T_C}\right) * R_j(t) + \frac{r_j(t)}{T_C} \quad (5-9)$$

其中, $\left(\frac{C}{I}\right)_j$ 为用户 j 的载干比, $r_j(t)$ 表示用户 j 的瞬时数据速率, $R_j(t)$ 表示用户 j 的平均数据速率, 该平均值是通过一定的平均周期 T_C 计算出来的。平均周期的选取, 应该保证既能有效利用信道的快衰落特性, 又能限制长期服务质量的差别小到一定的程度。

从系统容量的角度来看, Max C/I 调度是有益的, 但是从用户的角度来看, 那些长时间处于深衰落或者位于小区边缘的用户将永远不会被调度, 从而影响用户之间的公平性, 如图 5-63(a) 所示。RR 调度则充分考虑了用户之间的公平性, 如图 5-63(b) 所示, 其调度策略是让用户依次使用共享资源, 在调度时并不考虑用户所经历的瞬时信道条件。RR 调度虽然给每个用户相同的调度机会, 但是从 QoS 来说并不是这样的, 这是因为信道条件差的用户显然需要更多的调度机会才能完成基本相同的 QoS。一种 Max C/I 调度与 RR 调度的折中是比例公平调度, 如图 5-63(c) 所示。

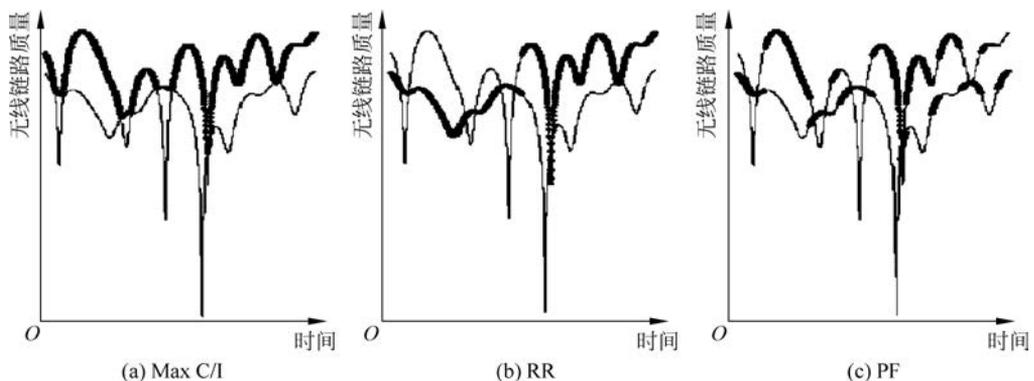


图 5-63 调度策略

相对于单载波 CDMA 系统, LTE 系统的一个典型特征是在频域进行信道调度和速率控制, 如图 5-64 所示, 基站侧需要知道频域上不同频带的信道状态信息。对于下行可以通过测量全带宽的公共参考信号, 获得不同频带的信道状态信息, 量化为信道质量指示 CQI 并反馈给基站; 对于上行可以通过测量终端发送的上行探测参考信号 SRS, 获得不同频带的信道状态信息, 进行频域上的信道调度和速率控制。

5.5.5 HARQ

1. FEC、ARQ 及 HARQ

利用无线信道的快衰特性可以进行信道调度和速率控制, 但是总是有一些不可预测的干扰导致信号传输失败, 因此需要使用前向纠错编码(FEC)技术。FEC 的基本原理是在传

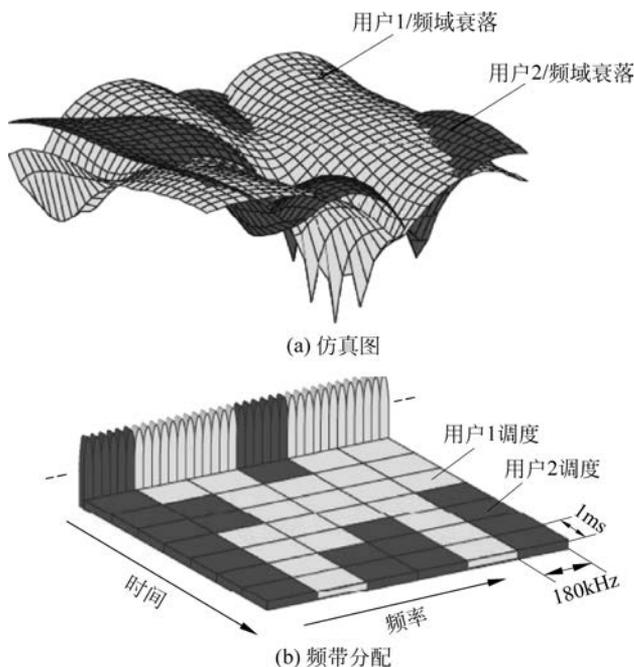


图 5-64 LTE 的频域调度

输信号中增加冗余,即在信号传输之前在信息比特中加入校验比特。校验比特使用由编码结构确定的方法对信息比特进行运算得到。这样,信道中传输的比特数目将大于原始信息比特数目,从而在传输信号中引入冗余。

另外一种解决传输错误的方法是使用 ARQ 技术。在 ARQ 方案中,接收端通过错误检测(通常使用 CRC 校验)判断接收到的数据包的正确性。如果数据包被判断为正确,那么说明接收到的数据是没有错误的,并且通过发送 ACK 应答信息告知发射机;如果数据包被判断为错误,那么通过发送 NACK 应答信息告知发射机,发射机将重新发送相同的信息。

大部分通信系统都将 FEC 与 ARQ 结合起来使用,称为混合自动重传请求(Hybrid ARQ, HARQ)。HARQ 使用 FEC 纠正所有错误的一部分,并通过错误检测判断不可纠正的错误。错误接收的数据包被丢掉,接收机请求重新发送相同的数据包。

LTE 采用多个并行的停等 HARQ 协议。所谓停等,就是指使用某个 HARQ 进程传输数据包后,在收到反馈信息之前,不能继续使用该进程传输其他任何数据。单路停等协议的优点是比较简单,但是传输效率比较低,而采用多路并行停等协议,同时启动多个 HARQ 进程,可以弥补传输效率低的缺点。其基本思想在于同时配置多个 HARQ 进程,在等待某个 HARQ 进程的反馈信息过程中,可以继续使用其他的空闲进程传输数据包。确定并行的进程数目要求保证最小的往返时间(RTT)中任何一个传输机会都有进程使用。

对于 TDD 来说,其 RTT 大小不仅与传输时延 T_p 、接收时间 T_{sf} 和处理时间 T_{RX} 有关,还与 TDD 系统的时隙比例(DL : UL)、传输所在的子帧位置有关。进程数目 N_{proc} 为 RTT 中包含同一方向的子帧数目。以下行 HARQ 进行说明,假设基站侧的处理时间为

$3 \times T_{sf}$, 终端侧的处理时间为 $3 \times T_{sf} - 2 \times T_p$, 如图 5-65 所示, 同样对于子帧 0 开始的数据传输, 不同的时隙比例, 其 RTT 及进程数目是不同的, 如图 5-65(a) 和图 5-65(b) 所示; 在相同的时隙比例下, 不同子帧位置开始的数据传输, 其 RTT 及进程数目也是不同的, 如图 5-65(a) 和图 5-65(c) 所示。

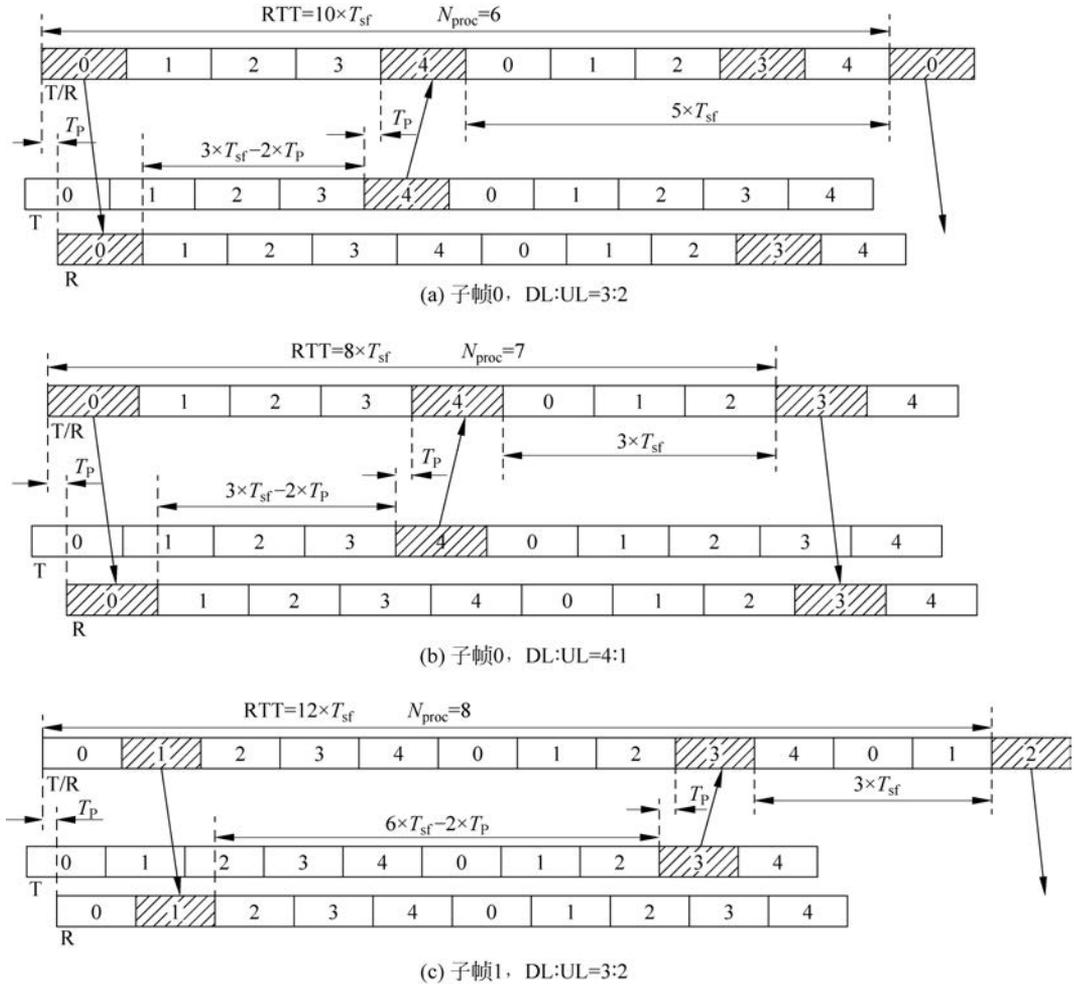


图 5-65 不同上下行配比

对于某一次传输, 其应答消息 (ACK/NACK) 需要在约定好的时间上进行传输, 对于 TDD 来说, 由于其在任何一个方向的传输都是不连续的, 因此 ACK/NACK 与上一次传输之间采用固定的时间间隔是无法保证的。对于 TDD 系统, 下行不同时隙配比的进程数如表 5-20 所示。

表 5-20 下行不同时隙配比的进程数

时 隙	DL/UL 配比	进 程 数
5ms 周期	1DL+DwPTS;3UL	4
	2DL+DwPTS;2UL	7
	3DL+DwPTS;1UL	10

续表

时 隙	DL/UL 配比	进 程 数
10ms 周期	3DL+2DwPTS;5UL	6
	6DL+DwPTS;3UL	9
	7DL+DwPTS;2UL	12
	8DL+DwPTS;1UL	15

对于 TDD 系统,上行不同时隙配比的进程数如表 5-21 所示。

表 5-21 上行不同时隙配比的进程数

时 隙	DL/UL 配比	进 程 数
5ms 周期	1DL+DwPTS;3UL	7
	2DL+DwPTS;2UL	4
	3DL+DwPTS;1UL	2
10ms 周期	3DL+2DwPTS;5UL	6
	6DL+DwPTS;3UL	3
	7DL+DwPTS;2UL	2
	8DL+DwPTS;1UL	1

如果重传在预先定义好的时间上进行,接收机则不需要显示告知进程号,则称为同步 HARQ 协议;如果重传在上一次传输之后的任何可用时间上进行,接收机则需要显示告知具体的进程号,则称为异步 HARQ 协议,如图 5-66 所示。LTE 中,下行采用异步 HARQ 协议,上行采用同步 HARQ 协议。同步 HARQ 协议并不意味着所有的初传与重传之间相隔固定的时间,而只要保证事先可知即可,因此为了降低上行传输延时,不同的时隙比例可以选取不同的 RTT。

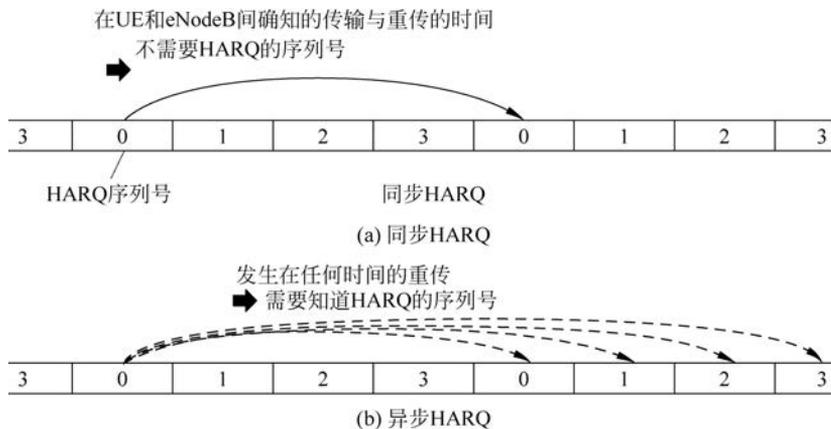


图 5-66 HARQ 协议

HARQ 又可以分为自适应 HARQ 与非自适应 HARQ。自适应 HARQ 是指重传时可以改变初传的一部分或者全部属性,比如调制方式及资源分配等,这些属性的改变需要信令额外通知。非自适应的 HARQ 是指重传时改变的属性是发射机与接收机提前协商好的,不需要额外的信令通知。

LTE 的下行采用自适应的 HARQ, 上行同时支持自适应和非自适应的 HARQ。非自适应的 HARQ 仅由物理 HARQ 指示 PHICH 中承载的 NACK 应答信息来触发; 自适应的 HARQ 通过 PDCCH 调度来实现, 即基站发现接收输出错误之后, 不反馈 NACK, 而是通过调度器调度其重传所使用的参数。

2. HARQ 与软合并

前面介绍的 HARQ 机制中, 接收到的错误数据包都是直接被丢掉的。虽然这些数据包不能独立地正确译码, 但是其依然包含一定的有用信息, 可以使用软合并来利用这部分信息, 即将接收到的错误数据包保存在存储器中, 与重传的数据包合并在一起进行译码。

HARQ 软合并技术根据重传比特和初传比特相同与否, 分为追踪合并(CC)和增量冗余(IR)。使用 CC 时, 重传包含与初始传输相同的编码比特集合, 每次重传之后, 接收机使用最大比特集合并对每个接收到的比特与前面传输中的相同比特进行合并, 然后送到译码器进行译码。由于每次重传都是与原始传输相同的副本, CC 合并可以看作额外的重复编码。CC 合并没有传输任何新的冗余, 因此 CC 合并不能提供额外的编码增益, 其仅增加了接收到的解调门限 E_b/N_0 , E_b 为每比特能量, N_0 为噪声功率谱密度, 如图 5-67 所示。

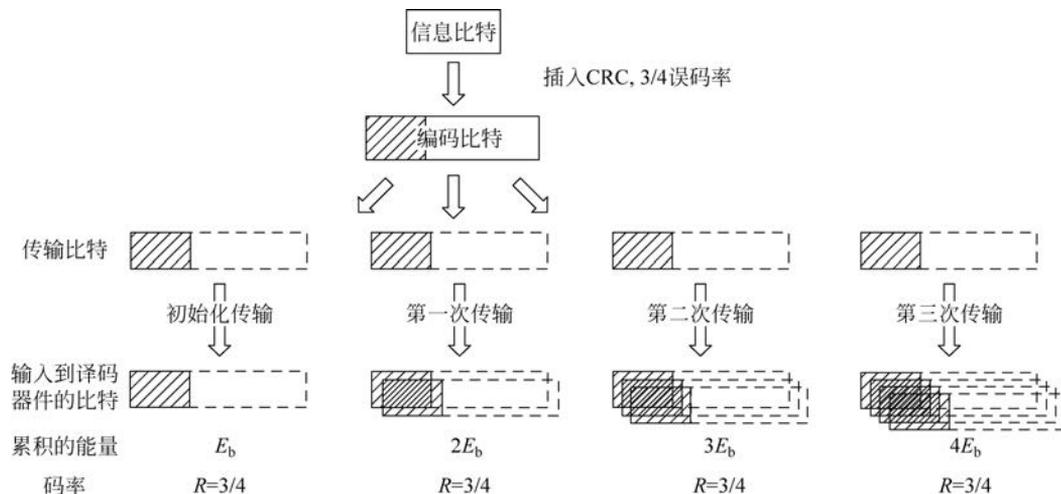


图 5-67 CC 合并

使用 IR 合并时, 每次重传不一定与初始传输相同。相同的比特信息可以对应多个编码的比特集合, 当需要进行重传时, 使用与前面传输不同的编码比特集合进行重传。由于重传时可能包含前面传输中没有的校验比特, 整体的编码速率被降低。进一步讲, 每次重传不一定与原始传输相同数目的编码比特, 不同的重传可以采用不同的调制方式。一般地, IR 合并通过对编码器的输出进行打孔获得不同的冗余版本, 通过多次传输及合并之后降低整体的编码速率, 如图 5-68 所示。

LTE 支持使用 IR 合并的 HARQ, 其中 CC 合并可以看作 IR 合并的一个特例。

5.5.6 小区间干扰消除技术

LTE 的下行和上行都采用正交的多址方式, 因此对于 LTE 来说, 小区间干扰成为主要的干扰, 而且与 CDMA 系统使用软容量来实现同频组网不同, LTE 无法直接实现同频组

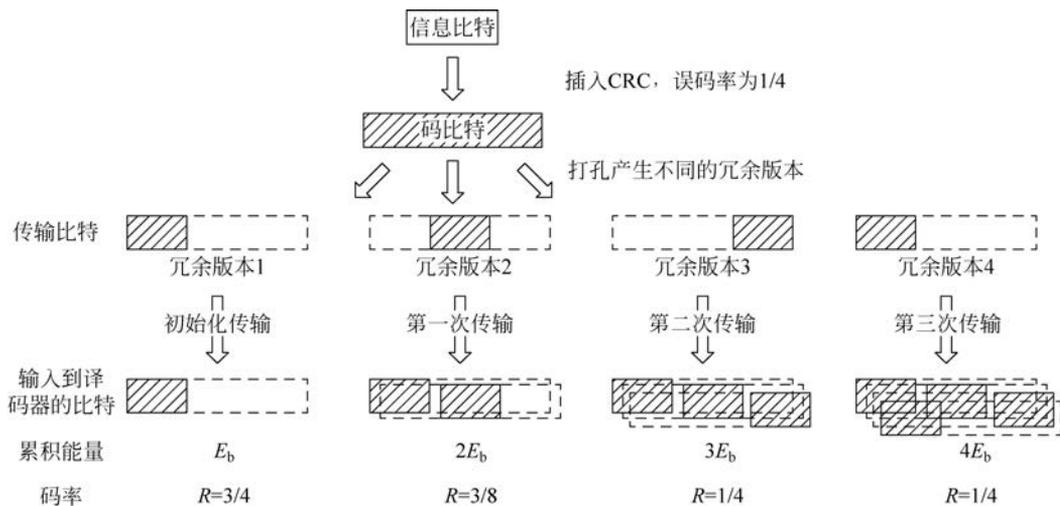


图 5-68 IR 合并

网,因此如何降低小区间干扰,实现同频组网成为 LTE 的一个主要问题。有多种方法可以消除小区间的干扰,LTE 系统至少支持四种小区间干扰消除方法,包括发射端波束赋形及干扰抑制合并(IRC)、小区间干扰协调、功率控制、比特级加扰。

1. 发射端波束赋形及 IRC

对于下行方向,基站可以使用发射端波束赋形技术,将波束对准期望用户来提高期望用户的信号强度并降低信号对其他用户的干扰,如图 5-69 所示。如果波束赋形时,基站已经知道被干扰用户的方位,基站就可以主动降低对该方向辐射能量,减少干扰。

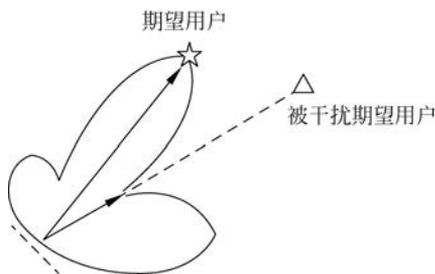


图 5-69 使用发射端波束赋形技术降低小区间干扰

发射端波束赋形是一种利用发射端多根天线降低用户间干扰的方法。当接收端也存在多根天线时,接收端也可以利用多根天线降低用户间干扰,其主要的原理是通过接收信号加权来抑制强干扰,称为 IRC,如图 5-70 所示。

以下行方向为例进行说明,存在一个目标基站 s 和一个干扰基站 s_1 ,那么接收端的信号 \bar{r} 用矩阵表示为

$$\bar{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_{N_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_{N_R} \end{bmatrix} \cdot s + \begin{bmatrix} h_{1,1} \\ \vdots \\ h_{1,N_R} \end{bmatrix} \cdot s_1 + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{N_R} \end{bmatrix} = \bar{h} \cdot s + \bar{h}_1 \cdot s_1 + \bar{n} \quad (5-10)$$

可以通过选取权值 \bar{w} 满足式(5-10)来实现对干扰信号的抑制

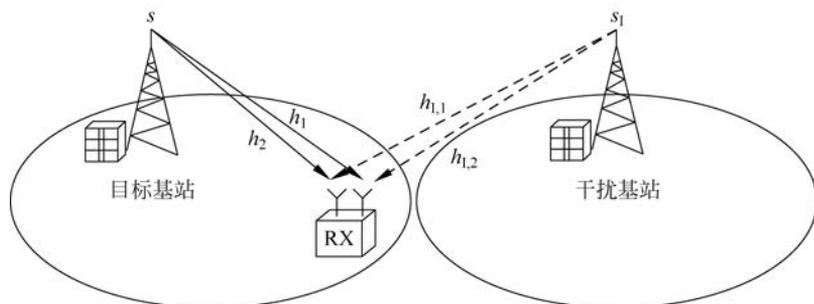


图 5-70 IRC(下行)

$$\bar{w}^H \cdot \bar{h}_1 = 0 \quad (5-11)$$

式中, \bar{h} 为天线矩阵。 N_R 根接收天线最多可以抑制 $N_R - 1$ 个干扰。

IRC 也可以用于上行, 用来抑制来自外小区的干扰, 这种方法通常也叫作接收端波束赋形, 如图 5-71 所示。

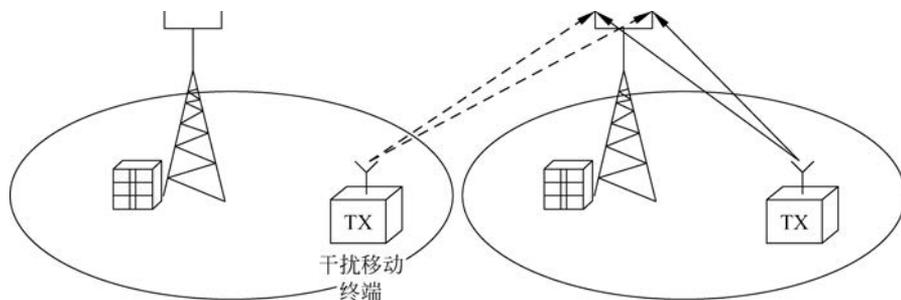


图 5-71 IRC(上行)

2. 小区间干扰协调

小区间干扰协调以小区间协调的方式对资源的使用进行限制, 包括限制哪些时频资源可用, 或者在一定的时频资源上限制其发射功率。小区间干扰协调可以采用静态的方式, 也可以采用半静态的方式。静态的小区间干扰协调不需要标准支持, 属于调度器的实现问题, 可以分为频率资源协调和功率资源协调两种, 这两种方式都会导致频率复用系统小于 1, 一般称为软频率复用或者部分频率复用技术。

一种频率资源协调方法如图 5-72 所示, 频率资源被划分为 3 部分, 其中位于小区中心的用户可以使用所有的频率资源, 而位于小区边缘的用户只能使用部分频率资源, 并且相邻小区的小区边缘用户所使用的频率资源不同, 从而可以降低小区边缘用户的干扰。

一种功率资源协调方法如图 5-73 所示, 频率资源被划分为 3 部分, 所有小区都可以使用全部的频率资源, 但是不同的小区类型只允许一部分频率可以使用较高的发射功率, 比如位于小区边缘的用户可以使用这部分频率, 而且不同小区类型的频率集合不同, 从而降低小区边缘用户的干扰。

半静态的小区间干扰协调需要小区间交换信息, 比如需要交换资源使用信息。LTE 确定可以在 X2 接口交换 PRB 的使用信息进行频率资源的小区间干扰协调(上行), 即告知哪个

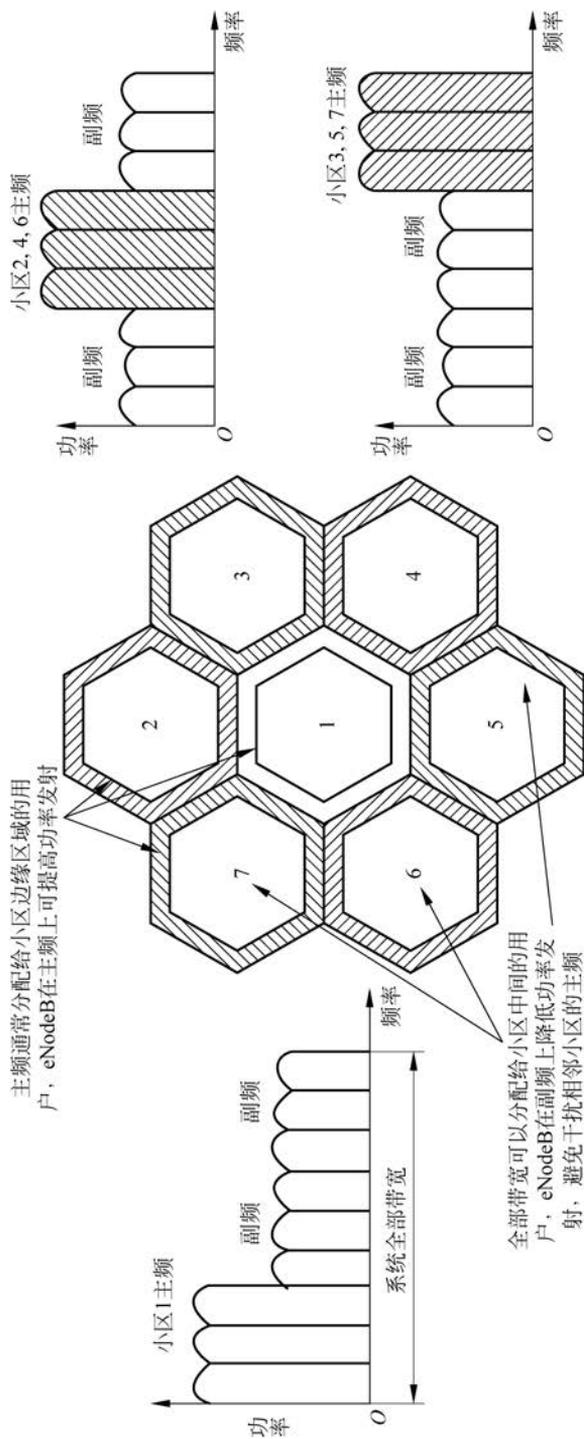


图 5-72 频率资源协调

PRB 被分配给小区边缘用户,以及哪些 PRB 对小区间干扰比较敏感。同时,小区之间可以在 X2 接口上交换过载指示信息,用来进行小区间的上行功率控制。

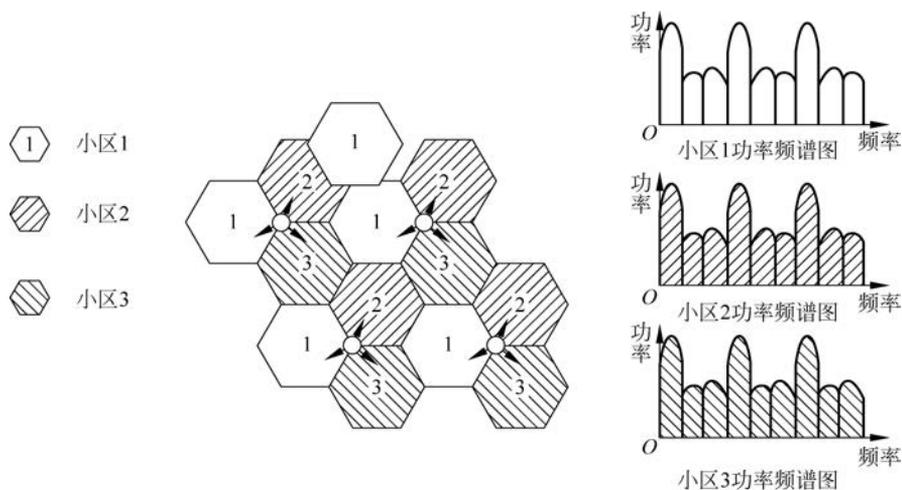


图 5-73 功率资源协调

3. 功率控制

LTE 上行方向可以进行功率控制(TPC),包括小区间功率控制和小区内的功率控制,如图 5-74 所示。小区内功率控制的主要目的是补偿传播损耗和阴影衰落,节省终端的发射功率,尽量降低对其他小区的干扰,使得热噪声干扰(IoT)保持在一定的水平之下。小区间功率控制可以通过告知其他小区本小区 IoT 的信息及控制本小区 IoT 的方法,这是因为本小区的 IoT 主要来自其他小区的干扰,如果干扰功率已经超过了 IoT 水平(超载),通过降低本小区的终端发射功率是无法降低本小区的 IoT 的。LTE 小区之间可以在 X2 接口上交换过载指示信息,进行小区间的上行功率控制。

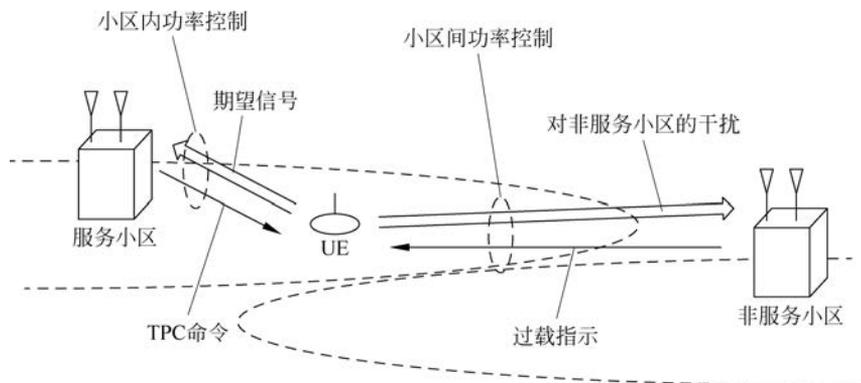


图 5-74 上行小区间及小区内功率控制

上行功率控制控制物理信道中一个 DFT-S-OFDM 符号上的平均功率,发射功率控制命令或者包含在 PDCCH 中的上行调度授权信令中,或者使用特殊的 PDCCH 格式与其他用户的 TPC 进行联合编码传输。

LTE 下行方向也可以进行功率控制,小区内的功率控制不需要标准支持。下行功率控

制 EPRE(每个 RE 上的能量),下行小区专用参考信号的 EPRE 在所有子帧及整个带宽上恒定。

4. 比特级加扰

LTE 使用比特级加扰对小区间干扰进行随机化,即针对编码之后(调制之前)的比特进行加扰,如图 5-75 所示。

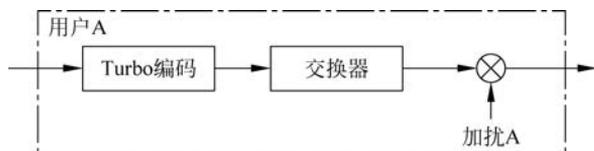


图 5-75 比特级加扰

使用比特级加扰后获得的干扰抑制增益与处理增益成正比。LTE 物理层协议确定对于 BCH、PCH 以及控制信令采用小区专用的加扰,并且其与物理层小区 ID 有一一映射关系;对于下行同步信道则采用 UE 专用加扰或者一组 UE 专用加扰;对于上行信道,LTE 系统支持 UE 专用加扰,但是允许配置为使用或者不使用。

5.6 LTE-Advanced 系统的增强技术

2005 年 10 月 18 日,ITU 给 B3G 技术一个正式的名称 IMT-Advanced,即 4G 技术,主要包括 LTE-Advanced(包括 TDD 和 FDD 两种制式)和 IEEE 802.16m 两大类技术方案。其中,中国主导的具有自主知识产权的 TD-LTE-Advanced,作为 LTE-A 技术的 TDD 分支,获得欧洲标准化组织 3GPP 和国际通信企业的广泛认可和支持。IMT-2000、LTE-Advanced 及 LTE R8 的指标需求如表 5-22 所示。

表 5-22 IMT-2000、LTE-Advanced 及 LTE R8 的指标需求

参 数	单 位	IMT-A	LTE-A	LTE R8
带宽	MHz	40	100	20
下行峰值速率	Mb/s	1000	1000	100
上行峰值速率	Mb/s	500	50	50
下行峰值频谱效率	b/s/Hz	15	30	15
上行峰值频谱效率	b/s/Hz	6.75	15	3.75
下行小区边缘频谱效率	b/s/Hz	0.07	0.09	—
上行小区边缘频谱效率	b/s/Hz	0.03	0.06	—

为了满足指标需求,LTE-A 引入载波聚合(CA)、多天线增强、中继技术、多点协作传输(CoMP)等关键技术。

5.6.1 载波聚合技术

CA 是 LTE-Advanced 系统大带宽运行的基础,而且能将多个较小的离散频带有效地整合起来,真正利用不同频带的传输特性,最大聚合带宽为 100MHz,从而能够实现更高的

系统峰值速率。LTE-Advanced 引入了成员载波的概念,每个成员载波的最大带宽不超过 20MHz,即 110 个 RB。在 LTE 中,每个小区只有一个成员载波,每个 UE 也只有一个成员载波为其服务;在 LTE-Advanced 中,每个小区有多个成员载波,每个 UE 也可能有多个成员载波为其服务。成员载波(CC)是指可配置的 LTE 系统载波,且每个 CC 的带宽都不大于 LTE 系统所支持的上限(20MHz)。

根据聚合的 CC 在无线资源中的连续性及其所在频带是否相同,可将 CA 分为三种聚合场景:同一频带内连续载波聚合、同一频带内非连续载波聚合和不同频带内载波聚合,如图 5-76 所示。按照系统支持业务的对称关系,聚合场景分为对称载波聚合和非对称载波聚合,如图 5-77 所示。

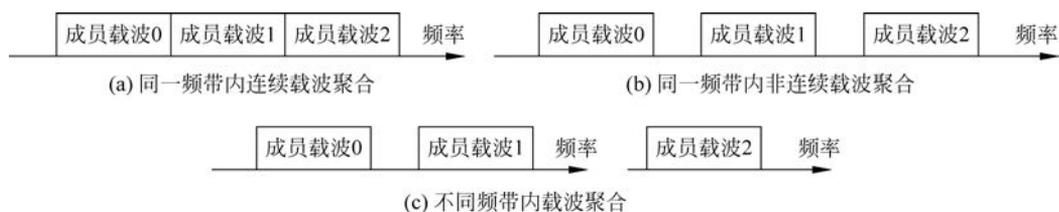


图 5-76 连续和非连续载波聚合

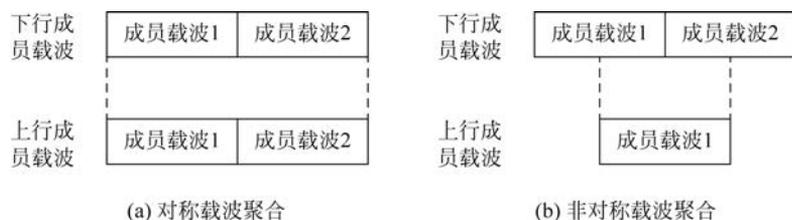


图 5-77 对称和非对称载波聚合

1. 连续和非连续载波聚合

在同一频带内的连续载波聚合中,所有载波单元在同一频带内,且载波单元之间没有间隔的存在;在同一频带内不连续的载波聚合中,所有载波单元在同一频带内,但至少有两个载波单元之间存在间隔。不同频带内的载波聚合的成员载波不在一个频带内。

根据频谱规划,4G 的频谱资源是比较稀少的,其频谱里面有些带宽还不到 100MHz,很难为一个移动通信网络提供连续的 100MHz 带宽,因此非连续载波聚合在实际环境中显得更具有普遍的适用性。但是不可避免的是,在非连续载波聚合下需要多个射频链路才能发送和接收完整带宽的信号。除了给硬件实现带来困难,非连续载波聚合还会对一些链路和系统级算法带来影响。

2. 对称和非对称载波聚合

对称和非对称载波聚合指的是下行与上行有相同或不不同的载波数目。非对称载波聚合既可以是小区专用的,也可以是 UE 专用的,小区专用非对称载波是从系统的角度来看待的,而 UE 专用非对称载波是从 UE 的角度来看待的。

图 5-77(a)从系统的角度来看是对称载波,但是由于不同的 UE 有不同的业务需求、射频单元处理能力及基带模块结构,因此从 UE 角度来看,可以被配置为非对称载波聚合方

式,并能够通过静态或半静态配置进行切换。UE 专用不对称载波聚合技术的应用,为 LTE-A 中负载均衡、干扰协调、QoS 管理及功率控制等技术提供了更大的灵活性。

对于 FDD 模式,非对称聚合会引起混淆上下行成员载波之间对应关系的问题。此外,数据传输在传输之前需要调度信息,传输之后需要 HARQ 功能反馈,这些都需要上行和下行成员载波之间的对应关系。而 TDD 通过上下行时隙配置,可以实现非对称传输,其上下行的对应关系是通过时间来对应的,不会混淆上下行成员载波之间的对应关系。

5.6.2 中继技术

1. 原理

传统蜂窝网络中,基站与用户之间的通信是靠无线信道直接连接的,即采用“单跳”的传输模式,信号经发送端发射之后,直接通过无线链路传输至接收端。中继技术则通过在基站和移动用户之间增加一个或者多个中继节点来实现信号的传输,即实现了无线信号的“多跳”传输。信号在通过发送端发射之后,需经过中继节点的处理后才会转发至接收端。中继技术为解决系统覆盖、提升系统吞吐量等问题提供了解决方案。中继站与传统直放站在工作方式及作用方面均不相同。传统的直放站在接收到基站发射的无线信号后,直接对其进行转发,仅起到了放大器的作用。而中继技术在数据传输的过程中,发送端首先将数据传送至中继站,再由中继站转发至目的节点。通过中继技术来缩短用户和天线间的距离,从而达到改善链路质量的目的,可有效提升系统的数据传输速率和频谱效率。若在小区原有覆盖范围部署中继站,还可以达到提升系统容量的目的。

基站和中继之间的链路被称为回程链路,基站与直传用户之间的链路称为直传链路,中继与中继所服务用户之间的链路称为接入链路。中继技术引入的主要目的是提升系统容量和扩大系统覆盖范围,中继技术还具有布网灵活快速,避免盲点覆盖,实现无缝隙通信,提供临时覆盖等诸多特点及优势。引入中继技术的网络示意图如图 5-78 所示。

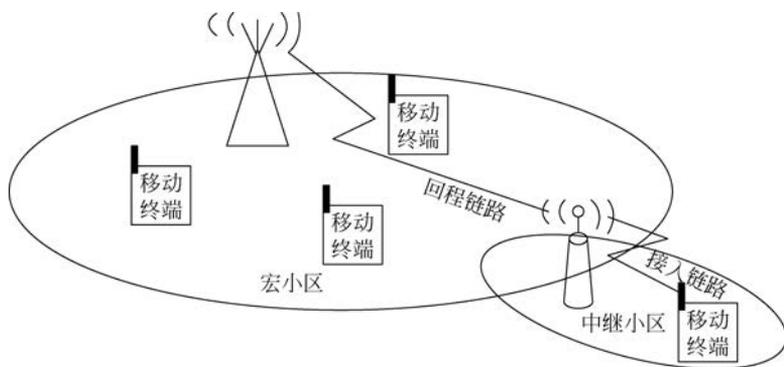


图 5-78 引入中继技术的网络示意图

2. 分类

1) 根据链路的频带不同分类

在 LTE-A 系统中根据基站与中继节点间链路的频带来分,中继可分为带内中继和带外中继。带内中继是指基站与中继链路和中继与用户链路的频带相同;带外中继是指基站与中继链路和中继与用户链路的频带不同。

2) 根据协议栈的分类

LTE-A 系统中考虑的中继技术有三种方案：L0/L1 中继、L2 中继和 L3 中继。L0 中继指中继节点收到信号后直接放大转发；L1 中继有物理层，将接收到的信号通过物理层转发；L2 中继的协议栈包括物理层协议、MAC 层协议及无线路由控制协议；L3 中继接收和发送 IP 包数据，因此 L3 中继具有基站的所有功能，可以通过 X2 接口直接和基站通信。

3) 根据是否存在小区 ID 分类

根据是否存在独立小区识别号可分为第 I 类中继和第 II 类中继。这两种中继方式最显著的特点是第 I 类中继具有独立的小区识别号，第 II 类中继没有独立的小区识别号。

第 I 类中继属于 L3 或者 L2 中继，是一种非透明中继，用户在基站和中继站之间必然发生切换，类似于普通基站间的切换操作。第 I 类中继发送自己的同步信道、参考信号及其他反馈信息，支持小区间的协作。第 II 类中继属于 L2 中继，是透明中继，用户在基站和中继站之间不一定发生切换，类似于小区内的切换或者透明切换操作。基站可以和中继同时发送相同的信号给用户，其主要作用是扩大小区的覆盖范围，只有部分基站功能，不需要自己生成信令，建站成本较低。

3. 应用目的

(1) 提高覆盖能力。终端不在基站的覆盖范围之内，使用中继技术可以提高系统的覆盖能力，如图 5-79 所示。

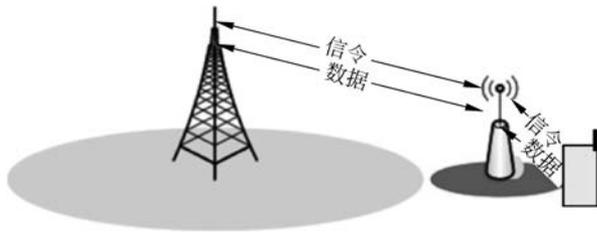


图 5-79 终端不在基站的覆盖范围的中继网络

(2) 提高容量。使用中继技术可以提高小区边缘用户的传输数据速率或小区平均吞吐量，如图 5-80 所示。

4. 应用场景

通过部署中继可以实现：①密集城区提高高速业务的覆盖；②改善乡村环境；③高速铁路为用户提供更高的吞吐量，并降低本地用户的切换失败率；④室内环境解决较大的阴影衰落和墙壁的穿透损耗；⑤对于城市盲点区域可以扩充对盲点区域的覆盖。

5.6.3 协作式多点传输技术

1. 原理

为了提高频谱的利用率，LTE 采用了同频组网的方式，使得小区边缘的用户将受到相邻小区的同频干扰。并且下行和上行都采用基于 OFDM 的正交多址方式，而 OFDM 无法有效地消除小区间干扰。虽然采用多天线技术可以提高小区中心的数据速率，却很难提高小区边缘的性能，小区中心和边缘的性能差异较大。

协作式多点传输技术 (CoMP) 是指协调的多点发射/接收技术，通过移动网络中多节点

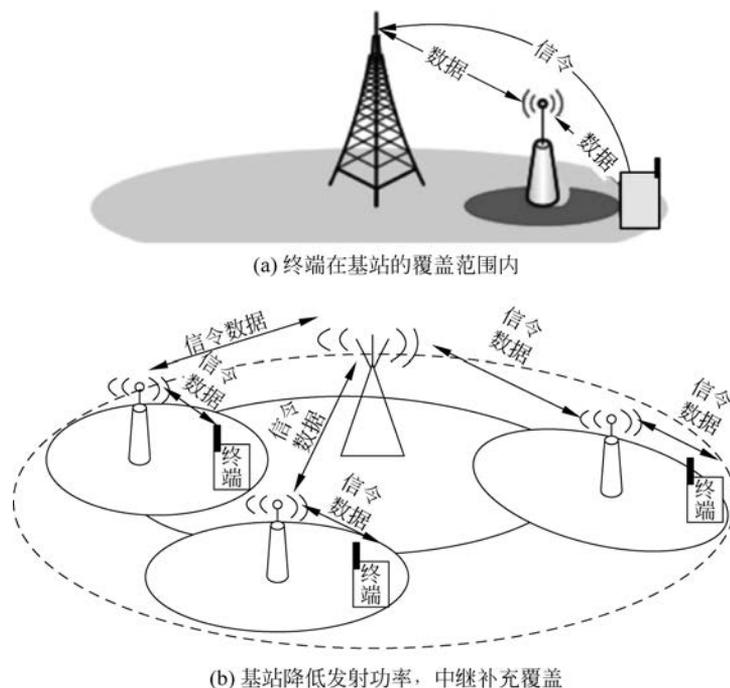


图 5-80 提高系统容量的中继网络

(基站、用户、中继节点等)协作传输,解决移动蜂窝单跳网络中的单小区和单站点传输对系统频谱效率的限制,更好地克服小区间干扰,提高无线频谱传输效率,提高系统的平均和边缘吞吐量,进一步扩大小区的覆盖。eNodeB 之间的 CoMP 技术可以采用 X2 接口进行有线传输,eNodeB 与中继之间的 CoMP 技术采用空口进行无线传输。

CoMP 分为上行和下行两部分。上行主要为多点的协作接收问题,其实质是多基站信号的联合接收问题,对现有的物理层的标准改变较小。下行则是协作多点传输问题,突破传统的单点传输,采用多小区协作为一个或多个用户传输数据,通过不同小区间的基站共享必要的信息,使多个基站通过协作联合为用户传输数据信息。协作的多个基站不仅需要共享信道信息,还需要共享用户的数据信息。整个协作的基站同时服务一个或多个用户。

2. 分类

从不同的角度出发,协作式多点传输技术的分类有所不同。

1) 根据干扰处理的角度

从干扰处理的角度出发,可以分为协作调度/波束成形和联合处理/传输技术两种方式。

(1) 在协调调度/波束成形中,要求协作传输的多个节点之间共享用户的信道状态信息,所要传输的用户数据信息只能由服务小区所在的基站进行传输,即用户数据信息不共享。通过在各个协作传输节点之间使用协作调度/波束成形技术,有效地降低由于各个协作传输节点所覆盖区域之间的重叠而造成的用户间的相互干扰。从本质上说,这种协作方式属于干扰避免或干扰协调技术。在进行子载波分配时,相邻小区的地理位置上非常接近的不同用户避免分配相同或相近的子载波进行信号传输,这样能够很好地改善小区边缘用户接收信号的质量,小区边缘用户的吞吐量也会明显增加,进而提高整个网络的性能。协作调

度/波束成形模型如图 5-81 所示。

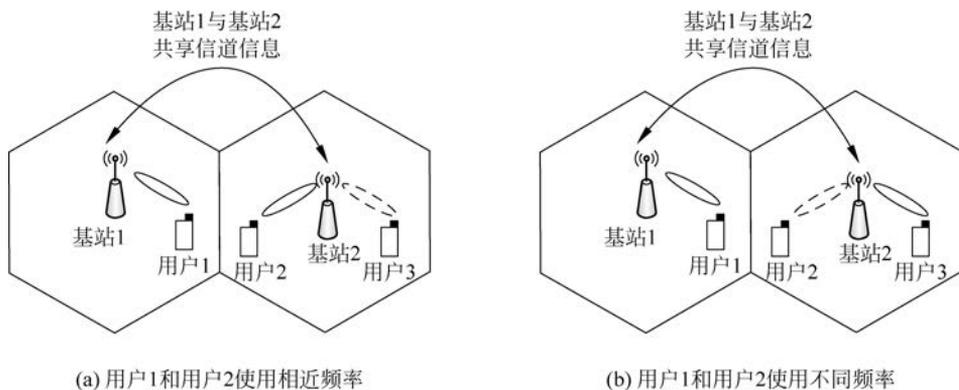


图 5-81 协作调度/波束成形模型

在图 5-81(a)中,用户 1 和用户 2 分别位于基站 1 与基站 2 所覆盖的重叠区域之中,其中用户 1 隶属于基站 1,用户 2 隶属于基站 2。在基站为用户提供服务时,当基站 1 分配给用户 1 的频率资源与基站 2 分配给用户 2 的频率资源相同或相近时,用户 1 和用户 2 之间将会产生相互干扰,这时基站 1 与基站 2 需要对用户 1 和用户 2 所使用的频谱进行相互协调,即协作调度/波束赋形。在图 5-81(b)中,通过基站 2 的调度或协调处理,将原来分配给用户 2 使用的频率资源分配给几乎不会对用户 2 造成干扰的用户 3 使用,对于用户 2 则重新分配另外的频率资源,这样能够大大减小用户 1 与用户 2 之间的相互干扰,但这样会在一定程度上导致频谱利用率降低。而协作波束赋形是指各基站为用户提供服务时,使用单一的方向性波束,这样可以减小多用户之间的相互干扰。

(2) 联合处理/传输技术。联合处理是指多个协作传输的节点,同时为多小区中的多个用户提供服务,可以显著改善整个系统的吞吐量。在联合处理/传输技术中,需要协作传输的多个节点之间共享用户的信道状态信息及用户数据信息,即所需要传输的数据信息在 CoMP 协作集的每个传输节点间进行共享。各传输节点按照某种准则向用户传输数据信息。为一个终端服务的每个小区都保存有向该终端发送的数据包,网络根据调度结果及业务需求的不同,选择其中的所有小区、部分小区或者单个小区向该终端发送数据。信息在 CoMP 协作集的每个传输节点间进行共享。根据多个传输节点是否同时传输用户数据,又可将联合处理/传输技术分为联合传输技术和动态小区选择技术。

在联合传输技术中,用户将能获得来自多个传输节点发送的数据信息;而在动态小区选择技术中,用户不同时接收来自多个协作传输节点发送的数据信息,但是用户可以根据信道状态信息的好坏或参考信号接收功率的大小或信干噪比的大小等因素来选择能使自己获得最大协作增益的一个协作传输节点,而且用户可以在 CoMP 协作集中的多个传输节点间随时进行传输节点的更换。三小区联合处理/传输技术模型如图 5-82 所示。

图 5-82 中,基站 1、2、3 同时为隶属于基站 3 的用户 3 提供服务,基站 1 和基站 2 为隶属于基站 1 的用户 1 提供服务。在传输节点确定之后,用户的服务基站可以选择采用联合传输或者动态小区选择来为用户提供服务。采用联合传输技术可以实现用户吞吐量的最大化,但是该技术频谱效率要比动态小区选择略低,所以基站应该根据实际系统的需要来选择

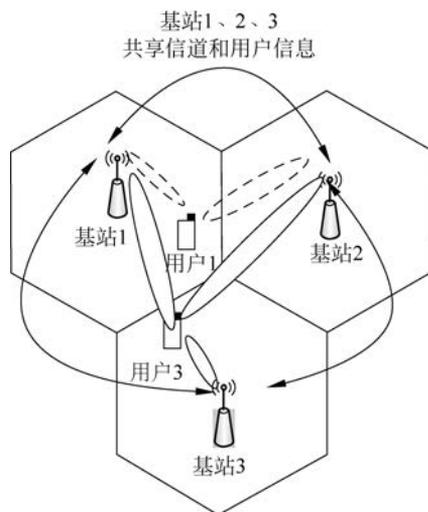


图 5-82 三小区联合处理/传输技术模型

合适的协作方式。

2) 根据协作范围的不同

根据协作范围的不同,协作式多点传输技术可分为站内协作方式和站间协作方式。当多点协作发生在一个站点内时被称为站内协作,此时由于没有回传容量限制,因此可以进行大量的信息交互。对于站内协作方式,参与协作的小区都属于同一个基站,基站拥有全部协作小区的信息,因而实现协作多点传输比较简单。

5.6.4 增强型 MIMO

1. 概述

多天线技术的增强是满足 LTE-A 峰值谱效率和平均谱效率提升需求的重要途径之一。

LTE R8 下行支持 1、2 或 4 天线进行发射,终端侧支持 2 或 4 天线进行接收,下行可支持最大 4 层传输。上行只支持终端侧单天线发送,基站侧最多 4 天线接收。LTE R8 的多天线发射模式包括开环 MIMO、闭环 MIMO、波束成形及发射分集。除了 SU-MIMO, LTE 中还采用谱效率增强的 MU-MIMO 多天线传输方式,多个用户复用相同的无线资源通过空分的方式同时传输。

LTE-A 中为提升峰值谱效率和平均谱效率,在上下行都扩充了发射/接收支持的最大天线个数,允许上行最多 4 天线 4 层发送,下行最多 8 天线 8 层发送。

通信系统上行单端口发送扩展到支持最大 4 端口的空间复用,可以实现 4 倍的单用户峰值速率。下行从 LTE4 个端口扩展到 8 个,最大支持 8 发 8 收空间复用,用户峰值速率将因此提高一倍。

2. 应用场景

(1) TDD-LTE 模式下, MIMO 的几种模式分别适用于不同的场景,按照切换的边界条件来分,从离城市中心到郊区及小区边缘,分别可以用如下传输方式布网:离基站比较近、

信号较强、靠近市中心、多径衰落较强的城市中心地区,可以使用闭环 MIMO,由于有闭环的 RI/PMI 反馈,其速率稳定、误码率较低,可以获得多天线增益,但是对边界条件要求比较严格;如果环境较为恶劣,SNR 值较低,信道相关性稍低,可以使用开环 MIMO 方式;在城市郊区较为开阔、信道相关性较高的郊区地区,依照速度的不同,选择波束赋形,波束赋形技术更可以利用 TD-LTE 系统中上/下行信道互易性,针对单个用户动态地进行波束赋形,从而有效提高传输速率和增强小区边缘的覆盖性能。以上各种模式均可切换成发射分集模式,发射分集模式的健壮性强,对速度、信道环境与 SNR 要求均不高,但是无法产生多天线速率增益,只可以享受由于多天线并行传输带来的分集增益。

(2) FDD-LTE 模式下,可以采用 4×4 或 8×8 MIMO 空分复用来提高系统容量。

本章习题

- 5-1 简述 LTE 的主要设计目标。
- 5-2 简述 LTE 的扁平化架构及特点。
- 5-3 4G 系统为何要采用 MIMO-OFDM 技术?
- 5-4 FDD-LTE 和 TDD-LTE 帧结构有什么不同?
- 5-5 简述 LTE 物理信道和物理信号。
- 5-6 LTE 系统引入循环前缀的主要作用是什么?
- 5-7 LTE 上行的 SC-FDMA 方式是采用何方式来实现多址的?为何这种方式的峰均比较 OFDM 的低?
- 5-8 对于 2×2 BLAST,假设 x_1, x_2 都是 64QAM 调制符号,请问在平坦衰落信道环境下,对于接收端来说,发送端发送的符号共有多少种可能取值?为什么?
- 5-9 简述空中分集、空间复用和波束赋形的基本原理。
- 5-10 LTE 的上、下行传输各采用了哪些传输技术,分别是基于什么来考虑的?
- 5-11 空时编码抗衰落的原理是什么?
- 5-12 空时分组码输出的码字与传统信道编码输出的码字有何关系?
- 5-13 LTE 系统的关键技术有哪些? LTE-A 系统的关键技术有哪些?这些技术都解决了哪些问题?
- 5-14 什么是 LTE 系统的跟踪区?简述其作用。
- 5-15 简述载波聚合的原理及其分类。
- 5-16 简述协作多点传输技术的原理及分类。