

本书根据作者多年移动网络优化经验，结合运营商的需求以及设备厂商优化维护人员的建议进行编写，对4G无线网络常见问题的优化思路和方法进行了重点讲解。

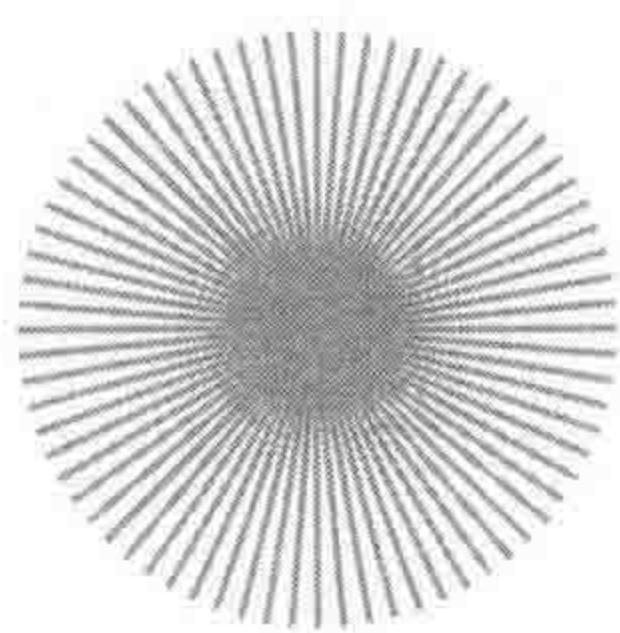
4G无线网络 原理及优化

张守国 王建斌 李曙海 沈保华 雷志纯◎编著

4G Wireless Network Principle
and Optimization

清华大学出版社

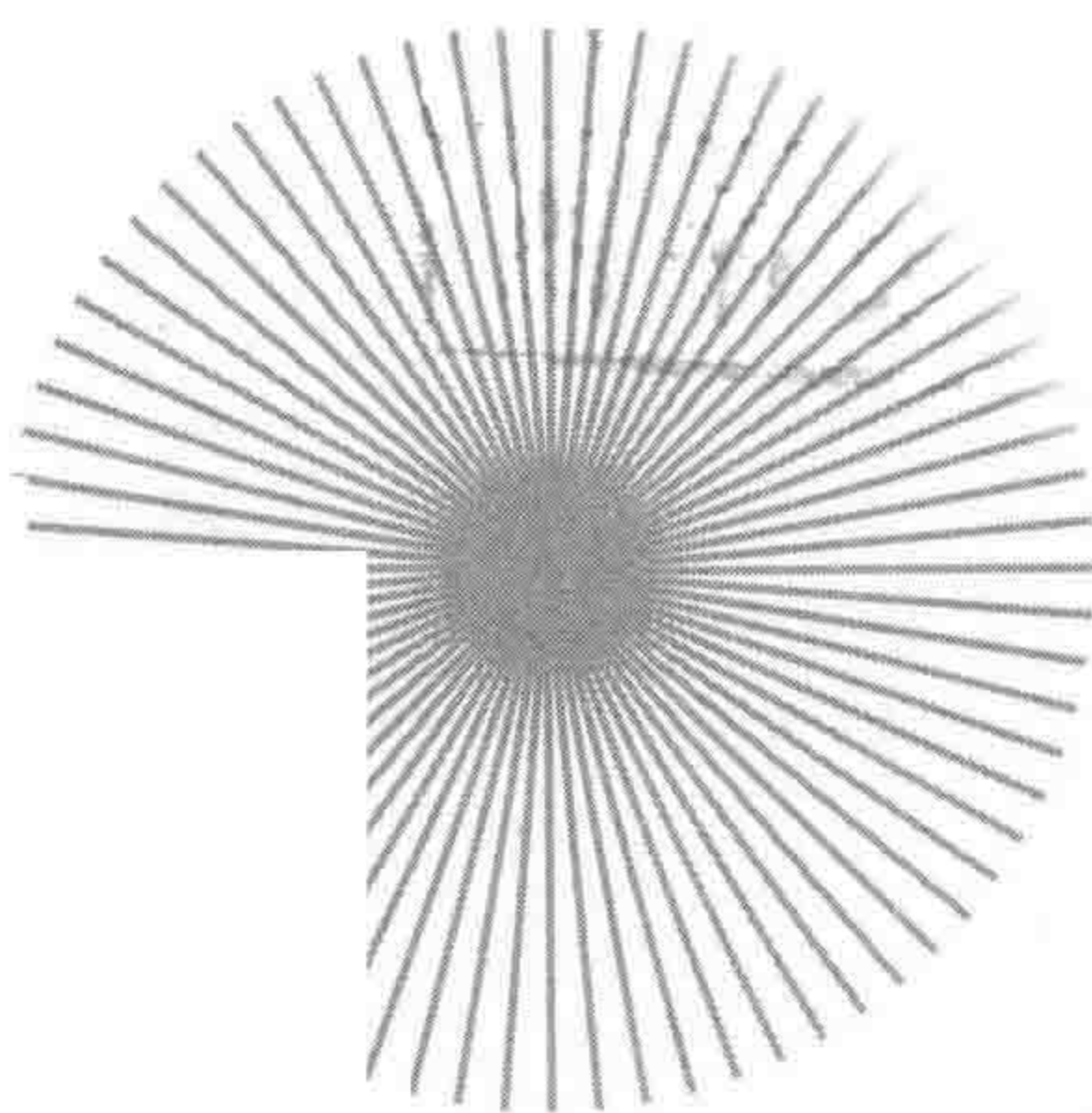
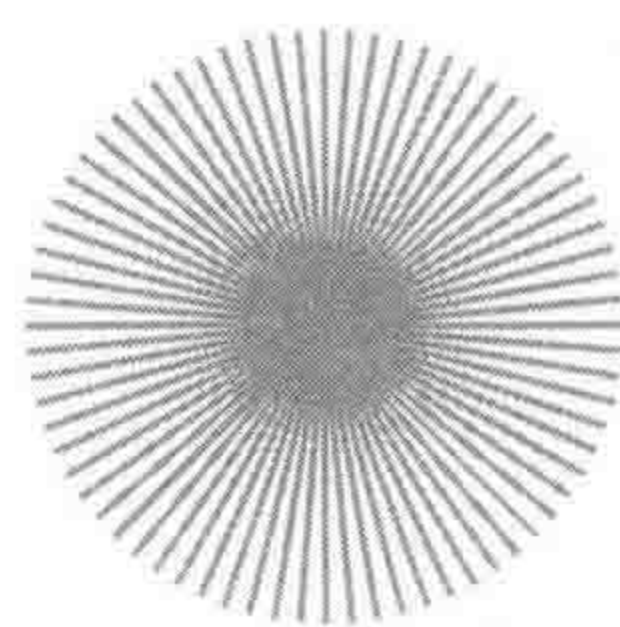




4G无线网络 原理及优化

张守国 王建斌 李曙海 沈保华 雷志纯◎编著

4G Wireless Network Principle
and Optimization



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书首先介绍 4G 网络结构、关键技术、接口协议,使得读者对 4G 基本原理有所了解。随后通过介绍信令流程和主要参数规划,使读者对移动台和网络的寻呼过程、业务建立过程、切换过程、载波聚合、CSFB、VoLTE 等信令传输过程和参数规划有比较全面的认识。接下来描述 4G 常见问题的分析思路,力求让读者在实践运用中能够举一反三。

本书根据作者多年移动网络优化经验,结合运营商的需求以及设备厂商优化维护人员的建议进行编写,对 4G 无线网络常见问题的优化思路和方法进行了重点介绍,适合于 4G 无线网络优化维护人员阅读和进阶使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

4G 无线网络原理及优化/张守国等编著. —北京:清华大学出版社,2017

ISBN 978-7-302-46476-1

I. ①4… II. ①张… III. ①第四代移动通信系统 IV. ①TN929.537

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 024815 号

责任编辑:刘 洋

封面设计:李召霞

责任校对:王荣静

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:16.5

字 数:291 千字

版 次:2017 年 5 月第 1 版

印 次:2017 年 5 月第 1 次印刷

定 价:59.00 元

产品编号:072705-01

前 言

随着中国 4G 网络的建设和完善,一张具有竞争力的 4G 网络已逐渐展开,4G 网络质量正在面临前所未有的挑战。我们需要不断优化网络,提高网络质量,建设 4G 精品网络。众所周知,网络优化是一项复杂、艰巨而又意义深远的工作。4G 网络优化工作内容与 2G、3G 网络优化既有相同点又有不同点。相同的是宏观优化思路,如都需要进行覆盖优化、干扰排查、参数调整等,不同的是具体的优化方法、优化对象和优化参数。本书结合一线 4G 网络优化维护人员需求,着重介绍了 4G 信令流程、关键消息内容、参数规划原则、问题分析思路、定位方法等。本书在内容编排时,侧重于实用性,突出了网络优化方面的内容。

本书第 1 章首先回顾了 4G 网络基本理论知识,对 4G 物理层、协议栈等进行了介绍。第 2 章介绍了主叫业务过程、被叫业务建立过程、不连续接收技术 DRX、切换过程等,对流程中相关消息和参数作了解释。第 3 章介绍了 CSFB 信令流程和常见问题优化思路,VoLTE 网络结构、功能以及信令流程。第 4 章介绍了编号规则、PCI 规划、PRACH 规划、TA 规划、邻区规划方法和原则。第 5 章介绍了常见 4G 网络问题产生原因、优化思路和流程,主要围绕 4G 网络覆盖优化、干扰分析与排查、接入问题优化、掉线优化、切换问题优化、吞吐率优化 6 个维度展开。第 6 章介绍了 4G 混合组网、系统间互操作、地铁隧道优化的总体原则。本书结合实践,对与日常优化紧密相关的基础知识进行了深入浅出的介绍,在此基础上着重对 4G 网络常见问题优化思路进行了详细描述,可以给 4G 优化维护人员遇到问题时提供参考和指导。附录部分整理了 4G 常用信令消息,方便读者查阅。

在此非常感谢参与本书编写的浙江省电信公司的李曙海、沈保华,华信咨询设计研究院有限公司的同事金江新、张建国以及参与本书校对工作的徐辉、裘哲明和曹志强等给予的帮助。同时也非常感谢浙江省电信无线网优中心经理徐绍愉、浙江移动杭州分公司网络部和华信咨询设计研究院有限公司领导给予的指导和支 持。本书责任编辑刘洋也给予了大量的修改完善建议,在此深表感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和错误之处,敬请各位读者和专家批评指正。意见和建议可反馈至本书责任编辑邮箱:liuyang_tup@163.com。

张守国

2017 年 1 月于杭州

目 录

第 1 章 网络概述	1
1.1 网络结构	2
1.2 频谱划分	5
1.3 无线帧结构	8
1.4 物理信道	13
1.5 关键技术	20
1.6 接口协议	30
1.7 无线资源管理功能	33
第 2 章 信令流程分析	35
2.1 随机接入过程	36
2.1.1 竞争模式	36
2.1.2 非竞争模式	38
2.1.3 RRC 连接建立	38
2.1.4 相关参数	39
2.2 S1 连接建立	40
2.3 RRC 连接重配置	43
2.4 专用承载建立	44
2.5 服务质量控制	50
2.5.1 QoS 参数	51
2.5.2 QoS 管理机制	53
2.6 开机入网流程	54
2.6.1 小区搜索	54
2.6.2 小区选择	55
2.6.3 小区重选	55
2.6.4 附着过程	58
2.7 业务建立流程	60
2.7.1 主叫流程	60

IV 4G 无线网络原理及优化

2.7.2 被叫流程	62
2.8 切换流程	65
2.8.1 测量事件类型	66
2.8.2 切换信令流程	71
2.8.3 主要消息内容	77
2.9 TAU 更新过程	79
2.10 CA 业务流程	83
2.11 空口主要消息	85
第 3 章 语音解决方案	96
3.1 双待机终端方案	97
3.2 CSFB 方案	97
3.3 VoLTE 方案	108
3.4 SRVCC 方案	131
第 4 章 参数规划	135
4.1 编号规则	135
4.2 PCI 规划	137
4.3 PRACH 规划	140
4.4 TA 规划	148
4.5 邻区规划	150
4.6 容量规划与优化	150
第 5 章 无线网络优化	155
5.1 优化原则	155
5.2 优化流程	156
5.3 覆盖问题优化	157
5.3.1 优化原则	158
5.3.2 优化流程	158
5.3.3 优化措施	159
5.4 干扰问题排查	160
5.4.1 干扰来源	160
5.4.2 排查方法	163

5.4.3	规避方案	166
5.5	接入性能优化	168
5.5.1	指标定义	168
5.5.2	分析思路	169
5.5.3	优化流程	171
5.6	掉线率优化	175
5.6.1	指标定义	175
5.6.2	分析思路	176
5.6.3	优化流程	177
5.7	切换性能优化	179
5.7.1	指标定义	179
5.7.2	分析思路	182
5.7.3	优化流程	183
5.8	吞吐率优化	184
5.8.1	指标定义	184
5.8.2	分析思路	185
5.8.3	优化流程	188
5.8.4	Iperf 工具使用方法	190
5.9	常用小区参数	193
5.9.1	小区选择与重选	193
5.9.2	切换控制	197
5.9.3	功率控制	202
5.9.4	定时器	206
5.10	常用统计项分类	208
5.11	典型案例分析	210
第 6 章	特殊场景优化	223
6.1	FDD 和 TDD 混合组网与优化	223
6.2	LTE 与 2G/3G 互操作策略	224
6.3	地铁隧道优化	227
附录	LTE 常用信令消息	232
参考文献	255

第 1 章

网络概述

LTE^①是由 3GPP 组织制定的 UMTS 技术标准的长期演进,于 2004 年 12 月在多伦多召开的 3GPP TSG RAN#26 会议上正式立项并启动。LTE 系统引入了 OFDM 和 MIMO 等关键传输技术,显著增加了频谱效率和数据传输速率,并支持 1.4MHz、3MHz、5MHz、10MHz、15MHz 和 20MHz 等多种带宽分配,且支持全球主流 2G/3G 频段和一些新增频段,因而频谱分配更加灵活,系统容量显著提升。LTE 系统网络架构更加扁平化、简单化,减少了网络节点和系统复杂度,从而减小了系统时延,改善了用户体验,可开展更多业务,降低了网络部署和维护成本。

LTE 系统有两种制式: FDD-LTE 和 TDD-LTE,即频分双工 LTE 系统和时分双工 LTE 系统。LTE TDD 和 LTE FDD 相比,主要差别在于空中接口的物理层上, FDD-LTE 系统空口上下行传输采用一对对称的频段接收和发送数据,而 TDD-LTE 系统上下行则使用相同的频段在不同的时隙上传输。高层信令除了 MAC 和 RRC 层有少量差别外,其他方面基本一致。表 1-1 为 LTE TDD 和 LTE FDD 的主要技术对比。

表 1-1 LTE TDD 和 LTE FDD 技术对比

名 称	时分双工(LTE TDD)	频分双工(LTE FDD)
信道带宽配置灵活	1.4、3、5、10、15、20	1.4、3、5、10、15、20
多址方式	DL: OFDMA; UL: SC-FDMA	DL: OFDMA; UL: SC-FDMA
编码方式	卷积码、Turbo 码	卷积码、Turbo 码
调制方式	QPSK、16QAM、64QAM	QPSK、16QAM、64QAM
功控方式	开闭环结合	开闭环结合
语音解决方案	CSFB/SRVCC	CSFB/SRVCC

^① 特别说明,本书书名中的 4G,指代的就是此处介绍的 LTE。

续表

名称	时分双工(LTE TDD)	频分双工(LTE FDD)
帧结构	Type2	Type1
子帧上下行配置	多种子帧上下行配比组合	子帧全部上行或下行
重传(HARQ)	进程数与延时随上下行配比不同而不同	进程数与延时固定
同步	主辅同步信号符号位置不连续	主辅同步信号位置连续
天线	自然支持 AAS	不能很方便地支持 AAS
波束赋形	支持(基于上下行信道互易性)	未商用(无上下行信道互易性)
随机接入前导	Format 0~4,且一个子帧中可以传输多个随机接入资源	Format 0~3
参考信号	DL: 支持 UE 专用 RS 和小区专用 RS; UL: 支持 DMRS 和 SRS,SRS 可以位于 UpPTS 信道	DL: 仅支持小区专用 RS; UL: 支持 DMRS 和 SRS,SRS 位于业务子帧中
MIMO 模式	支持 TM1~TM8,常用 TM2,3,7,8	支持 TM1~TM6,常用 TM2,3

1.1 网络结构

LTE 系统架构分两部分,包括演进后的核心网(EPC)和演进后的接入网(E-UTRAN),EPC 和 E-UTRAN 合在一起称为演进后的分组系统(EPS)。演进后的接入网由 eNodeB 组成,去掉了 2G/3G 中的 BSC/RNC 功能实体,以减少用户面和控制面的时延。演进后的分组核心网(EPC)主要包括移动管理实体(MME)、业务网关(Serving GW)、分组数据网关(PDN GW)、归属用户服务器(HSS)和策略与计费规则功能单元(PCRF)。EPS 的网络结构如图 1-1 所示。

LTE 核心网引入 MME 和 Serving GW 后,实现了用户面与控制面的分离。控制面信令流和用户面数据流路由如图 1-2 所示。

eNodeB: 提供到 UE 的 E-UTRA 控制面与用户面的协议终止点,eNodeB 具有现有 NodeB 全部和 RNC 大部分的功能;具备移动性管理功能、无线资源管理功能、空口数据传输、寻呼消息调度与传输、系统广播消息调度与传输、NAS 节点选择功能、安全功能、QoS 功能、SON 功能。eNodeB 和 UE 之间的接口为 Uu 接口,eNodeB 之间通过 X2 接口连接,eNodeB 与 EPC 之间通过 S1 接口连接。S1 接口又分为 S1-MME 和 S1-U 两类,其中 S1-U 为 eNodeB 与 S-GW 的用户面接口,S1-MME 为 eNodeB 与 MME 的控制面接口,采用 S1-AP 协议,类似于 UMTS 网络中的无线网络层的控制部分,主要完成 S1 接口的无线接入承载控制、操作维护等功能。

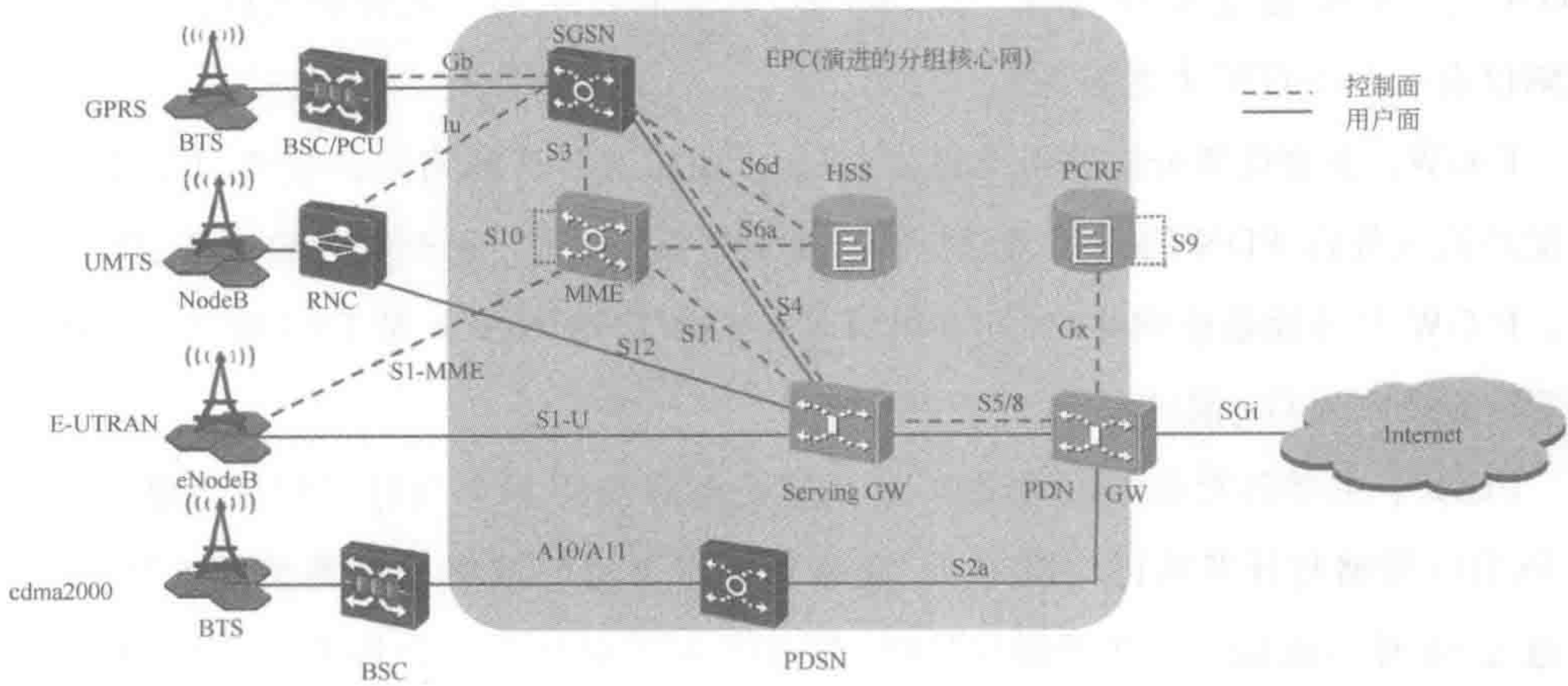


图 1-1 EPS 网络结构

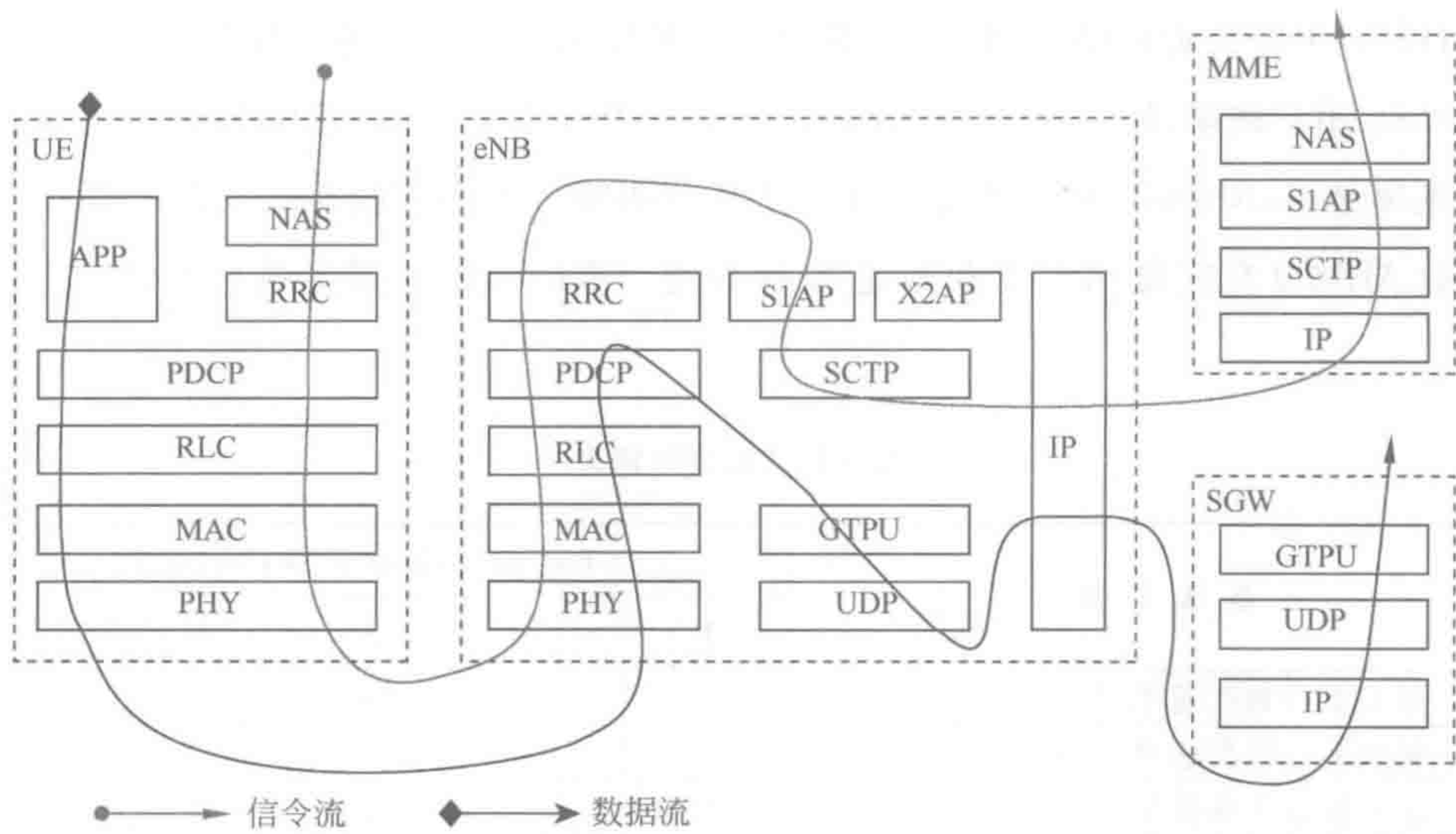


图 1-2 控制面和用户面分离

MME: 信令实体, 主要负责移动性管理、会话管理、用户鉴权和密钥管理、NAS 层信令的加密和完整性保护、TA List 管理、S-GW 选择、漫游控制、合法监听。MME 之间通过 S10 接口连接, MME 与 S-GW 通过 S11 接口连接, MME 与 HSS 通过 S6a 接口连接。

S-GW: 主要负责 UE 用户面处理、路由和数据的转发、3GPP 定义的不同接入方式间的接入、eNodeB 间切换、分组路由和转发功能、IP 头压缩、IDLE 态终结点、下行数据缓存、基于用户和承载的计费、路由优化和用户漫游时 QoS 和计费策略实现功能。

S-GW 与 P-GW 通过 S5/8 连接。除切换外,对于每个与 EPS 系统相关联的 UE,每个时刻仅有一个 S-GW 为之服务。

P-GW: 主要负责分组路由和转发、3GPP 和非 3GPP 网络间的锚点、UE IP 地址分配及接入外部 PDN 的网关、计费 and QoS 策略执行功能、基于业务的计费、PCRF 选择。P-GW 和外面数据网络(如互联网、IMS 等)的接口为 SGi,是 EPS 锚点,P-GW 和 PCRF 的接口为 Gx 接口。

PCRF: 主要负责业务数据流和 IP 承载资源的 QoS 策略与计费控制策略的制定,为 PCRF(策略与计费执行功能单元)选择及提供可用的策略和计费控制决策,PCRF 间通过 S9 接口连接。在非漫游场景时,在 HPLMN 中只有一个 PCRF 跟 UE 的 IP 连接访问网络(IP-CAN)会话相关。在漫游场景时,并且业务流量 Local Breakout 时,有两个 PCRF 跟一个 UE 的 IP-CAN 会话相关。

HSS: 主要负责存储 LTE/SAE 网络中用户所有与业务相关的数据。

UE: 用户终端,Release 8 和 Release 9 版本中分 5 个等级,其中等级 5 终端能提供的速率最高,Release 10 版本新增加 3 个终端等级。不同等级终端支持的调制方式和接收 MIMO 空间复用的层数量也有所不同。不同 UE 等级支持的功能如表 1-2 所示。

表 1-2 UE 类型定义

基本参数	UE 类别(Release 8 和 Release 9)				
	1	2	3	4	5
最大下行数据速率(Mbit/s)	10	50	100	150	300
最大上行数据速率(Mbit/s)	5	25	50	50	75
所需接收天线数量	2	2	2	2	4
所支持的下行 MIMO 流的数量	1	2	2	2	4
下行对 64QAM 的支持	√	√	√	√	√
上行对 64QAM 的支持	×	×	×	×	√
基本参数	UE 类别(Release 10)				
	6	7	8		
最大下行数据速率(Mbit/s)	300	300	3 000		
最大上行数据速率(Mbit/s)	50	100	1 500		
下行支持的 MIMO 层数	2,4	2,4	8		
上行支持的 MIMO 层数	1,2,4	1,2,4	4		
下行对 64QAM 的支持	√	√	√		
上行对 64QAM 的支持	×	×	√		

1.2 频谱划分

LTE 支持全球 2G/3G 主流频段,同时支持一些新增频段。目前 LTE 在不同频带的一个较宽的范围内作定义,每一个频带都具有一个或多个独立的载波。对于 FDD,实际上并没有定义双工分离,而是典型的上下行一对载波处于它们各自频带一个相似位置。LTE 的频段定义如表 1-3 所示。

表 1-3 LTE 频段定义

频段	上行(MHz)	下行(MHz)	模式
1	1 920~1 980	2 110~2 170	FDD
2	1 850~1 910	1 930~1 990	
3	1 710~1 785	1 805~1 880	
4	1 710~1 755	2 110~2 155	
5	824~849	869~894	
6	830~840	875~885	
7	2 500~2 570	2 620~2 690	
8	880~915	925~960	
9	1 749.9~1 784.9	1 844.9~1 879.9	
10	1 710~1 770	2 110~2 170	
11	1 427.9~1 447.9	1 475.9~1 495.9	
12	698~716	728~746	
13	777~787	746~756	
14	788~798	758~768	
17	704~716	734~746	
18	815~830	860~875	
19	830~845	875~890	
20	832~862	791~821	
21	1 447.9~1 462.9	1 495.9~1 510.9	
24	1 626.5~1 660.5	1 525~1 559	
33	1 900~1 920	1 900~1 920	TDD
34	2 010~2 025	2 010~2 025	
35	1 850~1 910	1 850~1 910	
36	1 930~1 990	1 930~1 990	
37	1 910~1 930	1 910~1 930	
38	2 570~2 620	2 570~2 620	
39	1 880~1 920	1 880~1 920	
40	2 300~2 400	2 300~2 400	
41	2 496~2 690	2 496~2 690	
42	3 400~3 600	3 400~3 600	
43	3 600~3 800	3 600~3 800	

注:频段 6 没有被使用。

对于这些频段来说,物理层规范和许多 RF 要求是相同的,但针对 UE RF 规范,这条规则存在一些例外情况。另外,由于基站限制条件非常少,因而通常以一种频段不可知的方式对 eNodeB 射频(RF)要求进行定义。即使出现新的要求,增加 LTE 频段也很容易,且只会影响到 RF 规范的独立部分。

LTE 承载带宽是根据信道带宽(BW_{Channel})和传输带宽配置(N_{RB})理论进行定义,如图 1-3 所示。

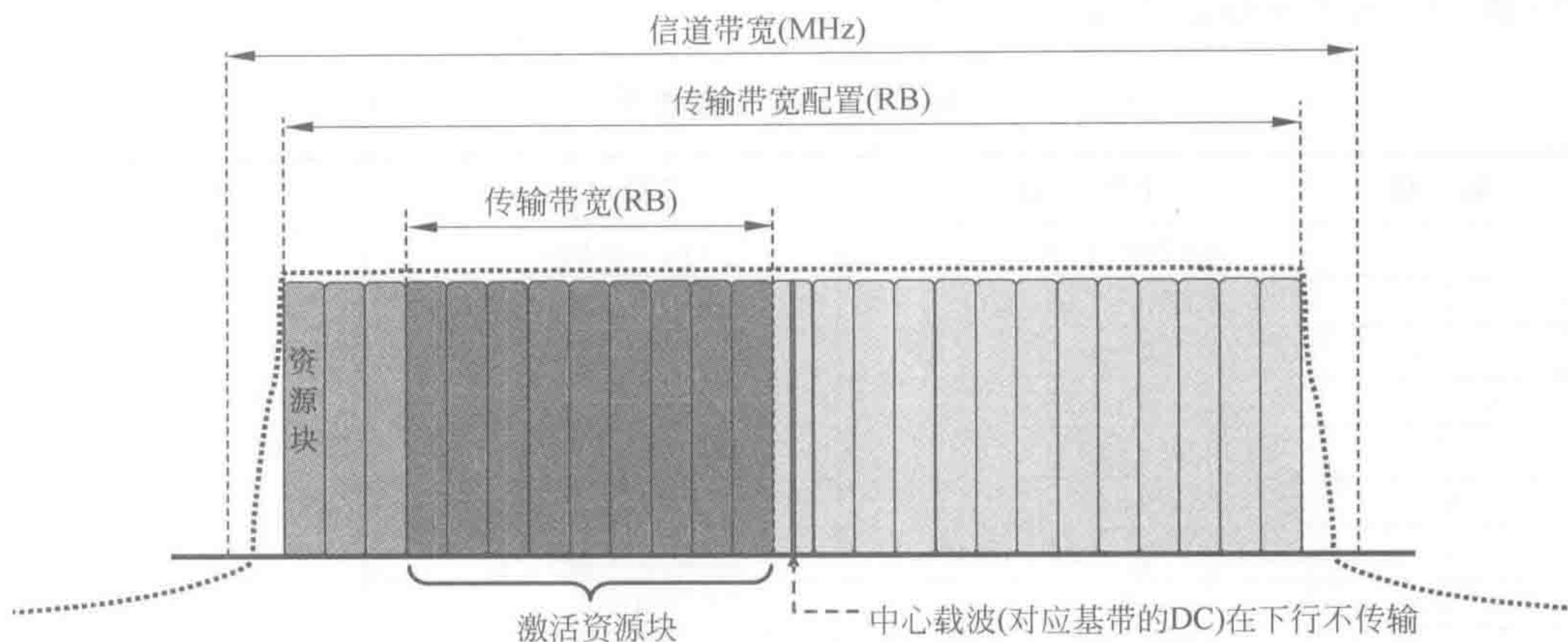


图 1-3 信道带宽和传输带宽配置的定义

传输带宽配置(N_{RB})定义为在 LTE 信道中分配的最大资源块(RB)数。一个资源块(RB)包含 12 个子载波,它占用 180kHz 的标称带宽。尽管规范支持传输带宽配置(N_{RB})采用 $6 \leq N_{\text{RB}} \leq 110$ 范围内的任何值,可是所有 RF 要求只能使用表 1-4 中定义的值。

表 1-4 LTE 信道带宽中的传输带宽配置(N_{RB})

信道带宽 BW_{Channel} (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
传输带宽配置 N_{RB}	6	15	25	50	75	100

不是所有 LTE 频段与信道带宽的组合方案都是有意义的。表 1-5 给出了标准所支持的组合,这些组合是建立在来自于运营商的输入基础上。需要注意的是,在表 1-5 中,如果方案具有较高的信道带宽,则标准会在更多的可用频谱内支持该方案。例如,在频段 1、2、3、4 内,标准支持带宽为 20MHz 的 LTE;但在频段 5 和频段 8 内,标准不支持带宽为 20MHz 的 LTE。反过来,当 LTE 的信道带宽低于 5MHz 时,标准会在较少的可用频谱(如频段 5 和频段 8)内支持该方案,或者在具有 2G 迁移场景的频段(如频段 2、5、8)内支持该方案。

表 1-5 标准所支持的具有标准灵敏度(“X”)和松弛灵敏度(“O”)的传输带宽

频段	1.4MHz	3MHz	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
1			X	X	X	X
2	X	X	X	X	O	O
3	X	X	X	X	O	O
4	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	O		
6			X	O		
7			X	X	X	O
8	X	X	X	O		
9			X	X	O	O
10			X	X	X	X
11			X	O	O	O
12						
13	X	X	O	O		
14	X	X	O	O		
17						
...						
33			X	X	X	X
34			X	X	X	X
35	X	X	X	X	X	X
36	X	X	X	X	X	X
37			X	X	X	X
38			X	X		
39			X	X	X	X
40				X	X	X
41			X	X	X	X
42			X	X	X	X
43			X	X	X	X

表 1-6 为目前国内各运营商频率使用情况。

表 1-6 国内各运营商频率使用情况

运营商	上行频率(MHz)	下行频率(MHz)	制式
中国移动	880~890	925~935	EGSM900
	890~909	935~954	GSM900
	1 710~1 735	1 805~1 830	GSM 1800
	1 880~1 900	1 880~1 900	TD-SCDMA/TD-LTE[F]
	2 010~2 025	2 010~2 025	TD-SCDMA[A]
	2 320~2 370	2 320~2 370	TDD LTE[E]
	2 575~2 635	2 575~2 635	TDD LTE[D]

续表

运营商	上行频率(MHz)	下行频率(MHz)	制式
中国电信	824~825	869~870	CDMA800
	825~835	870~880	CDMA800
	1 920~1 935	2 110~2 125	FPD LTE
	2 370~2 390	2 370~2 390	TDD LTE
	2 635~2 655	2 635~2 655	TDD LTE
中国联通	909~915	954~960	GSM900
	1 735~1 755	1 830~1 850	GSM1800
	1 940~1 955	2 130~2 145	UMTS 2.1G
	2 300~2 320	2 300~2 320	TDD LTE
	2 555~2 575	2 555~2 575	TDD LTE

对 LTE 而言上、下行载波频率用绝对频点 EARFCN 表示,取值范围为 0~65 535。绝对频点 EARFCN 计算公式如下:

$$F_{DL} = F_{DL_low} + 0.1 \times (N_{DL} - N_{Offs-DL})$$

$$F_{UL} = F_{UL_low} + 0.1 \times (N_{UL} - N_{Offs-UL})$$

式中, F_{DL} 、 F_{UL} 分别为下行和上行中心频率, N_{DL} 、 N_{UL} 分别为下行和上行绝对频点。详细描述可参考 3GPP 36.104。LTE 常用频带和绝对频点对应关系如表 1-7 所示。

表 1-7 常用频带和频点对应关系

频段	下行			上行		
	起始频率 F_{DL_low} (MHz)	起始频点 $N_{Offs-DL}$	频点范围 N_{DL}	起始频率 F_{UL_low} (MHz)	起始编号 $N_{Offs-UL}$	频点范围 N_{UL}
33	1 900	36 000	36 000~36 199	1 900	36 000	36 000~36 199
34	2 010	36 200	36 200~36 349	2 010	36 200	36 200~36 349
35	1 850	36 350	36 350~36 949	1 850	36 350	36 350~36 949
36	1 930	36 950	36 950~37 549	1 930	36 950	36 950~37 549
37	1 910	37 550	37 550~37 749	1 910	37 550	37 550~37 749
38[D]	2 570	37 750	37 750~38 249	2 570	37 750	37 750~38 249
39[F]	1 880	38 250	38 250~38 649	1 880	38 250	38 250~38 649
40[E]	2 300	38 650	38 650~39 649	2 300	38 650	38 650~39 649

1.3 无线帧结构

LTE 分 TDD 和 FDD 两种不同的双工方式,分别对应不同的无线帧结构。FDD 采用频率来区分上、下行,其单方向的资源在时间上连续;而 TDD 则采用时间来区分

上、下行,其单方向的资源在时间上不连续,而且需要保护时间间隔,避免两个方向之间的收发干扰,所以 LTE 分别为 FDD 和 TDD 设计了各自的帧结构。

FDD-LTE 帧是长度为 10ms 的无线帧,由 10 个长度为 1ms 的子帧组成,每个子帧由两个长度为 0.5ms 的时隙构成,每个时隙内含有 7 个 OFDM 符号(常规 CP)或 6 个 OFDM 符号(扩展 CP),时域的基本单位 $T_s = 1/(15\,000 \times 2\,048)s = 32.55\mu s$,基带采样率 $f_s = 1/T_s = 30.72\text{MHz}$,LTE 的采样率分别是 WCDMA 的采用率(3.84MHz)和 TD-SCDMA 的采样率(1.28MHz)的 8 倍和 24 倍,简化了 WCDMA/TD-SCDMA/LTE 多模终端的设计,因为多模终端可以直接使用同一个时钟电路实现,降低了系统的复杂度。FDD-LTE 帧结构如图 1-4 所示。

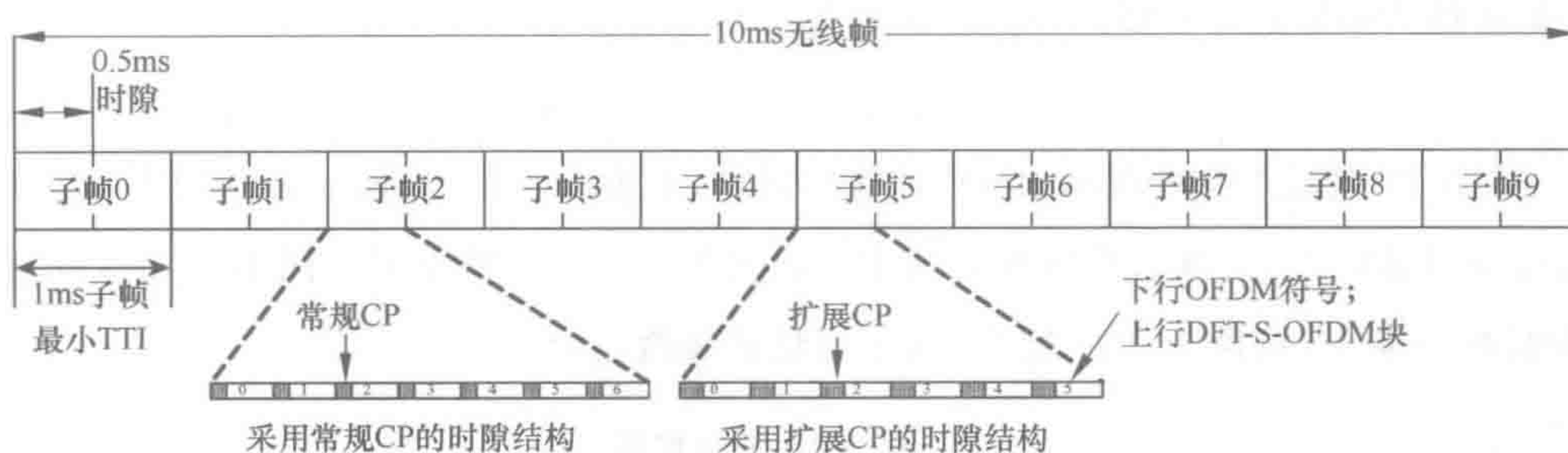


图 1-4 FDD-LTE 帧结构

LTE 时隙(0.5ms)的详细结构如图 1-5 所示。每个时隙由一定数量的 OFDM 符号加上相应的循环前缀(CP)组成,OFDM 的符号时间定义为可用符号时间和循环前缀的长度之和。LTE 系统定义了两种循环前缀(CP),即常规 CP 和扩展 CP,分别相当于每个时隙有 7 个和 6 个 OFDM 符号。在常规 CP 中,每个时隙的第一个 OFDM 符号的 CP 比其余 OFDM 符号的 CP 长,这样做是为了将 0.5ms 的时隙完全填充,因为一个时隙的时间单位 T_s 数(15 360)不能被 7 整除。

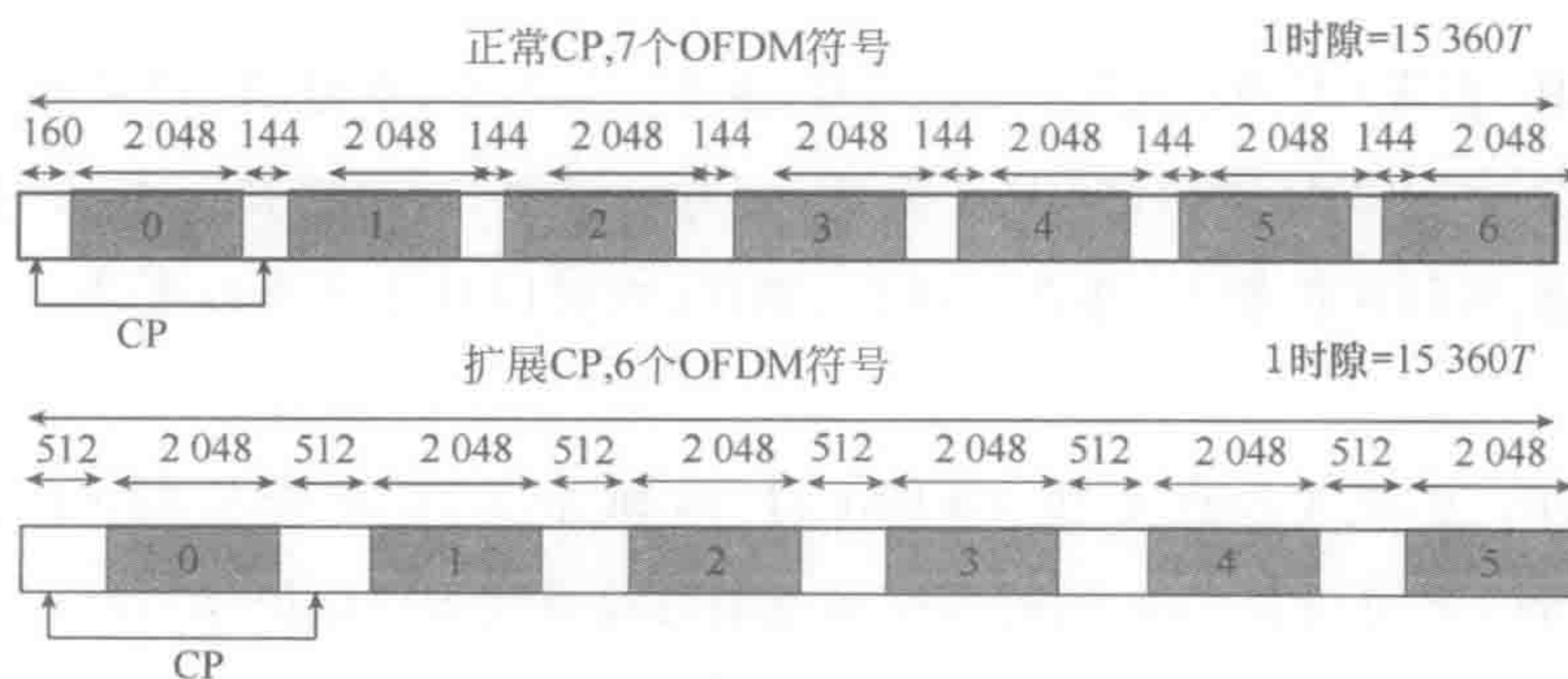


图 1-5 LTE 时隙结构

LTE 系统定义了两种 CP,主要有以下两个方面的原因。第一,虽然从总体的开销上来说扩展 CP 的效率更低,但在具有很大时延扩展的环境中,例如,在覆盖范围很大的小区中,长的 CP 对信道的估计更为准确;第二,在基于 MBSFN 的多播/广播传输中,CP 不仅应覆盖传输信道的大部分时延扩展,还应能够屏蔽由于不同基站传输所带来的时间差异,因此,在 MBSFN 系统的实际操作中,也需要额外的 CP。因此,LTE 系统的扩展 CP 主要用于 MBSFN 的传输,而不同的 CP 可以用在一帧内不同的子帧中。

在系统设计时,要求 CP 长度大于无线信道的最大时延扩展,而时延扩展与小区半径和无线信道传播环境相关。通常用均方根(Root Mean Square,RMS)多径延迟扩展 τ_{rms} 来描述功率延迟分布情况, τ_{rms} 公式定义如下。

$$\tau_{\text{rms}} = T_1 d^\epsilon y$$

其中 T_1 表示 1 公里距离 RMS 时延扩展值, d 表示小区半径, y 表示阴影衰落余量,多径时延扩展 τ_{rms} 随着小区半径的增加而增加。表 1-8 给出了不同小区半径 d ,在 4 种传播环境下,包含 90% 能量的 RMS 时延扩展值(μs)。

表 1-8 RMS 时延扩展

		不同小区半径 $d(\text{km})$ 下,包含 90% 能量 RMS 时延扩展值(μs)			
		市区	郊区	农村	山区
环境		$T_1=1.0,$ $\epsilon=0.5,$ $\sigma_y=2.0\text{dB}$	$T_1=0.3,$ $\epsilon=0.5,$ $\sigma_y=2.0\text{dB}$	$T_1=0.1,$ $\epsilon=0.5,$ $\sigma_y=2.0\text{dB}$	$T_1=0.5,$ $\epsilon=1.0,$ $\sigma_y=2.0\text{dB}$
小区半径, $d(\text{km})$	3	2.5	0.8	0.25	1.9
	5	3.2	1.0	0.32	3.2
	10	4.6	1.4	0.46	6.3

注: σ_y 表示阴影衰落标准差。

正常 CP: 正常 CP 有 7 个 OFDM 符号,第 1 个 OFDM 符号的 CP 长度是 $5.21\mu\text{s}$,第 2 个到第 7 个 OFDM 符号的 CP 长度是 $4.69\mu\text{s}$,正常 CP 可以在 1.4km 的时延扩展范围内提供抗多径保护能力,适合于市区、郊区、农村以及小区半径低于 5km 的山区环境。

扩展 CP: 扩展 CP 有 6 个 OFDM 符号,每个 OFDM 符号的 CP 长度均是 $16.67\mu\text{s}$,扩展 CP 可以在 5km 的时延扩展范围内提供抗多径保护能力,适合于覆盖距离大于 5km 的山区环境及需要超远距离覆盖的海面和沙漠等环境。

TDD-LTE 帧结构也是一个长度为 10ms 的无线帧,由两个 5ms 的半帧构成,每个