



高等职业教育“十三五”规划教材

LTE YIDONG WANGLUO  
GUIHUA YU YOUHUA

# LTE 移动网络 规划与优化

主编 杨燕玲



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)



高等职业教育“十三五”规划教材

# LTE 移动网络规划与优化

主编 杨燕玲



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

## 内 容 简 介

本书全面、系统地阐述了第四代移动通信系统中LTE移动网络规划与优化的技术和方法。LTE包括FDD和TDD两种模式,是目前中国第四代移动通信系统的主流技术。

本书共5章,包括LTE标准与关键技术、LTE基本原理、LTE移动网络规划、LTE移动网络优化和第五代移动通信等内容。本书紧密结合当前4G网络规划与优化的需求,具有较强的实用性及系统性。

本书可作为高职高专院校通信技术、移动通信技术、通信工程设计与监理、电子信息等专业的“LTE移动网络规划与优化”课程的教材,也可作为相关培训教材,还可作为通信行业工程技术和维护人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

LTE移动网络规划与优化 / 杨燕玲主编. -- 北京 : 北京邮电大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5635-5588-8

I. ①L… II. ①杨… III. ①无线电通信—移动网—高等教育—教材 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第206246号

---

书 名: LTE移动网络规划与优化  
著作责任者: 杨燕玲 主编  
责任编辑: 徐振华 孙宏颖  
出版发行: 北京邮电大学出版社  
社 址: 北京市海淀区西土城路10号(邮编:100876)  
发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578  
E-mail: publish@bupt.edu.cn  
经 销: 各地新华书店  
印 刷:  
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16  
印 张: 10.75  
字 数: 264千字  
版 次: 2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷

---

ISBN 978-7-5635-5588-8

定 价: 25.00元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

# 前 言

由于移动通信技术的发展和市场需求的推动,我国的信息产业在过去的几年中发生了翻天覆地的变化。短短二十多年,从 2G、3G、4G,直至目前正在加速研究和推动进程的 5G,中国已经从原来的技术跟随者和被动接受者,变成国际标准的引领者和主导者。

目前,中国电信、中国移动、中国联通三大运营商基本完成或正在完成移动通信网络的升级换代,2G、3G 正在逐步退出历史舞台,LTE 网络已经成为目前中国的主流通信技术承载网络。LTE 网络的建设已经开始从覆盖重点区域发展到广覆盖的阶段,LTE 网络建设的加速推进和大规模发展急需大量的网络规划和优化人才。

在网络建设前期,网络规划工作根据无线接入网的技术特点、射频要求、无线传播环境等条件,运用一系列规划方法,设计出合适的基站位置、基站参数、系统参数等,以满足网络覆盖、容量和质量等方面的要求。在网络运营中,需要持续进行网络优化工作,根据系统的实际表现和实际性能,对系统进行分析,通过对网络资源和系统参数的调整,使系统性能逐步得到改善,达到系统现有配置条件下的最优服务质量。因此,网络规划与优化是 LTE 网络建设和运营过程中的重要工作内容,通信专业人员必须掌握网络规划与优化的知识与方法。

目前,LTE 移动网络规划与优化已经成为移动通信领域的一门核心课程,是通信技术专业、移动通信技术专业、通信工程设计与监理专业等的必修课,各高职院校通信类专业都已经开设了相关课程,通过该课程的学习,可以使学生进一步加深对移动通信的理解,培养学生无线通信网络规划与优化方面的专业素养。

本书内容翔实丰富,循序渐进,以 LTE 网络规划与优化为主要内容,以目前市场主流技术 LTE 为对象,将无线网络规划与优化的基本理论、实际的网络规划和网络优化经验与 LTE 技术相结合,详细地介绍了 LTE 移动网络的规划与优化的理论与方法。

本书可作为高职高专院校电子信息、通信技术等专业教材,也可作为从事通信系统建设、网络规划设计、网络优化等通信工程领域相关技术人员的参考书。

# 目 录

<b>第 1 章 LTE 标准与关键技术</b> .....	1
1.1 移动通信技术发展与 LTE 标准演进 .....	1
1.1.1 移动通信发展简史 .....	1
1.1.2 LTE 标准及其演进 .....	5
1.2 LTE 关键技术 .....	6
1.2.1 多址接入 .....	6
1.2.2 多入多出 .....	10
1.2.3 高阶调制 .....	14
1.2.4 HARQ .....	15
1.2.5 干扰抑制技术 .....	17
1.2.6 语音解决方案 .....	21
1.2.7 SON .....	25
1.3 LTE 频谱资源 .....	27
1.3.1 世界无线电通信大会规划的移动通信频谱 .....	27
1.3.2 3GPP 确定的 LTE 频段 .....	28
1.3.3 我国 LTE 频谱 .....	30
习题与思考 .....	30
<b>第 2 章 LTE 基本原理</b> .....	31
2.1 LTE 系统架构 .....	31
2.1.1 LTE 系统网络架构 .....	31
2.1.2 E-UTRAN 与 EPC 的功能划分 .....	32
2.2 LTE 协议栈 .....	34
2.2.1 整体协议栈 .....	34
2.2.2 无线接口协议栈 .....	35
2.2.3 其他接口协议栈 .....	36
2.3 帧结构 .....	38
2.3.1 LTE 帧结构 .....	38
2.3.2 TDD 特殊时隙结构 .....	38

2.4	物理资源	40
2.4.1	物理资源块	40
2.4.2	下行资源分配	41
2.4.3	上行资源分配	42
2.4.4	上下行分布式传输的区别	43
2.5	信道映射	43
2.6	物理过程	47
2.6.1	小区搜索过程	47
2.6.2	同步保持过程	48
2.6.3	随机接入过程	48
2.6.4	功率控制过程	49
2.6.5	数据传输过程	50
2.6.6	切换过程	51
2.7	无线资源管理	52
2.7.1	资源分配	52
2.7.2	接纳控制	54
2.7.3	负荷均衡	56
2.8	LTE 两种制式的对比	57
2.8.1	系统设计差异	57
2.8.2	关键过程差异	60
2.8.3	TD-LTE 与 LTE FDD 的对比	61
	习题与思考	62
<b>第 3 章</b>	<b>LTE 移动网络规划</b>	<b>64</b>
3.1	总体规划流程	64
3.2	需求分析	65
3.2.1	网络指标要求	65
3.2.2	网络规划建设策略	66
3.2.3	业务需求分析	69
3.3	现网站址资源分析	72
3.4	覆盖估算	72
3.4.1	覆盖特性及目标设定	73
3.4.2	链路预算	75
3.4.3	覆盖规划	78
3.5	频率规划	79
3.5.1	同频组网	79
3.5.2	异频组网	80
3.5.3	频率偏移频率复用	80

3.6	子帧规划	81
3.7	站型配置	81
3.8	容量配置	82
3.8.1	LTE 容量特性	82
3.8.2	LTE 容量影响因素	86
3.8.3	LTE 容量规划	91
3.9	站址规划	92
3.9.1	总体建设原则	92
3.9.2	选址要点	93
3.10	LTE 系统仿真	94
3.10.1	移动通信信号传播	94
3.10.2	传播模型校正	96
3.10.3	仿真方法	97
3.11	无线资源与参数规划	98
3.11.1	邻区规划	98
3.11.2	PCI 规划	99
3.11.3	TA 规划	99
3.12	规划结论	101
3.13	网络规划实例	101
3.13.1	需求分析	101
3.13.2	预规划	102
3.13.3	仿真分析	104
3.13.4	规划结论	107
	习题与思考	107
<b>第 4 章</b>	<b>LTE 移动网络优化</b>	<b>108</b>
4.1	网络优化目标	108
4.1.1	网络优化的意义	108
4.1.2	覆盖、容量、质量的平衡	109
4.2	网络覆盖方式	109
4.2.1	宏基站	110
4.2.2	室内分布系统及室分外拉	111
4.2.3	微小站	115
4.2.4	分布式皮/飞基站	116
4.2.5	直放站	117
4.2.6	应急通信车	118
4.3	常用网络优化工具及其使用	119
4.3.1	测试软件	119
4.3.2	扫频仪	122

4.3.3	Site Master .....	123
4.3.4	地图软件 .....	125
4.4	LTE 网络工程优化 .....	127
4.4.1	工程优化的内容 .....	127
4.4.2	工程优化的流程 .....	129
4.5	网络优化思路及流程 .....	131
4.5.1	网络优化思路 .....	131
4.5.2	网络优化流程 .....	132
4.6	后台分析与优化 .....	133
4.6.1	常见后台指标 .....	133
4.6.2	后台分析与优化的思路及方法 .....	137
4.6.3	后台优化案例分析 .....	138
4.7	前台网络问题分析与优化 .....	141
4.7.1	前台常见网络问题 .....	141
4.7.2	前台分析与优化的思路及方法 .....	141
4.7.3	前台网络问题优化案例分析 .....	143
4.8	网络优化常见问题及优化方法 .....	145
4.8.1	覆盖优化 .....	145
4.8.2	切换优化 .....	146
4.8.3	掉话优化 .....	151
	习题与思考 .....	152
<b>第 5 章</b>	<b>第五代移动通信 .....</b>	<b>153</b>
5.1	5G 的概念 .....	153
5.2	5G 关键技术 .....	154
5.2.1	大规模天线阵列 .....	155
5.2.2	高效空口多址接入 .....	155
5.2.3	新型信道编码 .....	157
5.2.4	同频同时全双工 .....	158
5.2.5	终端间直通传输 .....	161
	习题与思考 .....	162

# 第 1 章 LTE 标准与关键技术

## 【本章内容简介】

长期演进(Long Term Evolution, LTE)包括 FDD 和 TDD 两种模式,是目前中国第四代移动通信系统的主流技术。本章主要介绍移动通信技术发展与 LTE 标准演进、多址接入、MIMO、高阶调制、HARQ、干扰抑制、语音解决方案、SON 等关键技术。

## 【本章重点难点】

LTE 标准及其演进、多址接入、MIMO、高阶调制、HARQ。

## 1.1 移动通信技术发展 with LTE 标准演进

### 1.1.1 移动通信发展简史

1897 年,意大利电气工程师伽利尔摩·马可尼(Guglielmo Marconi, 1874—1937 年)在陆地和一只拖船之间用无线电进行了消息传输,移动通信从此诞生。但是移动通信真正的繁荣是从 20 世纪 70 年代末开始的,从第一代模拟蜂窝网电话系统、第二代数字蜂窝网电话系统、第三代移动通信系统,到目前商用的第四代移动通信系统,移动通信技术迅猛发展并不断完善,第五代移动通信系统的研究和试验也开始紧锣密鼓地进行。

#### 1. 第一代移动通信系统

20 世纪 70 年代末,美国 AT&T 公司研制了第一套蜂窝移动电话系统,即 AMPS(Advanced Mobile Phone Service,先进的移动电话服务)。第一代蜂窝移动技术去除了电话机与网络之间的用户线,用户第一次能够在移动的状态下拨打电话。这一代移动通信系统主要有 3 种窄带模拟系统标准,即北美蜂窝系统 AMPS、北欧移动电话系统 NMT 和全接入通信系统 TACS。中国采用的主要是 TACS 制式,频段为 890~915 MHz/935~960 MHz。第一代移动通信的各种蜂窝网系统只能提供基本的语音业务,不能提供非语音业务,并且保密性差,容易并机盗打,它们之间还互不兼容,使得移动用户无法在各种系统之间实现漫游。

#### 2. 第二代移动通信系统

为解决由于采用不同模拟蜂窝系统造成互不兼容、无法漫游的问题,1982 年北欧四国

向欧洲邮电行政大会 (Conference Europe of Post and Telecommunications, CEPT) 提交了一份建议书, 要求制定 900 MHz 频段的欧洲公共电信业务规范, 建立全欧洲统一的蜂窝网移动通信系统; 同年, 欧洲“移动通信特别小组”(Group Special Mobile, GSM) 成立, 后来 GSM 的含义演变为“全球移动通信系统”(Global System for Mobile Communications)。第二代移动通信数字无线标准主要有 GSM、D-AMPS、PDC 和 IS-95 CDMA 等。我国第二代移动通信系统以 GSM 和 CDMA 为主。为了适应数据业务的发展需要, 在第二代技术中还诞生了 2.5G、2.75G, 也就是 GSM 的 GPRS、EDGE 和 CDMA 系统的 IS-95B、1x 等技术, 这些技术提高了数据传送能力。第二代移动通信系统在引入数字无线电技术以后, 数字蜂窝移动通信系统提供了更好的网络, 不但改善了语音通话质量, 提高了保密性, 防止了并机盗打, 而且为移动用户提供了无缝的国际漫游。

### 3. 第三代移动通信系统

第三代移动通信技术也就是 IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000), 也称为 3G (3rd-Generation)。相比第二代移动通信系统, 它能提供更高的速率、更好的移动性和更丰富的多媒体综合业务。最具代表性的技术标准有美国提出的 cdma2000、欧洲提出的 WCDMA 和中国提出的 TD-SCDMA。

#### (1) cdma2000

cdma2000 由美国牵头的 3GPP2 (3rd Generation Partnership Project 2) 提出, 是由 IS-95 系统演进而来的, 并向下兼容 IS-95 系统。cdma2000 系统继承了 IS-95 系统在组网、系统优化方面的经验, 并进一步对业务速率进行了扩展, 同时通过引入一些先进的无线技术, 进一步提升了系统容量。在核心网络方面, 它继续使用 IS-95 系统的核心网作为其电路域来处理电路型业务, 如语音业务和电路型数据业务, 同时在系统中增加分组设备 [分组数据服务节点 (Packet Data Serving Node, PDSN) 和分组控制功能块 (Packet Control Function, PCF)] 来处理分组数据业务。因此在建设 cdma2000 系统时, 原有的 IS-95 的网络设备可以继续使用, 只要新增加分组设备即可。在基站方面, 由于 IS-95 与 1x 的兼容性, 运营商只要通过信道板和软件更新即可将 IS-95 基站升级为 cdma2000 1x 基站。在我国, 中国电信采用 cdma2000 技术标准。

#### (2) WCDMA

欧洲电信标准委员会在 GSM 之后就开始研究其 3G 标准, 其中有几种备选方案是基于直接序列扩频码分多址的, 而日本的第三代研究也是使用宽带码分多址技术的, 其后, 以二者为主导进行融合, 在 3GPP (3rd Generation Partnership Project) 组织中发展成了通用移动通信系统 (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS), 并提交给国际电信联盟 (ITU)。ITU 最终接受 WCDMA 作为 IMT-2000 标准的一部分。WCDMA 是世界范围内商用最多、技术发展最为成熟的 3G 制式。在我国, 中国联通在 2008 年电信行业重组之后开始建设 WCDMA 网络。

#### (3) TD-SCDMA

TD-SCDMA 是我国提出的第三代移动通信标准, 也是 ITU 批准的 3 个 3G 标准之一, 是以我国知识产权为主的, 在国际上被广泛接受和认可的无线通信国际标准。TD-SCDMA

技术标准的提出是我国电信史上重要的里程碑。相对于另两个 3G 标准(即 cdma2000 和 WCDMA),TD-SCDMA 起步较晚。

该标准的原标准研究方为西门子。为了独立出 WCDMA,西门子将其核心专利卖给了大唐电信。1998 年 6 月 29 日,原中国邮电部电信科学技术研究院(现大唐电信科技产业集团)向 ITU 提出了该标准。该标准将智能天线、同步 CDMA 和软件无线电(Software Defined Radio,SDR)等技术融于其中。

TD-SCDMA 的发展过程始于 1998 年年初,在当时的邮电部科技司的直接领导下,由原电信科学技术研究院组织队伍在 SCDMA 技术的基础上,研究和起草符合 IMT-2000 要求的我国主导的 TD-SCDMA 建议草案。该标准草案以智能天线、同步码分多址、接力切换、时分双工为主要特点,于 ITU 征集 IMT-2000 第三代移动通信无线传输技术候选方案的截止日 1998 年 6 月 30 日提交到 ITU,从而成为 IMT-2000 的 15 个候选方案之一。ITU 综合了各评估组的评估结果,在 1999 年 11 月赫尔辛基 ITU-RTG8/1 第 18 次会议上和 2000 年 5 月伊斯坦布尔 ITU-R 全会上,正式接纳 TD-SCDMA 作为 CDMA TDD 制式的方案之一。2001 年 3 月包含 TD-SCDMA 标准在内的 3GPP R4 版本规范被正式发布,TD-SCDMA 在 3GPP 中的融合工作达到了第一个目标。

至此,TD-SCDMA 不论在形式上还是在实质上,都已在国际上被广大运营商、设备制造商所认可和接受,成为真正的国际标准。

但是,由于 TD-SCDMA 的起步比较晚,技术发展成熟度不及其他两大标准,同时由于市场前景不明朗导致相关产业链发展滞后,最终全球只有中国移动一家运营商部署了商用 TD-SCDMA 网络。

#### 4. 第四代移动通信系统

从核心技术来看,通常所称的 3G 技术主要采用 CDMA(Code Division Multiple Access,码分多址)技术,而业界对第四代移动通信核心技术的界定则主要是指采用 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,正交频分复用)调制技术的 OFDMA 多址技术,可见 3G 和 4G 最大的区别在于采用的核心技术已经完全不同。从核心技术的角度来看,LTE、WiMAX(802.16e)及其后续演进技术 LTE-Advanced 和 802.16m 等均可以视为 4G;不过从标准的角度来看,ITU 对 IMT-2000(3G)系列标准和 IMT-Advanced(4G)系列标准的区分并不是以采用何种核心技术为准的,而是以能否满足一定的参数要求来区分的。ITU 在 IMT-2000 标准中要求,3G 必须满足传输速率在移动状态 144 kbit/s、步行状态 384 kbit/s、室内 2 Mbit/s,而 ITU 的 IMT-Advanced 标准中则要求 4G 在使用 100 MHz 信道带宽时,频谱利用率达 10 bit/(s·Hz),理论传输速率达到 1 000 Mbit/s。

LTE 分为 TDD(时分双工)和 FDD(频分双工)两种双工方式,其中时分双工方式更适用于非对称频谱。

2010 年 10 月的 ITU-R WP5D 会议上,LTE-Advanced 技术和 802.16m 技术被确定为最终的 IMT-Advanced 阶段国际无线通信标准。我国主导发展的 TD-LTE-Advanced 技术通过了所有国际评估组织的评估,被确定为 IMT-Advanced 国际无线通信标准之一。

图 1.1.1 是从 2G 到 4G 主流移动通信系统的演进路线。

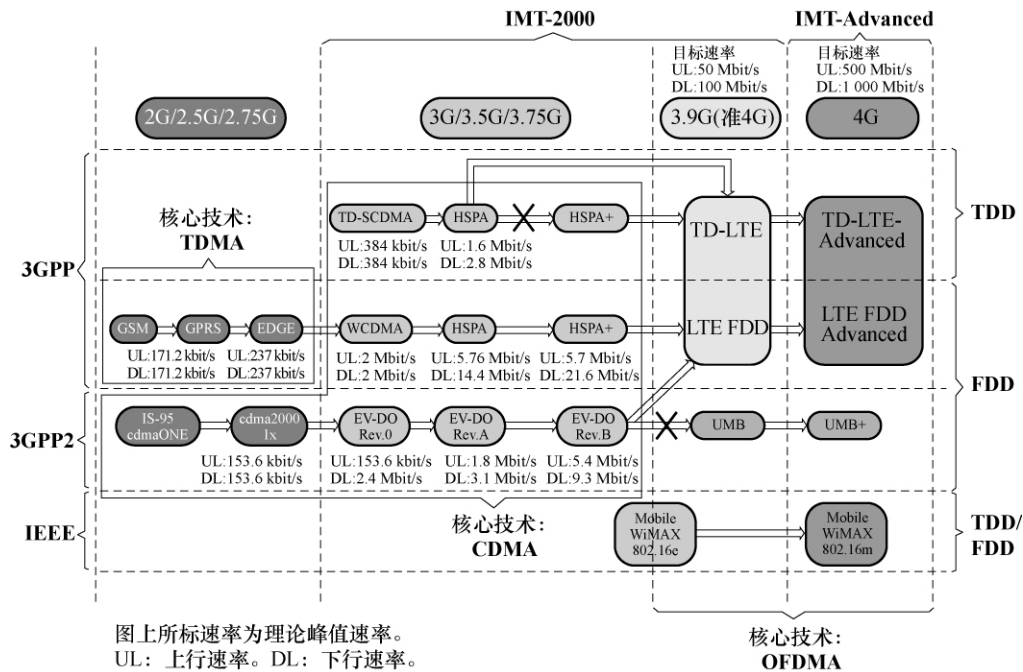


图 1.1.1 2G 到 4G 主流移动通信制式演进图

从图 1.1.1 可以看出：

① 以阵营划分，GSM、TD-SCDMA、LTE 属于 3GPP，CDMA、cdma2000 1x 和 cdma2000 EV-DO 属于 3GPP2，WiMAX 802.16e、802.16m 属于 IEEE；

② 以技术阶段划分，GSM、CDMA、cdma2000 1x 属于 2G，WCDMA、cdma2000 EV-DO、TD-SCDMA 属于 3G，TD-LTE、LTE FDD 可以认为是 3.9G 或准 4G，TD-LTE-Advanced、LTE FDD Advanced 属于 4G；

③ 以双工方式划分，GSM、CDMA、cdma2000 1x 和 cdma2000 EV-DO、WCDMA、LTE FDD、LTE FDD Advanced 属于频分双工，TD-SCDMA、TD-LTE、TD-LTE-Advanced 属于时分双工，WiMAX 则有 TDD 和 FDD 两种双工方式；

④ 以核心技术划分，GSM 的核心技术是时分多址 (TDMA)，CDMA、cdma2000 1x 和 cdma2000 EV-DO、WCDMA、TD-SCDMA 则采用了码分多址 (CDMA) 技术，TD-LTE、LTE FDD、TD-LTE-Advanced、LTE FDD Advanced、WiMAX 802.16e、WiMAX 802.16m 均采用了正交频分多址 (OFDMA) 技术。

### 5. 第五代移动通信 (5G) 的研究和推进工作

目前世界各国的第五代移动通信技术的研究已经加快步伐，5G 网络的研究和试验正在快速推进。2017 年 12 月，3GPP 分组大会宣布第一个 5G 国际标准 3GPP R15 的非独立组网 (Non-standalone, NSA) 5G 新空口标准正式完成并冻结，为尽快实现 5G 预商用奠定了基础。3GPP 在继续推进 5G 标准化方面明确了 3 个重要方向，包括：

- ① 完善 5G 新空口非独立组网规范，利用现有 LTE 核心网实现 5G 商用部署；
- ② 制定基于下一代核心网的 5G 新空口独立组网 (Standalone, SA) 规范；

③ 为 5G 在 3GPP Release-16 及未来版本中的演进工作做好准备,以进一步扩展 5G 生态系统。

2018 年 6 月,3GPP 全会(TSG#80)批准了第五代移动通信技术标准新一代无线接入网(New RAN,NR)独立组网功能冻结。至此,5G 已经完成第一阶段全功能标准化工作,进入了产业全面冲刺新阶段。

我国的移动通信发展在经历了 2G 追赶、3G 突破之后,当前 4G 网络正处在大规模部署阶段。面对 5G 新的发展机遇,我国政府积极组织国内各方力量,开展国际合作,共同推动 5G 国际标准的发展。2013 年,工信部、科技部、发改委联合成立了 IMT-2020(5G)推进组,推动中国 5G 标准和产业化工作。2018 年中国电信、中国移动、中国联通三大运营商开始部署 5G 无线网、传输网、核心网和业务平台的试点组网建设工作,继续推动 5G 产业端到端的成熟,加快实现 5G 规模商用。

### 1.1.2 LTE 标准及其演进

LTE 是 3GPP 主导的通用移动通信系统技术的长期演进。LTE 分为 LTE FDD 和 TD-LTE 两个版本,LTE FDD 是 FDD 版本的 LTE 技术,而 TD-LTE(TD-SCDMA Long Term Evolution,TD-SCDMA 长期演进)是 TDD 版本的 LTE 技术。LTE 关注的核心是无线接口和无线组网架构的技术演进问题。

从 2006 年 9 月到 2008 年 12 月是 LTE 标准制定阶段,即 WI 阶段(Work Item Stage)。由于对物理层技术的选用存在很大的争议,以及由于 LTE 的帧结构确定不下来,原定于 2007 年 9 月完成的第一个商用协议版本到了 2008 年年底才得以推出。此次推出的版本采用了融合后的技术方案,适用于 TDD 和 FDD 两种双工方式。

LTE 主要涉及 TS36.×××系列协议,其中,TS(Technical Specification)属技术协议细则类型,如 LTE 系统整体描述报告(TS36.300)。

随后,LTE 通过国际电信联盟的认证,成为国际通用标准。

LTE 标准各版本的制定时间如图 1.1.2 所示。

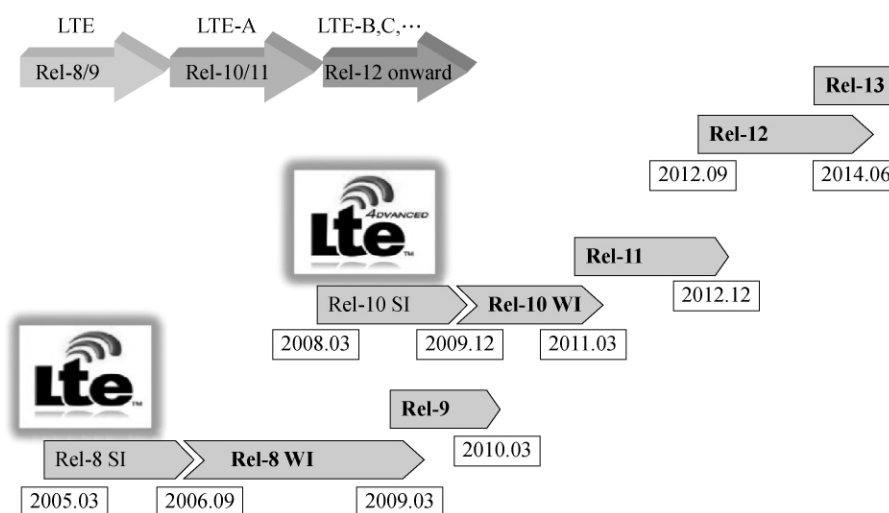


图 1.1.2 LTE 标准制定过程

为了满足更多的应用场景和市场需求,3GPP 在 R14 中对 NB-IoT 应用了一系列增强技术,并于 2017 年 6 月完成了核心规范。增强技术增加了定位和多播功能,提供更高的数据速率,在非锚点载波上进行寻呼和随机接入,增强连接态的移动性,支持更低 UE 功率等级。

## 1.2 LTE 关键技术

### 1.2.1 多址接入

传输技术和多址技术是无线通信技术的基础。传统的通信系统(如 GSM)采用单载波传输,这种系统在数据速率不高时,信号带宽小于信道的相干带宽,接收端符号间干扰(Inter Symbol Interference, ISI)不严重,只要采用简单的均衡器(equalizer)就可以消除符号间干扰。随着数据速率的提高,信号带宽大于信道的相关带宽,均衡器的抽头数量增加和运算的复杂性提高,使用均衡器已经无法消除 ISI。为了解决这一问题,LTE 系统采用了多载波传输技术,下行采用正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA),上行采用单载波频分多址(Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA),保证了不同频谱资源用户之间的正交性,以取得更好的频谱效率和较好地避免符号间干扰。

#### 1. 正交频分多址

OFDMA 的技术基础是正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiple, OFDM)技术。OFDM 技术被公认为未来移动通信的核心技术,成为现在以及未来的研究方向。OFDMA 的一个传输符号包括  $N$  个正交的子载波,实际传输中,这  $N$  个正交的子载波是以并行方式进行传输的,真正体现了多载波的概念。

从频域上看,多载波传输将整个频带分割成许多子载波,将频率选择性衰落信道转化为若干平坦衰落子信道,从而能够有效地抵抗无线移动环境中的频率选择性衰落。由于子载波重叠占用频谱,OFDMA 能够提供较高的频谱利用效率和较高的信息传输速率。通过给不同的用户分配不同的子载波,OFDMA 提供了天然的多址方式,并且由于占用不同的子载波,用户间相互正交,没有小区内干扰。在实际使用中,位于频谱中央的子载波(称为直流子载波或 DC 子载波)留空不用,然后将  $N(N$  应为偶数)个子载波分别映射到高频谱部分和低频谱部分。对于 LTE 系统,20 MHz 小区带宽支持的子载波个数为 1200 个。OFDM 频域波形如图 1.2.1 所示。

从时域上看,多载波传输技术把高速的串行数据流变成几个低速并行的数据流,同时去调制几个载波,这样在每个载波上的符号宽度增加,信道时延扩展引起 ISI 减小,同时,由衰落或干扰引起接收端的错误得以分散。

OFDM 将串行数据并行地调制在多个正交的子载波上,这样可以降低每个子载波的码元速率,增大码元的符号周期,提高系统的抗衰落和抗干扰能力,同时由于每个子载波的正

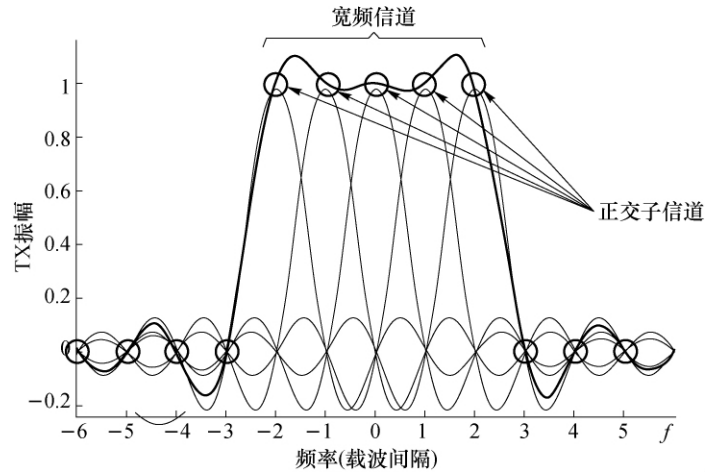


图 1.2.1 OFDM 频域波形示意图

交性大大提高了频谱的利用率,所以 OFDM 非常适合移动场合中的高速传输。OFDM 的调制和解调是分别基于快速傅里叶逆变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) 和快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 来实现的,如图 1.2.2 所示。

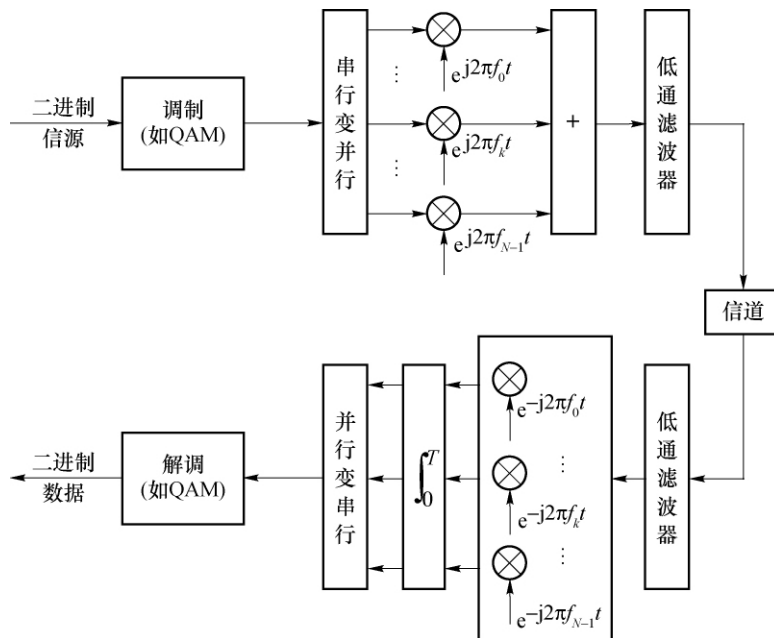


图 1.2.2 OFDM 原理图

无线多径信道会使通过它的信号出现多径时延,这种多径时延如果扩展到下一个符号,就会造成符号间串扰,严重影响数字信号的传输质量。采用 OFDM 技术的最主要原因之一是它可以有效地对抗多径时延扩展。把输入的数据流经过串/并变换分配到  $N$  个并行的子信道上,使得每个用于调制子载波的数据符号周期可以扩大为原始数据符号周期的  $N$  倍,因此时延扩展与符号周期的比值可降低为  $1/N$ 。在 OFDM 系统中,为了最大限度地消除符

号间干扰,可以在每个 OFDM 符号之间插入保护间隔,而且该保护间隔的长度  $T_g$  一般要大于无线信道的最大时延扩展,这样一个符号的多径分量就不会对下一个符号造成干扰。

当多径时延小于保护间隔时,可以保证在 FFT 的运算时间长度内,不会发生信号相位的跳变。因此,OFDM 接收机所看到的仅仅是存在某些相位偏移的、多个单纯连续正弦波形的叠加信号,而且这种叠加不会破坏子载波之间的正交性。然而,如果多径时延超过了保护间隔,则在 FFT 运算时间长度内可能会出现信号相位的跳变,因此在第一路径信号与第二路径信号的叠加信号内就不再只包括单纯连续正弦波形信号,从而导致子载波之间的正交性有可能遭到破坏,就会产生信道间干扰(Inter Channel Interference, ICI),使得各载波之间产生干扰。

为了消除由于多径传播造成的信道间干扰,一种有效方法是将原来宽度为  $T$  的 OFDM 符号进行周期扩展,用扩展信号来填充保护间隔。将保护间隔(持续时间  $T_g$ )内的信号称为循环前缀(Cyclic Prefix, CP)。在实际系统中,当 OFDM 符号送入信道之前,首先要加入循环前缀,然后进入信道进行传送。在接收端,首先将接收符号开始的宽度为  $T_g$  的部分丢弃,然后将剩余的宽度为  $T$  的部分进行傅里叶变换,再进行解调。在 OFDM 符号内加入循环前缀可以保证在一个 FFT 周期内,OFDM 符号的时延副本内所包含的波形周期个数是整数,这样时延小于保护间隔  $T_g$  的时延信号就不会在解调过程中产生信道间干扰。即 LTE 采用循环前缀做保护间隔,既可以消除信道间干扰,又可以消除符号间干扰(Inter Symbol Interference, ISI),如图 1.2.3 所示。

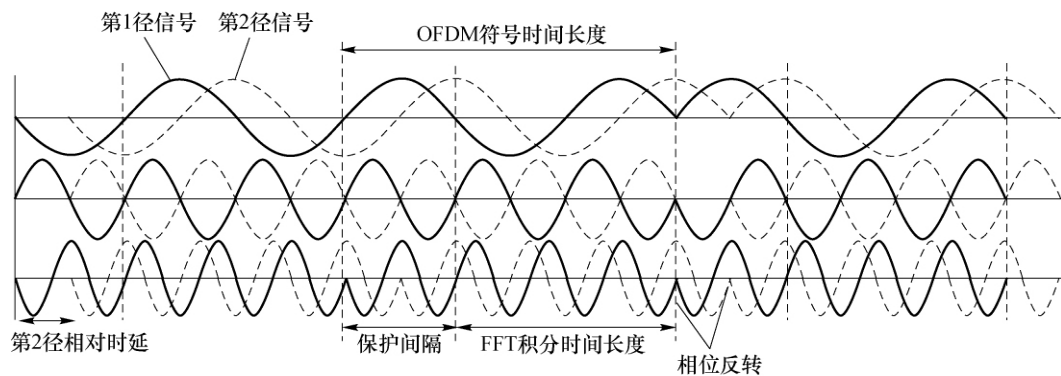


图 1.2.3 OFDM 的循环前缀和保护间隔

综上所述,一个完整的 OFDM 系统原理如图 1.2.4 所示。源信号在进行信道编码、交织,插入 CP 后,采用 OFDM 调制技术进行多载波调制,输入的已经过调制的复信号经过串/并变换后,进行 IFFT 和并/串变换,然后插入保护间隔,经过数/模变换后形成 OFDM 调制后的信号,再经过模/数变换经由天线发射出去。该信号经过信道后,接收到的信号经过模/数变换,去掉保护间隔,以恢复子载波之间的正交性,经过串/并变换和 FFT 后,恢复出 OFDM 的调制信号,再经过并/串变换还原出输入信号。

尽管 OFDM 技术在频谱效率提高和干扰消除等方面有其独特的优势,但是也应该看到,由于 OFDM 的子载波互相交叠,只有保证接收端精确的频率取样,才能避免子载波间干扰。这样带来了 OFDM 对于频率偏移的敏感;同时,由于 OFDM 的子载波正交性要求信号

落入 FFT 窗口内,提高了 OFDM 对于时间同步的要求。由于 OFDM 发送端输出信号是多个子载波相加的结果,目前应用的子载波数量从几十个到几千个,如果各个子载波同相位,相加后就会出现很大的幅值,即调制信号的动态范围很大,这高峰均比的特性对后续 RF (射频)功率放大器的设计提出了很高的要求。

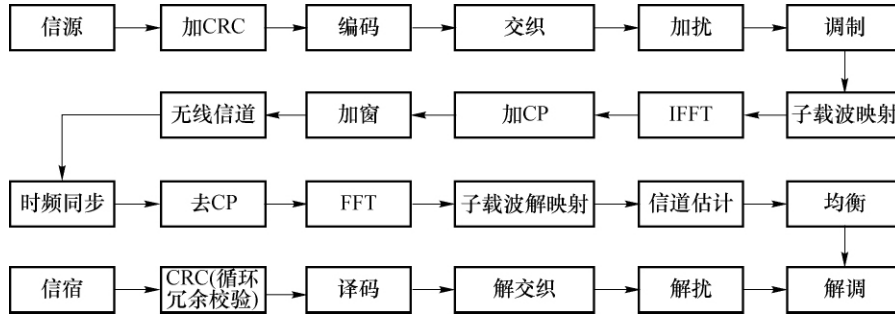


图 1.2.4 OFDM 系统原理基本框图

## 2. 单载波频分多址

和其他多址接入方式 TDMA、FDMA、CDMA、OFDMA 一样,SC-FDMA 主要是针对多用户共享通信资源所提出的。SC-FDMA 的提出是以 OFDMA 为基础的,是针对 OFDMA 的缺点而提出的一种新的解决方案。

SC-FDMA 采用单载波的方式,与 OFDMA 相比具有较低的峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio,PAPR,简称峰均比),比多载波系统的 PAPR 低 1~3 dB。较低的 PAPR 可以使移动终端在发送功效方面得到较多的好处,进而可以延长电池的使用时间。SC-FDMA 具有单载波的低 PAPR 和多载波的强韧性这两大优势,因此,LTE 上行链路传输选用了 SC-FDMA。

TD-LTE 中所采用的 SC-FDMA 又称为单载波 DFT-S-FDMA(离散傅里叶变换扩频的正交频分复用多址接入),采用基于 DFT(Discrete Fourier Transform,离散傅里叶变换)的频域实现方式,从系统实现上来看,增加了 DFT 模块,信号在调制之前先进行了 DFT 的转换,从时域变换到频域,再映射到频域的子载波上,解决了 OFDM 系统在  $N$  点 IDFT(Inverse Discrete Fourier Transform,离散傅里叶逆变换)输出端的每个符号作为  $M$  个独立变量的和,并且会逐渐地逼近高斯形态形成高包络变量的问题,其他处理与 OFDM 完全一致,如图 1.2.5 所示。

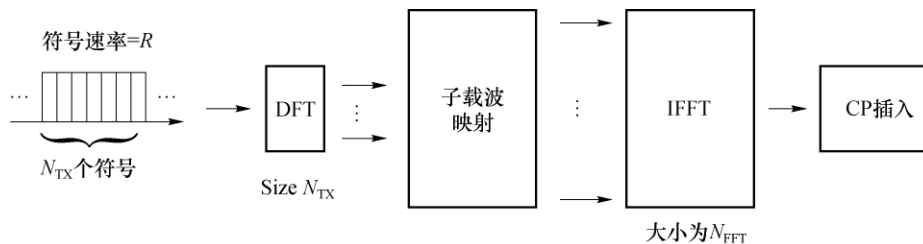


图 1.2.5 SC-FDMA 系统实现