

权威、系统、TD-LTE 技术宝典
诠释中国人自己的 4G 技术

“十二五”

国家重点图书出版规划项目

TD-LTE-Advanced Mobile Communications System Design

4G 丛书

TD-LTE-Advanced 移动通信系统设计

□ 王映民 孙韶辉 等 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

“十二五”
国家重点图书出版规划项目

TD-LTE-Advanced Mobile Communications System Design 4G 丛书

TD-LTE-Advanced

移动通信系统设计

□ 王映民 孙韶辉 等 编著

人民邮电出版社

北 京

序

移动通信所具有的移动性和个人化服务特征，适应了信息时代的需要，一直以来都表现出旺盛的生命力和巨大的市场潜力。一方面是日益增多的移动通信用户和随之而来的更多的业务带宽需求，另一方面是频谱资源有限，这一越来越尖锐的矛盾推动移动通信技术不断创新。与其他技术相比，移动通信的换代特征更为明显，从第一代移动通信（1G）到现在广泛使用的第二代移动通信（2G），再到多数国家正在商用的第三代移动通信（3G），几乎是 10 年一代。每一代都有鲜明的技术特征，与前一代相比在频谱利用率方面有显著的提高。1G 采用模拟电路交换体制和频分多址（FDMA）技术，2G 采用数字电路交换体制，其多址方式则分为以 GSM 为代表的时分多址（TDMA）和以 CDMA 为代表的码分多址（CDMA）两类。3G 在其标准化之初是数字电路交换体制与分组交换体制并存，逐步发展到以分组交换体制为主，其多址方式在 CDMA 的基础上出现了兼有 TDMA 技术的 TD-SCDMA，而且双工技术实现了从频分双工（FDD）到时分双工（TDD）的扩展。以正交频分复用（OFDM）和多输入多输出（MIMO）天线技术为标志的 3G 长期演进（LTE）技术标准化，揭开了新一代移动通信系统发展的新篇章。

TD-SCDMA 从标准化到产业化再到后续技术演进，是一个持续创新的过程。1998 年 6 月，我国向 ITU 提交了 TD-SCDMA 技术提案。2000 年，TD-SCDMA 标准被 ITU 和 3GPP 正式接纳为 3G 国际标准，实现了我国电信技术史上的重大历史性突破。2009 年 1 月，我国工业和信息化部颁发了 3G 牌照，标志着我国正式进入了 3G 时代。截止到 2011 年 6 月底，我国已经建设了 20 万个 TD-SCDMA 基站，覆盖了全国 238 个城市，用户已经超过 3700 万。在推进 TD-SCDMA 产业化并不断完善 TD 技术的同时，对 TD-SCDMA 后续技术的研究一直在进行。在我国企业的主导和推动下，将 3GPP LTE 标准中的两种 TDD 方式融合形成统一的 TD-LTE 标准，该标准使我国在 TD-SCDMA 所建立的自主知识产权的一些优势得以保持和发挥。作为 LTE 基本版本的 3GPP R8 标准和 R9 标准先后于 2008 年年底和 2009 年年底完成，LTE 的增强版本 LTE-Advanced，即 3GPP R10 标准也于 2011 年 6 月完成冻结。2010 年 10 月的 ITU-R 会议上，我国政府提交的 TD-LTE-Advanced 和 FDD 的 LTE-Advanced 以及 802.16m 经评估被接纳作为 IMT-Advanced（4G）国际标准。截止到 2011 年 6 月，全球已累计建设 32 个 TD-LTE 试验网。

大唐电信科技产业集团是 TD-SCDMA 标准的提出者和产业化推动者，大唐电信科技产业集团在 TD-LTE/LTE-Advanced 和 IMT-Advanced（即 4G）的标准化推进中做了大量实质性

的工作，在方案准备与提交、评估条件确定与结果输出等多方面起到了主力军的作用，作出了关键性的贡献。本书的作者是大唐无线移动创新中心（原大唐移动公司系统与标准部）从事 TD-SCDMA 和 TD-LTE 技术研究和标准化工作的工程师，他们亲身参与了 TD-LTE/LTE-Advanced 国际标准化的过程，对技术和标准化有着自己独到而深入的认识和理解。本书的作者之前所著的《TD-LTE 技术原理与系统设计》在出版后已被出版社数次重印，这次是在原书的基础上进行较大幅度修订后完成的。本书覆盖了 TD-LTE-Advanced 系统从标准体系到接口，从物理层到高层，从基带到射频，对需求、技术及标准都分别进行了介绍。本书对 TD-LTE 技术的介绍总体概念突出，创新思路明确，内容条理清晰，论述深浅得当，兼有新颖性、专业性、实用性和可读性。本书对 TD-LTE 和 TD-LTE-Advanced 标准的解读将有助于从事 TD-LTE 的技术研究和产品开发人员对有关技术的深入了解和创新，对即将从事 TD-LTE 系统建网和运维及业务开发的技术人员也有参考价值。相信本书对推动 TD-LTE/LTE-Advanced 的产业发展将起到积极作用。



2011 年 9 月

前言

本书作者之前所著的《TD-LTE 技术原理与系统设计》于 2010 年 6 月出版,受到了业界的好评和读者的喜爱,在出版后一年内即被出版社多次重印。本书是在《TD-LTE 技术原理与系统设计》的基础上进行较大幅度修订完成的:一方面,根据技术和标准的发展演进,本书内容按照标准的最新版本进行了全面的修订;另一方面,为了使读者能更深入地认识技术本质、更容易地把握整体思路,作者对全书的内容和篇幅做了大幅的调整,删除了一些具体协议的细节介绍,并按照新的结构对内容进行了重新组织和编写。关于 TD-LTE 和 TD-LTE-Advanced 两个专用名称的使用,严格的狭义的概念:TD-LTE 特指 3GPP R8/R9 版本,TD-LTE-Advanced 特指 3GPP R10 及 R11 版本;除非特别声明,本书采用广义的概念:用 TD-LTE 泛指 TD-LTE 及 TD-LTE-Advanced,而用 TD-LTE-Advanced 强调由 ITU 正式接纳成为 IMT-Advanced (4G) 国际标准以后的版本。

在 2010 年 10 月由国际电联无线部门召开的 ITU-R WP5D 第九次会议上,我国提交的 TD-LTE-Advanced 技术提案被正式接纳成为 IMT-Advanced (4G) 国际标准,这是我国移动通信产业继 TD-SCDMA 成为国际标准后的又一重要里程碑。LTE 是第四代移动通信的主流技术,3GPP 组织将 LTE 作为第三代移动通信系统的长期演进技术进行了可行性研究和标准化工作,LTE 及其增强版本 LTE-Advanced 的研究、标准化,以及设备开发和测试试验受到了全球运营商和设备商最为广泛的支持和参与。TD-LTE/LTE-Advanced 是时分双工模式的 LTE/LTE-Advanced 系统,是 TD-SCDMA 系统的后续演进技术与标准。2000 年,我国提出的 TD-SCDMA 技术标准被 ITU 和 3GPP 正式接纳成为第三代移动通信国际标准,实现了我国电信技术史上的重大突破,标志着我国在移动通信技术领域迈入了世界先进行列。TD-LTE/LTE-Advanced 作为 TD-SCDMA 后续演进标准,明确了 TD-SCDMA 作为一个有竞争力和生命力的国际标准的演进路线,同时 TD-LTE/LTE-Advanced 的标准化也标志着在新一代宽带移动通信中 TDD 作为一个重要的技术得到了国际移动通信产业界广泛的认可、积极的参与和大力的支持。

从 TD-SCDMA 技术发展和标准演进的路径来看,我们可以把它大致分为两个大的阶段:第一阶段的 TD-SCDMA 及 TD-SCDMA 增强型标准,是基于 CDMA 的技术体制;第二阶段的 TD-LTE 及 TD-LTE-Advanced 标准,是基于 OFDM 的技术体制。

TD-SCDMA 技术与标准的第一个大的阶段又可以分为 TD-SCDMA 基本版本阶段及 TD-SCDMA 增强型版本阶段。TD-SCDMA 基本版本即 3GPP R4 版本,主要是实现语音和中

低速的数据业务，TD-SCDMA 增强型版本是指 TD-SCDMA 的 3GPP R5~R10 版本。TD-SCDMA 增强技术是在 TD-SCDMA 已有技术的基础上，通过引入局部的先进技术如 HARQ、AMC、高阶调制、快速调度机制、MIMO 等技术，取得明显的性能提升，满足 TD-SCDMA 已有网络的快速升级和部署。采用的基本技术以 CDMA 技术为基础，没有技术体制上的更新换代，TD-SCDMA 增强技术以 HSDPA、HSUPA、MBMS（包括优化的 MBMS）、HSPA+为代表。

TD-SCDMA 标准第二个大的阶段包括 LTE 及 LTE-Advanced 标准两个子阶段。TD-LTE 在基本多址接入技术上引入 OFDM 来替代 CDMA，在智能天线的基础上进一步引入 MIMO 技术，形成智能天线+MIMO 的先进多天线技术，同时保持了特殊时隙和同步等原有技术优势和特点，在性能上获得较大提升的同时，还尽量保证了 TD-SCDMA 及增强网络向 TD-LTE 网络的平滑演进。TD-LTE 发展演进到 TD-LTE-Advanced，TD-LTE/LTE-Advanced 系统将提供新一代宽带无线移动通信系统的技术和服务。

无线移动通信系统的理论与技术经过多年的广泛且深入的研究发展，在无线移动通信系统中全面地引入时、频、码、空四个域的信号处理已经逐步成为现实。在新一代宽带移动通信中，以 OFDM 和 MIMO 技术为代表的 IMT-Advanced 系统体制逐步建立，为大幅提高无线通信系统的信息传输能力提供了基础。同时，无线移动通信理论与技术的研究开发，已经从普遍关注的点到点的无线链路传输技术，更多地转移到关注无线资源的管理与调度、网络架构与无线组网技术，以及多点之间的协同与协作传输技术等上来。总之，无线移动通信系统基于信道、用户和业务的多重动态特性，基于多用户、多小区和多模式的工作环境，基于高性能、低成本和智能化的应用需求，对理论与技术的发展提出了越来越高的要求，也为移动通信从业者提供了不断努力创新进取的源泉。

从 3GPP 历史上进行的标准化工作来看，LTE 概念的提出，是首次正式开始研究新的空中接口技术和网络系统架构，也就是将新技术对系统的优化放到了比保证良好的后向兼容性更重要的位置进行考虑。回顾整个 LTE 的标准化过程，从 2004 年年底提出概念，到 2008 年年底发布了第一个可指导开发的 R8 版本系列规范，前后经历了整整 4 年时间。LTE R8 系列规范的发布，也使得 3GPP 阵营在直面其他技术发展的竞争中，走出了坚实的一步。LTE R9 版本在 2009 年 12 月正式发布，协议冻结也在 2010 年 3 月完成。3GPP 在 2008 年 3 月就启动了 LTE-Advanced 技术可行性研究工作，从 2009 年 12 月开始 LTE-Advanced R10 的标准化项目，R10 标准化的协议冻结工作已在 2011 年 6 月完成。LTE-Advanced R11 的标准化工作也已从 2011 年 3 月开始启动。

本书的作者亲历了 TD-LTE/LTE-Advanced 标准化的过程，参与了技术与标准化的具体工作，并见证了这一过程中重要的里程碑。列举其中几例：2005 年 6 月，3GPP 召开第一次 LTE Ad Hoc 会议，大唐率先提出了 TD-LTE 的基础性提案，包括基于多载波 TD-SCDMA 和基于 OFDM TDD 的两套 LTE TDD 框架技术方案，后续陆续写入到 LTE 技术报告中；2005 年 11 月，大唐提出的基于 OFDM TDD 的技术方案作为两种 TDD 模式中的一种正式被 3GPP LTE 所采纳，该方案充分考虑了 TD-SCDMA 的演进和相关技术的延续；2007 年 4 月，3GPP 专门在北京召开了 LTE TDD Ad Hoc 会议，这次会议上 3GPP 接受了可使用专用导频的智能天线（Beamforming）方案，大唐持续推动的智能天线技术成功地进入 LTE 中；2007 年 11 月，3GPP 通过基于 LTE TDD 类型 2 帧结构（基于 TD-SCDMA 帧结构）的融合框架方案，

使 LTE TDD 模式只存在一种 TDD 模式方案,即 TD-LTE 方案,从标准保证了 TD-LTE 作为唯一的 TDD 模式技术方案;2009 年 10 月,我国向 ITU 提交 4G 候选方案 TD-LTE-Advanced,被 ITU 接纳为 IMT-Advanced 候选技术之一。2010 年 3 月,大唐提出的基于双流赋形的增强智能天线技术和基于智能天线的定位技术完成标准化工作,成为 LTE 第二版本(R9)重要的增强特性,进一步树立了 TD-LTE 显著的技术特色和优势。2010 年 10 月在重庆召开的 ITU-R WP5D 的第九次会议上,TD-LTE-Advanced 技术提案经过全面的评估后被正式接纳为 IMT-Advanced(4G)国际标准;2011 年 6 月,LTE-Advanced R10 标准协议冻结,我们在载波聚合、中继、多天线、异构组网、本地接入等多项关键技术中的重要贡献完成了标准化。

本书是对 TD-LTE/LTE-Advanced 技术、标准及系统设计的全面的介绍,包括针对 TD-LTE-Advanced 系统特有技术的深入探讨和论述,并且也包括了作为完整 LTE-Advanced 系统技术与标准的全面分析和描述。我们写作本书的目的,是希望读者能够从基本原理和系统设计的角度对 TD-LTE-Advanced 技术进行分析和理解,并能够从体系定义和协议流程的层面去梳理和掌握 TD-LTE-Advanced 的系统设计。

本书由王映民主持编写,王映民、孙韶辉、王可、肖国军、高卓、宋月霞、李国庆、胡海静、沈祖康具体负责各个章节的内容。在本书的编写和审校过程中,蒋守宁、全海洋、秦飞、丁昱、潘学明、彭莹、汪颖、房家奕、许芳丽、冯三军、陈晓忠、陈军、赵锐、林亚男、苏昕、高秋彬、梁靖、谌丽、彦楠、张娟、鲍炜、赵毅、刘爱娟、傅婧、张杰、赵瑾波、徐婧、刘佳敏、Rakesh Tamrakar、张然然、荆梅芳、陈文洪、杨义、高雪娟等同事参与了相关的工作。本书凝聚了大唐无线移动创新技术中心、大唐移动通信设备有限公司系统与标准部全体同事多年的研究与标准化工作的成果,作者在此一并表示衷心的感谢。

特别感谢电信科学技术研究院、大唐无线移动创新技术中心和大唐移动通信设备有限公司领导和同事的大力支持和真诚帮助,感谢在 TD-LTE/LTE-Advanced 技术研究和标准化过程中与工信部电信研究院、中国移动研究院以及众多国内外厂商和研究机构的交流与合作。限于作者的水平和能力,书中可能还有诸多不足与谬误之处,恳请各位读者和专家提出宝贵的意见和建议。

作 者

2011 年 9 月

目 录

第 1 章 背景与概述	1
1.1 移动通信系统发展与演进	1
1.2 TD-SCDMA 标准与技术	3
1.2.1 TD-SCDMA 物理层信号结构	4
1.2.2 TD-SCDMA 系统的关键技术	6
1.2.3 TD-SCDMA 标准演进	7
1.3 新一代宽带移动通信技术基础	7
1.3.1 OFDM 传输	8
1.3.2 多天线技术	9
1.3.3 分组无线接入	10
1.4 移动通信标准化组织	12
1.4.1 国际电信联盟 (ITU)	12
1.4.2 第三代合作伙伴计划 (3GPP)	13
1.4.3 第三代合作伙伴计划 2 (3GPP2)	14
1.4.4 电气电子工程师协会 (IEEE)	15
1.4.5 中国通信标准化协会 (CCSA)	15
1.5 LTE 需求与技术特点	16
1.5.1 LTE 系统需求	17
1.5.2 LTE-Advanced 系统需求	21
1.5.3 TD-LTE 系统技术特点	24
1.5.4 TD-LTE-Advanced 新增关键技术概述	28
1.6 TD-LTE/LTE-Advanced 标准化历程	32
1.6.1 LTE 的提出	32
1.6.2 TD-LTE R8 的研究及标准化	33
1.6.3 TD-LTE R9 版本	35
1.6.4 TD-LTE-Advanced 和 ITU IMT-Advanced	35
1.6.5 TD-LTE/TD-LTE-Advanced 重要的里程碑	37
1.7 小结	38
参考文献	38
第 2 章 协议架构与标准体系	39
2.1 LTE 系统架构	39
2.1.1 LTE 系统网络架构	39
2.1.2 网络功能划分	42
2.2 空中接口协议栈	43
2.2.1 协议栈概述	43
2.2.2 控制平面协议栈	44
2.2.3 用户平面协议栈	45
2.2.4 协议栈功能划分	45
2.3 S1/X2 接口协议栈	51
2.3.1 协议栈概述	51
2.3.2 控制平面协议栈	52
2.3.3 用户平面协议栈	53
2.3.4 协议功能描述	54

2.4	LTE 标准体系与规范	59	3.9	初始接入和同步	137
2.5	小结	64	3.9.1	小区搜索	137
	参考文献	64	3.9.2	物理层随机接入	139
第 3 章	物理层关键技术	66	3.10	干扰协调	141
3.1	TDD 双工技术	66	3.10.1	概述	141
3.2	多址传输方式	68	3.10.2	干扰随机化	144
3.2.1	多址传输方式概述	69	3.10.3	干扰抑制	145
3.2.2	TD-LTE 下行多址传输	72	3.10.4	分层组网中的干扰 协调增强	146
3.2.3	TD-LTE 上行多址传输	74	3.11	小结	152
3.3	帧结构和物理信道	75		参考文献	152
3.3.1	TD-LTE 系统帧结构	75	第 4 章	高层协议及过程	155
3.3.2	载波带宽和物理信道 映射	78	4.1	随机接入	155
3.4	导频设计	79	4.1.1	概述	155
3.4.1	下行公共导频	80	4.1.2	竞争随机接入过程	156
3.4.2	下行用户专用导频	82	4.1.3	非竞争随机接入过程	158
3.4.3	下行测量导频	85	4.1.4	随机接入建模	159
3.4.4	定位导频	86	4.2	系统广播	159
3.4.5	上行解调导频	87	4.2.1	概述	159
3.4.6	上行探测导频	88	4.2.2	广播消息内容分类	160
3.5	多天线技术	89	4.2.3	广播消息传输机制	161
3.5.1	多天线技术概述	89	4.2.4	广播消息修改机制	161
3.5.2	下行多天线传输技术	92	4.3	寻呼	162
3.5.3	上行多天线传输技术	97	4.3.1	概述	162
3.5.4	小结	99	4.3.2	寻呼传输过程	162
3.6	信道编码	100	4.3.3	寻呼接收过程	163
3.6.1	卷积编码	100	4.4	连接管理	164
3.6.2	Turbo 码	103	4.4.1	概述	164
3.6.3	线性分组码	106	4.4.2	状态与信令承载	164
3.6.4	小结	110	4.4.3	连接管理过程	165
3.7	链路自适应技术	110	4.4.4	承载管理过程	169
3.7.1	自适应调制与编码	111	4.5	移动性管理	169
3.7.2	混合自动重传请求	113	4.5.1	概述	169
3.7.3	功率控制	117	4.5.2	系统内移动性管理	170
3.7.4	信道选择性调度	120	4.5.3	系统间移动性管理	180
3.8	控制信道设计	122	4.6	小区间同步	184
3.8.1	下行控制信道	122	4.6.1	概述	184
3.8.2	上行控制信道	129	4.6.2	同步方法	185

4.7 无线资源管理	187
4.7.1 概述	187
4.7.2 调度	187
4.7.3 接纳控制	194
4.7.4 负荷均衡	196
4.8 安全机制	198
4.8.1 概述	198
4.8.2 认证与密钥协商	199
4.8.3 加密和完整性保护	200
4.8.4 安全模式命令	202
4.9 小结	203
参考文献	204

第5章 TD-LTE 系统射频 205

5.1 频谱定义和信道安排	205
5.1.1 工作频段	205
5.1.2 信道带宽	205
5.1.3 信道安排	206
5.2 无线发射指标	207
5.2.1 概述	207
5.2.2 输出功率要求	207
5.2.3 输出功率控制要求	209
5.2.4 发射机开关时间模板	211
5.2.5 发射信号质量	212
5.2.6 输出射频频谱	216
5.2.7 发射机互调	219
5.3 无线接收指标	220
5.3.1 概述	220
5.3.2 参考灵敏度电平	220
5.3.3 接收机动态范围	221
5.3.4 信道内选择性	222
5.3.5 接收机邻道抑制	222
5.3.6 阻塞特性	224
5.3.7 接收机杂散响应	226
5.3.8 接收机杂散辐射	226
5.3.9 接收机互调	226
5.4 系统同步要求	228
5.5 小结	228
参考文献	229

第6章 TD-LTE 系统新技术

特性	232
6.1 多媒体广播/多播	232
6.1.1 概述	232
6.1.2 网络结构和流程	233
6.1.3 空中接口	237
6.1.4 网络接口	240
6.2 家庭基站	241
6.2.1 概述	241
6.2.2 系统网络架构与实体功能	241
6.2.3 家庭基站系统技术特征	245
6.3 网络自配置与自优化	248
6.3.1 概述	248
6.3.2 自配置特性	248
6.3.3 自优化特性	250
6.4 定位技术	255
6.4.1 概述	255
6.4.2 定位架构	256
6.4.3 定位协议	257
6.4.4 定位方法	258
6.5 电路交换业务支持	264
6.5.1 概述	264
6.5.2 电路交换回退技术	264
6.5.3 单一无线语音呼叫连续性技术	267
6.6 最小化路测	270
6.6.1 概述	270
6.6.2 配置管理	271
6.6.3 空口技术	274
6.7 中继技术	277
6.7.1 概述	277
6.7.2 中继高层技术	278
6.7.3 中继物理层技术	284
6.8 载波聚合	291
6.8.1 概述	291
6.8.2 载波聚合物理层技术	291
6.8.3 载波聚合高层技术	297

6.9 公共告警系统.....	304	6.10.3 呼叫接入控制过程.....	308
6.9.1 概述.....	304	6.11 机器间通信.....	308
6.9.2 网络结构及流程.....	304	6.11.1 机器间通信需求.....	308
6.9.3 空中接口.....	305	6.11.2 机器间通信增强技术.....	309
6.9.4 网络接口.....	305	6.12 小结.....	309
6.10 紧急呼叫.....	306	参考文献.....	309
6.10.1 概述.....	306		
6.10.2 呼叫发起过程.....	307	缩略语.....	313

第 1 章

背景与概述

TD-LTE-Advanced 已经被国际电信联盟 (ITU, International Telecommunications Union) 正式接纳为第四代移动通信国际标准。LTE (Long Term Evolution) 是继第三代移动通信之后国际上主流的新一代宽带移动通信标准, TD-LTE 是时分双工 (TDD, Time Division Duplex) 模式的 LTE 系统, 是 TD-SCDMA 的后续演进技术与标准。LTE 是在 3GPP (3rd Generation Partnership Project) 组织中作为第三代移动通信的长期演进技术进行可行性研究和标准化的, LTE 及其增强版本 LTE-Advanced 的研究和标准化受到包括全球运营商和设备商最为广泛的支持和参与。LTE 系统以正交频分复用 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 和多输入多输出 (MIMO, Multiple Input Multiple Output) 技术为基础, 并在移动通信系统中全面采用和优化分组数据传输。

本书是对 TD-LTE-Advanced 标准及技术的全面介绍, 包括针对 TD-LTE/LTE-Advanced 特有技术的详细探讨和论述, 也包括作为完整的 LTE/LTE-Advanced 系统技术与标准的全面分析和介绍。第 1 章主要介绍 TD-LTE-Advanced 发展的相关背景知识, 并初步建立 LTE 及 LTE-Advanced 技术与标准的基本概念和认识。本章内容编写基本目标的考虑, 对于业内管理、市场等非研发类人员是要提供一个可读性强的普及版本, 而对于业内研发类技术人员则是要提供一个了解行业背景和理解基本概念的参考。

1.1 移动通信系统发展与演进

移动通信和互联网技术是 20 世纪末促进人类社会飞速发展的最重要的两项技术, 它们给人们的生活方式、工作方式以及社会的政治、经济都带来了巨大的影响。移动通信在 30 年的时间里得到了迅猛的发展, 特别是进入到 20 世纪 90 年代以后, 地面蜂窝移动通信以异乎寻常的速度得到了大规模的普及应用, 成为包括发达国家和发展中国家在内的全球 2/3 以上人口所使用的真正的公众移动通信系统。移动通信以其通信终端的移动性为最基本的特征, 从移动通信技术的发展历程来看, 对移动通信系统动态特性的追求和满足是最重要的技术发展方向和研究线索。移动通信的动态特性主要包括 3 个方面的内容: (1) 信道的动态性, 移动通信的传播信道具有开放性、环境复杂性和信道参量动态时变的特点; (2) 用户的动态性, 移动通信的用户具有移动性和个人化服务的特性; (3) 业务的动态性, 移动通信可提供各种业务类型服务并可动态选择^[1-3]。

结合移动通信的动态特性和业务应用需求, 我们可以把现代移动通信系统在设计中通常

所需考虑的重要特性归纳如下：(1) 无线频率资源的有限性，即无线频率资源是稀缺性的资源；(2) 移动通信信道的复杂和时变的特性；(3) 系统中所有用户独立地共享信道资源，这也是由无线信道的开放性所决定的；(4) 用户终端的移动性，用户可以处于移动、游牧或者固定状态；(5) 用户激活的随机性，用户业务数据可以在任何时间、位置发起并进行通信；(6) 用户数据的突发性，用户业务数据的激活期远小于静默期；(7) 用户终端类型和业务的多样性以及不同系统之间的互联互通特性。随着信息与通信事业的不断发展，在现代移动通信系统中，这些特点将越来越明显、越来越普遍。

蜂窝概念的引入是解决移动通信系统容量和覆盖问题的一个重大突破。蜂窝系统的提出与实现，使得移动通信技术能够真正为广大公众提供服务。当然，蜂窝系统带来的好处是以复杂的网络及无线资源管理技术为代价的。这一点也是现代移动通信系统的另一个非常重要的特点。自从 1968 年贝尔实验室提出蜂窝移动通信系统的概念以来，移动通信已经经历了三代系统的演变^[4-6]，正在向着第四代系统迈进^[7-9]。

第一代移动通信系统是模拟蜂窝系统，采用频分多址（FDMA，Frequency Division Multiple Access）技术。典型的第一代系统有北美的高级移动电话系统（AMPS，Advanced Mobile Phone System）、英国的全接入通信系统（TACS，Total Access Communications System）等。第一代系统在 20 世纪 80 年代初实现了蜂窝网的商业化，是移动通信发展历史上重要的里程碑。模拟蜂窝系统的缺点是容量小，业务种类单一（不能提供非语音业务），传输质量不高，保密性差，制式不统一，且设备难以小型化。第一代系统已经逐渐被第二代系统所取代。

第二代移动通信系统是窄带数字蜂窝系统，采用时分多址（TDMA，Time Division Multiple Access）或码分多址（CDMA，Code Division Multiple Access）技术。典型的系统有欧洲的 GSM（采用 TDMA 技术，20 世纪 90 年代初期商用）系统、北美的 IS-95（采用 CDMA 技术，90 年代中期商用）系统等。第二代移动通信系统在容量和性能上都比第一代系统有了很大的提高，不仅可以提供语音业务，还可以提供低速数据业务。第二代系统使移动通信得到了广泛的应用和普及，取得了商业上的巨大成功。第二代系统的技术和性能还在不断地演进和提高，以提供更高速率的电路和分组数据业务。但是，由于第二代系统主要技术的固有局限，系统容量和所能提供的通信业务服务难以满足个人通信应用高速增长的需求。市场的需求和技术的进步，使得移动通信系统又在向第三代系统发展。

国际电信联盟（ITU）在 2000 年 5 月召开的全球无线电大会（WRC-2000）上^[11]正式批准了第三代移动通信系统（IMT-2000，International Mobile Telecommunication 2000）的无线接口技术规范建议（IMT-RSCP），此规范建议了以下 5 种技术标准。

两种 TDMA 技术：SC-TDMA（美国的 UMC-136）和 MC-TDMA（欧洲的 EP-DECT）；

3 种 CDMA 技术：MC-CDMA（即 cdma2000），DS-CDMA（即 WCDMA）和 CDMA TDD（包括 TD-SCDMA 和 UTRA TDD）。

最终只有 3 种 CDMA 技术实际成为第三代移动通信系统的基础。这 3 种 CDMA 技术分别受到两个国际标准化组织——3GPP^[12]（3rd Generation Partnership Project）和 3GPP2^[13]的支持：3GPP 负责 DS-CDMA 和 CDMA TDD 的标准化工作，分别称为 3GPP FDD（频分双工，Frequency Division Duplex）和 3GPP TDD（时分双工，Time Division Duplex）；3GPP2 负责 MC-CDMA，即 cdma2000 的标准化工作。由此形成了世界公认的第三代移动通信的 3 个国际标准及其商用的系统，即 WCDMA、TD-SCDMA 和 cdma2000。在中国，这 3 个标准的系

统分别由中国移动 (TD-SCDMA)、中国电信 (cdma2000) 和中国联通 (WCDMA) 建设和运营。

1998 年原信息产业部电信科学技术研究院 (大唐电信科技产业集团) 在原邮电部的领导和支持下, 代表我国向国际电联提出了第三代移动通信 TD-SCDMA (Time Division Duplex-Synchronous CDMA) 标准建议。1999 年 11 月在芬兰赫尔辛基举行的国际电联 (ITU-R) 会议上, TD-SCDMA 标准提案被写入第三代移动通信无线接口技术规范的建议中。2000 年 5 月, 世界无线电行政大会正式批准接纳 TD-SCDMA 为第三代移动通信国际标准之一。这是我国第一次向国际上完整地提出自己的电信技术标准建议, 是我国电信技术的重大突破。1999~2001 年, 在 3GPP 组织内开展了大量的技术融合和具体的规范制定工作。通过近两年国内外企业和机构的紧密合作, 2001 年 3 月, TD-SCDMA 成为 3GPP R4 的一个组成部分, 形成了完整的 TD-SCDMA 第三代移动通信国际标准。

以 CDMA 技术为特点的第三代移动通信系统的迅猛发展为客户提供了较为丰富的数据业务体验, 并且随着通信技术的发展, 其增强型版本 HSDPA 和 HSUPA 在 3GPP 完成了其标准化工作, 而 HDR 在 3GPP2 完成了其标准化工作, 进而能够为用户提供更为高速的下行和上行数据业务传输能力。但是, 为用户提供更大带宽、更高数据率的通信服务, 是社会经济与市场发展的需求, 移动通信与宽带无线接入技术也在不断地发展和融合, 即宽带接入移动化和移动通信宽带化。移动 WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access) 技术首先得到了迅速的发展。为了应对 WiMAX 标准的市场竞争, 确保今后更长时间内的竞争力, 3GPP 于 2005 年 3 月正式启动了空口技术的长期演进 (LTE, Long Term Evolution) 项目, 3GPP2 也启动了类似的超移动宽带 (UMB, Ultra Mobile Broadband) 项目。

LTE 项目的目标是以 OFDM 和 MIMO 为主要技术基础, 开发出满足更低传输时延、提供更高用户传输速率、增加容量和覆盖、减少运营费用、优化网络架构、采用更大载波带宽, 并优化分组数据域传输的移动通信标准^[12]。由于采用了全新的技术, LTE 及其增强版本 LTE-Advanced 实际上可以被认为已经不属于 3G 标准, 而是新一代移动通信即 4G 标准。TD-LTE 是 TDD 模式的 LTE 系统, 是 TD-SCDMA 的后续演进技术与标准。

2005 年 10 月在赫尔辛基举行的 WP8F 第 17 次会议上, ITU-R WP8F 正式将 System Beyond IMT-2000 命名为 IMT-Advanced。2008 年 2 月, ITU-R WP5D 完成了 IMT-Advanced 需求定义, 发出了征集 IMT-Advanced 候选技术提案的通函。2009 年 10 月, WP5D 完成了候选技术提案的征集提交, 并开始了后续评估和标准融合开发工作。中国提交了 3GPP LTE-Advanced 技术的 TDD 部分, 即 TD-LTE-Advanced 技术。2010 年 10 月, 在中国重庆举办的 ITU-R WP5D 第九次会议上, LTE-Advanced 和 WirelessMAN-Advanced 正式被 ITU 接纳为 IMT-Advanced 4G 技术。TD-LTE-Advanced 成为继 TD-SCDMA 之后的又一个移动通信国际标准。

1.2 TD-SCDMA 标准与技术

在第三代移动通信中, 3GPP TDD 系统是一种典型的时隙 CDMA (Time Slotted CDMA) 系统。所谓时隙 CDMA 系统, 即发送信号按照时隙划分, 具有时隙同步的 CDMA 系统。在 3GPP TDD 标准中, 又分为两种选择方案: 一种是 3.84Mchip/s TDD (HCR TDD, High Chip Rate

TDD)方案,是由欧洲提出的 UTRA TDD 演变而来的;另一种是 1.28Mchip/s TDD(LCR TDD, Low Chip Rate TDD)方案,是由中国提出的 TD-SCDMA 演变而来的。下面简单介绍 TD-SCDMA 移动通信系统物理层信号结构及其关键技术^{[1][5][6]}。

1.2.1 TD-SCDMA 物理层信号结构

首先我们来看 TD-SCDMA 系统物理层的信号结构。

TD-SCDMA 物理层信道的帧结构分为 4 层:超帧(Super Frame)、无线帧(Radio Frame)、子帧(Sub Frame)和时隙(Time Slot, 或称为突发信号 Burst)。

TD-SCDMA 超帧和无线帧的结构如图 1-1 所示。一个超帧长 720ms, 由 72 个无线帧组成, 每个无线帧长 10ms。上述结构与 UTRA TDD 完全相同。对于 TD-SCDMA 系统, 将每个无线帧分为两个 5ms 的子帧。

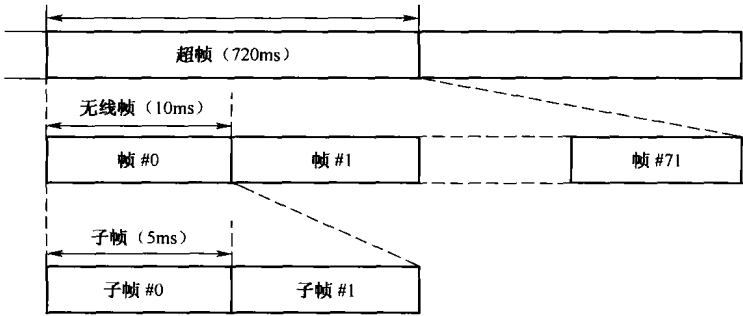


图 1-1 TD-SCDMA 超帧和无线帧结构

TD-SCDMA 子帧的结构如图 1-2 所示。每个子帧由 7 个常规时隙(长度为 675 μ s)和 3 个特殊时隙——下行导频时隙(DwPTS)、上行导频时隙(UpPTS)和保护时隙(GP)构成。

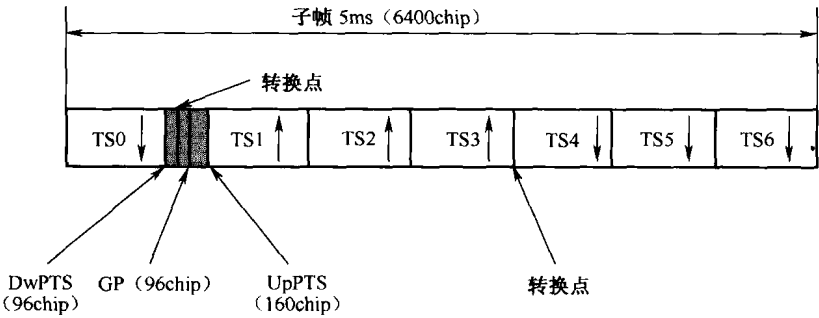


图 1-2 TD-SCDMA 子帧结构

在 7 个常规时隙中, TS0 (Time Slot 0) 总是分配给下行链路 (DL, DownLink), 而 TS1 总是分配给上行链路 (UL, UpLink)。上行时隙和下行时隙之间由转换点 (SP, Switching Point) 分开。在 TD-SCDMA 系统中, 每个 5ms 的子帧有两个转换点 (UL $\rightarrow$ DL 和 DL $\rightarrow$ UL)。通过灵活地配置上下行时隙的个数, TD-SCDMA 适用于上下行对称及非对称的模式。图 1-3 分别给出了对称分配和不对称分配上下行链路的例子。

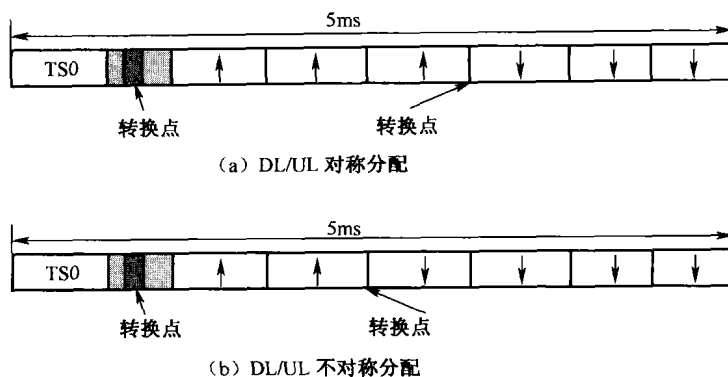


图 1-3 TD-SCDMA 时隙分配示例

下行导频时隙(DwPTS)的突发结构如图 1-4 所示。DwPTS 由 32chip 的保护间隔和 64chip 的下行同步码 (SYNC_DL) 组成,它是无线基站 (小区) 的导频 (Pilot) 信号,也是下行同步的信号。SYNC_DL 是一组 PN 码,用于区分相邻小区 (基站)。系统中定义了 32 个码组,每组对应一个 SYNC_DL 序列,SYNC_DL PN 码集在蜂窝网络中可以复用。

上行导频时隙 (UpPTS) 的突发结构如图 1-5 所示。UpPTS 由 128chip 的上行同步码 (SYNC_UL) 和 32chip 的保护间隔组成,它是用户终端的导频 (Pilot) 信号,主要作用用户终端的随机接入初始同步。SYNC_UL 是一组 PN 码,用于在接入过程中区分不同的 UE。

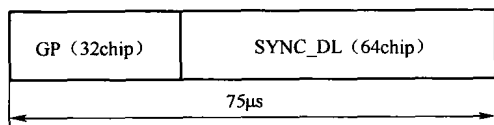


图 1-4 下行导频时隙的突发结构

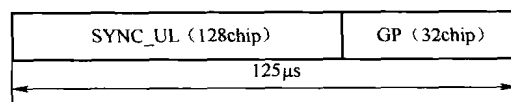


图 1-5 上行导频时隙的突发结构

保护时隙 (GP) 用于在基站端给出由下行转为上行的保护时间间隔,时长为 $75\mu\text{s}$ (96chip)。在 TD-SCDMA 系统中,此时隙的宽度保证了小区的最大半径可以达到 10km 以上,并放宽了对终端初始接入的时间估计精度的要求。

TD-SCDMA 常规时隙的突发结构如图 1-6 所示。主时隙总长 $675\mu\text{s}$,即 864chip。此突发类型由两个数据符号区 (共 704chip)、一个 144chip 的中间码 (Midamble 码) 和一个 16chip 的保护区组成。中间码作为训练序列,供信道估计使用。

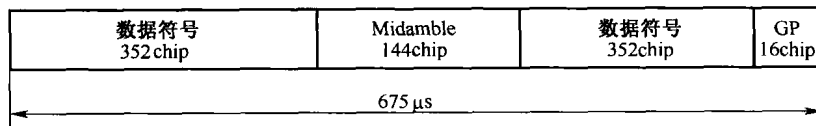


图 1-6 TD-SCDMA 时隙突发结构

在数据区,经过物理信道映射后的数据流要经过数据调制和扩频调制的过程。数据调制可以采用 QPSK、8PSK 或 16QAM 的方式,调制后的数据符号送入扩频调制。扩频调制要经过两个步骤:首先要经过信道化码进行扩频,然后利用扰码加扰。信道化码采用正交可变扩频因子 (OVSF, Orthogonal Variable Spreading Factor) 码,其扩频系数 (码长) 可以取值 Q_k

$\in \{1, 2, 4, 8, 16\}$, 信道化码用来区分本小区内同一时隙的不同码道。扰码采用固定长度为 16 的二进制扰码加复数旋转后生成的复数序列, 扰码是由小区确定的。

1.2.2 TD-SCDMA 系统的关键技术

在介绍了物理层的信号结构之后, 下面简单地介绍一下 TD-SCDMA 系统的关键技术。概括总结 TD-SCDMA 的技术特色, 主要有如下几个方面。

- ① 时分双工技术: 非成对频率, 单频点工作, 支持非对称业务, 信道对称性应用。
- ② FDMA+TDMA+CDMA: 资源管理与调度灵活方便; 动态信道分配 (DCA) 技术。
- ③ 智能天线技术: 自适应多天线技术应用, 覆盖/干扰抑制/容量/数据率/谱效率。
- ④ 短码 CDMA 与低码片速率: 联合检测应用, 抗多址与多径干扰; 小的资源单位, 软件无线电。
- ⑤ 完备的时隙结构: 基于块的处理, 单个时隙完成信道估计与解调, 兼容技术扩展。
- ⑥ 优化的空中接口过程: 小区搜索, 随机接入, 同步, 功率控制, 调度, 切换等。
- ⑦ 系统同步机制: 正常工作的保障, 性能提升的基础; 多小区间信号/干扰的协调与处理; 先进多媒体广播系统——同步/短码/分时隙。

这些技术特色的深入研究和开发决定了系统的性能和技术后续演进的方向, 下面就几项具体技术做进一步的介绍。

(1) 上行同步技术

同步 CDMA 所指的同步就是上行同步, 即要求分配在同一时隙的来自不同距离、不同用户终端的上行信号能够同步地到达基站。蜂窝移动通信的实际信道环境是非常复杂的, 存在干扰、多径传播和多普勒效应, 要实现理想的同步是不可能的。但是, 如果能够使每个上行信号的主径达到同步, 对改善系统性能、简化基站接收机的设计 (特别是对于 TDD 系统) 都有明显的好处。TD-SCDMA 系统的上行同步分为两个过程: 同步建立和同步保持。在上行同步的建立过程中, 终端首先利用下行导频信道 (DwPCH) 完成下行同步并解调基站的广播信息, 然后通过上行导频信道 (UpPCH) 的随机接入过程 (先开环后闭环) 来建立上行同步。在上行同步的保持过程中, 基站利用中间码 (Midamble 码) 检测上行信号的到达时刻, 并通过下行信道利用物理层控制信令对终端的发射时刻进行闭环控制。

(2) 动态信道分配

TD-SCDMA 系统对信道的分割同时采用了频分、时分和码分的技术, 系统中的任何一条物理信道都是通过它的载频/时隙/扩频码的组合来标记的。信道分配实际上就是一种无线资源的分配过程。信道分配可以采用固定信道分配 (FCA, Fixed Channel Allocation) 或动态信道分配 (DCA, Dynamic Channel Allocation) 方式, 也可以采用混合的信道分配方式 (结合 FCA 和 DCA 的方式)。固定信道分配方式是预先把信道资源固定地分配给各个小区, 而动态信道分配则是根据业务特性和信道条件两方面的情况来动态地分配信道。动态信道分配的主要功能包括: 信道优先级排序, 信道选择和分配, 信道调整和资源整备。目前, 3GPP 的标准中阐述的是一种基于本地干扰测量的信道分配算法, 信道分配算法在网络侧由 RNC 完成, 根据 UE 和 Node B 对本地信号及干扰强度的测量来分配信道。

(3) 联合检测技术

在 CDMA 移动通信系统中存在着严重的多径干扰和多用户干扰。传统的单用户检测方法