

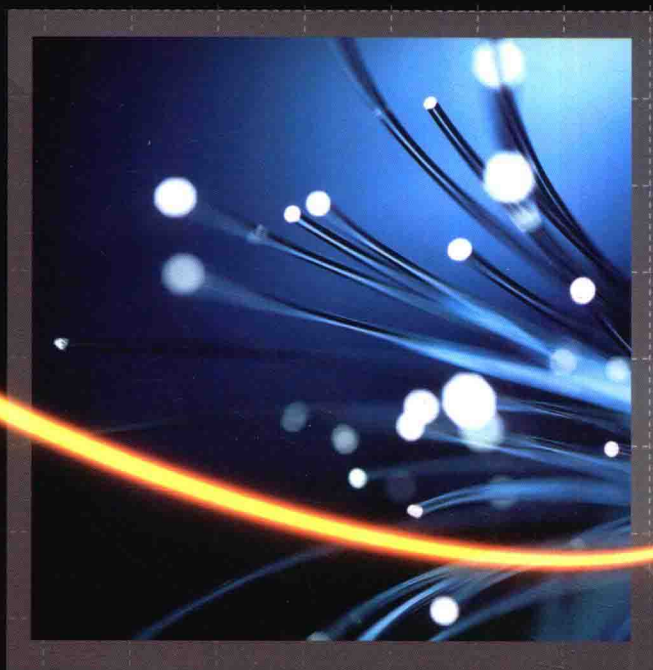


高端科技专著丛书

SC-CFDMA

无线传输技术

◆ 丁 丹 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高端科技专著丛书

SC-CFDMA 无线传输技术

丁 丹 著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

SC-CFDMA 技术是 SC-FDMA 技术 (4G 移动通信主流技术) 与 CDMA 技术 (3G 移动通信主流技术) 的有机融合, 在多用户、大容量、抗干扰以及资源分配灵活性等方面具有明显优势, 有着较为广阔的应用前景。本书在梳理移动通信发展动因、技术体制和系统特点的基础上, 系统介绍了 SC-CFDMA 的系统模型和传输性能, 深入研究了 SC-CFDMA 的载波同步、符号同步以及样值同步等关键技术, 展望了 SC-CFDMA 技术在军事和民用方面的应用前景。

本书可作为通信与信息类专业高年级本科生及相关专业硕士生、博士生的教学用书或参考书, 也可供无线通信领域从事研究与开发的科研人员、工程技术人员参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

SC-CFDMA 无线传输技术 / 丁丹著. —北京: 电子工业出版社, 2017.9

(高端科技专著丛书)

ISBN 978-7-121-32625-7

I. ①S… II. ①丁… III. ①移动通信—通信技术 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 215626 号

策划编辑: 曲 昕

责任编辑: 曲 昕

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 9 字数: 210 千字

版 次: 2017 年 9 月第 1 版

印 次: 2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: quxin@phei.com.cn。

FOREWORD

前言

纵观移动通信的发展脉络，其每一次更新换代既是技术的发展，又是用户体验的发展，也是用户需求的发展。1G 解决户外移动话音通信，2G 增加了低速数据业务，3G 进一步提供高速多媒体业务，4G 则实现了移动互联网。未来，人们对移动通信的需求将进一步增加，一方面，预计未来 10 年移动通信数据流量将呈爆发式增长，将达到当前的数百倍甚至更多，而且追求极致的使用体验，要求获得与光纤相似的接入速率、媲美本地操作的实时体验、随时随地的宽带接入能力；另一方面，伴随着移动物联网（Internet of Things, IoT）产业浪潮，车联网、智能家居、移动医疗等将会推动移动互联网和物联网相互融合形成新型“跨界业务”，数以千亿的设备将接入无线网络，形成“万物互联”新局面，实现“信息随心至、万物触手及”的美好愿景，由此催生了 5G 移动通信。这些发展动因给无线传输技术带来了更新、更高的要求，包括用户数量、数据吞吐量、抗干扰能力、资源分配灵活性、组网能力、实现复杂度等方面。在当前诸多无线传输技术中，OFDM 具有较高的传输效率、多用户适应能力以及资源分配灵活性；CDMA 则具有较强的多用户和抗干扰能力。因此，将 OFDM 技术和 CDMA 技术相结合、综合二者优势，是实现满足日益旺盛的通信需求的一种可行途径。

SC-CFDMA（Single Carrier Code-Frequency Division Multiple Access，单载波码分、频分多址）即 SC-FDMA 技术与 CDMA 技术结合的产物，也可视为一种呈现单载波特性的特殊 MC-CDMA，具有较低的 PAPR。CDMA 扩频技术是用更宽的频带换取通信的可靠性和抗干扰能力；SC-FDMA 则是通过对各用户数据进行 DFT 预编码，将普通 OFDMA 转变为一种时域、宽带调制技术，物理上仍然以多个正交子载波来划分频率资源，但其波形呈现单载波特性，避免了传统 OFDMA 的高 PAPR 问题。除了具备低 PAPR 的特点，SC-CFDMA 的扩频处理使得它能够和传统的扩频技术一样有效对抗窄带干扰，且在对抗部分带宽干扰方面比传统扩频方式更为有效。由于结合了正交子载波和扩频码两种多用户复用手段，SC-CFDMA 系统对用户数量变化的适应能力较强，这在用户数量和业务需求多变的场合下就显得更有利。传统的扩频技术需要采用 RAKE 接收技术来对抗多径衰落，实现起来比较复杂；而由于子载波面临平坦衰落、接收端采用频域均衡等原因，正交多载波技术本身就有对抗多径衰落的能力，与扩频技术相结合后比单纯采用 RAKE 接收的扩频系统性能还要优越，实现也更为简单。在信道资源分配动态性、灵活性方面，CDMA 虽然能够通过采用正交可变扩频因子码改变各用户的传输速率，但必须按 2 的幂次分挡位改变；而在 SC-CFDMA 体制中，可通过改变用户占用的子载波数量来调整数据速率，这种方式比改变扩频码周期长度更为灵活和方便，不受限于 2 的幂次。所以，SC-CFDMA 通信技术能够满足多用户、大容量、抗干扰、资源分配灵活的需求，适用于军、民用移动通信。

全书共 6 章,第 1 章全面总结了地面移动通信以及卫星移动通信的发展,包括发展动因、技术体制以及系统特点;第 2 章介绍了 OFDM 和 SC-FDMA 技术基础知识,在此基础上引出 SC-CFDMA 技术,分析 SC-CFDMA 传输模型和传输性能,并提出了 SC-2DCFDMA 技术;第 3~5 章分别探讨 SC-CFDMA 的载波同步、符号同步和样值同步三大技术难题,深入分析了同步偏差对系统性能带来的影响,提出了有效的载波、符号、样值同步方法,仿真验证了相关方法的性能。第 6 章展望了 SC-CFDMA 在移动通信、卫星通信、电力线通信、水声通信以及巡航导弹组网通信等方面的应用前景。

本书的写作得益于作者所在团队成员的鼎力相助,全书由丁丹撰写,陈宜文参与了第 2、6 章部分内容的撰写,柴黎、倪淑燕、姜明勇参与了第 1、6 章部分内容的撰写,李云涛、赵阳、李兆铭为本书部分仿真实验做出了贡献,廖育荣、程乃平教授审阅全书并提出了宝贵建议。作者团队在国内外重要学术期刊上发表论文 30 余篇,提交国家、国防发明专利 10 余项,本书正是在上述研究成果基础上完成,并得到了装备预研、863 等多项课题资助。此外,本书在写作过程中参考了有关书籍和文献(见本书列出的参考文献),在此向这些作者一并致谢。

本书脉络清晰、深入浅出,且具有一定创新性,可作为通信与信息类专业高年级本科生及相关专业硕士生、博士生的教学用书或参考书,也可供无线通信领域从事研究与开发的科研人员、工程技术人员参考。

由于作者水平所限,加之时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

CONTENTS

目录

第 1 章 移动通信发展	(1)
1.1 地面移动通信发展	(1)
1.1.1 第 1 代 (1G) 移动通信	(1)
1.1.2 第 2 代 (2G) 移动通信	(2)
1.1.3 第 3 代 (3G) 移动通信	(5)
1.1.4 第 4 代 (4G) 移动通信	(7)
1.1.5 第 5 代 (5G) 移动通信	(9)
1.2 卫星移动通信发展	(16)
1.2.1 卫星移动通信特点	(16)
1.2.2 卫星移动通信技术体制发展	(17)
1.2.3 典型卫星移动通信系统	(23)
第 2 章 SC-CFDMA 传输技术	(29)
2.1 OFDM 技术	(29)
2.1.1 技术提出	(29)
2.1.2 技术原理	(30)
2.2 SC-FDMA 技术	(33)
2.2.1 技术提出	(33)
2.2.2 技术原理	(33)
2.3 SC-CFDMA 技术	(36)
2.3.1 技术提出	(36)
2.3.2 技术特点	(37)
2.4 SC-CFDMA 传输模型	(38)
2.4.1 发射端模型	(38)
2.4.2 AWGN 信道下接收端模型及误码率分析	(39)
2.4.3 频率选择性信道下接收端模型及误码率分析	(43)
2.5 SC-2DCFDMA 技术及其传输模型	(49)
2.5.1 模型建立	(49)
2.5.2 误码率分析	(51)
2.5.3 仿真分析	(52)
2.6 需解决的问题	(55)

2.7	本章小结	(56)
第3章	SC-CFDMA 载波同步技术	(57)
3.1	载波同步偏差对 SC-CFDMA 系统性能影响分析	(57)
3.1.1	理论分析	(57)
3.1.2	仿真分析	(58)
3.2	SC-CFDMA 载波同步机制	(59)
3.3	基于改进超矩形分解法的载波频偏及其变化率联合估计	(61)
3.3.1	基于最优化的 LFM 信号参数估计概述	(61)
3.3.2	传统方法描述	(63)
3.3.3	传统方法的改进	(64)
3.3.4	L-DIRECT 算法分析	(69)
3.3.5	仿真分析	(72)
3.4	本章小结	(76)
第4章	SC-CFDMA 符号同步技术	(77)
4.1	符号同步误差对 SC-CFDMA 系统性能的影响	(77)
4.1.1	理论分析	(78)
4.1.2	仿真分析	(79)
4.2	基于多速率环路的 SC-CFDMA 符号同步方法	(81)
4.3	符号定时误差估计方法	(83)
4.3.1	估计机制设计	(83)
4.3.2	估计精度提升	(84)
4.3.3	多用户能力提升	(85)
4.3.4	仿真分析	(85)
4.4	符号定时误差闭环调整方法	(89)
4.4.1	多速率控制环路与提升技术	(89)
4.4.2	提升后的累加器状态空间方程	(90)
4.4.3	提升后的环路滤波器状态空间方程	(90)
4.4.4	仿真分析	(91)
4.5	本章小结	(94)
第5章	SC-CFDMA 样值同步技术	(96)
5.1	基于改进和声搜索多用户检测的 SCO 同步方法	(96)
5.2	基于多用户检测的 SC-CFDMA 系统模型	(96)
5.2.1	发送端模型	(96)
5.2.2	接收端模型	(97)
5.3	SCO 影响分析	(97)
5.3.1	系统模型扰动分析	(97)
5.3.2	信号畸变分析	(98)
5.4	SCO 补偿方法	(100)
5.4.1	相关度量函数修正	(100)

5.4.2 一种新的检测算法	(101)
5.5 仿真分析	(104)
5.6 本章小结	(106)
第 6 章 SC-CFDMA 应用前景	(107)
6.1 SC-CFDMA 应用于移动通信	(107)
6.1.1 5G 移动通信标准最新进展	(107)
6.1.2 SC-CFDMA 应用适应性	(107)
6.2 SC-CFDMA 应用于卫星通信	(108)
6.2.1 卫星通信需求及存在的问题	(108)
6.2.2 SC-CFDMA 应用适应性	(108)
6.3 SC-CFDMA 应用于电力线通信	(110)
6.3.1 电力线通信原理	(111)
6.3.2 电力线通信信道特点	(112)
6.3.3 SC-CFDMA 应用适应性	(116)
6.4 SC-CFDMA 应用于水声通信	(118)
6.4.1 水声通信概述	(118)
6.4.2 水声通信信道特点	(118)
6.4.3 SC-CFDMA 应用适应性	(120)
6.5 SC-CFDMA 应用于巡航导弹组网通信	(121)
附录 A SC-CFDMA 系统各节点信噪比变化	(123)
附录 B 频率选择性信道下采用 ZF 均衡的 SC-2DCFDMA 误码率分析	(124)
附录 C AWGN 信道下 SC-2DCFDMA 误码率分析	(126)
附录 D AWGN 信道下 MC-CDMA 误码率分析	(127)
附录 E SC-2DCFDMA 系统中各节点信噪比变化	(128)
参考文献	(129)

第 1 章 移动通信发展

1.1 地面移动通信发展

从 1864 年英国物理学家麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 预言电磁波的存在, 到 20 世纪 80 年代“大哥大”横行江湖, 再到今天移动通信市场空前繁荣, 地面移动通信的发展历程可分为 5 代。

1.1.1 第 1 代 (1G) 移动通信

1. 发展动因

20 世纪 20 年代到 70 年代, 移动通信实现了从军事专用通信向民用商业化通信的转变, 连接方式从人工交换升级为自动交换方式。在此基础上, 为进一步提升系统容量, 实现区域多用户话音移动通信, 贝尔实验室于 1978 年提出并成功研制了模拟蜂窝移动通信系统, 并于 20 世纪 80 年代被广泛使用。

2. 技术体制

1G 蜂窝移动通信采用基于频分复用 (Frequency Division Multiplex, FDM) 的模拟通信技术。1G 蜂窝移动通信由多个独立开发的系统组成, 相应体制标准较多, 很多国家都制定了自己的体制, 最具代表性的模拟蜂窝通信系统包括美国的 AMPS、英国的 TACS、西德的 C-450 等, 如表 1-1 所示。

表 1-1 第 1 代模拟蜂窝电话系统的主要参数

系统名称	前向频带 (MHz)	反向频带 (MHz)	信道间隔 (kHz)	使用地区
AMPS	824~849	869~894	30	美国、澳大利亚、南亚、非洲
TACS	890~915	935~960	25	欧洲
E-TACS	872~905	917~950	25	英国
NMT450	453~457.5	463~467.5	25	欧洲
NMT900	890~915	935~960	12.5	欧洲
C-450	450~455.74	460~465.74	10	德国、葡萄牙
RMTS	450~455	460~465	25	意大利
Radiocom 2000	192.5~199.5	200.5~207.5	12.5	法国
	215.5~233.5	207.5~215.5		
	165.2~168.4	169.8~173		
	414.8~418	424.8~428		



续表

系统名称	前向频带 (MHz)	反向频带 (MHz)	信道间隔 (kHz)	使用地区
NTT	925~940	870~885	25/6.25	日本
	915~918.5	860~863.5	6.25	
	922~925	867~870	6.25	
JTACS/NTACS	915~925	860~870	25/12.5	日本
	898~901	843~846	25/12.5	
	918.5~922	863.5~867	12.5	

我国于1986年开始投资建设1G蜂窝移动通信网络,引进了美国摩托罗拉(Motorola)公司TACS标准的模拟蜂窝移动通信系统,作为A网;同时引进了瑞典爱立信(Ericsson)公司TACS标准的模拟蜂窝移动通信系统,作为B网。1987年11月,广东省首先开通了移动电话业务,出现了中国第1位手持“大哥大”的用户。1996年,实现了A网和B网的漫游。2011年,我国模拟蜂窝移动通信网络关闭。

1G典型系统采用的技术体制及主要参数如下:

- 频段——大多为800MHz和900MHz;
- 频带宽度——典型值为25MHz;
- 单信道带宽——典型值为30kHz或25kHz,可细分至6.25kHz以提升网络容量;
- 话音带宽——3.1kHz;
- 调制——模拟调频(Frequency Modulation, FM);
- 小区复用——小区采用7色FDM,小区内辅以扇区化;
- 前反向双工——频分双工(Frequency Division Duplexing, FDD);
- 切换方式——网络控制、终端辅助。

3. 系统特点

1G模拟蜂窝移动通信网络实现了区域多用户话音移动通信,在20世纪80年代得到了大规模发展,但存在如下弱点:

- 频谱利用率不高,容量受限;
- 覆盖范围小、制式太多、互不兼容,不支持全球漫游;
- 模拟体制,保密性差、通话质量不高、不提供数据业务;
- 无法与通信的数字化发展相适应,数字承载业务很难发展;
- 终端笨重。

这些弱点妨碍了其进一步发展,因此由于日益激烈的市场竞争和技术竞争,1G模拟蜂窝移动通信在20世纪90年代逐步被2G数字蜂窝移动通信所取代。

1.1.2 第2代(2G)移动通信

1. 发展动因

随着数字通信技术的发展和用户对通信容量、业务种类、全球漫游、安全保密等方面的追求,从20世纪80年代中期开始,2G数字蜂窝移动通信系统取代了1G模拟蜂窝

移动通信系统。由于 2G 采用了更为先进的数字通信技术，使得网络容量、业务类型、漫游能力、安全性能等均有了很大提高，实现了全球、移动、数字通信，不仅能传输语音，而且能提供低速数据业务，又成为窄带数字移动通信系统。

2. 技术体制

2G 蜂窝移动通信的体制标准较 1G 更为统一，最具代表性的 2G 体制包括欧洲的全球移动通信系统(Global System for Mobile communication, GSM)、北美的码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)、20 世纪末欧洲电信标准学会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)推出的 GSM 升级版——通用分组无线服务(General Packet Radio Service, GPRS)，以及 EDGE(Enhanced Data Rate for GSM Evolution, 增强数据速率 GSM 演进)，各系统主要参数如表 1-2 所示。

表 1-2 第 2 代数字蜂窝系统的主要参数

系 统	GSM	IS-54	JDC	IS-95
使用地区	欧洲/亚洲	美国	日本	美国/亚洲
接入方法	TDMA/FDD	TDMA/FDD	TDMA/FDD	CDMA/FDD
调制方法	GMSK	$\pi/4$ -DQPSK	$\pi/4$ -DQPSK	SQPSK/QPSK
频段 (MHz)	935~960 890~915	869~894 824~849	810~826 940~956 1477~1489 1429~1441 1501~1513 1453~1465	869~894 824~849
载波间隔 (kHz)	200	30	25	1250
承载信道数/载波	8	3	3	可变
信道比特率 (Kbit/s)	270.833	48.6	42	1228.8
语声编码速率 (Kbit/s)	13	8	8	1~8 (可变)
帧长 (ms)	4.615	40	20	20

我国的数字蜂窝移动通信网的大力发展是从 20 世纪末开始的。1994 年，中国联通率先开始建设数字蜂窝移动通信网，1994 年底，广东首先开通 GSM 数字移动电话网(俗称 G 网)。G 网工作频率是 900MHz，为了满足不断增长的通信容量，后来又建设了 DCS1800 移动通信系统的网(即 D 网)，D 网采用的是 GSM900 标准，不同的是工作频率为 1800MHz，使用双频手机就可以在 G 网和 D 网中漫游通话。在 2000 年，中国联通启动了 CDMA 移动电话网(即 C 网)建设。2004 年出现了 GSM/CDMA 双模手机，双模手机用户可以自由选择使用 G 网和 C 网进行通信。目前我国应用的移动通信网主要是 G 网(主要运营商是中国移动与中国联通)和 C 网(主要由中国联通运营)。2001 年，中国移动开通 GPRS 业务，标志着中国无线通信进入 2.5G 时代。经过短短 20 年的发展，我国已成为全球移动通信用户最多的国家，中国移动不仅是中国规模最大的移动通信运营商，也是拥有全球最大网络规模 and 用户规模的移动通信运营商。



GSM、GPRS、EDGE 采用的技术体制及主要参数如下:

- 频段——900MHz、1800MHz;
- 单信道带宽——200kHz;
- 话音带宽——8kHz;
- 数据速率——GSM 为 9.6~14.4Kbps, GPRS 最高为 171.2Kbps 分组交换速率;
- 话音速率——13Kbps;
- 调制——GMSK;
- 纠错码——卷积码;
- 复用——TDMA;
- 双工——FDD;
- 小区——小区间 4 色复用, 小区内分 3 扇区;
- 切换——硬切换;
- 交换——GSM 为电路交换, GPRS 为分组交换;
- 保密——鉴权、加密;
- 话音编码——规则脉冲长期线性激励预测 (RPE-LTP);
- 其他——跳频 (217h/s)、时域均衡、话音间断传输。

GPRS 是在 GSM 系统软硬件基础上发展起来的分组交换系统, EDGE 则为 GPRS 到 3G 的过渡性技术体制, 它们与 GSM 工作频率一致, 为 2G 向 3G 过渡的网络系统, 所以有人将 GPRS 称为 2.5G 移动通信系统, EDEG 则称为 2.75G 移动通信系统。

CDMA 采用的技术体制和主要参数如下:

- 频段——800MHz;
- 单信道带宽——1.23MHz;
- 码片速率——1.2288Mcps;
- 数据速率——RS1 支持 1.2/2.4/4.8/9.6Kbps, RS2 支持 1.8/3.6/7.2/14.4Kbps;
- 话音带宽——8kHz;
- 同样覆盖面积下, CDMA 所需基站数比 GSM 少 80%;
- 调制——下行 QPSK, 上行 OQPSK;
- 纠错码——卷积码;
- 多址方式——CDMA;
- 双工——FDD;
- 小区复用——复用因子为 1;
- 切换——软切换;
- 容量——软容量;
- 话音编码——码激励线性预测的可变速率混合编码算法 (QCELP);
- 其他——RAKE、话音间断传输、功率控制。

3. 系统特点

GSM、GPRS 蜂窝移动通信系统具有如下优点:

- 频谱利用率达 1.35bps/Hz, 高于 1G;



- 系统容量比 1G 提高 4~5 倍；
- 统一标准，实现漫游；
- 业务比 1G 多样，如短信、GPRS 上网；
- 安全性、保密性强于 1G。

CDMA 蜂窝移动通信系统具有如下优点：

- 频率规划简单，网络规划、扩展灵活；
- 系统容量大，没有绝对的用户数量限制；同样条件下，CDMA 系统容量为 GSM 的 4~6 倍，为模拟系统的 20 倍；
- 保密性好，采用扩频码；
- 话音编码速率可变，适应不同信道条件。

尽管 2G 数字蜂窝移动通信基本实现了全球移动数字通信，其功能、性能明显优于 1G 模拟蜂窝移动通信，但仍存在以下不足：

- 漫游——与 1G 模拟蜂窝移动通信相比，2G 漫游能力明显增强，但仍未实现真正的全球漫游。
- 系统容量——2G 数字蜂窝移动通信系统容量实现了大幅增长，达到 1G 模拟蜂窝移动通信的 4~6 倍，但仍然难以适应日益增长的用户需求。
- 其他——此外，2G 的不足还包括切换掉话、接入速率不足、编码质量低等。

1.1.3 第 3 代（3G）移动通信

1. 发展动因

由于 2G 移动通信难以提供高速数据业务、无法实现真正的全球漫游、系统容量与用户规模增长之间的矛盾日益凸显，20 世纪 80 年代中期，国际电联（International Telecommunication Union, ITU）开始研发 3G 移动通信技术，旨在实现能够全球漫游、适应多种环境、提供足够容量的宽带多媒体移动通信。

2. 技术体制

1996 年，ITU 确定了 3G 移动通信系统正式名称为 IMT-2000，其含义为预期该系统在 2000 年左右投入使用，工作于 2000MHz 频段，最高传输速率为 2000Kbit/s。随后，各国、各组织竞相向 ITU 提出自己的 3G 标准。1999 年 11 月，ITU 最终确定了 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA 三大体制标准，如表 1-3 所示。

表 1-3 3G 移动通信技术体制对比

体 制	WCDMA	CDMA2000	TD-SCDMA
单信道带宽	5MHz	1.25MHz	1.6MHz
码片速率	3.84Mcps	1.2288Mcps	1.28Mcps
数据速率	最高 2.048Mbps	最高 2.5Mbps	最高 2.048Mbps
帧长	10ms	20ms	10ms（两个子帧）
话音带宽	16kHz	16kHz	16kHz



续表

体 制	WCDMA	CDMA2000	TD-SCDMA
话音速率	4.75~12.2Kbps 可调	1.2~9.6Kbps 可调	1.2~9.6Kbps 可调
系统容量 (话音)	100 个用户/5MHz/扇区	105 个用户/5MHz/扇区	24 个用户/1.6MHz/扇区
理想小区覆盖 密度	0.5~1km 一个基站	1~2km 一个基站	不超过 11.25km 一个基站
调制方式	下行 QPSK, 上行 BPSK	下行 QPSK, 上行 BPSK	QPSK、8PSK、16QAM
纠错码	卷积码、RS 码、Turbo 码	卷积码、RS 码、Turbo 码	卷积码、RS 码、Turbo 码
复用方式	CDMA+FDMA	CDMA+FDMA	CDMA+FDMA
双工方式	FDD	FDD	TDD
最优复用因子	1	1	1
切换策略	扇区间软切换、小区间软切换、 载频间硬切换	扇区间软切换、小区间软切 换、载频间硬切换	接力切换
话音编码	自适应多码率宽带语音编码 (AMR)	支持 QCELP13K、QCELP8K、 EVRC 三种	自适应多码率宽带语音编码 (AMR)
核心网	基于 GSM 演进	基于 CDMA 演进	与 WCDMA 类似, 属 UMTS 网络架构
基站同步	异步	同步	同步
其他	自适应编码调制 (AMC)、 RAKE、功率控制、多用户检测	自适应编码调制 (AMC)、 RAKE、功率控制、多用户检 测	自适应编码调制 (AMC)、 RAKE、功率控制、联合检测、 智能天线、动态信道分配

WCDMA 由欧洲和日本提出, 基于 2G 的 GSM 演进, 所以受到 GSM 运营商的支持, 鉴于 GSM 的市场占有率, 其全球漫游能力最强、影响范围最广。CDMA2000 由美国提出, 基于 2G 的 CDMA 演进, 技术成熟度高, 但由于市场占有率的缘故, 其全球漫游能力一般。TD-SCDMA 则由中国提出, 是中国在通信领域的第一个全球标准, 受到中国政府的大力扶持, 其空中接口采用了一系列先进技术, 支持上下行不对称业务, 频谱利用率最高。

3. 系统特点

相比 2G, 3G 移动通信具有以下特点:

- 可实现全球漫游, 使任意时间、任意地点、任意人之间的交流成为可能;
- 能够实现高速数据传输和宽带多媒体服务;
- 采用自适应多速率传输, 适应不同信道条件;
- 除了进行普通的寻呼和通信外, 还可上网读报、查信息、下载文件和图片;
- 由于带宽的提高, 第三代移动通信系统还可以传输图像, 提供可视电话业务。

然而, 由于 3G 核心网尚未脱离 2G 核心网结构, 所以普遍认为 3G 是一个从窄带移动通信向未来宽带移动通信的过渡。



1.1.4 第4代（4G）移动通信

1. 发展动因

纵观移动通信从 1G、2G 到 3G 的发展过程，是从窄带语音业务到宽带多媒体业务发展的过程。手机设备微型化、人性化、功能多，能够提供多样化通信、娱乐、生活服务等业务，已成为人们社会生活不可或缺的部分。与此同时，用户不断追求更高的网速、更多的业务、更优的体验，致使 2G、3G 提供的数据通信业务逐渐不能满足需求，无论是数据速率还是业务类型都已达到系统的极限，需寻找突破性的空中接口技术和网络接口。

在此背景下，4G 突破传统意义上的“数据通信”理念，将数字移动通信和互联网有机融合，形成“宽带移动互联网”。用户可在户外接入因特网，享受宽带网络带来的便利。“滴滴打车”、“微信理财”、“美团外卖”等新型业务极大地改变了人们的生活方式，同时也催生了“手机依赖症”、“低头族”等社会现象。

2. 技术体制

2004 年 12 月，在 3GPP（3rd Generation Partnership Project，第 3 代合作伙伴计划）多伦多会议上，正式立项并启动了 LTE（Long Term Evolution，长期演进）标准，以 OFDM/MIMO 为核心技术，目标是构建出高速率、低时延、分组优化的无线接入系统，可以视为“准 4G”或 3.9G。2008 年，LTE 标准化基本完成，其主要技术和参数分别如表 1-4 和表 1-5 所示。

表 1-4 LTE 主要技术

调制方式	QPSK、16QAM、64QAM
纠错编码	Turbo 码、LDPC 码
多址方式	OFDMA、SC-FDMA、MIMO
双工方式	TDD、FDD
小区切换	硬切换
话音编码	VoLTE
核心网	基于 IP 的核心网
基站同步	TD-LTE 需 GPS，FD-LTE 不需 GPS
其他技术	智能天线、软件无线电、载波聚合、协作多点传输（CoMP）、自组织网络

表 1-5 LTE 主要参数

单信道带宽	1.25~20MHz
数据速率	上行峰值为 50Mbps，下行峰值为 100Mbps
频谱效率	1.69bit/s/Hz（2×2 MIMO），1.87bit/s/Hz（4×4 MIMO）
时延	用户面时延小于 5ms，控制面时延小于 100ms



续表

运动适应性	能为速度大于 350km/h 的用户提供 100Kbps 的数据速率
话音带宽	16kHz
话音速率	4.75~12.2kbps 可调
视频质量	分辨率 720P, 帧率 30fps
容量 (纯话音)	200 个用户/5MHz/小区
覆盖	支持 100km 小区半径覆盖

● TDD-LTE 与 FDD-LTE

TDD-LTE 和 FDD-LTE 分别是 4G 两种不同的制式, 一个是时分一个是频分。简单来说, TDD-LTE 上下行在同一个频点时隙分配; FDD-LTE 上下行通过不同的频点区分。就其技术特点来说, 没有谁领先之分。

时分双工技术 (Time Division Duplexing, TDD) 是移动通信技术使用的双工技术之一, 与 FDD 相对应。在 TDD 模式的移动通信系统中, 基站到移动台之间的上行和下行通信使用同一频率信道 (即载波) 的不同时隙, 用时间来分离接收和发送信道, 某个时间段由基站发送信号给移动台, 另外的时间由移动台发送信号给基站。基站和移动台之间必须协同一致才能顺利工作。TD-LTE 上行理论速率为 50Mbit/s, 下行理论速率为 100Mbit/s。

FDD 模式的特点是在分离的两个对称频率信道上进行接收和发送, 用保证频段来分离接收和发送信道。LTE 系统中, 上下行频率间隔可以达到 190MHz。FDD (频分双工) 是 LTE 技术支援的两种双工模式之一, 应用 FDD (频分双工) 式的 LTE 即为 FDD-LTE。由于无线技术的差异、使用频段的不同及各个厂家的利益等因素, FDD-LTE 的标准化与产业发展都领先于 TDD-LTE。FDD-LTE 已成为当前世界上采用的国家及地区最广泛的, 终端种类最丰富的一种 4G 标准。FDD-LTE 上行理论速率为 40Mbit/s, 下行理论速率为 150Mbit/s。

相对 3G 的 3 种标准, 4G 的 TDD-LTE 和 FDD-LTE 差异更小, 兼容性更平滑, 更易于全球漫游。

● LTE-Advanced

从字面上看, LTE-Advanced 就是 LTE 技术的升级版, 那么为何两种标准都能够成为 4G 标准呢? LTE-Advanced 的正式名称为 Further Advancements for E-UTRA, 它满足 ITU-R 的 IMT-Advanced 技术征集的需求, 是 3GPP 形成欧洲 IMT-Advanced 技术提案的一个重要来源。LTE-Advanced 是一个后向兼容的技术, 完全兼容 LTE, 是演进而不是革命, 相当于 HSPA 和 WCDMA 这样的关系。LTE-Advanced 的相关特性如下:

- 带宽——100MHz;
- 峰值速率——下行 1Gbit/s, 上行 500Mbit/s;
- 峰值频谱效率——下行 30bps/Hz, 上行 15bps/Hz;
- 针对室内环境进行优化;
- 有效支持新频段和大带宽应用;
- 峰值速率大幅提高, 频谱效率的有限改进。



如果严格讲, LTE 作为 3.9G 移动互联网技术, 那么 LTE-Advanced 作为 4G 标准更加确切一些。LTE-Advanced 的入围, 包含 TDD 和 FDD 两种制式, 其中 TD-SCDMA 将能够进化到 TDD 制式, 而 WCDMA 网络能够进化到 FDD 制式。移动主导的 TD-SCDMA 网络期望能够直接绕过 HSPA+网络而直接进入 LTE。

3. 系统特点

相比 3G, 4G 移动通信系统的主要优势包括:

- 通信速率高, 达 3G 的 50 倍, 提供高质量通信;
- 通信更灵活, 随时随地通信、上网;
- 更高质量多媒体通信, 语音、数据、图像等大量信息通过宽频信道传输;
- 与生活更紧密融合, 使生活更便利;
- 兼容性更平滑, 全球漫游能力更强。

1.1.5 第 5 代 (5G) 移动通信

1. 发展动因

纵观从 1G 到 4G 的发展脉络, 移动通信每一次更新换代都是为了解决当时最主要的需求。1G 解决户外移动话音通信, 2G 增加了低速数据业务, 3G 进一步提供高速多媒体业务, 4G 则实现了移动互联网。移动通信的发展既是技术的发展, 又是用户体验的发展, 也是用户需求的发展。未来, 人们对移动通信的需求将进一步增加: 一方面, 预计未来 10 年移动通信数据流量将呈爆发式增长, 将达到 2010 年的数百倍甚至更多, 而且追求极致的使用体验, 要求获得与光纤相似的接入速率、媲美本地操作的实时体验、随时随地的宽带接入能力; 另一方面, 伴随着移动物联网 (Internet of Things, IoT) 产业浪潮, 车联网、智能家居、移动医疗等将会推动移动互联网和物联网相互融合形成新型“跨界业务”, 数以千亿的设备将接入无线网络, 实现“万物互联”。

“移动互联网+物联网”的发展动因给 4G 移动通信系统带来了巨大挑战, 包括吞吐量、时延、链路密度、组网能力、成本、复杂度、能量损耗和服务质量等方面。由此, 5G 应运而生。未来的 5G 移动通信系统, 不能再用某项单一的业务能力或者某个典型的技术特征来定义, 而应是面向业务应用和用户体验的智能网络, 通过技术演进和创新, 满足未来包含广泛数据和连接的各种业务快速发展的需要, 提升用户体验, 实现“信息随心至、万物触手及”的美好愿景。

2. 技术体制

5G 已成为全球移动通信产业关注的焦点, 参与 5G 技术体制标准制定的主要国际组织包括 ITU、3GPP、NGMN (Next Generation Mobile Network, 下一代移动通信网络) 以及我国的 IMT-2020 推进组。其中, ITU 是移动通信领域最权威的国际组织之一, 它为全球移动通信技术的发展做出了重要贡献。在 4G 技术体制的发展过程中, ITU 和 3GPP 是相关标准制定的最重要的 2 个组织。所以在 5G 标准制定过程中, ITU 和 3GPP 将依然扮演重要的角色, 但其他新兴的组织也将围绕 5G 标准的制定发挥积极作用。