



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

畅销书全面升级 | 融合4G/5G移动通信技术  
100多所高校采用的经典教材

信息与通信工程

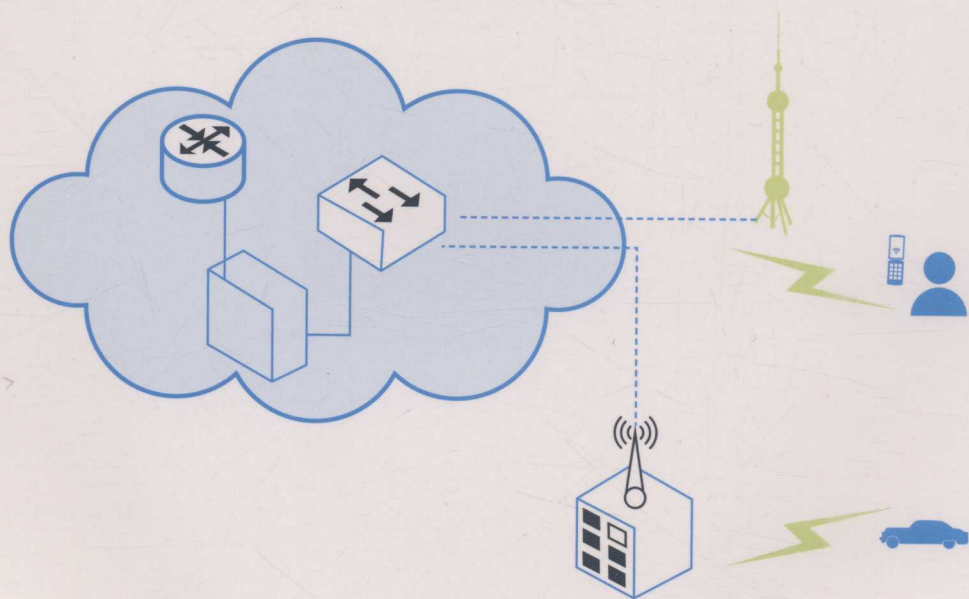
**P** rinciples of Mobile Communication  
Second Edition

# 移动通信原理

(第2版)

陈威兵 张刚林 冯璐 李玮 编著

Chen Weibing Zhang Ganglin Feng Lu Li Wei



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

Principles of Mobile Communication

Second Edition

# 移动通信原理

(第2版)

陈威兵 张刚林 冯璐 李玮 编著

Chen Weibing Zhang Ganglin Feng Lu Li Wei



清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书在介绍移动通信基本技术与原理的基础上,对1G至5G的各类移动通信系统的网络结构、关键技术和应用方式进行了全面阐述;给出了移动通信网络的规划、设计与优化方法;也对移动通信和计算机网络通信的融合方式进行了全面探讨。本书在编写过程中,注重实用性,力争做到内容全面、语言通俗易懂,同时注意吸纳移动通信领域最新研究成果,尽量涉及最新出现的技术、协议和规范。全书的主要特色可以概括为“内容新、知识全、重实用、跨专业”。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程和计算机应用等专业的高年级本科生和研究生相关课程的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

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

移动通信原理/陈威兵等编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2019

(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-53422-8

I. ①移… II. ①陈… III. ①移动通信—通信理论 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第179412号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:李红英

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市君旺印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.75 字 数:578千字

版 次:2016年1月第1版 2019年10月第2版 印 次:2019年10月第1次印刷

定 价:69.00元

产品编号:082005-01

# 高等学校电子信息类专业系列教材

## 一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学	(教指委高级顾问)	郁道银	天津大学	(教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学	(特约高级顾问)	胡广书	清华大学	(特约高级顾问)
华成英	清华大学	(国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学	(国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学	(国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学	(国家级教学名师)
邹逢兴	国防科技大学	(国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学	(国家级教学名师)

## 一 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学	王志军	北京大学
副主任	刘旭	浙江大学	葛宝臻	天津大学
	隆克平	北京科技大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	秦石乔	国防科技大学		
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	火箭军工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中国科学院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团股份有限公司
	蒋晓瑜	陆军装甲兵学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

# 序

## FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

# 前言

## PREFACE

移动通信技术是 40 年来发展最快的技术之一。自 20 世纪 70 年代末以来,已经经历了以模拟蜂窝通信为标志的第一代移动通信系统(1G)、以数字蜂窝通信为标志的第二代移动通信系统(2G)、以数据通信业务为主要标志的第三代移动通信系统(3G)、以全 IP 网络结构为标志的第四代移动通信系统(4G)等重要阶段。而以新型网络架构为标志的第五代移动通信系统(5G)即将全面铺开商用,它除了满足人们超高流量密度、超高连接数密度和超高移动性需求外,还将渗透到物联网领域,与工业设施、交通物流、医疗仪器等深度结合,全面实现“万物互联”,有效满足工业、交通、医疗等垂直行业的信息化服务需求。

本书的编写目的是为了给通信工程的学生和从业人员提供一本合适的书籍,方便其学习移动通信原理,并全面了解各类移动通信系统,特别是最新出现的移动通信技术和规范;与此同时,也给相近专业的人员提供一个了解移动通信的窗口。本书在编写过程中,力求做到内容充实、语言通俗易懂、结构条理清晰、形式图文并茂。

全书共 9 章。其中,第 1 章是对移动通信系统进行总体概述;第 2 章涉及移动通信基本技术和工作原理;第 3 章至第 7 章详细阐述了 2G 至 5G 的各类移动通信系统的总体组成、网络结构、关键技术和业务形式;第 8 章讨论了移动通信和计算机网络通信的融合方式;第 9 章介绍了移动通信网络的规划、设计和优化方法。

本书是在《移动通信原理》的基础上修订完成的,增加了第 7 章“第五代移动通信系统”、第 9 章第 7 节“5G 网络部署与规划设计”。本书由陈威兵副教授负责第 1 章、第 3 章至第 6 章和所有附录的修订工作,以及第 7 章的编写工作;张刚林副教授负责第 8 章的修订,冯璐副教授负责第 2 章的修订,李玮老师负责第 9 章的修订。关于 5G 内容的编写,参考了 IMT-2020(5G)推进组的 5G 网络技术系列白皮书。此外,长沙学院电子信息与电气工程学院、湖南大学信息科学与工程学院的同行也给出了很多中肯的意见,在此一并表示感谢。

需要说明的是,为了方便读者连贯阅读,书中有缩略书写方式的专业术语在正文中只给出了缩略语和中文解释,其英文全称可查阅附录中的缩略语英汉对照表。

本书与大家见面后,我们将虚心接受各位的批评与指正,并乐意和大家就移动通信的有关技术问题展开探讨。

本书的配套课件可以从清华大学出版社网站下载。本书有配套的教学视频资源,请关注爱课程网站中的“移动通信技术”课程(陈威兵主讲)。

作者

2019 年 8 月

# 目录

## CONTENTS

<b>第 1 章 移动通信概论</b> .....	1
1.1 移动通信的历史、现状与发展趋势 .....	1
1.1.1 移动通信的历史、现状 .....	1
1.1.2 移动通信在中国的发展概况 .....	3
1.1.3 移动通信的发展趋势 .....	4
1.2 蜂窝移动通信系统 .....	5
1.2.1 蜂窝小区的概念 .....	5
1.2.2 频率复用的几何模型 .....	6
1.2.3 蜂窝系统的组成 .....	7
1.2.4 蜂窝系统中的信道 .....	8
1.2.5 信道分配策略 .....	8
1.2.6 越区切换与位置管理 .....	8
1.3 专用移动通信系统 .....	9
1.3.1 无绳电话系统 .....	9
1.3.2 集群移动通信系统 .....	11
1.3.3 移动卫星通信系统 .....	13
1.3.4 分组无线网 .....	16
1.4 移动通信的基本技术 .....	16
1.4.1 多址连接 .....	16
1.4.2 组网技术 .....	17
1.4.3 移动通信中电波传播特性研究与信道建模技术 .....	18
1.4.4 抗干扰措施 .....	18
1.4.5 调制与解调 .....	19
1.4.6 语音编码技术 .....	19
1.5 移动通信标准化组织 .....	20
1.5.1 国际标准化组织 .....	20
1.5.2 不同地区中的标准化组织 .....	21
本章小结 .....	22
习题 .....	23
<b>第 2 章 移动通信基本技术及原理</b> .....	24
2.1 电波传播特性与信道建模技术 .....	24
2.1.1 无线电波传播特性 .....	24
2.1.2 移动信道特征 .....	26

2.1.3	移动信道建模技术 .....	28
2.2	多址技术 .....	28
2.2.1	多址方式 .....	28
2.2.2	扩频通信 .....	31
2.3	调制技术 .....	34
2.3.1	基本数字调制技术 .....	34
2.3.2	$\pi/4$ DQPSK 调制 .....	36
2.3.3	GMSK 调制 .....	38
2.3.4	多进制调制 .....	40
2.3.5	OFDM 调制 .....	40
2.4	抗衰落、抗干扰技术 .....	43
2.4.1	分集技术 .....	43
2.4.2	均衡技术 .....	46
2.4.3	信道编码技术 .....	48
2.5	信源编码与数据压缩 .....	53
2.5.1	语音压缩编码 .....	54
2.5.2	移动通信中的语音编码 .....	58
2.5.3	图像压缩编码 .....	61
	本章小结 .....	63
	习题 .....	64
<b>第3章</b>	<b>数字移动通信系统(2G) .....</b>	<b>66</b>
3.1	GSM 系统概述 .....	66
3.1.1	GSM 系统的结构 .....	66
3.1.2	GSM 的区域和识别号码 .....	68
3.2	GSM 的空中接口 .....	72
3.2.1	技术参数 .....	72
3.2.2	空中接口的物理结构 .....	73
3.3	GSM 系统控制与管理 .....	79
3.3.1	位置的登记和更新 .....	79
3.3.2	越区切换 .....	80
3.3.3	鉴权与加密 .....	81
3.4	IS-95 CDMA 系统概述 .....	83
3.5	IS-95 CDMA 的空中接口 .....	85
3.5.1	IS-95 CDMA 的正向信道 .....	85
3.5.2	IS-95 CDMA 的反向信道 .....	88
3.6	IS-95 CDMA 的控制功能 .....	91
3.6.1	软切换 .....	91
3.6.2	软容量 .....	91
3.6.3	功率控制 .....	92
3.6.4	安全机制 .....	93
	本章小结 .....	95
	习题 .....	96

<b>第 4 章 B2G 移动通信系统</b> .....	98
4.1 GPRS 系统 .....	98
4.1.1 GPRS 总体 .....	98
4.1.2 GPRS 协议模型 .....	100
4.1.3 GPRS 空中接口 .....	101
4.1.4 GPRS 的移动性管理和会话管理 .....	104
4.2 EDGE 系统 .....	107
4.2.1 概述 .....	107
4.2.2 EDGE 系统的关键技术 .....	107
4.3 CDMA 2000 1x 系统 .....	109
4.3.1 CDMA 2000 1x 系统的技术特点 .....	109
4.3.2 CDMA 2000 1x 系统的空中接口 .....	110
本章小结 .....	117
习题 .....	118
<b>第 5 章 第三代移动通信系统(3G)</b> .....	119
5.1 第三代移动通信系统标准介绍 .....	119
5.1.1 3G 的历史及特征 .....	119
5.1.2 3G 的主流标准及无线技术对比分析 .....	121
5.1.3 3G 频谱的划分 .....	122
5.1.4 3G 业务特点与分类 .....	123
5.2 WCDMA 系统 .....	124
5.2.1 概述 .....	124
5.2.2 WCDMA 的空中接口 .....	126
5.2.3 WCDMA 核心网的演进 .....	138
5.2.4 WCDMA 的移动性管理 .....	141
5.2.5 HSPA 技术 .....	145
5.3 CDMA 2000 系统 .....	147
5.3.1 概述 .....	147
5.3.2 CDMA 2000 1xEV-DO 系统 .....	151
5.3.3 CDMA 2000 1xEV-DV 系统 .....	155
5.3.4 CDMA 2000 核心网的演进 .....	157
5.4 TD-SCDMA 系统 .....	163
5.4.1 概述 .....	163
5.4.2 TD-SCDMA 的空中接口 .....	165
5.4.3 TD-SCDMA 的关键技术 .....	169
5.5 第三代移动通信系统安全机制 .....	175
5.5.1 3G 面临的安全威胁和攻击方法 .....	175
5.5.2 3G 系统的安全架构 .....	176
5.5.3 3G 网络接入安全机制 .....	177
本章小结 .....	179
习题 .....	180

<b>第 6 章 第四代移动通信系统(4G)</b>	182
6.1 4G 系统总体	182
6.1.1 4G 的起源与标准化进展	182
6.1.2 4G 特征与频谱	186
6.1.3 4G 网络架构	188
6.2 LTE/LTE-Advanced 关键技术	190
6.2.1 LTE 关键技术	191
6.2.2 LTE-Advanced 关键技术	197
6.3 LTE/LTE-Advanced 空中接口	205
6.3.1 LTE/LTE-Advanced 网络功能划分	205
6.3.2 LTE/LTE-Advanced 空中接口协议架构	206
6.3.3 LTE/LTE-Advanced 信道映射	206
6.3.4 LTE/LTE-Advanced 物理层	209
6.3.5 LTE/LTE-Advanced 高层协议	218
6.4 LTE/LTE-Advanced 移动性管理与安全机制	220
6.4.1 LTE/LTE-Advanced 移动性管理	220
6.4.2 LTE/LTE-Advanced 的安全机制	224
6.5 LTE/LTE-Advanced 语音解决方案	226
6.5.1 CSFB 语音方案	226
6.5.2 SVLTE 语音方案	227
6.5.3 VoLTE 语音方案	228
本章小结	229
习题	230
<b>第 7 章 第五代移动通信系统(5G)</b>	232
7.1 5G 系统总体	232
7.1.1 5G 的起源与发展历程	232
7.1.2 5G 特征与频谱	235
7.2 5G 网络架构及关键网络技术	239
7.2.1 5G 网络架构	239
7.2.2 5G 关键网络技术	242
7.3 5G 空口架构及关键无线技术	248
7.3.1 5G 空口技术路线	248
7.3.2 5G 空口技术框架	249
7.3.3 5G 新空口物理层特征	250
7.3.4 5G 关键无线技术	251
7.4 5G 移动性管理与安全机制	261
7.4.1 5G 移动性管理	261
7.4.2 5G 安全机制	264
7.5 5G 智能终端	265
7.5.1 智能终端分类	265
7.5.2 智能终端通信能力	266
本章小结	269
习题	270

<b>第 8 章 移动通信与计算机网络通信的融合</b> .....	271
8.1 计算机网络通信介绍 .....	271
8.1.1 概述 .....	271
8.1.2 Internet 的形成与发展 .....	271
8.1.3 TCP/IP 参考模型 .....	272
8.2 移动通信与计算机网络通信融合方式 .....	276
8.2.1 概述 .....	276
8.2.2 技术融合 .....	277
8.2.3 业务融合 .....	278
8.2.4 网络融合 .....	278
8.3 WAP 技术 .....	280
8.3.1 WAP 的网络结构 .....	280
8.3.2 WAP 协议栈 .....	281
8.3.3 WAP 的应用 .....	282
8.4 IMS 技术 .....	282
8.4.1 概述 .....	283
8.4.2 IMS 的网络架构 .....	283
8.4.3 IMS 的关键技术 .....	285
8.4.4 IMS 的业务应用 .....	286
8.5 移动应用技术 .....	287
8.5.1 应用开发模式 .....	287
8.5.2 应用开发工具 .....	289
8.5.3 应用开发关键技术 .....	290
本章小结 .....	292
习题 .....	293
<b>第 9 章 移动通信网络的规划、设计与优化</b> .....	294
9.1 移动通信网络规划与设计的基础知识 .....	294
9.1.1 概述 .....	294
9.1.2 网络规划设计的原则 .....	295
9.1.3 网络规划设计的流程 .....	295
9.1.4 网络规划设计的主要环节 .....	298
9.2 业务预测及业务模型 .....	304
9.2.1 概述 .....	304
9.2.2 业务预测 .....	305
9.3 无线传播模型及校正 .....	309
9.3.1 无线传播模型 .....	309
9.3.2 传播模型校正 .....	312
9.4 移动通信网络规划设计仿真 .....	313
9.4.1 通信仿真概述 .....	313
9.4.2 网络规划设计软件及其仿真 .....	313
9.5 3G 网络规划设计 .....	316
9.5.1 3G 与 2G 网络规划设计比较 .....	316
9.5.2 3G 网络规划基本思路 .....	317

9.5.3	多层次重叠式立体网络规划	318
9.6	TD-LTE 无线网络规划	319
9.6.1	数据业务热点区域分析	319
9.6.2	无线网设计指标	320
9.6.3	基站建设方案	321
9.7	5G 网络部署与规划设计	325
9.7.1	5G 网络规划设计原则与策略	325
9.7.2	5G 网络部署模式选择与演进策略	327
9.7.3	5G 无线网络规划	330
9.8	移动通信网络优化	333
9.8.1	概述	333
9.8.2	网络优化的内容及流程	333
9.8.3	LTE-RF 优化	335
	本章小结	348
	习题	350
	<b>附录 缩略语英汉对照表</b>	<b>351</b>
	<b>参考文献</b>	<b>363</b>

# 第1章

## CHAPTER 1

# 移动通信概论

世界电信在近40年的发展中,发生了巨大的变化,移动通信特别是蜂窝小区的迅速发展,使用户彻底摆脱终端设备的束缚,实现了完整的个人移动性,也提供了可靠的传输手段和接续方式。进入21世纪,移动通信已逐渐演变成社会发展和进步的必不可少的工具。

移动通信是指通信双方至少有一方的通信终端可以处于移动状态的通信方式,移动通信终端的载体可以是车辆、船舶、飞机、行人等。

## 1.1 移动通信的历史、现状与发展趋势

### 1.1.1 移动通信的历史与现状

现在,人们普遍认为1897年是人类移动通信的元年。这一年,意大利人伽利尔摩·马可尼在一个固定站和一艘拖船之间完成了一项无线电通信实验,也就是说,移动通信几乎伴随着无线通信的出现而诞生了,也由此揭开了移动通信辉煌发展的序幕。

现代意义上的移动通信系统起源于20世纪20年代,距今已有近100年的历史。大致算来,现代移动通信系统经历了如下4个发展阶段。

第一阶段从20世纪20年代至40年代,为早期发展阶段。在这期间,初步进行了一些传播特性的测试,并且在短波几个频段上开发出了专用移动通信系统,其代表是美国底特律市警察使用的车载无线电系统。该系统工作频率为2MHz,到40年代提高到30~40MHz。可以认为这个阶段是现代移动通信的起步阶段,特点是专用系统开发,工作频率较低,工作方式单工或半双工方式。

第二阶段从20世纪40年代中期至60年代初期,在此期间内,公用移动通信业务开始问世。1946年,根据美国联邦通信委员会(FCC)的计划,贝尔系统在圣路易斯城建立了世界上第一个公用汽车电话网,称为“城市系统”。当时使用3个频道,间隔为120kHz,通信方式为单工,随后,法国(1956年)、英国(1959年)等国相继研制了公用移动电话系统,美国贝尔实验室完成了人工交换系统的接续问题。这一阶段的特点是从专用移动网向公用移动网过渡,接续方式为人工,网络的容量较小。

第三阶段从20世纪60年代中期至70年代中期,在此期间,美国推出了改进型移动电话系统(IMTS),使用150MHz和450MHz频段,采用大区制、中小容量,实现了无线频道自动选择并能够自动接续到公用电话网,德国也推出了具有相同技术水平的B网。可以说,这一阶段是移动通信系统改进与完善的阶段,其特点是采用大区制、中小容量,使用

450MHz 频段,实现了自动选频与自动接续。

第四阶段从 20 世纪 70 年代中后期至今,在此期间,由于蜂窝理论的应用,频率复用的概念得以实用化。蜂窝移动通信系统是基于带宽或干扰受限,它通过分割小区,有效地控制干扰,在相隔一定距离的基站,重复使用相同的频率,从而实现频率复用,大大提高了频谱的利用率,有效地提高了系统的容量。同时,由于微电子技术、计算机技术、通信网络技术以及通信调制编码技术的发展,移动通信在交换、信令网络体制和无线调制编码技术等方面有了长足的进展。这是移动通信蓬勃发展的时期,其特点是通信容量迅速增加,新业务不断出现,系统性能不断完善,技术的发展呈加快趋势。

第四阶段的蜂窝移动通信系统又可以划分为几个发展阶段:如按多址方式来分,则模拟频分多址(FDMA)系统是第一代移动通信系统(1G);使用电路交换的数字时分多址(TDMA)或码分多址(CDMA)系统是第二代移动通信系统(2G);使用分组/电路交换的 CDMA 系统是第三代移动通信系统(3G);使用了不同的高级接入技术并采用全 IP(互联网协议)网络结构的系统称为第四代移动通信系统(4G);使用大规模天线技术和新型网络架构的是第五代移动通信系统(5G)。如按系统的典型技术来划分,则模拟系统是 1G;数字语音系统是 2G;数字语音/数据系统是超二代移动通信系统(B2G);宽带数字系统是 3G;高速数据速率系统是 4G;超宽带、海星连接、低时延系统是 5G。

20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期是第一代蜂窝移动通信系统的发展阶段。1978 年底,美国贝尔试验室研制成功先进移动电话系统(AMPS),建成了蜂窝状移动通信网,大大提高了系统容量。1983 年,首次在芝加哥投入商用;同年 12 月,在华盛顿也开始启用;之后,服务区域在美国逐渐扩大,到 1985 年 3 月已扩展到 47 个地区,约 10 万移动用户。其他工业化国家也相继开发出蜂窝式公用移动通信网,日本于 1979 年推出了自己的 AMPS 版本——800MHz 汽车电话系统(HAMTS),并在东京、大阪、神户等地投入商用,成为全球首个商用蜂窝移动通信系统;英国在 1985 年开发出全球接入通信系统(TACS),首先在伦敦投入使用,以后覆盖了全国,频段为 900MHz;法国开发出 450 系统;加拿大推出 450MHz 移动电话系统 MTS;瑞典等北欧 4 国于 1980 年开发出 NMT-450 移动通信网,并投入使用,频段为 450MHz。

20 世纪 80 年代中期至 20 世纪末,是 2G 这样的数字移动通信系统发展和成熟的时期。以 AMPS 和 TACS 为代表的 1G 是模拟系统,模拟蜂窝网虽然取得了很大成功,但也暴露了一些问题,例如频谱利用率低、移动设备复杂、资费较贵、业务种类受限制以及通话易被窃听等,最主要的问题是其容量已不能满足日益增长的移动用户需求。解决这些问题的方法是开发新一代数字蜂窝移动通信系统。数字无线传输的频谱利用率高,可大大提高系统容量;另外,数字网能提供语音、数据等多种业务服务,并与 ISDN 等兼容。实际上,早在 70 年代末期,当模拟蜂窝系统还处于开发阶段时,一些发达国家就着手数字蜂窝移动通信系统的研究。1983 年,欧洲开始开发 GSM(最初定名为移动通信特别小组,后改称为全球移动通信系统),GSM 是数字 TDMA 系统,1991 年在德国首次部署,它是世界上第一个数字蜂窝移动通信系统。1988 年,NA-TDMA(北美 TDMA)——有时也叫 DAMPS(数字 AMPS)在美国作为数字标准得到了表决通过;1989 年,美国 Qualcomm 公司开始开发窄带 CDMA(N-CDMA);1995 年美国电信产业协会(TIA)正式颁布了 N-CDMA 的标准,即 IS-95A。随着 IS-95A 的进一步发展,于 1998 年制定了新的标准 IS-95B。

自2000年左右开始,伴随着对第3代移动通信的大量论述以及2.5G(B2G)产品GPRS(通用无线分组业务)系统的过渡,3G走上了通信舞台的前沿。其实早在1985年,国际电信联盟(ITU)就提出了第三代移动通信系统的概念,当时称为未来公众陆地移动通信系统(FPLMTS)。1996年ITU将其更名为国际移动通信-2000(IMT-2000),其含义为该系统预期在2000年左右投入使用,工作于2000MHz频段,最高传输数据速率为2000Kbps。在此期间,世界上许多著名电信制造商或国家和地区的标准化组织向ITU提交了十几种无线接口协议,通过协商和融合,1999年,在芬兰赫尔辛基召开的ITU TG8/1第18次会议最终通过了IMT-2000无线接口技术规范建议(IMT-RSPC),基本确立了IMT-2000的3种主流标准,即欧洲和日本提出的WCDMA,美国提出的CDMA 2000和中国提出的TD-SCDMA。在业务和性能方面,3G系统比2G系统有了很大提高,不仅可以实现全球普及和全球无缝漫游,而且具有支持多媒体业务的能力,数据传输速率大大提高。在技术上,3G系统采用CDMA技术和分组交换技术,而不是2G系统通常采用的TDMA技术和电路交换技术。

2005年,ITU给了B3G(超三代移动通信系统)/4G一个正式名称IMT-Advanced。2009年,在其ITU-RWP5D工作组第6次会议上收到了6项4G技术提案,并在2010年正式确定LTE-Advanced和802.16m作为4G国际标准候选技术,均包含时分双工(TDD)和频分双工(FDD)两种制式。4G技术是各种技术的无缝链接,其关键技术包括正交频分复用(OFDM)技术、软件无线电、智能天线技术、多输入多输出(MIMO)技术和基于IP的核心网。自2013年6月韩国电信运营商SK全球率先推出LTE-A网络,宣告4G商用网络正式进入移动通信市场。

现阶段,移动通信已在全球迅猛发展。国际电信联盟2013年度报告显示世界71亿人口中有68亿手机用户;据爱立信公司的调查报告显示,至2022年,全球移动宽带用户数将达83亿,超过现有全球人口总数75亿。目前,2G、3G和4G商用移动通信网络处于共存阶段,并将在相当一段时间内共存下去,为各类用户服务,以满足不同业务需求,随5G商用网络部署,2G可能逐步退网,3G业务会降低。与此同时,第五代移动通信系统作为面向2020年以后移动通信需求而发展的新一代移动通信系统,ITU将其暂命名为IMT-2020,其研发工作已在全球范围内展开,目前处于技术标准形成和产业化培育阶段,但不久就会有商业化应用。

### 1.1.2 移动通信在中国的发展概况

回顾我国移动通信30余年的发展历程,我国移动通信市场的发展速度和规模令世人瞩目,可以说,中国的移动通信发展史是超常规、成倍数、跳跃式的发展史。早在2001年8月,中国的移动通信用户数达到1.2亿,超过美国跃居为世界第一。截至2014年1月,中国移动通信用户总数已达到12.35亿,其中3G用户数超过4亿。截至2018年9月,4G用户数为11.3亿。总体来说,我国移动通信发展经历了引进、吸收、改造、创新、引领5个阶段。现阶段,我国的移动通信技术水平已同步于世界先进水平,并逐步占领移动通信技术制高点,引领移动通信的发展方向。

1987年11月,从国外引进的第一个模拟蜂窝移动电话系统(TACS体制)在广东省建成并投入商用。虽然最初只有700个用户,但从此开启了中国移动通信产业发展的序幕。20世纪90年代初,当以数字技术为标志的2G在全球兴起时,我国虽然也对2G给予了足够的关注,但因为自身研究实力的问题,面对2G的发展,我国的技术发展还是以引进为主。

在北美的 DAMPS、日本的 PDC 和欧洲的 GSM 之间,我国选择了 GSM。1992 年,原邮电部批准在嘉兴地区建立了 GSM 实验网,并在 1993 年进入了商业运营阶段。随后,市场的迅猛发展证实了 GSM 的许多技术优势,因此 1994 年成立的中国联通也选择了 GSM 技术建网。这样一来,GSM 系统成为目前我国最成熟和市场占有率最大的一种数字蜂窝系统。2000 年 2 月,中国联通以运营商的身份与美国 Qualcomm 公司签署了 CDMA 知识产权框架协议,为中国联通 CDMA 的建设扫清了道路,并于同年宣布启动窄带 CDMA 的建设,到 2002 年 10 月,全国 CDMA 用户数达到了 400 万。

随着 2G 网络和产品的成熟,我国移动通信采取边吸收边改造的发展思路。有大唐、中兴、华为等通信设备供应商的群体突破;在网络上,逐步建立了移动智能网,以 GPRS 和 CDMA 2000 1x 为代表的 2.5G 分别在 2002 年和 2003 年正式投入商用。为寻求创新,真正拥有自主知识产权,以改变移动通信技术的落后面貌,1998 年 6 月,中国信息产业部电信科技研究院成功向 ITU 提交了第 3 代移动通信国际标准 TD-SCDMA 建议,并在其后得到了采纳。自 2009 年 1 月,中国 3G 牌照正式发放以来,国内三家移动运营商斥资数千亿进行了轰轰烈烈的 3G 网络建设、产业链建设和营销推广。随着 3G 网络的不断完善、智能终端的逐步普及和移动互联网应用的飞速发展,3G 概念日渐深入人心,我国 3G 进入规模化发展时期。2013 年底,工信部给运营商发放了 3 张 4G 牌照,标志着中国也进入了 4G 的商用化时代。

我国自 3G 时代以来,就紧跟移动通信的发展潮流,积极参与移动通信标准的制订,也取得了骄人的成绩,TD-SCDMA 和 TD-LTE-Advanced 先后成为 3G 和 4G 国际标准。目前,我国正在推进 5G 频谱规划,启动 5G 商用服务,突破 5G 关键技术和产品,成为 5G 标准和技术的全球引领者之一。

### 1.1.3 移动通信的发展趋势

自 20 世纪 80 年代以来,移动通信成为现代通信网络中发展最快的通信方式,近年更是呈加速发展的趋势。随其应用领域的扩大和对性能要求的提高,促使其在技术上和理论上向更高水平发展,通常,每 10 年将发展并更新一代移动通信系统。

从市场需求来看,移动互联网和物联网是下一代移动通信系统发展的两大主要驱动力,其中移动互联网颠覆了传统移动通信业务模式,而物联网则扩展了移动通信的服务范围。和现有的 4G 系统相比,5G 系统的性能将在 3 个方面提高 1000 倍:一是传输速度提高 1000 倍,平均传输速率将达到 100Mbps~1Gbps;其次是总的数据流量提高 1000 倍;再就是频谱效率和能耗效率提高 1000 倍。总体来看,新移动通信技术发展将呈现出以下新特点。

(1) 5G 研究在推进技术变革的同时将更加注重用户体验,网络平均吞吐速率、传输时延以及对虚拟现实、3D(三维)体验、交互式游戏等新兴移动业务的支撑能力等将成为衡量 5G 系统性能的关键指标。

(2) 与传统的移动通信系统理念不同,5G 系统研究将不仅仅把点到点的物理层传输与信道编译码等经典技术作为核心目标,而是从更为广泛的多点、多用户、多天线、多小区协作组网作为突破的重点,力求在体系构架上寻求系统性能的大幅度提高。

(3) 室内移动通信业务已占据应用的主导地位,5G 室内无线覆盖性能及业务支撑能力