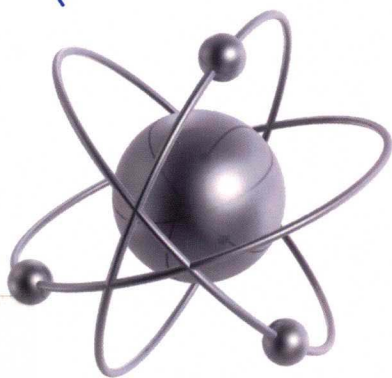





5G
COMMUNICATION
SYSTEMS

通信系统

周先军 著



科学出版社

5G 通信系统

周先军 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

信息技术的快速发展,未来通信系统需要满足更高的要求,当前正处于5G技术研发的关键阶段。在此背景下,本书对5G通信系统的传输、网络技术以及应用场景等进行了详细的介绍和讨论,内容涵盖5G网络的发展与现状、终端到终端通信、大规模多输入多输出、全双工、毫米波、信道编码、波形设计、软件定义的空中接口、多址技术、接入与回传、自组织网络、异构网络融合、软件定义网络、网络功能虚拟化、网络安全、人工智能在5G中的应用、5G的应用场景、系统方案等不同层面,较全面地为读者呈现5G通信系统。

本书适合相关工程技术人员及科研工作者参考使用,也可供通信与信息系统、网络工程等专业的低年级本科生、研究生学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

5G通信系统/周先军著. —北京:科学出版社,2018.12

ISBN 978-7-03-060135-3

I. ①5… II. ①周… III. ①无线电通信-移动通信-通信技术
IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第289512号

责任编辑:余江 张丽花 梁晶晶 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年12月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年12月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:320 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着社会的飞速发展，信息通信将成为人类社会信息化的关键所在。同时人们对无线移动通信的需求急速增长，使信息通信系统所承担的角色变得十分重要。万物互联时代的脚步正在步步逼近，作为未来信息基础设施，第五代移动通信(5G)系统的研究成为通信领域的热点。

2012年9月，欧盟在第七框架计划(FP7)下启动了面向第五代移动通信技术(5G)的研究课题，拉开了全球5G研究的序幕。2013年2月，由科学技术部、工业和信息化部、国家发展和改革委员会三部委联合组织成立了中国IMT-2020(5G)推进组，旨在推动中国5G技术的研发和打造开展国际交流与合作的主要平台。在2015年6月召开的国际电信联盟无线电通信组(ITU-R)WP5D第22次会议上，5G正式命名为IMT-2020，同时确定了5G的场景和时间表等关键内容。

5G的主要需求在于万物互联的应用和发展。ITU确定的5G应用场景分为三个：一个是支持移动互联网演进和发展的增强移动宽带，另外两个是支持物联网发展的高可靠、低时延通信和大规模机器类通信。5G将不再是一个单纯的通信系统，而是以用户为中心的、全新的融合体系。基于5G丰富的应用场景，5G的技术和能力也是多个层次的，通过技术的演进与创新，实现单一标准体系的多模式灵活切换，从而更好地为多种场景应用服务。

全书共分18章，基本涵盖5G的传输、网络技术以及部署的应用场景。

第1章概述，主要描述通信系统的发展和5G特性、全球5G研发的现状。第2章端到终端通信(D2D)，对D2D通信的关键技术以及性能进行介绍，重点描述D2D通信在5G通信系统中的应用。第3章大规模多输入多输出(massive MIMO)，对massive MIMO的概念、信道模型以及性能进行详细的描述。第4章全双工，介绍全双工的概念和发展过程，讨论全双工自干扰抵消技术以及全双工的性能。第5章毫米波，描述毫米波的概念和性能，以及毫米波通信的性能。第6章信道编码，描述信道编码的概念，同时对信道编码在5G中的应用进行详细说明。第7章波形设计，概述波形设计、子载波智能滤波以及F-OFDM等相关技术。第8章软件定义的空中接口，主要介绍软件定义空中接口的概念以及性能。第9章多址技术，描述典型多用户接入，并对非正交多址(NOMA)、图分多址接入(PDMA)、多用户共享接入(MUSA)、稀疏编码多址接入(SCMA)进行介绍。第10章接入与回传，对接入与回传的概念进行说明，然后分别讨论前传、中传、后传对网络传送性能的影响。第11章自组织网络，分别讲解自组织网络的概念、管理系统、内容以及算法。第12章异构网络融合，基于5G网络的复杂性，需要利用异构网络融合对5G移动网络进行优化和调度。第13章软件定义网络(SDN)，对SDN的产生背景和相关关键技术进行详细的介绍，分别从SDN的接入网技术和负载均衡与5G的结合进行探讨。第14章网络功能虚拟化(NFV)，在对NFV进行介绍后，重点介绍基于NFV的转发和网络切片技术。第15章网络安全，从物理层的链路安全和基于SDN的网络安全来

对网络安全架构进行说明。第 16 章人工智能在 5G 中的应用，从机器学习和深度学习两方面来阐述 5G 中的人工智能。第 17 章 5G 的应用场景，描述 5G 通信的 eMBB、mMTC、uRLLC 三大应用场景，并分别对这三个场景举例和说明，同时对三大应用场景在 5G 中的应用进行介绍。第 18 章系统方案，分别从仿真平台、标准的进展和商业进程等方面对 5G 的部署进行展望。

参与本书资料收集和整理工作的人员有周浩、冯纬枢、刘慧娟、张逸媛、徐逸凡、王桢、翟畅、陈其疆、王宇、汪锦涛、李浩、朱宇辉、罗响、谢郁忻、杜朝晖、刘金威、周杰等，对他们所付出的艰辛工作表示感谢。同时，感谢湖北工业大学电气与电子工程学院通信工程系的大力支持。

限于作者的水平和能力，本书难免存在不足之处，恳请各位读者批评指正。作者邮箱 xianjun_zhou@sina.com。

周先军

2018 年 10 月于武汉

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 移动通信的发展	1
1.2 5G 特性	2
1.3 研发现状	4
1.3.1 全球主要的 5G 活动	4
1.3.2 标准化进程	6
1.4 本书的内容介绍	7
1.4.1 5G 传输技术	7
1.4.2 5G 网络系统	8
1.4.3 5G 与人工智能	9
第 2 章 终端到终端通信	10
2.1 D2D 通信概念	10
2.2 D2D 邻近设备发现	11
2.3 D2D 通信模式选择	12
2.4 D2D 通信干扰分析	14
2.5 D2D 资源调配	16
2.6 基于 FFR 的资源管理	18
2.7 多跳 D2D 通信	23
2.8 D2D 通信的发展挑战	24
第 3 章 大规模多输入多输出	26
3.1 大规模 MIMO 的概念	26
3.2 大规模 MIMO 信道模型	27
3.3 大规模 MIMO 波束成形	30
3.4 导频污染	32
3.5 系统容量	34
3.6 大规模 MIMO 的发展挑战	36
第 4 章 全双工	37
4.1 全双工概述	37
4.2 全双工的发展过程	38
4.3 全双工通信的自干扰抵消	38
4.3.1 天线干扰消除	40
4.3.2 射频干扰消除	42
4.3.3 数字干扰消除	42
4.4 全双工的性能	43

4.5	全双工的发展挑战	44
第 5 章	毫米波	47
5.1	毫米波概述	47
5.2	毫米波传播特性	48
5.3	28GHz 室内外穿透损耗和反射特性的测量	51
5.4	毫米波通信的优点	55
5.5	毫米波通信的发展挑战	56
第 6 章	信道编码	57
6.1	信道编码概述	57
6.2	低密度奇偶校验码	58
6.3	咬尾卷积码	61
6.4	极化码	63
6.5	信道编码的发展挑战	65
第 7 章	波形设计	67
7.1	波形设计概述	67
7.2	FBMC 技术	68
7.3	GFDM 技术	69
7.4	UFMC 技术	70
7.5	F-OFDM 技术	71
7.6	波形技术特性总结	72
7.6.1	波形技术特征	72
7.6.2	波形技术性能分析	73
第 8 章	软件定义的天空接口	76
8.1	软件定义的天空接口概述	76
8.2	软件无线电	77
8.3	认知无线电	78
8.4	天空接口的软件定义	80
8.5	天空接口的发展挑战	84
第 9 章	多址技术	86
9.1	非正交多址	86
9.2	图分多址接入	88
9.3	多用户共享接入	91
9.4	稀疏编码多址接入	93
9.5	多址接入的发展挑战	95
第 10 章	接入与回传	97
10.1	接入与回传概述	97
10.2	C-RAN 的产生背景	98
10.3	C-RAN 的基本结构	99
10.4	C-RAN 的技术实现	102

10.5	混合回传网络	103
10.6	回传网络性能	104
10.7	接入与回传的发展挑战	105
第 11 章	自组织网络	107
11.1	自组织网络概述	107
11.2	自组织网络的架构	108
11.3	超密集场景下的网络自组织关键技术	109
11.4	自组织网络的标准化进展	111
11.5	5G 对 SON 的需求	113
11.6	自组织网络的发展挑战	115
第 12 章	异构网络融合	117
12.1	异构网络概述	117
12.2	异构部署的网络方案	118
12.3	异构网络的干扰管理	118
12.3.1	频域内干扰管理方案	119
12.3.2	时域内干扰管理方案	120
12.3.3	空域内抗干扰方案	121
12.4	异构网络的接入	122
12.5	异构网络的切换	123
12.6	异构网络的节能	125
12.7	异构网络的发展挑战	126
第 13 章	软件定义网络	127
13.1	产生背景	127
13.2	SDN 的典型架构	127
13.3	SDN 的关键技术	129
13.4	基于 SDN 的接入技术	132
13.5	基于 SDN 的负载均衡	135
13.6	基于 SDN 的“三朵云”5G 网络架构	136
13.7	SDN 的发展挑战	136
第 14 章	网络功能虚拟化	138
14.1	NFV 产生背景	138
14.2	NFV 的参考架构	139
14.3	基于 NFV 的转发	142
14.4	网络切片	143
14.5	NFV 的发展挑战	147
第 15 章	网络安全	148
15.1	网络安全概述	148
15.2	网络安全构架	149
15.2.1	身份可信, 行为可溯	150

15.2.2	网络可信, 安全分级	152
15.2.3	实体可信, 内建免疫	153
15.3	物理层的链路安全	153
15.4	SDN 控制层的安全控制	155
15.5	基于 SDN 的网络安全	156
15.6	网络安全的发展挑战	157
第 16 章	人工智能在 5G 中的应用	160
16.1	机器学习概述	160
16.2	机器学习在 5G 中的应用	161
16.3	深度学习	163
16.4	深度学习在 5G 中的应用	165
16.4.1	无线物理层深度学习	165
16.4.2	深度学习辅助的 SCMA	168
16.4.3	基于深度学习的网络流量预测	168
16.5	人工智能应用于 5G 的发展挑战	169
第 17 章	5G 的应用场景	172
17.1	应用场景概述	172
17.2	4G 演化的增强移动宽带应用	173
17.2.1	VR	173
17.2.2	高铁动车组的无线通信	174
17.3	低时延高可靠的车联网	175
17.3.1	车联网的结构组成	176
17.3.2	5G 车联网的特征	176
17.4	低功耗大连接的窄带物联网	177
17.5	基于云处理的业务应用	179
17.6	5G 业务应用的发展挑战	182
第 18 章	系统方案	183
18.1	总体框架	183
18.2	仿真平台	185
18.3	5G 外场测试	188
18.4	5G 标准进展	191
18.4.1	频谱进展	191
18.4.2	5G 传输标准进展	192
18.5	5G 商用的发展挑战	193
参考文献		195
缩略词		200

第 1 章 概 述

1.1 移动通信的发展

移动通信技术始于 20 世纪 70 年代,是人类历史进程中的重要一步。到 80 年代初期,第一代移动通信系统(1G)被正式提出,如 1981 年投入运营的 NMT 和 AMPS。第一代移动通信系统基于蜂窝组网,直接使用模拟语音调制,传输速率约 2.4Kbit/s,其特点是业务量小、质量差、安全性差、没有加密和速度低。

第二代移动通信系统(2G)起源于 20 世纪 90 年代初期,欧洲电信标准化协会在 1996 年提出了 GSM Phase 2+, 目的在于扩展和改进已有 GSM 中原定业务与性能,包括客户化应用移动网增强逻辑,支持最佳路由、即时计费、900/1800 双频工作,全速率完全兼容的增强型语音编解码提升了语音质量,提高容量近一倍。通过引入 GPRS/EDGE 技术,GSM 与 Internet 有机结合,数据传送速率可达 115/384Kbit/s,初步具备了支持多媒体业务的能力。随着用户规模不断扩大,频率资源已接近枯竭,太低的数据通信速率无法满足移动多媒体业务的需求。

第三代移动通信系统(3G),也称 IMT 2000,其基本的特征是智能信号处理单元成为基本功能模块,支持语音和多媒体数据通信,提供如高速数据、慢速图像的各种宽带信息业务,WCDMA 所占带宽为 5MHz 情况下的最大传输速率为 2Mbit/s,高速移动时支持 144Kbit/s 的传输速率,但依然没有实现真正意义上的个人通信和全球通信,支持的速率还不够高。

第四代移动通信系统(4G)集 3G 与 WLAN 于一体,下行速率为 100Mbit/s,上行速率为 20Mbit/s,能够传输高清图像,能够满足几乎所有用户对于无线服务的要求,计费方式更加灵活,4G 以正交频分复用(OFDM)为技术核心,具有良好的抗噪性能和抗干扰能力,可以提供高速率、低时延的服务。

用户对移动通信带宽的需求永无止境,未来移动通信需求如下。

(1)终端多样性,激增的数据流量。终端的蓬勃发展给移动通信产业带来巨大的变化,用户数、连接设备数、数据量均持续呈指数式增长,终端业务由传统的语音业务向宽带数据业务发展,终端形态呈现多样化发展,未来还会出现手表、眼镜等多种形态的智能终端,拉动数据流量的激增。根据相关统计,智能终端用户 70%的时间花费在游戏、社交网络等活动上,随着终端的发展,将会产生更多的数据流量。

(2)应用的多样性,提升用户体验。新型移动业务层出不穷,云操作、虚拟现实、增强现实、智能设备、智能交通、远程医疗、远程控制等各种应用对移动通信的要求日益增加。智能终端的发展带动移动互联网业务的高速发展,移动互联网业务由最初简单的短/彩信业务发展到现在微信、微博和视频等业务,越来越深刻地改变着信息通信产业的整体发展模式。随着移动互联网业务的发展,未来 5G 移动通信会渗透到各个领域,

在远程医疗、环境监控、社会安全、物联网业务等各个领域方便人们的生活。这些新应用、新业务以客户为中心，随时随地为用户提供最佳体验，使用户更快速地进行业务，即使在移动状态下仍然享有高质量服务，而 4G 移动通信技术无法满足未来的业务和用户体验需求。

(3) 频谱资源的有限性，亟须提高使用效率。移动通信系统的频率由 ITU-R 进行业务划分，LTE 网络部署初期主要集中在 2.6GHz、1.8GHz 和 700MHz，然而各个国家和地区使用情况存在差异，这给产业链和用户带来困难。例如，New iPad 只支持 700MHz 及 2100MHz 频率，这两个频段在很多国家不能使用。对中国来说，上述频段存在多种业务（如铁路调度系统、广播电视系统、集群系统、雷达系统以及固定卫星系统等），因此给 LTE 频率规划和网络部署带来巨大的挑战。因此，针对频谱资源稀缺问题，未来 5G 需要使用合适的频谱方式和新技术来提高频谱使用效率，如同频同时全双工 (CCFD)。

(4) 网络融合，亟须使用 IPv6。现有数字技术允许不同的系统，如有线、无线、数据通信系统融合在一起，这种融合迅速改变着人们和设备的通信方式。基于 IP 的通信系统在管理的灵活性和节省网络资源方面，都具有重要的优势，而 IP 化进程加快，各接入系统的互通需要引入在安全性、QoS、移动性等方面具有巨大优势的 IPv6。

面向未来，必须发展新的通信技术，面向下一代无线通信环境的 5G 应运而生。具有更多更先进功能的 5G，将实现无时不在、无所不在的信息传递。

1.2 5G 特性

随着移动互联网的高速发展和新的终端形态的演进，新型的业务形态不断出现，包括智能家庭、智慧城市、远程医疗、环保监测等，数据业务的需求呈现爆炸式的增长，现有的 4G 技术已经无法满足如此庞大的数据业务传输需求。未来 5G 网络需要实现以下目标：数据流量密度提升 1000 倍、设备连接数目增加 10~100 倍、用户体验速率改善 10~100 倍、MTC 终端待机时长延长 10 倍、端到端时延缩短 5 倍。5G 发展愿景如下^[1-3]。

(1) 高速度性。网络速度提升，用户体验与感受才会有较大提高，网络才能面对 AR/VR 超高清业务时不受限制，对网络速度要求很高的业务才能被广泛推广和使用。因此，5G 第一个特点就定义了速度的提升，5G 的基站峰值速率要求不低于 20Gbit/s，这样的速度，意味着用户可以每秒钟下载一部超高清电影，也可支持 VR 视频，给未来高速业务提供了可能。

(2) 泛在性。用户希望在任何时间、任何地点能够通过移动终端使用网络，如观看超高清视频。用户期望借助于智能手机和智能穿戴式移动通信设备，通过移动通信网络实时反馈给用户海量的虚拟信息，有效帮助用户感知和认识真实世界。未来 5G 网络的泛在化将满足各种类型互联网业务的个性化需求，提供无所不在的智能信息服务、无所不在的连接。

(3) 低功耗性。所有物联网产品都需要通信与能源，通信过程若消耗大量的能量，就很难让物联网产品被用户广泛接受。如果能把功耗降下来，让大部分物联网产品一周充一次电，甚至一个月充一次电，就能大大改善用户体验，促进物联网产品的快速普及。

eMTC 基于 LTE 协议演进而来，为了更加适合物与物之间的通信，也为了更多地降低成本，人们对 LTE 协议进行了裁剪和优化，其用户设备通过支持 1.4MHz 的射频和基带带宽，直接接入现有的 LTE 网络，提供上下行 1Mbit/s 的峰值速率。而 NB-IoT 构建于蜂窝网络，只消耗大约 180kHz 的带宽，可直接部署于 GSM 网络、UMTS 网络或 LTE 网络，以降低部署成本，实现平滑升级。NB-IoT 可以基于 GSM 网络和 UMTS 网络进行部署，满足 5G 对于低功耗物联网应用场景的需要。

(4) 低时延性。5G 的一个新场景是无人驾驶、工业自动化的高可靠连接。人与人之间进行信息交流，140ms 的时延是可以接受的，但是如果这个时延用于无人驾驶、工业自动化就无法接受。5G 对于时延的最低要求是 1ms，甚至更低。5G 应用于无人驾驶汽车需要将中央控制中心和汽车进行互联，车与车之间也应进行互联，在高速行动中，一个制动，需要瞬间把信息送到车上使车辆做出反应，100ms 左右的时间，车就会冲出几十米，这就需要在最短的时延中，把信息送到车上，使车辆进行制动与车控反应。工业自动化过程中，一个机械臂的操作，如果要做到极精细化，保证工作的高品质与精准性，也需要极小的时延，最及时地做出反应。需要在高速中保证及时传递信息和及时反应，这就对时延提出了极高的要求。要满足低时延的要求，需要在 5G 网络建构中找到各种方法，减少时延。

(5) 万物互联性。电信网、广播电视网、互联网三网融合，给人们的生活带来巨大便利的同时，也给网络带来新的挑战。三网融合要求扁平化和透明化的网络架构，同时对网络容量需求有大幅提高。三网融合业务逐步放开，将引发接入网、核心网的流量激增。5G 具有超高的传输能力、超高容量、超可靠性的特点，将会产生更多的新技术、新的传输方式，需要进一步实现网络融合。在保证用户体验的情况下，提升网络资源效率显得尤为重要。一是网络内各尽其责：2G、3G 优先疏通语音业务，在保证语音业务的前提下，可适度承载数据业务。4G 网络 TDD+FDD 主要承载数据业务，WLAN 作为无线蜂窝网络承载移动数据业务的重要补充。二是网络间协调发展：各网络间相互协同，优势互补，实现低成本、高效率的协调均衡发展。针对网络业务分布的不均衡性，根据网络负荷、业务类型动态地选择网络，提升网络流量价值。例如，WLAN 负荷高而蜂窝网负荷轻时，可以根据网络负荷情况动态地选择蜂窝网承担用户的数据业务。在保证用户体验不受影响的情况下，实现不同网络之间的动态负载均衡。未来接入网络中的终端，不仅是今天的手机，还会有更多产品。可以说，生活中每一个产品都有可能通过 5G 接入网络，例如，眼镜、手机、衣服、腰带、鞋子接入网络，成为智能产品。家中的门窗、门锁、空气净化器、新风机、加湿器、空调、冰箱、洗衣机都可能进入智能时代，通过 5G 接入网络，家庭成为智慧家庭。而社会生活中大量以前不可能联网的设备也会进行联网工作，更加智能。汽车、井盖、电线杆、垃圾桶这些公共设施，以前管理起来非常难，也很难做到智能化，而 5G 可以让这些设备都成为智能设备。

(6) 网络智能性。未来 5G 网络数据流量和信令流量将呈现爆炸式增长，面对挑战，通过网络智能化，实现网络资源、用户体验和收益的和谐发展。未来网络的智能化主要体现在：频谱智能化、网络架构智能化、网络管理智能化、流量管控智能化。目前，中国的频谱资源是通过固定方式分配给不同的无线电部门的，频谱资源的利用高度不均衡，因此未来可以通过新技术智能化使用频谱，如基于认知无线电技术 (Cognitive Radio, CR)

对所处的电磁环境进行实时监测，寻找空闲频谱，通过动态频谱共享提高无线频谱的利用效率。而随着互联网业务的爆炸式增长、服务器虚拟化以及各种云计算业务不断出现，传统网络已不再适用。由于 SDN 具有控制和转发分离、设备资源虚拟化、通用硬件及软件可编程三大特征，未来可以利用 SDN 理念改造现有无线网，以更加智能、更加灵活的方式提供新业务；另外，网络越来越密集，如果采用传统的人工维护，不仅工作量大，而且成本很高。为了减少网络建设成本和运维成本，SDN 功能主要包括自配置、自优化、自愈，综合传统运维手段并将其智能化，提升网络管理效率，未来 5G 将会存在多制式并存场景，SDN 功能将扩展到多制式网络系统，在更多方面使管理更加智能化，大幅度降低网络运营成本。而且，网络中流量分布存在极不均衡的场景，如一些区域很多用户在个别时间同时使用 P2P 业务等，占用大量带宽，网络系统忙闲流量差异巨大，网络资源利用率很低。中国电信提出的“智能管道”战略，通过“开源”和“节流”来吸引业务量，保证用户体验。对于 LTE 网络部署，同样采用“智能管道”的措施。例如，LTE-A 中的 HetNet(异构网络)，有效提高小区边缘速率和小区平均吞吐量，并适合业务量时空分布不均衡的情况，有效吸收热点地区业务。在进行 LTE 建设的同时考虑 PCC(策略和计费控制)的引入，使运营商具备有效和完备的移动智能管道控制能力，有效地调节和均衡数据流量。

(7) 重构安全性。安全问题似乎并不是 3GPP 讨论的基本问题，但是它也应该成为 5G 的一个基本特点。传统的互联网解决的是信息速度、无阻碍的传输，自由、开放、共享是互联网的基本精神，但是在 5G 基础上建立的是智能互联网。智能互联网不仅要实现信息传输，还要建立起一个社会和生活的新机制与新体系。智能互联网的基本精神是安全、管理、高效、方便。假设 5G 建设起来却无法重新构建安全体系，那么就会产生巨大的破坏力。在 5G 的网络构建中，需要在底层解决安全问题，从网络建设之初，就应该加入安全机制，信息应该加密，对于特殊的服务需要建立起专门的安全机制。智能网络体系保证网络安全运行，即使在网络出现安全攻击时，也能保证其网络服务品质。

1.3 研发现状

1.3.1 全球主要的 5G 活动

1. 欧盟

欧盟在 2012 年 9 月启动了“5G NOW”的研究课题，项目归属于欧盟第七框架计划(FP7)，课题主要面向 5G 物理层技术。2012 年 11 月正式启动，名为“构建 2020 年信息社会的无线通信关键技术”(METIS)的 5G 科研项目，持续时间为 2 年半，总投资达 2700 万欧元。2014 年 1 月欧盟启动了“5G 公私合作”(5G-PPP)，项目投资达 14 亿欧元，并将 METIS 项目的主要成果作为重要的研究基础，以更好地衔接不同阶段的研究成果。5G-PPP 项目计划时间为 2014~2020 年，包含三个阶段：第一阶段(2014~2016 年)，基础研究以及愿景建立阶段，开展 5G 基础研究工作，提出 5G 需求愿景；第二阶段(2016~2018 年)，系统化和标准化阶段，进行系统研发与优化，开展标准化前期研究；第三阶

段(2018~2020年),规模试验和初期标准化阶段,开展大规模试验验证,启动5G标准化工作。

欧盟数字经济和社会委员古泽·奥廷格表示,5G愿景不仅涉及光纤、无线以及卫星通信网络的相互整合,还将利用SDN、NFV、移动边缘计算(MEC)和雾计算等技术,欧盟的5G网络将在2020~2025年投入运营。

2. 美国

作为全球创新的超级大国,美国尚未提出国家层面的5G研发计划或政策,但是美国在5G上的研究依然处于世界前列。美国高通公司,作为3G、4G核心技术的拥有者,在5G研究方面的布局也很早,特别是在非授权频谱访问、D2D、WiFi和3GPP融合上拥有强大的技术储备。

3. 日本

日本无线工业及商贸联合会在2013年10月设立了5G研究小组“2020 and Beyond AD Hoc”,由NTT DoCoMo牵头,其目标是研究2020年及未来移动通信系统概念、基本功能、5G潜在关键技术、基本架构、业务应用和推动国际合作。2014年5月8日,NTT DoCoMo正式宣布将与Ericsson(爱立信)、Nokia(诺基亚)、Samsung(三星)等六家厂商共同合作,传输速度可望提升至10Gbit/s,并期望于2020年开始运作。

4. 韩国

2013年5月13日,韩国三星宣布,已成功开发第五代移动通信(5G)的核心技术,这一技术预计将于2020年开始推向商业化。该技术可在28GHz超高频段以1Gbit/s以上的速度传送数据,相比之下,当前的第四代长期演进(4G LTE)服务的传输速率仅为75Mbit/s,5G技术要快数百倍。

2013年6月,韩国成立“5G Forum”开展5G研究及国际合作,成员包括十多家韩国主要设备制造商、运营商、高校和研究机构。“5G Forum”研究5G概念及需求,培育新型工业基础,推动国内外移动服务生态系统建设。并在2020年提供正式的5G商用服务。2014年5月,韩国三星演示了5G系统,其在28GHz的带宽中实现1Gbit/s的速率,并达到2km的覆盖距离。而韩国SK电讯已经成功在2018年韩国平昌冬奥会上推出第五代移动通信系统,并争取在2020年成为全球第一家商用5G运营商。对于韩国而言,5G已经成为其实现世界通信强国梦的核心战略。

5. 中国

2013年2月,中国成立IMT-2020(5G)推进组,开展5G策略、需求、技术、频谱、标准、知识产权研究及国际合作,并取得了阶段性研究进展。先后发布《5G愿景与需求白皮书》、《5G概念》、《5G无线技术架构》和《5G网络技术架构白皮书》,其中主要观点已在全球取得高度共识。

1.3.2 标准化进程

ITU 是联合国的一个重要专门机构,其下又分电信标准化部门 (ITU-T)、无线电通信部门 (ITU-R) 和电信发展部门 (ITU-D) 3 个部门,每个部门下设多个研究组,每个研究组下设多个工作组,作为通信领域权威的国际化组织,ITU 通过开展 5G 需求愿景、技术趋势和频谱方案的研究,主导了全球 5G 研究和标准化的工作节奏,并将以 5G 愿景等阶段性研究成果为基础,研讨相应的 5G 候选方案技术要求,开展 5G 候选技术方案评估工作,以指导 3GPP 等国际主流标准组织的 5G 关键技术研究。

当前 ITU 启动的新一轮 IMT Vision (IMT 愿景) 研究工作,旨在研究面向 2020 年及未来的 IMT 市场、用户、业务和应用趋势,并将结合技术和频谱情况趋势,提出未来 IMT 系统的总体框架、目标、能力以及后续研究方向和工作建议。历经两年的研究,ITU 的 5G 愿景主体研究工作已基本完成,全面研讨了下一代 IMT 系统的业务趋势、关键能力和系统特征,推动了业界逐渐对 5G 系统的框架和核心能力达成共识。在典型业务和应用方面,5G 将大幅度提升“以人为中心”的移动互联网业务,实现人与人、人与物和物与物之间的智能互联,并在系统设计的初始阶段充分考虑。在关键指标方面,除 4G 已包含的时延、峰值速率、移动性和频谱效率等指标外,ITU 还提出了用户体验速率、连接数密度、流量密度和能效等 5G 新增关键能力,以更好地满足新场景和新业务的需求,并在后续阶段开展新增指标的评估方法研究。在能力特征方面,除展示 5G 系统各项关键能力的提升外,还将重点体现 5G 对不同业务和场景差异化需求的支持,为用户提供更好的体验并实现资源的最优化配置。随着 5G 标准前期的研究工作逐渐进入尾声,ITU 近期确定并对外发布了 IMT-2020 工作计划,2016 年初启动 5G 技术性能需求和评估方法的研究工作,2017 年底正式启动 5G 候选技术方案征集工作,2020 年底完成标准制定工作。

5G 的相关标准化工作是在 ITU-R WP5D 工作组下进行的,下设 3 个常设工作组 (总体工作组、频谱工作组、技术工作组) 和 1 个特设组 (工作计划特设组)。第一个阶段截止到 2015 年底,重点是完成 5G 宏观描述,包括 5G 的愿景、5G 的技术趋势和 ITU 的相关决议,并在 2015 年世界无线电大会上获得必要的频率资源。第二个阶段是 2016~2017 年底,为技术准备阶段。ITU 主要完成技术要求,技术评估方法和提交候选技术所需要的模板等内容,向全世界发出征集 5G 候选技术的通函。第三个阶段是收集候选技术的阶段。从 2017 年底开始,各个国家和国际组织就可以向 ITU 提交候选技术。ITU 将组织对收到的候选技术进行技术评估,组织技术讨论,并力争在世界范围内达成一致。2020 年底,ITU 将发布正式的 5G 标准。因此,5G 也应该被称为 IMT-2020。不同国家、地区、公司在 ITU-R WP5D#19 会议上提出了 5G 的需求,经过多方讨论,目前 5G 愿景已经大体成形。

而 3GPP 在 2015 年 3 月关于无线侧的 RAN 会议上讨论并确定了面向 5G 的初步工作计划,3GPP 邀请各个成员公司的相关组织探讨对后续 5G 发展的观点和想法。同时,3GPP 初步确定从 2016 年的 R14 版本开始,标准化工作持续 R14、R15 和 R16 三个版本,计划 2019 年一季度向 ITU-R 提交正式的 5G 核心标准。同时,3GPP 在需求方面已启动了面向未来新业务的新应用场景的研究项目,以指导后续 5G 系统的研究。后来,3GPP 决定提前完成 5G NR 标准,以推动部分运营商在 2019 年尽早实现 5G NR 的大规模试验

和部署。

2017年12月21日,3GPP在葡萄牙首都里斯本正式签署通过了5G NSA(非独立组网)标准,3GPP 5G NSA标准第一个版本正式冻结。根据3GPP的规划,5G标准分为NSA和SA(独立组网)两种。其中,5G NSA组网方式需要使用4G基站和4G核心网,以4G作为控制面的锚点,满足激进运营商利用现有LTE网络资源,实现5G NR快速部署的需求。NSA作为过渡方案,主要以提升热点区域带宽为主要目标,没有独立信令面,依托4G基站和核心网工作^[4,5]。

2018年6月14日,3GPP全会(TSG#80)批准了第五代移动通信技术标准(5G NR)独立组网功能冻结。加之2017年12月完成的非独立组网NR标准,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。此次SA功能冻结,不仅使5G NR具备了独立部署的能力,也带来全新的端到端新架构,赋能企业级客户和垂直行业的智慧化发展,为运营商和产业合作伙伴带来新的商业模式,开启全连接的新时代。此次标准的冻结将开启5G新时代大门。5G NR SA系统不仅显著增大了网络速率和容量,更为其他新行业打开了通过5G系统进行行业生态系统变革的大门。

2013年3月,IEEE启动了下一代WLAN标准预研究项目“HEW”,旨在进一步改善WLAN频谱效率,提升WLAN区域吞吐量和密集组网环境下的实际性能。下一代WLAN立项之后迅速成为全球业界竞争的焦点,并被看作5G潜在的技术演进路线之一。2014年3月,IEEE正式批准了下一代WLAN标准(IEEE 802.11ax)立项,预计该标准将于2019年初完成标准制定。

IEEE的SDN研究组于2016年7月15日发布了第二份白皮书《软件定义的5G生态系统:技术挑战、商业模式可持续性、通信政策问题》,系统地阐述了其对于电信网络软件化的研究成果。多个技术驱动力正在为将来电信网络设计、电信业务运营的范式变革创造条件、奠定基础。这些驱动力包括信息技术的进步、超宽带(固定及无线网络)接入的“泛在”化、硬件设备价格的降低、虚拟化技术的成熟、开源软件得到了越来越广泛的实际应用、用户终端的能力越来越强大等。实现电信网络软件化的四大关键技术是:SDN、NFV、Cloud(云)以及边缘雾计算,而且电信网络软件化将在将来的5G系统中发挥重要作用。

在企业界,爱立信、诺基亚、三星、华为、大唐电信、阿尔卡特朗讯、中国移动、DoCoMo等先后发布了5G白皮书和研究报告。

1.4 本书的内容介绍

本书主要从传输部分和网络部分两个方面对5G系统的概念进行阐述与分析,另外,对正在引起广泛关注的人工智能也进行了初步探讨。

1.4.1 5G传输技术

D2D能够实现较高的数据速率、较低的时延和较低的功耗;通过广泛分布的终端,能够改善覆盖,实现频谱资源的高效利用;支持更灵活的网络架构和连接方法,提升链路灵活性和网络可靠性。大规模阵列MIMO提供了更强的定向能力和赋形能力,多维度

的海量 MIMO 技术, 将显著提高频谱效率, 降低发射功率, 实现绿色节能, 提升覆盖能力。全双工方式在发送设备的发送方和接收设备的接收方之间采取点到点的连接, 这意味着在全双工的传送方式下, 可以得到更高的数据传输速率。毫米波技术有着信道干净、抗干扰强、频谱复用度高、天线和设备小型化、较高的天线增益等优点; 信道编码技术能增强数据在信道中传输时抵御各种干扰的能力, 提高系统的可靠性; 新型波形设计进一步提高了通信业务的适应能力, 而新型多址技术通过发送信号的叠加传输来提升系统的接入能力, 可有效支撑 5G 网络千亿设备连接需求; 全频谱接入技术通过有效利用各类频谱资源, 有效缓解 5G 网络频谱资源的巨大需求。

$$C_{\text{sum}} = \sum_{\text{Cells}} \sum_{\text{Channels}} B_i \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{I_i + N_i} \right) \quad (1-1)$$

如式(1-1)所示, 根据香农公式可知, 要扩大信道容量, 对于单个信道其关键在于增加带宽和信噪比, 然后通过增加信道和蜂窝网数量, 可以达到扩大信道容量的目的。

提高蜂窝网络总容量, 一方面是通过减小单小区覆盖区域, 提高频谱复用度(宏蜂窝、小蜂窝、微窝、中继站、飞蜂窝异构网络分层重叠部署), 以充分利用空间资源; 另一方面通过增加物理传输信道规模(如大规模 MIMO 技术、空间调制技术、协同 MIMO 技术、分布式天线系统、干扰管理机制等), 利用各种途径寻求可用频谱资源(如认知无线电、毫米波通信、可见光通信等), 以进一步提高频谱效率(如高阶调制、自适应调制编码)。

1.4.2 5G 网络系统

大量新技术的涌现为 5G 通信指标的完成提供了便利。为了更好地实现 5G 性能目标要求, 需要与新技术相配套的新型网络架构。新型网络构架, 采用 SDN、NFV 和云计算等技术实现更灵活、智能、高效和开放的 5G 新型网络。5G 网络架构需要满足不同部署场景的要求、具有增强的分布式移动管理能力、保证稳定的用户体验速率和毫秒级的网络传输时延能力、支持动态灵活的连接和路由机制, 以及具备更高的服务质量和可靠性。

移动自组织网络能够利用移动终端的路由转发功能, 在无基础设施的情况下进行通信, 从而弥补了无网络通信基础设施可使用的缺陷。软件定义无线网络保留了 SDN 的核心思想, 即将控制平面从分布式网络设备中解耦, 实现逻辑上的网络集中控制, 数据转发规则由集中控制器统一下发, 控制平面能够很好地优化和调整资源分配、转发策略、流表管理等, 简化了网络管理, 加快了业务创新的步伐。SDN 技术实现控制功能和转发功能的分离, 通过软件的方式使网络的控制功能很容易地抽离和聚合, 有利于通过网络控制平台从全视角来感知和调度网络资源, 实现网络连接可编程。因为做到了软硬件解耦, 所以 SDN 可通过通用硬件来替代专有的网络硬件板卡, 结合云计算技术实现硬件资源按需分配和动态伸缩, 从而达到最优的资源利用率; NFV 通过组件化的网络功能模块实现控制功能的重构, 可以灵活地派生丰富的网络功能, 以 NFV 为基础的网络切片利用虚拟化将网络物理基础设施资源虚拟化为多个相互平行的虚拟化切片网络, 在每个网络切片内, 运营商可以进一步对虚拟网络切片进行灵活的分割, 按需创建网络。

传统布置基站的方式会带来巨额开销(2G/3G 时代), 在 5G 网络中, 引入了 SDN 的理念, 将数据平面与控制平面分离, 并把控制中心化, 使网络管理更加高效。进一步借