

— 5G丛书 —

FIFTH GENERATION



MOBILE
COMMUNICATION

.....

深入浅出5G 移动通信

刘毅 刘红梅 张阳 郭宝 / 编著

一本书读懂5G

实战派通信网络工程师撰写

基本原理 | 网络架构 | 关键技术 | 网络部署 | 网络规划

三大典型应用场景与用例



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

— 5G丛书 —

FIFTH GENERATION

MOBILE
COMMUNICATION

.....

深入浅出5G 移动通信

刘毅 刘红梅 张阳 郭宝 / 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书结合当前国内外 5G 移动通信技术研究现状和发展趋势,从 5G 理论技术研究、5G 网络部署规划及典型应用等方面系统性地介绍了 5G 的全貌。首先回顾历代移动通信系统的演进,指出了 5G 的发展路径与进程;然后阐述 5G 的基本原理、网络架构及关键技术,研究了 5G 网络的体系架构及核心功能;随后深入分析 5G 网络部署及规划,系统呈现了关于 5G 部署演进路线与网络规划的分析建议;最后详细介绍 5G 应用场景及典型用例,探讨了 5G 技术的应用对人们社会生活的影响。

本书主要适合从事移动通信网络规划、研究、设计等工程技术的人员与广大通信爱好者学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

深入浅出 5G 移动通信/刘毅等编著. —北京:机械工业出版社, 2019. 1
(5G 丛书)

ISBN 978-7-111-61844-7

I. ①深… II. ①刘… 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 (2019) 第 011395 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:李馨馨 责任编辑:李馨馨 秦 菲

责任校对:张艳霞 责任印制:张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2019 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·16.5 印张·402 千字

0001-3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-61844-7

定价:69.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:(010) 88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010) 68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

金 书 网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com



前言

Preface

随着互联网和物联网的高速发展，高清视频、VR/AR、智能设备等新业务层出不穷，未来通信网络将实现更多更灵活、可靠、智能化的用户体验服务。为了适应新的更多样的业务需求，满足对于未来万物互联网的构想，实现真正意义上的万物互通互联，未来移动通信网络不仅对网速提出了高要求，同时还对接入密度、网络延迟、网络可靠性等方面提出了更高的要求。比如，峰值速率要求 10 Gbit/s 以上，连接密度要求百万级，时延要求 ms 级。现有通信网络已无法满足这种多样化的业务需求，第五代移动通信（5G）技术应运而生。5G 是国际电信联盟（ITU）制定的第五代移动通信标准，它的正式名称是 IMT-2020。如果说 3G 和 4G 使人与人相联，5G 存在的真正意义在于：为万物互联打下基础。这种全新的网络接入方式将万事万物以最优的方式连接起来，这种统一的连接架构将会把移动技术的优势扩展到全新行业，并创造全新的商业模式。

目前，5G 的研究处于关键发展阶段，各种关键技术研究进展迅速，全球主要国家和地区纷纷提出 5G 试验计划和商用时间表，力争引领全球 5G 标准与产业发展。随着我国经济的不断发展，人们的消费意识也在发生着翻天覆地的变化，用户对网络性能的要求已经越来越高，同时，大数据、无人驾驶和物联网等新产业的兴起，让人们对于 5G 的期待达到了前所未有的高度。目前市场上关于介绍 5G 移动通信技术的书籍还比较少，远不能满足广大通信从业者和爱好者的需求。针对于此，笔者根据自己多年从事移动通信工作的实践经验及理论研究，编写了本书，在全球 5G 时代即将来临的时机，希望能够给通信行业的从业者和爱好者日后的工作和生活提供参考。

本书系统全面地介绍了 5G 移动通信技术的基本原理、关键技术、网络部



署规划以及典型应用等方面的内容。本书采取理论性与应用性相结合的方式,通过对移动通信网络发展历程的详细介绍、基本理论的深入分析及典型应用的重点阐述,帮助读者对整个5G移动通信技术有全面性的认识。全书主要分为6章。第1章5G网络发展概述,主要介绍了历代移动通信系统的演进路线以及5G技术发展现状。第2章5G基本原理与网络架构,主要介绍了5G全新网络架构、5G基本原理和5G基本业务信令流程。第3章5G关键技术,主要从全频谱、新空口、新架构和新特性4个方面介绍了上下行解耦、新型多址方式、MEC和Massive MIMO等10多项关键技术。第4章5G网络部署策略,主要分析了4G与5G融合部署演进以及在现有网络基础上面向5G网络的储备与改造。第5章5G网络规划,主要介绍了5G的频谱特性和传播模型、5G网络规划仿真以及5G组网建议。第6章5G三大应用场景与典型用例,主要介绍了5G在移动宽带MBB、超可靠机器类通信以及大规模机器通信三方面的应用,并阐述了5G对人们社会生产、工作和生活中的影响。此外,结束语总结了全书主要内容,并对5G技术的未来应用进行展望。附录列出了5G常见缩写的含义以及简要介绍。

笔者在编著本书过程中,借鉴了大量国内外关于5G的行业标准、技术文件及资料,并结合了笔者在从事移动通信工作的理论研究和实践中所总结出的经验。由于笔者水平有限而且时间仓促,书中错误和疏漏之处在所难免,希望广大读者予以批评指正。



目录

Contents

前言

第1章 5G 网络发展概述 / 1

1.1 移动通信网络发展概述 / 2

1.1.1 1G 模拟时代 / 2

1.1.2 2G 数字时代 / 2

1.1.3 3G 数据时代 / 3

1.1.4 4G 无线宽带时代 / 3

1.2 5G 是什么 / 4

1.3 5G 面临的挑战 / 6

1.3.1 硬件设备器件的挑战 / 6

1.3.2 多接入融合的挑战 / 7

1.3.3 网络架构灵活性的挑战 / 8

1.3.4 灵活高效承载技术的挑战 / 8

1.3.5 终端技术的挑战 / 9

1.4 5G 协议发展现状 / 9

1.4.1 协议标准制定组织 / 9

1.4.2 IMT-2020 工作整体计划 / 10

1.4.3 IMT-2020 5G 协议框架 / 10

1.5 5G 标准分裂的风险 / 11

1.6 全球 5G 网络发展进程 / 13

1.6.1 逐步落地的频谱规划 / 14

1.6.2 首个 5G NR 标准冻结 / 14

1.6.3 5G 系统架构和流程标准制定完成 / 14



- 1.6.4 全球 5G 商用进展加快,技术方案已趋完备 / 15
- 1.7 面向 5G 网络的运营商的创新和转型 / 16
 - 1.7.1 面向 5G 网络的运营商的创新思路 / 16
 - 1.7.2 面向 5G 网络的运营商转型思路 / 18
- 1.8 5G 对经济发展的贡献及前景展望 / 20

第2章 5G 基本原理与网络架构 / 23

- 2.1 5G 网络架构 / 24
 - 2.1.1 5G 整体网络架构 / 24
 - 2.1.2 5G 组网架构 / 36
- 2.2 5G 基本原理 / 38
 - 2.2.1 调制方式 / 39
 - 2.2.2 全新波形 / 40
 - 2.2.3 灵活帧结构 / 44
 - 2.2.4 参考信号重设 / 47
 - 2.2.5 信道编码 / 66
- 2.3 5G 基本业务流程 / 67
 - 2.3.1 新增 RRC INACTIVE 态 / 67
 - 2.3.2 开机入网流程 / 69
 - 2.3.3 PDU session 建立 / 71
 - 2.3.4 UE 发起的上行 QoS Flow / 72
 - 2.3.5 移动性管理 / 72

第3章 5G 关键技术 / 78

- 3.1 全频谱 / 79
 - 3.1.1 全频谱接入 / 79
 - 3.1.2 上下行解耦 / 81
 - 3.1.3 灵活双工和全双工 / 84
- 3.2 新空口 / 87
 - 3.2.1 F-OFDM 基础波形 / 87
 - 3.2.2 新型多址方式 / 90



3.2.3	新调制编码	/	94
3.3	新架构	/	96
3.3.1	超密组网	/	96
3.3.2	C-RAN	/	97
3.3.3	MEC	/	100
3.3.4	D2D 通信	/	103
3.4	新特性	/	108
3.4.1	Massive MIMO	/	108
3.4.2	网络灵活切片	/	113
3.4.3	控制面用户面解耦	/	116
第4章 5G 网络部署策略 / 118			
4.1	4G 网络 5G 化	/	119
4.1.1	4G 网络 5G 化的目标	/	119
4.1.2	4G 网络 5G 化可行性分析	/	119
4.1.3	4G 网络 5G 化应用方案探索	/	122
4.2	4G 和 5G 融合部署演进	/	128
4.2.1	3GPP 定义多种 4G 和 5G 融合网络部署架构	/	128
4.2.2	独立组网的 4G 和 5G 融合网络架构分析	/	132
4.2.3	非独立组网的 4G 和 5G 融合网络架构分析	/	133
4.2.4	5G 语音方案演进路线	/	134
4.2.5	5G 室分系统部署与演进	/	135
4.2.6	5G 承载网演进路线	/	141
4.3	现网面向 5G 的储备与改造	/	150
4.3.1	超密组网的储备能力	/	150
4.3.2	天面的储备能力	/	152
4.3.3	传输的储备能力	/	153
4.3.4	MEC 网络储备能力	/	155
第5章 5G 网络规划 / 162			
5.1	5G 网络规划需求与挑战	/	163



5.1.1	新频谱对网络规划的挑战	/	163
5.1.2	新空口对网络规划的挑战	/	163
5.1.3	新架构对网络规划的挑战	/	165
5.1.4	新业务对网络规划的挑战	/	166
5.1.5	新场景对网络规划的挑战	/	166
5.2	5G 频谱选择与规划	/	166
5.2.1	频谱发展趋势	/	166
5.2.2	5G 频谱规划原则	/	167
5.2.3	全球频谱协同规划	/	167
5.2.4	频谱规划时需要考虑不同频段的覆盖能力	/	169
5.3	5G 传播模型分析	/	169
5.3.1	UMa 模型	/	170
5.3.2	RMa 模型	/	171
5.3.3	UMi 模型	/	172
5.3.4	射线追踪模型	/	172
5.3.5	O2I 场景建模	/	174
5.4	高频传播特性分析	/	174
5.4.1	路径损耗	/	175
5.4.2	穿透损耗	/	175
5.4.3	植被损耗	/	177
5.4.4	人体损耗	/	177
5.4.5	雨衰损耗	/	177
5.4.6	大气衰减	/	178
5.5	链路预算	/	178
5.5.1	链路预算流程	/	178
5.5.2	干扰余量	/	179
5.5.3	阴影衰弱余量	/	180
5.6	5G 仿真规划	/	181
5.6.1	网络仿真流程介绍	/	181
5.6.2	3D 仿真介绍	/	185
5.7	增强移动带宽场景 5G 规划组网建议	/	188



5.7.1	C 波段与毫米波性能对比	/	188
5.7.2	C 波段组网覆盖能力评估	/	189
5.7.3	5G 高低频场景化组网建议	/	190
5.8	总结	/	193
第6章 5G 三大应用场景与典型用例 / 195			
6.1	移动宽带	/	197
6.1.1	高清视频	/	197
6.1.2	VR/AR	/	199
6.2	超可靠机器类通信	/	204
6.2.1	移动医疗	/	204
6.2.2	服务机器人	/	208
6.2.3	V2X 智能车联网	/	211
6.2.4	智能制造	/	222
6.2.5	智能电网	/	226
6.3	大规模机器通信	/	229
6.3.1	智慧城市	/	229
6.3.2	无人机	/	233
结束语 / 242			
附录 / 245			
参考文献 / 254			

第 1 章

5G 网络发展概述



1.1 移动通信网络发展概述

移动通信的发展历史可以追溯到 19 世纪。1864 年麦克斯韦从理论上证明了电磁波的存在，1876 年赫兹用实验证实了电磁波的存在，1896 年马可尼在英国进行的 14.4 公里通信试验成功，从此世界进入了无线电通信的新时代。现代意义上的移动通信开始于 20 世纪 20 年代初期。从 1G 到 4G 再到即将来临的 5G，通信技术的发展十分迅速，和人类历史一样，通信技术的发展史也是卷帙浩繁、精彩纷呈的。

1.1.1 1G 模拟时代

1G 即第一代移动通信技术，在美国芝加哥诞生。1G 采用频分多址（FDMA）技术和模拟技术，由于受到传输带宽的限制，不能进行移动通信的长途漫游，只能进行区域性的移动通信。

1G 通信技术只能用于打电话，不能发短信或上网。同时，1G 模拟通信技术有很多的缺陷，如收听效果不稳定、声音质量不佳、保密性不足、无线带宽利用不充分等。1G 主要系统为 AMPS，该制式在加拿大、南美、澳洲以及部分亚太地区被广泛采用，而中国内地在 20 世纪 80 年代初期移动通信产业还是一片空白，直到 1987 年的广东第六届全运会上，蜂窝移动通信系统才正式启动。

1.1.2 2G 数字时代

2G 摆脱 1G 模拟调制技术，实现数字化通信，较上代技术而言主要在声音质量、保密性、系统容量上有重大的改变，同时增加数据传输服务。2G 时代主要包含欧洲主导的 GSM（Global System for Mobile Communications）系统和美国主导的 CDMA（Code Division Multiple Access）系统。

GSM 系统采用 TDMA 多址方式和 FDD 双工方式，每载频支持 8 个信道，频率带宽 200 kHz。GSM 的缺陷是容量有限，当用户过载时，就必须建立更多的基站。不过，GSM 的优点也比较突出：易于部署，且采用全新的数字信号编码取代原来的模拟信号；支持国际漫游；提供 SIM 卡，方便用户在更换手机时仍能存储个人资料；能发送 160 字长度的短信等。



CDMA 采用码分多址技术,容量是 GSM 的 10 倍以上,并且采用加密技术,提高通话的安全性。相比 GSM 有通话质量好、掉话少、低辐射、健康环保等显著优势。在数据业务上,CDMA2000 1X RTT 与 GPRS 在技术上已有明显不同,在传输速率上 1X RTT 高于 GPRS。但技术上的优势并不能完全决定制式的应用,受限于产业链发展的滞后与高铁专利的集中,CDMA 技术的应用远不及 GSM 来得广泛,这不得不说也是一种遗憾。

1.1.3 3G 数据时代

3G 是指将无线通信与国际互联网等多媒体通信结合的新一代移动通信系统,构建在数字数据传输上,被视为是开启移动通信新纪元的关键。

3G 主流的三种制式分别是 CDMA2000、WCDMA、TD-SCDMA。CDMA 是第三代移动通信系统的技术基础,以其频率规划简单、系统容量大、频率复用系数高、抗多径能力强、通信质量好、软容量、软切换等特点显示出巨大的发展潜力。ITU 对第三代移动通信系统的频率规划为 TD-SCDMA 使用 2110~2170 MHz 频段;WCDMA 使用 1900~2025 MHz 频段;CDMA2000 使用 2110~2170 MHz 频段。其中 CDMA2000 和 WCDMA 均采用直接序列扩频码分多址、频分双工 FDD 方式;TD-SCDMA 则采用时分双工 TDD 与 FDMA/TDMA/CDMA 相结合的方式。

3G 能够处理图像、音乐、视频流等多种媒体形式,提供包括网页浏览、电话会议、电子商务等多种信息服务。为提供这种服务,无线网络必须能够支持不同的数据传输速度。3G 在 2G 的基础上不但提高了语音通话安全性,也解决了移动互联网相关网络和数据高速传输的问题。

1.1.4 4G 无线宽带时代

4G 是指第四代无线蜂窝电话通信协议,集 3G 与 WLAN 于一体,是专为移动互联网而设计的通信技术,从网速、容量、稳定性上相比之前有质的飞跃,传输速率更高。

4G 包括 TD-LTE 和 FDD-LTE 两种制式。严格意义上来讲,LTE 只是 3.9G,尽管被宣传为 4G 无线标准,但实际上还未达到 4G 的标准,只有升级版的 LTE Advanced 才满足国际电信联盟对 4G 的要求。TD-LTE 和 FDD-LTE 两种制式分别对应 TDD 和 FDD 两种不同的双工模式。TDD 为时分双



工，上下行在同一频段上按照时间分配交叉进行，可以更好地利用频谱资源，更易于布置；FDD 为频分双工，上下行分处不同频段同时进行，数据传输能力更强。虽然名义上 4G 的这两种制式是由 TD-SCDMA 和 WCDMA 演进而来，但实际上 4G 采用 OFDM 方式调制下行，SC-OFDM 方式调制上行，与 3G 时代调制方式有天壤之别。

回顾移动通信 1G 到 4G 的速率与业务发展变迁（如图 1-1 所示），每一代移动通信系统都可以通过标志性能力指标和核心关键技术来定义。1G 采用 FDMA，即频分多址，只能提供模拟语音业务；2G 主要采用 TDMA，即时分多址，可提供数字语音、短信和低速数据业务；3G 采用 CDMA，即码分多址，用户峰值速率达到 2 Mbit/s 至数十 Mbit/s，可以支持多媒体数据业务；4G 采用 OFDMA，即正交频分多址，用户峰值速率可达 100 Mbit/s，能够支持各种移动宽带数据业务。

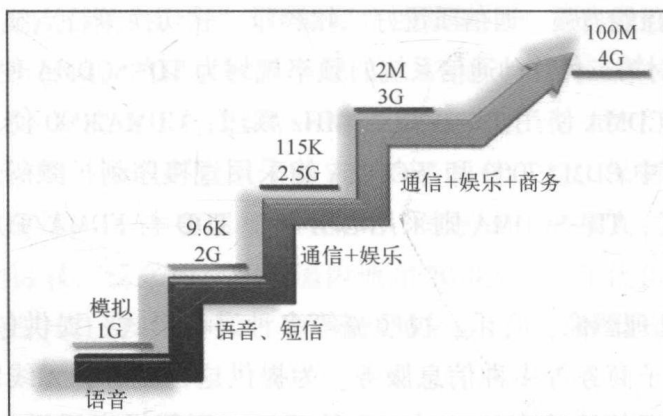


图 1-1 1G 到 4G 速率与业务发展变迁

1.2 5G 是什么

在解释“5G 是什么”这个问题之前，首先需要解释“为什么需要 5G”。随着移动互联网的不断发展，高清视频、VR/AR 等新业务层出不穷，预计未来 10 年，移动通信网络将会面对 1000 倍的数据容量增长，10~100 倍的用户速率需求，同时万物物联的发展以及工业 4.0 等垂直行业的渗透需求；而现有 4G 网络主要面向 MBB（移动宽带）场景，设计技术标准为端到端时延 30~50 ms，下行 100 Mbit/s 上行 50 Mbit/s 的峰值吞吐量，如图 1-2 所示。当



前的网络技术已经无法满足未来移动通信的需要，因此 5G 网络应运而生。



图 1-2 5G 与 4G 的性能差距

5G 是国际电信联盟（ITU）制定的第五代移动通信标准，它的正式名称是 IMT-2020。相比 4G 只面向 MBB 一种场景，5G 致力于在 eMBB（增强移动宽带）、mMTC（海量物联）、uRLLC（高可靠低时延）三个领域为用户提供服务，如图 1-3 所示。eMBB 将提供更高的系统容量以及更快的无线接入速率，从而满足未来虚拟现实 VR/AR、超清视频以及移动游戏等应用服务；mMTC 方面，预计到 2020 年，各种物联网应用将得到广泛普及，智能电网、智能物流、智慧城市、移动医疗、车载娱乐、运动健身等海量物联需求将迅速填充物联网管道；而 uRLLC 则将会在车联网、工业精确控制、无人机远程监测、入侵检测、急救人员跟踪等场景发挥巨大作用。

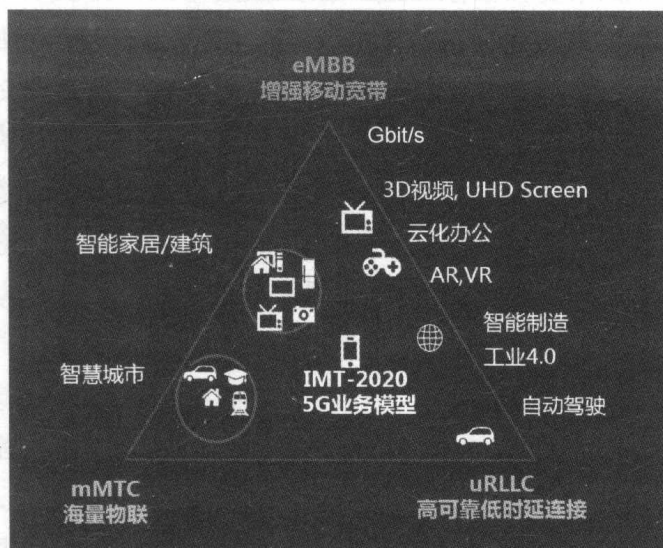


图 1-3 5G 应用体验多样化



为达成 5G 在上述三大场景的应用，5G 在标准性能设计时，不再单一考虑对速率的增强，而是综合衡量 6 个方面的指标，包括峰值速率、用户体验速率、频谱效率、移动性、时延和连接密度。同时，5G 使能未来通信最关键的三个需求维度是时延、吞吐量、连接数，分别对应 1、10 及 100，即 1 ms 的端到端时延，10 Gbit/s 的吞吐量及每平方公里 100 万的连接。

同时，5G 还是商业模式的转型、生态系统的融合，如图 1-4 所示。正如下一代移动网络（NGMN）所定义的，5G 是一个端到端的生态系统，它将打造一个全移动和全连接的社会。5G 主要包括生态、客户和商业模式三方面，它交付始终如一的服务体验，通过现有的和新的用例，以及可持续发展的商业模式，为客户和合作伙伴创造价值。

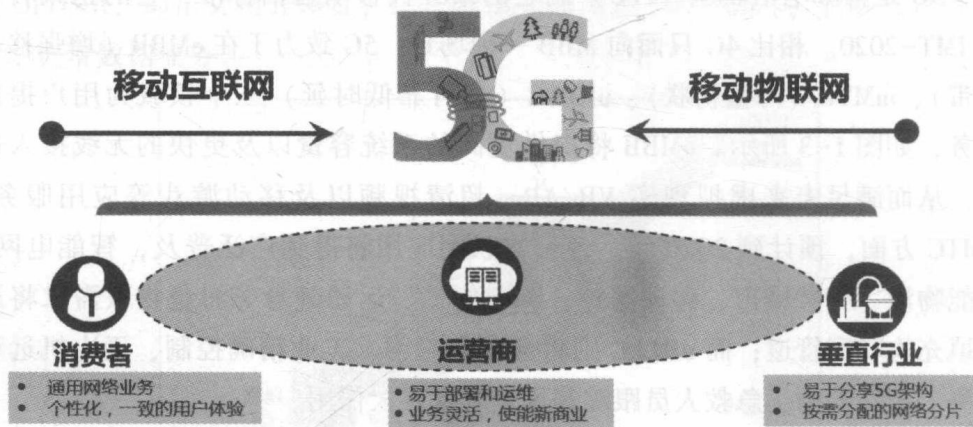


图 1-4 生态、客户和商业模式的生态系统

而对于运营商而言，5G 在物联网及垂直行业等领域的应用前景，将进一步帮助运营商拓宽商业边界，支持运营商从 B2C 行业向 B2B 行业的延展。同时，5G 通过虚拟化在电信网络上打通开源平台，可以让更多的第三方和合作伙伴参与进来，从而激发更多的创新和价值。

1.3 5G 面临的挑战

1.3.1 硬件设备器件的挑战

硬件设备主要包括基带数字处理单元以及 ADC/DAC/变频和射频前端



等模拟器件。为了追求更高的吞吐量和更低的空口用户面时延, 5G 采用更短的调度周期及更快的 HARQ 反馈, 这对 5G 系统和终端的基带处理能力要求更高, 从而给数字基带处理芯片工艺带来更大挑战。5G 支持的频段更高、载波带宽更宽、通道数更多, 对模拟器件也提出了更高的要求, 主要包括 ADC/DAC、功放和滤波器。ADC/DAC 为支持更宽的载波带宽 (如 1 GHz), 需支持更高的采样率。功放为支持 4 GHz 以上高频段和更高的功放效率, 需采用 GaN 材料。基站侧通道数激增, 导致滤波器数量相应增加, 工程上需进一步减小滤波器体积和重量, 如采用陶瓷滤波器或小型化金属腔设计等有效手段。总之, 模拟器件的主要挑战在于产业规模不足, 新型功放器件的输出功率/效率、体积、成本、功耗以及新型滤波器的滤波性能等尚不满足 5G 规模商业化要求, 特别是射频元器件和终端集成射频前端方面, 尽管已具备一定研发和生产能力, 但需要在产业规模、良品率、稳定性和性价比等方面进一步提升。至于未来的毫米波段, 则无论是有源器件还是无源器件, 对性能要求更高, 需要业界付出更大的努力。

1.3.2 多接入融合的挑战

移动通信系统从第一代到第四代, 经历了迅猛的发展, 现实网络逐步形成了包含多种无线制式、频谱利用和覆盖范围的复杂现状, 多种接入技术长期共存成为突出特征。在 5G 时代, 同一运营商拥有多张不同制式网络的状况将长期存在, 多制式网络将至少包括 4G、5G 以及 WLAN。如何高效地运行和维护多张不同制式的网络、不断减少运维成本、实现节能减排、提高竞争力是每个运营商都要面临和解决的问题。面向 2020 年及未来, 移动互联网和物联网业务将成为移动通信发展的主要驱动力。如何实现多接入网络的高效动态管理与协调, 同时满足 5G 的技术指标及应用场景需求是 5G 多网络融合的主要技术挑战。具体包括网络架构、数据分流和连接与移动性控制三方面的挑战。

(1) 网络架构的挑战 5G 多网络融合架构中将包括 5G、4G 和 WLAN 等多个无线接入网和核心网。如何进行高效的架构设计, 如核心网和接入网锚点的选择, 同时兼顾网络改造升级的复杂度、对现网的影响等是网络架构研究需要解决的问题。