



ELSEVIER

5G 之道

4G、LTE-A Pro到5G
技术全面详解


(原书第3版)

4G, LTE-Advanced Pro and The Road
to 5G, Third Edition

全球通信从业者选择，更好地理解5G，掌握5G技术
全球知名通信专家畅销力作全新升级
细梳4G到5G之道，完整全面讲解无线通信技术



埃里克·达尔曼 (Erik Dahlman)
[瑞典] 斯蒂芬·帕克威尔 (Stefan Parkvall) 著
约翰·斯科德 (Johan Sköld)
缪庆育 范斌 堵久辉 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

5G 丛书

5G 之道：4G、LTE-A Pro 到 5G 技术全面详解

(原书第 3 版)

埃里克·达尔曼 (Erik Dahlman)
[瑞典] 斯蒂芬·帕克威尔 (Stefan Parkvall) 著
约翰·斯科德 (Johan Sköld)
缪庆育 范 斌 堵久辉 译

机械工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

5G之道: 4G、LTE-A Pro 到 5G 技术全面详解: 原书第 3 版/(瑞典) 埃里克·达尔曼 (Erik Dahlman) 等著; 缪庆育, 范斌, 堵久辉译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 6

(5G 丛书)

书名原文: 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G (Third Edition)

ISBN 978-7-111-59933-3

I. ①5… II. ①埃… ②缪… ③范… ④堵… 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 099025 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: 林 楨 责任编辑: 林 楨

责任校对: 王 延 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 240mm · 26.75 印张 · 674 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59933-3

定价: 129.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

本书由与3GPP工作最为紧密的爱立信资深工程师所著，内容实用并且得到全球通信从业者选择。本书将目光投向5G最新技术以及3GPP所采纳的最新标准，详细解释了被选择的特定解决方案以及LTE、LTE-Advanced和LTE-Advanced Pro的实现技术与过程，并对通往实现5G之路以及相关可行技术提供了详细描述。

帮助读者搭建移动通信知识架构，全面提高对无线通信技术的理解，从而加深对现有商用技术的学习、工作实践的指导，同时又帮助读者理解掌握5G最新发展脚步，拥抱新的未来。

译者序

即将启程前往上海，去参加一年一度业界著名的 MWCS 展会，相信今年一定到处都是 5G 已来的热闹景象。全球的 LTE 投资顶峰已过，行业需要下一个热点来保持热度。然而，我们真的准备好了吗？

目前在中国 5G 峰会上应邀与通信专家和行业代表一起探讨通信产业与垂直行业的融合，会上来自传统制造业和知名无人机厂商的同仁对 5G 的能力与时间表非常了解，而包括我在内的通信从业者对于传统制造业以及新兴产业的行业特征及需求知之甚少。我们都在说 5G 与 4G 最大的区别在于能够满足多样化的需求并拥抱垂直行业。然而，从娱乐互联网到产业互联网似乎并非在行业终端上简单集成一个物联网模组或者 LTE 芯片就大功告成，就可安心收取行业用户的月租费和流量费了。产业的融合需要更多的相互了解、渗透、协作，甚至博弈。

前不久，有幸听取了北京大学国家发展研究院周其仁教授的“创新上下行”讲座，感觉受益匪浅。其中提到创新大多发源于大学园区的周边，例如美国的硅谷和以色列的特拉维夫，这是因为大学园区天然地将多个学科全球最顶级的教授、学生和初创公司聚集在一起，自然更容易在多学科边界的交集发生碰撞，并产生人类新知的火花。瑞典 Kista 科技园和北京中关村的发展历史亦印证了这个道理。因此，通信行业需要更多来自其他行业、了解垂直行业知识的人才来共同构建 5G 的多彩世界。

本书原作者均为通信业的知名专家，在 3GPP 标准组织里深耕多年。几个译者也已和他们合作已久，从 3G 到 4G 再到即将到来的 5G。本书是原书第 3 版，据原书上一版本的发行已有两年多的时间，3GPP 版本 15 之前的知识更新均已体现在本书中。通信领域的技术替代非常快，3GPP 里基本上一年到一年半的时间发布一个新标准版本，我们致力于将最新最权威的通信知识传播到中国，希望对通信界同仁以及其他行业的通信爱好者带来些许帮助。由于译者知识水平有限，翻译内容难免存在纰漏，希望广大读者批评指正。

感谢缪庆育博士和范斌博士在百忙之中依然按时完成了繁重的翻译工作！他们既是我在北京邮电大学王文博老师实验室时的师兄弟，也是我工作和生活中的良师益友。感谢机械工业出版社的林桢编辑对本书出版工作的大力推动和支持！最后感谢我们的家人对本书翻译过程中给予的支持和理解！

堵久辉

北京大学朗润园

原书前言

LTE 已成为最成功的移动宽带通信技术，2016 年初为超过十亿的用户提供服务并管理着广泛的应用。与 25 年前只提供语音业务的模拟系统相比，改变可谓翻天覆地。尽管 LTE 还只是处于发展的相对早期阶段，但业界已经开始准备通往下一代移动通信（通常被称为第五代或 5G）的历程。移动宽带现在是，并将继续成为未来蜂窝移动通信的重要组成部分，但未来无线网络很大程度上将考虑明显更为广泛的应用案例以及相对应的更大范围的需求。

本书讲述 LTE 技术，由 3GPP（第三代合作伙伴计划）开发并提供真实的第四代（4G）移动宽带接入，以及 3GPP 当前正在研究的新型无线接入技术。结合在一起，这两项技术将提供 5G 无线接入。

第 1 章提供了一个简介，之后在第 2 章中描述标准化过程及相关组织，例如之前提到的 3GPP 和 ITU。可用于移动通信的频谱也被涵盖其中，并且讨论了如何发现新频谱的过程。

LTE 及其演进可在第 3 章中找到。该章可独立阅读，提供了 LTE 的高度概括以及 LTE 规范如何随时间演进。为强调 LTE 演进所带来的能力显著增强，3GPP 为一些版本用了 LTE-Advanced 和 LTE-Advanced Pro 的名字。

第 4 ~ 11 章涵盖了 LTE 基本架构，第 4 章首先介绍总体协议结构，之后第 5 ~ 7 章为物理层的详细描述。其余第 8 ~ 11 章包括了连接建立和不同的传输过程，包括对多天线技术的支持。

第 12 ~ 21 章涵盖了随时间推移而针对 LTE 引入的一些主要增强功能，包括载波聚合、非授权频谱、机器类型通信，以及设备到设备通信。中继、异构部署、广播/多播业务和双连接多站协调为这些章节所涵盖的其他案例。

射频（RF）需求，作为第 22 章的主题，考虑频率灵活性和多制式无线设备方面的问题。

第 23 章和第 24 章包括了即将被标准化为 5G 一部分的新型无线接入技术。第 23 章主要讨论相关需求以及这些需求如何被定义，而第 24 章深挖技术实现。

最后，第 25 章对本书内容以及 5G 接入技术的讨论进行了总结。

目 录

译者序

原书前言

第1章 介绍	1	3.1.5 频谱灵活性	27
1.1 1G和2G: 语音为中心的技术	1	3.1.6 多播和广播支持	28
1.2 3G和4G: 移动宽带	1	3.1.7 定位	29
1.3 5G, 移动宽带, 网络社会	3	3.2 LTE 演进	29
1.4 每章要点	4	3.3 频谱灵活性	30
第2章 从3G到5G的频谱监		3.3.1 载波聚合	31
管和标准化	5	3.3.2 授权辅助接入	32
2.1 标准化和监管概述	5	3.4 多天线增强	33
2.2 ITU-R从3G到5G的活动	6	3.4.1 扩展的多天线传输	33
2.2.1 ITU-R的角色	6	3.4.2 多点协调和传输	33
2.2.2 IMT-2000和IMT-Advanced	7	3.4.3 增强的控制信道结构	34
2.2.3 IMT-2020	8	3.5 密集化、小基站和异构部署	34
2.3 移动系统的频谱	9	3.5.1 中继	34
2.3.1 ITU-R为IMT系统定义的频谱	10	3.5.2 异构部署	35
2.3.2 LTE频带	11	3.5.3 小基站开/关	35
2.3.3 新频带	16	3.5.4 双连接	35
2.4 5G频谱	17	3.5.5 动态TDD	36
2.4.1 WRC将要研究的新频段	17	3.5.6 WLAN互通	36
2.4.2 高于6GHz的RF辐射	18	3.6 设备增强	36
2.5 3GPP标准化	18	3.7 新场景	37
2.5.1 3GPP过程	18	3.7.1 设备到设备通信	37
2.5.2 3GPP中5G的制定	21	3.7.2 机器类型通信	37
第3章 LTE无线接入: 概述	22	3.8 设备能力	38
3.1 LTE基础技术	23	第4章 无线接口架构	40
3.1.1 传输方案	23	4.1 总体系统架构	40
3.1.2 信道相关的调度和速率适应	24	4.1.1 核心网络	40
3.1.3 小区间干扰协调	25	4.1.2 无线接入网络	41
3.1.4 多天线传输	26	4.2 无线协议架构	42

4.2.1	数据包合并协议	44	6.4.5	PDCCH 和 EPDCCH 的盲解码	105
4.2.2	无线链路控制	44	6.4.6	下行链路调度分配	108
4.2.3	媒体接入控制	45	6.4.7	上行链路调度许可	115
4.2.4	物理层	51	6.4.8	功率控制命令字	119
4.3	控制平面协议	52	第 7 章 上行链路物理层处理		120
4.3.1	状态机	53	7.1	传输信道处理	120
第 5 章 物理传输资源		54	7.1.1	处理步骤	120
5.1	总体时频结构	54	7.1.2	至物理资源的映射	122
5.2	常规子帧和 MBSFN 子帧	57	7.1.3	PUSCH 跳频	123
5.3	天线端口	58	7.2	上行链路参考信号	125
5.3.1	准共址天线端口	59	7.2.1	解调参考信号	126
5.4	双工机制	59	7.2.2	探测参考信号	131
5.4.1	频域双工	60	7.3	上行链路多天线传输	134
5.4.2	时域双工	60	7.3.1	用于 PUSCH 的基于预编码器 的多天线传输	135
5.4.3	LTE 和 TD-SCDMA 共存	63	7.3.2	上行链路多用户 MIMO	137
5.4.4	授权辅助接入	64	7.3.3	PUCCH 发射分集	138
5.5	载波聚合	64	7.4	上行链路层 1/层 2 控制信令	139
5.6	LTE 载波的频域位置	64	7.4.1	基本 PUCCH 结构	140
第 6 章 下行链路物理层处理		66	7.4.2	PUCCH 上的上行链路 控制信令	147
6.1	传输信道处理	66	7.4.3	PUSCH 上的上行链路 层 1/层 2 控制信令	151
6.1.1	处理步骤	66	7.5	上行链路功率控制	154
6.1.2	集中式和分布式资源映射	70	7.5.1	上行链路功率控制：一些基 本规则	154
6.2	下行链路参考信号	73	7.5.2	PUCCH 功率控制	156
6.2.1	小区专用参考信号	74	7.5.3	PUSCH 功率控制	157
6.2.2	解调参考信号	76	7.5.4	SRS 功率控制	158
6.2.3	CSI 参考信号	79	7.6	上行链路定时对齐	159
6.2.4	准共址关系	82	第 8 章 重传协议		161
6.3	多天线传输	82	8.1	采用软合并的混合 ARQ	162
6.3.1	传输模式	82	8.1.1	下行链路混合 ARQ	165
6.3.2	发射分集	84	8.1.2	上行链路混合 ARQ	165
6.3.3	基于码本的预编码	86	8.1.3	混合 ARQ 定时	167
6.3.4	非码本的预编码	88	8.2	无线链路控制	170
6.3.5	下行链路多用户 MIMO	90	8.2.1	分割、级联及 RLC SDU 的重组	171
6.4	下行链路 L1/L2 控制信令	92	8.2.2	RLC 重传	171
6.4.1	物理控制格式指示信道	93			
6.4.2	物理混合 ARQ 指示信道	95			
6.4.3	物理下行链路控制信道	97			
6.4.4	增强物理下行链路控制信道	102			

8.2.3 依序发送	172	11.2.2 系统信息块	204
8.2.4 RLC 操作	172	11.3 随机接入	206
第9章 调度和速率自适应	175	11.3.1 步骤1: 随机接入前导码传输	208
9.1 调度策略	176	11.3.2 步骤2: 随机接入响应	212
9.2 下行链路调度	178	11.3.3 步骤3: 终端识别	213
9.3 上行链路调度	179	11.3.4 步骤4: 争用解决	213
9.3.1 上行链路优先级控制	180	11.4 寻呼	214
9.3.2 调度请求	181	第12章 载波聚合	216
9.3.3 缓冲器状态报告	182	12.1 方案结构总览	218
9.3.4 功率余量报告	182	12.2 主组分载波和辅组分载波	218
9.4 调度分配与调度许可的定时	183	12.3 自调度和跨载波调度	219
9.4.1 下行链路调度定时	184	12.3.1 FDD 的载波聚合调度定时	220
9.4.2 上行链路调度定时	184	12.3.2 TDD 载波聚合的调度定时	220
9.5 半持续调度	185	12.3.3 FDD 和 TDD 载波聚合的调 度定时	222
9.6 半双工 FDD 的调度	186	12.4 非连续接收和组分载波去 激活	223
9.7 非连续接收	187	12.5 下行链路控制信令	223
第10章 信道状态信息与全 维度 MIMO	189	12.5.1 PCFICH	223
10.1 CSI 报告	189	12.5.2 PHICH	224
10.2 周期性和非周期性 CSI 报告	190	12.5.3 PDCCH 和 EPDCCH	224
10.2.1 非周期性 CSI 报告	190	12.6 上行链路控制信令	226
10.2.2 周期性 CSI 报告	191	12.6.1 PUCCH 上的混合 ARQ 确认	226
10.3 干扰估计	192	12.6.2 PUCCH 上的 CSI 报告	227
10.4 信道质量指示器	193	12.6.3 PUSCH 上的控制信令	228
10.5 秩指示器和预编码矩阵 指示器	194	12.7 定时提前和载波聚合	229
10.6 全维度 MIMO	195	第13章 多点协调和传输	230
10.6.1 用于大规模天线排列 的 CSI 反馈	196	13.1 小区间干扰协调	232
10.6.2 CSI 报告类型 A	196	13.2 多点协调/传输	233
10.6.3 CSI 报告类型 B	197	13.2.1 多点协调	233
第11章 接入过程	199	13.2.2 多点传输	236
11.1 捕获和小区搜索	199	13.2.3 上行链路多点协调/接收	239
11.1.1 LTE 小区搜索概述	199	第14章 异构网络部署	240
11.1.2 PSS 结构	201	14.1 在异构网络部署中的 干扰处理	241
11.1.3 SSS 结构	201	14.2 用版本 8 的功能来实现 异构部署	243
11.2 系统信息	202	14.3 频域分隔	244
11.2.1 MIB 和 BCH 传输	202		

14.4	时域分隔	245	18.3.5	回传链路和接入链路时序	286
14.5	共享小区	247	第 19 章	多媒体广播多播业务	289
14.6	封闭用户组	249	19.1	架构	290
第 15 章	动态 TDD 小基站增强	250	19.2	MBSFN 信道结构和物理层处理	292
15.1	小基站开/关	250	19.3	MBSFN 业务的调度	294
15.1.1	发现信号和相关测量	251	19.4	单小区点到多点传输	296
15.2	动态 TDD 和 eIMTA	252	第 20 章	用于大规模 MTC 应用的 LTE	297
15.2.1	eIMTA 的基本原则	252	20.1	概述	297
15.2.2	调度和混合 ARQ 重传	254	20.2	LTE 版本 12 中的 MTC 增强	298
15.2.3	RRM 测量和 CSI 报告	255	20.2.1	数据速率能力和 UE 类别 0	298
15.2.4	上行功率控制	255	20.2.2	类型 B 半双工操作	298
15.2.5	小区间干扰协调	255	20.2.3	具有单接收天线的设备的 可能性	299
第 16 章	双连接	257	20.2.4	省电模式	299
16.1	架构	258	20.3	LTE 版本 13 中 MTC 增强： eMTC	299
16.2	物理层影响	260	20.3.1	窄带操作	300
16.2.1	时序	260	20.3.2	通过重复的覆盖增强	301
16.2.2	功率控制	261	20.3.3	下行链路传输：PDSCH 和 MPDCCH	303
16.3	双连接下的调度	262	20.3.4	上行链路传输：PUSCH 和 PUCCH	307
第 17 章	非授权频谱与授权 辅助接入	264	20.3.5	同步信号和 BCH	310
17.1	LAA 频谱	265	20.3.6	系统信息块	311
17.2	Wi-Fi 基础知识	266	20.3.7	随机接入	312
17.3	LAA 的技术组件	268	20.3.8	扩展 DRX	313
17.3.1	动态频率选择	269	20.4	窄带物联网（NB-IoT）	313
17.3.2	先听后说	270	20.4.1	背景	313
17.3.3	帧结构与突发发送	273	20.4.2	NB-IoT 部署模式	314
17.3.4	参考信号与非连续发送	274	20.4.3	下行数据传输	314
17.3.5	调度、HARQ 与重传	275	20.4.4	上行传输	315
17.3.6	无线承载映射与 QoS 控制	275	20.4.5	NB-IoT 系统信息	317
17.4	R13 之后的增强	276	第 21 章	D2D 连接	318
第 18 章	中继	277	21.1	概述	318
18.1	LTE 中的中继	277	21.1.1	直通链路传输	318
18.2	整体架构	279	21.1.2	覆盖范围内和覆盖范围 外	
18.3	带内中继的回传链路设计	279			
18.3.1	接入链路的 HARQ 操作	280			
18.3.2	回传链路 HARQ 操作	281			
18.3.3	回传下行控制信令	282			
18.3.4	回传链路的参考信号	284			

外的直通链路连接	319	22.6.1 发射端特性	348
21.1.3 直通链路同步	320	22.6.2 接收端特性	349
21.1.4 直通链路连接的配置	321	22.6.3 区域性需求	349
21.1.5 直通链路的架构	322	22.6.4 通过网络信令传输的频 带特定的终端需求	350
21.1.6 直通链路信道结构	322	22.6.5 基站类型	350
21.2 直通链路通信	323	22.7 输出功率等级的要求	351
21.2.1 资源池及传输资源的配 置/选择	323	22.7.1 基站输出功率及动态范围	351
21.2.2 物理直通链路控制信道周期	324	22.7.2 终端输出功率及动态范围	352
21.2.3 直通链路控制信息/物理 直通链路控制信道的传输	324	22.8 传输信号质量	352
21.2.4 直通链路共享信道/物理 直通链路共享信道传输	326	22.8.1 EVM 和频率误差	352
21.2.5 直通链路控制信息内容	328	22.8.2 终端带内发射	352
21.2.6 调度授权和 DCI 格式 5	328	22.8.3 基站时间校准	353
21.2.7 接收资源池	329	22.9 无用发射的需求	353
21.3 直通链路发现	329	22.9.1 实现方面	353
21.3.1 资源池和传输资源的选 取/分配	330	22.9.2 频谱发射模板	353
21.3.2 发现传输	331	22.9.3 相邻信道泄漏比	355
21.3.3 接收资源池	331	22.9.4 杂散发射	356
21.4 直通链路同步	331	22.9.5 占用带宽	357
21.4.1 直通链路 ID 和直通链路同 步信号结构	332	22.9.6 发射机互调	357
21.4.2 直通链路广播信道和直通 链路主信息块	333	22.10 灵敏度和动态范围	357
21.4.3 选取同步参考 UE	334	22.11 接收端抗干扰信号的 敏感性	358
21.4.4 直通链路同步信号的传输	334	22.12 多频带基站	359
21.5 LTE 版本 13 设备间通 信的扩展	336	22.13 中继的射频需求	362
21.5.1 覆盖范围外的发现	336	22.14 授权辅助接入的射频需求	362
21.5.2 层 3 中继	337	22.14.1 未经授权的 5GHz 频带的 法规要求	363
第 22 章 频谱与射频特征	338	22.14.2 LAA 操作的特定基站 射频要求	364
22.1 灵活的频谱使用	338	22.14.3 LAA 操作中的特定终端 射频要求	365
22.2 灵活的信道带宽操作	339	22.15 有源天线系统的基站的射 频要求	365
22.3 LTE 的载波聚合	340	第 23 章 5G 无线接入	367
22.4 非连续频谱的操作	344	23.1 什么是 5G	367
22.5 多标准无线基站	345	23.1.1 数据速率	368
22.6 LTE 射频需求的概述	347	23.1.2 延迟	368

23.1.3	极高的可靠性	368	24.1.1	无线接入演进和向前兼容性	381
23.1.4	具有非常长的电池寿命的低 成本设备	368	24.1.2	超精致设计：最小化“始终 开启”的传输	381
23.1.5	网络能量效率	369	24.1.3	留在盒子里	383
23.2	5G 和 IMT-2020	369	24.1.4	避免严格的定时关系	384
23.2.1	IMT-2020 的应用场景	370	24.2	5G：关键技术组件	384
23.2.2	IMT-2020 的能力	370	24.2.1	波形	384
23.2.3	5G 在区域和运营商中的研究	373	24.2.2	灵活双工	388
23.3	一对多的技术：“网络 切片”	374	24.2.3	帧结构	390
23.4	5G 频谱	375	24.2.4	信道编码	391
23.4.1	扩展到高频段	375	24.2.5	多天线传输和波束成形	392
23.4.2	授权的与未授权的频谱	377	24.2.6	多站点连接和紧密互连	393
23.5	LTE 的演进与新 5G 技术	378	24.2.7	系统接入功能	394
23.6	5G 初始部署的频段	378	24.2.8	调度和基于内容的传输	396
23.7	5G 技术规范	379	24.2.9	新类型的无线链路	397
第 24 章	新的 5G 无线接入技术	381	第 25 章	结束语	400
24.1	5G：一些一般性设计原则	381		缩略语	401
				参考文献	412

第 1 章 介 绍

移动通信已经成为日常商品。在过去几十年中，它已经从对一部分人来说昂贵的技术演变为当今世界上大多数人使用的、普遍存在的系统。

世界已经目睹了四代移动通信系统的演进，每个系统都与一组特定的技术和一组特定的用例相关联，如图 1.1 所示。本章以各代通信系统和它们之间的演进作为本书内容的背景。本书的其余部分聚焦于已经部署和正在考虑的最新一代，即第四代（4G）和第五代（5G）。

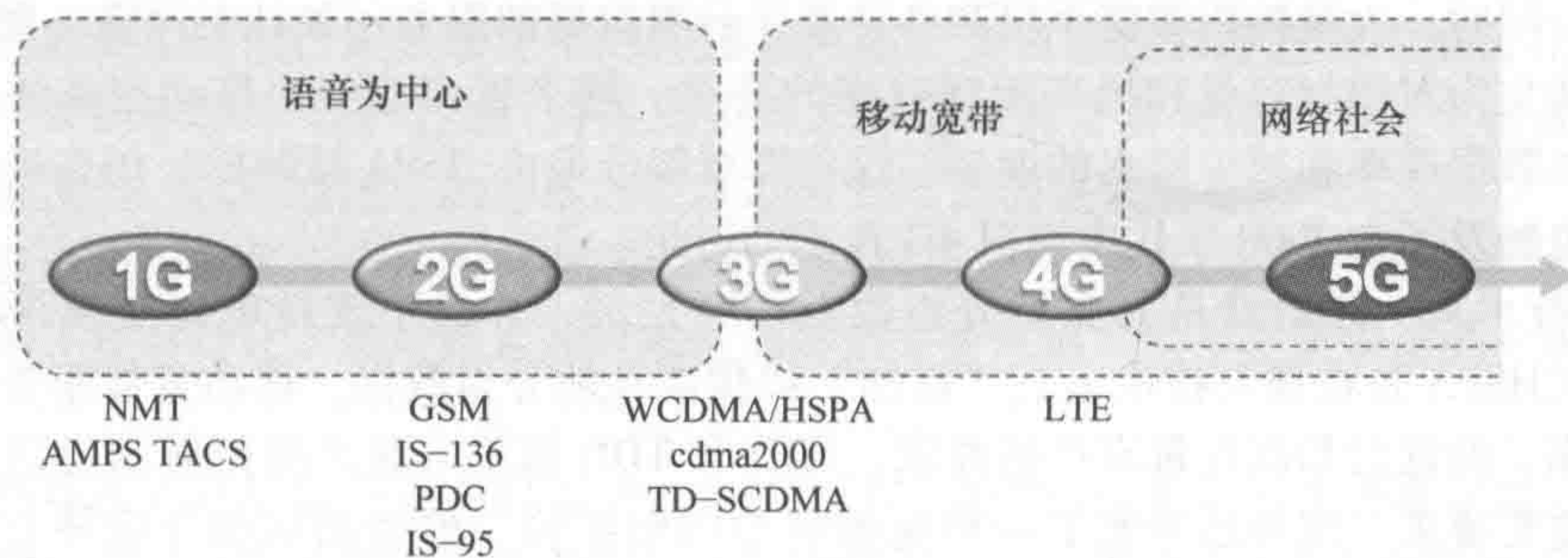


图 1.1 各代蜂窝通信

1.1 1G 和 2G：语音为中心的技术

第一代（1G）系统是 20 世纪 80 年代的模拟语音专用移动电话系统，通常在国家范围内提供，只有有限的或没有国际漫游功能。1G 系统包括 NMT、AMPS 和 TACS。移动通信在 1G 系统之前可用，但通常只是小规模并且只针对特定的人群。

第二代（2G）系统出现在 20 世纪 90 年代初。2G 技术的例子包括欧洲发起的 GSM 技术，美国 IS-95/CDMA 和 IS-136/TDMA 技术以及日本 PDC 技术。2G 系统仍然是以语音为中心，但由于全数字化提供了比以前的 1G 系统显著更高的容量。多年来，这些早期技术中的一些已经被扩展到也支持（原始）分组数据服务。这些扩展有时被称为 2.5G，以指示它们在 2G 技术中的根源，但具有比原始技术显著的更宽的能力范围。EDGE 是一个众所周知的 2.5G 技术的例子。GSM/EDGE 仍然在智能手机中广泛使用，但也经常用于某些类型的机器类型通信，例如报警、支付系统和房地产监控。

1.2 3G 和 4G：移动宽带

在 20 世纪 90 年代，不仅支持语音而且支持数据服务的需求开始出现，推动了对新一代蜂窝技术的发展。在 20 世纪 90 年代后期，2G GSM 虽然在欧洲开发，但已经成为事实上的全球标准。为了确保 3G 技术的全球覆盖，人们意识到 3G 的发展必须在全球范围内进行。为了促成这一点，

形成了第三代合作伙伴计划（3GPP）以开发 3G WCDMA 和 TD-SCDMA 技术，更多细节参见第 2 章。不久之后，并行组织 3GPP2 形成了，并开发竞争的 3G cdma2000 技术，这是由 2G IS-95 技术演变来的。

WCDMA 的第一个版本（99 版[⊖]）于 1999 年完成。它包括电路交换语音和视频服务，以及通过分组交换和电路交换承载的数据服务。

WCDMA 的第一个主要改进是在版本 5（R5）中引入了高速下行链路分组接入（HSDPA），随后在版本 6（R6）中引入了增强上行链路，统称为高速分组接入（HSPA）。HSPA 有时被称为 3.5G，开始了一个“真正的”移动宽带体验，数据速率为几 Mbit/s，同时保持与原来的 3G 规范的兼容性。随着移动宽带的支持，智能手机（如 iPhone）和各种 Android 设备迅速被采用。如果没有针对大量市场的移动宽带的广泛可用性，智能手机使用得将显著减慢，并且其可用性将受到严重限制。同时，大量使用智能手机和各种基于分组数据的服务，如社交网络、视频、游戏和在线购物，转化为对增加容量和提高频谱效率的要求。越来越多地使用移动服务的用户也提高了他们对增加数据速率和减少延迟的期望。这些需求部分地由 HSPA 持续的、仍在进行的演进所解决，但它也触发了在 2000 年代中期对 4G 技术的讨论。

4G LTE 技术从一开始就是为支持分组数据而开发的，并且不支持电路交换语音，而不像 3G，在 3G 中 HSPA 是在现有技术之上“附加”提供高性能分组数据。移动宽带服务是焦点，其对高数据速率、低延迟和高容量有严格要求。FDD 和 TDD 解决方案之间的频谱灵活性和最大通用性是其其他重要要求。此外还开发了一种新的核心网络架构，称为增强型分组核心网（EPC），以取代由 GSM 和 WCDMA/HSPA 使用的架构。LTE 的第一个版本是 3GPP 规范版本 8（R8）的一部分，第一个商业部署发生在 2009 年年底，随后成为快速全球部署的 LTE 网络。

LTE 的一个重要方面是全球认可的单一技术，不同于前几代，有几种竞争技术，如图 1.2 所示。拥有单一的、普遍认可的技术加速了新服务的开发，并降低了用户和网络运营商的成本。

自 2009 年的商业部署以来，LTE 在数据速率、容量、频谱和部署灵活性以及应用范围方面有了显著的发展。从 20MHz 的连续的、许可频谱的峰值数据速率为 300Mbit/s 的宏基站部署，LTE 在版本 13（R13）的演进可以支持多 Gbit/s 峰值数据速率，演进包括改进的天线技术、多站点协调、利用碎片以及未经许可的频谱和密集部署等几个方面。LTE 的演进还支持了大规模机器类型通信和引入了直接的设备到设备通信，相当大地拓宽了超出移动宽带的使用情况。

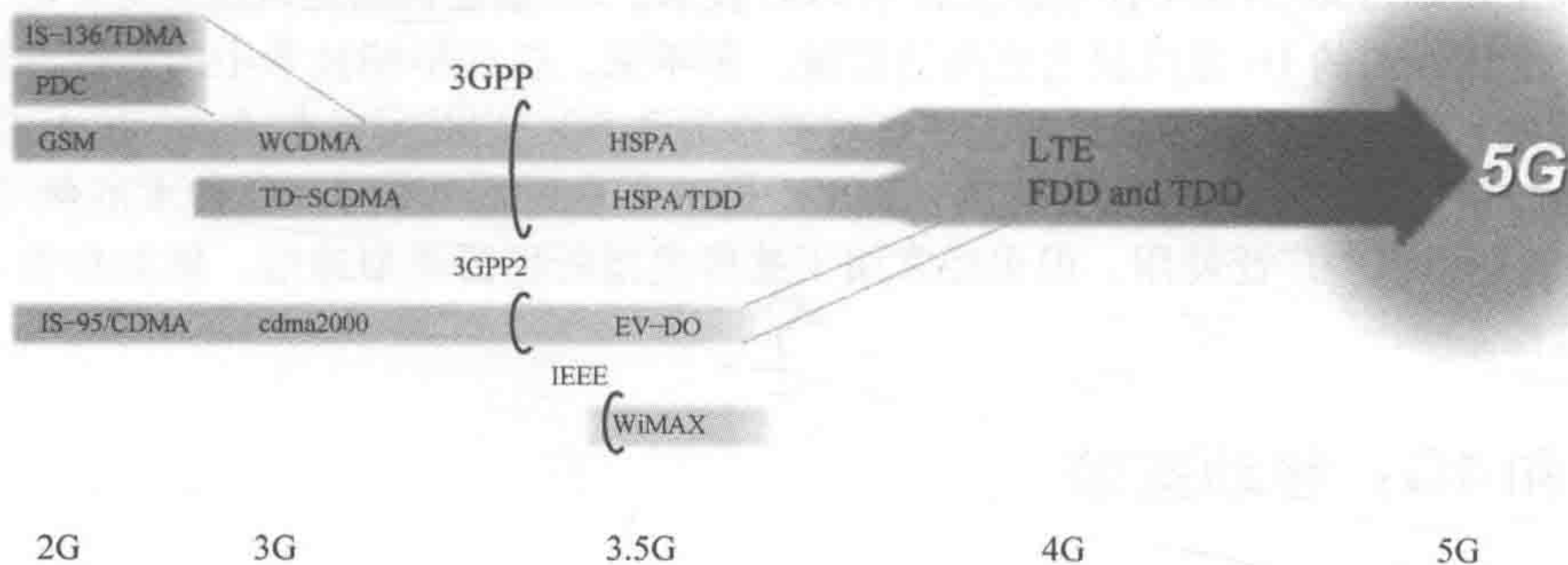


图 1.2 无线技术的融合

[⊖] 由于历史的原因，第一个 3GPP 的版本以它冻结时的年份来命名，而后续的版本为 4、5、6 等。

1.3 5G, 移动宽带, 网络社会

虽然 LTE 仍处于部署阶段, 但该行业已经在迈向下一代移动通信的道路上, 这通常被称为第五代或 5G。

移动宽带是并将继续成为未来蜂窝通信的重要部分, 但是未来的无线网络在很大程度上也涉及更为广泛的应用案例。实质上, 5G 应被视为一个平台, 实现与各种服务的无线连接, 包括现有的以及未来未知的服务, 从而使无线网络超越移动宽带。连接将基本上在任何地方, 随时提供给任何人和任何物体。网络社会这个术语有时用于指连接超出移动智能手机的情况, 这对社会产生深远影响。

大规模机器类型通信, 例如农业中的传感器网络、交通监控和建筑物中的公用设施的远程控制是一种类型的非移动宽带应用。这些应用要求非常低的设备功耗, 而每个设备的数据速率和数据量是适度的。这些应用中的许多已经可以由 LTE 的演进来支持。

非移动宽带应用的另一个示例是超可靠和低延迟通信 (URLLC), 也称为关键机器类型通信。其示例是工业自动化, 其对延迟和可靠性的要求非常严格。用于交通安全的车辆间通信是另一个例子。

然而, 移动宽带将仍然是重要的用例, 并且无线网络中的业务量正在快速增加, 用户对数据速率、可用性和等待时间的要求也在增强。这些增强的要求也需要由 5G 无线网络来解决。

增加容量可以以三种方式完成: 提高频谱效率、密集部署和增加频谱量。LTE 的频谱效率已经很高, 虽然可以进行改进, 但是不足以满足增加的业务量。不仅从容量角度, 而且从高数据速率可用性角度来看, 网络密集化也必将发生。尽管以寻找额外的天线站点为代价, 但可以提供相当大的容量增加。增加频谱的数量将有所帮助, 但不幸的是, 典型的蜂窝频带 (高达约 3GHz) 中尚未被利用的频谱的量是有限的并且相当小。因此, 注意力已经转移到将更高频率作为接入附加频谱的一种方式, 包括 3~6GHz、6~30GHz 或更高, 目前的 LTE 不是为这些很高的频率范围设计的。然而, 由于较高频带中的传播条件对于广域覆盖不太有利, 并且需要诸如波束成形的更先进的天线技术, 所以这些频带可以主要用作对现有的较低频带的补充。

从前面的讨论可以看出, 5G 无线网络的要求范围非常广泛, 需要高度的网络灵活性。此外, 由于目前无法预见许多未来的应用, 而保证未来可用是一个关键要求。这些要求中的一些可以由 LTE 演进来处理, 但不是全部, 同时要求新的无线接入技术来补充 LTE 演进, 如图 1.3 所示。

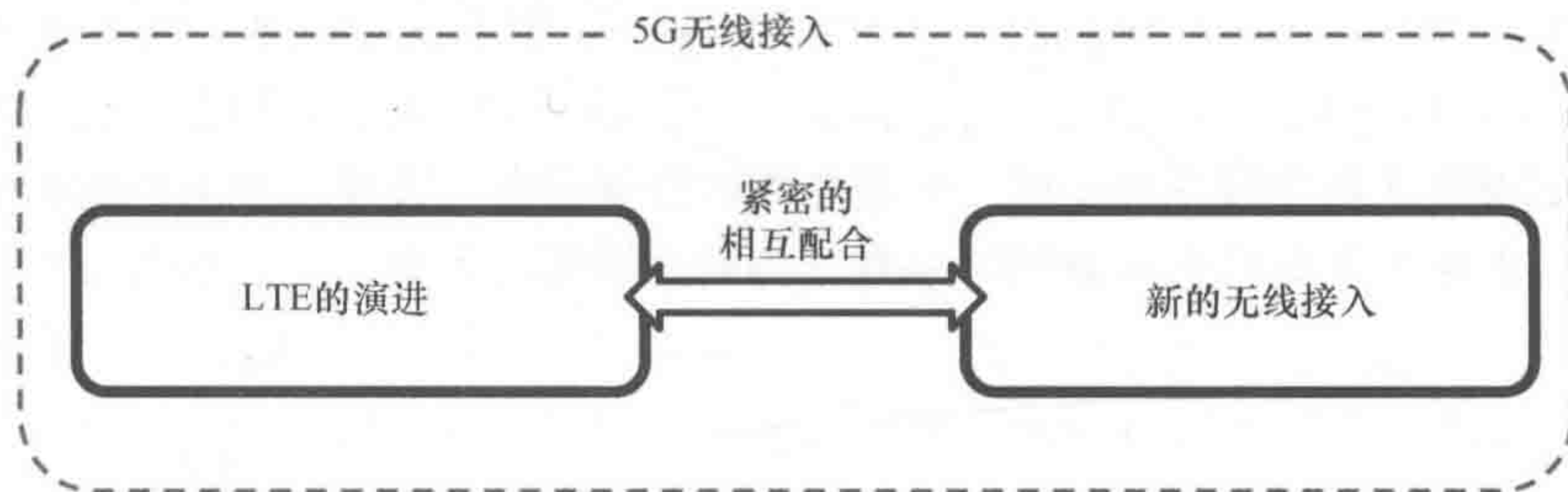


图 1.3 5G 包括 LTE 的演进和新的无线接入技术

1.4 每章要点

本书的其余部分描述了 4G 和 5G 无线网络的技术。

第 2 章描述了标准化过程和相关组织，如上面描述的 3GPP 和 ITU，还覆盖了可用于移动通信的频带，以及关于发现新频带的过程的讨论。

LTE 的概述及其演进见第 3 章。阅读本章可以获得对 LTE 的高度概述，以及 LTE 规范如何随着时间演进。为了强调 LTE 演进带来的能力显著增加，3GPP 为某些版本引入了名为 LTE-Advanced 和 LTE-Advanced Pro 的名称。

第 4 ~ 11 章涵盖了基本的 LTE 结构，从第 4 章中的总体协议结构开始，然后是第 5 ~ 7 章中物理层的详细描述。第 8 ~ 11 章，涵盖了连接配置和各种传输流程，包括对多天线的支持。

第 12 ~ 21 章涵盖了一些长期引入的主要增强功能，包括载波聚合、非授权频谱、机器类型通信和设备到设备通信。中继、异构部署、广播/多播服务、双连接多站点协调是这些章节中涉及的增强的其他示例。

对于射频的要求，考虑到频谱灵活性和多标准无线接入设备，是第 22 章的主题。

第 23 和 24 章讲述了将要作为 5G 一部分进行标准化的新无线接入。第 23 章对需求及其定义进行了仔细研究，而第 24 章深入探讨了技术实现。

最后，第 25 章对这本书和关于 5G 无线接入的讨论进行了总结。

第 2 章 从 3G 到 5G 的频谱监管和标准化

移动通信系统的研究、开发、实施和部署由电信产业界在全球共同协调的努力中进行，通过该协定，定义了整个移动通信系统的通用工业规范。这项工作还在很大程度上取决于全球和区域监管，特别是对于无线技术的重要组成部分——频谱的使用。本章将介绍移动通信系统制定中必不可少的监管和标准化环境。

2.1 标准化和监管概述

有许多组织参与创建技术规范 and 标准以及移动通信领域中的规则。这些可以大致可以分为三类：标准制定组织、监管机构和主管部门，以及行业论坛。

标准制定组织（SDO）制定和商定移动通信系统的技术标准，以便使行业能够生产和部署标准化的产品，并提供这些产品之间的互操作性。移动通信系统的大多数组件，包括基站和移动设备，在一定程度上被标准化。在产品实现方面也会提供一定专有解决方案的自由度，但是由于显而易见的原因，通信协议依赖于详细的标准。SDO 通常是非营利性行业组织，而不是政府控制的。他们经常在政府的授权下在一定范围内编写标准，但是标准具有更高的地位。

有国家级别的 SDO，但由于通信产品的全球传播，大多数 SDO 是区域性的，并在全球范围内合作。作为示例，GSM、WCDMA/HSPA 和 LTE 的技术规范全部由 3GPP（第三代合作伙伴计划）建立，3GPP 由来自欧洲（ETSI）、日本（ARIB 和 TTC）、美国（ATIS）、中国（CCSA）、韩国（TTA）和印度（TSDSI）等七个区域和国家 SDO 的全球组织。SDO 往往有不同程度的透明度，但是 3GPP 是完全透明的，所有技术规范、会议文件、报告和电子邮件列表公开可用，而且对非成员也是免费的。

监管机构和主管部门是政府主导的组织，为销售、部署和运营移动系统和其他电信产品制定了监管和法律要求。它们最重要的任务之一是控制频谱使用，并为移动运营商设置许可条件，这些运营商被授予许可证可以使用射频（RF）频谱的一部分来运营移动系统。另一个任务是通过监管认证来监管产品的“投放市场”，确保设备，基站和其他设备获得批准并符合相关规定。

频谱监管在国家一级由国家主管部门负责，但也通过欧洲（CEPT/ECC）、美洲（CITEL）和亚洲（APT）的区域机构协调。在全球层面，频谱监管由国际电信联盟（ITU）协调。监管机构规定在某个频谱使用什么服务，并设置更详细的要求，如限制发射机的无用杂散。他们还通过规章间接参与制定产品标准的要求。国际电信联盟参与制订移动通信技术的要求，这将在第 2.2 节中进一步说明。

行业论坛是行业领导的组织，其目的主要是促进和游说特定技术或其他利益。在移动行业，这些通常由运营商领导，但也有供应商创建的行业论坛。这样的组织的示例是 GSMA（GSM 协会），其促进基于 GSM、WCDMA 和 LTE 的移动通信技术。行业论坛的其他例子是下一代移动网