

内 容 简 介

《5G 技术核心与增强：从 R15 到 R16》是 OPPO 研究院的 5G 技术专家和国际标准化代表共同编著的一本 5G 技术图书。与市面上已出版的 5G 书籍不同，本书不仅介绍了 5G NR 标准的基础版本——R15 版本，也介绍了包含 URLLC、NR V2X、非授权频谱通信等 5G 重要组成部分的 5G 增强技术标准——R16 版本。本书的特色是深入介绍从无到有、由粗到细的 5G 技术方案遴选和标准形成的过程，不仅可以作为从事 5G 研发人员的工具书，也可以作为高校、企业中将要投身未来 5G 及 6G 研究的学生和年轻研究人员学习 5G 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。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目 (CIP) 数据

5G 技术核心与增强：从 R15 到 R16/OPPO 研究院组编；沈嘉等编著．—北京：
清华大学出版社，2021.2

(新时代·技术新未来)

ISBN 978-7-302-57151-3

I. ①5… II. ①沈… III. ①无线电通信-移动网 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 257064 号

责任编辑：刘 洋

封面设计：徐 超

版式设计：方加青

责任校对：王荣静

责任印制：沈 露

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

质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市金元印装有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm

印 张：40.5

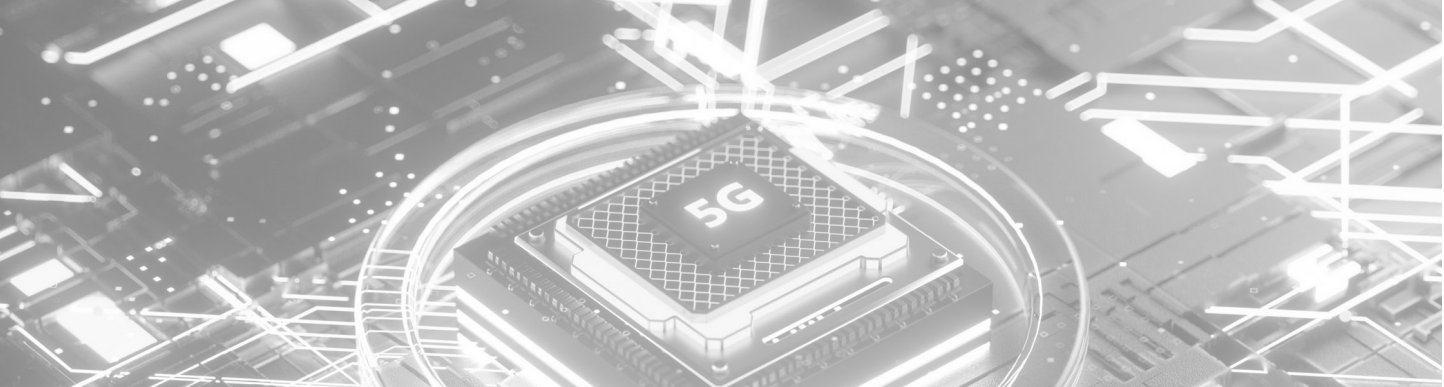
字 数：1035 千字

版 次：2021 年 2 月第 1 版

印 次：2021 年 2 月第 1 次印刷

定 价：198.00 元

产品编号：077471-01



序 言

第四代移动通信（4G）技术有力支持了移动互联网业务的快速发展，为消费者的生活、工作提供了空前的便利，已成为迄今应用最成功的移动通信技术。而第五代移动通信（5G）除了进一步提升移动互联网的带宽外，还扩展了高可靠低时延通信（URLLC）、大规模机器通信（mMTC）等更多应用场景，有望打造一张应用于千行百业的移动物联网，对通信基础设施与经济社会各方面的深度融合产生深远意义。

5G 国际标准自 2015 年底开始起草，在 2018 年首先完成了以增强移动宽带（eMBB）为核心的第一版本——R15 版本。2020 年又完成了包含 URLLC、NR V2X、非授权频谱通信等重要垂直行业功能的增强版本——R16 版本。这两个版本构成了 5G 国际标准的核心，将于未来 10 年内在全球广泛部署，国内外大量通信技术人员也陆续投入 5G 设备、终端、应用的研发及 5G 网络的规划、部署、运维工作。这些人员都需要对 5G 技术和标准有深入透彻的理解，5G 技术也将成为今后一段时间高校和研究机构通信专业的教学和研究重点。因此在 5G R16 标准完成之际，编写并出版介绍 5G 标准，尤其是包含 R15 和 R16 版本的完整的技术专著，是非常必要和亟需的。这将对 5G 领域的技术研究、设备开发、系统部署和业务运营起到积极的推动作用，对未来的 B5G、6G 预研也可以提供重要参考。

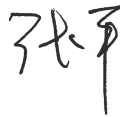
本书的主要特点是没有局限于对 5G 标准的简单解释。书中不仅介绍了 5G 标准化的结果，而且基于作者的参会经历，深入剖析了 5G 标准化的历程，对 5G 研究和标准化过程中关键技术的取舍和设计方案的首选过程进行了介绍，诠释了移动通信系统实用导向、整体设计、全面权衡的设计原则。本书一方面可以作为通信企业 5G 开发人员阅读规范、理解规范背后的关键技术和设计原理的参考资料；另一方面也可以作为高校、研究单位人员学习标准化工作的方法和规律的重要参考，为他们将来参与 B5G、6G 研发工作，与产业界顺利对接提供帮助。

本书的作者均为深入参与 3GPP 5G 国际化的第一线代表人员，参与了 5G R15、R16 历次标准化会议的技术讨论，经历了各次重大技术选择的确定过程，有些作者还作为负责人牵头了一些技术方向的研讨和标准起草工作。他们对 5G 技术原理和系统设计有深入的理解，对 5G 标准化过程有切身的体会，是精通 5G 标准的专家团队。本书编写的素材全部来自 3GPP 技术规范、标准化文稿、会议记录等第一手资料，具有较高的时效性、权威性和实用性。

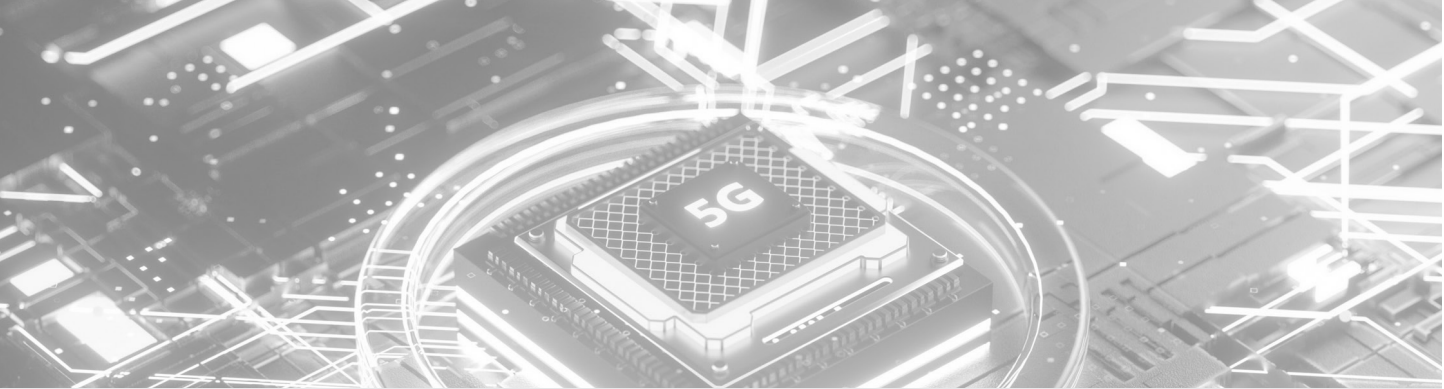
当然，在未来几年里，5G 标准还将持续增强和演进，对 5G 标准的学习、研究和应用

也是通信产业界一项长期的工作。希望通信产业界能够持续关注、重视 5G 标准的研究，希望本书的出版能为信息通信产业的长期、健康发展贡献一点力量。

中国工程院院士，北京邮电大学教授

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '张军' (Zhang Jun).

2020 年 8 月于北京



前言

移动通信系统十年一代，从1G到4G，历经了模拟、数字、数据、宽带四次技术变革，为全世界的亿万用户带来了“前所未有”的崭新感受。尤其是4G技术开启了移动互联网时代，深刻改变了人们的生活方式。正当大家满足于微博微信、视频抖音、点餐购物、移动支付、手机游戏等4G带来的丰富的移动互联网应用和便利生活时，移动通信产业已经将目标从“2C”（面向用户）转向“2B”（面向企业），试图用5G NR（新空中接口）技术推动千行百业向数字化、移动化、自动化发展。因此，相较4G“吃喝玩乐神器”的定位，5G技术由于着重增加了对移动物联网的支持，因此在更大广度和更多维度上获得了更广泛的关注，其意义甚至上升到了国家间高科技竞争主要制高点的高度，一定程度上也超出了5G技术研发者的预料。5G技术的核心是什么？5G引入了哪些创新？5G与4G在技术上有什么区别？5G能达到什么样的技术能力？相信这些问题是广大读者都很关心的。在笔者看来，5G并不是神奇的、无所不能的技术，它在很大程度上继承了3G、4G的系统设计理念，引入了一系列必要的创新技术，面向各种垂直应用进行了一系列专门的优化。这些创新和优化绝大多数并不是几个词、几句话就能说明白的“大概念”，而是由很多细致、精巧的工程改进构成的。本书的目的就是将5G的这些创新点和优化点剖析开，讲解给读者。

某些“唯技术论”的观点可能认为5G照搬了4G的核心技术，不过是“宽带版4G”。诚然，从理论上讲，5G沿用了4G LTE的OFDMA（正交频分多址）+MIMO（多输入多输出）核心技术架构。但相比LTE的“简化版”OFDMA，5G系统设计在时域和频域上都实现了更大的灵活性，能够充分发挥OFDMA系统的技术潜力，有效支持eMBB（增强移动宽带）、URLLC（高可靠低时延通信）、mMTC（大规模物联网）等丰富的5G应用场景。同时，5G系统设计也远比4G要精细、复杂，在LTE设计的基础上做了很多修改、增强和扩展。所以，本书以LTE标准为基础（假设读者已经了解LTE的基础知识），着重介绍在5G NR采用的全新和增强的系统设计，解读5G NR相对4G LTE的“增量”。

与大部分5G书籍不同，本书采用了“剖析5G标准化过程”的写法。本书的核心作者在2008年曾撰写了《3GPP长期演进（LTE）技术原理与系统设计》一书，此书不仅介绍了LTE标准，而且介绍了“从无到有、从粗到细”的4G系统设计和标准起草过程，出版后受到广大读者的欢迎，被称为“4G红宝书”。这说明广大读者对这种写法的认可。时隔十二年，本书再次采用了这种写法。本书的作者都是OPPO公司的3GPP标准代表，在第一线深入参与、推动了绝大部分5G技术设计的形成，他们提出的很多技术方案也被接受，成为5G标准的一部分。由他们讲述各个方向的技术遴选、特性取舍、系统设计的全过程，对读者是最好的选择。5G作为一个复杂的系统，每个环节上的技术方案选择都不是孤立的，单点技术上的最优方案不一定是对整体系统性能贡献最大的方案，系统设计的目标是选择互相适配、整体最优的均衡的技

术组合。本书在大部分章节中回顾 5G 标准化中出现的多种技术选项，介绍各种选项的优缺点，尽力解读 3GPP 从中筛选出最终方案的原因和考虑。这不仅包括性能因素，也包括设备实现的复杂度、信令设计的简洁性、对现有标准的影响程度等。如果只是“照本宣科”地对英文技术规范的最终版本进行翻译和解读，其实是大可不必费如此周章的。但作者希望通过讲述这一推理、选择的过程，帮助读者“既知其然，也知其所以然”，一窥无线通信系统设计的原则、方法和手段。

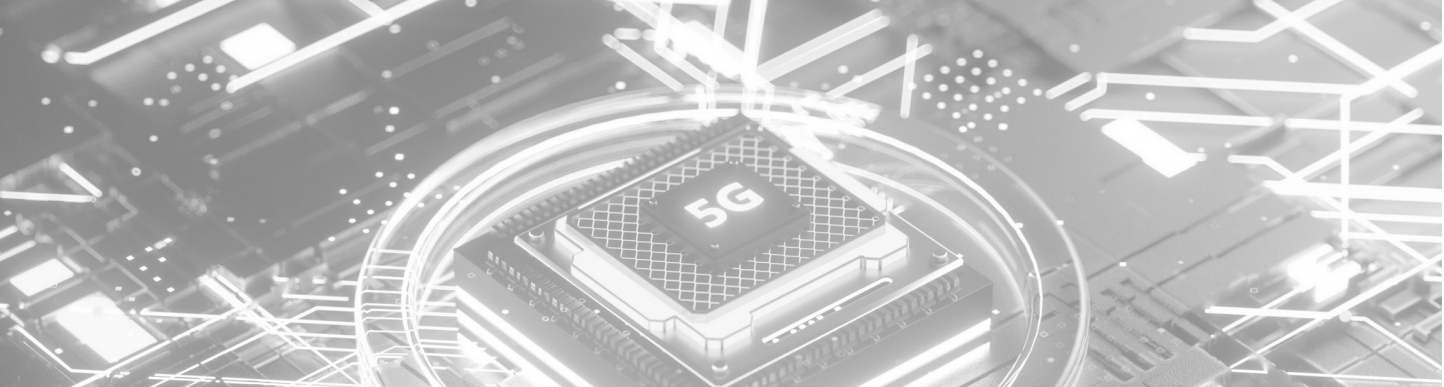
从另一个角度说，今天我们为 5G 选择的这些技术选项，只是在特定的时间、针对特定的业务需求、考虑近期的产品研发能力，做出的选择。未来业务需求变了，设备能力更强了，今天被淘汰的“次优”选项也有可能变成“最优”选项，重新回到我们的视野，成为新的选择。3GPP 标准只是指导产品研发的“工具性文件”，并不具备解读技术原理和设计思想的功能。如果只把标准化的最终结果展示给读者，让读者误以为这些设计都是“天经地义的唯一选择”，仿佛过程中的“优劣对比，纠结取舍”都不曾发生过，那么呈现给读者的就只能是一个“片面的 5G”。读者在很多境况下也会感到费解——为什么偏偏设计成这样？难道没有别的选择吗？这么设计有什么好处呢？如果是这样，作为经过了这一过程的标准化亲历者，作者也觉得是一个很大的遗憾。相反，如果今天的年轻读者能够通过这些技术选择过程批判地、客观地看待 5G 标准，在他们设计下一代系统（如 6G）的时候，充分汲取 5G 标准化中的经验教训，有机会构思出更好的设计，那么作者在本书中的这些回顾、分析和总结工作就是很有意义的。由于具备这个特色，相信本书不仅可以作为 5G 研发人员在工作中查阅的一本工具书，而且可以成为对广大通信专业的高校教师、学生学习 5G 的较好的参考书。

本书共分为 20 章，除第 1 章概述之外，第 2~14 章可以看作对 5G 标准的基础、核心部分的介绍，这些内容主要是在 3GPP R15 版本中定义的，其核心还是针对 eMBB 应用场景，并为物联网业务提供了可扩展的技术基础。第 15~19 章介绍了在 R16 版本中定义的“5G 增强”技术特性，包括 URLLC、NR V2X、非授权频谱通信、终端节能等，很多是 5G 技术不可分割的必要部分。这也是本书并未在 R15 5G 标准完成的 2019 年出版，而是等到 R16 版本完成后的 2020 年出版的原因。正如前面提到的，5G 相对 4G 等以前的移动通信系统的最大不同是增加了对各种物联网和垂直行业应用的支持。如果只介绍支持 eMBB 的 R15，缺失了 R16 中的 URLLC、NR V2X、非授权频谱通信等重要垂直技术，无疑是无法体现 5G 技术全貌的。在最后的第 20 章中，我们还简单介绍了 R17 版本中 5G 将要进一步增强的方向，以及我们对 B5G 和 6G 发展趋势的粗浅看法。

写在本书每一章开头的其他作者，都是作者在 OPPO 标准研究部的同事，他们都是各个技术领域的 5G 标准专家，其中很多人参加了 4G LTE 的标准化。在这里感谢他们为 5G 国际标准化做出的贡献。5G 手机中的一部分硬件或软件设计（虽然可能只是很小一部分）也基于他们的创新和付出。同时，感谢 OPPO 产学研事务部的秦征、陈义旆、陈华芳为本书的出版做出的贡献。最后，还要感谢清华大学出版社的大力支持和高效工作，使本书能尽早与读者见面。

本书是基于作者的主观视角和有限学识对标准化讨论过程和结果的理解，观点难免有欠周全之处，敬请读者谅解，并提出宝贵意见。

作者
2020 年 8 月



目 录

第1章 概 述

苏进喜 沈 嘉 编著

1.1 NR 相比 LTE 的增强演进	2	1.4.3 高可靠低时延通信 (URLLC)	
1.2 NR 对新技术的取舍	9	——高层	17
1.2.1 NR 对新参数集的选择	9	1.4.4 UE 节能增强	17
1.2.2 NR 对新波形技术的选择	10	1.4.5 两步 RACH 接入	18
1.2.3 NR 对新编码方案的选择	11	1.4.6 上行频谱切换发送	18
1.2.4 NR 对新多址技术的选择	12	1.4.7 移动性增强	18
1.3 5G 技术、器件和设备成熟度	13	1.4.8 MR-DC 增强	19
1.4 R16 增强技术	15	1.4.9 NR V2X	19
1.4.1 MIMO 增强	16	1.4.10 NR 非授权频谱接入	20
1.4.2 URLLC 增强——物理层	17	1.5 小结	20
		参考文献	20

第2章 5G 系统的业务需求与应用场景

田文强 编著

2.1 业务需求与驱动力	22	2.2.2 高可靠低时延通信	25
2.1.1 永恒不变的高速率需求	22	2.2.3 大规模机器类通信	26
2.1.2 垂直行业带来的新变化	23	2.3 5G 系统的性能指标	26
2.2 5G 系统的应用场景	24	2.4 小结	29
2.2.1 增强型移动宽带通信	25	参考文献	29

第3章 5G 系统架构

刘建华 杨 宁 编著

3.1 5G 系统侧网络架构	30	3.1.5 5G 和 4G 网络互操作	35
3.1.1 5G 网络架构演进	30	3.2 无线侧网络架构	36
3.1.2 5G 网络架构和功能实体	31	3.3 小结	43
3.1.3 5G 端到端协议栈	33	参考文献	43
3.1.4 支持非 3GPP 接入 5G	34		

第4章 带宽分段 (BWP)

沈 嘉 编著

4.1 BWP (带宽分段) 的基本概念	45	4.3.4 触发 BWP Switching 的 DCI 设计 ——显性触发和隐性触发	70
4.1.1 从多子载波间隔资源分配角度 引入 BWP 概念的想法	46	4.3.5 触发 BWP Switching 的 DCI 设计 ——BWP 指示符	71
4.1.2 从终端能力和省电角度引入 BWP 概念的想法	47	4.3.6 基于 Timer 的 BWP 回落的引入	73
4.1.3 BWP 基本概念的形成	49	4.3.7 是否重用 DRX Timer 实现 BWP 回落?	76
4.1.4 BWP 的应用范围	50	4.3.8 <i>bwp-InactivityTimer</i> 的设计	78
4.1.5 BWP 是否包含 SS/PBCH Block?	51	4.3.9 Timer-based 上行 BWP 切换	81
4.1.6 同时激活的 BWP 的数量	52	4.3.10 基于 Time Pattern 的 BWP 切换的 取舍	82
4.1.7 BWP 与载波聚合的关系	53	4.3.11 BWP 的自动切换	84
4.2 BWP 的配置方法	55	4.3.12 BWP 切换时延	86
4.2.1 Common RB 的引入	55	4.4 初始接入过程中的 BWP	88
4.2.2 Common RB 的颗粒度	56	4.4.1 下行初始 BWP 的引入	88
4.2.3 参考点 Point A	57	4.4.2 上行初始 BWP 的引入	90
4.2.4 Common RB 的起点 RB 0	61	4.4.3 下行初始 BWP 的配置	92
4.2.5 载波起点的指示方法	61	4.4.4 下行初始 BWP 与下行缺省 BWP 的关系	94
4.2.6 BWP 指示方法	62	4.4.5 载波聚合中的初始 BWP	96
4.2.7 BWP 的基本配置方法小结	62	4.5 BWP 对其他物理层设计的影响	97
4.2.8 BWP 配置的数量	64	4.5.1 BWP 切换时延的影响	97
4.2.9 TDD 系统的 BWP 配置	65	4.5.2 BWP-dedicated 与 BWP-common 参数配置	97
4.3 BWP 切换	66	4.6 小结	98
4.3.1 动态切换和半静态切换	66	参考文献	98
4.3.2 基于 DCI 的 BWP 激活方式的引入	67		
4.3.3 触发 BWP Switching 的 DCI 设计 ——DCI 格式	68		

第5章 5G 灵活调度设计

林亚男 沈 嘉 赵振山 编著

5.1 灵活调度的基本思想	101	5.2.5 信道“起点+长度”调度方法的 提出	117
5.1.1 LTE 系统调度设计的限制	101	5.2.6 起始符号指示参考点的确定	118
5.1.2 引入频域灵活调度的考虑	102	5.2.7 指示 K_0 与 K_2 的参考子载波间隔 问题	121
5.1.3 引入时域灵活调度的考虑	104	5.2.8 Type A 与 Type B 映射类型	121
5.2 5G NR 的资源分配设计	107	5.2.9 时域资源分配信令设计	123
5.2.1 频域资源分配类型的优化	107	5.2.10 多时隙符号级调度	128
5.2.2 频域资源分配颗粒度	110	5.3 码块组 (CBG) 传输	131
5.2.3 BWP 切换过程中的频域资源指示 问题	112	5.3.1 CBG 传输方式的引入	131
5.2.4 BWP 内的跳频资源确定问题	115		

5.3.2	CBG 的划分	132	5.5.3	长 PUCCH 结构设计	155
5.3.3	重传 CBG 确定方法	132	5.5.4	PUCCH 资源分配	158
5.3.4	DCI 中 CBG 相关信息域	133	5.5.5	PUCCH 与其他上行信道冲突解决	159
5.3.5	基于 CBG 的反馈设计	134	5.6	灵活 TDD	161
5.4	NR 下行控制信道 (PDCCH) 设计	136	5.6.1	灵活时隙概念	161
5.4.1	NR PDCCH 的设计考虑	136	5.6.2	半静态上下行配置	163
5.4.2	控制资源集 (CORESET)	138	5.6.3	动态上下行指示 (SFI)	164
5.4.3	搜索空间集 (Search Space Set)	145	5.7	PDSCH 速率匹配	165
5.4.4	下行控制信息 (DCI) 设计的改进	148	5.7.1	引入速率匹配的考虑	165
5.5	上行控制信道 (PUCCH) 设计	152	5.7.2	速率匹配设计	167
5.5.1	长、短 PUCCH 格式的引入	152	5.8	小结	170
5.5.2	短 PUCCH 结构设计	153	参考文献		171

第 6 章 NR 初始接入

徐伟杰 贺传峰 田文强 胡荣贻 编著

6.1	小区搜索	173	6.3.3	SSB 与 PRACH Occasion 的映射	201
6.1.1	同步栅格与信道栅格	173	6.3.4	RACH 过程的功率控制	203
6.1.2	SSB 的设计	178	6.4	RRM 测量	204
6.1.3	SSB 的传输特征	181	6.4.1	RRM 测量参考信号	204
6.1.4	SSB 的实际传输位置及其指示	184	6.4.2	NR 测量间隔	206
6.1.5	小区搜索过程	186	6.4.3	NR 的同频测量与异频测量	212
6.2	初始接入相关的公共控制信道	189	6.4.4	RRM 测量带来的调度限制	217
6.2.1	SSB 与 CORESET#0 的复用图样	190	6.5	RLM 测量	218
6.2.2	CORESET#0 介绍	191	6.5.1	RLM 参考信号	218
6.2.3	Type0-PDCCH Search Space	194	6.5.2	RLM 过程	219
6.3	NR 随机接入	196	6.6	小结	219
6.3.1	NR PRACH 信道的设计	196	参考文献		220
6.3.2	NR PRACH 资源的配置	199			

第 7 章 信道编码

陈文洪 黄莹沛 崔胜江 编著

7.1	NR 信道编码方案概述	221	7.3	LDPC 码	232
7.1.1	信道编码方案介绍	221	7.3.1	LDPC 码的基本原理	232
7.1.2	数据信道的信道编码方案	223	7.3.2	奇偶校验矩阵设计	233
7.1.3	控制信道的信道编码方案	225	7.3.3	置换矩阵设计	235
7.1.4	其他信息的信道编码方案	226	7.3.4	基础图设计	236
7.2	Polar 码	227	7.3.5	提升值设计	238
7.2.1	Polar 码的基本原理	227	7.3.6	分割与 CRC 校验	240
7.2.2	序列设计	229	7.3.7	速率匹配与 HARQ	243
7.2.3	级联码	229	7.4	小结	247
7.2.4	码长和码率	230	参考文献		247
7.2.5	速率匹配与交织	230			

第 8 章 多天线增强和波束管理 史志华 陈文洪 黄莹沛 田杰娇 方 昀 尤 心 编著

8.1 NR MIMO 反馈增强	253	8.4 主小区波束失败恢复	283
8.1.1 NR 的 CSI 反馈增强	253	8.4.1 基本流程	284
8.1.2 R15 Type I 码本	257	8.4.2 波束失败检测	285
8.1.3 R15 Type II 码本	258	8.4.3 新波束选择	286
8.2 R16 码本增强	263	8.4.4 波束失败恢复请求	287
8.2.1 eType II 码本概述	263	8.4.5 网络侧响应	288
8.2.2 频域矩阵设计	265	8.5 辅小区波束失败恢复	288
8.2.3 系数矩阵设计	266	8.5.1 波束失败检测	289
8.2.4 Rank=2 码本设计	268	8.5.2 新波束选择	290
8.2.5 高 Rank 码本设计	269	8.5.3 波束恢复请求	291
8.2.6 eType II 码本表达式	270	8.5.4 网络侧响应	293
8.3 波束管理	270	8.6 多 TRP 协作传输	293
8.3.1 模拟波束赋形概述	271	8.6.1 基本原理	293
8.3.2 下行波束管理基本流程	272	8.6.2 基于单 DCI 的 NC-JT 传输	294
8.3.3 下行波束测量与上报	274	8.6.3 基于多 DCI 的 NC-JT 传输	296
8.3.4 下行波束指示	278	8.6.4 基于多 TRP 的分集传输	300
8.3.5 上行波束管理基本流程	280	8.7 小结	303
8.3.6 上行波束测量	282	参考文献	304
8.3.7 上行波束指示	282		

第 9 章 5G 射频设计

邢金强 张 治 刘启飞 詹文浩 邵 帅 编著

9.1 新频谱及新频谱	308	9.4 NR 测试技术	326
9.1.1 频谱划分	308	9.4.1 SA FR1 射频测试	327
9.1.2 频谱组合	310	9.4.2 SA FR2 射频测试	327
9.2 FR1 射频技术	312	9.4.3 EN-DC 射频测试	330
9.2.1 高功率终端	312	9.4.4 MIMO OTA 测试	331
9.2.2 接收机灵敏度	315	9.5 NR 射频实现与挑战	334
9.2.3 互干扰	316	9.5.1 NR 射频前端	334
9.3 FR2 射频及天线技术	318	9.5.2 干扰与共存	336
9.3.1 射频天线架构	318	9.5.3 SRS 射频前端设计	337
9.3.2 功率等级	318	9.5.4 其他 NR 挑战	338
9.3.3 接收机灵敏度	322	9.6 小结	339
9.3.4 波束对应性	324	参考文献	339
9.3.5 MPE	325		

第 10 章 用户面协议设计

石 聪 尤 心 林 雪 编著

10.1 用户面协议概述	341	10.5 MAC 层	347
10.2 SDAP 层	343	10.6 小结	354
10.3 PDCP 层	344	参考文献	354
10.4 RLC 层	346		

第 11 章 控制面协议设计

杜忠达 王淑坤 李海涛 尤 心 编著

11.1 系统消息广播.....	355	11.3.2 RRC 连接控制.....	363
11.1.1 系统消息内容.....	355	11.4 RRM 测量和移动性管理.....	370
11.1.2 系统消息的广播和更新.....	357	11.4.1 RRM 测量.....	370
11.1.3 系统消息的获取和有效性.....	358	11.4.2 移动性管理.....	374
11.2 寻呼.....	360	11.5 小结.....	380
11.3 RRC 连接控制.....	362	参考文献.....	380
11.3.1 接入控制.....	362		

第 12 章 网络切片

杨皓睿 许 阳 编著

12.1 网络切片的基本概念.....	381	12.2.2 网络切片的业务通路.....	385
12.1.1 引入网络切片的背景.....	381	12.3 网络切片拥塞控制.....	388
12.1.2 如何标识网络切片.....	382	12.4 漫游场景下的切片使用.....	389
12.2 网络切片的业务支持.....	383	12.5 小结.....	389
12.2.1 网络切片的注册.....	383	参考文献.....	389

第 13 章 QoS 控制

郭雅莉 编著

13.1 5G QoS 模型的确定.....	390	13.3.3 码率控制参数.....	399
13.2 端到端的 QoS 控制.....	392	13.4 反向映射 QoS.....	400
13.2.1 端到端的 QoS 控制思路介绍.....	392	13.4.1 为什么引入反向映射 QoS.....	400
13.2.2 PCC 规则的确定.....	394	13.4.2 反向映射 QoS 的控制机制.....	401
13.2.3 QoS 流的产生和配置.....	395	13.5 QoS 通知控制.....	402
13.2.4 UE 侧使用的 QoS 规则.....	396	13.5.1 QoS 通知控制介绍.....	402
13.3 QoS 参数.....	396	13.5.2 候选 QoS 配置的引入.....	403
13.3.1 5QI 及对应的 QoS 特征.....	396	13.6 小结.....	404
13.3.2 ARP.....	399	参考文献.....	404

第 14 章 5G 语音

许 阳 刘建华 编著

14.1 IMS 介绍.....	406	14.2.2 EPS Fallback/RAT Fallback.....	413
14.1.1 IMS 注册.....	406	14.2.3 Fast Return (快速返回).....	415
14.1.2 IMS 呼叫建立.....	408	14.2.4 语音业务连续性.....	415
14.1.3 异常场景处理.....	409	14.3 紧急呼叫.....	416
14.2 5G 语音方案及使用场景.....	410	14.4 小结.....	416
14.2.1 VoNR.....	410	参考文献.....	417

第 15 章 高可靠低时延通信 (URLLC)

徐 婧 林亚男 梁 彬 沈 嘉 编著

15.1 下行控制信道增强.....	419	15.1.3 基于监测范围的 PDCCH 监测能力	
15.1.1 压缩的控制信道格式引入背景.....	419	定义.....	421
15.1.2 压缩的控制信道格式方案.....	419	15.1.4 多种 PDCCH 监测能力共存.....	422

15.1.5 PDCCH 丢弃规则增强	423	15.4.4 上行传输增强的频域资源确定方式	444
15.1.6 多载波下 PDCCH 监测能力	424	15.4.5 上行传输增强的控制信息复用机制	445
15.2 上行控制信息增强	425	15.5 免调度传输技术	446
15.2.1 多次 HARQ-ACK 反馈与子时隙 (Sub-slot) PUCCH	425	15.5.1 灵活传输起点	447
15.2.2 多 HARQ-ACK 码本	431	15.5.2 资源配置机制	448
15.2.3 优先级指示	432	15.5.3 多套免调度传输	450
15.2.4 用户内上行多信道冲突	433	15.5.4 容量提升技术	451
15.3 终端处理能力	435	15.6 半持续传输技术	454
15.3.1 处理时间引入背景与定义	435	15.6.1 半持续传输增强	454
15.3.2 处理时间的确定	435	15.6.2 HARQ-ACK 反馈增强	454
15.3.4 处理时间约束	437	15.7 用户间传输冲突	456
15.3.5 处理乱序	437	15.7.1 冲突解决方案	456
15.4 数据传输增强	439	15.7.2 抢占信令设计	458
15.4.1 CQI 和 MCS	439	15.7.3 抢占资源指示	460
15.4.2 上行传输增强	441	15.7.4 上行功率控制	461
15.4.3 上行传输增强的时域资源确定方式	442	15.8 小结	462
		参考文献	462

第 16 章 高可靠低时延通信 (URLLC) ——高层 付 喆 刘 洋 卢前溪 编著

16.1 工业以太网时间同步	465	16.3.4 重新定义混合自动重传请求 ID	474
16.2 用户内上行资源优先级处理	467	16.4 PDCP 数据包复制传输增强	474
16.2.1 数据和数据之间的冲突	467	16.4.1 R15 NR 数据包复制传输	474
16.2.2 数据和调度请求之间的冲突	470	16.4.2 基于网络设备指令的复制传输增强	476
16.3 周期性数据包相关的调度增强	470	16.4.3 基于终端自主的复制传输增强构想	477
16.3.1 支持更短的半静态调度周期	471	16.5 以太网包头压缩	478
16.3.2 配置多组激活的半静态调度资源	472	16.6 小结	480
16.3.3 半静态调度资源时域位置计算公式增强	473	参考文献	480

第 17 章 5G V2X 赵振山 张世昌 丁 伊 卢前溪 编著

17.1 NR V2X 时隙结构和物理信道	481	17.2.4 模式 2 资源分配	499
17.1.1 基础参数	481	17.3 侧行链路物理过程	505
17.1.2 侧行链路时隙结构	483	17.3.1 侧行链路 HARQ 反馈	505
17.1.3 侧行链路物理信道和侧行链路信号	485	17.3.2 侧行 HARQ 反馈信息上报	507
17.2 侧行链路资源分配	494	17.3.3 侧行链路测量和反馈	508
17.2.1 时域和频域资源分配	494	17.3.4 侧行链路功率控制	509
17.2.2 模式 1 动态资源分配	495	17.4 高层相关过程	511
17.2.3 模式 1 侧行免授权资源分配	497	17.4.1 侧行链路协议栈总览	511
		17.4.2 能力交互	512

17.4.3 接入层参数配置	513
17.4.4 测量配置与报告过程	515
17.4.5 RLM/RLF	515

17.5 小结	516
参考文献	517

第 18 章 5G 非授权频谱通信

林 浩 吴作敏 贺传峰 石 聪 编著

18.1 简介	518
18.2 信道监听	518
18.2.1 信道监听概述	519
18.2.2 动态信道监听	522
18.2.3 半静态信道监听	527
18.2.4 持续上行 LBT 检测及恢复机制	529
18.3 初始接入	531
18.3.1 SS/PBCH Block (同步信号广播信道块) 传输	531
18.3.2 主信息块 (MIB)	535
18.3.3 RMSI 监听	537
18.3.4 随机接入	540
18.4 资源块集合概念和控制信道	542
18.4.1 NR-U 系统中宽带传输增强	542

18.4.2 下行控制信道和侦测增强	545
18.4.3 上行控制信道增强	552
18.5 HARQ 与调度	557
18.5.1 HARQ 机制	557
18.5.2 HARQ-ACK 码本	560
18.5.3 连续 PUSCH 调度	568
18.6 NR-U 系统中免调度授权上行	569
18.6.1 免调度授权传输资源配置	569
18.6.2 CG-UCI 和 CG 连续重复传输	571
18.6.3 下行反馈信道 CG-DFI 设计	573
18.6.4 CG 重传计时器	574
18.7 小结	575
参考文献	575

第 19 章 5G 终端节能技术 (Power Saving)

左志松 徐伟杰 胡 奕 编著

19.1 5G 终端节能技术的需求和评估	577
19.1.1 5G 终端节能技术需求	577
19.1.2 节能候选技术	578
19.1.3 节能技术的评估方法	583
19.1.4 评估结果与选择的技术	585
19.2 节能唤醒信号设计及其对 DRX 的影响	587
19.2.1 节能唤醒信号的技术原理	587
19.2.2 R16 采用的节能唤醒信号	588
19.2.3 节能唤醒信号对 DRX 的作用	591
19.3 跨 Slot 调度技术	593
19.3.1 跨 Slot 调度的技术原理	593
19.3.2 灵活调度机制用于跨 Slot 调度	595
19.3.3 动态指示跨 Slot 调度的处理	596
19.3.4 跨 Slot 调度的作用时间机制	597
19.3.5 跨 Slot 调度的错误处理	598
19.3.6 跨 Slot 调度对上下行测量的影响	598
19.3.7 BWP 切换与跨 Slot 调度	598
19.4 多天线层数限制	600
19.4.1 发射侧和接收侧天线数影响能耗	600

19.4.2 下行 MIMO 层数限制	601
19.4.3 上行 MIMO 层数限制	601
19.5 辅小区 (载波) 休眠	601
19.5.1 载波聚合下的多载波节能	601
19.5.2 辅小区 (载波) 节能机制	602
19.5.3 激活时间外的辅小区 (载波) 休眠触发	603
19.5.4 激活时间内的辅小区 (载波) 休眠触发	603
19.6 RRM 测量增强	604
19.6.1 非连接态终端的节能需求	604
19.6.2 非连接态终端 RRM 测量放松的判断准则	605
19.6.3 非连接态终端的 RRM 测量放松的方法	606
19.7 终端侧辅助节能信息上报	607
19.7.1 终端辅助节能信息上报的过程	607
19.7.2 终端辅助节能信息上报的内容	608
19.8 小结	609
参考文献	609

第 20 章 R17 与 B5G/6G 展望

杜忠达 沈 嘉 编著

20.1	Release 17 简介	611	20.3	小结.....	627
20.2	B5G/6G 展望	616		参考文献	627
缩略语					629

第 1 章

概 述

苏进喜 沈 嘉 编著

移动通信基本保持着每十年出现一代新技术的规律。从 1979 年第一代模拟蜂窝移动电话系统的试验成功至今，移动通信已经经历了四个时代并已经迈进了第五代。每一代移动通信系统的诞生都具有其特定的应用需求，并且不断采用创新的系统设计和技术方案来推动移动通信整体性能的快速提升。

第一代移动通信技术（1G）出现在 20 世纪 70 年代，首次采用蜂窝组网方式，能够为用户提供模拟语音业务，但其业务能力和系统容量都十分有限，而且价格昂贵。大约十年之后，第二代移动通信技术（2G）诞生，2G 首次采用了窄带数字移动通信技术，不仅能够提供高质量的移动通话，还能够同时支持短消息和低速数据业务，并使得移动通信成本大幅下降，成为可以全球大规模商用的技术。20 世纪 90 年代末，在互联网浪潮的推动下，第三代移动通信（3G）应运而生。3G 最终产生了三种通信制式，分别为欧洲主导的 WCDMA 技术方案、美国主导的 CDMA2000 和中国自主提出的 TD-SCDMA 技术方案。3G 的数据传输能力可达至数十 Mbps，增强了语音用户的系统容量，同时也能够较好地支持移动多媒体业务。但移动通信技术发展的脚步并没有放缓，随着移动互联网和智能终端的爆发式增长，3G 的传输能力越来越不能满足需求。2010 年左右，第四代移动通信（4G）技术出现，4G 采用正交频分多址复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）和多天线的多输入多输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）等空口关键技术，使得传输速率可达到 100 Mbps~1 Gbps，能够支持各种移动宽带数据业务，可以很好地满足当前移动互联网发展的需求。

总之，经过近四十年的飞速发展，移动通信已经融入社会生活的每个角落，深刻地改变了人们的沟通、交流和生活方式。但通信的新需求仍然不断涌现，通信技术也在不断创新和持续演进。2020 年全球迎来了第五代移动通信（5G）的大规模商用网络的部署。5G 给人的总体印象是大带宽、低时延、广连接，实现万物互联。那 5G 具体是什么样子，解决了哪些问题，支持了哪些业务和需求，做了哪些技术增强和演进，本书会在下面内容中展开介绍。

在第四代移动通信技术刚刚启动商用之初，全球主流电信企业和研究机构就开始积极投入到第五代移动通信（5G）技术的研究方向。5G 技术的产生有多个驱动力，包括新的应用场景出现，以及技术创新、标准竞争、业务驱动、产业升级等多方面因素。早在 2013 年，我国工信部、发改委和科技部就联合推动成立了 IMT-2020（5G）推进组，组织国内产学研

用力量开展 5G 需求、技术、标准、频谱的研究及国际合作。伴随着我国 4G 网络的大规模商用部署和成熟应用，我国在通信产业已经具备了深厚的技术积累和丰富的产业化经验。我国移动通信产业在经历了“1G 空白、2G 跟随、3G 突破和 4G 同步”发展之后，抓住了 5G 发展的良好时机，最终成为 5G 技术、标准、产业和应用服务的先进国家，奠定了我国在 5G 全球产业的竞争优势。

当然，5G 技术演进和发展除了国家战略和产业竞争这个宏观的驱动力外，还有技术本身的持续优化和增强，向着更高更强的技术指标和系统目标演进的必然结果。5G 技术采用了新空口（NewRadio，NR）设计^[2,4,6,18-26]，基于 LTE 的 OFDM+MIMO 底层空口技术框架，在系统方案设计上相比 LTE 做了大量技术增强和改进，包括支持更高的频谱范围和更大的载波带宽、灵活的帧结构、多样化的参数集、优化参考信号设计、新型编码、符号级别的资源调度、MIMO 增强、时延降低、覆盖增强、移动性增强、终端节能、信令设计优化、全新的网络架构、业务 QoS（Quality of Service）保障增强、网络切片、车联网（Vehicle to everything，V2X）、工业互联网（Industry Internet of Things，IIoT）、非授权频谱设计（New Radio-Unclicensed，NR-U）、对多种垂直行业的良好支持等。这些更加先进合理的技术方案使得 5G 可以在未来产品开发和商业部署时，真正地满足人与人、人与物、物与物之间的泛在连接和智能互联的 5G 愿景。

1.1 NR 相比 LTE 的增强演进

移动通信已经深刻地改变了人们的生活，而且正在渗入社会的各个领域。尽管 4G 是一代非常成功的移动通信系统^[1]，很好地满足了移动互联网的发展需求，给人们之间的信息沟通带来了极大的便捷，使得全社会和诸多产业尽享移动通信产业发展带来的红利，但 4G 采用的 LTE 技术仍然存在一些不足，同时 LTE 在商用网络部署中也存在一些未能解决的问题。任何技术演进和产业的升级换代，都是由于具有了业务和应用需求的强大驱动力才得以快速成熟和发展。移动互联网和移动物联网作为 5G 发展的两大主要驱动力，为未来移动通信的发展提供了广阔的前景。5G 定义了三大应用场景^[3,5]，分别是增强移动宽带（Enhanced Mobile Broadband，eMBB）、高可靠低时延通信（Ultra-Reliable and Low Latency Communications，URLLC）和大规模物联网（Massive Machine Type Communications，mMTC）。其中 eMBB 主要面向移动互联网，而 URLLC 和 mMTC 则面向移动物联网。移动互联网将以用户为中心构建全方位的信息生态系统，近些年来超高清视频、虚拟现实（Virtual Reality，VR）、增强现实（Augmented Reality，AR）、远程教育、远程办公、远程医疗、无线家庭娱乐等以人为中心的需求正变得越来越普及，这些陆续出现的新业务需求必然会对移动通信的传输带宽和传输速率提出更高的要求。同时，移动物联网、工业互联网、车联网、智慧电网、智慧城市等垂直行业也在向信息化和数字化快速转型。除了智能手机外，可穿戴式设备、摄像头、无人机、机器人、车载船载等终端模组、行业定制终端等移动终端的形态也更加丰富多样。可见，基于 5G 的愿景和不断诞生各种新业务需求和新的应用场景，4G 技术已很难满足，4G 向 5G 技术演进和发展是必然趋势。下面就 LTE 技术存在的主要不足以及 5G NR（New Radio）中相应的增强和优化进行介绍。

● NR 支持了更高的频谱范围

LTE 支持的频谱范围主要为低频谱，可支持的最高频谱为 TDD 的 Band42 和 Band43，在

3 400~3 800 MHz 范围内。而从全球 LTE 实际商用部署网络情况看,基本都部署在 3GHz 以下的频谱范围内。对移动通信而言,频谱是最珍贵、最稀缺的资源,低频谱可用范围小,而且会被已有移动通信系统长期占用。而随着后续移动通信互联网业务的蓬勃发展,无线通信的需求和传输速率要求越来越高,高容量区域 4G 网络已经出现业务拥塞,因此亟须挖掘出更多的频谱来支持未来移动通信的发展。

结合全球无线电频谱使用情况看,6 GHz 以上的频谱范围内还有很广阔的频谱未被利用,因此 5G 支持 FR2 (Frequency Range 2, FR2) 频率范围 (24.25~52.6 GHz) 内的毫米波频谱,以更好地满足和解决无线频谱不足的问题。同时,为了解决毫米波传播特性不理想、传播损耗大、信号易受遮挡而阻塞等问题,NR 协议引入了波束扫描、波束管理、波束失败恢复、数字+模拟混合波束赋形等一系列技术方案,来保证毫米波传输的正常通信。支持广阔的毫米波频谱是 5G NR 相比 LTE 的一个巨大增强点,它可以使得未来 5G 部署和业务应用释放出巨大的潜能。

● NR 支持更大系统带宽

LTE 标准定义单载波带宽最大为 20 MHz,如果系统带宽超过这个范围,则需要通过多载波聚合 (Carrier Aggregation, CA) 方式来支持。载波聚合由于在空口存在辅载波添加和激活过程,以及多载波之间的联合调度,会增加协议复杂度和实现复杂度。同时,多载波聚合的载波之间预留一定的保护间隔 (Guard Period, GP),会浪费有效频谱效率。此外,LTE 载波有效信号的发射带宽仅为载波带宽的 90%左右,频谱利用率也有一定损失。经过近十年半导体产业和工艺水平的发展,半导体芯片和关键的数字信号处理器件的处理能力都大幅增强,加之射频功率放大器以及滤波器等半导体新材料、新器件的应用,使得 5G 设备处理更大的载波带宽成为可能。目前 5G NR 最终定义低于 6 GHz 频谱的最大载波带宽为 100 MHz,毫米波频谱的最大载波带宽为 400 MHz,相比 LTE 的载波带宽提升了一个数量级,为 NR 系统支持大带宽超高吞吐量奠定了更好的基础。

相比 LTE, NR 还大幅提高了系统带宽的有效频谱效率,通过施加数字滤波器的方式,使得载波的有效带宽由 LTE 的 90%提高到了 98%,等效提升了系统容量。

● NR 支持了更加灵活的帧结构

LTE 支持 FDD 和 TDD 两种帧结构,分别为帧结构类型 1 和帧结构类型 2。而对于 TDD 帧结构,是通过配置和调整上下行时隙配比来决定上下行业务容量的。LTE 对 TDD 的帧结构是定义了 7 种固定的上下行时隙配比的帧结构,小区建立过程中就确定了。尽管 LTE 后续演进版本也进行了动态 TDD 帧结构设计,但对传统 UE 有限制,且整体方案不够灵活,因此在 LTE 商用网络中一直未得到实际应用。

NR 从设计之初就考虑了帧结构的灵活性。首先,不再区分 FDD 和 TDD 帧结构,而是采用将时隙中 OFDM 符号配置为上行或下行来实现 FDD 的效果。其次,TDD 频谱的上下行配置周期可以灵活配置,如可以通过信令配置为 0.5 ms、0.625 ms、1 ms、1.25 ms、2 ms、2.5 ms、5 ms、10 ms 等各种周期长度。此外,在一个时隙内的每个符号除了固定配置为上行符号和下行符号外,还可以配置为灵活 (Flexible) 属性的符号。Flexible 符号可以基于物理层控制信道的动态指示,实时生效为下行符号或上行符号,从而达到灵活支持业务多样性的效果。可见,5G NR 对 TDD 帧结构和上下行资源配置提供了巨大的灵活性。

● NR 支持了灵活参数集

LTE 标准中定义 OFDM 波形的子载波间隔 (Subcarrier Spacing, SCS) 固定为 15 kHz, 基于 OFDM 系统基本原理, OFDM 符号时域长度与 SCS 成反比, 因此 LTE 的空口参数是固定的, 没有灵活性。LTE 支持的业务主要还是传统的移动互联网业务, 拓展支持其他类型业务则会受限于固定的底层参数。

NR 为了更好地满足多样化的业务需求, 支持了多种子载波间隔。SCS 以 15 kHz 为基准并以 2 的整次幂为倍数进行扩展, 包含 15 kHz、30 kHz、60 kHz、120 kHz、240 kHz 等多种子载波间隔的取值, 伴随着 SCS 的增加, 对应的 OFDM 符号长度也等比例缩短。由于采用了灵活子载波间隔, 因此可以适配不同的业务需求。例如, URLLC 的低时延业务需要较大的子载波间隔缩短符号长度进行传输, 以降低传输空口时延。而大链接的物联网类 mMTC 业务则需要缩小子载波间隔, 通过增大符号传输时长和功率谱密度来提升覆盖距离。

NR 支持的毫米波频谱的载波带宽往往比较大, 且多普勒频偏也相对较大, 因此高频谱载波适合采用较大的子载波间隔 SCS, 抵抗多普勒频移。同理, 针对高速移动场景, 也适合采用较大的子载波间隔。

可见, NR 通过支持灵活参数集和高低频统一的新空口框架, 为后续 5G 多种业务的灵活部署和多业务共存奠定了良好的技术支撑。

● NR 对空口的低时延的增强

LTE 协议中定义的数据调度和传输的时间间隔以 1 ms 子帧为基本单位, 正是这种固有设计导致了一次空口数据传输无法突破 1 ms 的时间单位限制。再加上 LTE 的 HARQ 重传的至少 N+4 时序定时关系, 使得 LTE 的空口时延很难满足低时延的业务要求。尽管 LTE 在后续演进的协议版本中引入了缩短传输时间间隔 (Transmission Time Interval, TTI) 技术方案, 但受限于 LTE 整个产业进度、开发成本以及部署需求不强烈等实际因素, TTI 技术在 LTE 商用网络中的实际应用概率极低。

针对解决空口时延问题, 5G NR 在设计之初就在多个技术维度上进行了考虑和优化。首先, NR 采用了灵活子载波间隔 (Subcarrier Spacing, SCS), 针对低时延业务可以通过采用大子载波间隔来直接缩短 OFDM 符号长度, 从而降低了一个时隙的时间长度。

其次, NR 支持了符号级别 (Symbol-level) 的资源分配和调度方式, 下行数据信道的时域资源分配粒度可以支持 2、4、7 个符号长度, 上行则可以支持任意符号 (1~14 个) 长度的资源调度。采用符号级调度, 可以在数据包到达物理层时, 不用等到下一帧边界或下一个时隙边界, 而是可以在当前时隙的任何符号位置进行传输, 这样可以充分降低数据包在空口的等待时延。

除了采用增大子载波间隔和符号级调度机制来降低空口时延外, NR 还通过自包含 (Self-contained) 时隙的方式来降低混合自动重传 HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) 的反馈时延。自包含时隙概念就是在一个时隙内包含下行符号、保护间隔符号和上行符号 3 种不同方向属性的符号, 即同一个时隙内包含下行数据信道 (PDSCH) 传输、保护时间间隔 (Guard Period, GP) 和下行确认反馈 (ACK/NACK) 传输, 使得 UE 可以在同一个时隙内完成对下行数据接收译码并快速地完成相应的 ACK/NACK 反馈, 从而大幅降低 HARQ 的反馈时延。当然, 实现自包含时隙对 UE 处理能力也提出了很高的要求, 非常适合低时延、高可靠 (URLLC) 的场景。

● NR 对参考信号的增强设计

参考信号设计是移动通信系统设计中最重要的一個技术点，因为接收端对无线信道估计就是通过参考信号来获得的，参考信号设计好坏会直接影响接收端对空口信号的解调性能。在 4G 系统中，LTE 协议定义的小区级公共参考信号（Cell-specific Reference Signal, CRS），可用于小区内所有用户的下行同步保持和频率跟踪，同时也用于 LTE 用户在空频块编码（Space Frequency Block Code, SFBC）和空分复用（Spatial Division Multiplexing, SDM）等多种传输模式下的解调参考信号，即用户基于 CRS 获得的信道估计用于下行业务信道（PDSCH）数据的解调和接收。CRS 在频域上是占满整个载波带宽的，小区建立后基站就恒定发送，与小区内是否存在用户以及是否有数据传输无关，是一种 always-on 信号。这种 always-on 参考信号 CRS 由于满带宽发送，不但占用较大的下行资源开销，而且还会带来网络中小区间交叠区域的同频干扰。恒定参考信号发送也会导致基站设备在小区无业务发送时，无法采用射频关断等技术手段而实现有效节能。

针对 LTE 的公共参考信号 CRS 存在的这些问题，5G NR 在导频设计上做了根本性改进，尽量避免的小区级公共信号。例如，在 NR 系统中小区级的公共信号仅保留了同步信号，其余参考信号都是用户级（UE-specific）的。这样可以减少小区级公共信号固定占用的系统开销，提高频谱利用率。例如，基站有数据发送给 UE 时，在调度用户业务数据的带宽内才会发送 UE-specific 的解调参考信号（Demodulation Reference Signal, DMRS）。另外，考虑到 5G 基站系统会普遍采用大规模天线（Massive MIMO）的波束赋形技术来进行数据传输，数据符号和解调导频采用相同的预编码方式，有数据传输时才发送导频信号，波束赋形发送也会有效降低系统中的干扰。

同时，NR 在 DMRS 导频设计采用前置导频（Front Loaded DMRS）结合附加导频（Additional DMRS）的设计方案。前置 DMRS 有利于接收端快速获得信道估计，降低解调译码时延。而引入附加 DMRS 的目的是满足高速移动场景下对 DMRS 时域密度的需求。用户在不同移动速度下，基站可以配置时隙内附加导频的数目，以匹配用户的移动速度，为用户获得精准信道估计提供保证。

● NR 对 MIMO 能力的增强

LTE 的空口技术就是 OFDM+MIMO，且对 MIMO 的支持一直在不断演进和增强，LTE 的后期版本引入的全维度 MIMO（Full Dimension MIMO, FD-MIMO），在水平维度和垂直维度都做到空间的窄波束赋形，可以更好地支持用户的空间区分度。但 MIMO 技术作为提升无线通信空口频谱效率和系统容量的最重要的技术手段，一直是一个持续追求极致性能的重要方向。

伴随着大规模天线（Massive MIMO）阵列的关键器件的成熟以及设备逐渐具备工程化应用和商业化部署的要求，从 5G 需求场景定义和系统设计之初，就把 Massive MIMO 视为 NR 重要的技术手段和 5G 商用网络大规模部署的主流产品形态。因此，5G NR 在标准化过程中对 MIMO 技术又做了大量的优化和增强。

首先，NR 针对解调导频（DMRS）进行了增强，基于频分和码分的方式使得 DMRS 可以支持最大 12 个正交端口，相比 LTE 可以更好地满足多用户 MIMO（MU-MIMO）的性能。其次，NR 相比 LTE 新引入了更高性能的类型 2 码本（Type2 Codebook），基于 CSI-RS 的类型 2 码本可以最佳地反馈空间信道的匹配程度。基站获得 UE 反馈的高精度码本后，可以更好地实现空间波束指向性和赋形精准度，大幅提升多用户多流空分复用的性能。

相比 LTE，NR 的一个巨大优势是增加了对毫米波频谱的支持。毫米波具有频谱高、波长短、空间传播损耗大、绕射能力弱、穿透损耗大等特点，因此毫米波通信必须要通过极窄的波束对准传输才能保证通信链路的质量。为了解决这些问题，NR 采用了数字加模拟混合波形赋形的技术。为了增强覆盖，NR 支持了对广播信道和公共信道的窄波束扫描机制（Beam Sweeping）。针对控制信道和业务信道，NR 引入了波束管理（Beam Management）的机制，包含多波束扫描、波束跟踪、波束恢复等技术手段和过程，目的就是使得通信双方的波束对准，自适应跟踪用户的移动。在此基础上，NR 又进一步支持了多天线面板（Multi-panel）的设计，以提升传输的可靠性和容量。

可见，5G 针对 MIMO 技术引入的一系列的增强方案，再结合大规模天线设备本身能力的提升，必然会使使得 Massive MIMO 在 5G 移动通信系统中释放出巨大的技术优势和经济效益。

● NR 对终端节能技术的增强

LTE 在对终端节电方面的技术设计考虑并不多，主要是非连续接收（DRX）技术。而 5G 系统的工作带宽增大、天线数增加、传输速率增加等因素，会导致终端上的射频模块和基带信号处理芯片的功耗大幅增加，从而造成手机工作过程中发热发烫或待机时间短等问题，这些问题会严重影响用户体验。

5G 针对终端面临的功耗问题，设计了多种技术方案。从时域节能角度，5G 针对连接态用户在配置了非连续接收（DRX）情况下，新引入了唤醒信号（Wakeup Signal）。由网络侧根据对业务量传输需求来判断是否在 DRX 激活周期到来前唤醒 UE 进行数据接收监听。这样可以避免用户在没有数据传输的情况下，进入 DRX 激活状态进行额外的业务监听，从而带来不必要的 PDCCH 检测功耗。另外，5G 还引入了跨时隙调度的机制，可以在业务数据不连续和偶发性业务传输情况下，减少 UE 在解码出 PDCCH 之前对 PDSCH 信道数据不必要的接收和处理，从时域上降低射频电路的激活时长。

从频域节能角度，5G 引入了带宽分段（Bandwidth Part, BWP）的功能。如前文所述，NR 的载波带宽相比 LTE 增大很多，很多核心频谱都可以支持典型的 100 MHz 载波带宽，大带宽的优势就是可以获得高的传输速率。但如果业务模式是小数据量传输或在业务不连续的情况下，UE 工作在大带宽模式下，是非常不经济的。BWP 的核心就是定义一个比小区的载波带宽和终端带宽能力都小的带宽，当空口传输的数据量比较低时，终端在网络侧的动态配置下工作在一个较小的带宽内进行收发操作，这样终端的射频前端器件、射频收发器以及基带信号处理模块都可以在一个较小处理带宽和较低的处理时钟的条件下工作，从而工作在一个耗电更低的状态。

另一个在频域上节能的技术手段，是针对 MR-DC（Multi-RAT Dual Connectivity）和 NR-CA 场景下引入的辅载波（Scell）休眠机制。处于激活态的辅载波，在无数据传输时可以进入休眠模式（Dormant Scell）。UE 在休眠模式下可以不用监听 PDCCH（Physical Downlink Control Channel），只进行信道状态信息（Channel Status Information, CSI）测量，有数据传输时再快速切换到正常状态进行调度信息监听，从而在不激活辅载波的情况下起到降低 UE 功耗的效果。

从频域和天线域角度，5G 引入了 MIMO 层数自适应的功能，网络侧结合对终端数据量传输需求，结合 BWP 的配置可以降低空间传输的层数，使得 UE 可以降低 MIMO 处理能力和吞吐速率，达到降低终端功耗的效果。

除了上述几种终端节能的技术外，5G 还支持放松对 UE 的无线资源管理（Radio

Resource Management, RRM) 测量的要求以降低功耗。例如, UE 处于静止或者低速移动时, 可以在不影响 UE 移动性的情况下, 采用加大 RRM 测量周期等方式适当放松测量要求, 来减少 UE 耗电; 或者当 UE 处于空闲态 (IDLE) 和非激活态 (INACTIVE) 时, 或者未处于小区边缘时, 都可以进行适当的 RRM 测量放松, 从而减少 UE 耗电。

● NR 对移动性的增强

LTE 的移动性管理主要基于 UE 的测量上报, 由源基站触发切换请求, 并将切换请求发送给目标基站。当收到目标基站的确认回复之后, 源基站发起切换流程, 并将目标基站的配置信息发送给终端。终端收到该配置消息之后, 向目标基站发起随机接入流程, 当随机接入过程成功时, 则完成切换过程。可见, LTE 系统中的小区切换过程, UE 需要先在目标小区完成随机接入后, 才能进行业务传输, 不可避免地会存在短暂的业务中断过程。

为了满足 0 ms 中断要求以及提高切换的鲁棒性, 5G NR 针对移动性做了两个方面的主要增强: 基于双激活协议栈的切换机制和条件切换机制。

双激活协议栈的切换机制与 LTE 切换流程类似, 终端基于收到的切换命令判断所要执行的切换类型。如果该切换类型为基于双激活协议栈的切换, 则终端在释放源小区之前会保持与源小区的数据收发直到终端成功完成与目标小区的随机接入流程。只有当终端成功接入到目标基站后, 终端才会基于网络侧的显示信令去释放源小区的连接并停止与源小区的数据收发。可见, 终端在切换过程中会存在与源小区和目标小区同时保持连接和数据传输的状态。通过双激活协议栈设计, 使得 NR 可以满足切换过程中 0 ms 中断时延的指标, 极大提升了用户在移动过程中的业务感知。

条件切换机制的目标主要是提高用户切换的可靠性及鲁棒性, 用以解决在切换过程中由于切换准备时间过长导致的切换过晚的问题或由于切换过程中源小区信道质量急剧下降导致的切换失败的问题。条件切换的核心思想是提前将切换命令内容预配置给 UE, 当特定条件满足时, UE 就可以自主地执行切换命令中的配置, 直接向满足条件的目标小区发起切换接入。由于切换条件满足时 UE 不再触发测量上报, 且 UE 已经提前获取了切换命令中的配置, 因而解决了前面提到的测量上报和切换命令不能被正确接收的问题。特别是针对高速移动场景或在切换带出现信号快速衰落的场景, 条件切换能极大提高切换成功率。

● NR 对协议栈的增强

5G NR 的协议栈大框架是基于 LTE 的协议栈来设计的, 然而 LTE 主要以移动宽带业务作为典型应用场景, 基本未考虑低时延、高可靠等垂直行业的新业务。5G NR 的高层协议栈相对于 LTE 做了大量增强和优化, 从而更好地支持低时延、高可靠业务, 主要包括如下四个方面。

第一, 5G NR 的媒体接入控制层 (Medium Access Control, MAC) 增强了 MAC PDU 的格式。在 LTE MAC 中, MAC PDU 的所有子包头都位于 MAC PDU 的头部, 而在 NR MAC 中, 子包头与相对应的 SDU 紧邻。换句话说, NR 中的 MAC PDU 包含了一个或多个 MAC 子 PDU, 每个子 PDU 包含子包头和 SDU。基于这样的设计, 收发端在处理 MAC PDU 时可以利用类似“流水线”的方式处理 MAC PDU, 从而提高处理速度, 降低时延。

第二, 5G NR 的无线链路控制层 (Radio Link Control, RLC) 优化了数据包的处理流程, 采用了预处理机制。在 LTE RLC 中, 其在生成 RLC PDU 时, 需要收到底层传输资源的指示, 也就是说只有当获得了物理层传输资源时才能产生 RLC PDU。而对于 NR RLC, 其在

设计之初就去掉了数据包级联功能，支持在没有收到底层资源指示时，就可以提前将 RLC PDU 准备好，这样可以有效减少在收到物理层资源时实时生成 RLC PDU 的时延。

第三，5G NR 的分组数据汇集协议（Packet Data Convergence Protocol, PDCP）层支持了数据包的乱序递交模式。该功能通过网络侧的配置，PDCP 层可以支持将 RLC 层递交过来的完整数据包以乱序模式递交到上层。换句话说，PDCP 层在这种递交模式下可以不用等所有数据包都按序到达后再执行向上层递交地操作，从而可以减少数据包的等待时延。

第四，为了提高数据包的传输可靠性，5G NR 的 PDCP 层还支持数据包的复制传输模式。该功能通过网络侧配置，PDCP 层可以将 PDCP PDU 复制为两份相同的数据包，通过将相同的 PDCP PDU 递交到关联的两个 RLC 实体，并最终在空口不同的物理载波上或不同的无线链路上冗余传输，来提高传输可靠性。

● NR 对业务服务质量（QoS）保障的增强

LTE 系统中通过 EPS 承载的概念进行 QoS（Quality of Service）控制，是 QoS 处理的最小粒度，单个 UE 在空口最多支持 8 个无线承载，对应最多支持 8 个演进分组系统（Evolved Packet System, EPS）承载进行差异化的 QoS 保障，无法满足更精细的 QoS 控制需求。基站对于无线承载的操作和 QoS 参数设定完全依照核心网的指令进行，对于来自核心网的承载管理请求，基站只有接受或拒绝两种选项，不能自行建立无线承载或进行参数调整。LTE 定义的标准化的 QCI（QoS Class Identifier）只有有限的几个取值，对于不同于当前运营商网络已经预配的 QCI 或标准化的 QCI 的业务需求，无法进行精确的 QoS 保障。随着互联网上各种新业务的蓬勃发展，以及各种专网、工业互联网、车联网、机器通信等新兴业务的产生，5G 网络中需要支持的业务种类，以及业务的 QoS 保障需求远超 4G 网络中所能提供的 QoS 控制能力。

为了给 5G 多种多样业务提供更好的差异化 QoS 保证，5G 网络对 QoS 模型和种类进行了更加精细化的调整。在核心网侧取消了承载的概念，以 QoS Flow（QoS 流）进行代替，每个 PDU 会话可以有最多 64 条 QoS 流，大大提高了差异化 QoS 区分度，从而进行更精细的 QoS 管理。基站自行决定 QoS 流与无线承载之间的映射关系，负责无线承载的建立、修改、删除，以及 QoS 参数设定，从而对无线资源进行更灵活的使用。5G 网络中还增加了动态的 5QI 配置，时延敏感的资源类型，以及反向映射、QoS 状态通知、候选 QoS 配置等特性，从而可以对种类繁多的业务提供更好的差异化 QoS 保证。

● NR 对核心网架构演进的增强

在 LTE 网络中，采用控制平面和用户平面不分离的网络架构方式，终端的会话管理和终端的移动性管理通过同一个网络实体处理，导致网络演进的不灵活性和不可演进性。

到了 5G 时代，5G 移动通信目标是实现万物互联，支持丰富的移动互联网业务和物联网业务，4G 的网络架构主要满足语音要求和传统的移动宽带（MBB）业务，已经不能高效地支持丰富多样的业务。

为了能够更好、更高效地满足上述需求，同时，为了支持运营商更好地实现服务的快速创新、快速上线、按需部署等，3GPP 采用控制平面和用户平面完全分离的网络架构方式。此种设计方式有利于不同网元独立的扩容、优化和技术演进。用户面既可以集中部署也可以分布式部署，在分布式部署时可以将用户面下沉到更接近用户的网络实体，提升对用户请求的响应速度；而控制面集中管理、统一集群部署，可以提升可维护性和可靠性。

同时，移动网络需要一种开放的网络架构，通过开放网络架构的更改支持不断扩充的网

网络能力，通过接口开放支持业务访问所提供的网络能力。基于此，3GPP 采纳 5G 服务化网络架构（Serviced Based Architecture, SBA）。基于 5G 核心网进行了重构，以网络功能（Network Function, NF）的方式重新定义了网络实体，各 NF 对外按独立的功能（服务）提供功能实现并可互相调用，从而实现了从传统的刚性网络（网元固定功能、网元间固定连接、固化信令交互等），向基于服务的柔性网络的转变。基于服务化的网络架构（Service Based Architecture, SBA）解决了点到点架构紧耦合的问题，实现了网络灵活演进，满足了各种业务灵活部署的需求。

1.2 NR 对新技术的取舍

通过 1.1 节的内容可以看出，NR 在标准化过程中相比 LTE 技术做了大量增强和优化。为了满足未来移动通信网络大带宽、低时延、高速率的基本目标，以及能更灵活地支持垂直行业多样化业务的需求，NR 从标准研究和技术方案设计之初的目标就是采用新架构、新空口、新参数、新波形、新编码、新多址等多项全新的关键技术。在正式的标准化制定阶段，每项关键技术都是经过审阅很多公司提交的大量的方案研究报告和技术建议提案，经过多轮讨论和评估，综合考虑多方面的因素做出一定取舍和权衡，最终形成的标准化结论。从最终的 NR 标准化结果可以看到，有些新技术，如新参数、新编码等，最终形成了标准化方案，但也有一些在标准化过程中被充分讨论的关键技术，并没有最终在已经完成的 R15 和 R16 的版本中被标准化，如新波形和新多址这两项技术。下面对 NR 在标准化过程中对新技术的取舍做一些简单的探讨和总结。

1.2.1 NR 对新参数集的选择

NR 之所以需要设计灵活参数集，是因为 NR 需要更好地支持多样化的业务需求。LTE 标准中定义 OFDM 波形的子载波间隔（Subcarrier Space, SCS）为固定的 15 kHz，这种单一的子载波间隔的参数不能满足 5G 的系统需求。5G 典型的 3 种业务 eMBB、URLLC、mMTC 对传输速率、空口时延、覆盖能力的指标要求是不同的，因此不同的业务需要采用不同的参数集（子载波间隔、循环前缀 CP 长度等）进行部署。相较于传统的 eMBB 业务，URLLC 的低时延业务需要较大的子载波间隔缩短符号长度进行传输，以降低传输空口时延。而大连接的物联网 mMTC 业务往往需要缩小子载波间隔，通过增大符号传输时长和功率谱密度来提升覆盖距离。而且 NR 需要不同参数集的业务在空口能够良好共存，互不干扰。

基于 OFDM 系统基本原理，OFDM 波形的子载波间隔与 OFDM 符号长度成反比。由于改变子载波间隔可以对应改变 OFDM 符号长度，从而可以直接决定一个时隙在空口传输的时间长度。考虑到 NR 要更好地支持不同的空口传输时延，同时也要支持大的载波带宽，因此 NR 最终支持了多种子载波间隔，SCS 以 15 kHz 为基准并以 2 的整次幂为倍数进行扩展，包含 15 kHz、30 kHz、60 kHz、120 kHz、240 kHz、480 kHz 等多种子载波间隔的取值，伴随着 SCS 增加，对应的 OFDM 符号长度也等比例缩短。这样设计的目的是使得不同的子载波间隔的 OFDM 符号之间能够实现边界对齐，便于实现不同子载波间隔的业务频分复用时的资源调度和干扰控制。当然，NR 讨论之初，也考虑过以 17.5 kHz 为基准的子载波间隔，但经过评估，以 15 kHz 为基准的子载波间隔能更好地支持和兼容 LTE 与 NR 的共存场景和频谱共享的场景，因此，其他 SCS 参数集的方案就没有被采纳。

采用了灵活可变的子载波间隔，可以适配不同的业务需求。例如，采用较大的 SCS，可以使符号长度缩短，从而降低空口传输时延。同时，OFDM 调制器的 FFTsize 和 SCS 共同决定了信道带宽。对于给定频谱，相位噪声和多普勒频移决定了最小的子载波间隔 SCS。高频谱的载波带宽往往比较大，且多普勒频偏也相对较大，因此高频谱载波适合采用较大的子载波间隔 SCS，既可以满足 FFT 变换点数的限制，又可以更好地抵抗多普勒频移。同理，针对高速移动场景，也适合采用较大的子载波间隔来抵抗多普勒频偏的影响。

基于如上分析，NR 支持多种子载波间隔，从而具有很好的扩展性，灵活参数集能很好地满足不同的业务时延、不同的覆盖距离、不同的载波带宽、不同的频谱范围、不同的移动速度等各种场景需求。可见，NR 通过支持灵活的参数集和高低频统一的新空口框架，为 5G 多种业务的灵活部署和多业务共存奠定了良好的技术基础。

1.2.2 NR 对新波形技术的选择

关于 NR 对新波形的需求，与前面讨论的灵活的参数集有相同的出发点，即 NR 需要支持多样化的业务需求。当不同的业务在空口通过不同的参数集（子载波间隔、符号长度、CP 长度等）进行传输时，需要能良好共存、互不干扰。因此，新波形的设计目标是具有更高的频率效率，良好的载波间抵抗频偏和时间同步偏差的能力，更低的带外辐射干扰，优良的峰均比（Peak to Average Power Ratio, PAPR）指标，同时也能满足用户之间的异步传输和非正交传输。

如大家所了解，LTE 下行方向采用的 CP-OFDM（Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing）波形具有一些固有的优势，如抵抗符号间干扰和频率选择性衰落效果好，频域均衡接收机简单、易与 MIMO 技术相结合、支持灵活的资源分配。但 CP-OFDM 波形也有固有的劣势，如有较高的信号峰均比，CP 的存在会有一定的频谱效率开销，对时间同步和频率偏差比较敏感，带外辐射较大，载波间干扰会导致性能下降。基于 NR 需要满足支持多种新业务的需求，空口新波形设计的目标是需要根据业务场景和业务类型灵活地选择和配置适合的波形参数。例如，将系统带宽划分若干子带承载不同的业务类型，选择不同的波形参数，子带之间只存在极低的保护带或完全不需要保护带，各子带可以采用数字滤波器进行滤波处理，来消除各子带之间的相关干扰，实现不同子带的波形解耦，满足不同业务之间的灵活共存。

在 NR 新波形的标准讨论过程中，以 CP-OFDM 波形为基础，提出了多种优化的或全新的波形方案^[7-17]。如表 1-1 所示，有十几种新波形的建议方案被提交，主要可以分为三大类波形：时域加窗处理；时域滤波处理；不做加窗和滤波处理。

表 1-1 NR 候选新波形

	Time Domain Windowing (时域加窗)	Time Domain Filtering (时域滤波)	Without Windowing/Filtering (不做加窗和滤波)
Multi-carrier (多载波)	FB-OFDM FBMC-OQAM GFDM FC-OFDM W-OFDM OTFS	F-OFDM UF-OFDM FCP-OFDM OTFS	CP-OFDM OTFS

续表

	Time Domain Windowing (时域加窗)	Time Domain Filtering (时域滤波)	Without Windowing/Filtering (不做加窗和滤波)
Single-carrier (单载波)	DFT spreading+ TDW MC candidates	DFT spreading+ TDF MC candidates	DFT-s-OFDM ZT-s-OFDM UW DFT-s-OFDM GI DFT-s-OFDM

多载波时域加窗类候选新波形有如下几种。

- FB-OFDM: Filter-Bank OFDM, 滤波器组的 OFDM。
- FBMC-OQAM: Filter-Bank Multi-Carrier offset-QAM, 滤波器组多载波。
- GFDM: Generalized Frequency Division Multiplexing, 广义频分复用。
- W-OFDM: Windowing OFDM, 时域加窗的 OFDM。
- FC-OFDM: Flexibly Configured OFDM, 灵活配置的 OFDM。
- OTFS: Orthogonal Time Frequency Space, 正交时频空间。

多载波时域滤波类候选新波形有如下几种。

- F-OFDM: Filtered-OFDM, 滤波的 OFDM。
- UF-OFDM: Universal-Filtered OFDM, 通用滤波 OFDM。
- FCP-OFDM: Flexible CP-OFDM, 灵活的 CP-OFDM。
- OTFS: Orthogonal Time Frequency Space, 正交时频空间。

单载波波形除了时域加窗和时域滤波方案外, 后续新波形还有如下几种。

- DFT-s-OFDM: DFT-spread OFDM, DFT 序列扩频的 OFDM。
- ZT-s-OFDM: Zero-Tail spread DFT-OFDM, 零尾扩频 DFT-OFDM。
- UW DFT-s-OFDM: Unique Word DFT-s-OFDM, 单字 DFT-s-OFDM。
- GI DFT-s-OFDM: Guard Interval DFT-s-OFDM, 保护间隔 DFT-OFDM。

3GPP 对提交的多种候选新波形方案进行评估和讨论, 其中几种重点讨论的候选波形有 F-OFDM、FBMC-OQAM、UF-OFDM 等。新波形在子带或子载波间正交性、频率效率、带外辐射性能、抵抗时频同步误差等方面确实有一定优势, 但也都存在着一些问题, 如性能增益不够显著、不能与 CP-OFDM 波形良好兼容、与 MIMO 结合的实现复杂度偏高、对碎片频谱利用不足等。标准制定的最终结论是并没有定义新的波形, 而仅在标准上定义了 NR 的有效载波带宽、邻道泄露、带外辐射等具体的指标要求。为了保证这些技术指标要求, NR 波形处理中可能用到的如时域加窗、时域滤波等技术方案, 留给厂家作为自有的实现方案。最终 NR 维持了下行仍采用 LTE 的 CP-OFDM 波形, 上行除了支持 LTE 的单载波 DFT-s-OFDM 波形外, 也支持 CP-OFDM 波形。这样做的原因主要是考虑到 CP-OFDM 波形的均衡和检测处理会相对简单, 更适合 MIMO 传输, 而且上下行采用相同的调制波形也利于 TDD 系统上下行之间统一的干扰测量和干扰消除。

1.2.3 NR 对新编码方案的选择

由于无线通信的空间传播信道会经历大尺度衰落和小尺度衰落, 以及系统内和系统间也可能存在同频或邻频干扰, 因此无线通信系统通常都会采用前向纠错码, 保证数据传输的可

靠性。信道编码作为历代无线通信系统中最重要的一项关键技术之一，被通信领域技术人员持续研究和探索。早期的移动通信系统，如 GSM、IS-95 CDMA 等，一般都采用卷积编码，采用维特比（Viterbi）译码。后续 3G 和 4G 为了支持高速率多媒体业务和移动互联网业务，数据信道均采用了 Turbo 编码方案，控制信道分别采用了卷积编码和咬尾卷积码（Tail-bit Convolutional Code，TBCC）。5G 需要满足大带宽、高速率、低时延、高可靠性的业务需求，这使得业界对 5G 的新编码充满了期待。

在标准化过程中，5G 的数据信道编码选择主要聚焦在 Turbo 码和低密度奇偶校验码（Low-Density Parity-Check code，LDPC）两者之间进行选择。由于 5G 要承载的 eMBB 业务相比 4G 在系统吞吐量方面大幅提高，下行需要满足 20 Gbps 的峰值吞吐率，上行需求需要满足 10 Gbps 的峰值吞吐率。因此，尽管 Turbo 码在 4G 被成熟应用，且在交织器方面做了并行处理的优化，但其在码块译码性能、超高吞吐率译码时延等方面还是不能满足未来 5G 大带宽高吞吐量的业务需求。LDPC 编码虽然一直未在 3GPP 的前几代移动通信系统中使用，但这种编码方案已经被提出几十年了，且已经被广泛用于数字视频广播（Digital Video Broadcasting，DVB）、无线局域网（WLAN）等通信领域中。LDPC 具有的译码复杂度低、非常适合并行译码、大码块高码率的译码性能好、具有逼近香农限的优异性能，使得 LDPC 天然适合 5G 的大带宽高吞吐率的业务需求。从实际产品化和产业化角度，LDPC 最终芯片化后在译码时延、芯片效率面积比、芯片功耗、器件成本等方面也都有明显的优势。3GPP 经过几轮会议讨论，最终确定 LDPC 编码为 NR 的数据信道的编码方案。

相比数据信道，控制信道编码的主要特征差别是可靠性要求更高，且编码的数据块长度较小。由于 LDPC 在短码性能上没有优势，因此 NR 的控制信道编码主要在 4G 的咬尾卷积码（TBCC）和 Polar 码两者之间进行取舍。Polar 编码作为 2008 年才被提出的一种全新的编码方案，短码的优势非常明显。Polar 码能够获得任意低的码率、任意的编码长度，中低码率的性能优异，且理论分析没有误码平台。经过充分评估，Polar 码在控制信道传输方面的性能要更优于 TBCC 码，因此最终确定了 Polar 码为 NR 的控制信道的编码方案。

可以说，NR 采用了全新的信道编码方案替代了原有 4G 的信道编码方案，一方面是由于 5G 新业务、新需求的驱动力，必须采用新的技术才能支持更高的性能需求。另一方面，由于信道编码在整个无线通信底层的系统方案和系统框架中的功能相对比较独立，信道编码方案本身的替换不会对其他功能模块产生影响。总之，5G 采用全新的信道编码方案，为 5G 支持全新业务和打造强大的空口能力提供了有力的底层关键技术的支撑。

1.2.4 NR 对新多址技术的选择

在 NR 定义关键技术指标和选取关键技术之初，除了新波形、新编码等，还有一项被业界深入研究和探讨的关键技术——非正交多址接入技术。为了提高空口的频谱效率和用户的接入容量，无线通信系统从 2G 到 4G，已经支持了时分、码分、频分、空分这几个维度的多用户复用技术。随着 5G 万物互联时代的到来，面向大规模物联网的 mMTC 场景，需要在单位覆盖面积内能容纳超高用户容量的接入，而非正交多址技术相比正交多址技术可以提供多达数倍的用户容量，是非常适合应用在大连接场景下的关键技术。国内外的很多企业都提出了自己的非正交多址技术方案，但在标准化过程中，非正交多址技术在 R16 版本仅作为一个研究项目开展了相应的讨论，并没有完成最终的标准化工作，即将开展的 R17 版本的项目范围中也没有包含。非正交多址技术会在本书中的 URLLC 物理层章节中进行相关的介绍，

这里不做展开性讨论。

总体来说，NR 标准相比 LTE 做了大量的增强、优化和升级，是不兼容 LTE 的全新设计。但客观分析，NR 空口上更多是针对系统设计方案的全面优化，如带宽增大、MIMO 层数增多、参数集多样化、灵活的帧结构、灵活的资源分配方式、灵活的调度等。从无线通信关键技术和信号处理角度，NR 仍然沿用了 OFDM+MIMO 的大体技术框架，采用的核心关键技术并没有本质性的突破和变革。当然这并不否定 NR 技术的创新性，这是整个产业基于现有技术和需求做出的一个客观、合理的选择。

移动通信技术的目标和定位是在工业界大规模商业部署和应用，为整个社会、个人以及多个行业提供更好的信息化服务。移动通信产业链中各个环节包括运营商、网络设备制造商、终端设备制造商、芯片制造商等，也都需要能伴随着产业的发展和升级换代获得一定的商业价值和利益。通过 NR 标准化过程中对关键技术的选取，可以看出从产品化、工程化和商业化的角度，更加看重技术的实用性。设备开发实现的复杂度、开发成本、开发难度和开发周期等因素，都会是新技术选择的重要影响因素。另外，新技术引入还要充分考虑系统性，某个方向技术升级或增强要能与已有的系统良好兼容，避免对现有技术框架造成较大影响，不会对产业现状造成较大的冲击。当然，创新性的新技术永远都是令人期待的，不断探索和研究新技术、持续提升系统性能、创新性解决问题，是所有的通信从业人员和整个产业界不断追求的目标。

| 1.3 5G 技术、器件和设备成熟度 |

在 4G 产业化和商用化的进程刚刚进入起步阶段，业内对 5G 技术的研究就如火如荼地展开了。基于全球的众多企业、科研机构、高校等近十年对 5G 技术的研究成果，使得 5G 技术和标准快速成熟，如本书 1.1 节介绍的，5G 在标准化方面相比 4G 做了大量的增强和演进，支持毫米波频谱范围、灵活的帧结构、灵活参数集、导频优化设计、灵活的调度方式、新型编码、MIMO 增强、时延降低、移动性增强、终端节能、信令优化、全新的网络架构、非授权频谱（NR-U）、车联网（NR V2X）、工业互联网（IIoT）等多种不同特性。从技术方案上确保了 5G 技术先进性和未来 5G 商业部署对新场景新业务需求的良好满足。5G 整个产业能够在第一个版本（R15）标准化后迅速开展全球商业部署，也是受益于整个移动通信行业在器件、芯片、设备等产业化方面的积累。

● 数字器件和芯片的发展和成熟良好地支撑了 5G 设备研发需求

与 4G 移动通信系统相比，5G 需要满足更加多样化的场景和极致的性能指标，因此对设备的处理能力也提出了更高要求。5G 需要支持 1 Gbps 的用户体验速率，数 Gbps 的用户峰值速率，数十 Gbps 的系统峰值吞吐量，相比 4G 系统的 10 倍频谱效率提升等，5G 还需要支持毫秒级的端到端时延，达到 99.999% 数据传输正确率的高可靠性，以及海量连接的物联网终端。所有这些 5G 的超高性能的技术指标的满足，都需要 5G 商用设备具有强大的计算、处理平台才得以保证。以 5G 商用网络部署最主流的 Massive MIMO 宏基站为例，eMBB 场景下的基带处理单元（Baseband Unit，BBU）的处理功能需要满足如下技术指标：单载波 100 MHz 带宽 64T64R 数字通道，上行 8 流、下行 16 流的 MIMO 处理能力，20 Gbps 的系统峰值速率，4 ms 的空口时延，单小区支持几千个用户同时在线连接。这些性能指标都需要 5G 基站平台的处理能力大幅提升，包括如基带处理 ASIC（Application Specific Integrated Circuit）芯片、SoC（System on Chip）芯片、多核 CPU、多核 DSP、大容量现场可编程阵列

(FPGA)、高速的传输交换芯片等。同样，5G 单用户峰值速率提高到几 Gbps，终端设备的通信芯片的处理性能相比 4G 终端也要大幅提升。可见，5G 对通信器件、半导体芯片都提出了更高的要求。

伴随着移动通信技术的不断演进，半导体产业也一直在飞速发展的。特别是近些年在通信需求巨大的驱动力下，半导体材料以及集成电路的工艺也在快速地完成技术创新和升级换代。数字集成电路（Integrated Circuit，IC）工艺已经从几年前的 14 nm 升级为主流的 10 nm 和 7 nm 工艺。未来一两年全球领先的芯片设计公司和半导体制造企业有望向更先进的 5 nm 和 3 nm 工艺迈进。先进的半导体芯片的工艺水平成熟和发展，满足了 5G 网络设备和终端设备的通信和计算能力需求，使其具备了 5G 商用化的条件。

● 5G 有源大规模天线设备已满足工程化和商用化条件

除了数字器件和芯片已经可以很好地满足 5G 设备通信需求外，作为 5G 最具代表性的大规模天线（Massive MIMO）技术的设备工程化问题也得到了有效突破。我们都知道，LTE 网络中的远端射频单元（Remote Radio Unit，RRU）设备一般都是 4 天线（FDD 制式）或 8 天线（TDD 制式），RRU 的体积、重量、功耗等设备实现和工程化都没有技术瓶颈。而 5G 的 Massive MIMO 需要水平维度和垂直维度都具有波束扫描能力和更高的空间分辨率，支持多达几十个流的空分复用传输能力，因此天线阵列的规模和数量都需要大幅提高。5G 大规模天线的典型配置是 64 数字通道 192 天线阵元，200 MHz 工作带宽，相比 4G RRU 设备工作带宽增加了 5~10 倍，射频通道数增加了 8 倍。由于射频通道数目太多，4G 之前移动通信采用的 RRU 与天线阵分离的传统的工程应用方式已经无法适用。5G 需要把射频单元和无源天线集成在一起，设备形态演变为射频和天线一体化的有源天线阵列 AAU（Active Antenna Unit）。另外，商用网络部署的要求是 5G 基站能与 4G 网络共用站址建设，由于 5G 的工作频谱相比 4G 要高，工作带宽相比 4G 宽，因此需要 5G AAU 设备能支持更大的发送功率，才能满足与 4G 相同的覆盖距离。

从 LTE 网络建网的后期，为了满足日益增长的用户容量需求，系统厂家就已经针对 LTE 的 TDD 频谱设备进行大规模有源天线阵列的工程样机的研制，并一直在持续改进和优化。近些年，伴随着射频器件工艺改进和新材料的应用，功率放大器（Power Amplifier，PA）支持的工作带宽和效率不断提升，射频收发器（RF Transceiver）的采样率、接口带宽以及集成度不断提高，关键器件和核心芯片的能力和指标有了巨大突破，逐步满足了商用化和工程化的需求。但 5G AAU 的设备功耗和设备工程化问题仍旧面临着较大挑战。一方面，由于 5G 大规模天线设备的射频通道数和工作带宽都数倍于 4G，导致的设备功耗也数倍于 4G 设备。另一方面，从节能环保和降低基础运营成本的角度出发，运营商对设备具有低功耗要求的同时，也会对设备工程参数如体积、重量、迎风面积等有严格的限制性要求。因此，在一定的工程限制条件下，5G AAU 设备所要满足的功率需求、功耗需求、散热需求是网络设备厂家近几年一直努力解决的难题。为此，设备商通过优化射频电路设计，提高功放效率和功放线性度，选用高集成度的收发信机，以及对中射频算法进行优化、降低峰均比（PAPR）和误差矢量幅度（Error Vector Magnitude，EVM）指标等技术手段，来提高整机效率降低设备功耗。另外，针对设备散热问题，一方面，从设备研制角度，采用先进的散热方案、合理的结构设计，以及器件小型化等手段来解决；另一方面，结合工作场景和业务负荷情况，采用自适应地关载波、关通道、关时隙、关符号等软件技术方案来节能降耗，以最终满足设备的商用化和工程化要求。

● 毫米波技术、器件和设备日渐成熟

5G 相比 4G 的显著增强点之一，就是支持了 FR2（24.25~52.6 GHz）范围的毫米波频谱，由于高频谱范围内可用频谱非常广阔，从而为 5G 的未来部署和业务应用提供更大的潜能和灵活性。

尽管毫米波频谱的频谱广阔可用带宽大，但由于毫米波所处的频谱高，应用于移动通信系统中，相比低频谱存在着如下这些问题。

- 传播路径损耗大，覆盖能力弱。
- 穿透损耗大、信号易受遮挡，适合直视径（LOS）传输。
- 毫米波工作频谱高，功放器件效率低。
- 毫米波工作带宽大，需要的 ADC/DAC 等射频器件采样率和工作时钟高。
- 毫米波器件相位噪声大，相比低频器件 EVM 指标要差。
- 毫米波器件成本高、价格昂贵，产业链不成熟。

业界针对毫米波存在的问题，多年来一直在进行研究和突破。为了解决毫米波传播特性不理想、传播损耗大、信号易受遮挡等问题，首先，从技术方案上，5G NR 协议引入了多波束（Multi-beam）的机制，包含波束扫描、波束管理、波束对齐、波束恢复等技术方案，在空口通信机制上来保证无线链路的传输质量。其次，从设备形态上，由于毫米波频谱相比 sub-6 GHz 波长短、天线阵尺寸小，毫米波功放（PA）输出功率低，因此毫米波的天线阵都是设计成在射频前端具有调相能力的相控阵天线面板（Panel），由一组天线单元合成一个高增益的窄波束，通过移相器来调整模拟波束（Analog Beam）的方向对准接收端，提高空口传输链路的信号质量。另外，为了避免分立器件连接导致的能量损耗，毫米波的设备研制都是采用射频前端与天线单元集成一体化（Antenna in Package）的形式，以最大化提高效率。为了满足 NR 的 MIMO 传输的功能需求，同时降低对基带处理能力的要求，毫米波设备都是采用数字+模拟混合波束赋形的方案，即一路数字通道信号在射频前端是扩展到一组天线单元后通过模拟波束赋形发送，在通信过程中基站与终端基于 NR 协议的波束管理（Beam Management）机制，不断进行波束方向的调整与对齐，确保通信双方的波束能准确指向对方。

可见，毫米波用于移动通信中，无论是对技术方案还是对设备性能要求都是巨大的挑战。但经过业内专家多年来的不懈努力，毫米波通信的技术方案已经在 5G 引入并被标准化，毫米波器件和设备研制也都取得了巨大突破。近两三年已经有一些设备制造商、运营商、芯片制造商等对外展示了一些基于毫米波样机的演示和测试结果。北美、韩国、日本等国家和地区由于 5G 商用频谱短缺，在 2020 年启动了毫米波预商用网络的部署。我国的 IMT-2020（5G）工作组于 2019 年组织完成了第一阶段的 5G 毫米波技术试验，2020 年会继续开展相关的工作，进一步推动毫米波技术和设备成熟，为未来的 5G 毫米波商用网络的部署提供技术方案支撑和测试数据参考。

| 1.4 R16 增强技术 |

前文对 5G 关键技术的演进和增强以及 5G 设备和产品的现状做了整体性介绍，接下来本节对 5G 的标准化进展情况进行概述性介绍。3GPP 对 NR 的标准化工作有明确的时间计划，R15 协议版本作为 NR 的第一个基础版本，于 2018 年 6 月完成并发布，支持了增强移动宽带（eMBB）业务和基本的 URLLC 业务。截至本书编写的时间，3GPP R16 协议版本的

标准化工作已经接近尾声，R16 版本对 eMBB 业务又进行了增强，同时也完整支持了 URLLC 业务。R16 协议版本完成的项目支持的新功能主要有如下几个方面。

1.4.1 MIMO 增强

R16 的 MIMO 增强是在 R15 的 MIMO 基础上进行增强和演进，主要增强的内容包括以下 4 点。

- eType II 码本 (eType II codebook)

为了解决 R15 Type II 码本反馈开销太大的问题，R16 进一步引进了 eType II 码本。不同于 Type II 码本将宽带或子带上的信道分解成多个波束的幅度和相位，eType II 码本将子带上的信道进行等效的时域变换，通过反馈各个波束的多径时延和加权系数，大大降低了反馈信令的开销。同时，eType II 码本还支持更精细化的信道量化以及更高的空间秩 (Rank)，从而能够进一步提高基于码本的传输性能，在 MU-MIMO 场景下性能提升更为显著。

- 多传输点 (Multi-TRP) 增强

为了进一步提高小区边缘 UE 的吞吐量和传输可靠性，R16 引入了基于多个发送接收点 (Transmission and Reception Point, TRP) 传输的 MIMO 增强。基于单个下行控制信息 (Downlink Control Information, DCI) 和多个下行控制信息 (DCI) 的非相关联合传输 (Non Coherent-Joint Transmission, NC-JT)，典型目标场景是 eMBB。基于单个 DCI 的 Multi-TRP 分集传输，典型目标场景是 URLLC。其中，基于单个 DCI 的 NC-JT 传输可以在不增加 DCI 开销的情况下，支持两个 TRP 在相同时频资源上同时传输数据，从而在理想回传 (Ideal Backhaul) 场景下提高边缘 UE 的传输速率。基于多个 DCI 的 NC-JT 传输支持两个 TRP 独立对同一个 UE 进行调度和数据传输，在提高吞吐量的同时也保证了调度的灵活性，可以用于各种回传的假设。基于多 TRP 的分集传输则支持两个 TRP 通过空分、频分或时分的方式传输相同的数据，提高了边缘 UE 的传输可靠性，从而更好地满足了 URLLC 业务的需求。

- 多波束 (Multi-Beam) 传输增强

R15 引入的基于模拟波束赋形的波束管理和波束失败恢复机制，使毫米波频谱的高速率传输成为可能。R16 在这些机制基础上进一步做了优化和增强，具体表现在：通过同时激活一组上行信号或下行信号（如多个资源或多个载波上的信号）的波束信息、引入默认的上行波束等方案，降低了配置或指示波束信息的信令开销；通过引入基于 L1-SINR 的波束测量机制，为网络提供了多样化的波束测量和上报信息；通过将波束失败恢复机制扩展到辅小区，提高了辅小区上的模拟波束传输的可靠性。

- 上行满功率发送 (Uplink Full Power Tx)

基于 R15 的上行发送功率控制机制，如果基于码本的物理上行共享信道 (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH) 传输的端口数大于 1 且小于终端的发送天线数，此时不能以满功率传输 PUSCH。为了避免由此带来的性能损失，R16 引入了全功率发送的增强，即不同 PA 架构的 UE 可以通过 UE 能力上报，使得网络侧能够调度满功率的物理上行共享信道 (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH) 传输。具体的，R16 引入了 3 种满功率发送模式：UE 的单个 PA 支持满功率发送（不需要使用 Power Scaling 方式）、通过全相关预编码向量支持满功率发送（即满端口传输）以及 UE 上报支持满功率发送的预编码向量。实际是否采用满功率发送以及采用哪种方式取决于 UE 能力上报及网络侧配置。

1.4.2 URLLC 增强——物理层

R15 协议对 URLLC 功能的支持比较有限，在 NR 灵活框架的基础上针对 URLLC，增强了处理能力，引入了新的调制编码方式（Modulation and Coding Scheme, MCS）和信道质量指示（Channel Quality Indicator, CQI）对应表格，引入了免调度传输和下行抢占技术。R16 针对 URLLC 成立了增强型项目，进一步突破了时延和可靠性瓶颈。R16 的 URLLC 增强主要包含如下方向。

- 下行控制信道增强，包括压缩 DCI 格式和下行控制信道监听能力增强。
- 上行控制信息增强，包括支持一个时隙内的多 HARQ-ACK 传输，同时构建 2 个 HARQ-ACK 码本和用户内不同优先级业务的上行控制信息抢占机制。
- 上行数据信道增强，支持背靠背和跨时隙边界的重复传输。
- 免调度传输技术增强，支持多个免调度（Configured Grant）传输。
- 半持续传输技术增强，支持多个半持续传输配置和短周期半持续传输。
- 不同用户间的优先传输和上行功率控制增强。

1.4.3 高可靠低时延通信（URLLC）——高层

为了能更好地支持垂直行业的应用，如工业互联网（Industry Internet of Things, IIoT）、智能电网等，R16 在物理层增强立项的同时，也成立了高可靠、低时延的高层增强项目，设计目标是能支持 1 μ s 的时间同步精度、0.5 ms 的空口时延，以及 99.999% 的可靠性传输。该项目主要的技术增强包括以下几个方面。

- 支持时间敏感性通信（Time Sensitive Communication, TSC）

为了支持如工业自动化类业务的传输，对以下几个方面进行研究，包括：以太帧头压缩、调度增强和高精度时间同步。具体的，以太帧头压缩是为了支持 Ethernet Frame 在空口的传输以提高空口的传输效率，调度增强是为了保证 TSC 业务传输的时延，高精度时间同步则是为了保证 TSC 业务传输的精准时延要求。

- 数据复制和多连接增强

R15 协议版本已经支持了空口链路上数据复制传输的机制。R16 则支持了多达 4 个 RLC 实体的数据复制传输功能，进一步提高了业务传输的可靠性。

- 用户内优先级/复用增强

在 R15 中支持的资源冲突场景是动态授权（Dynamic Grant, DG）和资源预配置授权（Configured Grant, CG）冲突的场景，且 DG 优先级高于 CG 传输。在 R16 协议版本中，需要支持 URLLC 业务和 eMBB 业务共存的场景，且 URLLC 业务传输可以使用 DG 资源，也可以使用 CG 资源。为了保证 URLLC 业务的传输时延，R16 需要对 R15 中的冲突解决机制进行增强。

1.4.4 UE 节能增强

R15 协议版本的针对终端节能的主要功能是非连续接收（DRX）技术和带宽分段（BWP）的功能，分别从时域角度和频域角度降低终端的处理。R16 又在如下几个方面进行了终端节能增强。

- 引入了唤醒信号（Wakeup Signal, WUS），由网络侧决定是否需要在 DRX 激活周期到来前唤醒 UE 来进行数据的监听接收，UE 唤醒机制通过新增控制信息格式（DCI Format 2-6）实现。
- 增强了跨时隙调度的机制，可以在业务数据不连续传输的情况下避免 UE 对 PDSCH 信道数据进行不必要的接收和处理。
- MIMO 层数自适应的功能，网络侧结合 BWP 的配置可以通知 UE 降低空间传输的层数，从而降低 UE 处理能力要求。
- 支持 RRM 测量机制放松。
- 支持终端优选的节能配置上报。

1.4.5 两步 RACH 接入

为了缩短初始接入时延，早在 R15 标准化早期就讨论过两步 RACH（2-step RACH）过程，但 R15 仅完成了传统的 4-step RACH 过程标准化。由于 2-step RACH 对于缩短随机接入时延、减少 NR-U 的 LBT 操作等方面有明显的增益，因此在 R16 版本中对 2-step RACH 进行了正式的标准化，随机接入过程从普通的 msg1 到 msg4 的四步过程优化为 msgA 和 msgB 的两步过程。

1.4.6 上行频谱切换发送

从运营商的 5G 实际频谱分配和可用性情况看，TDD 中频谱（如 3.5 GHz、4.9 GHz）是全球最主流的 5G 商用频谱。TDD 频谱相对较高，带宽大，但覆盖能力不足。FDD 频谱低，覆盖好，但带宽小。UE 可在 TDD 频谱上支持两天线的发送能力，但在 FDD 频谱上仅有单天线发送能力。R16 引入了上行频谱切换发送的技术，即终端在上行发送链路以时分复用方式工作在 TDD 载波和 FDD 载波，同时利于 TDD 上行大带宽和 FDD 上行覆盖好的优势来提升上行性能。上行频谱切换发送可以提高用户的上行吞吐率和上行覆盖性能，同时也能获得更低的空口时延。

上行载波间切换发送方案的前提是 UE 仅有两路射频发送通路，其中 FDD 的发送通路 with TDD 双路发射中的一路共用 1 套 RF 发射机。终端支持通过基站调度，可以动态地在如下两种工作状态下切换。

- FDD 载波 1 路发射+TDD 载波 1 路发射（1T+1T）。
- FDD 载波 0 路发射+TDD 载波 2 路发射（0T+2T）。

上行载波间切换发送机制可以使用户在 EN-DC、上行 CA、SUL 三种模式下工作。当 UE 处于小区近点位置时，基站可以调度用户在 TDD 载波的双发状态（0T+2T）下工作，使得用户获得 TDD 载波上行 MIMO 模式下高速率；基站也可以对近点用户调度在 FDD+TDD 载波聚合状态（1T+1T）下，使得用户获得上行 CA 模式下的高速率。当 UE 处于小区边缘位置时，基站可以调度用户工作在 FDD 低频载波上单发，提升边缘用户的覆盖性能。

1.4.7 移动性增强

R16 协议版本针对移动性增强主要引入了如下两个新功能。

- 双激活协议栈切换增强

对于支持双激活协议栈（Dual Active Protocol Stack, DAPS）能力终端的切换过程，终

端并不先断开与源小区的空口链接，而是成功接入目标小区后，终端才会基于网络侧的显示信令去释放源小区的连接并停止与源小区的数据收发。可见，终端在切换过程中可以与源小区和目标小区同时保持连接和同时进行数据传输的状态，从而满足切换过程中的 0 ms 业务中断时延的指标。

● 条件切换

条件切换（Conditional Handover）的核心思想是网络侧提前将候选的目标小区以及切换命令信息预配置给 UE，当特定条件满足时，UE 就可以自主地执行切换命令中的配置，直接向满足条件的目标小区发起切换接入。由于切换条件满足时 UE 不再触发测量上报，且 UE 已经提前获取了切换命令中的配置，因而避免了切换过程中的可能的测量上报或切换命令不能被正确接收的情况，从而提高了切换成功率。

1.4.8 MR-DC 增强

在 R16 MR-DC 增强课题中，为了提升在 MR-DC 模式下的业务性能，支持了快速建立 SCell/SCG 的功能，即允许 UE 在 idle 状态或者 inactive 状态下就执行测量，在进入 RRC 连接状态后立即把测量结果上报网络侧，使得网络侧可以快速配置并建立 SCell/SCG。

R16 引入了 SCell 休眠（SCell Dormancy）功能。在激活了 SCell/SCG 但无数据传输的情况下，通过 RRC 配置专用的 Dormant BWP，即 UE 在该 BWP 上不监听 PDCCH，仅执行 CSI 测量及上报，便于 UE 节电。而当有数据传输时可通过动态指示快速切换到激活状态，快速恢复业务。

为了降低无线链路失败带来的业务中断，R16 中引入了快速 MCG 恢复功能。当 MCG 发生无线链路失败时，通过 SCG 链路向网络发送指示，触发网络侧快速恢复 MCG 链路。

在网络架构方面，R16 也进行了增强，支持了异步 NR-DC 和异步 CA，为 5G 网络的部署提供了灵活的选择。

1.4.9 NR V2X

3GPP 在 R12 中开始了终端设备到终端设备（Device-to-Device, D2D）通信技术的标准化工作，主要是用于公共安全（Public Safety）的场景。D2D 技术是基于侧行链路（Sidelink）进行数据传输，实现终端到终端直接通信。与传统的蜂窝通信系统相比，终端在侧行链路上通信的数据不需要通过网络设备的转发，因此具有更高的频谱效率、更低的传输时延。在 R14 中，将 D2D 技术应用到基于 LTE 技术的车联网（Vehicle to Everything, V2X），即 LTE V2X。LTE V2X 可以实现辅助驾驶，即为驾驶员提供其他车辆的信息或告警信息，辅助驾驶员判断路况和车辆的安全。LTE V2X 的通信需求指标并不高，如需要支持的通信时延指标为 100 ms。随着人们对自动驾驶需求的提高，LTE V2X 不能满足自动驾驶的高通信性能的要求，R16 正式开展了基于 NR 技术的车联网（NR V2X）的项目工作。NR V2X 的通信时延需要达到 3~5 ms，数据传输的可靠性要达到 99.999%，以满足自动驾驶的需求。

R16 NR V2X 定义了侧行链路的帧结构、物理信道、物理层过程，侧行链路完整的协议栈等功能。NR V2X 支持侧行链路的资源分配机制，包括基于网络分配侧行传输资源和终端自主选取传输资源的两种方式。NR V2X 支持单播、组播、广播等多种通信方式，优化增强了感知、调度、重传以及 Sidelink 链路的连接质量控制等，为后续车联网多种业务的灵活和

可靠部署提供了良好的标准支撑。

1.4.10 NR 非授权频谱接入

R15 协议版本的 NR 技术是应用于授权频谱的通信技术，可以实现蜂窝网络的无缝覆盖、高频谱效率、高可靠性等特性。非授权频谱是一种共享频谱，多个不同的通信系统在满足一定要求的情况下可以友好地共享非授权频谱上的资源来进行无线通信。R16 协议版本的 NR 技术也可以应用于非授权频谱，称为基于 NR 系统的非授权频谱接入（NR-based Access to Unlicensed Spectrum），简称为 NR-U 技术。

NR-U 技术支持两种组网方式：授权频谱辅助接入和非授权频谱独立接入。前者用户需要借助授权频谱接入网络，非授权频谱上的载波为辅载波，作为授权频谱的补充频谱为用户提供大数据业务传输；后者可以通过非授权频谱独立组网，用户可以直接通过非授权频谱接入网络。

除了上述列出的 10 项 R16 协议版本增强的新功能，R16 还完成了接入和回传集成（Integrated Access and Backhaul, IAB）、NR 定位（NR Positioning）、UE 无线能力上报优化、网络切片增强、应对大气波导的远端干扰消除（Remote Interference Management, RIM）、交叉链路干扰测量（Cross Link Interference, CLI）、自组织网络（Self Organization, SON）等项目。同时，R16 也开展了如非陆地通信网络（Non-Terrestrial Network, NTN）、非正交多址（Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA）等研究项目（Study Item）。总之，R16 协议版本标准化的新功能和特性，为运营商以及行业客户的 5G 移动通信网络的网络功能部署、网络性能提升、网络升级演进，以及拓展新业务运营提供了强大的功能选择和技术保障。

| 1.5 小结 |

本章作为全书的开篇概述，首先重点介绍了 5G NR 的技术和标准相比 LTE 主要有哪些方面的增强和演进，同时对 NR 在标准制定过程中对新技术的取舍进行了总结和分析；其次介绍 5G 关键器件和设备的成熟度，这是促进 5G 标准化进程的一个重要因素；最后针对 3GPP 刚刚标准化完成的 R16 版本中的主要功能特性进行了概述，便于读者对后续各章节中 R16 技术内容先有一个基本了解。

参考文献

- [1] 沈嘉，索士强，全海洋，等. 3GPP 长期演进（LTE）技术原理与系统设计. 北京：人民邮电出版社，2008.
- [2] 刘晓峰，孙韶辉，杜忠达，沈祖康，徐晓东，宋兴华. 5G 无线系统设计与国际标准. 北京：人民邮电出版社，2019.
- [3] 3GPP TS 22.261 V15.6.0 (2019-06), NR. Service requirements for the 5G system. Stage1 (Release 15).
- [4] 3GPP TS 38.300 V15.6.0 (2019-06), NR. NR and NG-RAN Overall Description. Stage2 (Release 15).
- [5] 3GPP TS 38.913 V15.0.0 (2018-06), Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (Release 15).
- [6] 3GPP TS 21.915 V15.0.0 (2019-06), NR. Summary of Rel-15 Work Items (Release 15).
- [7] R1-165666. Way forward on categorization of IFFT-based waveform candidates, Orange. 3GPP RAN1 #85, May 23-27, 2016, Nanjing, China.
- [8] R1-162200. Waveform Evaluation Proposals, Qualcomm Incorporated. 3GPP RAN1 #84bis, Busan, Korea, 11th-

- 15th April 2016.
- [9] R1-162225. Discussion on New Waveform for new radio, ZTE. 3GPP RAN1 #84bis, Busan, Korea, 11th-15th April 2016.
 - [10] R1-162199. Waveform Candidates, Qualcomm Incorporated. 3GPP RAN1 #84bis, Busan, Korea, 11th-15th April 2016.
 - [11] R1-162152. OFDM based flexible waveform for 5G, Huawei, HiSilicon. 3GPP RAN1#84bis, Busan, Korea, 11th-15th April 2016.
 - [12] R1-162516. Flexible CP-OFDM with variable ZP, LG Electronics. 3GPP RAN1#84bis, Busan, Korea, 11th-15th April 2016.
 - [13] R1-162750. Link-level performance evaluation on waveforms for new RAT, Spreadtrum Communications. 3GPP RAN1 #84bis, Busan, Korea, 11th-15th April 2016.
 - [14] R1-162890. 5G Waveforms for the Multi-Service Air Interface below 6 GHz, Nokia, Alcatel-Lucent Shanghai Bell. 3GPP RAN1#84bis, Busan, Korea, 11th-15th April 2016.
 - [15] R1-162925. Design considerations on waveform in UL for New Radio systems, InterDigital Communications. 3GPP RAN1#84bis, Busan, Korea, 11th-15th April 2016.
 - [16] R1-164176. Discussion on waveform for high frequency bands, Intel Corporation. 3GPP RAN1 #85, May 23-27, 2016, Nanjing, China.
 - [17] R1-162930. OTFS Modulation Waveform and Reference Signals for New RAT, Cohere Technologies, AT&T, CM-CC, Deutsche Telekom, Telefonica, Telstra. 3GPP RAN1#84bis, Busan, Korea, 11th-15th April 2016.
 - [18] 3GPP TS 38.211 V15.6.0 (2019-06), NR. Physical channels and modulation (Release 15).
 - [19] 3GPP TS 38.212 V15.6.0 (2019-06), NR. Multiplexing and channel coding (Release 15).
 - [20] 3GPP TS 38.213 V15.6.0 (2019-06), NR. Physical layer procedures for control (Release 15).
 - [21] 3GPP TS 38.214 V15.6.0 (2019-06), NR. Physical layer procedures for data (Release 15).
 - [22] 3GPP TS 38.101-1 V15.8.2 (2019-12), NR. UE radio transmission and reception. Part 1: Range 1 Standalone (Release 15).
 - [23] 3GPP TS 38.321 V16.0.0 (2020-03), NR. Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 16).
 - [24] 3GPP TS 38.323 V16.0.0 (2020-03), NR. Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification (Release 16).
 - [25] 3GPP TS 38.331 V16.0.0 (2020-03), NR. Radio Resource Control (RRC) protocol specification (Release 16).
 - [26] 3GPPTS 38.300 V16.1.0 (2020-03), NR. NR and NG-RAN Overall Description. Stage 2 (Release 16).

第2章

5G系统的业务需求 与应用场景

田文强 编著

近几十年，移动通信的演进极大地推动了社会的发展。从模拟通信到数字通信，从3G时代到4G时代，人们在日常生活中对移动通信的需求和依赖程度日益增加。2010年前后，面对可预见的爆发式数据增长，以及众多垂直行业的个性化通信需求，从国家层面、各个标准化组织至公司与高校等机构相继启动了针对下一代无线通信系统的需求分析与讨论^[1-8]，第五代移动通信系统研究随即拉开大幕。

| 2.1 业务需求与驱动力 |

每一代通信系统都与其时代背景息息相关。“大哥大”的年代满足了人们对无线通信体验的渴望，以GSM为代表的第二代通信系统则让更多人享受到了无线通信服务所带来的便利，3G、4G的快速发展适应了无线多媒体业务传输的需求，也铺平了移动互联网发展的道路。到了5G这样一个新的阶段，新的需求和驱动力又将是什么？首先毫无疑问应该将更优质的宽带通信服务纳入5G讨论的范畴，让更多人在更广的区域获得更好的通信体验，这是移动通信发展的一条亘古不变的道路。除此之外，还有哪些新的特征会在5G时代呈现？重新审视通信系统的设计蓝图，垂直行业所带来的专业化通信需求有望为未来无线通信系统的构建打开全新空间，其对社会发展的贡献也将更加深入、广泛。本节将围绕上述两个层面，具体分析5G时代的业务需求和驱动力特征。

2.1.1 永恒不变的高速率需求

速率一直以来是通信系统的核心，我们通常把无线通信系统比喻成一条信息高速公路，通信速率其实就是这条信息高速公路的基本运力。近年来，随着新业务形态不断出现，一方面，激增的业务量已让4G这条“道路”略显拥挤，另一方面，10年前设计的有限的“道路通行能力”已经成为诸多新兴业务应用落地的瓶颈。面对这种情况，通信行业的技术人员在努力通过资源配置、合理调度等方法对4G系统进行优化，尽量避免“堵车塞车”的情况发生。但不容否认的是，这类优化型的工作并不是解决问题的根本方法，建设新一代无线通信系统的需求逐步提上议事日程，且迫在眉睫，一些比较典型的速率提升需求来自以下几类业务^[3-5]。

● 增强型多媒体业务

我们常说的多媒体业务一般是指多种媒体信息的综合，包括文本、声音、图像、视频等形式。通信系统的一代代演进实际上也就是在不断地满足人们对于多媒体类业务交互传输的更高需求。当移动通信系统能够提供语音交互时，新的需求来自图像；当图像传输能够实现后，新需求又来自视频；当基本的视频传输需求得到支持后，新兴的多媒体业务需求又在不断涌现。这其中首先表现为对影像清晰程度的要求在不断提升，从普通的高清视频到4 K视频、8 K视频的传输，都在对无线通信系统的传输性能提出挑战，可以说，只要人们对感官体验的极致追求不止步，人们对“更清晰更丰富”的多媒体业务的新生需求就永不会止步。

● 沉浸式交互多媒体业务

如果说以清晰程度提升为代表的增强型多媒体业务还只是“量”的积累，那么可以说以增强现实（AR）、虚拟现实（VR）和全息通信为代表的沉浸式交互多媒体业务带来了“质”的改变。在沉浸式的多媒体业务中，以AR、VR观赛为例，为了保证用户体验的细腻性与临场感，多角度全方位采集的多路超高清视频数据流需要及时传输至终端，并在渲染等综合处理后输出，上述过程所需的无线传输能力与资源将远远超出原有通信系统的用户需求设定。更进一步，当人们开始考虑全息通信的场景时发现，只有当更大数量级的传输速率得到满足后，真正的全息业务才得以支撑和实现。

● 热点大容量通信业务

在为单用户提供高速率通信服务的同时，还需要由点到面地考虑特定热点区域的多用户大容量通信需求。在一些存在大量并发用户的场景中，如一些大型体育赛事、演出等场合，当聚集人群集中爆发出诸如视频分享、实时高清直播等需求时，这类高密度高流量特征的通信业务很难被现有通信系统所支持。因此，在商场、大型集会、节日庆典等热点区域或事件中，单位区域内通信设备众多且流量密度需求较高的情况下，如何保障大量用户同时获得其所期望的通信体验是有待分析和解决的问题。

面对上述变化与需求，新一代通信技术的赋能势在必行。

2.1.2 垂直行业带来的新变化

长久以来，如何构建良好的通信环境来满足人与人之间的通信需求是无线通信系统设计的一条主线。但近年，人们在不断追求自身感官所需的信息传输体验的同时，也开始逐渐思考如何让无线通信系统更广泛地应用于日常生产生活中，面向众多垂直行业的个性化通信需求为今后无线通信系统的演进方向带来了新的变化^[3-5]。

● 低时延的通信

通信系统设计在满足传输速率需求的基础上，还需要考虑业务启动的实时性。用赛跑打比方，新的系统不仅要“跑得快”，还必须“起跑快”。一方面，人们期望获得“即时连接”的极致感受，在这种体验中，等待时间需要被尽量压缩，甚至需实现“零”等待时间。例如，在云办公、云游戏、虚拟现实和增强现实等应用中，即时的传输与响应是上述业务成功的关键因素。可以预见，如果在云办公过程中每一步操作都伴随着极大时延，那么所带来的用户体验一定是糟糕的。另一方面，以智能交通、远程医疗为代表的诸多行业应用中，较大的传输时延也将直接影响特定业务的实现，甚至还会带来安全隐患。

● 高可靠的通信

除了上述“时延”需求以外，来自“可靠性”的信息传输需求也同样重要。以无人驾驶、工业控制等为代表的众多场景均需要高可靠性的连接作为基本通信保障。这些需求是显而易见的，如在无人驾驶的环境中，行驶车辆需要准确获取周边车辆、道路、行人的动态信息以调控自身驾驶行为，此时如果无法可靠获取上述信息，延后的操控判断或者错误的指令指示都将有可能造成难以预计的严重后果。

● 物联通信

为了在千行百业中应用移动通信技术，使万事万物都享受“无线连接”带来的便利，未来社会连接的规模和程度都将迅速增长。可以预期的是，“物联网”的普及所带来的连接总量、连接深度将远远超过现在人类用户的规模及水平。这些连接的“物”可以是一个简单的设备，如传感器、开关；也可以是一个高性能的设备，如我们常用的智能手机、车辆、工业机床等；还可以是一个更加复杂的系统，如智慧城市、环境监测系统、森林防火系统等。不同的场景、应用下，这些设备将构建起不同层次的物联通信体系，并表现出不同的连接规模、能耗、时延、可靠性、吞吐量、成本等特征，用于满足来自家居、医疗、交通、工业、农业等不同行业的特征化需求。

“物”的互联，相比于以往来看，是通信领域的又一突破。传统的通信系统用于满足人的感官需求，旨在拓展人的视听范围；而物的互联从根本上扩展了通信系统的服务空间，来自“万物互联”的需求将远远超过以往“人际通信”的需求，并且这种突破将触发未来通信系统的全方面性能扩展。

● 高速移动

对移动性的支持是无线通信系统的基本特征之一。通常会考虑到人的移动、车辆的移动，并在设计通信系统时做出针对性的设计以支持上述移动场景下的通信服务。然而，随着社会的发展，以高铁为代表的高速移动场景日益增多，高峰时期的高铁单日客流量可破千万人次，高速移动下的通信保障已不再是小众场景。如何同时为静态用户、动态用户、高速用户提供最佳用户体验已成为新的难题，也正因为如此，下一代通信系统有必要在设计之初就考虑这一问题、解决这一问题。

● 高精度定位

除了上述的基本通信场景外，一些增值业务需求也在逐渐呈现出来，其中包括高精度定位的需求。准确的定位能力对于当前众多行业应用来说都十分重要，如基于位置的服务、无人机控制、自动化工厂建设等都需要利用高精度的定位信息来支撑相应的业务。以往的通信系统并不能够完全支持上述定位需求，特别是很难满足一些高精度定位的需求，如何改善这种情况、扩展精度定位能力是下一代通信系统需要考虑和解决的又一问题。

| 2.2 5G 系统的应用场景 |

基于不同类型的 5G 通信场景、应用及服务需求，通过提取其共性特征，国际电联（ITU）最终将 5G 的典型应用场景划分为三个大类，分别是增强型移动宽带通信（eMBB）、高可靠低时延通信（URLLC），以及大规模机器类通信（mMTC），基本的业务与场景划分情

况如图 2-1 所示^[3]。

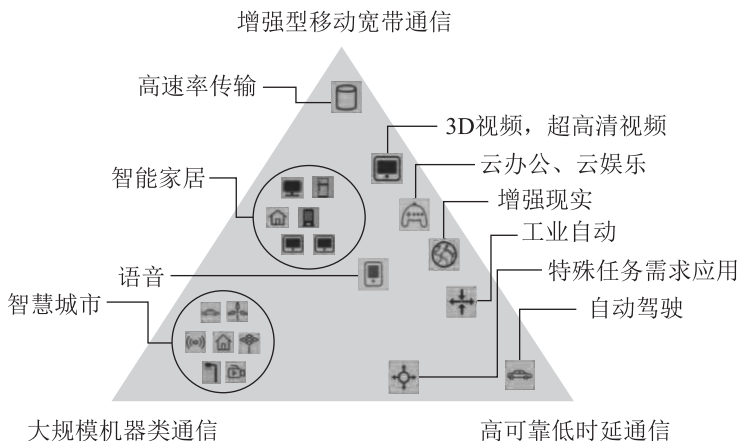


图 2-1 ITU 对未来通信系统的基本业务与场景分类^[3]

2.2.1 增强型移动宽带通信

移动宽带通信旨在满足人们对多媒体业务、服务、数据的获取及交互需求，这些需求随着社会的发展也在不断演进更新，相应地也需要进一步构建增强型移动宽带通信系统加以适配，从而满足来自各个应用领域的最新通信支撑要求，以及来自不同用户的个性化服务需求。具体来说，目前增强型移动宽带业务可细分为两类，分别是热点覆盖通信和广域覆盖通信。

对热点覆盖通信来说，其特征是在一些用户密集的区域或事件中，往往存在极高的数据吞吐量需求和用户容量需求，而与此同时，该场景下用户对移动性的期望相比广域覆盖场景有所降低。例如在大型体育赛事中，聚集的观众可能存在极高的数据传输需求，但用户有可能长时间处于同一位置，且周围环境相对稳定。

对广域覆盖通信来说，业务的无缝覆盖以及对中高速移动性的支持将是必须考虑的因素，任何用户都不期望业务服务时断时续，当然用户数据速率的提升也必不可少，但是相比于局部热点覆盖业务来说，广域覆盖场景下的用户数据速率要求可以稍作放松。因为在保证广覆盖、中高速移动性的同时要求极高的传输速率对于通信系统的设计、构建、运营来说都将是极大的挑战。

增强型移动宽带业务的特点是将上一代移动通信系统的性能进行全面升级，并进一步细分广覆盖和热点高速率需求，从而有针对性地构建出下一代无线通信系统的基本框架和能力。

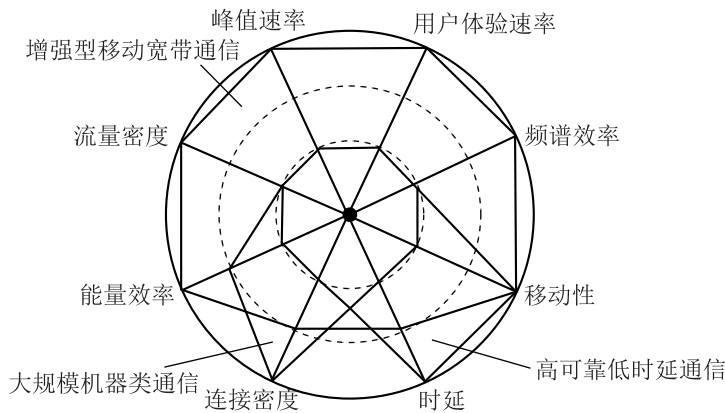
2.2.2 高可靠低时延通信

高可靠低时延通信是 5G 系统三大典型场景的重要支撑部分，主要面向一些特殊部署及应用领域，而这些应用中对系统的吞吐量、时延、可靠性都会有极高的要求。典型的实例包括工业生产过程的无线控制、远程医疗手术、自动驾驶、运输安全保障等，可以看出这些应用中任何差错、延迟带来的后果都将非常严重，所以相比普通的宽带传输业务，这些需求将会在时延和可靠性方面带来额外的极端性能指标要求，以及很高的资源开销与成本代价。考虑到上述各方面的因素，有必要在 5G 系统构建过程中将高可靠低时延通信与普通的增强型移动宽带通信加以区分，开展专门研究、设计和部署。

2.2.3 大规模机器类通信

大规模机器类通信是另一类极具特点的 5G 场景，其标志性应用是以智能水网、环境监测等为代表的大规模物联网部署与应用，这类通信系统的首要特征为终端规模极其庞大，此外，相应伴随的特点是这些大规模连接的设备所需传输的数据量往往较小，时延敏感性也较弱，同时还要兼顾低成本、低功耗的要求，以满足大规模机器设备能够实际部署的市场条件。

综上所述，eMBB、URLLC、mMTC 构建出了 5G 时代的三大典型场景。图 2-2 从场景与特征指标对应的角度出发，再次诠释了这三大场景的不同与联系。可以看到，eMBB 业务是 5G 时代的基础通信场景，其在各项 5G 关键性能上都有较高的需求，只是不对超大规模连接数、极端低时延高可靠传输做要求。mMTC 和 URLLC 类业务分别对应了两类不同特征的特殊通信需求场景，各自强调了大连接数以及低时延、高可靠传输的特征，以补充 eMBB 自身设定的不足。



2.3 5G 系统的性能指标

未来社会对无线通信系统的需求持续提升，并将依托三大典型应用场景呈现出专业化、多样化两个层面的需求形态。围绕着上述基本设定，ITU 经过多次讨论和意见征集，最终拟定了 5G 通信系统的八条基本指标^[3,7,8]，包括峰值速率、用户体验速率、时延、移动性、连接密度、流量密度、频谱效率和能量效率，如表 2-1 所示。

表 2-1 5G 系统关键能力指标

指 标	基 本 描 述
峰值速率	理想条件下，终端的最大可达数据速率
用户体验速率	覆盖区域内，移动终端普遍可以达到的数据速率
时延	网络从发送端传输数据包至接收端正确接收后的单向空口时延
移动性	在保证服务质量的条件下，能够支持的收发双方的最大相对速度
连接密度	单位区域内的总连接数及可接入数
流量密度	单位区域内所能支持的总吞吐量
频谱效率	每小区内单位频谱资源提供的吞吐量
能量效率	网络端/用户端的每焦耳能量所能传输的比特数量

峰值速率是一个通信系统的最高能力体现,ITU 对 5G 通信系统峰值速率的基本定义是,在理想条件下,终端可以达到的最高数据传输速率。这里的峰值数据速率是最高的理论传输速率,其基本假定是所有可配置的无线资源都分配给了一个用户,且不考虑传输错误、重传等影响因素时,该用户可以达到的数据传输性能。对 5G 通信系统来说,峰值速率较以往通信系统将有大幅提升,下行 20 Gbit/s、上行 10 Gbit/s 是 5G 系统设计需要达到的峰值速率指标。但这并不意味着人人都能畅享如此高的传输速率,当考虑到多用户场景以及实际可用无线资源受限等具体限定条件后,系统峰值速率并不是人人可畅享的速率体验。

鉴于系统峰值速率并不能用来表征普通用户的实际通信服务感受,5G 系统设计时将用户体验速率作为专项指标引入 5G 性能评价体系中。该指标重点考虑特定区域内的普遍可达速率,并考虑有限覆盖和移动性对用户体验速率的影响。对普通用户来说,用户体验速率的高低具有十分重要的参考意义。从具体目标数值上看,100 Mbit/s 的速率将是 5G 通信系统中用户体验速率的基本参考值。

在时延方面,每一代通信系统都尽可能降低时延以提供更好的用户体验。在下一代通信系统中,由于既要考虑人对通信时延的感受,又要考虑来自机器通信的低时延需求,所以时延这一指标的重要性显得更为突出,以低时延高可靠为代表的 URLLC 类业务将构成 5G 通信系统的重要支撑内容。在 4G 时代,我们考虑的最小时延要求是 10 ms 量级,到了 5G 时代,对一些时延敏感应用来说,这一指标显得有些捉襟见肘。在考虑新的时延指标设定时,ITU 将 5G 系统的端到端时延进一步压缩至 1 ms 级别,这一压缩可以说给整个 5G 通信系统设计带来了极大的挑战,即使是只考虑物理层的端到端 1 ms 时延都是极具难度的课题,更何况是高层、应用层的低时延端到端传输。面对这一难题,可以说需求与挑战并存,在后续章节中大家可以看到在全世界通信工作者的共同努力下,众多的针对性设计方案被引入 5G 通信系统中,以期尽可能达到上述低时延目标。

移动性是通信系统的另一特征指标。基本的移动性需求来源于行人的移动和车载用户的移动,而随着社会的高速发展,目前最具挑战的移动性需求已转变为来自于高铁等特殊高速场景的移动性需求。对于 5G 通信系统来说,500 km/h 的时速被作为移动性的关键指标,也就是说当人们坐在高铁上高速穿行于山川大河之间时,5G 通信系统需要保障车厢内用户的高质量通信需求,而如何在高速移动场景中持续保证用户服务质量将是移动性指标背后相关技术方案设计的关键。

连接密度是通信系统在单位区域内能够满足特定服务需求的总连接数。进一步,上述特定服务需求可简化为在 10 s 内成功传输一个 32 Byte 的小包数据。可以看出,该指标对速率、时延的要求相对较低,这主要考虑了环境监测、智慧城市等大规模物联网场景的实际数据特征。对于连接规模的定义,当前 ITU 的基本预期是“百万连接”。但是,如果只说明百万连接这个数值对诠释连接密度指标来说还不够,究竟是一个城市还是一个小区需要支持这样的规模?也就是说需要明确基本定义中的单位区域是如何界定的,针对这个问题,ITU 同样给出了相应描述,即需要在 1 km² 的范围内支持上述百万连接。

流量密度是指单位区域内可以支持的总业务吞吐量,可以用于评估一个通信网络的区域业务支撑能力,具体来说流量密度通过每平方米区域内网络吞吐量作为评估标准,其与特定区域内基站部署、带宽配置、频谱效率等网络特征均直接相关。ITU 提出的流量密度参考指标是每平方米区域内需支持 10 Mbit/s 数据传输的量级。那么是否对各个应用场景都需要这样一个相对较强的流量密度指标呢?答案是否定的。例如,在物联网或者大范围覆盖通信场

景中也要求达到这样的高流量密度指标显然是不必要的。一般来说只有当考虑一些热点覆盖类的业务需求时，才需要重点关注网络流量密度的特征，并利用相应的技术方案来满足热点区域内大吞吐量的需求。如果说速率、时延等指标是单兵作战能力的评估标准的话，流量密度更像一个团队在特定任务中整体战斗力的体现。

频谱效率的基本定义是单位频谱资源上所能提供的吞吐量，这是一项非常重要的通信指标，在有限带宽内通过各种技术手段不断提升吞吐量水平，是移动通信产业几十年来不断努力的目标。从时分、频分、码分的演进，到 MIMO 技术的不断迭代，其出发点都是让有限频谱资源得到更加充分的利用。对 5G 通信系统来说，怎样更好地利用其频谱资源，实现频谱效率相比以往通信系统的较大提升，是摆在通信工作者面前的又一挑战。以大规模 MIMO 为特征的方案设计与实现将是新阶段提升频谱效率的重要途径，也是 5G 通信系统的重要技术支撑。此外，对于非授权频谱的有效利用，虽然不能直接提高频谱效率，但能降低频谱的使用成本，将是充分利用频谱资源的另一条道路；对于非正交多址技术的研究与探索，则是提升频谱效率的又一重要尝试。这部分内容也将在后续章节中相应介绍。

绿色通信是未来通信发展的方向，在有效提升通信系统各项指标性能的同时兼顾能耗影响对通信产业的健康发展和社会资源的合理利用都有着长远的意义。例如，从网络侧来看，基站等设备的耗电已成为网络运营的重要成本支出之一。从终端侧来看，在以电池为主的供电方式下，过高的能耗带来的电池寿命缩短等问题势必会带来不佳的用户体验。此外，通信系统在整个社会生产生活中所消耗的能源比例不断提升，也是一个不可忽视的问题。基于这些实际问题，5G 网络的设计与建设从一开始就关注能耗问题，并将能量效率作为基本指标之一。在后续章节中可以看到，众多用于降低能耗、提高效率相关的技术方案已被引入 5G 通信系统之中，以期构建出面向未来的绿色通信体系。

如图 2-3 所示，面向上述各项指标所构建出来的下一代移动通信网络相比现有通信网络在各方面都将有明显的提升，5G 网络将会是一张灵活支持不同用户需求的网络，同时也将是一张高效支撑人与人、人与物、物与物相连的绿色网络。

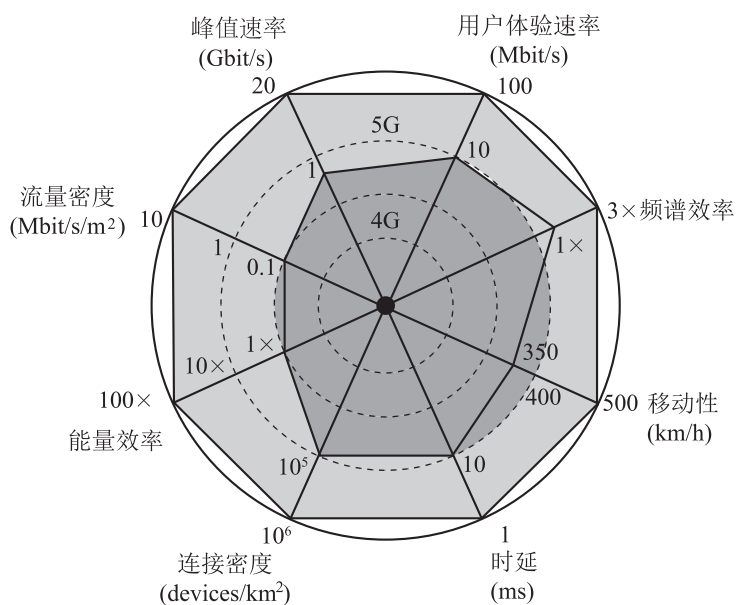


图 2-3 5G 整体性能指标增强^[3]

| 2.4 小结 |

本章从业务需求、应用场景、性能指标三个方面对 5G 系统进行了分析和说明，有助于读者了解 5G 系统设计所面临的需求与挑战。具体来看，持续的高速率扩展与垂直行业带来的新变化是推动 5G 系统构建的核心驱动力，以 eMBB、URLLC、mMTC 为代表的三大应用场景从产业的高度对 5G 系统的服务对象进行提炼和总结，对峰值速率、用户体验速率、时延、移动性、连接密度、流量密度、频谱效率和能量效率等指标的明确定义与场景对应则为 5G 系统设计提供了基本方向与目标指引。

参考文献

- [1] IMT-2020 (5G) 推进组, 5G 愿景与需求白皮书, 2014.
- [2] IMT-2020 (5G) 推进组, 5G 概念白皮书, 2015.
- [3] Recommendation ITU-R M.2083-0 (2015-09), IMT Vision-Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond.
- [4] Report ITU-R M.2320-0 (2014-11), Future technology trends of terrestrial IMT systems.
- [5] Report ITU-R M.2370-0 (2015-07), IMT Traffic estimates for the years 2020 to 2030.
- [6] Report ITU-R M.2376-0 (2015-07), Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz.
- [7] 3GPP TR 37.910 V16.1.0 (2019-09), Study on self evaluation towards IMT-2020 submission (Release 16) .
- [8] 3GPP TR 38.913 V15.0.0 (2018-06), Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (Release 15) .

第3章

5G系统架构

刘建华 杨 宁 编著

3.1 5G 系统侧网络架构

3.1.1 5G 网络架构演进

在 LTE 网络中，终端的会话管理和终端的移动性管理通过同一个网络实体处理，导致网络演进的不灵活性和不可扩展性。

5G 移动通信目标是实现万物互联，支持丰富的移动互联网业务和物联网业务，4G 的网络架构主要用于满足语音要求和传统的移动宽带（Mobile Broadband，MBB）业务，已经不能高效地支持此类业务。

在制定 5G 网络架构之前，3GPP 首先对 5G 系统及网络架构提出如下需求^[1]。

- 能够支持不同 RAT 类型，包括 E-UTRA、non-3GPP 接入类型；不支持 GERAN 和 UTRAN 接入。在 non-3GPP 接入类型中，应该支持 WLAN 和固网接入；应该支持卫星无线接入。
- 针对不同的接入系统支持统一的鉴权架构。
- 支持终端同时通过多个接入技术的同时连接。
- 允许接入网和核心网独立演进，最大化解耦接入网和核心网。
- 支持控制平面和用户平面功能分离。
- 支持 IP 包、非 IP 包、Ethernet 包的数据传输。
- 有效支持不同程度的终端移动性，包括业务连续性。
- 满足终端和数据网络之间不同业务的时延需求。
- 支持网络切片功能。
- 支持针对垂直行业的网络架构增强。
- 支持网络能力开放等。

为了能够更好、更高效地满足上述需求，同时，为了支持运营商更好地实现服务的快速创新、快速上线、按需部署等，3GPP 在 TSG SA#73 次会议采纳了控制平面和用户平面完全分离的网络架构。这种设计方式，有利于不同网元独立的扩容、优化和技术演进。用户面

可以集中部署也可以分布式部署，在分布式部署时可以将用户面下沉到更接近用户的位置，提升对用户请求的响应速度；而控制面则进行集中管理与集中部署，提升可维护性和可靠性。

同时，移动网络需要一种开放的网络架构，通过网络架构的开放支持不断扩充的网络能力，通过接口开放支持业务访问提供的网络能力。基于以上考虑，3GPP 在 TSG SA#73 次会议采纳了 5G 服务化网络架构（Service Based Architecture, SBA）；针对 5G 核心网功能进行了重构，以网络功能（Network Function, NF）的方式重新定义了网络实体，各 NF 对外按独立的功能（服务）进行实现并可互相调用，从而实现了从传统的刚性网络（网元固定功能、网元间固定连接、固化信令交互等）向基于服务的柔性网络的转变。基于服务化的网络架构解决了点到点架构紧耦合的问题，实现了网络灵活演进，保障了各种业务需求。

此外，5G 网络引入了网络切片架构。网络切片架构是在网络功能虚拟化、软件化的基础上，把网络切成多个虚拟且相互隔离的子网络，分别应对有不同业务质量要求的服务，再将网络功能进一步细粒度模块化，实现灵活组装业务应用和业务客户化定制功能。

3.1.2 5G 网络架构和功能实体

5G 网络架构设计采用面向服务的设计思路，网络功能间的交互采用两种不同的方式呈现^[2]。

- 基于服务化的呈现方式。在此种方式中，控制平面的网络功能允许其他授权的网络功能获取此网络功能的服务。
- 基于参考点的呈现方式。在此种方式中，任意两个网络功能之间采用点到点的参考点进行描述，两个网络功能之间通过参考点进行交互。

图 3-1 给出了基于服务化呈现方式的非漫游参考网络架构。

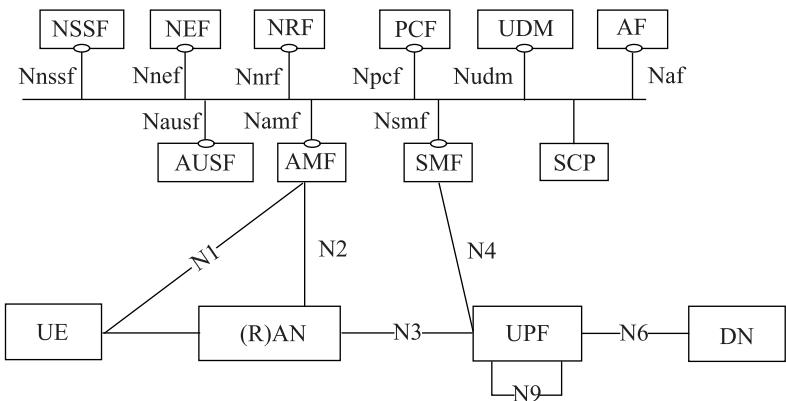


图 3-1 基于服务化呈现方式的非漫游参考网络架构（引自^[1] 中图 4.2.3-1）

图 3-2 给出了基于参考点呈现方式的非漫游架构。

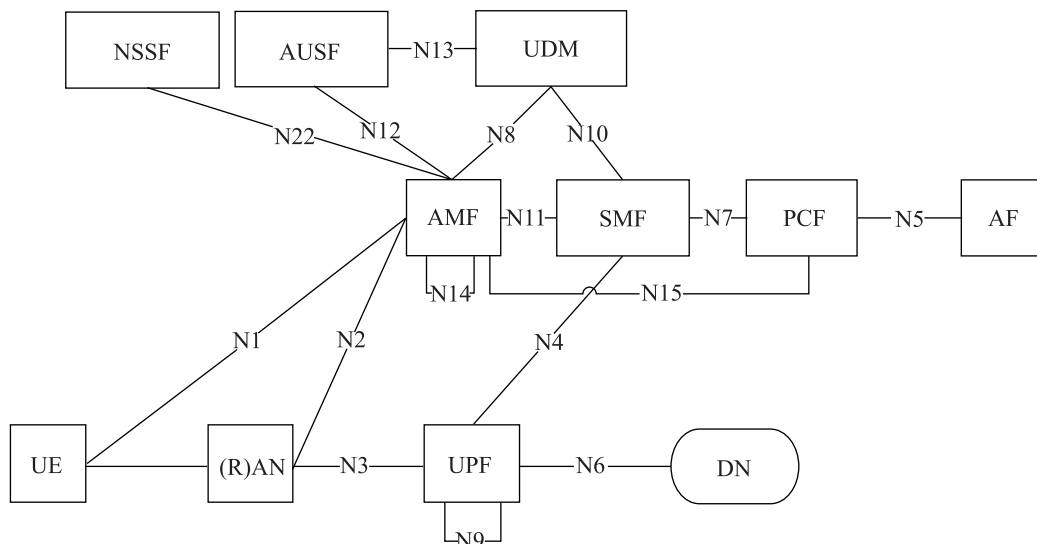


图 3-2 基于参考点呈现方式的非漫游架构（引自^[1] 中图 4.2.3-2）

5G 系统架构包含以下网络功能，具体功能介绍如下所述。

- 接入及移动性管理功能（Access and Mobility Management Function, AMF），处理所有终端与连接和移动性管理有关的任务，如注册管理、连接管理、移动性管理等。
- 会话管理功能（Session Management Function, SMF），包括会话的建立、修改和释放，UPF（User plane Function）和 AN（Access Node）节点之间的隧道维护，终端 IP 地址分配和管理，选择和控制 UPF 功能，计费数据收集和计费接口支持等。
- 用户面功能实体（User Plane Function, UPF），包括用户平面数据包的路由和转发，用户平面的 QoS 处理，用户使用信息统计并上报，与外部数据网络（Data Network）交互等功能。
- 统一数据管理功能（Unified Data Management, UDM），包括用户签约数据的产生和存储，鉴权数据的管理等功能，支持与外部第三方服务器交互。
- 鉴权服务功能（Authentication Server Function, AUSF），AUSF 用于接收 AMF 对终端进行身份验证的请求，通过向 UDM 请求密钥，再将下发的密钥转发给 AMF 进行鉴权处理。
- 策略控制功能（Policy Control Function, PCF），支持统一的策略框架去管理网络行为，并向其他网元和终端提供运营商网络控制策略。
- 网络存储功能（NF Repository Function, NRF），用来进行 NF 登记、管理、状态检测，实现所有 NF 的自动化管理。每个 NF 启动时，必须要到 NRF 进行注册登记才能提供服务，登记信息包括 NF 的类型、地址、服务列表等。
- 应用功能（Application Function, AF），可以是运营商内部的应用，如 IMS，也可以是第三方的服务，如网页服务，视频，游戏等。如果是运营商内部的 AF，与其他 NF 在一个可信域内，则直接与其他 NF 交互访问；如果 AF 不在可信域内，则需要 NEF 访问其他 NF。
- 网络开放功能（Network Exposure Function, NEF），负责管理 5G 网元对外开放网络数据，外部非可信应用需要通过 NEF 访问 5G 核心网内部数据，以保证 3GPP 网络的安全。NEF 提供外部应用 QoS 能力开放、事件订阅、AF 请求分发等功能。
- 网络切片选择功能（Network Slice Selection Function, NSSF），主要用于网络切片的选择。
- 数据网络（Data Network, DN），在这里包括运营商业务，第三方业务视频、游戏业务等。

整体来说，5G SBA 网络架构中的核心网具有如下关键特性。

- 网元功能松耦合及服务化。传统核心网网元由一组彼此紧密耦合的功能组成。为了支持新的业务需求，5G 网络采用基于服务化的网络架构，组成核心网的各网络功能实体在功能级别上解耦/拆分，网络功能实体拆分为若干个自包含、自管理、可重用的网络功能服务（NF Service，NFS）。网络功能服务可独立升级、独立扩展，在此过程中，网络功能服务提供标准化的服务接口，便于与其他网络功能服务通信。
- 网络接口轻量化。不同网络功能实体之间的接口采用成熟的标准化协议，例如 http 协议，便于快速实现网络接口的开发和网络功能实体的快速升级。同时，采用轻量化的网络接口实现了向业务应用开放网络的能力。
- 网络管理和部署统一化。5G 核心网新引入了网络存储功能实体，用于提供网络功能实体的服务注册管理以及服务发现机制等功能，核心网通过这种服务化的机制实现了自动化运行。
- 按需网络切片和 QoS（Quality of Service）保障。核心网中的网络功能实体可以为不同切片服务，根据切片配置，核心网组成不同的切片网络。不同的应用可根据业务的要求使用不同的网络切片资源。5G 网络实现了基于不同会话设置不同 QoS 的策略，增加了独立的网络数据分析功能，可以根据会话、终端、网络的状态实时调整 QoS 策略。

3.1.3 5G 端到端协议栈

在终端与网络通信过程中，终端和网络会遵循对等协议栈原则，即在每一个接口上都有对等协议功能进行对应。本节介绍了 5G 系统中端到端协议栈，此处只列出了主要接口的对等协议栈以供参考。

● 5G 控制平面端到端协议栈

控制平面用来承载终端与网络侧的交互信令，控制平面数据传递是通过 Uu 接口-N2 接口-N11 接口实现的，不同网元之间的信令采用对端协议栈的方式实现。如图 3-3 所示，NAS-SM 和 NAS-MM 都属于 N1 接口的 NAS 层协议；其中，NAS-SM 支持终端和 SMF 之间的会话管理功能，NAS-MM 支持终端和 AMF 之间的移动性管理功能，如注册管理，连接管理。NAS 层协议在 Uu 接口通过终端和接入网之间的 RRC 协议层承载。N2 接口是接入网和核心网之间的接口，其中 NG-AP 协议层用于处理核心网和接入网之间的信令连接，通过 SCTP（Stream Control Transmission Protocol）协议承载。

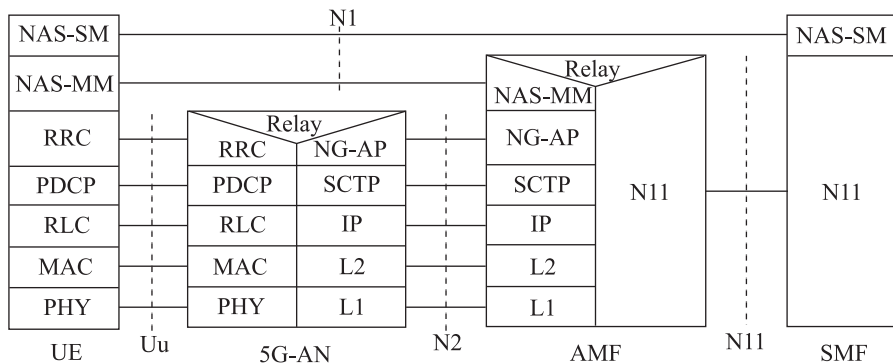


图 3-3 终端和核心网之间端到端控制平面协议栈（引自^[1] 中图 8.2.2.3-1）

● 5G 用户平面端到端协议栈

图 3-4 为用户平面用来承载终端应用层的数据，用户平面数据传递是通过 Uu 接口-N3 接口-N9 接口-N6 接口路径进行传输的。其中，N6 接口是 5G 网络与外部数据网络（Data Network）之间的接口，是数据在网络侧的进出口。在 5G 中，针对不同的应用层采用不同类型的 PDU 承载。目前支持的 PDU 类型有 IPv4、IPv6、IPv4v6、以太网、无结构等。不同 PDU 类型的协议栈对应各自的协议栈。用户的 PDU 数据在 Uu 接口通过接入协议层承载，在骨干网（N9、N3 接口）中采用 GTP-U 协议承载。

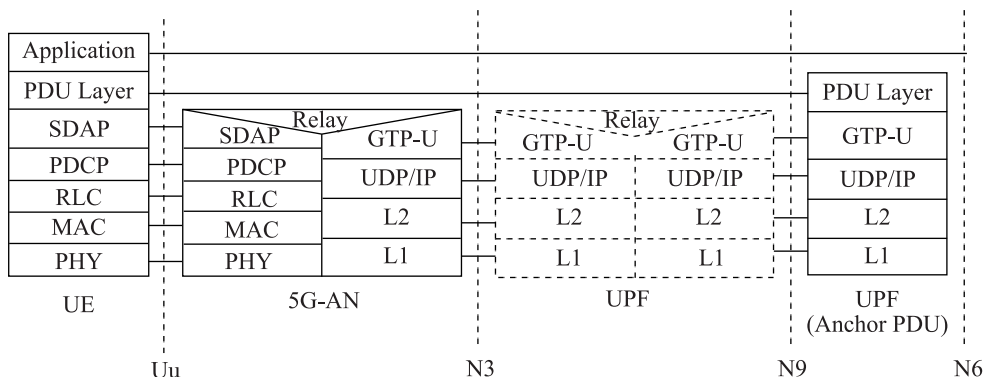


图 3-4 终端和核心网之间端到端控制平面协议栈

3.1.4 支持非 3GPP 接入 5G

在 TSG SA#73 次会议上，3GPP 同意支持终端能够通过 3GPP 以外的接入技术（如 WLAN 网络）接入到 5G 网络，实现运营商能够控制和管理通过非 3GPP 技术接入的终端，同时也给终端接入到运营商网络提供了多种方式。

图 3-5 提供了终端通过非 3GPP 接入到 5G 的网络架构。非 3GPP 接入网包含非授信和授信两种方式。非授信网络通过非 3GPP 互操作功能（Non-3GPP InterWorking Function, N3IWF）连接到核心网；授信网络通过授信非 3GPP 网关功能（Trusted Non-3GPP Gateway Function, TNGF）连接到核心网。N3IWF 和 TNGF 分别通过 N2 和 N3 接口连接到核心网的控制平面和用户平面。在此过程中，终端决定采用授信还是非授信非 3GPP 网络接入到 5G 核心网。

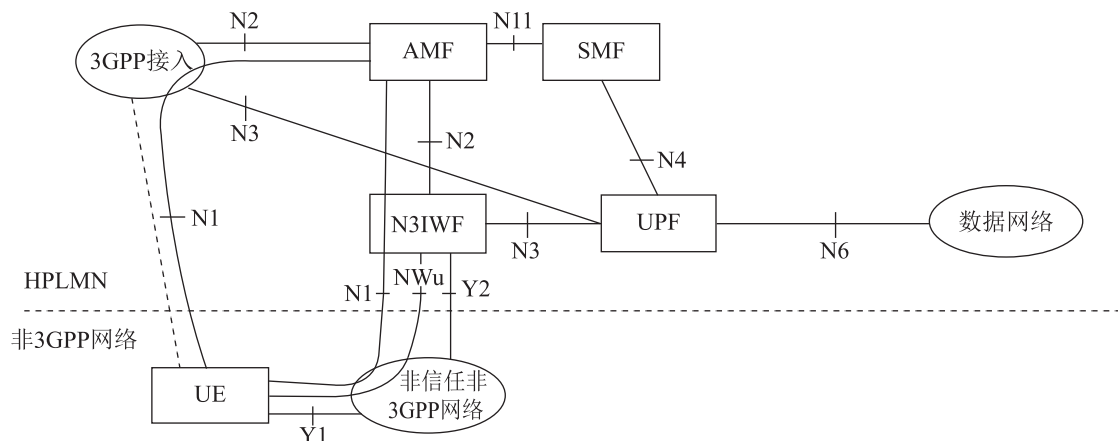


图 3-5 非 3GPP 接入到 5G 的网络架构（引自^[1] 中图 4.2.8.2.1-1）

- 当终端决定采用非授信的非 3GPP 接入到 5G 核心网时：
 - 终端首先选择并连接一个非 3GPP 网络；
 - 终端选择一个 PLMN 和此 PLMN 中的 N3IWF，PLMN 的选择和非 3GPP 接入网的选择是互相独立的过程。
- 当终端决定采用授信的非 3GPP 接入到 5G 核心网时：
 - 终端首先选择 PLMN；
 - 终端选择一个能可靠连接到 PLMN 的 TNAN，TNAN 的选择受 PLMN 选择的影响。

当终端通过 3GPP 接入网和非 3GPP 接入网同时接入到网络时，针对 3GPP 接入和非 3GPP 接入分别存在 N1 连接。终端可以通过 3GPP 和非 3GPP 接入到不同的 PLMN；终端也可以通过 3GPP 接入网和非 3GPP 接入网同时注册到两个不同的 AMF。

3.1.5 5G 和 4G 网络互操作

5G 网络引入之后，在一些场景中，为了保证用户的业务体验，需要支持 5G 网络和 4G 网络的无缝互操作。例如，5G 网络没有做到全覆盖或者部分业务无法获得 5G 网络支持或者运营商需要将部分终端负载均衡到 4G 网络。因此，5G 的商用部署进程将是一个基于 4G 系统进行的长期的替换、升级、迭代的过程；在 5G 覆盖不完善的情况下，4G 系统也是保障用户业务连续性体验的最好补充。

基于 3GPP 现阶段的结论，本书仅讨论 5G 与 4G 直接的融合组网及互操作技术，暂不涉及 5G 与 2G/3G 直接的互操作。

4G 和 5G 融合组网意味着网络、业务均需要进行一体化的融合演进。为了实现这一目标，在 4G 网络到 5G 网络的演进过程中，用户签约数据融合、网络策略融合、数据融合以及业务连续性是最主要考虑的问题。基于此网络演进需求，4G 和 5G 网络部分网元需要进行合设，如 HSS+UDM、SMF+PGW-C 和 UPF+PGW-U，如图 3-6 所示。其中 N26 接口为可选接口，根据运营商的部署策略和业务需求决定是否设置。

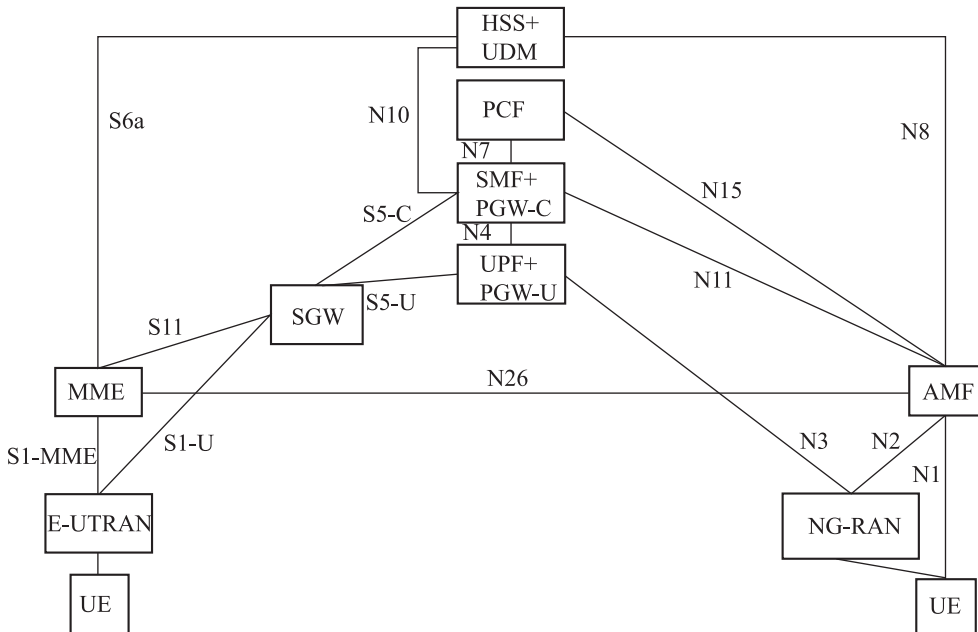


图 3-6 4G 和 5G 互操作系统架构（引自^[1] 中图 4.3.1-1）

同时，4G 和 5G 网络网元合设除了数据和用户状态的统一管理外，大部分 4G 和 5G 网络间的交互通过网元内部接口实现，不需要单独定义标准化接口，简化了互操作处理流程，减少了交互时延。

PGW-C 与 SMF 合设以及 PGW-U 与 UPF 合设，能够支持 4G/5G 切换过程中的业务连续性，保证用户的无缝切换体验；用户面网元合设使得切换过程中不需要变更用户面锚点，当终端在 5G 和 4G 网络之间进行移动时，终端的地址保留；终端的上下文在 MME 和 AMF 之间传递，实现了业务连续性和用户对于移动性的无感知，同时节省了业务处理资源。

3.2 无线侧网络架构

在 5G 网络架构的讨论中，各个运营商根据自身网络演进需求提出了多种可能的网络架构，希望能够尽可能在继承现有网络节点资源的基础上，使用 5G 关键技术提升性能。因此由于对 4G 网络的存续时间的理解不同以及演进路径的不同，演化出了很多不同版本的网络架构。

有关 5G 网络架构的讨论最早是从 2016 年 4 月的 RAN3#91bis 会议开始，并且在此次会议上确定后续将由 TR38.801 来负责描述相关内容^[4]。在本次会议中，不同公司针对 5G 无线网络场景、功能分割以及架构提出了建议^[5-8]，最终认为无线网络架构可能由于接入网与核心网络之间不同的组合，从而导致不同的形态，并将其初步描述在文献 [9] 中。

在 2016 年 5 月的 RAN2#94 次会议讨论中，基于前期的邮件讨论，初步形成了讨论文件^[14]，其中重点形成了 4G 接入网/5G 接入网与 4G 核心网/5G 核心网的组合方式，并初步确定了在后续研究中将会针对 4G-5G 耦合的 3 种方式（见图 3-7）与 5G 独立工作的两种方式（见图 3-8）继续进行研究。

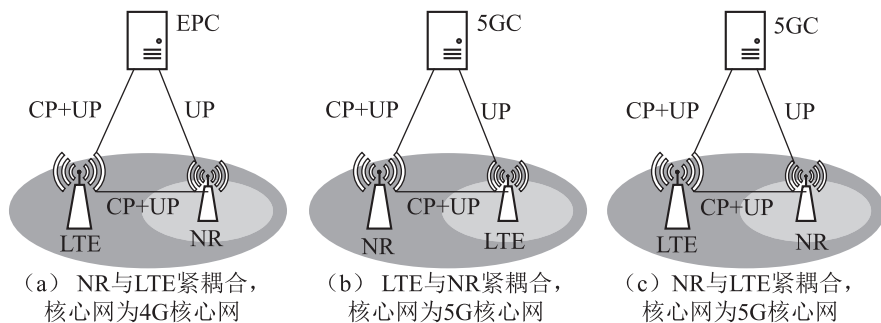


图 3-7 4G-5G 耦合的 3 种方式

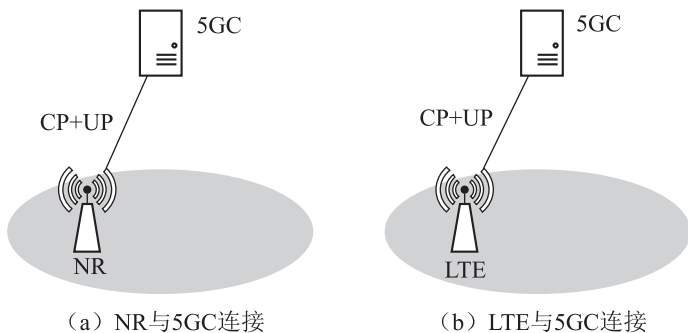


图 3-8 5G 独立工作的两种方式

此讨论文件在 RAN2、RAN3 与 SA2 举行的联合会议进行了讨论，但是未能得到任何结论，仅是在后续 RAN2 的讨论中，将部分场景描述在 TR38.804 中^[15]。

在 2016 年 6 月韩国釜山举行的 RAN#72 次全会上，针对该问题再次进行了讨论^[17]。在此讨论文件中，将 4G/5G 接入网与 4G/5G 核心网的组合列出（如表 3-1 所示）。

表 3-1 4G/5G 接入网与 4G/5G 核心网的组合

组 合	4G 核心网	5G 核心网
4G 接入网 LTE	选项 1	选项 5
4G 接入网 LTE（主）+5G 接入网 NR（辅）	选项 3	选项 7
5G 接入网 NR	选项 6	选项 2
5G 接入网 NR（主）+4G 接入网 LTE（辅）	选项 8	选项 4

- 选项 1：该架构为传统 LTE 及其增强，如图 3-9 所示。
- 选项 2：5G 独立工作模式，接入网为 5G NR，核心网为 5GC，该架构应为运营商进行 5G 部署的终极模式，即未来所有 4G 网络均演进为 5G 网络时呈现的网络架构，如图 3-10 所示。

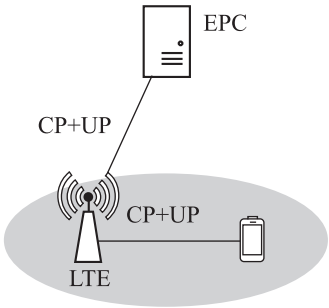


图 3-9 4G/5G 网络架构选项 1 示意图

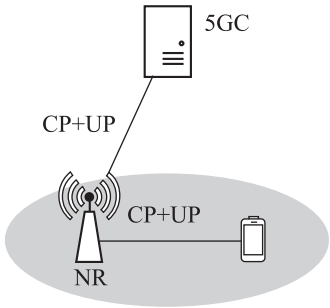


图 3-10 4G/5G 网络架构选项 2 示意图

- 选项 3：EN-DC 模式，接入网以 4G LTE 为主，5G NR 为辅，核心网为 4G EPC，该架构的提出主要在于运营商希望能够尽可能重用现有 4G 接入网与核心网投资，同时又能使用 5G 节点的传输技术提升网络性能。此外也需要注意尽管在此架构中辅节点也具备控制面功能，但与主节点相比，其仅能够支持部分控制面功能、主要控制面功能及其相应信令仍然由主节点承载，如图 3-11 所示。
- 选项 4：NE-DC 模式，接入网以 5G NR 为主，4G LTE 为辅，核心网为 5GC，该架构的提出主要是运营商考虑在 5G 网络大规模部署的情况下，4G LTE 网络未能完全演进完成，且网络中也存在少量 LTE 终端时，可以灵活使用 4G LTE 网络资源，如图 3-12 所示。
- 选项 5：eLTE 模式，接入网为 4G LTE 增强，核心网为 5GC，该网络架构的提出主要在于部分运营商仅考虑核心网升级以支持新的 5G 特性，例如新的 QoS 架构，但是仍然重用 4G 无线网络的能力，如图 3-13 所示。
- 选项 6：接入网为 5G NR，核心网为 4G EPC，该网络架构在讨论中并未有运营商提出较强的部署预期，因此在较早阶段即被排除，如图 3-14 所示。
- 选项 7：NG EN-DC，接入网以 4G LTE 为主，5G NR 为辅，核心网为 5GC，该网络架

构考虑在选项 3 的基础上，升级核心网为 5GC 时的场景，如图 3-15 所示。

- 选项 8：接入网以 5G NR 为主，4G LTE 为辅，核心网为 EPC，该网络架构在讨论中并未有运营商提出较强的部署预期，因此在较早阶段即被排除，如图 3-16 所示。

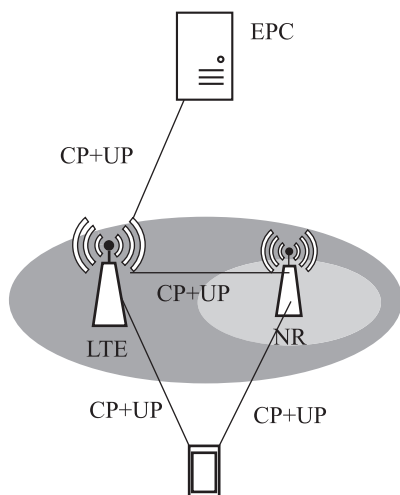


图 3-11 4G/5G 网络架构选项 3 示意图

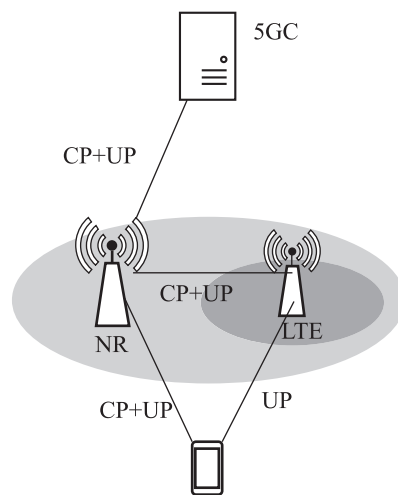


图 3-12 4G/5G 网络架构选项 4 示意图

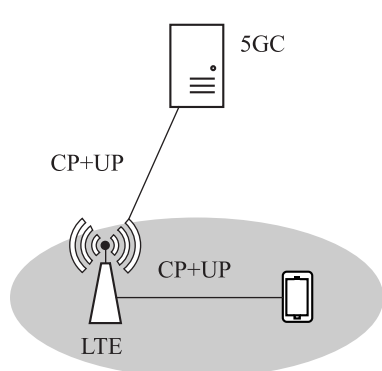


图 3-13 4G/5G 网络架构选项 5 示意图

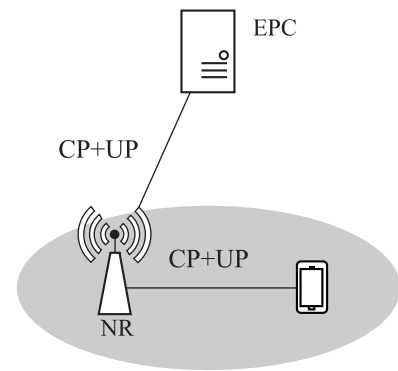


图 3-14 4G/5G 网络架构选项 6 示意图

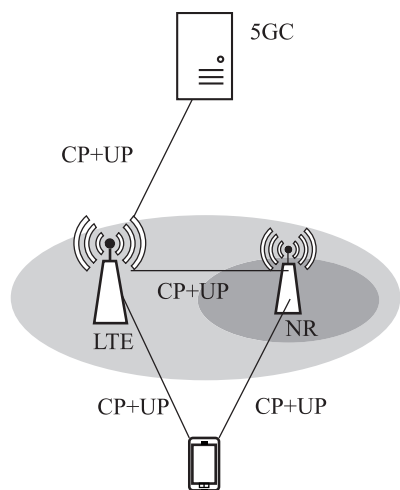


图 3-15 4G/5G 网络架构选项 7 示意图

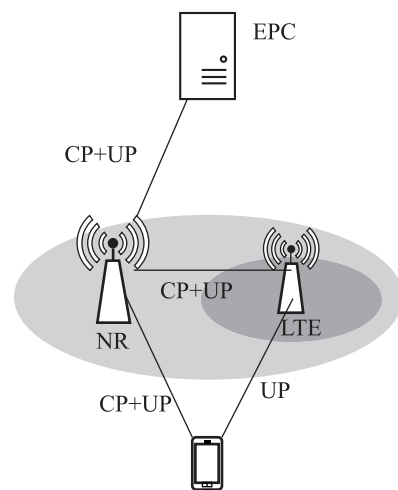


图 3-16 4G/5G 网络架构选项 8 示意图

经过讨论,运营商普遍认同选项6和选项8并不在其演进的路径上,因此需求较弱,首先将这两个选项删除。此外,由于选项3以4G LTE部署为主,以5G NR为辅,因此可以尽可能重用现有4G网络投资,从而作为5G标准较高优先级进行研究和标准化;同时针对其他选项(选项2、选项4、选项5、选项7)同步进行研究和标准化^[17]。

在2016年9月美国新奥尔良举行的RAN#73次会议上,由于部分运营商希望能够加速5G标准化的进度,从而快速推动5G商用进程,讨论是否可以将选项3 EN-DC提速完成。最终经过数轮讨论,在2017年3月的RAN#75次全会中最终决定选项3 EN-DC将在2017年12月完成,而其他选项(选项2、选项4、选项5、选项7)将在2018年6月完成。受时间以及运营商的关注度的限制,最终选项4、选项7于2018年12月才真正完成。后续篇幅将着重介绍运营商最为关注的选项3 EN-DC架构和选项2 SA架构。

在最受运营商关注的选项3 EN-DC架构中,又分为选项3、选项3a、选项3x三类。其主要的区别在于用户面的聚合节点不同^[19-20]。从控制面角度来说,选项3、选项3a、选项3x的架构均相同,如图3-17所示。由图3-17可知,选项3的控制面以4G LTE基站为主,5G NR基站为辅。在这个过程中,主节点负责辅节点的添加、修改、变更、释放,而辅节点也可以触发自身的修改、变更、释放,但是大部分控制信令都是以主节点为主。而从终端的角度来看,终端会与主节点eNB建立SRB0、SRB1与SRB2的信令连接;同时也可以与辅节点gNB建立SRB3的信令连接。此时辅节点gNB由于可以不具备独立接入功能,因此可以不支持除MIB(ANR情况下需要支持部分SIB1发送)之外的系统信息发送、寻呼消息发送、连接建立流程、重建立流程等过程,终端也不需要针对辅节点gNB进行小区搜索、驻留等操作,但是终端可以支持gNB通过SRB3下发配置信息,如测量配置与测量上报。

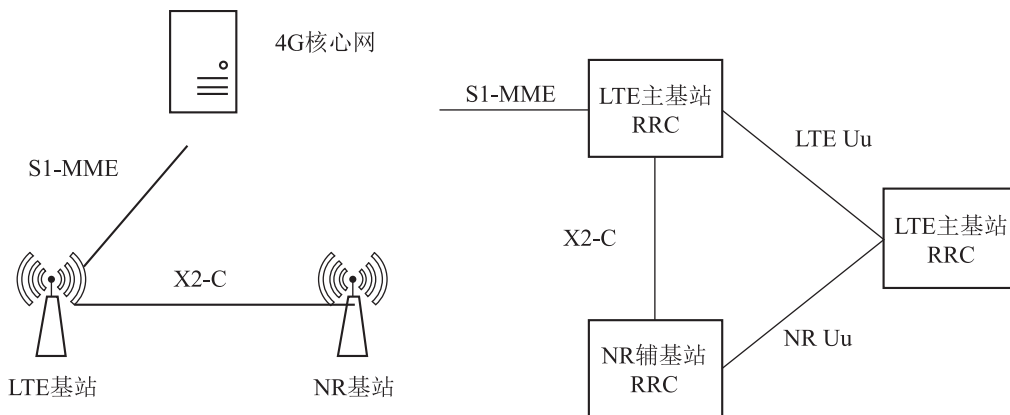


图 3-17 选项 3、选项 3a、选项 3x 控制面连接与控制面协议栈

从用户面角度来说,按照SCG终结的位置不同,可以分为选项3、选项3a和选项3x,如图3-18所示。由3种架构的用户面协议栈可知,选项3为主节点控制用户面数据流的分流,即MCG承载分离(MCG SplitBearer);选项3a为核心网控制用户面数据流的分流,即MCG承载(MCGBearer)+SCG承载(SCGBearer);选项3x为辅节点控制用户面数据流的分流,即SCG承载分离(SCG SplitBearer)。

选项2 SA架构属于与4G LTE类似的独立工作架构,如图3-19所示,整体无线架构与4G LTE区别不大,但是与4G LTE初期相比,可以支持载波聚合(CA)、双连接(DC)以及补充上行的机制(SUL)。

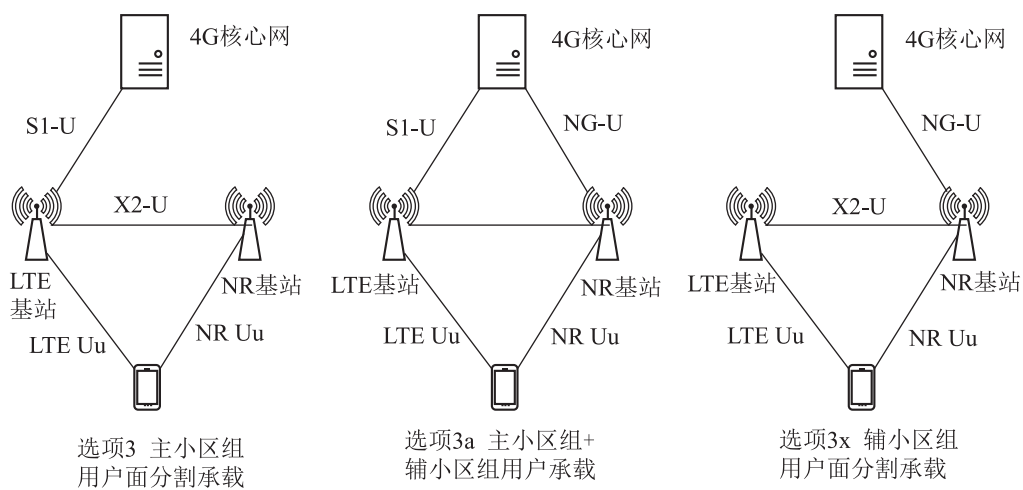


图 3-18 选项 3、选项 3a、选项 3x 用户面协议栈

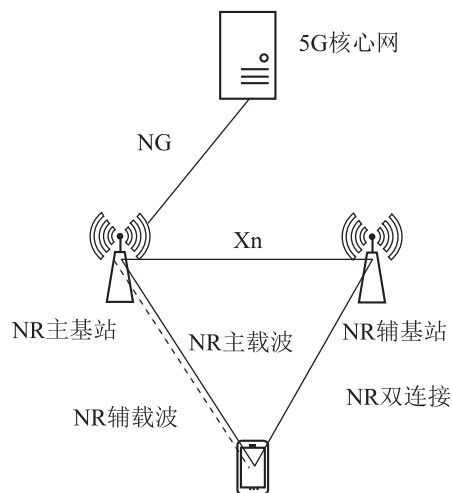


图 3-19 选项 2 网络架构

其控制面与用户面协议栈如图 3-20 所示，有关选项 2 的详细功能描述见第 11 章。

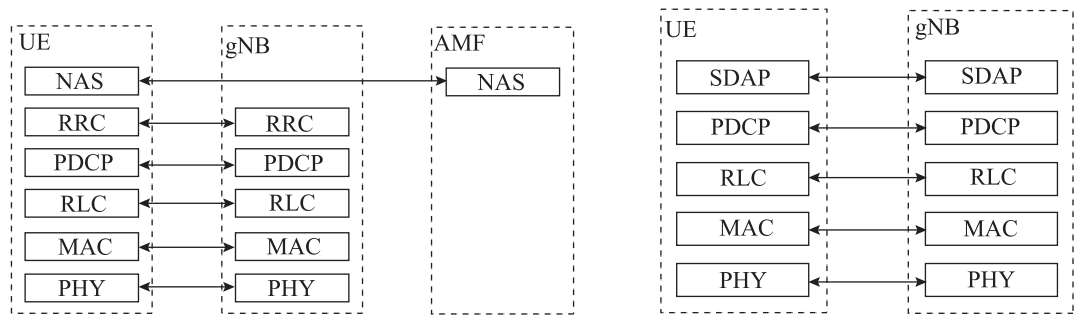


图 3-20 选项 2 控制面与用户面协议栈

这些系统架构中在 3GPP 标准协议中对这些标准化的选项取了各自的术语，如表 3-2 所示。

表 3-2 系统架构术语

系统架构	标准化名称	标准化版本
选项 3/选项 3a/选项 3x	EN-DC	Rel15, early drop
选项 5	E-UTRA connected to 5GC	Rel15, late drop
选项 7	NGEN-DC	Rel15, late drop
选项 2	SA (Stand Alone)	Rel15
选项 2+DC	NR-DC	Rel15, late drop
选项 4	NE-DC	Rel15, late drop

在有双连接架构的情况下，用户面和控制面的协议栈相对来说比较复杂。4G 和 5G 系统之间有一个很大的差别是 QoS 架构的差别。当 MCG 连接到 EPC 时，即使无线接入技术采用的是 NR，建立的无线承载也采用 LTE 系统的 QoS 架构。当 MCG 连接到 5GC 时，建立的无线承载需要采用 NR 系统的 QoS 架构。NR 系统的 QoS 的详细介绍可以参考第 13 章。因此无线承载在 EN-DC 和其他的 DC 架构上，即 NGEN-DC、NE-DC 和 NR-DC，是不同的。从终端的角度和从基站角度来看，无线承载的协议栈构成也是不同的。在双连接架构下，网络节点由两个节点构成，即 MN（主节点）和 SN（辅节点）。PDCP 和 SDAP 协议栈和对应的 PDCP 以下的协议栈（即 RLC、MAC 和 PHY）可能位于不同的网络节点。在终端内部不存在不同节点的区分问题，但是有小区群的角色问题，即需要区分主小区群（MCG）和辅小区群（SCG）。MCG 和 SCG 之间的差异源于不同的无线承载汇聚的协议层（即 MAC 和 PHY）的不同。

对于 EN-DC，从网络侧来看，无线承载的构成如图 3-21^[18] 所示。

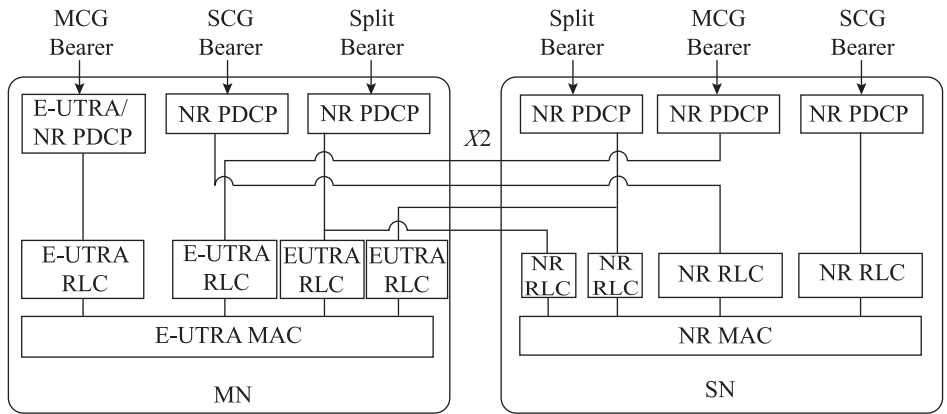


图 3-21 EN-DC 网络侧协议栈

当一个无线承载的 RLC、MAC 和 PHY 协议栈位于 MN 时，该无线承载称为 MCG Bearer，反之称为 SCG Bearer。SCG Bearer 的引入目的很简单，就是为了充分利用 NR 的无线接入流量。当 SCG Bearer 的 PDCP 协议栈在 SN 上时，SN 和核心网之间建立直接的用户平面数据 GTP-U 通道，这样 SN 可以分担 PDCP 协议的处理负荷。当 PDCP 协议栈在 MN 上时，处理负荷分担的好处没有了，而且还增加了用户面的时延。MCG Bearer 的 PDCP 协议栈在 SN 的时候，无线承载有类似的问题。但是这种类型的无线承载在某些异常情况下，可以减少用户面性能的损失。例如，从终端的角度来说，如果 SN 上发生了无线链路失败（RLF），那么

网络可以选择把分离承载（Split Bearer）在 SN 分支上 PDCP 以下的协议栈释放掉，但是可以保留在 SN 上的 PDCP 协议栈和 MN 上的协议栈，从而让这个无线承载继续工作。否则，网络要么选择释放 SN 上所有的无线承载，要么把这些无线承载转移到 MN 上。这些操作都会导致用户面协议栈（包括 PDCP）重建。而释放 PDCP 以下协议栈的操作只会导致和这个无线承载相关的 RLC 的重建和 MAC 层对应的 HARQ Process 的复位操作，用户面的损失要小得多。基于此，在 Rel-16 时，引入 MCG 快速恢复的技术特征，以处理 MN 上发生的 RLF（在 SN 还在正常工作的时候）。同样的道理 PDCP 在 MN 上的 SCG Bearer 也可以作为临时的过渡方案减少用户面的损失。

前面提到的分离承载在 MN 和 SN 上都有无线链路，但是只有一个 PDCP 协议栈。这个 PDCP 协议栈可能在 MN 上，也可能在 SN 上。分离承载的目的是提高无线接口的流量。当 PDCP 层允许对 PDCP 数据包在不同链路之间进行重发时，分离承载还可以提高无线承载的可靠性。基于上段落中提到的类似的原因，工程上更多的是采用 PDCP 协议栈在 SN 上的方案。对于 EN-DC 架构来说分离承载的 PDCP 采用的是 NR 系统的 PDCP 协议。这样做的原因是为了减少终端的复杂度。假如分离承载的 PDCP 根据所在位置分别采用 LTE PDCP 和 NR PDCP 协议栈，那么从终端的角度来说实际上会有两种分离承载。如果只采用 NR PDCP 协议栈，那么从终端的角度来说在 PDCP 协议层只有一种分离承载。这个差异在图 3-22 中可以明显看出。

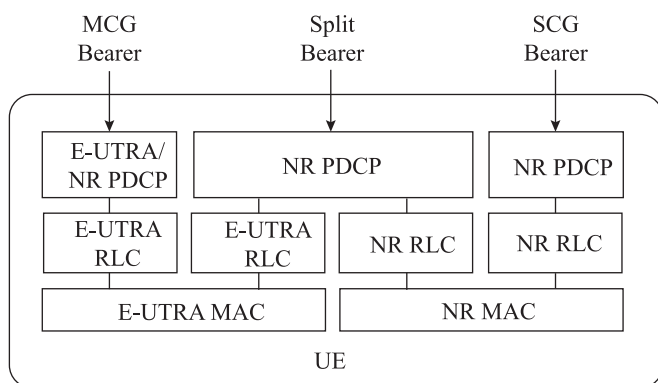


图 3-22 EN-DC 终端侧协议栈（引自^[18] 中图 4.2.2-1）

在网络侧采用了 CU 和 DU 分离的架构以后，这种合并对网络来说也是有意义的，因为只要在 CU 中实现 NR PDCP 就可以了，如图 3-23 所示。对于其他的 DC 架构，网络侧和终端侧的协议栈如图 3-23、图 3-24 所示。

与 EN-DC 架构相比，在 PDCP 协议层上多了 SDAP 协议栈。这是由 NR 系统的 QoS 架构决定的。从终端的角度 SDAP 只有一个实体。另外，PDCP 协议栈都统一为 NR PDCP 协议栈。RLC 和 MAC 的协议栈没有明确区分 LTE 和 NR 的协议栈是因为两种协议栈在 MN 和 SN 上都有可能。在 Stage3 的协议规范中，这些协议栈则会做详细的区分。其中 LTE 的协议栈需要参考 TS 36 系列的协议规范，而 NR 的协议栈需要参考 TS 38 系列的协议规范。TS 38 系列协议规范中用户面的详细介绍可以参考第 10 章，控制面的详细介绍可以参考第 11 章。

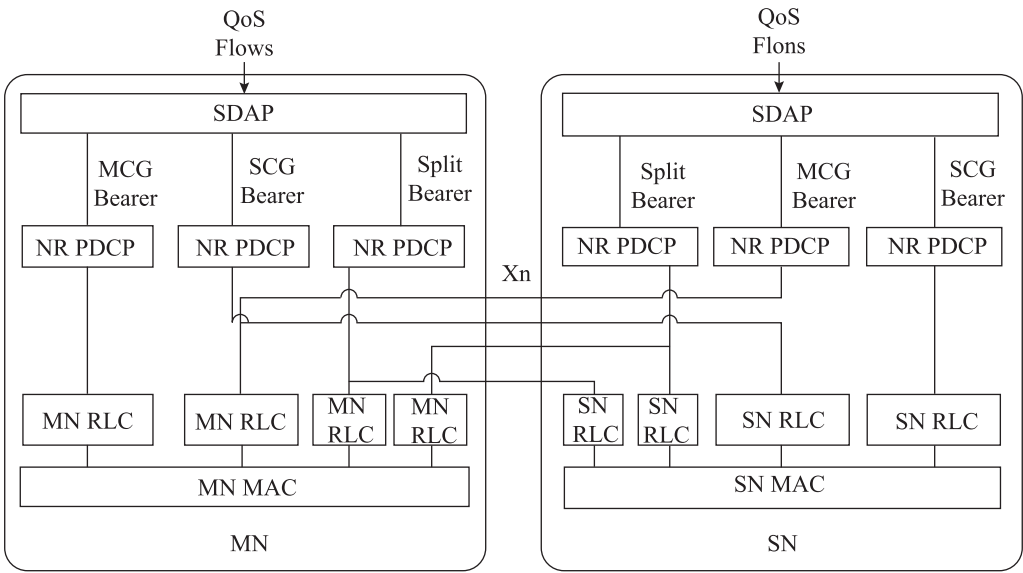


图 3-23 MR-DC 网络侧协议栈（引自^[18] 中图 4.2.2-4）

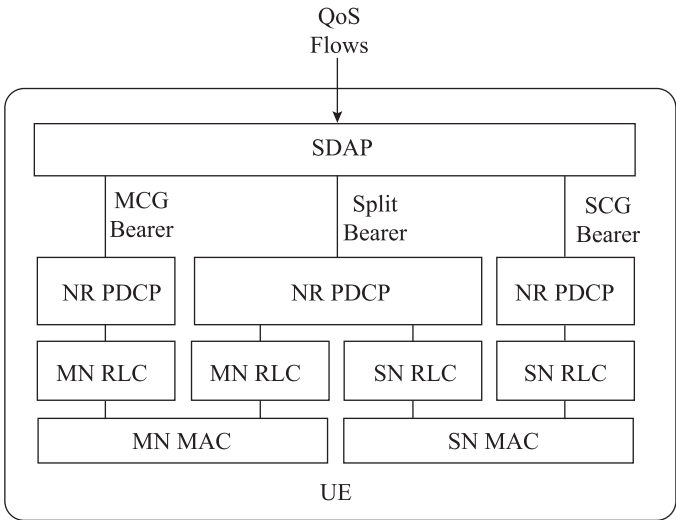


图 3-24 MR-DC 终端侧协议栈（引自^[18] 中图 4.2.2-2）

| 3.3 小结 |

本章从系统侧和无线侧分别介绍了 5G 网络架构的基本概念、演进缘由和演进过程。其中主要阐述了 5G 基本网络架构，以及由 4G 到 5G 网络架构演进过程中，如何满足新的场景和业务需求，同时考虑 4G 网络的平滑演进和共存共生。本章帮助读者对 5G 形成一个整体的认识，对 5G 架构的演进过程有一个初步的了解。

参考文献

[1] TS 22. 261. Service requirements for the 5G system. Stage 1.
[2] TS 23. 501. System architecture for the 5G system (5GS) . Stage 2.

- [3] R3-160947. Skeleton TR for New Radio Access Technology: Radio Access Architecture and Interfaces, NTT DOCOMO INC.
- [4] R3-160842. 5G architecture scenarios, Ericsson.
- [5] R3-161008. Next Generation RAT Functionalities, Ericsson.
- [6] R3-160823. Multi-RAT RAN and CN, Qualcomm.
- [7] R3-160829. Overall radio protocol and NW architecture for NR, NTT DOCOMO, INC.
- [8] R3-161010. CN/RAN Interface deployment scenarios, Ericsson.
- [9] R2-162365. Dual connectivity between LTE and the New RAT, Nokia, Alcatel-Lucent Shanghai Bell.
- [10] R2-162707. NR architectural discussion for tight integration, Intel Corporation.
- [11] R2-162536. Discussion on DC between NR and LTE, CMCCdiscussion.
- [12] R2-164306. Summary of email discussion [93bis#23] [NR] Deployment scenarios, NTT DOCOMO, INC.
- [13] R2-164502. RAN2 status on NR study-Rapporteur input to SA2/RAN3 joint session, NTT DOCOMO, INC.
- [14] R2-163969. Text Proposal to TR 38. 804 on NR deployment scenarios, NTT DOCOMO, INC.
- [15] RP-161266. Architecture configuration options for NR, Deutsche Telekom.
- [16] RP-161269. Tasks from joint RAN-SA session on 5G architecture options, RAN chair, SA chair.
- [17] RP-170741. Way Forward on the overall 5G-NR eMBB workplan, Alcatel-Lucent Shanghai-Bell, Alibaba, Apple, AT&T, British Telecom, Broadcom, CATT, China Telecom, China Unicom, Cisco, CMCC, Convida Wireless, Deutsche Telekom, DOCOMO, Ericsson, Etisalat, Fujitsu, Huawei, Intel, Interdigital, KDDI, KT, LG Electronics, LGU+, MediaTek, NEC, Nokia, Ooredoo, OPPO, Qualcomm, Samsung, Sierra Wireless, SK Telecom, Sony, Sprint, Swisscom, TCL, Telecom Italia, Telefonica, TeliaSonera, Telstra, Tmobile USA, Verizon, vivo, Vodafone, Xiaomi, ZTE.
- [18] TR38. 801. Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces.
- [19] TS 37. 340. Multi-connectivity, Stage 2.