

移动通信基本保持着每 10 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 4 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 10 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 3 种通信制式，分别为欧洲主导的 WCDMA 技术方案、美国主导的 CDMA2000 技术方案和中国自主提出的 TD-SCDMA 技术方案。3G 的数据传输能力可达至数十 Mbit/s，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）技术出现了，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 Mbit/s~1 Gbit/s，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 40 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，通信技术也在不断地创新和持续演进。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，本书将在下面展开介绍。

在第四代移动通信技术商用之初，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）技术的研究之中。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，组织国内产学研用的力量开展

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 技术的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，也是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-Unlicensed, 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。任何技术的演进和产业的升级换代，都是由于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 愿景和不断诞生的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的趋势。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。

1. NR 支持了更高的频段范围

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。全球 LTE 实际商用部署网络基本都部署在 3 GHz 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的要求越来越高，在高容量区域 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丰富的频谱未被利用，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。支持丰富的毫米波频谱是 5G NR 相比 LTE 的一个巨大增强点，它可以使得未来 5G 的部署和业务应用释放出巨大的潜能。

2. NR 支持更大的系统带宽

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）的方式来支持。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，会增加协议和实现的复杂度。同时，多载波聚合的载波之间预留一定的保护间隔（Guard Period，GP），会降低有效频谱效率。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。

3. 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 的帧结构定义了 7 种固定的上下行时隙配比，在小区建立过程中确定。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。最后，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。

4. 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 系统的基本原理，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来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 通过支持灵活的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。

5. 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 1ms 子帧为基本单位，正是这种固有的设计导致了一次空口数据传输无法突破 1ms 的时间单位限制。再加上 LTE 的 HARQ 重传至少 $N+4$ 的时序定时关系，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）的技术方案，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（Sub-carrier 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。

最后，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（Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ）的反馈时延。自包含时隙的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 的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。

6. 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项技术点，因为接收端对无线信道估计是通过参考信号来获得的，参考信号设计的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。恒定参考信号的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来实现有效节能。

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 导频设计中采用前置导频（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。

7. 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的指向性和赋形的精准度，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

波束赋形的技术。为了增强覆盖，NR 支持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）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，自适应地跟踪用户的移动。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。

8. NR 对终端节能技术的增强

LTE 在对终端节能方面的技术设计考虑得并不多，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，从而在手机工作过程中造成发热、发烫或待机时间短等问题，这些问题会严重影响用户的体验。

5G 针对终端面临的功耗问题，设计了多种技术方案。从时域节能的角度，5G 针对连接态用户在配置了非连续接收（DRX）的情况下，新引入了唤醒信号（Wakeup Signal）。由网络侧根据业务量传输的需求来判断是否在 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 信道数据进行不必要的接收和处理，从时域上降低射频电路的激活时长。

从频域节能的角度，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小时，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的处理带宽和较低的处理时钟条件下工作，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。

从频域和天线域的角度，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的需求，再结合 BWP 的配置可以降低空间传输的层数，使得 UE 可以降低对 MIMO 的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，以及未处于

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。

9. 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，若随机接入过程成功，则完成了切换过程。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式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，极大地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 就可以自主地根据预配置执行切换命令，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，条件切换能极大地提高切换成功率。

10. 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 做了大量的增强和优化，从而更好地支持低时延、高可靠业务，主要包括以下 4 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，从而提高了处理速度，降低了时延。

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再生成 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的操作，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，来提高传输的可靠性。

11. 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，EPS 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 多种多样的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）进行替代，每个 PDU 会话最多可以有 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 参数的设定，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。

12. 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，导致网络的不灵活性和不可演进性。

到了 5G 时代，5G 移动通信的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地扩容、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

通过第 1.1 节的内容可以看出，在 NR 标准化过程中，相比 LTE 技术做了大量的增强和优化。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，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，进行一定的取舍和权衡，最终形成标准化的结论。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，最终并没有在已经完成的 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进行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 (Sub-carrier 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来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很好地共存，互不干扰。

基于 OFDM 系统的基本原理，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地改变 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在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谱效率、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。

众所周知，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的效果好、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等。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，将系统带宽划分为若干子带来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，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)	FBMC-OQAM FB-OFDM FC-OFDM GFDM W-OFDM OTFS*	F-OFDM FCP-OFDM UF-OFDM OTFS*	CP-OFDM OTFS*
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

多载波时域加窗类的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。

多载波时域滤波类的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, 候选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了评估和讨论, 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的正交性、频谱效率、带外辐射性能、抵抗时频同步误差等方面确实有一定的优势, 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、对碎片频谱的利用不足等。讨论的最终结论是并没有定义新的波形, 而仅在标准中定义了 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有利于 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的同频或邻频干扰, 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关键技术, 被通信领域的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) 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 Gbit/s 的峰值吞吐率, 上行需要满足 10 Gbit/s 的峰值吞吐率。因此, 尽管 Turbo 码在 4G 成熟应用, 且在交织器方面做了并行处理的优化, 但其在大码块译码性能、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，使其天然适合 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来看，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 经过几轮会议的讨论，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。另一方面是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 支持全新的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。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 的全新的设计。但客观分析，NR 空口上更多的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来看，NR 仍然沿用了 OFDM+MIMO 的大体技术框架，采用的核心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择，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，新技术的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的影响，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 5G 技术和标准快速成熟，如本书第 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、灵活的参数集、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）等多种不同的特性。从技术方案上确保了 5G 技术的先进性和未来 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。

1. 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的要求。5G 需要支持 1 Gbps 的用户体验速率，几 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、处理平台才能得以保证。以 5G 商用网络部署中最主流的 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。特别是近些年在通信需求的巨大驱动力下，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。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。先进的半导体芯片工艺水平的成熟和发展，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。

2. 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、功耗等对设备的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传统的 RRU 与天线阵分离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（Active Antenna Unit, AAU）。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 的工作频段相比 4G 要高，工作带宽相比 4G 更宽，这就需要 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 网络建网的后半期，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 频段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。近些年来，伴随着射频器件工艺的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的挑战。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，运营商在对设备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。针对设备散热问题，一方面从设备研制的角度，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，最终来满足设备的商用化和工程化要求。

3. 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丰富，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可用带宽大，但由于毫米波所处的频段高，应用于移动通信系统中，相比低频段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 等射频器件的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。为了解决毫米波的传播特性不理想、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) 出口功率低，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。最后，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一体化 (Antenna in Package) 的形式，以最大化地提高效率。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的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 中引入并被标准化，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) 工作组自 2019 年开始组织 5G 毫米波技术试验，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

R15 协议版本作为 5G NR 的第一个基础版本，于 2018 年 6 月完成并发布，支持增强移动宽带 (eMBB) 业务和基本的 URLLC 业务。而后的 R16 版本对 eMBB 业务又进行了进一步的增强，同时也完整地支持了 URLLC 业务。R16 协议版本完成后支持的新功能主要有以下几个方面。

1.4.1 MIMO 增强

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

1. 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，大大降低了反馈信号的开销。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，性能的提升更为显著。

2. 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 Receiving 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 独立地对同一个 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 URLLC 业务的需求。

3. 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 在这些机制的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。

4. 上行满功率发送（Uplink Full Power Tx）

在 R15 的上行发送功率控制机制中，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）对应的表格，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 增强主要包含以下方面。

- 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 URLLC 增强——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 $1\ \mu\text{s}$ 的时间同步精度、 $0.5\ \text{ms}$ 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。

1. 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了研究，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以太帧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。

2. 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。

3. 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 协议版本中，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的增强。

- 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，从而降低对 UE 处理能力的要求。
- 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，在 R15 标准化的早期就讨论过两步 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 进行了标准化，随机接入过程从普通的 msg1 到 msg4 的 4 步过程优化为 msgA 和 msgB 的两步过程。

1.4.6 上行频段切换发送

从运营商的 5G 实际频谱分配和可用性情况看，TDD 中频段（如 3.5 GHz、4.9 GHz）是全球最主流的 5G 商用频谱。TDD 频段相对较高，带宽大，但覆盖能力不足。FDD 频段低，覆盖好，但带宽小。UE 可在 TDD 频段上支持两天线的发送能力，但在 FDD 频段上仅有单天线发送能力。R16 引入了上行频段切换发送的技术，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，同时利用 TDD 上行大带宽和 FDD 上行覆盖好的优势来提升上行性能。上行频段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 的发送通路与 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 3 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 模式下的高速率；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。

1. 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）能力的终端切换过程，终端并不先断开与源小区的空口连接，而是成功接入目标小区后，终端才会基于网络侧的显式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。

2. 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，主要用于公共安全（Public Safety）的场景。D2D 技术基于侧行链路（Sidelink）进行数据传输，实现终端到终端的直接通信。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、重传以及侧行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：授权频谱的辅助接入和非授权频谱的独立接入。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 R17 增强技术

R16 版本之后，5G NR 技术在 R17 版本中继续增强。在 RAN#86 次会议上，3GPP 通过了 R17 课题包，并且也决定了整个 R17 的工作周期为 15 个月。不巧的是，2020 年初的新冠病毒的肆虐直接导致了 2020 年上半年 3GPP 面对面会议的取消。在 RAN#87e 次会议上，3GPP 决定把 R17 的工作计划整体平移一个季度。之后又经过两次调整，最终 R17 工作计划如图 1-1 所示。



图 1-1 R17 工作计划

总的来说，R17 的课题继续保持了对 eMBB 业务的技术改善，并且对 R16 已经引入的垂直行业相关的技术做了进一步的增强。与 eMBB 业务、垂直行业都相关的是网络覆盖范围的提高，包括非地面通信的标准化，使得蜂窝网络呈现出海、陆、空三维立体覆盖。R17 也对 5G NR 在频谱、应用、广播通信机制和网络维护方面做了新的研究和探讨。图 1-2 所示是整个 R17 课题的分类示意图。

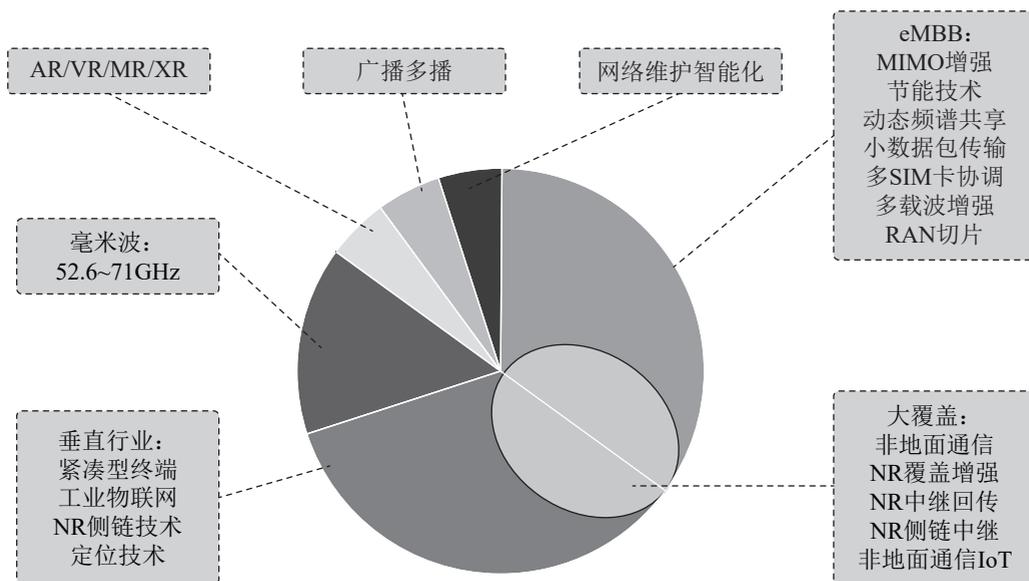


图 1-2 R17 课题的分类示意图

在 R17 eMBB 增强技术中，除了多 SIM 卡协调和 RAN 切片之外，其他的课题基本上是 R16 课题的延续或者扩展。例如，MIMO^[28] 在减少控制信令和时延上，从中低速扩展到 FR2 的高速场景，并且假设 UE 有多个天线面板；在多点发送和多面板接收下波束管理和信道鲁棒性、可靠性的提升上，从 PDSCH 信道扩展到了 PDCCH、PUSCH 和 PUCCH 信道；增加了 SRS 的天线端口以增加 SRS 的覆盖和容量；在 FDD 频谱上，进一步探讨利用信道互易性来增强 CSI 的测量和上报机制，引入了统一的 TCI 状态管理机制等。在 R16 中，基于 DCI 的节电技术解决方案主要是用来避免无谓地唤醒 UE，在 R17 中则考虑了更高速率业务的需求，寻求在 UE 已经被唤醒的前提下减少对 PDCCH 信道的监听。在 RRC_IDLE 和 RRC_INACTIVE 两个状态下设法减少对寻呼消息的监听和参考信号的系统开销^[29]。在 RRC_INACTIVE 状态下，直接发送小数据包的想法主要也是为了避免或者减少 UE 进入 RRC_CONNECTED 状态所带来的信令和功耗的开销，这对穿戴设备尤其适用^[30]。

一个 UE 有多个 SIM 卡在 4G 时代就已经比较流行了。两个 SIM 卡所对应的两个系统之间的冲突问题往往是由于 UE 有限的射频资源，如有限的射频链路和天线。4G LTE UE 都是通过厂商的产品实现来减少或规避这个问题，也就是说没有标准化的方案，但是效果不理想。5G NR UE 在射频资源上有所增加，一般认为比较典型的配置是 2T4R。但是市场上中低端的智能手机或穿戴设备，也会采用相对比较低的配置，如 1T2R，所以还是存在类似的问题。在 R17 中，采用标准化的方案可以尽可能减少两个系统之间的寻呼冲突，并且在 UE 决定离开当前系统（往往是 5G NR）去响应另外一个系统（往往是 4G LTE）寻呼时，减少对当前系统中正在进行的业务的影响，提高网络感知能力^[31]。其中响应语音业务的寻呼是重点。

RAN 切片课题的主要目的是使 UE 能够快速接入到一个支持 UE 想要发起的业务切片的小区，包括在小区选择和重选过程中匹配小区能够支持的切片和 UE 想要发起业务的切片，以及基于切片信息来发起随机接入过程。在发生移动性事件，如切换时，能够保证切片在源小区和目标小区之间不兼容的情况下保持业务的连续性。在 RAN 侧对切片这个概念做进一步的深耕也是 5G 网络技术的一种趋势^[32]。

垂直行业相关的技术增强是 R16 的一个显著特点，并且在 R17 将有新的突破，包括引入紧凑型 NR UE 和高精度的室内定位。5G NR 的三大应用场景都有各自的侧重点：eMBB 想要的是高速率，mMTC 要求的是广覆盖和多连接，而 URLLC 在可靠性和时延性能上追求极致。在一个终端上最多只能实现其中的两个维度，因为在同一个通信系统前提下，这 3 种需求实际上往往相互矛盾。但是也有一些终端需要兼顾这些需求，只是在支持程度上会大大下降，逻辑上这些紧凑型 NR UE 的需求可以参见图 1-3。

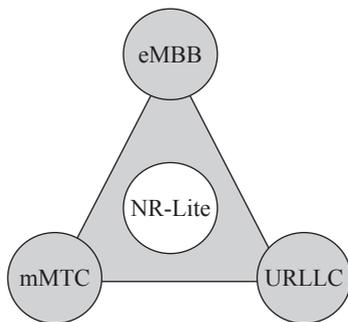


图 1-3 NR-Lite 定位

在 3GPP 刚开始讨论的时候，这样的 UE 被称为“NR-Lite”，意思是“轻”终端。“轻”不仅体现在 UE 的体积和重量上（如其中典型的应用是工业传感器），也体现在硬件的配置和处理能力上，即与智能终端相比，具有更少的天线端口、更窄的工作带宽。在此基础上还要求超长的待机时间、更多的连接数，同时还需要保持类似的覆盖范围。在 3GPP 最终立项的时候，这个名字改成了“reduced capability NR devices”，中文称为紧凑型终端。在 3GPP 的讨论过程中，这样的终端也包括了智能穿戴设备，如智能手表，以及用于工业或者智慧城市的视频监控和跟踪设备。但是不包括已经基于 LTE 系统开发的 NB-IoT 和 mMTC 业务，这是为了避免对市场上已经成熟产品的影响，也是为了减少 3GPP 标准化的工作量^[33]。

R16 中基于 NR 定位参考信号的定位技术实际上已经成熟，可以满足室内 3 m（80% 概率）和室外 10 m（80% 概率）的定位精度，同时也引入了基于 UE 的定位方案，即 UE 可以根据网络的辅助信息来计算出最后的定位信息。但是 R16 的方案无论是在精度上（ ≤ 0.2 m）还是在时延上（ ≤ 100 ms）均无法满足工业上室内定位的需求。同时，商业上和定位需求相关的应用也要求低于 1 m 的定位精度。另外，在 R17 的定位课题中首次提出了定位的可靠性和完整性需求，简单地说，也就是要求定位系统一直可用。如果定位系统出现问题，还需要及时通知正在定位的 UE，避免因误信而导致事故。这个要求对于交通、电力或者是紧急呼叫所使用到的定位应用尤其重要。在技术上会侧重于增强 R16 中引入的定位参考信号、定位方法和相关的协议流程^[34]。

当然，R17 中和垂直行业相关的技术更多的是在 R16 基础上的增强。R16 URLLC 在提高可靠性上的基本思路是除了增加 PDCP PDU 的重复支路之外（最多是 4 个），以“插队”的方式，即牺牲相对来说优先级较低的逻辑信道的发送或反馈，来达到提高优先级较高的逻辑信道可靠性的目的。这样的做法多少有些“简单粗暴”。R17 尝试精细化 R16 的方案，最大程度地减少对优先级相对较低的逻辑信道的影响，如在 UE 内或 UE 间进行优先级处理时可以采用某种信道复用的方式，使得优先级相对较低的逻辑信道在冲突的时候不会被全部丢弃。另外，采用非授权频谱的 NR 也是一个比较大的突破。一般来说，非授权频谱会因为频谱共享的原因在通信可靠性和时延性能上无法和授权频谱相比。但是在工业场景里，在封闭的环境下，基本上可以做到频谱“独享”。在这样的前提下，可靠性和时延问题在一定程度上可以通过技术手段来克服，如采用 FBE（Frame Based Equipment）的信道接入方式等^[35]。

侧行链路通信技术在 R16 中最重要的应用场景是 V2X，也就是车联网，UE 的形式往往是车载式终端。在 R17 中，这种基于 PC5 接口的侧行链路通信技术除了车联网之外，也会拓展到公共安全应用和消费电子的应用上。在这些新的应用场景中，UE 往往是手持终端，因此侧行链路技术在 R17 的重心落在了和节能相关的解决方案上，如在 PC5 接口引入 DRX 机制，在资源分配方面引入了 UE 之间协调机制和部分感知（Partial Sensing）的方式来减少 UE 对控制信道的监听^[36]。和侧行链路通信技术直接相关的另外一个课题是基于 PC5 接口的中继，包括 UE 到网络的中继以及 UE 到 UE 的中继。两种中继方式对于公共安全应用来说都比较重要，而商业上的一些应用，如智能手表或手环通过智能手机连接到网络，则对终端到网络的中继方式最感兴趣。对于智能手表或手环来说，和智能手机之间的基于 PC5 接口的短距离通信几乎耗电为零，从而可以大大提高待机时间。在室内场景下，借助智能手机比较高的配置，穿戴设备可以流畅地和网络进行通信，侧行链路中继可以看作扩大网络覆盖的一种技术解决方案^[37]。

对于覆盖问题，无论是 eMBB 业务还是垂直行业，R17 都提供了相应的解决方案。NR

覆盖增强主要是解决上行业务信道的覆盖问题。5G NR 中最典型的全球性频谱是 3.5 GHz (band n78、n79)。与用于 LTE 的频谱相比, 3.5 GHz 因为传播路损和建筑物穿透损耗大的原因, 即使在波束赋形技术的辅助下, 在市区的室内覆盖中也没有多少优势。在建筑物中心区域, 5G NR 的覆盖甚至比 LTE 还要差。目前全球范围内部署 SA 网络是 5G NR 的趋势, 而且在中国一开始就会大规模部署。在这种情况下, 覆盖就成了基于 3.5 GHz SA 网络的一个痛点。除了直接在 3.5 GHz 上下功夫外, 借助低频段频谱, 如 1.8 GHz 或者 2.1 GHz FDD 频谱, 也可以有效解决上行的覆盖问题。在这个课题中, 针对 FR1 频段, 研究的主要对象是语音业务和中低速率的数据业务。虽然 FR2 的覆盖问题也会在这个课题中进行研究, 但是 FR2 的覆盖已经有了一个比较好的解决方案, 就是利用中继回传技术^[38]。

上述的覆盖问题, 无论是 FR1 还是 FR2 频段, 针对的还是基于蜂窝的地面网络。非地面通信要解决的是广域覆盖。在 R16 中, 非地面通信的研究对象是高轨卫星 (即同步卫星) 和低轨卫星。5G NR 通信系统所面临的挑战主要是超长信号传输时延和比较大的频率偏差。需要注意的是, 非地面通信除了要求 UE 具备 GNSS 定位能力之外, 在发射功率上并没有提出额外的要求——还是采用第三类功率等级, 即 23 dBm。在 R17 对非地面通信标准化时, 所采用的方案也可以扩展到高空气球和空对地通信。需要注意的是, 在空对地通信中, 飞机快速移动, 类似于较为特殊的 UE; 而在卫星通信中, 在空中部署的更像是基站的射频部分或者 DU^[39]。R17 在非地面通信上的另外一个扩展是把类似的解决方案移植到 IoT 领域, 用于跟踪远洋油轮上货物的位置, 并且进行简单的通信^[40]。非地面通信逐渐进入市场并且开始产业化的重要原因是空间发射技术的成熟, 使得发射小体积卫星的成本变得比较低。

R17 在毫米波、XR、广播多播和网络智能化上也进行了大胆的探索。目前 5G NR 所涉及的频段分成两段: FR1 (400 MHz~7.125 GHz) 和 FR2 (24.25~52.6 GHz)。在 R17 刚开始标准化时, 美国的一些公司和运营商提出对 52.6~114.25 GHz 频段从波形开始进行系统性的研究。在对全球各个区域的频谱管理条例进行整理和研究以后, 逐步发现业界最感兴趣的是 60 GHz 附近的频段, 即 52.6~71 GHz。尤其是在不少国家, 此频段附近的非授权频谱 (参见表 1-2) 有产业化的可能。在 2019 年埃及举办的 WARC19 会议上, 此频谱也被 ITU-R 正式定为蜂窝无线通信频谱。

表 1-2 非授权频谱分布

国家和地区	频段 /GHz	最大发射功率 /mW
美国	57~64	500
加拿大	57~64	500
日本	59~66	10
欧盟	57~66	20
澳大利亚	59.4~62.9	10
韩国	57~64	10

基于这样的原因, 3GPP 最后决定只对这段频谱进行研究和标准化。为了减少标准化的工作量, 大的原则是在原来 5G NR 的波形基础上对核心的几个物理层参数, 如子载波间隔 (SCS) 和信道带宽等进行直接扩展。采用这种方式, 基本上可以继承现有的物理层协议框架。另外, 该频谱的毫米波波束的发送和接收更具有方向性, 形成所谓的“铅笔波束”。在这样的前提下, 信道接入的方式将不同于现有的 LBE 和 FBE 信道接入方式, 在空间维度上具备更高的共存可能^[41,42]。为了和原来的 FR2 频段进行区分, 在标准规范中此频段称为 FR2-2,

而原来的 FR2 频段则称为 FR2-1。

XR 是一个笼统的术语，可以代表 AR（增强现实）、VR（虚拟现实）、MR（混合现实）等。要达到视觉上以假乱真的效果，XR 相关的应用要求通信系统在提供高流量的同时还要保证相当高的可靠性和比较低的时延。另外一种类似的应用是云游戏（Cloud Gaming）。XR 和云游戏对 5G NR 系统来说既是挑战也是机遇。首先，在网络架构上，5G 网络必须要增加边缘计算节点，也就是拉近云计算节点和终端之间的距离，否则时延的要求往往无法满足。其次，无论是头盔还是眼镜都对功耗有比较高的要求，这是因为一方面用户佩戴的时间会比较长，另一方面运算的负载比较高。如何降低功耗、增加待机时间和用户的舒适度都是值得探讨的领域。最后，XR 和云游戏的业务需求看上去有点“既要马儿跑，又要马儿不吃草”，即使是 5G NR 这样的宽带通信系统也很难做到长时间给多个用户提供同时满足“高流量、低时延、高可靠”的业务。为了达到“好钢用在刀刃上”的效果，需要仔细研究 XR 和云游戏的业务模型，特别是数据包大小的分布范围以及在时域上的到达规律和相关的性能 KPI，如时延和丢包率，从而使通信系统能够更好地适配。R17 的 XR 课题的主要目的就是找到合适的评估方法来进行上述内容的研究^[43]。

广播多播技术在 3GPP 标准中有悠久的历史，UMTS 和 LTE 系统都进行过基于 SFN 的 MBMS 方案的标准化，在 LTE 系统中还引入了基于 PDSCH 的单小区广播技术（SC-PTM）。但是，真正在市场上得到广泛应用的广播多播技术可以说是凤毛麟角。而广播多播可以成为某些技术的有益补充，如在 IoT 和 V2X 技术中，通过广播的方式可以提高频谱效率。在视频点播应用中，可能会出现一个小区中的多个用户在点播相同视频内容的情况，在这样的前提下，把多个单播的线程合并成一个广播多播的线程就可以达到节省无线资源的目的。另外，与公共安全相关的广播明显要比单播更加高效。因为这样的原因，3GPP 最后决定在 R17 中研究基于 5G NR 的一个简化版的广播多播方案。方案不要求采用传统的 SFN 方式来增加小区边缘覆盖；可以采用和单播混合组网的方式，并且会引入广播多播和单播之间的切换机制；当 UE 在 RRC_CONNECTED 状态时，单播和多播都会提供上行反馈来增加广播多播的可靠性^[44]。

图 1-4 中，相同颜色的小区构成了广播多播同步覆盖区域。NR MBMS 的同步覆盖区域介于 LTE MBMS 和 LTE 高功率高塔广播之间，在一个基站内部实现。

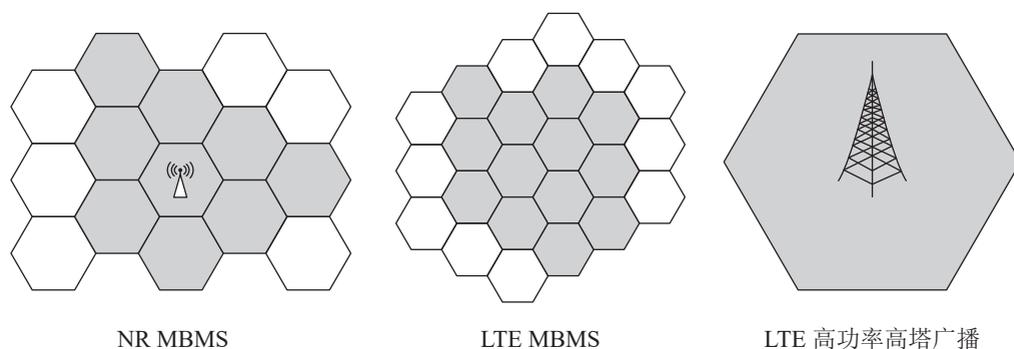


图 1-4 NR MBMS、LTE MBMS 和 LTE 高功率高塔广播的比较

对于网络维护的智能化，3GPP 从 LTE 开始就在系统中引入了 SON 和 MDT 机制，利用 UE 提供的测量和统计信息来建模网络的运行状态。随着人工智能所要求的算力（硬件）和

深度学习算法（软件）的逐渐成熟和普及，在网络维护中引入大数据收集和智能处理就水到渠成了。在此基础上，在 3GPP 通信系统的其他模块中也将逐渐引入人工智能^[45-46]。

| 1.6 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；其次介绍了 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、R17 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的 R16、R17 技术内容有一个基本的了解。

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, 等. 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, CMCC, 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] 3GPP TS 38.300 V16.1.0 (2020-03). NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage2(Release 16).
- [27] RP-200493. 3GPP Release timelines. RAN Chair, RAN1/RAN2/RAN3/RAN4/RAN5 Chairman
- [28] RP-193133. WID proposal for Rel. 17 enhancements on MIMO for NR. Samsung.
- [29] RP-193239. New WID: UE Power Saving Enhancements. MediaTek Inc.
- [30] RP-193252. New WID on NR small data transmissions in INACTIVE state. ZTE Corporation.
- [31] RP-193263. New WID Support for Multi-SIM devices in Rel-17. vivo.
- [32] RP-193254. Study on enhancement of RAN Slicing. CMCC Verizon.
- [33] RP-193238. New SID on support of reduced capability NR. Ericsson.
- [34] RP-193237. New SID on NR Positioning Enhancements. Qualcomm.
- [35] RP-193233. New WID on enhanced Industrial Internet of Things (IoT) and URLLC support. Nokia.
- [36] RP-193257. New WID on NR sidelink enhancement. LG Electronics.
- [37] RP-193253. New SID: Study on NR sidelink relay. OPPO.
- [38] RP-193240. New SID on NR coverage enhancement. China Telecom.
- [39] RP-193234. New WID: Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN). THALES.
- [40] RP-193235. New Study WID on NB-IoT/eTMC support for NTN. MediaTek Inc.
- [41] RP-193259. New SID Study on supporting NR above 52_6 GHz. Intel Corporation.
- [42] RP-193229. New WID proposal for extending NR operation up to 71GHz. Qualcomm.
- [43] RP-193241. New SID on XR Evaluations for NR. Qualcomm.
- [44] RP-193248. New WID proposal: NR Multicast and Broadcast Services. HUAWEI.
- [45] RP-193255. New WID: SON/MDT for NR. CMCC.
- [46] S1-193606. New WID on Study on traffic characteristics and performance requirements for AI/ML model transfer in 5GS. OPPO, CMCC, China Telecom, China Unicom, Qualcomm, 3GPP TSG-SA WG1 Meeting #88, Reno, Nevada, USA, 18 - 22 November 2019.