

摘要

5G 致力于应对 2020 后多样化差异化业务的巨大挑战，满足超高速率、超低时延、高速移动、高能效和超高流量与连接数密度等多维能力指标。FuTURE 论坛 5G 特别兴趣组（SIG）围绕着“柔性、绿色、极速”的 5G 愿景，以“5+2”技术理念，重新思考 5G 网络的设计原则：

- 1) **香农理论再思考（Rethink Shannon）**：为无线通信系统开启绿色之旅
- 2) **蜂窝再思考（Rethink Ring & Young）**：蜂窝不再（no more cell）
- 3) **信令控制再思考（Rethink signaling & control）**：让网络更智能
- 4) **天线再思考（Rethink antennas）**：通过 SmartTile 让基站隐形
- 5) **频谱空口再思考（Rethink spectrum & air interface）**：让无线信号“量体裁衣”，以及
- 6) **前传再思考（Rethinking fronthaul）**：通过下一代前传接口（NGFI）实现柔性无线接入网（RAN）
- 7) **协议栈再思考（Rethinking the protocol stack）**：实现差异化接入点灵活配置以及 BBU 和远端无线系统功能优化

围绕上述理念，FuTURE 论坛 5G SIG 在 5G 网络架构、RAN 和空口研发方面的取得了显著进展，本白皮书对相关成果做出总结，特别介绍了用户中心网络（UCN）和软件定义空口（SDAI）两个核心概念。

UCN 架构有如下四个特征：

- **RAN 重构**：为充分利用多样化的接入技术组合、提升组网效率，传统的蜂窝边界将允许动态重构调整、传统的协议栈以及基带功能将被切分并以最优的方式分布在重构的 RAN 网络节点和相关子系统上；
- **边缘提升**：以支持超低的端到终端延迟（低至 1ms），高效的数据分流、分发、本地移动性、各种边缘业务（包括 RAN 上下文开放使能的跨层优化），以及移动边缘云；
- **CN-RAN 再划分**：以支持融合多制式技术、低的端到端延迟（不超过 10ms），并充分利用控制转发分离（SDN）和软硬件解耦（NFV）的优点；
- **网络切片即服务**：支持通过 SDN/ NFV 实现多个垂直子平台，并能够通过一种更强大的水平平台实现多个垂直子平台的融合；对于有效地满足“互联网+”的挑战和机遇，具有重要意义。

SDN, NFV, C-RAN, NGFI, UDN, Multi-RAT/RIT, D2D 和灵活网络切片是 UCN 核心技术。大数据分析也是 UCN 动态特性不可缺少的部分。

与以前的空口制式不同，SDAI 不是单一的基于参数化 AMC 的空口，也不是针对不同用户场景而独立设计的多个空口的简单合集。相反，SDAI 通过物理层不同功能模块的可配组合来满足多样化需求。这些功能模块包括帧结构、双工模式、波形、多址方案、调制编码和多天线空域处理方案以及频谱策略等。SDAI 通过优化的定制能力满足增强移动宽带（eMBB）、低功耗大连接（mMTC）和低时延高可靠（uMTC）三类典型场景需求，具备如下两个鲜明特性：

- 1) **敏捷**：SDAI 通过可编程可配置功能，实现空口技术灵活构造及针对用户和业务模式的参数裁剪能力。
- 2) **高效**：SDAI 尽力构建统一的构架，最大化共性功能，最小化满足定制需求的特殊能力，支持不同场景和接入技术，同时在保持最小化特殊功能情况下，提供特殊定制化服务。

统一自适应帧结构、灵活双工、灵活多址、灵活波形、大规模天线、新型调制编码以及灵活频谱使用目前被认为是 SDAI 的关键使能技术，而协议栈重构对 SDAI 同样不可缺少。

5G 将与 4G 演进技术以及其他无线接入技术（包括 WALN 演进）在长时期内紧密共存。4G 在 6GHz 频段以下的增强可以满足 5G 部分场景需求，而 5G 工作频段包括高频与低频，满足所有场景需求。在频谱策略方面，低频段重点仍是覆盖与移动性增强，2.6GHz，3.5GHz 和其他 6GHz 以下频段可针对容量需求设计。同时，6GHz 以上频段可用来支持更高带宽业务。安全技术和智能终端技术对 5G 而言同样重要。

本白皮书（版本 v2.0）将与 7 个专题技术白皮书（版本 v2.0a 到 v2.0g）共同发布，这 7 个专题白皮书分别是《大规模天线技术》、《双工技术》、《高频段通信技术》、《新型多址技术》、《超密集网络技术》、《5G 物理层安全技术》和《5G 测试测量技术》。

3GPP 已经启动了 5G 标准化工作并计划在 2019 年左右结束。本白皮书以及 7 个相关专题技术白皮书将为 5G 设计提供参考，并推动 5G 标准化。我们期待着“柔性、绿色、极速”的 5G 网络在 2020 部署，带来“万物互联”的新时代。

目录

摘要	1
1. 引言	5
2. 5G 总体目标与框架	5
2.1 5G 总体需求	5
2.2 设计框架	8
2.3 频谱策略	9
2.4 测试需求	11
3. 用户中心网络 UCN	12
3.1 UCN 总体目标	12
3.1.1 端到端总体架构与目标	12
3.1.2 无线接入网总体目标	13
3.2 无线接入网框架	14
3.2.1 无线接入网重构	15
3.2.2 增强边缘	16
3.2.3 核心网与接入网重分	17
3.2.4 网络切片即服务	18
3.3 关键使能技术	18
3.3.1 UDN	18
3.3.2 C-RAN/NGFI	20
3.3.3 SDN/NFV	21
3.3.4 灵活的网络切片	24
3.3.5 网络能力开放	27
3.3.6 多连接与多空口	29
3.3.7 D2D	31
3.3.8 动态网络	33
4. 软件定义空口 SDAI	36
4.1 SDAI 总体目标	36
4.2 SDAI 总体框架	36
4.3 关键使能技术	38
4.3.1 统一自适应帧结构	38
4.3.2 灵活双工	40
4.3.3 灵活多址	41
4.3.4 灵活波形	43
4.3.5 大规模多天线	44
4.3.6 新型调制编码	46
4.3.7 灵活频谱使用	47
5. 5G 安全技术	48
5.1 5G 安全架构	48

5.2	终端安全技术.....	50
5.2.1.	安全需求.....	50
5.2.2.	关键技术.....	51
5.3	空口安全技术.....	53
5.3.1.	安全需求.....	53
5.3.2.	关键使能技术.....	54
5.4	数据处理和传输安全技术.....	54
5.4.1.	安全需求.....	54
5.4.2.	关键技术.....	55
5.5	应用层安全技术.....	56
5.5.1.	安全需求.....	56
5.5.2.	关键技术.....	57
5.6	物理层安全技术.....	57
5.6.1.	安全需求.....	57
5.6.2.	关键使能技术.....	58
6.	5G 智能终端.....	60
6.1	智能终端通信需求.....	61
6.2	智能终端通信能力.....	61
6.2.1.	个人信息中心.....	62
6.2.2.	可穿戴设备.....	63
6.2.3.	智能机器设备.....	64
6.2.4.	微型传感器.....	65
7.	总结.....	66
	参考文献.....	67
	缩略语.....	67
	致谢.....	69

1. 引言

5G 致力于应对 2020 后多样化差异化业务的巨大挑战，满足超高速率、超低时延、高速移动、高能效和超高流量与连接数密度等多维能力指标。FuTURE 论坛 5G 特别兴趣组（SIG）围绕着“柔性、绿色、极速”的 5G 愿景，重新思考 5G 网络的设计原则：香农理论再思考：为无线通信系统开启绿色之旅；蜂窝再思考（Rethink Ring & Young）：蜂窝不再（no more cell）；信令控制再思考（Rethink signaling & control）：让网络更智能；天线再思考（Rethink antennas）：通过 SmarTile 让基站隐形；频谱空口再思考（Rethink spectrum & air interface）：让无线信号“量体裁衣”。围绕这些理念，FuTURE 论坛 5G SIG 在 5G 网络架构、RAN 和空口研发方面的取得了显著进展[1, 2]。

在 5G 业务场景与需求、关键技术逐渐明晰，以及 5G 标准化即将开展之时，迫切需要给出 5G 系统设计框架以及面向标准化的系统解决方案。本白皮书（版本 2.0）基于之前的设计原则，进一步对前传链路和协议栈再思考，聚焦用户中心网络（UCN）和软件定义空口（SDAI），重点关注如下内容：

- 5G 总体框架与目标
- UCN 架构与关键使能技术
- SDAI 与关键使能技术
- 5G 安全与智能终端技术

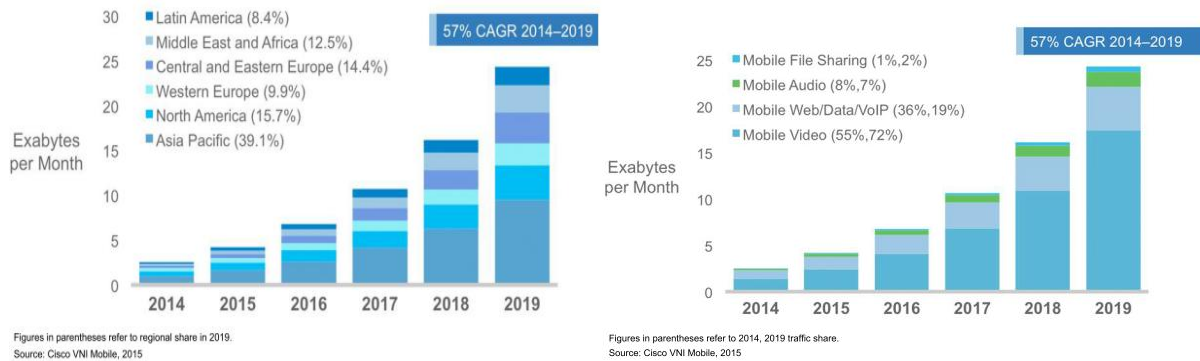
本白皮书（版本 2.0）于 2015 年 11 月发布，目的是统一共识，凝聚力量，应对 5G 标准化。后续版本根据 5G 研发进展情况适时更新。

2. 5G 总体目标与框架

2.1 5G 总体需求

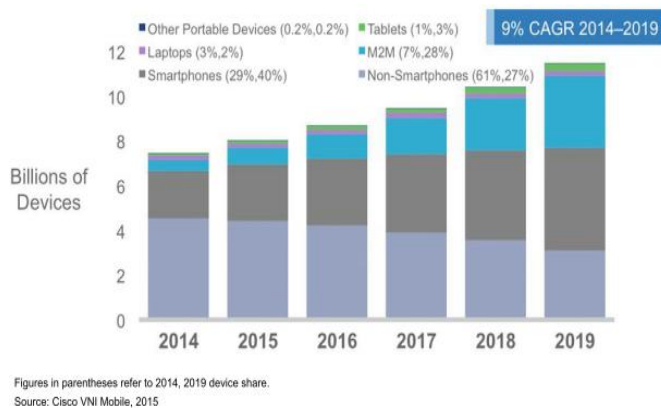
根据图 2.1 中业务预测报告显示：2014 到 2019 年全球 IMT 流量将进一步快速增长，总的流量上涨倍数达到几十到 100 倍 [3]。另外，我国“互联网+”国家战略需求中明确指出：未来电信基础设施和信息服务要在国民经济中下沉，满足农业、医疗、金融、交通、流通、制造、教育、生活服务、公共服务、教育和能源等垂直行业的信息化需求，改变传统行业，催生跨界创新。因此，未来 5G 网络不仅需要继续面对移动互联网业务带来的挑战，例如：频谱效率和用户体验速率的提升，时延的减少，移动性的增强等，同时还需要满足物联网多样化的业务需求。

从信息交互对象不同的角度出发，目前 5G 应用分为三大类场景：增强移动宽带（eMBB）、海量机器类通信（mMTC）和超可靠低时延通信（eMTC）。eMBB 场景是指在现有移动宽带业务场景的基础上，对于用户体验等性能的进一步提升，主要还是追求人与人之间极致的通信体验。mMTC 和 uMTC 都是物联网的应用场景，但各自侧重点不同。mMTC 主要是人与物之间的信息交互，而 uMTC 主要体现物与物之间的通信需求。



(a) 全球不同区域业务增长趋势

(b) 全球业务类型增长趋势



(c) 全球终端及连接数增长趋势

图 2.1 全球移动业务 2014-2019 增长趋势

5G 网络关键能力指标（KPI）在不同场景下侧重点不尽相同。本白皮书第一版（版本 v1.0）[2] 定义了两类 KPI：一是速率、时延、密度和移动性等性能指标，二是频谱效率、能效效率以及成本效率等效率指标。本白皮书与 ITU [4] 相比，两者定义的 KPI 指标基本一致。但前者定义了 ITU 没有定义的端到端时延和成本效率指标，对于频谱效率的指标要求也要高于 ITU。图 2.2 给出了具体的 KPI 目标值，可见为了追求极致的用户体验，有些如车联网和工业互联网等场景对于 5G 部分 KPI 指标要求极具挑战性。

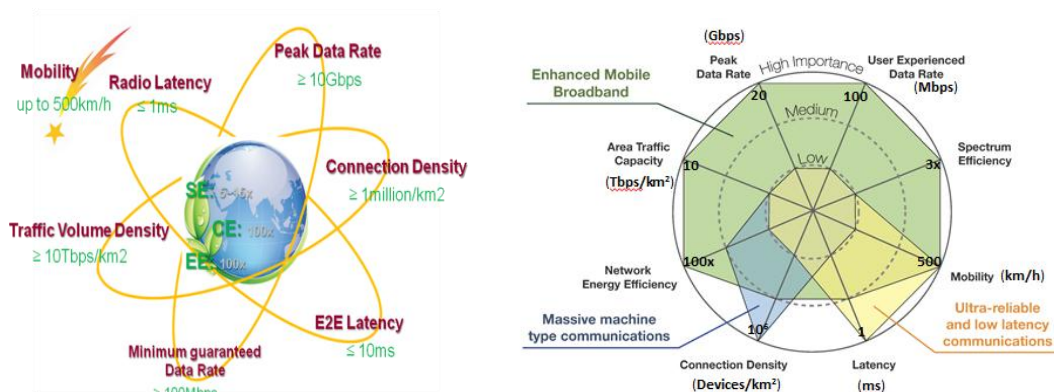


图 2.2 5G 能力 KPI（引自 Future-Forum 第一版白皮书 [2] 及 ITU 愿景报告[4]）

为了满足 2020 后的 eMBB 需求，一方面，4G 空口将持续演进和增强：通过更多的载波聚合（如 32 载波）和多天线增强，如 FD-MIMO，Massive MIMO 等实现更高吞吐率；通过多连接、多 RAT 融合持续增强技术实现更好的异构组网和用户体验；通过更加灵活的频谱使用增加可用频率总量和频率利用效率。另一方面，为了达到 5G 部分极高 KPI 指标，如 10Gbps 峰值速率，需要引入 5G 新空口和新技术特性。

为了满足 mMTC 场景需求，基于 4G 的 M2M 特性将在技术和实现上持续演进和增强，满足一定场景的需要。更重要的，需要设计全新的针对低功耗、大连接、低成本、深度覆盖的 5G 物联网新空口，针对物联网业务特性设计全新的系统带宽，选择合理的载波设计，优化实现信令过程和业务过程，以极低的成本满足未来千亿连接的物联网广泛普及使用的需求。

为了满足 uMTC 场景需求，拓展车联网、工业控制等场景，一方面可以基于现有 LTE-A 系统，进一步扩展和增强 D2D 特性、群组通信特性等支持更多行业的扩展，另外可以在后向兼容的基础上设计新子帧结构和传输过程，缩短端到端时延，提升用户体验。但是 4G 增强很难满足 5G 提出的 1ms 空口时延以及 99.999%可靠性的需求，所以需要设计 5G 新空口，引入新的载波设计，缩短子帧长度，支持新的调度和资源分配模式，新的组网形态和端到端传输方式等以缩短时延，同时引入先进的编码调制，先进的传输方式以提高传输的可靠性。

由于支持的场景众多，频率范围广，5G 空口设计上应尽量灵活可配置，避免多网络重复建设，降低系统复杂度和整网成本。尽量统一灵活空口设计将成为 5G 空口重要目标。

综上，在 5G 演进路线上，4G 及其演进系统与 5G 系统将长期共存，并与其它无线宽带技术（如下一代 WLAN）紧密融合，如图 2.3 所示。4G 演进主要面向 6GHz 以下频段，满足部分 5G 场景和需求，5G 新空口则同时工作在低频段和高频段，满足全部 5G 场景和需求。

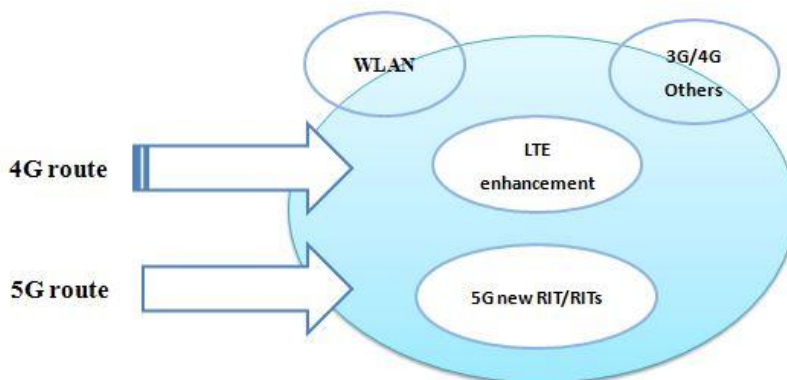


图 2.3 5G 技术路线图

2.2 设计框架

5G 设计框架包含了 5G 愿景、5G 场景、5G 能力、设计理念、核心技术、测试评估和 5G 方案等多个要素。网络愿景是“柔性、绿色、极速”[2]。目标场景是 eMBB、mMTC 和 uMTC，包括移动互联网、工业互联网和车联网以及其他具体场景[4]。为实现愿景和场景目标，图 2.2 清晰的定义了 5G 能力。如图 2.4 和 2.5 所示，为了实现这些目标和能力，5G 设计理念从香农理论再思考、蜂窝再思考、信令控制再思考、天线再思考、频谱空口再思考 [2]，到前传再思考和协议栈再思考，全面定义 5G 设计原则。基于这些理念，UCN 和 SDAI 两个核心概念被明确作为 5G 系统解决方案的基础，这里 UCN 通过 RAN 架构和功能重定义，尝试提供一个拥有公共的高层协议的统一的无线接入架构，而 SDAI 通过空口不同功能模块的重定义，提供一个具备面向各种差异化业务和场景的定制能力的统一空口。UCN 和 SDAI 中关键使能技术的性能将被评估和测试，同时考虑频谱策略和测试测量技术，以验证技术 UCN 和 SDAI 的 5G 解决方案是否能达到 5G 能力目标，这是一个闭环设计过程。



图 2.4 从 5G 愿景到研发理念 [2]

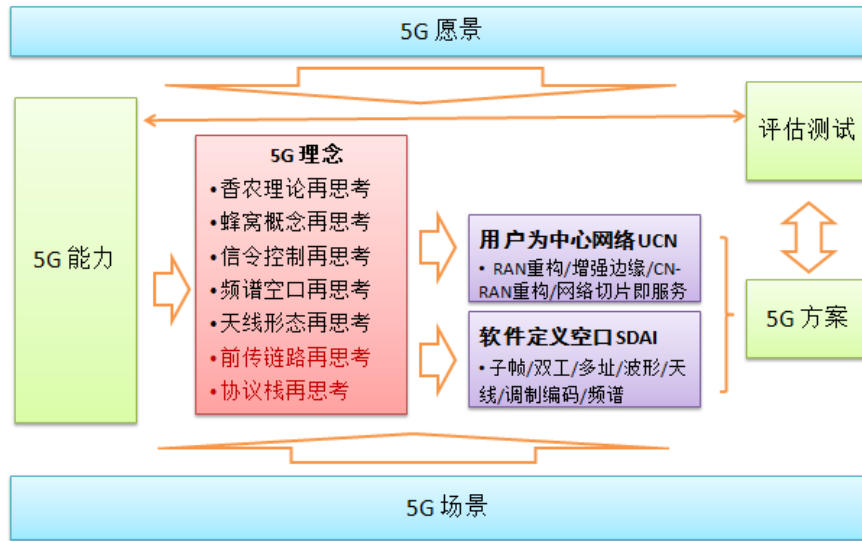


图 2.5 5G 设计框架

2.3 频谱策略

上述对 5G 总体需求的研究表明无论从增强的移动宽带的业务需要还是海量的机器类通信的人与物和低时延高可靠的物与物的通信需求，都需要有未来对新的频谱、更大带宽的频谱的要求，特别是用户业务需求和应用的增长、以及设备连接数的百亿级需求对于无线新技术和新频谱都提出了更高的要求。

ITU-R 在 WRC-15 研究周期里（针对 WRC-15 A11.1），对满足未来 2020 年以前的频谱需求和候选频段进行了广泛深入研究，开展了如图 2.6 所示候选频段的共存分析和频段使用的研究：

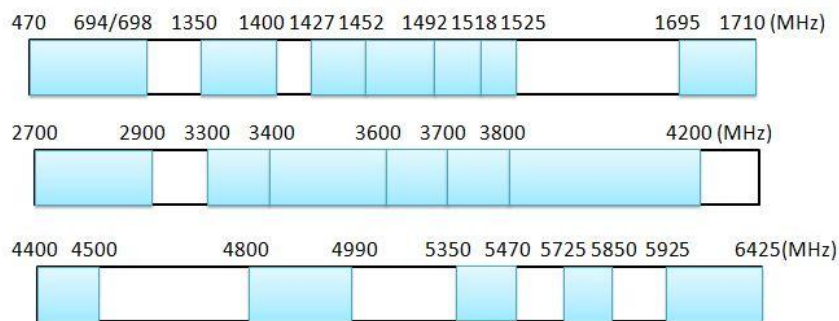


图 2.6 ITU-R 研究的 6GHz 以下候选频段

在 2015 年 11 月即将召开的 2015 世界无线电大会上将完成对新的 IMT 候选频段的确认分配工作。我国也积极开展了 IMT 候选频段的研究，提出了 3300-3400MHz，4400-4500MHz，以及 4800-4990MHz 的候选频谱的支持意见。

但从目前的各国提出的候选频段在 ITU 和各区域组织的讨论上看，各地区、国家候选频谱的提出比较分散不统一，并且距 ITU 研究组测算的频谱需求总量还有比较大的缺口，未来移动通信论坛支持产业界的

努力，在 WRC-15 的后期准备和大会期间，积极推动满足未来频谱需求预测所需的额外频谱的确认工作，来满足未来移动通信 2020 年以前的业务要求。

为了更好的满足 2020 年及以后移动通信业务持续发展的需要，ITU-R WP5D 完成了 IMT.VISION 的研究工作，制定了 5G 发展的愿景和需求，并明确了 5G 的命名为“IMT-2020”。目前全球各地区的研究机构以及工业界也都开始了有关 5G 相关技术和频谱的研究工作，因此各区域无线电规则组织也都在考虑为下届大会 WRC-19 建立 IMT 相关议题，目标是在下届大会上确认 IMT 全球统一的 5G 频谱。由于 5G 需要更高的速率和带宽，6GHz 以上高频段成为研究的热点。技术方面，ITU-R WP5D 已经完成了 IMT.ABOVE 6GHz 的研究报告，研究 6GHz 以上的频段用于 IMT 的技术可行性，以及相关的使能技术，如，有源和无源部件、天线技术、部署架构和仿真、特性测试的一些结果。该报告在 2015 年 7 月的 SG5 的会议上得到通过。频率方面，目前部分地区和国家已积极支持 WRC-19 为 IMT 成立相应的议题，研究未来 6-100GHz 频段 IMT 的候选频段，满足 2020 年以后到 2030 年的 IMT 的频谱需求，并在 ITU 下一研究周期展开相应的候选频段、共存研究分析的工作。这里列出全球频率划分均为 MS 主用划分的频段，如图 2.7 所示。

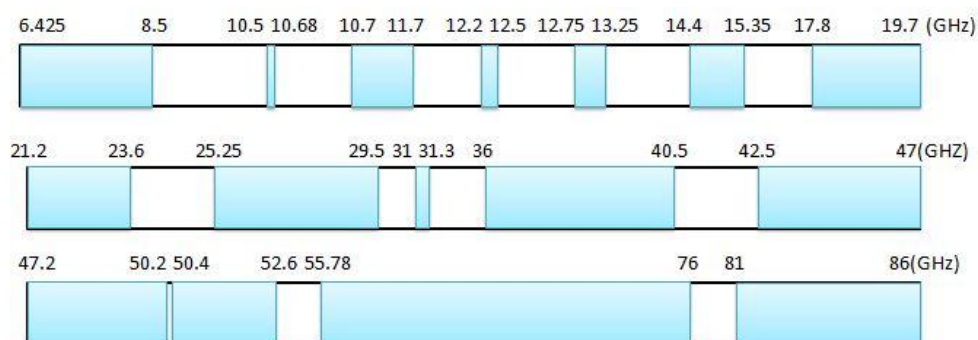


图 2.7 6-100GHz 频段 IMT 的候选频段

未来移动通信论坛，支持在 WRC-15 大会上为下届大会 WRC-19 确立 IMT 新的议题，并积极开展 5G 相关技术和频谱的研究，特别是在 6GHz-100GHz 频段用于 IMT 的可行性和信道测量与建模方面开始了相关的研究工作。

未来移动通信论坛，也对未来 5G 频率部署展开了技术讨论，基本观点为满足未来 5G 的业务需求，需要有低频段的覆盖，还需要像 2.6GHz、3.5GHz 这样的满足容量要求的频段，同时需要 6GHz 以上的高频段的部署，并通过波束赋形等 5G 技术，支持更高要求的宽带业务需求。未来移动通信论坛将后续研究高频段的技术特性，对高频段使用的候选技术、频段展开进一步的研究。

2.4 测试需求

5G 与现有的 3G/4G 技术相比提出了更为激进的性能要求。需要巨大的改变和更多的新技术来满足 5G 的需求。因此，为了验证这些改变和新技术与 5G 需求相匹配，相应的测试测量技术不仅对研发很重要，也对未来的网络部署也很重要。

5G 新技术很大的可能性将会包括毫米波频率，超宽的带宽，和大规模多天线技术。首先最重要的是用户和设备之间的空间信道的测量，建立信道性能的数学模型，并使用它们来定义 5G 新的空中接口标准。

5G 空口也发生着重大的变化来满足 5G 的性能要求。包含软件定义的新空口概念，新的空口技术包括 Massive MIMO，高频段通信，新的波形和多址技术等。每项新技术需要专门的测试解决方案，验证这项技术实际能够达到的性能，并验证性能优化解决方案。例如，Massive MIMO 测试解决方案需要扩展到多通道来测试 TX/RX 性能指标，并采用 OTA 测试来测试系统性能。

还有一个很重要的方面，5G 网络发生非常大变化来满足 5G 网络性能要求：高的数据速率，高容量，低延迟等。专用的测试和测量解决方案来验证新的网络体系的性能，也有助于优化 5G 网络部署。5G 网络测试的挑战主要在于这些测试解决方案需要：支持分布式的测量，能够进行大规模的测试，能够仿真实际的信令业务和数据业务来实现网络的压力测试。同时与现有多种无线接入网络的兼容性测试是测试方案的另外一个挑战。

作为未来论坛 5G 兴趣组的一部分，5G 测试测量小组致力于 5G 测试技术的研究并力求为测试方案提供指引。在测试专项白皮书中，上文所提到的测试方向都做了广泛的讨论和严谨的论证。通过白皮书的研究成果，可以预期 5G 的测试方案是可行的，但也面对着从方法论到具体实现的巨大挑战。

在未来，5G 测试测量小组会继续更加广泛和深入的研究 5G 测试技术。通过跟踪最新的测试测量方案，小组会吸收更多的对 5G 测试感兴趣的伙伴，从而推动 5G 测试产业链的发展。同时通过白皮书的持续更新，发布最新的测试方案和测试结果，可以为 5G 测试提供参考并加速 5G 测试的标准化过程。

3. 用户中心网络 UCN

3.1 UCN 总体目标

3.1.1. 端到端总体架构与目标

在提升移动网络的性能，以及支持更多样化应用场景的同时，5G 网络架构的目标是：更简单、更高效、更灵活、更开放。

- 简单：功能、接口和协议可以进一步简化、融合，或者设计更简单的替代逻辑，例如，跨网的互操作可以通过更扁平、更简单的功能和协议来实现；
- 高效：低成本的网络部署、高效的流量转发，以及优化的业务路由能够提升业务提供的有效性，降低业务成本；接入网络 and 核心网络去耦合，能够独立灵活演进；
- 灵活：网络功能可以及时进行更新，能够灵活构建以及迁移；网络能够识别用户和业务场景的差异性，并提供相应的定制化的网络服务；
- 开放：网络的状态信息和网络的功能信息可以开放给第三方的应用，提高用户的体验，拓展网络生态，提升网络营收。

面向上述抽象的网络设计准则，5G 网络架构可以设计成若干层，即，接入层，汇聚层，控制层，服务层，开放式应用程序接口（API）和应用层，如图 3.1 所示。

- 接入层，包括多种无线接入技术（RAT），4G、5G、WiFi 等。
- 汇聚层，允许传统的核心网功能下放到接入网位置；汇聚层的主要功能包括多 RAT 管理，本地转发，本地数据处理、本地数据感知。
- 控制层包含了网络的核心控制功能，包括网络策略控制、业务会话、移动性管理、集中数据网关；同时，控制层能够灵活地管理配置汇聚层的本地用户面功能。
- 服务层提供增值业务服务，比如，流量优化（例如，视频优化加速），类似防火墙的安全功能，进一步提升用户体验。
- 开放式 API 可以管理和调用网络关键功能块提供的信息和能力，并开放给第三方应用。
- 应用层包括来自 OTT 服务商、企业以及移动虚拟运营商提供的各种应用。

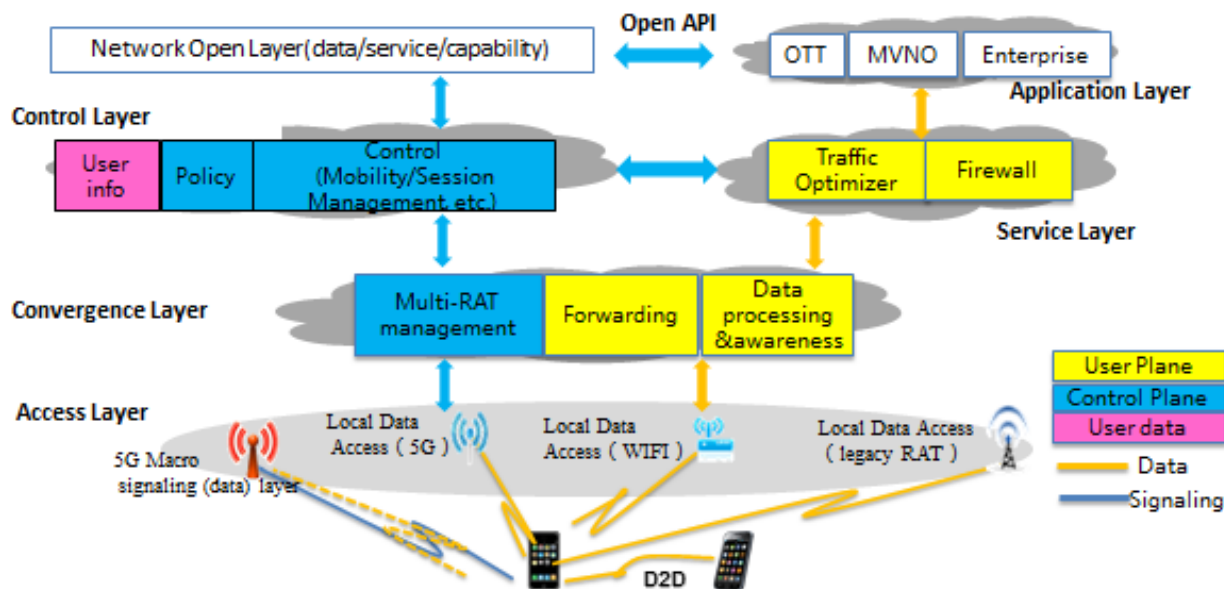


图 3.1 5G 端到端网络架构示意图

总结起来，5G 网络架构需要实现如下架构特征：控制平面和转发平面分离，网络功能虚拟化，灵活的网络业务流程，网络的开放性，多网多制式融合，本地化缓存/处理/转发，灵活组网。这些特征依赖如下相对应的技术趋势：软件定义的网络/网络功能虚拟化（SDN/NFV）技术，网络切片技术，融合多制式网络技术，超密集网络实现技术，C-RAN /下一代前传接口（NGFI）。值得一提的是，SDN/NFV 技术有助于建立一个通用、可管理的网络基础设施框架；并且，基于这个设施框架，能够实现软件定义、可编程的网络功能和网络分片。SDN/NFV 技术促成了一个全新网络理念的诞生、加速 5G 网络迈向绿色和柔性。

3.1.2. 无线接入网总体目标

截至目前，无线接入网络面向所有用户提供无差别的一致性的网络架构和服务。然而，在 5G 时代，不仅业务将会更加多样化、网络的接入点以及网络的拓扑都将更加复杂。因此，UCN 接入网络（RAN）需要具体实现如下目标：

- UCN RAN 应该有足够的能力，能够支持所有 5G 用例，包括高密度流量，超低成本，超低延迟。
- UCN RAN 应该实现高效率，这意味着：需要面向不同业务和网络场景，提供场景相关的效率最优化的网络服务。
- 为了实现网络的简化操作，网络中所有的业务场景对应的多有的网络服务，需要通过一个灵活可伸缩的网络架构框架统一地进行管理。
- 该架构框架需要能够感知业务需求和网络状态，决策以及提供最优的网络服务和网络配置。

3.2 无线接入网框架

表 3-1 列举了 3 个 5G 关键场景的核心性能指标以及[2]中发现的一些相应的技术的映射关系：

表 3-1 应用场景和技术引擎的映射关系

	eMBB	mMTC	uMTC
关键性能指标 (KPI)	用户感知数据速率；高移动性	海量连接；低成本	超低时延；超高可靠性
技术引擎	超密集网络；多连接；多网多制式融合；移动边缘计算	动态网络	移动边缘计算；D2D；V2X；动态网络

根据所述四个 UCN RAN 目标，UCN RAN 主要包含如下四个架构元素：

- **RAN 重构：**在 5G，无线网络环境变得更加复杂，将包括多样的接入点和拓扑。为了提升网络整体效率，UCN RAN 将打破传统蜂窝小区的边界。通过将 RAN 功能分配到不同的最佳承载的接入点，以及通过接入点间的协作配合，UCN RAN 将充分利用不同网络接入点的差异性、通过节点间协作，实现优化的网络效率；
- **边缘提升：**如表 3-1 指出的，网络应该部署融合的边缘服务，以支持最低 1ms 的端到端网络延迟。与此同时，考虑到移动宽带将持续作为网络的主要驱动业务，可以通过部署边缘数据中心以及边缘控制器，实现有效的数据分流、分发以及本地移动性支持，从而增强移动宽带用户的体验。此外，边缘服务还包括 RAN 上下文信息以及 RAN 能力的开放，可以用于支持包括跨层优化等业务提升技术。
- **CN-RAN 再划分：**从表 3-1 可以看到，已有网络架构需要更加扁平化，以便支持多 RAT 融合，以及不超过 10ms 的端到端时延。因此，UCN 将重新划分核心网络（CN）和接入网络（RAN）的功能、简化网络功能、接口和协议，以实现高效扁平的架构逻辑；
- **网络切片即服务：**不同于传统的所有场景通用一样的网络架构和流程，UCN 将面向不同业务场景提供定制化的网络服务，在满足业务需求的基础上、实现高的网络效率。网络服务的选择和提供将通过一个通用的、可管可控的网络基础设施实现。这种设施可以实现软件定义、可编程的网络功能和网络服务，从而，可以帮助实现灵活和可扩展的 UCN 网络。

图 3.2 是 UCN RAN 的框架示意图。其中，集中的无线网络控制器负责支持多 RAT 的融合、多连接的协调和边缘控制；无线数据中心面向终端用户提供边缘数据业务。

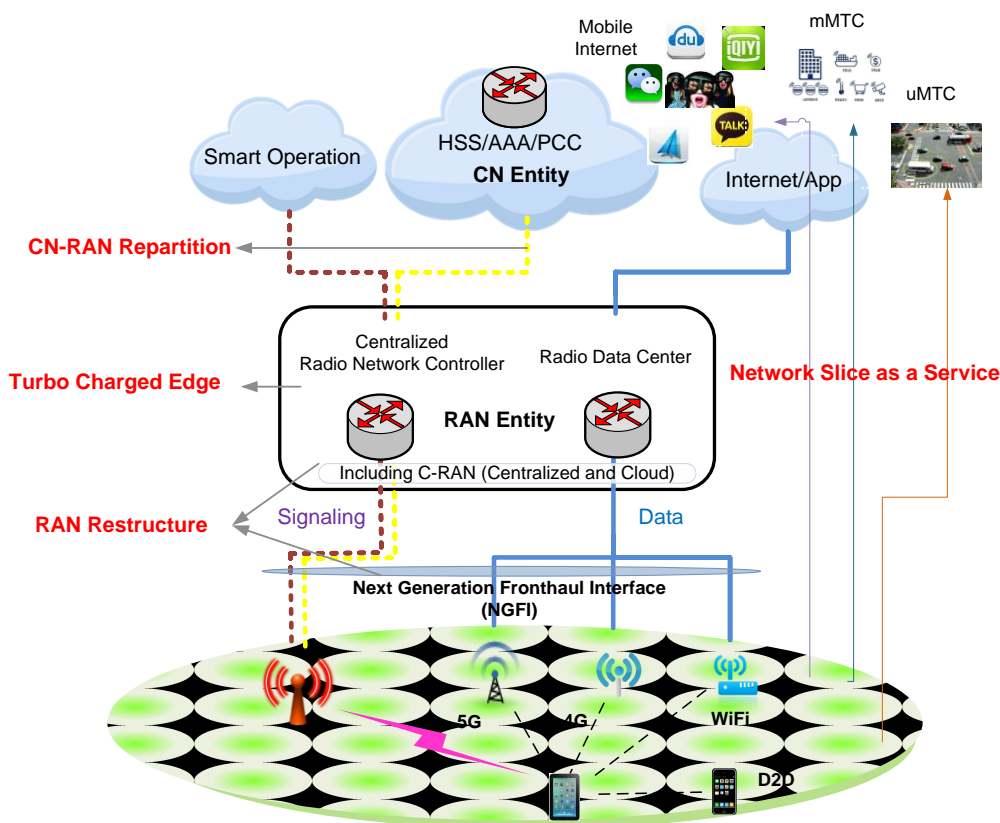


图 3.2 UCN RAN 框架示意图

3.2.1. RAN 重构

RAN 重构可以从以下几个方面考虑：

- 随着 UDN 和 C-RAN 被确定为 5G 关键使能技术，传统静态的蜂窝边界将被打破以支持平滑的移动性体验。在异构网络，控制平面可以始终由宏站承载、用户平面可以由集中控制面进行协调调度。特别地，通过在多个小蜂窝的协作，实现控制信令的分集传输，可以构造虚拟的控制面。
- 除了业务的 KPI，网络效率也被确定为 5G 重要指标。在 4G，每个基站是一个独立小区、具备完整的接入网络功能。每个小区独立地广播专属的存在信息、系统信息和同步信号。但是，相同的独立广播机制应用到 UDN 或重叠覆盖的多制式多接入场景，容易造成广播风暴；同时，大量的广播信息，一方面造成网络干扰，另一方面，减少了可用的数据传输资源，降低了系统性能。因此，5G UCN 网络传输，包括绝大多数的网络广播信息，将只在需要的时间、需要的地点发生。具体地，可以搭建一个极简广播层，保证网络可用信息的发送、进而保证用户可以随时找到可用网络；这个广播层可以为多个接入制式多个接入网络所共用。非广播层的接入点仅在有数据要发送的时候激活。

- 如上所述，融合多制式多空口技术以及多连接技术，是 5G 的关键技术，能够满足无缝用户体验以及有效网络资源利用。然而，多制式多连接的协调很难有效地在完全分布的 4G 架构逻辑上实现。NGFI 技术致力于支持不同程度的接入集中模式；它通过重新定义 C-RAN 架构中的集中基带单元（BBU）和远程射频单元（RRU）之间的功能切割、分布，能够很容易地支持网络的互操作。适配不同的前传能力和不同的业务，网络支持灵活的 RAN 功能切分。NGFI 支持的网络架构能够有效支持包括 RAN 控制面/数据面分离、多制式多接入融合以及多连接技术。

3.2.2. 边缘提升

边缘提升可以从以下几个方面来说明：

- 5G 时代，在网络边缘，比如基站上，可以部署无线数据中心，以解决业务分流出口。同时，RAN 边缘控制器可以为某个第三方应用的某个 IP 业务流选择最佳路由，导向本地或者远程网关。此外，边缘控制器需要能够有效地处理用户在多个网关之间的移动性，包括本地网关之间，以及本地网关和远程网关之间的移动性。
- 无线接入网络能力和网络的上下文可开放给第三方业务提供商，使得服务的提供可以适配网络能力和网络条件进行优化，提升用户体验。举个例子，用户的 MAC 或者 RLC 层的吞吐量可以开放给业务侧的 TCP 窗口控制，进行 TCP 业务分发优化。
- 除了通信网络能力，无线接入网络也可以开放边缘计算能力。这种边缘计算有助于提高要求严苛的业务的服务质量，比如对延迟和带宽要求很高的业务类型。举个例子，本地数据中心的部署对于提升基于虚拟现实或者增强现实的交互在线游戏的用户体验非常有效。而网络能够适配不断涌现的新的业务类型伸缩地生成新的网络功能块。

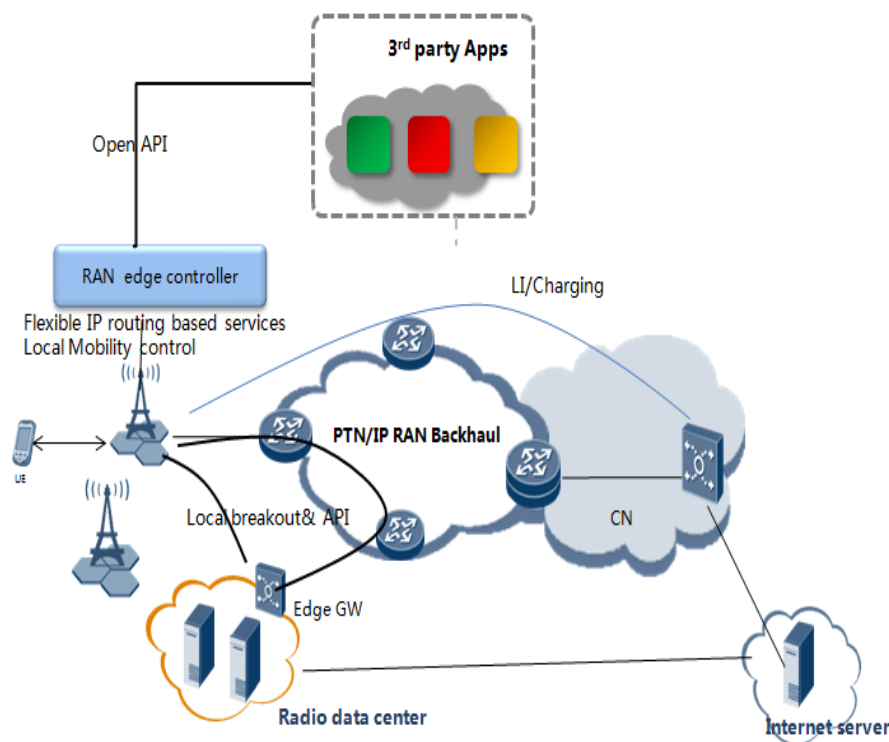


图 3.3 边缘控制的灵活网络路由

3.2.3. 核心网与接入网再划分

CN-RAN 的再划分可以从以下几个方面来考虑：

- 5G 网络需要在特定应用场景下支持毫秒量级的端到端网络延迟。因此，网络接口和协议将被重新设计，使之更加简洁、高效，从而降低网络延迟。网络需要减少通信链路必须经过的网元节点和必须激活的网络功能。举个例子，通过将传统的分级映射的网络承载，进行扁平化的重新设计，潜在可以缩短网络的时延。
- 5G 需要支持融合多制式多接入技术，使得所有的无线网络资源能够统筹调度，实现最优化的用户体验和最有效的网络资源利用。然而，在传统的蜂窝网络，多个不同制式的协调是在 CN 实现的；层次化的网络架构导致难以实现跨制式的平滑互通。因此，UCN RAN 将支持多种制式多种接入方式在 RAN 侧进行有效融合，在上层面向用户提供统一的无差别的通信链路，实现网络服务和空口接入方案的解耦。
- 一旦网络业务通过边缘提供，需要有新的方式来定义 CN 和 RAN 的边界。同时，网络潜在需要定义新的功能以及接口来支持边缘网络架构。

3.2.4. 网络切片即服务

5G 网络可用为特定的业务和网络场景提供定制的网络切片服务。为了实现这种“网络切片即服务”，需要进一步完成如下工作：

- 为每个垂直行业的业务用例设计最优网络切片方案，包括网络拓、网络架构和网络协议。
- 支持基于业务上下文感知的动态控制策略，支持最佳网络切片的决策。
- 逻辑上分离的网络切片可以共存在同一个共享的物理网络基础设施上。支持各个网络切片的类似功能，比如各个切片的物理层功能、MAC 层功能等，在相同物理设施的共存问题需要进行仔细研究，包括通过简单的参数配置实现灵活切片功能以及通过完全垂直的网络功能实现不同切片等。

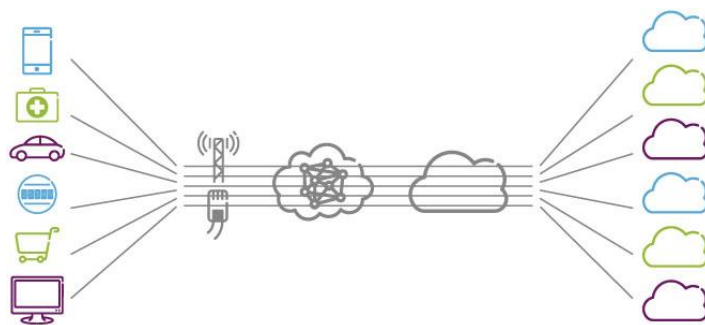


图 3.4 一个共享的网络基础设施通过网络切片支持不同应用用例

3.3 关键使能技术

3.3.1. UDN

UDN 是满足 2020 年后超高流量通信的需求，将成为一种关键技术。通过在 UDN 中大量装配无线设备，可实现极高的频率复用。这将使得，在热点地区系统容量获得几百倍的提升。典型的 UDN 场景包括：办公室、聚居区、闹市、校园、体育场和地铁等。但是持续的网络密度提升将带来新的挑战，如：干扰、移动性、回传资源、装置成本等。为满足典型场景的要求，并克服这些挑战，虚拟小区技术、干扰管理及抑制技术和协作传输及反馈技术将是 UDN 领域中的重要研究方向。虚拟小区技术包括用户中心虚拟小区技术、虚拟分层技术和软扇区技术。

用户中心虚拟小区的目标是实现无边界的网络结构。由于用户覆盖范围及服务要求的限制，虚拟小区随着用户的移动而不断更新，并在虚拟小区及用户终端之间保持高质量的用户体验和用户服务质量 (QoE/QoS)，而不必考虑用户的位置。虚拟小区技术打破了传统的小区概念，不同于传统的小区化网络，此时的用户周围的接入点组成虚拟小区并联合服务该用户，并以之为中心。随着用户的移动，新的接入点

将加入小区，而过期的接入点将被快速的移除。图 3.5 表示了用户中心化的虚拟小区的工作原理。具体来说，用户周围大量的接入点构成虚拟小区，以保障用户处于虚拟小区中央。一个或多个接入点将被新的接入点替换，这意味着随着用户的移动，新的接入点将加入移动小区的边缘。这种虚拟化小区的主要优点是保持较高的用户体验速率。

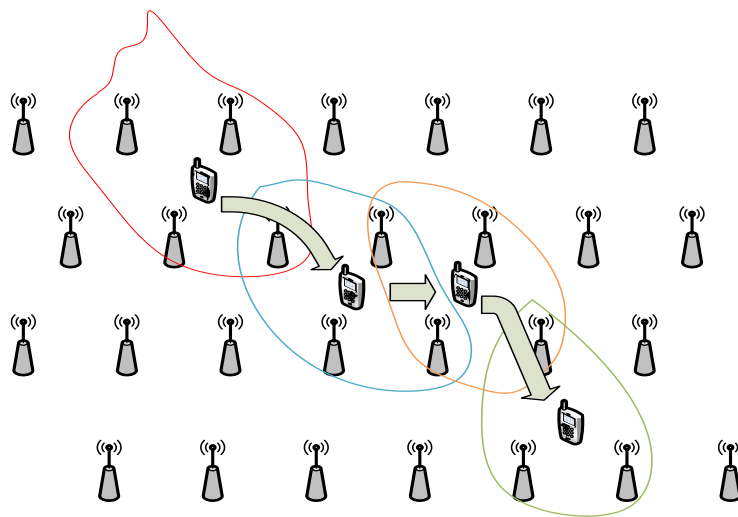


图 3.5 用户中心式虚拟小区

虚拟分层技术是基于由虚拟层和真实层构成的多层架构网络。此时，虚拟层用于广播、移动性管理等，真实层用于传输数据。在相同的层内，不再需要小区重选和切换，因此用户体验将极为可观。对于软扇区技术，多个扇区有中心控制单元生成的多个波束形成。软扇区技术可以对真实扇区和虚拟扇区提供统一化的管理，减少操作复杂度。

干扰管理和抑制技术可分为两种：基于接收机和基于发射机。对于下行链路，基于接收机的干扰消去技术需要用户的基站之间的协作。在用户端，须要使用一些非线性算法，如 SIC 和 MLD 等。在基站端，各相邻小区间须交互干扰信息。对于上行链路，基于接收机的干扰消去技术几乎只需在基站端进行操作，与 CoMP 类似。在基站端，中控设备可实现小区间的信息/数据交互。基于发射机的干扰消去，通常被传统的 ICIC 技术采用。更进一步的说，下行链路 CoMP 可被认为是 ICIC 的一种实现方式。相比于分布式协作，中心化协作的增益要更高，收敛速度更快。在 UDN 中，各小小区协作是一种典型场景，该场景更适于设置一个中心控制器。在另一方面，NFV 是一种网络架构的演变趋势，其将平滑的提供一种中心化的协作方式。

接入和回传的联合优化包括以下几种技术，级联回传技术和无线自回传技术。在级联回传架构下，基站端将进行层标号。第一层由宏小区和小小区组成，由有线链路进行连接。第二次的小小区通过单跳无线传输与第一层的基站相连。第三层及之后各层的与第二层的情况类似。在此框架下，有线与无线回传向结合，实现即插即用的网络架构。

自回传是无线回传的主要形式。自回传技术的明显特征是接入和回传链路通过时分/频分复用共同使用相同的频率资源。同时，接入和回传链路的资源分配更加灵活，因此，接入回传联合优化可大幅提升资源的有效利用率。一些自回传的增强技术可显著提升自回传链路的容量，包括和 BC+MAC 技术和虚拟 MIMO 技术。在 BC+MAC 方案中，在第一阶段，主 TP 向各从 TP 和用户广播信息；然后，在第二阶段，用户通过空分多址的方式自主 TP 和从 TP 接收不同的信息。虚拟 MIMO 技术使用多个中继节点或协作用户构建一个类似于 MIMO 的网络。根据图 3.6，在粉色的簇中，4 个中继节点将合作构成一个 8 天线的虚拟 MIMO，其中 DeNB 拥有 8 天线，各中继节点包含 2 个天线。因此，虚拟 MIMO 的最主要优点是，其可以利用更高的自由度进行干扰抑制。

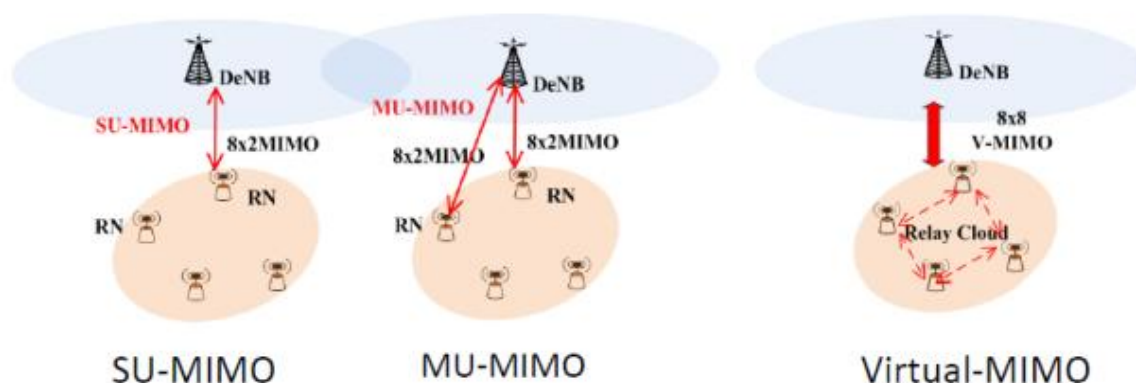


图 3.6 虚拟 MIMO

对于具体的技术描述请参考白皮书 2.0-E，一些加强 UDN 的关键技术，包括动态簇优化、动态多连接优化和基于 BS/UE 比的基站密度优化等，将在今后的研究中进一步探索。

3.3.2. C-RAN/NGFI

面向无线接入网络演进和 5G 关键能力需求，C-RAN（Centralized, Cooperative, Cloud RAN）是未来无线接入网演进的重要方向。NGFI 网络用于连接无线云中心（Radio Cloud Center, RCC）和远端无线处理系统（Remote Radio System, RRS），定义高带宽和低延迟的前传网络是 5G 的必然需求。首先，在 RCC 引入资源调配控制单元进行分层协作化，可有效地解决高容量和高密度网络中的干扰问题。其次，基于 NGFI 的 C-RAN 可实现 BBU/RRU 功能重构，从而更好地满足未来网络 C/U 分离、Massive MIMO 等新技术要求。最后，面向低时延和高带宽的上层业务需求，业务下沉和核心网功能边缘化趋势明显。在考虑业务命中率的前提下，RCC 是折中服务用户数和业务时延需求的业务下沉部署点。

如图 3.7 所示，RRS 汇聚小范围内 RRU 信号经部分基带处理后进行前端数据传输，可支持小范围内物理层级别的协作化算法，适用于宏微覆盖 HetNet 场景和密集 UDN 高容量场景。NGFI 网络是低时延、

高带宽的包交换网络，提供 RCC 与 RRS 间的低时延信息交互，为在 RCC 实现 MAC 及以上层级的快速协作算法提供基础。RCC 可实现跨多个 RRS 间的大范围控制协调和协作化算法，以及多小区控制面/用户面逻辑上的分离，并且为网络开放接口 API 和虚拟化提供部署点。

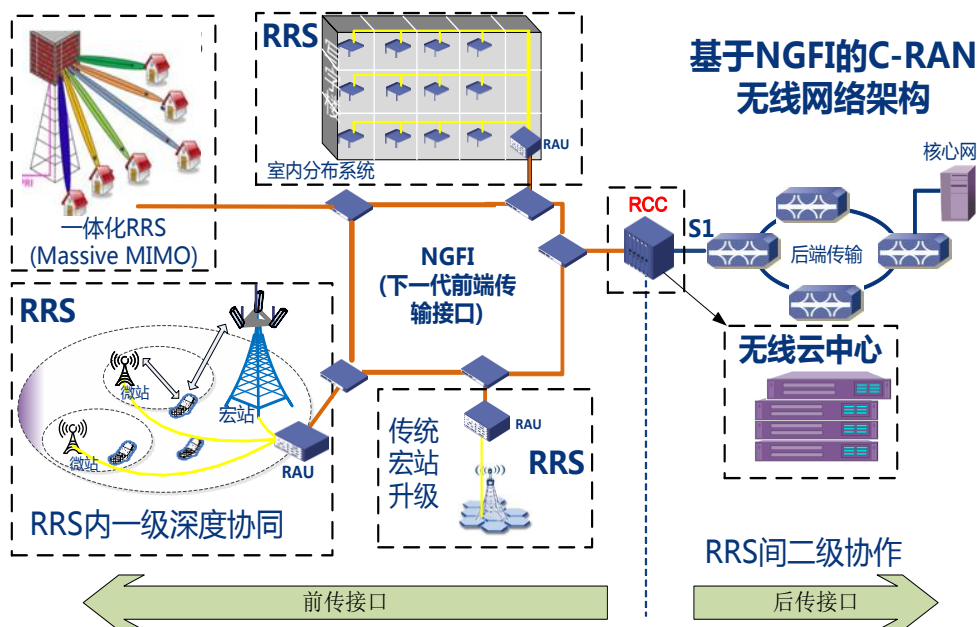


图 3.7 基于 NGFI 的 C-RAN 无线网络架构

3.3.3. SDN/NFV

软件定义网络（SDN）来源于 Stanford 大学重构传统路由交换网络的创新工作，针对未来无线网络演进的需求，SDN/NFV 作为 5G 关键技术之一，成为无线网络架构演进的重要方向。目前大家较为认可的 SDN 定义可以概括为“控制/转发分离，简化的数据（转发）面，集中的控制面，软/硬分离、网元虚拟化及可编程的网络架构”。软件定义网络采用软件集中控制、网络开放的三层架构，提升网络虚拟化能力，实现全网资源高效调度，提供了网络创新平台，增强了网络智能。网络功能虚拟化（NFV）源于运营商在通用 IT 平台上通过软件实现网元功能从而替代专用平台的尝试，从而降低网络设备的成本。NFV 系统通常包括虚拟的网络功能（VNF，即实现网络功能的软件），NFV 基础设施（NFVI），NFV 管理与协同（NFV-MANO）三个部分。

由于 SDN/NFV 在灵活性、支持快速创新方面的优势，被广泛认为是网络演进的主要驱动力。然而，5G 在核心网和接入网是否需要引入 SDN 和 NFV 技术，哪些 5G 的需求需要采用 SDN 和 NFV，SDN 和 NFV 技术会对 5G 产生何种影响，SDN 和 NFV 如何演进才能满足 5G 的要求，这些都是在 5G 架构研究中期待得到解决的问题。

SDN 由于控制平面和转发平面的分离，给网络的控制带来了极大的灵活性，提供快速部署，更改，按需分配的可能；同时南向北向接口的公开，促进了设备的互联和互通，使得控制部分和数据转发部分可以分别演进和部署，提高网络的灵活性和可扩展性，朝着控制功能集中化，虚拟化，转发功能标准化，可控化发展。

NFV 将虚拟化技术引入到电信领域，使得硬件和软件能够解耦，采用通用平台来完成专用平台的功能。目前核心网的控制部分较为复杂，需要多个网元，功能实体的配合完成核心网的控制功能，采用通用平台实现的方式可以基于虚拟化技术和虚拟化网络功能的方式实现核心网的控制功能，具有灵活性，可扩展，便于维护和管理的特点。

根据 ITU 5G 愿景，表 3-2 中所列的 5G 应用场景非常适合用 SDN 和 NFV 技术来实现。

表 3-2 适于用 SDN/NFV 技术实现的 5G 应用场景

网络切片	SDN 集中的控制，分布式可控数据平面很适合网络切片的应用
边缘计算	边缘计算的实施需要更灵活动态的路由，来连接用户和应用，非常适合 SDN 来实现
快速灵活的网络，计算，存储部署	SDN 和 NFV 提供更好地灵活性，可扩展性，提供快速定制的可能
超密集网络	Small cell 的移动性，干扰控制需要集中的控制，灵活和可扩展的控制，需要 NFV 技术的支撑。SDN 技术和集中的移动控制可能更好地解决移动性问题
5G 动态的带宽	5G 用户和设备会进一步增加，吞吐率将呈现出更不均衡，更动态的特性，NFV 和 SDN 技术能更快速地调派资源
CRAN 和 NGFI	通过数据平面功能的重新划分，部分数据面功能和控制功能将更加集中，适合于 NFV 实现
业务需要的多样性	业务的多样性需求，需要的计算资源，传输，存储差别很大，NFV 技术能更优地配置资源

SDN 和 NFV 技术也面临许多挑战，比如电信网络的规模一般大于数据中心的规模，设备集中化部署的程度低，控制的延时要求更低，可靠性要求更高，对 SDN 技术提出的新的挑战；电信设备的可靠性，部署环境的复杂性，低时延特性对 NFV 也提出了更高的要求。

电信网络 3G/4G 网络也将长期存在，在引入 5G 的同时，怎样兼容现有设备，怎样平滑的过渡和升级也是引入 SDN 和 NFV 的关键问题。目前，4G 网络中，在不改变协议和 SDN 交换机的情况下，可以实现核心网控制功能的虚拟化，在业务链的部署中采用 SDN 和 NFV 技术支持快速的业务链部署。ONF 正研究通过 P-GW and S-GW 控制和转发分离，为 SDN 交换机增加 GTP 处理的能力，在 SDN 交换机上实现 4G 网关的数据面功能，在此基础上，核心网的整个转发平面可以用 SDN 交换机实现。由于实现网关的数

据面和控制面分离，通过集中的控制，可以按照需要将 SDN 交换机配置成网关，在网络中支持计算和存储的功能部署，如图 3.8 所示。

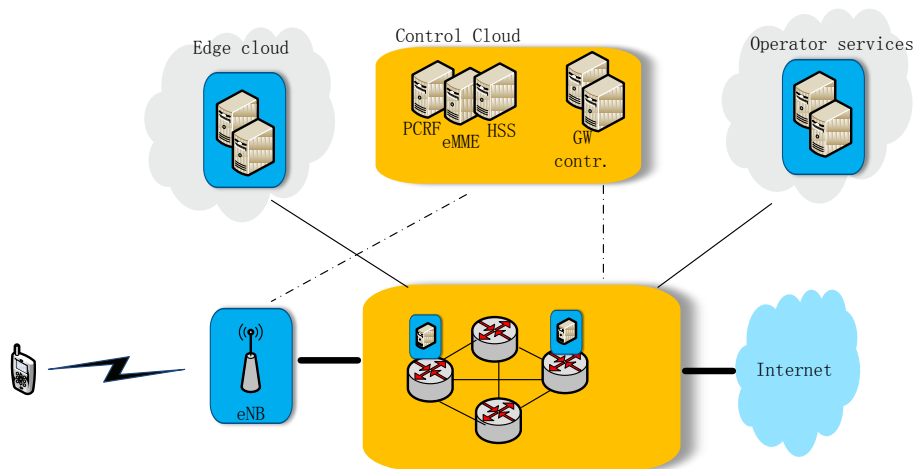


图 3.8 核心网演进趋势：EPS 节点的 C/U 分离

在接入网中，一些新的架构，技术的引进也可能对 NFV 和 SDN 技术在 RAN 侧的应用产生深远的影响。由于 5G 带宽的增加，天线数量的增多，同时支持的用户的增加，前传网络的带宽将急剧增加，前传网络是 NGFI 的研究重点。当通过 NGFI 的划分，将部分数据平面的功能移到前端处理后，会降低前传网络的带宽，后端处理的功能，包括部分数据平面和可控制平面的功能更易于集中。如图 3.9 所示，基于宏基站和小基站的功能重新划分，采用 CRAN+NFVI 技术以减低前传网络带宽和对延时的要求，全部控制平面集中，部分数据平面集中，采用 NFV 技术支持集中的处理功能，以满足对灵活动态计算的要求，同时由于采用集中控制的小蜂窝，移动性管理和干扰管理更易于实现。

上述方案采用集中的数据传输处理，一个潜在的问题是当小基站很多时，全部集中到一点需要更多的传输和交换资源。解决该问题的途径之一是通过 SDN 交换机实现后传网络控制和数据面的分离进而实现分布式后传数据平面。该方案的关键是分离后传网络的控制和数据面功能，采用具有 SDN 能力的交换机后，集中后传网络的控制，采用分散的 SDN 数据面支持后传网络，同时和核心网 SDN 交换机对接，便于更好的实现网络切片，和对边缘计算的支持。

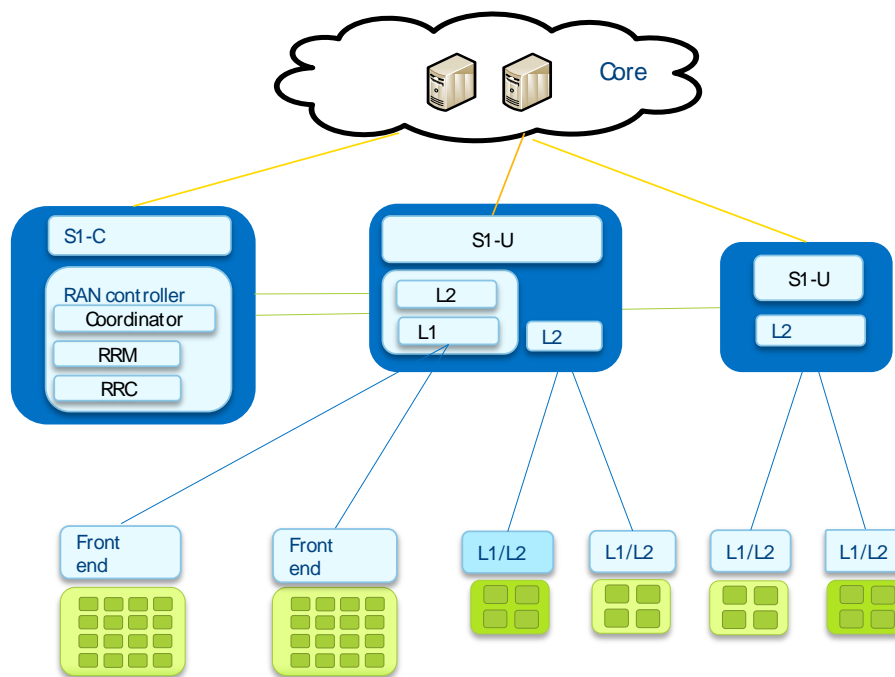


图 3 基于 NGFI+C/U 分离的 RAN 架构

NFV 和 SDN 的技术都有了实质性的进展，但在电信网络的大规模应用还面临着一些挑战，如虚拟机（VM）满足实时性的要求，VM 的快速迁移，通用平台的性能，加速器的集成，平台的可靠性和安全性在电信网络中面临的问题。

在引入 SDN 和 NFV 技术后，如何定义设备间的接口成为一个关键问题，SDN 传送设备控制采用 SDN 南向接口应该成为必然选择，但能不能进一步扩展 SDN 的南向接口，支持接入网设备的控制功能，比如移动性控制，干扰的管理协调等，需要进一步的研究。如果小基站的控制能采用类似 SDN 南向接口的方式实现，将极大地简化小基站设计，更易于互联互通。

3.3.4. 灵活的网络切片

5G 网络建成后将提供多连接和处理很多不同的使用情况和场景。启用逻辑网络切片，将使运营商提供业务为基础的网络，来满足 2020 年需要的广泛的应用案例。预测的 2020 年应用案例将需要新的类型的连接服务，这些服务将是在速度、容量、安全、可靠性、可用性、时延和电池寿命的影响方面高度可扩展、可编程的。并且传统的蜂窝网络以及那种一个尺寸适合所有人的方法需要进行调整，来支持数以千计不同的应用情况，许多不同用户类型和不同应用的使用。不断发展的现有的无线接入技术（RAT），如 LTE 和新 5G 技术都将是未来的灵活和动态 5G 系统的一部分。支持跨域整合和多 RAT 环境。新技术将使像极低延迟的概念成为可能，并且额外容量的需求将需要在比今天的频谱范围更高的频段进行通信。最终，演进到下一代 5G 系统将使运营商像提供一种服务一样来提供网络。

5G 网络将提供广泛的业务需求。一些应用程序将需要 100 倍的数据传输速率与目前的普通网络提供的速率相比，有的需要近零延迟，整个系统将努力实现的长达 10 年的电池寿命。但是，并非所有未来的用例都需要网络是超快、超智能，并且要支持大规模的设备数量连接。相反，网络建成后将有灵活的方式，速度、容量和覆盖范围可分配逻辑片，以满足每个用例的具体要求。例如，对于重型机械的遥控操作的最佳连接性服务具有低延时，高带宽，覆盖有限的地理区域，并支持设备的一个已知的最大数量和类型。

使用今天的模型，建筑或矿业公司需要能够远程操作机器可能会决定，最好的选择是建立一个自己的网络，在不再需要这样的连接服务是，将它拆下。但是在未来，5G 系统将使运营商能够提供这样的小连接性服务。

视频也是网络发展的一个重要方面。这部分已经占整个网络流量的显著的一部分，并预计到 2019 年增长 13 倍，占到超过 50% 的全球移动数据流量。

作为 5G 系统的多 RAT 网络，结合 LTE 和新 5G 技术，在无线电资源利用所得到的灵活性可使媒体内容得到优先。这种能力意味着 5G 系统有可能成为内容提供个性化媒体的首选方法。

为了满足这种广泛多样的应用要求，5G 系统，因此将使用逻辑的，而不是物理资源，帮助运营商提供作为一种业务的基础网络构建。这样的网络服务将提供分配和重新分配资源与需求，并量身定制的网络片的灵活性需求。

传统上，一个尺寸适合所有使用的专用系统支持网络架构，IT 对于单一业务的用户网络运营，有可预测的流量和增长网络。然而，所得到的垂直结构使得难以扩展电信网络，适应不断变化的用户需求，并满足融合业务的情况需求。云技术以及 SDN 和 NFV 提供工具，使网络架构具有更大程度的抽象性，从而提高网络的灵活性构建。这将允许垂直系统可以被分块，形成水平网络架构，这种架构可以以编程方式和虚拟化方式来适应被提供和扩展的业务连接。

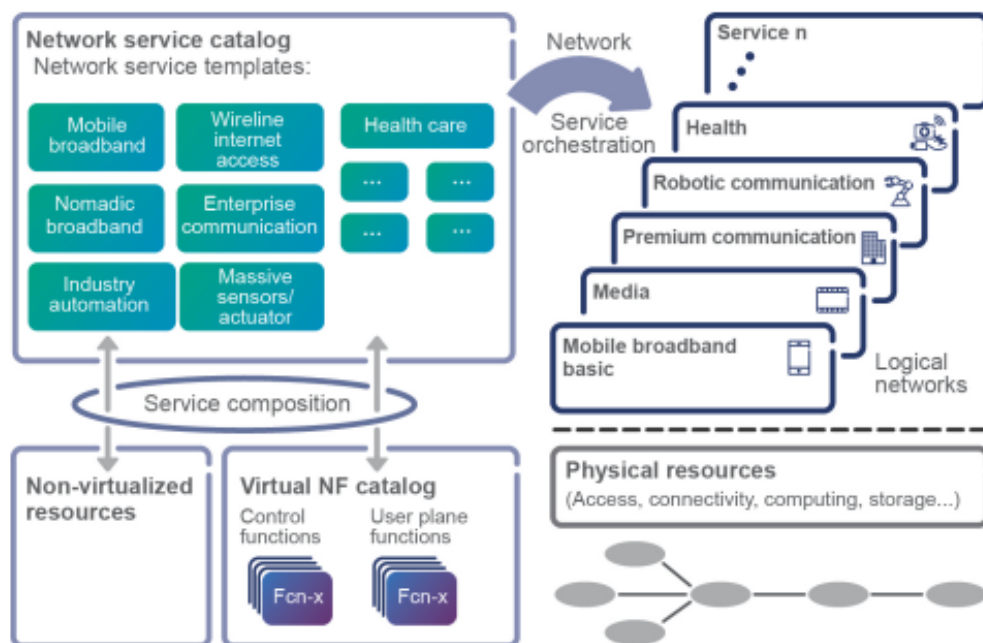


图 3.10 使用网络切片化的业务创建

在 5G 系统中，网络将进一步抽象成网络切片；一个连接性业务被定义成定制化的软件定义功能，这些功能管辖地理覆盖区、持续时间、容量、速度、时延，鲁棒性、安全性。

网络切片的概念并不是一个新的概念；例如 AVPN，就是一个网络切片的基本版本。但广泛的使用案例和未来网络需要支持的更严格的要求表明表明，在 5G 的背景下网络切片将被在全新层面定义，更像是按需网络。

切片网络的好处不只是提供一个广泛的连接服务对任何一个行业，而且可以确保据此进行计费的使用这些服务。切片网络提供了更深入地了解网络资源的使用，因为每个切片被定制去匹配业务所需的复杂度。下面是几个应用实例。

一个公用事业公司，例如，需要连接它的智能电表。这种需要被转化成一个网络切片，这个网络切片连接了多个给定时间下能够下载状态更新的有延迟和数据速率的 M2M 设备。该服务的安全级别为中等，并且它是要求高可用性和高可靠性的数据类的服务。具有较高级别的安全性，更长的持续时间或增加的可靠性相关的额外的网络功能可以被配置以适合应用的需要。

同样的公用事业公司可能需要连接其故障的传感器。网络片用于这种类型的服务需要能够从系统中的所有的 M2M 设备接收二十四时钟状态指示器。这个用例需要单数据覆盖，具有高可用性和鲁棒性，中的安全性和延迟。

再有，根据使用情况，一个网片提供此连接性服务可以用不同的网络的功能配置成较高级别的安全性，或接近零延迟

运营商希望提供所有在特定国家用户使用它的具有非常高吞吐量的视频流媒体业务。高数据传输速度和低延迟是这个网络切片的主要要求。某些关键任务服务可能需要在紧急情况下快速访问网络的容量或覆盖在紧急情况下。这样的用例可以通过协定来预先安排和根据需要由运营商提供。这个用例的重要方面是业务协议。

网络切片的概念需要许多关键使能技术来提供。SDN, NFV 和云技术使网络从他们的底层物理基础设施的分开, 使他们可以通过编程, 来提供业务连接。性质上变化很大的设备将需要以一个智能的方式使用连接, 以最小的信令, 最大的睡眠周期和简化的数据发送, 只发送所需的给定业务的信息。网络切片需要提供端到端的安全性, 以便确保从多个来源被捣碎的业务的可信任。网管系统需要适应货币化各种各样使用连接的设备类型。网络将需要能够同时支持多个 RAT, 而且无线电环境需要支持业务的灵活性, 同时保持了成本和能源消耗的控制。

3.3.5. 网络能力开放

网络能力的开放应结合具体业务场景, 并综合考虑第三方应用平台在系统架构及业务逻辑方面的差异性, 从而实现简单友好的开放。此外, 网络能力开放必须具有足够的灵活性, 随着网络功能的进一步丰富, 网络能力可向第三方应用实现持续开放, 而不必对第三方平台及网络系统自身进行复杂的改动。网络能力开放主要包括: (1) 网络及用户信息开放, (2) 无线业务及网络资源开放, (3) 网络计算资源开放。

具体来说, 网络信息开放包括: 单个蜂窝的负载信息、链路质量的实时及统计信息 (CQI、SINR、BLER)、网络吞吐量的实时及统计信息、移动用户的定位信息等。无线业务及网络资源开放主要指: 短消息业务能力、业务质量调整 (QCI) 等。网络计算资源开放指的是无线网络可将自身的计算能力以基础设施 (IaaS: Infrastructure as a Service) 的形式提供给第三方应用以便于其在无线网络内部, 尤其是网络边缘直接部署业务环境。

网络能力开放需要对第三方应用平台保持友好性从而使得开放变得简单直观。鉴于目前移动应用大部分基于 web 方式实现, 可考虑将网络能力拆分为可通过 HTTP 操作的逻辑资源, 并且嵌入特定的 HTTP 会话内随业务数据一起交付。这样, 第三方应用平台, 尤其是目前主流的移动应用提供商, 可基于已有的生产环境方便调用运营商开放的网络能力, 而无需修改自身的系统架构及业务逻辑。具体的实现方式包括: (1) HTTP 头改写 (HTTP Header Enrichment), (2) HTTP 头识别, (3) URL 改写 (URL Enrichment), (4) URL 识别。

HTTP 头改写主要指，在 HTTP 请求/响应头内加入特定的 key-value 字段。HTTP 头识别指对 HTTP 请求/响应头内特定 key-value 字段进行识别。URL 改写指通过对 URL 的 Query 字段添加内容。URL 识别指对 URL 内的特定内容进行识别。

HTTP 头改写及 URL 改写主要用于网络及用户信息的开放，无线网络可将特定内容插入 HTTP 头或 URL 内，从而实现对第三方应用的信息开放。HTTP 头识别及 URL 识别用来实现网络业务及网络资源分配能力的开放，无线网络通过识别 HTTP 头或 URL 内的特定字段，确定是否需要向该业务开放特定的网络能力。比如，为指定的 HTTP 数据流提供更多的网络资源保证其用户体验。

基于安全性考虑，无线网络只能向经过认证的第三方应用开放网络能力。因此第三方应用提供商必须通过特定的控制接口为特定的业务申请可开放的网络能力，且运营商的 BOSS(Business & Operation Support System) 系统需要记录相应的业务标识及具体开放方式。比如，电子商务网站可要求无线网络在其支付页面交付给用户的同时，由基站向用户终端发送认证短信。在上述过程里，电子商务服务商需要首先向运营商注册其支付页面的 URL，且注明该 URL 需要利用无线网络的短信功能。运营商在完成相应的认证操作后，控制网络为该 URL 开通短信发送功能。

图 3.11 描述了网络能力开放系统的架构。API 引擎负责分析 HTTP 会话的上下文，具体来说，即解析 HTTP 请求/响应头及 URL。根据解析结果，API 引擎将继续查询业务数据库以确定具体的网络能力开放方式。接着，API 引擎通过无线控制器驱动无线网络对特定业务进行相应的能力开放。第三方应用提供商则需要事先在业务数据库内对指定的业务进行认证注册，并注明其需要获得开放的网络能力。

API 引擎可部署于 PDN 网关或者本地网关。通过驱动无线控制器进行路由控制，API 引擎可将网络内的 web 流量导入其内部。为了应对无线网络内激增的 web 流量，API 引擎可分布式部署于网络内的多个位置以实现负载均衡。

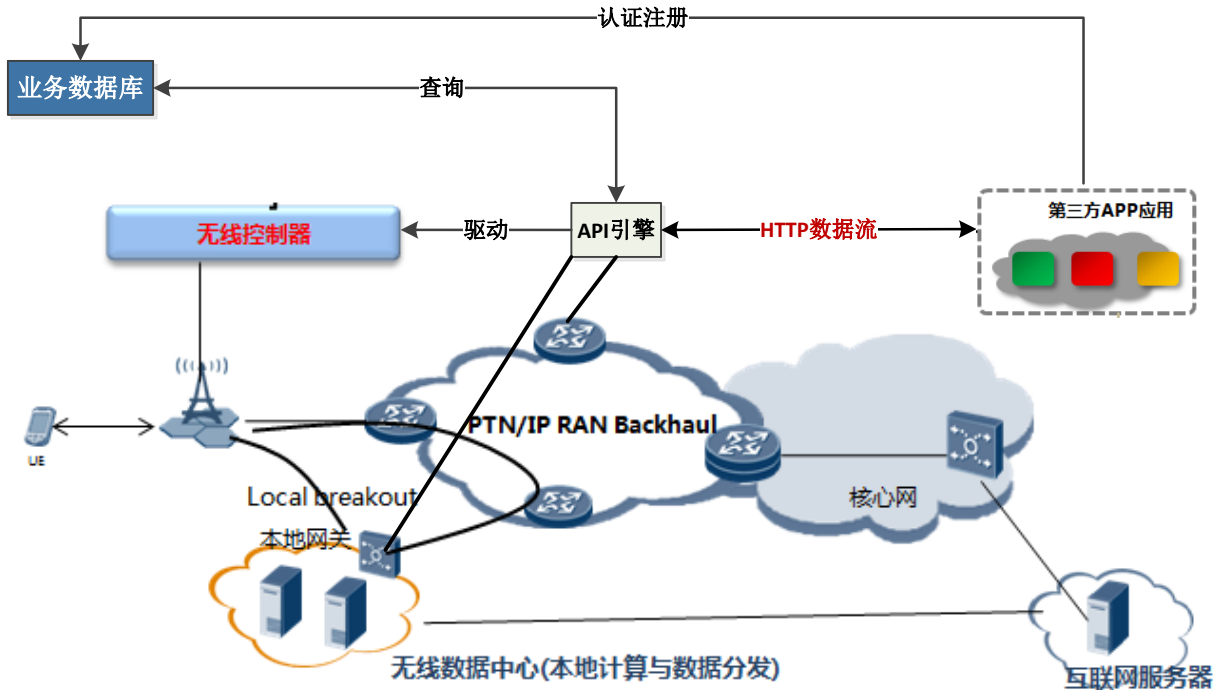


图 3.11 网络能力开放系统架构

为了实现上述网络能力开放架构，5G 网络需支持灵活的网络控制功能，尤其在 QoS 策略控制方面，应打破传统网络只支持端到端的控制方式，实现基于特定网络节点（例如，基站）的 QoS 策略控制。具体来说，无线控制器可作为 QoS 控制网元引入 5G 网络，以实现对各网元的 QoS 策略调整，而对具体的网元而言，则需要定义新的控制接口，以确保其能够接受无线控制器的调控指令。

网络能力开放必须受到严格的控制，特定的信息及资源只能向授权的指定业务或用户开放，且能力开放应不影响网络及其他业务的正常运行。因此，对于网络业务及资源开放而言，需要设定可控的门限以避免恶意用户的侵入。

3.3.6. 多连接与多空口

多连接是指对给定用户配置至少两个不同的网络节点的无线资源的操作。多连接的出发点主要为以下几个方面：

- 速率增强
- 鲁棒性连接以降低连接错误、保证连续的 QoS
- 无缝移动性以保证“0”切换中断
- 异构网络下用户被连接至频率层以提供附加的容量但却不必提供广域覆盖和移动下的性能优化

提供多连接服务的小区可以工作在相同频率下也可以工作在不同频率下，使用相同的 RAT 或不同的 RAT。在相同频率下，用户被连接至工作在相同频率下的两个或多个小区并使用相同的 RAT。这些小区可以采用集中式的布局或通过回传相互连接。这种多连接可以通过多个广区域小区的多连接保证无缝移动性，或通过多个高频段的热点小区的多连接提升链路可靠性。

对于不同频率下的多连接，互连的小区工作于不同载波频率下并使用相同的 RAT。在目前的系统中，多频多连接被认为是一种提升系统吞吐率的有效方式。3GPP 已经明确了集中式小区下的载波聚合和非集中式小区下的非理想回传下的双连接。考虑到 5G 更多样的频谱操作，这些技术仍将用于 5G 系统中。关于载波聚合，由于 5G 小区工作在低频段和高频段，这将需要配置更多的参数，如：传输时间间隔、时间提前量等。同时，可能还需要优化协议栈，以便于不同的配置和不同的无线资源管理。类似的，考虑到 5G 系统灵活的传输配置和多样的回传，在新的 5G 架构下需要重新审视 LTE 双重连接中的数据负载拆分操作。

控制层的多连接传输也注定要在 5G 中进行设计。实际上，3G 系统中的软切换采用了切换信号的分集传输，这可能在 5G 系统中进一步发展。LTE 双连接中，采用控制面单连接的方式，这可能增加 RRC 信号的延迟并增加小区之间的回传信号的开销。考虑到 5G 系统的低时延要求，多连接的 RRC 信号传输可以实现快速和高效 RRC 配置和优化。异构网络中的 C/U 分离将继续发挥着作用，并被应用于 5G 宏小区和 5G 小小区之间的多连接，或者用于 4G 宏小区和 5G 小小区之间的多连接。

由于目前运营网络的具有不同的配置和演进方式，未来 5G 网络架构将包含现有的 RAT，如 4G、3G、WLAN，以及如图 3.12 所示的新型 RAT。在 3GPP 版本 12 中，已经明确了 LTE 与 WLAN 之间的交互运行方式。此外，对于正在进行的 LTE 和 WLAN 聚合的研究，正试图通过探索加强底层合作，以改善整个系统的性能。可以预见，为提升网络运营效率和用户体验质量，5G 中多种 RAT 的融合将十分必要。



图 3.12 5G 架构下多 RAT 融合

多种 RAT 下的无线接入网通常需要定义多种协议结构并采用多种传输技术。这也导致了需要进行多种信号的设计。在新的 5G 网络架构下，需要一些统一的信号以支持不同网络之间的信号传输。另一方面

是不同 RAT 的网络之间的垂直切换。其特点是需要适合不同种类的服务、不同种类的 QoS 要求、不同种类的用户。此外需要考虑的是，为提升整体效率，不同无线接入网下的无线资源管理。5G 网络架构应具有从多信息源收集信息的能力、具有为用户提供基于多种网络下多种决策特性提供最佳接入选择的能力，并能够克服乒乓效应。

上文提到的多连接技术可以被用于不同的 RAT。为了更高效的利用无线资源，需要一种统一的架构，以支持不同网络间（包括通用接口和回传链路）的信号和数据传输。

3.3.7. D2D

近年来，设备间直接通信技术（D2D）吸引了越来越多的商业兴趣，相关标准化工作正在 3GPP 和 WiFi 联盟进行中。包含 D2D 等新功能的 5G 系统设计中充分考虑了如何提高系统的灵活性和提升系统潜在的性能。下文详细阐述了通过 5G 系统的 D2D 技术和更普遍的自组织通信技术实现的一些新的用户案例。

车联网。目前，大量的汽车已经配备了 3G / 4G 调制解调器并可以作为蜂窝网络的终端进行工作。我们预测，在 5G 时代，车辆将被更紧密地集成到蜂窝网络并发挥更重要的作用。首先，与普通手机相比，车辆没有了耗电限制，并有更多的空间安装多个天线。这使得车辆可能成为采用无线回传的微基站。作为移动微基站的一种，汽车微基站可以扩大网络覆盖并为附近的人群提供更好的网络。同时微基站也会让车内的人受益，它可以补偿由金属玻璃膜引起的信号剧烈衰减，改善车内终端的体验。其次，DSRC 技术可以在 5.9GHz 建立车辆之间（V2V）和车辆和网络之间（V2I）通信。DSRC 的第一个应用例是碰撞规避，但随后衍伸至其他非安全应用领域。通过授权频谱为车联网业务提供 D2D 通信将是 5G 一个重要机会。相对于 DSRC，工作在授权频谱的 D2D 技术可以提供更好的干扰管理和服务质量保证。在提供较高安全性的应用之外，5G 技术可以通过提供车与车之间和车与通信设施之间的低时延高可靠通信技术为汽车自动驾驶功能提供助力。第三，对于信息娱乐和其他目的应用，汽车可以提供远超普通电话的硬盘存储空间。通过利用大数字存储空间，采用 D2D 技术可以形成车队内容分发网络（V-CDN）。具备高带宽车联网通信能力的车辆，可以在停车场和道路上在经过时交换存储内容。

多跳无线边缘网络。现有的蜂窝系统已经定义了通过中继扩展网络覆盖的机制，但是目前的架构并不能很轻易的扩展为多跳网络。D2D 技术可以为未来网络提供一个干净的构建基础，以搭建更具有普遍性的多跳覆盖延伸网络。此外，如果提供多跳覆盖的节点同时可提供很多与其他节点的连接，它们可以形成无线边缘网络，为边缘节点和固定网络基础设施之间提供更多的连接，从而增加在覆盖延伸区域连接的鲁棒性。需要注意的是，应用层服务供应商已经开始研究和开发使用网络覆盖技术为对等节点提供这种多跳网络服务了。作为运营商 5G 网络的一部分，多跳功能将得到 5G 蜂窝系统天然的支持，并取得更好的性能。

未来的无线边缘域可以提供更多直接访问本地内容和服务的机会。例如，网络边缘内容缓存可以减少从远端节点读取带来往返延迟并相应的增加网络吞吐量。更有想象力的观点认为如果能够直接访问由对等节点提供的服务和存储的内容，相关的运营商和厂商将会获得新的商业机会。

网络密集化和毫米波网络。网络密集化是指包括在路灯，建筑幕墙和电线杆等位置部署微型基站。考虑到毫米波特性和毫米波频段较弱的功率放大器能力，网络密集化对毫米波基站非常重要。为这些微小区提供有线回传可能产生高昂的成本，无线回传技术提供了一种可行的解决方案。毫米波小区的覆盖往往呈现不规则的形状，并具有随环境衰落变化而变化的时变特性。例如，在车辆经过时毫米波基站与终端之间的视距传播可能会被暂时中断，终端甚至可能会被切换到另一临近的毫米波基站。这种情况下，毫米波无线回传就不仅仅是将边缘基站连接起来，它还把边缘基站通过无线回传组成了一个网格网络，并通过提供空间分集提高了连接的鲁棒性。

MTC 和 IoT。5G 提供了一个更好地支持各种物联网设备的机会。当前，物联网大多通过工作在非授权频谱的 D2D、中继和网状网络技术提供服务，我们期待 5G 的 D2D 通信可以通过扩展蜂窝网络的方式改善物联网的服务。

采用僵化的分层网络架构的 4G 移动网络将很难有效且充分地支持上文动机部分提出的新用户案例。为此，我们需要在 5G 技术中将自组织网络通信技术集成到蜂窝网络架构中，下文详述了新技术可能面临的挑战。

首先，自组织网络的特性会使得网络受到的干扰呈现出非常不规则的拓扑，且干扰信号动态范围很大。例如，一个试图与远端节点通信的节点可能会对周边节点产生巨大的干扰。5G 自组织网络协议在设计中必须解决该问题。此外，如果自组织网络与蜂窝通信共享同一频谱，我们还必须处理这两者之间的干扰。

另一个挑战是终端功耗。在 D2D 和自组织网络通信的很多用户案例中，通信连接两端的终端都是由电池供电的。因此，5G 自组织通信协议设计中需要考虑为通信终端和其它潜在终端优化功率效率。为了对应这些挑战，下面的技术设计原则需要关注。

首先，自组织网络中的发现和通信机制需要独立设计。5G 网络将支持多样的服务，其中的发现功能主要指服务类型的发现。服务类型包括：拥有无线或有线回传的终端可以提供 D2D 中继服务，拥有大量计算能力的终端可以提供计算服务，支持海量存储的终端可以提供内容分发服务等。通信机制设计主要考虑通信时间可能较长、传输速率较高；而发现机制需要优先考虑终端的功率效率。这些不同类型的服务首先需要通过优化的发现机制被发现，然后通过高效的通信机制交换信息并提供或获得服务。

所有节点之间的时间同步有助于各节点节省电力。特别是在发现阶段，相互同步的节点可以精确的知晓在何时发送或收听同步信号，以便延长的休眠周期。同步可能是来自一些如 GPS 或基站的外部定时源，或通过某些分布式同步机制从相邻节点获得同步。

D2D 是 5G 通信系统的一项重要技术。引入 D2D 特性和功能，通过支持新的使用案例、服务和方案，可以为运营商管理的网络提供新的业务机会。在 D2D 特性和功能的设计之初就应考虑高效和高性能的通信机制，以确保未来可以被很好地与其它 5G 技术整合、协调。

3.3.8. 动态网络

动态自组织网络用于满足 5G 系统两方面需求：在低时延高可靠性场景降低端到端时延，提高传输可靠性；在低功耗大连接场景延伸网络覆盖和接入能力。动态自组织网络是一种分布式网络，在系统架构方面具有支持更高的灵活型，可扩展性和健壮性的特点。

新型业务带来的严格时延需求来自移动物联网下区域性部署的机器类终端场景，要求网络侧时延几乎可以忽略，如工业互联网。分布式网络相比传统蜂窝网具有明显优势。动态自组织网络具有如下特点：基于蜂窝网控制和/或使用蜂窝网资源；具有区域自主性：包括控制、管理和传输功能本地化；区域内灵活自组织、自管理；网络功能和角色、网络拓扑的动态配置（如控制中心功能位置的灵活化等）。在动态自组织网络中，终端可以以簇为单位进行管理和传输，头节点作为簇管理控制节点，一个簇下的多个末端节点根据位置、类型、业务需求等灵活组织。

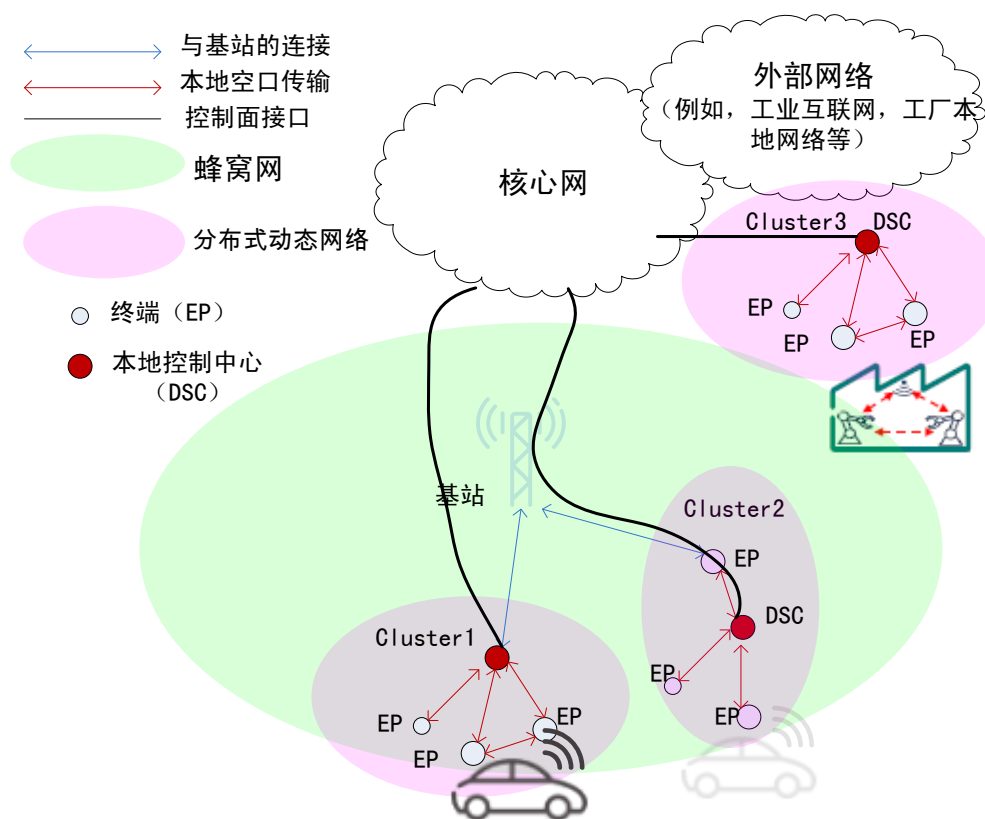


图 3.13 动态自组织网络组织方式

1. 控制面设计

不同于传统蜂窝网络在控制面设计上的中心式控制方案，为了满足垂直行业个性化通信需求，动态自组织网络进行一系列的网络灵活性增强。

控制、管理功能的下移与可配置：引入本地控制功能，如设置本地控制中心，降低控制面延迟，包括连接建立延迟。将控制面功能下沉到本地网络，可以有效降低运营商核心网控制面负载。通过将控制面功能的下移和控制面功能可定制结合，更好贴合垂直行业具体场景，例如对于工厂流程自动化场景，终端通常是固定的，或者仅在工厂区域移动，在这种情况下移动性管理过程可以极大简化。

动态自组织网络的基本单位是簇，每个簇有且仅有一个簇头节点，簇头节点可以是高能力终端，也可以是普通终端（如降低成本终端），但优先由高能力终端担任。在一定区域内（例如智能工厂中），多个簇共同组成一个本地网络或称为一个本地网片。本地网络由一个逻辑上的分布式服务中心（DSC）功能负责管理。DSC 可对网络层面参数进行配置（例如，网络标识配置，载波配置，帧结构配置，导频配置等），安全层面的基本参数进行配置（例如，当前网片采用的安全机制，加密算法），簇成员管理方面（例如，为簇成员分配网络 ID，对簇成员进行身份验证等）。

安全方案可定制：不同于传统移动宽带系统采用的单一安全架构设计，在安全机制方面，不同的垂直行业，或者即使相同的行业的用户可能要求采用定制化的安全方案，从而减小对已部署的工厂自动控制系统的影响，实现平滑演进，因此在对簇成员的身份验证，加密完整性保护方面，需要适配实际场景对安全方案的需求，从而实现“本地网片”安全策略可配置的技术效果（例如，智能工厂的网络管理人员可以通过分布式服务中心 DSC 功能，对工厂使用的安全策略做动态配置）。为了实现安全方案和安全策略的灵活可配置，网络需要能够灵活配置安全功能管理实体在网络中的位置（例如在工厂本地网络内，或在运营商网络内容）。

基于群组的托管设计：例如在工厂自动化通信场景下，终端设备通过接入到本地网络从而形成一个群组或簇，簇内成员节点在设备形态方面可能是机器人，机械臂或各种传感器，执行器类设备。一方面这类现场设备在数量和密度上可能非常高，因此如果将簇成员或组成员的管理功能放在传统运营商核心网会造成核心网负载过高和信令风暴的问题，因此需要一种基于“分布式托管思想”对簇成员或组成员进行管理方案。一种实现方式是由本地网络中的分布式服务中心 DSC 或簇头节点负责对“本地网片”内的簇成员或组成员设备进行管理，簇成员设备本身对于运营商网络可以不直接可见，簇或组作为一个整体对运营商核心网可见，运营商网络可以通过簇头节点或分布式服务中心 DSC 间接获得簇成员或组成员状态，激活业务类型，以及分布式动态网络整体运行方面的信息。

在计费策略方面，可针对本地化群组通信的特点，设计基于特定群组或群组用户的计费策略（例如把整个工厂作为一个群组用户，工厂中所用的通信功能的设备包括传感器，机器人，手持设备都属于这个群组）。

2. 用户面设计

在传统蜂窝网络架构下，终端必须通过基站（Base Station）和蜂窝网网关功能（Gateway Function）才能与目标端进行通信，在这种网络架构下，终端在获得数据传输服务前必须首先选择一个服务基站，并与服务基站建立并保持连接。而在动态自组织网络中，任何接入网节点（包括高能力终端，微型基站，宏基站）都具备数据存储与路由转发功能，动态自组织网络中的每个节点都具备无线信号收发能力，并且每个节点都可以与一个或者多个相邻节点通过无线方式进行直接通信，整个动态自组织网络呈现出网状网结构和特征。低能力终端（例如无线触感器，机械控制装置）等可以通过动态自组织网络访问本地与服务器，出于成本考虑，低能力终端不支持数据的存储于路由转发节点，因此只能充当整个动态自组织网络的末端节点。动态自组织网络可应用智能工厂通信，以及智能交通通信等垂直行业应用场景。

在动态自组织网络中，任何节点间（例如，终端与终端，终端与基站，基站与基站）均通过无线方式进行通信，无需任何布线工作，并具有支持分布式网络所提供的冗余机制和重新路由的功能特点。在动态自组织网络中，添加任何新节点（例如终端或基站），只需要简单地接上电源就可以，节点可以自动进行自我配置，并确定最佳的多跳传输路径。动态自组织网络的主要具有如下优点。

部署灵活：在动态自组织网络部署方面，只需要将动态自组织网络节点（例如终端或微型基站）放置到目标区域，节点便可以自动进行自我配置，自动建立并维护网络拓扑关系，并确定最佳的多跳传输路径，从而大大降低了网络部署成本，加快网路部署速度。

支持多跳：动态自组织网络支持多跳传输，与发射终端有直接视距的接收终端先接收无线信号，然后再将接收到的信号转发给非直接视距的终端。按照这种方式，数据包能够自动选择最佳路径不断从一个用户跳转到另一个用户，并最终到达无直接视距的目标终端。动态自组织网络能够通过多跳方式支持非视距传输的特性大大扩展了其应用领域和覆盖范围。

高可靠性(冗余传输+动态路由)：动态自组织网络通过链路增强技术，并通过支持空口多路冗余传输提高空口单跳传输可靠性之外，还通过支持多路由数据传输特性提高端到端传输可靠性，如果某个中继节点发生故障，数据包可动态切换到中继节点通过备用路径传送，因此动态自组织网络比传统蜂窝网络更加健壮，因为它不依赖于某一个单一节点的性能，在传统蜂窝网络中，如果某一个基站出现故障，该基站覆盖区域的通信也随之瘫痪。而在动态自组织网络中，由于每个节点都有一条或几条传送数据的路径，一旦相邻服务节点出现故障或者受到干扰，数据包将自动路由到备用路径继续进行传输，整个动态自组织网络的运行不会受到影响。

支持超高带宽：无线通信的物理特性决定了通信传输的距离越短就越容易获得高带宽，因为随着无线传输距离的增加，各种干扰和其他导致数据丢失的因素随之增加，因此选择经多个短跳来传输数据将是获得更高系统带宽的一种有效方法，同样动态自组织网络可以支持更高的系统带宽，此外由于短跳的传输距离短，传输数据所需要的功率也更小，从而有利于实现绿色节能。由于使用较低功率将数据传输到邻近的节点，节点之间的无线信号干扰也较小，网络的信道质量和信道利用效率大大提高，因而能够实现更高的网络容量。

4. 软件定义空口 SDAI

4.1 SDAI 总体目标

传统移动通信的演进一直以来都是以提升峰值速率和系统容量为主要目标，5G 将面临更加多样化的场景和极致的性能挑战。采用传统单一定制化的空口技术和参数设计无法满足上述需求。面对 5G 极为丰富的应用场景和极致的用户体验需求，5G 空口应该具备足够的“弹性”来适配未来多样化的场景需求，从而以最高效的方式满足各场景下不同的服务特性、连接数、容量以及时延等要求。此外，未来 5G 空口设计需要能够实现空口能力的按需及时升级，具备 IT 产业敏捷开发、快速迭代的特征。从某种意义上讲，5G 将是“第一代多维度”通信系统标准，它将具备自我完善自我发展的能力。

软件定义空口的目标是建立统一、高效、灵活、可配置的空口技术框架，可针对部署场景、业务需求、性能指标、可用频谱和终端能力等具体情况，灵活的技术选择和参数配置，形成针对 eMBB, mMTC, uMTC 应用场景的空口技术方案，实现对场景及业务的“量体裁衣”，从而提高资源效率，降低网络部署成本，并能够有效应对未来可能出现的新场景和新业务需求。

4.2 SDAI 总体框架

图 4.1 展示了灵活自适应统一的软件定义空口框架。该架构根据应用场景、可用频谱、性能需求、设备能力等预先定义若干空口方案，按需选取最优组合方案并优化相应参数，实现不同场景的空口优化配置。软件定义空口框架包含帧结构、双工、波形、多址、调制编码、天线等核心基础模块，各模块遵循“共性最大化”原则，最大可能地整合共性内容，协同工作，灵活实现为不同业务提供定制化的服务体验。

软件定义空口的挑战主要来自两方面，一是候选空口技术集合及相应参数的选取，二是根据场景、业务及链路环境的空口自适应机制。

在候选空口技术集合及相应参数的选取上，应该遵循灵活和高效两大基本设计理念。灵活性体现在软件定义空口能够提供一个足够多样性的技术集合和相关参数集合，使得候选技术集合中的技术能够支撑不同场景与业务的极端需求。高效性体现在技术方案的选择需要考虑性能与复杂度的折中，一方面是技术集中的候选技术方案的数量要控制在一定的范围内。另外一方面是候选技术方案尽量使用统一的实现结构，复用相关实现模块，以提高资源的利用效率，降低商用化成本。例如针对多种多址接入技术，可以确定统一的实现结构，区别体现在码字的使用上。针对多种波形的实现，则可以复用具有共性特征的信号处理模块，如滤波器和快速傅里叶变换。

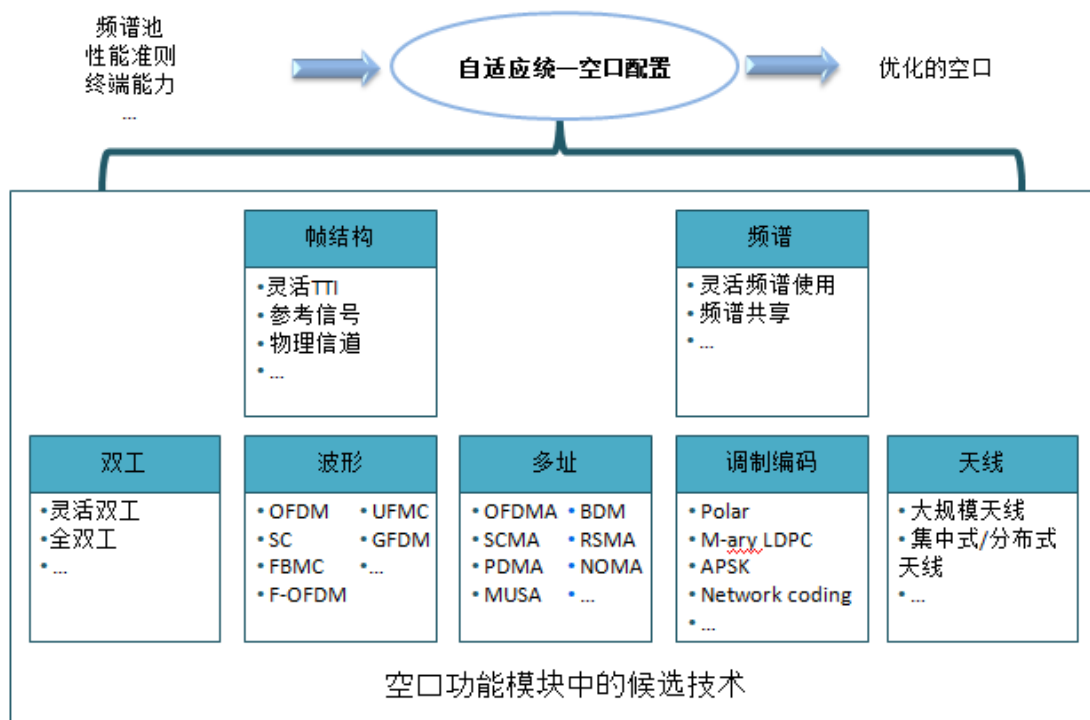


图 4.1 软件定义空口技术框架

在空口自适应机制方面，考虑到典型场景及终端类型的相对固定性，以及用户业务类型及用户链路等的动态变化特点，空口自适应可以考虑两种不同时间粒度上的自适应配置：1）根据场景和部署的需要等进行半静态配置；2）针对用户链路质量、移动性、传输业务类型、网络接入用户量等动态变化的环境参数进行动态空口自适应配置。第一种半静态配置方式，时间变化周期较长，可以通过小区广播信道通知小区的空口配置情况。相应的空口配置可以针对一些 5G 典型的场景 eMBB, mMTC 和 uMTC 的需求设计相应的优化空口技术方案，具体可包括频段、帧结构、波形调制技术、接入技术等设计，最终归纳为几种典型的无线空口技术（RIT）配置。小区广播信道只需要向终端指示相应的 RIT 方式即可。第二种动态配置方式，时间变化周期短并且有用户区分性，需要通过控制信道向具体的用户通知其空口配置参数。动态

配置方式会以半静态的 RIT 为基础进行配置，具体可针对信道环境变化、上下行业务量、用户的移动性以及传输业务类型等瞬时变化。

为了进一步提升自适应配置的灵活性，还可以考虑第一种半静态配置方式和第二中动态配置方式相融合，保留空口参数配置时间周期层面的差异性，但在空口设计实现方面采用更加通用的融合一体化设计，即不同的半静态 RIT 均基于相同的通用信号处理流程和处理模块实现，只是在配置的参数集上进行了不同的分类设置。为了便于这种一体化的空口实现，可将空口的数据处理和配置分层，将数据处理层中的数据处理模块进行抽象并通过标准的应用程序接口开放给空口配置层，便于空口配置层的无线资源管理功能按需进行配置。另外由于不同 UE 可能具有不同的空口支持能力，为了便于基站对空口进行配置时，UE 在附着基站时也可通知基站 UE 自身的空口能力。

SDAI 的核心在于提高空口的灵活性，使得空口在承载不同业务时可以具有不同的传输特征以最佳匹配业务的需求。这种灵活的空口配置需要相应空口技术的支持，如统一自适应的帧结构，灵活的双工，灵活的多址，灵活波形，大规模天线，新型调制编码及灵活频谱使用。下面将重点介绍上述关键使能技术。

4.3 关键使能技术

4.3.1. 统一自适应帧结构

空口时延总是受限于其采用的物理层帧结构，比如 TD-LTE 在 10ms 帧中最多只有两个上下行切换点，这就给空口时延设置了硬性的限制。面向 5G 的 1ms 时延的需求，需要设计适应低时延的新的帧结构。同时，帧结构的设计必须适应灵活的上下行数据的变化，尤其是对于局域（local area）的小小区密集部署的情况，传播损耗会相对减少，而且部署在 3GHz 以上的频率必然带来较短的时延扩展。这些特性加上一些 5G 时代可以预计的技术提高，比如硬件技术能实现上下行链路切换时间的缩短，会带来更为优化的参数设计，比如循环前缀（CP）、保护时间（GP）比现有系统得到压缩。而开销的降低也将带来更短的帧、更为快速的上下行切换。而 5G 也最终需要提供比 LTE 更为优化的广域覆盖方案，低频的信道有不同的传播特征，加上用户数目的差异，必然与局域方案对于帧结构的时延有不同要求，尤其是采用 FDD 的情况下。

5G 面向更多的业务和更广泛的场景，需要有更为灵活的帧结构设计来适应这种需要。比如对于广覆盖大连接的 IoT 业务，可能需要设计专门的窄带系统。另一方面，5G 的可能部署的频段也有很大的跨度，有些因素如相位噪声，随着频率的升高，对于系统性能的影响会越来越大。除了传统的在接收机进行相位噪声估计和补偿的方法外，较大的子载波间隔也是对抗相位噪声影响的有效途径。因此，在频率范围从现有的 3G 以下往上一直到扩展到毫米波频段，可用频谱粒度也存在极大差异的情况下，可能需要有跟所

用频段相匹配的系统带宽和子载波间隔。从这个角度看，5G 的帧结构也可能是一个小的集合而非单一选项。一个统一的帧结构如图 4.2 所示，这里 5G 是统一的空口，就像一个容器，承载着多种无线空口技术。

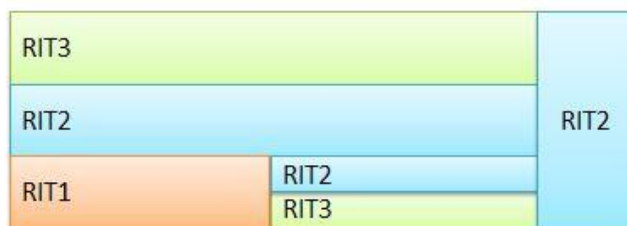


图 4.2 统一的帧结构

作为 5G 关键技术之一，Massive MIMO 应用于低于 6GHz 和毫米波上可以增强覆盖及降低功耗。比如 massive MIMO 可以在宏小区部署的较高频段上（3.8—4.2GHz）实现覆盖层功能，其中的挑战包括高载波频率及大带宽等都需要增加接收功率。作为一种解决方案，massive MIMO 可以提供很大的波束赋形增益，显著增强覆盖，使重用现有蜂窝基站成为可能。为实现高赋形增益，及时准确的信道信息是必须的。对于 TDD 系统而言，可极易地利用信道互易性获取及时准确的信道信息；而对于 FDD 系统，若想及时获取准确地信道信息，则将会带来大量的系统开销，比如：下行导频开销和上行反馈开销。因此，大规模天线技术的广泛应用将会对 5G FDD 系统的帧结构设计提出新的挑战及要求。

灵活双工技术也被认为是 5G 的关键技术之一，用于灵活匹配系统业务变化，提升网络容量。然而，相邻小区灵活的 DL-UL 配置将会带来小区间或站点间的干扰，特别是控制信道的干扰，从而影响系统性能提升。因此，在 5G 帧结构设计时，需考虑灵活双工带来的干扰问题。

图 4.3 描绘了一种增强 TDD 帧结构设计，其中，每个子帧均可任意为上行传输或者下行传输，不再局限于现有 LTE 系统中的 6 种 DL-UL 配置，可更灵活地匹配业务变化。参数如 TTI 也可灵活地配置，以高效匹配于不同业务类型。

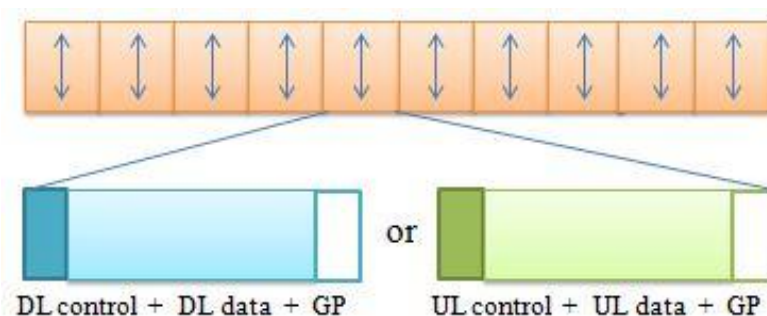


Fig.4.3 增强 TDD 帧结构设计示例

图 4.4 给出了另一种增强的 TDD 子帧设计，其中附加的子帧头中可以插入一些导频，实现下行发送波束赋形和上行解调信道估计等，以达到对 massive MIMO 赋形增益的要求。这一设计可以减少信道解相关

的影响，提供及时准确的信道估计，并支持移动用户。同时，这种设计可有效消除灵活双工中控制信息间的干扰。

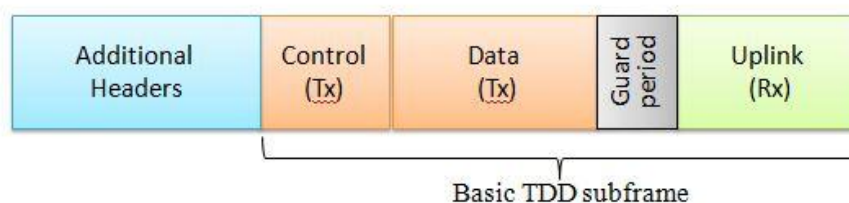


图 4.4 增强 TDD 帧结构设计示例

4.3.2. 灵活双工

随着上下行业务不对称性的增加以及上下行业务比例随着时间的不断变化，传统 LTE FDD 中的固定成对频谱使用和 TDD 中固定的上下行时隙配比已经不能够有效支撑业务动态不对称特性。另一方面，包括上行和下行的业务总量的爆发式增长导致半双工方式已经在某些场景下不能满足需求，全双工成为一种可能潜在技术。灵活双工充分考虑了业务总量增长和不对称特性，有机地将 TDD、FDD 和全双工融合，满足未来网络需求。

灵活半双工可以分为频域方案和时域方案。频域方案通过调整每个载波的双工方向来实现上下行带宽的动态调整。时域方案通过改变每个子帧的双工方向来控制上下行资源比例。灵活半双工可以采用 TDD 的思想，在下行载波上插入探测参考信号可以有效利用信道互易性获得信道估计值。

对于全双工传输，自干扰删除是实现同时同频发送接收信号的关键因素。删除可以在天线域、模拟域和数字域联合展开来抑制干扰，目前在实验平台上已经能够达到高达 130dB 的干扰抑制能力，下一步将是如何设计全双工芯片。为保证控制信号质量和高数据传输速率，全双工的帧结构在控制域和数据域进行了精心设计。基本原则是下行（上行）控制信号比数据要有更高的优先级不能被上行（下行）的数据或控制所干扰，上下行数据进行灵活机会传输。

另外，灵活半双工和全双工的一个共性问题是干扰控制。在多小区环境中，小区间干扰变得更加复杂和严重。除了传统 TDD 和 FDD 系统中的下行对下行干扰和上行对上行干扰，新引入了上行对下行和下行对上行干扰，即基站对基站干扰和用户对用户干扰，如图 4.5 所示。潜在的解决方法包括自适应的资源和功率分配、用户调度、干扰避免和消除以及网络协调。首先，基站和用户的发射功率可以根据上下行的信道质量、基站间和用户间的干扰情况以及业务负载等因素进行详细调整。上下行联合功控是一种有效方法。其次，有效调整多个小区的上下行传输资源可以有效控制小区间干扰。最后，上下行间干扰还可以通过高级信号处理技术进行抑制。在基站侧，利用 C-RAN 的集中处理能力可以有效进行干扰消除。在用户侧，

下行用户可以利用如 SIC 的先进接收算法，上行用户可以采用多天线技术在被干扰的下行用户方向上形成零陷。对于异构网络，宏站和微站间可以通过上下行传输协调来形成虚拟全双工来提升网络吞吐量。

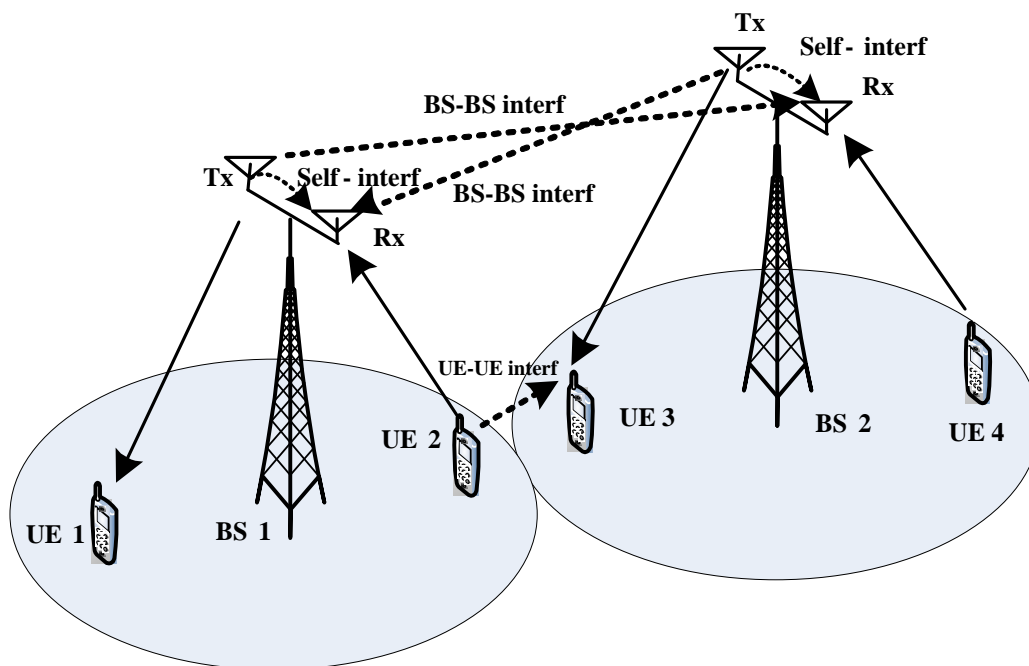


图 4.5 灵活双工组网中的干扰情况

灵活双工致力于在半双工和全双工模式之间进行灵活切换进而适应干扰环境和业务变化。当灵活双工应用于多小区网络时，半双工和全双工小区的灵活组网问题需要重点考虑。不同双工的小区密度可以进行细致优化，不同双工类型的小区可以工作在不同或相同频段上来控制网络干扰。

详细的技术细节请参见白皮书版本 2.0-B。

4.3.3. 灵活多址

面对 5G 通信提出的更高频谱效率，更大容量，更多连接，以及更低时延的总体需求，5G 多址技术的资源利用必须更为灵活高效。当前 5G 多址技术的主要候选集合有现有的 OFDM 正交多址技术，以及正在研究的 BDMA, MUSA, NOMA, PDMA, SCMA 等非正交多址 (Non-orthogonal Multiple Access, NMA) 技术。这些不同的多址技术可以采用统一的实现框架，通过不同的码本映射方式区分不同的多址技术。这样一方面可以灵活地在不同多址技术上进行切换，另一方面可以复用相关模块，提高资源利用率，降低商用化成本。图 4.6 和图 4.7 分别给出上行及下行多址接入的统一实现框架图。

面对 5G 更为多样化的业务场景，需要灵活的多址技术支撑不同的场景与业务需求。例如，面对海量连接的业务场景，如何在有限的资源上接入更多的用户，成为 5G 多址技术需要解决的核心问题。非正交多址接入技术通过多个用户复用同一资源，大大提升用户连接数。由于用户有更多机会接入，网络整体吞

吐量和频谱效率提升。此外，面对低延时或低功耗的业务场景，采用非正交多址接入技术可以更好地实现免调度竞争接入，实现低延时通信，并且减少开启时间，降低设备功耗。在另一些场景，如下行 MTC，考虑到终端的成本和实现复杂度，可能需要使用更为简单的正交多址技术。详细的技术细节请参见白皮书版本 2.0-D。

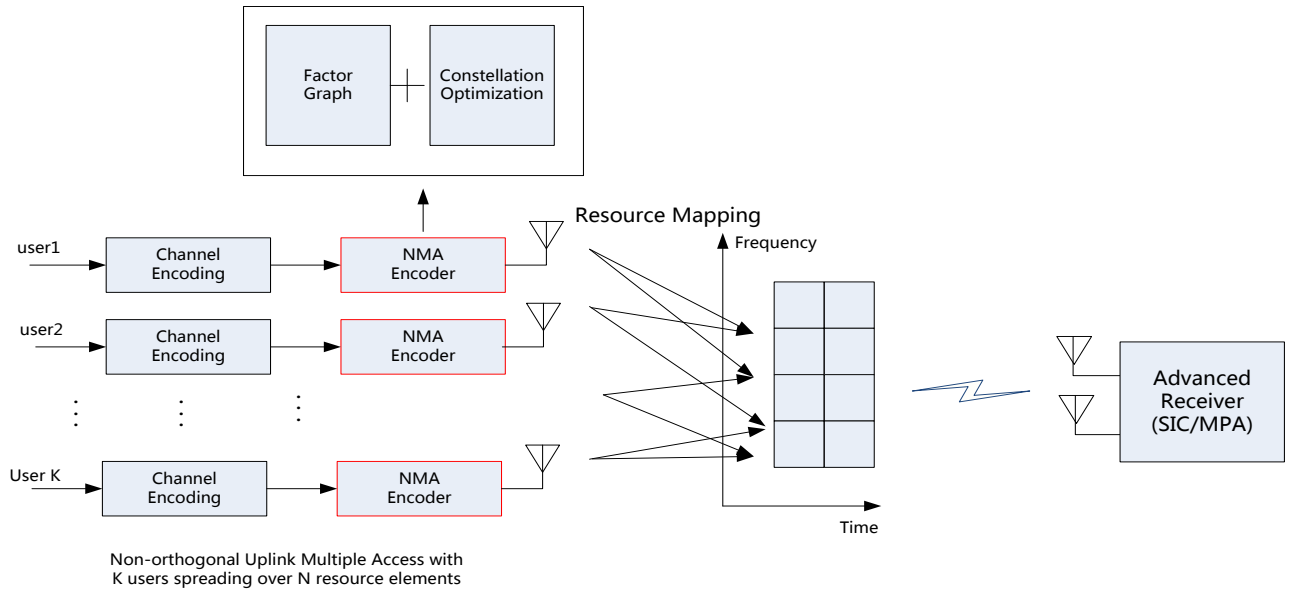


图 4.6 上行多址接入统一实现框架

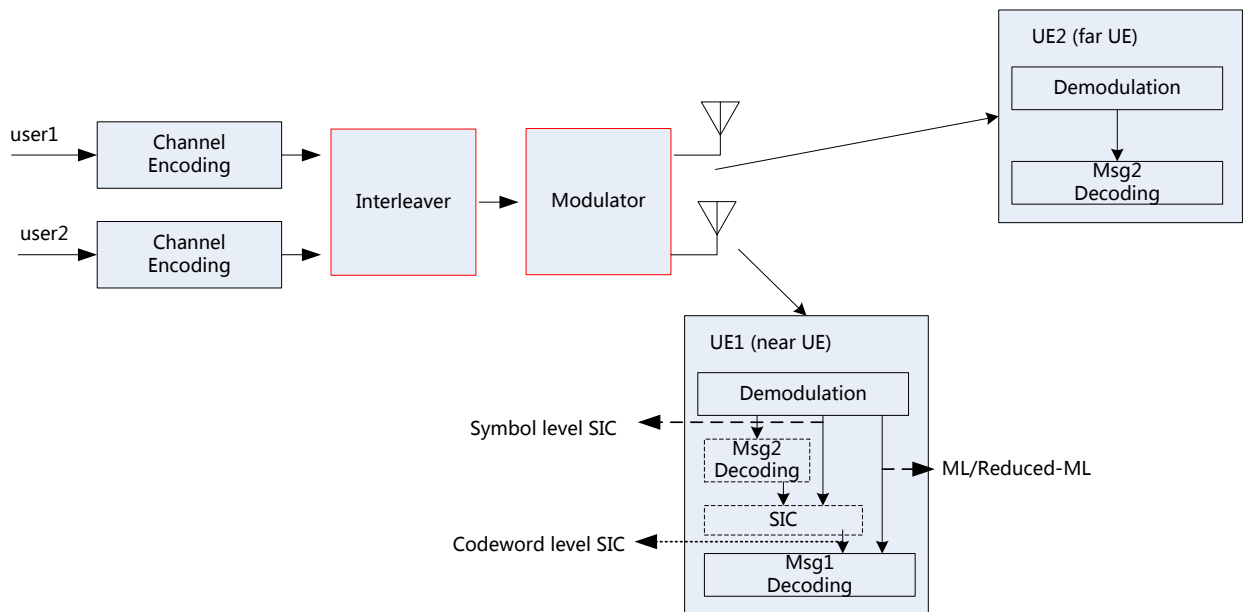


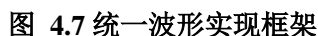
图 4.7 下行多址接入统一实现框架

4.3.4. 灵活波形

OFDM 技术作为一种重要的多载波技术，不仅在 4G 系统中得到了广泛使用，而且作为 5G 系统的重要候选波形之一仍然被众多研究人员所推崇。但是与前几代移动通信系统相比，5G 系统设计时不仅要考虑移动宽带业务，同时也会考虑未来对于海量机器连接以及高可靠低时延业务的支持。OFDM 存在一些固有的缺点：比如对于频率同步误差，时间非同步，多普勒扩展等都比较敏感，所以如果对于未来更加多样化的业务，更高的频谱效率以及海量连接，如果继续仅仅使用 OFDM 一种波形技术是不够的。因此为了满足未来应用的需求，同时考虑到对于低时延，零碎频谱使用，非严格同步以及在高速情况下系统鲁棒性等 5G 系统所面临的挑战，许多新的多载波调制方案被提出，比如：UFMC，Filtered-OFDM (F-OFDM)，GFDM 以及 FBMC。基于载波/波形聚合的方案可以作为这些众多波形方案的一种灵活兼容的设计。位于不同载波上的不同波形聚合在一起作为一种统一的空口服务于不同的 5G 业务。每一种波形方案以及该方案中子带宽度，子载波间隔，滤波器长度以及 CP 长度等参数可以根据不同场景以及业务类型进行灵活配置。

这些新波形方案一个共同点是通过滤波器组的方式来降低带外泄露以及减小对于时频同步的要求。UFMC 和 F-OFDM 方案中的滤波器组都是以一个子带为粒度的。两者的主要差别是：一方面，UFMC 使用的滤波器阶数较短，相比而言 F-OFDM 需要使用较长的滤波器阶数；另一方面，UFMC 不需要使用 CP，而考虑到后向兼容的问题 F-OFDM 仍然需要 CP，其信号处理流程与传统的 OFDM 基本相同。对于 GFDM 方案而言，根据一个 GFDM 块中不同的子载波以及子符号数配置，该方案可以把 CP-OFDM 以及 SC-FDE 作为它的一个特例。除此之外，与 OFDM 中每个符号添加 CP 不同，GFDM 通过在一个 GFDM 块前统一添加一个 CP 的方式来降低开销。而 FBMC 原理方案中所使用的滤波器组是以每个子载波为粒度的。通过优化的原型滤波器设计，FBMC 可以极大的抑制信号的旁瓣，而且与 UFMC 类似 FBMC 也通过去掉 CP 的方式来降低开销。另外在 FBMC 以及 GFDM 中通常使用 OQAM 调制，来减小邻道干扰以及降低实现复杂度。

图 4.8 描述了一种兼容多种多载波调制方案的发射机结构。该结构以最小化硬件功能单元为设计目标，在复杂度较低的前提下，通过不同的信号处理单元组合以及系统参数的配置，该结构可以灵活实现诸如：OFDM，filtered-OFDM，UFMC，GFDM 和 FBMC 多种不同的波形方案。



多天线技术为系统频谱效率、用户体验、传输可靠性的提升提供了重要保证，同时也为异构化、密集化的网络部署提供了灵活的干扰控制与协调手段。目前，数据通信业务飞速发展与连接数的激增仍然是推动 MIMO 技术继续演进的内在需求，而大规模天线理论研究已经为 MIMO 技术的进一步发展提供了有力支持，同时相关实现技术的日渐成熟为 massive MIMO 技术的标准化、产业化提供了必要的条件。随着一系列关键技术的突破及器件、天线等技术的进一步发展，可以预见 MIMO 技术将在 5G 系统中发挥更为重大作用。

1. Massive MIMO 应用场景的研究与建模

2. 面向异构和密集组网的 massive MIMO 网络构架与组网方案

44

3. Massive MIMO 物理层关键技术

天线阵列规模的增大带来了可利用空间自由度的大幅度提高，为支持更大的用户数量与更高的频谱利用率创造了有利的条件。然而，MIMO 维度的大幅度扩展与用户数量的激增也为相应的物理层技术方案设计提出了前所未有的挑战。传输与检测算法的计算复杂度直接与天线阵列规模和用户数相关，而基于大规模阵列的预编码/波束赋形算法与阵列结构设计、设计成本、功率效率和系统性能都有直接的联系。信道状态信息的测量与反馈则从另一方面影响着 massive MIMO 技术的性能与系统效率。此外，随着天线规模的增大以及新型网络构架和组网方式的出现，大规模天线的多用户、多小区调度和协作技术方案将面临更加复杂的场景、干扰环境以及更为复杂的校准与能效优化问题。而天线规模的增加对调度、协作、校准以及回程链路的设计都面临着更为严苛的要求。上述物理层关键技术的优化都将是 massive MIMO 技术步入实用化和标准化过程中需要面对的重要问题。

4. 大规模有源阵列天线结构

5G 时代，大规模天线可能在跨度巨大的多个频段上使用，其天线阵列架构也会有所不同。基于有源天线阵列以及基带波束赋形技术，每个天线端口都由收发信机驱动，多天线的操作主要在基带数字域进行。这种基带架构能提供较多的灵活性如子载波间差异化 MIMO 操作，因此可以适用于低频段的 5G 系统。

当 5G 用在高频段如毫米波频段时，我们需要大量的天线单元提供波束赋形增益来对抗恶劣的传播环境，这种宽带的大规模天线阵列会带来很多挑战。如果仍采用基带架构不仅大规模天线阵列成本奇高，更为关键的是宽频带系统需要有非常高速的 A/D D/A 处理器，其功耗巨大。这种情况下，全射频架构是更为合适的大规模天线阵列实现方式，MIMO 和波束赋形都在射频完成。这个架构下使用一个收发信机来驱动天线阵列，发送阵列处理通过射频单元来进行相位偏移和增益调整。

基带架构和全射频架构之外，还有一种混合架构。混合架构是将 MIMO 和 beamforming 的控制和操作在基带和射频之间分离。在混合架构中，由于模拟赋形之后的数字通道数量大幅度降低，所需的 A/D 与 D/A 器件数及功耗都可得到有效地控制。此外，由于数字通道数的减少，相应的基带处理量也可得以降低。从而能够较好地控制设备复杂度与成本和灵活性及性能之间的平衡。厘米波频段和毫米波频段都可以考虑使用混合架构的大规模天线阵列。

鉴于大规模天线技术的巨大潜能，产业界已经着手开展了相关的产业化推进和标准化工作。3GPP Rel-12 中首先完成了针对 6GHz 以下的 3D 化信道及应用场景建模工作，Rel-13 中 3GPP RAN1 也已经开启了 elevation beamforming/ FD-MIMO 的研究工作。预计大规模 MIMO 也将成为 3GPP Rel-14 及后续版本中的研究与标准化工作的一项核心内容。

更多技术细节请参考白皮书版本 2.0-A。

4.3.6. 新型调制编码

在 3G、4G 时代，Turbo 码和正交振幅调制已经使得在单天线情况下可以逼近香农极限，但还是有足够的研究空间去推进一些更加优秀的调制编码方案应用在 5G 蜂窝系统里。并且现有的信道编码方案仅仅支持传统的业务类型，例如大编码块；而且这些方案的性能增益都基于高斯白噪声信道的理想条件下获得的。但在未来的 5G 时代，由于 ITU IMT-2020 定义了更加丰富的关键能力和评估场景，因此在设计调整编码方案时，一些新的技术方案应该被考虑作为候选方案来进行研究和评估。

首先，对于 ITU IMT-2020 为 5G 定义了更高的关键能力，例如更好的用户体验速率、更高的峰值速率，但现有调整编码技术都很难满足如此高的要求。在此一些先进的相关技术将被作为潜在的候选技术在下文中介绍。

对于 5G 新引进的用户体验速率，在现有系统里类似为小区边缘速率。ITU IMT-2020 定义了用户体验速率在未来需要达到 100Mbps/s，这比 4G 系统高出近 10 倍，这将会成为一个非常大的挑战。因为在基于 OFDM 技术的蜂窝小区边缘（例如 LTE 小区），小区间干扰（ICI）带来的问题非常严重，而这一干扰的分布取决于干扰信号的调制方式：例如，对于 QAM 调制方式，在所有子载波都被占用的时候，小区间干扰接近高斯分布。所以为了缓解 ICI 从而调高用户体验速率，引入新的调制编码方案将变得十分有必要。FQAM 作为相关的潜在候选方案之一，就是希望能够主动地改造小区间干扰，使得这一分布非高斯化，进而提高信道容量。小区间干扰的统计特性能够通过改变干扰用户的调制方式加以改造。如果干扰用户使用这种结合 FSK 和 QAM 特性的 FQAM 调制方式，将会得到统计分布非高斯化的小区间干扰，从而提升小区边缘的性能。

关于未来需要满足的 10G bit/s 峰值速率，这是 4G 时代的 20 倍。即使业界已经普遍认为使用大规模天线阵列是很有可能在未来满足此关键能力，但此性能指标作为 5G 的重要评判标准之一还是面临很大挑战。因此通过设计更大速率，更高鲁棒性的调制信道编码技术来与大规模天线技术相结合来满足 10G bit/s 峰值速率已经成为学术界积极讨论的话题。其中多元域 LDPC 码作为一个潜在的 5G 候选方案已经在学术界得到了广泛的关注。因为多元域 LDPC 码具有优异的码字纠错性能、良好的抵御突发错误能力、更容易和多天线、高阶调制方式、多载波技术相结合提供更高的传输速率和高频谱效率，所以认为特别适用于未来带宽资源有限条件下的高速数据传输如宽带多媒体、移动视频、影像等应用，适应于未来 5G 系统应用来满足极高的系统的峰值速率。

其次，对于 5G 引入了一些新的评估场景，例如不同需求的物联网场景。由于这些物联网场景的业务类型、用户分布、评估指标与现有系统之间具有明显的差异性。所以同样需要考虑引入新的信道编码技术去匹配这些新的场景。在此我们也会介绍一些相关候选的调制编码技术。

尤其是在海量连接的物联网场景，其特点为需要满足大量移动设备接入，接入网络的连接数量将会非常巨大，但每条链路仅仅携带远远小于现有网络的数据大小，每个数据包甚至可能只有几十个比特。这种码字短、信道具有快衰落特性，这对传统蜂窝在时域、频域上的设计都有很大影响，那么考虑的候选信道编码方案将需要对信道的快速变化更加敏感，这样才能在短码情况下有效提升信道容量。因此，链路自适应方案作为一个能够高效处理快速衰落引起的误码问题的方案，能够帮助发送端选择合适的调制编码方案来匹配此刻的信道条件。即使链路自适应方案在 3G、4G 时代已经提出过，但当时此方案当用户的移动性明显提高，或者码长更短的条件下，还很难准确且高效的获取快衰信道信息。但在 5G 时代，更加先进的链路自适应方案能够更快使接收端高效获取信道信息，从而选择相应的调制编码方案，这能更好的避免资源浪费，提高链路传输效率。此外，从系统级去考虑海量连接的物联网场景，网络编码作为 5G 潜在的候选方案，能够通过多跳传输机制来增加系统的总吞吐量。这也是因为中继接点作为多跳传输在 5G 蜂窝中的典型应用已经被广泛认同。即使网络编码在学术上还有部分问题没有解决，但我们相信这个情况在 5G 时代将有可能得到改变，我们可能看到网络编码在 5G 的不同的标准下面得到更加广泛的应用。

总之，通过对这些调制编码技术的理论研究和性能仿真结果的表现来看，他们都会对未来无线蜂窝系统的发展起到很大的推动作用。即使有的调制编码技术已经在无线通信领域被广泛的开始研究，但是对于这些技术如何灵活的匹配不同场景的需求都需要被谨慎的考虑和设计。尤其是在 5G 标准化的关键时期，如何把这些调制编码的理论高效飞转化成具有标准化同样也需要产业界更多的关注。

4.3.7. 灵活频谱使用

5G 频谱波段将涵盖很大的频率范围，甚至高达毫米波波段。因此 5G 系统必须足够灵活以便在相同或不同的授权规则下，可以工作在不同的频段，包含不同频段间的切换，以及同时工作在多个频段的能力。5G 的三大场景，及 eMBB、mMTC 和 uMTC 各自具有不同的频谱需求。这种意义上，频谱使用和共享必须足够灵活以支持不同的业务场景。

eMBB 是大容量高速率场景，需要更多的频谱资源。6GHz 以下的低频段资源对增强覆盖至关重要。高频段可提供连续的大带宽，即使衰减较大，覆盖降低，但在热点地区，仍可以较低的收发复杂度提升容量。因此高低频协作是满足 eMBB 场景的基本手段。同时，一些新型的频谱使用方式在 5G 时代也有可能有所进展。比如授权共享使用（LSA）能有效使用一些现有业务使用率较低的频段，共主用户共享（co-primary sharing）可能出现在一些新频段上允许对多个运营商进行同等的授权接入。将来不排除出现其他新型的频谱使用方式。总的来说，5G 仍会以传统的独占授权使用频谱为主，以非授权和其他频谱使用方式为辅。频谱使用方式的多样性，也需要 5G 有灵活自适应的机制来实现系统操作和控制。

mMTC场景通常是低速率的小包传输，覆盖必须得到保障，因此需要优先配置6GHz以下尤其是1GHz以下的频段。授权频谱是mMTC的保障，而其他频谱使用方法待研究。

uMTC 是低时延高可靠场景，因此必须独立的配置授权频谱以保证其极高的可靠性要求，其他频谱使用方法暂不考虑。

5. 5G 安全技术

面对未来 5G 网络的高速率、低延时、全覆盖的技术特征，以及全开放、软件化、可编程化的面向用户的设计标准，CP/UP 分离的组网思路等，相较于现行 4G 网络，未来 5G 网络将会在网络通信的各个层面迎接更加严峻和复杂的安全攻击形势。保护未来 5G 网络的安全将不仅需要我们研究 5G 通信中具体的场景、网络特性和安全攻击方式，而且需要我们在 5G 网络设计之初即明晰 5G 通信中各阶段所应该具有的安全策略，提出总体的安全设计框架。并通过引入新的安全技术、流程和监控检测方法，保证安全机制和方法在系统中的正确有效实施，从而保障 5G 网络通信的安全。

5.1 5G 安全架构

针对未来 5G 网络的三朵云：接入云、处理云和控制云架构，5G 网络设备的安全通信将需要实现 4 个层面上的 5 类安全，如图 5.1 所示：

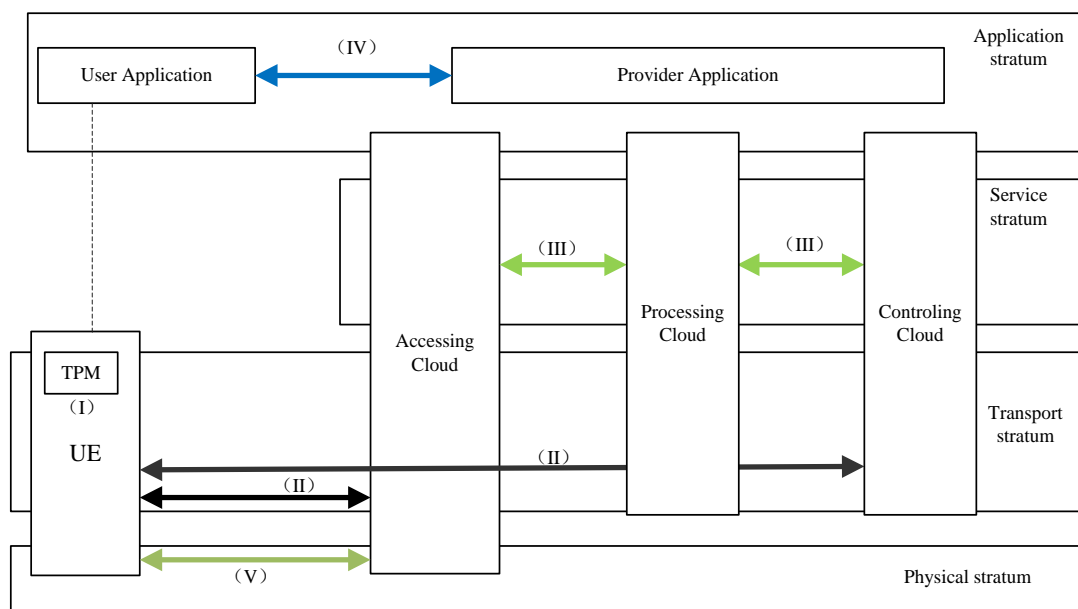


图 5.1 5G 安全架构图

(1) 终端设备安全 (I)

未来的 5G 网络将提供对海量用户的支持并保障多种类型设备的安全接入，5G 不仅能为移动互联网中更加丰富的应用场景提供支撑，而且能深入普及到移动医疗、智能家居、工业控制、车联网、环境监测等物联网领域，将数以千亿计的设备接入网络，实现“万物互联”。在万物互联的场景中，如何确保海量接入设备自身的安全，即网元的安全性，将成为保障未来 5G 安全的基础。在保证网元安全性上，我们需要在接入设备中设计有效的终端基础安全模块，使在设备接入网络的初始阶段完成自身安全检测成为可能，并在设备运行阶段定期的进行安全验证和维护，以保障设备自身的安全性。同时由于 5G 中还提出了针对低功耗的设计的需求，保证低功耗设备上实现通信的安全保护也带来新的挑战。

（2）空口安全（II）

未来的 5G 网络呈现节点超高密度部署、多种无线网络技术体制并存、多种安全机制并存等特点，导致 5G 网络对大量数据安全计算、多域超短时认证和授权、异构网络安全通信、无缝的安全漫游切换等成为 5G 网络接入（空口）方面的主要安全困难。未来的 5G 网络中需要通过接入云、处理云和控制云的相互协作，在 transport stratum 完成网络设备的安全接入认证（图 6-1 中链路 II），因此需要开发和利用适合 5G 网络特性的 transport stratum 安全协议来实现多域融合的密钥管理、网络和用户身份认证、用户隐私保护、网络空口数据/信令加密保护，完整性保护、端到端安全认证和数据保护、安全域融合等功能需求。

（3）数据处理和传输安全（III）

为了适应 5G 的业务需求，5G 网络中引入了一些组网模式的变化，例如 CP/UP 分离，核心网简化，核心网功能下沉等。在我们所提出的网络结构中，这些变化将主要通过三朵云的网络结构来具体实现。而 5G 网络通信实体间的数据传输也将通过接入云、处理云和控制云的有效协同来建立通信链路（图 6-1 中链路 III），保障数据的有效、安全传输，并实现数据预处理、负载均衡等功能。数据在 5G 网络域上的传输和处理的安全性将主要通过基于 SDN/NFV 的服务层相关功能来保障。SDN 的使用将使核心网络趋向扁平化，网络资源和中继节点资源将实现可控和动态优化，并将解耦网络设备的控制面和数据面，实现控制面的集中化，并提供开放、可编程的接口供应用层使用。NFV 则利用虚拟化技术实现硬件通信功能的软件化，分层解耦通信功能单元并引入新的 MANO (Management and Orchestration) 管理体系。面对由于 SDN/NFV 的广泛使用而引发的诸多网络特性和变化，很多原本围绕传统网络结构、通信设备而设计的安全方法、安全策略、信任管理策略等都可能都将不再适用。用户数据在未来的 5G 网络中通过接入云、处理云和控制云的转发、预处理以及负载均衡等功能所引起的数据的一致性、保密性，相关网络功能的抗 DDOS/DOS 攻击性，抗中间人攻击等安全问题将是保障 5G 数据处理和传输安全方面的主要工作。

（4）应用层安全（IV）

未来的 5G 网络将向用户提供极端丰富的网络应用资源。这些应用将不但满足用户对于数据通信、娱乐、网络漫游等传统互联网的服务性需求，还将可提供针对底层网络的数据预处理、数据转发等控制层操作的相关功能。这将使未来 5G 网络的应用层更具攻击价值，保障应用层安全的重要性将会更加突出。5G 的接入云、处理云和控制云都将向应用层提供开放的软件接口，因而在应用层的程序设计和现实中，横跨三朵云的网络域应用安全、网元自身应用安全及两者间的安全通信（图 6-1 中的链路 IV）将成为 5G 应用层安全研究的主要内容。网络能力开放、接口开放、业务开放是 5G 生态圈的重要特征。开放意味着由多个资源/业务拥有者/提供者相互协作提供业务服务。这些不同的拥有者间的建立互信、合理授权、资源使用 SLA 保证都必须有一套完善的安全机制保证。不同拥有者间、不同业务间的资源和信息必须共享（协作的要求），同时也必须保证隔离（信息与资产安全性要求，故障隔离要求等）。在 5G 中提出的业务 Slice 的概念是解决共享与隔离问题的主要思想。5G 架构中必须包含对这种认证、授权、计费的能力，同时保护这种开放对网络的安全性的影响。同时，还要保护这种授权模式下用户隐私保护。

（5）物理层安全（V）

无线信道在空时频域具有明显的多样性、时变性和私有性，通信双方的信道特征也具有一定的互易性，这就使得针对物理层安全的研究可以从无线通信的物理层特点入手，在信号层面解决无线通信的安全问题。未来的 5G 网络将使用全新或向上融合的空口资源进行数据通信，为用户提供高频谱效率、高吞吐率的无线传输技术。为了大幅度提高频谱效率和功率效率，5G 拟在基站使用更大规模的天线阵列技术，这将极大地丰富了信道特征的多样性和时变性；而 TDD 模式下信道的互易性和私有性则会更加明显。因此，可以充分利用 5G 无线通信的物理层传输特性，研究安全传输、密钥生成、加密算法和接入认证技术，提出一个分等级的多层多域安全体系架构，突破面向物理层安全的无线传输技术、物理层密钥生成机制、基于物理层安全的加密和认证机制等三类关键技术，为 5G 无线网络的安全传输奠定坚实基础。网络开放还意味着网络的安全保障服务的开放，即网络的安全由第三方负责。

5.2 终端安全技术

5.2.1. 安全需求

5G 网络将提供对海量用户的支持并保障多种类型设备的安全接入，将数以千亿计的设备接入网络，实现“万物互联”。在万物互联的场景中，如何确保海量接入设备自身的安全，即网元的安全性，将成为保障未来 5G 安全的基础。具体地，5G 网络中的终端面临着下列的安全需求：

- （1）更高的身份可靠性要求

5G 时代终端和终端之间可以直接交互，需要终端自身具备身份证明和验证能力，从而保证交互双方的身份可靠性。

(2) 信息完整性需求

5G 网络需要面向无人驾驶、工业控制等对安全性较高的领域，除了在基础网络层保证低延时和连接的可靠性，还要保障网络所传送控制指令的完整性。5G 终端需要具备信息完整性证明和验证手段。

(3) 隐私保护需求

5G 为万物互联时代，海量终端接入将会促进大数据技术得到更充分应用，5G 网络大数据环境下的隐私保护将成为重要问题。5G 终端需要提供保护隐私的有效技术手段。

(4) 终端可靠性需求

智能终端执行环境的可靠性和应用程序来源的可信性面临挑战。嵌入式传感器终端数量巨大，这些传感器可能面临固件更新问题，而固件代码来源的可信性证明，是保证终端可靠性的基础。5G 时代，需要通过技术手段保证终端执行环境的可靠性和可信性。

现有移动通信技术安全保障机制已经无法满足未来移动通信应用的安全需求，因此必须针对 5G 设计全新的安全保障体系，为未来的移动通信应用提供多样化、个性化、差异化和分级别的安全服务。而构建这种安全保障体系的关键则是设计面向移动终端的基础安全模块，为各类 5G 应用提供基础性安全服务。

5.2.2. 关键技术

1. 面向终端的基础安全模块

基础安全模块由一系列组件构成，为模块内部应用和外部管理系统之间提供了一套独立于硬件和厂商的接口，实现全生命周期的密钥管理、数字证书管理以及各类安全域的动态管理，为 5G 通信以及 5G 应用提供包括实体认证，以及信息的保密性、完整性、不可否认性等各类所需的基础性安全服务。其中，安全域的设计采用对称结构，各安全域之间并无依赖关系，为 5G 终端提供了极大的灵活性去管理大量不断变化的、期望能够在基础安全模块上运行自己应用的业务合作伙伴。同时，该基础安全模块具备高强度的硬件安全防护体系，能够抵御各类物理攻击。基础安全模块的框架图如图 5.2 所示。



图 5.2 基础安全模块设计框架图

2. 基础安全模块安全管理技术

(1) 基础安全模块系统框架设计

围绕基础安全模块，构建涉及 5G 终端设备、运营商、应用提供方、设备生产商在内的基础安全服务框架。其中涉及基础安全模块的初始化流程，运营商、应用提供方以及设备生产商间信任链的构建等问题。

(2) 全生命周期的密钥管理

基于基础安全模块，设计各类密钥的生命周期管理机制，其中涉及密钥的产生、存储、使用、分配、更新、锁定、解锁、销毁等操作。

(3) 安全域控制

能够在基础安全模块中实现各类安全域的动态管理与配置。其中包括：安全域的动态分配和回收操作，跨域安全交互操作，以及安全策略的下载、更新、删除、锁定、解锁等操作。

(4) 安全协议的设计

面向安全服务的申请、应用下载、安全策略的分配等信息通信，设计轻量级的安全协议，确保信息传输的保密性、完整性和认证性。

(5) 信息格式设计

设计各类命令格式以及消息格式，满足基于基础安全模块的安全管理和安全服务的需求。

(6) 基础安全模块的硬件安全设计

包括硬件的主机接口协议设计、密钥安全管理设计，密码算法种类及实现效率设计。

3. 基础安全模块安全检测技术

(1) 安全功能检测

包括密码算法、随机数发生器、异常检测机制、残余信息保护机制、存储器访问控制机制功能性检测。

(2) 抗攻击能力检测

包括基础安全模块芯片表面检测、基础安全模块芯片背部检测、基础安全模块芯片表面简要分析、基础安全模块芯片表面详细分析等检测技术，以增强基础安全模块的抗攻击能力。

5.3 空口安全技术

5.3.1. 安全需求

未来的 5G 接入网存在多层（蜂窝网络与毫米波网络）、多种无线接入技术（multi-RAT），将实现 2G, 3G, 4G, WiFi 等多种技术的无缝融合，能提供超过 10Gb/s 速度、具有低延迟、高可靠、超高密度用户容量、支持高移动性、能量严格受限等特性，可以支持超高清视觉通信、多媒体交互、移动工业自动化、车辆互联等各种应用需求。这些特征使得传统的空口安全机制并不适合于未来 5G 空口安全。具体地，5G 网络在空口方面存在下列安全需求。

（1）5G 网络呈现多种无线网络技术体制并存、多种安全机制并存等特点，导致多种模式的快速接入认证、无缝的漫游切换等安全保障困难。

（2）5G 网络边缘的超高密度节点部署，海量的物联网终端设备需要并发接入到 5G 网络里，同时这些终端之间也要进行通信，需要设计海量设备标识与密钥管理、高并发接入认证、机器类通信 MTC 的安全机制等。

（3）为了减轻接入网络的压力，5G 引入了设备之间直接通信，即：D2D 通信，终端设备不需要基站的转发直接进行通信，缺乏安全基础设施的 D2D、Ad Hoc 等边缘网络无法直接使用现有的安全技术。此外，为了扩大网络的覆盖面积，移动接入设备可以临时升级成为小基站，但这种设备角色切换，在安全层级上使得设备具有更高权限，而其他接入设备则需要通过该设备传递信息，由此可能引发信息泄露以及安全管理问题。5G 网络中对于双重身份设备的安全管理问题需要得到进一步的研究。

（4）4G 网络通常只对通信链路上手机和基站之间空口的无线通信数据提供加密保护，这使得这些数据在传输过程中很容易受到攻击。而且，由于加密功能的启用或关闭仅由运营商决定，对用户往往是透明的。这些措施并不能有效保证通信的安全性，无法满足一些对安全性要求较高的应用需求。需要设计新型能够保证端到端通信安全的方法。如何实现异构多域环境下的端到端的统一认证以及建立跨域的端到端安全机制将是空口安全的一个研究重点。

（5）业务对低能耗、高并发处理的要求，对边缘网络中的轻量级密码算法和接入传输、服务提供网络中高并发的密码算法实现机制提出了严峻的挑战。

新型的 5G 端到端网络架构的特点需要我们设计新型的 5G 空口安全体系。在此基础上，根据 5G 网络高并发、高动态、能量高效的具体需求，需要设计空口相关的接入认证、漫游切换、密钥管理以及密码算法等机制，这些机制需能够兼容 4G 以前的空口安全相关技术，并适应多网、多融合的特征。

5.3.2. 关键使能技术

1. 适合 5G 的身份认证技术

首先，5G 中将对多种网络技术实现支持并提供统一的接入平台。通过提供标准接口 API，实现用户通信的完全无缝连接服务。在这种情况下，用户的通信过程将可能会涉及到多种网络通信技术领域，以及多种通信安全域。由于不同的接入技术所采用的安全机制不同，且具有安全性较弱以及容易暴露用户隐私的缺点，为了解决这一问题，提出适合于异构无线网络的安全、高效和低开销的统一的跨平台身份认证机制，保证多种无线网络互联互通；其次，针对业务应用的安全等级不同，研究基于生物特征、信道特征等方式的多元化安全认证方法，保证 5G 网络可全面、细粒度地为业务应用提供支撑。最后，针对海量终端设备同时接入场景，设计海量设备同时高并发的接入认证方法，以及相关的大量设备标识与密钥管理机制。

2. 异构无线网络跨域的端到端认证和加密技术

提出异构无线网络端到端认证模型、端到端身份认证方法和异构无线网络端到端加密结构及加密方法，设计适合于异构无线网络的分层、分布式密钥管理和分发方法，保证信息跨域传输的机密性和完整性；。

3. 安全高效的异构无线网络漫游切换技术

设计安全高效的异构无线网络漫游切换机制，确保漫游切换在时延上低于 50ms，满足多媒体业务的基本需求。

4. 轻量级加密和完整性算法

研究适合于 5G 网络的轻量级加密算法以及完整性保护算法，从安全，能耗以及具体场景等多角度研究轻量级密码，建立起轻量级算法的评价方法，提出轻量级加密算法以及完整性保护算法，以解决 5G 网络的安全算法不但要考虑 4G-LTE 网络安全算法的平滑演进，又要考虑物联网，车联网等多种网络逐渐融合进 5G 网络的问题。

5.4 数据处理和传输安全技术

5.4.1. 安全需求

随着移动互联网的飞速发展以及云计算等新业务的普及，为了解决传统网络中无法避免的缺乏灵活性、对需求变化的响应速度缓慢、无法实现网络的虚拟化以及高昂的成本等问题，软件定义网络（SDN）和网络功能虚拟化（NFV）作为一种革命性的技术已被引入移动网络，并将成为未来 5G 的主要技术力量。实际上，SDN 解耦了设备的控制面和数据面，于控制面实现集中控制，并提供开放、可编程接口供应用层使

用。然而 SDN 的集中控制的特性使得安全威胁由转发面转移到控制面，大大增加了控制器受到攻击的风险；开放和标准化的接口将会带来新的协议安全问题；开放可编程的特性也大大增加了通过软件进行攻击的危险。而 NFV 则采用虚拟化技术、基于通用硬件实现电信功能节点的软件化，打破传统电信设备的竖井式体系，其核心特征是分层解耦和引入新的 MANO (Management and Orchestration) 管理体系。网络虚拟化后，将使得传统网络具有功能软件化、资源共享和部署集中化的特点。这些特点在带来产品上线快、成本低等优势的同时，也会导致传统网络安全发生变化。例如，网元功能软件化导致原来的硬件网元设备的物理边界消失，引入软件安全问题，使攻击面变得更广；计算、存储及网络资源共享化，导致引入虚拟机安全、虚拟化软件安全、数据安全等问题；部署集中化，引入通用硬件导致病毒能够在集中部署区域迅速传播，通用硬件的漏洞更容易被攻击者发现和利用。

5.4.2. 关键技术

SDN/NFV 安全涉及到的关键技术如下：

- **SDN 控制器的渗透攻击防护：**SDN 控制器由于集中控制网络的转发策略、具有全网视图等特点而成为攻击者的重点攻击对象。攻击者只要控制了 SDN 控制器就可以控制整个网络。所以对 SDN 控制器进行渗透攻击防护是非常重要的。由于 SDN 控制器是将控制器软件安装在服务器或者虚拟机上实现的，所以除了考虑传统的针对服务器和虚拟机的渗透攻击，还需要考虑 SDN 控制器软件本身所存在脆弱点。另外，还需要考虑 SDN 控制器的部署环境对渗透攻击的影响。
- **SDN 控制器的 DDoS 攻击防护：**SDN 控制器集中控制的特点以及 SDN 控制器的重要性导致了 DDoS 攻击成为攻击者常用的攻击方式。常用的对 packet-in 消息进行限速的方式，会导致丢弃正常报文，影响正常报文的处理，可以考虑在 SDN 控制器中引入“分片”的概念，即 SDN 控制器被逻辑分成多个分片，每个分片负责处理某几个交换机上送的流量，此方式可以实现某个分片出现 DDos 攻击时，不影响其他分片的流量处理。
- **虚拟化安全（包括 Hypervisor 安全、虚拟机安全等）：**虚拟化安全是 NFV 安全的基本保证，一旦 Hypervisor 被控制、虚拟机隔离失效，VNF 安全以及 VNF 之间的通信安全将完全失效。NFV 场景中的虚拟化安全可以考虑重用云计算中的虚拟化安全机制，但是哪些云计算中的虚拟化安全机制可以重用、哪些机制需要加强等是需要重点考虑的。
- **MANO 安全：**MANO 是网络功能虚拟化后引入的虚拟化资源管理系统，MANO 的安全等级应该与传统网管的安全等级相同。MANO 安全除了考虑 MANO 包含的网络实体的安全之外，需要重点考虑 MANO 与外部系统（包括传统网管、NFVI 以及 VNF 等）之间的通信安全，防止攻击者

通过外部系统以及与外部系统之间的接口攻击 MANO。传统的设备安全加固、证书认证以及 TLS/IPSec 安全通道等安全机制可以考虑在 MANO 安全中重用,但需要考虑是否需要进行传统安全机制的增强。

- **SDN/NFV 引入移动网后的部署安全:** 部署安全会在一定程度上影响安全风险发生的可能性。对于 SDN/NFV 移入移动网后考虑部署安全,首先需考虑对重点保护设备和系统的部署安全,可以通过划分安全域并实现不同安全域之间的安全隔离的方式来保证重点设备和系统部署在安全级别高的隔离环境中。由于 SDN/NFV 的虚拟化特点,还需要考虑传统的安全域划分原则是否能够在此场景下完全适用,在虚拟化网络功能迁移的情况下,安全域如何处理等。

5.5 应用层安全技术

5.5.1. 安全需求

伴随着通信技术迅猛发展,未来 5G 网络时代,人类对网络空间的依赖将达到极致。5G 网络将成为国家最重要的信息基础设施,而 5G 的安全问题将成为主要课题。为了解决这一问题,一方面需要研究解决 5G 网络自身的安全问题,保证 5G 网络安全可信、可管可控、稳定可靠的运行;另一方面,也要研究解决承载在 5G 网络之上的各种应用的安全问题,提高 5G 应用层的安全性。具体来说,应该解决如下问题:

(1) 应用层自身的安全。包括终端应用的自身安全、服务方 (Provider) 应用的安全、以及终端与服务方之间的安全通信。5G 时代,终端数量、种类大幅度增长,应用的广度和深度也与之之前不可同日而语。安全技术要适应这种需求。比如,为适应小型物联网终端的要求,需设计安全性高、运算速度快、资源能耗比较少的轻量级密码算法;5G 的接入云、处理云和控制云都将与应用层之间有互相协作的接口,必须有一整套安全机制来建立互信、合理授权、资源共享与隔离等。

(2) 5G 网络向应用层提供的安全服务。网络能力开放、接口开放、业务开放是 5G 生态圈的重要特征。安全技术和能力是每一个服务提供者都需要的共性需求,比如用户身份的认证、访问权限控制、安全事件的追溯、密钥的分配和管理、网络攻击的防护等等。5G 时代的众多应用提供者,安全能力参差不齐,急需由第三方提供方便、可靠的安全服务。5G 网络提供的信息安全服务将随着 5G 业务的发展而不断发展。目前来看,5G 安全服务可以包括但不限于身份管理、身份认证、访问控制、信息保护、隐私保护、密钥管理、密码计算、电子签名等。5G 网络提供的信息安全服务,将有效降低应用层面的信息安全门槛,支撑物联网、工业 4.0、互联网+等新业务、新应用的发展,有力促进大众创新和创业,带来巨大的经济效益。

电信运营商由于掌握着网络资源和用户资源，因此在提供信息安全服务方面具有先天优势。但其他互联网业务提供商同样可以提供信息安全服务。5G 的安全服务领域有可能成为创业创新的热点。

5.5.2. 关键技术

(1) 网络身份管理技术

实现网络能力开放的前提条件是实现跨网络层与业务层的鉴权整合，也就是网络层和业务层之间可以实现可靠、方便的身份信息传递。网络身份管理技术包括身份标识的数据模型、生命周期管理、用户权限控制、身份信息授权访问、用户隐私保护等多个方面。

网络身份管理的重点是身份标识的设计，基于 IP 地址的身份标识是最方便易用的技术方向，但需要解决 IP 地址的身份位置二义性问题。此外，网络层和业务层之间安全的身份信息交互也非常重要，既要达到业务方便可用的效果，又能够保障用户隐私。

(2) 基于 SIM/USIM 的移动统一认证技术

基于 SIM/USIM 的移动统一认证技术（以下简称 SIM 统一认证）利用移动终端 SIM/USIM 卡绑定的个人移动 ID，依托 SIM 卡应用认证、远程管理能力，为第三方业务提供统一认证服务，是网络可信身份技术的一种。

SIM 统一认证整个生态系统由用户终端 SIM 卡认证应用、认证管理 app、用户 PC 机（浏览器端）、业务平台（SP 网站）、统一认证服务器等组件构成。其核心是用户手机上的 SIM 卡以及卡上的应用。需要研究 SIM 卡应用的技术规格和下载更新的方式；需要定义统一认证网关实现与各种第三方 SP 的安全交互；需要研究针对 SIM 认证系统的 DDOS 攻击、渗透攻击、仿冒攻击等。

SIM 统一认证按照业务需求和安全需求的不同，可以有单纯卡应用和客户端应用两种。前者只需要在 SIM 卡上有应用小程序（SIM Applet），后者需要终端上安装应用程序（手机 APP）。这两种方式都对 SIM 卡技术规格、终端软硬件有具体的要求。推进 SIM 卡统一认证需要从标准制定、基础设施建设、关键技术研发等方面加快工作。

5.6 物理层安全技术

5.6.1. 安全需求

无线移动通信网络需要为用户提供稳定、可靠的服务，然而，电磁波传播开放性所造成的无线链路脆弱性正是无线通信安全的“最短板”。从 2G 到 4G，移动通信系统的安全性虽然逐步得到改善，但采用的安

全手段依然沿用有线通信中的高层加密认证机制，密钥存储和分发的安全性面临极大的隐患。因此，有必要在 5G 通信技术的研究起步之初，兼顾通信和安全的双重需求，在研究高频谱效率、高吞吐率的无线传输技术的同时，同步开展针对无线传播特点的安全防护机制研究，形成相互借鉴、相互促进、良性循环的有利发展态势，同时满足用户日益增强的通信和安全性需求。

无线安全通信的主要目标是在保证期望用户通信质量的同时防止信息被潜在的窃听者截获。近年来兴起的物理层安全研究从无线通信的物理层特点入手，在信号层面解决无线通信的安全问题。无线信道在空时频域具有明显的多样性、时变性和私有性，并且通信双方的信道特征具有一定的互易性，这些特性为安全传输方法设计提供了新的思路。5G 所采用的传输和组网技术可以更好的与物理层安全相结合。Massive MIMO、以及多个基站之间的多点协作（CoMP）等各种技术，为物理层安全的深入研究带来了极为丰富的资料。充分利用 5G 无线移动通信的物理层传输特性，研究安全传输、密钥生成、加密算法和接入认证技术，在保证期望用户通信传输质量的同时，防止未知位置的窃听者截获信号或者增加中间人攻击的难度。

5G 的物理层安全技术需要提出一个分等级的多层多域安全体系架构，突破面向物理层安全的无线传输技术、物理层密钥生成机制、基于物理层安全的加密和认证机制等三类关键技术，为 5G 安全标准体系框架的形成奠定坚实基础。

5.6.2. 关键使能技术

1. 物理层安全传输技术

空域资源的开发和利用是物理层传输安全性的本质来源，而多天线技术和协作中继技术的使用是开发利用空域资源的必备条件。5G 移动通信系统中的一个典型特点是基站端配备大规模天线阵列，并且小区密集度高，中继的大量部署，万物互联的特性等都为我们提供了丰富的空域资源。我们应该致力于研究基于空域差异的 5G 安全传输技术，主要包括：面向多天线传输的一类技术，通过设计兼顾通信效率和安全性能的多天线预编码，实现该场景下的安全传输；面向协作中继的一类技术，通过设计不同节点的安全协作策略保证安全传输；此外针对系统内部的不可信节点也应该做到窃听防范。更为重要的，考虑到 5G 通信场景的复杂性以及业务的多样性，我们应该充分考虑反馈受限，小区干扰等实际通信场景中的安全传输技术，以及不同安全等级的通信需求。

2. 物理层密钥生成技术

利用无线信道特征生成密钥是物理层安全的一个重要的研究方向，这类方法解决了传统密码学中密钥分发和管理的难题，并有希望达到“一次一密”的保密特性。该技术的基本思想是利用无线信道的互易性、

私有性和时变性，使通信双方通过信道特征提取和量化生成密钥，避免密钥分发和管理的过程，从而增强密钥的安全性。

5G 移动通信系统呈现出以下特点：首先，Massive MIMO 技术的使用使得网络呈现高度不对称的特点，即基站端往往拥有海量天线，而终端由于物理尺寸以及功耗的限制，通常只能配备一至两根天线；其次，高载频的使用使得可利用的无线信道特征更加丰富；再次，多基站协作技术的使用进一步加强了用户信道特征的多样性。然而，由于基站天线单元的数量巨大，如果要终端来估计每一个基站天线的信道特征，导频的开销会太大。为此，可以在基站端采用波束域发射导频的方式降低导频开销，通过人为构造时变的波束来生成时变的等效信道，以此保证等效信道的多样性和提高密钥生成速率。当天线阵列的阵元间距增大时，在近场模型下，无线信号在空中的分布将由“波束形成”变为“点聚焦”，即信号能量主要集中于一点。与前述的“人造时变波束”方法类似，通过随机选择基站参与聚焦的阵元，可以在基站和移动终端之间形成不同的等效信道，用于密钥生成。

3. 基于物理层安全的认证增强

一方面，由于移动通信系统采用无线接入，无线信道的空间自由传播特性决定了接入层加密和完整性保护的重要性。相比于 2G、3G 而言，4G 的加密和完整性保护机制相对完善，可以有效防止用户的业务信息被第三方截听。但由于其加密和完整性保护机制中密钥和身份是绑定的，必须要确定身份才能进行密钥协商。所以，用户首先从上行公共信道接入网络，与网络在开放的上下行公共信道上明文进行初始会话协商后，才启用加密和完整性保护过程。这种加密和完整性保护机制存在敏感信息泄露、USIM 卡数据安全等隐患。因此，在高层进行与身份绑定的加密和完整性保护机制的基础上，补充对初始接入时信令、会话过程中信令和业务数据的物理层加密和完整性保护，可以设计一种全新的基于物理层安全的隧道密闭防护机制，利用安全传输技术，将初始会话协商过程指定到一个启用了物理层加密和完整性保护的专用控制信道上，以防止用户敏感信息的泄露；同时，在现有加密和完整性保护方法上混叠物理层加密和完整性保护方法，防范 USIM 卡被复制条件下用户业务数据流被截听的风险。

另一方面，在 GSM 系统中认证是单向的，只有网络对用户的认证，没有用户对网络的认证，存在严重的安全漏洞。窃听者可以通过伪基站轻易地伪装成合法的网元，从而欺骗用户，窃取用户身份、位置，甚至是业务内容等数据。3G 系统虽然实现了双向认证，但只是用户对归属网络的认证。4G 仍然没有启用用户对基站的认证措施，这使得基站成为了重灾区。窃听者将伪基站和伪终端串接在合法用户和公网的基站之间，通过信令和数据的透明转发，进行中间人攻击，即可以假冒合法用户在公网进行身份注册和发起语音、短信等业务，实时地截获用户的位置、真实身份等敏感信息，并在后台留存、解密用户数据信息。相比现阶段无线通信系统主要单独依赖与身份绑定的高层（MAC 层及以上）认证机制来实现安全认证，更为可靠的办法是利用无线通信系统中的物理传输信道特征来增强认证功能。同时这种认证的优势还在于

不需要改动现有高层协议，而通过改动物理层的行为即可加强现有无线通信网络的安全性，通过基于传输路径的物理层认证结合现有与身份绑定的高层认证机制，提高未来 5G 通信系统的抗伪基站、伪终端攻击的安全性能。

最后，未来的 5G 将是基于 IP 的多种无线接入技术共存的异构融合网络，不同接入技术的认证机制对业务及用户应该是透明的。但是，目前每种接入技术在身份标识、权限管理、认证方式、加密方法提供和完整性保护等方面各有长短，使得要统一保证用户所有链接的可信性和保密性变得非常困难。正是由于 5G 这种异构融合网络环境的复杂性和不稳定性，必须引入新的统一的标识管理和认证机制，来唯一识别 5G 无线通信网络内的各种物理和逻辑实体，并基于此对目标对象进行相应的权限控制和身份管理，以及相关信息的安全获取、处理、传送与交换。因此，有必要利用用户与基站间无线信道的随机特征，从中提取出既包含足够信息量又具有较低复杂度，能够快速实时产生的物理层安全变量作为认证参数，设计新的适配多种无线接入技术的认证机制，并突破异构无线移动通信网络中用户身份的统一标识、分层映射、隐藏传输等关键技术，实现利用较小的资源投入即可获得信息的高可靠传输与用户低延迟的统一安全接入。

6. 5G 智能终端

设备的智能化引领着技术的革新，未来 5G 系统终端将以智能化的设备为主。从仪器、家电到交通工具、公共设施，智能化的产品将遍布周边。这些设备不仅能够进行信息的收集、处理，更重要的是其自身具有通信的需求，能够自发地进行信息的反馈和交互，充当通信主体的角色。

与现有的通信接入网架构不同，5G 将采用以用户为中心的接入网架构，这将赋予终端侧更强大、更丰富的通信能力，以满足 5G 智能终端设备的各项通信需求。5G 智能终端设备将支持人人交互、人机交互、机机交互多种信息交互方式，以实现个人通信、健康监测、自动驾驶、远程医疗、远程教育、智能家居、灾难预警与救助、交通安全等各种应用场景下的不同需求。由于涵盖了宽泛的应用场景，5G 智能终端设备不再具有单一的形式，为此需要对终端进行分类。本章采用的分类标准是终端形态，这是因为相近的终端形态通常具有相似的通信需求，也能够满足 ITU 定义某个应用场景。

本章把 5G 智能终端设备分为以下四类：

- 个人信息中心：作为现有手机、平板、个人电脑在 5G 应用中的延伸，个人信息中心侧重的是信息的处理、交互以及对连接设备的管理等作用，对应了增强型移动宽带（eMBB）的应用场景。
- 可穿戴设备：作为个人信息中心的拓展，承担了信息的收集、显示等功能，也对应了增强型移动宽带的应用场景。

- 智能机器设备：是实现车联网、过程自动化、工厂自动化、医疗自动化等先进控制、制造流程的必要组成部分，对应了高可靠低时延通信（uMTC）的应用场景。
- 微型传感器：是物联网的必要组成部分，对应了大规模机器通信（mMTC）的应用场景。

本章后续部分首先总体地介绍 5G 智能终端通信需求，其后介绍不同类型终端应对 ITU 提出性能要求所应该具备的通信能力。

6.1 智能终端通信需求

与 LTE 不同，5G 应用将区分场景，ITU 在场景的划分上提出了三大应用场景，分别为增强的移动宽带（Enhanced Mobile Broadband）、海量的机器间通信（Massive Machine Type Communication）和超高可靠和超低时延通信（Ultra-reliable and Low Latency Communication）。在不同应用场景下，5G 终端的通信需求也不尽相同：如增强的移动宽带场景下，5G 终端主要应支持峰值速率、高用户体验速率、高能效和频谱效率以及高速移动性等；海量的机器通信场景下，主要应支持高连接数接入以及高能效等；超高可靠和超低时延场景下，主要应支持端到端时延以及高速移动性等。ITU 定义了 5G 相应的关键技术指标（KPI），即峰值速率、用户体验速率、频谱效率、移动性、时延、连接数密度、网络能效、流量密度。具体地要求峰值速率达到 10Gbps，用户体验速率在 100Mbps 到 1Gbps 之间，频谱效率为 4G 的 3 倍，移动性支持 500km/h 的高速移动，端到端延时最低 1ms，连接数密度达到 $10^6/\text{km}^2$ ，网络能效比 4G 提高 100 倍，流量密度达到 $10\text{Mbps}/\text{m}^2$ 。

为了实现这些 KPI，需要应用相应的关键技术；这些技术将部署于网络端、基站端和与用户关系最密切的终端端。例如最直观地，在 5G 技术框架下，接入网将可能涵盖 GSM、3G、4G、5G 等广域网，整合 WLAN、ZigBee、Bluetooth 等局域网以及定位、导航网络。5G 智能终端将实现全连接方案，即可同时接入不同的通信网络，并且具备融合不同网络数据流的能力。此外，5G 终端也将支持一些近场通信技术，例如 RFID、NFC 等。

6.2 智能终端通信能力

按照终端形态，将其分为如下四类：个人信息中心、可穿戴设备、智能机器设备和微型传感器，如图 6.1 所示。下面依据不同的终端形态，分别给出该类终端下的主要通信能力。



图 6.1 终端形态

6.2.1. 个人信息中心

5G 手持终端，例如 5G 手机、平板等设备，将成为个人信息业务的中心，实现多种通信网络的全连接，承载各种形式的通信交流，信息交换，因此 5G 手持终端将被赋予更多的功能，提供更好的用户体验，如更强大的硬件支持、更优化的操作系统、更丰富的显示技术、以及更灵活的操作等特点。为此，作为个人信息中心的新型终端，应当实现以下通信能力：

- 多连接：5G 终端需支持同时与多个基站建立连接，多连接包括 C/U 分离下的多连接，也包括双连接、波束聚合等。从频率上讲，包括异频多连接，同频多连接。
- 离散频谱资源：未来为追求可以接近光纤的极速体验，将会使用更多的频率资源。新挖掘的频谱资源分布在多个离散频段，且带宽也差异较大。再考虑终端后向兼容老标准，终端需要支持多个离散频段。
- 更强大的可重配置能力：5G 智能终端因为有更多的需求（灵活频谱、多连接、软件定义空口等），其基带和射频部分都将具备更灵活的配置方法。在基带技术方面，将支持多种模式的同时连接，同时根据用户需求调整基带带宽；而在射频技术上面，频带不再固定，而是可以从合适的频带上灵活选择。对射频架构的优化需要考虑选择单个宽带系统或多个窄带系统，综合考虑滤波器、功放、混频器、AD/DA 等一系列终端射频芯片技术的发展。

6.2.2. 可穿戴设备

与手持终端相比，可穿戴设备具有感知和监测两大特点，它作为个人信息中心的延展，将与手持终端一起实现更多的用户需求。通过可穿戴设备，可以实现用户健康监测、特殊人士监护、用户的运动情况记录，并根据设置完成实时反馈与报警。另外，可穿戴设备还可为用户提供虚拟现实和增强现实功能，前者可以增加游戏代入感和体验，后者则可以方便用户生活方方面面，如图 6.2 所示。



图 6.2 可穿戴设备

作为可穿戴设备，应该具备以下通信能力：

- 近距离低功耗通信：可穿戴设备与个人信息中心之间的链路通常为近场通信，维持较低的发射功率和支持 DTX/DRX 以降低功耗，从而延长待机时间。此外，同一个人的多台设备以及不同人的设备之间应当采用新型的多址方式以降低减少干扰。
- 高速云存取：虚拟现实和增强现实需要复杂的场景渲染，对于轻便的设备而言，巨大的计算量往往难以胜任，因此需要通过云后台进行计算，而设备只是完成实时存取的操作。这样的云存取操作需要维持稳定的高速通信，以保证图像、视频的清晰度和流畅度，实现的方式则可以与 6.2.1 节中的个人信息中心类似。

- 预警信息通知：可穿戴设备一方面作为人体健康监测器，如图 6.3 所示，应该具备快速监测应急信息的能力，通过广播方式将相应的预警信息发布出去。另一方面作为移动中的传感器，在万物互联的场景下，也应当具有转发预警信息的中继功能。



图 6.3 人体健康监测

6.2.3. 智能机器设备

在 5G 应用框架下，更多的智能机器设备将可以通过 5G 的协议远程操控，比传统的局域网控制具有更大的范围和更稳定的可靠性，具体的应用范例有

- 无人机：在 5G 覆盖场景下，无人机可以轻松突破单个基站限制，实现大范围内的飞行。
- 机械臂：在工业生产和应急救援等环境下，可能接触到极端温度、极端压力等恶劣条件，在 5G 低时延高可靠场景下，可以通过遥控手臂完成固定位置的作业。
- 自动驾驶汽车：通过车联网，实现自动驾驶、车车/车路通信以及车辆与行人交互，从而实现道路资源的最大化，并降低事故发生概率。
- 机器人：分为工业机器人，民用机器人两大类。要求机器人终端具有对信息的超快捕捉、处理请求和转发的能力，同时还应该具备相应的学习能力。

智能机械的控制，对可靠性和精度要求较高，除具备 6.2.1 所述通信能力，还应当具备以下通信能力：

- 高可靠连接：无缝切换，连通率保证 99.999%（METIS）。传输方面，需要满足“超过最大传输次数丢包率”和“超过时延门限丢包率”的需求，具体的指标需要结合实际应用细化。
- 低时延连接：车联网要求达到 10ms 端到端延时，工业控制下需要支持接近 1ms 延时。在实际传输中，考量时延的性能指标通常为“95%数据包到达延迟”和“99%数据包到达延迟”等，具体的指标还需要结合实际应用细化。

- 分布式自组织网络：在车联网等应用场景下，由于终端位置和拓扑结构是不断变化的，终端之间的快速自组网能力很关键。通过自组织网络，可以尽可能的拓展覆盖范围，在重大灾难营救现场等通信设施遭遇破坏的场景下实现通信的保障。

6.2.4. 微型传感器

传感器是物联网的重要组成部分。在 5G 的发展下，微型传感器将遍布世界，从探测温度、湿度、电磁、有毒气体、地震波、核辐射等自然环境，到监测脉搏、血液、生物电流、脑电波等人体生理指标，如图 6.4 所示。

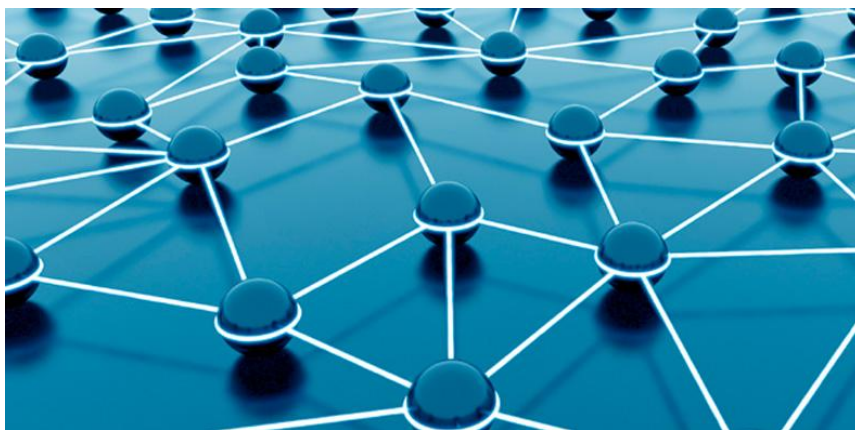


图 6.4 微型传感器

对于微型传感器，应当支持以下通信能力：

- 自组织网络：由于微型传感器通常数目庞大，通常采用随机撒点的形式布网，传感器之间应当具有自组织网的能力，这里的自发性主要强调的是网络能够自行配置空口方案、路由表自行优化以及针对网络故障的自行愈合。
- 低功耗传输：微型传感器通常是一次性投掷，所以应当降低功耗以延长使用时间。传统的 DTX/DRX、智能待机、智能唤醒等技术可被用于降低终端运行功耗。
- 预警广播：由于分布较广，传感器网络能够在第一时间探测到地震、海啸、辐射等重大灾害，因此应当具备迅速广播灾难预警信号的能力，通过传感器网络传递给通信骨干网，从而实现大范围区域内的预警。

7. 总结

随着 4G LTE 的广泛商用化，5G 研究已经逐渐成为无线通信领域一个重要的研究热点。5G 网络被认为可以满足 2020 年后无线通信中的多种极具挑战性的需求，如：超高速率、超低时延、高移动性、高能量效率、高流量密度等等。传统的无线网络设计方案为此需要进行深层次的重新审视，并在相应方向进行创新性的改进。该白皮书提供了 FuTURE FORUM 5G SIG 近期在网络架构、空口、测试与测量、5G 安全等方面的相关成果和观点，包括：

- 提出以用户为中心的 5G 网络架构，其特点是：控制层与用户层分离、网络功能虚拟化、灵活的网络编排、网络开放、多 RAT 融合、本地缓存/处理/分发和灵活组网。
- 提出无线接入网框架，其特点是：RAN 重构，边缘提升，CN-RAN 再划分，以及网络切片即服务。
- 提出 SDAI 框架，其特点是：统一的自适应帧结构、灵活双工、灵活多址、灵活波形和灵活频谱应用。
- 提出面向 2020+ 的路线图及频谱策略。
- 针对未来 5G 智能终端的需求及能力进行了研究。
- 提供了 7 个专题白皮书，分别是大规模 MIMO、UDN、双工技术、多址技术、高频段通信技术、测试测量技术和物理层安全技术。

5G 标准活动才刚刚开始，目前尚存在多样化的建议时间表、工作范围、关键技术、频谱策略。面对极其多样化的服务和应用需求，以及在各种场景中的更好的用户体验，5G 网络设计可能依据本白皮书提出的 UCN 和 SDAI 和网络架构的设计框架进行，以实现简化、高效、灵活、开放的网络运营目标。该白皮书和其余七个专题白皮书很可能作为 5G 设计参考并潜在的促进 5G 标准化工作。FuTURE FORUM 将与全球合作伙伴共同努力，直到成功实现 5G。

微信扫描下方二维码，免费加入【5G 俱乐部】，还赠送整套：5G 前沿、NB-IoT、4G+ (VoLTE) 资料。



参考文献

- [1] Chih-Lin I, Corbett Rowell, S. F. Han, et al., “Towards Green & Soft: A 5G Perspective,” IEEE Communalization Magazine, vol. 52, no.2, pp. 66-73, 2014.
- [2] White Paper, “5G: Rethink Mobile Communications for 2020+”, FuTURE Forum 5G SIG, 2014.
- [3] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019
- [4] New Recommendation ITU-R M. [IMT.Vision].
- [5] Chih-Lin I, Yannan Yuan, Jinri Huang, Shijia Ma, Chunfeng Cui, Ran Duan, “Rethink fronthaul for soft RAN,” IEEE Communications Magazine, vol 53, no. 9, pp. 82-88, 2015.
- [6] Chih-Lin I, Jinri Huang, Yannan Yuan, Shijia Ma and Ran Duan, “NGFI, the xHaul”, to be appeared in IEEE GLOBECOM 2015.
- [7] Q. Sun, Chin-Lin I, S. Han, Z. Pan, “A Framework Towards SDAI”, IEEE MMTC e-letter, vol.10, no.1, pp.22-25, Jan 2015
- [8] S. Han, Chih-Lin I, “Large scale antenna system with hybrid analog and digital beamforming for 5G”, IEEE Communications Magazine, vol. 105, no. 1, Jan. 2015.
- [9] M. Dohler, R.W. Heath, A. Lozano, et, al., “Is the PHY layer dead” IEEE Communications Magazine, vol. 101, no. 4, pp. 159-161, Apr, 2011.

缩略语

4G	the Fourth-Generation mobile communications
5G	the Fifth-Generation mobile communications
BS	Base Station
CN	Core Network
C-RAN	Centralized, Cooperative, Cloud and Clean RAN
C/U	Control/User plane
D2D	Device-to-Device
E2E	End-to-End
EE	Energy Efficiency
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
FBMC	Filter Bank Multicarrier

FD	Full Duplex
FDD	Frequency Division Duplexing
FQAM	Frequency and Quadrature-Amplitude Modulation
HetNet	Heterogeneous Network
HTTP	HyperText Transfer Protocol
ICT	Information and Communication Technology
IoT	Internet of Things
IoV	Internet of Vehicles
ITU	International Telecommunications Union
KPI	Key Performance Indicator
LTE	Long-Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Multiple Access
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
mmWave	millimeter Wave
MNO	Mobile Network Operator
MTC	Machine-Type Communication
mMTC	Massive MTC
MUSA	Multi User Shared Access
NFV	Network Functions Virtualization
NGMN	The Next Generation Mobile Networks Alliance
NGFI	Next Generation Front-haul Interface
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
O & M	Operation & Maintenance
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OTT	Over The Top
PDMA	Pattern Division Multiple Access
QoE/QoS	Quality of Experience/Quality of Service
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RF	Radio Frequency
RIT	Radio Interface Technology
SCMA	Sparse Code Multiple Access
SDAI	Software Defined Air Interface
SDN	Software Defined Networking
TDD	Time Division Duplexing
UCN	User Centric Network
UDN	Ultra Dense Network
UE	User Equipment
uMTC	Ultra-reliable low latency MTC
URL	Uniform Resource Locator
VM	Virtual Machine
WRC	World Radio communication Conference

致谢

诚挚的感谢如下人员对本白皮书做出的贡献：

总编辑：易芝玲（中国移动）

贡献单位与人员：

上海贝尔：许铭，张晓文

大唐：秦飞，康绍莉，刘佳敏，苏昕

中国移动：崔春风，陈亚迷，潘成康，韩双锋，孙奇，王化磊，王森，徐志昆，
徐国珍，袁雁南，李刚，倪吉庆，陈炜，左敏，庄晓君

中国电信：朱剑驰，余小明

重庆邮电大学：王光宇、邵凯、景小荣

爱立信：王卫，张战，缪庆育

富士通：汪巍崑，王昕

华为：周利萍

英特尔：张旭, 俞一帆, 杨峰

是德科技：孔宏伟, 张海涛, 封翔, 杨建兵

国家数字交换系统工程技术研究中心：金梁, 黄开枝, 钟州

诺基亚：滕勇, 关皓

高通：曹一卿、王能、高路、李俨

罗德与斯瓦茨：汤日波

三星：孙程君, 喻斌, 李迎阳

展讯：曲鑫, 潘振岗

清华大学：王京, 栗欣, 曾捷

电子科技大学：但黎琳, 武刚, 肖悦

上海无线通信研究中心：王江

西安电子科技大学：曹进, 付玉龙, 李兴华, 任智源, 张耀元

中孚：赵华伟, 张平

中兴：孟溪 王欣晖, 黄兵

审稿人：易芝玲、潘成康, 徐国珍（中国移动）