

MEDIATEK

6G

# 愿景白皮书

发布日期： 2022-01-07

Copyright 2022 © MediaTek, Inc. All rights reserved.  
Unauthorized reproduction or disclosure of this document, in whole or in part, is strictly prohibited.

## 目录

图表目录	3
1 前言	6
2 时间表 - 2030 及未来	7
3 发展趋势和实用技术原则	8
3.1 趋势综述	8
3.2 S.O.C. - 实用技术原则	9
3.2.1 繁简得宜 - 6G 极致体验赋能器	9
3.2.2 臻善致美	10
3.2.3 融合畅达	10
4 无线接入融合	11
5 分布式网络架构	13
6 面向真正小区边缘无感的 MIMO 演进	15
6.1 超大规模 MIMO 演进到更高载波频率	15
6.2 分布式异构 MIMO 架构	15
6.2.1 去小区的设计方法	15
6.2.2 设备作为混合节点	16
6.3 主要的性能指标	16
7 面向极致和可预测的 QoS - 精简的用户平面协议栈	17
7.1 实现极致吞吐量的实时沉浸式服务	17
7.2 新方法：拥塞管理/恢复，而非按序交付	17
7.3 用于动态无线电层/应用层相互感知的跨层 API	18
7.4 精简的用户平面协议栈	19
8 系统能源足迹和能耗效率	20
8.1 极致能效的终端	20
8.2 网络节电	21
8.3 基本的 KPI：极致性能的能耗效率	21
9 地面与非地面融合	23
9.1 TN/NTN 浑然天成	23
9.2 TN/NTN 频谱复用	24
9.3 单一且价格合理的 TN/NTN 设备	24
10 内生人工智能集成系统-通信和计算的融合	25
11 频谱 - 增加频谱资源，优化频谱利用	27

11.1	7-24GHz	27
11.2	Sub-THz	27
11.3	灵活双工的智能频谱接入	28
11.4	最佳的频谱共享	28
12	跨云、网络 and 设备的端到端安全架构	29
13	总结	31

## 图表目录

图 1. 6G 时间表	7
图 2. 6G 相对于前几代蜂窝系统的观察趋势	8
图 3. 混合节点	11
图 4. 灵活的数据消费模型	13
图 5. 应用驱动网络架构的关键功能	14
图 6. 6G 异构 MIMO 拓扑示例 (集中式 RAN)	16
图 7. 5G 通信协议栈上的重传延迟	18
图 8. 跨层 API 的概念	19
图 9. 设备 Big-Little Modem 设计概念	21
图 10. 设备辅助唤醒的动态网络节点开/关	21
图 11. TN/NTN 的集成和融合	24
图 12. TN/NTN 的频谱复用	25
图 13. 6G 时代 AI 集成的机遇	26
表 1. S.O.C. 设计原则: 繁简得宜、臻善致美和融合畅达	9
表 2. 繁简得宜的说明性示例	9
表 3. 臻善致美的说明性示例	10
表 4. 融合畅达的说明性示例	10
表 5. 6G 中 MIMO 设计的关键性能指标	16
表 6. 影响 6G 极致用户体验的主要因素	18
表 7. 无线层和应用层之间关键的互感因素	18
表 8. 精简协议栈的性能标准	19
表 9. 终端节电方案	20
表 10. 网络能耗的潜在研究方向	21
表 11. 能耗领域的挑战	22
表 12. 地面和卫星通信融合的挑战和研究方向	23
表 13. Sub-THz 频谱资源	27

术语	注解
Sub-GHz	Frequency bands below 1GHz 本文用以表示 1GHz 以下频段
Sub-THz	There is no completely accurate term currently agreed by the research community for the meaning of this term. For the purposes of this document it refers to frequency ranges between 100GHz and 300GHz 业界当前暂无该术语的规范性解释，本文用以表示 100GHz - 300GHz 频段

英文缩略语	英文全称	中文注解
AI	Artificial intelligence	人工智能
API	Application programming interface	应用编程接口
AR	Augmented reality	增强现实
BBU	Baseband unit	基带处理单元
CP-OFD	Cyclic prefix OFDM	循环前缀- OFDM
C-RAN	Centralized radio access network	中心化无线接入网
DFT-s-OFDM	Direct Fourier transform spread OFDM	离散傅里叶变换-拓展- OFDM
eMBB	Enhanced mobile broadband	增强型移动宽带
FDD	Frequency division duplex	频分双工
FR	Frequency	频段
GEO	Geosynchronous equatorial orbit	高轨道
HARK	Hybrid automatic repeat request	混合自动重传请求
IETF	The Internet engineering task	国际互联网工程任务组
IP	Internet protocol	网络协议
KPI	Key performance indicator	关键性能指标
LEO	Low earth orbit	低轨
LOS	Line-of-sight	视距
MAC	Medium access control	媒体接入控制
MIMO	Multiple input multiple outputs	多入多出
ML	Machine learning	机器学习
mMTC	massive MTC	大规模机器类型通信
NTN	Non-terrestrial network	非地面网络
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing	正交频分复用
O-RAN	Open RAN	开放 RAN
PDCP	Packet data convergence protocol	分组数据汇聚协议
PDU	Protocol data unit	协议数据单元
QoE	Quality of experience	体验质量
QoS	Quality of service	服务质量

RAN	Radio access network	无线接入网络
RIC	RAN intelligent controller	RAN 智能控制器
RLC	Radio link control	无线链路控制
RRH	Remote radio head	远端射频头
SESSy	Sustainable environmental sensing systems	可持续环境感知系统
TCP	Transmission control protocol	传输控制协议
TDD	Time-division duplex	时分双工
TN	Terrestrial network	地面网络
URLLC	Ultra-reliable and low-latency communications	超可靠低时延通信
V2X	Vehicle-to-everything	车联网
XR	eXtended reality	拓展现实

# 1 前言

随着 5G 技术的不断发展和成熟，5G 的使用率也在全球范围内不断攀升。从 3GPP（第三代移动通信伙伴项目）Rel-18 开始，将进入 B5G（Beyond 5G）的演进周期。因此，当前正值为下一代移动通信系统（6G）奠定全球标准的适宜时机。联发科在 5G 的设计、标准化及其演进中发挥了重要的领导作用，并率先向市场推出了成熟的 5G 设备，能够在开创性的新型 5G 系统（包括 5G 无线网和核心网）中使用。作为世界领先的智能手机芯片供应商和公认的 5G 商用产品领导者<sup>1</sup>，联发科始终在制定新一代技术标准以及推动技术实现方面处于领先地位。

5G 是围绕三大核心应用场景进行设计和发展的，即增强型移动宽带（eMBB）、超可靠低延迟通信（URLLC）和海量机器类通信（mMTC）。5G 的建立不仅是为了迎接 4G 在消费者领域激发的移动宽带革命，也是为了在这个市场之外创造新的增长机会。借助于 4G 向蜂窝物联网市场的发展，5G 进一步实现了重大飞跃，这一次，其瞄准的是具有严格要求的工业物联网。5G 将移动通信的变革力量渗入到社会的各行各业。这是有史以来第一次，通过单一通信系统的设计，不仅能够满足在 sub-6 GHz 与毫米波频段范围内的授权与非授权频谱上实现各式各样的消费级和专业级应用；而且还可以通过与地面网络无缝集成的机载和卫星基础设施，在传统地面网络的覆盖之外提供连接。然而，这种规模宏大的设计如今给网络和设备带来巨大的复杂度，导致更高的部署成本和功耗。因此，5G 的推出是渐进式的，主要集中在 sub-6 GHz 的 eMBB 消费级应用上。从网络经济的角度来看，实现高频毫米波网络的无缝覆盖一直是极具挑战性的。令人振奋的是，我们看到开放 RAN 架构的崛起，它与 5G 部署结合后将带来更多的灵活性和智能化，但是基本的网络设计仍基于传统的移动网络和分层架构。这些显著的改进将推动网络架构进一步迈向人工智能和机器学习的新时代。

一方面，当前的通信产业将继续发展 5G 技术，以应对上述挑战。而另一方面，未来的 6G 技术不仅可以解决这些问题，还能够为移动网络带来根本性的变革。我们的 6G 愿景是一个全球统一的标准化技术，其性能从一开始就要显著优于 5G 及其演进版本。6G 将使用内在的自适应无线电和网络技术实现极端的性能要求，并以一种完全安全且可持续的方式为消费级和专业级市场的各种数据消费模式提供支持。6G 架构将通过一种异构网络架构实现更好的网络经济性和能源效率，而这种架构天然地模糊了专用网络设施和设备之间的界限。6G 的目标是实现无处不在的毫米波覆盖，并进一步利用更高的频谱（~THz），这就需要更加紧凑的网络密集部署来实现网络覆盖，因此对网络部署成本的控制就变得至关重要。这样的背景下，我们预计 6G 设备不仅仅是以无线通信系统终端的形式存在；它还能够作为数据通路中起主动作用的网络节点，并最终形成独立运行的网络。我们的 6G 愿景是一个自适应的、集成的、超异构的无线通信系统，以一种真正无处不在的方式提供普适的移动连接，无论是短程通信、卫星通信还是介于两者之间的任何通信。6G 系统将具有高度的可扩展性，从而用最精简的方式实现任何部署场景。人工智能和机器学习方面的革命性进步将发挥核心作用，并使 6G 愿景成为现实；我们需要新颖且实用的工具对系统进行建设、运营和管理，并根据当前的需求来自主、动态地调整系统的整体配置和运行，而无需人工干预，同时能够迭代地从中学习以提高系统性能。

这份白皮书详细从以下几个主题介绍了我们的 6G 愿景：时间表、关键驱动因素和实现因素。

<sup>1</sup> 参见 Counterpoint Handset Model-Level Chipset Tracker: Q1 2020 - Q2 2021。

## 2 时间表-2030及未来

6G 标准化和产业化将遵循 ITU-R IMT 2030 及未来的时间表，从 2030 年起开始商用，而 6G 预商用可能提前一年进行。

尽管 ITU-R 计划分别在 2022 年年中和 2023 年年中完成 IMT2030+ 趋势和愿景的研究报告，联发科预计将在 2023/2024 年左右开始 3GPP 的初步标准化工作，并于 2026/2027 年之交发布正式的规范。

图 1 展示了上述内容，也描述了预期的 3GPP 版本 (R19~R22)。

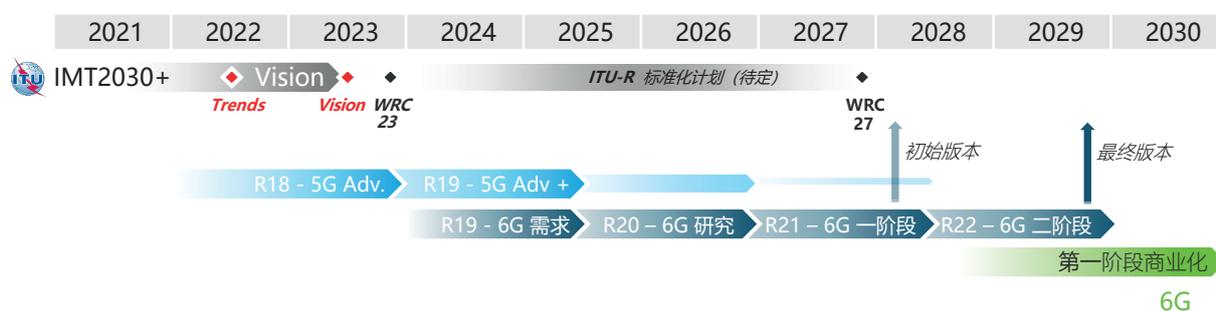


图 1. 6G 时间表

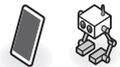
## 3 发展趋势和实用技术原则

### 3.1 趋势综述

下述列举几个启发和驱使我们对于新一代移动通信愿景畅想的关键趋势：

- 新的杀手级应用将进一步推动对系统性能的要求,如极致全息和触觉通信、数字孪生、先进的远程服务等；
- 由上述新型应用的驱动,数据速率增加 10 -100 倍的同时保证超低延迟；
- 额外增加在 7-24GHz 和 sub-THz 频段的频谱可用性,总可寻址带宽约为 50GHz。这一新的频谱为极致应用的服务提供了重要支撑,但也给克服高频段传播衰减带来了严峻挑战；
- 对密集网络尤为关注,主要有两个原因:一是为了增加低频段的容量,二是为了克服在新频段内严重的传播衰减问题。室内基站部署成本相关的挑战和其他实际问题需要不同于 5G 的方法来解决；
- 实现无处不在的全球连接,包括对目前蜂窝网络还没有覆盖的偏远地区；
- 在 5G 的最初版本发布之后,首次加入了对 5G 用例和应用程序的持续改进。这些使用案例和应用程序受益于不受约束的设计,而不用考虑早期 5G 版本原有设计的约束,同时最小化 6G 与 5G 共享资源的系统开销。

图 2 描述了 6G 相对于前几代蜂窝系统的观察趋势。

	3G 	4G 	5G 	6G 
宽带速率 设备 MIMO 数	1 – 10Mbps 1Tx / 1Rx	10Mbps – 1Gbps 1Tx / 2+Rx	100Mbps – 10Gbps 2Tx / 4+Rx	1Gbps – 1Tbps 4Tx / 8+Rx
频谱范围	FDD + new TDD (e.g. 2.3GHz) ~100MHz more	+more TDD (2.5GHz) + 非授权频段 (5GHz) ~600+ MHz more	+3.5-7GHz + 毫米波频段 ~3+ GHz more	+7-24GHz +sub-THz ~50+GHz more
网络加密 <sup>1</sup>	Nominal	+	+ device	++ device
主流应用	移动互联网 (e-mail, 网页浏览)	移动视频 社会化媒体 (+ 低功耗广域物联网)	超高清视频 云游戏, 拓展现实 其他垂直行业	N-D 全息通信 人工智能高效系统

注释1: 随着频谱越来越高,“基础设施”和“设备”之间的界限越来越模糊。

图 2. 6G 相对于前几代蜂窝系统的观察趋势

## 3.2 S.O.C. - 实用技术原则

前一节描述的 6G 趋势主要依赖于三个基本设计原则的结合: 繁简得宜、臻善致美和融合畅达, 如表 1 所示, 在下面的小节中做进一步阐述。

表 1. S.O.C. 设计原则: 繁简得宜、臻善致美和融合畅达

繁简得宜	臻善致美	融合畅达
可持续发展	实际用户体验驱动的系统优化	跨域融合以提高成本效益和系统性能
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 利用必要的复杂性以提高性能</li> <li>• 简化传统设计以提高性能</li> <li>• 不以牺牲能耗为代价</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 关注未来对最终用户体验具有重要意义的关键维度和应用</li> <li>• 对空口, 频谱利用和网络架构进行优化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 无线接入: 跨授权频段、非授权频段以及共享频段, 具有前传和回传的融合接入</li> <li>• 网络节点设备化, 即混合节点</li> <li>• 地面与非地面例如卫星接入的融合</li> <li>• 通信与计算融合</li> <li>• 通信与感知的融合</li> </ul>

### 3.2.1 繁简得宜-6G极致体验赋能器

繁简得宜是增加的复杂性和简易性的结合, 使其刚柔并济。

- 复杂性的增加是实现诸如数据速率等系统性能飞跃的必要条件, 这对于新的 6G 应用来说也是非常必要的;
- 简单性是实现 6G 目标的必要条件, 同时要显著降低每比特传输的复杂性, 以便将总体的复杂度控制在现实可行的范围内。虽然降低复杂性仍然是系统设计的重要目标, 但 6G 标准需要谨慎处之, 以确保设备和基站不受过度限制。不必要的限制可能会使系统实现无法获得最优的能耗 / 成本效率, 以至于可持续发展目标的实现变得遥不可及。对于标准定义的所有领域 (如射频、数字、模拟、云) 以及所有协议层, 谨慎处之是非常必要的。表 2 中描述了一些说明性示例。

表 2. 繁简得宜的说明性示例

实现高性能无线接口和技术必要的复杂性	高性能的本地精简设计
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 通过更宽的带宽 (<math>\geq 1\text{GHz}</math>) 来扩展数据容量</li> <li>• 工作在新的频段:               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 中高频段: 7-24GHz</li> <li>✓ 高频段: Sub-THz</li> </ul> </li> <li>• 更高阶的 MIMO: 网络和设备               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 网络侧: 高密度天线</li> <li>✓ 设备: 8x8 及以上</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 降低空口控制, 信令, 参考信号及包头开销:               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 频谱效率</li> </ul> </li> <li>• 精简协议栈设计: 更少的协议层和开销, 简化的处理流程               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 实现极致 QoS (延迟和数据速率) 的要求</li> </ul> </li> <li>• 高功率效率               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 每 bit 低能耗</li> </ul> </li> </ul>

### 3.2.2 臻善致美

6G 的不断优化是势在必行的，然而，无论用户是对 6G 的提供商还是消费者而言，最为重要的基于由实际的用户体验主导的优化。下面将围绕支撑优化设计的三个基石来进行阐述，即：

- 优化该网络架构使其支持任何实际的网络部署和拓扑场景，其中最核心的是异构无线网络架构；
- 得益于人工智能和机器学习领域的革命性进步，优化该系统使其从接入网到核心网可以在没有人共干预的情况下自主进行操作和编排；
- 通过特定的应用跨层设计，优化系统以达到最有效地实现最优的端到端应用性能。

表 3 中描述了一些说明性示例。

表 3. 臻善致美的说明性示例

异构无线网络架构	系统融合的人工智能和机器学习	针对应用的跨层设计
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 中心化，去中心化，端到端</li> <li>• 无缝极致 QoS 的用户体验               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 超大规模 MIMO</li> <li>✓ 分布式 MIMO – 无小区边界</li> </ul> </li> <li>• 设备间协作及 mesh 网络               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 本地 sidelink 和 mesh 网络</li> </ul> </li> <li>• 解决毫米波和亚太赫兹频率的阴影衰落</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AI 辅助的无线接入</li> <li>• AI 增强的网络运营</li> <li>• 通过机器学习不断迭代提高性能</li> <li>• 跨网络和设备</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 对 AI 应用的最优支持               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 高效的数据传递和模型更新通路</li> </ul> </li> <li>• 对超沉浸式和超低延迟应用的最优支持</li> <li>• 能耗感知的 QoS 交付</li> </ul>

### 3.2.3 融合畅达

跨域融合将在拓展 6G 体验空间的同时，实现系统性能、覆盖范围和成本效率带来额外的增益，预计在不同域将有更多机会，如无线接入（统一前端 / 回传接入、授权频段 / 非授权频段融合）、天地空一体接入、通算结合、通感一体，以及最根本的，设备和网络节点之间的融合。在表 4 中可以找到其他详细信息。

表 4. 融合畅达的说明性示例

无线接入	地面和非地面	通信和计算
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 真正的无线移动网络               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 集成接入，前传和回传</li> </ul> </li> <li>• 授权频段，非授权频段和共享频段的融合               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 精简协议栈，以降低系统开销</li> <li>✓ 灵活射频和快速接入</li> </ul> </li> <li>• 通信和感知               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 用于通信和感知的无线资源可以是共享或独立的</li> </ul> </li> <li>• 网络节点设备化               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 通过混合节点紧凑网络的密集部署</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 集成地面和非地面网络的接入及服务</li> <li>• 地面和非地面工作在同一个设备上</li> <li>• 地面和非地面网络的频谱复用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 统一的网络系统机构               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 实现移动设备和边缘计算之间的资源共享</li> </ul> </li> <li>• 跨云、网络和设备的集成安全</li> <li>• 解决 3GPP 和 IETF 之间的重叠问题，以实现沉浸式应用</li> </ul>

## 4 无线接入融合

我们的 6G 愿景通过使用地面、空中或卫星无线电接入技术，几乎可以支持任何部署场景，无论何时何地都可以提供连接的通用技术设计平台的普适系统。我们设想的系统能够以智能和灵活的方式（见 §11），在满足相应的区域频谱法规下，利用潜在的频谱资源（从 sub-GHz 到 sub-THz）为任何给定的通信需求提供最有效的无线接入。这样的设想对工程实现，尤其是在空口方面，提出了巨大的挑战。由于无线电接口（例如 Uu 和 sidelink）的不同，不同的频谱所有权、频谱区域制度和部署方案，从而导致的无线接入碎片化是不提倡的方式。相反，我们建议通过无线接入融合来实现统一的无线接入技术。这种融合不仅可以实现规模经济，还将促使价格合理、可靠性高的替代产品方案的产生，例如点对点链路、有线或光纤通信链路，从而促进网络的快速部署。

在高频段（~ 毫米波及以上）建立网络覆盖和容量将需要更密集的的无线电节点部署，以克服这些频段带来的更显著的阴影衰落，这也说明它们不适合非视线传输。只有提供覆盖范围的无线节点本身在经济上可行，密集的无线节点部署才具有经济可行性，即，易于安装、维护和更换，不需要或很少需要建筑物部署成本。换句话说，如果这些无线节点不仅与设备具有非常高的协同作用，而且还可以是易于使用的设备，那么高频广覆盖就能成为可能。这些无线节点是设备与网络节点融合的产物，称之为“混合节点”，如图 3 所示。混合节点可以与任何其他混合节点、设备或基站通信。混合节点还可以调整它们的中继能力，例如，对它们进行配置以权衡延迟和吞吐量的性能。异构网络结构可以包含模拟（如放大前传中继器）和数字（如译码前传中继器）的混合节点，并能根据业务需求对通过系统的业务进行智能路由。混合节点将改变 6G 时代无线覆盖、网络规划和运营的方式，它们将在有效解决高频段频谱资源的短距离通信方面发挥重要的作用。

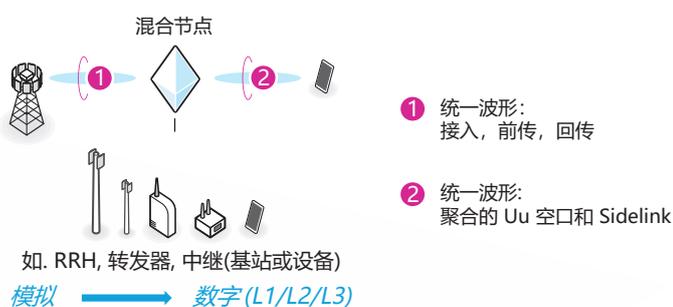


图 3. 混合节点

无线接入融合的核心和混合节点的主要实现因素是统一波形原则，必须从一开始就按照上述原则设计：

- 满足接入、前传网络和回程网络的要求（至少在吞吐量、通信范围和可靠性方面）；
- 通过融合设计，实现 Uu 接口网络到设备端的无线通信，以及 sidelink 设备端到设备端直接的无线通信。

当然，对于上述对统一波形的定义，要考虑到从 sub-GHz 到 sub-THz 的不同特性<sup>2</sup> 也是极为重要的。虽然将使用不同的参数集 Numerology（例如循环前缀、子载波间距）的波形进行统一设计具有天然地可扩展性，但根据这些波形的特点，可能需要不同的互补波形来适应从 sub-GHz 到 sub-THz 的全频谱范围。例如，虽然在 4G LTE 和 5G NR 中使用了循环前缀 - 正交频分复用（CP-OFDM）和离散傅里叶变换 - 拓展 - 正交频分复用（DFT-s-OFDM）两种 OFDM 波形，但它们的峰均比较大，对频率偏移高度敏感，对于亚太赫兹，这些问题尤为重要。因此，应该研究其他候选波形，如单载波波形。当然，也有必要研究适当的调制方案，用来作为上述方案的补充，如考虑极端数据速率条件下的解调复杂度，（连续）调制符号之间的快速相位变化等方面。最后，应该规范通用的协议层架构，以进一步消除服务和传输之间的依赖关系（见 §7）。

遵循上述原则，无线接入融合技术将使 6G 从运营初期就能够扩展到不同的部署和使用场景，同时减少实现这一目标所需的工作量。

<sup>2</sup> 信道特性（例如传播损耗、多普勒频移）、设备特性（例如相位噪声、功率放大器功效、功率放大器非线性特性）、系统特性（例如信号带宽、波束赋形）。

## 5 分布式网络架构

从传统的网络架构上看，蜂窝系统一直是集中的，用户设备作为一个客户端，位于运营商控制的网络边缘，而这个网络是由核心网提供服务的。考虑到在专用网络内，或不涉及网络节点直接在设备端之间提供服务（例如，V2X），使网络靠近消费者节点以最小化延迟或拥堵的风险，基于网络中的多个点提供服务的去中心化服务成为一种趋势。这些变化需要灵活的数据消费模型，在该模型中，系统要提供从服务源节点到服务目标节点最佳的数据路径。这可能涉及使用设备之间的各种接入技术，包含各种网络节点之间的路径，具体如下图所示。

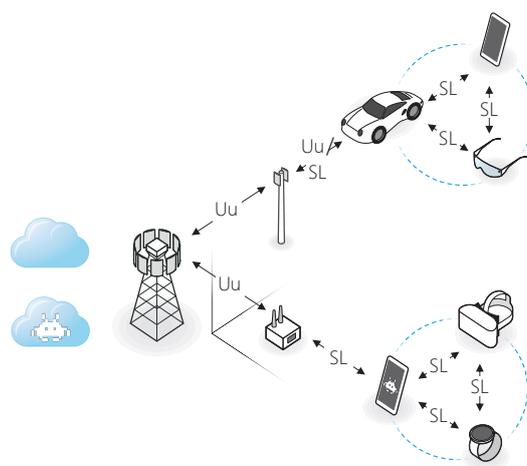


图 4. 灵活的数据消费模型

我们的 6G 网络架构愿景源于这个灵活的数据消费模型，它是为各种应用量身定制的：支持灵活拓扑的应用驱动的分布式体系结构。这一模型将允许在计算、存储、传输和能耗方面以最优的资源使用效率处理该应用生成的数据，同时满足所有相关的 QoS 和安全需求。

4G 架构的定义主要是为了传输移动宽带数据，5G 网络架构中增加了实现更好的数据管理的手段，即允许 a) 将资源分割为数据类型和 / 或所有权的功能(网络切片, 私有网络)和 b) 通过无线接入 / 核心网融合(边缘计算)<sup>3</sup> 使应用更接近最终用户。以 5G 为基础，6G 体系结构将提供本机功能支持，以最好地服务于应用程序。这一愿景的核心是：

- 人工智能 / 机器学习 的出现，特别是针对消费者应用(如 AR 应用的环境检测、实时语音翻译)，以及对计算资源的相关需求；
- XR 消费应用的预期爆炸式增长和对更接近终端用户的服务器本地化的需求（比如，时延需求）；
- 智能手机和 AR 眼镜等近距离设备之间对低延迟、高速率数据交换的相关需求。这三个用例概括了 6G 体系架构与生俱来的关键功能：
  - ✓ 启用网络边缘和/或设备上的计算资源，包括设备和网络边缘之间潜在的计算共享；
  - ✓ 启用服务器功能在多个节点之间的划分，这些节点可能分散在网络中；
  - ✓ 启用设备到设备的操作。

<sup>3</sup>注：除去5G中本已支持的网络切片之外，其他功能为附加功能。



图 5. 应用驱动网络架构的关键功能

灵活的数据使用模型使得 6G 网络架构具有另外一个突出的特点：灵活的拓扑。自蜂窝通信出现以来，“网络”和“拓扑”的定义发生了显著的变化。随着 5G 的出现，网络类型的多样化出现了飞跃式的变化：

- 除了由运营商控制的公共地面网络外，还引入了非地面网络和私人网络；
- 通过 sidelink 技术支持设备到设备通信，并逐步采用 sidelink 中继的形式来支持设备到设备的 ad-hoc 网络；
- 无论是使用蜂窝或非蜂窝无线技术，都已经规范了通过另一个网络访问一个网络的行为如 Wi-Fi 或蓝牙。

这种多样化的环境为 6G 提供了一个融合的机会，支持通用系统架构框架下的所有部署模型，包括这些模型之间的无缝互通。

实现灵活拓扑结构的关键是支持混合节点（见 §3）和网状网络。如第 3 节所述，6G 混合节点将改变 6G 时代无线覆盖和网络规划的方式，例如，多跳传输可以使设备高效地连接到网络上。至关重要的是，无论有无网络参与协作的情况下，混合节点都将能够考虑资源使用效率、QoS 和安全要求，以及任何可变条件，如衰落、负载、混合节点和终端设备的电池使用情况等参数，从而动态确定和调整<sup>4</sup>最有效的拓扑和与其相关的数据路径，最终为终端设备提供特定服务的覆盖范围。除此之外，混合节点能够将子网络拓扑与其所属的主网络拓扑隔离开来，从而保证子网络在主网络中的安全运行。

<sup>4</sup>包含以安全的方式快速且动态地加入或退出现有拓扑的能力。

## 6 面向真正小区边缘无感的 MIMO 演进

MIMO 和多天线技术一直是提高 4G 和 5G 系统频谱效率的关键技术，波束成型作为一种关键的使能技术，其对应的频率研究范围也被扩展到 3GHz，甚至 24-71 GHz 频率范围。对于 6G，我们希望 MIMO 沿着同样的道路发展，同时也希望它能成为用于 6G 无线接入网架构设计的协作、无缝和异构方法的基石。

### 6.1 超大规模 MIMO 演进到更高载波频率

亚太赫兹频率将使得天线元件尺寸更小，MIMO 和增强波束成型将作为关键的技术，解决亚太赫兹信号特性带来的挑战。就 MIMO 阵列而言，140 GHz 下，给定尺寸的 2D MIMO 天线阵列的元件数量预计将比 28 GHz 下增加 25 倍。这样获得的更窄的波束也能够最大化提升频谱效率和覆盖范围，以便最有效的利用较大的潜在带宽—此时主要限于视距传输。此外，还需要特别关注波束管理的设计，以确保发送的波束能够追踪接收端的信道状态，实现最佳链路性能。

如果最终能够解决射频复杂度问题（在现有毫米波系统克服这些挑战之后），从而证明未来混合波束成型将更加数字化而非模拟化，将会为不同用户提供更灵活的多路数据传输能力，并进一步提高容量和频谱效率，以及低延迟的增益。

由于要支持更好的波束跟踪，从而需要移动设备内部有额外的射频链路和 MIMO 处理，随之而来的另一个挑战是要确保移动设备的功耗是在可接受的范围之内。

### 6.2 分布式异构 MIMO 架构

#### 6.2.1 去小区的设计方法

在分布式 MIMO 部署中，收发信号不是仅仅绑定在一个节点 / 站点上，而是分布在多个站点和节点上，从而能够提高区域内的频谱效率和用户体验度，具体的思考如下几点所示：

- 相干联合传输：系统能够允许不同的无线站点积极贡献单个用户的通信链路，这些信号相互不干扰，进而提高整个区域的可用用户吞吐量，从而突破传统“小区边缘”的限制；
- 减轻用户之间的干扰：规划跨无线站点的多用户操作，以尽量减轻跨站点区域的用户间的干扰。

基于上述描述，再加上更高频段波束成型增益的增加和信号方向性灵敏度的提高，这将推动 6G 无线接入网架构向 MIMO 处理 / 调度功能的集中化方向发展。在设备通过某个区域或用户周围的条件变化时，为了允许来自不同无线节点的不同波束动态地产生信号，建议采用无缝的“去蜂窝”设计方法。

需要特别强调的是，启用这种集中式的 RAN 功能（C-RAN）对无线站点的传输网络架构提出了非常严格的要求（在同步、延迟和前传 / 中传传输带宽方面）。传输网络到无线站点的“最后一公里”

的限制是在 4G 和 5G 部署中实际采用集中式 RAN 的主要障碍。然而，随着 6G 的出现，在密集的城市和室内分布式网络场景中对更动态环境的需求将推动网络站点的简化。其中，对于那些特定的部署场景，由于站点之间的距离较短，因此上述问题几乎可以忽略不计，这为本地化中心提供了好处。对于郊区和农村的网络部署，这些实际的挑战还会持续一段时间在这些场景中，相应的替代方法（见 §4、§5 和 §9）将更适合提高区域频谱效率和用户体验。

### 6.2.2 设备作为混合节点

在前面的章节中提到了网状网络和设备作为混合节点的可能性，从而能够在降低无线站点密集化的成本同时扩大网络覆盖。在使用 MIMO 的背景下，我们希望这种混合节点能够被所有分布式 MIMO 网络部署所使用达到最大效果，在一个地理区域内最大限度提升覆盖和用户体验。

图 6 显示了这种拓扑的一个示例。

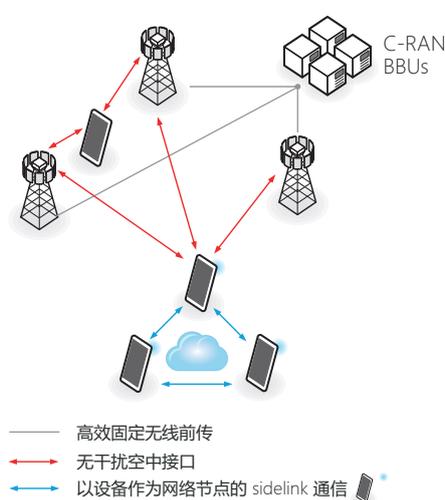


图 6. 6G 异构 MIMO 拓扑示例（集中式 RAN）

## 6.3 主要的性能指标

下表 5 中的性能指标对于 6G 网络中的 MIMO 设计至关重要。

表 5. 6G 中 MIMO 设计的关键性能指标

关键性能指标 (KPI)	重要性
MIMO 功耗	当频率扩展到亚太赫兹时，MIMO 天线阵列在设备和网络中变得越来越复杂，保持原有功率效率变得越来越有挑战性。设备电池功耗对于 6G 仍然很重要，而且网络能耗也需要不断改善，参见 §8
高性能移动性	对于毫米波和亚太赫兹，精确波束跟踪的能力，以及确保这些波束能够在最优波束节点/天线之间进行最佳配对，将是最佳用户体验的关键
区域频谱效率和容量	演进到“去小区”方法的原因是使传统小区边缘不再受性能的限制。是分布式和异构 MIMO 的关键驱动因素是提升一个区域内的所有用户最大化吞吐量性能的能力。最大化区域内所有用户的吞吐量性能是驱动分布式和异构 MIMO 的关键因素

## 7 面向极致和可预测的 QoS -精简的用户平面协议栈

### 7.1 为实时沉浸式服务实现极致吞吐量

6G 旨在为未来的应用提供实时沉浸式服务，如为用户提供全息影像和触觉体验。这些内容通常在边缘服务器中渲染，并通过高性能无线链路传递给用户设备。

新的 6G 应用需要以下不同的、具有挑战性的组合：

- 保证高数据速率超过 1Gbps；
- 保证低延迟在 0.5-5ms 范围内；
- 在不影响最终用户体验的情况下，限制对数据丢失的容忍度。

当前的协议栈设计重点是无损数据传输，这种方式不适合高度交互的沉浸式应用，对于这些应用来说，丢失的数据包和延迟的数据包在本质上没有实际区别。接收端无论如何都需要丢弃那些错过音频或视频编解码器最后期限的数据包。

### 7.2 新方法：拥塞管理/恢复，而非按序交付

5G 和前几代的蜂窝系统中的更高协议层 (RLC 层或 PDCP 层) 把无损按序交付作为规范重点，以克服约 1% 的 MAC 层 PDU 丢失率。无损按序列交付对于防止应用层 TCP/IP 协议栈触发拥塞控制尤为重要。不幸的是，TCP 拥塞控制并不适用于无线环境，一旦检测到小包数据丢失，紧接着就会触发数据速率的急剧降低。由于 RLC 层 PDU 重新传输具有较大的往返延迟，因此无损传输的成本非常高。更糟糕的是，TCP 中冗余的重传层可能会导致另一轮重传延迟。图 11 描述了 5G 通信协议栈上的重传延迟。

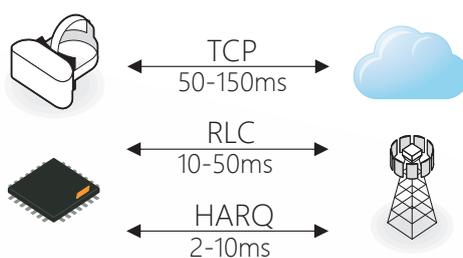


图 7.5G 通信协议栈上的重传延迟

对于高度交互式沉浸式应用程序，需要采用不同的方法来解决新的用户体验干扰因素，如表 6 所示。需要注意的是，所有这些干扰因素都是时变的，并且无法通过基于重新传输和无损按序交付的传统方法加以克服。

表 6. 影响 6G 极致用户体验的主要因素

影响性能的主要因素	主要原因
分组抖动	用户移动性和数据复用（空中和核心网络）
数据包丢失	小区边缘的传输和接收不那么健壮
数据速率波动	小区流量暂时超过小区容量。源编解码器的流量需要根据每个用户可用的数据速率快速、可靠地调整

### 7.3 用于动态无线层/应用层相互感知的跨层API

为了克服前一节中描述的体验干扰，发展无线层 / 传输层和应用层之间的动态相互感知是非常有前景的。表 7 列出了关键的相互感知因素，图 8 展示了我们对跨层 API 概念的看法。

表 7. 无线层和应用层之间关键的互感因素

互相感知的方面	影响
无线/传输层对应用流量需求的感知	应用层会通知无线层如块大小、周期性等业务模式特征的变化
无线/传输层对可接受的 QoS 的感知	应用层将可接受的 QoS（例如，可接受的丢包率、抖动或延迟预算）的变化通知无线层
应用层对无线接入 QoS 的感知	将无线层中导致 QoS 的降低或提升的环境变化通知给应用层，网络要保证特定设备和特定应用的 QoS
应用层的动态 QoS 调节	应用层对无线电条件的变化作出反应，并选择可能的最佳策略（例如，不同的编解码器质量、恢复策略等），以最大限度地提高用户 QoE 和可用 QoS
渲染功能的动态分割	根据设备/边缘处理能力和无线条件动态确定设备与边缘渲染功能的分割。这可以共同优化用户体验和网络资源利用率

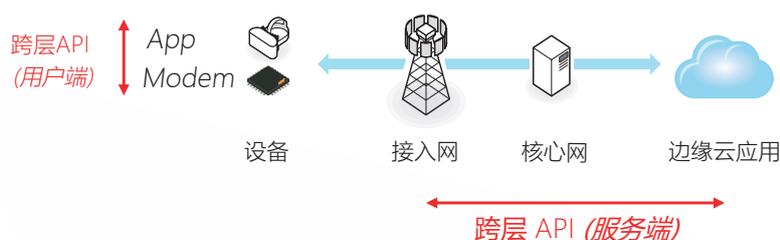


图 8. 跨层API的概念

## 7.4 精简的用户平面协议栈

我们需要对 6G 通信用户平面协议栈进行仔细地重新设计，以确保上述用户体验干扰因素得到有效解决。通信协议栈中的较低层需要能够预测可以保证的性能部分，并将此信息传递给应用层加以考虑。

不幸的是，上一节中描述的这些相互意识原则是必要的，但还不够。当将高数据速率和低延迟需求耦合在一起，同时需要确保 6G 通信的安全性和私密性时，6G 通信协议栈的处理能力、内存使用和能量占用会显著增加。因此，在不增加数据传输的相关成本和能耗的同时，仔细设计精简的协议栈以满足 6G 用例的需求变得尤为重要。

虽然半导体技术的进步将缓解部分压力，但这些新型沉浸式服务的通信和存储需求将远远超过技术发展和集成的步伐。我们需要引入 5G 协议栈中的原有功能，并继续保留以向后兼容原有的服务。同时，在用户平面协议栈尽可能精简的情况下，有必要采用一种新的操作模式，将数据平面内的每个包的干预保持在最低限度，从而减少其对新的高要求服务的总体延迟的影响。在这种新的操作模式中，只有在非常必要的情况下才能引入功能，以保持良好的最终用户体验。这将确保 6G 通信协议栈能够在合理的处理和存储限制内，以高能效的方式服务于不断变化的业务。精简的运营模式性能指标如表 8 所示。

表 8. 精简协议栈的性能标准

性能标准	原因
避免无损操作	实时服务不能接受与高层数据恢复相关的延迟。所需的可靠性将需要由较低的层次来保证
避免按序交付	对实时服务来说，重新排序延迟是不可接受的。必须不惜一切代价避免与队头阻塞相关的延迟和缓存，并尽快删除过时的内容
提前获取授权信息	为了减少实时服务的上行处理延迟，那些不需要每调度间隔进行变化的 UL 授权信息应该在授权时机之前就获取到
减少包头开销	为了控制高吞吐量服务的处理开销，必须避免控制信息以与数据信息相同的速度增长
物理层和媒体接入控制层协调紧密	为了减少基站和设备的内存占用，媒体接入控制层和物理层之间需要紧密的协调，只有需要恢复的信息应该存储在 HARQ 缓冲区中

## 8 系统能源足迹和能耗效率

在前几代蜂窝芯片中，半导体技术的发展极大地提高了性能，并显著降低了功耗。在过去，这些半导体能耗利用率的提高支撑了终端和基站复杂性的增加。尽管能耗效率预期将持续提升。然而随着时间的推移，预期提升的速度将不太可能满足 6G 用例的需求。为了提供极致的用户体验，6G 用例需要支持 10 -100 倍数据速率提升、更低的延迟、更高的 MIMO 阶数，并需要工作在能耗利用率较低的 sub-THz 频段上。

在 NR R15 版本之后，这种能耗演进放缓的趋势就已经显现。显然，如果不在 3GPP 协议中做进一步的推动，终端功耗的目标就无法达成。因此，我们看到 3GPP 在随后的版本中也进行了一些补救的工作。

### 8.1 极致能效的终端

手持设备从根本上受制于电池容量和散热能力。为了保证终端表面的温度处于安全水平，典型无风扇 6 英寸智能手机的平均功耗需要限制在 3-5W 以下。虽然电池能量密度可能会在未来 10 年内得以提升。但在同一时期内，热功率限制不太可能显著放宽。并且普遍认为，6G 时代会有更多的紧凑型设备和模块的需求。它们可以被用于诸如先进远程呈现、全息通信、感知网络等这样的应用中。这些新的设备形态可能会对终端设定更严格的限制。不仅因为它们的外形尺寸（如眼镜这类体积和电池容量受限的设备）。还因为它们是穿戴型设备，而不是手持或携带型的设备（由于长期与皮肤接触，这类设备有更严格的散热要求）。表 9 列出了一些值得典型的研究方向。

终端的峰值功耗和成本通常由接收端下行部分主导，与接收端下行的峰值数据速率近似成正比。在其他条件相同的情况下，终端峰值数据速率增加 10-100 倍会导致峰值功耗也增加大约 10-100 倍，从而产生无法接受的功耗水准。为了将终端的平均功耗保持在可接受的范围内，终端必须显著的控制非激活时段以及低速率工作时段功耗。这些时段的功耗必须大幅度低于峰值速率时的水平。为实现这一目标，必须确保终端的日常通信行为（控制信道监控、波束管理、邻区测量、空闲态寻呼监听等行为）不触发不必要的唤醒动作，进而让终端尽可能长时间的保留在休眠态。

表 9. 终端节电方案

解决方案	描述
基于终端节能的系统标准	从最开始制定标准时就将终端的节能设为所有协议层的基本 KPI，该 KPI 适用于所有相关的设备优化程序
Big-Little (大小双核心) modem 架构	6G 规范必须支持 Big-little modem 的设计思路，允许终端在低活跃态下使用低复杂度且节能的子系统。见图 9
零功耗的空闲模式：超低功耗唤醒与能量收集	集能量收集和性能优化于一体的超低功率终端类型，可以在低活跃态运行时不需要任何电池电源

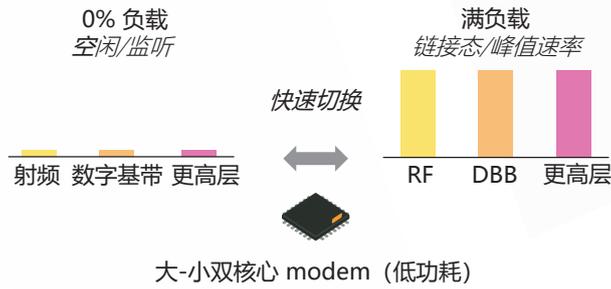


图 9. 设备 Big-Little Modem 设计概念

## 8.2 网络节电

5G 网络的能源足迹 (energy footprint) 问题已经引起了人们的关注。这不仅因其对环境的影响，也因为冲击了网络运营商的运营成本。在无线层面，基站的复杂度和基站的部署密度会进一步增加。所以除非采取有针对性的措施，否则网络的能源消耗会大幅增加。除此之外，分布式云化也可能会导致功耗的进一步增加。

在功耗这个问题上，妥协的余地是有限的。在某些情况下，我们认为可能需要牺牲最终的网络性能或灵活性来平衡功耗问题。表 10 列出了一些潜在的研究方向。

表 10. 网络能耗的潜在研究方向

研究方向	描述
基于网络节能的系统标准	从最开始制定标准时就将网络的节能设为所有协议层的基本 KPI
基于混合节点的混合组网 (见§4)	基于网络和设备的中继锚点 (relay anchors) 组合可以在显著降低能耗的情况下实现宏大的 6G 性能目标
将终端已有的节能技术延伸至网络	网络在非激活态或低活跃态下，有机会进一步大幅降低设备功耗。基站侧可以考虑一定程度借鉴终端侧的节能技术，优化这部分的功耗
动态网络节点开关和终端辅助型的网络唤醒 (如图10)	在最小化对连接终端的影响下，网络需要尽可能关闭不必要的网络节点或将其停留在低性能状态。然而，这很难在不影响网络运行的情况下轻易实现。网络和终端之间更好的相互感知可为这种联合优化行为提供更好的标准

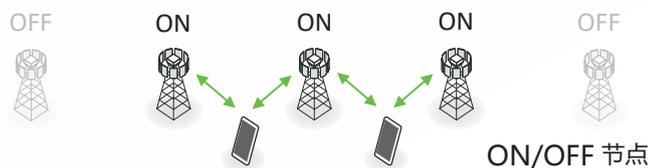


图10. 设备辅助唤醒的动态网络节点开/关

### 8.3 基本的KPI：极致性能的能耗效率

表 11 总结了终端和网络功耗相关的一些具体挑战。

终端节能和网络运营节能的问题，不能像以前几代蜂窝网那样，事后才开始规范和优化。应该从一开始，所有技术领域（射频电路设计、数字技术、波形设计、高级 MIMO、物理层过程等）都需要进行深入的能耗研究，将功耗作为基本的 KPI。这可能需要改变传统上以性能为导向的研究文化和标准化过程。一些现有的系统权衡需要仔细考虑，如终端与网络功耗、功耗与性能、功耗与延迟等。

表 11. 能耗领域的挑战

挑战	描述
功耗和流量负载匹配	当数据负载降低时，终端和网络功耗也应大幅降低
网络密度增加但网络总体功耗不增加	为了提升单位频谱容量、克服更高频段（毫米波，sub-THz）的传播损耗，需要增加网络密度。但网络的总体功耗不能增加
“能耗感知”的端到端服务交付	额外的性能和额外的功耗之间有直接的联系。在定义用于 6G 标准的技术解决方案时，该因素是必须要首先考虑到的
终端和网络间的“能耗协作”	终端和基站之间更好的“相互感知”有助于在一端或两端之间实现额外的节能收益
充分利用网络和终端的关闭时间，来共同节省网络和终端能耗	主动调整网络和终端的非激活时间，使它们重叠，最大限度地实现联合节能

## 9 地面与非地面融合

对非地面网络 (NTN) 的支持是一项极具发展前景的技术, 其可以补充现有的 TN 部署, 并以类似 eMBB 的数据速率填补现有的网络覆盖缺口。相较于传统蜂窝网络, 在人口稀疏地区部署 NTN 系统能以更低的成本实现广覆盖。然而, 一个必要条件是 NTN 的接入不会给终端用户带来额外的负担: 这也意味着重用现有的如智能手机等主流大众市场设备, 以及现有的手机用户是一个关键的要求。

表 12. 地面和卫星通信融合的挑战和研究方向

	更高的系统容量	高端大众市场设备	与 TN 无差异的 NTN 服务体验
<b>NTN/TN 浑然天成</b>	TN/NTN 切换和	对齐 TN/NTN 空中接口和网络	为源自同一订阅的用户提供无缝的用户体验
<b>集成式 TN/NTN 设备</b>	TN/NTN 频谱复用	消费级手持 TN/NTN 设备	
<b>TN/NTN 在低频段 (例如 L/S) 的频谱复用</b>	在 TN 覆盖之外, 运营商可将 TN 的频谱复用给 NTN 使用	手持设备无需添加额外的射频前端 (功放 / 双工器 / 滤波器)	与 TN 相同的可用频谱
<b>卫星部分的成本降低</b>	大量 LEO 卫星提供更高的系统容量		大量低成本 LEO 卫星可以降低订阅价格

### 9.1 TN/NTN 浑然天成

5G NR 技术自 3GPP Rel-15 开始进行规范, 随后在 Rel-17 期间扩展到支持 NTN。6G 自始便为联合定义 NTN/TN 提供了机会, 其通过定义高度集成的网络架构和无线空口技术, 从而不受限于早期标准版本的后向兼容问题。

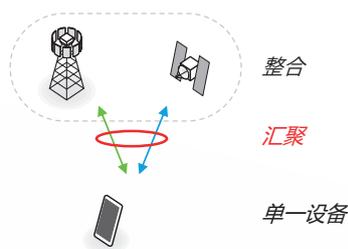


图 11. TN/NTN 的集成和融合

为了从小众服务发展到大众市场, 终端用户需要达成以下目标:

- 为所有相关应用提供真正无处不在的服务体验: 宽带、物联网、可持续环境感知系统, 其中 NTN 填补了现有的 TN 覆盖缺口;
- 为源自同一订阅的终端用户和应用提供无缝 TN/NTN 移动性, 类似于现有的国际漫游协议;
- 价格合理的 NTN 订阅, 具有可接受的宽带性能和 / 或地面覆盖范围以外的室内渗透率。通过已建立的零售渠道提供价格合理的 TN/NTN 设备。

## 9.2 TN/NTN 频谱复用

从历史上看，卫星和地面频段是以独占方式分配的，完全独立使用，这不是最佳的频谱利用方式。对于支持 NTN 的手持设备而言，最理想的频带是位于 1.5-2.5GHz 范围 (L/S 频带) 的 FDD 频带，而目前该频段内只有少量频谱资源可用于卫星应用。

对于地面运营商来说，在目前覆盖范围之外的偏远地区，通过提供基于 NTN 的 eMBB 蜂窝服务来扩大其蜂窝覆盖范围是一个巨大的机会。这可以基于他们自己的授权频段资源来实现，而这些频段资源目前尚未在人口稀少的地区使用。目前，可用的 NTN 频段显然不足以为手持设备提供可接受的宽带体验，而这些未使用的蜂窝地面频段资源有助于在偏远地区提供 eMBB 服务。

这种特定的筹划还对实现设备规模化经济带来了额外的积极影响。复用 TN 频段，也使得 NTN 可以充分复用特定于 TN 的射频前端组件（滤波器、双工器、宽带放大器、天线），从而完全避免了设备支持 NTN 所需的额外成本、体积和复杂性。

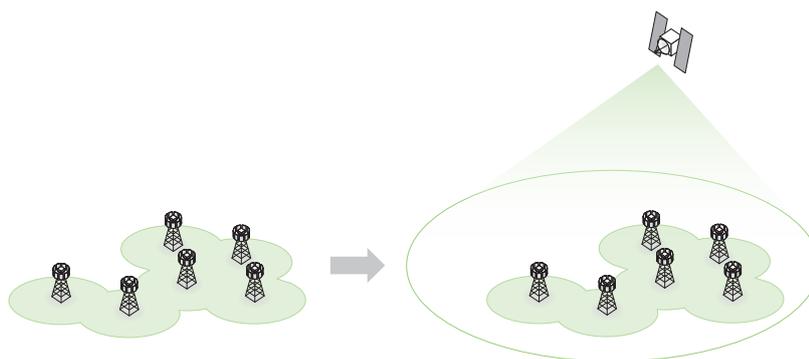


图 12. TN/NTN 的频谱复用

## 9.3 单一且价格合理的 TN/NTN 设备

与地面蜂窝设备相比，现有的手持卫星通信终端通常体积庞大、缺乏吸引力且成本高昂。如前一节所述，公共 TN/NTN 空中接口和 TN 频段复用的组合实际上可以抑制任何类型（射频前端、射频收发器、基带、波形因素等）、任何设备的复杂性增量。

TN/NTN 的技术整合可以与同时提供 TN 和 NTN 覆盖的单一蜂窝订阅相结合，从而基于现有庞大、动态且高度创新的智能手机生态系统，将 NTN 转变为一种大众市场的主流功能。重要的是，6G TN/NTN 设备能力可以作为一种新型功能，成为可被所有用户广泛应用的标配性功能，而其要求的外形尺寸和成本结构与引入此功能之前可保持一致。因此具备 6G TN/NTN 能力的设备可以通过既有的 OEM 制造和零售渠道进行交付。

此外，NTN 技术与 6G 设备 mesh 网 / 中继能力的结合可用于在偏远地区提供更深的室内覆盖。

## 10 内生人工智能集成系统-通信和计算的融合

人工智能和机器学习正迅速渗透到所有行业领域，无论这些领域是专业级用途还是消费级用途。AI/ML 均支持自动执行复杂任务(即,最少且最终无需人工干预),同时迭代地从其操作中学习,以系统地提高其性能。因此, AI/ML 不仅是 6G 时代大有裨益的工具,它还将在 6G 系统的建立、优化、管理、协调和运行中发挥关键作用。

引入人工智能不需要通过人工干预就可以自动、迭代地提高移动网络性能,这样的设计目标和能力在业内已经存在相当长时间了。例如,在现有的 4G 和 5G 系统中,自优化网络和最小化路测功能允许以最小的人为干预自主优化网络和设备运行。机器学习为网络和设备带来了新的机会,它们可以使用大数据集来识别和学习如何优化系统性能,而无需定义一组预先设定的结果。

AI/ML 不仅将单独用于优化 6G 设备和 6G 网络的性能,同时也将在 6G 网络和 6G 设备之间协同使用,以优化整个 6G 系统的性能。AI/ML 将实现实时、近实时或非实时的性能优化,具体取决于当前的需求,例如:

- 实时: 物理层操作、链路自适应、调度、设备功耗;
- 近实时: 负载均衡、QoS 优化、干扰管理;
- 非实时: 网络规划、网络配置。

ML 为网络性能最大化带来了前所未有的优势,衡量网络性能的重要 KPI 包括: 区域频谱效率、服务吞吐量/延迟/可靠性/可用性、设备电池寿命、网络/设备能耗、连接建立延迟/可靠性、设备位置准确性。当将它们分解为影响各个 KPI 的不同功能时, ML 支持这些目标的机会是无穷无尽的,例如优化小区搜索、MIMO 无线链路自适应、移动性、干扰抑制、流量路由等。

然后,当我们将有关端到端应用的数据载入到无线接入域时,就可以进一步优化服务供应。

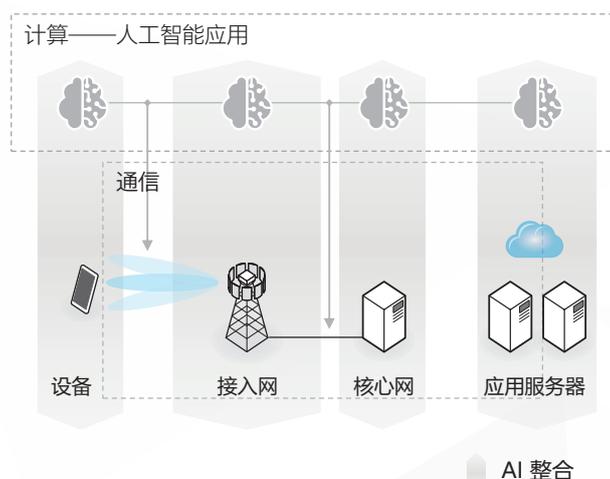


图13. 6G 时代 AI 集成的机遇

这种机遇也带来了一些挑战，包括：

- 如何在“决策”不集中、支持决策的数据来自不同节点的网络中进行最优学习；
- 如何保证多厂商环境下的协同算法，其中来自不同厂商的节点间相互连接；
- 如何在不降低 KPI 的情况下，高效、安全地管理数据集，并将数据集传输到系统的适当部分，以做出此类决策；
- 如何验证 ML 技术在网络和设备中的性能，以确保在考虑所有 KPI 的情况下做出最佳决策。

上述挑战要求所有行业参与者建立一个协作的标准化框架，以确定机器学习的关键目标领域，定义相关框架和架构，以促进机器学习的成功应用。

这种预备性的研究在 3GPP 5G-advanced 已经开始了。此外，在 O-RAN 联盟内部，已经开展了为数据收集确定网络架构和接口的工作，并定义了 O-RAN RAN 智能控制器 (RIC)。6G 系统将成为第一代从初始便与 ML 形式的人工智能浑然一体的移动通信系统，这将简化整体系统设计，同时最大限度地提高性能。

## 11 频谱 - 增加频谱资源，优化频谱利用

越来越多的无线设备正服务于不同的社会需求，这一趋势推动了越来越高的容量要求，从而需要更多的频谱来满足这些设备的相关流量需求。在本节中，我们将关注潜在相关的 6G 新型频谱，更加智能化的频谱接入技术，以及对如何优化频谱共享机制来为 6G 平台创造更多新机会进行探讨。

### 11.1 7-24 GHz

对于 3GPP 目前定义的频带，FR1 最大到 7.125GHz，FR2 是从 24.25GHz 开始，二者之间的 7-24GHz 范围内存在大量可利用的潜在频谱资源<sup>5</sup>。该频段的频谱特性兼具 FR1 和 FR2 的优点，可使 6G 操作具有以下优点：

- 高阶 MIMO (8x8 或更多)—— 可以将更多的天线集成到更小的物理尺寸单元。而这正是 FR1 范围内现有频段的局限所在，因为它们的波长更大；
- 相较于 FR2 范围的频谱，传播特性得到了改善。

因此，7- 24GHz 频段作为 6G 运行的候选频段应予以强烈考虑。

### 11.2 Sub-THz

在 sub-THz 频段范围内，有机会为 6G 通信提供大量的新型频谱资源。表 13 罗列了不同国家 / 地区在 sub-THz 范围内潜在的频谱资源。

表 13. Sub-THz 频谱资源

频率范围	潜在可用的频谱资源和时间表	国家/地区
100-200 GHz	130-134, 141-148.5, 151.5-164, 167-174.8 GHz: 带宽共计 31.8GHz, 用于固定和/或移动业务	美国 (联邦通讯委员会), 欧洲 (电子通信委员会)
≥ 200 GHz	252-275 GHz: 带宽共计 23 GHz, 指定为地面移动和固定业务共享使用	全球 (世界无线电大会 16)
275-450 GHz	用于固定和移动业务的带宽为 175 GHz, 其中 137 GHz 无使用限制, 38 GHz 需与地球探测卫星业务共享使用	全球 (世界无线电大会 19)
其他	带宽共计 21.2 GHz, 用于实验未授权的使用	美国 (联邦通讯委员会)

然而，在这个频率范围内的无线信道会经历较大的传播和反射损耗，遮挡也会导致 LOS 径的可用性降低。这些现象导致链路性能具有更短的范围和间歇性的开 / 关行为等特点。Sub-THz 频段天线的小尺寸使得收发机可以配备大量的天线单元，从而实现具有高波束增益的窄波束，有助于克服衰减损失和分子吸收。然而，这也导致系统对于波束失准更加敏感，使得对移动用户的波束跟踪更具挑战性。

<sup>5</sup> 参见 3GPP TR 38.820, “7 - 24 GHz frequency range (Release 16)” V16.1.1, 2021 - 03.

从应用的角度而言，上述特性使 sub-THz 频谱极其适合以下应用：

- 固定回程或移动设备，通过 LOS 点对点 / 多点连接，与一个网络枢纽连接，或作为网络的一部分，并通过狭窄的固定波束最大限度地扩大连接范围；
- 短距枢纽，在本地视距环境(如室内，大型场馆等)中，为潜在的大量用户提供高数据速率 / 容量。

为最大化 sub-THz 的使用机会，需要设计先进的无线接入协议来克服典型的挑战、并满足目标使用场景的需求，同时需要融合性设计(见 §4) 以便在不同频谱授权制度下工作，包括授权频谱，非授权频谱或者混合性频谱。

### 11.3 灵活双工的智能频谱接入

现有的 0.4 - 3 GHz 频段对 6G 生态系统仍然很重要，这是由于它们天然的覆盖优势，特别是对于室外到室内的通信。频谱资源的稀缺性使得 6G 最大化频谱利用效率变得非常重要。受限于物理天线尺寸以及它们进一步给网络和设备带来的限制，在这个频段范围内通过更高阶的 MIMO 实现高频谱利用率将非常困难，因此仍需对新型方法进行探索。相较于前几代通信(包括 4G 到 5G) 之间的演进，5G NR 已经减少了“始终在线 (always-on)” 的网络传输方式，这使得运营商从 5G NR 向 6G 无线接入的演进变得更为便捷。

更好地利用现有的 3GHz~71GHz 的 5G 高频段也很重要，我们期望“异构 MIMO”(见 §6) 在此发挥重要的作用：其中设备可作为网络节点进行协作，以最大限度地提高地区的整体频谱利用效率。

鉴于现有频谱在很大程度上被静态地定义为“FDD”或“TDD”的双工模式，我们预计 6G 将是革命性的：通过网络和设备上的全双工或部分双工，在所有频谱上驱动无约束的智能双工接入，以最大限度地利用频谱。6G 它还允许以更具创新性的方式组合单独的频谱资源(例如高频段 + 低频段)，以实现更好的性能与复杂性的权衡。

### 11.4 最佳的频谱共享

为了满足某一地区的峰值和平均流量需求(以及相关的应用要求)，对频谱需求的日益增加将进一步导致需要更优的频谱接入方式，从而网络供应商以最低的成本来满足这些需求。

为此，6G 系统需要支持最佳的频谱共享方式，不仅要支持同一网络的运营商和用户之间的频谱共享，还要支持不同部署拓扑下的最佳共存。一个例子是，当终端设备 / 混合节点被用作 mesh 网络的一部分时，它们的传输和接收能够与同类型的其他节点、以及传统网络节点的传输和接收进行协调，从而避免干扰且最大限度地提升区域内所有用户的体验。此外，地面节点和非地面节点间的频谱复用(见 §9.2) 也将带来一些新的挑战需要克服，从而能够支持最佳的复用方式以实现完全无缝覆盖。

最后，使 6G 与现有的非移动技术共存也将是确保垂直行业能够采用 6G，并最大限度地重用任何现有特定频谱资源的关键。

## 12 跨云、网络 and 设备的端到端安全架构

6G 生态系统蓄势待发，为快速实现社会的数字化转型（无论是对人、企业还是政府），它必须天生具备强大的鲁棒性，从而能够应对任何意外或恶意的侵害，并具备足够的灵活性以应对新的未知威胁。只有这样，6G 才能得到人民、企业和政府的充分信任，并兑现承诺。

作为 6G 成功的条件，对 6G 的信任必然是由终端用户和发布运营 6G 的实体（“6G 运营商”）赋予的。信任无疑来源于 6G 可以满足用户体验甚至超过预期性能的能力，但从根本上说，信任根植于 6G 能够提供全面安全性和弹性的能力。

对 6G 的信任将建立在以下几个方面的基础之上：

- 确保 6G 系统和设备是完全安全的，即：通过相关设计，6G 系统在任何时候都能够充分保护其传输或存储的所有用户数据和身份；6G 设备要完全且可验证地服从对所有用户数据和身份的保护；
- 它具有高度的内建弹性，即在出现故障时能够迅速自动恢复的能力，以及在不存在故障的情况下（例如某些政府部署）能够选择性地提供更高可用性的能力。

6G 安全不仅包括对用户数据和身份的保护，也包括允许任何设备之间（云、网络和设备）相互通信、相互进行身份验证的必要手段。对类似的通信进行授权不仅可以防止系统被未经授权的用户使用，也可以防止被恶意使用。

6G 安全面临三大方面的挑战：

- 6G 新的结合了云、网络 and 设备的架构模型；
- AI/ML 在 6G 中的核心作用；
- 计算技术的进步。

6G 生态系统将结合多种技术，包括云（和相关服务器）、网络基础设施、设备以及它们之间的接口。6G 还将具有去中心式网络架构模型的特点，例如边缘计算的广泛使用和蜂窝 mesh 网络的出现。这将产生潜在的新型安全漏洞，例如一些原本处于核心网极为安全的功能被推到了网络边缘。再比如，设备在网络架构里不仅扮演非源头，即末端的角色，也更积极地为其附近的设备提供网络连接，因此将承担诸如测量和记录使用信息的责任，而这项工作过去是在核心网进行的。分布式网络也可能对处理本地数据有自己的要求（例如，部署在安全位置的网络边缘节点可能需要将一些数据限制在本地，而非与边缘之外的其他网络节点共享数据）。所以，无论体系架构的模型是什么，6G 系统所有的组成部分都必须天然独立且协同地提供基本但高水准的安全性和弹性，更重要的是要始终确保没有 QoS 的降低（例如延迟方面）。

AI/ML 将在 6G 系统的运行中发挥核心作用，特别是它可以减少或避免人为干预。有了它，预计 6G 系统将产生、传输、存储和利用前所未有的海量数据。这些数据不仅仅包括用户相关的数据。保护这些数据的机密性、完整性和来源不仅关系到 6G 信任的建立，还严重影响到 6G 的实际运营（例如，任何恶意数据损坏都可能对 6G 的运营产生不利影响）。然而，重要的不仅仅是对数据的保护，还包括检测和识别任何潜在的数据损坏，比如，在影响 6G 运行之前就将这些数据丢弃。AI/ML 必须在本质上是安全且可被信任的，从而可以广泛应用于 6G 系统的运行中；但它也将是一个关键工具，必然使这些系统复杂而安全。AI/ML 将能够快速检测和响应可能出现在 6G 系统中的安全威胁和漏洞，重要的是，从这些事件中学习，以迭代地提高这些系统的安全级别。

计算技术的进步，尤其是量子计算，可能会对密码学和社会的数字化构成重大威胁。对于 6G，不仅要从安全的角度，而且要从实际实现的角度出发，考虑非对称密码和对称密码算法，来研究能够抵御量子计算机密码分析攻击的方法。

最后，需要从安全性以及在 6G 系统中实现的复杂性两方面研究一种有前景的方法，即物理层安全性，它是对更传统的密码解决方案的补充。物理层安全可以提供一种有效且高效的手段来对付无线电媒介上的漏洞和威胁，这些漏洞和威胁无论是在窃听还是拒绝服务（例如干扰）方面天然就容易受到攻击。例如，通过利用无线信道和 / 或无线设备的物理层属性和随机性，可以比在更高的层协议更有效地实现物理层身份验证。物理层安全也可以是一个特别强大的工具，以防止通信系统中使用 MIMO 和 / 或中继通信（如使用混合节点，见 §4）的窃听攻击，这两者都是 6G 系统的核心组件。MIMO 波束成形技术可以用来干扰潜在的窃听者，（受信任的）混合节点也可以相互合作，以干扰潜在的窃听者。

## 13 总结

6G 是一种面向 IMT2030 及未来的技术，其全球标准将于 2024 年左右由 3GPP 启动，而相应的正式商用预期在 2030 年左右。下一代无线通信标准的制定将会扩大我们社会的数字化转型，影响范围不限于消费者，或是专业市场的企业和政府。这样如此宏大的目标要求总体系统设计能够满足这些市场的极致性能需求，同时能够以安全和可持续的方式适应其各种数据消费模型和部署场景。

6G 标准的制定看上去非常复杂，但若遵循关键的实用技术原则，我们的愿景就能够成为现实。这个原则就是繁简得宜、臻善致美和融合畅达，也即 SOC：

- 繁简得宜是复杂性与简洁性的结合。可以在实现性能飞跃的同时显著降低交付每比特数据的处理需求，以将成本和能耗保持在实际可控范围内；
- 臻善致美指的是优化以用户体验为导向，无论该用户是 6G 服务的提供者还是消费者。我们期望沿着三个新的关键方向进行优化：异构无线接入体系架构、人工智能和机器学习，以及专为应用设计的跨层结构；
- 融合畅达指的是对等域之间的融合，这对于解决承受能力和能源效率方面的挑战是一个重要的机会。该融合包括设备和网络节点之间、频谱制度之间、接入、前传和回传之间、设备到设备和基站到设备接入之间、地面和非地面接入之间，通信和计算的融合等等。

与 5G 相比，6G 系统在流量与设备类型、频谱范围与制度、网络拓扑等方面的复杂性将相对增加。人工智能和机器学习可以集成到网络和设备操作的各个领域，从而简化 6G 的部署和操作。同时，迭代学习机制可以整体提高 6G 系统性能，无论是实时方面（如链路自适应、调度）、近实时方面（如负载均衡、干扰管理），还是非实时方面（如网络规划），因而能够支持总体目标，如最大化用户体验、优化成本效率和最小化能耗。

能源效率对 6G 来说既是一个挑战，也是一个机遇，可以让 6G 变得与之前截然不同。社会可持续性目标将推动整体网络能源足迹的减少，同时实现性能的数量级增长（以及可能的节点密集化）。在设备方面，我们需要克服散热和电池容量的挑战，以实现更高的数据速率和新的设备外型尺寸，从而实现高级沉浸式应用。为了满足这些需求，无论是在无线研究领域还是在半导体技术领域，我们都需要转变研究的思路——将能源效率作为基本 KPI。

频谱将是 6G 系统设计的另一个基本驱动力。为了应付在服务需求和使用案例中更为多样化的需求，以及地理上的广域覆盖和按需接入服务的需求，系统将需要同时支持现有的频率和新的频率范围，并实现最佳的频谱共享。用于地面和非地面部署的 5G 以及传统通信系统将会提高现有频谱的利用率，将一些频谱进行再分配，同时会将频谱扩展到 7-24GHz 以及亚太赫兹范围 6G 能够满足不同的频谱共享机制，从而促进系统部署的频谱利用率提高。同时又能促进垂直行业市场的传统频谱重用。这需要使用不同的部署场景，以便不同的频率范围都能得到最佳使用。

MIMO 将在 6G 时代发挥更为重要的作用，在 sub-THz 频段，得益于更小的天线阵列尺寸，天线阵列的数量得以大幅提升，从而有望解决 sub-THz 频段传播特性带来的挑战。此外，mmWave 和 sub-THz 频段的密集式组网将进一步推动对去小区 - 分布式 MIMO 的需求，从而保障用户在不同无线电节点下的无缝式体验。

无线接入的融合对于实现 6G 目标架构至关重要，因为它可以避免技术碎片化，有助于最大限度地实现技术规模化经济，从而提高网络和设备的性价比。为此，建议采用统一的无线波形准则，该准则可基于一组简单的波形和可选参数集进行扩展。此外，设备和网络节点之间的融合，即网络节点的“设备化”或“混合节点”的部署变得尤为重要。该方法可利用更高频段的频谱资源（例如从 C 频段到 mmWave 甚至 sub-THz 频段），以一种经济且有效的方式来扩展地面 6G 的覆盖。

6G 架构将具有充分的适应能力，能够为通信终端间的任意数据业务模型提供最佳的网络拓扑，这些通信终端既可以通过传统地面网络架构，在一个本地 mesh 网络中进行直连，也可以通过机载或卫星设备进行中继连接。为此，从无线架构的角度来看，混合节点将发挥主要作用，并提供必要的网络功能以协作式地确定（无论是否涉及网络）最佳的无线网络拓扑。此外，6G 架构也将由原生应用所驱动，并具备可配置性以支持：

- 网络边缘和设备之间的计算资源优化分配、分布和共享；
- 多节点间侧和多节点间服务器功能的本地化和分布化；
- 设备到设备间的直接操作。

传统的用户平面协议栈被按顺序来传递无损数据，但这不适用于延迟受限的高交互沉浸式应用，因此需要一种新的方法来解决这些用户体验干扰因素（抖动、丢包和数据速率波动）所带来的挑战。一个精简的用户平面协议栈将依赖于应用程序和无线层之间更强的相互感知，从而实现目标性能，并减少对数据包级别干预的需求（这些干预会导致不可接受的延迟和流量开销），同时也能避免由于数据缓冲导致的严重的内存占用负担。

地面和非地面接入的融合是一项极具潜力的发展方向，其能够以经济有效的方式填补人口稀少地区现有的蜂窝网络覆盖缺口。我们希望借助于现有设备和地面蜂窝网络生态系统的规模和市场，以避免给用户带来任何额外的负担。以对消费级设备进行低影响的硬件改造是非常重要的，这样一来用户可以通过单一的、可负担的主流设备、蜂窝网络和应用来接入卫星服务。实现这一目标的关键因素是地面 / 非地面无线接口和网络的原生化集成，以及地面和非地面接入间的频谱复用。

最后，6G 需要在本质上是安全且有弹性的，从而能够在出现新的威胁时仍可信赖。物理层安全作为传统加密措施的补充，不仅可以提高 6G 系统相对于 5G 系统的安全性，还可以解决传统安全措施（如更高层身份验证）的延迟问题，从而充分支持对延迟敏感的应用。AI/ML 技术将在快速检测与响应威胁和漏洞方面发挥重要作用，同时能够从这些漏洞中学习，以防止出现新的安全漏洞。