

紫金山实验室 6G 研究白皮书概要及部分英文翻译

临菲信息技术港

原文：“6G 研究白皮书——6G 无线网络：愿景、使能技术与新应用范式”。

原文原载：紫金山实验室官网。

本文是原文的摘录整理，并对原图中的部分英文进行了翻译，以方便概览。有需求原文的读者可点击文后“阅读原文”。

由紫金山实验室、东南大学移动通信国家重点实验室尤肖虎教授领衔、王承祥教授负责组织起草，联合和邀请国内外 20 多位资深专家学者，在《SCIENCE CHINA Information Sciences》（《中国科学：信息科学》）2021 年 1 月发表了 6G 长篇综述“Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts”，并在此原文基础上发布了“6G 研究白皮书——6G 无线网络：愿景、使能技术与新应用范式”。

一、6G 无线通信网络的发展背景

5G 的局限性

5G 将不能满足 2030 年之后的未来网络需求。

6G 的需求及愿景

6G 无线通信网络有望提供更高的频谱/能量/成本效率、更高的传输速率（Tbps 级）、10 倍以上的更低时延、100 倍以上的连接数密度、全自动的更高智能化水平、亚厘米级的定位精度、接近 100% 的覆盖率，以及亚毫秒级的时间同步。新的空口与传输技术对于获得高频效和高能效十分必要，这包括新的波形设计、多址接入方式、信道编码方案、多天线技术，以及这些技术的有机结合。同时，需要设计新的网络架构，例如软件定义网络（SDN）/网络功能虚拟化（NFV）、动态网络切片、基于服务的网络架构（SBA）、认知服务架构（CSA）以及无蜂窝架构等。

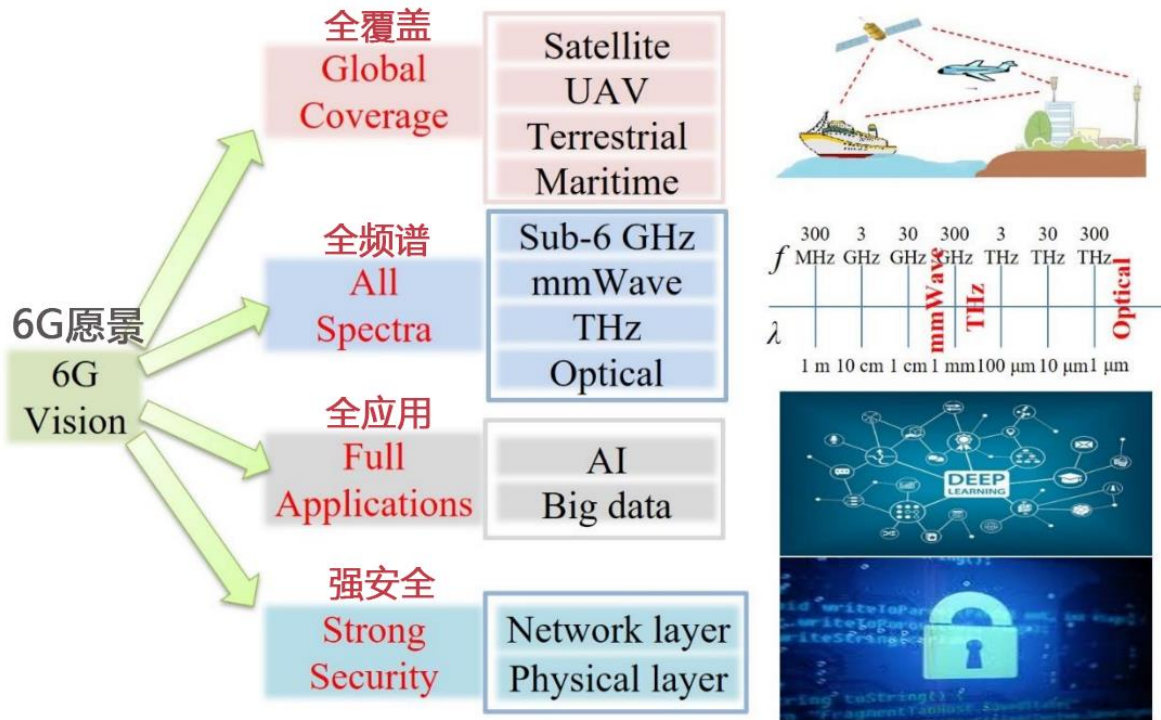


图 1 6G 无线通信网络的发展愿景

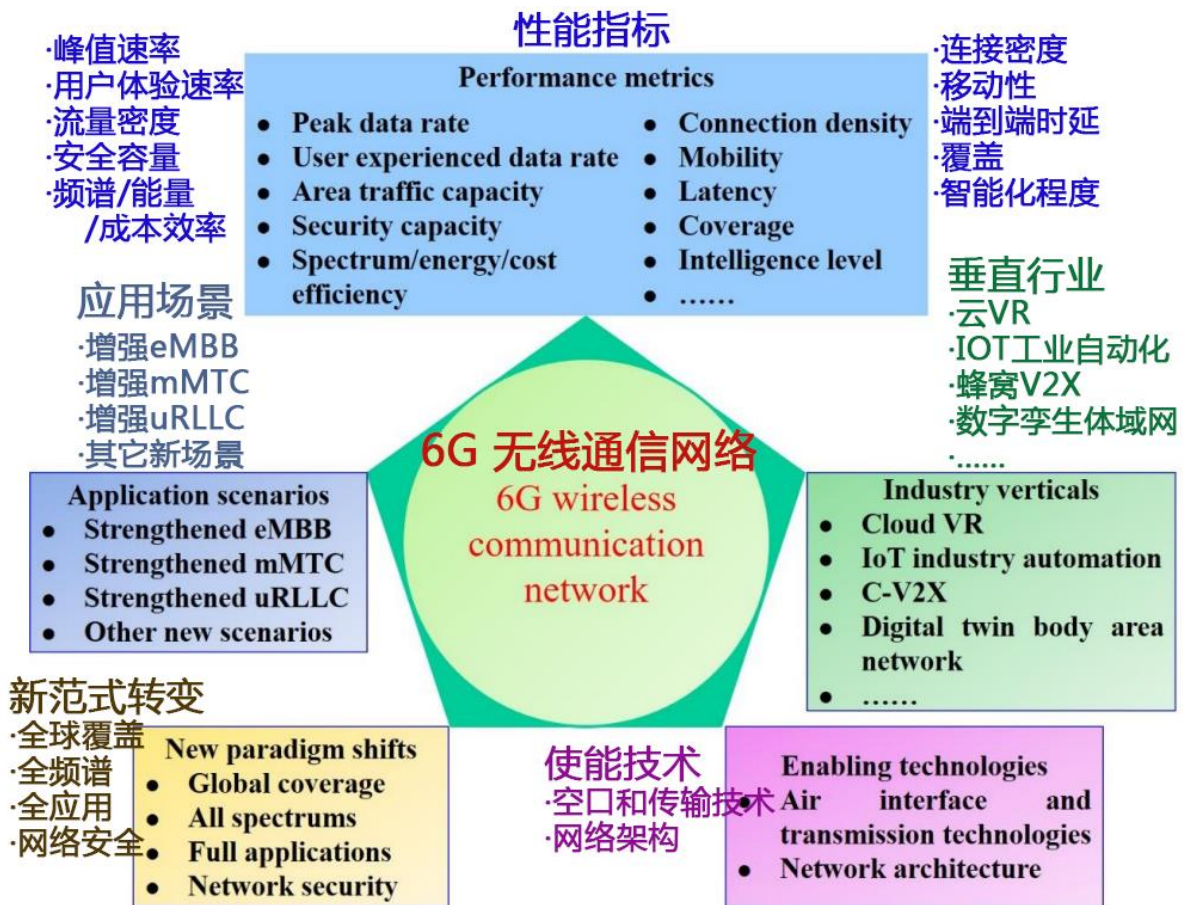
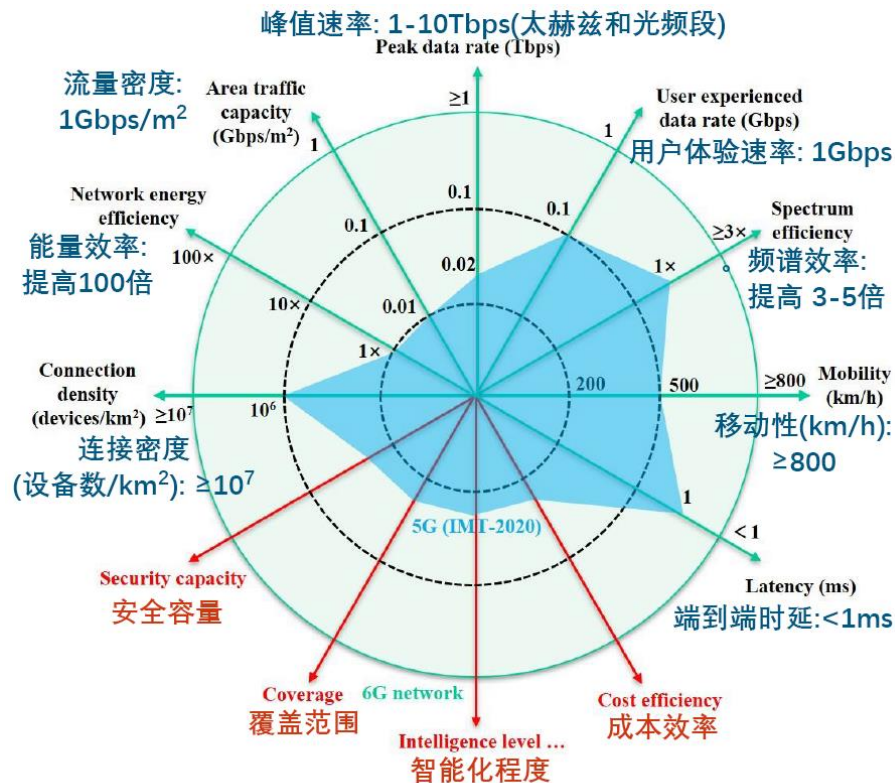


图 2 6G 无线通信网络概述

二、6G 性能指标、应用场景和垂直行业应用示例

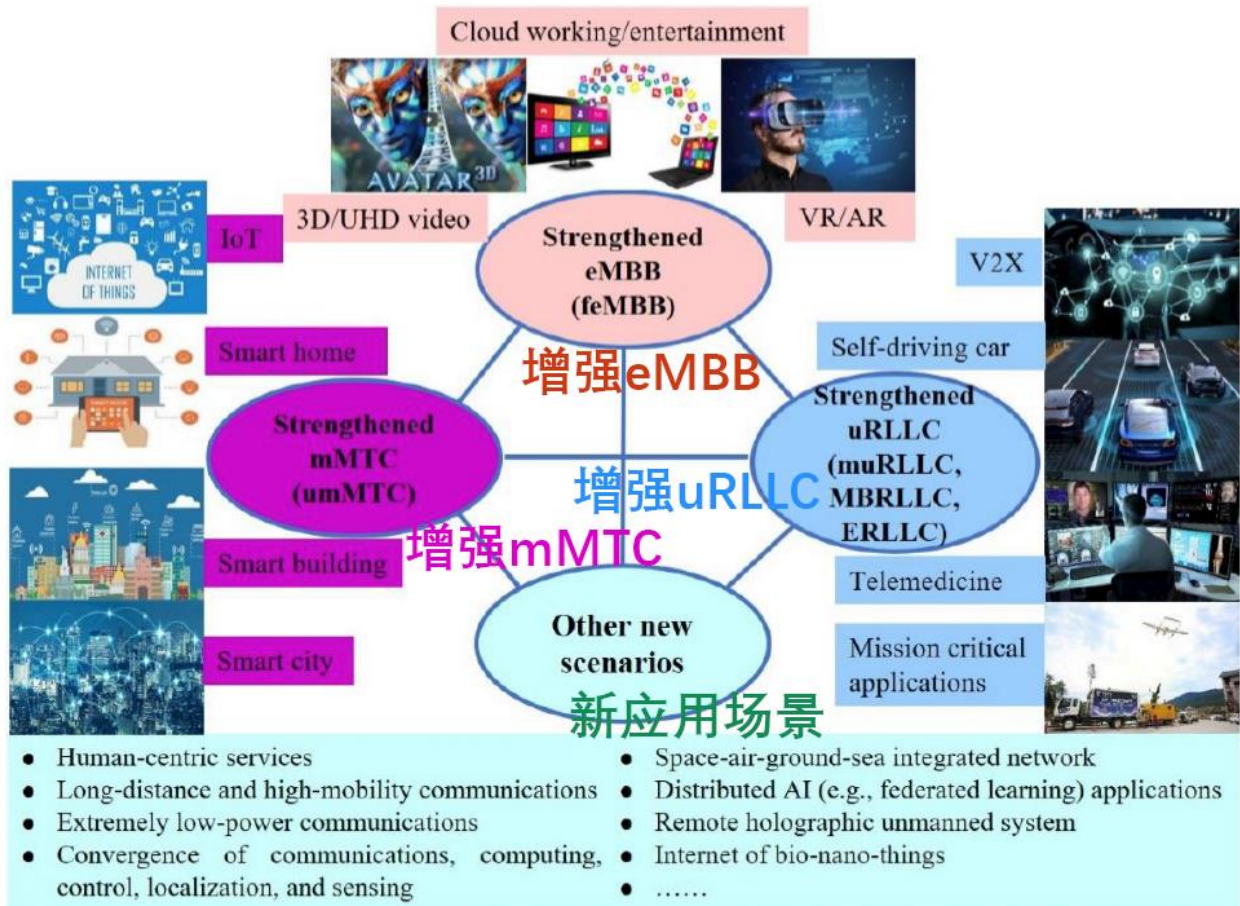
2.1 6G 性能指标和应用场景



6G 应用场景的愿景，包括：增强的三个 5G 应用场景，即：增强 eMBB (feMBB)、增强 mMTC (umMTC)、增强 uRLL(muRLLC、MBRLLC 和 ERLLC)，以及其它新应用场景。

6G 将支持新的应用场景，例如：

- 1) 以人为中心的服务
- 2) 远距离和高移动性通信
- 3) 超低功耗通信
- 4) 通信、计算、控制、定位和传感的融合
- 5) 空天地海一体化网络
- 6) 分布式 AI 和联邦学习应用
- 7) 远程全息无人系统
- 8) 生物纳米物联网。



feMBB: further-eMBB; umMTC: ultra-mMTC; muRLLC: massive-uRLLC; MBRLLC: mobile broadband reliable low latency communications; ERLLC: extremely reliable and low latency communications

图 5 6G 无线通信网络的应用场景

2.2 垂直行业应用

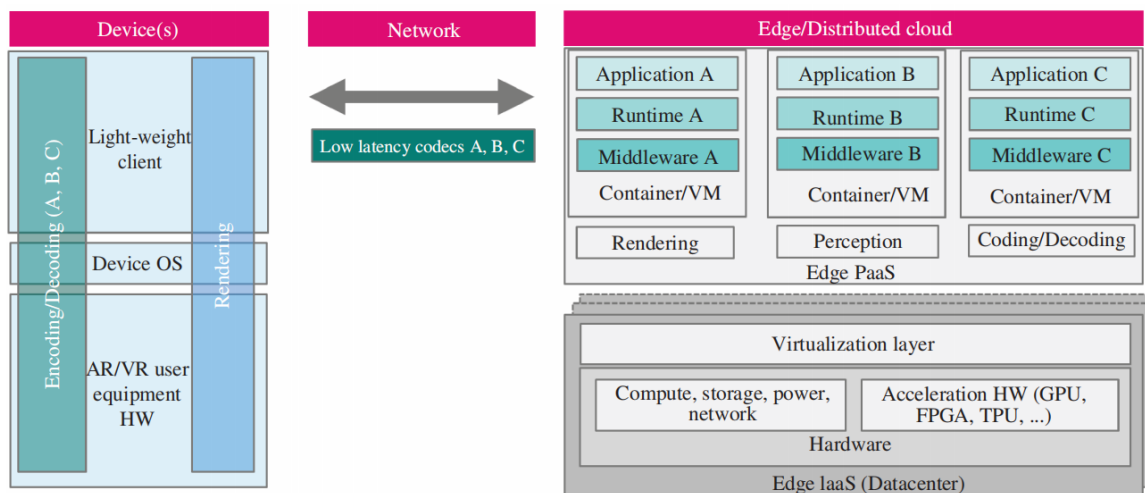


图 7 云虚拟现实的参考架构^[17]

2.2.1 云虚拟现实

将现有的云虚拟现实研究分为三类：注视点渲染、低时延渲染和优化渲染流水线。技术的进步将使云虚拟现实服务成为现实，更多的优化技术将使云虚拟现实服务逐渐走向盈利。

2.2.2 物联网工业自动化

表 1 工业物联网用例与需求^[29]

用例		可靠性	循环时间	典型有效载荷大小	设备数量	典型服务区域
运动控制	印刷机	>99.9999%	< 2 ms	20 bytes	>100	100 m × 100 m × 30 m
	机床	>99.9999%	< 0.5 ms	50 bytes	~20	15 m × 15 m × 3 m
	封装机	>99.9999%	< 1 ms	40 bytes	~50	10 m × 5 m × 3 m
移动机器人	协同运动控制	>99.9999%	1 ms	40-250 bytes	100	< 1 km ²
	视频遥控器	>99.9999%	10-100 ms	15-150 kbytes	100	< 1 km ²
具有安全功能的移动控制面板	装配机器人/铣床	>99.9999%	4-8 ms	40-250 bytes	4	10 m × 10 m
	移动起重机	>99.9999%	12 ms	40-250 bytes	2	40 m × 60 m
进程自动化/监控		>99.99%	> 50 ms	可变	10000 设备/km ²	

2.2.3 蜂窝车联网

蜂窝车联网（C-V2X）是 3GPP 指定的标准化车联网解决方案，为车对车（V2V）、车对行人（V2P）、车对基础设施（V2I）和车对云（V2C）提供低时延、高可靠性和高吞吐量的通信能力。

C-V2X 有两个重要版本，即长期演进车联网（LTE-V）和新空口车联网（NR-V）。

下一代 C-V2X 还需要进一步解决以下问题：

- (1) 基于 ICDT 的 C-V2X 体系结构和空口
- (2) C-V2X 技术验证和测试
- (3) C-V2X 的新频谱

2.2.4 数字孪生体域网

数字孪生体域网可以通过 6G 和 ICT 模拟虚拟人体，可以全天候跟踪，提前预测疾病，还可以模拟虚拟人体的手术和用药，利用虚拟人体预测疗效，加快药物研发，降低成本，从而提高人类的生活质量。

2.2.5 高效无线网络控制与联邦学习系统

世界正朝着大量使用数据相关性进行分析的应用这一方向迈进。一个崭新的例子是在移动设备收集的邻近数据的帮助下，与流行病如 COVID-19 的斗争。这些数据必须通过网络进行关联，以减缓疾病的传播。此外，对于在有不同参与者（自行车、行人、汽车、两轮车）的交叉口场景下的自动驾驶，必须将移动和固定传感器（如激光雷达和雷达）结合起来，以分布式控制方法了解情况并根据需要控制交通。

三、6G 使能技术

3.1 6G 空口与传输技术

3.1.1 新的波形设计

(1) 现有波形综述

正交频分复用（OFDM）。

正交时间频率空间调制（OTFS）。

OTFS 和大规模 MIMO 的结合也是今后的研究方向。

(2) 极低功率的波形设计

6G 波形的一种新的设计模式可能是寻找仅需要非常低分辨率 A/D 转换器的调制方案，最低要求是 1-bit A/D 转换器。

3.1.2 多址接入

非正交多址接入（NOMA）。

3.1.3 信道编码

- (1) 下一代极化码
- (2) Turbo 收发机下一代前向纠错
- (3) 并行级联方案
- (4) HARQ 的多组 Turbo 码
- (5) 串行级联方案
- (6) 不规则前向纠错：外部信息传递图表辅助设计时代

3.1.4 无蜂窝大规模 MIMO

无蜂窝大规模 MIMO 的性能增益来自于对大量异地分布的远端天线单元 (RAU) 的联合处理。

3.1.5 动态智能频谱共享与接入

使用认知无线电技术来支持动态和智能的频谱共享与接入：

- 无授权频段的动态频谱共享
- 共生无线电 (SR)
- 基于 AI 的动态频谱共享

3.1.6 基于区块链的无线接入网络

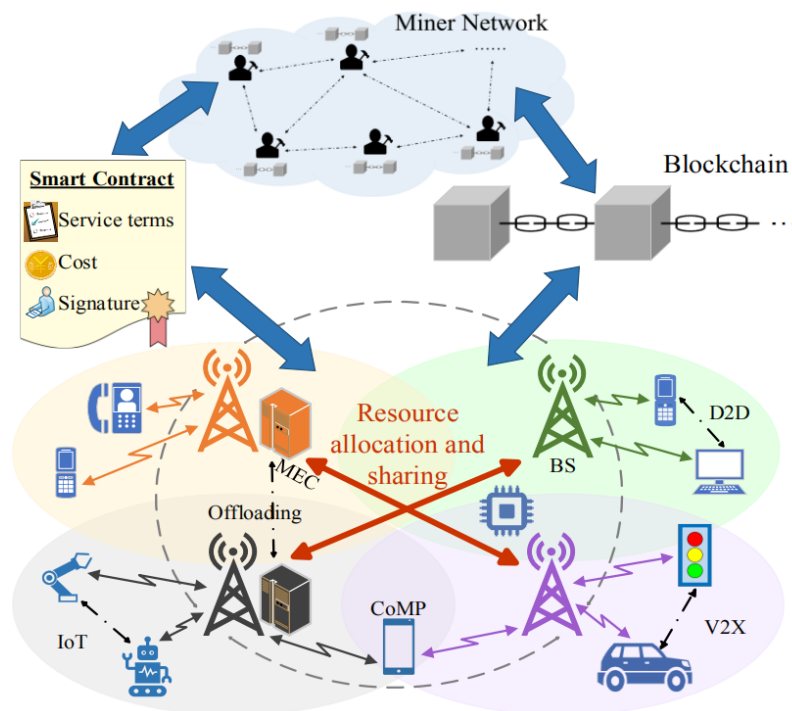


图 15 基于区块链的无线网络示意图

区块链无线接入网（B-RAN）——一种由区块链技术支持的去中心化、可信任的无线接入范式。

FCC 在 2018 年世界移动通信大会概述了他们在未来 6G 网络中部署区块链的愿景。

3.1.7 光子定义无线电

由于目前在信号源和探测器方面的限制，太赫兹频谱范围还没有被充分挖掘。为了开辟 6G 应用的频率范围，光子解决方案已经走在了技术的前沿。

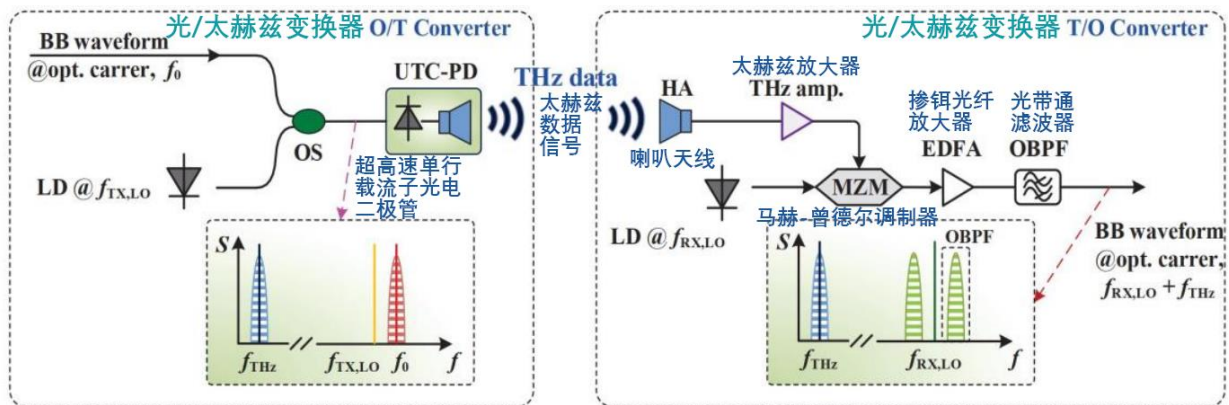


图 16 直接光-太赫兹和太赫兹-光转换图

3.1.8 关键任务 uRLLC

未来的 6G 需要 uRLLC 具有更强的能力。

结合 eMBB 和 uRLLC 可能会在未来的 6G 中产生新的应用场景。

3.2 6G 网络架构

3.2.1 软件定义网络/网络功能虚拟化

- (1) 软件定义网络及其演变
- (2) 网络功能虚拟化及其演变

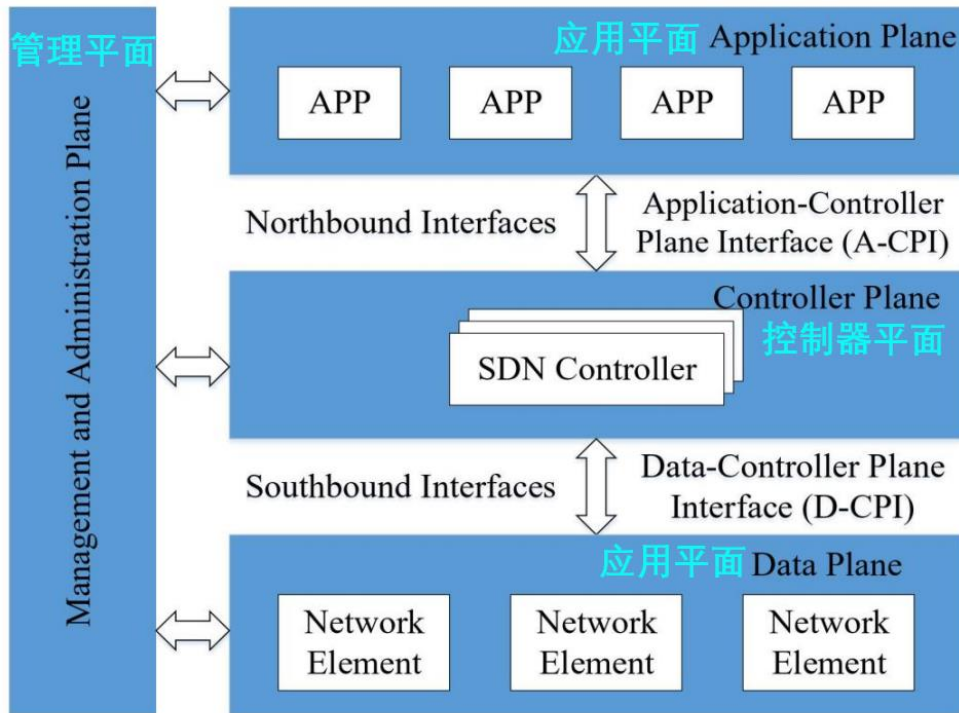


图 17 软件定义网络架构的高层次概述

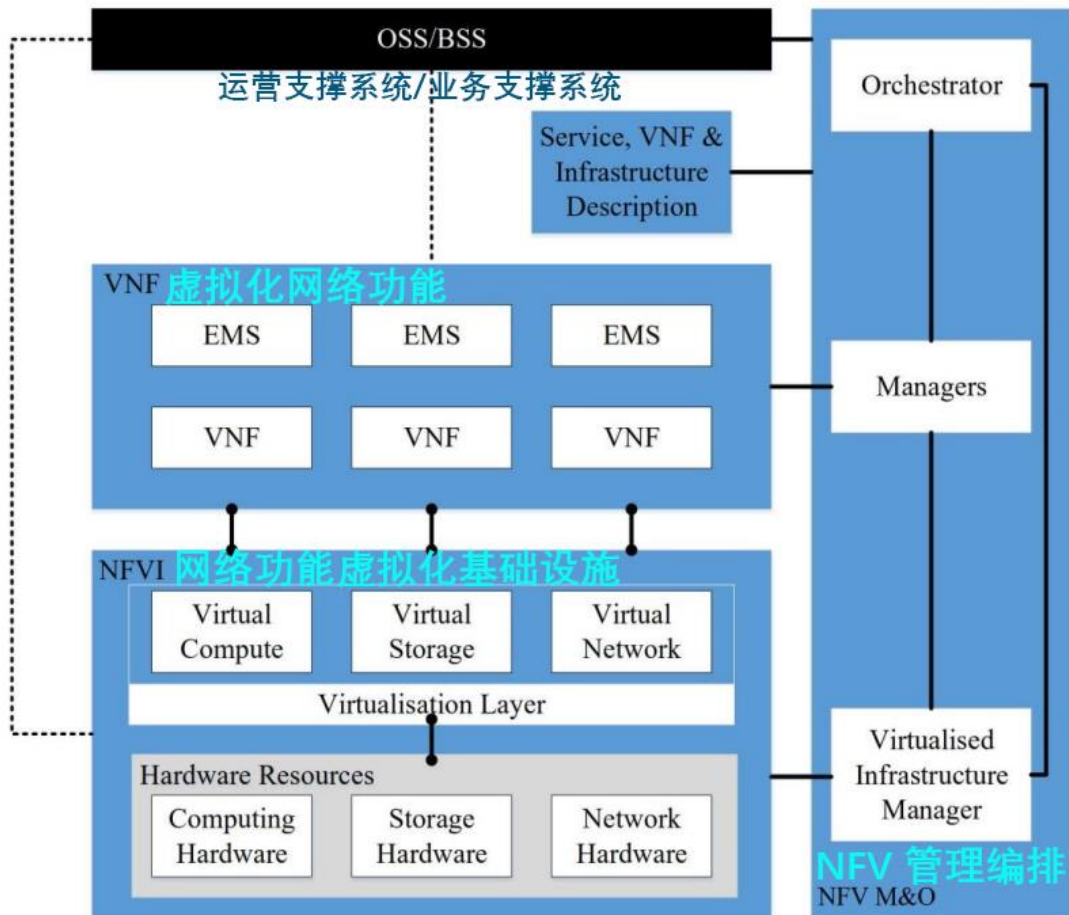


图 18 网络功能虚拟化架构的高层次概述

3.2.2 网络切片及其演进

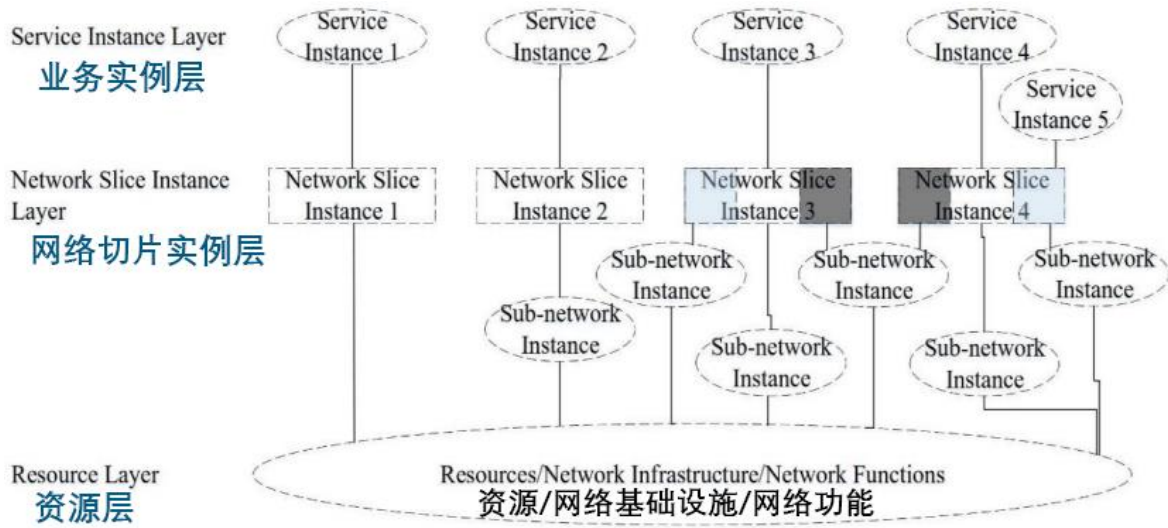


图 19 网络切片的概念框架^[187]

3.2.3 基于服务的网络架构及其演进

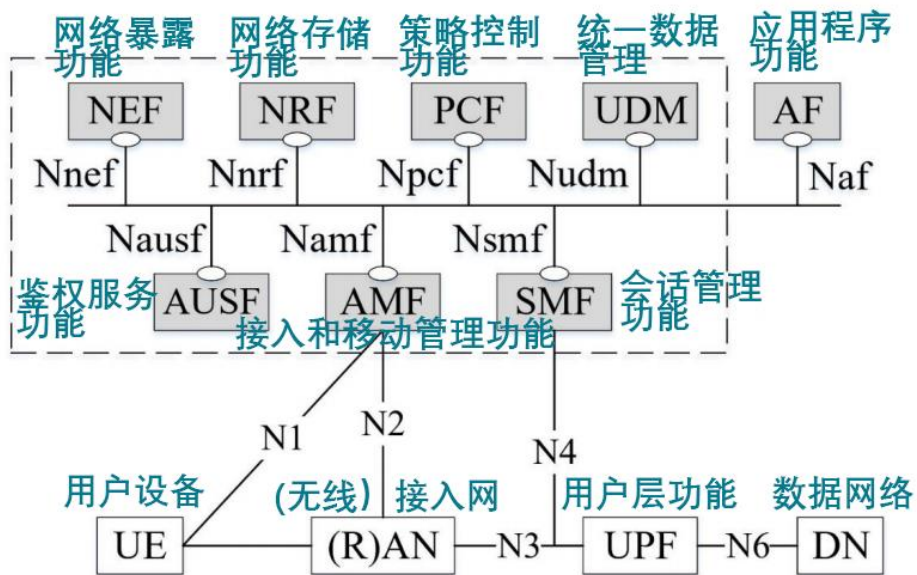


图 20 5G 核心网基于服务的网络架构^[192]

3.2.4 认知服务架构

6G 核心网络的 SBA（基于服务的网络架构）应具有显著的认知功能，即认知服务架构（CSA）。CSA 有两个特性，首先，它可以准确地识别目标行为、场景语义和用户特征；其次，通过统一的服务描述方法，对网络服务进行自适应动态调整。

6G 核心网络功能将进一步下沉到网络的边缘，即边缘核心。

在 6G 时代，具有各种 AI 功能的终端设备将与各种边缘和云资源无缝协作。

3.2.5 深度边缘节点和网络 (DEN2)

DEN2 的主要好处是将通信服务和智能推向边缘，从而实现普及智能的愿景。

DEN2 的本质设计是基于协作和可控的深度边缘节点实体的大规模组网。

它的愿景是建立一个能够为各种工业和非工业终端提供统一访问权限的超高性能平台。另一方面，DEN2 有望成为未来移动通信系统的关键创新平台。

它还具有实现高度分布式人工智能的愿景，将智能化从中央云转移到深层边缘节点。

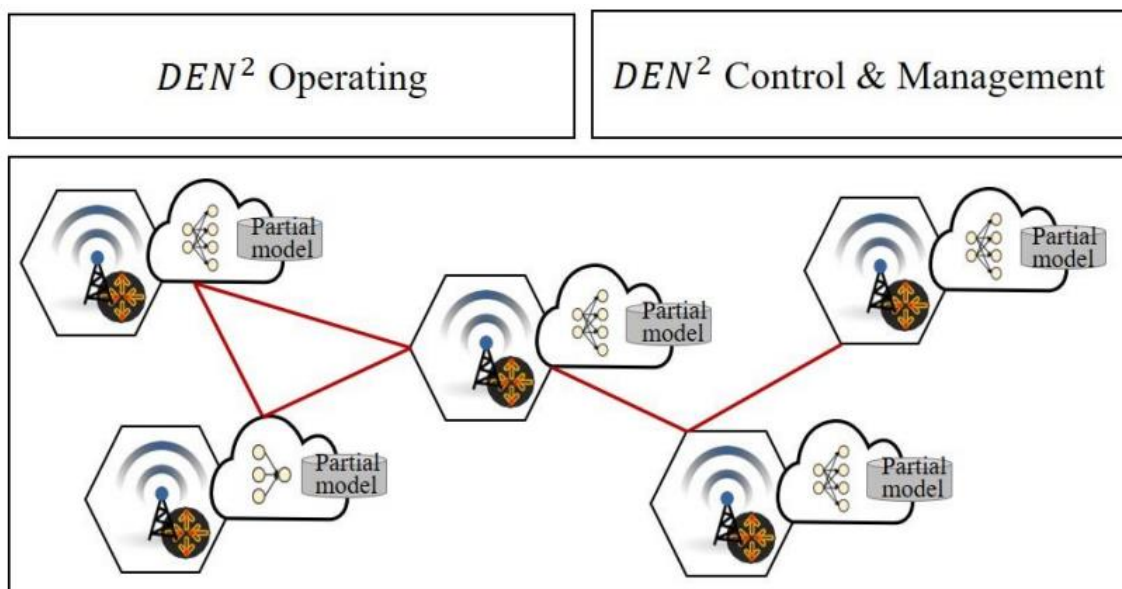


图 21 DEN² 架构示意图

3.2.6 无蜂窝架构

无蜂窝大规模 MIMO 引起了研究者们研究兴趣，并成为 6G 无线通信网络的潜在技术之一。

无蜂窝大规模 MIMO 的主要优势在于：

- 高网络连通性（高覆盖率）
- 巨大的频谱和能量效率
- 简单的线性信号处理和低成本器件

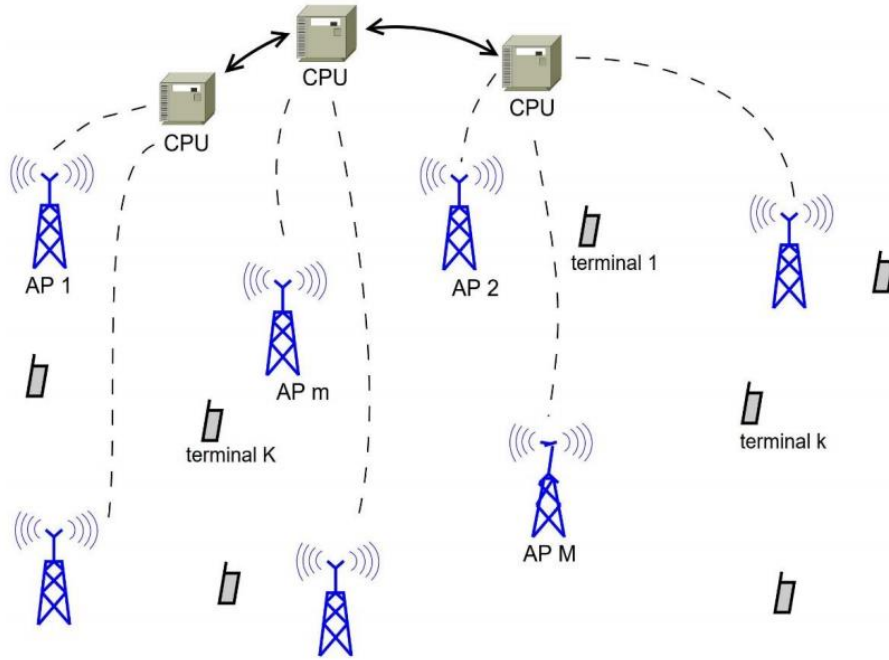


图 22 无蜂窝大规模 MIMO 的系统模型

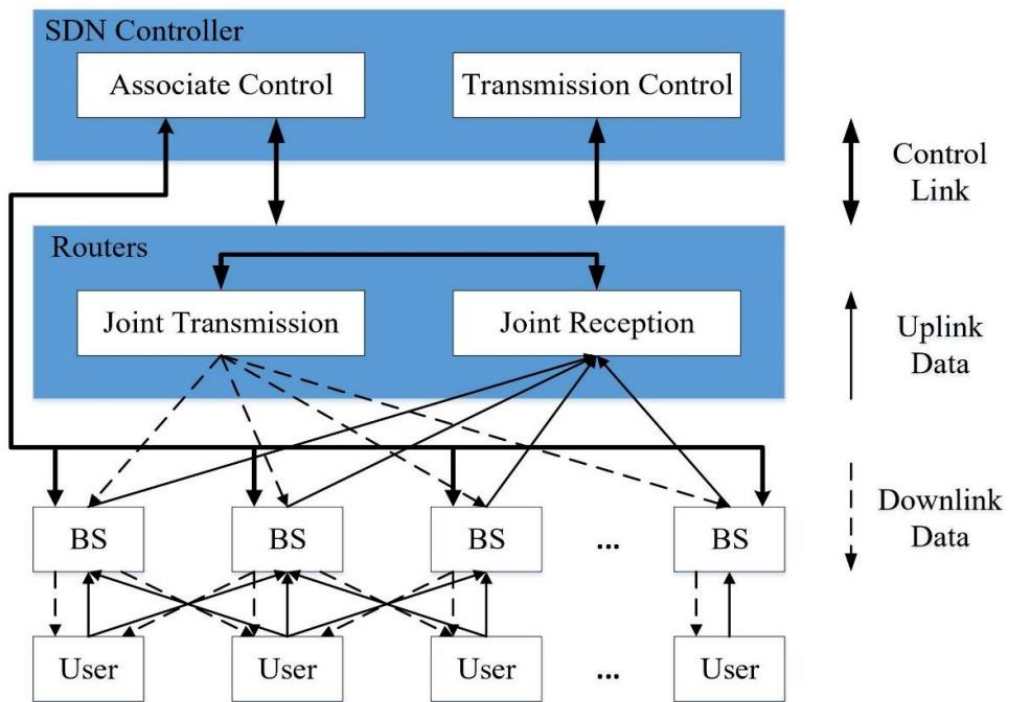


图 23 基于软件定义网络的无蜂窝架构^[202]

蜂窝大规模 MIMO 今后的一些重要研究方向

- 可扩展信号处理
- 可扩展功率控制

3.2.7 云/雾/边缘计算

(1) 计算技术的演进

MEC 和雾计算的一个关键区别在于 MEC 只在单机模式下运行，而雾计算有多个相互连接的层，可以与远距离的云和网络边缘进行交互。

(2) 集成的多层计算网络

多层计算网络可以被看做是一种自上而下、具有多层组织结构的大型公司。

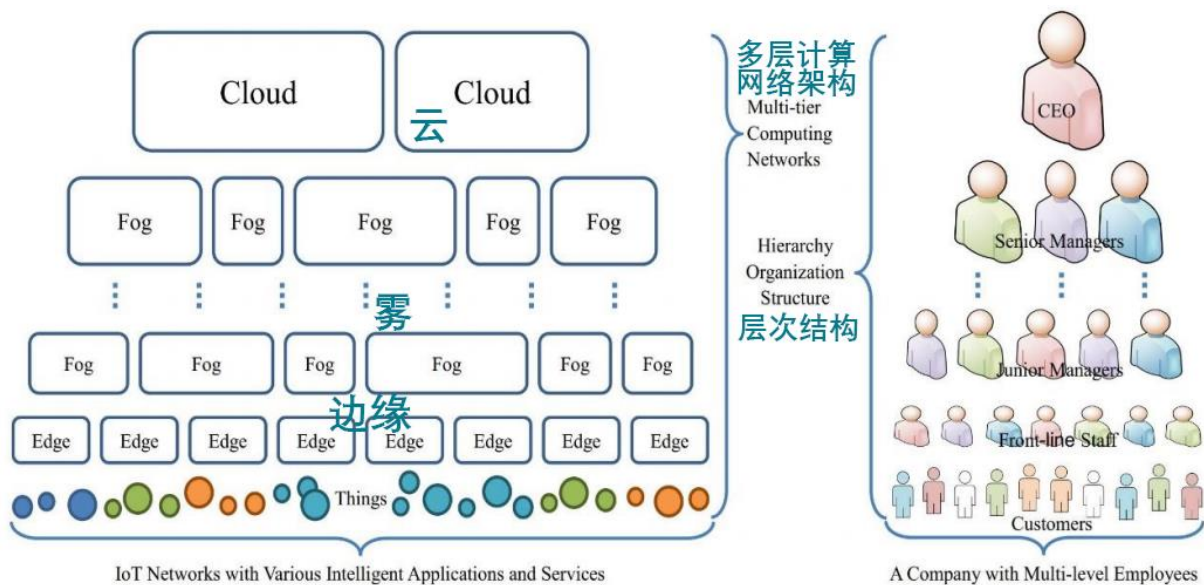


图 24 使能任何时刻、任何地点、任意物体间智能服务的融合云、雾、边缘计算技术的多层计算网络架构

四、6G 新的范式转变

为实现 6G 的性能指标和应用场景，目前的 5G 无线通信网络预计有四个新的范式转变，即全覆盖、全频谱、全应用和强安全。

4.1 全覆盖：空天地海一体化网络

4.1.1 卫星通信网络

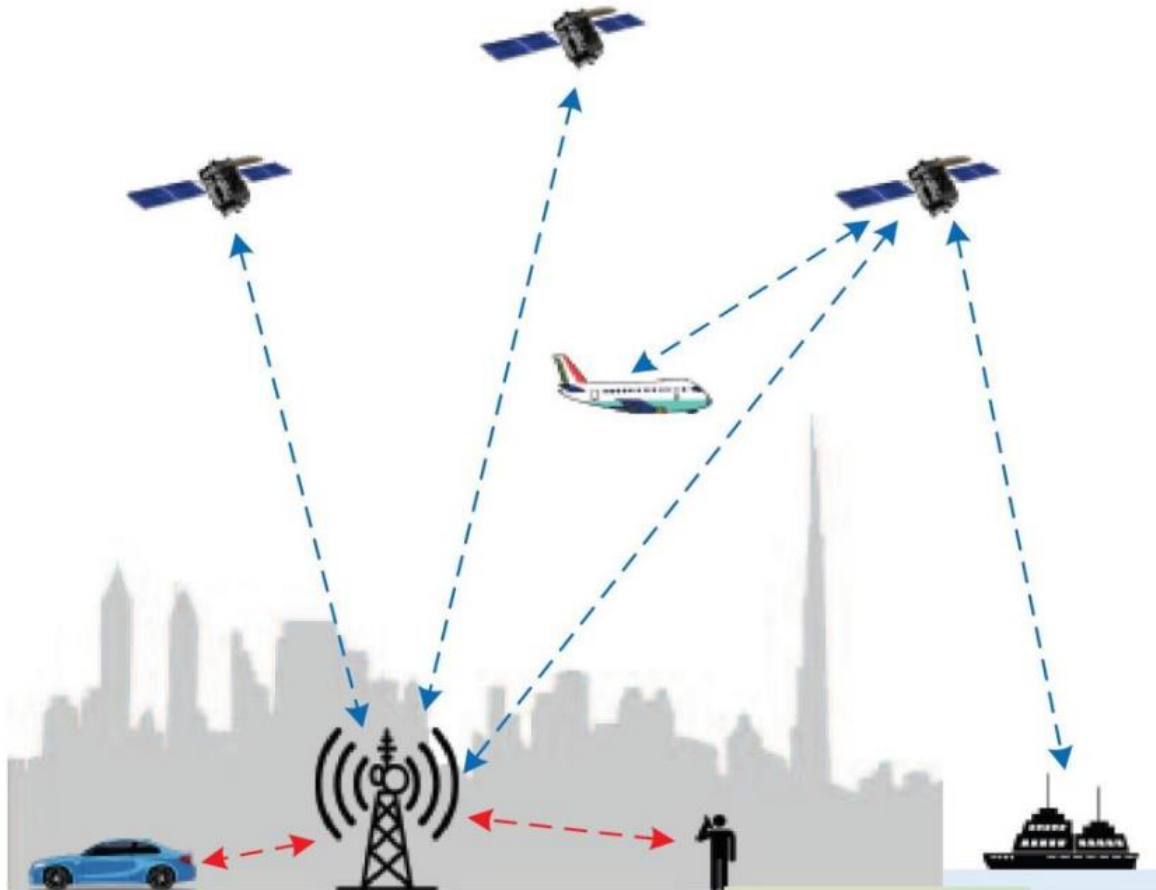


图 25 陆地和卫星无线通信网络的融合

4.1.2 无人机通信网络

根据不同高度的平台对无人机进行分类，分别称为低空平台（LAP）和高空平台（HAP）。

根据无人机的飞行高度，相应的通信网络将分为两类：基于 LAP 的通信网络和基于 HAP 的通信网络。

4.1.3 海洋机器类通信网络

系统架构：海洋机器类通信的首要要求是提供全球公海上船舶和海岸之间的普遍连接，以确保海上服务的持续性。

空口：海洋通信与地面通信有很大的不同。

无线电频谱：国际电联已经为海洋机器类通信分配了国际频谱。

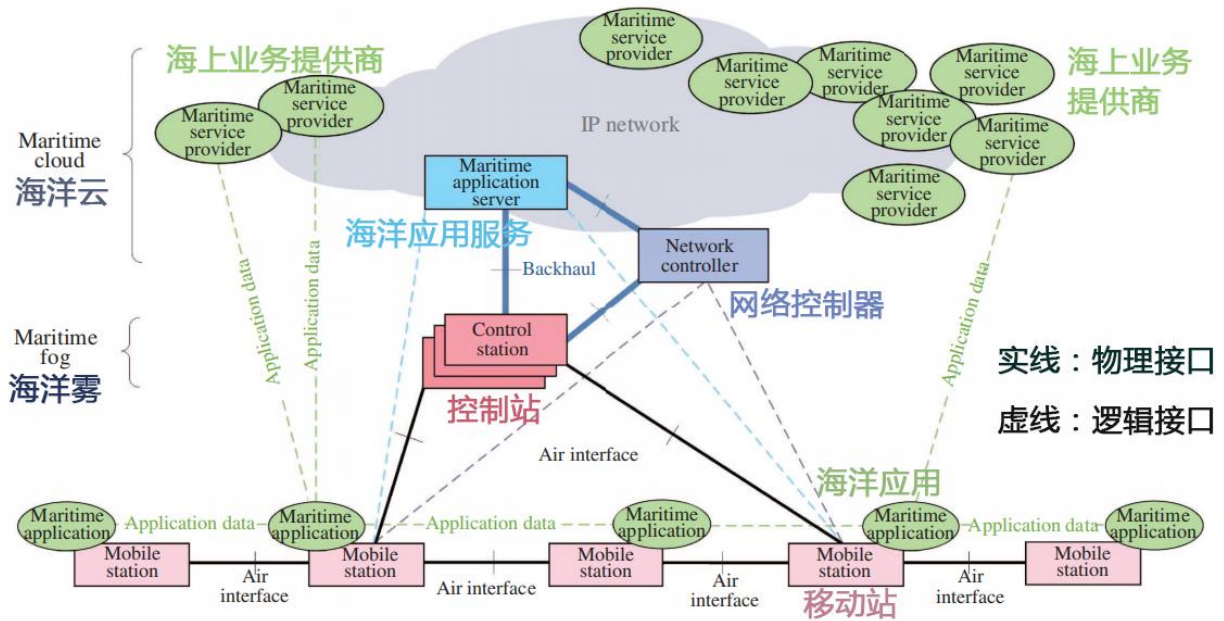
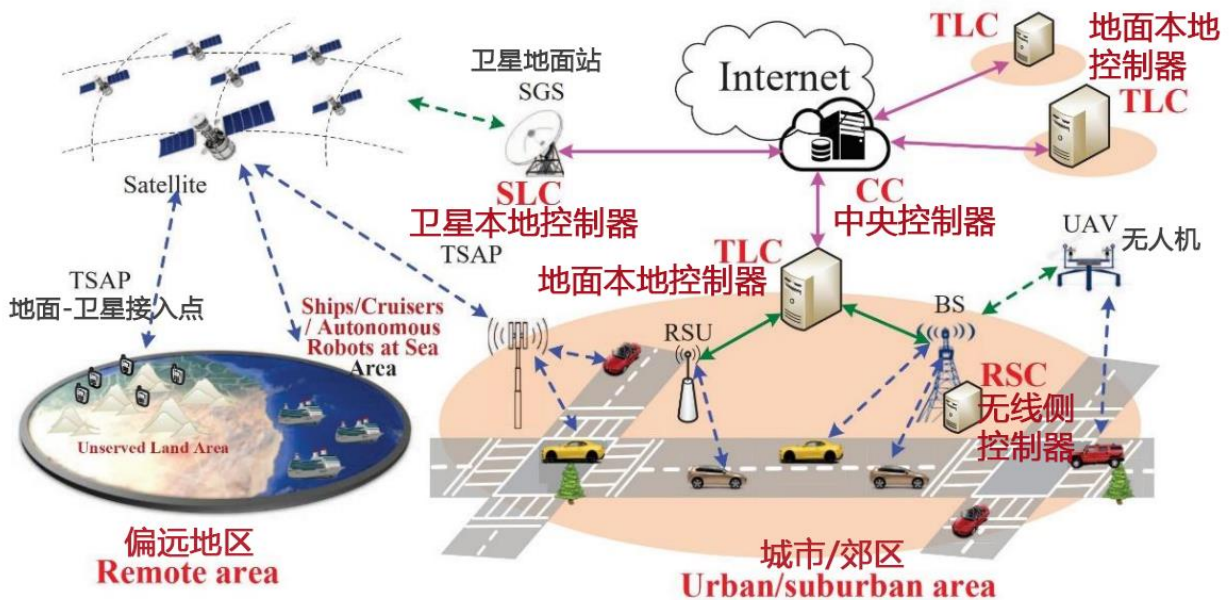


图 26 用于以服务为中心和软件定义网络的海洋机器类通信网络功能概述与拓扑结构^[248]

4.1.4 空天地海一体化网络

空天地海一体化网络本质上可以是一个分层异构的体系结构。



CC: Central Controller	TLC: Terrestrial Local Controller	←--→ User-to-AP control message
SLC: Satellite Local Controller	RSC: Radio Side Controller	←--→ AP-to-TLS/SLC control message
SGS: Satellite Ground Station	TSAP: Terrestrial-Satellite Access Point	←--→ TLC/SLC-to-CC control message

图 28 空天地海一体化网络的控制架构

4.2 全频谱：Sub-6 GHz、毫米波、太赫兹、光频段

4.2.1 Sub-6 GHz 频段

在 6G 中，更高的性能要求对信道建模提出了新的挑战，以支持更多的技术和场景，包括大规模 MIMO、车对车和高铁通信场景。

4.2.2 毫米波频段

在 30 GHz 和 300 GHz 之间的毫米波通信被认为是在下一代系统中有前景的技术，能够提供超高容量。

4.2.3 太赫兹频段

太赫兹频段被认为是在不久的将来为 6G 提供大带宽和充足频谱资源的有希望的候选频段。太赫兹通信能够实现从数百 Gbps 到几个 Tbps 的高传输速率。

太赫兹成像系统已经存在了 20 多年。相比之下，对太赫兹通信系统的研究还处于起步阶段。需要对高性能和低成本的设备及封装技术进行大量研究，使其在 6G 方面具有商业可行性。

4.2.4 光频段

主要的光无线通信技术包括：1) 自由空间光通信 (FSO)，2) 可见光通信 (VLC)，3) 光学相机通信 (OCC)，4) 光无线联网，也称为 Li-Fi，和 5) 光移动通信 (OMC)。

4.2.5 5G 及 5G 之后的信道测量与模型

由于 6G 信道面临大带宽、复杂场景等问题，具有许多新的挑战，需要在未来进行研究。

- 6G 无线信道测量
- 基于智能反射面的 6G 信道测量和模型：
- AI 使能的信道测量和模型
- 通用 6G 标准信道模型框架
- 信道模型参数、信道特性和系统性能之间的复杂关系
- 6G 信道模型性能评估

4.3 全应用：AI 使能的无线网络

4.3.1 AI 及机器学习技术概述

新兴的 AI 和机器学习性能强大而且可扩展，可以提高下一代无线网络的质量。

AI 和机器学习由于其强大的功能，适用于各种网络层。

AI 算法可用于解决包括感知、挖掘、预测和推理在内的各种问题。

4.3.2 物理层应用

现有的研究工作已经展示出将 AI 和深度学习应用于物理层通信的优势。由于深度学习的强大功能，传统方法无法解决的问题可以得到很好的解决。然而，由于这一研究课题还处于起步阶段，未来的研究还存在许多问题。

首先，我们需要确定深度学习是否会超越传统方法，或者它们有自己的应用领域。

其次，我们必须平衡基于深度学习的物理层通信的性能追求和训练工作。

第三，我们需要为通信系统找到合适的学习度量标准。

第四，生成足够且有效的用于学习训练的移动大数据至关重要。

最后，为了使基于深度学习的方法能够投入应用，有效的硬件实现十分关键，它可以连接理论和实践之间的鸿沟。

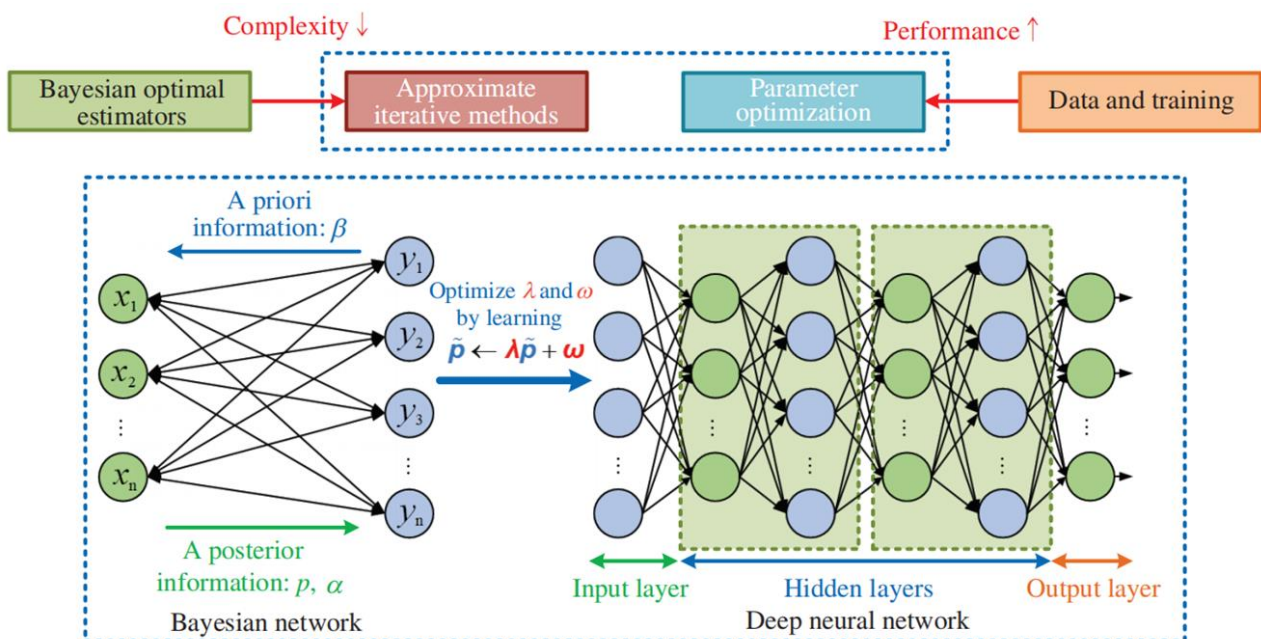


图 32 用于物理层通信的深度学习辅助的贝叶斯最佳估计器

4.3.3 上层应用

由于客户对数据流量的质量和数量的需求大大增加，5G 场景下的网络流量控制成为一个关键问题。

机器学习技术可以帮助优化和管理移动网络，并通过性能预测降低运营成本。

未来 5G 和 6G 网络的一个关键挑战是引入基于波束空间传输的干扰管理。

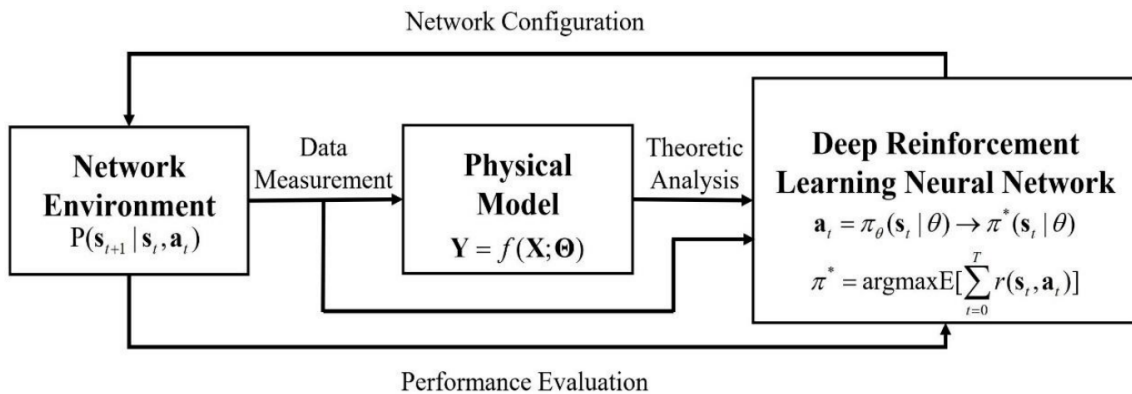


图 33 基于深度强化学习和物理层模型的网络优化框架

4.3.4 资源分配应用

AI 可以帮助有效地分配无线电资源。

AI 还可以通过智能地使用计算、缓存和通信来帮助改进这些应用程序。

AI 技术也可以用于分配缓存和计算资源。

我们应该设计一种智能技术，它可以事先预测一个环境动作事件，从而使策略和智能体能够主动地根据潜在的动作进行相应的调整。

4.3.5 智能内生网络 (IEN)

目前，以深度学习和知识图为代表的 AI 技术发展迅速。通过将 AI 技术引入网络，对网络及其相关用户、服务和环境的多维主客观知识进行表征、构建、学习、应用、更新和反馈。基于所获得的知识，可以实现网络的立体感知、决策推理和动态调整。因此，网络可以根据我们需要的任何新服务自动进行更改。我们将这样的网络称为“智能内生网络”。智能内生网络受益于自进化的闭环结构，如图 35 所示。

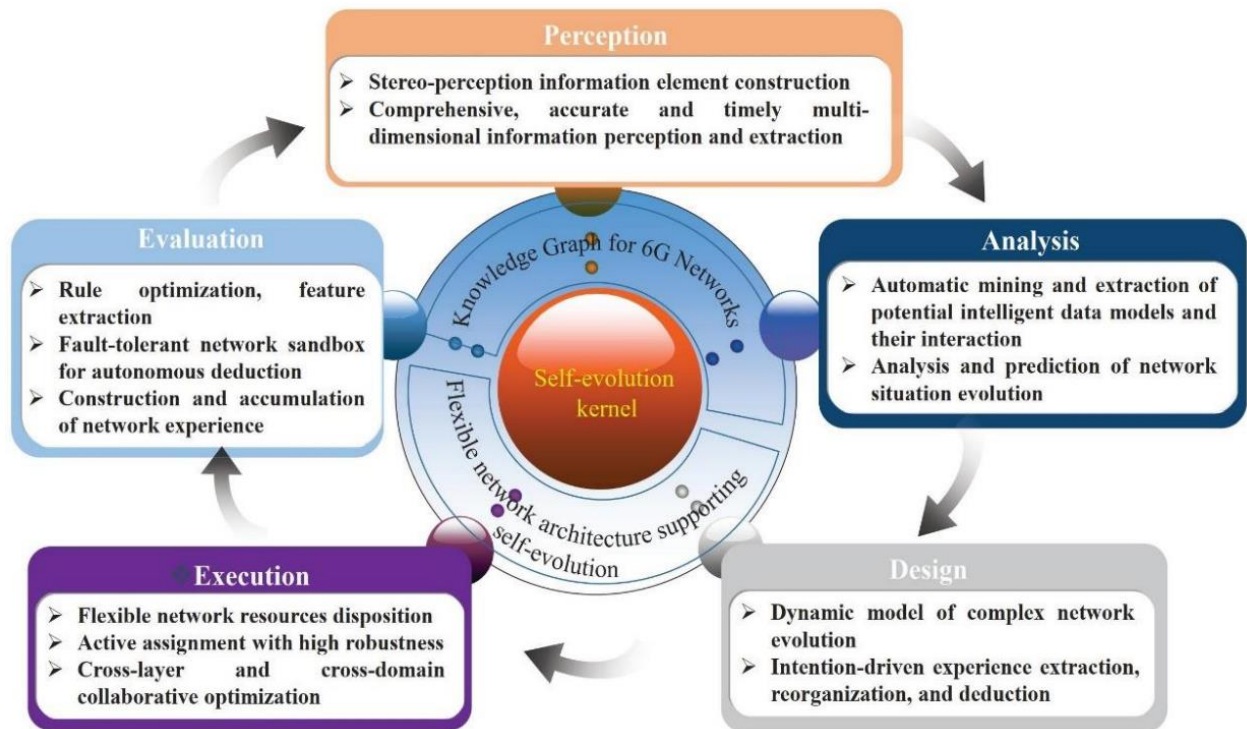


图 35 智能内生网络的自我进化闭环结构

构建智能内生网络需要解决的理论问题和关键技术包括：

- 6G 网络的知识图表征与构建技术。
- 全息网络立体感知技术
- 柔软而灵活的网络资源调度机制
- 网络自进化机制

4.3.6 面向 6G 的信息、通信与数据技术融合

预计在 6G 时代，信息通信和数据科技将会更加深入地融合，从而加速网络设计的各个方面的创新和集成，例如网络架构、核心网络、无线接入网、物理层和更高层的协议栈。

大数据技术和 AI 在无线通信行业的蓬勃发展，让人们对未来无线网络的智能化程度产生了丰富的想象。

4.4 内生安全

4.4.1 现状和主要问题

(1) 经典密码学

为了防止潜在的窃听者截获密钥，必须通过安全信道从发射端向接收端传输密钥。

(2) 物理层安全

利用无线信道的随机性来生成用于加密机密信息的密钥，并利用一系列其他复杂的技术来降低窃听者和其他恶意用户收到的信号质量。

(3) 量子密钥分发和安全直接通信

与经典密码学需要两个信道不同，量子密钥分配系统中使用了三个信道，即不安全的公共信道、量子信道和经过认证的公共信道。

4.4.2 6G 中的网络安全隐患问题

(1) AI 带来的安全和隐私问题

包括数据安全、AI 模型和算法安全、AI 软件系统和框架的漏洞、AI 技术的恶意利用等。

(2) 物联网网络中的安全问题

物联网设备的安全能力受限于其计算能力、存储空间和电池能量。

(3) 无人机网络中的安全问题

受限于功率和重量的严格要求，无人机无法像地面基站那样支持复杂的加密算法。

4.4.3 6G 网络安全和隐私问题的可能对策

(1) 传统的密码学方法与更轻量级的算法

(2) 基于物理层的方法

(3) 基于量子的方法

(4) 基于区块链的方法

(5) 基于人工智能的方法

五、总结与展望

本文指出了当前 5G 无线通信网络的局限性后，提出了 6G 无线通信网络的愿景、使能技术、四种新的范式转变以及未来的研究方向。同时，提出了新的性能指标和应用场景，如提供全球覆盖、增强的频谱/能量/成本效率、更高的智能水平、安全性和弹性等。此外，以云 VR、IoT 行业自动化、C-V2X、数字孪生体域网、节能无线网络控制和联邦学习系统为例，本文给

出了 6G 无线通信网络的行业纵向图，并给出了实现 6G 需求的使能技术。本文研究了新型的空口和传输技术，如新波形、多址接入、信道编码、无蜂窝大规模 MIMO、动态智能频谱共享与接入、基于区块链的无线接入网络、光子定义无线电、uRLLC 的多连接技术等。同时，还研究了新型网络架构，包括软件定义网络/网络功能虚拟化、网络切片、基于服务的架构、认知服务架构、深层边缘节点和网络、无蜂窝和云/雾/边缘计算等。四个新的范式转变被提出，以实现 6G 网络的全面融合，即全球覆盖（卫星、无人机、地面、海洋通信）、全频谱（sub-6 GHz、毫米波、太赫兹、光频段）、全应用（AI 赋能无线通信）、强网络安全。本文各个部分分别指出了未来的研究方向，希望能够为学术研究者 and 业界专家在未来 6G 无线通信网络的发展方面提供一些启示。

临菲学堂课程推荐：

- [循环冗余校验码（CRC）的原理与 MATLAB 仿真](#)
- [无线通信空间调制的基本原理及 MATLAB 仿真](#)
- [无线通信码索引调制的基本原理及 MATLAB 仿真](#)



临菲信息技术港



临菲信息技术港公众号



临菲学堂



临菲少年