



RAN 能力开放白皮书 1.0

(2025 年)

发布单位：中移智库

**编制单位：中国移动通信研究院、中关村泛
联移动通信技术创新研究院**

前 言

本白皮书旨在系统阐述无线接入网（RAN）能力开放的产业驱动力、核心应用场景、关键技术内容及开放路径，提出面向未来的开放框架与产业倡议。通过梳理标准化进展、实践案例和演进方向，我们致力于为运营商、设备商及垂直行业提供无线网络开放的参考蓝图，推动开放无线生态发展。

当前，网络智能化与开放化已成为全球通信产业的核心趋势。一方面，5G-A/6G 网络向云化、服务化架构演进，催生了对网络能力解耦与开放的内在需求；另一方面，工业互联网、车联网等新业态亟需深度调用无线资源以支撑差异化业务体验。在这一背景下，RAN 作为使能业务的关键层，其能力开放已成为释放网络潜能、赋能千行百业的必然路径。本白皮书首先剖析开放浪潮的深层驱动力，对比分析了网络开放的标准化历程与现状；然后在开放内容层面，我们聚焦向消费者与第三方应用提供更优质的服务与能力，总结了 RAN 开放的七大典型内容，包括通信能力、数据能力、存储能力、感知能力、计算能力、AI 能力、数字孪生能力。此外，我们提出两种路径开放策略，一是延续式对外开放，指基于现有接口标准渐进扩展，兼容现网设备。二是定制化对外开放，指针对不同的业务场景提供灵活的质量保障。最后，白皮书呼吁产学研共建开放协作体系通过标准互认、测试认证和商业试点，破解接口碎片化等关键挑战。

我们期望本研究成果能推动全球产业伙伴凝聚共识，加速 RAN 能力开放从技术构想走向现实，为 6G 时代“网络即服务”奠定基础。

目 录

1. 背景	1
1.1 RAN 网络开放驱动力	1
1.2 网络开放的标准化现状	4
2. RAN 能力开放内容	5
2.1 通信能力	5
2.2 数据能力	5
2.3 存储能力	7
2.4 感知能力	8
2.5 计算能力	9
2.6 AI 能力	9
2.7 数字孪生能力	11
3. RAN 能力开放路径	18
3.1 路径 1：延续式对外开放	18
3.2 路径 2：定制化对外开放	21
4. 未来展望	24
缩略语列表	25
参考文献	27

1. 背景

1.1 RAN 网络开放驱动力

从 1G 到 5G，网络的智能化和开放化随着业务需求经历了从无到有、从简单到复杂、从封闭到逐步开放的过程。在 1G/2G 模拟与数字时代，网络采用完全封闭的硬件架构和专用协议栈。3G/4G 阶段，IP 化转型与软硬件解耦催生了网络虚拟化，并且从 4G R12 开始通过能力开放框架指定了一系列的网络能力开放。5G 时代标志着网络开放化与智能化的融合，具体的，5G 核心网在 SDN/NFV（软件定义网络/网络功能虚拟化）技术的基础上实现了控制面与用户面解耦，进一步引入 SBA（服务化架构）将网络功能模块化为独立服务，支持按需调用与组合，5G 核心网定义 NEF（网络开放功能）对外提供统一 API（应用程序编程接口），开放网络数据（如 QoS 策略、位置信息）和服务（如流量管理），并完成第三方鉴权与能力适配，构建了网络开放平台[1]。

表 1.1 移动通信网络业务需求与开放历程

移动通信网络	1G	2G	3G	4G	5G
业务需求	模拟信号传输，仅支持语音通话；没有考虑到数据服务的需求，也缺乏灵活的网络架构。	数字信号传输，开始提供数据传输功能，支持短信和低速数据服务（如 GPRS、EDGE）。	支持高速数据传输，提供移动互联网接入，如视频通话和移动数据。	4G 是完全基于 IP(互联网协议)网络的通信系统，提供高速的移动互联网和多媒体服务，支持视频流、高清流媒体等。	5G 引入了超高的传输速率、极低的延迟、大规模设备连接等特性，对垂直行业产生了深远的影响，推动了物联网、自动驾驶、增强现实、虚拟现实等新兴技术的发展[3]。

开放特性	1G 没有能力开放，1G 网络是封闭的、专有的技术，每个运营商都有自己的技术标准和架构。	2G 没有能力开放，不支持多样化的第三方应用开发，但后期通过一些补充技术和协议实现了短信服务、定制的语音服务等。	3G 没有能力开放，但是提出的业务开放平台 OSA[2] 是针对一组开放、标准化的 APIs 的规范提出的倡议技术，是能力开放标准化的尝试。	4G 初步实现了网络能力开放。通过 API（应用程序接口）和标准化协议实现。4G 中后期，NFV（网络功能虚拟化）和 SDN（软件定义网络）、RESTful API 技术达到了可大规模应用，为网络能力的开放和灵活性提供了基础。	5G 通过 3GPP 系统化描述能力开放，在 3GPP R15 版本中，定义了 NEF。并通过 SBA、CAPIF（通用的 API 开放框架）、网络切片、边缘计算等实现了更多的网络能力开放。
------	--	--	--	---	---

1G-5G 的能力开放一直是由业务驱动，从语音到对数据能力的支持驱动了 API 技术的发展和更多服务的开放，同时随着业务多元化的需求相继开放了 QoS（服务质量）服务、边缘计算能力、网络切片等。后期 4G 和 5G 的开放主要体现在核心网灵活的架构，运营商能够根据需要动态配置网络资源，主动提供给不同的业务。相对来说，无线能力的开放是非常有限的。

面向 6G，RAN 能力开放将为赋能泛在轻量化智能终端和低时延业务应用提供更多可能。随着 AI、感知等技术的发展，自动驾驶、机器人、XR 等业务对 6G RAN 侧能力有了新的需求，RAN 侧有更多、更深的开放能力以支持高性能的 6G 业务。通过网络能力开放，运营商可以向第三方应用开放网络能力，从而使能创新业务。并且随着移动通信网络逐步向服务化、开放化、白盒化发展，也为网络能力开放的应用带来了优势。具体来说，无线网络的能力开放需求与价值来源于以下三个方面。

a. ICDT 融合驱动网络能力升维

首先，网络内部具有开放需求，核心网（例如 RAN 与核心网网元 NWDaf 之间、RAN 与核心网网元 NEF 之间、网管系统内部）与 RAN 之间需要更高效的信息共享，从而构建跨域能力共享平台以实现高效的信息流通与能力共享。从 6G 网络自身可提供的服务与支持能力来看，相较于传统的移动通信网络，未来无线网络可能集成通信、计算、大数据、感知、AI、安全等多能力。此外，基于数字孪生构建网络能力沙箱，支持第三方在虚拟化环境中测试能力组合策略（如工业 AR 场景下通信-计算联合优化）。

b. 赋能轻量化智能化新型终端

对于轻量化新型终端，例如 XR 眼镜、无源物联网终端等设备可以由网络侧提供算力按需开放、协议动态适配等能力，以突破终端硬件限制。在网络智能协同层面，需打通终端本地 AI 与云端全局模型的联合训练通道，开放无线信道指纹、干扰图谱等多维数据流，构建分布式智能计算范式。

c. 个性化业务与新的商业模式

5G 核心网通过 NEF 实现的开放其本质为“被动响应式”能力调用（如位置信息查询、AF 触发策略更新）。当第三方应用通过 NEF 发起请求时，需依赖核心网控制面流程逐级协调 NF（网络功能）完成数据采集，导致开放效率受限。例如：

- 难以满足时延敏感型业务，车联网碰撞预警需端到端时延<10ms，而当前 V2X 方案依赖 MEC 的集中式处理，难以满足毫秒级需求；
- 高并发场景性能局限，大规模物联网场景下，NEF 的单点架构难以支撑百万级设备并发请求；
- 用户面能力割裂，MEC 应用虽可获取 RAN 上下文信息，但无法直接干预 RAN 配置（如波束赋形、频谱分配）。

无线网络天然地具备靠近用户、分布部署的优势，因此无线网络与第三方应用之间的双向开放将更有利于能力的高效开放与共享，更好地满足用户业务的定制需求。

因此，网络中可以开放的内容将不仅仅包括通信数据，深挖多维能力的价值可以为网络变现带来新的机会。同时，通过统一的 API 定义 RAN 多维能力，既能增强无线网络的对外赋能作用，又能推动产业互联互通。

1.2 网络开放的标准化现状

目前，全球多个标准化组织正在推进网络能力开放工作。

3GPP 作为全球通信标准的核心组织，在 5G 标准中定义了网络能力开放框架[1], [4]，使运营商能够通过 API 向第三方开放网络能力，其核心网能力开放成熟。3GPP 能力开放框架可以定义为两类，一是将 4G 的服务能力公开功能(SCEF)或 5G NEF 通过网络北向接口将核心网能力公开给外部应用程序。二是通过使能抽象使能层 API（例如，SEAL、EDGEAPP、V2XAPP 等）开放给各种垂直应用，这些是在网络北向接口已经提供的抽象功能之上提供的并行抽象层，并且也可通过 CAPIF 对外开放[5]。从实际应用上看，第二类技术方案目前尚未形成成熟的商业落地模式。面向 6G 的标准化工作，在 2025 年 3 月的 3GPP Workshop 会议上，多家公司（例如中兴、英特尔、联想、中信科移动等）就 RAN 的能力开放分享了观点，提出定义 RAN 能力开放 API 向第三方提供更多空口能力信息。同时，多家公司也提出希望 RAN 沿用现有通用技术框架，实现 RAN 和 CN 统一的能力暴露。

O-RAN 联盟将推动无线接入网络（RAN）的开放化作为目标愿景之一，聚焦 RAN 的开放解耦和智能化，提出了近实时 RIC 和非实时 RIC 方案[6]，支持第三方应用通过 xApps 和 rApps 进行无线相关能力的调用。O-RAN 联盟已完成 RAN 对外提供计算服务、通算一体服务研究，正在制定通算一体服务相关标准。目前 O-RAN 的验证场景多数是无线网络性能优化。

GSMA 于 2023 年推出 Open Gateway 倡议，聚焦商业化 API 生态。目前有 40+运营商，100+云服务商、科技公司等合作伙伴等参与，其中已经签约的运营商占全球移动市场份额的 75%左右[7]，部分运营商开始收费模式，探索盈利路径。其目标是方便开发者和云服务提供商更快地接入运营商网络，将电信网络能力转化为标准化服务。但是开放的接口通过核心网 NEF 功能实现，RAN 侧能力开放有限。

2. RAN 能力开放内容

对于移动通信网络，能力开放一般是指运营商网络的资源、功能、服务开放给用户、第三方开发者、企业或者其他运营商。对于 RAN 能力开放，是指开放新的无线网络的通信、数据、存储、感知、计算、AI、数字孪生等能力给用户、第三方开发者、企业或者其他运营商。

为适配多样化用户与业务需求，本节根据开放内容的维度阐述 RAN 开放的内容与应用场景。

2.1 通信能力

RAN 通信能力开放是指第三方应用可以与接入网协同改变基站策略，为终端提供差异化的频谱资源，QoS 保障，无线资源管理策略等。

典型用例：

应急救援：随着无人机、机器人业务的普及，其在特殊场景的需求越来越广泛，例如无人机在自然灾害等特殊场景执行物流配送、救援任务时，可以使用 RAN 开放专用安全通信频段，实现位置广播与防碰撞，保障超视距飞行安全，提升任务执行准确度和效率。

自动驾驶：基站向第三方提供 CSI 预测模型输入，支持设备优化调制编码策略。自动驾驶汽车根据信道质量动态调整传输速率，确保低时延通信。

2.2 数据能力

RAN 数据能力开放即将无线网络中的数据库，以及数据的采集、生成等能力向第三方开放。也就是说，第三方应用可以在按需定义的控制逻辑下访问和利用 RAN 中的实时数据、网络状态信息、用户信息等，以及网络处理优化后的数据，从而使得第三方可以开发新的服务或优化现有应用。

(1) RAN 数据集服务。该服务为 RAN 可开放的数据集提供支持。可以开放的数据类型包括如下几类：

1) 通信服务数据

- 频谱地图：提供频段状态，如占用时隙、波束方向、覆盖区域，支持动态频谱分配。
- 邻区干扰矩阵：提供跨小区干扰热图，如辅助无人机避开干扰频段。
- 网络拓扑结构：提供基站数量、用户密度等信息，如辅助无人机、机器人等的路径规划。
- 信道模型：提供信道多径衰落模型、路径损耗模型等，辅助终端优化通信质量。
- 硬件参数：如用户设备和基站的传输功率、接收灵敏度等。

2) 基站 O&M 数据

- 网络性能指标：小区负载、用户数、吞吐量、缓冲区队列深度，实时反映网络状态。

3) 终端数据

- 用户位置与移动性数据：通过基站测量获取脱敏后的终端位置（经度/纬度）及移动轨迹，用于无人机、物流机器人的障碍规避与路径规划。

(2) 数据采集服务。该服务为应用提供可定制的数据采集逻辑。

目前无线接入网中的数据采集是一种基于网络架构分层功能的采集，例如 AAU（有源天线单元）通过射频单元可以实时采集无线信道状态信息，DU 可以采集基带处理相关的实时数据，包括用户面传输时延、调度队列状态、MAC 层协议交互日志等，CU 则可以聚合多站点数据，采集非实时全局信息（如网络切片状态、跨基站负载均衡参数、用户移动性轨迹）。DU、CU 中的功能实体可以采用内部接口上报数据，而信道状态等信息主要通过终端上报。但随着应用对于数据开放类型和实时性要求的提高，例如面向应用 A 和应用 B 的开放数据均来自基站 MAC，现有系统中可能会在应用 A 的触发下调用基站 MAC 上报，在应用 B 的触发下再次调用基站 MAC 上报，造成资源浪费。针对不同的应用需求分别定义基站私有接口实现，采集效率低下，对应用的 QoS 需求缺乏有效保障。此外不同终端采集的数据，例如信道质量信息可以开放给其它用户或网络，以协助网络做出更优的决策，节约网络整体资源。

未来 RAN 数据采集的模式将包括定制与通用两类模式。通用模式面向标准

化和互操作性需求，主要通过网络主导标准化的开放逻辑，即数据通过统一接口和协议提供标准化、轻量化的开放数据，以支持快速接入与规模化扩展。定制开放模式聚焦特定行业或场景的差异化需求，由网络与应用共同协商数据的开放逻辑，即可以通过新型灵活接口和私有协议实现数据的采集、生成方式以及数据格式。

典型用例：

网络优化：RAN 业务过程中会产生信号强度（RSRP）、信干噪比（SINR）等相关数据，这些数据已广泛用于无线优化，例如进行天线倾角调整、开展功率分配，消除覆盖盲区等场景。随着数字孪生、意图驱动等新型优化方法与手段，对 RAN 数据的需求也越来越丰富、越及时。

工业互联：通过 RAN 侧获取的数据，用途广泛，不仅拓展移动通信网络的能力，还可以用于多个垂直行业，参与更多价值链的创造。例如，RAN 可通过部署在工业环境的智能反射表面和分布式传感器，实时监测设备振动、温度、机械臂运动轨迹，将这些数据对外开放，应用于工业生产、医疗健康等多个行业。

2.3 存储能力

RAN 存储能力开放是指将 RAN 侧的存储资源开放给第三方用于提供数据缓存/存储支持,第三方应用可以在按需定义的控制逻辑下访问和使用 RAN 存储能力，从而使得第三方可以优化应用。

无线接入网的数据存储功能已从基础配置存储向边缘智能存储演进，其应用深度依赖场景需求与网络架构升级。5G/6G 时代，存储能力将成为 RAN 支撑低时延、高可靠服务的关键技术要素。

典型用例：

多用户内容分发：利用 RAN 侧的存储资源，将内容分发网络（CDN）节点延伸至 RAN，减少用户访问视频、网页的延迟，尤其适用于体育赛事、录直播视频业务等高并发场景。

高精地图缓存：面向车联网用户，存储资源还可以用于缓存更新高精度地图，车辆通过基站就近获取局部高精地图相关数据（如周边建筑三维模型、和个性化显示标签），减少从云端调取的延迟。

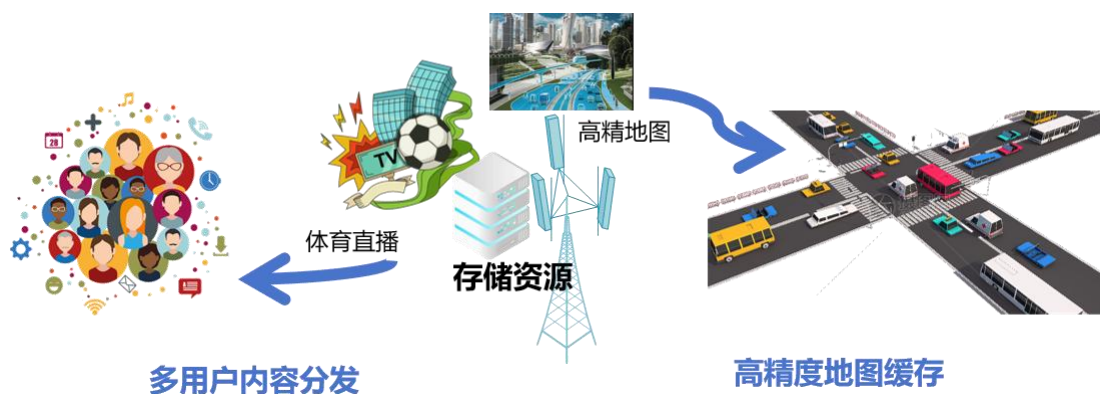


图 2.1 RAN 存储能力开放场景

2.4 感知能力

RAN 感知能力开放是指将 RAN 的独立感知、协作感知能力开放给第三方用于检测物体有无、定位、和环境重构等场景,第三方应用可以在按需定义的控制逻辑下访问和使用 RAN 感知能力。

(1) 独立感知能力：指由 RAN 的单个基站进行感知，即单个基站发送感知信号到达目标，进而接收和处理目标反射后的感知回波信号，执行感知测量和估计。可以用于存在性检测、侧速测距等。

(2) 协作感知能力：利用移动通信网络中大规模节点（多基站，多 UE）协作交互进行感知，共享测量信息，进行数据融合处理。可以实现类似于通信中空间分集接收 处理增益，提升感知精度。

典型用例：

无人机监测：面向低空安全，基站向无人机监管系统开放 RAN 通信感知功能，用于实时监测无人机飞行的航迹、高度、速度、位置、航向等数据，利用这些数据，可以实时监控和预警“黑飞”、或者记录无人机操作者信息，便于执法部门溯源。

智慧城市：通过通感一体化设计，开放 RAN 感知功能，可获得被感知物体的大小、形状、速度等信息，成为分布式智能感知系统，从而可将无线通信、环境感知与智能计算深度融合。例如，利用 6G 基站发射的毫米波/太赫兹信号，实时扫描道路环境（如障碍物、行人、车辆），构建厘米级精度的 3D 动态地图，弥补摄像头和雷达的盲区，移动通信可广泛应用于智慧城市中的自动驾驶、智慧物流等场景，从而提供超越连接的能力。

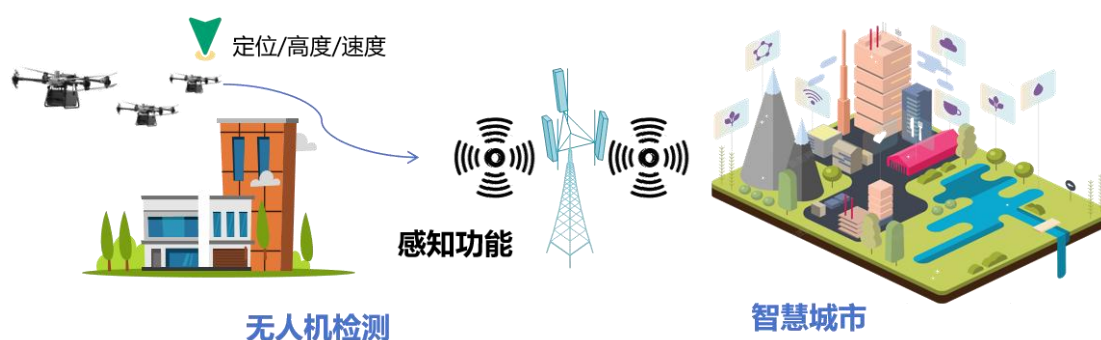


图 2.2 RAN 感知能力开放场景

2.5 计算能力

RAN 计算能力开放是指将基础的计算资源以及形成的计算功能开放给第三方，是 AI 能力包含的一种基础能力，但是不限于用于 AI 计算功能，同时可以应用于基础数据处理、图形渲染等。

典型用例：

云游戏时延优化：利用基站通用算力资源，例如 GPU 资源池开放给云游戏提供商/运营商实现低时延服务，为有需求的 VIP 游戏用户群体单独使用 RAN 开放的资源部署游戏部分功能，或者为 XR 游戏提供低延时图形渲染等，优化端到端时延，让算力以加速套餐等形式实现商业变现和增值。

2.6 AI 能力

RAN AI 能力开放是指将 RAN 侧的算力，模型，数据、通信能力和基于这些能力形成的 AI 功能向第三方开放。第三方应用可以在按需定义的控制逻辑下访问和使用 RAN 的 AI 能力，从而使得第三方可以优化 AI 应用，为终端用户提供更好的 AI 业务体验。

(1) 算力：可开放的物理计算资源能力，如 CPU、NPU、GPU、TPU，用于执行 AI 计算功能。

(2) 模型：泛化性强的通用大模型（如 ChatGPT 系列、DeepSeek 系列等）和针对某种业务的定制化模型。

(3) 数据：提供的 AI 业务相关的数据用于业务执行及优化等。包括：

- 算力资源状态信息：如计算资源开放状态、计算资源的类型，计算

资源的占用率。

- AI 计算的结果及中间结果：在分布式或者是多协同的计算任务中，需要考虑对外开放计算的中间结果。

(3) 通信：用于保障 AI 数据的传输的终端到基站的空口资源及传输策略。

(4) AI 功能：针对不同业务为第三方提供有不同类型的 AI 功能，包括但不限于以下功能：

- AI 推理：用训练好的模型接收用户的输入数据（如文本、图像等），通过模型计算生成预测或输出用户想要的结果。
- AI 训练：通过大量的数据和算力资源，让模型（如神经网络）调整其内部参数，提高任务性能，如联邦学习和强化学习中的训练。
- 数据处理功能：如模型的剪枝、数据清洗等
- 图形渲染：利用 AI 算法为 XR 用户实时生成虚拟场景或对象。
- 视频编码：利用 AI 算法为 XR 用户提供压缩率高的高质量视频编码，同时可以节省无线带宽资源。

典型用例：

沉浸式交互优化：RAN 开放 AI 推理能力，赋能智能体（如虚拟数字人、服务机器人、车载助手等）实现实时情感交互，通过语音、表情、生理信号（如心率、语调）实时分析用户情绪（如愤怒、愉悦、焦虑），可以降低端到端时延，确保智能体反馈自然流畅，避免卡顿。

自动驾驶决策：RAN 开放 AI 推理能力，赋能自动驾驶车辆，当车辆前方突然出现货物掉落、行人“鬼探头”、大面积“炮弹坑”等糟糕的道路情况，传统车载情况可能因天气或其他情况无法识别，可利用 RAN AI 能力融合感知到的环境信息实现车辆的紧急制动，包括减速、改变行驶路径等。

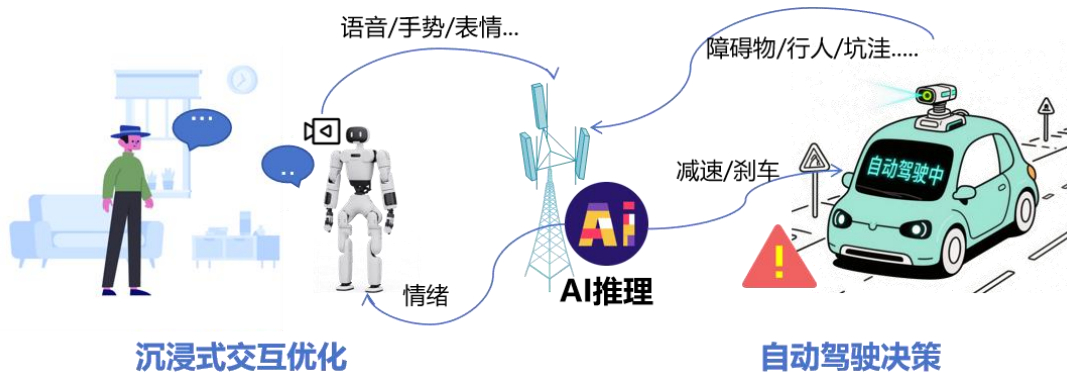


图 2.3 RAN AI 能力开放场景

2.7 数字孪生能力

网络数字孪生通过构建与物理网络实时映射的孪生体，对第三方开放如数据生成、网络仿真、性能预测、新技术/软件升级前的可行性验证等能力。第三方开发者、垂直行业、应用提供商或科研单位等无需直接接触底层物理网络，即可安全、高效地开展创新服务验证和网络新技术、新设备迭代升级。这不仅促进了网络升级演进的敏捷性与可控性，还能在保障网络运行安全的同时，有效保护用户数据和网络的隐私，构建可信、开放、智能的网络生态环境。网络数据孪生开放类型可概况为三种：孪生数据开放、孪生模型开放和孪生平台开放。

（1）孪生数据开放

基于网络数字孪生，在任意条件下，模拟网络复杂动态场景，生成接近物理网络真实的数据，尤其针对隐私受限数据、少样本故障数据等难以获取的数据，向第三方提供数据，用于网络性能分析、AI 训练等。

1) 少样本故障和异常类数据

在现网中故障事件发生概率较低，若需获取大量故障和异常数据需较长的周期，因此可基于孪生网络模拟不同的故障场景，生成和现网接近的故障和异常数据开放给第三方辅助网络故障定位与修复。包括小区退服、覆盖盲区、邻区干扰、RRC 连接建立失败、切换失败、资源调度异常、时钟同步错误、射频链路异常等类型。每类数据均配套关键性能指标（如 SINR、CQI、PRB 利用率、吞吐量等）及故障发生条件，广泛适用于 AI 模型训练、网络鲁棒性评估及第三方运维优化研究。

2) AI 训练数据

在基于 AI 的网络参数优化、负载均衡、流量调度等场景中是基于监督学习实现的，因此需要带标签的网络数据。可在孪生网络中设置不同程度的网络性能和状态，然后记录相关的结果，得到带标签的训练数据。具体输出类型格式如下：

- 输入特征：孪生生成的策略参数、网络状态，环境上下文等元信息等。
- 标签输出：在孪生网络中监测记录的网络性能指标结果（如：吞吐量、成功率、时延、体验评分等）

比如网络参数优化类 AI 训练数据：

- a. 输入：不同天线倾角、发射功率配置，标签：小区覆盖范围变化、接入成功率、吞吐量变化；
- b. 输入：不同小区切换门限设置，标签：切换成功率、Ping-Pong 事件发生率；
- c. 输入：Beamforming 配置参数，标签：用户信道质量指标（CQI、SINR）和用户吞吐量变化。

3) 网络行为与流量仿真数据

对第三方开发者而言，设计调度算法或 QoE 优化机制时，需要仿真不同类型业务的流量行为（如突发性、周期性、低延时需求等）。

数字孪生可模拟多种业务场景下的用户行为模型与对应流量曲线，包括视频流、AR/VR、车联网、工业传感等，生成动态流量数据集，辅助第三方在无真实接入条件下完成算法预验证与模型训练。

4) 切片级性能与隔离特性数据

在网络切片场景中，不同租户或服务间的性能隔离能力是关键评估指标，但真实隔离场景下的数据不易统一采集。基于孪生网络可模拟多个租户并发运行在共用基础设施下的资源竞争场景，输出切片 KPI 变化、SLA 保障情况等数据，供第三方评估其服务在共享环境下的稳健性与资源占用行为。

（2）孪生模型开放

NDT 通过对物理网络的实时建模，可以生成和存储多种具有高开放价值的模型，包括三维环境模型、无线环境模型、站点拓扑模型、用户分布模型以及业务模型等，为第三方平台、厂商、高校及研究机构提供支持，助力自动驾驶、无线技术研发、业务优化等领域的创新与发展。

1) 三维环境模型

三维环境模型通过整合通感一体化技术、无人机（UAV）航拍、广泛部署的摄像头以及其他传感器数据，实时构建并更新动态三维环境模型，涵盖道路、建筑、障碍物等信息，具有高精度和细粒度的特点。基于此，第三方车联网平台可利用该模型获取实时、动态的三维环境数据，用于车辆路径规划、障碍物规避及协同驾驶。相比传统摄像头受限于分辨率、部署位置及成本，NDT 提供全方位的环境感知，显著提升自动驾驶的安全性与效率。此外，VR/AR 内容提供商可

基于该模型开发沉浸式应用，如虚拟旅游或实时导航。为此，能力开放平台中的 NDT 模块可以通过 API 接口提供实时或定期更新的三维环境模型，支持按区域、时间或分辨率定制化输出，确保数据隐私与安全性。

2) 无线环境模型

无线环境模型基于射线追踪、电磁波传播模拟及实时网络参考信号数据，构建高精度的无线信道模型，反映真实物理网络的信号传播特性、多径效应及干扰情况。基于此，高校及第三方通信设备厂商可利用该模型进行新技术（如通感一体化、智能反射面）的仿真验证，发现潜在问题并优化方案，降低实际部署前的风险。由于模型基于真实网络数据，其结果具有更高的业界可信度。此外，第三方设备厂商可通过该模型测试终端设备的性能，如天线设计或信号接收能力，确保产品在复杂环境下的鲁棒性。为此，能力开放平台中的 NDT 模块可以提供周期性更新的无线环境模型，或通过算力平台按需生成特定区域、频段的模型，满足研发需求。

3) 站点拓扑模型

站点拓扑模型记录真实物理网络中基站、接入点及其他网络设备的地理位置、连接关系及参数配置，形成网络拓扑的数字化映射。基于此，第三方通信设备厂商及高校团队可利用该模型设置仿真参数，模拟真实网络环境下的技术方案（如太赫兹技术部署方案等），提升实验结果的可信性。为此，能力开放平台中的 NDT 模块可以提供标准化的站点拓扑模型，支持按区域或网络类型（如 4G、5G）筛选，低成本输出，适用于多种仿真平台。

4) 用户分布模型

用户分布模型基于实时网络数据，分析用户在地理位置、时间段及网络使用行为的分布规律，生成动态的用户密度与行为模型。基于此，高校及第三方设备厂商可利用该模型设置用户分布参数，模拟真实场景下的网络负载与性能表现，提升仿真结果的真实性。此外，第三方零售或服务行业可结合用户分布模型优化门店选址或营销策略。为此，能力开放平台中的 NDT 模块可以提供匿名化的用户分布数据集，支持按时间、区域或用户类型的定制化输出。

5) 业务模型

业务模型通过分析来自不同区域、不同应用的流量数据，构建用户在区域性、

时间性及业务类型上的兴趣分布模型，涵盖视频、游戏、社交媒体等多种业务类型。基于此，第三方互联网应用厂商可基于该模型了解全局用户行为趋势，优化内容推荐算法、缓存策略或服务部署。例如，视频流媒体平台可根据区域性流量高峰调整 CDN 节点资源分配。此外，第三方广告平台可利用业务模型分析用户兴趣分布，精准投放广告，提升转化率。为此，能力开放平台中的 NDT 模块可以提供匿名化、聚合化的业务模型，保护用户隐私，同时支持按区域、业务类型或时间段的定制化查询。

（3）孪生平台开放

通信行业缺乏灵活的现网验证环境，无法为研发和验证提供交互试错环境，数字孪生技术的发展，开放型孪生平台通过构建虚拟与现实结合的仿真环境，面向第三方企业开放网络仿真验证与沙盒测试能力，支持新技术验证与产品部署前评估。通过开放仿真资源、AI 工具链及服务接口，平台为第三方提供轻量化、降低企业研发门槛。开放技术验证支持支持多厂商设备与算法在孪生环境中预验证，确保兼容性与性能达标。业务场景仿真能力开放，支持第三方按业务场景需求灵活组合，生成适配不同任务的组合。

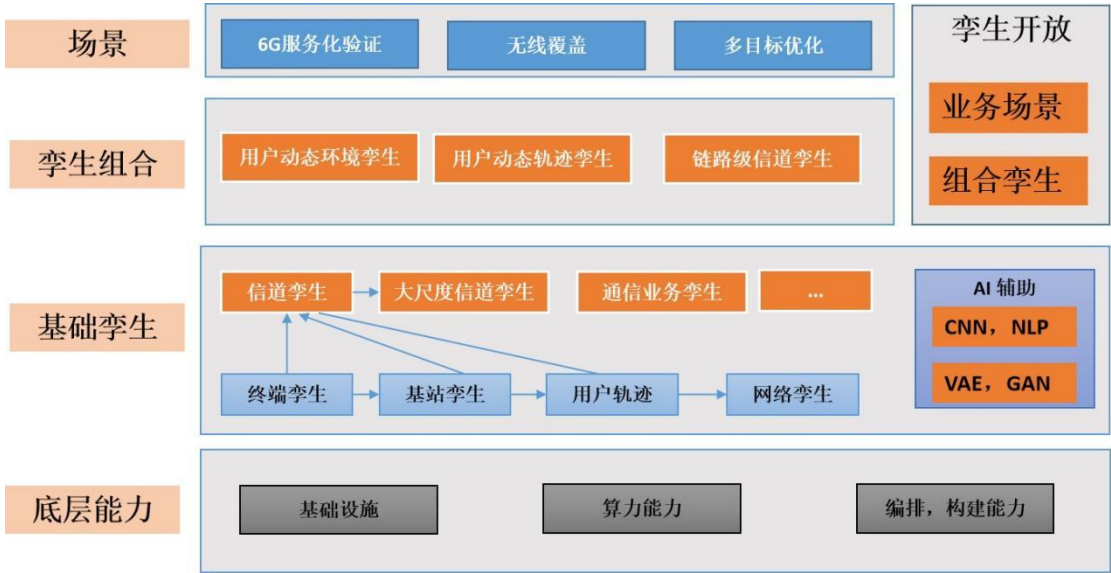


图 2.4 网络数字孪生开放平台

通过构造不同类型的孪生体，并基于业务场景需求完成孪生体的集成组合，从而支通过与第三方的交互，完成平台孪生能力的调用和任务的启停。通过标准化 API 接口交互式开放，开放仿真器调用权限，用户可动态配置参数，如调整

天线参数、优化网络拓扑。

1) 基础孪生验证网络环境：通过调用接口封装、改造进行使用基础孪生平台。

用户行为：用户行为仿真包括轨迹生成和业务生成，其中，轨迹生成实现按天生成用户经纬度序列。

大尺度信道：根据任意子波束的天线方向图，结合每个小区的位置、天线挂高、发射功率、机械方位角、下倾角、地理地貌等，仿真得到每个栅格或用户任意小区、任意一种波束的大尺度信道仿真结果，支撑基站。

信道：基于真实地理环境，针对仿真场景的区域特征室内（Indoor）、城区微小区（Umi）和城区宏小区（Uma）等进行跨区域、多场景的无线信道建模。

基站/终端：基站/终端仿真为系统级孪生，提供了无线资源，无线资源控制（RRC）层、媒体接入控制（MAC）层、物理（PHY）层的无线协议栈流程和功能。

2) 组合孪生验证网络环境：通过多个基础孪生器组合并统一提供服务，满足不同业务场景的任务开放及模型在线训练服务需求。

环境动态用户的协议栈：组合由用户行为仿真、基站仿真和终端仿真组合而成，为用户提供用户粒度及小区粒度的 RSRP、SINR、流量及速率等指标。

真实环境动态用户的覆盖：为提升基站、终端仿真效率，调用上述仿真器中的物理层仿真，结合用户仿真，为用户级及小区级输出 RSRP、SINR 等覆盖指标。

链路级信道仿真：该组合仿真器由信道仿真提供核心能力、结合基站物理层和终端物理层协议栈仿真，为用户提供资源（RE）级的频域信道响应信息。

典型用例：

新网络功能导入验证：数据孪生技术通过构建物理网络的孪生模型，能够对新网络功能在真实环境中的行为进行模拟与预测。在新功能入网阶段，可利用数据孪生平台结合历史运行数据和实时网络状态，开展端到端的仿真验证。不仅可以对配置正确性、协议兼容性、能力。如通过基于模拟压力测试评估其性能边界及故障恢复程中通过对割接前后网络拓扑、路由策略、流量分布等因素比对，可评估割接对现网业务的潜在影响，预判风险点，并制定回滚策略和割接窗口计划。降低因人为操作失误或系统异常导致的业务中断风险。不仅提升了新网络功能的

入网效率和成功率，为复杂的网络割接导入任务提供了智能化、可视化的支撑。

CSI 压缩反馈算法优化：在大规模 MIMO 系统中，基站通常配备多达数百个有源天线，为多个用户设备（UE）同时提供服务。准确的 CSI（信道状态信息）是实现大规模 MIMO 性能提升的关键。下行链路的 CSI 需由用户端通过导频估计获得，并通过反馈链路发送回基站。基站依据反馈信息执行预编码和其他自适应传输优化操作。利用孪生平台的链路级信道仿真能力，能够支持从数据集定制、模型训练到效果验证的完整流程。通过支持多种开放接口形式，接入外部 AI 模型进行训练与评测，推动算法创新与场景的融合。

孪生平台通过构建完善的网络仿真与测试体系，为 AI 训练、网络优化、产品上线等多方面提供强支持。提升各行业的应用系统性能、优化流程和降低风险方面的能力。

随着 RAN 可开放能力的扩展，RAN 侧“原子”能力还可以通过动态编排引擎组合为面向场景的功能链，形成定制化、场景化的服务包，封装无线空口技术细节，提供开箱即用的行业解决方案。

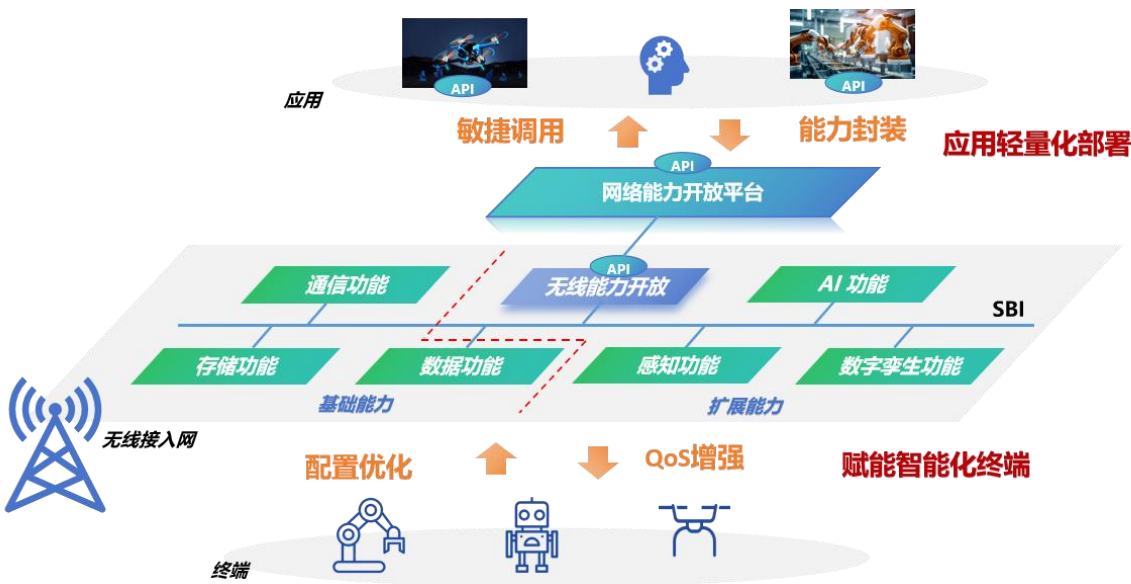


图 2.5 RAN 能力开放示意图

典型用例：

应用敏捷开发部署：第三方开发者无需深入理解复杂的网络基础设施，即可通过标准化 API 快速集成网络能力，缩短特定场景应用的开发周期。例如在无人机执行城市物流配送场景中，无人机需要获取实时障碍物位置与空域拥堵情况，

动态调整飞行高度与路线，避开禁飞区并规避其他无人机。开发者可直接调用运营商定义的无人机路径管理 API，API 内部自动映射到低时延控制信令下发功能、实时空域状态感知功能与航线计算功能三类基站能力，为异构无人机提供航线管理，避免航线重叠引起的碰撞。

端网协同计算：设备厂商可基于开放的 RAN 能力（如 GPU 算力调度、无线资源切片）优化硬件设计（如定制化 AI 加速模组），或与运营商联合推出“网络+终端”协同服务，同时终端根据基站开放信息优化资源配置或工作模式。例如在工业自动化机器人协同控制的场景中，零件运输机器人与装配机器人需同步抓取零件实时协同。第三方应用可直接集成机器人协同服务 API，API 融合调度低时延控制信令下发功能，关键指令还可以采用双链路冗余传输；同时基站提供高精度时钟同步，基于时隙预留机制同步调度机器人动作；此外基站融合感知功能检测人员/设备/机器人位置，指示机器人避开动态障碍物。再例如在全息直播场景中，网络需要为用户提供不中断的通信服务，第三方应用可调用直播通信保障 API。此 API 协同通信功能，流量预测功能与边缘算力功能。当流量预测功能预测到未来时间段可能发生流量高峰时，主动调整通信物理层传输策略与高层重传策略保障直播不中断，同时激活计算功能，指示终端应用启用基站边缘算力进行 AI 算法补偿，保障直播视频质量不发生断崖下降。

3. RAN 能力开放路径

在现有在 3GPP 标准中,网络能力主要是通过核心网 NEF 功能对外开放。但是随着 RAN 集中的能力越来越强大,RAN 应具备一个集中管理能力的功能或平台以及有效对外开放的机制,以便高效利用 RAN 的资源,优化终端、第三方平台的业务性能和用户体验。分析对外开放路径,基于 3GPP 现有开网络整体架构[5]改进,有两种不同的开放路径。

3.1 路径 1：延续式对外开放

如图 3.1 所示,不改变现有 3GPP 能力开放框架,通过增强 NEF 或引入 RAN 能力开放功能实现 RAN 能力开放。

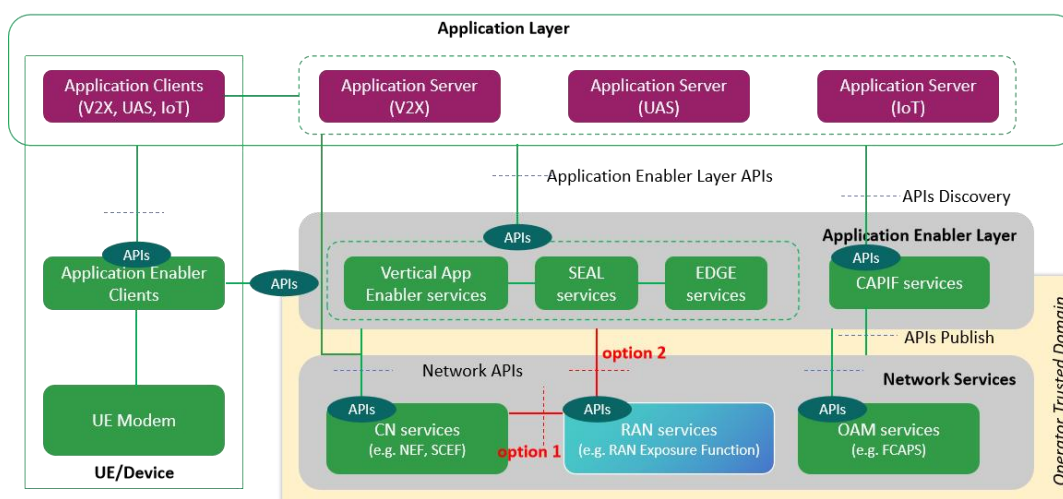


图 3.1 路径 1：延续式对外开放

具体地，该路径又可以通过两个选项实现：

选项 1: RAN 能力通过核心网 NEF 间接对外开放。在这一选项下，RAN 与 NEF 之间可能需要设计服务化接口，以便于 NEF 可以更高效调用 RAN 开放能力，二者之间的关系类似于 NEF 与其他核心网 NF 之间的调用关系。

- **优势：**标准化较成熟，可遵循 3GPP 核心网能力开放设计思路，设计面向 RAN 能力开放的服务；NEF 为整网能力开放的唯一入口，安全性较高。
- **劣势：**延时高，RAN 能力开放相关信令和数据（例如信道状态、位置更新、

计算资源占用等)需经核心网,难以满足超低延时业务。

- 关键技术需求: NEF 增强, NG 接口服务化。

选项 2: 在 RAN 侧引入类似于 CN NEF 的 RAN 能力开放功能(RAN Exposure Function), 该功能可与应用使能层(如 CAPIF)直接交互, 实现 RAN 能力直接对外开放。

- 优势: 时延低, 能力开放路径缩短, 支持面向低时延场景的实时响应(如车联网、工业控制); 增强 RAN 能力管理自治, 可实现 RAN 扁平化资源管理。
- 劣势: 相比于选项 1, 除定义 RAN 开放服务外, 还需要考虑 RAN 能力开放与应用使能层(如 CAPIF)之间的关系, 标准化设计开销大。
- 关键技术需求: NG 接口服务化, RAN 能力开放功能与 CAPIF/NEF 之间的关系。

为便于实际部署, 3GPP TS 23.222 考虑了三种 CAPIF 部署模式, 即明确了三种 CAPIF 与 NEF 之间的关系[8]: (1) NEF 实现完整的 CAPIF 功能; (2) NEF 只实现 service-specific 部分 CAPIF 功能; (3) NEF 只实现 service-specific 部分 CAPIF 功能且支持分布式部署。当引入 RAN 能力开放功能后, 需要进一步考虑 RAN 能力开放功能、NEF 与 CAPIF 的关系。

如图 3.2 所示, 当 NEF 实现完整的 CAPIF 架构时, RAN Exposure Function 需要借助 NEF 实现 API 信息发布, API 认证、授权、日志、计费等功能。RAN Exposure Function 与 NEF 可以是分级的关系, 也可以是独立部署的关系。在分级关系中, NEF API exposure function 可作为 RAN Exposure Function 1 的 API gateway, 辅助其实现 RAN API 对外提供; 在独立部署关系中, RAN Exposure Function 将服务发布到 NEF、并通过 NEF 对外提供给 API invoker 以便于其发现, 但不同于分级模式, RAN Exposure Function 可以通过 CAPIF-2 或 CAPIF-2e 直接将服务提供给 API invoker。

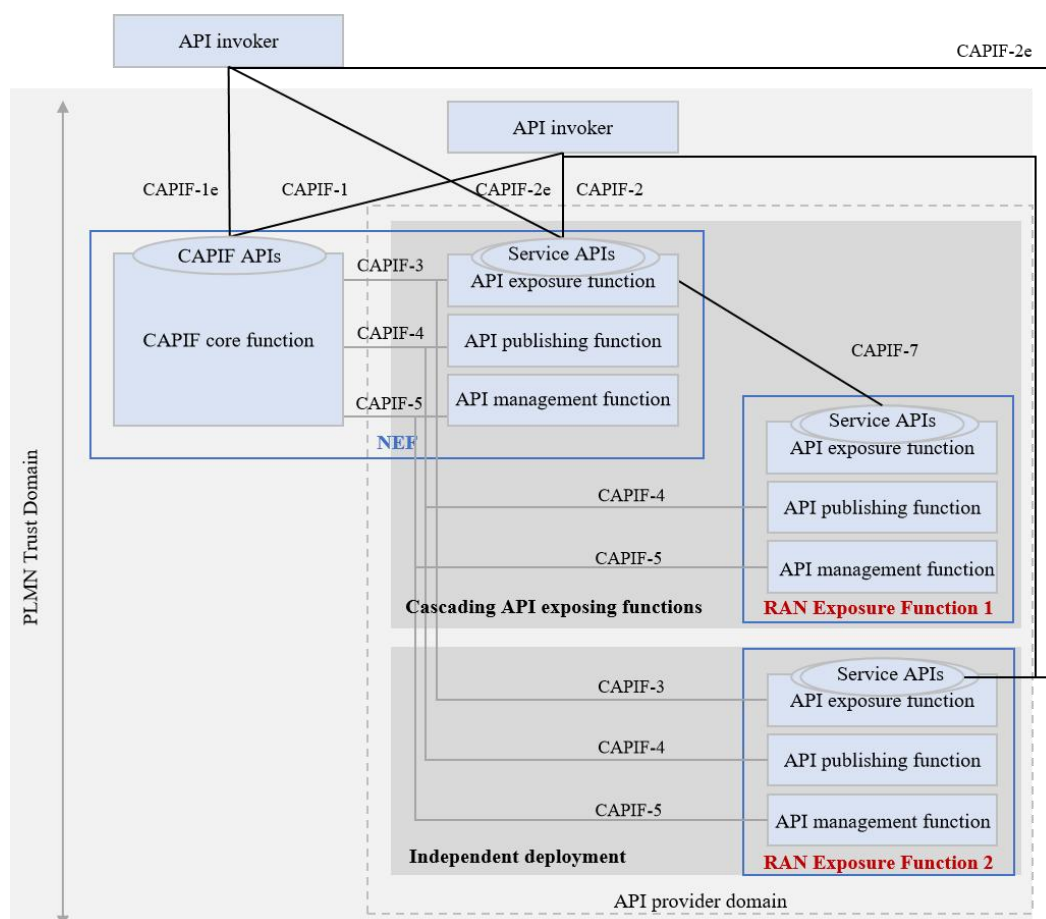


图 3.2 RAN 能力开放功能与 CAPIF/NEF 之间的关系(NEF 实现完整 CAPIF)

如图 3.3 所示，当 NEF 只映射为 CAPIF 的 AEF、APF、AMF，CAPIF core function 由网络能力运营平台实现时，RAN Exposure Function 与 NEF 同样可以是分级的关系，也可以是独立部署的关系，但分级部署的必要性不大。在这一场景下，RAN Exposure Function 与 NEF 功能类似，均需要借助网络能力运营平台独立提供开放服务。

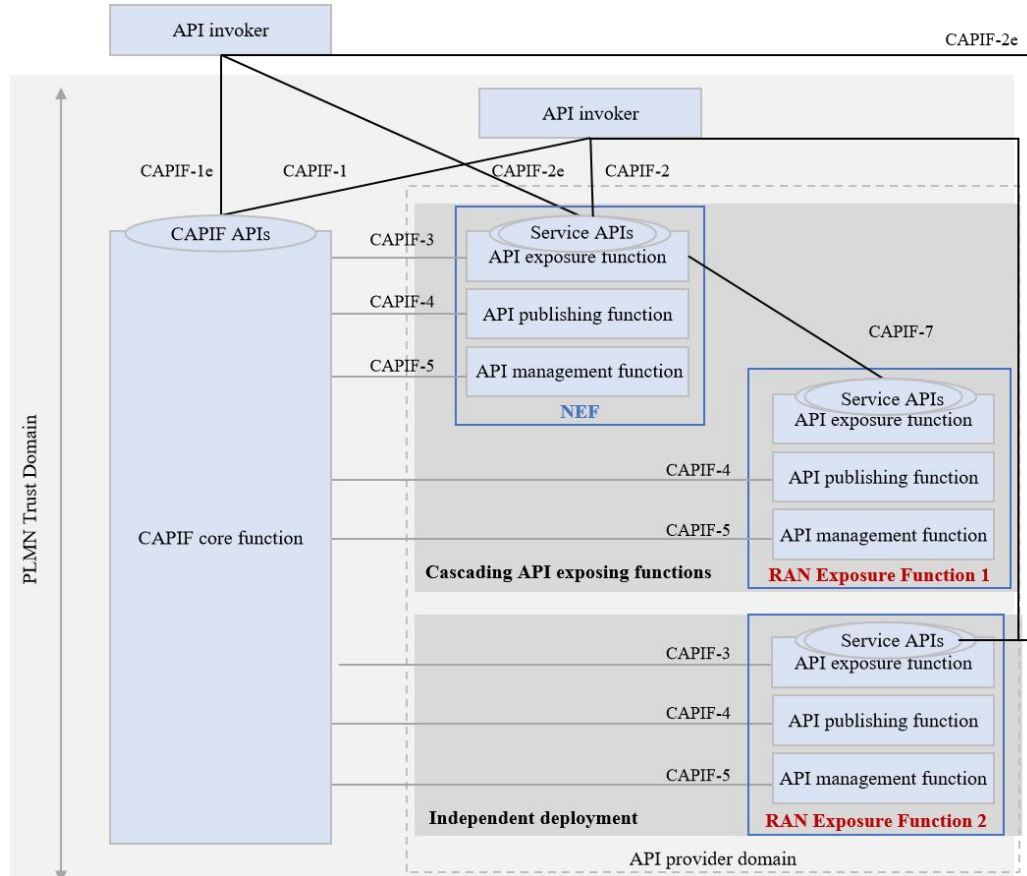


图 3.3 RAN 能力开放功能与 CAPIF/NEF 之间的关系（NEF 只实现 service-specific 部分 CAPIF）

3.2 路径 2：定制化对外开放

从 4G 开始，3GPP 即开展网络能力开放框架设计及相关开放网络能力的定义，5G 以及面向 6G 也将持续优化。虽然 NEF 已经定义了 40 项开放能力，但从当前开放产业生态来看，这些能力仍不足以满足差异化、碎片化、个性化的业务应用需求。未来，在 AI 技术的加持下，业务应用将呈现更加差异化、碎片化、个性化的特点，因此如何更好实现网络对外赋能是 6G 需要研究的重点。

5G 网络能力开放的主要局限在于：（1）可开放的网络服务有限：仅支持通过 NEF 开放网络能力；（2）应用使能层 API 有限：未能充分组合网络能力形成多样化 API；（3）增加客户使用网络的难度：客户并不希望了解网络开放能力的具体细节，而丰富的应用使能层 API 及北向 API 给客户选择带来困扰。

针对上述问题，提出定制化对外开放路径，如图 3.4 所示，该路径相比于延

续式对外开放，具备如下特征：

特征 1：突破 NEF 唯一开放入口模式，支持 NF 直接将可开放服务发布到 CAPIF。例如，如图 3.5 所示，6G 核心网及接入网均可能支持计算 NF 等网络功能，这些功能可直接将可开放的服务通过 CAPIF-4 发布到 CAPIF core function，以丰富可开放的网络服务集合。此外，UE 和第三方应用也可以将开放服务发布到 CAPIF core function，以更好赋能业务应用。

特征 2：引入意图驱动的智能编排功能（Intent-driven Intelligent Orchestration）。一方面更高效组合开放网络能力更好匹配业务需求，另一方面降低客户使用网络能力的门槛。意图驱动的智能编排功能是应用与网络 APIs 之间的桥梁，该功能通过与 CAPIF core function 的交互实现网络 API 的发现与调用，在实现网络能力的编排组合后，将应用所需能力通过应用使能层 API 返回给应用。在这种模式下，应用将不能直接发现与调用网络服务，由此降低了网络对外暴露过多 API 导致的安全风险。

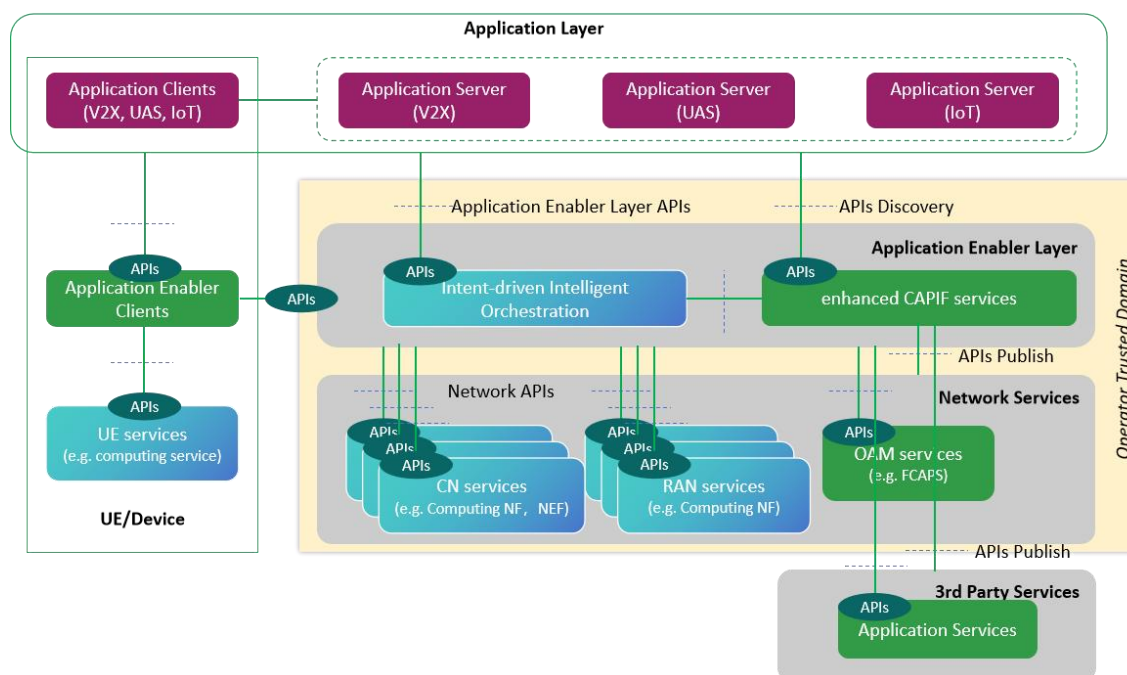


图 3.4 路径 2：定制化对外开放

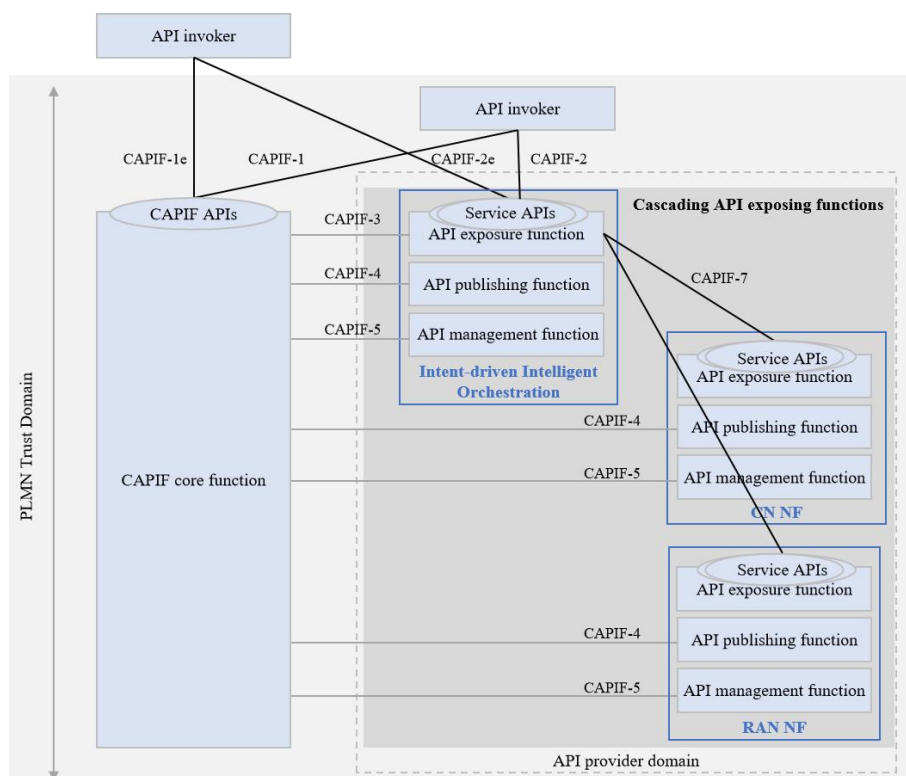


图 3.5 意图驱动智能编排与 NF 之间的关系

对比上述开放两种路径，应用场景的需求与发展是影响路径选择的主要原因之一，例如对于时延敏感的场景，RAN 能力考虑直接对外开放（路径一：Option 2 和路径二）。同时，从标准化的角度考虑，路径 1 对标准化接口的影响较少，通过新增 RAN 功能及其到 NEF 或应用使能层的接口可以实现，路径 2 则是综合考虑了核心网和无线网络的能力，集中了对外能力开放的编排和管理，简化了对外开放的接口，随着业务对网络需求和网络本身能力的增强，以及对外能力开放范围的扩大，路径 2 更有利于整个网络能力的灵活管理以及能力和业务需求的更深契合。

4. 未来展望

随着 5G/6G 技术演进和行业数字化转型加速，全球通信产业正通过开放网络能力创造新型商业价值。运营商通过解构传统封闭架构，开放网络资源、功能与服务，释放数据、算力、AI 等生产要素潜力，构建“网络即平台”的开放生态。本白皮书旨在呼吁全球产业链伙伴共同推进关键行动。

统一技术框架并定义开放标准：分层制定资源层、功能层（AI 推理）和服务层的标准化 API，建立涵盖基础型、增强型及前瞻型能力的开放分级模型。同时构建共赢商业模式，推行“资源+能力+价值”三维计费机制（如按量付费、增值分成），并通过开发者基金和资源补贴激励垂直行业创新。

加速跨产业融合：联合运营商、云服务商、设备商及车企等成立行业联盟，定期发布能力开放路线图；重点培育智能制造（数字孪生工厂）、智慧城市（应急通信调度）等标杆场景，形成可复用的能力开放模板，推动技术成果向实际应用转化。

缩略语列表

缩略语	英文全名	中文解释
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
AEF	API Exposing Function	API开放功能
AF	Application Function	应用功能
AI/ML	Artificial Intelligence / Machine Learning	人工智能/机器学习
AMF	API Management Function	API管理功能
APF	API Publishing Function	API发布功能
API	Application Programming Interface	应用程序编程接口
AR	Augmented Reality	增强现实
CAPIF	Common API Framework	通用的API开放框架
CDN	Content Delivery Network	内容分发网络
CPU	Central Processing Unit	中央处理器
CU	Central Unit	中央单元
DU	Distributed Unit	分布单元
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution	增强型数据速率GSM演进技术
EDGEAPP	Enabling Edge Applications	使能边缘应用程序
GPRS	General Packet Radio Service	通用分组无线服务
GPU	Graphics Processing Unit	图形处理单元
GSMA	GSM Association	全球移动通信系统协会
ICDT	Information, Computing and Data Technology	信息，计算和数据技术
IP	Internet Protocol	网际协议
IT	Information Technology	信息技术
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟
KPI	Key Performance Indicator	关键性能指标
MAC	Medium Access Control	媒体接入控制层
MEC	Multi-access Edge Computing	多接入边缘计算
MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出通信技术
mMTC	Massive Machine Type Communications	大规模机器类通信
NDT	Network Digital Twin	网络数字孪生
NEF	Network Exposure Function	网络开放功能
Net for AI	Network for Artificial intelligence	网络使能AI
NF	Network Function	网络功能

NFV	Network Functions Virtualization	网络功能虚拟化
NPU	Neural Processing Unit	神经网络处理器
NR	New Radio	新空口
NWDAF	Network Data Analytics Function	网络数据分析功能
PDCP	Packet Data Convergence Protocol	分组数据汇聚协议
PHY	Physical Layer	物理层
PRB	Physical Resource Block	物理资源块
QoAIS	Quality of AI Service	AI服务质量
QoE	Quality of Experience	体验质量
QoS	Quality of Service	服务质量
OSA	Open Service Architecture	业务开放平台
RAN	Radio Access Network	无线接入网络
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制层
SBA	Service-based Architecture	服务化架构
SCEF	Service Capability Exposure Function	网络业务能力开放功能
SDN	Software-Defined Networking	软件定义网络
SEAL	Service Enabler Architecture Layer for Verticals	垂直服务使能器架构层
SMS	Short Message Service	短消息服务
SOAP	Simple Object Access Protocol	简单对象访问协议
TPU	Tensor Processing Unit	张量处理器
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	无人驾驶飞行器
UE	User Equipment	用户设备
V2X	Vehicle-to-Everything	车联网
V2XAPP	Vehicle to Everything Applications	V2X应用
VR	Virtual Reality	虚拟现实
XML	Extensible Markup Language	可扩展标记语言
XR	Extended Reality	扩展现实

参考文献

- [1] 3GPP TS 23.501, System Architecture for the 5G System[S/OL]. [2022-03-21].
- [2] A. . -J. Moerdijk and L. Klostermann, "Opening the networks with Parlay/OSA: standards and aspects behind the APIs," in IEEE Network, vol. 17, no. 3, pp. 58-64.
- [3] HCLTech, "5G Network APIs: An ERS whitepaper", 2024.
- [4] 3GPP TS 23.502, Procedures for the 5G System (5GS)[S/OL]. [2024-09].
- [5] "3GPP Capability Exposure Frameworks and APIs", <https://www.3gpp.org/technologies/ct3-exp-fr-apis>.
- [6] O-RAN, "O-RAN Empowering Vertical Industry: Scenarios, Solutions and Best Practice ". 2023.
- [7] GSMA, "GSMA Open Gateway: State of the Market, H2 2024".2024.
- [8] 3GPP TS 23.222, Common API Framework for 3GPP Northbound APIs[S/OL]. [2024-03].

