

面向行业的5G-A XR 网络技术白皮书

(2025年)



发布单位：中国移动

牵头编制单位：中移智库、中国移动通信研究院

前言 >>

扩展现实（Extended Reality，XR）作为连接物理世界与数字世界的桥梁，是元宇宙的关键入口，也是新一代信息技术的重要前沿方向。2023 年国务院印发《数字中国建设整体布局规划》，强调打造面向未来的智能化沉浸式服务体验，擘画 XR 发展新蓝图。5G-A 实现了大带宽、低时延及高可靠等关键性能指标的显著提升，是促进 XR 技术变革和沉浸式服务发展的中坚力量。

面向沉浸式服务行业发展，基于中国移动和产业合作伙伴对 5G-A 赋能 XR 技术的最新理解，特编写本白皮书。本文聚焦行业、企业及用户三大需求层面，分析了 XR 需求及 5G-A 应对思路，阐述了 5G-A 赋能 XR 的“行业内容内生监管、企业坪效提优服务、用户体验极致保障”一体化供给理念，提出了包含 9 项创新能力的技术体系。同时，本文展示了 5G-A 和 XR 技术融合在行业应用中的初步探索，期望为 5G-A 赋能 XR 技术创新和沉浸式服务发展提供新的思路 and 方向。

中国移动希望与各合作伙伴通力协作，共同繁荣 5G-A XR 沉浸式服务生态，助力用户体验升级、企业提质增效、行业数智转型，为推进数字中国建设作出贡献。

目录

Contents

1 国家政策和行业发展态势	1
2 XR 需求及 5G-A 应对思路	3
2.1 行业层面：监管难	3
2.2 企业层面：坪效低	5
2.3 用户层面：体验差	6
3 面向行业的 5G-A XR 技术体系	8
3.1 核心理念	8
3.2 技术体系	8
4 面向行业的 5G-A XR 关键技术	10
4.1 XR 内容监管技术	10
4.1.1 帧导入	10
4.1.2 帧识别	11
4.1.3 帧监管	13
4.2 XR 坪效提升技术	14
4.2.1 非关键帧丢弃	14
4.2.2 动态速率保障	15
4.2.3 异构融合传输	16
4.3 XR 体验保障技术	18
4.3.1 帧时延保障	18
4.3.2 L4S 拥塞控制	19
4.3.3 智能网络服务	20
5 5G-A XR 服务在行业应用的初探	23
5.1 XR 内容监管应用	23
5.2 XR 坪效提优应用	24
5.3 XR 体验保障应用	28
6 展望	30
缩略语列表	32
联合发布及编制单位	34
参考文献	35

1 国家政策和行业发展态势

扩展现实（Extended Reality, XR）作为连接物理世界与数字世界的桥梁，是元宇宙的关键入口，也是新一代信息技术的重要前沿方向^{[1][2]}。2023 年国务院印发《数字中国建设整体布局规划》，强调打造面向未来的智能化沉浸式服务体验，普及数字生活智能化，全面赋能经济社会发展。XR 凭借创新的交互方式和沉浸的用户体验，将深刻影响和改变人类的生产生活方式，为经济社会发展带来新的增长动能。

近年来，我国陆续出台相关政策，持续推动 XR 和元宇宙产业的高质量发展。2016 年 3 月，“十三五”规划首次提出要大力扶持虚拟现实等新兴产业；2021 年 3 月，“十四五”规划明确将虚拟现实和增强现实列为未来五年数字经济重点产业；工信部等国家部委陆续出台《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划（2022—2026 年）》、《元宇宙产业创新发展三年行动计划（2023-2025 年）》相关政策规划，深入推进 XR、元宇宙产业赋能数字经济与实体经济融合，促进经济社会数字化转型。

5G 作为通信服务的重要能力，是沉浸式通信的关键载体之一。自 2019 年 5G 规模商用以来，XR、元宇宙产业发展也开启新一轮热潮，国家和各地方政府通过政策引导、建设指引等措施，持续推动 5G 在 XR 行业的应用从直播、游戏等传统消费娱乐领域加速向文旅、工业、教育等垂直领域渗透，不断培育 XR 产业生态：在文化和旅游领域，北京、河南、重庆、甘肃、天津等多省市先后发文，积极推动 5G 和 XR 技术融合创新，打造智慧旅游沉浸式体验空间，丰富 3D 画廊、XR 导览等新业态，刺激旅游消费体验；在工业制造领域，北京积极鼓励推动智慧工地建设，利用 5G+XR 技术搭建可视化智慧工地管理平台，实现工程建设活动智能化、精细化管理。浙江重点强调创新利用 5G、VR、AR 等现代科技手段，打造一批元宇宙制作工坊、虚拟漫游体验谷等，提升产业质效；在教育领域，江苏、重庆先后发文，推动利用 5G 和 XR 等数字技术打造数字远程实训平台、重塑教学空间，繁荣数字教学生态；在交通领域，江西积极推进 5G 和 XR 等先进技术与交通运输深度融合，攻关智联物流自动驾驶卡车技术研发，提升数字交通创新能力。随着 2024 年 5G-A（即 5G-Advanced，是 5G 技术的演进和增强版本）商用元年的到来，5G-A 在大带宽、低时延及高可靠等关键性能指标上实现了显著提升，还引入了内生智能等创新技术，为众多 XR 行业提供了更为丰富的应用场景和更强大的技术支

持。



图 1 5G-A 赋能 XR 行业应用图谱

面向未来，根据全球知名数据机构 IDC 预测，全球增强与虚拟现实（AR/VR）总投资规模有望在 2029 年增至 397.0 亿美元,中国 AR/VR 总投资规模将超过 105 亿美元，占全球 26.5%，市场体量仅次于美国^[3]。与此同时，行业新进入的参与者将带来更多创新和竞争，推动 XR 和元宇宙技术创新与应用场景挖掘。可以预见，未来 5G-A 与 XR 的融合将开启沉浸式通信及其应用的新纪元，引领产业迈向前所未有的数字化、智能化新时代。

2 XR 需求及 5G-A 应对思路

2.1 行业层面：监管难

随着 XR 技术发展，在迎接沉浸式体验新时代的同时，企业内容合规性、业务数据安全性等问题逐渐受到关注。当前，面向文旅领域的 XR 行业监管措施始露苗头，2025 年 3 月，国家电影局先后发布《关于促进虚拟现实电影有序发展的通知》、《虚拟现实电影备案须知（暂行）》，首次对虚拟现实电影的摄制备案、公映许可等作出了具体的规定，将虚拟现实电影纳入了国家电影局的监管。但是，面向行业的 XR 内容监管仍处于模糊地带，有必要健全监管体系和规范市场秩序，保障 XR 用户权益和产业生态稳定性。考虑到 XR 行业监管的步伐刚刚迈开，监管难度主要体现在两方面：

一方面，在业务通信层面，行业 XR 内容具备高动态性，组网部署、用户行为、业务模式纷纷不一，监管单元难定位：

- **针对组网部署**，以当前发展态势较好的文旅 XR 大空间为例，其内容安全风险主要源于业务结构与分布式网络拓扑结构的根本性变革。相较于传统影视播控系统采用的封闭式专网传输模式，XR 大空间逐步转为依托公网构建，动态灵活组网的同时也扩大了攻击暴露面，监管范围更大；
- **针对用户行为**，一是行业 XR 用户数量逐渐攀升，例如 2025 年 4 月底在北京开业的“798 超维视界·VR 院线”，占地面积达 3500 平方米，五一假期客流量达 5000 多人次，受众数量瞩目；二是高移动性和空间自由度成为趋势，随着雷鸟 X3 Pro AR 眼镜等新品将重量压缩至 75 克以内，设备轻量化为摆脱“背包束缚”创造了条件。XR 用户数目增多、轨迹更丰富等行为对监管机制的灵活性提出了更高要求；
- **针对业态形式**，随着 XR 内容的日益丰富，一是交互动作将逐渐从弱交互（如虚拟现实电影，侧重视角切换、预设剧情触发）逐渐向强交互（如沉浸式体验，侧重自由行走、体感操作）演进；二是体验场景从单一用户单一体验的场景逐步演进为多用户体验互通互动、用户多模态体验共存（如视觉、听觉、触觉交融）等场景，业态的多样化使得监管的复杂度更高。

上述挑战要求行业 XR 的监管能够“横向到边”，即弹性满足各单元的监管定位需求，区域层面灵活监管局域、广域部署范围，用户层面动态定位差异用户、实时轨迹，业态层面快速感知、匹配任务，从而实现高效、灵活、实时的内容监管。

另一方面，在监管实践层面，行业 XR 的内容易受外部攻击篡改，内部也需加密防护，监管内容难识别：

- **针对外部的“攻”**，XR 业务数据在传输过程中易遭遇协议级的内容替换攻击。例如，攻击者可利用 HLS 分片传输机制，通过伪造 m3u8 索引文件实施动态内容劫持；或针对 MPEG-DASH 标准中的自适应码率切换功能，注入非法视频分片。传统的前置式技术审查体系已难以应对新型攻击向量，亟需实时动态地识别篡改；
- **针对内部的“防”**，随着 XR 业务对安全性的需求提升，视频流普遍采用 SSL、TLS 及 QUIC 等加密协议来保证数据传输安全性。考虑到当前媒体传输方案多为厂商的私有加密协议，XR 内容识别的可行性、准确性都面临挑战。

上述要求行业 XR 的监管能够“纵向到底”，即打通感知业务、解析内容、发现篡改等内容识别的各个环节，卡好监管的第一道防线。

综上，行业期望能够提供灵活定位监管单元、健全识别 XR 内容的监管服务。从公共服务体系建设的角度，亟需构建“云-边-端”协同的监管基础设施。考虑到云侧监管恐要求数据“终端-云端-终端”的往返传输，增加监管链路的不确定性，而端侧监管对设备的算力要求过高，不利于 XR 设备轻量化演进，且隐私与权限受限（如无法访问跨设备数据），5G-A 网络作为边侧具备“横向到边”的先天优势，有望实现高效、合规监管；同时，5G-A 网络作为承载业务流量的高价值管道，支持大部分数据流量的内容识别、解析和传输，能够实现“纵向到底”的高质、高精监管。因此，需要考虑 5G-A 网络作为“监管入口”，设计“导入-分析-上报”全流程，满足行业 XR 监管需求：

- **监管导入**：随流提取业务可能对业务传输造成影响，同时也会潜在影响网络的运行效率。5G-A 网络如何不影响业务中断、实现无感监管是前提；
- **监管分析**：考虑到现阶段企业协议私有化严重、内部加密较为普遍，且存在外部篡改的风险，5G-A 网络如何准确、快速识别监管内容是基础；

- **监管上报：**业界 5G-A XR 监管架构尚为空白，5G-A 网络如何做好“监管入口”的角色，实现网业端协同监管是核心。

2.2 企业层面：坪效低

在日益竞争激烈的商业环境下，XR 企业对于提升单位面积产出效益（即坪效）的需求极为迫切。从企业运营者的经济视角看，XR 业务场景在用户体验质量与终端并发数目的协同效能上面临着显著的“坪效困境”：一方面，单个 XR 用户的体验越满意，意味着端到端网络服务质量越好，企业投入成本更高；另一方面，单位面积的 XR 终端并发使用数目将直接关乎企业收益，并发越高收益越多。更复杂的是，若企业初期投入较少成本较低，XR 网络效果太差而严重影响用户体验，潜在降低了用户再次消费的可能性，“一次性体验”导致企业后期收益乏力；反之，初期高成本的投入可能带来用户高质量体验的正反馈，通过刺激二次消费增加企业整体营收。因此，企业为达到最高坪效比，网络投入成本与用户体验收益之间的最优权衡是关键。

针对上述运营问题，进一步转为从网络技术视角看，XR 网络面临着“三维”的空间效率挑战——即单位物理空间内需同时满足低时延、高码率、高并发三重技术指标。例如，针对 XR 大空间沉浸式游戏场景，相较于传统影视的单向广播式传输，XR 游戏用户的交互特性对 5G 网络架构提出了更严苛的要求：传输时延需压缩至 20ms 以内以消除眩晕感，单终端码率最低需求需要达到 30~60Mbps 以支撑 2K 以上级全景画面渲染，而典型商业场景中要求至少支持 40+终端的并发接入，这种技术需求的三维叠加，直接冲击着运营商既有的网络部署模型。回溯当前 5G 网络的技术思路，为满足单个用户的极致体验，通常采用“资源换能力”的策略，通过叠加一定的带宽资源来实现低时延、可靠性的确定性通信要求，例如：

- **传输协议层面：**传统 TCP 协议的弹性传输机制在服务 XR 音视频流时反而成为时延、抖动的根源。采用 UDP 协议搭配前向纠错(FEC)编码是一种保障确定性时延的有效方法，但 FEC 冗余包占比超过 30%的配置使得有效带宽利用率降至 70%以下，物理层信道容量与传输层开销的矛盾将急剧放大，带宽资源利用率已达瓶颈上限；
- **通信系统层面：**一是通过 PDCP 复制、slot 重复及低码率 MCS 等技术，基于空口的带宽资源冗余来提升业务时延可靠性；二是当前业界也在积极探索毫米波技术，从频谱资源

上根本解决性能不足的问题。但无论哪种技术，都存在带宽成本较高的共性问题。

综上，运营商基于叠加带宽资源的保障思路仍面临带宽利用率不高、成本攀升的剪刀差困境，通过“开源”方式难以低成本解决坪效问题。打铁还需自身硬，5G-A 网络需考虑通过更灵活、更轻量的网络保障手段提升带宽利用率，实现“节流”：

- **面向业务：**5G-A 网络如何进行差异化的 XR 业务帧识别及调度是关键，通过在资源紧张、网络拥塞等情况下适时丢弃非关键帧以实现带宽利用率的有效提升；
- **面向用户：**考虑多用户并发场景，不同用户对带宽的需求可能存异，5G-A 网络如何动态根据用户体验质量和带宽需求进行多用户带宽分配亟需解决；
- **面向网络：**考虑到企业可能存在 Wi-Fi 等存量网络，5G-A 网络如何内生实现 5G+Wi-Fi 异构制式的智能协同传输待探索，从而达到“1+1>2”的更优效果。

2.3 用户层面：体验差

XR 业务形态丰富，可分为高保真强交互、高保真弱交互、低保真强交互、低保真弱交互四类^[4]。其中，高清晰度、高流畅度和强交互感都是影响用户 XR 体验的关键指标，也相应对网络的大带宽、低时延和高可靠提出了要求，如图 2 所示。在带宽方面，单路 8K/120FPS 的 XR 内容传输需 100Mbps 以上带宽，若带宽不足，画面卡顿、加载缓慢等问题会让沉浸感荡然无存；在时延方面，用户期望时延尽可能低，一旦时延超过 20ms，头部转动与画面刷新的不同步将引发眩晕感，严重破坏体验^[5]；在可靠方面，网络拥塞等原因导致的丢包会加剧画面卡顿与撕裂现象，使得用户在 XR 体验中频繁出戏，极大降低了 XR 应用的吸引力与用户留存率。

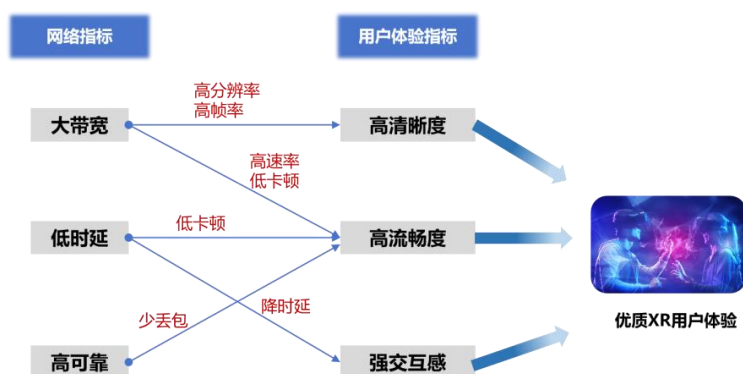


图 2 网络指标与 XR 用户体验指标的关系示意图

面向未来，用户对 XR 技术的核心诉求将聚焦于极致的沉浸体验，逐渐向高保真强交互的最终目标演进，对网络性能的要求也将更加严苛。3GPP 已针对触感通信、多模态传输进行了大量研究工作，并制定了重要的 KPI 需求，如表 1 所示^[6]。

表 1 多模态通信和沉浸式 VR 的 KPI 需求

用例	最大端到端时延	用户体验速率	可靠性
云、边缘、分割渲染	5ms	0 ~ 1Gbit/s	上行：99.99% 上行：99.9%
游戏和交互式数据	10ms	0 ~ 1Gbit/s	99.99%
沉浸式 VR 上行-触感反馈	5ms	16kbit/s ~ 2Mbit/s (无触感压缩编码)	99.9%
		0.8 ~ 200kbit/s (有触感压缩编码)	99.999%
沉浸式 VR 上行-传感器信息	5ms	<1Mbit/s	99.99%
沉浸式 VR 下行-视频	10ms	1 ~ 100Mbit/s	99.9%
沉浸式 VR 下行-音频	10ms	5 ~ 512kbit/s	99.9%
沉浸式 VR 下行-触感反馈	5ms	16kbit/s ~ 2Mbit/s (无触感压缩编码)	99.9%
		0.8 ~ 200kbit/s (有触感压缩编码)	99.999%

当前，5G 网络性能与 XR 用户的极致体验需求仍存在差距，主要受制于网络保障能力有限。5G-A 网络将从三大层面提升网络保障能力：

- **更精细的网络保障粒度：**相较于 5G 网络流级别的保障能力，5G-A 网络考虑进一步实现 XR 业务“帧”的感知，匹配 XR 业务保障的更精细诉求；
- **更灵活的端网业协同：**考虑网络拥塞场景，亟需更灵活的终端、网络、业务平台协同机制，实现拥塞等网络状态的灵活检测和业务自适应调控；
- **更融通的新生产要素：**人工智能技术正在驱动生产方式变革，需进一步考虑 5G-A 网络与 AI 之间的深度融合，对内优化 XR 网络保障，对外方便 XR 客户运维。

3 面向行业的 5G-A XR 技术体系

3.1 核心理念

为了面向行业提供一流的 5G-A XR 服务，中国移动致力于推动行业视角的监管更深入、企业视角的坪效更优质及用户视角的体验更沉浸。通过 5G-A 架构与 XR 能力的深度耦合，实现 5G-A XR 服务的一体化供给，即“行业内容内生监管、企业坪效提优服务、用户体验极致保障”。

- **行业内容内生监管：**面向行业管理，为填补沉浸式服务行业监管空白，通过 5G-A 网络实现敏感数据和违规信息的无感抽取、精准识别和实时处置，构筑 XR 内容监管的“墙”；
- **企业坪效提优服务：**面向企业运营，打破物理空间限制，通过系统性提供多维度的带宽优化方法和网络接入手段，优化企业“空间-成本-效率”三角关系，打造 XR 用户接入的“基”；
- **用户体验极致保障：**面向用户保障，推动 5G 沉浸式通信性能的极致化演进，实现从“流”到“帧”更细粒度的端到端时延保障，推动服务模式从“业发网收”到网业端协同模式转变，并提供智能闭环的 XR 网络解决方案，盖好 XR 业务体验的“瓦”。

3.2 技术体系

为了实现面向行业的 5G-A XR 三大核心理念，需要贯穿 5G-A 网络赋能行业 XR 的全生命周期、全流程服务，构建涵盖三类 9 项关键技术的技术体系：



图3 面向行业的5G-A XR技术体系

首先，针对行业内容内生监管，通过快速零中断的业务帧导入，为监管创造前提条件；攻关面向明文、密文、私有化协议等差异化的帧识别技术，并设计5G-A内生帧监管技术架构，填补业界基于5G-A网络实现帧监管的技术空白。

其次，针对企业坪效提优服务，面向业务提供差异化的帧保障优先级调度技术，通过非关键帧丢弃有效节省通信带宽；面向用户提出动态速率保障技术，实现多用户带宽自适应调整；面向网络实现5G-A内生支持的5G+Wi-Fi异构融通传输，缓解企业坪效压力。

最后，针对用户体验极致保障，通过精细化的帧粒度时延保障，降低XR业务端到端传输时延；基于网业端三方协同，5G-A网络内生支持L4S拥塞控制，实现低时延、高可靠和稳速率的三重保障；进一步，发挥5G-A×AI技术相乘倍增的作用，对内优化网络保障、对外方便客户运维。

4 面向行业的 5G-A XR 关键技术

4.1 XR 内容监管技术

4.1.1 帧导入

5G-A 网络作为 XR 业务帧的“监管入口”，帧导入是帧识别和帧监管环节的前提。以沉浸式 XR 大空间场景为例，现场多采用 5G 专网本地化部署或 UPF 下沉部署模式，UPF 与 XR 运营播控系统通过本地直连实现实时渲染与图像推送，以达到最佳业务体验。然而，监管部门难以对实时渲染的 XR 画面进行有效内容审查，存在非法信息植入、数据篡改等安全隐患，这就要求 5G-A 网络突破单纯转发的网络功能边界，实现快速提取 XR 业务流量的帧导入功能。但是，考虑到随流提取业务可能对业务传输造成影响，同时也会潜在影响网络的运行效率，5G-A 网络如何在不影响 XR 业务中断的前提下实现无感帧导入面临挑战。

为解决上述痛点，构建基于 UPF 的“两面三层”特色帧导入技术架构，实现 5G-A 网络对 XR 业务帧的无感抽取、统一适配和灵活兼容，如图 4 所示。

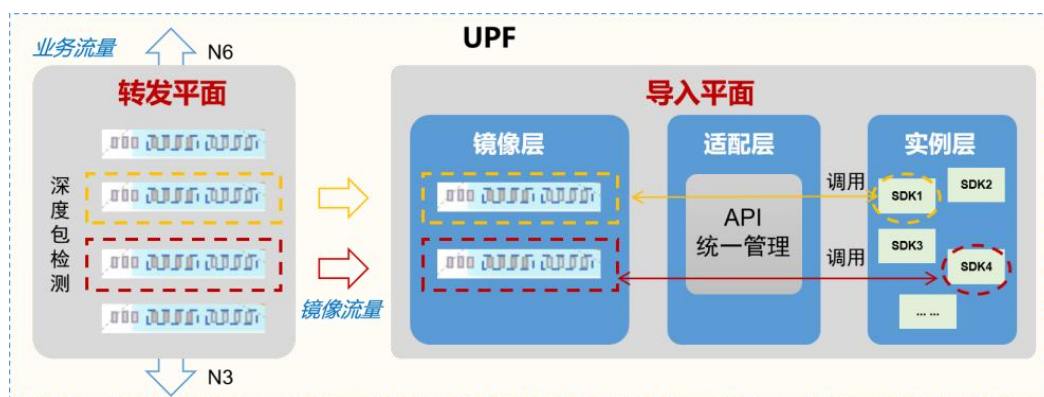


图 4 基于 UPF 的帧导入技术架构

第一，通过转发平面和导入平面的双平面快速解耦，实现 XR 业务帧的无感抽取。在转发平面，基于深度包检测对 XR 业务流量进行实时复制，并镜像复制至导入平面的镜像层，原始流量正常转发至终端，避免因解析处理引入额外的时延或抖动；

第二，在适配层定义统一 API 接口，基于模块化设计实现面向特定 XR 业务的 SDK 按需

加载。镜像层统一调用实例层进行 XR 帧处理，扩展性强、运维成本低。此外，适配层支持分布式调用和灵活扩缩，能够应对高吞吐 XR 业务流量场景；

第三，在实例层构建 XR 业务解析工具包(SDK)资源池，一是支持“点对点”解析 XR 服务提供商的私有或加密协议，通过定制化集成服务商 SDK，镜像层能够从实例层精准拉取帧位置、时间戳等元数据，完成多层解码（如 HTTP/FMP4 容器解封装、RTP 扩展头解析），实现关键帧信息的快速获取；二是同时支持多种通用协议（如 FMP4、RTP）与私有协议并行处理，适应 XR 业务多样化需求；三是针对特定加密流量，可通过 SDK 提供的合法接口获取元数据，无需破解加密内容，符合隐私保护要求。

上述帧导入技术方案能够节约服务商改造成本，同时规避协商周期，具备更优性价比和更良好的应用前景。

4.1.2 帧识别

5G-A 网络如何准确、快速识别监管内容是帧监管的基础，但传统 5G 网络在传输 XR 业务时，无法细粒度地识别帧包关系，缺少感知帧类型、帧结束标识等帧信息的有效手段，XR 帧识别的准度和精度都难以保障。进一步，考虑到当前企业协议私有化严重、内部加密较为普遍，对网络帧识别、网业帧协商均提出了更严苛要求。因此，面向明文、密文及私有定制化协议等差异化 XR 业务场景，亟需设计明确的网络帧识别机制，匹配行业监管诉求，也为后续 5G 网络对 XR 业务的精细化调度保障提供条件。

针对传统的 XR 明文业务（如，基于标准应用层协议封装的 RTSP/RTP 业务帧），UPF 通过增强 DPI 深度解析能力，实现帧包关系的决策、分析和标记，如图 5 所示。第一，通过配置三四层或者七层的帧包规则，快速过滤 XR 业务报文；第二，解析 XR 业务流的协议类型（如 RTP），决策是否进行帧包识别；第三，通过识别 RTP 头部获取帧完整性参数，如帧序列号（PSSN）、帧结束标记（EPDU），通过解析 RTP 负载获取帧重要性参数，如解析网络抽象层单元（NALU）并识别关键帧标志位；第四，通过帧信息的统一标记为帧监管奠定基础，此外可以在 GTP-U 头标记并通过 N3 接口传递给无线基站，指导基站进行精细化帧调度保障。

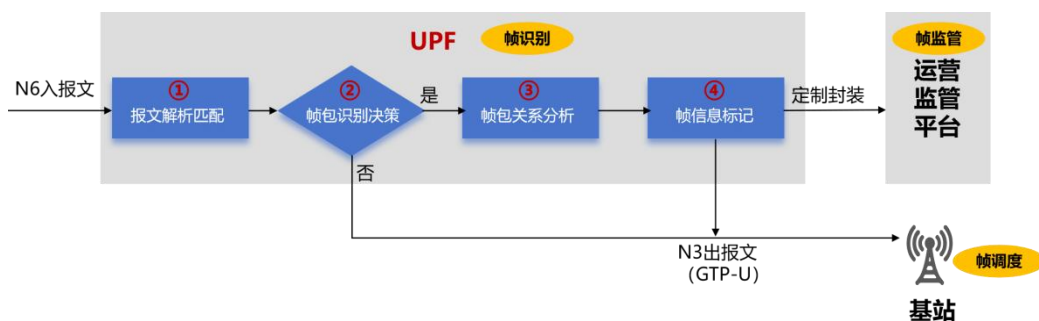


图5 基于UPF的帧识别技术原理

针对加密或私有化协议的XR业务，需引入智能识别功能，支持加密流量解析，提高识别泛化能力，完成实时特征流量的识别。为应对加密流量难识别、特征库频繁更新的难题，创新能够智能识别XR业务帧的智算UPF方案，一是通过AI模型训练、推理实现APP类别的在线识别和挖掘，摆脱明文识别限制，捕捉统计特征，数据量越大越准确；二是泛化能力强大，模型经过大量训练，自动学习规则模式和数值界限，应用没有重大改变，一定时间内识别率不下降；三是快速迭代更新，通过拨测抓包加数据挖掘，无需专家设计规则，大大降低专家依赖，如图6所示。

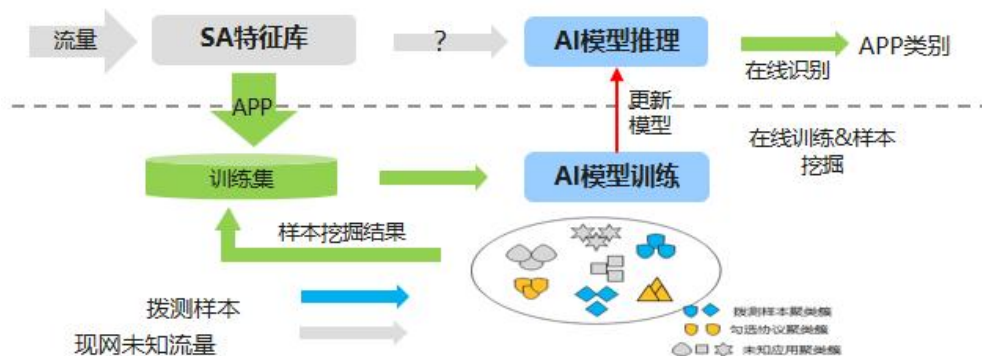


图6 基于智算UPF的帧识别原理

进一步，针对当前行业普遍的私有化定制协议现象，加强网业协同能力、促进网业协商至关重要。后续，可考虑建立协作机制，针对XR直播、交互游戏等高价值场景，定义通用帧包关系识别框架，降低私有化差异。联合XR服务提供商与网络设备商制定行业协议标准及企业级规范，统一帧识别接口与数据格式。当前，3GPP等国际组织正积极推动四层/七层协议标准化以明确帧类型的标记规则，明确定义了两种字节格式的RTP扩展头字段^[7]，通过直接携带帧信息实现了网络帧识别难度的大幅降低，如图7所示。

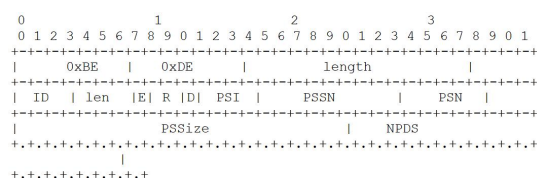


图 7(a) RTP 扩展头 (1 字节)

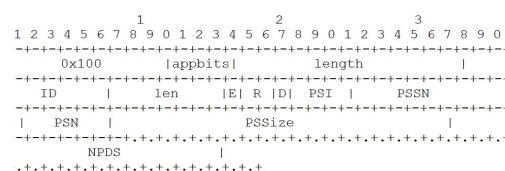


图 7(a) RTP 扩展头 (2 字节)

4.1.3 帧监管

当前，面向行业 XR 的监管方法尚不清晰，如何基于网业端协同实现 XR 串流业务的全生命周期监管面临挑战。5G-A 网络作为“监管入口”，难度主要在于：一方面，针对内容审核，考虑到网络状态、用户行为及业务模态各不相同，缺乏灵活定位监管单元的技术手段，高效、灵活、实时的内容监管难度较大；另一方面，针对结果处置，如何快速、准确处置违规内容需要统一规范和定义。

针对上述痛点，5G-A 网络端到端拉通头显串流终端、网络、XR 串流渲染服务端、运营播控系统与第三方内容监管平台，通过动态分析网络、用户及业务状态，实现监管单元的“横向”灵活定位，通过南向阻断、北向告警实现监管内容的“纵向”实时管理，填补 5G-A 网络赋能行业 XR 监管的技术空白。5G-A 内生帧监管技术架构如图 8 所示。

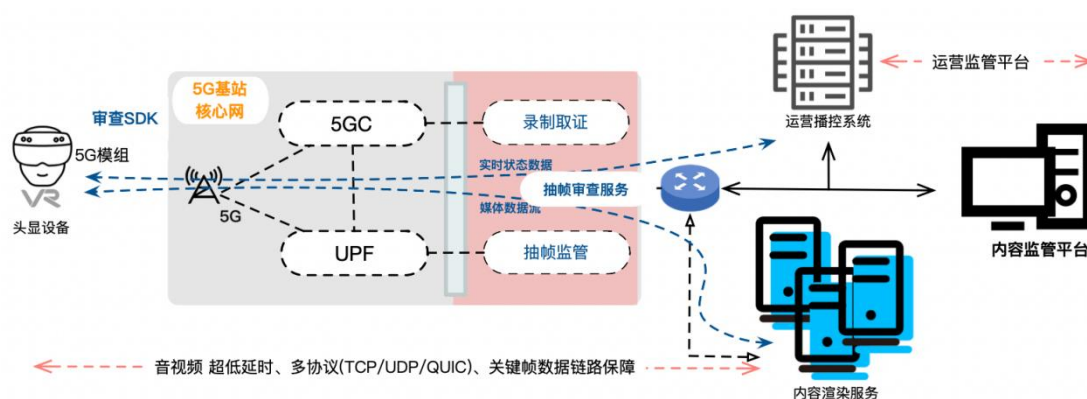


图 8 5G-A 内生的端到端帧监管技术架构

1、“横向”监管单元定位

首先，构建统一的媒体协商接口，保证网、业对 XR 媒体内容的实时管理同步。UPF 作为抽帧审查服务的锚点，通过和运营播控系统之间的关键 API 接口实现媒体控制相关的协作，从而获取串流元信息。其中，串流元信息包括两类：1) 网络元数据，包含端侧地址、端口与

协议类型等，在播控系统与终端建立媒体链路后即可获取。基于网络元数据，UPF 能够实时获取 XR 终端用户和业务数据，为帧导入和帧识别提供策略参考，也为明确监管单元提供“画像”输入；2）媒体元数据，即运营播控系统和头显终端建立双向媒体协商通道后交互的基本信息，在串流初始化的媒体协商阶段获取。基于媒体元数据，UPF 能够对图像数据进行编码还原，进而支撑对监管单元的画面审查、录制取证等管理操作。

其次，综合考虑监管范围、适用场景和网络能力，明确监管单元粒度，并按照两个阶段实现监管单元定位：面向初期监管的快速应用，基于帧导入、帧识别及媒体协商的网络能力，实现网络、用户及业务粒度的内容监管，适用于空间较封闭、用户数较固定、XR 内容属性较单一的 XR 业务场景，例如沉浸展演、虚拟电影等。面向中远期监管的能力扩展，通过 AI 驱动 5G-A 网络的检测、推理及分析能力演进，打造“任务”粒度的内容监管机制，实现监管单元的灵活定义、随机抽查和智能定位，适用于更广域的网络环境、更灵活的用户轨迹和更复杂的业务模式，同时实现全行业监管的降本增效。例如，针对沉浸式大型交互游戏，网络检测到某段时间内的个别用户画面出现违规，通过实时推理和该用户进行交互的游戏用户群组，并进行紧急告警处理。

2、“纵向”内容处置机制

- **南向阻断：**基于零中断的帧导入和高精准度的帧识别，当感知非法内容后，UPF 直接切断对应流量转发，实现网络内部的快速响应。
- **北向告警：**通过在 UPF 和内容监管平台之间构建统一应急处置接口，包含应急控制指令、内容异常的业务流信息（如 UE IP、端口和 TEID）等，当感知到非法内容后，UPF 可提供灵活定制的处置方案，包括及时通知播控系统追加渲染告警画面，以及进行录制取证、便于处置过程状态可追溯等。

4.2 XR 坪效提升技术

4.2.1 非关键帧丢弃

XR 视频帧主要包括 I 帧、P 帧和 B 帧。其中，I 帧作为关键帧包含完整的图像信息，具有独立解码能力，是 P 帧、B 帧解码的前提，P 帧只能参考前向 I 帧或 P 帧实现解码，B 帧则

需要同时双向参考前后帧信息实现解码，这使得 I 帧的完整和高效传输成为整个视频流解码的关键。考虑到 I 帧一般相较 P 帧、B 帧更大，尤其针对 5G 网络空口环境不稳定的场景，I 帧在传输时易突发性丢包，引发业务侧进行大规模 I 帧重传，导致网络拥塞加剧，坪效无法得到保证。

针对上述痛点问题，可基于 5G-A 差异化帧调度保障技术，闭环实现网络能力与业务需求的实时协商，精准匹配网络资源调度策略，通过优先传输关键帧、适时丢弃非关键帧实现小区带宽利用率的最大化，从而提升坪效。

1、网业信息精准匹配

为实现差异化帧保障，网络侧和业务侧需统一帧重要性（PSI）的定义，基于精准的帧识别获知业务帧信息，提取帧类型等信息并“翻译”成 PSI 字段，从而拉齐网络侧和业务侧对帧优先级调度的理解。同时，基于前向的网业协商机制，增强业务侧的帧重传，避免 XR 业务平台由于检测到丢帧而不断重传，减少帧重传尤其是 I 帧的重传导致的网络拥塞风险加剧。

2、网络动态丢帧策略

5G-A 网络内部，需要实现动态可协商的丢帧策略。在控制面，核心网通过动态策略下发“丢单包”或“丢整帧”指示给基站，实现非关键帧的灵活丢弃；在用户面，基站为关键帧和非关键帧定义不同的传输超时丢弃定时器，基于从 UPF 得到的 PSI 信息判断业务包是否属于关键帧，进而匹配至不同定时器中，并判定当前数据包传输等待时长，如果超时则丢弃数据包，从而实现对关键帧和非关键帧的差异化调度保障，业务流程如图 9 所示。



图 9 非关键帧丢弃流程示意图

4.2.2 动态速率保障

XR 视频媒体流基于不同分辨率、帧率及压缩比会产生不同的码率，尤其在渲染复杂或运

动画面时，XR 业务平台可能通过自动调节码率以适配媒体要求，这对 5G 网络的带宽分配和速率保障能力形成了挑战。传统 5G 网络在传输 XR 业务时，仍采用固定 GBR 速率保障机制，难以匹配 XR 业务侧的多样化码率要求和动态码率调整特征，尤其在网络拥塞或带宽不足时，静态带宽资源分配易导致资源浪费，其与动态业务需求的不匹配将加剧影响传输性能和效率。

5G-A 网络需要支持替换 QoS（Alternative QoS）动态速率保障机制，通过“事前”预定义备用保障速率集合，“事中”提供渐进式备用保障速率方案，“事后”恢复主用保障速率，实现 XR 业务服务质量的动态保障，进一步提升网络效率，如图 10 所示。

- **事前：**核心网在为 XR 业务建立 GBR 承载时，除 GFB R 基本保障速率外，还可以额外向基站下发若干组 Alternative QoS 参数集，包含备选的 GFB R 基本保障速率。
- **事中：**基站为 XR 业务建立 GBR QoS 承载后，依据小区资源情况对 Alternative QoS 中 GFB R 速率进行保障和监测。当基站侧判断小区资源状况发生变差情况，例如发生资源拥塞、覆盖较差、空口信道波动等原因导致空口能力不足，且当前 GBR 保障速率无法得到满足时，基站会在 Alternative QoS 参数集中选择备选的 GFB R 保障速率进行保障，并且通过 Notification Control 功能将正在采用的 Alternative QoS 反馈给核心网。
- **事后：**如果后续小区资源缓解，GFB R 支持情况发生变化，基站向核心网上报 QoS 通知控制（QoS Notification Control，QNC）消息，携带原因值“Fullfilled”，以及当前能满足的 GFB R 索引值。

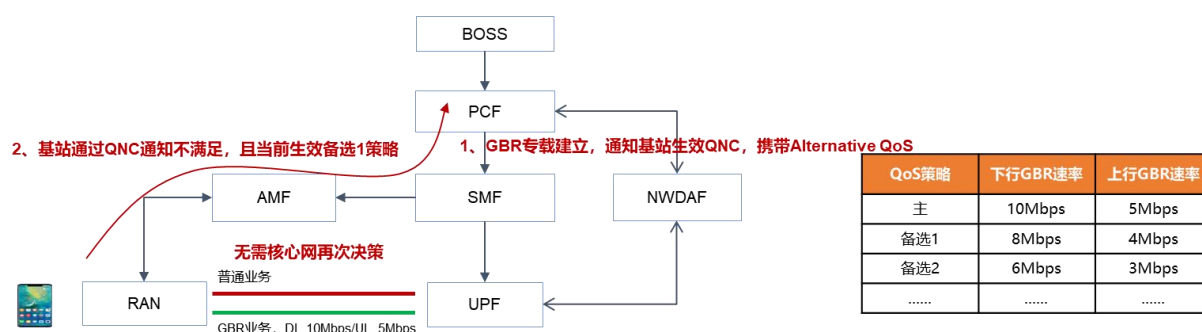


图 10 基于 Alternative QoS 的速率保障机制

4.2.3 异构融合传输

Wi-Fi 具备高带宽、低成本及灵活部署优势，但其存在易受干扰、覆盖范围有限等缺陷，

难以满足 XR 大空间园区对稳定低时延（如 20ms）和高并发用户（如 20 多个终端）的需求。固移融合技术充分利用 5G 和 Wi-Fi 等异构制式接入能力，实现不同价值业务的承载，合理利用网络资源，有效降低流量成本，为用户提供更好的数据业务体验，满足 XR 行业的需求。例如，在 XR 文旅导览领域，室内展厅依赖 WiFi 高带宽传输高清全景内容，用户移动至户外则切换至 5G，避免因 Wi-Fi 覆盖不足导致的画面卡顿；在 AR 工业巡检领域，高危环境下通过 5G 和 Wi-Fi 双网冗余避免单点失效，保障 AR 标注、实时数据回传的连续性和可靠性；在 VR 远程医疗领域，手术示教或远程会诊中 5G 与 Wi-Fi 同时在线，任一网络故障可瞬间切换，确保操作指令零中断。

为实现上述 XR 业务场景的数智连接和沉浸通信，以 UPF 为融合底座，形成 5G、Wi-Fi 等异构制式统一接入的解决方案。其中，异构制式的融合接入，以及无感切换、可靠冗余及灵活聚合等智能协同传输方案将带来坪效的大幅提升，如图 11 所示。

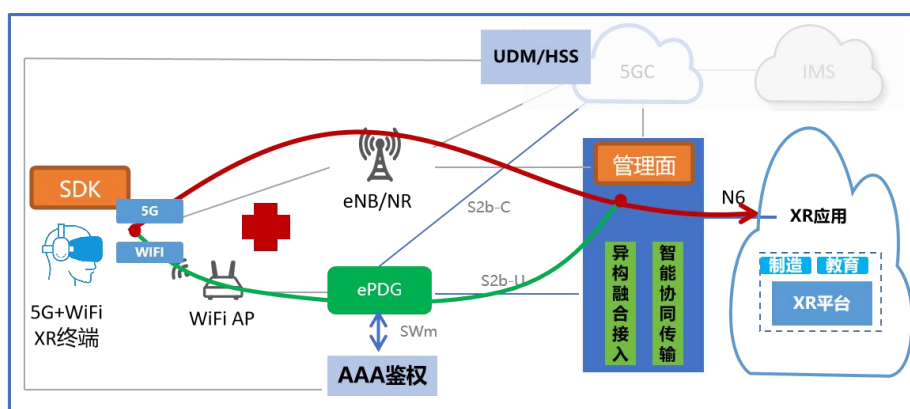


图 11 XR 异构融合统一架构

一方面，异构制式的融合接入将简化多重传输网络并存场景的链路管理难题，XR 应用平台只用对接一个链路管理面和用户面。根据网络集中化程度异构制式的融合接入可分为两个阶段实现：

- **阶段一：**将 UPF 作为统一数据融合锚点，UPF 内生端口和 Wi-Fi AP 直接连接，实现 5G 和 Wi-Fi 双路接入。
- **阶段二：**考虑 5G 网络对 Wi-Fi 制式的统一纳管，采用基于 ePDG 的 3GPP 和 Non-3GPP 互操作架构，XR 终端经 Wi-Fi AP 接入 ePDG 进行 AAA 鉴权，实现 5G 网络对 Wi-Fi 接入的内生融合。

另一方面，智能协同传输将成为便捷使用异构网络资源的重要手段，大幅提升网络选择准确性，提升坪效。根据网络智能化程度可分为两个阶段实现：

- **阶段一：**独立功能开启。初期独立支持冗余、切换、聚合等功能开启，简化端侧及 UPF 的实现难度，以推动端到端产业生态为主。其中，冗余功能可基于 UE、UPF 支持双发选收模块实现，切换、聚合要求 UE 支持接收选路/分流指示、UPF 支持负载监测及选路/分流指示下发。
- **阶段二：**统一闭环保障。耦合考虑冗余、切换、聚合等功能开启，端到端拉通 UE、UPF 统一实现。同时考虑基于 AI 的质差闭环保障，UPF 通过质差性能检测、进一步引入 AI 训推模块进行效果分析，实现异制式链路质差效果的动态预测、对比、决策，反向更新策略实现更好的坪效保障和提升。

4.3 XR 体验保障技术

4.3.1 帧时延保障

面向 XR 业务传输，每个 XR 业务帧可能包含多个数据包，单数据包错传漏传可能导致整帧解码失败，需保障帧完整性。但是，传统 5G 网络仍将 QoS Flow 作为业务的最小保障粒度，流级别的网络保障能力无法适配 XR 业务帧粒度保障的更精细诉求，缺乏以帧为单位的时延调度约束，XR 业务的时延满足度还有很大的提升空间。

为实现帧粒度的时延保障，通过对无线、核心网进行技术增强与性能优化，可实现 5G 端到端网络毫秒级的时延传输。PDU Set 时延预算（PSDB）参数可以作为一帧在 5G 网络端到端传输时延的约束条件，增强帧时延保障能力。在控制面，核心网基于 PDU Set QoS 策略向基站下发 PSDB，并支持通过能力开放和 XR 业务平台直接交互，实现 PSDB 的动态更新；在用户面，UPF 通过识别帧序列号、帧结束标记等帧信息并传递至基站，基站依据数据包在基站内等待调度的时延，计算与 PSDB 时延要求的余量，基于帧时延余量调整调度优化级，尽量在 PSDB 时延要求内完成所有数据包调度，从而完成帧时延约束调度的优化保障，如图 12 所示。

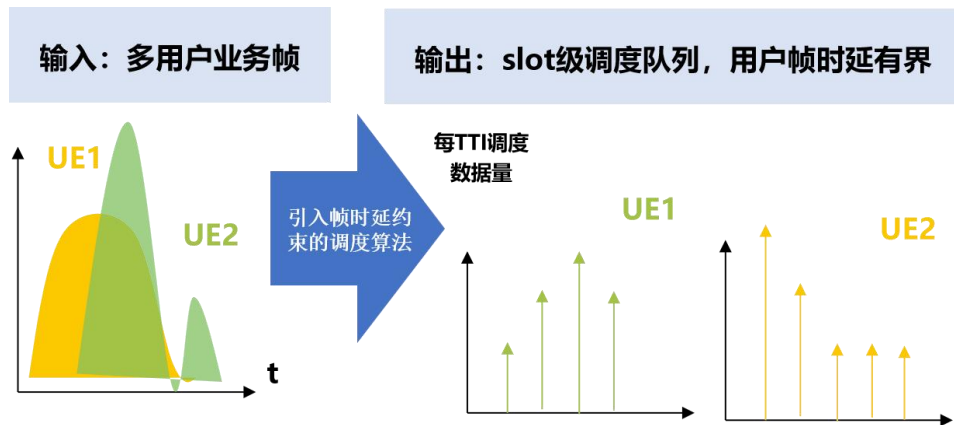


图 12 帧时延保障示意图

进一步，可通过“Non-GBR/GBR+帧时延保障”的组合，针对不同 XR 业务开展差异化网络保障：1）针对速率敏感类 XR 业务，配置 GBR 专载，保障基本速率；2）针对时延敏感类且具备帧特征的 XR 业务，配置基于 PDU Set 的帧时延优化，保障确定性的传输时延；3）针对沉浸式 XR 业务等带宽、时延均敏感业务，两者叠加配置实现保障。

4.3.2 L4S 拥塞控制

针对时延敏感类 XR 应用（如交互式 XR 游戏），画面流畅是影响用户体验的最关键指标之一。如果时延无法稳定保持在较低水平，用户将难以容忍图像或音频卡顿导致的游戏质量下降，这就要求 5G-A 网络能够提供可靠确定的时延性能保障。

新的传输控制协议 L4S（Low Latency, Low Loss, Scalable throughput）相比传统 TCP 等协议，解决了队列管理、拥塞控制等方面存在的响应周期长、速率起伏大等问题，能够良好满足 XR 业务的低时延高可靠传输诉求，为用户提供流畅的业务体验。基于 L4S 协议的网-业-端闭环协同保障机制，可以实现端到端感知-反馈-响应的预防性拥塞处理，通过对传输链路的拥塞状态感知进行动态、自适应、即时性的发送-传输速率匹配，降低 L4S 数据包在链路缓存队列的等待时长，以保证 XR 时延，防止完全拥塞导致体验严重恶化。其核心思路在于，基站或 UPF 根据网络状态和数据包的等待时长计算拥塞状态信息，将拥塞信息传递至应用层，使得应用层能根据拥塞情况调整端侧的业务速率^[8]，业务流程如图 13 所示：

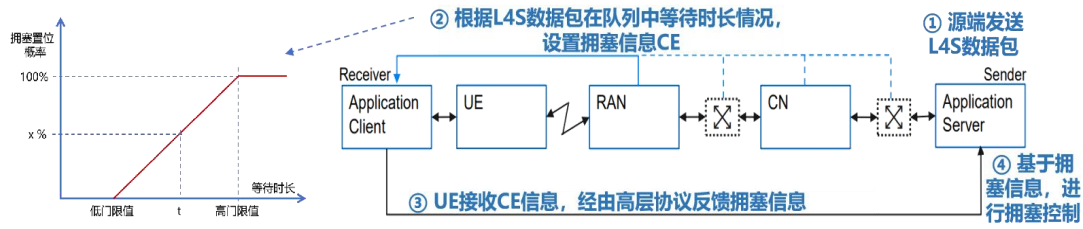


图 13 5G 网络 L4S 拥塞控制机制

1. XR 业务平台在 IP 包头 ECN 设置 L4S 能力标识特征，并发送至 5G-A 网络进行传输；
2. 5G-A 网络通过 ECN 标志位为 XR 业务建立 L4S、non-L4S 两个业务流，并采取不同的队列管理实现 L4S 与 non-L4S 等传统流量的隔离和拥塞控制通知。基站监测 L4S 业务流的排队时延，如果超过门限，则依据排队时延比例定义拥塞程度并对数据包的 ECN 标识进行 CE 置位，传递给 XR 终端；
3. XR 终端根据接收的数据包 IP 头 ECN-CE 的标记情况，经上层协议向 XR 业务平台反馈拥塞状态；
4. 发送方根据拥塞状态反馈，计算传输过程中的拥塞程度，并调整其后续发送比特率（拥塞窗口），降低发送速率的程度取决于网络所标记的数据包比例。

在移动网络场景下，拥塞感知主要由 RAN 负责，拥塞标记有两种方式：

- 基站对 L4S 队列做拥塞检测和标记；
- 基站对 L4S 队列做拥塞检测，再通过 GTP-U 扩展头上报给核心网 UPF，UPF 依据上报的拥塞程度在 IP 报文头中进行拥塞标记。

4.3.3 智能网络服务

XR 业务要求超低时延、超大带宽和高可靠性的网络传输能力，而传统 5G 网络在动态资源调度、实时业务感知等方面存在显著瓶颈。一方面，5G 网络在保障 XR 业务时，往往无法动态感知 XR 业务通信质量、XR 用户并发数量等信息，导致网络策略分配和实际业务需求、网络运行状态三者无法动态精准匹配，难以满足 XR 业务对稳定性的严苛要求，导致用户体验易受卡顿、延迟等问题而降低；另一方面，传统运维模式高度依赖人工经验，故障定位效率低、跨域协同能力弱，难以应对 XR 场景下多终端用户并发与复杂业务场景的运维需求，影响网络

整体性能和效率。

针对上述痛点，基于 XR 智能网络服务架构，可打造面向企业和用户的 XR Agent（智能体），实现 XR 运行智能和 XR 运维智能，如图 14 所示：

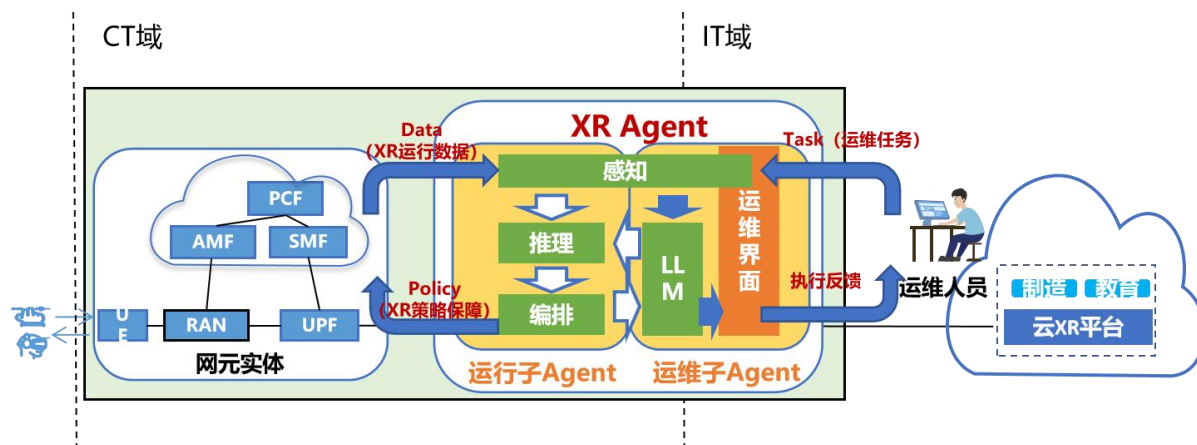


图 14 XR 智能网络服务架构

在运行层面，5G 网络可以通过在网络数据分析功能（NWDAF）或边缘智算 UPF 上部署 XR 运行 Agent，构建动态闭环自优化的网络运行体系：一是智推 XR 通信任务，基于边缘智算不仅能够实现 XR 业务加密后的帧识别，还能为更多 XR 业务进行泛化识别，深度挖掘业务特征，推理远程协作 XR、多人交互 XR 游戏等场景，使能多模态、多用户的 XR 关联策略生成；二是智检 XR 业务状态，通过精准检测 XR 业务质量 KQI（关键质量指标），以及实时感知小区拥塞、GBR 资源利用等多维度网络情况，为网络资源的精细化调度与优化提供坚实的数据支撑；三是智生 XR 保障策略，通过实时分析网络性能数据、用户行为数据和业务需求，动态生成用户级/会话级/流级/帧级保障策略，实现业务资源动态抢占无线资源分配，确保高价值 XR 应用的流畅运行，显著提升网络资源利用率与业务体验，为 XR 场景提供“零感知”的高确定性连接底座。

在运维层面，部署运维 Agent 并支持面向客户的协同运维和面向网络的内生运维。一是面向客户的协同运维，创新引入语言大模型（LLM）技术，重构传统运维管理模式。通过训练垂直领域语言大模型，系统可理解自然语言指令，自动解析故障工单、日志数据及运维知识库，实现“对话式”智能运维。例如，园区人员可通过语音或文本输入描述异常现象（如“某区域 XR 用户频繁掉线”、“某 XR 业务用户反馈体验不好”），语言大模型自动关联网络 KPI、设备状态及历史故障案例，快速定位根因（如无线干扰或核心网拥塞），并生成修复建议或自

动化执行脚本。二是面向网络的内生运维，结合多模态数据分析能力，运维 Agent 可内生支持自动化开通 XR 业务，通过收集网络中的各类业务数据，智能判断哪些属于 XR 业务，并提取其关键特征。随后，运维 Agent 将这些特征自动化集成到网元内部，使得后续相关业务可以基于这些特征，直接进行 XR 业务的帧识别和策略保障，大幅减少人工干预，提高业务开通效率，降低运维成本。此外，运维 Agent 还可支持预测性维护、容量规划及能效优化等操作。上述运维模式将运维效率从“人工响应”升级为“AI 闭环”，为 XR 业务的长期稳定运营提供坚实保障。

5 5G-A XR 服务在行业应用的初探

5.1 XR 内容监管应用

1) 应用场景与需求

2025 年 3 月 21 日，国家电影局出台《关于促进虚拟现实电影有序发展的通知》。XR 大空间业务以其极强的临场感、沉浸感，为观众提供了崭新的视听体验，部分作品已经在市场上引起了强烈的反响。《通知》的出台对提出了规范内容审查的要求，将有利于做大电影经济总量，有利于以电影成熟市场体系和产业政策为虚拟现实技术赋能、推动虚拟现实电影有序发展，促进电影高质量发展、实现“电影强国”目标。2025 年 4 月 29 日，习近平总书记在上海市考察科技创新工作时指出，要“努力开发更多安全可靠的优质产品”，为数字技术产业发展指明方向。

2) 解决方案及应用成效

在国家政策的号召下，中国移动与吾知科技联合，于第十五届北京国际电影节重磅发布“虚拟现实影院播控与安监方案”，攻克虚拟现实影院网络延迟与内容安全双重技术难题。该技术填补了行业监管空白，精准响应国家“安全可靠”的产品发展要求。



图 15 “中国电影新赛道”启动仪式现场

后续，中国移动将与吾知科技积极推动虚拟现实电影网络及内容安全监管的标准化制定，加速产业规范化进程。作为该方案的首批示范案例，吾知科技在暑期档展映的《长安三万里》

大空间虚拟现实电影，将通过“技术+场景”深度融合，为影院提供安全可控的运营样板，更在教育、文旅等领域打造可复制的安全解决方案，助力国家数字化战略实施。

5.2 XR 坪效提优应用

1) 应用场景与需求

XR 大空间行业需紧密围绕着“优质体验”和“商业转换效率”并重的商务模型，解决坪效困境，提升整体营收。一方面，优质的游戏体验是吸引用户的核心，在 XR 沉浸式体验方面，为实现玩家间、玩家与 NPC 间的深度交互，需要精准且实时地捕获同场用户的位姿数据，让用户在虚拟环境中的移动、转身、伸手等动作都能得到实时准确的反馈。因此，高沉浸式 XR 大空间业务需要高质量的无线通信方案作为基础支撑；另一方面，考虑到传统 Wi-Fi 方案易受干扰、多并发效果差，5G+Wi-Fi 双通道运行能够极大优化高负载网络通信效率，提升大空间场景下同场参与人数坪效比。

2) 解决方案及应用成效

针对上述需求，中国移动联合吾知科技，创新 5G+Wi-Fi 混合组网串流传输解决方案，基于中国移动自研的“果核”5G 专网，实现了至少 50 人高清稳定并发承载，如图 17 所示。该方案在大范围物理空间内大幅提升稳定并发的用户数量，在保障体验舒适度的前提下，颠覆性地提升了坪效比、翻台率与用户承载量，达到行业领先，同时依托低项目的低成本优势，已实现全国范围内的规模复制，商业前景极具优势。



图 16 “果核” 5G+Wi-Fi 混合组网串流传输解决方案

当前成熟的商用案例及应用成效如下：

❖ 案例 1：沉睡的古堡——国内首个 LBMR(Location-based Mixed Reality)展厅

《沉睡的古堡》以张壁古堡为原型，长期以来，尽管张壁古堡因其独特的地理位置、深厚的历史底蕴和浓郁的神话色彩而独具魅力，但由于交通不便，且周边 30 分钟车程内存在两个 5A 级景区，它鲜少成为游客的首选目的地。项目的核心痛点在于如何利用 XR 技术，将张壁古堡因地理劣势而被埋没的独特魅力，转化为一种技术上可行、体验上惊艳、内容上深刻、商业上可持续、并能有效对抗“次级目的地”标签的沉浸式产品。

经方案落地，在 700 平米超大空间内，稳定支持至少同场 60 名体验者同时仅佩戴 VR 头显自由行走，无死角畅游古堡的每一寸角落；呈现超高清画质并确保全程流畅运行，带来顺滑试听感受；厘米级精度实时定位用户所处的空间位置及坐标，确保用户互动的安全性，并支持精细化的多人互动场景；确保虚拟环境对用户动作的无缝响应，实现了人与人、人与虚拟角色、人与环境等多重互动体验，极大地提升互动的自然性和沉浸感。作为国内首个 LBMR 大空间混合现实沉浸式互动体验项目，《沉睡的古堡》曾获得 2024 年度国家文化和旅游科技创新研发项目立项，并入选 2024 山西文旅数字化应用创新案例。此外，它还成功入围了 2024 西安国际 XR 电影“金梦獭·最佳 XR 作品”与 2024 年度金鸡 VR 影展，获得了业界的广泛认可。



图 17 《沉睡的古堡》沉浸式空间

❖ 案例 2：跟着走——红色文旅场景的快速复制

2025 年 1 月 15 日，为纪念遵义会议召开 90 周年遵义会议纪念馆 1935 广场向公众正式推出长征主题行进交互式沉浸体验剧《跟着走》。项目主要挑战在于，如何在观众需持轻量化枪支道具动态行进的环境下，为数十台终端设备实时传输超高清、强交互的 XR 内容。这不仅要求系统确保大规模用户动作、道具状态（如枪支位姿）与虚拟/物理空间的精准同步，还要严格遵循历史叙事的庄严肃穆，同时确保现场安全，避免道具碰撞以及技术设备（如背包电脑）为体验者带来额外负重。

经方案落地，项目 1:1 高拟真数字孪生遵义会议会址原貌，最大限度地还原了 1935 年 1 月的遵义会议的激烈争论现场；另一方面，通过高带宽、低时延的 Wi-Fi+5G 混合组网串流传输技术，将超高清视频流实时传输至 VR 设备，保障视觉品质、交互流畅度与超写实的感官冲击力。同时，体验者无需背负沉重背包电脑，真正实现“轻装上阵”，重新踏上那段波澜壮阔的漫漫长征路。突破了目前传统大空间项目以简单场景和剧情介绍观看无互动参与的形式，让体验者能“拿起钢枪，身临其境地参加红军战斗”。朱德、王稼祥、钱壮飞等红军后裔专程到遵义体验，并给予高度评价。此外，该技术解决方案可快速复制部署至其他场馆，通过轻量化终端适配与场景参数配置，快速完成新场景的技术适配，为项目的规模化推广奠定了坚实的基础。



图 18 《跟着走》沉浸体验剧

❖ 案例 3：三体——顶级科幻 IP 实现规模效应

2025 年 5 月 31 日，“三体·四维空间”科幻体验中心全国首店落地北京朝阳，并手法打造《三体游戏·文明碎片》顶级科幻 IP 游戏。项目挑战主要在于需创造性地将物理空间纳入空间叙事，让用户从“观看者”彻底转变为“命运参与者”，以极致画质和前所未见的沉浸感重塑用户对三体宇宙的感知，这要求必须在有限物理空间内，实现超高清的宇宙级场景实时渲染和交互。

经方案落地，项目突破大空间网络限制瓶颈，轻松实现单场 85 人标清或 60 人高清并发体验，显著地提升了高画质、强交互场景下的用户承载上限，为高清视觉体验与流畅互动提供了坚实保障。技术赋能之下，观众将以汪淼博士的第一视角走进三体宇宙，探索由外星文明开发的“三体游戏”，亲历原著经典场景，与标志性角色深度互动，感受影视级视觉效果体验，360 度全景技术沉浸感，实现从科幻文本到多维感官的震撼升级。



图 19 《三体游戏·文明碎片》沉浸式游戏宣传海报

5.3 XR 体验保障应用

1) 应用场景与需求

面向高保真、强交互类 XR 应用场景，如 4K/8K 沉浸式在线游戏、多感官虚拟协作等典型业务，用户体验对高清晰度、高流畅度及强交互感均提出了较高需求，对应地，5G-A 网络的挑战之一是需要同时提供大带宽、低时延及有高可靠的通信能力，从而保障 XR 用户的良好体验。例如，4K XR 云游戏要求码率约 40Mbps、帧率 60FPS，且运动响应时延（Motion to Photons, MTP）不高于 20ms。另一方面，考虑到园区内多用户接入时导致网络拥塞程度加剧，或 XR 用户自由移动（如行走、转身）引起信号不稳定，或 XR 业务平台推流码率波动等情况，端、网、业都处于动态变化的过程，5G-A 网络的另一挑战即是通过端-网-业协同，实现动态复杂场景下的网络资源适配，从而进一步优化面向用户体验的带宽、时延及可靠性等网络指标。

2) 方案架构及应用效果

针对上述痛点问题，中国移动联合产业伙伴已在 3GPP R18 组织牵头 XRM 课题立项，完成多本国际标准，为 XR 商用奠定了理论技术基础。2025 年 4 月，在国际信息港的实验室，中国移动携手产业伙伴重点围绕两大技术开展面向商用的 5G-A XR 端到端精细化保障验证：

- **XR 网络内生帧保障：**UPF 通过报文深度识别帧信息并传递至基站，基站完成帧时延约束调度、关键帧优先调度的双重优化保障。基于核心网的帧粒度 QoS 策略，基站依据数据包的等待调度时延以及帧时延余量动态调整调度优化级，优化帧时延；此外，核心网动态下发“丢单包”或“丢整帧”指示，基站实现三档帧差异化调度保障。验证结果表明，在小区高容量拥塞场景下，基站平均帧传输时延锐减 90%至 10ms，时延满足度可达 20ms@99%。

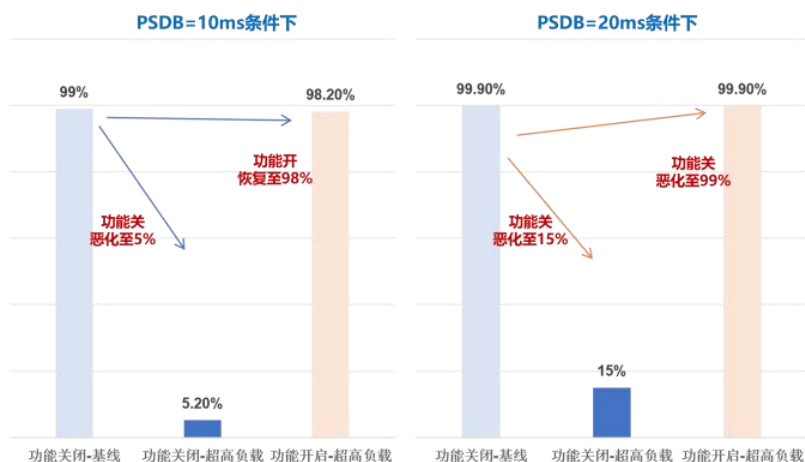


图 20 网络内生帧保障验证结果 (PRB=95%灌包压力测试)

- **XR 网业端协同：**引入双队列兼顾低时延、大带宽差异化的保障需求，多种门限条件提高拥塞感知-响应速度，实现了业务特征呈现、传输链路拥塞状态感知、拥塞信息反馈以及速率自适应调整的网-业-端闭环协同保障机制，支持各种网络拥塞条件下的 XR 低时延高可靠传输。验证结果表明，网络端到端传输时延性能增益>10%，时延抖动性能增益>40%。

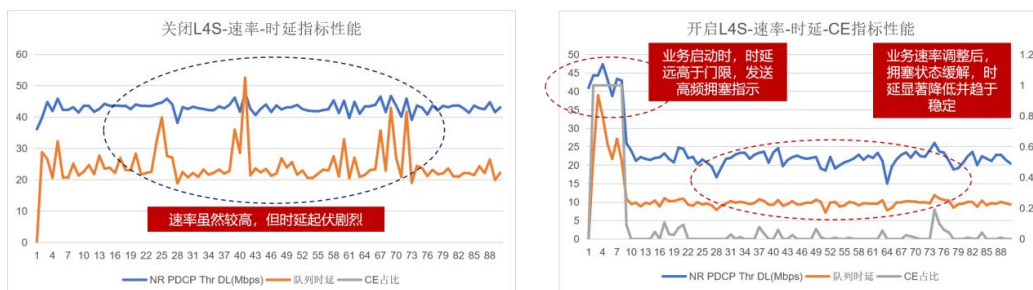


图 21 L4S 开关对比验证结果 (以 L4S 双门限 (10ms, 20ms) 为例)

6 展望

随着 5G-Advanced (5G-A) 技术的规模化部署和扩展现实 (XR) 硬件生态的不断成熟, 新型人机交互范式正从概念验证走向产业验证的关键节点, 持续推动数字经济向沉浸式、智能化跃迁。中国移动联合产业界在持续推动网络向“更高带宽”和“更低时延”的极致性能突破的同时, 也将推动 XR 技术深度赋能文娱、工业制造、城市治理、教育培训等领域。展望未来, XR 技术将迎来爆发式增长, 对应用场景的多元化、技术的深度融合、产业的协同创新均提出更高的要求。

从应用多元的场景看, XR 将突破传统边界, 向全方位、多层次的沉浸式交互演进。一是消费级应用进一步深度普及, Vision Pro 等沉浸式头显将向轻量化、全天候佩戴方向发展, XR 体验馆的竞技对战和沉浸式观影将带来更丰富的社交化体验。二是产业级应用成为新的增长极, 文娱领域的万人级元宇宙演唱会与跨域电竞联赛, 车联领域的乘员舱和驾驶舱体验显著提升, 工业制造领域的全工厂级数字孪生实时操控, 城市级的应急指挥 XR 推演系统等等, 都将可能成为下一代场景的突破点。三是智能设备交互能力全面扩展, 一方面 XR 应用将进一步扩展从音视频交互到触觉、感知等多维感官协同, 另一方面服务机器人的情感化交互、工业机器人的直观化编程、辅助机器人的精密操控等都将成为新的应用场景。

从技术融合的深度看, XR 将变成超级业务载体, 推动多技术栈协同演进。一是通信层面, 未来网络突破传统的带宽和时延优化, 同时智能化将进一步驱动网络预测用户意图、动态调整网络资源、主动适配沉浸式体验需求的认知能力。二是计算层面, 算力架构突破传统云边端的物理边界, GPU、量子处理器、神经形态芯片等异构计算资源无缝融合, 模型的推理和联邦优化将使复杂的智能计算能够在轻量化设备上实时运行。三是交互范式层面, 多模态大模型打破传统的输入输出界面限制, 满足自然语言、手势、眼神、脑电信号等全息方式交互, 智能化理解用户的深层需求并主动提供个性化服务, 并具备真实的情感感知和表达能力。四是模型层面, 新型智能模型成为 XR 内容的“造物主”催生内容生成的革命性变革, 支持世界模型技术使虚拟环境具备物理世界的因果关系和动力学特性, AI Agent 作为虚拟世界的原生居民, 进一步实现物理世界与虚拟空间的原子级融合。

从产业生态的协同发展看, XR 将成为上下游融合的关键驱动力。一是产业链实现深度整

合，芯片厂商与设备制造商深度合作推动硬件创新，传感器技术与显示技术融合带来突破性进展，新材料在轻量化设备中的应用降低使用门槛；同时软件平台通过操作系统层面的 XR 支持优化、开发工具链标准化普及、内容创作平台低门槛化实现生态完善。二是跨行业融合催生新模式，网络运营商从连接提供商向体验服务商转型，通过新一代算网智业融合的网络面向 XR 原生设计提供专用网络解决方案；机器人产业通过控制系统与 XR 系统深度集成、人机交互界面标准化设计、远程操控技术安全性保障实现协同创新；内容与服务生态通过专业创作团队培养、商业模式创新、知识产权保护机制建立形成良性循环。三是标准化与治理框架提供重要保障，跨平台兼容性通过统一内容格式标准、设备协作协议、开放式 API 接口实现互操作，智能监管、安全隐私保护通过身份认证机制、虚拟资产权益保护确保用户、产业权益。

5G-A 与 XR 的融合是技术迭代的开始，是人类认知与交互方式的革命。中国移动愿与合作伙伴携手，以场景创新为牵引，以标准共建为纽带，共同开启下一代互联网的新纪元。

缩略语列表

缩略语	英文全称	中文解释
3D	3 Dimensions	三维
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
3GPP CT	3GPP Core Network and Terminals	3GPP核心网络和终端技术规范组
4/5G	4/5 th Generation Mobile Network	第四/五代移动通信
5G-A	5G-Advanced	5G技术的演进和增强版本
AAA	Authentication Authorization Accounting	认证、授权和计费
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AR	Augmented Reality	虚拟现实
DPI	Deep Packet Inspection	深度包检测技术
ECN	Explicit Congestion Notification	显式拥塞通知
EPDU	End PDU of the PDU Set	帧结束标记
ePDG	Evoled Packet Data Gateway	演进型分组数据网关
FEC	Forward Error Correction	前向纠错编码
FPS	Frames Per Second	每秒帧数
FMP4	Fragmented MPEG-4	基于 MPEG-4 Part 12 的流媒体格式
GBR	Guaranteed Bit Rate	保证比特速率
GFBR	Guaranteed Flow Bit Rate	最小流比特速率
HLS	HTTP Live Streaming	基于 HTTP 的流媒体传输协议
HTTP	Hypertext Transfer Protocol	超文本传输协议
IDC	Internet Data Center	数据中心
IP	Internet Protocol	网际互连协议
KPI	Key Performance Indicator	关键绩效指标
KQI	Key Quality Indicators	关键质量指标
L4S	Low Latency、Low Loss、Scalable throughput	低延迟低损耗可扩展
LBMR	Location-based Mixed Reality	大空间混合现实
LLM	Large Language Model	大语言模型
m3u8	MP3 URL, UTF-8 编码	一种流媒体传输协议
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制与编码策略
MPEG-DASH	Moving Picture Experts Group, Dynamic Adaptive Streaming over HTTP	一种基于 HTTP 的流媒体传输协议
MTP	Motion to Photons	从用户运动开始到相应画面显示到屏幕
NALU	Network Abstraction Layer	网络抽象层单元
NWDAF	Network Data Analytics Function	网络数据分析功能

缩略语	英文全称	中文解释
PDU	Protocol Data Unit	协议数据单元
PDCP	Packet Data Convergence Protocol	分组数据汇聚协议
PRB	Physical Resource Block	物理资源块
PSI	frame Priority and Significance Indicator	帧优先级与重要性参数
PSDB	PDU Set Delay Budget	PDU 集时延预算
PSSN	PDU Set Sequence Number	帧序列号
QNC	QoS Notification Control	QoS 通知控制
QoS	Quality of Service	服务质量
QUIC	Quick UDP Internet Connections	一种由谷歌开发的传输层协议
RAN	Radio Access Network	无线接入网络
RTP	Real-Time Transport Protocol	实时传输协议
RTSP	Real-Time Streaming Protocol	实时流协议
SDK	Software Development Kit	软件开发工具包
SDP	Session Description Protocol	会话描述协议
SSL	Secure Socket Layer	安全套接层，用于保障网络通信安全及数据完整性的安全协议
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议
TEID	Tunnel Endpoint Identifier	隧道端点标识符
TLS	Transport Layer Security	传输层安全协议
UDP	User Datagram Protocol	用户数据报协议
UE	User Equipment	用户终端
UPF	User Plane Function	用户面管理功能
VR	Virtual Reality	虚拟现实技术
VxLAN	Virtual eXtensible LAN	虚拟扩展局域网
Wi-Fi	Wireless Fidelity	无线局域网
XR	eXtended Reality	扩展现实

联合发布及编制单位

本白皮书编制过程中，得到了产、学、研、用合作伙伴的大力支持，为白皮书的观点形成和编写提供了有力的支撑，后续本白皮书将根据技术演进和业务实践适时修订。

联合发布单位（排名不分先后）：中国移动通信有限公司政企事业部、中国移动计划建设部、中移智库、中国移动通信研究院、北京吾知视界科技有限公司、中兴通讯股份有限公司、华为技术有限公司、中国移动通信北京有限公司、中移湾区（广东）创新研究院有限公司、上海诺基亚贝尔股份有限公司、英特尔（中国）有限公司、思博伦通信科技（北京）有限公司、浪潮通信技术有限公司。

参考文献

- [1]中国信通院:《元宇宙白皮书》,2023
- [2]中国电子技术标准化研究院:《扩展现实(XR)产业和标准化研究报告》,2024
- [3] 国际数据公司(IDC):《全球增强与虚拟现实支出指南》,2025
- [4]3GPP TR 26.928: “Extended Reality (XR) in 5G”
- [5]华为:《泛XR产业发展白皮书-数字基础设施篇》,2024
- [6]3GPP TS 22.261: “Service requirements for the 5G system”
- [7]3GPP TS 26.522: “5G Real-time Media Transport Protocol Configurations”
- [8]中国移动:《XR网络技术体系白皮书》,2023