



世界无线局域网应用发展联盟  
WLAN Application Alliance

# 家庭超千兆体验 白皮书

—

White Paper on Home Ultra-Gigabit Experience

May 16, 2026

## 前言

随着数字经济持续高速发展，人工智能技术的快速普及与深度应用，各类新型数字化应用加速落地，不断推动网络基础设施迭代升级，全面重塑各行各业发展模式与交互形态，也为家庭网络发展带来全新挑战与发展机遇。当前，家庭场景已融合远程办公、在线教育、超高清影音、全屋智能、沉浸式 XR 等多元服务，逐步发展为一体化综合数字空间，用户网络需求从基础高速连接，升级为全场景、高品质、确定性的全屋网络体验。

家庭网络光纤到房间技术（FTTR）已成为实现家庭千兆网络全覆盖的核心解决方案，有效解决家庭组网带宽瓶颈与信号衰减难题，技术成熟度与产业规模化水平持续提升。面向 AI 时代全新业务诉求与应用场景，传统千兆组网能力已无法同时满足高速率、低时延、多设备并发的使用需求，推动 FTTR 向家庭超千兆升级演进，成为行业发展的必然方向。家庭超千兆以 FTTR 组网为基础，融合多频段 WLAN 协同技术，实现超高峰值速率、低确定性时延、强并发能力与全屋无死角覆盖，是家庭网络从带宽扩容到架构、频谱、体验体系的全方位范式升级。

在此背景下，世界无线局域网应用发展联盟（WAA）立足家庭网络发展新形势与产业变革新趋势，编制《家庭超千兆体验白皮书》，全面阐述 AI 时代家庭网络发展新特征，深度剖析 FTTR 超千兆、IEEE 802.11be 三频、与空口新技术融合发展的产业新格局。本白皮书首先系统分析 FTTR 向家庭超千兆演进的时代背景与核心驱动因素，解读业务模式与应用范式的迁移变化，明确超千兆网络的核心定义与能力价值，进而梳理 FTTR 升级演进的内在逻辑、关键技术路径与测速验收方案，为后续技术研究、方案落地与产业实践筑牢理论根基。

本白皮书旨在凝聚产业链共识，推动上下游协同创新，加速家庭超千兆规模化普及落地，持续夯实数字家庭发展底座，升级家庭高品质数字生活体验，拓展运营商业价值新空间，赋能智慧家庭产业高质量发展，为数字中国建设筑牢坚实的网络基础。

# 目录

<b>1 AI 时代家庭网络产业新变革</b>	<b>1</b>
1.1 家庭超千兆行业背景	1
1.2 家庭超千兆需求与驱动	1
1.2.1 业务需求演进与关键技术挑战	1
1.2.2 产业链演进支撑超千兆产业发展	2
1.2.3 超千兆相比于千兆时代的根本变化	3
1.3 家庭超千兆典型解决方案	4
<b>2 FTTR 发展现状及挑战</b>	<b>6</b>
2.1 FTTR 发展现状	6
2.2 FTTR 发展挑战	6
2.3 WAA 标准技术解决方案	8
<b>3 FTTR 超千兆解决方案</b>	<b>12</b>
3.1 FTTR 超千兆解决方案架构	12
3.1.1 超千兆主 FTTR 设备	12
3.1.2 超千兆从 FTTR 设备	13
3.1.3 家庭 IFDN 布线系统	13
3.1.4 网络管理平台	15
3.2 FTTR 超千兆核心优势	15
3.2.1 价值 1: 更大网络容量	16
3.2.2 价值 2: 更低网络时延	17
3.2.3 价值 3: 大屏体验更清晰	18
3.2.4 价值 4: 云端业务更流畅	18
3.2.5 价值 5: 直播业务更吸粉	19
3.2.6 价值 6: AI 应用更丝滑	19
3.2.7 价值 7: Token 调用更高效	20
3.2.8 价值 8: 具身智能不迟钝	21
3.2.9 价值 9: 感知能力更准确	22

---

3.2.10 价值 10: 宽带套餐三千兆 .....	22
3.3 FTTR 超千兆网络测评方法 .....	23
3.3.1 测速核心原则与前提条件 .....	23
3.3.2 有线双网口聚合测速 .....	24
3.3.3 无线 MLO 聚合测速 .....	26
3.3.4 超千兆网络业务体验测试 .....	27
<b>4 总结与展望 .....</b>	<b>30</b>

## 版权声明

本白皮书版权属于世界无线局域网应用发展联盟（WAA WLAN Application Alliance），并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本白皮书文字或者观点的，应完全引用其中段落描述，并注明“来源于世界无线局域网应用发展联盟（WAA WLAN Application Alliance）”。违反上述声明者，世界无线局域网应用发展联盟将追究其相关法律责任。

## 免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的新技术、新业务、新产品等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本白皮书信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，WAA 及参与编写单位不对您在本文档基础上做出的任何行为承担责任，也可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

## 编写单位及撰稿人

本白皮书由世界无线局域网应用发展联盟（WAA）牵头组织编制，行业相关单位及专家共同参与编写，以下参与单位及人员排名不分先后：

中移（杭州）信息技术有限公司：赵航斌、夏羿、张满、苏畅、谢旭东、张良、朱铖凯

华为技术有限公司：徐帆、刘炳森、赵望生、廖倩、刘璞、程俊、司小书、程习学、彭亮、周建明、秦卫星、胡淑宝、操日祥、孙艳宾

中兴通讯股份有限公司：张耀东、黄启圣、李彦淳、任虎、王子晟、曹博、钱玉蓉、黄纯、李云、毛子焕

烽火通信科技股份有限公司：陈金花、刘峻铄、杜波、李博、王攀攀、何会海、阳琳峰、李巍、王戈

新华三信息技术有限公司：邹长明、程永椿、李中正

联发软件设计（深圳）有限公司：何恒、李晓娇、冯帅

深圳市中兴微电子技术有限公司：樊纪磊、周仁龙、陈海波、任飞跃、刘晓宇、汤爽

思博伦通信科技有限公司：王晓萌、马頔、张赢

灿芯技术（深圳）有限公司：刘志堂

杭州永谐科技有限公司：曾华清

安徽朗力半导体有限公司：徐方鑫、蒋成钢

# 1 AI 时代家庭网络产业新变革

## 1.1 家庭超千兆行业背景

当前，数字经济正以前所未有的深度和广度融入经济社会发展各领域。5G-A、云计算、人工智能等新一代信息技术的规模化应用，催生了 8K 超高清视频、VR/AR 沉浸式体验、云游戏、实时远程协作等一大批创新业务形态。这些新兴应用对家庭网络提出了远超传统千兆能力的严苛要求：涵盖更高的峰值速率、更低的端到端时延、更强的多设备并发处理能力，以及全屋无差别的稳定覆盖。

与此同时，固定网络技术自身也在加速演进。家庭超千兆技术作为家庭侧构建超千兆体验网络的核心底座，正成为运营商推动家庭网络升级的战略支点。它通过光纤直达每个房间，解决了用户从入户宽带接入到终端设备之间的“最后十米”性能问题，是实现家庭超千兆体验不可或缺的关键基础设施。

从用户需求侧看，家庭已逐步演变为集生活、娱乐、办公于一体的多元化的数字生活与生产空间。远程办公、在线教育成为常态，4K/8K 影音娱乐普及，全屋智能设备数量激增，这些场景交织并存，推动家庭网络的核心需求从“单一高速连接”向“全场景覆盖、高品质承载、确定性体验”的全新升级。用户不仅关注签约带宽，更关注在实际使用中，每个房间、每台设备、每类业务是否能获得一致且优质的体验，这也成为家庭超千兆产业蓬勃发展的根本市场驱动力。

所谓家庭超千兆，是指以 FTTR 光纤到房间为基础组网架构，结合多频段 WLAN 协同技术，为家庭用户提供超越传统千兆体验的端到端网络能力。从产业演进视角看，家庭宽带正经历从“千兆普及”到“三千兆升级”的跨越式发展，即峰值速率从 1000Mbps 向 2000Mbps、3000Mbps 乃至更高代际的持续跨越。而“三千兆”正是这一速率跃迁的关键里程碑，标志着家庭网络从“千兆覆盖”迈向了“超千兆体验”的新阶段。

## 1.2 家庭超千兆需求与驱动

### 1.2.1 业务需求演进与关键技术挑战

当前家庭网络正经历从连接基础向体验中心的核心转变，具体表现为三大业务范式的系统性升级。首先，**全屋无缝协同**成为刚需，家庭网络的需求正从单点覆盖向全屋连续体验延伸。用户在室内移动过程中（如从客厅到卧室），期望高清视频通话、在线游戏等业务实现零感知切换；同时单个家庭联网设备数量普遍超过 30 台，手机、平板、智能家居等多终端并发高速传输，要求网络可自适应识别业务类型并动态调整资源分配，实现真正的全场景组网协同。

其次，**上行带宽需求**呈现激增态势。在 4K/8K 超高清直播、AIGC 应用普及的推动下，叠加视频会议、云端协作、VR/AR 实时交互等业务的快速增长，上行流量占比显著提升，对网络的上行能力

提出了更高要求，既需要具备大上行带宽能力，同时对上行时延高度敏感。这也标志着家庭网络正从以“内容消费”为主的单向下下载时代，迈向“内容创作与实时交互”并重的双向时代。

此外，网络价值维度从保障比特流 (Bitstream) 升维至**保障交互体验 (Token 流)**。这意味着网络的核心使命不再只是完成数据传输送达而是确保每一次交互的体验可感知、可保障。针对云游戏、远程医疗、在线教育等不同业务类型、需实现差异化 SLA 保障：云游戏业务依赖大带宽与低抖动性能，AI 交互则对实时性和精准性有着极高要求。这就要求网络具备业务感知和智能调度能力，可为各类应用提供差异化的服务质量保障，实现从“尽力而为”到“确定性保障”的根本转变。上述业务需求对现有 WLAN 方案提出了多重挑战，主要集中在频谱资源、干扰管理和组网能力三个层面。

**频谱效率瓶颈**日益突出：一方面，传统双频方案的频谱利用效率已接近极限，难以支撑多终端并发超千兆的极致体验；另一方面，2.4GHz 频段设备密度持续攀升，同频干扰问题日益严峻，而 5GHz 频段在密集部署场景下的邻频干扰同样不容忽视。这些挑战正驱动新一代无线技术方案加速演进——通过更先进的资源管理和多频段协同调度，在优化频谱资源使用效率的同时实现更高吞吐量，为超千兆体验奠定频谱基础。

**密集干扰环境下的体验保障**难度加剧：当前单家庭的联网设备已普遍超过 30 台且仍在快速增加，同时 IEEE 802.11ax/be、蓝牙、微波等多种无线技术在相近频段共存，跨系统间的相互干扰进一步加剧了网络性能的不确定性。在这种密集设备环境下，在线会议、云游戏等关键业务的体验质量难以得到确定性保障，这对网络的干扰协同管理能力提出了全新的要求。

最后是**跨房间组网能力存在明显短板**：传统单路由器方案存在穿墙信号衰减严重的问题，需要通过 FTTR 的光纤主干+房间级光纤连接，实现微秒级时延的主从 FTTR 设备协同，并支持基于业务需求的动态路径选择。同时要求网络能够自适应识别业务类型并动态调整资源分配，实现真正的全场景组网协同。

## 1.2.2 产业链演进支撑超千兆产业发展

### 1.2.2.1 IEEE 802.11 芯片发展现状

当前网络接入点 (AP) 侧芯片市场呈现多元化发展格局，国际主流厂商在高端市场保持技术领先，国内企业在中低端领域取得显著进展。IEEE 802.11ax 已成为市场主流技术，各主要芯片厂商的 IEEE 802.11be 解决方案已全面进入商用阶段，并开始面向 AI 应用进行优化演进。其中，高端芯片支持高 MIMO 规格等先进特性，能够满足高性能路由器和企业级设备的需求；中低端芯片则具有成本优势，适用于消费级产品和物联网设备。这种多层次的产品布局，使得设备制造商能够根据不同的市场需求和产品定位，灵活选择适合的芯片方案，组合出多种规格的产品，例如 BE10000 三频和 AX3000 双频，满足从基础连接到极致体验的各种应用场景。

终端设备（STA）侧芯片同样呈现多元化竞争态势，除传统芯片厂商外，消费电子企业也基于自身优势，推出自有芯片解决方案。从 IEEE 802.11be 代际开始，终端芯片支持双频/三频并发特性，配合 IEEE 802.11be 三频路由器，WLAN 性能可以突破 3000Mbps，能够有效提升用户性能和体验，确保终端设备能够充分发挥网络基础设施的性能。新一代终端芯片在提升传输速率的同时，持续优化能效比、集成度与成本控制，为智能手机、笔记本电脑等终端提供超千兆网络能力支撑。

### 1.2.2.2 产业链协同与生态构建

芯片技术的快速演进为 FTTR 全屋超千兆产业发展提供了关键支撑。从网络设备到终端产品，完整的芯片解决方案确保了产业链各环节的技术同步和互联互通。随着主要芯片厂商新一代产品的规模商用，设备成本逐步下降，产品选择更加丰富，为运营商规模部署和用户广泛接受创造了有利条件。

除了 IEEE 802.11 芯片之外，FTTR 产业还涉及到 PON MAC、BOSA、光 PHY、FEM 射频放大器和射频滤波器，这些器件目前也已形成了完善的生态配套，国内外参与厂家和可供选择的器件众多。

同时，芯片厂商与设备制造商、运营商、标准组织之间的紧密合作，推动了技术标准的完善和产业化进程。这种产业链协同不仅加速了新技术从实验室到市场的转化，也促进了应用生态的繁荣，为超千兆网络的价值实现提供了全方位保障。

### 1.2.3 超千兆相比于千兆时代的根本变化

如果说千兆时代是对百兆网络的线性升级，那么超千兆时代则代表着一场根本性的范式变革。这种变革不仅体现在网络速率的代际跨越上，更深刻地重塑了家庭网络的技术架构、服务理念与产业生态。

在技术层面，超千兆网络需要打破传统架构的桎梏。其中最具标志性的演进，是从传统双频方案向三频方案的跨越升级。传统 2.4GHz+5GHz 双频组合在超千兆业务场景下已逐渐难以适配：2.4GHz 频段干扰严重、信道狭窄，5GHz 频段虽带宽充裕但在多终端高并发场景下仍面临容量瓶颈。通过新增独立 5GHz 频段，实现 5.2GHz 与 5.8GHz 频段分开复用，构成三频协同，不仅大幅扩展了可用频谱资源，更为干扰规避、负载均衡和多设备并发提供了全新的调度维度。与此同时，依托智能干扰规避与动态调度算法，网络可在密集终端环境下实现整体性能跃升；通过支持更高阶调制与更宽信道绑定能力，突破了接入能力的物理极限。多重技术升级共同构成了超千兆网络的基石。

在体验层面，网络质量的评价标准发生了根本性转变。过去，家庭网络更多聚焦基础信号覆盖，而超千兆时代则全面转向用户实际体验保障。网络服务模式从传统的“尽力而为”承载，升级为可为视频会议、云游戏、VR/AR 等关键业务提供可承诺的 SLA 级确定性体验。网络配置也告别了静态设定，走向了基于 AI 的动态智能，能够根据业务需求实时调整资源，实现自动化的运维与管理。

在业务与价值层面，运营商的商业模式随之升级。价值经营从单纯的带宽售卖，转向高品质全屋网络体验运营，依托确定性连接能力打造差异化服务优势。网络定位也从基础通信管道提供者，升级为全场景生态赋能平台，全面支撑全屋智能、AI 应用等新业务落地普及。最终，这驱动产业从依赖用户规模增长的粗放模式，转向通过提升单用户价值来实现高质量增长的精细模式。在产业与生态层面，超千兆发展对行业自主创新能力提出了更高要求。这不仅需要国内产业在核心技术上实现自主突破，也要求我们积极参与并引领相关国际标准的制定，以提升产业话语权。同时更需要芯片、终端设备、行业应用等上下游全产业链协同创新，共同搭建繁荣健康、可持续演进的超千兆产业生态。正是这些在技术、体验、价值与生态层面的系统性变革，使得超千兆网络与传统千兆网络有了本质的区别。然而，要实现这些变革，将理论上的可能性变为家庭用户能够切实享受的体验，就必须有与之匹配的网络基础设施作为支撑。

### 1.3 家庭超千兆典型解决方案

FTTR 由主 FTTR 设备、从 FTTR 设备和室内光纤分布式网络三部分组成。FTTR 基于光纤 P2MP (Point to Multiple Point) 物理拓扑结构为基础，在家庭/小微企业接入点位置部署主 FTTR 设备并以其为中心，构建家庭/小微企业全光网络。主 FTTR 设备上联局端 OLT PON 口，室内连接一个或多个从 FTTR 设备；从 FTTR 设备可根据家庭/小微企业布局延伸至用户所需部署的区域，为每个区域提供网络覆盖，实现高质量网络。一个典型的 FTTR 超千兆解决方案架构由以下四部分组成：超千兆主 FTTR 设备，超千兆从 FTTR 设备，家庭 ODN (IFDN 布线系统)，以及家庭网络管理平台。纵观家庭网络发展演进历程，FTTR 已成为全屋千兆覆盖的普适化主流方案，传统网线组网虽可实现基础家庭千兆接入，但存在明显应用局限。迈入家庭超千兆时代，随着三千兆及以上新兴业务加速普及，对家庭网络架构提出了更高标准要求：需具备三千兆级峰值速率、超低确定性时延、50 台以上终端并发承载能力以及大带宽上行体验。当前主流 WLAN 回传、PLC 电力线回传整体性能存在瓶颈；而传统网线回传对预埋网口、布线线缆规格要求严苛，部署成本高、整体性价比偏低。FTTR 依托光纤传输大带宽、低损耗、强抗干扰、易平滑演进的天然禀赋，融合新一代多频段 WLAN 协同技术，成为承载家庭超千兆高品质体验、兼顾高性价比与长期可演进能力的最优解决方案。

FTTR 全屋超千兆代表着家庭网络发展的新范式，不仅是速度的提升，更是网络能力的全面升级：

- **全场景体验保障**：通过光纤延伸到每个房间，结合新一代无线技术，确保家庭每个角落都能获得超千兆的稳定接入能力和确定性体验。
- **智能干扰协同**：利用多频段优势和智能调度机制，在密集设备环境下实现干扰规避和动态资源分配。
- **上行大带宽能力**：提供更大上行带宽接入能力，满足 AI 时代双向高质量数据流需求。
- **业务体验感知**：具备业务识别和智能调度能力，为不同应用提供差异化的服务质量保障。

这一演进将家庭网络从“连接管道”升级为“智能体验平台”，推动家庭数字化从“连接在线”向“智能在场”深刻转变。

从千兆到超千兆的演进，是应对频谱瓶颈、设备干扰、上行需求三大挑战的必然选择，也是顺应业务从单点到组网、从下行到上行、从比特到 Token 三大趋势的战略举措。这一升级不仅解决了当前网络面临的实际问题，更面向 AI 时代布局了下一代家庭网络基础设施，为数字经济发展和产业升级开辟了新空间。

通过技术创新和产业协同，FTTR 全屋超千兆将推动家庭网络产业进入新的发展阶段，为用户提供更优质的数字生活体验，为运营商创造新的价值增长点，为数字中国建设提供坚实的网络底座。

## 2 FTTR 发展现状及挑战

### 2.1 FTTR 发展现状

FTTR 以“主 FTTR+从 FTTR”组网模式，具备全光传输、低衰损耗、超低时延、超大并发、长期演进等核心优势，完美适配 4K/8K 超高清、云游戏、VR/AR、全屋智能、远程办公等新一代数字场景需求，成为固定网络“最后十米”升级的核心载体，实现全屋光纤覆盖、FTTR 超千兆、WLAN 无感漫游、多设备高稳定并发接入，是家庭、商业及行业数字化组网的新一代主流方案，推动家庭及行业网络从“能用”向“好用、智用”跨越。

据工信部发布 2025 年通信业统计公报显示，FTTR 用户规模实现快速扩张，截至 2025 年底已达 5939 万户；家庭数字基础设施的持续升级，推动家庭业务从基础连接向“FTTR+X”融合应用加快演进，不断拓展家庭数字化服务新场景。预计 2026 年市场 FTTR 规模将突破 8000 万户，2027 年有望冲击 1.2 亿用户数。家庭端，户均联网终端数量逐步上升，用户对全屋无死角覆盖、低时延、高稳定网络需求激增。行业端，酒店、写字楼、商超、教育、医疗等场景，对高并发、高可靠、易运维的组网需求持续上涨，4K/8K 流媒体、云游戏、VR/AR、远程办公、AI 助手同时并发，传统千兆网络已无法满足需求，万兆网络虽已开展小范围试点商用，但规模部署仍需一定周期。因此，三千兆成为家庭网络升级首选方案。

国家层面，一二线城市率先实现 FTTR 规模化部署；运营商层面，FTTR 套餐逐步下沉，轻量化产品普及推广，推动城乡市场差距逐步缩小。同时，运营商积极推动超千兆与 AI 网络深度融合，全面支持家庭全场景需求，自 2026 年起，逐步推广 IEEE 802.11be 三千兆套餐，进入规模化部署阶段。移动集团：“将超千兆网络与 AI+ 融合，支撑家庭全场景需求”；电信集团：“推广 IEEE 802.11be 三千兆 FTTR，做到超千兆规模部署”；联通集团：“在北方联通把双千兆优势放出来，在年终会议落地”。

FTTR 凭借全光优势，成为宽带主流组网的方案，得益于国家政策、运营商强力驱动，市场需求从家庭向行业场景爆发。宽带技术从双千兆向三千兆、万兆逐步演进，基于 IEEE 802.11be 空口技术，网络从双频向三频升级，三千兆已成为行业共识，正逐步成为家庭网络的“新标配”。

### 2.2 FTTR 发展挑战

双频 FTTR 技术，即光纤到房间结合 2.4GHz 与 5GHz 双频组网，已成为当前解决大户型、多墙体环境下全屋千兆网络覆盖的主流方案。它通过将光纤延伸至每个房间，从根本上解决了传统组网方式信号穿墙衰减严重、覆盖不均的痛点，为高清视频、在线教育、远程办公等常见家庭业务提供了稳定、高速的网络保障。在实际应用中，双频 FTTR 已展现出强大的场景适应能力。例如，运营商装维工程师为 150 平方米的住宅定制“一拖三”的 FTTR IEEE 802.11be 双频组网方案，使用隐形光纤在不破坏装修的前提下，实现了全屋无死角覆盖，无线网络下行速率可达 2000Mbps，让 8K 超高清视频和云游戏等高带宽应用成为可能。然而，随着智慧家庭进入 AI 时代，家庭网络正从单

纯的“联接”向“联接+算力”一体化的智慧服务底座演进，**双频 FTTR 的局限性**也逐渐显现，面临着多方面的新挑战。

**首先**，无法保障高优先级业务体验。双频 FTTR 仅能提供 5G 一条高速数据通道，2.4G 由于信道带宽小，外部干扰大，无法提供高速数据通信。当家庭多用户同时使用网络时（如刷短视频、看 4K/蓝光视频等），多个终端共享唯一的 5G 信道，相互竞争网络资源，导致网络无法提供确定性带宽和时延保障。对于 AI Agent 等高频交互类高优先级业务，其既需要频繁的人机交互，还需频繁调用大模型，对大模型调用时延的稳定性要求极高，当前双频网络在高负载场景下，难以保证所有 AI 应用顺畅运行，易出现卡顿、体验降质等问题。

**其次**，难以适配全民化家庭直播需求。当前家庭直播已进入全民化、轻量化、垂直化阶段，以居家场景为核心，覆盖宝妈、银发、三农、社区团购等群体，成为普通人灵活就业与家庭增收的主流方式。直播业务需要稳定的上行带宽，但双频受限单一高速通道，且受制于 WLAN 上下行时分复用的机制，无法保障上行直播带宽和时延，一旦发生卡顿，会严重影响直播业务的收益。

**然后**，带宽瓶颈问题日益凸显。双频 FTTR 虽可向单个终端可提供两千兆的网络速率，但家居环境一般存在外部干扰，导致网络速率无法满足套餐验收。这时，对于家庭中突然出现的大下载业务，用户等待时间较长，会显著影响使用体验。

**最后**，设备并发承载压力剧增。现代智能家庭的联网设备数量激增，从智能家电到各类传感器，从手机、平板、学习机到笔记本电脑，动辄数十台以上。双频网络在大量设备高并发连接的场景下，信道拥塞和干扰问题加剧，网络延迟增加，导致多个用户同时卡顿，影响用户的网络体验。

为有效应对上述挑战，**三频 FTTR 应运而生**。它通过引入第二个 5GHz 频段，形成 2.4GHz、5.2GHz、5.8GHz 三频并发架构，有效解决了上述难题，核心优势体现在四个方面：

- **超大带宽保障**：三频并发可提供超双频的总吞吐量，轻松应对大下载、8K 视频、沉浸式 3D 内容等高带宽应用。
- **海量设备连接**：通过智能频段调度，将高带宽应用与海量 IoT 设备分流至不同频段，互不干扰，可支持更多设备稳定并发连接。
- **AI 智能抗干扰**：通过 AI 算法动态优化信道选择，在复杂干扰环境下仍能保持稳定的高速连接，确保全屋网络体验始终如一。
- **超低时延体验**：结合 MLO（多链路操作）等技术，将网络时延控制在 10ms 以内，为 AI 英语陪练，AI 云健身、远程医疗等实时应用提供可靠保障。

三频 FTTR 不仅是对双频方案的简单升级，更是面向未来 5-10 年智能体互联网时代的家庭网络基础设施革新，为智慧家庭的持续演进奠定了更为坚实的网络基础。三频 FTTR 通过新增独立 5GHz 高频或低频段，实现专属高速通道、移动快速通道与 IoT 基础通道的分层承载，可解决双频模式下频段资源不足、业务相互干扰、高密接入性能下降等挑战，为全场景高品质无线网络提供更完善的解决方案。

## 2.3 WAA 标准技术解决方案

世界无线局域网应用发展联盟（WAA）是全球首个专注于 WLAN 应用体验领域的国际产业和标准组织。它的核心在于推动 WLAN 网络不仅“连得上”，更要“用得好”，致力于为数字世界提供最佳体验的无线局域网。

为适配用户持续升级的差异化网络体验需求，规范行业技术发展方向，WAA 先后迭代制定 Release1、Release2 两版 WLAN 体验增强技术标准。两套标准采用循序渐进的演进思路，分别围绕双频基础能力、三频进阶性能进行技术定义，逐层完善家庭无线网络承载能力，实现网络性能与使用体验的双重升级，以下将对两个版本标准进行详细说明。

《WLAN 体验增强技术标准》**Release1 版本**基于 IEEE 802.11be 定义了双频设备的业务保障、智能空口、整网并发等核心特性，通过双频设备部署，满足全屋超千兆网络的基础应用诉求，其**双频关键特性**如下：

### 1. 时延敏感类业务保障

时延敏感业务保障增强特性包含链路间保障调度、链路内保障调度、AP 间空口资源协同调度、AP 间协同 EDCA 四项子特性。

- 链路间保障调度：基于各链路负载与信道状态，通过 TTLM 调整流量分布，优先保障 VIP 业务所在链路资源，提升业务传输稳定性。
- 链路内保障调度：在目标链路上合理分配空口资源占比与上下行调度比例，确保 VIP 业务资源优先级，降低因资源抢占导致的时延波动。
- AP 间空口资源协同调度：通过协调邻居 AP 的空口资源占比，降低环境干扰，保障 VIP 业务处于可控干扰环境。
- AP 间协同 EDCA：由控制器统一收集干扰与业务信息，动态调整整网 EDCA 参数，优化空口竞争秩序，保障高优先级/时延敏感业务质量。

该技术可为上行直播、云 VR 及实时 AI 交互（如语音助手、边缘推理请求）等时延敏感业务，提供稳定、高质量的网络传输保障。

### 2. 智能空口

针对 WLAN 网络中网内/网外干扰、同频/叠频/邻频干扰、隐藏节点与暴露节点等复杂场景，提出了一套 AI 驱动的智能空口架构。其核心逻辑是：通过信道信息交互实时感知空口干扰状态，通过度量信息交互实现空口参数的动态调优，最终由 AI 模块完成干扰识别与参数推理，实现空口性能自适应优化。

智能空口工作流程包括：

- a. 能力协商：关联时 AP 与 STA 上报智能空口能力，完成协同基础配置。

- b. 信道信息交互：周期性收集干扰 IQ 数据/时域/频域/强度等统计信息，构建干扰数据库。
- c. 度量信息交互：同步收集链路质量关键指标，包括 PER（分组差错率）、AirTime（空口占用时间）、Retry（重传次数）、Throughput（吞吐量）等，为参数调优提供数据支撑。
- d. AI 感知与推理：依托人工智能算法完成干扰类型精准分类（包括 WLAN 干扰、蓝牙干扰、子带干扰、混合干扰等）；通过强化学习模型，在参数空间中快速求解空口最优配置方案。
- e. 参数下发与执行：将最优的 EDCA、CCA 等参数配置下发至 AP 芯片生效，实现空口性能动态优化。

智能空口技术赋予 FTTR 系统“环境感知与动态优化”的能力，传统 WLAN 往往需要数秒才能重新收敛，引发速率波动或短暂卡顿；而智能空口通过实时识别这种由人体走动引发的多径衰落与快速信噪比变化，结合空间复用技术，在解决暴露节点与隐藏节点问题的基础上，主动调整每个链路的发射参数、MCS 速率与天线模式等。实测表明，在新年聚餐、家庭聚会等高频走动的家庭环境中，整网吞吐量波动降低、保持服务状态稳定，移动终端的上下行直播画质可以保持稳定高清，同时为未来超密物联网与 AI 驱动的生活形态提供坚韧的技术底座。

### 3. 整网并发

整网并发技术的核心原理是通过精细化干扰管理与智能功率控制，实现多设备并行传输，从而突破传统串行信道接入机制的容量瓶颈。整网并发机制能够有效提高信道复用率并降低空口等待时间，尤其在密集部署场景中，可显著缓解多 AP 间的竞争退避问题，保障业务传输的低时延与高吞吐确定性。

在该技术框架下，多频协同将频谱维度引入协同调度，通过多频协同调度为不同并发设备对分配差异化工作频段，显著提升了整网并发调度的自由度与资源利用效率。多频协同使得高优先级业务可被调度至干扰较少的频段并叠加空域复用，非实时业务则分配至其他频段，从而实现业务级的精细化服务质量保障。

整网并发基于协调的空间重用技术，打破了传统 WLAN 在密集部署下相互干扰的僵局。通过多 AP 间的智能协同发送，同一频谱可被多个房间的 FTTR 节点并行利用，使整网并发吞吐量提升数倍。

《WLAN 体验增强 业务保障增强技术标准》为《WLAN 体验增强技术标准》的 **Release2 版本**，其全面继承了 R1 的特性，同时基于 IEEE 802.11be 标准，新增定义了三频设备的超低时延（含时延敏感技术要求及智能空口技术要求），超高带宽（整网并发技术要求）等关键技术，通过三频设备的技术升级，进一步优化网络性能，更好地满足全屋超千兆网络的高品质体验需求，其核心**三频关键特性**如下：

#### 1. 频段导航

根据协议和报文特征识别业务，系统基于业务优先级与需求特性，执行智能频段导航与资源分配策略，实现业务与频段的最优匹配。

业务优先级映射：系统内置策略引擎，为不同应用类型分配差异化调度优先级，确保关键业务体验优先。例如：实时游戏、视频会议为最高优先级；在线视频、网页浏览为中优先级；文件下载、系统更新为普通优先级。

三频智能牵引策略：

- 频段特性匹配：5.8GHz 频段干净，优先牵引高优先级、低时延业务（如云游戏、VR 应用）；5.2GHz 频段作为主力承载频段，服务大部分中优先级业务，保障日常网络体验；2.4GHz 频段覆盖广，主要服务低优先级、低带宽的 IoT 设备及兼容性终端。
- 动态调度机制：系统实时监控各频段负载、干扰及业务需求，动态调整资源分配策略。当网络拥堵时，严格保障高优先级业务的带宽和时延，可对低优先级业务进行合理的速率限制或队列调度，确保关键体验不受影响。

## 2. 业务保障

通过第三频段实现干扰规避与资源隔离：通过第三频段（如 5.8GHz）专供高优先级业务（如 4K 视频、在线会议），避免与普通业务（如普通视频类业务）争抢空口资源。

TTLM：当 AP 监测到某条链路质量劣化时，通过 TTLM 调整业务流分布（如游戏、视频、文件传输），映射到其他状态良好的链路，保障低时延业务独占优质链路。

非 TTLM 终端兼容：对不支持 TTLM 的设备，通过第三频段调度实现资源隔离，避免拖累整体性能。

## 3. 智能空口

在抗信道波动增强技术及抗干扰子特性技术基础上，《WLAN 体验增强 业务保障增强技术标准》为三频类设备进一步拓展智能空口能力，新增以下核心功能：

- 功能 1：支持 5GL+5GH MLO 功能，可实现带宽叠加（如 5GL 160MHz + 5GH 80MHz），显著提升整网吞吐量，满足高带宽业务的传输需求。
- 功能 2：通过在消息上增加上下行天线策略的定义，缓解由于 AP 和 STA 上下行采用不同智能天线带来的上下行信道不互异问题，优化链路传输质量，降低信号损耗。

## 4. 无线感知

无线感知技术是 WLAN 体验增强技术体系的重要延伸方向，其基于 WLAN 信号的信道状态信息（CSI）变化感知，实现对家庭环境内的人体存在、动作、轨迹、行为的无接触式检测，打破了传统 WLAN 网络仅提供网络连接的能力边界，是全屋智能、家庭安全、健康养老等场景的核心使能技术。该技术基于主从 FTTR 之间的通信链路进行通感一体化任务，在不增加设备成本、不影响通信质量的前提下，利用 CSI（包括幅度、相位、频率等信息）感知人的动作、存在、以及其他特征。无线感知技术通过依赖主从 FTTR 之间的互通协议，包括：WLAN 感

知能力的发现，WLAN 感知组网决策，WLAN 感知会话的建立和 WLAN 感知的帧交互，实现稳定的信道采样和信号参数发送，保证采集高质量的 CSI 信息，实现准确的感知功能。

在三频设备支持下，可实现三个独立感知通道，极大程度降低干扰对感知的影响。即使在有邻居干扰、多业务并发、大流量负载下，也能保障感知准确率，实现感知业务稳定运行、不中断。

**小结：**随着宽带进入超千兆时代，IEEE 802.11be 作为第七代 WLAN 标准，以三频架构（2.4GHz + 5.2GHz + 5.8GHz）+ MLO 多链路并发为核心，为用户提供“超高速、超低时延、超高可靠、全场景覆盖”的极致无线体验，赋能工业数字化、智慧家庭等新兴领域。2026 年起中高端路由器及 FTTR 产品将搭载 IEEE 802.11be 三频，实现全屋稳定 3000Mbps 以上速率，网络时延降至 10ms 以内，更好适配 VR、云游戏、8K 视频等极致带宽需求，助力数字经济高质量发展。

FTTR 上行光口 10G 能力，千兆宽带全面普及，预估 2026 年三千兆初步进行商用推广。终端组网配套升级，有效满足多场景、大带宽、高并发需求。同时，FTTR 内网光口随着 2.5G 对称网络的普及，光器件带宽逐步提升，产业光芯片、光 PHY、BOSA 等产业上下游芯片、器件已全面支持超 3000Mbps 速率要求，已满足全屋稳定 3000Mbps 以上速率带宽需求。

FTTR 三千兆以 10GPON、IEEE 802.11be、AI 智能为核心技术支撑，产业正处于技术快速迭代、市场爆发增长、场景全面渗透的黄金发展期，政策强力驱动、需求持续爆发、产业链日趋完善，FTTR 三千兆成为主力增长引擎，家庭、商用、行业全场景协同发力，2026-2027 年成为产业成熟与价值释放的关键拐点，推动产业从高端尝鲜迈向大众普及，支撑数字经济与智慧生活高质量发展，产业长期增长空间广阔。

## 3 FTTR 超千兆解决方案

### 3.1 FTTR 超千兆解决方案架构

传统双频 FTTR 也能提供双千兆解决方案的能力，如 FTTR 设备无线采用 IEEE 802.11be 双频接入，FTTR 设备之间采用光纤接入时，在家庭网络环境干扰小，家庭并发用户少，家庭网络业务带宽和时延无保障需求的情况下，传统双频 FTTR 基本能满足业务需求。但随着家庭网络用户的规模发展，同时伴随着新型业务的出现，如智能 Agent，上行直播，高清直播，云游戏等，这些业务要求存在干扰和多用户并发情况下，保障业务的带宽和时延。显然，双频 FTTR 提供的超千兆解决方案无法完全匹配以上需求。

三频 FTTR 不仅能提供三千兆解决方案能力，同时由于引入了新的频段，额外提供一条高速传输通道，对于以上干扰和多用户并发等场景，能更好的保障新型业务的带宽和时延，保障用户体验，是最优的超千兆解决方案。典型的三频 FTTR 超千兆解决方案架构如图 3-1 所示，整体架构虽然和传统双频 FTTR 超千兆解决方案相似，但存在三个显著的区别，分别体现在：(1) 三频 WLAN 规格，(2) 光层支持不低于 3Gbps 速率，(3) 电口支持不低于 2.5GE，以下章节将详细介绍。

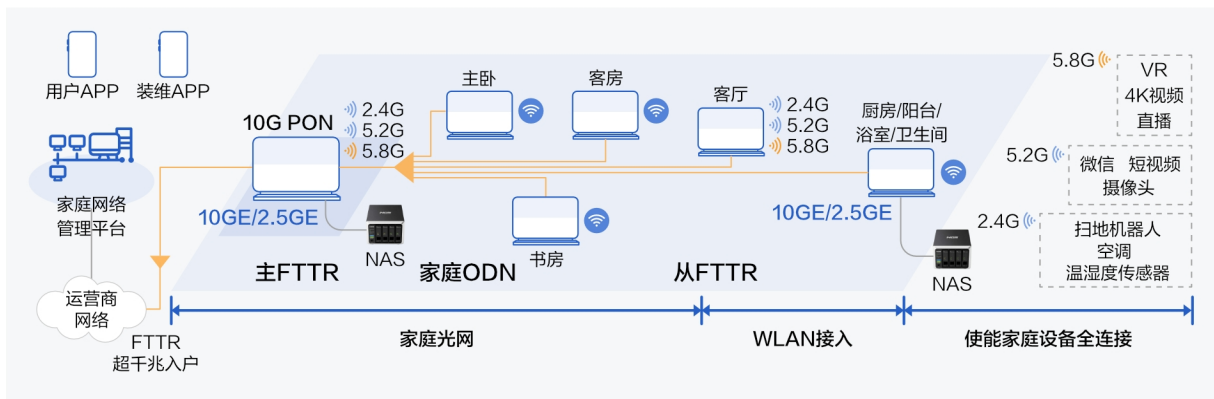


图 3-1 FTTR 超千兆解决方案架构示意图

#### 3.1.1 超千兆主 FTTR 设备

超千兆主 FTTR 设备作为整个超千兆解决方案的核心，通常部署在家庭客厅电视柜附近。该设备通过光纤向上连接运营商的 OLT 设备，实现超千兆带宽入户；同时通过光纤向下连接各个房间从 FTTR 设备，确保从 FTTR 设备能够提供稳定的带宽覆盖。

该设备集成了光网络终端（ONT）、高性能路由器、IEEE 802.11be 接入点（AP）和智能网关功能，负责全屋网络的统一管理、控制、配置和漫游调度。设备为用户提供 GE/2.5GE 或 GE/10GE 有线接入和 IEEE 802.11be 无线接入的超千兆接入能力。此外，还可以基于 IEEE 802.11be 三频

WLAN 频段实现的全局负载均衡，以及基于 5.8GHz 频段的 VIP 业务加速功能，能够有效保障在干扰环境和多用户并发业务场景下的带宽和时延性能。

在网络侧接口方面，采用 XGPON 技术作为对接 OLT 的接口，为 FTTR 超千兆解决方案提供带宽接入能力；在用户侧接口方面，主 FTTR 设备通过主从光接口、有线接口和无线接口对接从 FTTR 设备和用户，通过光纤为从 FTTR 提供不低于 3Gbps 的速率，确保从 FTTR 设备实现超千兆网络覆盖。

有线接口配置包含 1 个 10GE 或 2.5GE 接口，以及多个 GE 接口的组合。主 FTTR 通过 1 个 10GE 接口，或者通过 1 个 2.5GE 接口与 1 个 GE 接口进行聚合，可提供不低于 3Gbps 的有线接入能力，为 NAS 等高带宽需求业务带来高速接入体验。

无线接入方面，宜支持三频 IEEE 802.11be 2+2+2 配置，同时具备 2.4GHz 2\*2 MIMO、5.2GHz 2\*2 MIMO 和 5.8GHz 2\*2 MIMO 三个频带的无线接入能力，形成一条低速通道和两条高速通道，实现 5.2GHz 和 5.8GHz 频段的 MLO 传输技术。可提供 WAN 口和 WLAN 互相之间不低于 3Gbps 的无线接入能力，有效保障大文件下载业务和高清视频直播的快进、快退等操作体验。

### 3.1.2 超千兆从 FTTR 设备

超千兆从 FTTR 设备部署在各个房间，通过室内光纤与主 FTTR 设备连接。该设备将光信号转换为电信号，为用户提供 GE/2.5GE 或 GE/10GE 有线接入和 IEEE 802.11be 三频或双频无线接入的超千兆接入能力。

从 FTTR 设备由主 FTTR 设备统一管理和控制，与主 FTTR 设备及其他从 FTTR 设备共同构成一张无缝漫游的 WLAN 网络。设备外形设计小巧美观，便于部署安装。

在网络侧接口方面，从 FTTR 设备通过不低于 2.5Gbps 光接口上行连接主 FTTR 设备，满足从 FTTR 设备超千兆网络覆盖需求。

在用户侧接口方面，从 FTTR 设备提供有线和无线接口连接用户终端。有线接口配置包含 1 个 10GE 或 2.5GE 接口，以及 1 个 GE 接口，能够满足大带宽有线传输需求，为 NAS 等高带宽需求业务提供高速接入体验。无线接入方面，从 FTTR 设备具备双频 IEEE 802.11be 2+2 接入能力，并可支持三频 IEEE 802.11be 2+2+2 配置。从 FTTR 设备支持 2.4GHz 2\*2 MIMO，和 5.2GHz 或 5.8GHz 2\*2 MIMO 两个频段的无线接入，也可支持 2.4GHz、5.2GHz 和 5.8GHz 三个频带的无线接入能力，及相应的 MLO 传输技术。

### 3.1.3 家庭 IFDN 布线系统

IFDN (Indoor Fiber Distribution Network) 是指室内光纤分配网络，它是 FTTR 布线系统中的核心组成部分。IFDN 通过光纤介质和分光器构建室内光纤网络，为 FTTR 系统提供基础连接架构，确保主从 FTTR 设备之间能够建立稳定可靠的连接，从而实现全屋超千兆网络覆盖。

IFDN 采用点到多点 (P2MP) 架构设计, 通过无源光分路器实现一根主干光纤连接多个从 FTTR 设备。这种分光器设计极大地减少了光纤布线数量, 有效降低了部署成本和工程复杂度。在 IFDN 中, 通常采用 G.657.B3 标准的单模抗弯光纤作为传输介质, 其弯曲半径应不低于 5mm。

### FTTR 布线实例

图 3-2 描述了一个四室一厅的住宅室内入户光缆到光纤信息点位之间的布线系统。入户光缆进入家庭配线箱, 入户连接主 FTTR 设备, 然后通过引出光缆引出到每个需要的通信引出端, 并连接到从 FTTR 设备。主 FTTR 设备自带 WLAN 功能, 优先放置在信息箱外面的客厅中。

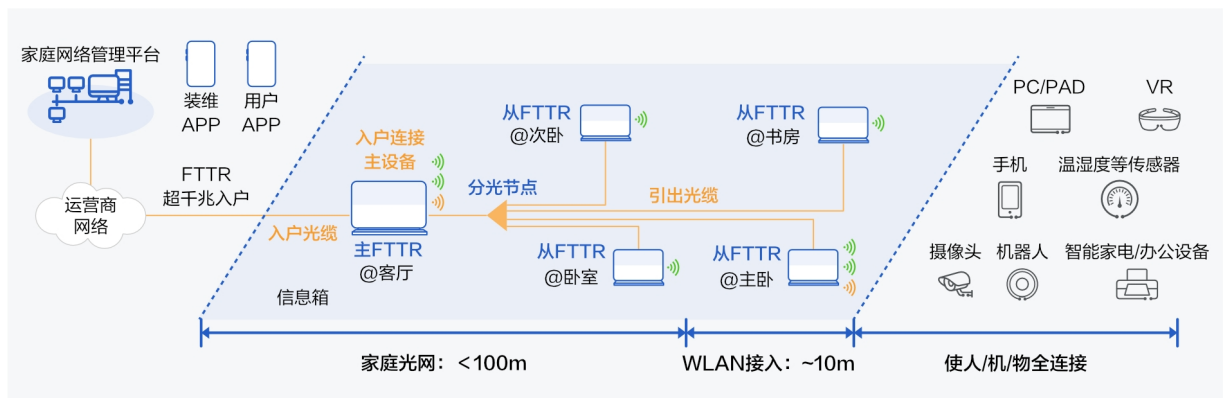


图 3-2 典型家庭住宅套内布线系统

其中, 分界点是接入服务商和用户布线设施之间的接口点, 分光节点是主 FTTR 设备到从 FTTR 设备的点到多点光纤分配点。其位置在接入服务商提供和安装的网络接口装置处, 接入服务商应按相应的规范连接到分界点处。

- **配线箱配置规范**

在普通住宅场景中, 通常配置一个家庭配线箱。箱内需要设置配线交接设备或无源分光节点, 用于连接入户光缆和引出光缆。通过分光节点将接入业务信号分配到住宅各个房间。针对多楼层别墅场景, 根据实际需求在每层或每几层设置一个或多个配线箱 (或过路箱)。可通过每层配线箱中的分光节点实现链式组网扩展, 这种设计在实际部署过程中提供了更好的灵活性。配线箱的位置选择需要综合考虑美观性、布线便利性和热点覆盖效果。配线箱及相关设备可采用壁挂式或嵌入式安装方式。当箱内需要安装无线接入设备时, 应选用非金属材质的箱体或面板, 并在设计安装位置时充分考虑无线信号的覆盖需求。

- **电源配置要求**

在信息配线箱/间内需要安装 220V 交流电源, 必须使用符合规范要求的带保护接地的电源插座或电源柜。电源插座的安装高度应与已安装的配线箱及相关设备保持协调一致。

- **引出光电缆通道设计**

新建住宅项目中，引出光电缆应采用暗管敷设方式。通常在墙壁和天花板施工完成前，在预先设置的墙壁、立柱和天花板管孔中进行光电缆布放，实现预布线系统。对于旧住宅改造项目，根据实际情况可选择暗管或明线敷设方式。引出光电缆通道应从家庭配线箱敷设至住宅内人员经常活动的区域，包括起居室、卧室、书房等空间的光纤面板位置。

- **引出光电缆类型选择**

根据不同应用场景的需求，主要采用以下光电缆类型：

- 普通光缆/跳线：常用类型包括蝶形缆或圆缆。使用不带连接器的光缆时，需要专业人员使用专业设备进行熔纤或冷接端子处理，现场制作连接器。使用带连接器的跳线时，由于常规连接器体积较大、长度较长，且在穿管过程中保护不足，因此此类跳纤不适合穿管使用。
- 微型跳线：此类跳线采用定制的微型连接器，具有良好的穿管适应性能，同时具备优异的保护和抗拉力特性，特别适用于穿管敷设场景。

基于具体施工场景和施工效率要求，可以选择合适的光电缆类型，实现光缆的快速高效部署。

### 3.1.4 网络管理平台

网络管理平台实现对 FTTR 超千兆网络的远程管理，包括 FTTR 超千兆网络拓扑可视、超千兆主从 FTTR 设备和状态可视、超千兆 FTTR 下挂设备状态可视、告警管理、超千兆 FTTR 网络配置与调优、超千兆 FTTR 网络运维和升级等功能。

网络管理平台连接超千兆主 FTTR 设备对 FTTR 超千兆网络进行统一管理，由超千兆主 FTTR 设备对超千兆从 FTTR 设备进行代理管理。超千兆主 FTTR 设备集中采集 FTTR 超千兆网络内的设备、状态、告警、WLAN 信息并上报到网络管理平台，由网络管理平台进行数据分析，并呈现实时拓扑、告警和网络的调优，实现对 FTTR 超千兆网络的可视、可管和可维。

## 3.2 FTTR 超千兆核心优势

中国区 WLAN 频谱包括 2.4GHz, 5.2GHz, 5.8GHz 三个频段。FTTR 千兆采用双频 WLAN，支持 160MHz 频宽，选用使用 2.4GHz 和 5.2GHz 时，实现真千兆网络体验。FTTR 超千兆则建议支持三频，同步覆盖 2.4GHz, 5.2GHz 和 5.8GHz 三个频段，进一步提升网络性能。

三频 FTTR 设备在家庭宽带套餐层面实现“三千兆”能力，通过双 5GHz 频段并发传输，峰值速率稳定 3Gbps 以上，显著提升带宽能力；三频 FTTR 额外多一个频段，可以提升网络容量，服务更多用户；在业务时延方面，三频 FTTR 有 2 个 5GHz 频段，当其中一个 5GHz 频段有其它设备占用时，可通过另一个 5GHz 频段发送，从而降低空口等待时延；对于大屏业务，三频 FTTR 支持将 4K 视频提升到 8K 视频，让用户享受到更好的视频体验；对于云游戏、云电脑等业务，三频 FTTR 能够实现更快的响应，避免操作卡顿；对于直播业务，三频 FTTR 可以将直播码率从标清提高的高清，有助于吸引粉丝，提高打赏率；对于 AI 文本对话、图像视频解析、图像视频生成业务，三频

响应更快，操作更丝滑；对于 Agent Token 调用，三频 FTTR 响应更快，减少 Agent 重新发起请求的概率，避免 Token 重复计费；对于具身智能业务，三频可以避免响应迟钝的现象，提高人机交互体验。整体而言，三频 FTTR 通过技术升级，带来更高速、更稳定、更智能、更沉浸的网络体验，全面赋能家庭与个人数字化生活。

### 3.2.1 价值 1：更大网络容量

三频 FTTR 增加 1 个频段，相当于在原有网络基础上多修一条“高速公路”，网络容量更大。在用户终端数量和网络流量不断增加的场景下，可有效减少网络拥塞，保障各类应用稳定运行要求。在相同用户数量的条件下，每用户可获得带宽提升 50% 以上。例如在过年团圆，或者生日开 party 等场景，即使有十几个人甚至几十个人同时使用，网络仍然不卡顿。

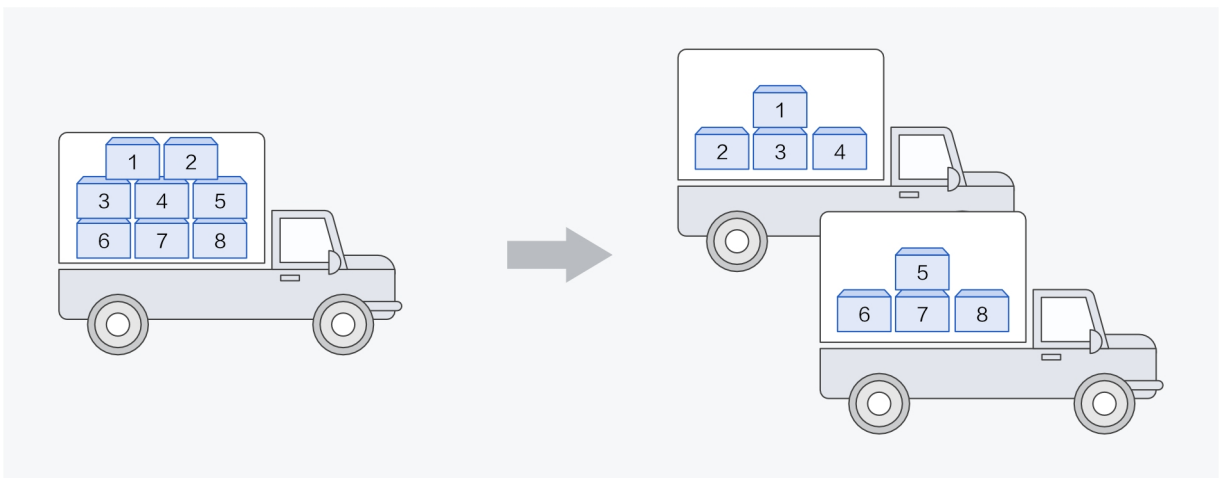


图 3-3 新增频段扩大“载货”容量

同时，通过整网并发技术，实现空间复用，进一步提升网络容量。通过多 AP 智能协同发送，同一信道可被多个房间并行使用，使整网并发吞吐量大幅提升。此外，通过 AP 智能天线波束协同，进一步降低并发干扰，提高并发效率。



图 3-4 整网并发提升网络容量

### 3.2.2 价值 2：更低网络时延

2.4GHz 频段目前已处于高负载繁忙状态，双频相当于 1 条国道（2.4GHz）+ 1 条高速公路（5.2GHz），当 5.2G 频段出现拥塞（如大量设备同时进行下载业务）时，其他用户的业务时延会显著增加，影响使用体验。三频 FTTR 方案相当于 1 条国道（2.4GHz）+ 2 条高速公路（5.2GHz + 5.8GHz），2 条高速公路同时拥塞的概率更低，从而大幅降低业务拖尾时延，获得更好的业务体验。实验室测试，三频 FTTR 相对于双频 FTTR，99% 报文的最大时延可以降低 50% 以上。

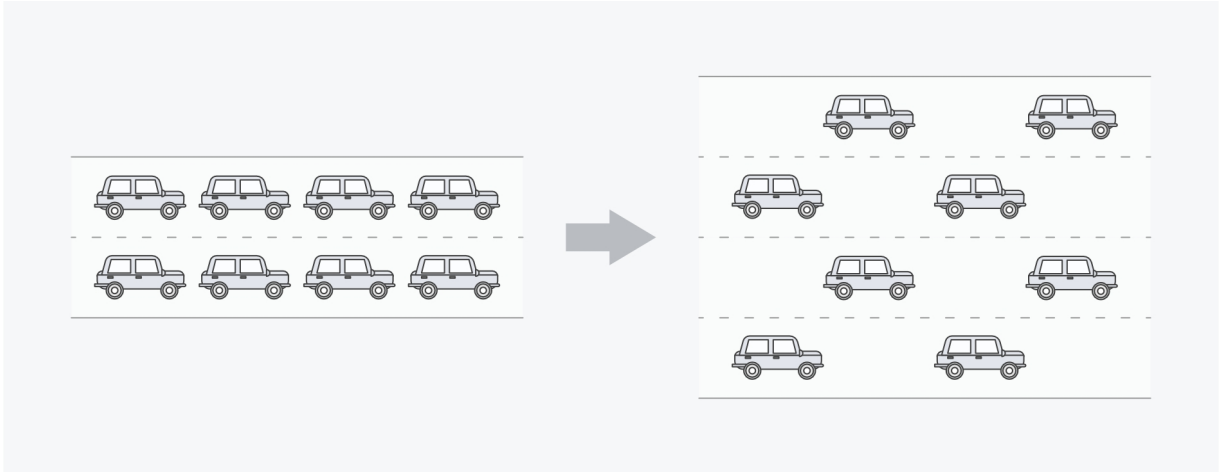


图 3-5 新增频段开拓新“高速公路”不拥塞

结合三频能力，支持多层次调度和协同。Link 内时频资源调度，竞争参数协同。Link 间根据负载和干扰情况实时调度和分配 Link 资源。AP 间通过整网并发技术有序发送，减少冲突。

实测表明，在整网高负载下，关键业务时延可降低到毫秒级。在多个房间同时使用 4K/8K 视频、上行直播、在线教育、居家办公、云游戏、云 VR、AI Agent、AI 实时交互等业务时，做到相互不影响，业务不卡顿。

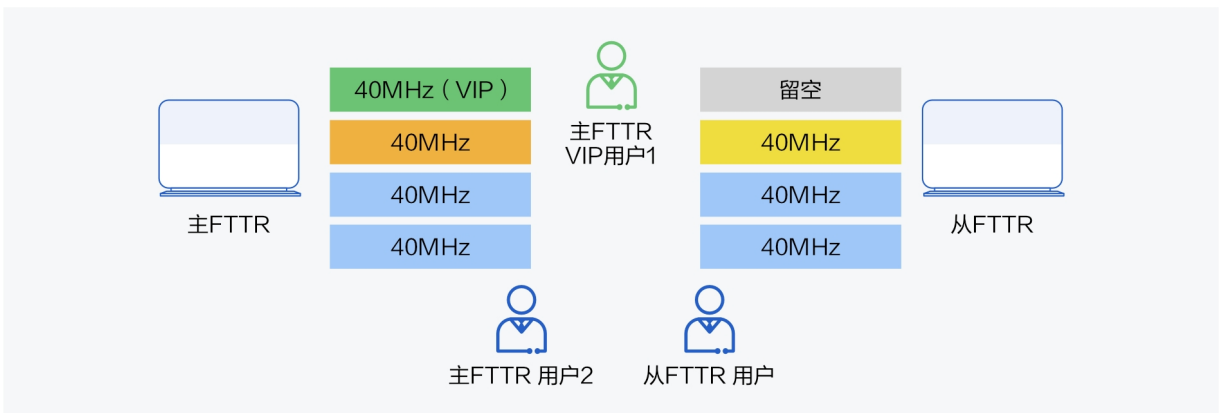


图 3-6 整网时频资源调度降低 VIP 业务时延

### 3.2.3 价值 3：大屏体验更清晰

广电总局正在推动一体化电视，将机顶盒功能以软件形态内置于电视机中，打造极简终端形态，一台电视机即可畅享海量直播、时移、回看、点播等全类型电视业务，具备开机看直播、一个遥控器看电视、智能语音交互、超高清呈现功能。

一体化电视可使用 WLAN 连接替代网线，更具便捷性。三频 FTTR 可有效支撑 VR 大屏类业务品质提升，为用户带来更清晰、更沉浸的大屏观看体验。

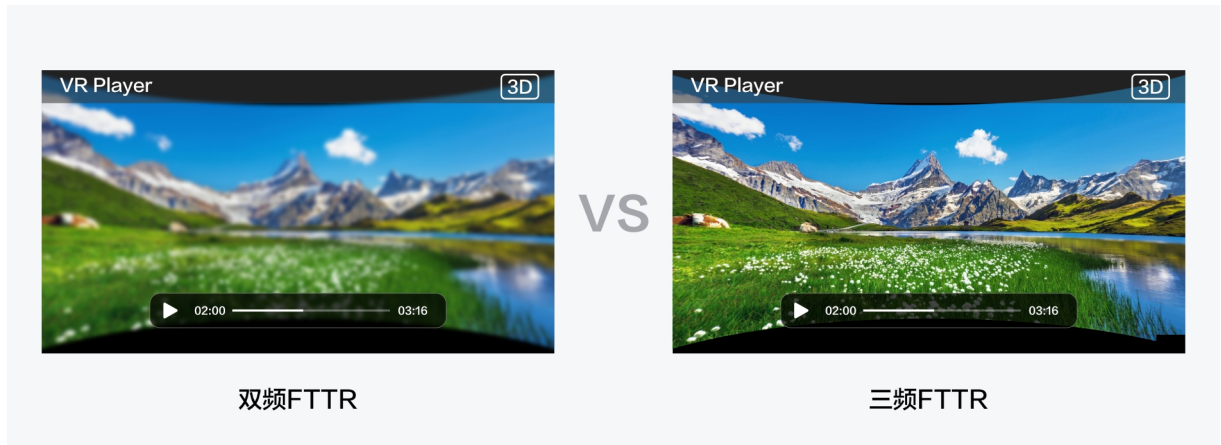


图 3-7 三频助力 VR 大屏体验更清晰

### 3.2.4 价值 4：云端业务更流畅

考虑便捷性、可靠性、安全性，越来越多的用户使用云电脑、云游戏等云端业务。此类业务对键鼠操作时延要求极高，时延过大会导致云电脑打开慢、云游戏加载卡顿、键盘输入延迟、鼠标拖拽不顺畅、甚至影响游戏操作体验。三频 FTTR 相对于双频 FTTR，可以显著降低网络时延，大幅提升云电脑、云游戏操作的流畅性，改善用户使用体验。

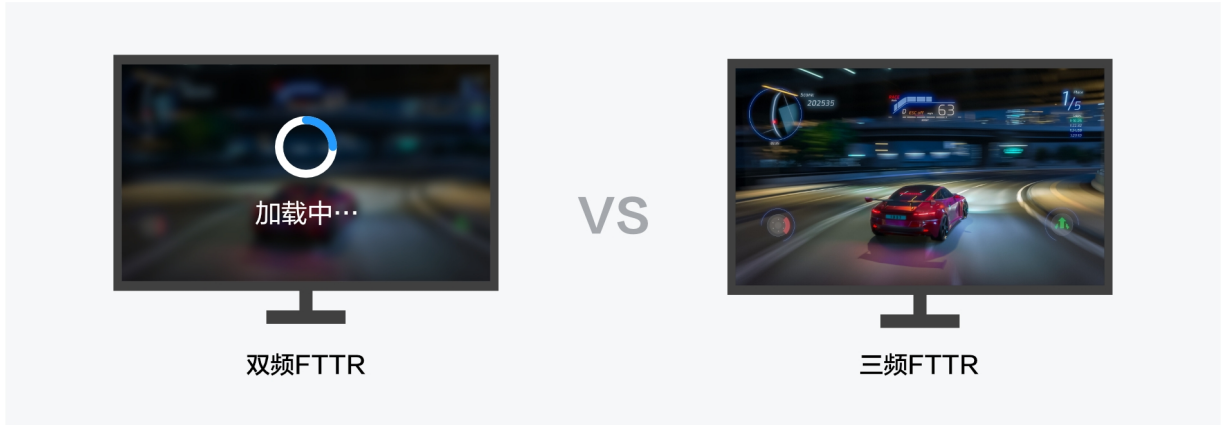


图 3-8 三频提供零卡顿云游戏体验

### 3.2.5 价值 5：直播业务更吸粉

直播已成为重要的生产与变现方式，越来越多的人通过直播实现增收。当网络质量不佳时，直播 APP 会自动降低码率，虽然可维持直播正常进行，但画面清晰度下降，容易导致粉丝流失；而更高清晰度的直播更容易吸引观众，获得观众打赏。三频 FTTR 可以提高直播业务码率，助力主播提升直播画质，吸引更多粉丝，增加收入来源。

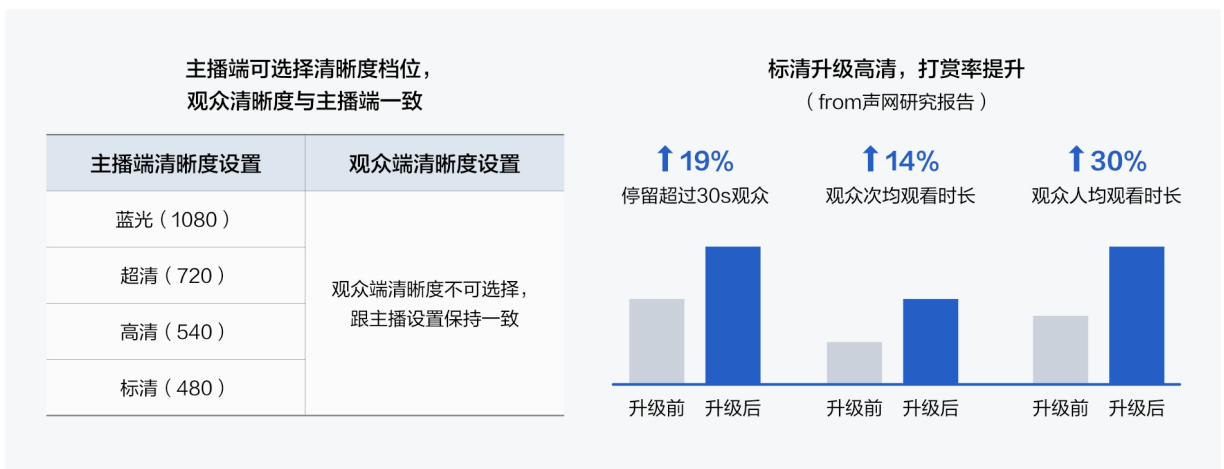


图 3-9 更清晰直播画质提升观看时长

### 3.2.6 价值 6：AI 应用更丝滑

随着大模型技术的爆发式发展，AI 应用快速渗透到工作与生活的各个领域。从文本输入、语音输入，到图像输入、视频输入，从文本输出、到图像输出、视频输出，各类 AI 应用对网络带宽及时延的要求不断提升。

三频 FTTR 通过更高的网络带宽，更低的传输时延，为 AI 业务发展提供有力支撑，确保各类 AI 应用操作更丝滑、响应更迅速。

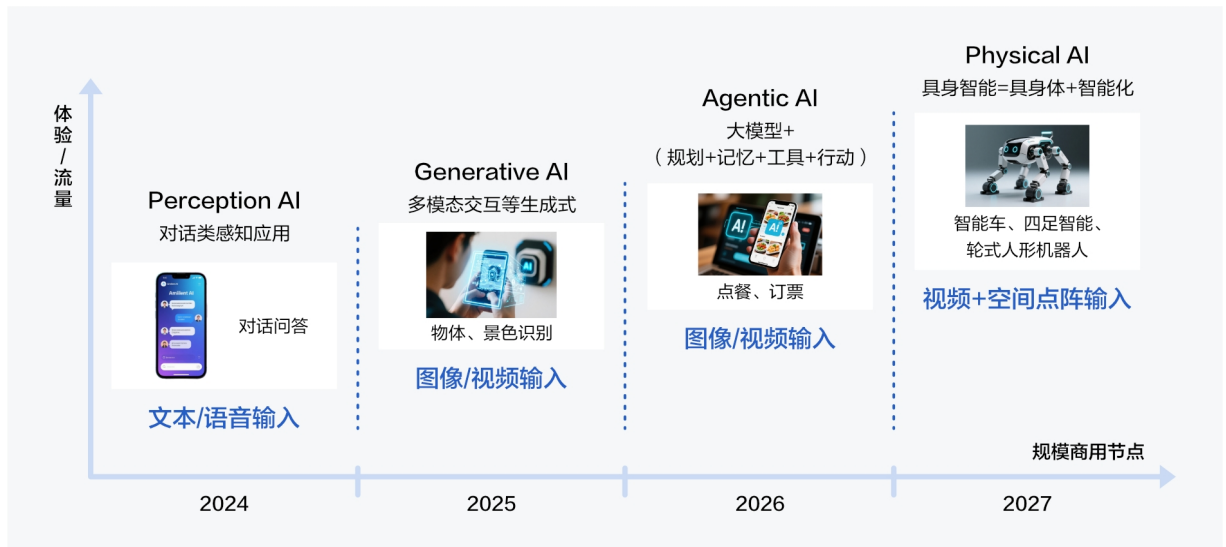


图 3-10 三频助力 AI 应用持续升级

### 3.2.7 价值 7: Token 调用更高效

随着 OpenClaw 横空出世，AI Agent 获得迅猛发展。AI Agent 调用大模型时，需要所有输入到齐后才能处理，调用时延大，且服务器缓存数据时间长，增加服务器缓存开销。三频 FTTR 可以大幅降低大模型处理时延，提高 Token 调用消息数量，减少服务器缓存压力。

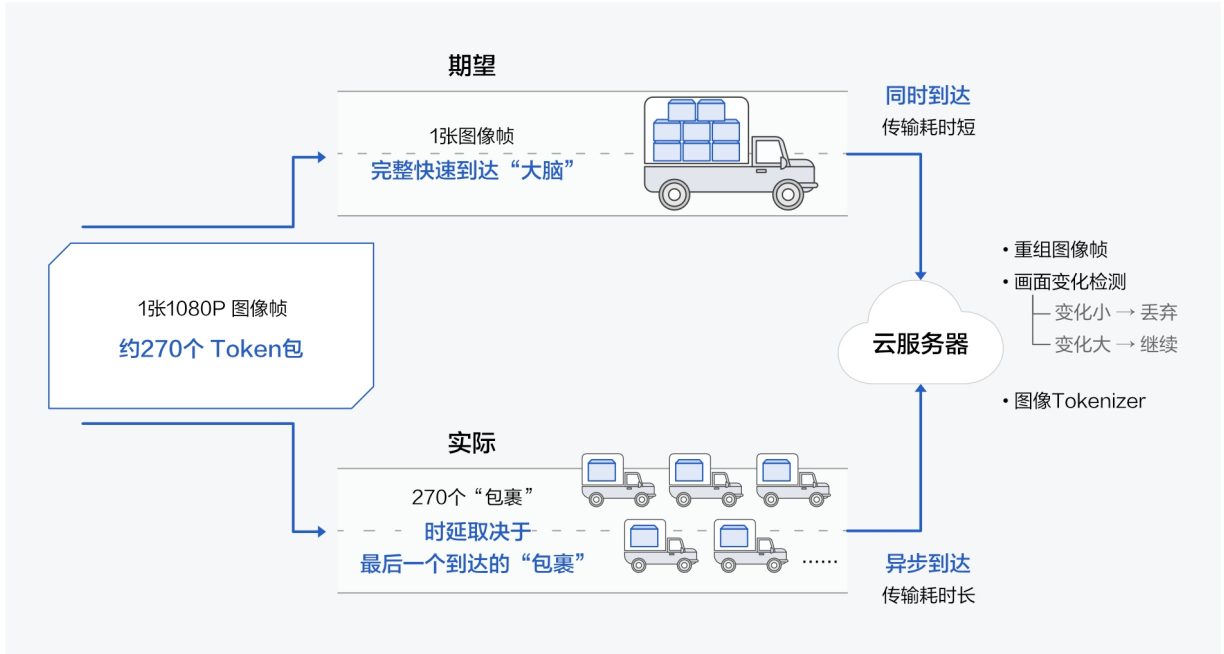


图 3-11 Token 调用实际传输耗时长

### 3.2.8 价值 8：具身智能不迟钝

具身智能对人机交互时延要求极高，网络时延太高，若网络时延过高，会导致机器人反应迟缓，无法实现顺畅的人机交流，严重影响用户交互体验。三频 FTTR 可以有效降低具身智能的交互时延，大幅提升类真人交互体验，推动具身智能在家庭场景的落地应用。



图 3-12 三频降低具身智能交互时延

### 3.2.9 价值 9：感知能力更准确

感知业务通过设备间收发报文，根据信道的变化，来感知目标。当干扰较大时，收发感知报文被影响，不能及时发送足够数量的报文，影响感知的准确性。

三频 FTTR 可以支持三个独立感知通道，可灵活选择用不同的频段发送感知报文。当某个频段干扰较大时，可通过其它频段成功发送感知报文，从而保障 WLAN 感知的准确性。极大程度降低干扰对感知的影响。即使在有邻居干扰、多业务并发、大流量负载下，仍能维持较高的感知准确率，确保感知业务稳定运行、不中断。

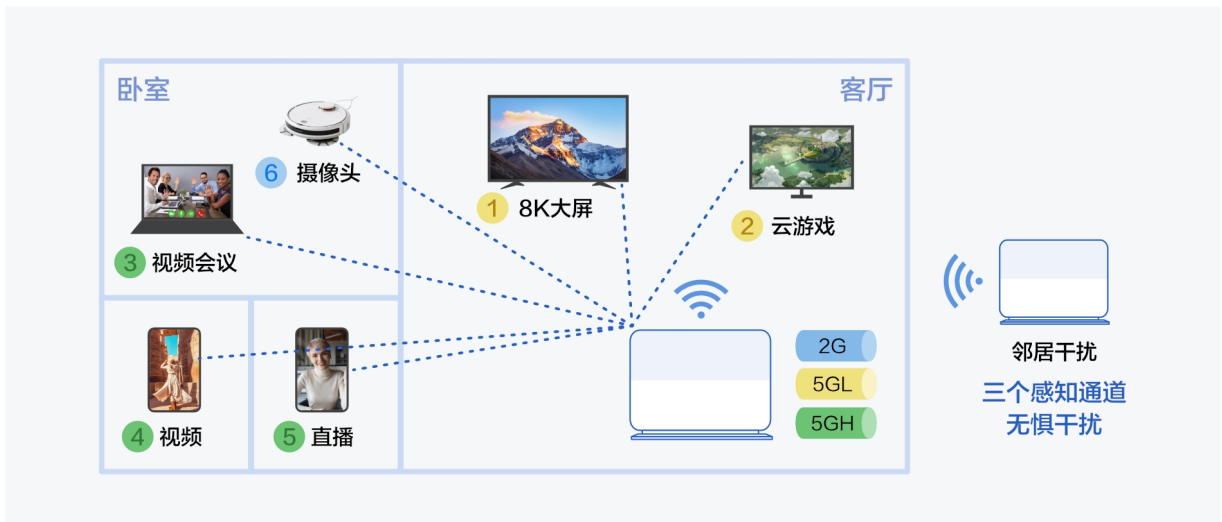


图 3-13 三频支持三个独立感知通道

### 3.2.10 价值 10：宽带套餐三千兆

IEEE 802.11be 标准虽然最高支持 8 流传输，但端侧设备受限于尺寸、功耗、天线布局等约束，通常仅支持 2 流传输。双频 FTTR (2×2 40MHz + 2×2 160MHz) 空口协商速率虽可达 3570Mbps，但受 2.4GHz 干扰及帧头开销影响，实际测速速率只能达到 2.2Gbps 左右。三频 FTTR 通过双 5GHz 并发 (2×2 160MHz + 2×2 80MHz)，空口协商速率可达 4323Mbps，实际测速可达 3Gbps 及以上，可完美支撑三千兆宽带套餐落地。

表 3-1 FTTR WLAN 套餐规格配置

FTTR WLAN 规格	频段配置	理论物理速率 (Mbps)	套餐验收速率
IEEE 802.11ax 双频	2.4GHz+5.2GHz	2400	1.6Gbps~1.8Gbps
IEEE 802.11be 双频	2.4GHz+5.2GHz	688+2882	2Gbps
IEEE 802.11be 三频	2.4GHz+5.2GHz+5.8GHz	688+2882+1441	3Gbps

## 3.3 FTTR 超千兆网络测评方法

### 3.3.1 测速核心原则与前提条件

FTTR 超千兆测速是检验 FTTR 网络服务质量及验证签约速率的核心手段，其结果的真实性与准确性直接影响用户权益维护与网络优化决策以及最终用户的上网体验。

FTTR 超千兆测速，是指用户侧终端（通过 WLAN 或有线接入）与网络侧测速平台之间，基于 TCP 或 UDP 协议进行数据传输的测试过程。基于不同的接入方式，区分为 WLAN 接入速率和 LAN 接入速率，为测试出准确的用户可获得的最大速率，需要在测速设备、测试环境、测试数据采样处理等方面进行统一，确保测速有效性。

#### 3.3.1.2 测试设备要求

运营商通过装维 PDA 接入速率测试平台进行测速时，其最终测试结果不仅与宽带接入服务运营商提供的网络状况相关，与用户终端设备的配置和运行情况也有一定关系。本章将提供用户终端设备、宽带接入速率测试平台、基于浏览器/客户端软件的测速客户端的技术要求。

测速用的装维 PDA 按照终端类型，和有线或无线测速场景区分技术要求如下：支持 2.5GE + 1GE 双网口、双 2.5GE 网口或以上，支持双网口聚合功能，保障能测试到超千兆速率水平；或支持 IEEE 802.11be 协议，支持 5.2GHz（160MHz）+ 5.8GHz（80MHz）双 5GHz 频段 MLO 聚合，CPU 及内存规格不影响超千兆测速。

消费者用户测速设备规格建议：

- 手机：支持 IEEE 802.11be 协议，支持 5.2GHz（160MHz）+ 5.8GHz（80MHz）双 5GHz 频段 MLO 聚合，CPU 及内存规格不影响超千兆测速。
- 笔记本：支持 IEEE 802.11be 协议，支持 5.2GHz（160MHz）+ 5.8GHz（80MHz）双 5GHz 频段 MLO 聚合，CPU 及内存规格不影响超千兆测速。

因同时存在有线测速和无线测速的验收要求，基于终端设备的能力和测试组网的简便性，建议使用装维 PDA 进行超千兆测速。

#### 3.3.1.3 测速服务平台的要求

测速服务平台在功能上由宽带测速节点服务器和统计分析处理系统组成，二者在物理上可以分离，其中，宽带测速节点服务器一般采用分布式方式放置。建议使用国内省份运营商部署的本地带宽测速服务器：

- 宽带测速节点服务器的位置应部署在 BRAS（BNG）处。
- 宽带测速服务平台应提供基于浏览器的测速服务，宜同时提供基于客户端软件的测速服务。

- 宽带接入速率测试平台应支持下行宽带接入速率测试，宜同时支持上行宽带接入速率测试。
- 宽带测速节点服务器的接入线路应采用 10Gbps 及以上的链路连接。
- 应支持多用户并发测试，同时为避免多用户同时测试造成系统运行异常，支持当宽带接入速率测试平台接入带宽耗尽时，对新的测速请求进行排队或提示稍后再测。

### 3.3.1.4 测速环境要求

为了真实反馈用户可获得 FTTR 的最大网络性能，需要在实际的家居常用场景下进行带宽测速，即通过有线终端测试有线的最大带宽，通过无线终端测试无线最大带宽。一般的常用场景有：

- 场景一：用户新装 FTTR 时，装维人员进行签约速率验收，此时通过手持 PDA 连接 FTTR 的有线端口进行测速，当签约带宽大于单个 LAN 口的物理速率时，可通过多端口聚合的方式进行测速。此时要求 FTTR 设备需支持多端口聚合，测速用的 PDA 支持多端口聚合。测速终端与主从 FTTR 通过网线连接。
- 场景二：用户新装 FTTR 时，装维人员进行签约速率验收，此时通过手持 PDA 连接 FTTR 的无线网络进行测速，当签约带宽大于单个 WLAN 物理接口的最大速率时，可通过 MLO 聚合的方式进行测速。此时要求 FTTR 设备支持 MLO 功能，测速用的 PDA 支持 MLO 功能。测速终端与主从 FTTR 的 WLAN 接入设备建议距离约 0.5 米的距离，终端应放置在与 WLAN 接入设备相同的高度，周边 WLAN 干扰源的占空比低于 10%。
- 场景三：用户终端在客厅沙发、主卧、次卧。用户终端可以为手机、平板、笔记本、NAS 设备，终端放置在经常使用位置，通过 NAS 双网口聚合功能或者手机、平板等设备的 MLO 聚合功能进行测速。无线测速时，人体不异常阻挡在终端和 WLAN 接入设备间。

### 3.3.1.5 测速执行要求

测试次数要求：由于 WLAN 干扰导致速率、时延不稳定、上层网络的波动，建议测试 3 次以上取平均值。

测试时背景业务要求：关闭测试终端的除测速应用以外的其他网络应用，关闭待测 FTTR 下挂的其他终端设备，同时避开网络高峰时段，选择网络稳定时段测试。

## 3.3.2 有线双网口聚合测速

### 3.3.2.6 测试拓扑

FTTR 超千兆测速时，用户终端需要通过网线接入到 FTTR 设备的 LAN 口。具体组网如图 3-14 所示。

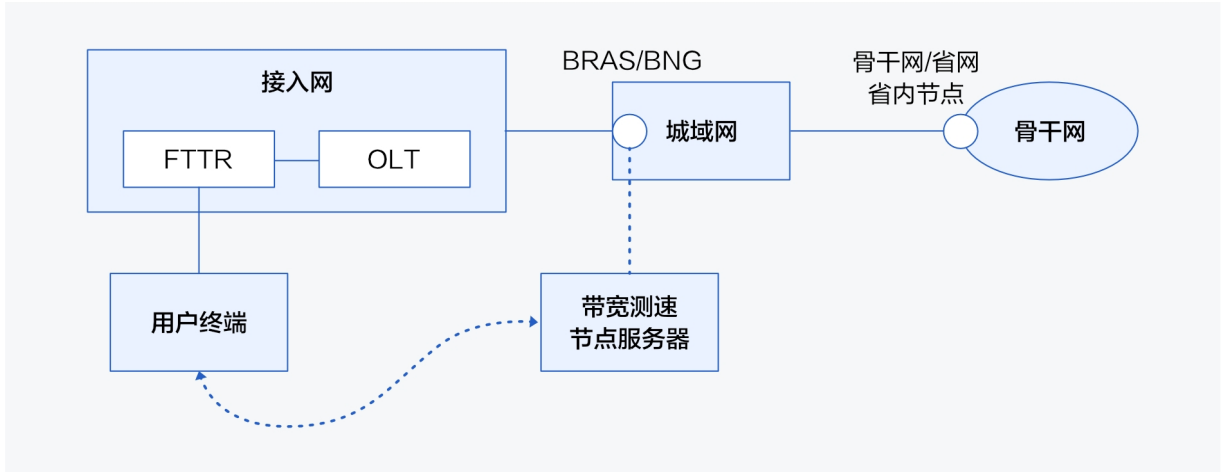


图 3-14 有线接入速率测试拓扑图

### 3.3.2.7 测试方案

本章节以三千兆签约带宽为例，介绍三千兆签约带宽下 FTTR 有线测速的步骤。如图 3-15 所示。

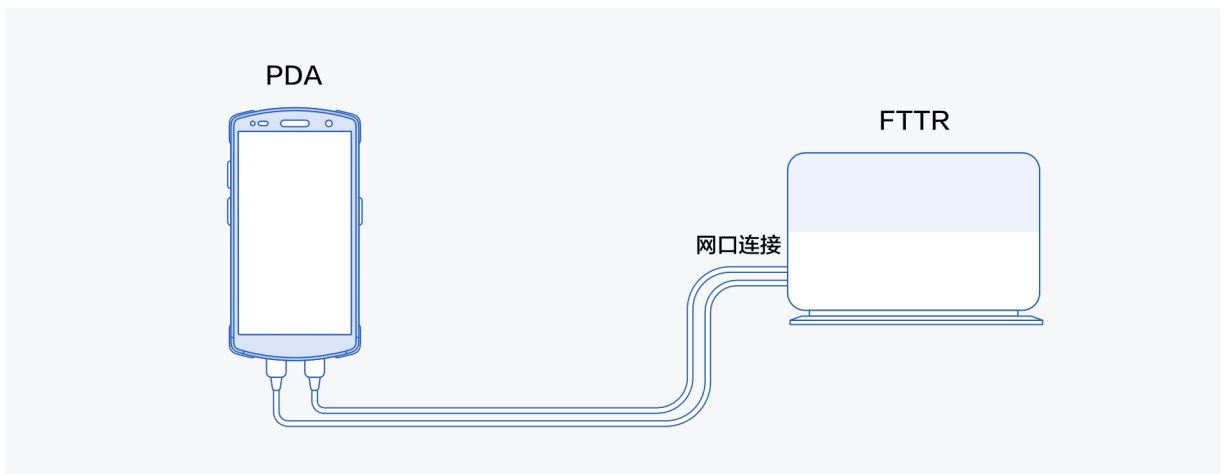


图 3-15 双 PDA 有线测速示意图

FTTR 超千兆测速，采用在测速客户端软件与宽带接入速率测试平台之间通过 TCP 连接进行数据传输的方式进行，本文件所指的测速客户端软件一般为用户终端上安装的专门的测速客户端软件、内置的速率测试功能模块、基于浏览器的测速服务软件，在技术条件具备的情况下，数据传输时应采用多线程。优先使用省份运营商推荐的测速软件和测速节点。

具体测试步骤如下：

1. 如图 3-15 将装维 PDA 设备的两个端口与 FTTR 的两个 LAN 口连接（至少一个 LAN 口支持 2.5GE，或只需一个 LAN 口支持 10GE 的能力）。

2. 装维 PDA 设备上运行测速客户端软件，开启测速。测试开始后，测速客户端软件首先与宽带接入速率测试服务器建立 N 条 TCP 连接 ( $N \geq 5$ )。
3. 等待测速完成，记录测试结果。
4. 重复 3 次测速，记录 3 次测速的结果，取 3 次测速平均值为最终的测速结果。

通过使用支持双网口聚合的 PDA 终端设备，可以在 FTTR 装维测速场景下使用双网口聚合测速方法达成三千兆网络测速验收。

### 3.3.3 无线 MLO 聚合测速

#### 3.3.3.1 测试拓扑

FTTR 超千兆测速时，用户终端需要通过 WLAN 接入到 FTTR 的 WLAN 接口。具体组网如图 3-16。

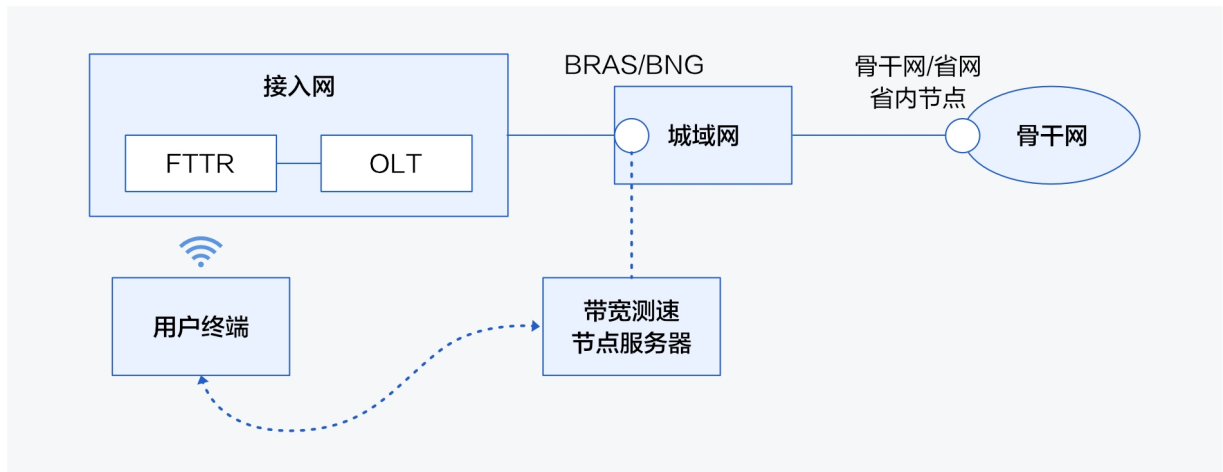


图 3-16 无线接入速率测试拓扑图

#### 3.3.3.2 测试方案

本章节以三千兆签约带宽为例，介绍三千兆签约带宽下 FTTR 无线测速的步骤。如图 3-17 所示。

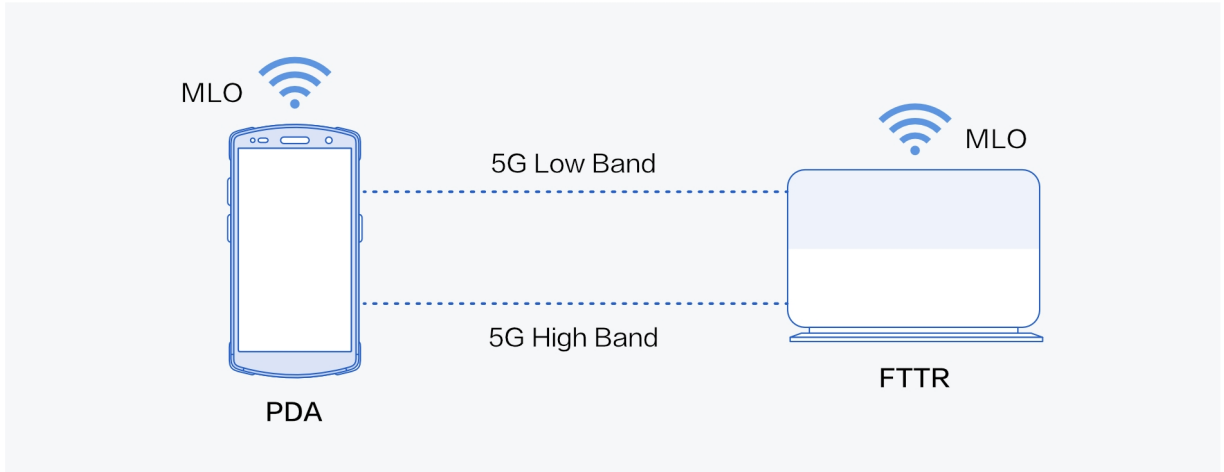


图 3-17 双 5G MLO PDA 无线测速示意图

FTTR 超千兆无线测速，具体步骤如下：

1. 如图 3-17 将装维 PDA 设备（支持双 5GHz MLO）与 FTTR SSID 连接（主 FTTR 开启 MLO 功能）。
2. 装维 PDA 设备上运行测速客户端软件，开启测速。测试开始后，测速客户端软件首先与宽带接入速率测试服务器建立 N 条 TCP 连接（ $N \geq 5$ ）。
3. 等待测速完成，记录测试结果。
4. 重复 3 次测速，记录 3 次测速的结果，取 3 次测速平均值为最终的测速结果。

通过使用支持双 5GHz MLO 聚合的装维 PDA 设备，可以在 FTTR 装维测速场景下使用 MLO 聚合测速方法达成三千兆 WLAN 网络测速验收。

### 3.3.4 超千兆网络业务体验测试

随着家庭场景业务的飞速发展，用户需求已从追求基础的“高速连接”升级为对“全场景、高可靠、确定性体验”的品质要求。为测试超千兆网络的业务体验能力，本白皮书以云游戏业务、直播、视频会议、数据下载等多业务并发的体验保障为例，说明常见家庭多业务并发场景时关键业务的体验测试方法。

#### 3.3.4.1 测试组网

云游戏业务体验测试时建议选择运营商 TOP 3 以上的云游戏服务提供商，并选择所在平台 TOP 5 以上的热门游戏进行测试，视频会议选用常见 TOP3 以上的视频会议应用如腾讯、钉钉等会议应用，手机游戏选用热门的手游，同时并发用户常见的大流量下载业务。如图 3-18 所示，为常见的多业务并发测试组网拓扑。

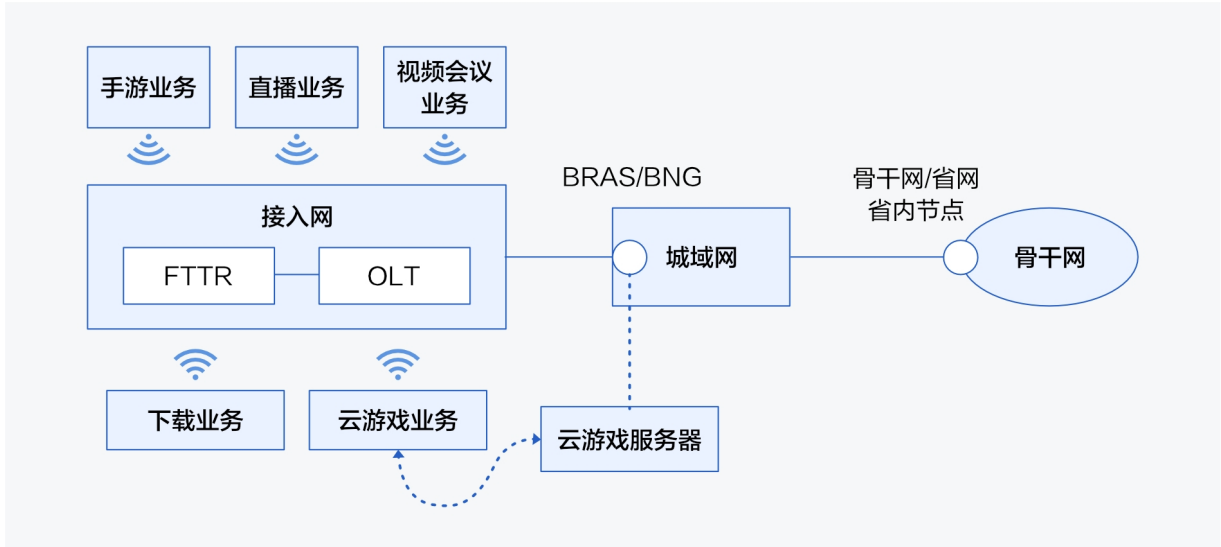


图 3-18 多业务并发体验测试组网拓扑

### 3.3.4.2 测试方法

**云游戏：**是指通过云计算实现的虚拟网络技术，安装在远程服务器中运行，用户通过终端接收渲染后的实时游戏视频图像，并发送指令来进行操控的一种游戏，其关键的 KQI 指标为卡顿时长占比和操作响应时延，其中操作响应时延可分别统计平均时延和大时延（一般>25ms）占比。

**网络直播业务：**是指通过互联网技术，实时传输音频、视频信号，使主播（内容创作者）与观众（用户）进行即时互动，并以此为基础开展内容分发、用户互动、流量变现或商品销售的一系列商业或个人活动。其关键的 KQI 指标为卡顿时长和卡顿时长占比。

**手机游戏：**主要指手机网络游戏，以互联网为传输媒介，以游戏运营商服务器和用户手持设备为处理终端，以游戏移动客户端软件为信息交互窗口的在线游戏。跟网络相关且用户感知到的手机游戏体验 KQI 指标有网络启动时延、卡顿时长占比、操作响应时延，其中操作响应时延可分别统计平均时延和大时延（一般>100ms）占比。

**视频会议：**主要形式为通过电脑进行远程视频会议、桌面共享等方式实现语音、视频交互及内容画面的传递；用户感知的在线教育/远程办公体验 KQI 指标有：卡顿次数、卡顿时长占比、交互时延。

如上指标参考 YD/T 6234-2024 《面向家庭网络的宽带业务体验和网络性能评价指标体系》。

按照测试组网进行测试环境搭建，同时将云游戏终端（运行云游戏）、多个手机终端（运行在线手游、视频会议业务、直播业务）、PC 终端（运行数据下载业务）接入到 FTTR 设备。测试环境中 5.2G 频段和 5.8G 频段均存在约 50% 的占空比的外界干扰，各业务终端的位置如图 3-19 所示。

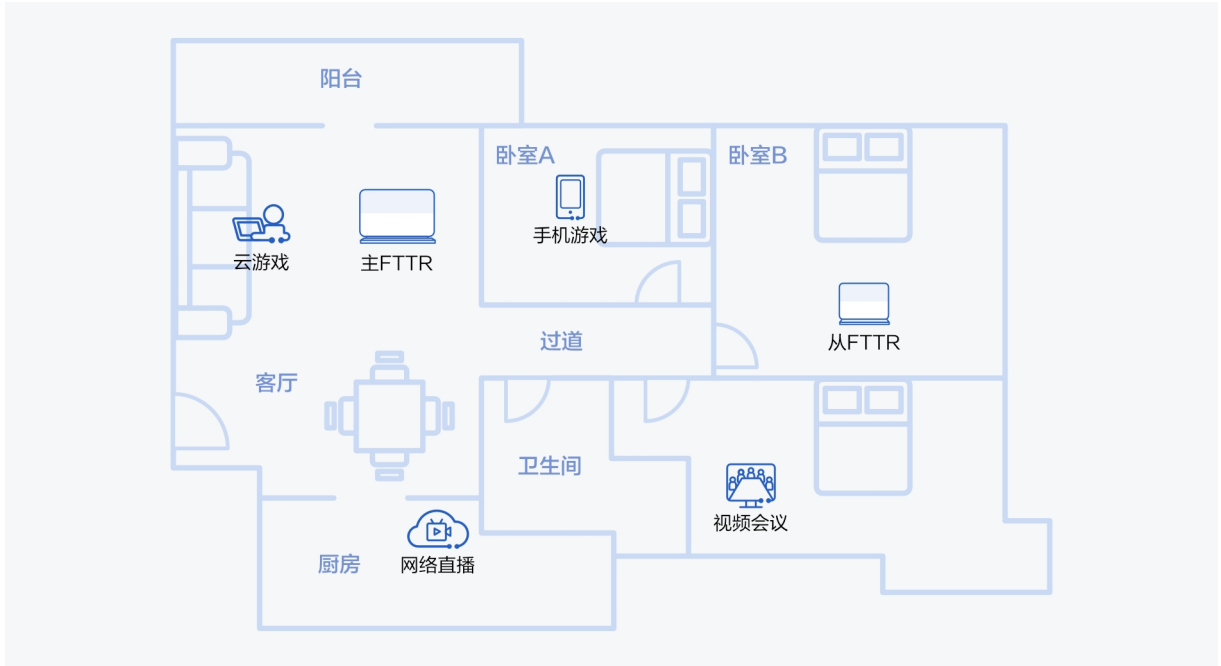


图 3-19 各业务终端位置示意图

同时启动下载、直播、云游戏、手游、视频会议业务，对测试终端进行录屏，执行 5 分钟后，对每个屏幕的录屏结果通过数帧软件和图像识别工具进行分析，统计各业务的卡顿时长及实时时延指标。

## 4 总结与展望

家庭网络正经历一场从“连接导向”到“体验导向”的深刻范式变革。随着 AI 时代的到来，远程办公、在线教育、4K/8K 超高清影音、云游戏、VR/AR 以及全屋智能等多元化、高并发、低时延的业务场景已成为家庭数字生活的常态。用户需求已从追求基础的“高速连接”升级为对“全场景、高可靠、确定性体验”的品质要求。

在此背景下，白皮书系统性地阐述了 FTTR 向家庭超千兆演进的内在逻辑与必然性，FTTR 超千兆解决方案作为实现家庭超千兆全覆盖的核心路径，其核心价值得到了充分体现：

- 1. 技术架构的根本性跨越：**从千兆时代的双频 WLAN 向超千兆时代的三频 WLAN（2.4GHz、5.2GHz、5.8GHz）架构演进。这一变革结合了 MLO（多链路操作）、智能干扰规避等 WLAN 体验增强技术，突破了传统双频架构的频谱和容量瓶颈，为超千兆体验奠定了坚实基础。
- 2. 体验保障的确定性升级：**网络评估的核心从“信号覆盖”和“单点峰值性能”转向“系统级协同效能”和“确定性体验保障”。同时，网络测评方式从单点验证逐步演进至聚合测速，最终迈向分布式测速（即多网关多终端协同测速）。三频 FTTR 通过提供专属高速通道，能够为云游戏、AI 交互、高清直播等高优先级业务提供 SLA 级承诺，实现从“尽力而为”转变到“确定性保障”。
- 3. 解决方案的全面性优势：**三频 FTTR 超千兆解决方案，通过超千兆主/从 FTTR 设备、家庭 IFDN 布线系统及智能网络管理平台的协同，可提供高达 3000Mbps 的峰值速率、上行大带宽超千兆能力、支持多设备海量并发以及超低时延，匹配 AI Agent、直播、云游戏等高频交互业务需求。

在 AI 数字化智慧家庭的驱动下，FTTR 超千兆是推动宽带全产业链高质量发展的新动能。当前我国宽带正从“千兆普及”向“万兆启航”加速演进，本白皮书旨在打造“端网业”协同匹配的超千兆网络，落实宽带提质升级，助力行业高质量发展。超千兆不仅是宽带速率的提升，也是抓住家庭网络迈向 AI 的必备入口、避免业务同质化的关键抓手，助力业务向 AI 服务化、生态化转型，为运营商开展实时服务质量保障的 Token 经营提供网络基础。建议运营商、设备商、标准组织加强协同，加速推进 FTTR 超千兆系列标准的制定与完善，合力推动产业生态健康发展。

## 缩略语

英文缩写	英文全称	中文全称
AIGC	Artificial Intelligence Generated Content	人工智能生成内容
AP	Access Point	接入点
AR	Augmented Reality	增强现实
BNG	Broadband Network Gateway	宽带网络业务网关
BOSA	BiDi (Bidirectional) Optical Sub Assembly	双向光学子板
BRAS	Broadband Remote Access Server	宽带远程接入服务器
CCA	Clear Channel Assessment	空闲信道评估
CSI	Channel State Information	信道状态信息
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access	增强型分布式信道访问
FEM	Front End Module	射频前端模组
FTTR	Fiber To The Room	光纤到房间
IFDN	Indoor Fiber Distribution Network	室内光纤分配网络
IoT	Internet of Things	物联网
KQI	Key Quality Indicator	关键质量指标
LAN	Local Area Network	局域网
MAC	Media Access Control	媒体接入控制

英文缩写	英文全称	中文全称
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制和编码方案
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多入多出技术
MLO	Multi-Link Operation	多链路操作
NAS	Network Access Server	网络接入服务器
ODN	Optical Distribution Network	光分配网络
OLT	Optical Line Termination	光线路终端
ONT	Optical Network Terminal	光网络终端
P2MP	Point to Multiple Point	点到多点组网
PDA	Personal Digital Assistant	个人数字助理
PHY	Physical Layer	物理层
PLC	Power Line Communication	电力线载波通信
PON	Passive Optical Network	无源光网络
SLA	Service Level Agreement	服务水平协议
SSID	Service Set Identifier	服务集标识符
STA	Station	终端设备
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议
TTLM	TID to Link Mapping	终端 ID 到链路映射
UDP	User Datagram Protocol	用户数据报协议

英文缩写	英文全称	中文全称
VR	Virtual Reality	虚拟现实
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网



媒体合作: [contact@waa-alliance.org](mailto:contact@waa-alliance.org)

工作机会: [contact@waa-alliance.org](mailto:contact@waa-alliance.org)

业务合作: [contact@waa-alliance.org](mailto:contact@waa-alliance.org)

官方网站: [www.waa-alliance.org](http://www.waa-alliance.org)