

NGOAN 技术发展 白皮书



2022

前 言

随着宽带网络的全面普及和互联网应用的蓬勃发展，同时，科技竞争和产业革命大潮澎湃，经济社会的数字化转型进程加速前进，有线接入网从单一的带宽提升走向了以千兆、全光连接、极致体验为特征的千兆光接入网时代。从人机时代到 M2M 时代，千兆光网是第二次光改革命，支撑家宽高品质发展和千行百业数字转型，带来了业务、体验、运营等方面的持续创新和融合。为适应固定宽带网络新形势发展需求，2021 年 11 月 2 日在中国移动全球合作伙伴大会上，移动研究院联合 7 家合作伙伴共同发布了《NGOAN 智能光接入网白皮书》。

一年以来，为推动国家新基建战略的落实，中国移动充分发挥中央企业“网络强国、数字中国、智慧社会”主力军的作用，积极构建“连接+算力+能力”的新型信息服务体系，制定了算力网络总体发展策略。为进一步推动 NGOAN 技术和产业发展，本白皮书在去年发布的《NGOAN 智能光接入网白皮书》基础上，结合算力网络全新发展计划，以及最新的政策、产业、标准发展情况，本白皮书阐述了 50G PON 高功率预算收发技术及基于跨层协同机制的低时延技术方案的研究进展及趋势，同时向业界展示了中国移动创新提出的基于光层 OAM 的原生管控维、Wi-Fi 集中管控、PON+FTTR 协同等 FTTR 架构设计与关键技术的研究进展及发展趋势，以期和产业界协同推动下一代光接入网技术和产业的发展。

本白皮书的版权归中国移动所有，未经授权，任何单位或个人不得复制或拷贝本建议之部分或全部内容。

目 录

1.	下一代光接入网演进驱动力.....	6
2.	下一代光接入网技术发展理念.....	8
3.	下一代 PON 关键技术.....	10
3.1	高速光器件.....	10
3.2	高速电器件.....	13
3.3	PON 低时延技术.....	14
3.4	PON 支持网络切片.....	16
4.	FTTR 关键技术.....	17
4.1	网络原生管控维架构.....	17
4.2	集中管控的 Wi-Fi 组网.....	18
4.3	FTTR 物理层.....	20
4.4	FTTR 平滑演进技术.....	21
5.	PON+FTTR 协同关键技术.....	22
5.1	光层 OAM 能力延伸.....	22
5.2	高速数据采集底座.....	23
5.3	智能化关键技术.....	24
6.	应用场景.....	25
6.1	直播宽带.....	25
6.2	5G 小基站承载.....	25
6.3	工业 PON.....	26
6.4	HDICT 场景.....	27
6.5	中小企业场景.....	27
7.	未来展望.....	28
	缩略语列表.....	29

1. 下一代光接入网演进驱动力

当前，千兆光网在我国全面蓬勃发展，5G 千兆和千兆光网为代表的“双千兆”网络发展，对于促进国家信息消费、数字经济发展和新动能壮大，全面支撑我国社会经济高质量发展具有重要意义。中国移动正在积极构建“连接+算力+能力”的算力网络新型信息服务体系，千兆光网络作为算力网络基础设施层的底座，是承载算网服务的高品质运力保障。光接入网一方面支撑千兆光网规模发展，另一方面是算力网络的入口，也是用户入算体验保障的关键。

国家《十四五规划和 2035 年远景目标纲要》和 2021 年《政府工作报告》均对加快“双千兆”网络发展提出了明确要求。光网络已全面进入千兆光网时代，为数字经济持续高质量发展奠定坚实光网底座。光接入网给家庭带来的规模红利正在向垂直行业渗透以普惠千行百业。目前，中小企业的光接入网业务已拓展到企业上云、平安城市（雪亮工程、智慧厨房）、平安乡村、智慧社区等场景应用。中国移动今年推出的全光 e 企组网对中小企业产生重要影响，促使企业内网体验从几兆、几十兆升级到千兆以上的体验，未来光纤到桌面、光纤到终端的技术发展，将极大提升企业办公和生产效率。同时，千兆 2B 即千兆光网在行业中的应用也逐渐成为趋势，光接入网将融入到小微企业智能制造、智慧医院、智慧酒店、智能园区等行业应用，随着“光华杯”的带动影响，光接入网到千行百业已呈现出蓬勃发展的产业生态，将深刻影响行业数字化转型。为企业和行业提供万兆到企业、千兆到桌面、内网百微秒等极致体验，将极大拓展光接入网的服务边界，促进中小企业的数字化转型升级，有效服务办公、生产和生活，助力千行百业智能普惠发展。

受疫情、新型互联网、先进显示及交互技术发展等多重因素影响，家庭已从娱乐中心变化为多元的生活和生产中心，将催生更丰富的宽带新业务并带动下一代光接入网持续演进：一、4K/8K 大屏视频业务蓬勃发展，当前 4K 大屏的存量用户占比已超过 70%，8K、120 帧刷新率等视频终端和业务逐渐进入消费舞台，1 路视频就需要 800Mbps 甚至 1Gbps 以上的接入带宽；二、XR/云字

宙等沉浸式体验业务不断发展，将从 8K 向 16K/32K 甚至更高清晰度升级，以远程办公为代表的多方视频通话、虚拟会议、沉浸式云游戏等将成为常态；三、实时交互 RTC 业务形态（如直播、在线办公/教育等）日益丰富，叠加甚高清和沉浸式视频，将不只是对网络的大带宽有需求，同时对网络小于 20ms、10ms 的低时延会产生需求；四、家庭网络 Wi-Fi 满屋覆盖，Wi-Fi 覆盖本身已成为一种业务，相比自购路由器运营商为用户提供 Wi-Fi 服务将成为行业主流，运营商以网络优势和服务优势，家庭真正形成一张电信级的 Wi-Fi 网络，支撑用户在家庭固定场景达到千兆到终端的业务体验。

中国移动从 2021 年开始全面转向 10G GPON 系统构建，基于“10G GPON+千兆智能网关+Wi-Fi6”实现端到端千兆固网宽带能力，目前千兆光宽带用户覆盖已超 2 亿，200M-1G 签约带宽用户成为绝对主流。面向家庭 HDICT 和行业数字化的未来发展，下一代光接入网需全面提升接入网络的带宽、时延、可靠性、泛在接入和覆盖等能力，并构建极简架构、融合网络智能化能力、切片能力和全光延伸能力，保障算力网络服务端到端体验，促进宽带业务、家庭 HDICT、行业数字化的繁荣发展。

2. 下一代光接入网技术发展理念

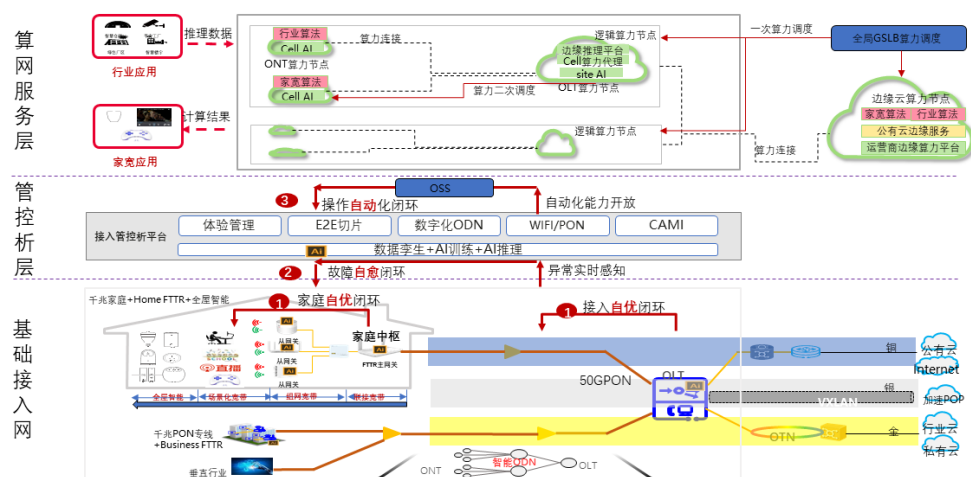


图 1 NGOAN 网络架构图

接入网作为接入运营商网络的第一跳入口，是业务入算的保障。面对算力网络发展需求，光接入网立足于提升网络的带宽、时延和确定性等网络基础能力的同时，还需要融合网络感知和网络切片能力，并能将以上能力向下延伸直达用户终端，支撑端到端面向服务的差异化网络和链路承载资源的匹配和路径调度的优化等，从而提供可承诺的算力接入。因此，下一代光接入网从 FTTH 向 FTTR 演进过程中，需从三个方面持续提升网络能力：

- **提升全光接入性能：**在带宽层面，由 10G PON 逐步向 50G PON 升级实现带宽倍增，为算网服务提供可保证的超千兆带宽需求。在时延层面 50G PON 创新引入跨层协同 DBA 调度、单帧多突发、队列调度等机制全面提升低时延性能。同时 50G PON 需兼容已部署的 10G PON 系统，实现共平台平滑演进。
- **增强千兆无缝覆盖：**FTTx 网络进一步向 FTTR 延伸，FTTR 主从设备全面支持 Wi-Fi 6 千兆能力，未来向 Wi-Fi 7 超千兆能力演进。同时基于管控集中的 FTTR 一张网架构支撑光接入网服务能力向用户侧延伸，对运营商算网服务能力直达用户和终端提供保障。

- 引入智能感知：将大数据底座能力进一步延伸到用户侧（家庭网络/园区网络），引入 Telemetry 和 MQTT 秒级采集机制，光纤基础设施数字化，充分挖掘 PON 和 FTTR 的网络和业务数据，以 OLT 和 FTTR 智能化实现业务感知和网络质量可视、分析和调优，保障算和网能力的精准匹配。

光联万物导致网络规模变大，网络复杂性增强，中国移动积极推动光接入网络围绕以上维度构建面向用户和场景直接提供更灵活敏捷、更高品质的算网服务的能力，以实时动态响应算力业务需求变化，满足接入运力按需调度的需求。支持算网资源智能化、实时化呈现，帮助运维人员直观、全面地评估算网能力。面向算网业务，管控析层需要自动化评估用户入算的 PON 和 FTTR 的连接能力，支撑上层算网大脑智能决策算力和网络的调度方案。

3. 下一代 PON 关键技术

当前，50G PON 已明确成为全球范围内下一代光接入网技术体系，相比已部署的 XG(S)-PON 系统，除带宽提升外，还需满足低时延、高精度时间同步以及支持 PON 切片等功能，以满足未来多场景综合承载的需求。同时，满足已部署 PON 系统平滑演进的需求，50G PON 还应兼容现网 C+等级功率预算，并能够和 XG(S)-PON 实现共存。

3.1 高速光器件

50G PON 光模块结构如下图 2 所示，其中下行线路速率为 50Gb/s，上行速率包括 25Gb/s 和 50Gb/s 两种规格。为满足 C+等级 32dB 的高功率预算要求，需要更高功率和更大带宽的激光器，并且需要提升接收灵敏度，同时引入 DSP 解决色散以及大带宽突发接收问题。当前 50G PON 光模块产业链尚未完全成熟，核心器件需要产业界协同持续突破。



图 2 50G PON 光模块内部结构示意图

1) 大功率 50G EML

为了满足 C+等级 32dB 功率预算，首先要提升 OLT 发射光功率。ITU-T G.9804.3 已发布 OLT 光模块发射机的光接口指标，其中下行 50Gb/s 速率工作波长为 1340-1344nm，满足 C+等级功率预算的最小发送光功率为 8.5dBm。

- 常规的 EML 激光器虽然可以实现较高带宽的，但这类激光器的发射光功率一般仅达到 0~2dBm 左右。为满足 C+等级 ODN 链路预算的需求，需要激光器芯片的原始出光功率达至少到 50mW 以上。然而，如此高的发射功率进入调制器时，常规 EML 的电吸收调制器已达到饱和状态，输出功率无法持续线性增加。所以当前规模使用的 EML 激光器难以在

兼顾带宽、色散的条件下满足如此高的功率输出指标。因此，可使用 EML 集成 SOA 外置放大的方案来满足 50G PON 下行链路预算的需求。

- 近几年业内出现的硅光 MZM 调制器，具有带宽大、啁啾小、尺寸小的优点，容易实现 50Gb/s 的 NRZ 信号调制，且易于集成。但是，硅光 MZM 调制器耦合插损较大，对外部激光器的入射光功率要求更高。若满足 C+链路预算，DFB 激光器发射光功率至少达到 80mW。如此高的入射光功率会在硅基光波导中产生 Kerr 效应、双光子吸收等非线性效应，严重影响输出光信号质量。后续进一步提升耦合效率后，硅光 MZM 也可用于 50G PON 下行发射机。

2) 25G/50G DML

50G PON 上行，考虑 ONU 对成本较为敏感，通常使用 DML 激光器。和下行方向类似，上行方向也需要满足现网 C+等级 32dB 功率预算。因此，除带宽提升外，发送光功率相比 10G GPON ONU 也要进一步提升。目前 ITU-T G.9804.3 已明确上行 25Gb/s 满足 C+功率预算等级的 ONU 发送光功率最小值为 5dBm，而上行 50Gb/s 考虑到接收机灵敏度劣化影响，发送光功率将会更高。

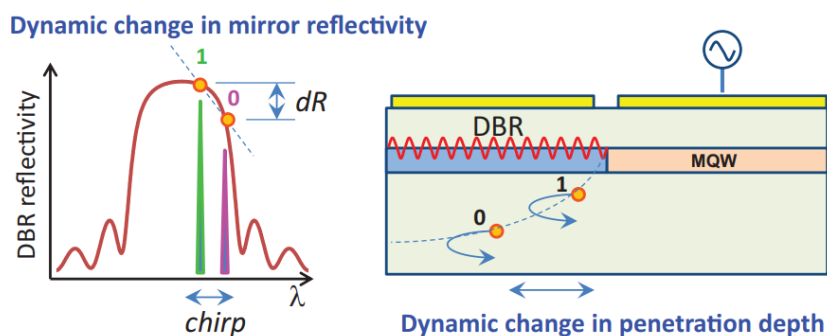


图 3 基于失谐负载效应的 DML 原理示意图

常规的单段式 DML 激光器具有尺寸小、成本低的优点，制作工艺已经非常成熟。然而，直调激光器的主要技术难点是无法同时满足高功率和高带宽要求，目前仅能满足 25Gb/s 上行功率预算需求，暂时无法完全满足 50Gb/s 功率预算需求。使用多段式 DML 激光器可有效解决上述问题。多段式 DML 通常利用复合谐振腔引入失谐负载效应来进行带宽拓展，其结构如图 3 所示。失谐负载效应通常采用在激光器的出光端集成一段无源的 DBR 波导，通过将激光器的布

拉格波长偏调在 DBR 反射谱的长波长端，在大信号调制过程中由于载流子的等离子色散效应，激光器会出现啁啾，失谐负载效应即可利用 DBR 的反射谱将激光器啁啾转换为 DBR 光栅损耗和穿透深度的动态变化，这种损耗调制受载流子影响与增益同相，因此可以提高激光器的微分增益，同时提升带宽。

此外，多段式 DML 激光器的输出信号的频率啁啾值是可控的。通常情况下，瞬时啁啾范围可在 $a=0-3$ 之间实现连续可调。通过调节该指标，可在一定程度上补偿光信号在光纤传输中产生的色散损伤，提升接收机灵敏度。研究表明，50Gb/s NRZ 信号经过 20km 传输后，通过附加合适的啁啾值，可使得接收灵敏度优化 2dB，甚至超过背靠背情况。

3) 25/50G APD

50G PON 系统应使用高带宽、高灵敏度的 APD 完成高速光信号的接收，提升功率预算。目前，ITU G.9804.对 50Gb/s 下行和 25Gb/s 上行 C+等级的功率预算下接收端灵敏度的要求分别为-24dBm 和-27.5dBm。APD 具有噪声低、带宽高、灵敏度高等特点，是实现 50G PON 高灵敏度接收的核心光电器件之一。

- 常规的 III-V 族 APD，采用 InGaAs 或 InAlAs 作为倍增层材料，是 50G PON APD 的一种技术选择。III-V 族 APD 具有噪声低、温度稳定性好等优点，但 III-V 族 APD 的增益带宽积是主要技术难题。当前，常规 III-V 族 APD 增益带宽积约为 105GHz。对于 50G 速率的应用，光器件的带宽要求在 25GHz 以上，III-V 族 APD 的倍增系数只有 4 左右，需通过优化工艺结构设计、材料掺杂等技术持续提升，使得其灵敏度相比标准要求有更多余量。
- Ge/Si 材料的 APD 采用 SACM 结构，是一种吸收层、电荷层和倍增层分离的器件结构，是 50G PON APD 的另一种技术选择。其中硅衬底上外延生长的纯锗作为吸收层材料，硅作为倍增层材料具有低的离化系数比和高增益带宽积的特点。其增益带宽积可提升至 270GHz。同时，Ge/Si APD 的制造流程与标准的 CMOS 工艺兼容，能够在成熟的商用 CMOS 代工厂完成流片，容易实现大规模生产，非常适合光纤到户这种具有海

量需求的应用。

50G Ge/Si APD 搭配目前数据中心通用的 50GBaud 线性 TIA 封装的 APD ROSA 在 $1\text{E-}2$ 误码率下的灵敏度为 -25.5dBm ，可以满足 50G PON 下行 -24dBm 的灵敏度要求。25G Ge/Si APD 搭配 25G 突发模式 TIA 在 $1\text{E-}2$ 误码率下的灵敏度为 -28.5dBm ，可满足 Class C+ 25G 上行接收灵敏度 -27.5dBm 的要求，同时还有 1dB 余量。

目前 ITU-T G.9804.3 定义了 50G 下行和 12.5G/25G/50G 上行基线规格，对于 50G 上行的光接口参数还在讨论中。但考虑 ONU 发射光功率受限，50G 上行接收机的灵敏度要求更高，除 50G PON APD 外，当前可选的另一个方案是采用 SOA+PIN。理论上，SOA+PIN 方案可以获得比 APD 更高的灵敏度。但市场上还没有单片集成的 SOA+PIN 器件，也是业界的突破方向。

3.2 高速电器件

1) Driver

50G PON 下行方向，为保证 50Gb/s NRZ 信号质量，要求 OLT 的 EML 驱动电芯片带宽大于 38GHz，调制后 EML 的输出信号消光比（ER）大于 7dB。需使用芯片内部集成高频扼流圈，通过高速驱动芯片的阻抗匹配、输出预加重补偿等优化技术，满足 50Gb/s NRZ 眼图信号质量的要求。为满足 7dB 以上消光比的要求，驱动芯片的输出幅度应大于 2Vpp ，同时保证芯片功耗小于 500mW。由于驱动芯片增益带宽积受限，在 50G 带宽下满足 ER 要求当前仍存在较大挑战。

在上行方向，50G PON ONU 需要生成 25G 或 50G NRZ 的高速突发信号，要满足 25.8ns 的 burst on/off 突发时序，且输出光功率大于 5dBm ，消光比要大于 5dB。因此，要求使用较高的驱动电流。低成本解决方案倾向于采用无温控 DML，高温工作环境下调制效率下降是突发驱动芯片面临的主要技术挑战。为确保激光器在突发期间光功率保持稳定，需要 driver 具备快速的自动光功率控制技术和偏置电流控制技术。当前 10G 突发 driver 已经在 XGS-PON 中规范成

熟应用，业界已经开发了 25G 突发 driver 样品，消光比和眼图质量在持续优化中。50G 突发 driver 协同 50G 上行激光器方案，产业界正在投入进行研究攻关。

2) DSP

50G PON 相比 10G PON 速率增加 5 倍，高速信号带来的色散代价急剧增加，系统性能受限于高色散代价以及接收机灵敏度的下降，仅依靠硬件性能提升仍然无法满足功率预算需求。因此，接入网首次引入 DSP 技术，通过 DSP 算法消除器件带宽受限以及色散对高速信号传输的影响，提高链路功率预算。

50G PON 系统上行方向存在 12.5 Gb/s、25 Gb/s 和 50 Gb/s 三种速率，且包括不同谱宽的器件，各上行信号所经历的损伤情况之间差异较大。目前 DSP 内部的线性均衡器 FFE 及序列检测 MLSE 等模块按照最恶劣的条件来设计，均衡器一般具有大抽头，长序列等特性，会带来收敛难、训练时间长等问题，且这种单一模式的 DSP 算法对于多速率 ONU 无法达到系统性能最优。因此，需要充分挖掘 DSP 技术潜能，开展动态灵活的 DSP 技术攻关，实现 50G PON 系统性能最佳。

- 物理层 DSP 的方案：对于高速 PON 系统上行多速率 ONU，可以在 DSP 模块中嵌入信号速率识别模块。其中速率识别模块和时钟恢复算法、均衡器算法以及 FEC 解码器需要联合调优，来保证不同速率信号突发帧到来时，均衡器可以在最短时间内达到收敛，实现高速 PON 系统性能最佳。
- MAC 和 DSP 跨层协同的方案：通过 MAC+DSP 跨层协同的机制，利用来自 MAC 的突发先验信息辅助 DSP 内均衡模块的收敛，可以在不影响接收机性能的前提下有效压缩上行前导长度，高效实现多速率 ONU 的突发均衡。

3.3 PON 低时延技术

近年来，随着各种互联网新兴业务的崛起以及 PON 系统的行业应用场景延伸，PON 的低时延需求日益凸显。在 50G PON 标准的制定和讨论中，多个

低时延相关的方案都被提出并纳入 ITU-T 标准。

1) 单帧多突发

在 50G PON 系统中，上行沿用 TDMA 的复用机制。ONU 的上行时隙分配报文位于每个下行帧帧头固定开销的 BWmap 中，每个 BWmap 可以完成该下行帧所对应的 125us 上行时隙分配。当 ONU 在单帧 125us 内有多次发送机会，并辅以极小的突发开销，上行时延将成倍缩减。为保证上行突发发送及接收的正常，需要引入一定的突发开销。在每帧内，突发的个数越多，引入的总开销也越大。因此，低时延技术需要协同优化突发数目以及突发开销：

- 提升 DBA 算力，控制单帧突发的数目，确保上行带宽效率不会过低。

在 50G PON 标准中，OLT 每帧可以给某个 ONU 分配的最大突发数是 16 个，在这种情况下，单个 ONU 最小时延可以达到 $125/16=7.8125\mu\text{s}$ 。同时，对于抖动要求比较严格的系统，各 ONU 突发时隙的位置应保持固定。

- 优化突发开销，提升有效带宽，进而增加突发时隙。突发开销主要由保护间隔以及前导码构成。前导码主要用来做突发信号的电平恢复以及时钟同步，同时对于多速率上行接收，需要完成速率识别。一方面需要优化 TIA 的响应能力以及时钟同步速度，另一方面可引入跨层协同 DBA 机制，DBA 结合下挂 ONU 激光器开启/关闭时间大小，ONU 到达 OLT 的光功率等信息，保证每帧内相邻突发时隙的保护间隔达到最优，避免短板效应，从而将保护间隔的开销降到最低。

2) 带外开窗

为了避免开窗引入的额外时延和抖动，一种有效的方法就是引入额外的一个波长通道实现 ONU 的注册认证。一个上行通道用于正常的业务和管理；另外的一个通道用于开窗，同时，该通道也可以用于发送上行业务。在某些特定应用场景下，为了实现两个上行发射通道间的负荷均衡，OLT 的两个 DBA 调度模块之间需要进行相应的信息互通，以实现上行带宽调度优化。

通过这些低时延的技术方案的引入，PON 系统引入的最大时延可由原来的

毫秒量级降至 300us 甚至更低。

3.4 PON 支持网络切片

50G PON 未来需要更好的支持多业务差异化承载需求，支持网络切片是一个重要特性。网络切片是在传统的接入网或者用户专用网络内，根据业务的 SLA 要求进一步划分接口带宽、转发等资源，形成不同承载能力。网络切片根据对业务分配的资源可以分为硬切片和软切片两大类。

1) 软切片方式

当前主流 OLT 基于分组交换内核，并从集中式转发架构演进到分布式转发架构。由于分组业务突发的影响，该转发架构时延和抖动都具有不可保证的特征。为了获得更低时延、更低抖动，需要从报文基本转发机制、报文调度等方面入手，包括引入 HQoS 做进一步性能优化。

2) 硬切片方式

PON 接口技术原生支持 TDM 方式提供上行码流调度机制，OLT 可引入新型双平面交换架构，基于信元交换/TDM 交叉架构只需要按照静态规划做空分交叉，无需复杂的业务转发表项查找、报文处理，也无拥塞、无需调度出队列，可提供确定性低时延和隔离性。

同时，接入网切片管控功能应包括切片的管理面和控制面，其中管理面提供应用界面，实现对切片对象的 FCAPS 管理，控制面实现切片建模和实例化过程。切片管理面实现包括切片业务的配置，切片故障管理，切片性能管理，切片安全管理及切片自动化能力；切片控制面实现切片的对象建模，具体包括切片的业务配置模型，切片故障模型及切片的性能模型。

4. FTTR 关键技术

为实现千兆光宽带网络能力的无缝覆盖，从而直达用户和业务终端，业界提出了基于光纤的新一代全光 Wi-Fi 组网技术——FTTR。FTTR 全光 Wi-Fi 是基于 P2MP 架构的技术，可直接将光纤延伸至各个房间，实现全屋千兆以上覆盖能力，是构建家庭和企宽高质量信息基础设施的关键。由于 FTTR 基于 P2MP 的光接入架构，可延续运营商 FTTH 成功运维运营经验，同时具备灵活扩展、可视可管可维的电信级网络优势。当前，FTTR 国际和行业标准相继立项，发展建设 FTTR 已成为业界共识。同时我们也看到 FTTR 系统架构及关键技术方案尚未完全收敛和统一，亟需业界协同推动技术标准化，加快产业健康发展。

4.1 网络原生管控维架构

算力网络时代，可承诺接入要求网络能力直达用户终端，千兆能力通过 PON+FTTR 进一步延伸，提供千兆 Wi-Fi 无缝覆盖成为千兆固网技术发展趋势。FTTR 作为光接入网向用户的延伸后，管控维能力需要协同向下延伸，电信级网络的系统化延伸才能支撑千兆固网的端到端电信级体验。因此，FTTR 的系统架构应满足以下能力：

- OMC/EMS 基础网络管控能力的延伸：随着 FTTx 从 FTTH 向 FTTR 延伸，光层网络的管理能力延伸到家庭网络内部，实现 P2MP 光网络端到端可视可管可维。
- 网关管理平台/RMS 业务开通能力的延伸：业务开通能力延伸到 FTTR 从设备，实现用户网络内的多业务开通和承载。
- Wi-Fi 组网的电信级管控能力：FTTR 场景下，传统的单点 Wi-Fi 向基于 P2MP 光连接的多点 Wi-Fi 组网演进，传统的面向 CPE 管理需要同步向网络管理演进，需具备原生的 Wi-Fi 组网管控能力。

为满足以上需求，中国移动联合业界创新提出 FTTR 原生管控维架构，上

层网络管控平台通过升级 Me 接口以及新增 Mf 接口共同实现 FTTR 网络原生管控：

- Me 接口演进：通过 P2MP 光层网络的管控功能延伸，将 OLT、FTTR 主设备、接入网 ODN 的管控延伸到 FTTR 从设备和局域网 ODN。包括实现 FTTx 端到端拓扑还原、FTTR 主从设备安全接入、告警的实时上报，及主从设备存量、光模块等数据的获取，以及上层管理通道（例如 Mf、TR-069 等）的创建以及主从设备配置队列业务优先级和切片加速配置等功能，实现光层网络业务开通端到端。此通道只依赖光纤的连接即可实现对 FTTR 主从设备的高可靠性管理，避免了上层管理通道（例如 Mf、TR-069 等）中断带来的 FTTR 脱管风险。
- Mf 接口：基于 MQTT 协议，实现对 FTTR 光+Wi-Fi 组网一张网的管控和数据采集能力。将 FTTR 主从设备相关的配置信息、Wi-Fi 信息等上报管理平台，实现对 FTTR 网络的可管可视可维，并能够通过主从代理通道实现 FTTR 主从网络配置协同调优。

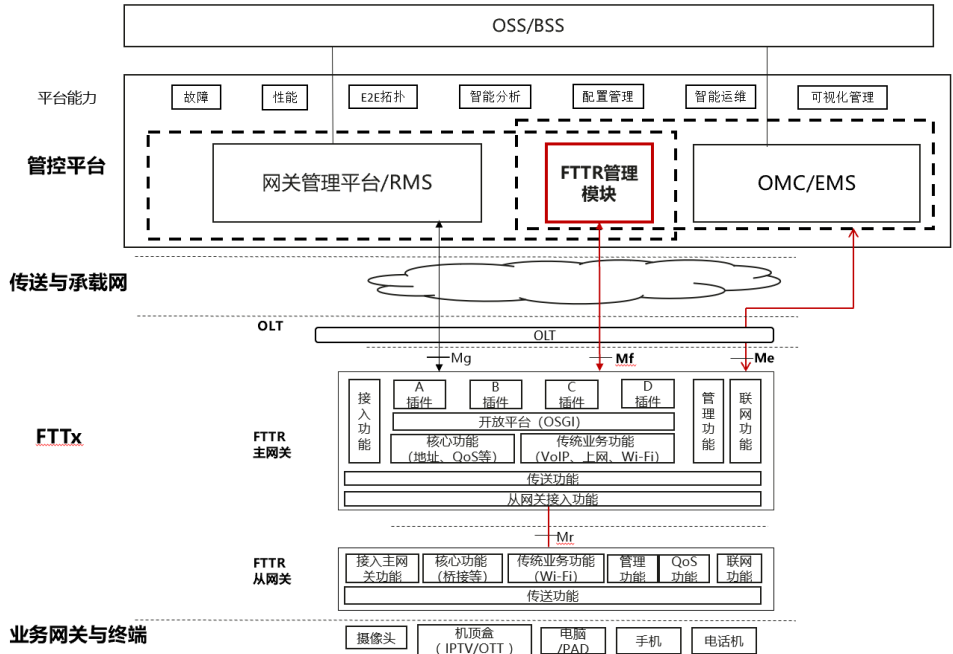


图 4 FTTR 系统级原生管控维架构

4.2 集中管控的 Wi-Fi 组网

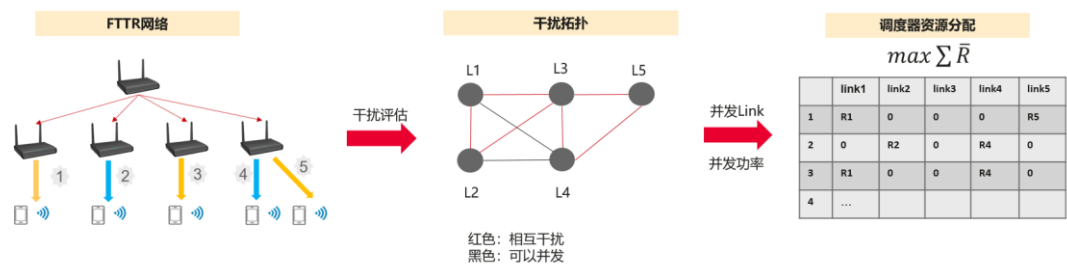
FTTR 场景下，Wi-Fi 组网性能成为提升体验的重要环节。FTTR 需重点解

决传统 Wi-Fi 网络不稳定和不可控等关键问题，通过光+Wi-Fi 中心化控制下的一张网协同，提供可靠稳定的空口连接，以满足网络业务可承诺接入的核心诉求。

1) Wi-Fi 链路调优

传统的 Wi-Fi 5 采用空口自由竞争机制，空口发送机会和时延没有保障。Wi-Fi 6 引入 OFDMA 后，不同类型的终端可以分配不同的 RU 子信道，进行独立发送，保障了业务的 SLA。

FTTR 从设备能实时统计空口业务的 QoS 参数、信道占空比等信息，通过光链路上报到主 FTTR，主 FTTR 解析出相关信息进行智能分析，并动态调整各个设备 Wi-Fi 的工作信道以及功率，保障 AP/STA 间速率及 AP 间空口链路的干扰平衡，并不断迭代，将最终的工作信道以及功率收敛到一张网整体最优。



2) 光和 Wi-Fi 融合调度

在 FTTR 多个设备组网场景下，由于在同一冲突域内可能存在多个设备同时接入空口，导致发生冲突，下一轮就需要更多时间去进行退避，高优先级业务的时延会增大，用户接入体验无法得到保障。在 FTTR 组网架构下，利用光链路超低时延的特性，主 FTTR 设备可通过光链路请求从 FTTR 设备反馈信道扫描信息，根据信道信息生成干扰矩阵从而识别出可以并发的设备，通过调度器分配并发时频资源，提升 FTTR 网络整体容量。调度算法考虑优先级维度保障高优先级业务优先分配时隙，保障 VIP 用户或业务的接入体验。光链路上下行调度和 Wi-Fi 空口调度可以深度融合，根据 Wi-Fi 空口的状态，调整光链路带宽分配的算法，使得 FTTR 下行数据经过光纤到达 FTTR 从设备后，即刻通过空口发送出去；FTTR 从设备接收到 FTTR 上行空口数据后，即刻通过光链

路上行窗口发送到 FTTR 主设备，做到光和 Wi-Fi 调度的深度融合，进一步降低 FTTR 网络业务的端到端时延。

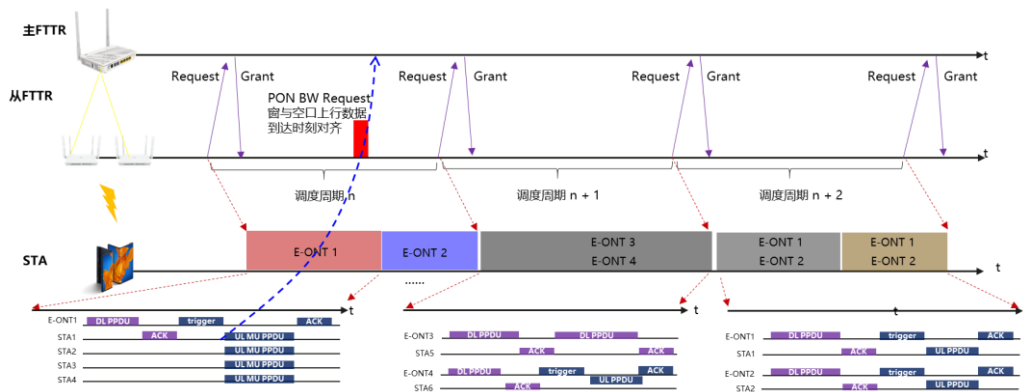


图 6 Wi-Fi 协同有序调度

3) Wi-Fi 无缝漫游

传统漫游强依赖 802.11k/v/r 协议及双方交互，面临切换不及时以及许多兼容性问题。FTTR 主从设备同属一个域，具备整网协同调度能力。以光链路作为低时延控制通道，统一用户的接入和移动性管理，全网共用一个 BSSID，FTTR 设备直接测量 STA 的 RSSI，并上报到主 FTTR 设备，主 FTTR 设备学习用户的移动行为，动态调整漫游切换阈值，即时为用户选择当前接入的最优设备，控制数据链路进行漫游切换，实现用户漫游无感知。

4.3 FTTR 物理层

FTTR 需要解决家庭、沿街商铺、小微企业、园区等多场景应用部署需求，针对不同场景，需综合考虑物理层的技术方案和指标设计。

- 功率预算：商业和园区场景中，P2MP 光分配网传输距离为 1km 以内，分光比最大需达到 1:32；家庭场景中，P2MP 光分配网距离为 200m 以内，分光比不超过 1:16。另外，家庭场景 FTTR 主从设备直连需求明显，光路功率预算指标需兼容直连场景需求。
- 速率选择：FTTR 作为一种全新的电信级全光组网技术，系统容量需要对标以太网等多种局域网技术。局域网中除南北向流量外，还需考虑东西向流量，现有局域网技术基本均为对称速率系统。因此，FTTR 系统

的主从设备之间应支持向对称速率发展并演进。

- 波长规划：FTTR 可以充分复用成熟的 PON 产业链，也可以复用 1550nm 波长产业链，技术成熟，成本也可控。其他可选波长有待进一步研究。

4.4 FTTR 平滑演进技术

FTTR 融合运营商的基础网络能力、维护和运营优势，结合中国移动光接入网的演进趋势和发展策略，还需要考虑 FTTR 与 PON 的协同平滑演进的问题。

存量技术向新技术的演进以及旧有技术的退网并非一蹴而就，需要综合研判推进。当前 GPON 端口仍然占有一定的比例，且未来一段时间内 OLT 线路侧会存在 GPON、XG(S)-PON 或 Combo PON 多种端口。这要求 FTTR 主设备网络侧接口具备多种 PON 端口的对接能力，可以灵活的接入 OLT 侧的不同的端口，实现伴随 OLT 从 GPON 向 XG(S)-PON 高带宽业务的快速平滑升级。因而，FTTR 主设备适应多种 PON 端口，实现多速率 Combo 接入可更好地保护设备投资，XG(S)-PON FTTR 和 Combo FTTR 将是未来的主流 FTTR 技术方案。目前，Combo 光器件主要应用于 OLT 局端设备，在用户侧设备的应用还需要产业链共同推进成熟，支撑规模应用。

5. PON+FTTR 协同关键技术

FTTR 作为光接入网向用户侧的进一步延伸，PON 与 FTTR 协同才能够更好的提供可承诺的泛在接入，提供端到端的网络切片，为千兆光网的各类场景化应用提供可承诺的 SLA 保障。

5.1 光层 OAM 能力延伸

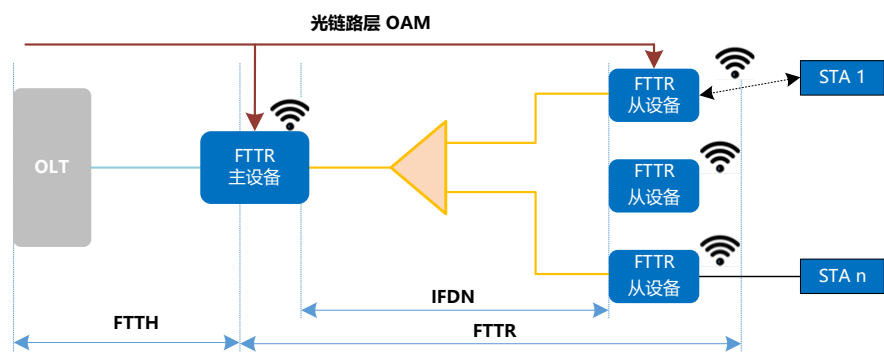


图 7 基于光层 OAM 能力的 PON+FTTR 系统

FTTx 网络的光层 OAM 进一步从接入段延伸到家庭网络等用户局域网，实现接入段和用户侧光层 OAM 协同，端到端实现 FTTx 光网络拓扑还原、两级 P2MP 光链路告警、故障及端到端光层业务配置等 OAM 能力。

光层 OAM 能力延伸到 FTTR 主从设备，需 OLT 与 FTTR 主设备之间需新增 FTTR 光层 OAM 管理通道和协议，实现对 FTTR 从设备的管理，此通道承载在 OLT 和主 FTTR 之间的 PON 通道上。FTTR 主设备和 FTTR 从设备之间光层管理通道，用于主从 FTTR 之间光层管理。

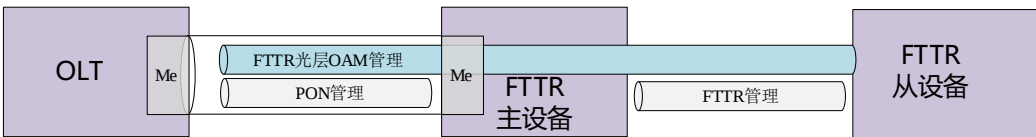


图 8 FTTR 光层 OAM 管控面

- OMC/EMS：新增 FTTR 光层 OAM 管理模块对 FTTR 光路告警、故障、光模块及相关端到端业务进行管理和维护。
- OLT：新增 FTTR 光层 OAM 管理协议和管理通道，实现对 FTTR 光层

OAM 的管理，包括告警、光模块参数信息、光路故障信息、光路业务优先级信息和切片加速信息等。

- FTTR 主设备：对上与 OLT 基于新增 FTTR 光层 OAM 管理协议和管理通道完成 FTTR 光层 OAM，对下管理接入的 FTTR 从设备实现 FTTR 光路 OAM。
- FTTR 从设备：配合 FTTR 主设备和 OLT 实现 FTTR 光路 OAM。

基于光层 OAM 延伸以及 FTTR 一张网，实现了 WiFi 切片与 FTTR 和 PON 切片的协同调度，基于 WiFi RU 与 PON 硬切片和 HQoS 软切片的相互映射，从而提供千兆光接入端到端切片的保障：

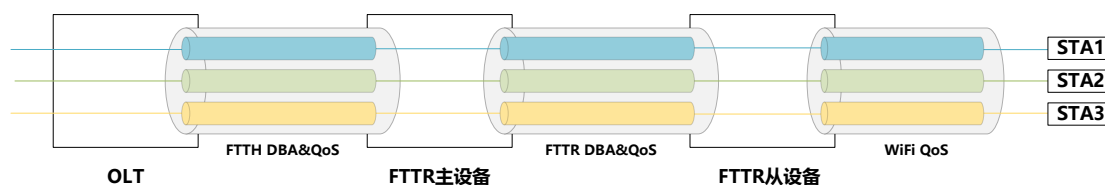


图 9 基于光层 OAM 的 PON+FTTR+Wi-Fi 端到端切片

- FTTR 内网协同：FTTR Wi-Fi 空口调度与 DBA 协同调度，实现家庭内网 Wi-Fi 与光层 QoS 协同，Wi-Fi 有序收发和低时延调度。
- PON+FTTR 协同：FTTR Wi-Fi、FTTR DBA 与 FTTH DBA 协同调度，实现整网 Wi-Fi 与光层 QoS 协同，实现业务端到端的有序收发和低时延调度。

5.2 高速数据采集底座

随着光网络能力的延伸，网络产生的内生和业务感知数据和过去相比，正在快速地增加。为了及时获取和感知这些数据，需构建高速的数据采集底座。同时，考虑 FTTR 设备的庞大数量和复杂的安装环境，该采集底座需要具备采集通道的安全防护，采集需求的动态订阅，和采集数据的主动推送：

- PON 侧：基于 Telemetry 实现对 PON 网络高速采集网络数据，使得控制器可以接近实时的感知网络状态，针对网络突发事件随时做出响应。
- FTTR 侧：FTTR 网络引入原生管控接口，采用 MQTT 协议，支持发布/

订阅消息模式。数据采集底座通过订阅设备的周期上报主题，实现数据周期采集。该接口支持个性化安全认证、MQTT 消息独立签名和加密，确保数据采集的安全性。

下一代光接入网通过 Telemetry 和 MQTT 实现了高速、全量的数据采集，构建起覆盖网元、物理链路、逻辑链路、应用流等各层的数据，并能够覆盖千兆光宽带网络各网络分段的大数据底座，支持算网协同能力构建和向网络智能化演进。

5.3 智能化关键技术

网络智能化是下一代光接入网的效率使能器，基于大数据底座构建的数据湖，通过引入 AI 技术，解决电信领域预测类、重复性、复杂类等问题，以大幅提高效率。

参考 ETSI AI 自闭环模型，在 PON 和 FTTR 领域，根据接入业务特点，定义了长、中、短三层 AI 自动闭环模型。长周期闭环指的是 10 分钟以上的 AI 闭环模型，典型场景包含业务切片路由自动调整、AI 节能等。中周期闭环指的是秒级 AI 闭环模型，典型场景包含光路调优、通道化接口参数调优等。短周期闭环指的是毫秒级 AI 闭环模型，典型场景包括 Wi-Fi 调优、Wi-Fi MAC 重传、QoS 队列调优、DBA 调优等。

匹配长、中、短闭环模型，需要进一步优化算力的分布。当前 OMC/EMS 以上的云平台，主要完成 PON 和 FTTR 长周期的决策闭环。随着在 OLT 部署算力板，算力得到进一步下沉。算力板和 OLT、FTTR 协同工作，一方面下发推理模型，协助 OLT、FTTR 完成短周期的决策闭环。另一方面，算力板负责边缘数据采集、数据预处理和压缩，向上层 OMC/EMS 管控系统主动推送数据，协助 OMC/EMS 管控系统完成中周期的数据分析和闭环决策下发，使管控系统真正具备了 SDN 的能力。

6. 应用场景

6.1 直播宽带

宽带直播充满机遇，电商直播、游戏直播等迅速发展。直播不花屏、不卡顿，网络延时小，操作响应快，这将是高带宽网络加持下宽带直播的“标配”体验。

典型直播场景包括多台直播终端和看播终端，直播时长通常持续 8~12 个小时；相比传统上网业务，对网络的时延、丢包率、稳定性及上行带宽有更高要求，优质直播体验 E2E 时延要求<200ms，丢包率<1%，上行带宽>50Mbps（考虑突发+多终端并发），最大可支持 64~128 终端并发接入。

下一代光接入网应用于直播宽带场景，采用 10G GPON + FTTR + Wi-Fi6 全光组网技术，可以实现上行大带宽、高并发接入，同时具备端到端低时延能力，保障直播用户的千兆体验，同时提供高效的管控维能力，保证直播期间网络故障快速定位并解决，为在线直播行业的发展带来了巨大的机遇。

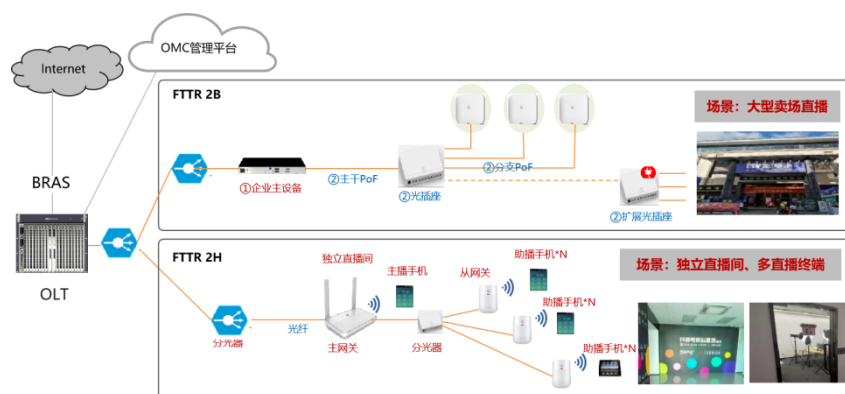


图 10 直播宽带技术方案

6.2 5G 小基站承载

5G 小基站商用化进程加速，覆盖密度越来越大，需要建设深度覆盖、低成本的承载网络。PON 网络具有 ODN 广覆盖、部署成本低、可节约光纤消耗的优势，和 10G GPON 比较，50G PON 能提供更大的带宽和更小的时延。

50G PON 系统，应用于小基站回传，均可满足带宽和时延需求，可以充分发挥 ODN 广覆盖的优势，降低无线部署成本，提升 5G 室内覆盖厚度。对于有局域网组网需求的场景，FTTR 协同 PON 可作为 5G 小站回传综合承载网络。

6.3 工业 PON

随着国内工业互联网的发展，工厂对于机器视觉质检、设备协同作业、设备故障诊断、生产现场检测等场景的业务需求涌现，PON 接入网相比传统基于铜线（双绞线，网线）交换机的工业互联网技术有着明显优势：抗干扰，易部署，易扩展，高可靠、无中继传输距离远等。

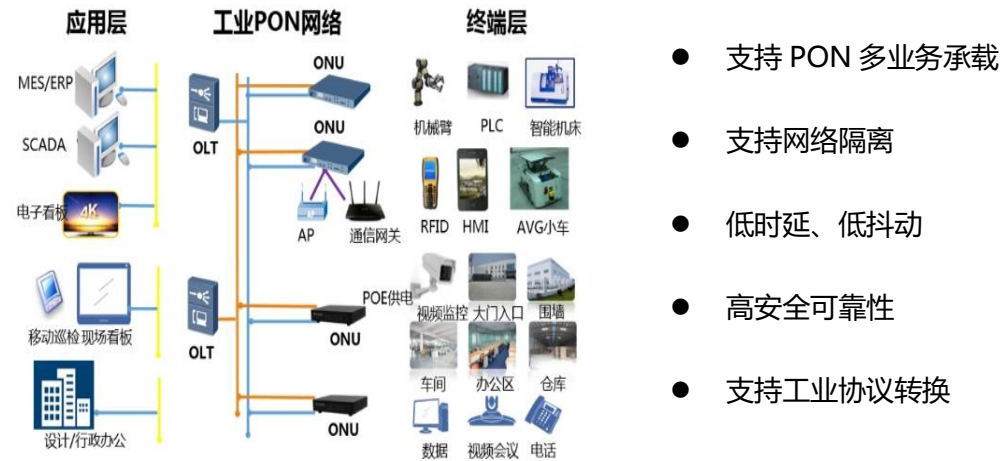


图 11 工业 PON 方案

PON 网络应用于工业生产，与 5G + 工业应用配合形成互补，部署于工业生产网络中，用于承载工业的办公、生产以及监控数据业务。通过切片技术可实现办公网、生产网及监控网多网合一，相互隔离，独立配置/管理，节省建网成本；在工业 ONU 设备上增加协议转换功能，工业 PON 将为不同类型的现场生产设备、传感器与企业生产管理系统、企业信息管理系统和云服务平台之间提供高带宽的业务承载能力。PON 低时延技术为生产网提供确定性时延，Telemetry 等技术实施监控网络质量支撑故障快速定位、快速恢复。工业 PON 网络尤其在安全可靠方面更具有其他接入产品不可比拟的技术优势。

6.4 HDICT 场景

随着家庭业务的快速发展，家庭应用场景已从娱乐中心进入生产生活中心，包括远程办公、远程教育、8K 高清视频/沉浸式 XR 和全息通信，同时随着智能家居的发展，家庭内部各个智能家居设备之间通过 Wi-Fi 接入和控制，FTTH 需进一步延伸至家庭，从而构建家庭内部千兆无缝覆盖、低时延、低功耗、无缝漫游的真千兆能力。

FTTR 成为家庭下一代光接入技术的突破点之一，保障家庭用户真千兆体验。下图显示了基于光纤的家庭网络典型应用，主从网关之间通过光纤连接，主从网关提供 Wi-Fi 接入能力，通过光纤将 Wi-Fi 覆盖到每个房间。FTTR 未来可以进一步融合家庭光纤组网、全屋智能、家庭存储等，构建全屋连接、控制和算力中心的 HDICT 全光底座。

6.5 中小企业场景

中小企业的业务诉求，从传统基本上网、文字/语音交流，已经全面进入了在线会议、混合移动办公、无边界云业务模式，并且随着智能办公(智能会议室、AI 交互)、沉浸式 XR、全息办公/生产元宇宙新兴业务的蓬勃发展，迫切需要提供一张稳定可靠、大用户并发、多业务共存确定性保障、差异化灵活调度的全光企业内网。

50G PON+FTTR 中小企业全光组网方案，发挥光纤大容量和持续可演进的能力，PON 光路和 WiFi 空口协同一体化的高性能架构，以 AI 智能化使能业务需求和网络资源的动态粘合调度，提供全光纤连接、企业一张网、运维自动化、绿色低碳的核心价值，满足企业场景用户数量多、实时确定性业务占比高、企业内网无缝覆盖和算力网络应用的高质量发展要求。

7. 未来展望

新型信息基础设施建设，孕育着新一轮科技革命和产业变革，众多新技术涌现，推动现有光纤网络不断做大管道，做多连接，做简架构，实现高质量网络泛在，提供高品质业务体验。基于 50G PON 和 FTTR 协同构建下一代智能光接入网 NGOAN，作为从人机时代到 M2M 时代的全光底座的重要组成，将对运营商和产业界带来的巨大价值。

中国移动期待携手运营商、科研机构、设备、芯片和模块厂家等产业链上的合作伙伴，通过理论和技术协同创新，不断完善和提升 NGOAN 大带宽、低时延、确定性、千兆无缝覆盖等网络基础能力，同时不断融合通感一体、算网融合、AI 智能化等新能力，促进光接入网提供可承诺的算力接入，支撑算网服务的进一步发展，促进千兆光网以“一业带百业”深度改变生活、改变社会，满足人们对未来更美好信息生活的需要，并通过光联万物促进行业向数字化、智慧化发展。

缩略语列表

缩略语	英文全名	中文解释
10G GPON	10 Gigabit GPON	10 吉比特无源光网络
50G PON	50 Gigabit PON	50 吉比特无源光网络
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AP	Access Point	无线接入点
APD	Avalanche Photo Diode	雪崩光电二极管
BOSA	Bi-Directional Optical Sub-Assembly	光发射接收组件
BSSID	Basic Service Set Identifier	基本服务集标识符
BWmap	Bandwidth Map	带宽映射
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	互补金属氧化物半导体
COB	Chips On Board	板上芯片封装
CPE	Customer Premise Equipment	客户终端设备
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation	动态带宽分配
DBR	Distributed Bragg Reflector	分布式布拉格反射
DFB	Distributed Feedback Laser	分布反馈式激光器
DML	Directly Modulated Laser	直调激光器
DSP	Digital Signal Process	数字信号处理
E2E	End to End	端到端
EML	Electro-absorption Modulated Laser	电吸收调制激光器
ER	Extinction Ratio	消光比
ETSI	Europe Technical Standards Institute	欧洲技术标准协会
FCAPS	Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security	故障、配置、计费、性能、安全
FFE	Feedforward Equalizer	前馈均衡器
FTTH	Fiber to the Home	光纤到户
FTTR	Fiber to the Room	光纤到房间
GPON	Gigabit-Capable PON	吉比特无源光网络

HQoS	Hierarchical Quality of Service	层次化 QoS
IP	Internet Protocol	网际互连协议
M2M	Machine to Machine	机器到机器
MAC	Media Access Control	介质访问控制层
MLSE	Maximum Likelihood Sequence Estimation	最大似然估计算法
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport	消息队列遥测传输协议
MZM	Mach-Zehnder Modulator	马赫曾德尔调制器
NGOAN	Next Generation Optical Access Network	下一代光接入网
NRZ	Non-Return-to-Zero	不归零码
OAM	Operation Administration and Maintenance	操作维护管理
ODN	Optical Distribution Network	光分配网
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	正交频分多址接入
OLT	Optical Line Terminal	光线路终端
OMC	Operation and Maintenance Center	操作维护中心
ONU	Optical Network Unit	光网络单元
P2MP	Point to Multi-Point	点到多点
PAM4	4-Level Pulse Amplitude Modulation	四电平脉冲幅度调制
PON	Passive Optical Network	无源光纤网络
QoS	Quality of Service	服务质量
RMS	Resource Management System	资源管理系统
RSSI	Received Signal Strength Indicator	接收信号强度指示
RU	Resource Unit	资源单元
SACM	Separate Absorption Charge Multiplication	吸收区、电荷区与倍增区分离的
SDN	Software Defined Network	软件定义网络
SLA	Service Level Agreement	服务等级协议
SOA	semiconductor optical amplifiers	半导体光放大器
TDM	Time Division Multiplexing	时分复用

TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址
TIA	Transimpedance amplifier	跨阻放大器
ToB	To Business	面向企业
ToH	To Home	面向家庭