

ZTE中兴

下一代固网接入技术 发展白皮书



目录

1 固网建设与技术发展如影随形，持续演进	3
2 固网建设采用的介质分析	4
2.1 光纤	4
2.2 双绞线	5
2.3 同轴电缆	5
3 下一代固网接入技术发展演进	6
3.1 下一代 PON 技术发展分析	6
3.1.1 PON 技术回顾和展望	6
3.1.2 下一代 PON 技术标准进展	8
3.1.3 下一代 PON 关键技术	8
3.1.4 IEEE/ITU-T 下一代 PON 技术	15
3.1.5 下一代 PON 应用探讨	17
3.1.6 中兴通讯下一代 PON 研究进展	17
3.2 下一代铜线接入发展分析	18
3.2.1 DSL 技术	18
3.2.2 DOCSIS 技术	21
3.3 未来光纤接入将成为主流发展方向	22
3.4 下一代 Wi-Fi 技术	23
3.4.1 不断演进中的 Wi-Fi 技术	23
3.4.2 Wi-Fi 6 关键技术	24
3.4.3 Wi-Fi 6 的下一代技术	25
3.5 5G FWA	25
3.5.1 5G FWA 成为运营商关注点	25
3.5.2 5G FWA 的主要部署场景	25
3.5.3 5G FWA 的部署局限性	26
3.5.4 5G+FTTx 方案	28
4 总结	28

图目录

图 3-1 PON 网络架构图	6
图 3-2 PON 技术演进趋势示意图	7
图 3-3 NG-EPON(a)和 50G-PON 波长规划选项	9
图 3-4 NRZ 调制架构和信号眼图	10
图 3-5 双二进制调制架构和信号眼图	10
图 3-6 PAM4 调制架构和信号眼图	11
图 3-7 CO-DBA 示例	14
图 3-8 小颗粒带宽示例	14
图 3-9 DAW 示例	15
图 3-10 100G-EPON 网络架构	15
图 3-11 50G-PON 网络架构	16
图 3-12 PON 波长规划	17
图 3-13 铜线接入技术演进路线	19
图 3-14 G.fast 应用场景	19
图 3-15 G.mgfast 应用场景	20
图 3-16 Wi-Fi 标准演进	23
图 3-17 模拟测试环境	26
图 3-18 模拟结果	27

表目录

表 3-1 PON 技术演进	7
表 3-2 线路编码调制技术	11
表 3-3 50G-PON 波长规划	17
表 3-4 Wi-Fi6 应用场景	24
表 3-5 覆盖距离和频率的关系分析	28

1 固网建设与技术发展如影随形，持续演进

宽带网络的迅猛发展大大促进了用户的使用和信息共享，并对经济发展和人民生活水平提高产生积极影响。很多国家和组织甚至将宽带网络的发展水平作为衡量国家进步和竞争力提升的重要依据，并且出台相应的政策进行刺激，以便在未来的全球竞合进程中掌握主动。经过多年发展，宽带网络向着带宽更高、更弹性、更智能，也更开放的方向演进，网络融合也是一个持续探索的方向。

网络的发展和收入依托于业务的应用和被用户接受的程度。近年来新业务日益涌现，业务应用蓬勃发展，业务的类别和数量也呈指数形式上升，已经从最初纯粹的窄带语音发展为包括语音、数据、视频、图像等于一体的多重发放，网络的运营也从语音为主，向数据为主，再向视频为主逐步转变。视频业务已经成为宽带网络的基础业务，并且占据宽带网络中 80% 以上的流量，在这个进程中 IPTV 和 OTT 视频在其中起到了极大的促进作用。而随着 4K/8K/Cloud VR 的应用与逐步普及，预计未来 5 年视频业务将会得到快速发展。从另一方面来看，视频的发展也呈碎片化，内容多样化等趋势，短视频的兴起和快速普及吸引了大量的用户，尤其是年轻群体的观看，高互动型业务成为发展方向，吸引用户积极参与其中。

纵观近 20 年来的发展历程，固定网络的业务发展呈现明显的喇叭口效应，同时也具备一定的叠加效应。传统的业务仍然在网应用，新建网络要求对于已有业务能够兼容，新业务的出现要求网络支撑能力更进一步等。这就要求无论是从技术层面、网络规划、还是建设或维护层面，均需要一方面考虑对于已有业务的延续支持能力，另一方面对于新业务需求的满足，例如对于视频业务更高带宽、更低抖动/时延和更小丢包的需求满足。

业务的使用者也在逐步产生分化，适合于不同用户群体的业务使用呈现出差异化和多向性，甚至不同年龄、不同性别用户其关注点也在分化并逐步固化，业务的群体属性会更趋明显。这就要求业务的提供能够根据不同的用户意向、使用习惯和诉求倾向进行细分，与用户的日常活动和行为相匹配，并对不同类型用户的业务提供和推送更加精准。而用户也逐步从被动接受业务，到主动诉求和选择业务，再到主动定义业务，从而使得在运营商约定的框架之下，最终用户被一定程度授权并真正成为某一业务的定义者、拥有者和掌控者，业务的用户所有者属性更加明显。在此过程中，用户对于业务的体验和感知的要求也会越来越高，而这种诉求的提高也会迫使网络和技术做出相应改变以适应时代发展。

从近 20 年的固网发展历程来看，每 5 年左右网络带宽提升 10 倍，每 5 年左右出现一次技术更新迭代，而每 10 年左右网络会进行一次升级或更新换代。新技术的发展呈现滚雪球效应，也即，新技术的出现会兼容已有技术提供的业务并有所扩展，但实现方式可能有所不同，当然也有部分技术在发展的过程中由于各种原因被逐步替代或舍弃，如模拟语音、2/4 线音频、DDN 等。而网络的发展中一般会考虑尽可能利用已有资源例如光纤/双绞线、机柜、机房、管道等基础设施，不但有助于提升已有资源的利用率，延长设备的生命周期，而且可有效降低成本并减轻经营压力。

另一方面，固定网络的发展也从技术驱动逐步向业务驱动转变，在传统的窄带时代和宽带发展初期阶段，网络的发展往往受制于技术的发展。而随着视频业务逐步成为宽带网络的基础业务，用户的感知和体验意识在增强，对于网络质量的要求越来越高，相应的容忍度却在减小，这也使得业务驱动网络成为可能和现实。

带宽提速是宽带网络发展的基础诉求，也是一个持久不衰的话题，推动不同网络、不同介质的技术持续升级和演进。当前移动网络已经进入到 5G 时代，而固定网络也相应进入到新时代，固网和移动两张网络相互促进，协同发展，固网的发展有助于移动网络的带宽能力提供，而移动网络的发展也倒逼固网做出创新和改变，两者在业务的提供上和场景的适配上相互补充，互为驱动，从而使业务提供更有弹性和裕度，网络能力更加健壮，适配能力更强，也更易应对竞争。

2 固网建设采用的介质分析

在固网的建设中，传输介质作为一种沉淀资源，部署后可能在较长时间内难以改动，一旦选择不当可能容易造成浪费和损失，因此在选择上需要谨慎，需要从不同网络介质的发展趋势、功能/性能、技术成熟度、成本等多方面综合考量。尤其近年来很多国家和运营商为了迎合信息化浪潮，提升民众宽带网络接入能力，跨越数字鸿沟，通过大量投资网络基础设施建设以实现普遍接入和泛在连接，对于传输介质的选择就显得尤为重要。

在固网的建设上通常采用等多种传输介质。

2.1 光纤

光纤是一种基于光的全反射原理制作成的光传导工具。由于其原材料可获得性较强、成本低、重量轻、损耗小、传输距离长、易于运输和部署等特点，光纤在 20 世纪 80 年代以来得到了迅猛发展。尤其在本世纪以来随着光进铜退的进程加快，接入网 POP 点逐步向用户侧下沉，极大刺激了光纤在通信领域的广泛应用，光纤从到小区、到楼宇、到办公室/家庭、到桌面/房间等逐步延伸，从而使得 FTTH 大行其道，家庭全光覆盖也成为一种现实。随着终端成本的下降和预端接/光缆铺设等技术的发展和突破，配合光分配网络 ODN 部署，FTTH 端到端网络建设成本大幅下降，反过来促进了 FTTH 的大力发展。

在宽带接入网中，光纤覆盖距离可达几十公里，下行一般采用单模光纤以满足不同距离覆盖需求，上联根据上层设备接头选用单模或多模光纤，根据不同的接头来进行适配。

在光缆类型的选择上，需要综合考虑光纤通信的工作波长，系统容量，传输距离等因素，而在实际的网络部署中，需要提前考虑并确定光缆的类型、芯数和光缆结构，如铺设条件、阻水方式、护套等因素。

随着技术的发展和光纤工艺的提升和改进，光纤变得更易部署，弯曲度更小，皮线光缆也使得

入户变得更为轻松，铠装光缆使得主干光纤在布放和使用中的安全性更好，更易受保护。此外新型预端接技术可以减少光纤端接所需时间，气吹技术促进光纤在管道中部署的速度，以上都促进了光纤在全球的大规模应用。

2.2 双绞线

双绞线是在铜线接入中常见的一种传输介质，尤其在语音网络中普遍使用。双绞线由一对相互绝缘的金属导线(如铜线)绞合而成，两根铜线通过保护套进行绝缘，可以抵御外界的电磁波干扰，从而使得传输信号的质量有所提高。

双绞线又可以分为非屏蔽双绞线和屏蔽双绞线。非屏蔽双绞线(UTP)由四对不同颜色的传输线组成，具备重量轻、成本低、部署灵活等特点，因此广泛应用于电话线和以太网线中。屏蔽双绞线(STP)在双绞线和外层绝缘护套之间采用一层金属进行屏蔽，屏蔽层可以减少外部电磁干扰的辐射和噪音，因此相比非屏蔽双绞线更加安全，电子信号更洁净，传输速率更高，但是成本也更高。

双绞线按照线径又可以分为三类线、五类线、六类线、七类线等各种不同的规格，数字越大，则意味着技术越先进，可提供的带宽也越高。

在实际的工程部署中，多对双绞线被封装在一个绝缘电缆套管里形成双绞线电缆。双绞线普遍应用于电话，以太网线等应用场景，属于基本的通信基础应用，尤其在家庭/楼宇室内布线中。

2.3 同轴电缆

同轴电缆是指信号传输导体和外部的屏蔽层采用同一轴心的电缆，最常见的同轴电缆由绝缘材料隔离的铜线导体组成，电缆由聚氯乙烯或特氟纶材料的护套封装。电缆从里到外一般分为四层：中心铜线(单股的实心线或多股胶合线)、塑料绝缘体、网状导电层和电线外包皮。同轴电缆可用于模拟信号和数字信号的传输，适用于有线电视传播，长途电话传输等，在同轴电缆中传导的是交流电而非直流电。

同轴电缆可以分为基带同轴电缆和宽带同轴电缆。基带同轴电缆的屏蔽层通常采用铜线作为网状结构，其特征阻抗为 50 欧姆，通常用来传输数字信号。而宽带同轴电缆的屏蔽层通常由铝冲压而成，特征阻抗为 75 欧姆，通常用于传输模拟信号。

同轴电缆的优点在于在相对长的线路上支持高带宽通信，缺点是体积大，直径粗，重量重，成本高。同轴电缆主要应用于有线电视信号的传输，而近年来全球 HFC 网络的发展过程中，由于网络转型、带宽能力、Triple-play 业务提供等方面有一定的劣势，其应用有逐步减少的趋势。

此外，在固网接入的末端经常由于方便覆盖而采用电磁波介质，如采用 Wi-Fi 技术应用于有线宽带领域末端接入的进一步延伸覆盖，在末端用户侧将有线信号转为无线信号进行传输，是一种在家庭或办公、热点覆盖等短距离环境下的无线接入技术。影响 Wi-Fi 信号的因素主要有距离、房屋格局、Wi-Fi 设备摆放位置、天线增益、发射功率以及外围信号的干扰等多种因素，信号的强弱和

质量直接影响到用户的使用和体验，如网速变慢和视频花屏、卡顿等。

3 下一代固网接入技术发展演进

3.1 下一代 PON 技术发展分析

3.1.1 PON 技术回顾和展望

PON 技术是一种基于无源 ODN 网络的点到多点宽带接入技术，上下行传输波长独立，数据时分复用。PON 网络由光线路终端 (OLT)、分光器 (Splitter) 和光网络单元 (ONU) 组成。OLT 一般放置在中心/接入机房，分配和控制信道的连接，并有实时监控、管理及维护功能。ONU 放置在用户侧，OLT 与 ONU 之间通过 ODN 连接。

相对于铜线接入技术，PON 技术有如下优点：

1. 可靠性高：采用纯光介质，避免了电磁干扰，环境适应性强。建设维护成本低，易于扩展和升级。
2. 带宽高：基于光纤通讯，当前普遍应用的GPON/10G PON可以提供2.5G/10Gbps带宽。
3. 多业务承载：带宽分配灵活，服务质量可保证，支持语音、数据、视频等多种业务接入。
4. 成本低：网络采用P2MP拓扑，一个PON口可以接入多个ONU，局端资源大幅节省；同时中间ODN网络全程无源，容易建设和扩展，综合成本低。

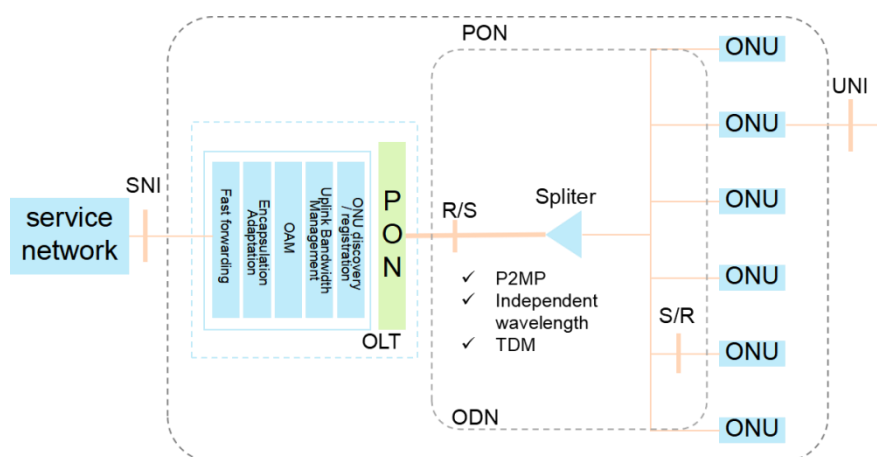


图 3-1 PON 网络架构图

在 PON 技术发展历程中，FSAN/ITU 和 IEEE 起到了巨大的推动作用，GPON 和 EPON 得以普遍应用，GPON 和 EPON 的下一代技术 XG(S)-PON 和 10G-EPON 也已经成熟并步入大规模商

用窗口期。

技术体系	下行速率	IEEE	ITU-T
GPON/EPON	2.5G/1.25Gbps	EPON (IEEE 802.3ah)	GPON (ITU-T G.984)
10G PON	10Gbps	10G-EPON (IEEE 802.3av)	XG-PON(ITU-T G.987) XGS-PON(ITU-T G.9807)
50G-PON	25G/50Gbps	25G/50G-EPON (IEEE 802.3ca)	50G-PON (ITU-T G.9804)

表 3-1 PON 技术演进

GPON/EPON 技术可以为用户提供百兆带宽接入能力，逐步替换原有铜线接入技术。10G PON 可以为用户提供 300Mbps-1Gbps 带宽，满足 4K/8K 视频业务规模应用，以及 VR/AR 业务的前期导入。同时面向未来极致 AR 业务 1G 以上带宽需求，以及 PON 业务承载扩展到 5G 无线承载，对 PON 技术的带宽和延迟提出更高的要求。

下一代 PON 从技术路线角度看，分成单波长提速和多波长叠加两种技术路线演进。对于下一代单波长提速技术路线，单播速率提高到 25Gbps 或 50Gbps，对于有更高带宽的需求，可以采用多波长的叠加方式扩展实现。当前 IEEE 和 ITU-T 就是基于这个思路来进行研究。

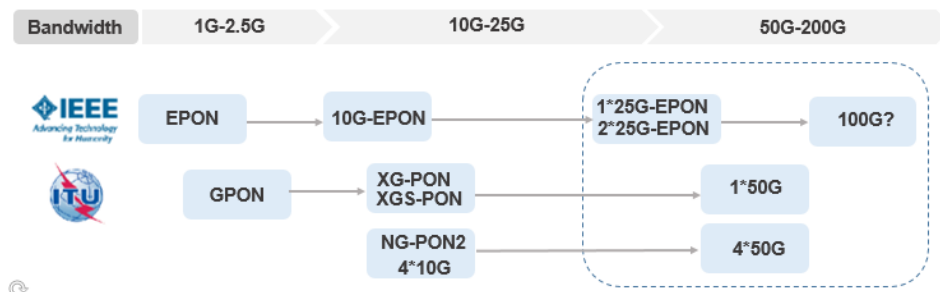


图 3-2 PON 技术演进趋势示意图

其中，IEEE 率先启动了下一代 PON 技术的标准制定，单根光纤上支持 25Gbps 下行速率，同时上行支持 10Gbps 或 25Gbps 不同速率，并支持和 10G-EPON 兼容。对于 50Gbps 带宽需求，采用多波长叠加技术和通道绑定技术提供 2 个 25Gbps 通道，实现 50Gbps 带宽。

ITU-T 也在考虑 XG(S)-PON)后的技术发展，以 G.sup.HSP 后 10G PON 技术研究报告为基础，考虑了家庭用户、企业用户、移动回传和前传等需求，运营商和设备商等产业链逐步形成了对于下一代 PON 的需求，在 2018 年 1 月 50G-PON 的标准立项，同时立项的还有基于多波长叠加的 NG-PON2 的下一代，每个通道的速率为 50Gbps。

3.1.2 下一代 PON 技术标准进展

3.1.2.1 IEEE 25G/50G-PON 标准进展

IEEE 的 PON 标准到目前为止演进分成三代：

1. 第一代EPON技术，技术标准IEEE 802.3ah在 2004年9月正式颁布。
2. 第二代10G-EPON技术，技术标准IEEE 802.3av在2009年10月正式颁布。
3. 第三代25G/50G-EPON技术，技术标准IEEE 802.3ca在2020年7月正式颁布。

25G/50G-EPON IEEE 802.3ca 作为 IEEE 主推的下一代 PON 技术，具体历程如下：

1. 2013年，IEEE开始启动NG-EPON研究，成立了IEEE ICCOM，对NG-EPON的市场需求、技术方案进行分析。
2. 2015年3月，发布了NG-EPON技术白皮书，2015年7月开始启动100G-EPON标准制定，命名为IEEE 802.3ca。
3. 2020年7月，发布IEEE 802.3ca标准，删除了100G MAC层速率配置，提供单波长25G，双波长50G两种MAC层速率，其中25G分为非对称10G/25G和对称25G/25G两种制式。

3.1.2.2 ITU 下一代 50G-PON 标准进展

FSAN 组织在完成 10G PON 标准 XG(S)-PON 制定之后，也启动了下一代 PON 的研究。首先基于 10G 速率的波长叠加，在 2011 年启动 NG-PON2 的标准研究，2015 年完成标准制定。NG-PON2 选择 TWDM-PON 作为主要技术方案，采用 4/8 波长叠加方式，每波长采用 10G TDM 方式，在移动回传和商业客户中可选择点对点的 WDM overlay 技术。NG-PON2 的关键需求主要为 40G 下行和 40G/10G 上行，但受限于可调谐光器件的高成本和系统的成熟度，导致 NG-PON2 商用部署进展缓慢，未来应用存疑，或有可能被跳过。

ITU-T 同时开展了后续演进技术的研究，2018 年 ITU-T 接入网标准组织 Q2/15 启动了下一代高速 PON 技术白皮书，调研下一代高速 PON 接入的各种技术的可能性。2018 年 1 月 50G-PON 标准在 ITU-T 立项，未来为用户提供 1G~10Gbps 带宽，预计 50G-PON 在 2025 年左右具备商用能力。

3.1.3 下一代 PON 关键技术

3.1.3.1 波长规划

低成本和高性能一直是 PON 技术规模应用的基础，其中波长选择是关键，需要综合考虑如下

因素：

1. 不同波长的光纤色散、光纤损耗。
2. PON系统兼容性。
3. 光器件成本。
4. 线路编码的实现复杂度。

当前全 O 波段的波长规划方案，无需复杂的色散补偿处理，可采用最简单的 NRZ 线路编码技术。同时，下一代 PON 技术由于采用 25G/50G 两种速率模式，O 波段可以重用目前的 100GE 以太网产业链，并可以使用 DML/EML 激光器，物理层实现简单，是优选方案。而 C、L 波段色散大，需要采用复杂的调制、均衡等技术进行色散补偿，其性能、成本影响还需要进一步研究。

对于 PON 系统的兼容性，IEEE/ITU-T 都基于两代 PON 之间 WDM 共存的原则，三代 PON 不共存，其波长可以释放。同时考虑到 IEEE 和 ITU 物理层融合的前提，ITU 的波长规划与 IEEE 保持一致，并与 GPON 或 XG(S)-PON 保持共存。为此 IEEE 802.3ca 通过了两个下行波长和两个上行波长方案，可满足不同演进场景需要，ITU 下行一个波长，上行两个波长，如图 3-3 所示。ITU-T 50G-PON 上行波长有多种选项，部分场景仍在讨论当中。ITU-T 对下一代 50G-PON 也考虑了兼容 10G-EPON 的需求。这样就可以根据未来需要实现多种演进路径：

1. 10G-EPON/XG-PON+2*25G-PON
2. GPON+25G EPON
3. 10G-EPON+ 50G-PON
4. 10G-EPON/XG-PON+50G-PON
5. GPON+50G-PON

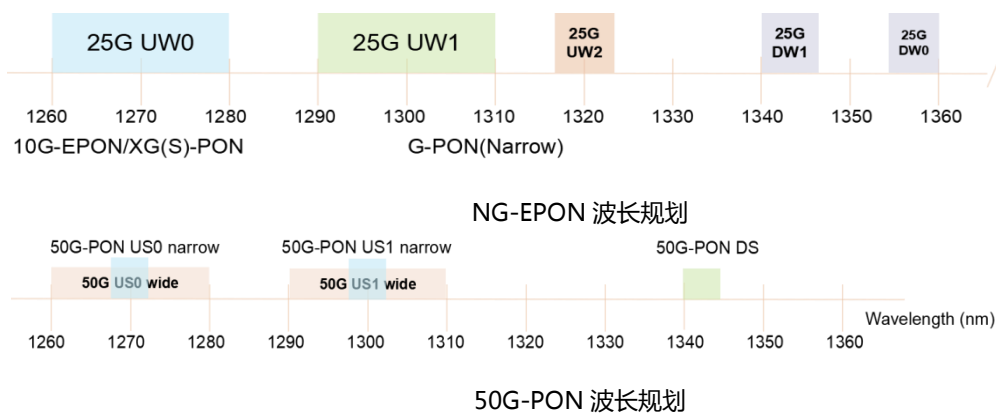


图 3-3 NG-EPON(a)和 50G-PON 波长规划选项

3.1.3.2 线路编码调制技术

下一代 PON 的速率包括 25Gbps 和 50Gbps，为了实现整个 PON 系统的高性能和低成本，

以及规定范围内的功率预算，线路编码调制技术十分重要。当前可选的实现方案如下：

1. NRZ

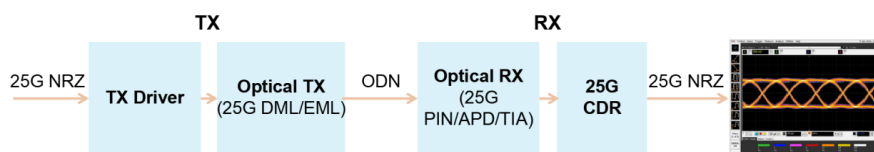


图 3-4 NRZ 调制架构和信号眼图

NRZ 调制的优点是系统实现简单，关键光器件可以重用 100G 以太网和 10G PON 的成熟产业链。具体实现方式有两种，都采用 OOK 直接调制编码：

- 无均衡 NRZ：发送端和接收端均采用 25G 光器件，这种方案只能达到 25Gbps 速率。
- 有均衡 NRZ：发送端和接收端采用 25G 光器件，通过均衡补偿算法提高灵敏度，来实现 50Gbps 传输速率。

2. 双二进制

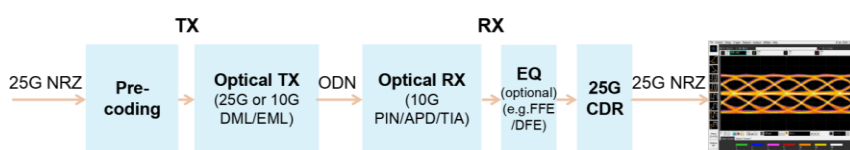


图 3-5 双二进制调制架构和信号眼图

双二进制是一种二进制的编码方式，它将二进制中逻辑信号“0”转换为逻辑信号“+1”和“-1”，使信号的频谱带宽减小为原来一半。在光纤通信中双二进制有两种应用形式。

➤ 电双二进制

一种是采用三电平幅度调制，这种形式的双二进制在接收机需要双二进制解码电路，与传统二进制 IM-DD 系统相比，三电平判决会导致接收机灵敏度劣化。

三电平幅度调制方案的优点是系统实现简单，电域、光域的信号带宽与 NRZ 的系统相比可以减小一半。缺点是与 NRZ 系统相比，系统光功率预算会下降。

➤ 光双二进制

另一种双二进制实现方式是光双二进制，使用 M-Z 调制器，采用幅度调制和相位调制 (AM-PSK) 相结合方式，该方案的特点是接收端可以与传统二进制 IM-DD 系统的接收机兼容，不会导致灵敏度劣化。

光双二进制的优点是在接收端不需要判断所接收的相位是多少，只要取出其幅值即可，因此在接收端只需要使用传统的直接检测器件，其难点是 M-Z 调制器体积大和成本高。

3. PAM4

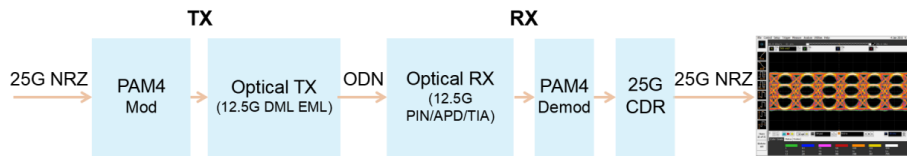


图 3-6 PAM4 调制架构和信号眼图

脉冲幅度调制(PAM)是高阶调制技术的一种，原理是将 2 个或以上比特信息映射到不同的发射脉冲幅度(电压)上增加每符号的比特传输速率。使用 PAM 调制的主要目的是在提高传输速率的情况下，降低或者保持传输信号的带宽不变，从而降低或保持发射和接收机的成本。PAM-4 有 4 个幅度信息，每个幅度上可携带 2bit 的信息。PAM-4 调制的色散容限相对于 NRZ 可提升 4 倍。PAM4 调制可以采用 12.5G 带宽光器件，传输 25G 的信号，但是相应代价是在发送端和接收端要采用高速 AD 和 DA 等技术进行编解码，接收端还需要采用相对复杂的算法进行带宽补偿。

以 25G PON 为目标，综合各种因素对各种线路编码调制方案做了比较，参见表 3-2：

- 从性能上看，NRZ 和 ODB 性能最好，EDB 和 PAM4 性能较差。
- 从器件上看，NRZ 和 ODB 要求 25G 器件，而 EDB 和 PAM4 可用 10G 器件改造。
- 从实现上看，NRZ 和 EDB 最简单，PAM4 比较复杂。

线路编码		NRZ	NRZ	光双二进制	电双二进制	PAM4
			(带均衡)	ODB	EDB	
光器件	激光器	25GHz EML	10GHz EML	10GHz MZM	10GHz EML	10GHz EML
	调制解调	IM-DD	IM-DD	AM-PSK	IM-DD (3电平)	IM-DD (4电平)
	接收机	25GHz APD	25GHz APD	25GHz APD	25GHz APD	25GHz APD
	接收机灵敏度	中	高	中	中	低
	色散补偿	需要	需要	无	需要	需要
电调制参数	波特率	25G	25G	25G	25G	25G
	电平数	2	2	2	3	4
	相位数	0	0	2	0	0
	发射端均衡	无	需要	无	无	需要
	接收端均衡	无	需要	需要	需要	需要
	器件线性度	无	无	无	较高	很高
	SNR	中	低	低	中	高
系统	共存	O	C/L	C/L	C/L	C/L
	成本	低	中	高	中	高

表 3-2 线路编码调制技术

综合以上分析，单波长 25G PON 实现需要对光器件带宽和电层实现复杂度二个核心因素进行

权衡,选择出性价比合适的实现方案。基于 NRZ 编码的 25G PON 由于架构简单,器件成熟度高,近期成为标准制定和业界研究的主要热点。单波长实现 25G 传输速率后,就可以结合多波长叠加以及通道绑定(Channel binding)技术来实现 50G-PON(2 波长)。同时,25G NRZ 技术后续可通过线路发送和接收均衡算法,有望达到 50Gbps 速率。

3.1.3.3 突发时钟恢复技术

突发时钟数据恢复(BCDR)是 PON 系统的关键技术,10G 速率上行的 BCDR 产业链已经成熟,相关技术已经在 PON 系统中可正常商用。单通道 25Gbps 速率的 PON 网络仍然在标准制定过程中,当前 25Gbps 速率 BCDR 技术产业界尚处于研究阶段,几乎没有芯片厂商可以提供商用 25G BCDR 芯片。PON 系统采用的 BCDR 技术主要来源于两种实现方案,一种是反馈式 Alexander 鉴相技术,还有一种是前馈式 Oversampling 相位拾取技术。

Alexander 技术也称为 bang-bang 鉴相,在 1 个 UI 周期中时钟上下沿要采集两次信号。比较连续四次采集信号的异或结果,就可以判断时钟与数据的超前、滞后、或者同步的情况。

PON 系统采用 Alexander 技术实现 BCDR 功能是最常用的手段,实现简单、成本低。但是基于 Alexander 技术的 BCDR 是基于反馈系统实现的,数据锁定恢复时间相对较长。因此为了提高 BCDR 的恢复时间,Oversampling 相位拾取技术基于 3 倍过采样相位,可以实现更好的性能。

3.1.3.4 增强 FEC 技术

下一代 PON 技术前向纠错当前热点聚焦在 LDPC 编码技术上。在 PON 系统中,上行信道工作于突发模式,由于 ONU 中的突发模式发射机中开关效应的暂态瞬变(Slow Transients)、光放大器的瞬变效应(如增益稳定的掺铒光纤光放大器)、以及突发模式接收机中的瞬变效应,在 burst 前端会引入一连串的具有记忆性且分布不均匀的连续错误。然而,大部分纠错编码(如 LDPC 编码)在纠正连续错误方面表现得并不理想。LDPC 码字由于独特的码字构造特点,在某些特定的比特位置上对应的置信度会比较低,有待进一步优化解决。

另外,被 5G 采用的 polar 编解码,在下一代 PON 中,很可能成为取代 Reed-Solomon 编解码的短码方案,也是业界后续研究的方向。

3.1.3.5 信道绑定技术

为了实现更高的 ONU 传输速率,ONU 可以支持多个光模块,ONU 可在多个波长通道中同时传输和接收数据,称为通道绑定技术。支持一个通道的 ONU 峰值速率为 25Gbps,支持两个通道的 ONU 的峰值速率为 50Gbps。通道绑定技术中,如果一个 ONU 支持一个通道,OLT 发送数据时,OLT 将 ONU 的 MAC 数据映射到一个 ONU 支持的通道上传输;如果一个 ONU 支持两个通

道，OLT 发送数据时 OLT 将对应该 ONU 的 MAC 数据映射到两个 ONU 支持的通道上传输。

以 IEEE802.3ca 25G/50G EPON 为例进行下说明：

第 1 步：OLT 将发送给 ONU1 的数据分成 n 个 EQ，每个 EQ 是 8 个字节的长度。

第 2 步：OLT 根据给该 ONU 在所有支持通道上的带宽分配，决定在每个通道上传输的数据的开始时间和传输数据的总的尺寸。

第 3 步：OLT 根据第 2 步中的带宽分配将数据放入一个 buffer 中，buffer 有 4 列，代表 4 个通道，buffer 有 32 行，OLT 在最先可得到的通道上先传输数据，当多个通道同时可用时，OLT 将数据按照通道顺序在第一个通道放 1 个 EQ，然后第二个可得到的通道上传输第二个 EQ，第三个可得到的通道上传输第三个 EQ，第四个可得到的通道上传输第四个 EQ，第一个可得到的通道上传输第五个 EQ，以此类推。

第 4 步：OLT 将 buffer 中的数据分配到各个对应的通道上传输，OLT 在每个通道上传输的一组数据前面加上了帧头，称为 ESH，整段数据称为一个 Envelope。

第 5 步：ONU 侧根据每个通道接收数据的 ESH 头，可以自动适应不同通道的差异，把乱序的数据分片重新恢复出原始数据包。

3.1.3.6 低延迟技术

传统 PON 系统中正常延迟如果不做特殊处理，则很难到达 200us 以内。其主要原因如下：

1. 安静窗口

安静窗口用于 OLT 发现、测距 ONU。为了实现快速注册 ONU，OLT 需周期性地开放安静窗口以发现 ONU，如果希望 ONU 能够在秒级别注册 ONU，则该周期应该是秒级别。在现有标准中，当 OLT 对 ONU 进行测距时，也需要开放安静窗口，正常 20km 距离时每次安静窗口需要 250us，因此，由安静窗口引起的延迟将更大。

2. 传统 DBA

传统 DBA 算法基于 ONU 的系统宽请求或 OLT 对 ONU 的流量监测而进行，即动态带宽分配 DBA。动态带宽分配方法可以实现带宽的高利用率，但是带宽存在一定的滞后性，对 ONU 的上行传输带来较大缓存延迟。

下一代 PON 技术为了满足交互式 VR 和 5G 承载业务，相比之前的 PON 技术，更关注低延迟技术的突破，具体方案如下：

1. CO-DBA(Cooperative DBA)

母站(Station Equipment)控制子站(Child Equipment)的上行传输时，母站(Station Equipment)知道子站(Child Equipment)上行传输的到达时间和大小。母站(Station Equipment)和 OLT 之间协同工作，提前交互子站(Child Equipment)的上行传输时间及大小，OLT 根据这些信息提前为子站(Child Equipment)分配好相应的带宽，使得子站

(Child Equipment)的上行传输数据在 ONU 中的缓存时间达到最小。参见图 3-7。

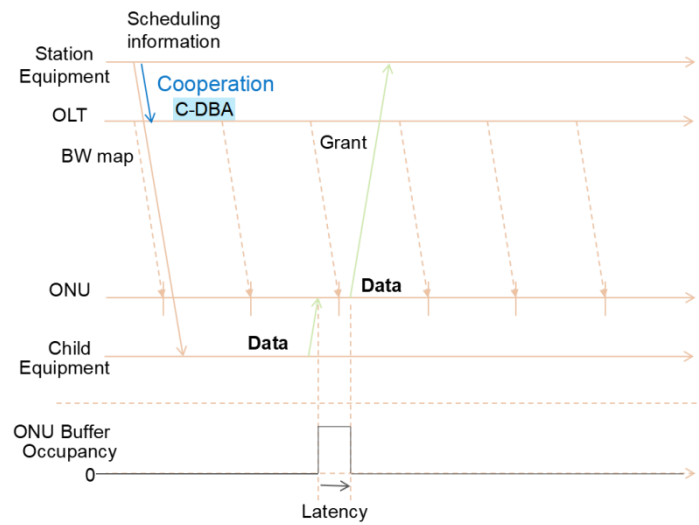


图 3-7 CO-DBA 示例

2. 小颗粒带宽

通过切割带宽，使得带宽分配更加小颗粒、更加密集，使得相邻带宽分配之间的时间间隔更小，从而达到减小等待带宽的时间，并降低最大时延，参见图 3-8。

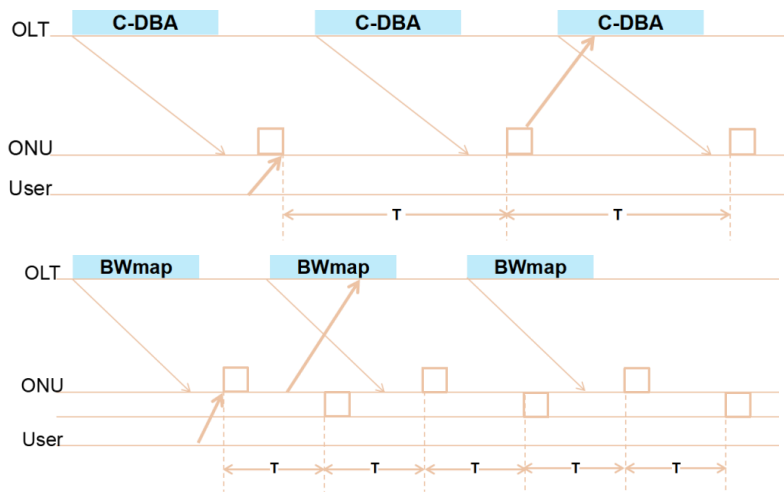


图 3-8 小颗粒带宽示例

3. 专用激活波长(DAW)

安静窗口开放在 DAW(λ_{DA})上，工作通道(例如 λ_{50Gu})上不再开放安静窗口，因此工作通道上不再有安静窗口，消除了安静窗口带来的时延。参见图 3-9。

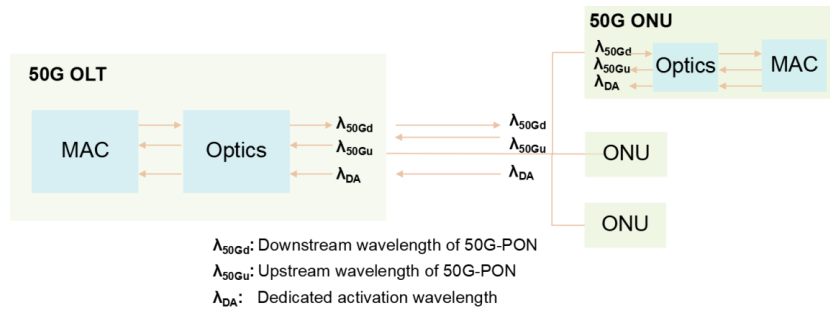


图 3-9 DAW 示例

CO-DBA 需要 PON 和业务准确协同，实现难度大，标准未完善，当前还在研究阶段。而专用激活波长(DAW)方案，技术成熟可靠，现有标准兼容性好，实现成本低，结合小颗粒带宽技术，相比 CO-DBA 方案有较大优势。

3.1.4 IEEE/ITU-T 下一代 PON 技术

3.1.4.1 IEEE 下一代 25G/50G-PON 技术

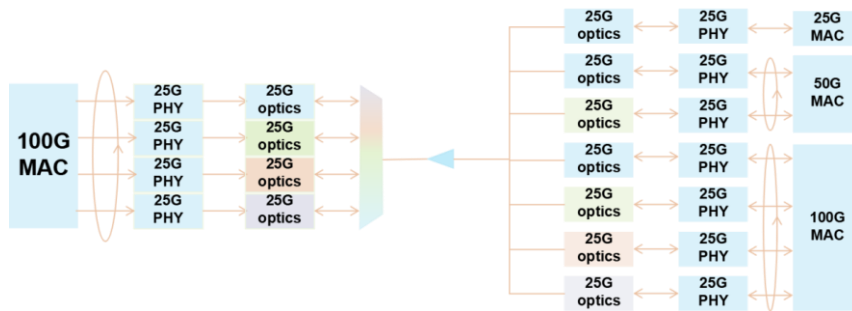


图 3-10 100G-EPON 网络架构

图 3-10 为目前 IEEE 802.3ca 标准讨论的 100G-EPON 的系统架构，支持 25G/50G/100G 的 MAC 速率。为了支持逐代部署，可以先部署单波长的 25G OLT/ONU，再部署 50G、100G 的 OLT/ONU。由于可调谐激光器和滤波器等性能问题和商业化难度，100G-EPON 采用固定波长，通过波分的方式与已部署的 10G-EPON 等系统在同一个 ODN 中实现共存。在 OLT 侧，100G-PON 通过波分复用器组合成一个 PON OLT 端口，每波长支持 25Gb 的光层速率和 PHY 层速率。MAC 层支持 25G/50G/100G 多种速率，需要通过 channel bonding 技术实现对多个 25G PHY 层和光层绑定以支持更高的 MAC 速率。

2019 年 IEEE 对 802.3ca 做了修订，删除了 100G 的 MAC 速率，当前 IEEE 下一代 EPON 就

是 25G/50G EPON。

IEEE 802.3ca 采用全 O 波段方案，NRZ 编码，LDPC 前向纠错。

单波长速率 25G，定义了两种模式：非对称模式：上行 10Gbps，下行 25Gbps，对称模式：上行 25Gbps，下行 25Gbps。

同时定义了 2 种功率预算等级，分别是 1) PR20 ≤ 24dB，对应 1:16, 20km or 1:32, 10km；2) PR30 ≤ 29dB，对应 1:32, 20km。

定义了 2 类功率预算，分别是 1) PR-S 对应 25G 或 50G 对称 PON；2) PR-A 对应 25G 或 50G 非对称 PON。

结合等级和类别分为，PR-S20、PR-S30、PR-A20、PR-A30。

3.1.4.2 ITU-T 下一代 50G-PON 技术

ITU-T 50G-PON 于 2018 年 1 月立项，标准还在讨论，已确定了线路编码 NRZ 和波长固化。

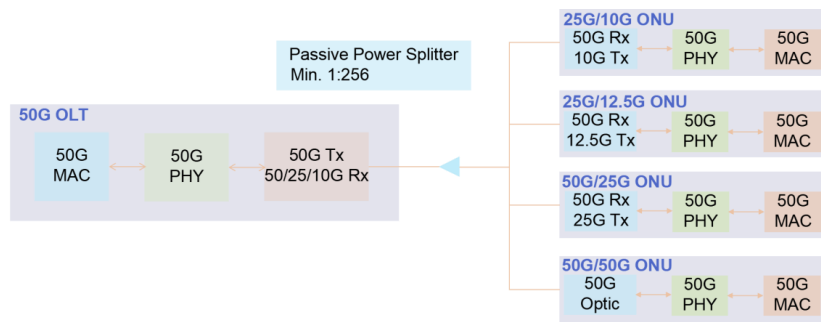


图 3-11 50G-PON 网络架构

参见图 3-11，50G-PON 采用单波长实现 50Gbps 速率传输，50G-PON 标准确定下行支持 49.7664Gbps，上行支持 9.95328Gbps、12.4416Gbps、24.8832Gbps、49.7664Gbps 四种速率，线路编码采用 NRZ。波长采用 O 波段，参见图 3-12，下行波长定位 1342nm +/- 2nm，上行波长仍在讨论，有与 GPON/10G PON 共存等不同 Option，参见表 3-3。光功率预算主要关心 29dB 和 32dB 两个功率等级。为了提高接收机灵敏，FEC 纠错码率提高的 1E-2，采用低密度奇偶校验码 (LDPC) 纠错算法。对低延迟和切片 Slicing 特性还在研究中。

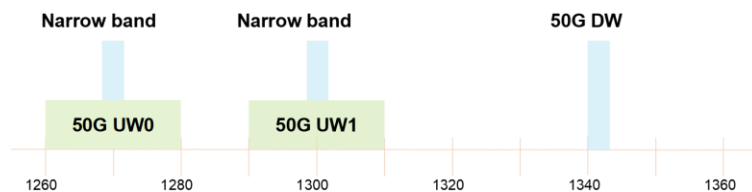


图 3-12 PON 波长规划

上行波长	US0-wide	US1-wide	US0-narrow	US1-narrow
	1260-1280nm	1290-1310nm	1268-1272nm	1298-1302nm
10G 上行	确定	确定	讨论中	讨论中
25G 上行	确定	确定	讨论中	确定
50G 上行	未讨论	未讨论	讨论中	讨论中

表 3-3 50G-PON 波长规划

3.1.5 下一代 PON 应用探讨

下一代 PON 技术应用趋势：

1. 有线电视运营商10G-EPON后续演进

传统有线电视运营商部分采用 EPON 技术，当前正在进行 10G-EPON 的技术更新，后续可能会采用 25G/50G EPON 技术作为下一步演进技术路线，面向家庭宽带市场，满足未来交互式 VR/AR 的带宽需求。

2. 运营商平滑演进

当前主流运营商都采用 ITU-T GPON 技术路线，当前 GPON 正在广泛应用，XG(S)-PON 正在逐步导入，中国市场已经进入 10G PON 规模部署阶段。后续演进有两条技术路线：

➤ XG(S)-PON 演进到 50G-PON

XG(S)-PON 在完成 GPON 的替换之后，为了满足未来交互式 VR/AR 的带宽需求，需要提供 1Gbps-10Gbps 的带宽，后续会导入 50G-PON，并和 XG(S)-PON 共存。

➤ GPON 演进到 NG-PON2

由于 NG-PON2 的 ONU 可调光器件的技术不成熟，成本过高，当前还看不到规模商用前景。

部分传统 10G-EPON 的运营商也会迁移到 50G-PON，并和 10G-EPON 共存。

3. 5G承载等新业务扩展

50G-PON 具备的大带宽低延迟特征，满足未来 5G 承载和企业专线的用，下一代 PON 技术将从传统的家宽领域进入到企业宽带接入、无线承载等领域，这样可以复用当前已广泛建成的 FTTH ODN 网络，实现综合接入的目标，极大降低运营商的建网和运维成本。

3.1.6 中兴通讯下一代 PON 研究进展

中兴通讯很早就开展了下一代 PON 技术研究，建立了基于 25Gbps 速率的下一代技术平台，通过高速误码仪、高速任意波形发生器(AWG)以及高速采样示波器等，对 25G 的关键器件(如 25G EML/DML/APD/TIA 突发 CDR 等)进行测试，并能够对多种调试格式(NRZ、Duo-binay、PAM4、

DMT)、各种 DSP 算法的性能进行仿真实验。

2017 年中兴通讯在巴塞罗那 MWC 展上成功展示了 100G-EPON 的原型样机。2017 年上半年,中兴通讯与上海大学“特种光纤与光接入网”教育部重点实验室的联合示范网中成功验证了对称 100G PON 样机,验证了对称单波 25G 和 4 波 100G PON 系统。

中兴通讯是 IEEE802.3ca 25G/50G EPON 标准的最早发起人之一,多项关键技术指标被采纳为标准,也是 ITU-T Q2/15 下一代高速 PON 技术白皮书的发起者、编辑和主要贡献者。

当前,除了少数有线电视运营商,大多数运营商都采用 ITU-T 下一代 PON 技术,为此中兴通讯将聚焦 50G-PON 关键技术的突破,积极推动 50G-PON 的研究和商用进程。

3.2 下一代铜线接入发展分析

3.2.1 DSL 技术

3.2.1.1 不断演进中的铜线接入技术

上世纪 90 年代,随着互联网的逐步普及,信息数据类业务的需求开始兴起。针对家庭及小型企业的拨号 Modem 和 ISDN 业务便应运而生,铜线网络除了传输语音外,开始向数据领域扩展。

本世纪初期,各种视频类业务开始兴起,基于铜线的 xDSL 技术逐渐成熟,包括 HDSL,ADSL, ADSL2 及 ADSL2+。其中 ADSL2+以其较高的传输带宽和性价比脱颖而出,下行理论速率达到 24Mbps,ADSL2+技术在全球范围内得到了广泛部署。

高清视频逐步成为普遍需求,ADSL2+技术无法满足带宽需求。VDSL2 技术将频宽拓展到 17MHz 甚至 35MHz,带宽提升到百兆。而 Vectoring 技术的出现,解决了长期困扰铜线材质的串扰问题。Vectoring 在不牺牲性能的前提下通过算法将串扰进行了抵消,使 VDSL2 技术真正实现了百兆及多百兆级别的接入。

而 G.fast 技术,则使在铜线上提供千兆成为了现实。

铜线技术的演进路线

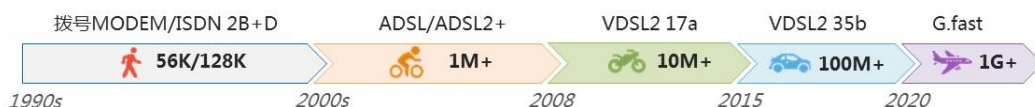


图 3-13 铜线接入技术演进路线

3.2.1.2 G.fast 引领铜线进入千兆时代

G.fast 技术是一种在短距离铜线上实现超高速率的接入技术。与 VDSL2 相比较，G.fast 在铜线接入速率上实现了由 100Mbps 向 1Gbps 甚至 2Gbps 的跃进，将铜线接入能力提升到了一个全新的高度。作为 FTTH 的有益补充，G.fast 可以解决特定场景下光纤无法入户/入户难、入户贵的问题，实现运营商网络的快速部署和性能提升。

G.fast 的应用场景主要是 FTTB、FTTdp，以及部分 FTTC 场景。

在 FTTB 场景下，光纤部署到楼宇（如公寓）的地下室或者楼道，通过多端口 DPU 设备提供 G.fast 接入，利用建筑物已有的双绞线资源，离用户的距离通常在 100m 左右，最远不超过 200m。

在 FTTdp 场景下，光纤抵达铜线的最后一个分配节点，通常安装在室外电线杆上或者人洞中，利用最后一段双绞线资源。距离用户的距离通常不超过 200m。

而 FTTC 场景下用户的距离通常在 300m 左右，通过采用长距离 G.fast 技术（如 G.fast profile 106b），可以将 G.fast 的传输距离拓展到 300m 左右。



图 3-14 G.fast 应用场景

相对于 VDSL2 技术，G.fast 在以下方面进行了提升和改善：

1. 扩展的频谱规划使 G.fast 达到 2Gbps 能力

G.fast 技术在原有 VDSL2 基础上扩展频谱资源。VDSL2 的典型工作频率是 17MHz 或者 35MHz，而 G.fast 的频谱将扩展到 106MHz 甚至 212MHz。频率越高 G.fast 可获得的带宽也越高，但信号频率越高，传输距离越短，G.fast 的最佳应用距离在 250 米以内。

2. 采用 TDD 双工方式，上下行速率灵活可配，适应不同业务

不同于 ADSL 和 VDSL 所采用的 FDD 双工方式，G.fast 采用了 TDD 双工方式，也就是通过分配不同的时隙来区分上下行流量。这样一方面便于技术实现，另一方面可以灵活定义上下行速率比例，适配不同的业务和用户。

3. 更稳定的链路，引入快速重配置

链路稳健性对用户体验来说是一个重要指标。如果链路环境恶化，链路频繁掉线，就会降低用户体验。G.fast 引入了在线重配置 OLR 来应对这种情况，通过在线调整参数，包括

调制参数、传输参数、帧结构参数以及管理通道参数来适应线路环境的变化，防止断链。

3.2.1.3 G.fast 的下一代技术 G.mgfast

G.mgfast 标准在 ITU-T 的 2017 年 6 月全会上正式立项。G.mgfast 借用 G.fast 标准的部分内容，同时新增定义 212MHz 以上的 Profile、全双工操作等内容。G.mgfast 的目标接入速率是达到 5Gbps 甚至 10Gbps，传输的距离建议在 100m 内。G.mgfast 的主要应用场景为 FTTB 和 FTTD。

在 FTTB(Fibre to the Building)应用场景中，多端口 DPU 通常安装在 Building 的地下室或者楼道，接入每个住户的线对都通过一个共用的线缆管道，DPU 的每个端口与各住户单元中的 CPE 一对一相连。DPU 离住户最远距离建议不超过 100m。

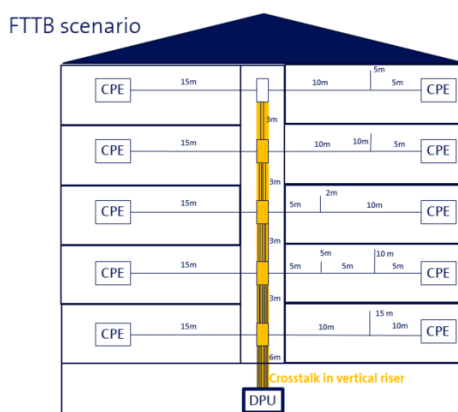


图 3-15 G.mgfast 应用场景

而 FTTD (Fiber to the Door) 场景通常主要针对的用户是家庭住户，光纤已经延伸到用户家门口，单端口 DPU 设备通常安装在外墙的铜线接线盒旁。线路长度一般小于 30 米。

相对于 G.fast 技术，G.mgfast 在以下方面进行了提升和改善：

1. 频谱进一步拓展，将速率提升到 10Gbps

G.fast 的工作频率是 106MHz 与 212MHz，而 G.mgfast 的频谱将扩展到 424 MHz 甚至 848 MHz。G.mgfast 高频段初始阶段会采用 424MHz，速率提升至 5Gbps；未来可扩展到 848MHz，速率提升至 10Gbps。频率越高，G.mgfast 可获得的带宽也越高，但信号频率越高、传输距离越短、成本和功耗越大，因此需要在性能、成本和可实现性之间取得平衡。

2. 增加全双工 FDX 技术

相对于 G.fast 的 TDD 双工方式，G.mgfast 增加了全双工模式 (FDX)，即 G.mgfast 可

支持 TDD 或 FDX 模式，也可支持 TDD 与 FDX 模式。其中，TDD 是通过不同的时间窗口来区分上下行流量，而 FDX 实现在同一个时间窗口同时收发上下行流量，即在同一频段同时完成信号收发通信，理论上频谱效率可提高一倍，并能降低端到端时延和信令开销。

3. 多时延通道技术

为了满足不同类型业务承载要求，G.mgfast 支持 2~4 种具有不同 delay_max 值的时延类型，以匹配不同的时延要求。G.mgfast 物理层从上层接收到不同类型业务的数据包以后在 DTU (如 DTU header、或 DTU frame header)中对时延类型进行对应的标志。

G.mgfast 能否成熟尚待时间的检验，尤其需要背后产业链的推动，如运营商的部署需求是否形成规模，芯片供应商能否提供成熟可靠的芯片方案，而设备商能否推出低成本的成熟产品。其中的每一环都很重要。

3.2.2 DOCSIS 技术

DOCSIS 技术是 CableLabs 定义的一个在有线电视网络上承载数据业务的标准体系，将 HFC 网络的广播方式转变为双工双向传输方式。DOCSIS 定义了 CMTS 和 CM，以及它们同后台 OSS 系统之间的标准接口，保证了不同设备厂家基于 DOCSIS 标准的设备能够互通，从而实现数据业务的自动开通。

前期 MSO 运营商建设了大量的 HFC 网络，而 HFC 网络最初是为广播而设计的，这就决定了其网络架构、频段划分和节点用户数等都难以适合高宽带互联网时代的发展需要。尤其当前视频已经成为宽带网络的基础业务的情况下，针对一些视频业务如 4k/8K/Cloud VR 的多样化、灵活性用户需求，HFC 网络已经难以满足。大量模拟有源器件在 HFC 网络中也导致 OpEx 很高，此外末端同轴电缆部分通常采用链型网络，光节点下用户共享频谱/带宽，在技术上比较封闭。因此随着业务发展、带宽诉求提升，以及竞争的加剧（这种竞争不但包括 MSO 之间的竞争，同时还有 MSO 运营商和电信运营商、OTT 之间的竞争），迫切需要解决频谱资源共享，上行带宽资源不足，以及有源设备的运维和管理等问题。

基于同轴电缆的 DOCSIS 技术经历了从 1.0，2.0，3.0 再到 3.1 的演进历程，DOCSIS 1.0 解决了双向数据传输的问题，也即解决了数据业务的有无问题；DOCSIS 2.0 关注 bit/Hz 率的提升；DOCSIS 3.0 通过通道绑定来提升带宽。

DOCSIS 1.0/2.0/3.0 已经在网大量部署应用，现阶段有线电视网络主要是向 DOCSIS 3.1 的升级演进，以及 DOCSIS 4.0 的技术升级阶段。

DOCSIS 3.1 技术相对 DOCSIS 3.0 来说，最大的改进在于 PHY 层，采用 OFDM 调制方式，同时每个信道宽度变成 192MHz，在频谱规划和带宽能力上进行了扩展，可以满足上行 1~2Gbps，下行 10Gbps 的带宽能力，同时采用了新的 FEC 算法（LDPC）和更高的调制效率（QAM4096），并引入了 OFDM 重新规划了频谱，有效提升了频谱利用率。

MSO 运营商升级到 DOCSIS 3.1 的驱动力

1. 基于光纤的竞争技术已能提供 FTTH 千兆到户。有线电视运营商需要达到类似的带宽，才能保持对基于 PON 的 FTTH 的带宽竞争力和均衡竞争态势。
2. 新兴业务如大视频要求更高的上行和下行速率，以及更好的使用体验。有线电视网络需要大幅提高带宽以支持新的用户体验和未来应用，如 4K/8K/VR、企业宽带接入、智慧家庭等应用。这些新应用将带来流量的指数级增长，并进而对网络提出更高的要求。
3. 5G 的发展会倒逼有线网络进行改变以适应新形势下的发展需要，对带宽、连接、时延/抖动/丢包以及基础介质承载能力等提出了更高要求。

从全球情况来看，目前 DOCSIS 3.1 正处于引入阶段，已经有部分 MSO 开始进行相应的试验和部署，对于拥有大量同轴电缆沉淀资源的 MSO 来说，升级到 DOCSIS 3.1 具备一定的吸引力，现有的网络基本上不需太多改动，同时可以有效保护已有投资。

DOCSIS 4.0 技术是在 DOCSIS 3.1 基础上的持续演进，其重点是结合全双工 FDX 和扩展频谱，以及低延迟来制定统一标准，这样可以使得上行和下行流量在同一频谱上运行，同时提供比较低的延迟。DOCSIS 4.0 技术可实现高达 10 Gbps 的下行速率和 6 Gbps 的上行速率。

DOCSIS 4.0 的标准于 2020 年 3 月发布，但预计离市场真正部署还需要一定时日，前期部分 DOCSIS 的主流厂家在 DOCSIS 4.0 上出现投入削减和降低关注的倾向，并且在技术的发展和选择上还需要进一步探讨和完善。另一方面，随着 FTTH 在全球的快速普及，对有线电视网络造成了事实上的冲击，部分 MSO 运营商已经开始从有线电视网络向 FTTH 转型，也给后续 DOCSIS 技术的发展带来一定的不确定性。

3.3 未来光纤接入将成为主流发展方向

随着 FTTx 成本的进一步下降及全球化光进铜退、光纤化进程的加快，持续带宽提速将成为未来 5~10 年固定宽带领域的一种态势。基于双绞线的 DSL 技术和基于同轴电缆的 DOCSIS 技术经过多年的发展，后续演进方向存在一定的不确定性。G.mgfast 技术目前还处于标准的探讨和制定过程中，DOCSIS 4.0 在技术实现的选择上还需要进一步完善。

同时，铜线网络从 20 世纪 80 年代开始规模建设，目前已经有近 40 年的使用寿命，而对于铜线介质来说，随着时间的推移和氧化等多种因素、其传输能力和质量会逐步下降，而其设计寿命一般为 50 年。这就意味着 10 年后已在网铜线介质将达到生命周期的末期，需要提前考虑进行网络的改造规划，而铜线的寿命和质量将成为制约其发展的关键因素。同时铜作为一种战略资源，近年来其价格一直处于高位，这也导致新建基于铜线的网络将需要更多的投资。

光纤相比铜线具备如下优势：

1. 原材料成本低廉，可获取性强，重量轻、易部署。
2. 不易受外界干扰，如电磁辐射、氧化，同等传输距离情况下损耗更低。

3. 生命周期远长于铜线。
4. 可承载带宽高，传输信息量远超铜线。

此外,从几种主流的固网接入技术来看,PON技术有明确的演进方向,从GPON向10G PON,并进而向50G-PON演进已经成为业界共识,和G.mgfast技术、DOCSIS 4.0相对标的10G PON技术已经规模商用,部署进程远远领先。这就意味着,在同一时间阶段,铜线技术的可提供带宽远落后于PON技术可提供带宽能力,网络经营和市场竞争压力更大。

3.4 下一代 Wi-Fi 技术

3.4.1 不断演进中的 Wi-Fi 技术

Wi-Fi 技术是一种基于 IEEE 802.11 系列协议,将有线信号转化为无线信号进行传输的短距离无线接入技术。当今无论是在家庭还是工作场合,Wi-Fi 已经成为用户上网的首选方式。根据 Wi-Fi 联盟预测,在 2022 年会有近 400 亿的 Wi-Fi 设备为全世界提供服务,Wi-Fi 承载超过全球一半的数据流量。而这样的成绩离不开 Wi-Fi 技术的持续演进。

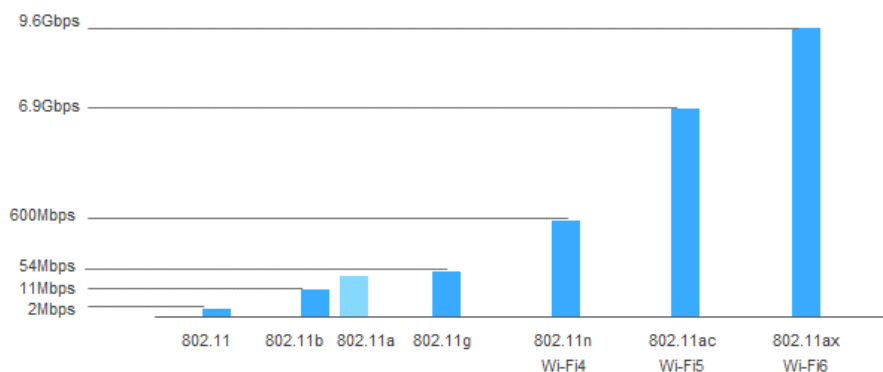


图 3-16 Wi-Fi 标准演进

IEEE 802.11b 是第一个被广泛接受的 Wi-Fi 标准,后续依次是 802.11a,802.11g,802.11n 和 802.11ac,共经历了五代。在这期间,Wi-Fi 技术主要围绕如何进一步提升理论速率,即提升高信噪比环境下的吞吐量,以满足日益增长的带宽需求。

然而,随着智能家居、视频会议、AR/VR 等新业务的兴起,Wi-Fi 网络因为越来越多的智能设备的接入而变得拥挤。使得 802.11ax (Wi-Fi 6) 除了关注理论速率的提升,更关注频谱效率的提升,提高多终端的接入能力。相较于上一代 Wi-Fi 技术,802.11ax 实现了峰值速率提升 37%,高密度场景下接入效率提升 4 倍,终端功耗降低 30%以上。

3.4.2 Wi-Fi 6 关键技术

相较 Wi-Fi 5，Wi-Fi 6 更适用于高速率、高密度、低时延的场景。其中，高速率低时延场景主要有视频会议、电子教室、AR/VR 等。高密度场景主要集中在智能家居、机场、场馆等应用场所。

场景	描述
高带宽	5GHz 频段 Wi-Fi 6 可稳定达到 500Mbps+，具备 VR 所需带宽的 2 倍能力
低时延	基于 VR 业务识别保证专享通道流量<50%峰值流量，保障 Wi-Fi 6 平均时延<5ms
高密度	128 个终端同时接入，满足家庭 IoT 业务发展需求

表 3-4 Wi-Fi6 应用场景

为了匹配高带宽和高密度两个场景的业务需求，Wi-Fi 6 主要引入以下关键技术来提升频谱效率和吞吐量，提升密集应用场景下的网络性能和用户体验：

1. 1024QAM：由Wi-Fi 5的256QAM提升至Wi-Fi 6的1024QAM，由原来每信号传输8bits增加至10bits，理论数据吞吐量提升了25%。
2. 4倍子载波：子载波间隙可从312.5kHz降至78.125kHz，其对应的信号持续时间会相应增加4倍。该技术可以有效降低丢包率和重传率，尤其在中远距离或者多障碍物传输时，多径效应比较明显，可以降低载波间干扰，提升信号覆盖距离。
3. UL/DL MU-MIMO：支持多用户同时上传和下载，在Wi-Fi 6协议下，最多允许8个终端共享上行、下行的带宽。适用于大数据包的并行传输，提升了空间流的利用效率及相较于Wi-Fi 5，成倍提升理论速率。
4. OFDMA：将无线信道划分成多个子信道，用户数据得以承载在不同的频率资源块上。避免了在Wi-Fi 5中，无论单个数据包大小传输时都会占用整个通道的弊端，降低了网络堵塞和时延，极大地提升了数据的传输效率。
5. BBS着色技术：通过数据包头部6bits标签区分是否属于终端自己的信息，而无需进行完整的解码验证，从而降低了同频干扰的可能、提升了传输效率，节约终端电力损耗。
6. TWT目标唤醒技术：AP与每个终端协商设置“唤醒协议”，从而协商被唤醒或接收数据时间间隔，预计为IoT设备节约30%以上的电力损耗。
7. 6GHz频段：开放了6GHz频段供非授权使用，额外增加了7个160MHz信道。用户可以很轻松地拥有属于自己的160MHz信道，一方面使得吞吐量增加一倍（与80MHz相比），另一方面将大大减少与另一个设备共享频谱的可能。

3.4.3 Wi-Fi 6 的下一代技术

随着 EasyMesh™标准的发布以及多 AP 需求和应用的激增，相较于 Wi-Fi 6 首次考虑密集场景下的网络性能，下一代 Wi-Fi 技术着手讨论多 AP 协调优化网络性能这一议题。同时，随着 6GHz 的引入，在不久的将来，支持三频的固网终端也会迎来规模商用，所以，如何更充分的发挥多链路优势的议题也越发具有吸引力。

当前下一代 Wi-Fi 技术还在标准制定阶段，功能和技术都还在进一步探讨完善中。但结合 IEEE 802.11 工作组已披露的信息，可以给出后续可能的技术提升方向：

1. 单信道操作优化：延续Wi-Fi 6E对于6GHz的支持、320MHz信道、16空间流。
2. 多链路操作机制：允许终端同时使用两个以上的链路（如同时使用5GHz和6GHz两个信道）进行上传下载，实现吞吐量的提升，同时也带来低时延的优势，也可支持负载均衡。
3. 多AP协作机制：实现多AP间构成的分布式MIMO，复用闲置空间流，进而改善多AP环境下的网络性能，尤其是在需求越来越强烈的Mesh组网场景下。
4. 低时延操作机制：结合时延测量与多链路技术，提供低时延操作模式，增强针对低时延业务的QoS实现机制，支持4K/8K视频、VR/AR视频、游戏、远程办公、云计算等大吞吐量及低时延业务应用。
5. 链路自适应机制：如采用HARQ(Hybrid automatic repeat request)技术实现将传输的错误报文和重传后的错误报文进行组合解码，提升解码成功率。

3.5 5G FWA

3.5.1 5G FWA 成为运营商关注点

随着 5G 时代的来临，Fixed Wireless Access（以下简称 FWA）成为越来越多运营商关注的话题。5G 接入技术可支持峰值 10Gbps、平均 1Gbps 的接入速率，1ms 的空口时延，相比于 4G 在速率、时延和频谱效率等方面有显著提高。

与 FTTx 相比，5G FWA 的 TTM 更短，TCO 更低。从市场的角度来看，目前家庭宽带未服务区域是 FWA 的巨大潜在市场。考虑到 FWA 能够降低最后一公里的部署成本，以较低的价格提供宽带服务，特别是在还没有有线宽带的地区，因此这些未服务的区域将是 FWA 的潜在市场。

目前很多运营商已明确其 5G 进程，未来 5G FWA 市场份额将会快速增长。FWA 已经在近 120 个国家部署，5G FWA 可以直接与 DSL、Cable Modem 及 FTTx 之外的接入技术竞争。

3.5.2 5G FWA 的主要部署场景

5G FWA 的部署场景主要包含 4 个：

1. 提升覆盖范围：原来FTTx覆盖不到的地方，可以部署无线。
2. 提供高速率业务：主要是为原来双绞线的地区提升容量，提升QoE。
3. 提高效率：5G FWA基于现有移动网络部署，提高频谱利用率。
4. 热点覆盖：在热点区域部署5G FWA分担MBB和FBB流量压力。

5G FWA 给运营商带来好处：

1. 对于传统固网运营商，5G FWA所带来的好处一是提升覆盖，原来覆盖不到的地方可以部署无线；二是提供高速率业务，主要是为原双绞线的提升QoE。
2. 而对于移动运营商来说，采用5G FWA，可以拓展新市场，同时提供多业务满足用户需求，减少用户转网。

3.5.3 5G FWA 的部署局限性

虽然 5G FWA 有一定好处，但由于其采用空口进行传输，在实际使用时有一定的局限性。为了探索外界环境对性能的影响，通过搭建场景环境进行相应的模拟测试。

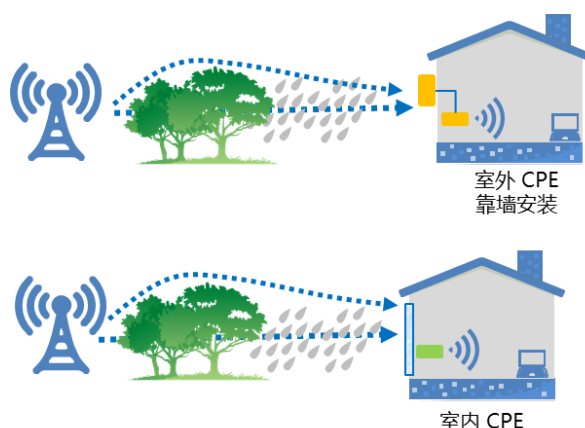
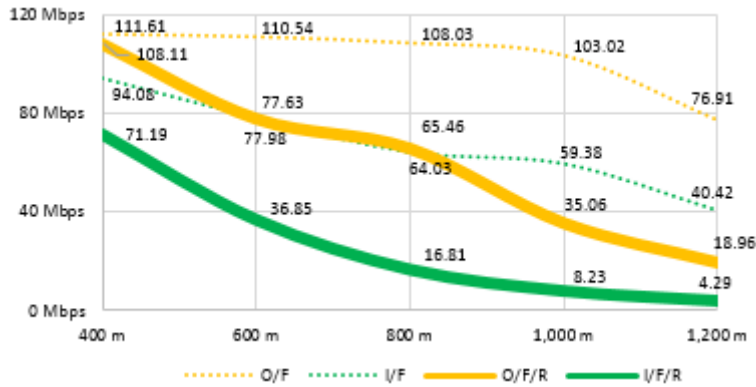


图 3-17 模拟测试环境

经过测试，CPE 放装位置、降雨、植被阻挡等均会对最终性能造成影响。

28G 综合性能 (叶衰&雨衰)



3.5G 综合性能

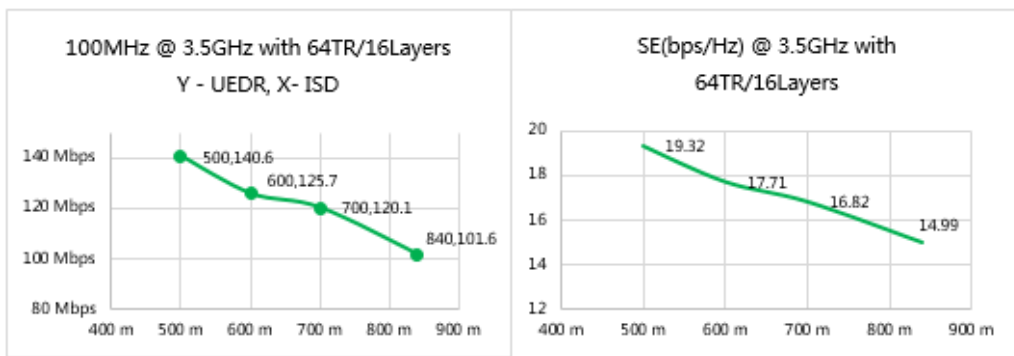


图 3-18 模拟结果

通过数据对比可以得出如下结论：

1. 在边缘数据速率相同的情况下，室外CPE的半径是室内CPE的4倍以上。
2. 在相同覆盖条件下，室外CPE相比室内CPE，具有超过25%的速率增益。
3. 50mm雨量情况下室外可以达到 100Mbps @1100m 或者小区边缘 CPE 速率减少到89Mbps。
4. 50mm雨量情况下室内可达100Mbps @680m 或小区边缘CPE 速率减少到26Mbps。
5. 植被导致在NLOS场景下具有穿透损耗和衍射效应。植被在3.5GHz频率下会带来-0.54dB / m的损耗，在26GHz频率下会带来-4.05dB / m的损耗。
6. 在晴朗天气条件下，只有室外CPE可以在1000米 以上站间距达到100Mbps的速率；在其他的植被损耗情况下，应保持较低的GBR和短距离覆盖。

距离	3.5G (100M)	28G (400M/800M)
50m~400m	用户>100Mbps,小区吞吐量较小,不能同时提供更多用户的高速率业务	用户>100Mbps,小区吞吐量是3.5G的2-3倍,能使更多用户享受fiber-like服务
400m~1000m	用户>50Mbps,下载速率较高频更有优势	用户下载速率急剧下降,性能远弱于3.5G
Capacity	2.7G (仿真结果约900M/Cell)	6G (暂按2G/Cell)
场景	移动用户群+5G FWA混合业务 适合中等速率FWA用户需求 (20~50M)	适合较高密度用户分布区域, 适合Fiber-like FWA用户 (200M~1G)

表 3-5 覆盖距离和频率的关系分析

可见,单纯的 5G FWA 接入对于 5G CPE 的部署条件要求较高,同时对于天气等环境要求也相对来说较为苛刻。

3.5.4 5G+FTTx 方案

通过上述结论,FWA 固然方便,但是可靠性相比 FTTx 尚有较大距离。在未来的应用部署中,可以考虑将推出 5G FWA+FTTx 的结合方案,该方案适应三种场景。

1. 5G+PON: 采用融合网关,支持5G和PON双上行模式,互为备份。
2. 5G+DSL: 采用融合网关,支持5G和DSL双上行模式,两种上行模式同时生效,通过5G来弥补DSL接入速率的不足,对FBB流量进行有效分担,同时又保证了高速率接入,给用户带来更好体验。
3. FTTH+5G AP: 利用已有FTTH接入网络,通过ONT下挂5G AP方式对运营商5G覆盖进行补盲;可使用5G作为备份链路,大大缩短灾后重建通信恢复时间,保障用户在极限条件下的通信需求。同时对于ODN未建设完成的区域,可以使用5G快速部署,缩短TTM,如室内、人口密集型场馆等基站无法完全覆盖的地区进行5G信号补盲,保证用户网络接入。

5G 所采用的频段决定了其穿透性不如 4G,同时受天气影响会产生衰减。FTTH+5G AP 的组网可以通过现有的 xPON 高速接入进行补充。在 ONT 上创建专用通道,下挂 5G AP,来对室内、人口密集型场馆等基站无法完全覆盖的地区进行 5G 信号补盲,保证用户接入。

总体来说,5G FWA 对用户体验提升有一定的效果,但是单纯的 5G FWA 接入用于家庭宽带业务还稍有不足,其性能对部署位置、障碍物遮挡、天气条件等比较敏感,会产生较大影响。而 5G FWA+FTTx 方案,分别对 5G FWA 与 FTTx 的劣势进行了互补,既保证用户网络健壮性,又提升了接入带宽,从而增强了用户对高速网络的体验。

4 总结

作为最靠近用户的接入网,其发展和最终用户的使用体验和感知密切相关,接入网具备覆盖范围广、场景复杂、成本敏感等特点。某一种接入技术发展能否被认同并广泛使用,受制于该技术的

标准、产业链、成本、使用场景、用户群体等多种因素的综合表现。尤其对于固网来说，由于涉及到大量的基础设施建设和投入，一旦部署改变比较困难，更需要统筹考虑。

现阶段光纤已经大规模应用，支撑长距覆盖、大流量数据传输和轻便化网络部署，随着成本的下降和光纤部署配套技术的发展，预计未来 5~10 年光纤接入将得到更进一步发展。基于光纤介质的 PON 技术由于演进方向明确，覆盖范围广、高带宽上限等优点，在部署上相比铜线接入有明显优势。无疑是未来固网发展的主流技术。

基于铜线的 DSL 和 DOCSIS 接入有着巨大的市场存量，部分运营商会继续基于已有技术路线进行网络升级和演进。但由于未来技术发展的不确定性和铜线质量的现实考虑，在考虑投入产出比的前提下，逐步向光纤化转型是未来的发展方向，目前部分传统的固网运营商和有线电视运营商已经在向基于 PON 的 FTTH 网络进行转型，预计随着时间的推移，这种趋势会更加明显。

家庭网络将是未来固网发展的重点方向，基于用户使用方便性、对已有环境影响小、无缝接入漫游等诉求，推动 FTTH 更进一步，解决最后 10 米光纤覆盖，或采用新型 Wi-Fi 接入技术在不改变用户家庭已有布局的情况下实现高速接入，将夯实智慧家庭发展的基础。

5G 的引入和逐步规模部署，势必会对已有有线宽带网络产生影响，促使有线宽带做出改变，而固网的发展也会进一步促进 5G 发展，两者相互促进，双轮驱动，共同推动宽带领域向前发展。