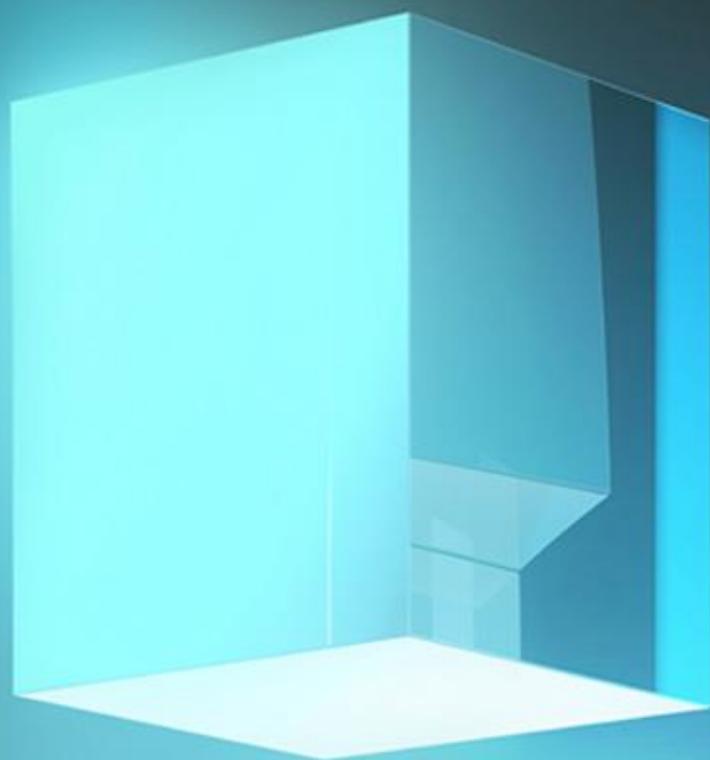


ZTE中兴

50G-PON技术白皮书



目录

1 PON 技术回顾和 50G-PON 展望	3
1.1 PON 技术发展史回顾.....	3
1.2 50G-PON 标准发展.....	4
1.3 向 50G-PON 的演进.....	5
2 50G-PON 需求分析	5
2.1 承载能力要求.....	6
2.2 PON 共存需求.....	6
2.3 业务支持需求.....	7
2.4 保护需求.....	8
2.5 安全需求.....	8
3 50G-PON 关键技术分析	9
3.1 波长选择.....	9
3.2 线路编码.....	10
3.3 线路速率选择.....	10
3.4 FEC 纠错技术.....	11
3.5 Common TC 技术.....	11
3.6 50G-PON PHY 层器件.....	12
3.7 50G-PON 和 10G PON 技术比较.....	13
3.8 50G-PON 待研究方向探讨.....	13
4 50G-PON 应用场景分析	14
4.1 家庭超宽带接入.....	14
4.2 园区确定性网络.....	15
4.2.1 远程医疗.....	16
4.2.2 电网继电器保护.....	16
4.2.3 厂矿井下通讯.....	16
4.2.4 工业智能制造.....	17
5 总结	17

图目录

图 1-1 PON 技术演进趋势示意图.....	4
图 1-2 50G-PON 标准进展情况.....	4
图 1-3 50G-PON 平滑演进升级.....	5
图 2-1 通过独立的 CEx 设备使 XG(S)-PON 和 50G-PON 共存.....	7
图 2-2 通过 Combo PON 方式使 XG(S)-PON 和 50G-PON 共存.....	7
图 2-3 Type B 保护 – 1:1 冗余	8
图 2-4 Type C 保护 – 1+1 冗余	8
图 3-1 单波 50G-PON 系统架构图.....	9
图 3-2 50G-PON 波长规划	10
图 4-1 千兆到家部署示意图.....	14
图 4-2 吞吐量关系计算公式.....	15

表目录

表 1-1 PON 技术演进.....	3
表 3-1 50G-PON 波长方案	10
表 3-2 PON 关键技术对比分析	13
表 4-1 VR 业务对带宽和时延的需求.....	15

1 PON 技术回顾和 50G-PON 展望

1.1 PON 技术发展史回顾

PON 技术是一种基于无源 ODN 的宽带接入技术，上下行传输波长独立，数据时分复用。PON 网络采用 P2MP 点到多点拓扑，一个 PON 口可以接多个 ONU，有效节省局端资源。连接 OLT 和 ONU 的 ODN 网络采用纯光介质，全程无源，避免了电磁干扰，环境适应性强，易于扩展和升级。PON 技术已经大规模应用，并具有高带宽、高可靠性、多业务承载和低成本等优点。

在 PON 技术的发展历程中，标准组织 FSAN/ITU-T 和 IEEE 起到了巨大的推动作用。PON 技术起源于早期的 APON/BPON，商用 PON 技术历经 3 代发展，GPON 和 EPON 已经大规模商用部署。目前 10G-EPON 和 XG(S)-PON 设备已经成熟并步入大规模商用窗口期。

表 1-1 PON 技术演进

技术体系	下行速率	IEEE	ITU-T
第一代 GPON/EPON	2.5G/1.25Gbps	EPON (IEEE 802.3ah)	GPON (ITU-T G.984)
第二代 10G PON	10Gbps	10G-EPON (IEEE 802.3av)	XG-PON(ITU-T G.987) XGS-PON(ITU-T G.9807)
第三代 50G-PON	25G/50Gbps	25G/50G-EPON (IEEE 802.3ca)	50G-PON (ITU-T G.9804)

第一代 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。第二代 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。面向未来 1G 以上带宽需求业务如极致 AR、政企接入、5G Fronthaul/Backhaul 等，并对 PON 技术的带宽和延迟提出更高要求。

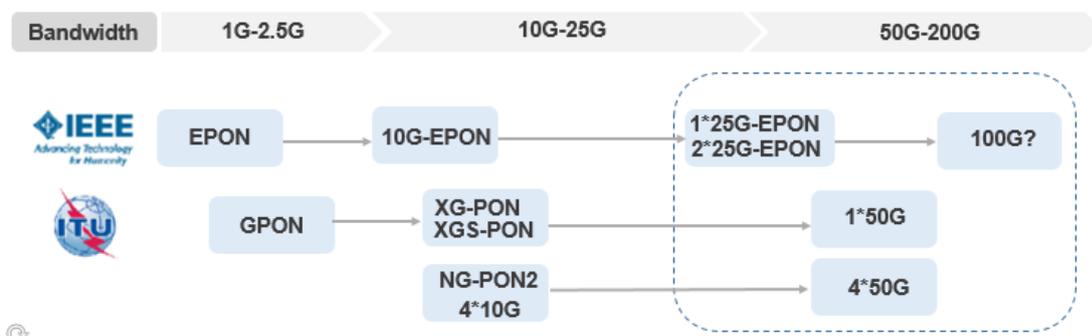
10G PON 之后的下一代 PON 技术发展趋势主要有两种方向：方向一是提高单波长速率；方向二是多波长复用提高总速率。业界普遍认可将下一代光接入网容量提升至 50Gbps，因此如何简单、高效地实现系统容量升级成为目前 PON 领域研究的热点。IEEE 和 ITU-T 就是基于这个思路来研究 PON 技术的后续演进，并在积极推动中。

IEEE 率先启动了下一代 PON 技术的标准制定，在单根光纤上支持 25Gbps 下行速率，同时上行支持 10Gbps 或 25Gbps 速率，并支持和 10G-EPON 的兼容。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 速率。

ITU-T 以 G.Sup64 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，并逐步形成了对于下一代 PON 的需求。聚焦单通道速率为 50Gbps 的 50G-PON 技术。

图 1-1 PON 技术演进趋势示意图



1.2 50G-PON 标准发展

FSAN 组织在完成 10G GPON 标准 XG-PON 的制定之后，启动了下一代 PON 的技术研究。首先基于 10Gbps 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。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，并有可能被跳过。

ITU-T 同时开展了后续演进技术的研究，启动了下一代高速 PON 技术白皮书，调研下一代高速 PON 接入的各种技术可能性。相比多波长复用方案，单波长 50G-PON 更有潜力成为 10G PON 之后的下一代光接入网主流行业标准。2018 年，FSAN/ITU-T 启动了基于单波长 50G-PON 的标准制定工作，命名为“G.HSP : G. Higher Speed PON”，该标准预计可能于 2022 年发布，并预计 2025 年将开始逐步商用，而在此时间点前，10G PON 将仍然是业界主流技术并得到大规模商用部署。

图 1-2 50G-PON 标准进展情况



围绕单波长 50G-PON 的相关研究工作也已经展开。50G-PON 上下行均工作在 O 波段，不支持与 GPON 和 XG(S)-PON 同时共存，FEC 选用 LDPC 纠错算法。为了更好地支持低时延，50G-PON 技术引入了专用激活波长(DAW)、CoDBA 等技术。采用专用激活波长技术，ONU 在专用波长进行注册激活，业务波长不再分配安静窗口，可以减小因注册开窗而带来的传输时延。CoDBA

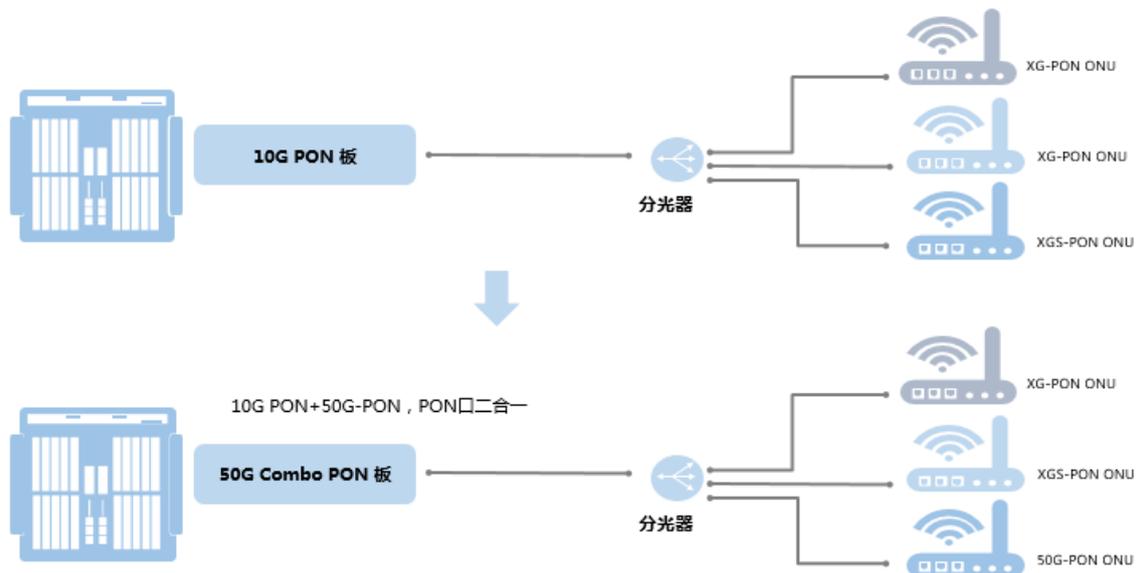
是指在承载无线业务时，通过基站与 OLT 协调，OLT 为 ONU 分配好带宽授权，移动终端数据到达 ONU 时正好是 PON 系统 DBA 的授权时间，数据无需等待直接转发，可以降低带宽调度带来的时延。

1.3 向 50G-PON 的演进

目前 10G PON 已进入批量部署阶段。未来，随着更高带宽的家庭宽带接入、政企接入需求的大量普及，50G-PON 将是有线宽带接入下一阶段的部署趋势。为实现 10G PON 到 50G-PON 的平滑演进，满足不同业务的组网需求，10G PON 和 50G-PON 将长期共存。为节约机房部署空间，降低光接入设备能耗，有效利用现网的 ODN 资源和降低运营商的网络建设成本，局端设备采用多制式共存的光收发合一模块是目前已被验证的最有效手段，如 GPON 和 10G PON 共存 Combo PON 光模块。

根据网络平滑演进，节约机房部署空间以及高效利用 ODN 资源的系列要求，有必要开展 50G-PON 和 10G PON 业务共存验证和测试。

图 1-3 50G-PON 平滑演进升级



2 50G-PON 需求分析

接入带宽需求不断攀升，要求接入网容量持续提升，未来 5~10 年光接入网的发展目标是将每

户接入速率提升至 1~10Gbps。此外随着 5G 的全面部署，出现 5G 小站等新场景，与光纤直连方案相比，基于 PON 架构的 5G 前传可大幅节省主干光纤。为此，固网及 5G 移动接入网均有对超 10G 光接入技术实现方案的潜在需求。10G PON 已处于规模部署阶段，市场需关注并布局下一代技术，从而满足网络演进需求。10G PON 后续演进需要：带宽提升四倍以上，支持 10G PON 平滑演进，并兼容现网 ODN。

50G-PON 是 ITU-T 制定的 10G PON 之后的下一代 PON 标准，单波长支持上下行 50Gbps 速率，带宽提升 5 倍。沿用 TDM PON 的机制，可与 10G PON 共存，并支持现网已部署的 ODN 基础设施。同时考虑到智能新业务的特性，在低时延、切片、节能和可靠性上进行了扩展。满足 10G PON 的后续平滑演进，在考虑成本的同时面向多场景的综合接入需求。

50G-PON 总体要求已经发布，针对承载能力、共存需求、业务支持、保护和安全等方面都进行了规定。

2.1 承载能力要求

所有打算在已建立的基于分光器的 PON 基础设施上运行的 50G-PON 系统应：

- 在下行和上行方向，每个波长信道的对称标称速率为 50Gbps，以确保支持至少 40Gbps 的最大业务速率。
- 每个波长信道的非对称标称速率组合，下行为 50 Gbps，上行为 25 Gbps。
- 通过 TDMA 在同一波长信道上同时支持具有不同上行标称速率组合选项的 ONU。
- 支持使用 ITU-T G.652 和 ITU-T G.657 中描述的光纤类型。
- 在由光纤、连接器、分光器和可选波长选择设备组成的 ODN 上运行。
- 对于基于 TDMA 的系统，应该支持：
 - 最大光纤覆盖距离 60 公里。
 - 最大差分光纤距离达 40 公里。
 - 支持最小 1:256 的分光比。

2.2 PON 共存需求

对于 50-GPON 技术的共存需求如下：

- 支持传统 PON 和 50G-PON 技术在同一根光纤上共存。
- 应避免或尽量减少未升级的 ONU 服务中断。
- 50G-PON 支持和兼容传统 PON 业务。

现网向 50G-PON 的演进，可以考虑两步迁移到 50G-PON：包括从 GPON 到 XG(S)-PON，再从 XG(S)-PON 到 50G-PON 的两步迁移方式。这需要在开始向 50G-PON 升级之前，将待升级

PON 口下的 GPON 迁移到 XG(S)-PON，从 GPON 迁移到 XG(S)-PON。重新使用 GPON 波长窗口，使 50G-PON 技术与 XG(S)-PON 共存，可以实现两步全迁移。这种情况下，两种 PON 技术在任何时候都存在双重共存。

为了使 XG(S)-PON 与 50G-PON 同时工作，网络中应包括 WDM 功能，可以是独立的设备 CEx，也可以采用 50G-PON Combo PON 光模块，如图 2-1 和图 2-2 所示。

图 2-1 通过独立的 CEx 设备使 XG(S)-PON 和 50G-PON 共存

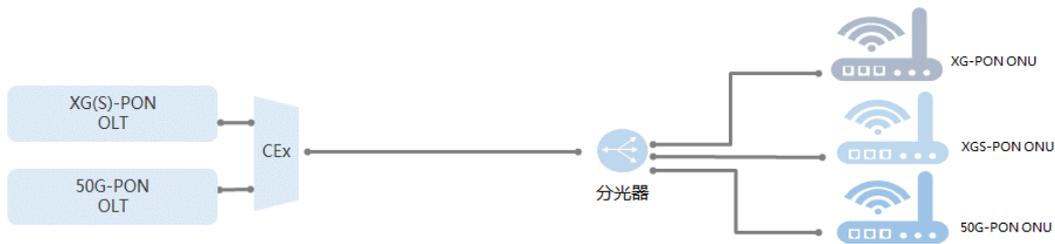
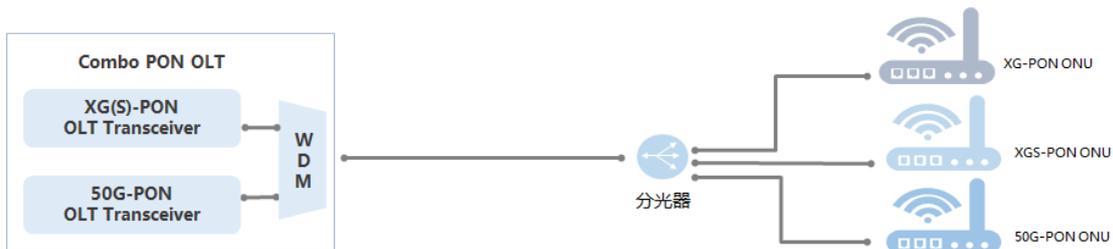


图 2-2 通过 Combo PON 方式使 XG(S)-PON 和 50G-PON 共存



2.3 业务支持需求

50G-PON 系统以其高质量的服务质量和高比特率的能力，全面支持面向家庭用户、企业用户等应用的多种业务需求。此外，50G-PON 系统可以获得更好的时延和抖动性能。50G-PON 系统必须支持传统业务，如使用仿真的 POTS 和 T1/E1、高速专用线（有帧和无帧）以及新兴的分组业务。必须支持最大为 9000 字节的以太网数据包。

对于移动回程业务（尤其是 5G 业务），应支持时间传递（如早期 ITU-T G.984、ITU-T G.987、ITU-T G.989、ITU-T G.9807 系列支持）和低传输延迟时间。

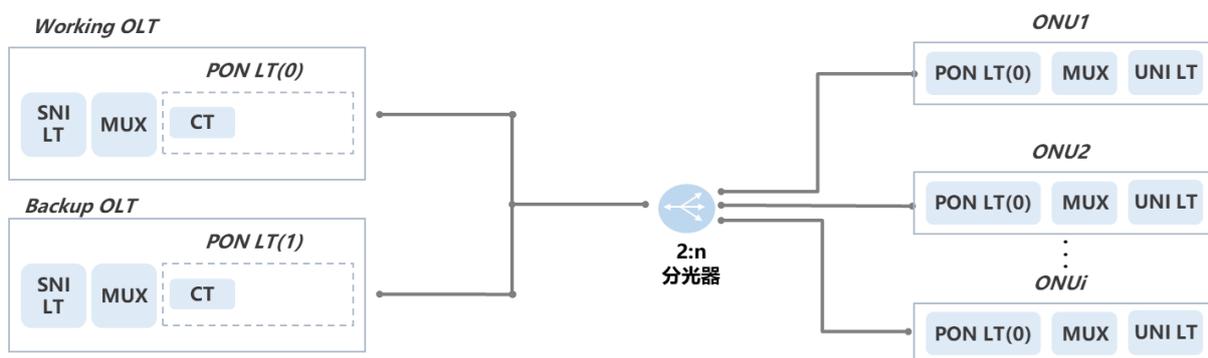
为了支持无线传输需求，包括基于 OTDOA 的定位服务，50G-PON 系统中的 ONU 应该保持 ToD 同步到指定的精度。精确的规格在 ITU-T G.8273.2 中为约 100ns。

2.4 保护需求

50G-PON 的保护在支持企业应用和家庭高价值用户应用方面将变得更加重要，尤其是在多业务共存场景中。需要端到端的保护机制，以避免在光纤或设备发生故障时可能对数千甚至数万个用户造成的服务中断。保护方式可以采用 Type B 或 Type C 保护。

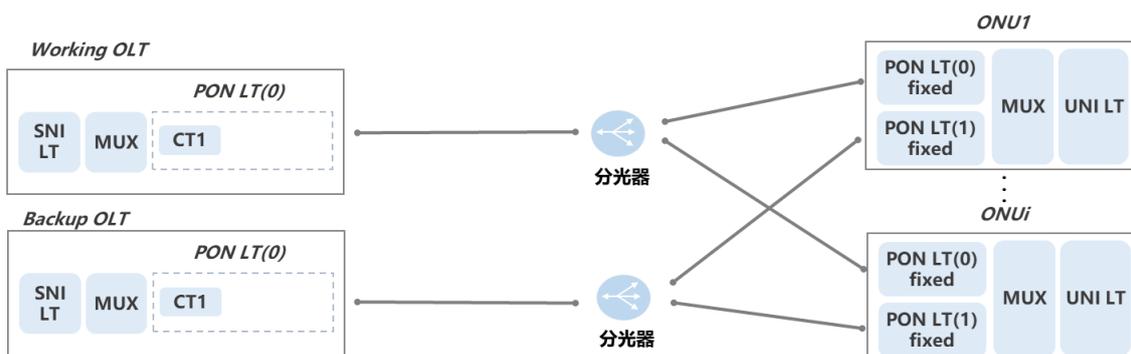
采用 Type B 型保护时，则 OLT 和馈线光纤受到保护，如图 2-5 所示。

图 2-3 Type B 保护 – 1:1 冗余



采用 Type C 保护时，即全双工系统（1+1 模型），ONU 有两个固定收发器，如图 2-6 所示。因此，通过切换到备用 OLT 时，可以在任何时候从故障中进行恢复。

图 2-4 Type C 保护 – 1+1 冗余



2.5 安全需求

与传统的 PON 系统一样，50G-PON 是一种基于共享介质的系统，同一 PON 上的所有 ONU 都接收完整的数据。因此，必须采取措施避免冒充/欺骗等手段。

为了防止冒充/欺骗，身份验证机制必须标准化。50G-PON 系统需要实现这些机制，而机制的

激活必须由操作者决定动态控制。包括但不限于：

- 认证用于 ONU 注册处理的 ONU 序列号和/或注册 ID。
- 基于 IEEE 802.1x 的客户端设备 (CPE) 认证。
- 需要强大的身份验证机制。

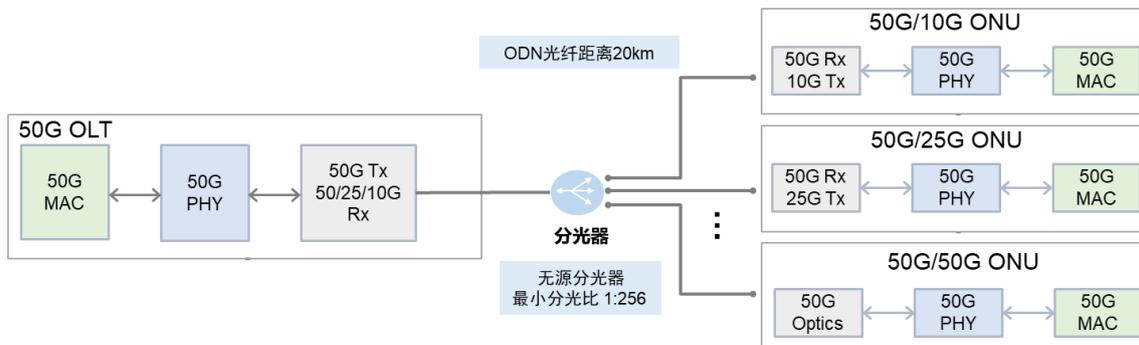
当使用节能功能时，从“休眠”模式恢复时，还需要一种低复杂性但安全的身份验证方法。

为了防止在 ONU 处被检测，所有下行方向的单播数据都应使用一种强大且特性良好的算法进行加密，例如高级加密标准 (AES)。50G-PON 还应提供启动加密通信所必需的可靠密钥交换机制，50G-PON 系统必须支持上行加密和相关的密钥交换，以及运行时控制上行加密的方法。

3 50G-PON 关键技术分析

单波 50G-PON 定位在接入网的中心机房 (Central Office)，向上连接业务网络，向下通过各种类型 ONU 用户侧接口接入用户，系统支持点对多点拓扑，同时支持视频、数据、语音等业务。与 GPON、10G PON 一样，单波长 50G-PON 利用波分复用实现单纤双向传输，下行采用 TDM 时分复用，上行采用 TDMA 时分多址接入，实现 OLT 和 ONU 之间点到多点通信。

图 3-1 单波 50G-PON 系统架构图



3.1 波长选择

PON 系统经过了几代发展，不同标准采用不同的波长，目前光接入网波长资源越来越紧张。而且光接入网面向广大用户，不同用户需求不一，导致现网多代系统同时存在。50G-PON 目前可用波长只有 O 波段一小段可用波长。不够 50G-PON 系统使用。ITU-T 标准组织经过多次讨论，目前已经明确 50G-PON 不会与 GPON 和 10G PON 同时共存。

另外速率提高到 50G-PON 之后，为了能够重用已部署的 ODN 网络，需要实现高灵敏度接收

机，前置放大器是一种有效提升接收机灵敏度的方案。但是放大器存在 ASE 带外噪声，影响接收机性能，为此需要增加光滤波器，而且滤波器波长要与发射机波长匹配。为了降低滤波器设计，避免使用可调滤波器，需要将发射机波长收窄到一定范围，所以 50G-PON 需要有一种窄波长的波长方案。具体波长可选方案标准仍在讨论，图 3-2 和表 3-1 是目前已经确定的几种波长选择。

图 3-2 50G-PON 波长规划

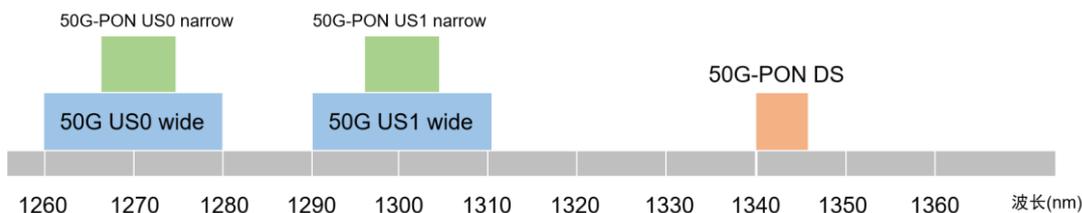


表 3-1 50G-PON 波长方案

条目	US0-wide 1260-1280nm	US1-wide 1290-1310nm	US0-narrow 1268-1272nm	US1-narrow 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

3.2 线路编码

ITU-T 标准在最初讨论时，考虑过 PAM4、双二进制和 NRZ 等几种线路编码。因为 PON 系统功率预算要求很高，标准最终选择了接收性能最好的 NRZ 编码。

3.3 线路速率选择

ITU-T 已经明确 50G-PON 速率要求，支持对称、非对称不同速率组合。下行速率 49.7664Gbps；上行速率有 9.95328Gbps、12.4416Gbps、24.8832Gbps 和 49.7664Gbps 四种线路速率可选。其中 9.95328Gbps 和 12.4416Gbps 速率相差不大，预计将主要采用 12.4416Gbps、24.8832Gbps 和 49.7664Gbps 三种。

3.4 FEC 纠错技术

50G-PON 线路速率提高后，接收机灵敏度下降，需要提高收发机性能才能重用已经大量部署的 ODN 网络。为了降低高速光器件指标要求，50G-PON 参考 IEEE NG-EPON 引入 LDPC(17280,14592) (低密度奇偶校验，LOW Density Parity Check) 编解码方案进行 FEC 前向纠错，编码效率约 84.84%。相比 10G PON RS (255,221) 编码可以将纠错前误码率降低到 10^{-2} ，接收灵敏度提高 2dB 左右。

LDPC 算法根据输出数据是否经过判决又分为硬值输入和软值输入。硬值数据是信号经过均衡判决后的 01 比特序列输入 LDPC 解码器进行解码。软值输入的是未经过判决的原始数据，可以得到输入信号的对数似然比(LLR)，从而提高纠错性能。软值输入需要紧跟在均衡器之后，而且需要 ADC 对原始信号进行数字化采样。

3.5 Common TC 技术

50G-PON 支持 PON-MFH (Mobile Fronthaul) 应用场景，即基于 PON 的 5G 移动前传，在该场景中 OLT 和 ONU 提供 CU 和 DU 之间的业务传输，要求 50G-PON 支持低时延。50G-PON 主要通过以下技术来实现低时延：专用激活波长 (DAW)、协作 DBA (CO-DBA)、减小分配周期。

- 专用激活波长：可以是新定义的波长，也可以是 50G-PON 之前部署的 PON 系统波长，例如 10G PON 波长、GPON 波长。专用激活波长可以是一个单独的上行波长，此时专用激活波长和 50G-PON 下行波长配合完成激活过程，包括发现 ONU 和测距 ONU，并通过计算获得 50G-PON 上下行波长上的测距结果。专用激活波长也可以是一对上下行波长，此时专用激活波长单独完成激活过程，包括发现 ONU 和测距 ONU，并通过计算获得 50G-PON 上下行波长上的测距结果。通过专用激活波长技术，避免了在 50G-PON 上行波长上开放安静窗口，成功取消了因安静窗口带来的时延。
- 协作 DBA：OLT 通过上游设备 CU 获知 ONU 的上行业务发送需求，提前将带宽分配给 ONU，使得业务数据在 ONU 的缓存时间尽量少。
- 减小分配周期：降低 ONU 获得带宽分配的时间间隔，从而降低业务数据在 ONU 的缓存时间。每个 T-CONT 在 125us 周期内可以最多分配 16 次，即在 125us 周期内最多发送 16 个 burst。

为了实现超 50Gbps 的速率传输，可以通过多个通道的通道绑定技术来实现。

在通道绑定中，发送侧业务数据包被分割为若干个数据单元，针对每个数据单元，选择在多个通道中发送时间最早的通道上发送，如果有多个发送时间最早的通道，则选择通道编号最小的通道，

按照该规则直到所有数据单元发送完毕。接收侧，每一次接收数据单元中，在多个通道中接收时间最早的通道上接收一个数据单元，如果有多个接收时间最早的通道，则选择通道编号最小的通道，按照该规则直到将所有数据单元接收完毕，将各数据单元按照接收顺序组装成业务数据包。

另外，通道绑定中的多个通道，由于其波长不同等原因，数据单元在各通道上的传输时延不一样，在多个通道上传输的数据单元，到达接收侧的顺序可能与发送侧的顺序不一样，因此需要数据单元顺序恢复技术，目前标准暂未确定具体技术。其中一种可能的技术是下行方向各通道上同步发送 PSBd，并设置统一的时间参考点，数据单元的发送顺序和接收顺序都以该参考点为准，上行方向类似；另一种可能技术是，发送方确定各通道数据单元发送的相对位置关系，并在数据帧中标明该相对位置关系，接收方根据这些相对位置关系恢复数据单元顺序。

3.6 50G-PON PHY 层器件

PHY 层器件是 PON 系统需要解决的关键技术问题之一，满足 PON 系统性能需求的光收发器件是最核心的 PHY 器件。随着 PON 速率的提升，为避免工作在 C 波段引入过高色散代价，同时避免与 GPON、XG(S)-PON、TWDM-PON 等系统波长冲突，ITU-T G.9804 单波长 50G-PON 标准中，上、下行波长规划定义在光纤色散系数较低的 O 波段。

50G-PON PHY 层器件主要包括光发射组件，光接收组件，激光器驱动器 LDD，突发 TIA 以及时钟恢复芯片 CDR（其中，上行接收方向需要突发时钟恢复 BCDR）等关键光电器件。OLT 光发射组件光器件可采用 EML，集成 SOA EML 器件等，OLT 光接收组件光器件可采用 APD，集成 SOA PIN 器件等。ONU 与 OLT 类似，与 OLT 的不同之处则在于，ONU 驱动器需要支持突发功能，接收不需要突发时钟恢复 BCDR，25Gbps/10Gbps 等上行速率等级 ONU 光发射组件光器件还可采用 DML 器件。

当前业界核心光电器件尚未成熟，仍处于光器件方案和指标需求定义标准讨论中，尚无适用于 50G-PON OLT 和 ONU 的 PHY 层光电器件。业界主流厂家的实验和仿真结果表明，50G-PON 采用 50G EML 发射机器件，25G APD 接收机器件有望获取单波 50Gbps 速率。虽然业界已有 50G EML 光器件产品，但目前器件主要用于以太网 400GE 光模块，发射光功率较低（芯片级出光功率 4-5dBm），消光比较低（>4dB），用于 50G-PON 指标有待进一步提升。而且缺少 50G-PON 下行 1342nm 波长的 50G EML。25G APD 产业链基本成熟，已商用于以太网 50G ER，100G/200G ER4 等光模块。50G APD 仅有极少厂家可提供小批量样品。关键电器件方面，LDD 和下行接收连续 TIA 可重用数据通信产品的产业链器件，而上行突发激光器驱动器 LDD 缺少专用芯片，突发 TIA 器件以及突发时钟恢复芯片尚无可用器件。

3.7 50G-PON 和 10G PON 技术比较

50G-PON 和 10G PON 的关键技术比较如表 3-2 :

表 3-2 PON 关键技术对比分析

技术项	50G-PON	10G PON
线路速率(下行)	49.7664Gbps	9.95328Gbps
线路速率(上行)	9.95328Gbps、12.4416Gbps、 24.8832Gbps 和 49.7664Gbps	2.48832、9.95328Gbps
线路编码	NRZ	NRZ
FEC	LDPC(17280,14592)	RS(248,216)
安静窗口	支持 DAW 上开放	仅在工作波长上开放
CO-DBA	支持	不支持
每 T-CONT 每 125us 最大突发帧	16	4
同一 ODN 共存	与 10G PON 共存	与 GPON 共存
通道绑定	支持 TC 层通道绑定	支持业务层通道绑定
切片	支持	不支持

3.8 50G-PON 待研究方向探讨

目前 50G-PON 部分相关技术内容已经确定,部分内容和方向尚待进一步研究和明确,以下两个方向可能是后续的关注重点:

- PON 网络未来支持多运营商或业务的独享带宽等需求,支持硬切片是一个重要特性,这个特性将支持 PON 的下行调度能够实现刚性管道的建立,将对于现有的 PON 协议框架产生影响,如果 50G-PON 支持这个特性,如何兼容如 XG(S)-PON 等已部署的网络,标准方案还需进一步的探讨。
- 为了满足 10Gbps/25Gbps/50Gbps 不同速率共存的物理层、光模块设计,50G-PON 的上行光功率预算较为紧张,通过 LDPC 来提升纠错能力等机制引入的时延要求和性能、成本的矛盾也是亟待解决的问题。

4 50G-PON 应用场景分析

4.1 家庭超宽带接入

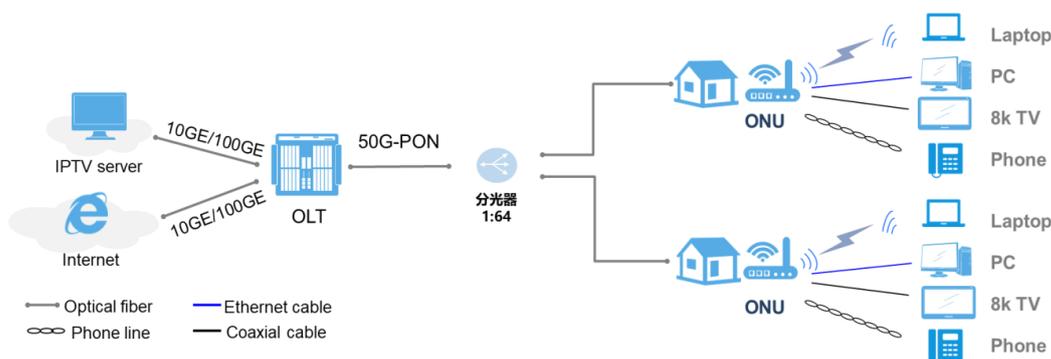
50G-PON 应用于家庭宽带接入场景时，主要为家庭客户提供高速上网、视频和语音服务。为满足不断增长的固网带宽需求，特别是 4K/8K、AR、Cloud VR，典型带宽需求为 1G~5Gbps 每户，接入网需要更大的带宽，PON 技术需要不断演进。

表 4-3 PON 关键技术对比分析

VR 视频	商用时间	全视角带宽	FOV 带宽	RTT 时延	丢包率
入门	~2 年	120M	48M	20ms	2.4×10^{-5}
体验	3~5 年	630M	155M	20ms	1×10^{-6}
极致	6~10 年	4.4G	1.1G	10ms	1×10^{-6}

下图以千兆到家为例，分析 10G PON,50G-PON 端口的用户带宽收敛比。可以看出 50G-PON 可以提供更大的收敛比，为用户提供更大的带宽通道、无损压缩以及极致的用户体验。

图 4-1 千兆到家部署示意图



10G PON: $10G/64$ (分光) / $1G=1:6$

50G-PON: $50G/64$ (分光) / $1G=1:1$

按照 64 用户计算 PON 口下行带宽需求，考虑实装率 50%，并发率 70%，实际端口带宽需求为： $64 \times 50\% \times 70\% \times 1G = 22G$ 。通过计算，用 50G-PON 承载可以满足更高实装率和并发率需求。

另外家宽业务的高带宽和低延时要求主要取决于 8K 高清视频/AR/Cloud VR 业务的高吞吐量和低延时需求。

参考中国电信低时延光网络技术白皮书,按照下图 4-3 公式中,TCP 吞吐量受限于三个因素:带宽 BW、往返时延 RTT 和丢包率 ρ 。假设带宽足够,且良好的网络质量可以不考虑丢包率的话,则时延成为决定性因素。如果时延过大,客户体验带宽无法提升,此时仅提高带宽无法解决问题,形象的称之为“带宽黑洞”。

图 4-2 吞吐量关系计算公式

$$\text{吞吐量} \leq \min\left(BW, \frac{CWND}{RTT}, \frac{MSS}{RTT} \times \frac{1}{\sqrt{\rho}}\right)$$

假设带宽(BW)为 10Gbps,单向时延 10ms(往返时延 RTT 为 20ms),根据上述公式,TCP 协议的最大吞吐量只有 26.3Mbps,远低于网络带宽。业界通常认为 4K/8K 高清视频等实时大吞吐量业务的吞吐量需要达到实际码流速率的 1.5 倍,才能保证业务质量。因此 4K 高清视频的吞吐量需求为 30~45Mbps,按照上述公式计算,所能容忍的最大往返时延 RTT 为 12~17ms。

VR 对用户带宽更高,超过 1G,用户体验提升需要更低延迟 5ms(RTT 延时)。

表 4-1 VR 业务对带宽和时延的需求

Standard		Pre-VR	Entry-Level VR	Advanced VR	Ultimate VR
视频分辨率		3840*1920	7680*3840	11520*5760	23040*11520
强交互 VR 业务	码率	18Mbps	60Mbps (3D)	390Mbps	680Mbps
	带宽需求	50Mbps	200Mbps (3D)	1.40Gbps	3.36Gbps
	RTT	10ms	10ms	5ms	5ms
	丢包率	1.00E-6	1.00E-6	1.00E-6	1.00E-6

参考上述带宽和时延需求,50G-PON 技术针对家宽高清电视 4K/8K 业务能够有效提高带宽,并通过低延时技术降低接入设备的时延性能,从而降低整网的 RTT 延时,最终能极大提高视频业务的吞吐量并进而提升用户体验。而且如果 50G-PON 系统转发延时小于 1ms,基本能够满足严苛的 Cloud VR 多种等级的业务要求。

4.2 园区确定性网络

信息通信技术向各行各业融合渗透,行业数字化加速转型升级。面向行业用户的工业网络对网

络承载的需求差异较大，例如工厂、港口、园区、医院等场景，在覆盖、时延、带宽、安全可靠性等确定性方面有着更高的要求。

确定性传输提供在端到端网络上运行的低延迟、低延迟变化（抖动）和极低损耗的保证交付。确定性传输通常期望极值，其主要目标是保证这些参数的上限。

确定性网络的关键参数包括确定性延迟、确定性带宽和确定性丢包。确定性网络的更多参数包括周期性关键控制数据流、最大端到端延时、高可用性等，这些参数与工业互联网高度相关。

4.2.1 远程医疗

随着医用机器人的发展，预计医生和护士会与不同领域的专业医用机器人进行合作，完成医疗过程。操作指令通过网络正向链路发送至手术台，手术现场的高清图像和信号通过反向链路发送至远程医务人员。由不同医务人员签发的指令应实时传送到现场机器人，不能传送得太早或太晚（要求低抖动）。在这种远程手术场景下，为确保顺利完成手术，患者与医生之间的端到端通信延迟必须小于 50 毫秒，且抖动必须小于 200 μ s。

4.2.2 电网继电器保护

在电源线的各端放置继电器保护装置，通过网络向对端发送等量电流，将本地电流与从对端接收的电流进行比较。如果两个电流的差值小于限值，则表示线路无故障。否则，表示线路发生故障。由于两端的继电器保护装置之间没有时间同步，因此有必要使用 RTT/2 的时间测量两端之间的单向延迟，并作为依据进行相应的操作。

为保证继电器保护系统的精度，两方向之间的单向时延应小于 200ms，抖动应小于 50 μ s。现在，中继保护装置通过无线或有线电信装置传输，因此对传输网的低延迟和抖动提出严格要求。

4.2.3 厂矿井下通讯

厂矿井下通讯面临的主要问题有：

- 1、信号覆盖问题：考虑无线信号抗干扰，穿透力、覆盖范围。
- 2、信号传输稳定性：工作面终端设备多，环境复杂，传输线缆部署，可靠性等。

通过 50G-PON 组建的全光网可以延伸到井下的各个终端，提供稳定的信号传输。这些终端类型可以包括传感器信息采集、视频监控、人员通讯、远程控制等。井下通讯的确定性要求，带宽为 30M-100Mbps；延时为 30ms-100ms。

4.2.4 工业智能制造

智能制造场景对网络性能在数据采集、工业控制、自动化及人机交互等场景对网络的传输时延和安全可靠有着严格要求，通信保障需达到毫秒级端到端时延和接近 100%的可靠性。

传统工业网络本身存在的局限，使其难以满足多样化的场景需求。工业网络之前是各种工业总线，后续演进为工业以太网，但仍存在成本高、部署时间长、部署不方便或无法部署、网络互通性差、故障排查困难等问题，无法满足未来个性化定制对于生产线高度灵活性的要求。

传统窄带工业网络无法支持高密度的工业终端接入以及高并发、大数据量的通信。即使部分工业园区切换到工业以太网设备，其最大上行带宽一般不超过 10Gbps，对于超大型工业园区，也不会超过 40Gbps。而面向下一代的 50G-PON 技术就可以提供比 40Gbps 网络更大的接入带宽，在带宽方面优势明显。

工业 PON 设备在工业互联网体系架构中处于车间级网络位置，通过工业级接入网关(ONU)设备实现光网络到设备层的连接，通过光分配网络实现工业设备数据、生产数据等到汇聚网关(OLT)的集中构成工业 POL 方案，最终通过汇聚网关(OLT)与企业 IT 网络的对接，从而实现企业融合组网及工业数据的可靠有效传输。

确定性指标包含延时和抖动等参数，特别是抖动需求对工控网络非常重要，业内工业以太网交换机可以实现 1us。确定性时延指标需要根据业务需求确定，比如典型目标要求：1ms+/-20us。下一代 50G-PON 技术同时支持确定性转发技术如 TSN，DetNet 等技术，可以保证工业数据在园区可靠、确定性转发。

5 总结

经过多年的发展和商业应用，基于光纤、无源和点到多点等特征的 PON 技术以其相对于双绞线/同轴电缆的比较优势，获得了业界的极大认可并取得了成功。PON 技术正在向三个方向发展：

- 应用领域拓展
 - 全光接入：FTTH 是 PON 的传统领域，正在从 GPON 升级到 10G PON，给家庭提供千兆到家带宽。
 - 全光家庭：从千兆到家向千兆在家演进，光纤组建家庭全光网络，让每个房间可以部署高频、高带宽 Wi-Fi 6 无线接入。
 - 全光园区：POL 技术替代传统以太网交换机组建全光园区网络，实现光纤到会议室、光纤到摄像头、光纤到办公位、光纤到机器等。

- 带宽品质提升

GPON 已经商用 10 来年，FTTH 网络正在从 GPON 向 10G PON 升级，从 GPON 到 10G

PON 带宽提升了 4 倍,有理由相信比 10G PON 带宽提升 5 倍的 50G-PON 是 10G PON 的下一代 PON 技术。

新形势下给人类生活习惯带来了很大的变化,家庭的在线教育、家庭办公高品质需求业务成为刚需,对 FTTH 网络 and 全光家庭网络提出了更高品质保障需求;而全光园区的拓展应用,对网络品质有更高要求,保证园区生产、办公活动的高效率。

➤ 人工智能网络

无论是 FTTH 光接入网、还是深入千家万户的全光家庭网络、支撑园区生产活动的全光园区网,人工智能是提升网络品质的重要手段:

- AI 网络运维:网络内生 AI,能自动故障预警、故障定位、甚至恢复。
- AI 网络优化:网络内生 AI,能自动适应提升网络业务保证。

50G-PON 正在研究的内容包括:5 倍于 10G-PON 的带宽、确定性、内生人工智能所需的度量等,这些新技术和特性的引入将会让 50G-PON 产生质的飞跃,很好的地满足上述 PON 技术的三个发展方向需求。