

50G-PON标准进展及关键技术



Standard Progress and Key Technologies of 50G-PON

黄新刚/HUANG Xingang, 杨波/YANG Bo

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)

(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202403012

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240620.1519.002.html>

网络出版日期: 2024-06-21

收稿日期: 2024-04-20

摘要: 50G-PON标准制定主要工作已基本完成, 下行支持 50 Gbit/s, 上行支持 12.5 Gbit/s、25 Gbit/s 和 50 Gbit/s。50G-PON支持 GPON、XG(S)-PON、50G-PON三代共存。50 Gbit/s光接口指标采用OMA-TDEC参数体系, 光模块发射光功率、消光比、TDEC指标可以相互补偿, 核心是要满足光调制功率与TDEC的最小差值要求。50G-PON引入DSP均衡以提升接收灵敏度。为了发挥DSP均衡能力, TIA、LA不能采用限幅放大, 需要支持线性放大。线性突发LDD、TIA、LA和BCDR是50G-PON突发收发关键芯片。50G-PON采用纠错能力更强的LDPC纠错技术以提升接收机灵敏度, 与DSP集成可以支持软值LDPC。SFP尺寸的GPON、XG(S)-PON、50G-PON三代Combo是50G-PON OLT光模块的关键需求。模块结构布局和功耗是主要挑战。

关键词: 50G-PON; 数字信号处理均衡; 低密度奇偶校验; 突发收发; 三代Combo

Abstract: The main work of 50G-PON standardization has been basically completed. The downlink supports 50G line rate, and the uplink supports 12.5 Gbit/s, 25 Gbit/s, and 50 Gbit/s triple line rate. The 50G-PON supports the coexistence of GPON, XG(S)-PON, and 50G-PON in one ODN. The 50G line rate optical interface specification uses the OMA-TDEC parameter method. The transmit optical power, extinction ratio, and TDEC parameters of the optical module can be mutually compensated. The core performance must meet the requirement of the minimum launch power in OMA minus TDEC value. 50G-PON introduces DSPs to improve the receiving sensitivity. To fully use the DSP equalization capability, the TIA and LA cannot use amplitude-limiting amplification but must support linear amplification. Linear burst LDD, trans-impedance amplifier, LA, and BCDR are key devices for 50G-PON upstream burst transmission. The 50G-PON uses LDPC error correction technology to improve receiver sensitivity and can integrate with the DSP to support soft-decision LDPC. The SFP type GPON, XG(S)-PON, and 50G-PON three-generation combo are key requirements for 50G-PON OLT optical modules. The module structure layout and power consumption are major challenges.

Keywords: 50G-PON; digital signal processor equalization; low-density parity-check; burst transmission; three-generation Combo

引用格式: 黄新刚, 杨波. 50G-PON标准进展及关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(3): 72-80. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403012

Citation: HUANG X G, YANG B. Standard progress and key technologies of 50G-PON [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(3): 72-80. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403012

1 50G-PON技术介绍

1.1 PON技术介绍

无源光网络 (PON) 是一种光接入技术^[1-2], 包括光线路终端 (OLT)、光分配网络 (ODN) 和光网络单元 (ONU)。OLT位于接入机房, 实现业务数据汇聚转发。ONU位于用户侧, 实现个人、家庭、企业等各种场景的用户侧业务接入。ODN是连接OLT和ONU的无源光纤网络。PON技术支持点到多点拓扑结构, 利用波分复用技术实现上下行单

纤双向, 将光信号作为信息传输载体, 进而实现大带宽长距离传输。OLT根据ONU业务需求, 在不同用户之间动态调带带宽资源, 以提高网络运行效率。

PON技术是最成熟的宽带光纤接入技术并得到了广泛应用。相对于铜线, 光纤在带宽提供、可获得性、成本、运维等方面具有优势, 对运营商具有强大吸引力。一方面, 光纤材料相比于铜线可获得性大幅提升, 成本更低。另一方面, PON网络采用无源组网, 无需供电, 可靠性高, 维护简单。同时由于采用点到多点拓扑结构, OLT、ODN等公共部分建设运维成本由众多用户共享, 大大降低系统成本。经过多年的发展, PON设备及芯片、光器件成熟, 产业链不断延伸完善, 为运营商规模商用部署提供了坚实保障。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2900800)

1.2 PON技术演进

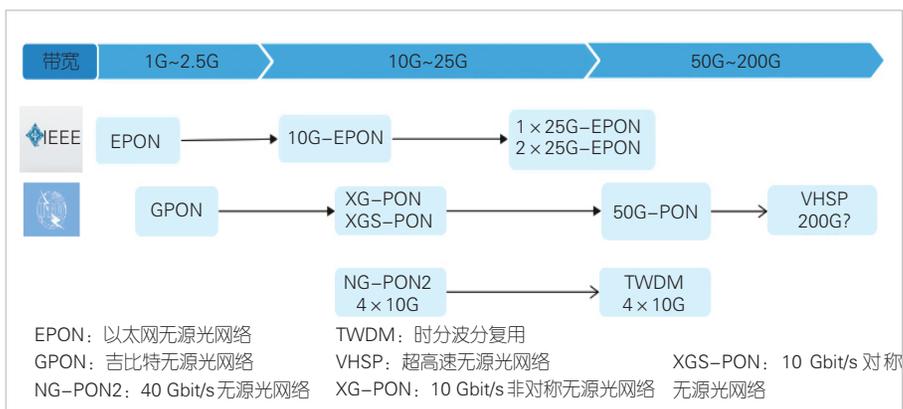
PON技术标准主要是国际电信联盟 (ITU) 和电气与电子工程师协会 (IEEE) 标准组织制定的, 经过20多年发展已经有多代PON标准, 如图1所示。国际电信联盟电信标准化部门 (ITU-T) 制定了异步转移模式无源光网络 (APON)、宽带无源光网络 (BPON)、吉比特无源光网络 (GPON)、10 Gbit/s 非对称无源光网络 (XG-PON)、10 Gbit/s 对称无源光网络 (XGS-PON)、40 Gbit/s 无源光网络 (NG-PON2) 标准。目前最新的是50G-PON标准。IEEE制定了以太网无源光网络 (EPON)、10 Gbit/s 以太网无源光网络 (10G-EPON) 和 $N \times 25G$ -EPON 标准。

EPON 和 GPON 标准于2004年完成制定, 是最早被全球广泛使用的PON技术标准, 可以为用户提供超过100 Mbit/s 带宽的高速接入, 逐步替换原有铜线接入技术。2019年中国宽带用户数量超过4亿, 其中采用GPON、EPON技术的光纤到户 (FTTH) 用户占比超过90%。10G-EPON 和 XG-PON 标准分别于2009年和2010年完成制定, 随后PON技术进入10 Gbit/s时代。XG-PON 上行速率只有2.5 Gbit/s, ITU-T 在2016年定义了对称10 Gbit/s 速率的XGS-PON, 上行、下行速率均为10 Gbit/s。当前10G-EPON、XG(S)-PON 建设已经达到高峰, 可以为用户提供500 Mbit/s ~ 1 Gbit/s 带宽, 满足4K/8K 视频业务应用, 以及虚拟现实/增强现实 (VR/AR) 业务的前期导入需求。

随着用户业务需求的持续增长以及4K/8K 高清视频业务的普及, 为满足在线教育、在线游戏、工业智能制造等新业务的高带宽需求, 标准组织制定了更高速率的PON标准。IEEE 在2020年完成了 $N \times 25G$ -EPON 标准制定, 单波长支持25 Gbit/s 速率, 支持2波长绑定实现50 Gbit/s 传输。 $N \times 25G$ -EPON 主要受到北美MSO运营商的关注。ITU-T 在2021年发布了50G-PON 第一版标准, 并进行持续修订。当前50G-PON 标准已经基本完善, 正处于产品化阶段, 可以为用户提供1 Gbit/s 以上带宽, 支持极致AR、VR等业务。50G-PON 是10G-PON 之后的下一代PON技术主流方案, 是光接入网的未来演进方向。

1.3 50G-PON标准介绍

50G-PON 是ITU-T 制定的XG(S)-PON 之后的下一代PON标准。2018年全业务接入网论坛 (FSAN) /ITU-T 启动了基于



▲图1 PON技术演进趋势

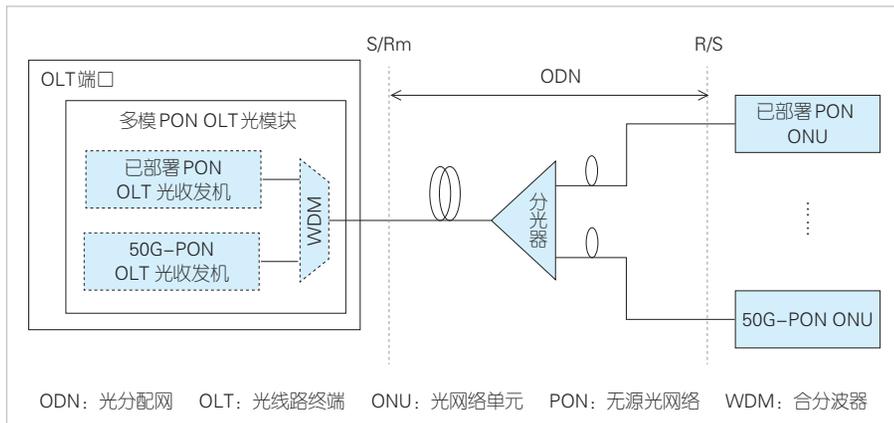
单波长的50G-PON标准制定工作, 即“G.HSP: G Series. Higher Speed PON”, 该标准在2019年发布了需求定义ITU-T G.9804.1, 在2021年发布了ITU-T G.9804.1Amd1需求增补、第一版协议层标准ITU-T G.9804.2和物理层标准ITU-T G.9804.3。ITU-T 在2023年发布了物理层标准ITU-T G.9804.3Amd1增补和协议层标准ITU-T G.9804.2增补, 并在2023年11月审议通过了需求ITU-T G.9804.1Amd2和物理层标准ITU-T G.9804.3 Amd2。50G-PON标准基本完善。

与GPON、XG(S)-PON一样, 50G-PON也利用波分复用实现单纤双向传输, 下行采用时分复用 (TDM), 上行采用时分多址接入 (TDMA), 实现OLT和ONU之间点到多点通信。50G-PON下行单波长支持50 Gbit/s, 上行单波长支持12.5 Gbit/s (12.441 6 Gbit/s)、25 Gbit/s (24.883 2 Gbit/s) 和50 Gbit/s (49.766 4 Gbit/s) 3种速率, 采用非归零码 (NRZ) 线路编码。50G-PON定义了Class N1和Class C+两种ODN规格的光接口指标, 其他ODN规格指标还需要继续完善。为了提高接收机灵敏, 50G-PON标准采用低密度奇偶校验 (LDPC) 码纠错算法, 纠前误码率提高到了 1.0×10^{-2} 。

50G-PON与传统PON共存的通用架构如图2所示^[1]。50G PON通过OLT内置共存光模块^[4-5]与传统PON共存, 支持网络平滑演进, 节约机房部署空间。此外, 相关标准也定义了采用外置合分波器的架构。

1) 50G-PON波长规划

PON网络面对终端用户时, 同一PON口下的ONU分散在不同位置。网络升级换代需要逐个升级, 必须支持重用ODN, 支持与已有PON系统共存。波长选择是PON系统支持平滑演进的关键。不同代的PON系统选择不同的上下行波长, 通过波分复用实现ODN重用, 支持平滑升级演进。50G-PON标准制定中, 为了支持与已有PON系统共存, 波长定义是标准讨论的一个重要议题。



▲图2 50G-PON与传统PON共存系统架构 (Combo PON形式)

50G-PON信号速率提升到50 Gbit/s。受色散影响，S、C和L等波段不支持20 km长距离传输，50G上下行波长只能采用色散较小的O波段。然而，O波段被已有PON系统的波长占用，要从中找出50G-PON的波长十分困难。50G-PON的标准制定借鉴了 $N \times 25G-EPON$ 标准的研究成果。50G-PON下行方案选择啁啾系数较小的电吸收调制激光器（EML）激光器，下行波长选择O波段长波段，并最终在 $N \times 25G-EPON$ 下行两个波长中选择更靠近零色散点的1 340~1 344 nm作为50G-PON下行波长。50G-PON上行波长制定方案有多种。上行为了使用DML激光器，以降低ONU成本，把1 260 nm负色散波段、1 300 nm零色散波段作为50G-PON上行波段。在第一版50G-PON物理层标准ITU-T G.9804.3的制定过程中，上行为了使用不带半导体制冷器（TEC）温控的DML激光器，以降低终端成本，上行波长需要20 nm宽度。因为没有足够的波长资源，所以标准定义并未考虑50G-PON与GPON、XG(S)-PON同时共存。针对不同运营商网络情况，上行波长有两种波长选项：上行波长选项1波长范围为1 260~1 280 nm，支持与GPON共存；上行波长选项2波长范围为1 290~1 310 nm，支持与XG(S)-PON共存。此外，对于25 Gbit/s速率，上行波长选项2标准还定义了1 298~1 302 nm窄波长选项。这是因为，当OLT接收机使用集成半导体光放大器（SOA）的光电二极管（PIN）接收机时，窄波长可以使用通带范围窄的滤波器将SOA带外的ASE噪声降得更低。在制定50G-PON物理层标准ITU-T G.9804.3 Amd1增补时，上行波长增加了上行波长选项3的1 284~1 288 nm波长选项，支持50G-PON与GPON、XG(S)-PON三代共存。选项3的波长范围只有4 nm通带，ONU发射机需要使用TEC控温。

2) 光接口指标

为了降低收发机设计难度，50G-PON上下行50 Gbit/s速率指标引入了光调制功率-发射机色散眼图闭合代价

(OMA-TDEC)参数体系。光调制功率(OMA)与平均光功率和消光比相关。要达到同样的OMA光功率，消光比大时可以降低平均光功率，消光比小时需要增大平均光功率。TDEC可以用来表征发射信号质量。发射机TDEC越大，信号质量就越差。如果要实现同样接收误码率就需要增大发射光功率，以补偿信号质量差带来的代价。引入OMA-TDEC参数体系，使得光模块指标可以在光功率、消光比、信号质量不同参数之间实现平衡，进而满足OMA与TDEC

的最小差值要求。此外，OMA-TDEC参数体系还可以将发射和接收指标解耦，使发射机满足发射机指标要求，接收机满足接收机指标要求，以保障系统传输性能。

50G-PON对称光接口主要指标参数如表1^[9]所示。光接口指标定义时，主要考虑下行采用EML发射机，上行采用DML发射机，上下行接收机均采用雪崩光电二极管（APD）接收机，具体设备实现方式不对收发机方案进行限制。因为接收机采用APD接收，所以接收机散弹噪声与功率相关。接收信号高电平和低电平噪声不一样。在计算TDEC时，50G-PON标准定义时 $m = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}$ 取值1.5。接口参数制定时，成立了物理媒质相关（PMD）Adhoc，建立了统一的上下行链路仿真模型。下行使用啁啾系数为0.5的EML激光器，仿真结果的色散代价最大约2.5 dB。考虑批量余量，色散代价最大值为3.5 dB。加上发射机代价，最终下行TDEC最大值为5 dB。上行50G TDEC与下行一致。下行消光比标准采用7 dB作为指标定义参考值，上行DML激光器大消光比实现困难，上行消光比参考值降低到5 dB。实际产品消光比可以大于或小于消光比参考值。标准定义下行消光比不能小于5 dB，但对上行没有明确要求。

在制定50G上行指标时，不同厂家提出了不同方案。最终标准定义了两个选项。选项C+b将最小发射功率指标提升1 dB，降低Class C+接收机难度。该方案的难点在于不集成SOA实现发射功率大于7.8 dBm的DML激光器。如果消光比达不到5 dB，或者TDEC大于2.5 dB，发射光功率还要进一步提高。相比于选项C+b，50G上行选项C+的上行接收灵敏度要求提升1 dB，发射光功率可以减小1 dB。ONU激光器不集成SOA的方式更容易实现。为了使ONU指标一样，Class N1等级的50G上行指标定义了N1和N1b两个选项。

▼表1 对称50G-PON光接口主要参数指标

| 收发机 | 参数 | 单位 | 值 | | | |
|----------------------------|--------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| | ODN规格 | | N1 | | C+ | |
| 49.766 4 Gbit/s 下行 OLT 发射机 | 最小发射光功率 | dBm | +5.5 | | +8.5 | |
| | 最大发射光功率 | dBm | +11 | | +14 | |
| | 最小调制光功率减TDEC | dBm | +4.75 | | +7.75 | |
| 49.766 4 Gbit/s 下行 ONU 接收机 | 灵敏度 | dBm | -24.0 | | -24.0 | |
| | 过载光功率 | dBm | -3.0 | | -3.0 | |
| | 参考误码率 | - | | | 1E-2 | |
| | 收发机选项 | - | N1 | N1b | C+ | C+b |
| 49.766 4 Gbit/s 上行 ONU 发射机 | 最小发射光功率 | dBm | +6.8 | +7.8 | +6.8 | +7.8 |
| | 最大发射光功率 | dBm | +11.8 | +11.8 | +11.8 | +11.8 |
| | 最小调制光功率减TDEC | dBm | +4.47 | +5.47 | +4.47 | +5.47 |
| 49.766 4 Gbit/s 上行 OLT 接收机 | 灵敏度 | dBm | -22.7 | -21.7 | -25.7 | -24.7 |
| | 过载光功率 | dBm | -2.2 | -2.2 | -5.2 | -5.2 |
| | 参考误码率 | - | | | 1E-2 | |

ODN: 光分配网 OLT: 光线路终端 ONU: 光网络单元 PON: 无源光网络 TDEC: 发射机和色散眼图闭合

2 50G-PON 关键技术

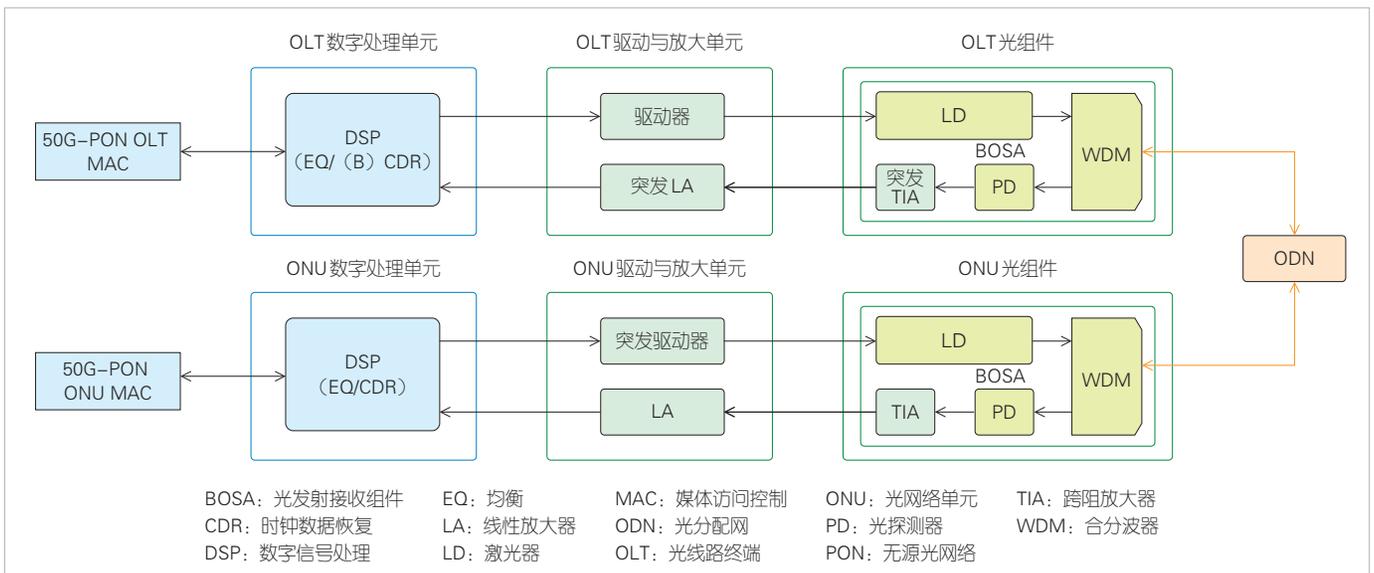
50G-PON 系统架构如图3所示。下行方向数据首先经过 OLT 媒体访问控制 (MAC), 经 OLT 数字信号处理 (DSP) 芯片、激光器驱动、激光器转成光信号后发送给 ONU。下行光信号被 ONU 光接收机接收后转成电信号, 随后发送给 ONU DSP 处理, 最后再发送给 ONU MAC。上行方向与下行数据类似, 不同的是上行发送和接收需要支持突发工作。ONU 发送需要突发驱动器, OLT 接收需要突发跨阻放大器 (TIA)。DSP 支持突发时钟数据恢复 (CDR) 功能, 并且 OLT 接收要支持 12.5 Gbit/s、25 Gbit/s 和 50 Gbit/s 3 速率接收。光功率在 50G-PON Class C+接收灵敏度附近时, TIA 输

出信号幅度只有 50 mV 左右。此时 TIA 输出信号还需要经过突发线性放大器 (LA) 放大才能被 DSP 正常接收。

50G-PON 传输速率高, 器件带宽受限, 接收机灵敏度低。功率预算是 50G-PON 面临的巨大挑战。为了实现高功率预算, 需要解决高功率发射机、高灵敏度接收机、高性能 DSP 均衡和 FEC 技术等关键技术问题。高速突发驱动、突发 LA、TIA 和突发时钟数据恢复 (BCDR) 等是实现 50G-PON 上行突发收发关键技术。

2.1 50G-PON DSP

10 Gbit/s 及以下速率 PON 设备, 器件带宽足够大, 光信



▲图3 50G-PON系统架构

道的损伤小。接收机光电转换后，经过时钟恢复与判决恢复出数据，不需要进行复杂的均衡处理。随着传输速率的增加，器件带宽提升的难度也在增大。使用高速信号处理技术来提高光接收性能成为新的趋势。这种方法通过增加电处理的复杂度来降低光器件指标要求，进而提升光传输系统的性价比。

50G-PON系统线路速率达到50G等级，电链路损耗大，光器件带宽也不足。PON系统首次引入了高性能均衡处理技术，具体实现时可以分为纯模拟CDR实现、数字DSP实现、以及数模混合DSP实现3种方案架构，如图4所示。

1) 模拟CDR方案。该方案没有ADC，主要通过模拟CTLE进行信号补偿。也有结合前向均衡（FFE）、判决反馈均衡（DFE）的设计方案，但是FFE和DFE抽头数较低。该模拟方案具有功耗低、成本低的特点。全模拟接收均衡通常用在25 Gbit/s及以下速率的CDR芯片中。

2) 数字DSP方案。模拟前端进行CTLE补偿后，利用高速ADC对接收信号进行采样。数据进入DSP处理模块进

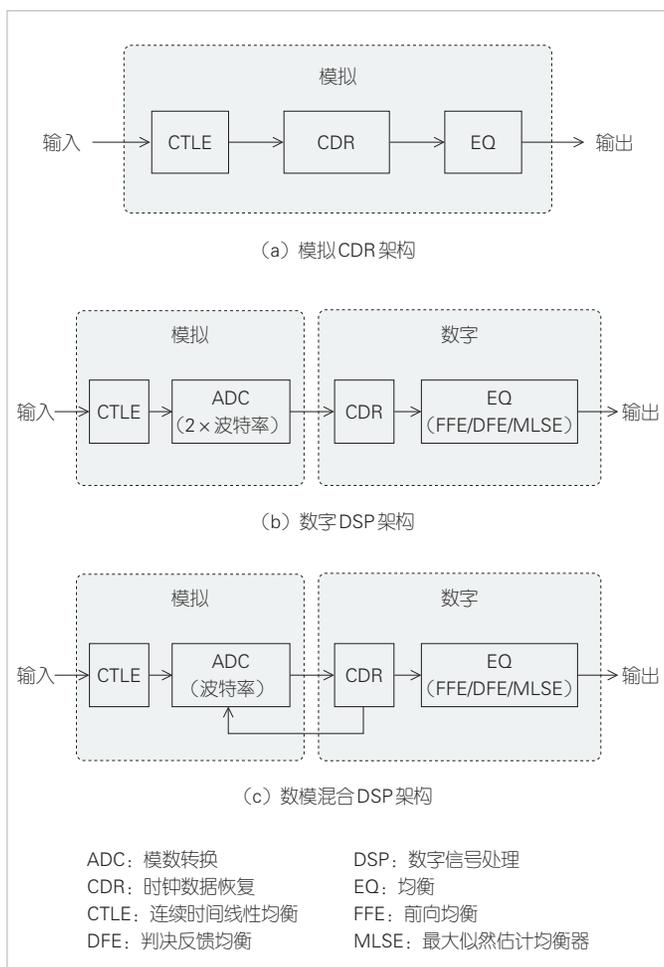
行时钟恢复、FFE、DFE以及MLSE等数字信号处理。数字DSP方案的核心是ADC高速采样后，在全数字域进行信号处理。ADC采样速率是信号波特率的2倍。接受一定性能代价时，ADC采样速率可以适当降低，但一般不低于1.3倍。

3) 数模混合DSP方案。当模拟前端完成CTLE补偿后，可变增益放大器（VGA）放大到合适的信号幅度，进入ADC并按照信号符号速率进行采样。采样数据进入DSP数字处理模块进行CDR时钟恢复、FFE、DFE以及MLSE等信号均衡处理。在数模混合架构下CDR模块计算出相位误差，并将其反馈给ADC进行采样相位调整。由于ADC采样速率降低，芯片功耗成本比纯数字架构更低。该方案已成为目前的主流方案。由于ADC采样时钟需要CDR模块反馈调整，反馈链路变长，增加了突发接收难度。

50G-PON DSP在系统中的位置方案有两种：一种是集成在光模块，另一种是集成在MAC芯片内。当集成在光模块内部时，DSP靠近光组件，此时传输性能更好。但是光模块内部集成DSP会增加光模块功耗，增大模块实现难度。当DSP集成在MAC内部时，光模块简单，但是信号需要经历20~30 cm的印刷电路板（PCB）走线，信号质量进一步恶化，对传输性能的影响很大。

DSP均衡算法标准在指标定义时使用15阶FFE+3阶DFE作为参考均衡器进行参数制定。各公司可以根据自身情况选择不同的均衡器实现方案。提升DSP算法复杂度可以提升接收性能。相对于上行灵敏度要求，下行接收灵敏度要求较低，可以使用参考均衡器。上行Class C+接收指标面临较大挑战，采用更强性能的均衡算法可充分发挥DSP性能，降低光接收机压力。

针对50G突发时钟恢复难题，业界提出了一种快速均衡方案：在注册阶段配置长的前导码对均衡器进行训练，在工作阶段根据动态带宽分配（DBA）调度将对应ONU的均衡参数进行预配置。当该ONU突发数据到达时系统可以快速收敛，完成突发接收。DSP内置光模块方案需要OLT MAC提供传输通道通知DSP到达的突发数据是哪个ONU。对此业界也提出了不同的方案，例如带内Ploam消息、带外硬件接口。其中，前者占会用业务带宽，后者需要增加光模块接口。



▲图4 高速信号均衡处理架构

2.2 突发收发技术

对于PON系统上行时分多址，ONU会根据OLT DBA带宽授权突发发送上行数据，OLT突发接收。不同ONU到OLT的链路衰减不一致。上行ONU突发数据到达OLT接收机时信号是不连续的，而且信号功率变化可达20 dB。OLT

接收机要能够在前导码的几百纳秒时间内确定突发TIA、LA增益，完成突发时钟恢复，输出正确的信号。

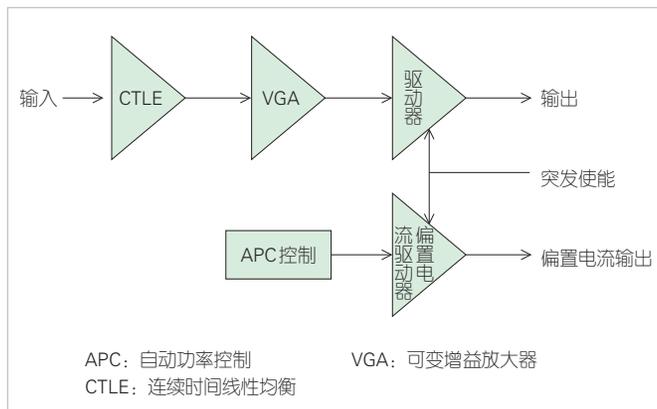
1) 突发LDD。突发激光器驱动器 (LDD) 应用于 50G-PON ONU，将 ONU DSP 发送的上行数据信号转换成调制电流信号，驱动 ONU DML 激光器发送上行突发光信号，如图 5 所示。该技术可通过外部控制环路调整芯片增益，控制加载的调制电流大小，实现信号的线性放大，并根据 ONU MAC 突发控制信号快速打开和关闭 LDD 偏置电流和调制电流，实现上行光信号突发控制。突发打开关闭时间越小，上行开销越小，带宽效率就越高。50G-PON 突发打开关闭时间协议期望值为 25.7 ns。目前上行非对称突发 LDD 已有相关芯片^[6]，上行对称 50G 突发 LDD 仍在开发中。

2) 突发TIA。TIA 能够将 APD 输出的电流信号转化成电压信号，并进行放大输出，如图 6 所示。因此，我们可以使用跨阻增益来评价放大效果。PON 系统中不同 ONU 到 OLT 的损耗不一样。上行突发信号到达 OLT 接收光功率差异高达 20 dB。针对不同功率的信号，TIA 需要快速调整放大增益，输出恒定幅度信号给后级模块。

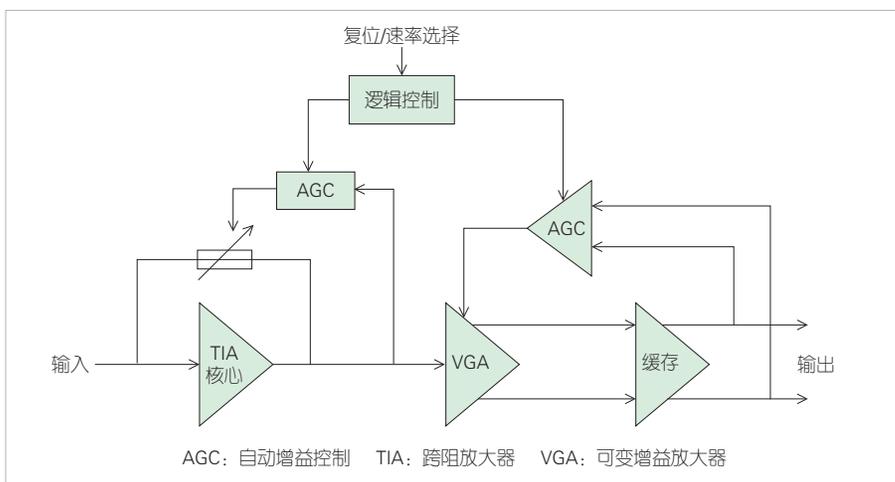
突发 TIA 需要 MAC 提供的 Reset 复位信号，触发 TIA 进行快速自动增益控制 (AGC) 增益调节，VGA 输出增益调节，建立工作状态输出稳定信号。50G-PON 上行还要支持 12.5 Gbit/s、25 Gbit/s 和 50 Gbit/s 3 种接收速率，需要 MAC 提供速率选择信号，在不同速率信号到达时，控制 TIA 工作在合适的带宽。50G TIA 输出信号要送给后级 DSP 处理，除了需要同时具备高速、线性、突发 3 种重要特征，还要具备低噪声、高灵敏度的重要性能。带宽、突发恢复时间、动态范围、噪声、增益、线性度是 TIA 的几个主要参数。由于 50G-PON 要进行 DSP 均衡处理，因此 TIA 还要支持线性放大。根据最新报道，Semtech 开发了用于上行 50G 的突发 TIA。^[6]

3) 突发 LA。当突发 LA 用于 OLT 光模块时，输出的电压信号被放大并发送给 DSP，如图 7 所示。由于 PON 灵敏度要求高，TIA 在灵敏度附近的输出信号幅度只有 50 mV 左右，而且上行光信

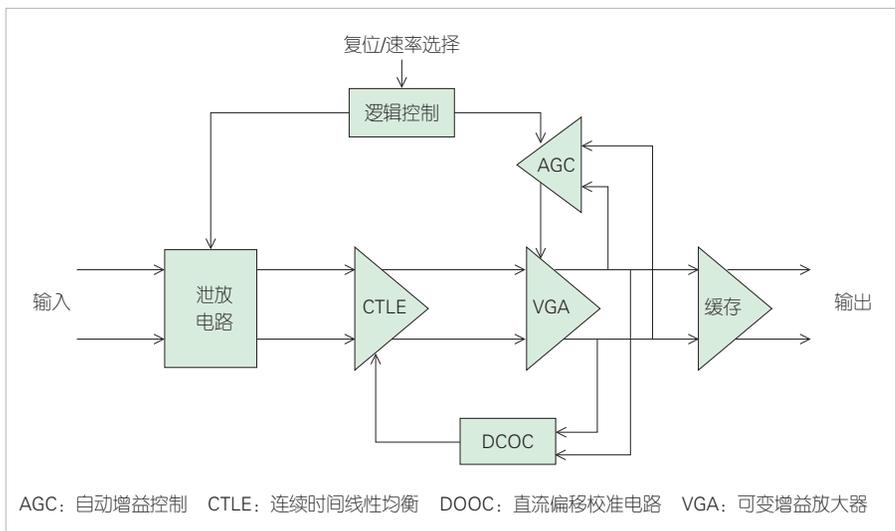
号功率有 20 dB 的变化范围。TIA 输出信号不能在所有输入功率下保持恒定输出，需要 LA 对信号进一步放大并保持幅度恒定才能满足 DSP 输入要求。与 TIA 一样，LA 要支持突



▲图 5 突发激光器驱动器 (LDD) 架构



▲图 6 突发 TIA 结构示意图



▲图 7 突发线性放大器 (LA) 结构示意图

发增益控制，支持多速率突发工作。此外，LA也会集成CTLE均衡补偿封装打线、PCB走线损耗，提升信号质量。当前业界尚无50G线性突发LA产品。

4) 突发CDR。LA输出信号进入DSP后，需要经过时钟恢复后才能正确采样，判决恢复出接收的数据。为了降低突发开销，DSP需要具备快速突发时钟恢复功能。PON系统上行发送时钟源自下行信号提取的时钟。OLT接收机时钟恢复主要是相位恢复。

在传统模拟系统中，采样时钟的相位以锁相环方式控制，实现与接收信号中符号时钟的相位对准。在数字系统中，当采用多倍采样时，相位对准主要通过内插处理来实现波形样本从采集样本位置到目标样本位置的变换。数模混合方案采用单倍采样，此时相位对准是根据数字域相位误差检测反馈调整采样时钟来实现相位对准的。50G-PON DSP采用数模混合单倍采样相位对准方式，也有部分公司研究基于模拟架构的突发时钟恢复方案。目前尚无满足50G-PON应用的50G突发CDR商用芯片。

2.3 增强 FEC

前向纠错编解码是保证高速光通信系统传输可靠性的关键技术之一。由于传输速率的提高会导致灵敏度下降、功率预算降低，因此FEC技术会向着更高的编码增益和更低的冗余位方向发展。其中，低密度奇偶校验(LDPC)码具有优越的纠错性能，已被许多通信标准采用。

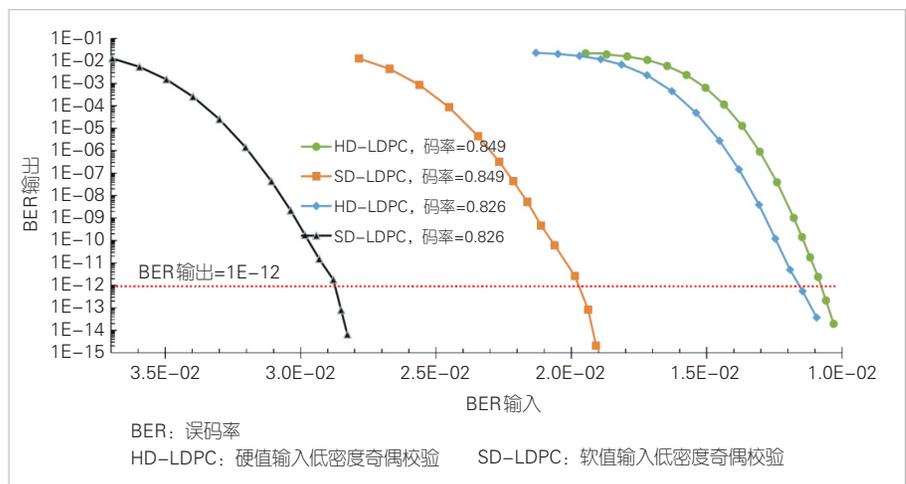
为了降低光器件开发难度和PON系统成本，IEEE标准组织在制定IEEE 802.3ca N*25G-EPON标准^[7]时，选择硬判决LDPC作为前向纠错码，输入误码率阈值为 10^{-2} ，输出误码率要求小于 10^{-12} 。50G PON标准采用了与IEEE 802.3ca一样的准循环低密度奇偶校验(QC-LDPC)(17 664, 14 592)码作为母码方案，校验矩阵为 12×69 矩阵，循环行列式大小为256。通过对信息位截短以及校验位的槽孔操作，我们可以得到不同码率不同性能的LDPC码本方案。

50G-PON下行FEC将QC-LDPC(17 664, 14 592)码字校验位的最后384 bit进行截短操作，得到下行FEC码字LDPC(17 280, 14 592)^[8]。一个LDPC码字为17 280 bit。其中，信息位占14 592 bit，校验位为占2 688 bit，码率为0.844 4。在采用硬值和软值LDPC算法时，输出BER为 10^{-12} 时对应的输

入BER门限分别降到 1×10^{-2} 和 2×10^{-2} 。

50G-PON上行支持灵活FEC，定义了FEC Code 0默认码本(Default FEC code)、FEC Code 1高吞吐率码本(high throughput code)和FEC Code 2高增益码本(high margin code)3种FEC编码方案^[8]。默认码本与下行码本一样，为LDPC(17 280, 14 592)。高吞吐率码本通过槽孔将校验信息缩短到1 288 bit，码本为LDPC(15 872, 14 592)，码率为0.919 4。高增益码本校验位3 072比特不变，信息位进行截短，得到上行码本。高增益码本信息位截短 $S=256 \times CS$ bit，CS取值范围为19~35，信息位长度 $HM2=14 592-S$ ，码长 $HM1=17 644-S=HM2+3 072$ ，码字记为LDPC(HM1, HM2)，码率是0.647 1~0.760 0。高吞吐率码本LDPC(15 872, 14 592)码率更高，可以传输的业务带宽更高，但是增益有所下降，适用于距离OLT损耗较小、距离较短的ONU。高增益码本LDPC(HM1, HM2)码率低、增益更高，适用于因器件老化、温度变化、光纤弯曲等因素导致链路质量下降、信号误码增大的场景。

LDPC解码算法一般会进行多次迭代，在每个迭代中会计算并更新对数似然比(LLR)信息。初始LLR信息的获取方式不同，导致LDPC算法有硬值输入和软值输入之分。硬值输入是指，输入LDPC解码模块的数据是硬判决后的0、1比特序列。这种输入需要通过LLR生成模块对接收到的0、1比特进行映射处理，进而得到LLR输入值。软值输入是指，输入LDPC解码模块的数据是均衡后未经过硬判决的原始数据。这种输入不是只有0、1硬值信息。软值输入比硬值输入有更多的信息输入，性能更好。如图8所示，在0.849码率时，同样是 1×10^{-12} 输出误码率，软值输入LDPC译码器的入口误码率要求为 1.97×10^{-2} ，硬值输入LDPC译



▲图8 准循环低密度奇偶校验(QC-LDPC)性能测试结果

码器的入口误码要求为 1.08×10^{-2} ，对应到光接收机灵敏度差异大约是 0.95 dB^[9]。

50G-PON 标准定义是按照硬值 LDPC 指标进行定义的。采用软值 LDPC 可以降低误码率，提升系统性能，降低接收机器件指标要求。采用软值 LDPC 还是硬值 LDPC 主要体现在译码阶段。无论采用哪种方式都不影响发送信号和系统互通。需要说明的是，软值 LDPC 需要保留信号软值信息，需要 ADC 对数据进行采样，并且 LDPC 集成到 DSP 芯片才能支持软值 LDPC。

2.4 50G-PON 光收发模块

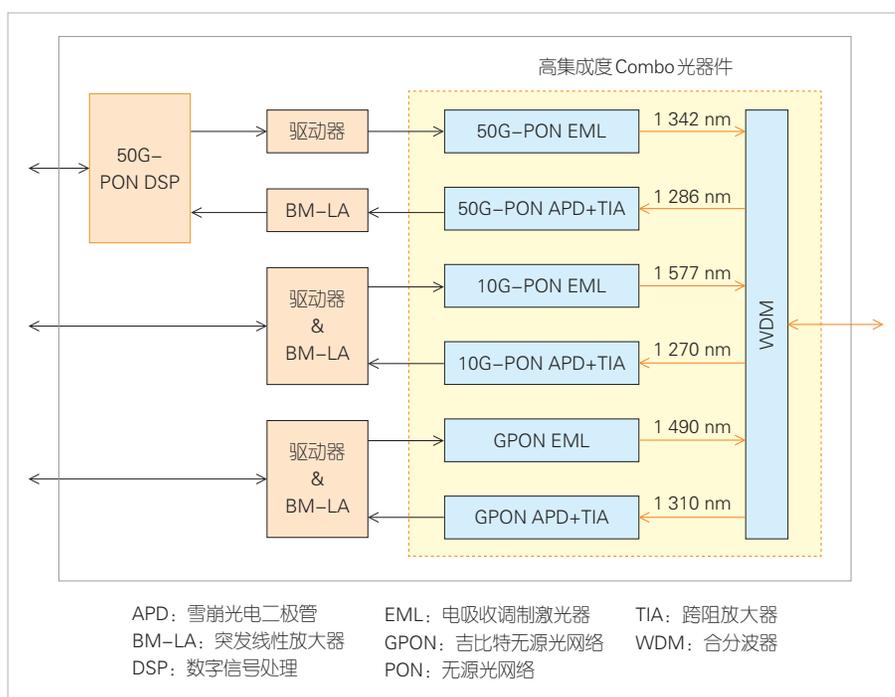
1) 50G-PON 光器件。对称 50G PON Class N1 和 C+ OLT 下行发射光功率分别需要大于 5.5 dBm 和 8.5 dBm，50G 上行接收灵敏度小于 -22.7 dBm 和 -25.7 dBm (C+ option) 或 -24.7 dBm (C+b option)。ONU 下行接收灵敏度小于 -24 dBm，发射光功率大于 6.8 dBm (C+ option) 或 7.8 dBm (C+b option)。标准没有强制要求采用的收发机类型，产业链选择 EML+SOA 用于下行发射机，DML 用于上行发射机，APD 用于上下行接收机。当前 OLT Class C+ 接收机以及 ONU 发射机面临很大挑战，相关指标尚未达到标准要求。APD 接收机样品测试灵敏度能达到 -25.7 dBm，但是考虑 OLT Combo 光模块合分波器损耗、高低温恶化、大批量使用余量，需要继续提升 APD 响应度、带宽，降低 APD 和 TIA 噪声。为了降低成本，ONU 发射机采用 DML 激光器。业界需要继续提升光功率、带宽指标。

2) 50G-PON Combo 光模块。PON 技术在不断发展，新一代 PON 技术要能够与上一代 PON 共存，支持平滑演进。在进行 XG(S)-PON 建设时，业界提出了 Combo PON 方案，使同一个 PON 口同时支持 GPON 和 XG(S)-PON。网络升级时，只需要将原有的 GPON OLT 线卡更换成新的 GPON/XG(S)-PON Combo PON OLT 线卡，不需要增加共存合分波器，也不需要额外增加 OLT 线卡槽位，如图 9 所示。50G-PON 将继续沿袭 Combo 方案。同一 PON 口需要支持 GPON、XG(S)-PON、50G-PON 3 代 PON (考虑对称非对称不同速率时，需要支持 5 种模式)。OLT 光模块内需要容纳 3 个发射机和 3 个接收机，以及相应的 LDD、LA 和 50G-PON DSP 芯片。

同时模块封装保持小封装热拔插光模块 (SFP) 形式，与 GPON/XG(S)-PON Combo PON OLT 光模块尺寸基本一致，保持同样的槽位端口密度。此外，功耗和尺寸也面临很大挑战。对此，业界正在研究小型金属罐型 TO-CAN、Box 等不同光路结构，研发多路集成、小封装 LDD/LA 电芯片等不同技术方案。预计 2025 年会有 SFP 尺寸的 GPON、XG(S)-PON、50G-PON 三代五模 Combo 光模块样品。

3 50G-PON 产业链

随着标准制定逐渐完善，50G-PON 产业链进入快速发展期。博通、海信、光迅等都已推出下行 EML+SOA 激光器，Coherent、源杰等开发了非对称上行 DML 激光器，Si-fotonics、Macom 等开发了用于 50G-PON 的 APD 产品。电芯片方面，Semtech 公司已经开发非对称 50G-PON OLT 和 ONU Combo 电芯片。OLT Combo 电芯片支持下行激光器驱动、上行突发 LA，并支持下行连续 CDR 和上行突发 CDR 功能。ONU Combo 电芯片支持下行 LA，并支持上行突发激光器驱动和上下行连续 CDR 功能。Semtech 同时开发了用于上行 50G 的突发 TIA 芯片。Macom、优讯、英思嘉等也推出了 50G-PON 上下行激光器驱动器、25G 限幅突发 TIA 等芯片。目前非对称 50G-PON Class N1 器件相对成熟，相关指标已基本满足标准要求。然而，非对称、对称 50G-PON 接收灵敏度还不能满足 Class C+ 指标。对称 50G-PON 的上行 50G ONU DML 发射机，以及突发 LDD、突发 LA、突发 BCDR 芯



▲图9 50G-PON Combo PON OLT光模块结构

片仍在开发中。

50G-PON设备研制也取得了很大进展。设备商已经推出50G-PON非对称样机^[10]，完成了运营商测试。文献[11]完成了非对称50G-PON样机实时验证，支持29 dB链路预算。文献^[12]使用独立的50G-PON验卡与GPON、XGS-PON线卡，验证了50G-PON与GPON、XGS-PON共存。文献[13-14]中50G-PON样机采用三代Combo OLT光模块支持GPON、XG(S)PON、50G-PON。目前已有设备厂商发布了对称50G-PON样机^[15]。当前由于对称50G-PON器件还不成熟，对称样机性能指标还需要提升。预计2024年非对称50G-PON会开始试商用，2025年业界会推出采用SFP大小的小封装三代Combo OLT光模块的对称50G-PON系统。

4 结束语

50G-PON标准制定主要工作已基本完成，下行可支持50 Gbit/s，上行支持12.5 Gbit/s、25 Gbit/s和50 Gbit/s 3种速率，支持GPON、XG(S)-PON、50G-PON三代共存。50G-PON标准50 Gbit/s速率光接口指标采用OMA-TDEC参数体系。光接口指标更加灵活，有利于提高光模块良率。50G-PON引入DSP均衡和LPDC提升接收灵敏度。线性突发LDD、TIA、LA和BCDR是50G-PON突发收发关键芯片。GPON、XGS-PON和50G-PON三代Combo共存将是未来的主流方案。SFP尺寸的三代Combo OLT光模块是50G-PON的关键需求。模块结构布局和功耗是面临的主要挑战。当前非对称50G-PON产业链已经趋于成熟，多个运营商已经完成现网测试，预计2024年非对称50G-PON可能会进入商用阶段。对称50G-PON关键器件尚不成熟，当前还是样机阶段，商用产品仍在开发中，预计2025年会有相关产品推出。

参考文献

- [1] 张伟良, 王霄雨, 黄新刚. 基于动态通道绑定的更高速无源光网络[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(2): 100-106. DOI: 10.12142/ZTETJ.202402014
- [2] 王新余, 孔雪, 贺峰. 新型家庭全光网技术[J]. 中兴通讯技术, 2022, 27(2): 56-62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202301011
- [3] ITU. 50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): physical media dependent (PMD) layer specification: G.9804.3 [S]. 2024
- [4] 张平化, 王会涛, 付志明. 数据中心光模块技术及演进[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 89-98. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401015
- [5] 沈百林, 王会涛. 相干光收发器件未来技术演进[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 82-86. DOI: 10.12142/ZTETJ.202305013
- [6] Semtech. Semtech's latest innovations [EB/OL]. [2024-05-16]. <https://www.semtech.com/company/press/semtech-latest-innovations-empower-carriers-to-navigate-seismic-shifts-in-content-consumption-enabling-new-levels-of-service-and-revenue-capabilities>

- [7] IEEE. Physical layer specifications and management parameters for 25 Gbit/s and 50 Gbit/s passive optical networks: 802.3ca-2020 [S]. 2020
- [8] ITU. Higher speed passive optical networks - common transmission convergence layer specification: G.9804.2 [S]. 2023
- [9] WANG W M, TAO K, QIAN W F, et al. Real-time FPGA verification for 25G-PON and 50G-PON LDPC codes [C]// Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). IEEE, 2020: 1-2
- [10] 中兴通讯. 中兴通讯全球首发精准50GPON样机 [EB/OL]. (2022-03-02) [2024-05-16]. <https://www.zte.com.cn/china/about/news/20220302c4.html>
- [11] JIN J L, ZHANG D Z, LI Q Z, et al. First demonstration of 50G TDM-PON prototype in compliance with ITU-T G. 9804.3 standard N1 ODN class 29-dB [C]// Proceedings of IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2022: 236-240. DOI: 10.1109/ICCC56324.2022.10065743
- [12] SALIOU F, SIMON G, HUÉROU S L, et al. Triple coexistence of G-PON, XGS-PON and 50G-PON systems with extended reach [C]// Proceedings of 49th European Conference on Optical Communications (ECOC 2023). IET, 2024: 822-825
- [13] SALIOU F, SIMON G, LE HUÉROU S, et al. Coexistence in future optical access networks from an operator's perspective [J]. Journal of optical communications and networking, 2024, 16(1): A78-A88. DOI: 10.1364/JOCN.499935
- [14] SALIOU F, SIMON G, LE HUÉROU S, et al. Two approaches for triple coexistence of G-PON, XGS-PON, and 50G-PON systems with extended reach and a class-D ODN [J]. Journal of optical communications and networking, 2024, 16(7): C97-C105. DOI: 10.1364/JOCN.515458
- [15] ZTE. ZTE unveils symmetric 8-port 50G PON Combo and 50G PON Wi-Fi 7 ONU [EB/OL]. (2024-02-26) [2024-05-16]. <https://www.zte.com.cn/global/about/news/ZTE-unveils-symmetric-8-port-50G-PON-Combo-and-50G-PON-Wi-Fi-7-ONU.html>

作者简介



黄新刚，中兴通讯股份有限公司固网团队技术预研资深专家；长期从事光接入技术研究和标准化工作；主持和参加多项国家“863”项目、省部级重点项目；获国家科学技术进步奖二等奖1项、电子学会科学技术进步奖一等奖1项、深圳市科技进步奖二等奖1项，获授权发明专利70余项。



杨波，中兴通讯股份有限公司固网团队技术预研资深专家，高级工程师；长期从事50G-PON、WDM PON等下一代PON技术预研和标准化工作；参加多项国家和省部级重点项目，主持上海市科技启明星项目1项；曾获中国电子学会科学技术进步奖一等奖。