



50G-PON 平滑演进的 挑战和方案研究

Challenges and Solutions for Smooth Evolution of 50G-PON

杨波/YANG Bo¹, 张德智/ZHANG Dezhⁱ², 刘波/LIU Bo¹

(1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;

2. 中国电信研究院, 中国 北京 102209)

(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;

2. China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202506004

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20251230.1453.003>

网络出版日期: 2025-12-30

收稿日期: 2025-11-01

摘要: 提出了 50G-PON 三代时分共存系统架构, 以解决以太网无源光网络 (EPON)、10G-EAPON 向 50G-PON 演进中因兼容现网非收窄 EPON 终端所面临的波长冲突等关键问题, 实现了 EPON 收窄/非收窄、10G-EAPON 对称/非对称以及 50G-PON 对称/非对称 6 类终端全兼容共存。研究涵盖下行 $1.366 \pm 2 \text{ nm}$ 新波长与上行 1.25 Gbit/s、10.312 5 Gbit/s、24.883 2 Gbit/s、49.766 4 Gbit/s 四速率时分接收等物理层关键技术, 并完成了相应光模块与系统设备的研制及验证测试。结果表明, 所研光模块与系统指标满足现网 29 dB 功率预算要求并留有余量, 可支持现网光分配网络 (ODN) “零改动” 平滑升级。本研究成果为万兆光网演进提供了高效益、低成本且可持续的解决方案。

关键词: 50G-PON; EPON; 10G-EAPON; 时分复用; 三代共存; 四速率突发接收机

Abstract: A three-generation time-division coexistence system architecture for 50G-passive optical network (PON) is proposed to address challenges including wavelength conflicts during the evolution from Ethernet PON (EPON) and 10G-EAPON to 50G-PON, while ensuring backward compatibility with deployed non-narrowed EPON terminals. This architecture enables full coexistence among six classes of terminals: narrowed and non-narrowed EPON, symmetric and asymmetric 10G-EAPON, and symmetric and asymmetric 50G-PON. Key physical-layer technologies were investigated, such as a newly defined $1.366 \pm 2 \text{ nm}$ downstream wavelength and an upstream four-rate (1.25 Gbit/s, 10.312 5 Gbit/s, 24.883 2 Gbit/s, and 49.766 4 Gbit/s) time-division reception scheme. Corresponding optical modules and system equipment for the three-generation coexistence were developed and validated. Test results show that the optical interface specifications of the module and the system performance satisfy the existing network's 29 dB power budget requirement with sufficient margin, thereby supporting a smooth, zero-touch evolution of the installed optical distribution network (ODN). An efficient, cost-effective, and sustainable solution is thus provided for the evolution toward 10G-class optical access networks.

Keywords: 50G-PON; EPON; 10G-EAPON; time-division multiplexing; three-generation coexistence; four-rate burst receiver

引用格式: 杨波, 张德智, 刘波. 50G-PON 平滑演进的挑战和方案研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(6): 20–28. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506004

Citation: YANG B, ZHANG D Z, LIU B. Challenges and solutions for smooth evolution of 50G-PON [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(6): 20–28. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506004

随着云计算、4K/8K 视频、工业互联网等新兴业务的爆发式增长, 用户对网络带宽的需求呈现指数级攀升趋势。传统光接入网络已难以满足未来 10 年“万物智联”场景的承载需求。无源光网络 (PON) 作为光纤接入网主流技术, 经历从吉比特无源光网络 (GPON) 向 10 Gbit/s 无源光网络 (XG-PON) 和 10 Gbit/s 对称无源光网络 (XGS-PON) 的演进, 以及从以太网无源光网络 (EPON) 向 10 Gbit/s 以

太网无源光网络 (10G-EAPON) 的升级, 并正逐步向更高速率的下一代 PON 迈进。50 Gbit/s 无源光网络 (50G-PON) 作为下一代无源光网络的核心技术, 凭借其单波长 50 Gbit/s 的超高带宽、低时延和高可靠性等优势, 已成为下一代 PON 的主流演进方向^[1-2]。

在 PON 技术的发展过程中, 国际电信联盟 (ITU) 主导的 GPON 与电气电子工程师协会 (IEEE) 主导的 EPON 长期并行发展, 形成了两大技术体系。两者在技术标准、设备生态和运营模式上存在较大差异, 增加了网络升级与运维的复杂性。2018 年, ITU 电信标准化部门 (ITU-T) 正式立项启

基金项目: 上海科委启明星项目 (23QB1405800)

动 50G-PON 标准的研制工作，将其确立为 XG-PON 和 XGS-PON 的下一代演进方向，相关标准包括：G.9804.1^[3]、G.9804.2（通用传输汇聚层）^[4]以及 G.9804.3（单波长 50G-PON 物理层^[5]）。2019—2025 年，支持单波 50G 的 50G-PON 系列标准及其修正案陆续完成研究与发布^[6]。与此同时，IEEE 于 2020 年完成了 N×25G-EPON 标准的制定^[6]，该标准单波长支持 25 Gbit/s 速率，可通过双波长绑定实现 50 Gbit/s 传输。N×25G-EPON 技术主要受到北美运营商的关注。为凝聚产业链力量、共同推动关键技术的成熟，将 ITU-T GPON 体系与 IEEE EPON 体系归一化融合至 50G-PON 的路线，已获得全球范围内多数运营商的认可。因此，50G-PON 已成为 XG-PON、XGS-PON 及 10G-EPON 网络共同的下一代演进目标。

ITU GPON 体系在向 50G PON 演进过程中，其共存方案涉及 3 个上行波长选项：1 260~1 280 nm（选项 1）、1 290~1 330 nm（选项 2）以及 1 284~1 288 nm（选项 3）^[5]。其中，选项 1 仅支持 GPON 与 50G-PON 两代共存，选项 2 仅支持 10G-PON 与 50G-PON 两代共存，而选项 3 可支持 GPON、10G-PON 与 50G-PON 三代共存^[5]。因此，目前业界在 50G-PON 上行波长选择上普遍都采用适用场景更广泛的选项 3。

相比之下，IEEE EPON 体系的上行波长分布较为复杂。10G-EPON 对称系统上行波长为 1 260~1 280 nm；而对于非对称系统，EPON 与 10G-EPON 的上行波长存在收窄与非收窄两种类型。其中，EPON 非收窄类型的工作波长范围较宽，为 1 260~1 360 nm^[7]；收窄类型则为 1 290~1 330 nm。10G-EPON 非对称系统的上行波长在规模部署初期已收窄至 1 260~1 280 nm^[8]。

若 EPON、10G-EPON 与 50G-PON 采用现有 ITU-T 无源光网络共存标准 G.9805^[9] 所定义的波分复用架构，则会出现以下波长冲突问题：

1) 50G-PON 上行波长 1 286 ± 2 nm 与 EPON 非收窄终端上行波长 1 260~1 360 nm 部分重叠，导致波分复用器件无法通过波长区分两种制式的上行信号，从而造成业务干扰。

2) 50G-PON 下行波长 1 342 ± 2 nm 同样与 EPON 非收窄终端上行波长 1 260~1 360 nm 存在重叠，50G-PON 下行光信号经光分配网络（ODN）反射后可能进入 EPON 上行接收机，影响 EPON 上行业务。

3) 50G-PON 光网络单元接收机在 1 330~1 356 nm 范围内未定义明确的滤波要求^[5]，该波长范围内的 EPON 非收窄终端宽谱上行信号经 ODN 部分反射后可能进入 50G-PON 下行接收端，影响其接收灵敏度。

根据中国电信的调研，目前现网在用的 EPON 终端总量超过 6 000 万台。按照网络演进趋势预测，至 2030 年，预计仍有超过 2 000 万台终端在网运行，短期内难以实现 EPON 终端的全面退网。日本、韩国等国家的运营商也存在类似情况。

综合考虑标准定义与运营商光接入网现状，EPON、10G-EPON 与 50G-PON 三代系统若采用波分复用方式共存，将面临上下行波长冲突以及大量在网非收窄型 EPON 终端替换成本高等问题。

本文聚焦于 EPON 体系向 50G-PON 平滑演进的核心问题，提出一种 50G-PON 三代时分共存方案及相应系统架构，开展其物理层关键技术研究，并完成了基于 50G-PON 三代时分复用 Combo（组合）光模块的系统验证。研究结果表明，该时分共存方案可兼容 EPON、10G-EPON 及 50G-PON 三代制式，并支持非收窄 EPON、收窄 EPON、非对称 10G-EPON、对称 10G-EPON、非对称 50G-PON 和对称 50G-PON 共 6 类终端同时共存。所使用的 Combo 光模块光收发指标满足现网 29 dB 功率预算要求，从而为 EPON 及 10G-EPON 网络向 50G-PON 的平滑演进提供了理论依据。

1 50G-PON 三代时分共存系统架构

1.1 系统架构

50G-PON 三代时分共存系统架构如图 1 所示，其与波分共存方案的核心区别在于上行方向采用时分复用模式，分时隙接收不同类型终端发送的上行信号以避免上行波长冲突，彻底解决万兆光网无法兼容现网大量未收窄 EPON 终端这一难题，实现了 EPON 终端全兼容共存，现网终端无须退网或新建 ODN。

50G-PON 三代时分共存系统采用多 PON 模块（MPM）共存模式，通过光线路终端（OLT）内置 50G-PON 三代时分复用 Combo 光模块以及 OLT 多媒体接入控制（MAC）来实现统一时分调度动态带宽分配（DBA）机制，以支持 EPON、10G-EPON 和 50G-PON 三代共存，非收窄 EPON、收窄 EPON、非对称 10G-EPON、对称 10G-EPON、非对称 50G-PON 和对称 50G-PON 6 类终端全兼容。其中，EPON 下行单波长支持 1.25 Gbit/s，上行单波长支持 1.25 Gbit/s；10G-EPON 下行单波长支持 10.3125 Gbit/s，上行单波长支持 1.25 Gbit/s、10.3125 Gbit/s 两种速率；50G-PON 下行单波长支持 49.7664 Gbit/s，上行单波长支持 24.8832 Gbit/s 和 49.7664 Gbit/s 两种速率；三代 PON 上下行均采用不归零（NRZ）线路编码。上行方向，50G-PON 三代时分共存系统

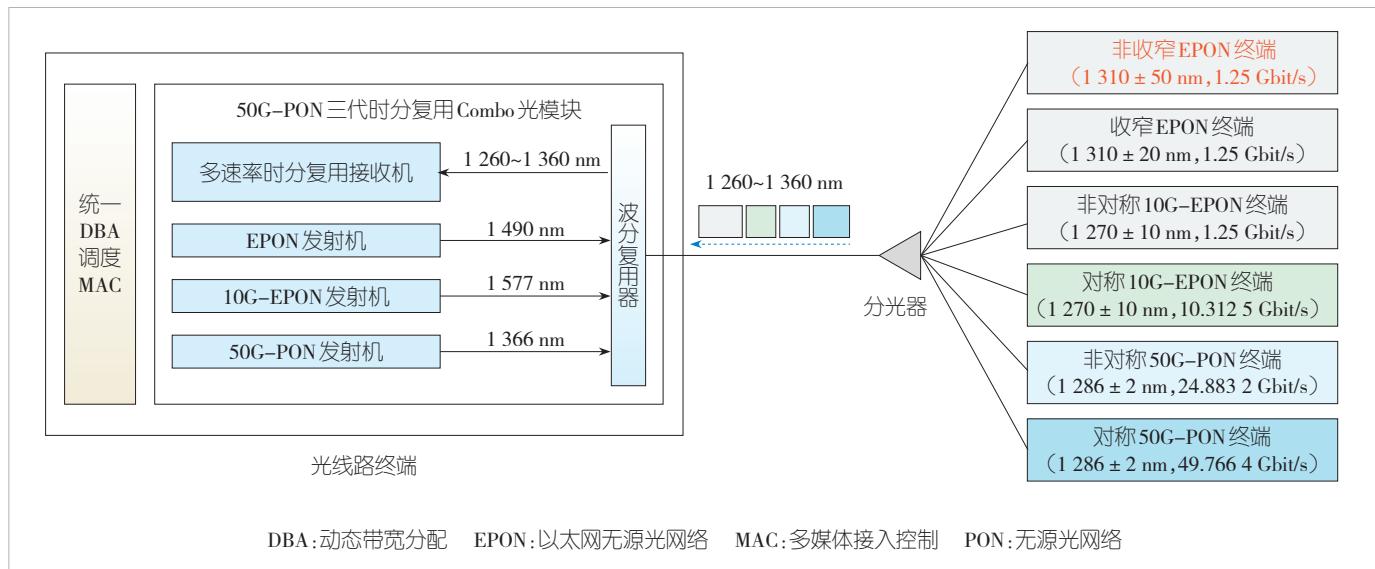


图1 50G-PON三代时分共存系统架构

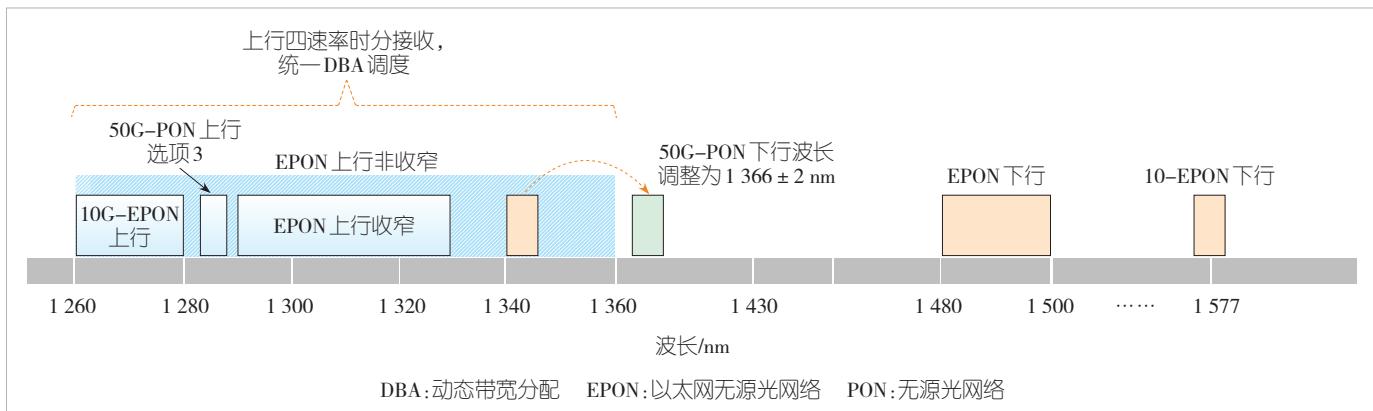
则采用了四速率时分复用接收机制，接收机的工作波长范围为1 260~1 360 nm，分时隙接收1.25 Gbit/s、10.3125 Gbit/s、24.8832 Gbit/s和49.7664 Gbit/s 4类速率上行光信号，解决EPON非收窄终端与50G-PON上行波长冲突的问题。下行方向，50G-PON三代时分共存系统采用传统波分复用架构，EPON、10G-EPO和50G-PON下行业务数据分别通过不同波长光信号传输至光网络单元(ONU)，并通过不同PON制式ONU内置的下行波长滤波器选择接收。为避免ODN反射引起的50G-PON下行波长 $1342 \pm 2 \text{ nm}$ 与EPON和10G-EPO非对称上行波长冲突问题，三代时分共存方案中50G-PON下行采用了新的波长定义。采用上述50G-PON三代时分共存的方案和系统架构，各制式下行带宽与波分方案一致，上行带宽通过统一DBA调度，按需分配给6类终端，带宽利用率更高。

1.2 波长规划和光接口指标定义

针对EPON、10G-EPO向50G-PON演进过程中遇到的各类波长冲突问题，50G-PON三代时分共存系统架构上行方向采用四速率时分接收方式，解决了50G-PON上行波长与EPON上行波长冲突问题。新定义的50G-PON下行波长，要求其在与EPON、10G-EPO和50G-PON上行波长，以及EPON、10G-EPO下行波长互不冲突的同时，满足50G-PON系统下行传输功率预算和传输距离要求。ITU-T G.9804.3标准规定50G-PON下行49.7664 Gbit/s信号经过20 km光纤传输后，下行光路径代价(OPP)最大不超过3.5 dB，发射机色散和眼图闭合(TDEC)最大不超过5 dB。

对于50G-PON系统，其OPP主要来源于光纤传输引入的色散代价，另外还包括一些特定场景下非线性效应代价和0.5 dB规模应用余量。传统EPON和10G-EPO下行波长所处的S、C和L波段由于光纤色散系数较大，已不能支持49.7664 Gbit/s速率20 km传输。在50G-PON三代时分共存的系统中，除去上行波长占用的O波段外，50G PON下行波长需要选择更为靠近0色散波长的E波段。传统的E波段(1 360~1 460 nm)由于水峰的存在，通常不被用于高速光通信。但接入侧网络光纤通常部署年份较晚，光纤工艺的改进使得光纤在1 360~1 460 nm范围内的衰减显著降低^[10]，这扩展了光纤在E波段的应用。如ITU-T G.694.2中定义了粗波分复用(CWDM) 18个标准波长通道，1 371 nm、1 391 nm、1 411 nm、1 431 nm和1 451 nm等波长位于E波段^[11]。其中，1 371 nm通道已在移动前传网络中广泛应用。

在E波段中，为规避水峰衰减峰值(1 383 nm)及其邻波长区域，同时降低下行色散代价，EPON、10G-EPO与50G-PON三代共存系统中的50G-PON下行波长应尽可能选取靠近O波段的波长。如图2所示，本文所述系统将50G-PON下行波长定义为 $1366 \pm 2 \text{ nm}$ 。其中，1 360~1 364 nm之间保留了4 nm的波长间隔，用作3类PON制式上下行波长在合分波器中的过渡带，以实现主干光纤中上下行波长的单纤双向传输，并有效隔离下行50G-PON信号的反射波长进入上行时分接收机，从而解决50G-PON下行波长与EPON非收窄上行波长的冲突问题。需要指出的是，若发射端采用常规50G电吸收调制激光器(EML)，在 $1366 \pm 2 \text{ nm}$ 波长下，其色散代价可能超过50G-PON标准规定的3.5 dB OPP



限值。为降低该新下行波长的传输代价，可在下行50G-PON ONU接收侧采用增强型数字信号处理算法，或在发射侧采用负啁啾EML激光器方案^[11]。本研究将采用后一方案，即使用负啁啾1366 nm EML激光器。

在G.9804.3标准中，50G-PON Class N1等级规定的ODN功率衰减范围为14~29 dB，与EPON体系中的PX30、PR30及PRX30等级（15~29 dB）的预算范围最为接近。对于50G-PON三代时分共存系统的MPM光模块的关键光接口指标，除下行波长调整为 1366 ± 2 nm外，50G-PON的最小发射光功率、光调制幅度（OMA）及TDEC等其他光接口参数均参照G.9804.3标准Class N1等级的指标。EPON与10G-EAPON（对称/非对称）则分别遵循IEEE 802.3标准中PX30、PR30及PRX30等级的相应规定。为满足上述光接口指标要求，除需依托50G-PON已有的一系列关键技术外，如高功率发射机、高灵敏度接收机、高性能数字信号处理（DSP）均衡及前向纠错（FEC）等外，对于时分三模Combo光模块而言，其物理层关键技术还包括下行1366 nm发射机的色散代价控制以及上行四速率接收机的实现。

1.3 统一DBA调度

DBA是PON网络中实现上行带宽动态分配的核心机制，旨在提升带宽利用率、降低传输时延并同时更好地保障业务服务质量。在EPON、10G-EAPON与50G-PON三代共存的网络中，由于IEEE EPON体系与ITU-T GPON体系在突发机制、时钟域及DBA管理机制上存在差异，为实现不同体系PON制式的协同工作，必须采用统一的DBA机制进行整体调度。

实现不同PON制式的统一DBA调度，主要有两种可行机制。一种是将上行时隙按GPON和EPON两种制式划分为两个区域，在各区域内沿用其原有的DBA调度机制。该方案的实现较为简单，但难以最优地平衡带宽利用率与低时延

特性。另一种是将不同PON模式（如EPON、10G-EAPON、50G-PON等）的业务优先级统一映射到系统内部定义的调度优先级，从而在共存网络中实现带宽的公平调度，并可精细优化系统带宽利用率与低时延性能。本文中，我们提出一种具体的GPON DBA向EPON DBA的映射机制，GPON传输容器（T-CONT）类型1映射为EPON固定带宽，T-CONT类型2映射为EPON保证带宽，T-CONT类型3保证带宽和非保证带宽分别映射为EPON保证带宽和尽力而为带宽优先级0，T-CONT类型4映射为EPON尽力而为带宽优先级非0，T-CONT类型5的固定和保证带宽分别映射为EPON的固定带宽和保证带宽，T-CONT类型5的其他类型带宽映射为EPON尽力而为带宽，并选择优先级非0。通过该映射机制，可将GPON的T-CONT调度纳入EPON的统一调度框架，利用统一的DBA调度器同时处理EPON的逻辑链路标识（LLID）与GPON的T-CONT，并将GPON的T-CONT类型与EPON的优先级进行对应映射，从而实现GPON与EPON体系在共存网络中的统一DBA机制。如图1所示，在50G-PON三代时分共存系统中，OLT内部的三代时分共存MAC芯片集成了统一的DBA调度器。该调度器接收来自GPON（经适配后）和EPON的带宽请求，并基于统一的优先级与带宽策略进行调度，进而生成统一的上行带宽授权消息下发至各ONU，从而实现灵活且集中控制的带宽授权。借助该统一DBA调度机制，系统可支持EPON、10G-EAPON与50G-PON三代6类终端的上行时分复用，彻底解决了三代PON共存时上行波长冲突的问题。统一的DBA机制不仅简化了带宽管理与调度逻辑，避免了不同PON体系间的资源冲突，还能够按需动态分配带宽，从而提升整体网络效率。通过下行波分复用、上行时分复用以及协议机制的统一，50G-PON三代时分共存系统为运营商提供了平滑、灵活的网络演进路径。

2 50G-PON三代时分共存物理层关键技术

2.1 下行 1 366 nm EML 激光器传输特性

在 50G-PON 三代时分共存系统中，将 50G-PON 下行工作波长范围调整为 1 364 ~ 1 368 nm 后，为最大限度保持与 GPON 体系指标的兼容性，除工作波长外，其下行发射机性能仍需满足 G.9804.3 标准的相关要求。其中，与波长密切相关的下行发射机关键指标包括 TDEC 与 OPP。TDEC 指标通常受到激光器 3 dB 带宽、调制系数、光信噪比 (OSNR)、啁啾系数以及非线性失真等一系列因素的影响。对于常规工作于 1 342 nm 的 50G-PON EML 激光器，其 3 dB 带宽一般为 37.5 GHz，消光比 (ER) 大于 7 dB (在带宽不受限时对应的调制系数约为 0.704)。当该激光器的啁啾系数为 0.5 时，其 TDEC 及经 20 km 光纤传输后的色散代价分别约为 4.5 dB 与 2.5 dB^[1]。随着波长向长波长方向移动，G.652 光纤的色散系数逐渐增大，20 km 传输对应的累积色散量从 1 342 ± 2 nm 时的 77.1 ps/nm 增加至 1 366 ± 2 nm 时的 116.1 ps/nm。若保持啁啾系数为 0.5，1 366 nm EML 激光器的 TDEC 将超出 50G-PON 标准规定的 5 dB 上限。本文通过仿真来确定满足 TDEC < 5 dB 要求的 1 366 nm EML 激光器的啁啾系数取值范围。下行仿真链路如图 3 (a) 所示，主要包括短应力伪随机码 (SSPR) 信号发生器、EML 激光器、20 km 光纤及 TDEC 计算模块。根据 G.9804.3 标准定义的测试方法，TDEC 计算模块中还包含光电转换器、滤波器及 TDEC 算法模块等^[5]。仿真中，发射机的眼图直方图数据波形由 TDEC 计算模块中的光电探测器获取，并通过滤波器将带宽限制在参考接收机定义的 18.75 GHz。TDEC 算法模块采用 13 阶前馈均衡器 (FFE) 作为虚拟参考均衡器，对获取并滤波后的波形进行均衡，最终根据均衡后的测试眼图闭合度以及均衡器噪声增强因子 Ceq 计算出 TDEC 值。

采用图 3 (a) 所示仿真链路及参数，对不同啁啾系数在不同传输距离下的 TDEC 进行仿真，结果如图 4 (a) 所示。仿真结果表明，啁啾系数越小，激光器的 TDEC 值越低。当啁啾系数小于或等于 0 时，1 366 ±

2 nm EML 激光器可满足 50G-PON 标准中规定的、经 20 km 光纤传输后 TDEC ≤ 5 dB 的要求。

考虑到实际系统中抖动、串扰及非线性失真等因素会导致发射机眼图质量劣化，并兼顾规模应用所需的余量，建议将 1 366 ± 2 nm EML 激光器的啁啾系数设计在 -0.5~0。

在 50G-PON 系统中，下行传输的另一关键参数为 OPP，其主要由激光器经光纤传输引起的色散代价构成，同时也包含少量多波长传输非线性效应代价与多路径反射代价。采用图 3 (a) 所示仿真系统与参数，发射数据采用 15 阶伪随机二进制序列 (PRBS15)，接收侧 DSP 配置为 3 抽头判决反馈均衡 (DFE) 加 15 抽头 FFE 均衡算法，对啁啾系数为 0 与 -0.2 的 1 366 ± 2 nm EML 激光器进行仿真，其背靠背 (BtB) 与 20 km 传输后的结果如图 4 (b) 所示。仿真结果表明，啁啾系数为 0 与 -0.2 的 1 366 ± 2 nm EML 激光器在 20 km 传输后的色散代价分别为 1.78 dB 与 1.08 dB，低于啁啾系数为 0.5 的 1 342 nm EML 激光器在同等传输距离下的代价，因而能够满足 50G-PON 时分三模系统下行 20 km 的传输要求。

通过对 1 366 ± 2 nm EML 激光器的 TDEC 与色散代价进行仿真分析可知，当啁啾系数取值在 -0.5~0 时，该激光器的下行发射 TDEC 指标以及 20 km 传输后的 OPP 均能满足 50G-PON G.9804.3 标准的要求。其发射光功率仅需满足标准中 OMA-TDEC ≥ 4.75 dBm 的规定即可。因此，对于 1 366 ± 2 nm EML 激光器，除需控制啁啾系数外，无须对其发射光功

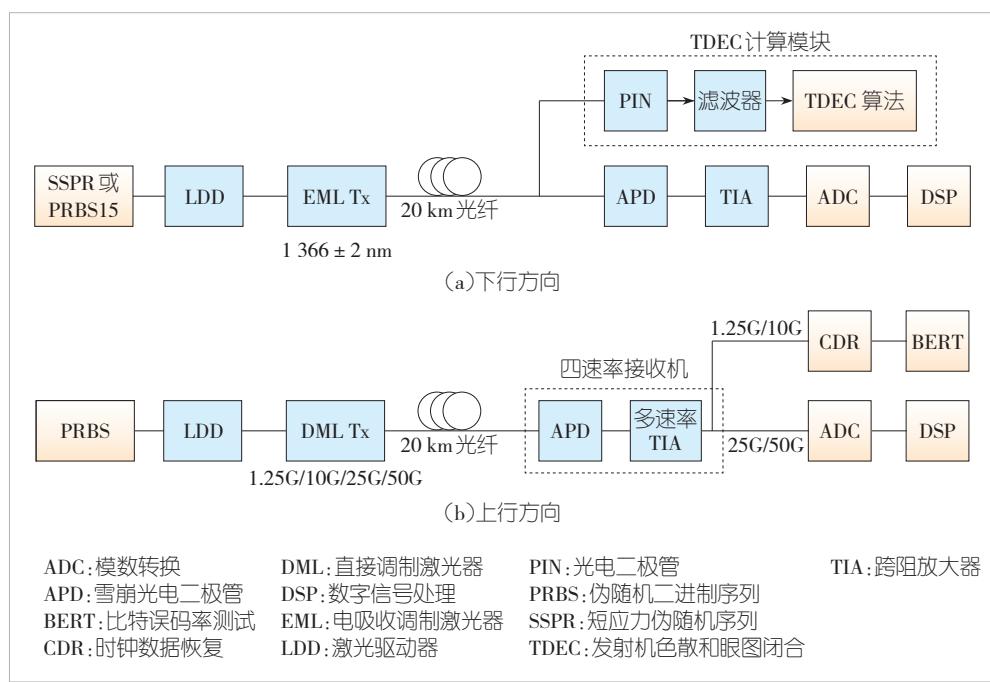
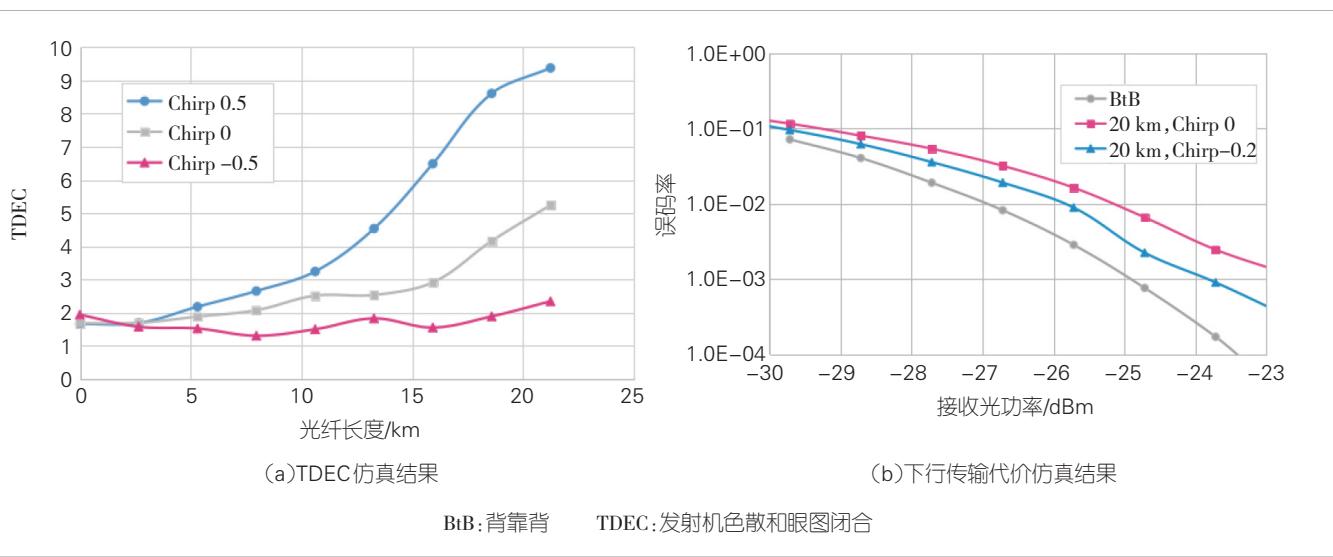


图 3 50G-PON 仿真链路

图4 不同啁啾系数 1366 ± 2 nm EML激光器

率、调制系数、OSNR等其他指标进行特殊设计。根据已有文献报道，通过适当调整电吸收调制器的吸收边与信号波长之间的相对关系，或优化EA偏置电压，可使高速EML激光器实现负啁啾特性，其值甚至可达-1以下^[12]。这表明， 1366 ± 2 nm EML激光器具备应用于50G-PON时分三模系统的技术可行性。

2.2 上行时分复用多速率接收机接收性能

在50G-PON三代时分共存系统中，上行时分复用1.25 Gbit/s、10.312 5 Gbit/s、24.883 2 Gbit/s、49.766 4 Gbit/s四速率接收机是实现多代PON共存与速率兼容的关键组件。该接收机能够支持EPON（收窄/非收窄）、10G-EPON（对称/非对称）和50G-PON（对称/非对称）三代PON 6类终端的4种上行速率，并在同一接收机内完成光电转换与信号放大，是OLT实现统一DBA调度并正确解析不同制式上行PON信号的物理层基础。上行时分复用多速率接收机主要包括雪崩光电二极管（APD）与四速率突发跨阻放大器（TIA）芯片。相较于传统EPON和10G-EPON中使用的1.25 Gbit/s与10.312 5 Gbit/s双速时分复用突发接收机，50G-PON四速率接收机所需支持的速率等级及接收光功率范围跨度更大，因此需对其中APD芯片的带宽、响应度与倍增因子，以及突发TIA的带宽、跨阻增益、等效输入噪声与饱和电流等关键参数进行明确定义与研究^[13-14]。

基于现有10G-EPON商用OLT光模块的器件选型，为同时满足1.25 Gbit/s与10.312 5 Gbit/s速率的接收灵敏度要求，APD倍增后的响应度应大于8 A/W，且APD与TIA的总带宽需分别控制在1 GHz与7.5 GHz。对于25 Gbit/s与50 Gbit/s速

率，则要求APD与TIA的总带宽不低于18.75 GHz。由于当前APD芯片缺乏快速的带宽与增益切换机制，其各项指标必须兼顾所有速率等级的要求。因此，多速率时分复用接收机在低速模式下的带宽控制需通过突发TIA的档位切换来实现。除带宽控制外，突发TIA还需针对不同速率的输入信号，动态调整其跨阻增益。基于上述的一些关键参数，采用图3(b)所示的上行多速率突发接收性能仿真链路进行仿真。低速信号通过时钟数据恢复(CDR)模块完成数据恢复与误码判决；高速信号则借助模数转换(ADC)模块与DSP进行采集、处理与数据恢复，最终得到50G-PON四速率时分复用接收机在各速率等级下的接收灵敏度仿真结果^[15]。

图5中，1.25 Gbit/s、10.312 5 Gbit/s、24.883 2 Gbit/s和49.766 4 Gbit/s速率的接收灵敏度为 -33.5 dBm@BER 10^{-12} 、 -31.75 dBm@BER 10^{-3} 、 -29.44 dBm@BER 10^{-2} ，以及 -26.35 dBm@BER 10^{-1} 。各速率等级接收灵敏度均符合前文所述光接口指标要求，并具备一定的余量。目前产业界锗硅材料体系和铟铝砷材料体系的25G APD或50G APD可满足仿真指标要求，配合多速率模式突发TIA，上行时分复用四速率接收机具备技术可行性。

3 50G-PON三代时分复用Combo光模块及系统验证

3.1 50G-PON时分复用三模Combo光模块

50G-PON时分复用三模Combo光模块的结构如图6所示。该模块由下行方向的3个发射机——EPON 1 490 nm直接调制激光器(DML)、10G-EPON 1 577 nm EML和50G-PON 1 366 nm EML-SOA，以及一个上行时分复用四速率突

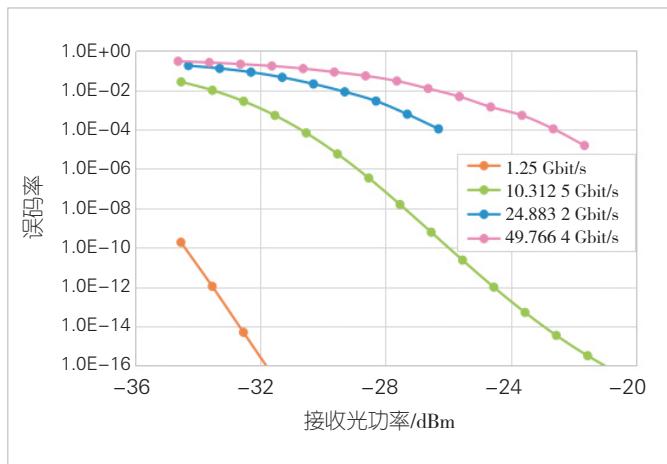


图5 上行四速率接收机接收灵敏度仿真结果

发接收机组成。模块还包含EPON与10G-EAPON专用的LDD驱动芯片和突发限幅放大器(LA)芯片、50G-PON专用的LDD驱动芯片、突发线性放大器(Linear Amplifier)芯片和高速DSP芯片等电学部分。

上行时分复用四速率突发接收机内置高带宽、高灵敏度的APD芯片以及四速率突发TIA。下行3个波长通道与整个上行1 260~1 360 nm波长通道通过波分复用器件进行合波与分波，最终经由光模块的光纤适配接口实现单纤的双向传输。

与50G-PON波分复用三模Combo光模块相比^[1]，本方案无须采用复杂光路对上行1 260~1 280 nm、1 284~1 288 nm和1 290~1 330 nm3个波长进行波分复用，有利于降低50G-PON上行链路的接收损耗，节省模块内部布局空间，从而实

现小型化的三模Combo光收发组件，并可支持16端口槽位密度的双倍密度小型可插拔(SFP-DD)封装形态。由于仅需一个突发接收机，该方案显著减少了上行突发接收机及相关配套电芯片的数量，有助于降低光模块的整体成本^[16]。

在核心光电芯片方面，50G-PON时分复用三模Combo光模块可与波分复用方案共享绝大部分芯片，例如1 577 nm激光器、1 490 nm激光器、25G/50G APD、50G-PON专用驱动放大芯片及DSP芯片等，仅需将1 342 nm EML-SOA激光器替换为1 366 nm EML-SOA。这一设计最大限度地复用了现有PON产业链资源。

3.2 50G-PON时分复用三模Combo光模块系统验证

基于前述上、下行关键光电芯片、50G-PON时分复用三模Combo光模块结构及系统架构，本文完成了包含50G-PON时分三模Combo光模块与系统设备的整套50G-PON三代时分共存系统验证，具体如图7所示。验证内容涵盖光模块的光接口指标以及系统的上下行功率预算与吞吐量性能。

实验验证结果表明，该50G-PON时分三模Combo光模块的下行发射指标均满足前文所述光接口指标要求。其中，1 366 nm通道的平均发射光功率大于9.3 dBm，中心波长为1 366.55 nm，边模抑制比优于50 dB。在BtB传输条件下，其眼图张开度良好，消光比为9.387 dB，眼图余量超过20%。经20 km光纤传输后，受色散影响，1 366 nm发射机的眼图出现一定闭合，测得的TDEC为3.17 dB。根据平均发射光功率与消光比，折算得到光模块光口的OMA-TDEC指标为8.2 dBm。该光模块其他下行通道的指标为：10G-EAPON 1 577 nm通道的发射光功率为4.5 dBm，消光比为

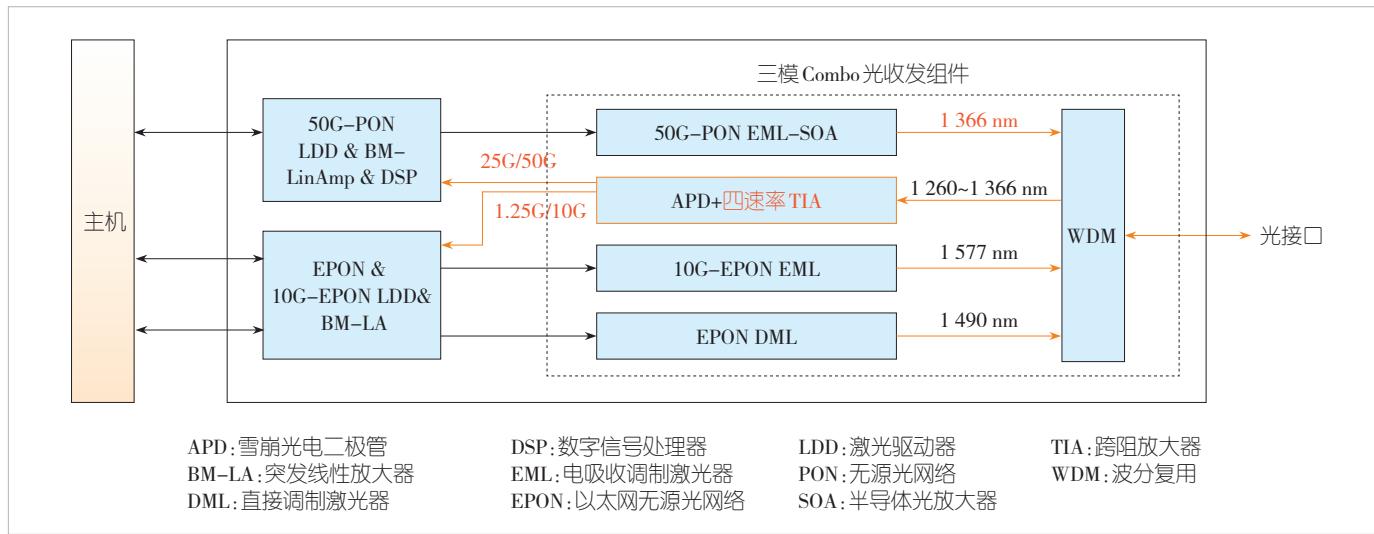


图6 50G-PON时分复用三模Combo光模块结构框图

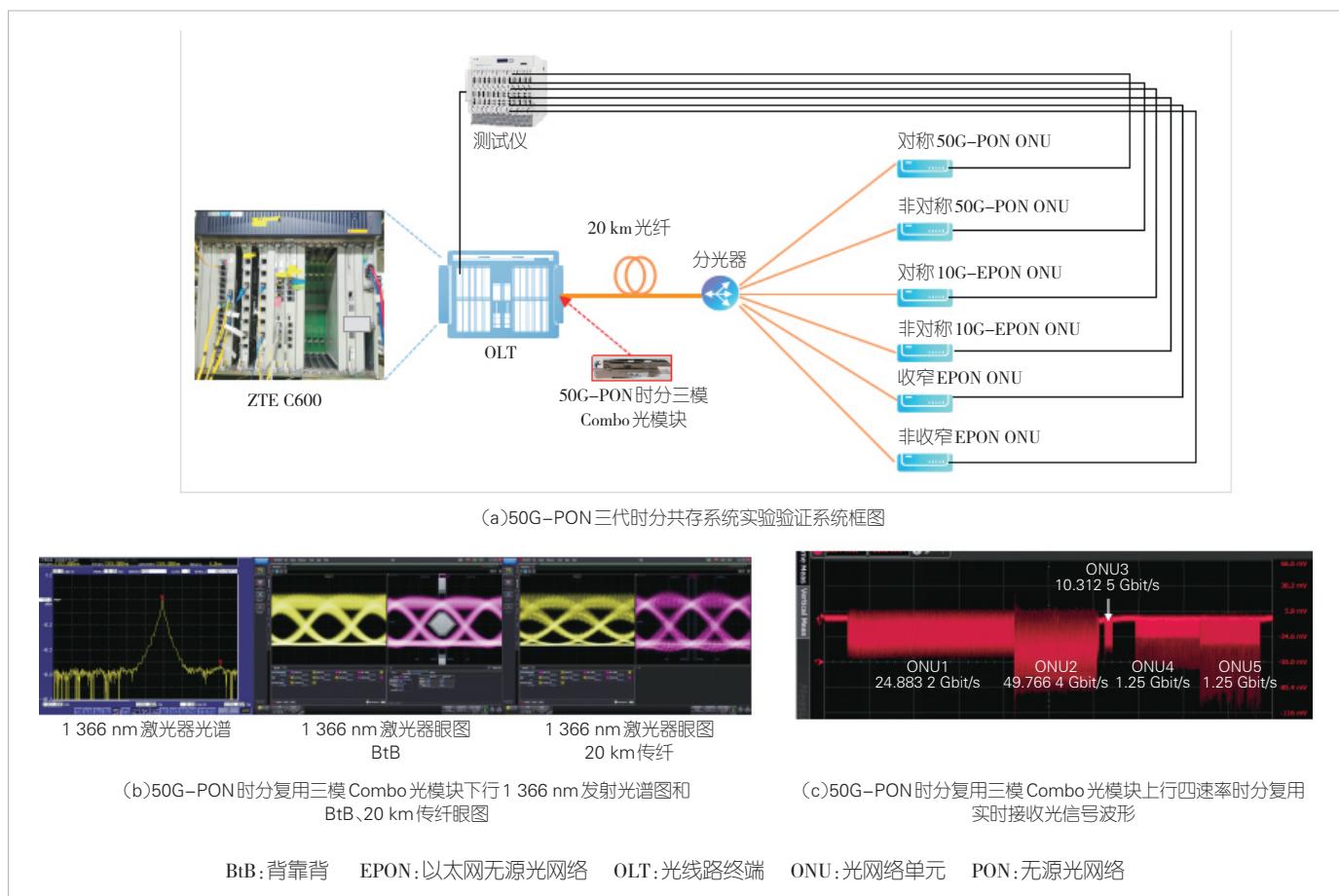


图7 50G-PON三代时分共存系统实验验证系统

7.17 dB; EPON 1490 nm 通道的发射光功率为 6.0 dBm, 消光比为 8.88 dB。

在上行方向, 50G-PON 时分三模 Combo 光模块各速率的离线误码接收灵敏度的具体实验验证结果如图 8 所示。1.25 Gbit/s 接收灵敏度为 -34 dBm @ BER 10^{-12} , 10.3125 Gbit/s 接收灵敏度为 -32 dBm @ BER 10^{-3} , 24.883 2 Gbit/s 接收灵敏度为 -28 dBm @ BER 10^{-2} , 49.766 4 Gbit/s 接收灵敏度为 -25.2 dBm @ BER 10^{-2} , 符合所述光接口指标和仿真预期。

基于图 7 所示的实时验证系统, 本文进一步对 50G-PON 时分三代共存系统的光功率预算、上下行吞吐量及长期稳定性进行了测试验证。在该实时系统中, 收窄/非收窄 EPON、对称/非对称 10G-EPON 以及对称/非对称 50G-PON 共 6 类 ONU 终端接入同一 ODN, 并通过上行混合 DBA 调度机制实现所有终端的带宽分配与稳定运行。系统中各通道的接收灵敏度定义为业务流零丢包时对应的接收光功率。测试结果表明, EPON、10G-EPON 与 50G-PON 通道的光功率预算均不低于 29 dB, 不仅满足现网部署的功率预算要求, 还保留了一定余量, 具体结果见表 1。

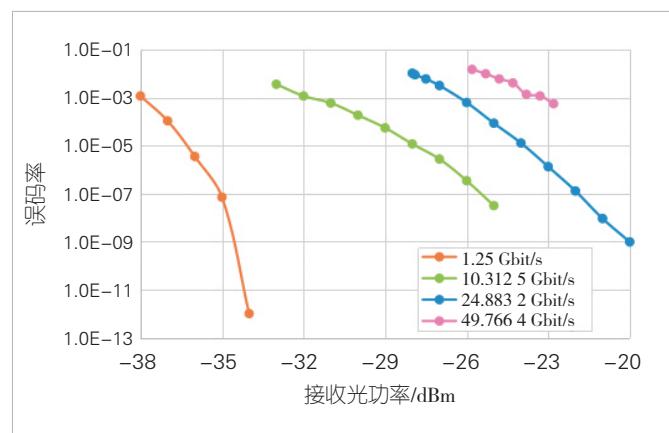


图8 50G-PON时分复用三模Combo光模块上行四速率收灵敏度实验验证结果

在 ODN 6 类 ONU 终端业务并发测试中, 50G-PON 通道在下行方向和上行方向最大业务吞吐量分别达到 40.5 Gbit/s 和 40 Gbit/s, 与 50G-PON GPON 体系波分三模方案吞吐量性能基本相当。在长期稳定性测试时, 6 类终端均 24 h 在线, 且极限带宽跑流上、下行 24 h 零丢包。

表1 50G-PON三代时分共存系统功率预算验证结果

	发射光功率/ dBm	传纤后接收 灵敏度/dBm	链路 预算/dB
50G-PON下行	9.30	-24.50	33.80
50G-PON上行非对称	7.81	-27.58	35.39
50G-PON上行对称	9.96	-24.36	34.32
10G-EPON下行	4.50	-31.94	36.44
10G-EPON上行非对称	1.81	-31.41	33.22
10G-EPON上行对称	6.32	-30.39	36.71
EPON下行	6.00	-29.30	35.30
EPON非收窄上行	1.65	-30.20	31.85
EPON收窄上行	1.30	-31.35	32.65

EPON:以太网无源光网络 PON:无源光网络

4 结束语

针对EPON与10G-EPON向50G-PON演进过程中，因兼容现网非收窄EPON终端而面临的波长冲突、终端退网难度大、成本高等问题，本文提出了50G-PON三代时分共存系统架构。该方案在下行方向采用 $1.366 \pm 2 \text{ nm}$ 新波长，并结合统一的DBA调度机制实现带宽按需分配，从而彻底解决了上下行波长冲突问题。对下行新波长的传输代价以及上行四速率(1.25 Gbit/s、10.312 5 Gbit/s、24.883 2 Gbit/s、49.766 4 Gbit/s)时分接收灵敏度等关键技术开展了深入研究。基于上述研究，完成了50G-PON三代时分共存系统设备及相关Combo光模块的研制与测试验证。测试结果表明，系统各项指标符合预期，能够满足现网ODN 29 dB光功率预算及业务吞吐量要求。本研究有效解决了运营商在EPON体系网络升级中面临的终端退网困难、多代共存波长冲突等实际问题，为GPON与EPON体系向50G-PON的平滑融合演进，提供了一条高效、低成本且可持续的技术路径。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张伟良, 黄新刚, 马壮. 基于专用激活波长的低时延50G-PON原理与实现 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(4): 58–62.
- [3] ITU. Higher speed passive optical networks - requirements: G.9804.1 [S]. 2019.
- [4] ITU. Higher speed passive optical networks - common transmission convergence layer specification: G.9804.2 [S]. 2021.
- [5] ITU. 50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): physical media dependent (PMD) layer specification: G.9804.3 [S]. 2021.
- [6] ITU. Transmission systems and media, digital systems and networks [EB/OL]. [2025-11-12]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G/e>
- [7] IEEE. IEEE standard for ethernet amendment 9: physical layer specifications and management parameters for 25 Gb/s and 50 Gb/s passive optical networks [EB/OL]. [2025-11-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/STDGTSU24221>
- [8] 中国电信集团有限公司. 中国电信光接入网技术要求EPON (1G-EPON/10G-EPON)设备: Q/CT 2361.1-2021 [S]. 2021.
- [9] ITU. Coexistence of passive optical network system: G.9805 [S]. 2022.
- [10] ITU. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): general requirements: G.989.1 [S]. 2013.
- [11] ITU. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid: G.694.2 [S]. 2003.
- [12] CHENG Y, PAN J, WANG Y, et al. 40-Gb/s low chirp electroabsorption modulator integrated with DFB laser [EB/OL]. [2025-11-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4745770>
- [13] 王新余, 孔雪, 贺峰. 新型家庭全光网技术 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 27(2): 56–62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202301011
- [14] 刘刚, 张德智, 陈爱民. 光接入网络遥测技术的分析与实践 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 27(2): 73–78. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303013
- [15] 陆源, 牛文林, 王永奔, 等. 基于数字子载波和概率整形的相干光通信系统设计及应用 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 27(2): 78–82. DOI: 10.12142/ZTETJ.202304014
- [16] 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, 27(2): 82–86. DOI: 10.12142/ZTETJ.202305013

作者简介



杨波，中兴通讯股份有限公司技术预研资深专家，高级工程师；主要从事下一代PON技术预研和标准化工作；参与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；获授权专利40余项。



张德智，中国电信集团光接入领域高级专家、中国电信研究院网络技术研究所接入网络研究中心总监、国际标准组织FSAN现任主席；主要研究方向为下一代高速PON、工业PON、全光组网FTTR、光接入网SDN智能化等；长期在SG15、CCSA TC6从事标准化工作，牵头20余项ITU-T国际标准及多项光接入网领域行业标准的制定；发表论文10余篇，拥有中国专利50余项。



刘波，中兴通讯股份有限公司光接入产品线预研总工；主要从事PON技术预研方面的工作。