

引用本文:王宁,贾晓硕,袁贺,等.支持高功率预算与多速率兼容的50G PON系统[J].光通信技术,2025,49(2):64-68.

支持高功率预算与多速率兼容的50G PON系统

王宁¹,贾晓硕¹,袁贺²,张楠楠¹,李俊玮¹

(1.中国移动通信有限公司研究院 基础网络技术研究所,北京 100053;2.华为技术有限公司 光产品线研发管理部,武汉 430223)

摘要:针对50G无源光网络(PON)系统部署中面临的32 dB功率预算需求及上行25 Gb/s与50 Gb/s多速率兼容难题,以及现网GPON和10G PON系统共存的挑战,提出了一种支持高功率预算与多速率兼容的实时50G PON系统。系统在激光器中引入低频包络幅度调制技术,有效抑制了高功率传输引发的光纤非线性效应;在光线路终端(OLT)接收端,通过与多址接入控制(MAC)层协同的动态自适应光数字信号处理(oDSP)技术,实现了25 Gb/s和50 Gb/s上行速率的兼容;同时,基于空间光合波技术,解决了50G PON与GPON、10G PON在同一PON端口的共存问题。实验结果表明:该系统功率预算达32 dB,满足C+等级标准;在无需增加额外前导开销的前提下,50G PON与现网GPON、10G PON可实现同一端口的共存与协同工作。

关键词:无源光网络;功率预算;多速率兼容

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)02-0064-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



50G PON system supporting high-power budget and multi-rate compatibility

WANG Ning¹, JIA Xiaoshuo¹, YUAN He², ZHANG Nannan¹, LI Junwei¹

(1. Department of Fundamental Network Technology, China Mobile Research Institute, Beijing, 100053, China;

2. R&D Department of Optical Product, Huawei Technologies Co., Ltd., Wuhan, 430223, China)

Abstract: To address the challenges in deploying 50G passive optical network(PON) systems—including the 32 dB power budget requirement, compatibility of 25 Gb/s and 50 Gb/s upstream rates, and coexistence with existing GPON and 10G PON systems, a real-time 50G PON system supporting high-power budget and multi-rate compatibility is proposed. The system introduces low-frequency envelope amplitude modulation in the laser to effectively suppress fiber nonlinear effects caused by high-power transmission. At the optical line terminal(OLT) receiver, dynamic adaptive optical digital signal processing(oDSP) technology collaboratively working with the multi-access control (MAC) layer achieves compatibility for 25 Gb/s and 50 Gb/s upstream rates. Additionally, spatial optical hybrid wavelength-division multiplexing technology enables coexistence of 50G PON with GPON and 10G PON on the same PON port. The experimental results show that the system achieves a 32 dB power budget, meeting the C+ standard. Without additional pilot overhead, 50G PON can coexist and operate collaboratively with existing GPON and 10G PON systems on the same port.

Key words: passive optical network, power budget, multi-rate compatibility

收稿日期:2024-11-23。

基金项目:中国移动集团重点研发项目(R241140XC06、R24113HXC03)资助。

作者简介:王宁(1989—),男,高级工程师,博士毕业于美国佛罗里达大学。现就职于中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所,主要从事下一代高速光接入网PON系统核心光电器件技术及PON+FTTR系统架构与协同管控方面的研究工作。



0 引言

当前,千兆光接入网络的规模 and 用户数量正在快速增长,全国范围内千兆用户的占比已达到四分之一,标志着“千兆信息高速公路”初步形成。随着算力服务不断升级、新业务形态层出不穷以及用户体验需求的持续提升,万兆光接入网络的发展初见端倪。北京、上海、深圳等地政府相继发布政策,推动万兆宽带网络的建设,并加速其试商用进程,以支持新型计算

王宁,贾晓硕,袁贺,等:支持高功率预算与多速率兼容的50G PON系统

网络场景和业务模式的探索与发展。万兆光网络被视为全光接入网络的下一次重大迭代,在数智家庭、智慧园区及普惠算力应用等领域展现了广阔的商业前景。

考虑到现有10G无源光网络(10G PON)系统在满足未来万兆业务对带宽和时延的需求方面存在局限性,国际电信联盟电信标准化部门(ITU-T)定义了50G PON作为10G PON演进至下一代光接入网的技术框架。ITU-T G.9804系列作为50G PON的首个国际标准已于2021年发布^[1],目前该技术标准体系已基本建成。但是,该技术面临的主要挑战有3个方面:

1) 现网兼容性。为了确保与现有的光分配网络(ODN) 32 dB功率预算相匹配,以支持20 km光纤覆盖和1:64的分光比,50G PON必须克服与C+等级32 dB功率预算兼容的巨大挑战。这是因为相比10G PON,50G PON线路速率提升了5倍,导致理论灵敏度下降约7 dB,这对收发系统性能提出更高要求。近年来,国内外多个研究机构深入探讨了50G PON物理层的收发技术,并提出了一系列重要的方案和实验成果。例如,使用突发跨阻放大器(TIA)结合雪崩光电二极管(APD),上行50 Gb/s链路接收灵敏度可以达到-23.7 dBm^[2];采用半导体光放大器(SOA)作为接收机预放大器,可实现上行50 Gb/s链路的功率预算满足N₁等级29 dB的技术要求^[3]。

2) 多速率兼容。50G PON系统在物理层架构上呈现显著的技术特征:其下行方向的传输速率为50 Gb/s,上行方向则提供25 Gb/s与50 Gb/s双模速率配置。在具体应用场景中,不同业务对带宽的差异化需求决定了设备选型策略。以家庭宽带市场为例,扩展现实(XR)类等新兴业务虽然要求下行带宽突破1 Gb/s,但上行需求相对有限,此时采用上行25 Gb/s的非对称型光网络单元(ONU)即可满足性能要求。相较之下,工业制造场景中的高精度视频质检系统或医疗领域的实时远程诊疗应用,往往需要高达2 Gb/s的上行带宽,此时必须部署上行50 Gb/s的对称型ONU方能保障业务质量。在技术演进层面,该领域已取得阶段性突破。国际标准组织于2021年首次发布非对称型50G PON原型系统技术规范,随后在2023年完成对称型系统的标准化工作^[4-5]。虽然早期系统普遍存在单模运行限制,而近期研究表明,通过应用自适应盲均衡算法可实现双模系统的离线兼容^[6]。不仅如此,华为研发团队还创新性地将多址接入控制(MAC)协议与光数字信号处理(oDSP)技术相结合,在实验室环境中成功验证了3种不同速率ONU在同一系统端口下的

协同工作。该方案不仅突破传统设备兼容性限制,更大幅缩短了均衡器的收敛时间^[7]。

3) 三代共存。鉴于现网中大量千兆无源光网络(GPON) ONU短期内无法完全退出市场,50G PON还需支持与现有的GPON和10G PON ONU在同一端口通过波分复用(WDM)的方式共存,以确保光接入网技术能够平滑升级。

为解决上述技术难点,本文提出全球首个实时支持高功率预算与多速率兼容的50G PON系统,该系统的关键技术主要包括32 dB高功率预算技术和多速率兼容技术,旨在促进光接入网络的平滑演进和持续发展。

1 32 dB高功率预算技术

50G PON光线路终端(OLT)发送端需显著提升发射光功率以满足现网C+等级32 dB功率预算需求。传统外调制激光器(EML)受限于输出饱和特性,通常难以满足C+等级标准要求的8.5~14 dBm输出功率范围。为此,可采用集成半导体光放大器(SOA)的增强型EML器件提升入纤光功率。然而当入纤光功率超过10 dBm时,20 km主干光纤链路上产生的受激布里渊散射(SBS)非线性效应将显著劣化系统功率预算性能。为克服SBS的影响,本文提出在直流激光器驱动电流中叠加5 kHz低频包络幅度调制信号,有效扩展激光器的线宽,从而提高SBS阈值^[8],减轻该效应对系统的影响。

低频包络调制信号的调制深度对系统的误码性能有着重要影响。如果调制深度过低,则不足以使激光器线宽得到充分扩展;而调制深度过高,则可能导致信号消光比恶化,同样会损害误码性能。因此,本文进行了实验验证,实验采用14 dBm的50 Gb/s光信号,经20 km光纤传输后,通过逐步增大调制深度并实时监测接收端误码率,测试结果如图1所示。可以看出,当调制深度设置为2%时,误码性能最佳,此时测得的接收灵敏度达到了-27.1 dBm,不仅满足了C+等级的标准指标要求,而且还保留了大约3 dB的工程余量。

此外,与10G PON相比,50G PON面临更严重的色散问题,这对链路的色散补偿能力和功率预算提出了更高要求。于是,本文采取了以下措施:首先,通过选择O波段内的低色散波长——下行1 342 nm和上行1 286 nm来减少色散;其次,制定了无线调制精度总偏差误差要求(OMA-TDEC)指标,当色散导致总偏

王宁,贾晓硕,袁贺,等: 支持高功率预算与多速率兼容的 50G PON 系统

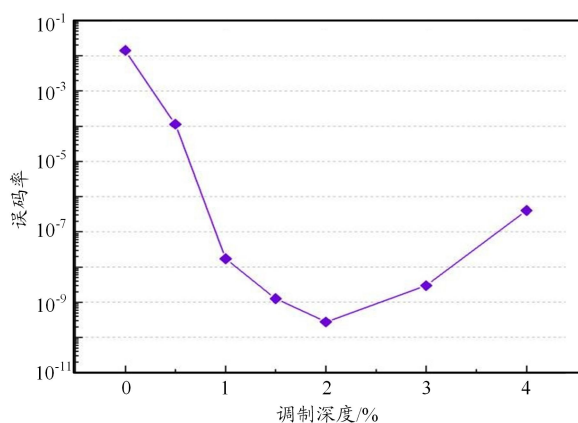


图1 低频包络幅度调制深度对接收机误码性能的影响

差误差(TDEC)增加时,需相应地提高发送光功率,以维持端到端的功率预算性能;最后,在接收机中引入高性能 oDSP 均衡器和纠错能力更强的低密度奇偶校验(LDPC)前向纠错编码(FEC),以增强系统的鲁棒性和可靠性。

2 多速率兼容技术

为了满足光接入网不同业务场景的需求,50G PON 系统不仅要实现 50G 通道自身上行方向 25 Gb/s 和 50 Gb/s 双速率时分复用(TDM)的兼容,同时还需要与现有的 GPON 和 10G PON 系统在同一端口通过 WDM 共存。

2.1 上行 25Gb/s 和 50 Gb/s 多速率兼容方案

在上行链路中,ONU 发射机通常采用低成本的直接调制激光器(DML)。本实验中,25G 和 50G DML 的中心波长分别设定为 1 286.7 nm 和 1 285.2 nm。该波长配置采用 WDM 技术方案,确保 50G PON 系统与现网部署的 GPON、10G PON 系统保持频谱兼容。

对于非对称 25 Gb/s 和对称 50 Gb/s 的 ONU,其光信号输出功率分别为 8.3、7.6 dBm。其中,25 Gb/s DML 输出信号的消光比为 7.0 dB,在经过 20 km 光纤传输后,该值略微下降至 6.1 dB。而对于 50 Gb/s 的光信号,在应用 DSP 预均衡技术后,其传输前后的消光比分别为 5.7、5.1 dB。此外,在经过 20 km 光纤传输后,50 Gb/s 发射机的色散眼图闭合度仅为 1.45 dB。

实现上行多速率兼容的核心组件是多速率突发模式接收机,本文提出的基于 MAC 协同的动态自适应 oDSP 上行多速率 OLT 接收机原理图如图 2 所示。该接收机的设计确保了不同速率信号的有效接收与处理,从而支持多速率系统的稳定运行。

接收机的关键组件之一是 oDSP 芯片内的突发控

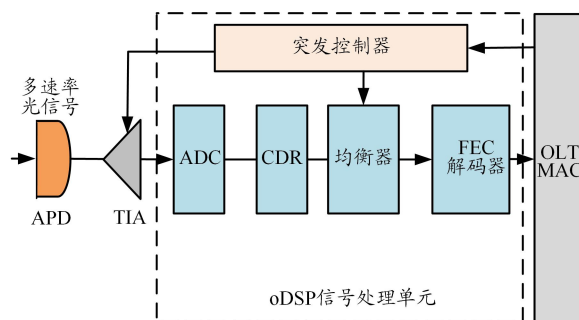


图2 基于 MAC 协同的动态自适应 oDSP 上行多速率 OLT 接收机原理图

制器。该控制器通过与 OLT 的 MAC 层同步,获取动态带宽分配 (DBA)、ONU 测距数据及线路速率等参数,并支持对每个突发数据包独立配置接收模块,包括突发 TIA、均衡器和 FEC 解码器。

在实验配置中,25 Gb/s 与 50 Gb/s 上行光信号首先输入至带宽为 29 GHz 的 50G 雪崩光电二极管(APD)。经 APD 光/电转换后,信号进入突发 TIA 进行跨阻放大,确保不同幅度的光电流转换为标准电压电平。TIA 带宽根据突发控制器提供的时序信息,动态切换至 25 Gb/s 或 50 Gb/s 模式。随后,信号经 oDSP 中的模拟/数字转换器(ADC)进行数字化处理,并生成与线路速率匹配的突发模式时钟恢复(CDR)。均衡器滤波器的抽头数量由线路速率和光纤传输距离联合确定,相关参数由突发控制器预配置。最后,信号进入 FEC 解码阶段。该过程依据线路速率执行,并将解码后的数据通过 50G 电接口传输至 OLT MAC 芯片,从而完成整个信号处理流程。

动态自适应 oDSP 技术使 OLT 能够根据传输链路的质量实时调整均衡器参数。每当 ONU 上线时,oDSP 处理单元会依据信号速率、波长和传输距离等信息初始化均衡器参数设置。随后,系统通过从 MAC 层读取信噪比的变化情况,迭代优化均衡系数,直至信噪比和接收灵敏度达到最佳状态。在业务正常发送期间,系统还会定期监控信噪比的变化,并持续更新均衡器抽头数量,从而确保接收灵敏度始终保持最优。

2 种线路速率上行信号的误码率性能测试结果如图 3 所示。通过采用软判决 LDPC FEC 方案,系统误码率阈值可扩展至 2×10^2 。具体测试数据如下:

1)25 Gb/s 链路:背靠背(BTB)条件下接收灵敏度为-30.7 dBm,经 20 km 光纤传输后灵敏度为-30.8 dBm,性能降幅仅 0.1 dB;

2)50 Gb/s 链路:BTB 条件下接收灵敏度为-25.9 dBm,经 20 km 光纤传输后灵敏度提升至-26.8 dBm,增益

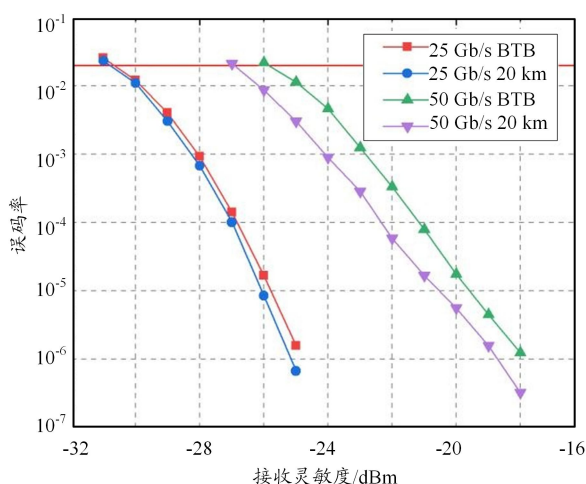


图3 25 Gb/s 和 50 Gb/s 上行信号的误码率性能

达 0.9 dB。这种提升是由于 50G DML 产生的正啁啾效应对波长处于光纤正常色散区域内的光信号接收灵敏度具有增强作用。

2.2 50G PON 与已部署 GPON、10G PON 共存多速率兼容方案

为了使 50G PON 能够与现有的 GPON 和 10G PON 系统兼容并共存,OLT 光模块中必须集成一个小型化的六波长合分波器。对于下行方向,GPON、10G PON 和 50G PON 的信号中心波长分别为 1490 ± 10 nm、 1577 ± 2.5 nm 和 1542 ± 2 nm。这些波长之间的间隔较大,因此在下行传输中不容易发生信号串扰。然而,在上行方向,由于 3 个系统的波长都位于 O 波段($1260\sim 1360$ nm),并且分布非常密集,最小间隔仅为 2 nm,这增加了通道间串扰的风险。为了解决这一问题,需要使用具有陡峭边缘的滤波器,其斜率要求高达 15 dB/nm,以确保不同波长的信号能够有效分离。为此,本文采用自由空间微光学技术(光合分波技术),并借助精密排列的微型滤波片与反射镜面阵列实现高效波长分离。此外,依托自由空间光路的精确调控技术,完成了全晶体管外形(TO)封装的激光器及探测器与其对应波长光束的高效耦合,从而确保了光信号处理的高精度。

为了验证所提出方案的有效性,本文进行了不同波长通道间串扰的实验验证,比较了各通道单独工作时与 3 个通道同时工作时的接收灵敏度差异。实验结果表明,当 3 个通道全部开启时,接收灵敏度的劣化不超过 0.1 dB,这表明该方案可有效消除通道间的串扰。

3 50G PON 系统性能测试

本文使用网络测试分析仪评估了 50G PON 系统

的吞吐量性能,实验系统架构如图 4 所示。整个 PON 系统构建于华为下一代光接入平台 MA5800T 之上,该平台的每个线卡提供超过 1 Tb/s 的背板带宽,能够支持未来 16 个端口同时满负荷运行。OLT 采用的是 QSFP-28 封装的可插拔光模块,并安装在线卡的一个端口上。PON 链路由 20 km 长的 G.652 单模光纤和一个 1:64 分光器组成。在同一 PON 链路上,连接有 4 个非对称型 ONU 和 4 个对称型 ONU。OLT 的上联板通过 100GE 光接口与测试设备相连,而每个 ONU 则通过 10GE 光接口连接到同一测试设备。为了测量 50G PON 系统的吞吐量,本文在上下行方向均发送长度为 512 字节的数据包,所获得的兼容非对称型和对称型 ONU 的 50G PON 系统吞吐量测试结果如图 5 所示。

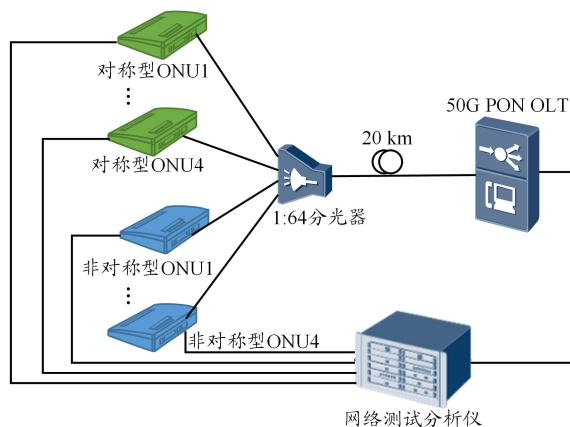


图4 多速率上行 50G PON 系统吞吐量测试实验架构

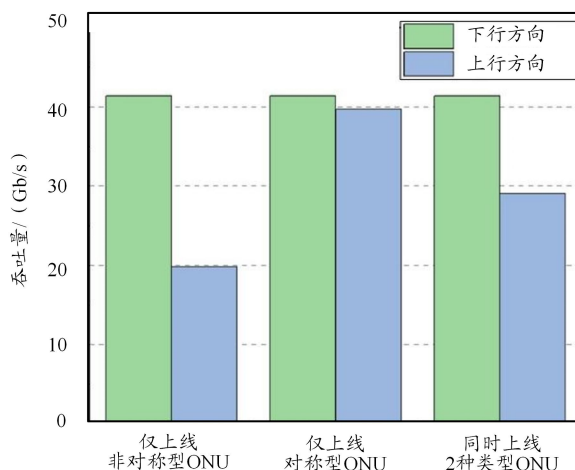


图5 兼容非对称型和对称型 ONU 的 50G PON 系统吞吐量测试结果

实验分为以下 3 个阶段实施:

1)仅上线非对称型 ONU。只使 4 个非对称型 ONU 注册并启动。此时,测得的下行总吞吐量达到了 41.37 Gb/s,上行总吞吐量为 19.82 Gb/s。下行吞吐量接近 LDPC FEC 理论极限 41.75 Gb/s;而上行吞吐量略低于理论值,这可能意味着还有优化空间,可以通过减少突发

王宁,贾晓硕,袁贺,等:支持高功率预算与多速率兼容的 50G PON 系统

TIA 的收敛时间和 CDR 的前导开销来提升性能。

2)仅上线对称型 ONU。将所有非对称 ONU 下线,并仅让 4 个对称型 ONU 注册并启动。在这种配置下,下行吞吐量保持不变,仍为 41.37 Gb/s,而上行吞吐量显著增加至 39.68 Gb/s,几乎是非对称模式上行吞吐量的 2 倍。这一结果显示了对称型 ONU 在上行方向上的高效性能。

3)同时上线非对称型与对称型 ONU。将 8 个 ONU 实现同步注册与启动,其中包含 4 个非对称型 ONU 和 4 个对称型 ONU。针对对称型 ONU 的上行吞吐量进行参数调整,使其达到非对称型 ONU 的 2 倍数,以确保各 ONU 在时隙分配上的均衡性。经此配置,系统上行总吞吐量稳定在 29.07 Gb/s,该数值与前 2 种实验场景的平均值基本一致。实验结果表明,基于现有 PON 端口的资源调度架构,多速率 ONU(包括 25G/50G)可实现高效共存与协同传输,同时保持标准前导码结构不变。

4 结束语

本文针对 PON 系统的技术演进,提出了一种创新的 50G PON 系统,该系统能够在同一链路上兼容支持 GPON、10G PON 和 50G PON 的多速率模式。通过在 OLT 激光器中引入低频包络幅度调制技术,有效抑制了 SBS 非线性效应,从而显著提升了系统的功率预算至 32 dB。此外,该系统采用 DML 作为发射机,并结合 APD 接收机,同时配合与 MAC 层协同工作的动态自适应 oDSP 均衡技术,成功实现了 25 Gb/s 和 50 Gb/s 2 种上行速率信号的兼容处理。为确保与现有网络的

共存,系统利用自由空间光学波分复用组件,使 50G PON 能够与 GPON 和 10G PON 网络无缝集成。此系统已基本满足未来商业部署的技术要求,为下一代大容量光接入网的发展奠定了坚实基础。

参考文献:

- [1] ITU-T. 50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): ITU-T Recommendation G.9804.1-2021[S]. Geneva: ITU-T, 2021: 1-68
- [2] COUDYZER G, VERPLAETSE M, VAN LOMBERGEN B, et al. 100 Gbit/s PAM-4 linear burst-mode transimpedance amplifier for upstream flexible passive optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(12): 3652-3659.
- [3] SIMON G, POTET J, SALIOU F, et al. Real-time 58.2Gb/s equalization-free NRZ mode burst transmission for upstream HS-PON and beyond with monolithically integrated SOA-UTC receiver[C]//IEEE. Proceedings of OFC 2022. San Diego: IEEE, M3G.2-1-M3G.2-3.
- [4] ZHANG D Z, LIU D K, DESSET D, et al. Carrier lab trial of a real time 50G-PON Prototype[C]//IEEE. Proceedings of ECOC 2021. Bordeaux: IEEE, 2021: We3F.5-1-We3F.5-4.
- [5] LI J W, WANG N, ZHU J L, et al. First real-time symmetric 50G TDM-PON prototype with high bandwidth and low latency[C]//IEEE. Proceedings of OECC 2023. Shanghai: IEEE, 2023: 8915-8918.
- [6] SIMON G, SAMPAIO F N, SALIOU F, et al. Equalizer convergence for various transmission channels and multi-rate upstream 50G-PON[C]//IEEE. Proceedings of OFC 2023. San Diego: IEEE, 2023: Th1G.3-1-Th1G.3-3.
- [7] ZHANG N N, LI J W, BAI L R, et al. MAC-assisted DSP architecture for 50G TDM-PON upstream triple-rate reception[C]//IEEE. Proceedings of OFC 2024. San Francisco: IEEE, 2024: Tu3I.5-1-Tu3I.5-3.
- [8] FLLNER C, WANG N, SHABANA F M A, et al. Analysis of SBS-induced performance penalties and their mitigation in 50G TDM-PON downstream[C]//IEEE. Proceedings of OFC 2024. San Francisco: IEEE, 2024: Th1E.7-1-Th1E.7-3.