

下一代光接入网络物理层关键技术综述

冯楠¹,连彬²

(1.北京邮电大学 电子工程学院,北京 100876;2.河北工程大学 水利水电学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 为满足未来用户持续增长的带宽需求,从大容量光接入网络的物理层关键技术出发,总结了下一代无源光网络(NG-PON)标准化现状,综述分析了物理层先进的调制格式、功率预算提升技术、物理层损伤及其抑制损伤的先进数字信号处理(DSP)算法。此外,对未来 NG-PON 物理层的研究方向进行了展望。

关键词: 下一代无源光网络;调制格式;功率预算;数字信号处理

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)11-0053-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.11.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Survey of physical layer key technologies for next generation optical access network

FENG Nan¹, LIAN Bin²

(1. School of electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China)

Abstract: In order to meet the increasing bandwidth demand of users in the future, starting from the key technology of physical layer of high-capacity optical access network, this paper summarizes the standardization status of the next generation passive optical network (NG-PON), reviews the advanced modulation formats in the physical layer, the enhanced power budget technology, the physical layer impairment and suppression based on the advanced digital signal processing (DSP) algorithms. In addition, the future research directions of NG-PON physical layer is prospected.

Key words: next generation passive optical network; modulation formats; power budget; digital signal processing

0 引言

近年来,高清视频、虚拟现实以及 5G 移动前传等业务应用广泛,光接入网的容量需求呈现指数形式增加。下一代无源光网络(NG-PON)具有带宽宽、开销部署低以及建立维护方便的特点^[1-6],其物理层关键技术引起了国内外工业界和学术界的广泛研究。NG-PON 物理层关键技术主要包括发射机先进的调制格式选

择、提升 NG-PON 系统功率预算方案、减少 ONU 数目以降低成本以及收发机中用于提升系统容量或抑制物理层损伤因素的各种数字信号处理(DSP)技术等。因此,基于强度调制/直接检测(IM/DD)机制的 NG-PON 由于其开销低、简单易实现的特点而受到青睐。本文首先介绍当前 NG-PON 的标准化研究现状,然后分析当前基于直接检测的 NG-PON 物理层研究现状和关键技术,最后总结未来 NG-PON 面临的物理层发展趋势及挑战。

1 下一代光接入网络标准化现状

国内外标准组织(如电气与电子工程师协会(IEEE)、国际电信联盟电信标准化部门(ITU-T)和全业务接入网国际标准组织(FSAN)^[7-10])针对下一代光接入网络的升级演进,对多种 NG-PON 进行标准化以解决相应需求。NG-PON 演进的主要时间轴线和相应的标准化现状如图 1 所示^[11-12]。当前部署的 PON 从

收稿日期:2021-02-01。

基金项目:国家自然科学基金项目(61801043)资助;河北省自然科学基金项目(F2018402251、F2018402198)资助;河北省高等学校科学技术研究项目基金(QN 2020193)资助。

作者简介:冯楠(1987—),女,博士研究生,主要研究方向为下一代光纤接入网络。作为技术负责人,参与过多项横向项目以及国家自然科学基金、河北省自然科学基金等纵向项目,在国内外学术期刊和学术会议上发表论文和专利 20 余篇。曾获河北省优秀毕业生、校优秀毕业生及优秀硕士学位论文等奖项。



2004 年的 2.5G GPON 到 2016 年的 10G 时分复用 PON(TDM-PON)和吉比特 PON(XGS-PON),NG-PON 在部署上迅速增长和演进^[9]。2018 年,IEEE 802.3ca EPON 任务组制定了当前工业界商用的 TDM PON 标准,并指定系统升级到 25 Gb/s 链路速率。2020 年,WEY J S 等人^[10]详细总结了 NG-PON 上、下行 OLT 和 ONU 之间交互时的标准化现状。同年,IEEE 802.3 ca 标准化任务组通过建立 2 个波长信道实现了 50 Gb/s NG-EPON 的目标。此外,标准化组织 ITU-T Q2/SG-15 组基于当前标准中 10 Gb/s 的 XG-PON 和 NG-PON2 系统链路速率,关注下一代更高速率的 PON 系统的参考架构,主要包括 50G TDM-PON、单信道 50 Gb/s 的 TWDM-PON 以及单信道高速率 50 Gb/s 的点对点(PTP)的 WDM-PON^[11],并已经开始面向更高速率(如 100G)PON 系统需求进行标准化建议。下一步期望 NG-PON 可以具备高速、高可靠性以及较好的兼容性等特征。

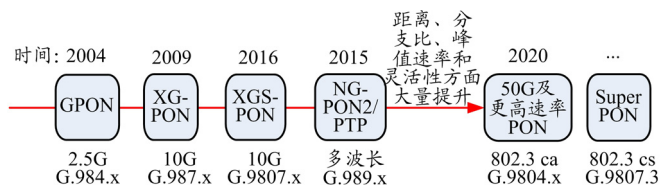


图 1 NG-PON 标准和相应时间轴

由于 NG-PON 的物理层关键技术可以为数据链路层的网络管理和资源规划问题提供有力支撑,因此在上述标准化建议的 NG-PON 网络框架的基础上,研究学者分别就光接入网中物理层的先进器件、编码、调制、复用和检测等技术方案进行了分析研究。本文主要介绍 NG-PON 中先进的调制格式、提升系统功率预算和常见 DSP 算法三方面的物理层关键技术。

2 下一代光接入网物理层关键技术

2.1 NG-PON 先进调制格式

目前,50G TDM-PON 采用基于非归零码(NRZ)的开关键控(OOK)调制方法,频谱效率较低。当前,通过发射机端应用先进、高阶的调制格式可以提高频谱效率(SE),增加 NG-PON 链路比特速率,实现多种业务的容量提升。NG-PON 中的调制格式主要包括:多载波的 OFDM、离散多音频(DMT)、基于多进制正交幅度调制(M-QAM)的 Nyquist 成型副载波调制(SCM)、无载波相位幅度(CAP)调制、多等级脉冲幅度调制(PAM)、电双二进制(EDB)以及光双二进制(ODB)^[13-16]

调制。其中,基于 OFDM 和 DMT(实值 OFDM 信号)的 PON 通过在不同的子载波上为不同的 ONU 分配数据,具有使用灵活和频率可选择的优点,是应用最广泛的多载波技术^[17]。但是,多载波调制格式的发射机和接收机中因采用快速傅里叶变换(FFT)信号处理技术,导致其实施复杂度高,并且多载波调制的高峰均功率比(PAPR)会引起非线性损伤,减弱了传输性能和功率效率。

为实现高 SE 和低开销需求,基于单载波的 CAP 和 PAM-4 格式为 2 种具有前景的候选格式。PAM 具有网络数据吞吐量高、复杂度低和对噪声和畸变容忍性高的优点^[12]。EDB 的主要优点是 NRZ 调制兼容,相比于 PAM-4 格式,其降低了收发机器件的线性需求。而 ODB 调制格式的主要优点是可以采用一个与 NRZ 相似的单阈值接收机进行探测,缺点是在发射机中需要进行脉冲的光相位控制,要增加一个马赫-曾德尔调制器(MZM),因此,ODB 一般仅应用在下行方向。综上所述,为适应 NG-PON 不同的传输场景,权衡不同调制格式所实现的系统容量、功率预算以及所需的实施复杂度具有重要意义。

2.2 NG-PON 物理层功率预算提升技术

对于 NG-PON 系统,随着数据传输速率和传输距离的增加,所带来的线性和非线性损伤更加严重。典型 20 km 标准单模光纤(SSMF)的 TDM-PON 具有 29 dB 的损耗预算(IEEE 中 PR30 和 ITU-T 的 N1),ITU-T 也标准化了 31 dB(N2)和 33 dB(E1)损耗预算^[11]。NG-PON 系统面临功率预算不能充分满足系统要求的问题,而低功率预算限制了用户数目,增加了系统升级的开销。

发射机的发射功率和接收机的灵敏度决定了链路的功率预算。因此,增加下行链路的发射功率是提升下行系统功率预算的一种方法。NG-PON 一般为非放大系统,但是在更高速率的 NG-PON 系统中,为实现相同的功率预算标准,则必须使用光放大器。目前,典型的光放大器主要有掺铒光纤放大器(EDFA)、半导体放大器(SOA)^[18]和喇曼放大器^[19]。根据不同场景需求,选择不同的光放大器。在基于 IM/DD 的 NG-PON 系统中,EDFA 泵浦的高发射功率不仅可以提升功率预算,而且可以有效减缓色散(CD)引起的功率衰落。但是,其带来的光纤非线性自相位调制(SPM)^[20-22]和直接检测系统存在的非线性拍频干扰(SSBI)损伤则更加严重,且当发射功率增加到一定程度,非线性效应(SBS)将会限制系统性能。SOA 因其规模小、开销低、

可与光设备结合以及可放大不同波长信号的特点受到了广泛关注。但是,SOA的快速动态增益使其具有数据的模式效应且容易受到非线性的影响。喇曼放大器由于高饱和功率和快速增益的特点使得其可以应用在上行 NG-PON 中,但喇曼放大器的缺点是效率较低。

提升功率预算的另一种方法是增加接收机灵敏度,而接收机灵敏度的提升与整体系统方案设计有关,如 NG-PON 发射机中调制器的选择。目前,在发射机中,基于强度调制的调制器可以采用低开销、低功率的垂直腔面激光器(VCSEL)设备、直接调制激光器(DML)或外部调制器(EML)。其中,EML一般在单片上将激光器集成 MZM 或电吸收调制器(EAM)^[23-24]。但是,DML/EML 产生的啁啾有较大的 CD 代价,这给 NG-PON 系统的设计带来了挑战。另一方面,接收机灵敏度提升可以通过采用 DSP 技术(如编码、符号映射、线性和非线性损伤抑制等)来实现。其中,采用基于 DSP 的均衡机制可以抑制 IM/DD 系统方案中信号所受的物理层损伤,从而改善接收机灵敏度。

2.3 NG-PON 物理层损伤因素及其抑制的常见 DSP 算法

在 NG-PON 系统中的光纤传输需要考虑 CD、光电器件的非线性效应带来的损伤,如电放大器、调制器、光电探测非线性特性以及直接检测系统中平方率检测引入的非线性拍频符号间干扰(ISI)^[25-26]等。为抑制这些非线性效应引起的畸变以保证符号的正确检测,需要通过收发机的 DSP 算法进行补偿。下文简要介绍基于直接检测的 NG-PON 中典型的均衡技术分类。

从均衡作用的信号域角度进行分类,均衡技术可分为光域和电域均衡。其中,光域均衡可以直接在光信道(有全部光相位、幅度和偏振信息的)上进行,如采用光滤波器实现残余边带滤波抑制功率衰落效应。而电域均衡方法实施灵活,在保证系统性能的同时显著减少系统的开销成本。从功能的角度按照被抑制的损伤类型,均衡技术可分为线性均衡和非线性均衡。其中,针对线性损伤,常见的数字均衡器包括电色散补偿(EDC)、前馈均衡器(FFE)、判决反馈均衡器(DFE)、最大似然均衡器(MLSE)以及这些均衡器之间的联合^[27-28]。针对非线性损伤特别是非线性拍频的抑制,常见的抑制方法主要有迭代、符号预畸变、单滤波器、Volterra 均衡器、基于 Kramers-Kronig(光单边带调制)的机制^[29]以及采用人工智能(如基于神经网络的机器学习^[30-31])等。在实际的传输链路中,选择均衡技术时需要进行多方面考虑,如在计算复杂度方面,基于

MLSE、Volterra 和神经网络的均衡技术具有计算复杂度高的特点,为减少计算复杂度,需要选择合适的均衡器阶数和抽头数目,可设计简化的稀疏 Volterra 均衡器以实现系统性能与复杂度之间的平衡。

从均衡器所在链路位置的角度进行分类,均衡主要分为发射机的预均衡和接收机的后向均衡方法。针对实际部署的下行 NG-PON 场景,相比于传统 PON 需要在多个 ONU 中使用 DSP,预均衡器的设计可以显著减小整体系统的开销,如根据 Volterra 逆均衡理论,若将传统下行 ONU 接收机中的 Volterra 后向均衡器转移到发射机 OLT 中,构建基于直接学习或间接学习的 Volterra 预均衡器,则对下行 PON 的低成本设计具有重要意义。

从 NG-PON 均衡技术实施中是否采用训练序列的角度,均衡方法可以分为基于盲和基于训练的均衡。基于盲的均衡方法不需要训练序列,只基于接收符号与发端正确符号之间的误差来恢复符号。恒模算法(CMA)^[32]是典型的盲时域均衡方法,但其收敛速度较慢,其它改进的 CMA 盲均衡机制如多模算法(MMA)和改进多模算法(MCMA)^[33-34]可改善这一问题。而基于训练的均衡方法,需要将已知的训练序列或导频插入到符号中,在接收端通过比较接收的序列和发送的符号序列,训练模拟信道的特征。该均衡方法要分配开销,因此具有一定的数据传输代价。在均衡器的抽头系数更新上,常用基于最抖梯度下降的自适应算法,例如最小均方(LMS)和递归最小二乘(RLS)算法^[35]。其中,基于 LMS 算法的自适应数字均衡器取决于输入信号,计算简单,但收敛较慢。而基于 RLS 的迭代方法收敛速度较高。因此,在自适应滤波器的更新策略上,需要同时考虑开销、均衡算法的性能以及自适应均衡器的性能。

在上述传统均衡器中,实际数据传输的输入基带信号一般为实值。为了恢复包含实部和虚部的复值符号,需要进行复均衡器的设计。由于复值信号一般需进行 I/Q 调制,而 I/Q 不平衡畸变会严重影响系统性能。为了补偿 I/Q 不平衡损伤,可使用广义线性均衡器、广义 Volterra 均衡器、非线性多输入多输出(MIMO)Volterra 均衡器以及 MIMO 神经网络均衡器,这些均衡器的输入为复值信号,复值信号可直接进行均衡。

3 下一代光接入网物理层未来发展方向

3.1 更高速率的方向

随着 NG-PON 系统的传输容量持续增加,NG-

PON 必然向更高速率的方向发展。迄今,已经有理论研究和实验验证了下行 50 Gb/s 及以上速率 NG-PON 链路中的一些关键技术。单波长 100G TDM-PON 不仅可以减少所需的光器件的数目和相关开销,而且节省了波长资源,但 100G NG-PON 仍然面临重要挑战。在器件支持方面,随着集成电路的发展,商家需要考虑更加成熟、高集成的器件,如高速的数/模转换器、模/数转换器和低开销的光电器件(VCSEL 和联合 DSP 的雪崩光电二极管的收发机等)。在复用技术方面,可以采用新型的多信息承载维度,增加资源利用的灵活性,如基于偏振复用的 PON(PDM-PON)^[36]、子载波因子功率调制的 PON(SIPM-PON)^[37] 以及延迟复用的 PON(DDM-PON)^[38]。在新型传输技术方面,概率成型(PS)^[39]作为一种提升传输容量的前景技术,在不增加系统复杂度的基础上提升了系统的灵活性,在非线性信道中基于 PS 的 QAM 格式具有 1.53 dB^[40]的灵敏度增益。PS 一般通过前向纠错编码(FEC)和调制方案来实现。为了增加 NG-PON 功率预算、纠正传统均衡器的输出及突发错误,需要提升额外的 FEC^[41]的编码增益来进一步提升收发机的性能,FEC 可以进行硬/软译码从而分别实现 10^{-3} 及 10^{-12} 的误码率纠正。其中,基于软译码的 FEC 已广泛用于 NG-PON 系统中,但若想继续提升 FEC 的编码增益,则需综合考虑 FEC 的实施复杂度及开销。

3.2 灵活 NG-PON 方向

针对 NG-PON 中不同的 ODN 分布导致各链路信噪比(SNR)不同的问题,通过在物理层设置调制和编码参数可以提升 NG-PON 的吞吐量。具体操作如下:将信道 SNR 相似的 ONU 进行分组,在下行方向,OLT 采用分层调制^[42-43]技术,对不同的 ONU 组按照一定的功率比叠加信号,从而得到非均匀的有灵活功率比变化的信号星座以支持多个数据流同时传输,为不同的 ONU 组提供了不同的保护;在上行方向,从资源分配的角度出发,通过分层调制技术,不同的 ONU 可以采用不同的调制格式,网络运营商会重新分配采用高阶和低阶调制格式的 ONU 资源,如为采用低阶调制格式的 ONU 分配较长的时隙,对于可承载高阶调制格式的 ONU 分配较短的时隙,以保持不同业务具有相同的数据传输速率,保证多个 ONU 之间的公平性。

3.3 相干 NG-PON 方向

相干检测光器件灵敏度高且技术成熟,在长距离、城域和数据中心传输系统中广泛应用,为实现更高的接入容量和更大覆盖范围,相干技术^[44]已被引入

到 NG-PON 中。但相比于单 PD 的直接检测机制,相干 NG-PON 需要复杂的光 I/Q 调制器和集成相干接收机的设计。其中,数字相干接收机需要偏振和相位分集检测架构,载波相位恢复的复杂度也比较高,总功率消耗显著增加。因此,相干 PON 面临硬件复杂度高和开销大的问题。为解决该问题,文献[45]通过采用外差、幅度调制的准相干系统,在发射机端采用一个单 MZM 来代替双偏振的 I/Q 调制器。但是,该方法相比于全相干 QPSK 系统,其接收机灵敏度较差,并且由于需要 2 倍的接收机带宽反而增加了开销。此外,在基于光单边带调制机制中,目前广泛采用的自相干机制是通过在发射机添加一个连续光源,可以避免任意光频率偏移问题,满足稳定控制需求,减小了接收机的复杂度。

3.4 上行突发 NG-PON 方向

对于 NG-PON,为满足相同光路径的损耗需求,下行信号持续广播到所有的用户。在上行方向 OLT 以突发的形式接收来自不同用户端的信号。这些上行信号有不同的信号功率、载波相位、时间/时钟和偏振态^[46]。因此,需在上行 NG-PON 中有效且鲁棒性地实现突发模式检测。为实现这一功能,在上行带宽受限的传统 PON 接收机中采用限幅放大器(LA),将来自不同位置的 ONU 的多个输入信号幅度进行分级^[47]。此外,为了提升来自 ONU 的上行突发信号的信号恢复和处理效率,需在 OLT 中进行突发均衡器的设计,对下一个到达的上行突发信号快速响应,保证在短时间内重启传输。

已有研究报道了通过采用前导设计和快速的 DSP 来解决上行 NG-PON 的突发接收问题。ZHANG J 等人^[48]针对突发模式下运行的接收机及相干接收机中整体突发帧、前导帧和一些关键的 DSP 功能进行了综述和讨论。相比于直接检测 PON 突发模式的信号恢复,相干光信号在幅度、相位和偏振上进行调制和复用,因此基于相干检测的突发接收复杂度更高,但较为适合更高速率、更长距离的 NG-PON 发展需求。

3.5 支持 5G 前传的 NG-PON 方向

相比现有的 4G 网络,随着无线业务的需求快速增长,5G 网络作为一种新的射频接入技术,需要更高的业务速率、更多的链接、更低的端到端延迟以及更高的可靠性。5G 传输架构基于 4G 基站单元,按照功能细分为集中单元、分布单元和远端单元^[49],引入基于 PON 的无线网络架构可以提供固定的 5G 射频服务传输。WEY J S 等人^[50]在信号处理链的功能分支选择上

分析了 4G 与 5G 传输架构的区别,并根据不同的运营商关于 5G 前传的需求,讨论了 4 个潜在的部署场景,还总结了支持 5G 场景的 PON 技术的标准化现状。目前,ITU-T Q2/SG15 已经制定了在无线网络中部署 NG-PON 不同的功能分支架构和实现 NG-PON 的具体方法。为满足基于 PON 的 5G 前传的低延迟需求,新型的动态带宽分配(DBA)和资源调度方法已成为热点研究。WDM-PON 由于不需要 DBA,是 5G 前传传输中可满足容量需求的一种重要的技术选择。

4 结束语

为满足未来光接入网络持续增加的数据速率需求,本文从 NG-PON 的物理层角度出发,首先描述了当前 IEEE 和 ITU-T 针对 NG-PON 的标准化现状。此外,总结了 NG-PON 物理层在提升信号传输容量的调制格式、提升系统功率预算以及收发机抑制物理损伤等方面的关键技术,对未来 NG-PON 物理层朝高速、灵活、相干、上行突发和支持 5G 移动的方向演进进行了介绍和展望。

参考文献:

- [1] HARSTEAD E, VAN V D, HOUTSMA V, et al. Technology roadmap for time-division multiplexed passive optical networks (TDM PONs) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 37(2): 657–664.
- [2] HOUTSMA V, MAHADEVAN A, KANEDA N, et al. Transceiver technologies for passive optical networks: past, present, and future [Invited Tutorial] [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2021, 13(1): A44–A55.
- [3] XUE L, YI L, HU W, et al. Optics-simplified DSP for 50 Gb/s PON downstream transmission using 10Gb/s optical devices[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(3): 583–589.
- [4] DONG Z, ZHAO X, CHEN Y, et al. A low-complexity probabilistic shaping based on bit-weighted distribution matching in DMT-WDM-PON [J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 21814–21824.
- [5] PAROLARI P, GATTO A, NEUMEYER C, et al. Flexible transmitters based on directly-modulated VCSELs for next generation 50G passive optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(10): D78–D85.
- [6] FENG N, SUN X. Nyquist four-level pulse amplitude modulation scheme (PAM-4) based on hierarchical modulation in IM/DD-TDM PON with hybrid equalization [J]. *Optics Communications*, 2020, 457: 124609–124609.
- [7] LAM C F, YIN S. *Optical Fiber Telecommunications VII* [M]. Los Angeles: Academic Press, 2020.
- [8] ROBERTS H. Status of ITU-T Q2/15: new higher speed PON projects [J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2020, 4(1): 57–59.
- [9] LI B, ZHANG K, ZHANG D, et al. DSP enabled next generation 50G TDM-PON [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(9): D1–D8.
- [10] DESANTI C, DU L, LAM C F, et al. Super-PON: an evolution for access networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(10): D66–D77.
- [11] WEY J S. The outlook for PON standardization: a tutorial [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(1): 31–42.
- [12] ZHOU L, HE H, ZHANG Y, et al. Enhancement of spectral efficiency and power budget in WDM-PON employing LDPC-coded probabilistic shaping PAM8[J]. *IEEE Access*, 2020, 8(99): 45766–45773.
- [13] ZHANG J, WANG K, WEI Y, et al. Symmetrical 50Gb/s/λ PAM-4 TDM-PON at O-band supporting 26 dB+ loss budget using low-bandwidth optics and semiconductor optical amplifier [C]//*Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, March 8–12, 2020, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2020: 1–3.
- [14] JIN W, SANKOH A, DONG Y, et al. Hybrid SSB OFDM-digital filter multiple access PONs [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(8): 2095–2105.
- [15] LIU B, HAN S, MAO Y, et al. High-security multi-slot chaos encryption with dynamic probability for 16-CAP PON [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1–10.
- [16] VEEND T V, HOUTSMA V E. Flexible 50G PON based on multi-rate PAM and CAP-4 with user interleaving [C]//*45th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Sept. 22–26, 2019, Dublin, Ireland. Dublin, 2019: 1–3.
- [17] AUPETIT-BERTHELEMOT C, SANYA M F. An IFFT/FFT size efficient improved ACO-OFDM scheme for next-generation passive optical network [C]//*European Conference on Networks & Optical Communications (ECOC)*, June 1–3, 2016, Lisbon, Portugal. Lisbon: IEEE, 2016: 1–3.
- [18] ZHANG J, YU J, WEY J S, et al. SOA pre-amplified 100 Gb/s/λ PAM-4 TDM-PON downstream transmission using 10 Gbps O-band transmitters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 185–193.
- [19] SANTA M. Next Generation Technologies for 100 Gb/s PON Systems [D]. Ireland: University College Cork, 2019.
- [20] CHEN H Y, WEI C C, LU I C, et al. High-capacity and high-loss-budget OFDM long-reach PON without an optical amplifier [Invited] [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2015, 7(1): A59–A65.
- [21] GONG X, GUO L, DONG Y, et al. SPM-improved transmission performance of software-reconfigurable IMDD PONs based on digital orthogonal filtering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(20): 4488–4496.
- [22] FENG N, LIU N, LIU C, et al. The high power budget IMDD OFDM-PON down-stream scheme employing sparse volterra filter-based nonlinear impairment mitigation [C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, May 14–19, 2017, San Jose, USA. San Jose: IEEE, 2017: 1–2.
- [23] ISOE G M, LEITCH A W R, GIBBON T B. Maximizing capacity, flexibility and efficiency in G-PON networks using VCSEL-based OOK and 2/4-PAM formats[J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, 66(7): 747–752.
- [24] ZHANG J, YU J, CHIEN H, et al. Demonstration of 100Gb/s/λ PAM-4 TDM-PON supporting 29 dB power budget with 50km reach using

- 10G-class O-Band DML transmitters [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3–7, 2019, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2019: 1–3.
- [25] FENG N, SUN X. Implementation of network-coding approach for improving the BER performance in non-orthogonal multiple access (NOMA) -PON[EB/OL]. [2021-02-01]. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125301>.
- [26] ZHANG Z, LIU N, JU C, et al. IMDD-based bidirectional 20 Gb/s/λ WDM-PON with nyquist 4 PAM employing rayleigh backscattering noise detection-based self wavelength management [J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(3): 210-1–210-12.
- [27] WEI J, GIACOMIDIS E. 40 Gb/s/λ optical amplified PAM-4 PON with transmission over 30 km SMF using 10G Optics and simple DSP[C]//Optical Fiber Communications Conference & Exhibition (OFC), March 19–23, 2017, Los Angeles, USA. Los Angeles: IEEE, 2017: 1–3.
- [28] LIU N, JU C, LI C. Nonlinear ISI cancellation in nyquist-SCM direct detection PON downstream scheme with volterra pre-equalizer [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 14–18.
- [29] ZHANG J, YU J, LI F, et al. 11×5×9.3 Gb/s WDM-CAP-PON based on optical single-side band multi-level multi-band carrier-less amplitude and phase modulation with direct detection [J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18842–18848.
- [30] YI L, LIAO T, HUANG L, et al. Machine learning for 100 Gb/s/λ passive optical network [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(6): 1621–1630.
- [31] LI P, YI L, XUE L, et al. 56 Gbps IM/DD PON based on 10G-class optical devices with 29 dB loss budget enabled by machine learning[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11–15, 2018, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2018: 1–3.
- [32] ZHANG J, YU J, CHI N. Advanced digital signal processing for short-haul and access network [C]//Optical Metro Networks & Short-haul Systems VIII, February 13, 2016, San Francisco, USA. San Diego: SPIE, 2016: 1–10.
- [33] YU J, LABS O, INC Z. Digital signal processing for optical access networks[J]. ZTE Communications, 2014, 12(4): 40–48.
- [34] NETO L A, MAES J, LARSSON-EDEFORS P, et al. Considerations on the use of digital signal processing in future optical access network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 38(3): 598–607.
- [35] ZHOU L, HE H, ZHANG Y, et al. Enhancement of Spectral Efficiency and Power Budget in WDM-PON Employing LDPC-coded Probabilistic Shaping PAM8[J]. IEEE Access, 2020, 8(99): 45766–45773.
- [36] ZHANG J, YU J, LI X, et al. 200 Gbit/s/λ PDM-PAM-4 PON system based on intensity modulation and coherent detection[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(1): A1–A8.
- [37] CHEN L, HALABI F, GIDDINGS B, et al. Subcarrier index-power modulated optical OFDM with superposition multiplexing for IMDD transmission systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(22): 5284–5292.
- [38] HSU J H, YU M, WEI C C, et al. Employing hybrid sub-nyquist sampling rates to support heterogeneous services of varying capacity in 25 Gbps DDM-OFDM-PON[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1–8.
- [39] ZHANG Y, LIU B, REN J, et al. Flexible probabilistic shaping PON based on ladder-type probability model [J]. IEEE Access, 2020, 8: 34170–34176.
- [40] HE Z, BO T W, KIM H. Probabilistically shaped coded modulation for IM/DD system[J]. Optics express, 2019, 27(9): 12126–12136.
- [41] ZHANG L, YANG C, ZHANG F. Joint optimizing of interleaving and LDPC decoding for burst errors in PON systems [J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(2): 129302-1–129302-3.
- [42] LINDEN R V D, YIN X, TRAN N C, et al. Demonstration of upstream flexible 2-/4-PAM formats for practical PON deployments [C]//42nd european conference on optical communication (ECOC), Sept. 18–22, 2016, Dusseldorf, Germany. Dusseldorf: VDE, 2016: 1–3.
- [43] LINDEN R V D, TRAN N C, TANGDIONGGA E, et al. Increasing flexibility and capacity in real PON deployments by Using 2/4/8-PAM formats [C]//Optical Fiber Communication Conference, March 20–24, 2016, Anaheim, USA. Anaheim: IEEE, 2016: 1–3.
- [44] LI C, LUO M, QIU Y, et al. Flexible coherent PON system based on cost-effective heterodyne detection of PDM-PAM-n signal [C]//2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), July 27–29, 2016, Chengdu, China. Chengdu: IEEE, 2016: 1–3.
- [45] LI H, LUO M, LI X, et al. Demonstration of 50-Gb/s/λ PAM-4 PON with Single-PD using Polarization-Insensitive and SSBI Suppressed Heterodyne Coherent Detection [C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8–12, 2020, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2020: 1–3.
- [46] EFFENBERGER F J, ZENG H, SHEN A, et al. Burst-mode error distribution and mitigation in DSP-assisted high-speed PONs [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(4): 754–760.
- [47] GAUR C B, FERREIRA F, GORDIENKO V, et al. Experimental comparison of fiber optic parametric, raman and erbium amplifiers for burst traffic for extended reach PON [J]. Optics Express, 2020, 28(13): 19362–19373.
- [48] ZHANG J, JIA Z, XU M, et al. High-performance preamble design and upstream burst-mode detection in 100Gb/s/λ TDM coherent-PON[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8–12, 2020, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2020: 1–3.
- [49] ZOU J S, SASU S A, LAWIN M, et al. Advanced optical access technologies for next-generation (5G) mobile networks [Invited][J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(10): D86–D98.
- [50] WEY J S, LUO Y, PFEIFFER T. 5G wireless transport in a PON context: an overview [J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2020, 4(1): 50–56.