

工业无源光网络物理层关键技术及发展趋势

霍佳皓^{1)✉}, 张晓营¹⁾, 高凯强²⁾, 皇甫伟¹⁾, 隆克平¹⁾

1) 北京市融合网络与泛在业务工程中心, 北京科技大学, 北京 100083 2) 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192

✉通信作者, E-mail: huojiahao@ustb.edu.cn

摘 要 随着工业互联网的不断发展, 工业无源光网络 (Passive optical network, PON) 引起了工业界和学术界的共同关注. 为应对工业互联网多样化场景应用的不同特点, 工业 PON 需满足超高速率、超大连接和低成本的需求, 物理层调制格式、复用方式、传输方案、数字信号处理算法等一直是该领域的研究热点. 首先介绍了 PON 的基本概念, 回顾了 PON 的标准化历程, 重点对 PON 物理层传输方案及关键技术进行梳理, 包含强度调制技术、多维复用技术和数字均衡技术的研究进展. 然后, 提出了适用于工业 PON 传输的偏振复用强度调制相干检测系统方案, 在仿真平台上分别测试了四电平脉冲幅度调制和开关键控调制两种调制格式在背靠背和 20 km 传输距离的单模光纤中的传输性能, 验证了该方案的优越性. 最后, 对工业 PON 的物理层发展趋势进行展望.

关键词 工业 PON; 超高速率; 超大连接; 低成本; 数字均衡技术

分类号 TN911

Key technologies and trends in the development of industrial passive optical networks

HUO Jiahao^{1)✉}, ZHANG Xiaoying¹⁾, GAO Kaiqiang²⁾, HUANGFU Wei¹⁾, LONG Keping¹⁾

1) Beijing Engineering and Technology Research Center for Convergence Networks and Ubiquitous Services, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

✉Corresponding author, E-mail: huojiahao@ustb.edu.cn

ABSTRACT With the proliferation of the industrial internet, passive optical networks (PON) have attracted attention from industry and academia. Industrial PONs need to meet the requirements of ultra-high speed, ultra-large connections, and low cost to be able to cope with diverse industrial internet scenarios. Physical layer modulation formats, multiplexing modes, transmission schemes, and digital signal processing algorithms have always been the focus of research in this field. Direct detection and 10 G devices are extensively studied due to their low cost and ease of deployment. However, meeting the power budget targets of a high-speed PON can be challenging. Transmission of a high-order modulation signal can improve the system's capacity; however, it may also decrease the receiver's sensitivity. Polarization multiplexing technology, coherent detection, and advanced digital signal processing technology can be utilized to meet the demands of industrial PON, such as ultra-high speeds, ultra-large connections, ultra-high capacities, high receiver sensitivity, and high power budgets. The use of intensity modulation schemes at the transmitter would reduce the overall cost of the system. Herein, we propose a digital coherent detection system with polarization multiplexing intensity modulation suitable for industrial PON transmission. The 50 Gbit·s⁻¹ signals modulated with four-level pulse amplitude modulation (PAM 4) and on-off keying (OOK) are transmitted on the simulation platform. Performance assessments of back to back (BTB) transmission and fiber transmission over 20 km

收稿日期: 2022-12-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFB2900801); 国家自然科学基金资助项目 (62201033, U22A2005); 中国通信学会青年人才托举工程 (2021QNRC001); 广东省基础与应用基础研究基金联合基金-青年基金资助项目 (2020A1515111047); 青年教师国际交流成长计划 (QNXM20220039)

are studied to prove the superiority of this proposed scheme. A power budget of more than 32 and 36 dB can be achieved with the polarization multiplexing coherent detection system-based transmission of 50 Gbit·s⁻¹ PAM 4 and NRZ signals, respectively, on a 20 km C-band single-mode fiber at a threshold of 3.8×10^{-3} , which is a considerable improvement over intensity modulation direct detection systems. The superiority of the proposed scheme is further verified by the fact that the 100 Gbit·s⁻¹ PAM 4 signal has better transmission performance in the polarization multiplexing intensity modulation coherent detection system than the NRZ signal. Considering the system performance, the polarization multiplexing intensity modulation coherent detection scheme is expected to be one of the promising solutions for high-speed PON systems. Finally, the development trends of the physical layer of industrial PON are discussed.

KEY WORDS industrial PON; ultra-high speed; ultra-large connection; low cost; digital equalization technique

自 2017 年我国提出建设“互联网+先进制造业”发展工业互联网行动计划以来,工业互联网已经连续五年写入《政府工作报告》。作为工业互联网的重要组成部分,工业无源光网络(Passive optical network, PON)受到了业界的广泛关注。工业 PON 系统能够满足企业的生产控制、工序工艺数据采集、监测、视频监控等各种应用场景。国务院印发的《国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》明确指出,支持工业企业以互联网协议第 6 版(Internet protocol version 6, IPv6)、工业 PON、工业无线等技术改造工业企业内网,以 IPv6、软件定义网络以及新型蜂窝移动通信技术对工业企业外网进行升级改造,从政策层面鼓励企业开发和运用工业 PON。

PON 技术至今已历经多代的发展。全业务接入网论坛(Full service access network, FSAN)首先发起了第一个正式制定时分复用无源光网络(Time division multiplexed passive optical network, TDM-PON)通用规范的活动。1998—2001 年国际电信联盟电信标准化部门(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)做了进一步标准化工作。G.983 标准的第一个版本基于异步传输模式而建立,因此被称为异步传输模式无源光网络(Asynchronous transfer mode PON, ATM-PON)。随着对异步传输模式协议的使用逐步减少,标准进一步发展,形成了 G.983 标准的最终版本,即宽带无源光网络(Broadband passive optical network, BPON)^[1]。在 21 世纪初,美国电气和电子工程协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)提出的以太网无源光网络(Ethernet passive optical network, EPON)得到发展^[2],与此同时,FSAN/ITU-T 提出了吉比特无源光网络(Gigabit passive optical network, GPON)^[3-4]。

在 21 世纪初期,IEEE 和 FSAN/ITU-T 都进行了 10 G-PON 的标准化,形成了 XG-PON(10 Gigabit passive optical network)^[5]和 10 G-EPON^[6]。ITU-T

在 2016 年进行了对称的 10 G-PON 的标准化,即 XGS-PON(10-Gigabit symmetric passive optical network)^[7]。10 G-EPON 标准支持两种配置方案(对称的 10 Gbit·s⁻¹ 速率和上行 1 Gbit·s⁻¹、下行 10 Gbit·s⁻¹ 速率)。在过去的 10 余年里,10 Gbit·s⁻¹ 速率的 PON 在技术和成本上都是可行的,且 XG-PON 与 10 G-EPON 标准共存。在容量需求不断增长的驱动下,FSAN 在 2011 年开始研究 10 Gbit·s⁻¹ 速率以上的下一代 PON(Next generation PON stage 2, NG-PON2)^[8],并于 2012 年选用时分波分复用(Time and wavelength division multiplexing, TWDM)PON 作为主要的解决方案。

在工业互联网的发展驱动下,工业 PON3.0 正在规划,实现在工业 PON 局端设备、终端设备以及云端平台等主要领域整合实现更多的工业应用功能,例如边缘计算、各种低时延技术、更完备的网络和业务安全保障能力、更加开放的工业平台和工业 APP 实现能力等。

虽然 PON 技术在 10 Gbit·s⁻¹ 及以下具有较成熟的产业生态,但在工业互联网中应用需解决工业领域的一些特定问题。例如在智慧港口应用场景中,为了满足智能识别、自动驾驶、智能装卸、智能监控等对大容量和低时延的需求,工业 PON 技术需要在超高速率、超低时延、超大连接和低成本方面的关键技术进一步探索。随着数据传输速率的提高,以低成本实现超大连接的技术面临更大挑战,带宽受限、色散等问题需要新的解决方案,这离不开高性能的数字信号处理(Digital signal process, DSP)技术。本文将总结高速 PON 发展过程中已有的先进成果,梳理 NG-PON 所需技术,对不同系统方案进行研究,并给出实现超高速率、超大连接和低成本工业 PON 的可行方案。

1 NG PON 关键技术

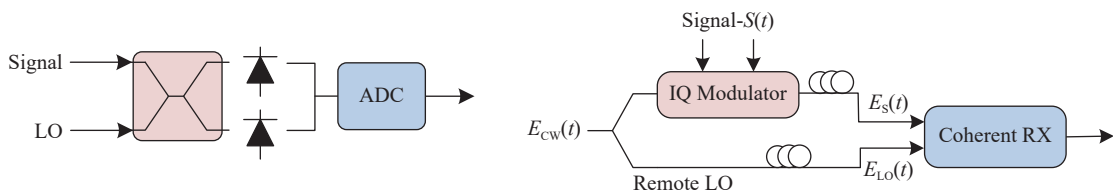
1.1 系统方案

用户需求的不断提高对 PON 的超高速率、超大连接和低成本提出了更高的要求,为提高传输

速率,一方面可以应用高阶调制格式,另一方面可以通过对信号多维度的复用以提高总速率,在这些方面当前已积累了很多研究成果^[9-13].

强度调制直接检测(Intensity modulation and direct detection, IM-DD)由于其低复杂度和低成本的特点被广泛关注^[14-15],但随着传输速率的提高,IM-DD已经不能满足已部署光分配网络(Optical distribution network, ODN)所需的链路预算,且随着其对器件带宽要求的提高,系统成本进一步增加.相干检测技术具有高接收灵敏度和高频谱效率的优点,且可以应用DSP技术对光纤链路损伤进行补偿,因此得到了越来越多的关注^[16-18].但相干检测的固有结构决定了其成本高于直接检测,高复杂度和高成本的缺点限制了其在实际中的应用.伦敦大学Taylor提出的基于相位分集检测的相干检测方案与配套的DSP技术,在不需本振激光器(LO)的情况下实现了与零差检测相同的接收灵敏度^[19].目前,研究人员提出了一系列简化的相干系统方

案.上海大学Li等^[20]提出的同相正交(In-phase and quadrature, IQ)交错检测接收机方案和华为Gui等^[21]提出的自零差相干系统方案如图1所示. IQ交错检测接收机方案在信号与LO之间预先设定一个频偏值,使一个符号中的两个样值之间产生一定的相位差,通过时间交错的方式实现相位分集检测.该方案采用了与外差检测相同的结构,但不需要数字/电下变频来恢复复数信号,从而简化了相干方案.自零差相干检测方案最大限度地继承了相干技术的优点,信号和LO都来自发射端的同一激光器,然后分别通过双工光纤的两个通道到接收机进行相干接收.该方案可以最大限度地减少激光器相位噪声的影响,并避免了频率偏移,从而降低了对激光器波长稳定性的需求且简化了DSP算法^[22].但在实际应用中,需要确保远端LO在接收端有稳定的偏振态,并最小化信号与LO之间的路径差.此外,为了确保接收到的光LO功率足够,远端发射的LO功率需要足够高以克服传输损耗.



Notes: ADC is analog to digital converter; $E_{cw}(t)$ is field of continuous wave; $E_s(t)$ is field of signal; $E_{lo}(t)$ is field of local oscillator; RX is receiver.

图1 简化的相干系统方案. (a) IQ 交错检测接收机架构; (b) 自零差相干系统架构

Fig.1 Simplified coherent system scheme: (a) configuration of the IQ-interleaved coherent detection scheme; (b) configuration of the self-homodyne coherent scheme

除了应用相干检测提高接收灵敏度以提高系统功率预算的方法外,值得注意的是,在已进行商业部署的PON中,系统到光网络单元(Optical network unit, ONU)的速率并非是固定的,最大的数据传输速率受功率预算最差的ONU限制,因此系统的带宽资源和功率预算未得到充分利用.有研究提出了灵活速率无源光网络(Flexible-rate passive optical network, FLCS-PON)的概念,FLCS-PON示意图如图2所示,光线路终端(Optical line terminal, OLT)到ONU的不同距离造成了不同的光链路损耗(Optical path loss, OPL),ONU3距OLT的距离最远,故其OPL最大,而FLCS-PON可以根据ONU的不同位置,基于其信道条件优化其能达到的数据速率,比如可以对一些信道条件好的ONU应用更高阶的调制格式.这种灵活性可用于优化PON资源的使用,有效提高传输速率和链路预算,从而可以支持更多工业PON节点的接入.对于IM-DD和相干PON,

当前已报道了不少实现灵活速率的方案^[23-24].为实现灵活速率,有研究者提出应用多载波解决方案,如离散多音频(Discrete multi-tone, DMT)调制^[25],但这种方案具有较高的峰均比要求且需要复杂的DSP,不适用于IM-DD系统和对功率预算要求高的场合.复旦大学Xing等^[26]在FLCS-PON基础上,进一步应用概率整形和功率调整等技术,降低光链路损耗,提升系统整体速率并提高接收机灵敏度,获得更多的链路预算,进一步使系统支持更多的用户.由图3可以看出,相较于传统PON,FLCS-

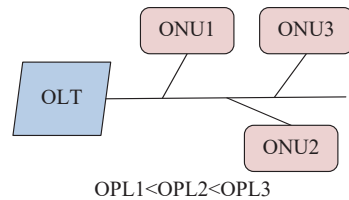
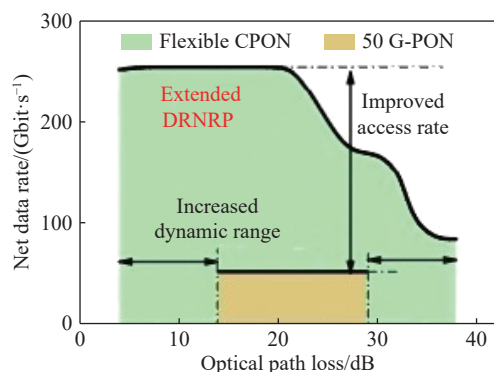


图2 FLCS-PON 在大范围PON中的实现图

Fig.2 Implementation diagram of the FLCS-PON in a large-scale PON



Notes: DRNRP is dynamic-range and net-rate product; CPON is coherent passive optical network.

图3 传统 PON 与 FLCS-PON 比较^[26]

Fig.3 Comparison of traditional PON with FLCS-PON^[26]

PON 可有效提高传输速率和链路预算^[26].

1.2 调制技术

传统的光接入网, 包括 E/GPON、10 G-EPON 和 XG-PON, 由于 IM-DD 技术发展成熟且成本低, 均采用开关键控 (On-off keying, OOK) 调制^[27-28]. 但随着传输速率增加, 低成本器件的带宽不足以支持 50 Gbit·s⁻¹ 以上高速率 OOK 信号的传输, 严重的滤波效应使系统性能进一步恶化. 对此, 可以应用高阶调制方式, 复用光载波幅度、频率、相位、时间、空间、偏振等维度, 从而提升数据传输速率并放宽系统对器件带宽的需求.

四电平脉冲幅度调制 (Four-level pulse amplitude modulation, PAM 4) 调制方式简单, 为高速 PON 调制格式提供了很好的选择, 是一种目前主流的调制方式. DMT 是一种基于正交频分复用技术的调制方法, 可以实现高的频谱利用率和灵活的调制加载技术, 对色散引入的频率选择性功率衰退具有相对较高的耐受性^[29-31]. 无载波幅度相位调制 (Carrier-less amplitude and phase, CAP) 作为另一种提高数据传输效率的低成本调制方案也得到了广泛关注^[32-34]. 东南大学 Zhang 等^[35] 在 O 波段使用 10 G 的直接调制激光器 (Direct modulation laser, DML) 实现了 50 Gbit·s⁻¹ PON 的传输, 比较了系统在 PAM、DMT 和 CAP 调制格式下的性能, 结果表明所有调制格式在硬判决前向纠错 (Hard decision-forward error correction, HD-FEC) 阈值下均可以实现 26 dB 以上的功率预算. 该团队也综合比较了 PAM 4、无载波幅度相位-16 进制正交幅度调制 (Carrier-less amplitude and phase-16 quadrature amplitude modulation, CAP-16QAM)、DMT-16QAM 调制格式下系统的性能, 结果表明 PAM 4 信号有最好的热噪声容限, DMT-16QAM 信号有最大的功率预算, 且

DMT-16QAM 相比于 PAM 4 和 CAP-16 QAM 信号有更低的计算复杂度^[9]. 高阶调制格式虽增加了数据传输速率, 但同时以降低接收机灵敏度为代价. 对此, 很多研究应用数字信号处理中的前后均衡技术以提高系统的性能, 下文将对此进行详细介绍.

1.3 多维复用技术

从 PON 的发展历程可以看到, 10 G-PON 及之前的 PON 技术均采用时分复用的方式, 随着对容量需求的增加, 在对速率为 40 Gbit·s⁻¹ 的 PON 研究中引入了波分复用 (Wavelength division multiplexing, WDM) 技术, 通过使用该技术, 数据在同一物理光纤中可以在不同的波长信道上传输, 从而实现容量的扩展^[10].

传输速率的增加导致系统所需带宽增加, 为提升频谱效率, 除了 WDM 外, 偏振复用 (Polarization multiplexed, PDM) 和空分复用 (Space division multiplexing, SDM) 技术也有很多研究成果. 上海交通大学 Xin Haiyun 等人采用偏振复用克拉默斯-克朗尼克 (Kramers-Kronig, KK) 接收机方案, 实现了 100 Gbit·s⁻¹ PDM-PAM4 信号在 25 km 传输距离的单模光纤传输, 最终实现了 32 dB 的功率预算^[11-12]. 复旦大学 Zhang 等^[13] 则使用强度调制器取代高成本的 IQ 调制器, 应用载波恢复, 并利用奈奎斯特脉冲整形技术降低对收发机带宽的要求, 每个偏振使用一个平衡光电二极管 (Balanced photodiode, BPD) 和一个模数转换器 (Analogue-to-digital converters, ADC) 通道实现外差相干, 实验证明了单波长 200 Gbit·s⁻¹ PDM-PAM 4 信号在 C 波段下行传输, 实现了高达 32.5 dB 的功率预算.

目前已有多个研究小组通过使用多芯光纤提高系统容量^[36-37], PON 系统中典型的基于多芯光纤的上下行传输方案如图 4 所示, 发送端调制后的信号扇入到多芯光纤, 在接收端, 信号从多芯光纤中扇出, 到达接收机完成光电转换. 诺基亚贝尔实验室 Mazur 等^[38] 使用实时 DSP 首次在多芯光纤上进行了现场实验. 华中科技大学 Feng 等^[39] 采用了 7 芯光纤, 下行传输中使用其中 1 芯传输本振光, 其余 6 芯传输 4 通道波长复用的偏振复用信号, 最终实现了 6×4×200 Gbit·s⁻¹ 超高容量传输. 当系统进一步向 100 Gbit·s⁻¹ 以上的大容量发展时, 将很有可能结合 SDM、WDM 和高阶调制格式以获得更高频谱效率.

1.4 光电器件选择

光电器件的选择是决定 PON 成本的关键性因

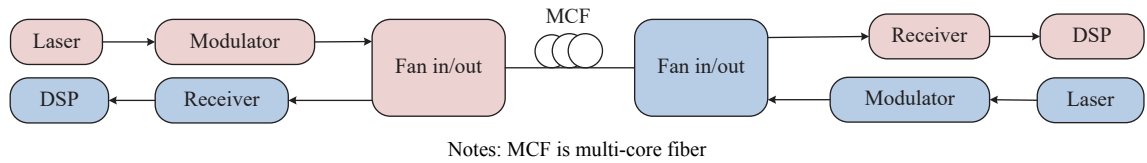


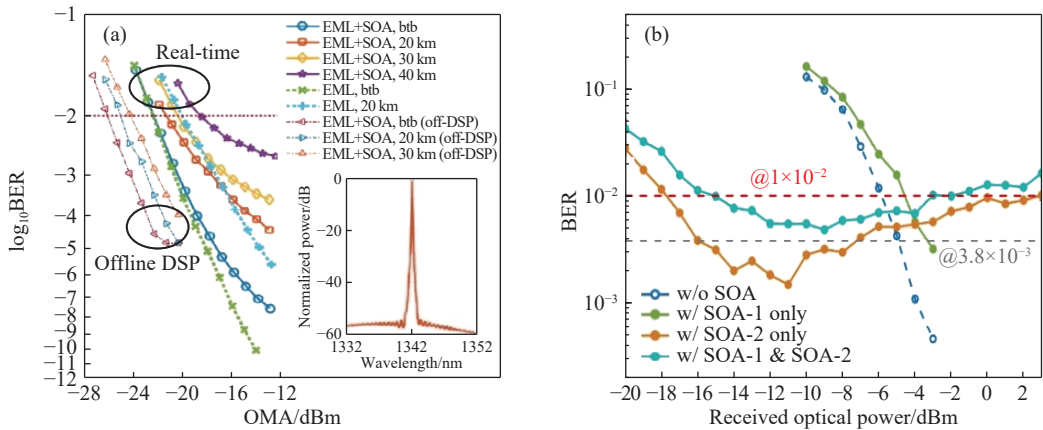
图4 基于多芯光纤的上下行传输方案

Fig.4 Scheme of upstream and downstream transmissions over a multicore fiber

素. 在发射端, 电吸收调制激光器 (Electro absorption modulated laser, EML) 由于较高的带宽和高集成度, 可以调制高速信号受到广泛关注; DML 具有成本低、体积小、插入损耗小、驱动电压低、光输出功率高等优点, 这样的特性也使其广泛应用于 TWDM-PON 系统的 ONU 发射机. 在接收端, 信号由光电二极管 (Positive intrinsic-negative, PIN) 或雪崩光电二极管 (Avalanche photo diode, APD) 探测, APD 相对于 PIN 的增益更高, 接收电信号有较高的信噪比, 而 PIN 为了提高接收灵敏度, 通常会级联跨阻放大器 (Trans-impedance amplifier, TIA) 用于放大电信号. 10 G 器件相较于 25 G 器件发展更加成熟, 且 10 G 器件可以利用已部署的设备最小化部署成本, 因此, 为了在提高功率预算的同时保持低成本, 暨南大学 Liang 等^[27] 使用 10 G 的 DML 和 APD, 结合 DSP 算法传输 50 Gbit·s⁻¹ OOK 信号并达到了 29 dB 以上的功率预算. 上海交通大学 Zhang 等^[40] 采用商用 10 G DML 和 PIN-TIA, 在 HD-FEC 阈值下传输 50 Gbit·s⁻¹ PAM 4 信号实现了 29 dB 的功率预算. 然而, 在基于 DML 的高速系统中, 激光器啁啾和光纤色散引起的畸变严重限制了系统的性能, 在高传输速率系统中选用 10 G 的器件也会带来带宽受限问题, 因此上海交通大学 Bi 等^[41] 采用可调谐光滤波器以减小啁啾引起的畸变. 数字

信号均衡技术也被广泛应用, 如前向反馈算法 (Feed forward equalization, FFE)、最大似然估计 (Maximum likelihood sequence estimation, MLSE) 等. 但是复杂的均衡算法, 增加了 ONU 端的成本, 因此有研究在下行方向对信号进行预补偿, 上行方向在 OLT 端均衡信号来减轻 ONU 端的成本压力^[42].

对于 50 G-PON 而言, 为达到 32 dB 及以上的链路预算, 需要 10 dBm (分贝毫瓦) 以上的发射功率^[43]. 因此在对链路预算有更大需求的情况下, 不少实验都在发射端引入半导体光放大器 (Semiconductor optical amplifiers, SOA) 以获得更大的链路预算, 华为 Rosales 等^[44] 使用集成的 EML+SOA 为系统提供了 13 dBm 输出功率. 同样, 在 ONU 端也可以引入 SOA 用于提高链路预算^[45], 北京大学 Li 等^[46] 在 ONU 端部署反射半导体光放大器 (Reflective semiconductor optical amplifiers, RSOA) 作为前置放大器提高下行信号的光功率. 但从图 5 可以看出, 在发射端或接收端应用 SOA, 其应用条件均有一定限制^[45,47]. SOA 无论是在 OLT 端后置放大输出光信号, 还是在 ONU 端前置对接收光信号进行放大, 当其输出功率较大时, SOA 都会产生不同程度的非线性, 从而降低系统的性能^[47]. 此外, 应用 SOA 的系统由于其增益饱和特性还会受到模式效应的影响^[48].



Notes: BER—Bit error ratio; OMA—Optical modulation amplitude; btb—back to back; w/—with; w/o—without

图5 文献 [44] 和 [47] 中有无 SOA 的结果比较. (a) 文献 [44]; (b) 文献 [47]

Fig.5 Comparison of the results with and without SOA: (a) in reference [44]; (b) in reference [47]

1.5 数字信号处理算法

电信号经 ADC 转换为数字信号后, 应用 DSP 模块对信号的损伤进行补偿, DSP 技术当前已被广泛用来补偿系统的线性和非线性损伤^[49]. 低成本带限器件引入的符号间干扰 (Inter-symbol interference, ISI), 降低了信号传输质量. 从使用均衡算法的角度, 发射端的 Tomlinson-Harashima 预编码 (Tomlinson-Harashima precoding, THP) 和接收端的判决反馈均衡器 (Decision feedback equalizer, DFE) 都可以根据相邻的符号估算出 ISI, 从而可以预先进行消除. 通过 DSP 实现信道均衡可有效减轻码间干扰带来的损伤, 目前常用 FFE^[50]、DFE 等均衡技术. 复旦大学 Zhang 等^[51] 使用带宽受限的器件, 应用 99 个抽头的 DFE 达到了 26 dB 的功率预算. 上海交通大学 Xue 等^[52] 应用色散均衡技术和 FFE 均衡器, 达到了 -16 dBm 接收灵敏度. 但当线性码间干扰严重时, 接收端 FFE 和 DFE 分别会受到噪声增强和误差传播的影响, 不足以消除高速传输中的码间干扰^[50]. 对此, DFE 均衡器也可以用于 FFE 均衡之后, FFE 消除非因果码间干扰后, DFE 进一步抑制 FFE 均衡带来的噪声增强作用^[53]. 除此之外, 还有其他的均衡算法值得关注, 上海交通大学 Huang 等^[54] 比较了传统的均衡器 (FFE、DFE、Volterra、Volterra-DFE) 和深度学习均衡器 (神经网络、长短时记忆均衡器) 的性能, 结果表明 Volterra-DFE 有更好的性能、更低的成本、更好的泛化能力且易于优化.

在 IM-DD 系统中, 除带宽受限影响系统的性能之外, 色散也会导致频率选择性衰落问题^[55]. 虽然系统在 O 波段传输会避免严重的色散失真, 但 C 波段有成熟的 WDM 器件和放大器, 且其光纤损耗更低, 因此有很多减轻 C 波段色散的研究工作, 如色散补偿光纤、色散预补偿、单边带或残留边带调制、KK 接收机等. DSP 在对抗色散引起的码间干扰和功率衰落方面也发挥着关键作用^[56]. 华为 Tao 等^[57] 应用接收端均衡和前向纠错技术, 使色散导致的接收机灵敏度代价在 1 dB 以内. 日本 NTT 公司 Kanai 等^[16] 在下行传输的发射端使用带有啁啾控制的发射机和放大器, 避免了由光纤色散引起的信号失真问题. 除此之外, 也有神经网络或机器学习进行预均衡或后均衡、单边带调制结合 KK 接收机、高阶调制结合相干检测、编码和脉冲整形结合等方式用于减轻色散引入的损伤^[50].

由于成本的限制, 系统使用的器件通常会有较强的非线性, FFE 线性均衡可以减轻窄带宽器

件引起的失真, 但也加强了高频噪声, 光纤传输和平方检测会给系统带来非线性损伤. 对提升系统性能而言, 应用非线性补偿方案是必要的, 都灵理工大学 Wang 等^[58] 的实验证明应用相应的非线性补偿方案可为系统带来高达 3.3 dB 的灵敏度增益. 常见的非线性均衡方案包括 MLSE^[59], 基于 Volterra 的非线性均衡器^[60-65] 和基于神经网络的均衡方法等^[66]. 上海大学 Li 等^[47] 为了补偿由光收发机和 SOA 引起的线性和非线性损伤, 下行方向在 OLT 侧采用查找表 (Look up table, LUT) 预补偿, ONU 侧使用 FFE, 上行方向在 OLT 端使用二阶 Volterra 非线性均衡器, 在 25 km 传输距离的单模光纤的上下行传输中均实现了 18 dB 以上的链路预算. 复旦大学 Li 等^[67] 联合 Volterra 级数、记忆多项式和人工神经网络以减轻线性和非线性损伤. 此外, 基于微扰理论的发射机端预补偿技术和基于数字反向传输的技术也可以实现光纤非线性补偿. 在上述所提算法中, MLSE 算法计算复杂度较高. Volterra 均衡和基于神经网络的均衡也存在计算复杂度高的问题, 目前已提出了很多简化方案, 如减少信号拍频项的简化非线性均衡器^[68]、多项式非线性均衡器 (Polynomial nonlinear equalizer, PNLE)^[69] 等.

在考虑系统性能提升之外, 保持 ONU 端的低复杂度和低成本是必要的, 因此不少研究都提出了在 OLT 端应用预均衡的方案^[51,54,67,70]. 预均衡技术包括有限长单位冲激响应 (Finite impulse response, FIR) 滤波、频域均衡、LUT 和 THP 预编码等. 中兴通讯有限公司 Zhang 等^[71] 在 OLT 端应用数字色散预补偿、线性预均衡和 LUT 非线性预失真方案, ONU 端仅使用 5 个抽头的 FFE, 在保持 ONU 端低复杂度同时在 50 Gbit·s⁻¹ 传输系统中实现了 31 dB 的功率预算. 上海大学 Luo 等^[72] 在 OLT 端使用 THP 预均衡, 接收端同样使用 FFE, 提供了 TDM-PON 的高速低成本解决方案.

为了进一步克服带宽限制, 提高数据速率, 超奈奎斯特采样接收技术^[73] 也是很好的方法. 上海交通大学 Zhu 等^[74] 的实验结果已证明, 高阶调制格式和超奈奎斯特采样接收技术的组合在高速短距应用中是可行的. 四川大学杜慧琴等的实验结果也表明基于判决反馈均衡器级联超奈奎斯特技术的方案可有效恢复 PAM 4 信号^[75]. 除此之外, 有效改善数模转换器 (Digital to analog converter, DAC) 量化比特噪声^[76]、提升带宽容忍度的概率和几何整形技术^[77-81] 等也是重要的研究领域. 但这些高复杂度的算法限制了其在实际中的应用, 因此如

何降低高性能 DSP 算法的复杂度是当前研究的热点^[82-85]。

1.6 上行传输技术

在 PON 的下行传输中, OLT 到 ONU 的数据以广播的形式发送给不同的用户, 在上行方向, 由于 ONU 端用户的使用特点, 上行的信号是突发的, 需要突发模式下传输。由于不同 ONU 具有不同的发射功率, 且经不同的路径传输到 OLT, 最终到达 OLT 的是具有不同功率、不同载波相位、不同时钟, 甚至不同偏振态的信号, 因此对接收机的性能和数字信号处理算法提出很大的挑战。在上行方向, 除了对 DSP 常见性能和功耗的要求以外, 不仅需要宽动态范围的突发模式接收机来克服不同的功率电平, 而且需要突发模式接收机和均衡器快速收敛以减少突发模式开销, 提高上行传输效率^[62]。

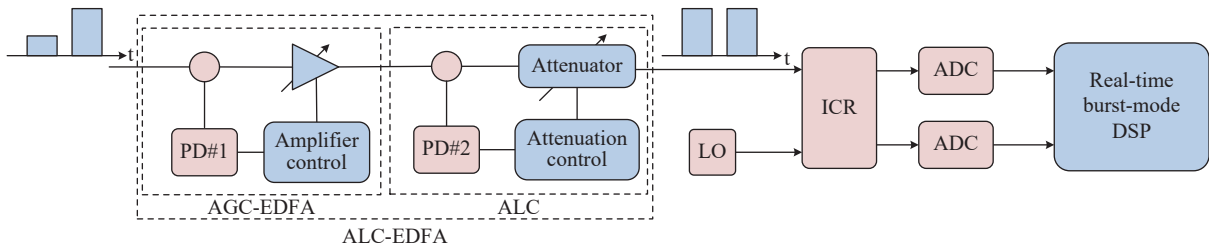
根据突发模式传输的固有特点, 为获得更好的系统性能, 根特大学 Yin 等^[86]应用了线性突发模式接收机, 通过自动增益控制和自动偏移控制循环回路, 该接收机可以在宽动态范围内保持线性运行, 数据路径的增益或直流偏移可以根据突发信号快速调整。此外, 上行突发信号连续帧之间的功率差异是显著的, 如果 TIA 的线性响应区域不足, 相干接收机的输入动态范围将严重受限。为了使相干接收机的接收功率具有较宽的动态范围, 复旦大学 Li 等^[87]提出了基于本振功率调整的突发模式相干接收机的结构, 每个突发对应的信号电平取决于突发信号的光功率, 因此, 当接收到强突发信号时, 将信号电平拉低, 使光电二极管(Photodiode, PD)检测到的信号功率保持恒定, 以增大

TIA 的输入动态范围。日本 NTT 公司 Koma 等^[88-89]提出了一种新的突发模式相干接收机结构, 其将 SOA 作为前置放大器, 并在相干接收机处使用 TIA, 这样采用光电两级增益控制减小了接收突发信号的功率变化, 增大了接收机的动态范围。日本 NTT 公司 Kanai 等^[16]提出的突发模式相干接收机结构如图 6 所示, 在上行方向, 由于在 ONU 端应用 SOA 会有高成本的问题, 故其将放大器应用在 OLT 端对接收光信号进行预放大。

而在信号恢复和处理方面, 为了提高上行传输效率, OLT 必须快速响应, 在短时间内恢复 ONU 发送的突发信号, 然后重置 OLT, 以应对下一个上行突发。常见的接收端的数字信号处理流程如图 7 所示。在这方面, 东南大学 Zhang 等^[90]应用全数字突发时钟和数据恢复算法, 进行了 PAM 4 信号上行速率为 50 Gbit·s⁻¹ 的传输实验, 达到了 25 dB 的功率预算。都灵理工大学 Torres-Ferrera 等^[91]应用 EDB 调制和基于 FFE 的突发模式自适应均衡方案, 实现上行速率为 25 Gbit·s⁻¹ 的传输。日本 NTT 公司 Koma 等^[92]在传统实时处理 DSP 的基础上改进, 增加了帧检测功能, 检测到每一个突发帧的到达从而触发逐帧的 DSP 操作。此外, 其团队通过在 ONU 发现过程中预计算 FIR 滤波器的抽头系数和在均衡前应用偏振前馈补偿, 缩短了突发信号用于自适应均衡的前导长度^[88]。

2 50 Gbit·s⁻¹ 速率的 PDM-PAM 4 相干 PON 系统验证

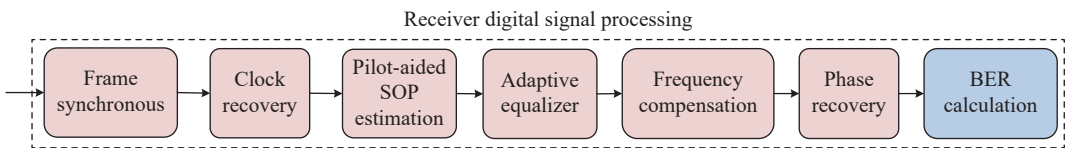
为实现工业 PON 中 50 Gbit·s⁻¹ 速率下超大连



Notes: AGC-EDFA is automatic gain controlled erbium-doped fiber amplifier; ALC is automatic level control; ICR is integrated coherent receiver.

图 6 突发模式接收机结构

Fig.6 Configuration of the burst mode receiver



Notes: SOP is state of polarization

图 7 上行突发模式 DSP 框图

Fig.7 Block diagram of digital signal processing in the burst mode of transmission

接需求,我们提出了偏振复用强度调制相干接收系统方案.系统上下行传输均采用偏振复用强度调制相干检测实现.以下行为例,我们使用 $50\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 速率的 PDM-PAM 4 信号,在相干探测下测试了其性能,仿真系统设置如图 8 所示,系统包含发射机、信道、接收机三部分,分别完成信号的调制发射、传输和接收.

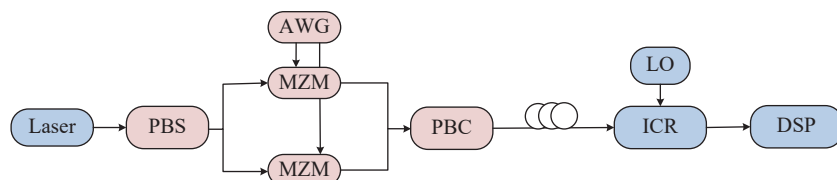
在发射端, MATLAB 首先生成伪随机二进制序列,并映射为 PAM 4 信号,信号通过任意波形发生器进行模数转换并输入到马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM) 中.偏振分束器首先将激光器发出的光信号分离成偏振正交的两路光载波,在 MZM 中完成 PAM 4 信号的调制上光后,调制后的信号经偏振合束器合并为一路发送信号,之后送入光纤传输链路.在接收机的前端,可调光衰减器首先调整信号的接收光功率,然后使用集成相干接收机检测光信号并完成光电转换,对检测到的信号采样并完成模数转换后,采样后的信号输入 DSP 模块完成对信号的恢复.

DSP 部分的处理框图如图 9 所示.在下行的 DSP 处理部分,首先需要对数字信号进行两倍采样,对采样后的信号通过计算其与训练符号的相关性找到训练序列的起点,即符号同步.之后采用 31 个抽头的蝶形结构自适应均衡器对信号进行偏振均衡解复用,并补偿由色散、偏振模色散和窄带滤波效应引起的码间干扰,步长值为 0.0005.对均衡处理后的信号进一步使用直接检测超奈奎斯特 (Direct detection faster-than-nyquist, DDFTN) 算法,该算法由后滤波器和 MLSE 算法模块组成,后滤波器的系数 α 设为 0.2, MLSE 的记忆长度为 5.最后,进行符号判决并计算误码率^[93-94].

我们在不使用光放大器的情况下 (发射机功

率为 0) 测试系统性能,进行了偏振复用相干检测系统和强度调制直接检测系统中 $50\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ PAM 4 和非归零码 (Non-return to zero, NRZ) 信号的传输,测试了其在背靠背 (back-to-back, BTB)、20 km 传输距离的 C 波和 O 波单模光纤上传输的性能,在强度调制直接检测系统中使用 31 个抽头的 FFE 均衡算法,步长值为 0.0001, DDFTN 算法中,后滤波器系数 α 为 0.33, MLSE 的记忆长度为 7,结果如图 10(a) 和 (b) 所示.

从图 10 中可以看出,在 3.8×10^{-3} 阈值下, 20 km 传输距离的 C 波单模光纤上应用偏振复用相干检测系统传输速率 $50\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ PAM 4 和 NRZ 信号分别可达到 32 dB 和 36 dB 以上的功率预算,而对于强度调制直接检测系统在背靠背和 20 km 传输距离的 O 波单模光纤中的传输而言, PAM 4 和 NRZ 信号仅实现了 14 dB 和 11 dB 的功率预算,当在 20 km 传输距离的 C 波单模光纤中传输 NRZ 信号时,信号严重受到带宽受限和色散的影响,数字信号处理算法已无法有效补偿信号所受的损伤.由此可见,速率 $50\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 NRZ 信号和 PAM 4 信号在偏振复用相干检测系统中传输时性能更佳,该系统在实现高功率预算方面有更好的发展潜力.为进一步探究更高速率情况下的系统性能,进行了速率为 $100\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 PAM 4 和 NRZ 信号的传输,此时系统带宽为 12.5 GHz,结果如图 10(c) 和 (d) 所示.当传输速率达到 $100\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,强度调制直接检测系统难以达到目标功率预算.对于偏振复用相干检测系统而言,系统仍然可以达到 3.8×10^{-3} 阈值,进一步验证了该系统的优越性.在调制格式选择上可以发现, $50\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 速率下使用 NRZ 调制格式有更佳的性能表现,而对于未来 $100\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 传输速率, PAM 4 信号的性能明显优于 NRZ 信号.



Notes: PBS is polarization beam splitter; AWG is arbitrary-waveform generator; PBC is polarization beam combiner

图 8 偏振复用相干探测系统实验设置

Fig.8 Experimental setup of PDM-PAM4 with the coherent system

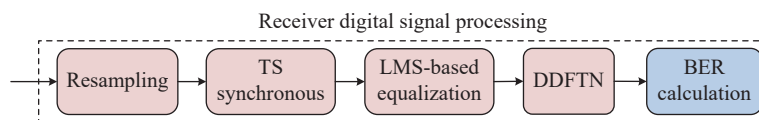


图 9 下行 DSP 处理框图

Fig.9 Offline DSP blocks of signal recovery

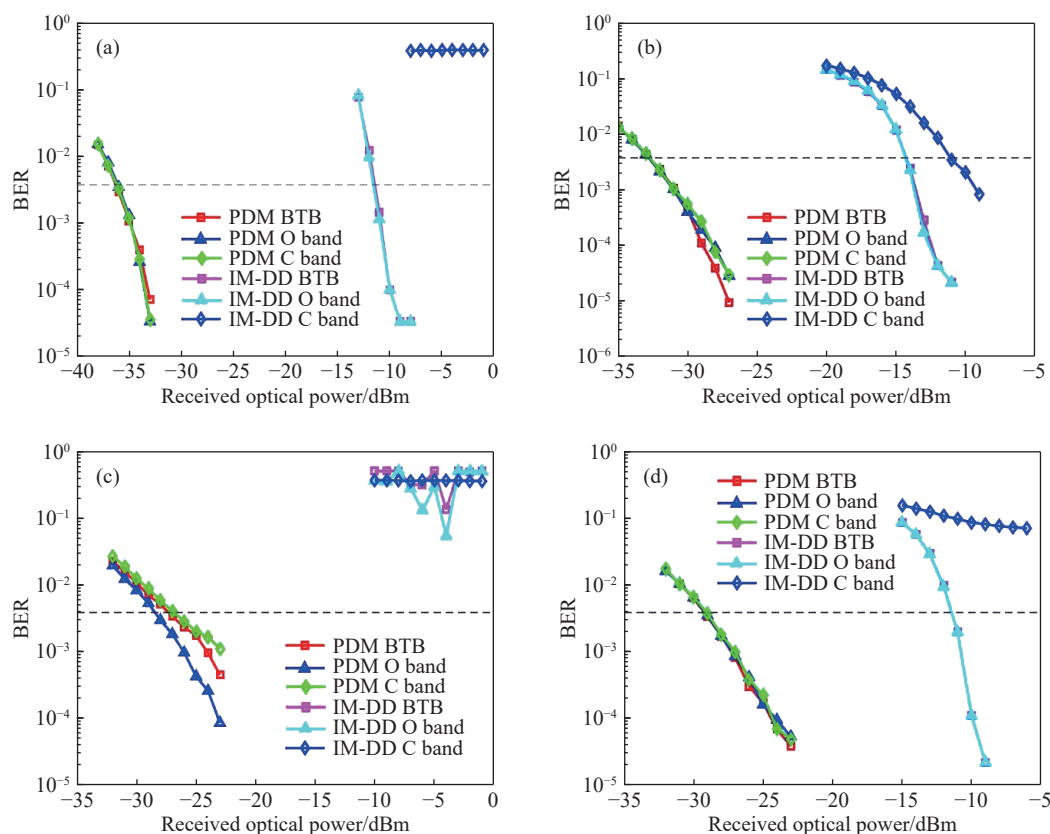


图 10 BER 与信号接收光功率的关系曲线图。(a) 50 Gbit·s⁻¹ NRZ; (b) 50 Gbit·s⁻¹ PAM 4; (c) 100 Gbit·s⁻¹ NRZ; (d) 100 Gbit·s⁻¹ PAM 4

Fig.10 BER as a function of the received optical power: (a) 50 Gbit·s⁻¹ NRZ; (b) 50 Gbit·s⁻¹ PAM 4; (c) 100 Gbit·s⁻¹ NRZ; (d) 100 Gbit·s⁻¹ PAM 4

此外,应用多芯光纤代替原来的单模光纤还可以进一步提高系统容量,相关成果已经被报道^[95-97]。

3 结论

本文介绍了高速 PON 的发展现状,对 PON 系统涉及的调制、复用、数字信号处理、上行突发模式传输等技术的发展进行了总结与分析,并介绍了我们的相关工作。直接检测和 10 G 的器件可以较好地满足 PON 系统对低成本的需求,但为实现高功率预算,相干检测结合数字信号处理算法或许是更佳的选择方案。应用高阶调制格式可以提高系统容量,但随着阶数增加,系统接收机灵敏度会降低。因此综合考虑系统性能、系统复杂度等方面,偏振复用强度调制相干检测有希望成为高速 PON 理想的系统方案之一。针对工业 PON 超高速、超大连接、低成本需求,该方案应用偏振复用技术提升系统的传输容量,使用相干检测和先进的数字信号处理技术,提高接收灵敏度,实现更高的功率预算需求,在发射端选用强度调制的方案,降低了发射机和接收机 LO 的成本。从仿真实验结果可以看出,速率为 100 Gbit·s⁻¹ 的 PAM 4 信号在偏振复用强度调制相干检测系统中的传输具有明显的性能优势,展现出了适用于工业 PON 的良好潜力。

参 考 文 献

- [1] ITU-T Study Group 15. ITU-T Recommendation G. 983 Series *Broadband Passive Optical Network*. Geneva: ITU-T Study Group 15, 2005
- [2] Kramer G, Pesavento G. Ethernet passive optical network (EPON): Building a next-generation optical access network. *IEEE Commun Mag*, 2002, 40(2): 66
- [3] ITU-T Study Group 15. ITU-T Recommendation G. 984 Series *Gigabit Capable Passive Optical Network (G-PON)*. Geneva: ITU-T Study Group 15, 2008
- [4] Bonk R, Geng D, Khotimsky D, et al. 50G-PON: The first ITU-T higher-speed PON system. *IEEE Commun Mag*, 2022, 60(3): 48
- [5] ITU-T Study Group 15. ITU-T Recommendation G. 987 Series 10 *Gigabit Capable Passive Optical Network (XG-PON)*. Geneva: ITU-T Study Group 15, 2016
- [6] IEEE Computer Society. IEEE 802.3av-2009 *CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks*. New York: IEEE, 2009
- [7] ITU-T Study Group 15. ITU-T Recommendation G. 9807 Series 10 *Gigabit Capable Symmetric Passive Optical Network (XGS-PON)*. Geneva: ITU-T Study Group 15, 2016
- [8] ITU-T Study Group 15. ITU-T Recommendation G. 989 Series 40-*Gigabit-capable Passive Optical Networks (NG-PON2): General Requirements*. Geneva: ITU-T Study Group 15, 2013

- [9] Zhou Q Y, Zhang J, Zhu M, et al. Performance comparison of advanced modulation formats for low-bandwidth optics-based 50-Gb/s/ λ PON at O-band // *International Conference on Optical Communications and Networks*. Qufu, 2021: 1
- [10] Matsushita A, Nakamura M, Yamamoto S, et al. 41-Tbps C-Band WDM transmission with 10-bps/Hz spectral efficiency using 1-Tbps/ λ signals. *J Light Technol*, 2020, 38(11): 2905
- [11] Xin H Y, Kong D M, Zhang K, et al. 100 GBPS simplified coherent PON using carrier-suppressed PDM-PAM-4 and phase-recovery-free KK detection // *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*. Dublin, 2019: 1
- [12] Xin H Y, Zhang X L, Kong D M, et al. Carrier-recovery-free KK detection for PDM-bipolar-PAM in 100 Gb/s simplified coherent PON // *Optical Fiber Communication Conference*. San Francisco, 2021: F2H. 4
- [13] Zhang J, Yu J J, Li X Y, et al. 200 Gbit/s/ λ PDM-PAM-4 PON system based on intensity modulation and coherent detection. *J Opt Commun Netw*, 2020, 12(1): A1
- [14] Wang H Y, Torres-Ferrera P, Rizzelli G, et al. 200 Gbps/ λ PON downstream C-band direct-detection links with ≥ 29 dB power budget. *Appl Sci*, 2022, 12(7): 3538
- [15] Wei J L, Rahman T, Calabrò S, et al. Experimental demonstration of advanced modulation formats for data center networks on 200 Gb/s lane rate IMDD links. *Opt Express*, 2020, 28(23): 35240
- [16] Kanai T, Fujiwara M, Igarashi R, et al. Symmetric 10 Gbit/s 40-km reach DSP-based TDM-PON with a power budget over 50 dB. *Opt Express*, 2021, 29(11): 17499
- [17] Kanai T, Koma R, Kani J I, et al. Future long-reach optical access network with digital coherent technologies // *Conference on Lasers and Electro-Optics*. San Jose, 2021: STh1I. 5
- [18] Faruk M S, Li X, Nasset D, et al. Coherent passive optical networks: Why, when, and how. *IEEE Commun Mag*, 2021, 59(12): 112
- [19] Taylor M G. Coherent detection method using DSP for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16(2): 674
- [20] Li Z X, Yin F, Huang X G, et al. Demonstration of a 50G-PON with a 45-dB power budget using an IQ-interleaved coherent detection scheme. *Opt Express*, 2021, 29(20): 32523
- [21] Gui T, Wang X F, Tang M, et al. Real-time demonstration of homodyne coherent bidirectional transmission for next-generation data center interconnects. *J Light Technol*, 2021, 39(4): 1231
- [22] Zhang R, Chen Y W, Kuzmin K, et al. Intra-data center 120Gbaud/DP-16QAM self-homodyne coherent links with simplified coherent DSP // *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2022: W1G. 1
- [23] Li B R, Nasset D, Liu D K, et al. DSP enabled next generation flexible PON for 50G and beyond // *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2022: M3G. 1
- [24] Houtsma V E, van Veen D T. Investigation of modulation schemes for flexible line-rate high-speed TDM-PON. *J Light Technol*, 2020, 38(12): 3261
- [25] Lee J, Dong P, Kaneda N, et al. Discrete multi-tone transmission for short-reach optical connections // *2016 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC)*. Anaheim, 2016: 1
- [26] Xing S Z, Li G Q, Chen J, et al. First demonstration of PS-QAM based flexible coherent PON in burst-mode with 300G peak-rate and record dynamic-range and net-rate product up to 7, 104 dB-Gbps // *Optical Fiber Communications Conference*. San Diego, 2022: 1
- [27] Liang W X, Wang H D, Wei J L, et al. DSP-enabled 50G OOK-PON with beyond 29 dB power budget using O-band 10G DML and 10G APD. *Opt Commun*, 2022, 504: 127486
- [28] Wu X, Zhang J W, Lau A P T, et al. Low-complexity absolute-term based nonlinear equalizer with weight sharing for C-band 85-GBaud OOK transmission over a 100-km SSMF. *Opt Lett*, 2022, 47(6): 1565
- [29] Wang W, Zou D D, Wang X W, et al. 100 Gbit/s/ λ DMT-PON system based on intensity modulation and heterodyne coherent detection. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2021, 33(18): 1014
- [30] Zhang J, Liu Q, Zhu M Y, et al. Beyond 200-Gb/s/ λ DMT signal transmission with NGMI optimization and volterra equalization. *J Light Technol*, 2021, 39(18): 5837
- [31] Le S T, Drenski T, Hills A, et al. Real-time 100 Gb/s IM/DD DMT with chirp managed laser supporting 400 Gb/CWDM-4 over 20 km // *Optical Fiber Communications Conference*. San Diego, 2022: 1
- [32] Liang S Y, Jiang Z H, Qiao L, et al. Faster-than-nyquist precoded CAP modulation visible light communication system based on nonlinear weighted look-up table predistortion. *IEEE Photonics J*, 2018, 10(1): 1
- [33] van Veen D T, Houtsma V E. Flexible 50G PON based on multi-rate PAM and CAP-4 with user interleaving // *45th European Conference on Optical Communication*. Dublin, 2019: 1
- [34] Izquierdo D, Altabas J A, Clemente J, et al. Flexible resource provisioning of coherent PONs based on non-orthogonal multiple access and CAP signals // *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*. Dublin, 2019: 1
- [35] Zhang J, Zhu M, Wang K H, et al. The best modulation format for symmetrical single-wavelength 50-Gb/s PON at O-band: PAM, CAP or DMT? // *Optical Fiber Communication Conference*. San Francisco, 2021: W1H. 3
- [36] Mazur M, Dallachiesa L, Fontaine N K, et al. Real-time transmission over 2x55 km all 7-core coupled-core multi-core fiber link // *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2022: Th4A. 1
- [37] Diamantopoulos N P P, Nishi H, Fujii T, et al. 4 $\times$ 56-GBaud PAM-4 SDM transmission over 5.9-km 125- μ m-cladding MCF using III-V-on-Si DMLs // *2020 Optical Fiber Communications Conference*. San Diego, 2020: 1
- [38] Mazur M, Ryf R, Fontaine N K, et al. Real-time MIMO transmission over field-deployed coupled-core multi-core fibers //

- Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2022: Th4B. 8
- [39] Feng Z H, Xu L, Wu Q, et al. Ultra-high capacity WDM-SDM optical access network with self-homodyne detection downstream and 32QAM-FBMC upstream. *Opt Express*, 2017, 25(6): 5951
- [40] Zhang K, Zhuge Q B, Xin H Y, et al. Design and analysis of high-speed optical access networks in the O-band with DSP-free ONUs and low-bandwidth optics. *Opt Express*, 2018, 26(21): 27873
- [41] Bi M H, Xiao S L, Yi L L, et al. Power budget improvement of symmetric 40-Gb/s DML-based TWDM-PON system. *Opt Express*, 2014, 22(6): 6925
- [42] Zhang K, Zhuge Q B, Xin H Y, et al. Demonstration of 50 Gb/s/λ symmetric PAM4 TDM-PON with 10 G-class optics and DSP-free ONUs in the O-band // 2018 *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2018: M1B. 5
- [43] Rosales R, Cano I, Nasset D, et al. Achieving high budget classes in the downstream link of 50 G-PON. *J Opt Commun Netw*, 2021, 13(8): D13
- [44] Rosales R, Cano I N, Nasset D, et al. 50G-PON downstream link up to 40 km with a 1342 nm integrated EML+ SOA. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2022, 34(6): 306
- [45] Zhang J, Yu J 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 Light Technol*, 2020, 38(2): 185
- [46] Li J H, Lin B J, He Y Q, et al. DSP-enhanced TWDM-PON with DSB modulation towards 100-GB/S // 2014 *13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. Suzhou, 2014: 1
- [47] Li Z X, Li Y W, Luo S Y, et al. SOA amplified 100 Gb/s/λ PAM-4 TDM-PON supporting PR-30 power budget with > 18 dB dynamic range. *Micromachines*, 2022, 13(3): 342
- [48] Wang K H, Zhang J, Zhao L, et al. Mitigation of pattern-dependent effect in SOA at O-band by using DSP. *J Light Technol*, 2019, 38(3): 590
- [49] Torres-Ferrera P, Wang H Y, Ferrero V, et al. 100 Gbps/λ PON downstream O-and C-band alternatives using direct-detection and linear-impairment equalization. *J Opt Commun Netw*, 2021, 13(2): A111
- [50] Xiang M, Fu S N, Xu O, et al. Advanced DSP enabled C-Band 112 Gbit/s/λ PAM-4 transmissions with severe bandwidth-constraint. *J Light Technol*, 2021, 40(4): 987
- [51] Zhang J, Wang K H, Wei Y R, et al. Symmetrical 50-Gb/s/λ PAM-4 TDM-PON at O-band supporting 26 dB+ loss budget using low-bandwidth optics and semiconductor optical amplifier // *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2020: Th1B. 3
- [52] Xue L, Yi L L, Li P X, et al. 50-Gb/s TDM-PON based on 10G-class devices by optics-simplified DSP // 2018 *Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*. San Diego, 2018: 1
- [53] Tang X Z, Qiao Y J, Chen Y W, et al. Digital pre-and post-equalization for C-band 112-Gb/s PAM4 short-reach transport systems. *J Light Technol*, 2020, 38(17): 4683
- [54] Huang L Y, Xu Y X, Jiang W Q, et al. Performance and complexity analysis of conventional and deep learning equalizers for the high-speed IMDD PON. *J Light Technol*, 2022, 40(14): 4528
- [55] Chen X, Antonelli C, Chandrasekhar S, et al. Kramers-Kronig receivers for 100-km datacenter interconnects. *J Light Technol*, 2018, 36(1): 79
- [56] Lu D X, Boateng B, Zhou X, et al. High-speed PON downstream transmission based on pre-configured KK scheme with CD pre-compensation and direct detection. *Opt Commun*, 2022, 510: 127906
- [57] Tao M H, Zheng J Y, Dong X L, et al. Improved dispersion tolerance for 50G-PON downstream transmission via receiver-side equalization // *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2019: M2B. 3
- [58] Wang H Y, Torres-Ferrera P, Rizzelli G, et al. 100 Gbps/λ C-band CD digital pre-compensated and direct-detection links with simple non-linear compensation. *IEEE Photonics J*, 2021, 13(4): 1
- [59] Li B R, Zhang K, Zhang D C, et al. DSP enabled next generation 50G TDM-PON. *J Opt Commun Netw*, 2020, 12(9): D1
- [60] Xi Y, Bi M H, Miao X, et al. A modified Volterra equalizer for compensation distortion in C-band DML-based short reach limited-bandwidth system with 80-Gb/s PAM-4 signals. *Opt Commun*, 2022, 513: 128105
- [61] Xue L, Lin R, Van Kerrebrouck J, et al. 100G PAM-4 PON with 34 dB power budget using joint nonlinear tomlinson-harashima precoding and Volterra equalization // *European Conference on Optical Communication (ECOC)*. Bordeaux, 2021: 1
- [62] Yang C W, Ye T, Zhang K, et al. A simple and accurate method to estimate the nonlinear performance of VCSEL IM-DD system // 2022 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. San Diego, 2022: 1
- [63] Kaneda N, Lee J, Chen Y K. Nonlinear equalizer for 112-Gb/s SSB-PAM4 in 80-km dispersion uncompensated link. // *Optical Fiber Communication Conference*, 2017: Tu2D. 5
- [64] Cho J, Le S T. Volterra equalization to compensate for transceiver nonlinearity: Performance and pitfalls. // 2022 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2022: 1
- [65] Reza A G, Rhee J K K. Blind nonlinearity mitigation of 10G DMLs using sparse Volterra equalizer in IM/DD PAM-4 transmission systems. *Opt Fiber Technol*, 2020, 59: 102322
- [66] Chan D W U, Zhou G, Wu X, et al. A compact 112-Gbaud PAM-4 silicon photonics transceiver for short-reach interconnects. *J Light Technol*, 2022, 40(8): 2265
- [67] Li G Q, Li Z Y, Ha Y, et al. Performance assessments of joint linear and nonlinear pre-equalization schemes in next generation IM/DD PON. *J Light Technol*, 2022, 40(16): 5478
- [68] Batista E L O, Seara R. On the performance of adaptive pruned Volterra filters. *Signal Process*, 2013, 93(7): 1909
- [69] Kuech F, Kellermann W. Orthogonalized power filters for

- nonlinear acoustic echo cancellation. *Signal Process*, 2006, 86(6): 1168
- [70] Li J C, Wang Z, Li X F, et al. Single-span IM/DD transmission over 120-km SMF with a silicon photonic mach-zehnder modulator and THP // *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2022: M2H. 3
- [71] Zhang J W, Yu J J, Shi J Y, et al. 64-Gb/s/A downstream transmission for PAM-4 TDM-PON with centralized DSP and 10G low-complexity receiver in C-band // *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. Gothenburg, 2017: 1
- [72] Luo S Y, Li Z X, Qu Y Z, et al. 112-Gb/s/ λ downstream transmission for TDM-PON with 31-dB power budget using 25-Gb/s optics and simple DSP in ONU // *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2020: Th3K. 4
- [73] An S H, Li J C, Li X F, et al. FTN SSB 16-QAM signal transmission and direct detection based on tomlinson-harashima precoding with computed coefficients. *J Light Technol*, 2021, 39(7): 2059
- [74] Zhu Y X, Wu Q, Yin L J, et al. Faster-than-nyquist subcarrier modulation utilizing digital brick-wall filter-based THP for band-limited DML-DD systems // *2021 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. Bordeaux, 2021: 1
- [75] Liu Q, Du H Q, Wu X L. A band-limited receiver technology based on PAM4 modulation for the short distance optical transmission system. *Telecommun Sci*, 2018, 34(3): 118
(刘群, 杜慧琴, 吴香林. 短距光传输系统中基于PAM4调制的带限接收技术. 电信科学, 2018, 34(3): 118)
- [76] Li F, Luo Z B, Yin M Z, et al. Architectures and key DSP techniques of next generation passive optical network (PON) // *2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. San Diego, 2022: 1
- [77] Böcherer G, Steiner F, Schulte P. Bandwidth efficient and rate-matched low-density parity-check coded modulation. *IEEE Trans Commun*, 2015, 63(12): 4651
- [78] Zhang S L, Yaman F. Constellation design with geometric and probabilistic shaping. *Opt Commun*, 2018, 409: 7
- [79] Li X Y, Yu J J, Zhao L, et al. 1-Tb/s photonics-aided vector millimeter-wave signal wireless delivery at D-band // *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*. San Diego, 2018: 1
- [80] Jia S, Zhang L, Wang S W, et al. 2 $\times$ 300 Gbit/s line rate PS-64QAM-OFDM THz photonic-wireless transmission. *J Light Technol*, 2020, 38(17): 4715
- [81] Zhao L, Sang B H, Shi J T, et al. Demonstration of 74.7 Gbit/s 4096QAM OFDM E-band wireless delivery over 700 m employing advanced DSP // *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2022: M1C. 1
- [82] Yu Y K, Choi M R, Bo T W, et al. Low-complexity second-order Volterra equalizer for DML-based IM/DD transmission system. *J Light Technol*, 2019, 38(7): 1735
- [83] Zhang Q W, Duan S H, Wang Z C, et al. Low complexity Volterra nonlinear equalizer based on weight sharing for 50 Gb/s PAM4 IM/DD transmission with 10G-class optics. *Opt Commun*, 2022, 508: 127762
- [84] Diamantopoulos N P, Nishi H, Kobayashi W, et al. On the complexity reduction of the second-order Volterra nonlinear equalizer for IM/DD systems. *J Light Technol*, 2018, 37(4): 1214
- [85] Matsuda K, Matsumoto R, Suzuki N. Hardware-efficient adaptive equalization and carrier phase recovery for 100-Gb/s/ λ -based coherent WDM-PON systems. *J Light Technol*, 2018, 36(8): 1492
- [86] Yin X, Coudyzer G, Ossieur P, et al. Linear burst-mode receivers for DSP-enabled passive optical networks // *Optical Fiber Communication Conference*. San Francisco, 2021: M3G. 1
- [87] Li G Q, Xing S Z, Li Z Y, et al. 200-Gb/s/ λ coherent TDM-PON with wide dynamic range of > 30-dB based on local oscillator power adjustment // *Optical Fiber Communication Conference*. San Diego, 2022: Th3E. 3
- [88] Koma R, Fujiwara M, Kani J I, et al. Burst-mode digital signal processing that pre-calculates FIR filter coefficients for digital coherent PON upstream. *J Opt Commun Netw*, 2018, 10(5): 461
- [89] Koma R, Fujiwara M, Kani J I, et al. Fast feed-forward optical and electrical gain control to extend the dynamic range of the burst-mode digital coherent receiver for high-speed TDM-PON systems. *J Light Technol*, 2021, 40(3): 647
- [90] Zhang J A, Zhou Q Y, Zhu M, et al. Demonstration of all-digital burst clock and data recovery for symmetrical 50 Gb/s/ λ PON based on low-bandwidth optics. *Opt Commun*, 2022, 516: 128266
- [91] Torres-Ferrera P, Wang H Y, Ferrero V, et al. Optimization of band-limited DSP-aided 25 and 50 Gb/s PON using 10G-class DML and APD. *J Light Technol*, 2019, 38(3): 608
- [92] Koma R, Fujiwara M, Kani J I, et al. Demonstration of real-time burst-mode digital coherent reception with wide dynamic range in DSP-based PON upstream. *J Light Technol*, 2016, 35(8): 1392
- [93] Zhou X, Zhong K P, Huo J H, et al. 112 Gb/s transmission over 80 km SSMF using PDM-PAM4 and coherent detection without optical amplifier. *Opt Express*, 2016, 24(15): 17359
- [94] Zhou X, Zhong K P, Huo J H, et al. 112-Gbit/s PDM-PAM4 transmission over 80-km SMF using digital coherent detection without optical amplifier // *10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. Prague, 2016: 1
- [95] Gao Y Y, Gao W P, Luo M, et al. 4 $\times$ 112 Gb/s/ λ MCF transmission using field PDM-PAM4 and coherent detection for datacenter applications. *IEEE Photonics J*, 2022, 14(1): 1
- [96] Gao W P, Gao Y Y, Lu D X, et al. Experimental demonstration of 448 Gb/s PS-PDM-PAM8 coherent transmission over multi-core fiber. *Opt Fiber Technol*, 2022, 69: 102849
- [97] Gao W P, Gao Y Y, Luo M, et al. Experimental investigation of PS-PDM-PAM8 coherent transmission over multi-core fiber // *2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*. Shanghai, 2021: 1