

基于 10G-class 器件的 NRZ-FTN 100G NG-PON2 传输算法

冯平兴¹,张洪波²

(1.成都工业学院 网络与通信工程学院,成都 611731;2.成都信息工程大学 通信工程学院,成都 611731)

摘要:为降低光线路终端和光网络单元光电器件的部署成本,基于现有成熟的 10G-class 光电器件,采用超奈奎斯特(FTN)窄带传输技术成功实现 4×25 Gb/s 不归零码(NRZ)信号的 100G 下一代无源光网络(NG-PON2)传输。通过仿真和离线实验验证:基于 FTN 的窄带传输技术进行 NRZ 传输,在 O 波段可以实现单模光纤(SMF)20km 传输,接收灵敏度可以达到 -25.8 dBm,且可以实现大于 33 dBm 的功率预算。该系统方案满足 NG-PON2 的功率预算要求,实现与上一代 PON 系统的兼容设计。

关键词:非归零码-超奈奎斯特;100G 下一代无源光网络;时分波分无源光网络

中图分类号:TN915.62 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)09-0053-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



NRZ-FTN 100G NG-PON2 transmission algorithm based on 10G-class device

FENG Pingxing¹, ZHANG Hongbo²

(1. College of Network and Communication Engineering, Chengdu Institute of Technology, Chengdu 611731, China;

2. College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Engineering, Chengdu 611731, China)

Abstract: In order to reduce the deployment cost of optoelectronic devices in optical terminal and optical network unit, the existing mature 10G-class optoelectronic devices, and the next generation passive optical network(NG-PON2) transmission of 4×25 Gb/s non-return-to-zero (NRZ) line code signal is successfully realized by using faster-than-nyquist (FTN) narrowband transmission technology. Through simulation and off-line experiment, it is proved that the narrowband transmission technology based on FTN can realize 20 km transmission of single mode fiber (SMF) in O-band. Meanwhile, the receiving sensitivity can reach -25.8 dBm, and the power budget can be greater than 33 dBm. The scheme of the system meets the power budget requirements of NG-PON2 and achieves compatible design with the previous generation PON system.

Key words: NRZ-FTN; 100G NG-PON2; TWDM-PON

0 引言

近年来,随着智能连接设备数量持续增长、物联网广泛发展、增强现实/虚拟现实(AR/VR)技术服务的兴起以及第四代、第五代移动前传和后传的巨大传输需求,对未来接入网带宽提出了更高的要求。根据 Cisco 网络流量预测,到 2021 年,宽带速率将是 2016

年的 2 倍^[1]。因此,要求下一代无源光网络(NG-PON2)具有更大的传输带宽。中国电信已经开始进行 10G PON 的部署,从长远来看,40G/100G PON 将是下一代光接入网的主要演进方向,5G 移动通信系统的演进也在加速 NG-PON2 技术的发展^[2];另一方面,在 PON 系统中,光分配网(ODN)占据了总成本开销的 90%^[3]。因此,在现有 ODN 上实现系统的带宽升级可降低重新铺设 PON 的成本,这是 NG-PON2 系统实现平滑升级的最佳方案。

目前,商用 10G-class 光电器件已经非常成熟,并广泛应用于 10G 以太网的无源光网络(EPON)和 XG-PON 系统中。10G-class 器件的选用可以降低系统实现平滑升级的成本,使得商业化应用更为可能。在现

收稿日期:2018-12-26。

作者简介:冯平兴(1981-),男,博士,副教授,近年来致力于盲信号处理与分离技术、光信号处理技术以及新一代通信与信息系统的研究与技术改进。主持了四川省教育厅自然科学类重点项目;参与多项光传输技术及光通信系统研究与设计。



已部署的 ODN 基础上,采用 10G-class 器件,设计 4×25 Gb/s 的 100G PON 系统,可以实现低成本的 PON 系统平滑升级。由于基于 10G-class 器件实现 25 G/λ 传输受器件窄带宽限制,为提高频谱利用率,解决器件带宽受限问题,有研究提出采用光正交频分复用(O-OFDM)^[4-8]技术或离散多频音调制(DMT)^[9-11]技术,这也是 PON 技术中被认为比较具有潜力的实现技术之一。然而,OFDM 技术具有峰均功率比(PAPR)高、频偏敏感和同步困难等特点,在芯片实现上还面临着实现复杂度高、芯片占用资源和功耗高以及芯片面积较大等诸多问题。此外,也有研究提出采用具有较高频谱效率的无载波幅度-光网络(CAP-PON)^[12-14]或采用基于数字滤波器组的数字滤波器多接入无源光网络(DFMA-PON)^[15,16]、非正交多接入无源光网络(NOMA-PON)^[17,18],还有传统的基于相位幅度调制(PAM)的 PON 系统及其改进的带限传输的 Poly-PAM-PON 系统,例如比较简单的 Poly-PAM 为电信号双二进制(EDB)调制。为提高接收灵敏度,实现长距离大容量 PON 传输,也有研究采用相干检测的偏振复用正交相移键控(QPSK)实现 100 G/λ 的波分复用无源光网络(WDM-PON)系统进行单模光纤(SMF)80 km 以上传输^[9]。然而,在这些 NG-PON2 系统方案中,相干方案实现复杂且成本较高。未来,随着客户侧本振(LO)激光器成本的降低,低成本的相干接入方案也将成为接入网发展的一个方向^[20,21]。而基于强度调制-直接检测(IM-DD)的 PAM 实现方式最为简单,且功耗较低,配合收端的非线性补偿和窄带补偿技术可以实现基于 10G-class 器件的 100G-PON 传输 (4×25 Gb/s),是 NG-PON2 中较为理想的实现方案。但是,收端的复杂数字信号处理技术将带来较大的设备成本和功耗开销。因此,采用单载波不归零码(NRZ)实现的方案仍是值得继续研究和考虑的主要备选方案之一。

为降低系统升级的成本压力 and 解决高速信号传输面临的带宽受限问题,本文提出基于 10G-class 器件的超奈奎斯特(FTN)传输技术,为 NG-PON2 标准建议和下一代接入网建设提供理论基础和备选方案。

1 色散分析

基于 10G-class 器件和 10G NRZ 传输 10G EPON 或 XG-PON 目前已成熟并逐步进入商用化阶段,NG-PON2 传输将实现 25G/λ 传输。基于现有 ODN,采用成熟商用的 10G-class 器件实现系统的平滑升级对业界极具吸引力。本文拟采用 10G 器件实现下行 25G

NRZ 信号在 SMF 中传输 20 km,收端光网络单元(ONUs)采用简单的前向均衡器(FFE)对符号间干扰(ISI)进行均衡,实现对窄带和色散引入的 ISI 补偿。

在带限系统中,为尽量降低带限系统对高频信号衰落的影响,在发端采用 FTN 技术将信号频谱限制在相对较窄的带宽内,即人为引入可控的 ISI;在收端通过一定的均衡技术可以将此 ISI 影响去除。同时,考虑到带限系统对高频衰落的敏感性,在发射机中对器件和信道的频率衰落特性进行预加重处理,即预先将发端信号中高频信号部分功率依据器件和信道衰落特性进行反补(预加重处理),反补后的信号通过器件和信道后,在接收机处接收到的信号频谱可以保持有效信号频谱的平坦性,从而降低高频衰落对有效信号失真的影响。

尽管发端预加重可以补偿高频信号衰落引入的信号失真的影响,但是预加重提高了高频信号功率,且会引入较高的 PAPR。在发射机发射电信号功率不变的情况下,较高的 PAPR 不仅在信号的调制过程中会引入非线性失真,而且还会因数字模拟转换器(DAC)的量化削波引入信号失真。因此,发端预加重在补偿信号高频衰落的同时,也会引入一定的信号损伤代价,需要合理设定预加重的范围以获得最佳的传输性能。

为降低 ONUs 成本和功耗开销,本文在 ONUs 中采用 7 抽头的 FFE 对接收到的信号进行均衡,去除发端 FTN 和光纤链路色散引入的 ISI 影响,恢复出发端信号。整个 PON 系统采用 1:64 分光设计,ODN 中光纤链路最远距离为 20 km,激光器工作在 O 波段,整个传输过程中引入的色散较小,O 波段 G.652 光纤的色散系数范围可以表示为:

$$\frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (1)$$

其中, D 表示色散函数, $\lambda_{0\min}$ 、 $\lambda_{0\max}$ 分别表示最小、最大中心波长, $S_{0\max}$ 表示最大色散斜率,其参数取值如表 1 所示。

表 1 G.652 光纤色散参数

参数	数值	单位
$\lambda_{0\min}$	1300	nm
$\lambda_{0\max}$	1324	nm
$S_{0\max}$	0.092	ps · (nm ² · km) ⁻¹

据此,可以估计出 1310 nm 激光信号在 G.652 光纤中传输 20 km 受到的色散影响范围大约为 $-26 \sim 18$ ps。由于 O 波段光信号在光纤中传输 20 km 受光纤色散影响较小,因此,采用 10G-class 器件实现 4×25 Gb/s 系统传输将主要解决系统带限的问题,即本文提出的发端采用 FTN 技术实现信号的带限传输。

2 系统结构

本文所设计的 100G NG-PON2 系统结构如图 1 所示。首先,发端通过 FTN 预处理,将信号频谱尽可能地限制在低频带宽内,降低带限系统对有效信号的高频衰减影响,避免了因高频衰减引入的信号损伤。然后,通过固定抽头滤波器对滤波后的信号进行预加重处理,提高高频信号功率,抵抗信道将引入的高频衰减。固定抽头滤波器的抽头系数可以通过预先发送已知信号进行标定。最后,通过数/模转换并经激光驱动后发送。为提高信号标定的准确性,本研究采用 2 次标定的方式实现:即第一次将采用小信号白噪或矢量网络分析仪(VNA)的方式获得信道响应的 S21 曲线,计算出其信道响应的抽头系数,并将该系数配置到发端预加重滤波器中;第二次将发射已知实际传输的 NRZ 信

号,采用类似的方式获得信号的频谱响应特性,并计算出其逆响应的滤波器抽头系数,将该系数配置到发端预加重滤波器作为最终系统预加重滤波器的抽头系数。采用 2 次定标的方法可以获得相对准确的预加重效果。最终,根据信道响应特点和预加重后信号的 PAPR,可以对预加重抽头系数进行适当调节,以获取最佳传输性能。

系统采用 IM-DD 的方式实现,发端采用 10G-class 的 O 波段电吸收调制激光器(EML)直接调制,最高发光功率为 10dBm, NRZ 信号源采用 SerDes 产生;传输链路采用 20km SMF,所采用激光器的激光波长在该光纤中受色散影响较小。

接收端采用雪崩光电二极管(APD)进行光/电转换。接收到的电信号在 ONU 中首先通过自动功率增益(AGC)对接收信号的功率进行适当调整,随后通过时钟数据恢复(CDR)环路实现采样时钟恢复,时钟恢复后的信号再进行数字信号处理。在数字信号处理部分,数字信号先通过匹配滤波器(MF)进行数字信号处理,数据经 FFE 后进入 FTN 处理单元,通过符号硬判决恢复出发端 NRZ 信号。

在实验系统中,模数转换器和数模转换器的

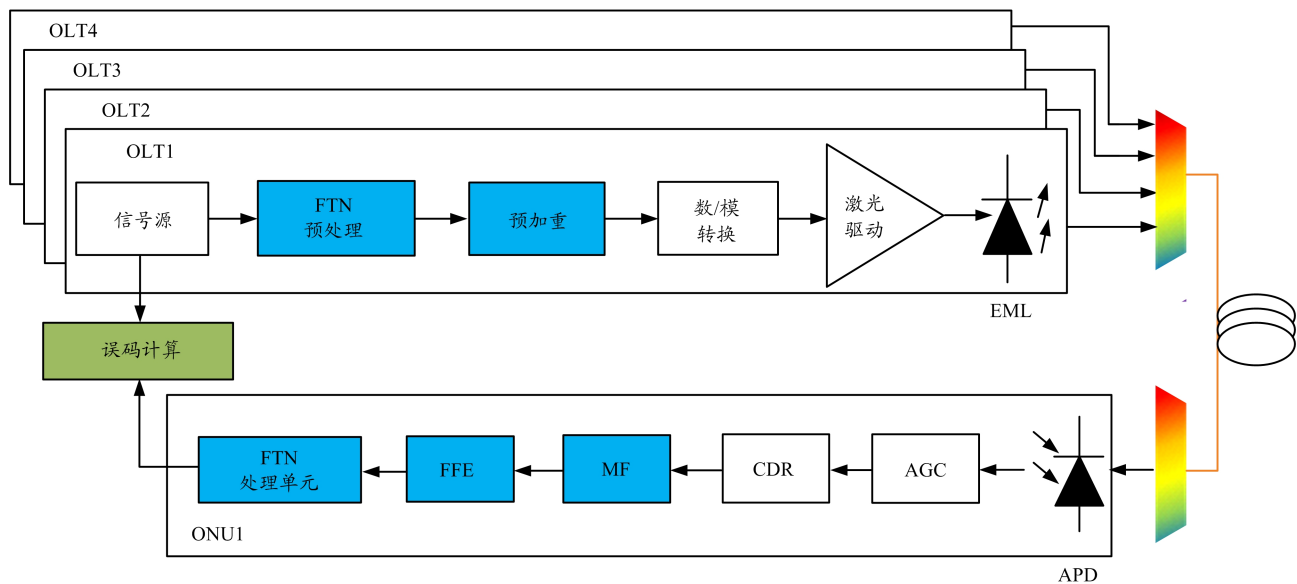


图 1 基于 10G-class 器件的 NRZ-FTN 100G NG-PON2 下行传输系统结构

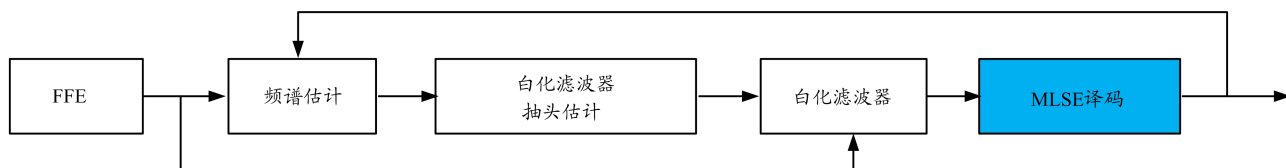


图 2 FTN 处理单元内部结构

有效比特位数为 4 bit,采样倍率为 2 倍,发射光组件(TOSA)和接收光组件(ROSA)的 10 dB 带宽约 13 GHz。

ONUs 中的 FTN 处理单元包含 FFE、频谱估计、白化滤波器和最大似然序列译码(MLSE)处理单元,FTN 处理单元的内部结构如图 2 所示。

为获得更好的噪声白化效果,可以通过优化频谱估计效果和增加白化滤波器抽头个数实现。从系统实现复杂度考虑,本文采用 AR 技术进行频谱估计,并采用 2~4 个白化滤波器抽头对有色噪声进行白化。

3 结果与分析

为验证本文所提出的基于 10G-class 器件的 NRZ-FTN 100G PON 下行传输算法,我们采用了 VPI TransmissionMaker 提供的光纤信道模型(包含激光器模型、光纤模型和 APD 模型)和 Matlab 进行光数字信号处理,对光背靠背(OBtB)和 SMF 20 km 传输进行了仿真,仿真结果如图 3 所示。在 (m,n) 中, m 表示白化滤波器抽头数, n 表示 FFE 抽头数。

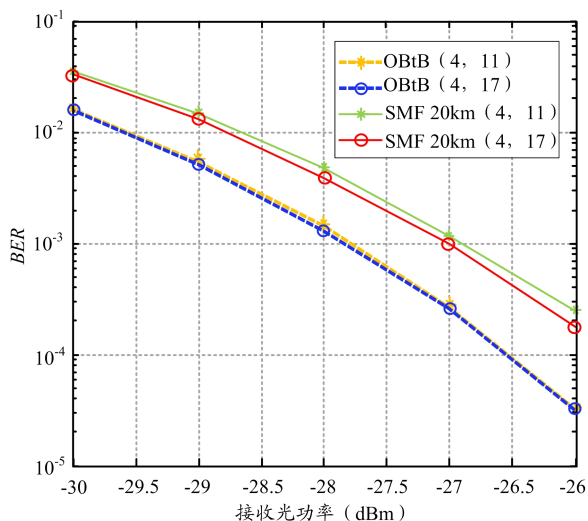


图3 NRZ-FTN 100G NG-PON2 仿真结果

从图 3 可以看出,以 $BER=10^{-3}$ 作为前向纠错(FEC)纠前门限,FTN 的白化滤波器采用 4 抽头配置,11 抽头 FFE 传输 20 km 后的接收光功率为 -26.9 dBm;增加 FFE 抽头数到 17,大约增加 0.1 dB 的功率余量。OBtB 传输在不同均衡器抽头数的条件下,接收光功率均为 -27.7 dBm,相比光纤 20 km 传输有 0.8 dBm 功率余量。从图 3 可以看出,FFE 采用 11 抽头具备足够的抗符号间串扰 ISI 能力,即使增加到 17 抽头也不会带来更好的功率余量,即在光纤色散较

小的情况下,光纤信号主要受到窄带器件影响而出现信号失真,从而引入 ISI。在收端均衡器配置中,11 抽头的 FFE 足以抵抗信道的线性 ISI 失真,而进一步的非线性失真和残留线性 ISI 影响则在后续的 FTN 均衡器中进行均衡。因此,从 PON 系统的资源功耗及需求的角度考虑,可以对抽头进行适当调节,以最低复杂度设计出满足需求的 NG-PON2 下行传输系统。

为进一步验证方案的可行性,本文对所设计的系统进行了离线实验验证,同样对 OBtB 和 SMF 20 km 传输进行离线测试,在均衡器配置上,FTN 的白化滤波器同样采用 4 抽头,线性 FFE 采用 11 和 17 抽头,离线测试结果如图 4 所示。

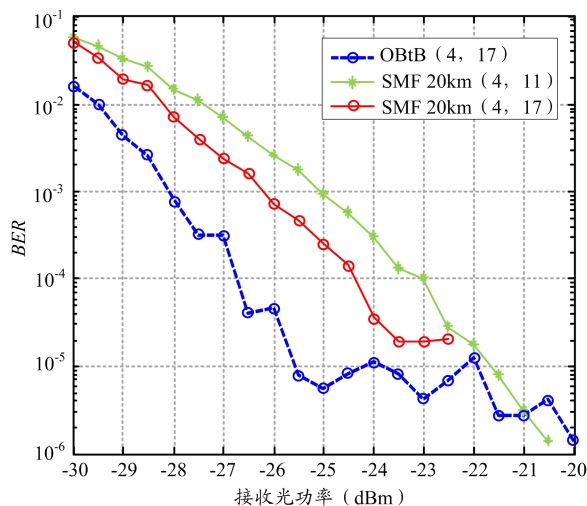


图4 NRZ-FTN 100G NG-PON2 离线结果

在离线测试中,同样以 FEC 纠前门限 $BER=10^{-3}$ 进行参考。OBtB 传输性能基本一致,接收光功率约为 -28 dBm,相比仿真有 0.3 dBm 功率收益。由于离线测试具有一定的随机性,仿真与离线结果基本一致。在 SMF 20 km 的传输实验结果中,11 抽头的 FFE 满足 FEC 纠前门限的最低接收光功率为 -24.9 dBm,增加 FFE 抽头个数到 17 后接收光功率可以进一步降低到 -26.2 dBm。离线测试中,17 抽头的 FFE 相比 11 抽头 FFE 可以获得 1.3 dB 功率余量。FFE 不同抽头的仿真与离线结果存在一定偏差,这主要是离线测试的光纤信道环境与仿真系统中的光纤模型有一定出入导致的。从抽头数对性能的影响看,增加抽头数都获得了不同程度的 BER 性能提升,在离线实测环境中,获得了 0.9 dBm 的功率余量。这说明光纤信道引入的 ISI 比仿真中引入的 ISI 大,这种串扰可能来自于收发设备频响中的频谱不平坦,而这种不平坦可能由电路阻抗不匹配导致的纹波引起。在此前的离线测试中,我

们已经发现 TOSA/ROSA 在封装时由于阻抗不匹配而引入的较大 ISI 问题;此外,光纤链路的 MPI 也会在直接检测后引入串扰。因此,在离线测试中,提高线性 FFE 的抽头数可以明显提升接收机的接收灵敏度,提高系统接收功率余量。

4 结束语

本文采用现有成熟商用 10G-class 光电器件,在 O 波段上实现 4×25 Gb/s PON 的 NRZ 传输。尽管双二进制只占用传统 NRZ 信号的一半带宽,但为降低 ONU 端的信号判决代价,采用传统的 NRZ OOK 信号,在收端辅以窄带传输技术,并通过软件仿真和离线实验验证等方法,对所提出的系统进行全面验证。仿真和离线验证结果表明:采用 NRZ-FTN 技术,可以在 10G-class 光电器件上实现单波 25 Gb/s 的 NRZ OOK 信号传输;同时,进行 O 波段 SMF 20 km 传输后,在 $BER=10^{-3}$ 的 FEC 纠错前门限,接收机灵敏度可到 -25.8 dBm。按照 2017 年 IEEE 100G-EPON 标准讨论会上的提议:100G-EPON 的发端平均光功率为 7.9~9.9 dBm,那么对应接收机功率预算最低可以到 33.7 dB,满足当前 10G PON 的最大功率预算要求。因此,本文所提出的系统可以实现 PON 的前向兼容,并利于实现 10G PON 的平滑演进。

参考文献:

- [1] Zettabyte Era: Trends and Analysis [M/OL]. New York: 2017. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>.
- [2] NESSET D, PON Roadmap Invited[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(1): 71–76.
- [3] WOOD R. TOWARDS THE CONVERGED NETWORK FOR THE 2020s CITY: 5G, NG-PON2 AND VIRTUALISATION[M/OL]. Analysys-mason, 2015. http://www.analysysmason.com/contentassets/dfa5521e67e148-64a6612d4b2e29739f/towards_converged_network_for_2020s_city_5g_ng-p-on2_virtualisation_rupert_wood.pdf
- [4] CVIJETIC N, QIAN D Y, HU J Q. 100 Gb/s Optical Access Based on Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing [J]. Ieee Communications Magazine, 2010, 48(7): 70–77.
- [5] LI C, HU R, LI H B B, et al. Digital OFDM-PON Based on Delta-Sigma Modulation Employing Binary IM-DD Channels[J]. Ieee Photonics Journal, 2017, 9(4): 124–127.
- [6] CHOW C W, YE H C H, WANG C H, et al. Signal Remodulation of OFDM-QAM for Long Reach Carrier Distributed Passive Optical Networks [J]. Ieee Photonics Technology Letters, 2009, 21(5–6): 715–717.
- [7] LIN B J, TANG X, FANG X, et al. Efficient frequency-domain channel equalisation methods for OFDM/OQAM-PON with intensity modulation and direct detection[J]. Iet Communications, 2017, 11(4): 872–877.
- [8] CHOW C W, YE H C H, WANG C H, et al. WDM extended reach passive optical networks using OFDM-QAM [J]. Optics Express, 2008, 16(8): 12096–12101.
- [9] LEE J, BREYER F, RANDEL S, et al. 24-Gb/s Transmission over 730 m of Multimode Fiber by Direct Modulation of an 850-nm VCSEL Using Discrete Multi-Tone Modulation [J]. IEEE Service Center, 2007, 6(3): 256–262.
- [10] AMIRALIZADEH S, YEKANI A, RUSCH L A. Discrete Multi-Tone Transmission With Optimized QAM Constellations for Short-Reach Optical Communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(15): 1–1.
- [11] CHEEMA S A, BALDA E R, WOLF M, et al. Unique Word DMT Schemes for Optical Systems with Intensity Modulation and Direct Detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 12(9): 1–1.
- [12] WEIC C, CHEN K Z, CHEN L W, et al. High-Capacity Carrierless Amplitude and Phase Modulation for WDM Long-Reach PON Featuring High Loss Budget [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(2): 1075–1082.
- [13] JUNWEN Z, JIANJUN Y, FAN L, et al. 11×5×93Gb/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.
- [14] HE J, SHI L, DENG L, et al. Novel design of N-dimensional CAP filters for 10Gb/s CAP-PON system[J]. Optics Letters, 2015, 40(10): 2409–12.
- [15] DUAN X, GIDDINGS R P, MANSOO, et al. Experimental Demonstration of Upstream Transmission in Digital Filter Multiple Access PONs With Real-Time Reconfigurable Optical Network Units[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(1): 45–52.
- [16] AL-RAWACHY E, GIDDINGS R P, TANG J M. Experimental demonstration of a DSP-based cross-channel interference cancellation technique for application in digital filter multiple access PONs [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3850–3862.
- [17] LIN B, ZHANG K, TANG X, et al. Optical MIMO NOMA-PON based on single carrier transmission and polarization interleaving[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 36: 412–416.
- [18] LIN B J, GHASSEMLOOY Z, TANG X, et al. Experimental demonstration of an NOMA-PON with single carrier transmission [J]. Optics Communications, 2017, 12(8): 66–70.
- [19] SUZUKI N, YOSHIMA S, MIURA H, et al. Demonstration of 100-Gb/s/lamda-Based Coherent WDM-PON System Using New AGC EDFA Based Upstream Preamplifier and Optically Superimposed AMCC Function[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 1415–1421.
- [20] SHAHPARI A, FERREIRA R M, LUIS R S, et al. Coherent Access: A Review[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(2): 1050–1058.
- [21] FERREIRA R M, SHAHPARI A, REIS J D, et al. Coherent UDWDM-PON With Dual-Polarization Transceivers in Real-Time [J]. Ieee Photonics Technology Letters, 2017, 29(6): 909–912.