

光 OFDM 收发机中基于信道滚降的均衡字长优化

汪微龙, 张俊杰

(上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室 特种光纤与先进通信
国际合作联合实验室 上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444)

摘要:在高速实时光正交频分复用(OOFDM)收发机系统中,接收端的信道均衡运算是该系统的主要功耗之一,为降低功耗,提出了一种基于信道滚降(roll off)均衡和解映射输入字长的优化方案。与FFT输出信号的字长相比,采用该方法最多能节省3bit的均衡输入信号字长。在强度调制直接检测(IMDD)的OOFDM收发机的实验平台上进行了实验验证,验证结果表明,在不同的FFT点数和接收光功率下,该字长优化方案具有高适用性、准确性和有效性。

关键词:光正交频分复用;滚降;字长优化

中图分类号:TN365 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2018)05-0005-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.05.002

Optimization of equilibrium word length based on channel roll off for optical OFDM transceiver

WANG Weilong, ZHANG Junjie

(Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks,
Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and
Advanced Communication, Shanghai Institute for Advanced Communication and
Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In the high speed real time optical orthogonal frequency division passive optical network transceiver system, the channel equalization calculation is one of the main power consumption. In this paper, an optimized resolution scheme of channel equalization and de-mapping based on channel roll off is proposed and a maximum of 3 bit resolution can be saved compared to the output resolution of FFT. The high suitability, accuracy and effectiveness of the proposed scheme are verified over IMDD OOFDM transceiver system at different received optical power and FFT sizes.

Key words: OOFDM; roll off; resolution optimization

0 引言

近年来,随着手机游戏、4k电视和云计算/服务等新兴业务的飞速发展,网络数据和用户呈指数式增长,接入网的带宽需求加剧。光正交频分复用(OOFDM)因为其高频谱利用率、灵活的带宽和业务管理、抗色散能力强以及对系统信道的高适应性等

收稿日期:2018-02-25。

基金项目:国家自然科学基金(61132004,61275073,61420106011)资助;上海市科学发展基金(16511104100,14dz1104800,16YF1403900)资助。

作者简介:汪微龙(1992-),男,硕士研究生,主要研究方为光接入网。

优点^[1,2],使得其成为未来软件定义光网络(SDON)中的关键技术。目前,OOFDM收发机的速率已经达到了几十吉比特/秒(Gb/s),随着系统速率的提高,会使系统复杂度提高、硬件资源增加,所以降低OOFDM收发机系统的逻辑资源是实现高速实时OOFDM收发机的关键所在。

在实时OOFDM收发机系统中,高速数字信号处理(DSP)和数模/模数转换器(DAC/ADC)需要消耗更多的系统资源和能量,其中快速傅里叶变换(FFT)占整个接收端系统功耗的16.25%^[3]。近10年来,我们的

课题组^[4-7]以及其它团队^[8,9]对 FFT 的优化进行了大量研究。在实时 OOFDM 接收机解调算法中,信道均衡和解映射算法为紧邻 FFT 计算后的算法,其计算所需要的字长来自 FFT 计算后的输出字长,且该算法消耗了约 10% 的 OOFDM 接收端的系统能量^[9],其功耗仅次于 FFT。因此,优化 OOFDM 收发机系统的信道均衡和解映射算法的输入字长将会降低数字信号处理的复杂度及功耗。在 OOFDM 收发机系统中,由于各个硬件器件会存在器件带宽的限制问题,导致传输信道在频域上具有明显的滚降(roll off)特性。因此,结合上述传输物理特性,本文提出一种基于信道滚降特性的信道均衡和解映射输入字长优化算法。

1 IMDD-OOFDM 收发机的系统架构

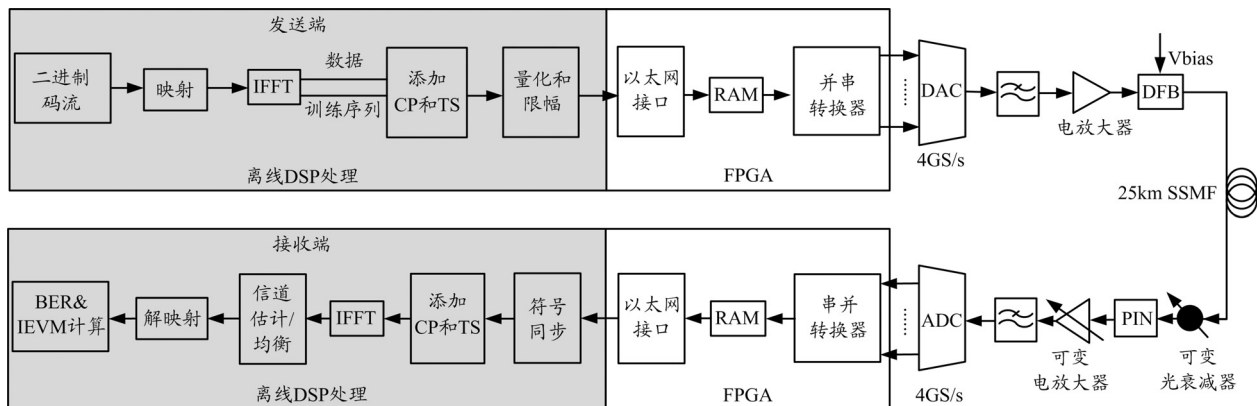
为了验证本文提出的基于信道滚降的信道均衡和解映射输入字长优化方法,我们采用的是基于 Xilinx ML605 的 IMDD OOFDM 收发机平台,其系统框图如图 1(a)所示。

在发送端,15 阶的伪随机二进制序列 (PRBS)码作为输入信号,经过串并转换,对并行的数据进行自适应的 QAM 调制(不同的子载波信道性能不同,采用比特加载以最大化系统的传输容量),其信号调试格式包括 4-QAM、8-QAM、16-QAM、32-QAM、64-QAM、128-QAM 和 256-QAM。由于 OOFDM 收发机系统采用了低通滤波器和交流耦合(AC-coupling)的模式,所以 0/1 号子载波是关闭的。所有数据子载波要满足共轭对称特性,以保证经过快速傅里叶逆变换(IFFT)后产生的 OFDM 信号是实数。IFFT(32 点、64

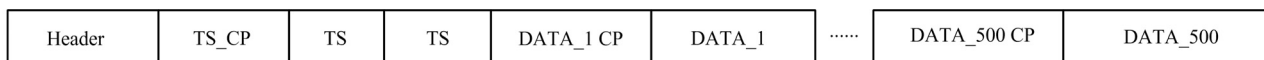
点、128 点)运算后,先对数据信号添加循环前缀(CP)和训练序列(TS),然后再进行量化(12bits)和限幅(12dB)处理。基于该硬件平台,产生的 OFDM 信号通过以太网接口以用户数据报协议(UDP)包的形式传送到 FPGA 板卡的 RAM 中。ML605 FPGA 板卡运行时钟为 125MHz,RAM 中数据经并串转换后进入 4GS/s@12bit DAC 中,DAC 模块输出的模拟信号经过 2.05GHz 低通滤波器进行放大生成基带电 OFDM 信号,最后用窄带分布反馈激光器(DFB-LD)把生成的基带电 OFDM 信号转换到光域中,并在光纤上传输。

在接收端,经过 25km SSMF 传输后,先用可变光衰减器(VOA)调整接收光功率,测评整个 OFDM 系统的性能,再经过一个 2.7GHz 的光电二极管(PIN)进行光电转换,电 OFDM 信号经过一个可变电放大器(VEA)后进入 2.05GHz 低通滤波器并进入 ADC 模块。实验中,先将 1M ADC 的采样数据保存在另一块 ML605 FPGA 板的内置 RAM 上,然后通过 UDP 协议把 FPGA 采集后的数据传到电脑上进行离线分析。OFDM 信号的离线 DSP 依次包含符号同步、去循环前缀、FFT(32 点、64 点、128 点)运算、信道估计/均衡和星座图解映射。最后,通过计算信号的逆误差向量幅度(IEVM)和误码率(BER)来评估整个系统的性能。

OFDM 帧格式如图 1(b)所示,每帧包含 1 个 80 个零的帧头,2 个训练序列(TS),其长度与 FFT 点数一样,有 500 个 OFDM 符号。每个训练序列和每个 OFDM 符号前有 16 点长度的循环前缀。OOFDM 收发机的系统参数如表 1 所示。



(a) OOFDM 收发机的系统框架



(b) OFDM 帧结构

图 1 OOFDM 收发机的系统框架和 OFDM 帧结构

表 1 OOFDM 收发机的系统参数

参数类型	参数值
FFT 点数(N)	32/64/128
数据载波	$2 - (N/2 - 1)$
调制格式	4/8/16/32/64/128/256-QAM
PRBS	$2^{15} - 1$
循环前缀	16 点
数据符号数	500

2 基于滚降的信道均衡和解映射的最优字长映射

2.1 系统信道滚降特性

在 OOFDM 收发机系统中,由于 ADC/DAC、分布反馈激光器(DFB-LD)和 PIN 等硬件器件带宽有限的特征,使得接收端得到的 OFDM 信号低频和高频部分的幅度不同,即高子载波处的信号幅度远远小于低子载波处的信号幅度,这也是本文提出的 OOFDM 收发机系统信道滚降原理的基础。在接收光功率为 -9dBm 的情况下,32 点、64 点和 128 点 FFT 得到的系统信道衰减特性^[10]分别如图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)所示。从

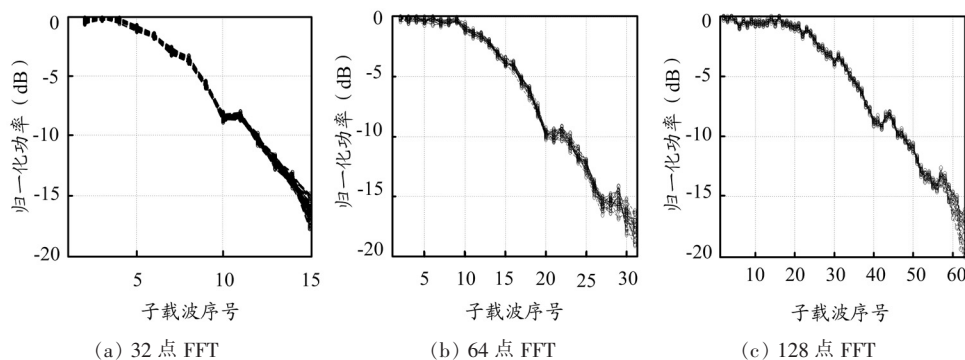


图 2 不同 FFT 点数下系统的信道滚降特性

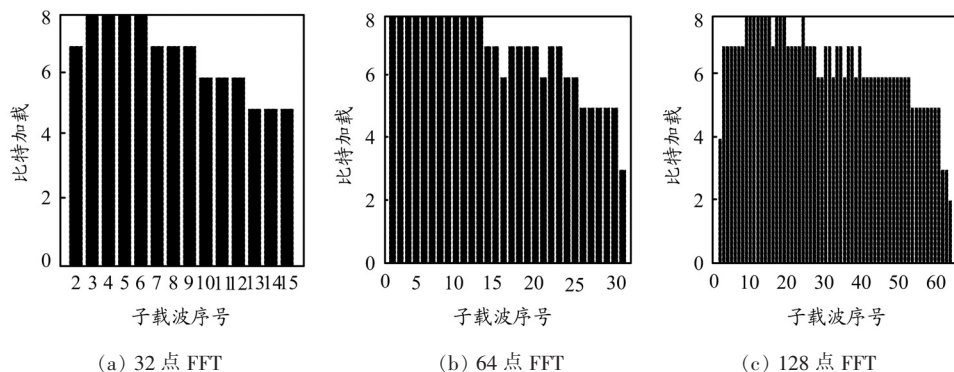


图 3 各子载波比特加载

图 2 可以看出,子载波序号号越大,信号功率衰减得越大,与低子载波处的信号相比,最高子载波处的信号功率衰减了约 18dB。为了保证系统的传输速率最大,同时又使得每个子载波的 BER 在 FEC 门限下,即每个子载波的 BER 低于 3.8×10^{-3} ,其发送端采用自适应 QAM 调制,各子载波的比特加载(bit loading)如图 3 所示。

2.2 最优字长映射表

由于在 OOFDM 收发机系统的发送端各信道的平均功率设定为相同,因此当接收到的 OFDM 信号进行 FFT 变换后,如果传输信道为理想信道,则各个子载波的信号接收平均功率都一样。但是,实际的 OOFDM 收发机传输系统中存在滚降,对不同的 FFT 而言,对应的高子载波的信号即使是最大幅度,也会呈现滚降特性,即子载波序号越大,其信号最大幅度会越小。因此,对不同子载波采用类似限幅的操作^[4],既能节约字长,又不影响 OOFDM 收发机的系统性能。

本文根据接收端 FFT 运算后的数据进行进一步优化。由于我们先前的课题已对 FFT 优化进行了大量研究^[4-7],所以本文的优化方案是在先前优化的基础上进行方案设计。我们在系统采集 10 位 ADC 数据,设定

这 10 位数据的输入格式为 5i5f,也即 FFT 的输入数据的整型字长为 5 位,小数部分字长为 5 位^[4]。因此,在本课题之前对 FFT 的字长优化的基础上,得到 32 点、64 点和 128 点 FFT 后输出数据的整数字长分别为 7bits、8bits 和 8bits,小数部分字长均为 3bits^[4-7]。

因为本文的优化方案为类似限幅的操作,所以这里主要是对输入均衡的信号的字长进行优化,小数部分字长保持不变。根据 FFT 计算后的信号,每个子载波信号的最大幅度和信道的滚降特性,同时,又因为在实际应用中的运算数据字长应该设置为整数,这就很容易得出采用本文的字长优化后的第 r 个子载波的整数部分字长 $L(r)$,其表达式为:

$$L(r)=\text{ceil}(\log_2(A_{\max})+1) \quad (1)$$

其中, $A_{\max}$ 为第 r 个子载波上的信号最大绝对值幅值, $\text{ceil}(\cdot)$ 函数功能是向上取整。式(1)与文献[4]采用的基于 FFT 中间级的限幅(clipping)技术相似,而本文只是比较字长优化前后信道均衡和解映射输入信号的整数部分字长差异,因此可得到如表 2 所示的 32 点、64 点、128

点 FFT 下各子载波信号整数部分的字长,也即表 2 为采用本文的优化方案后得到的最优字长映射表。

表 2 32 点、64 点、128 点 FFT 下各子载波信号整数部分的字长

不同的 FFT 点数	子载波序号	字长(bits)
32 点 FFT	2~5	7
	6~9	6
	10~12	5
	13~15	4
64 点 FFT	2~9	8
	10~17	7
	18~24	6
	25~31	5
128 点 FFT	2~17	8
	18~34	7
	35~51	6
	52~63	5

根据式(1),可进一步得到字长优化后,相较于 FFT 最后一级输出的整数部分字长,其节省的信号字长为 $L_{\text{reduction}}(r)$,其表达式如下:

$$L_{\text{reduction}}(r)=L_{\text{FFT}}-L(r) \quad (2)$$

其中, L_{FFT} 是 FFT 最后一级输出信号的整数部分字长,对于 32 点、64 点和 128 点 FFT,该字长分别为 7bits、8bits 和 8bits。根据上述所得到的基于信道滚降的字长优化方法并结合表 2 参数,可得到如图 4 所示的字长节约情况,从中可以看出,子载波序号越大,优化后信号字长节约越多,对于不同 FFT 点数,最高子载波处的信号字长比最低子载波处的字长节约了 3bit。从图 4 还可以看出,随着 FFT 点数的增加,节约 1bit、2bit 和 3bit 字长的子载波数趋于相同。此外,结合图 2 还可看出系统的信道滚降基本符合低通特性,其截止频率对应的子载波序号之后的信道滚降也基本符合线

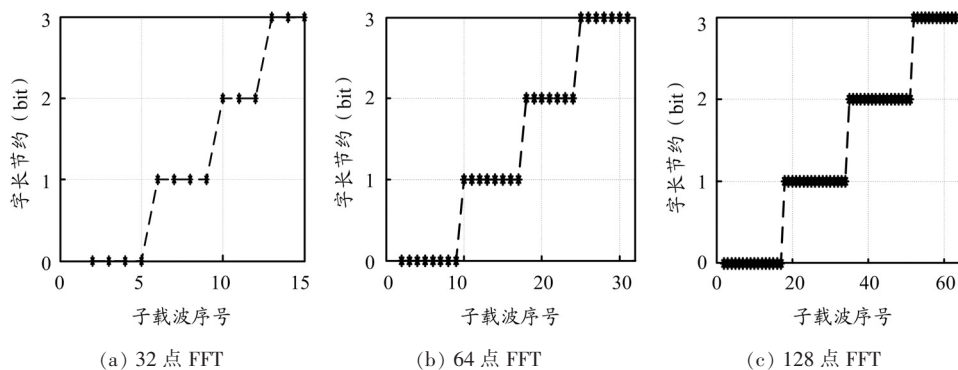


图 4 各子载波的字长节省情况

性衰减。结合图 2 进一步分析还可得到,子载波的信号功率每降低 6dB,其子载波信号的字长减少约 1bit。由此可以得出,该字长优化方案随着 FFT 点数的变化,其整体子载波间的字长节约趋势是不变的,因为其信道的滚降特性基本相似。

3 最优字长映射表实验验证

为了验证表 2 的准确性,我们将采用上述得出的字长优化方案在 OOFDM 收发机平台上进行了相关的试验。如图 5 所示,在不同 FFT 点数下,采用和不采用表 2 参数求得系统 IEVM 性能,其中接收光功率设为 -9dBm,各子载波的比特加载如图 3 所示。从图 5 可以看出,无论是否采用表 2 中参数,两系统的 IEVM 值相同,这验证了本文字长优化方案的准确性和适用性。

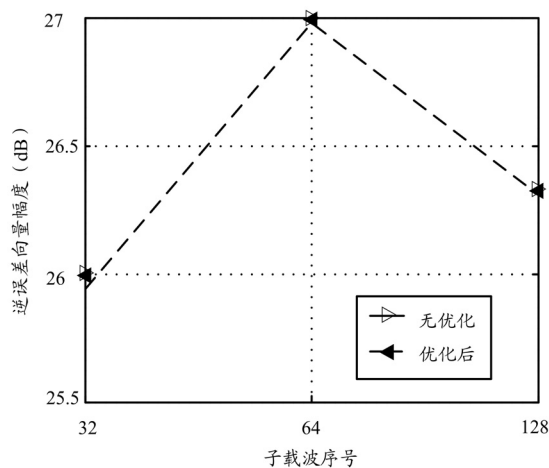


图 5 不同 FFT 点数下系统的 IEVM 对比

图 6 为不同接收光功率下系统的 IEVM 和 BER,其中 FFT 点数为 64。从图 6 可以看出,在不同信道性能(接收光功率)下,即使采用本文的字长优化方案,其结果与未采用优化方案系统的 IEVM 和 BER 相同,并未出现恶化现象,说明表 2 中的参数不会因接收光功率的变化而影响其适用性。图 7 为 -9dBm 的接收光

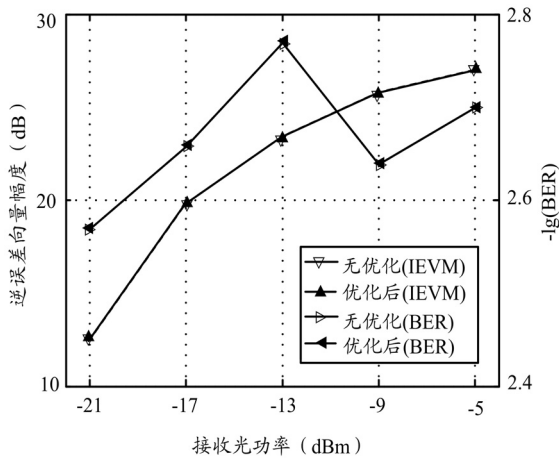


图6 不同接收光功率下的系统 IEVM 和 BER

功率在 64 点 FFT 条件下, 采用表 2 中的参数后得到的第 8、17、21、27 号子载波的星座图。从图 7 可以看出, 解调后各子载波星座图上的点基本聚集在理论参考点附近, 且星座图也比较清晰, 表明本 OOFDM 收发机系统具有较好的性能。

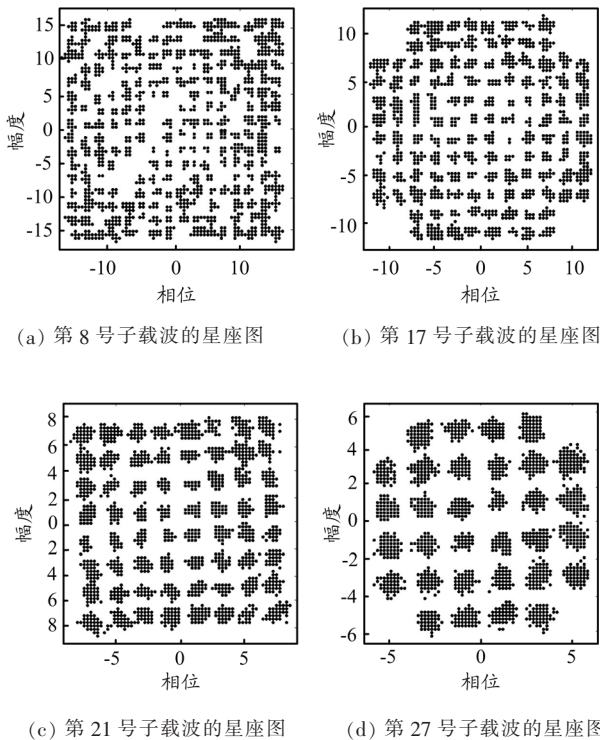


图7 -9dBm 的接收光功率下各子载波的星座图

图 5、图 6 和图 7 的结果说明本文的字长优化方案不但具有广泛的适用性和应用场景, 而且具有高效性和准确性。

4 结束语

为了降低信道均衡与解映射运算的系统功耗, 本文针对 OOFDM 收发机系统中特有的信道滚降特性, 提出了一种基于信道滚降的信道均衡和解映射输入字长优化方案。通过此方法, 得到了不同 FFT 点数(32 点、64 点、128 点)下的信道均衡和解映射输入字长映射表。与 FFT 输出信号的字长相比, 采用本文方案后最高可降低 3bit 的信道均衡和解映射输入信号的字长。经在不同光功率系统条件下实验验证, 本文的字长优化方案具有高适用性、准确性和有效性。

参考文献:

- [1] FISCHER J K, ALREESH S, ELSCHNER R, et al. Schubert. Bandwidth-variable transceivers based on 4D modulation formats for future flexible networks [C]// presented at ECOC, September 22-26, 2013, London, UK. Piscataway: IEEE, 2013.
- [2] 郭毅. 光纤接入网的发展趋势[J]. 科技创新与应用, 2014(13): 67-68.
- [3] QIN Youxiang, ZHANG Junjie. Novel toggle-rate based energy-efficient scheme for heavy load real-time IM-DD OFDM-PON with ONU LLID identification in time-domain using amplitude decision. OPTICS EXPRESS [J]. 2017, 25(14): 16771-16782.
- [4] ZHANG J J, TANG Z H, GIDDINGS R, et al. Stage-Dependent DSP Operation Range Clipping-Induced Bit Resolution Reductions of Full Parallel 64-Point FFTs Incorporated in FPGA-Based Optical OFDM Receivers [J]. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2016, 34 (16): 3752-3760.
- [5] 吴琦. IMDD-OOFDM-PON 中全并行 1024 定点 FFT 优化的研究与实现[J]. 光通信技术, 2016, 40(10): 8-11.
- [6] ZHANG J J, WU Q, QIAN C, et al. An optimized full-parallel variable-length FFT design for software-defined optical OFDM receivers[C]// in the Asia Commun Photon Conf. Hongkong: Optical Society of America, 2015.
- [7] 吴琦. OOFDM 系统中基于统计特性的全并行变长点定点 FFT 优化的研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.
- [8] YANG Chen, XIE Yizhuang, CHEN He, et al. New Quantization Error Assessment Methodology for Fixed-Point Pipeline FFT Processor Design [C]// System-on-Chip Conference, September 2-5, 2014, Nevada, USA. Piscataway: IEEE, 2014.
- [9] BOUZIANE R, KOUTSOYANNIS R, MILDRE P, et al. Optimizing FFT precision in optical OFDM transceivers [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2001, 23(20): 1550-1552.
- [10] DUAN X, GIDDINGS R P, MANSOOR S, et al. Performance Tolerance of IMDD DFMA PONs to Channel Frequency Response Roll-Off[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2017, 29(19): 1655-1658.