

光纤非线性补偿中低通滤波器对 DBP 算法的影响

邓黎¹, 李伯中¹, 金炜¹, 马超¹, 徐健², 项旻², 黄丽艳², 龙函^{2*}

(1. 国家电网有限公司 信息通信分公司, 北京 100761; 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

摘要: 针对光纤非线性补偿中低通滤波器对数字后向传输(DBP)算法复杂度与补偿精度的影响, 研究了 256 Gb/s 偏振复用 16 阶正交振幅调制(PDM-16QAM)信号在采用贝塞尔、高斯和巴特沃斯低通滤波器时的非线性补偿特性。实验结果表明: 当步长较小时, 3 种低通滤波器对 DBP 算法影响基本一致; 当步长较大时, 高阶贝塞尔低通滤波器的性能最佳。此外, 当低通滤波器阶数为 1、3 dB 带宽固定为 8 GHz 和步长大于 40 km 时, 高斯低通滤波器比其它 2 种低通滤波器的 Q 因子高约 0.1 dB。

关键词: 相干光通信; 低通滤波器; 非线性; 单模光纤; 数字后向传输

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)07-0010-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.07.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Influence of low pass filter with optical fiber nonlinear compensation on DBP algorithm

DENG Li¹, LI Bozhong¹, JIN Wei¹, MA Chao¹, XU Jian², XIANG Min², HUANG Liyan², LONG Han^{2*}

(1. State Grid Information & Telecommunication Co., Ltd.(SGIT), Beijing 100761, China; 2. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: Aiming at the influence of low-pass filter in optical fiber nonlinear compensation on the algorithm complexity and compensation accuracy of digital back propagation (DBP), the nonlinear compensation characteristics of 256 Gb/s polarization multiplexing 16 order quadrature amplitude modulation (PDM-16QAM) signal with Bessel, Gaussian and Butterworth low-pass filters are studied. The experimental results show that when the step size is small, the influence of three low-pass filters on DBP algorithm is basically the same, when the step size is large, the performance of high-order Bessel low-pass filter is the best. In addition, when the order of the low-pass filter is 1 and the 3 dB bandwidth is fixed at 8 GHz and the step size is greater than 40 km, the Q factor of the Gaussian low-pass filter is about 0.1 dB better than that of the other two low-pass filters.

Key words: coherent optical communications; low pass filter; nonlinearity; single mode fiber; digital backward transmission

0 引言

随着光纤通信技术的不断进步, 在长距离传输中非线性效应成为了限制通信容量与距离的主要因素。光纤非线性补偿技术主要包括光学相位共轭^[1]、电学

相位共轭^[2]、非线性频分复用^[3]、非线性微扰^[4]、机器学习^[5]和数字后向传输(DBP)算法^[6]等。其中, DBP 算法以其灵活、精细的补偿效果被广泛关注, 如何提高 DBP 算法的效率是研究的重点之一。文献[7–9]中, 研究人员通过在 DBP 算法中加入一个数字低通滤波器, 可以成倍增加算法的步长且不降低补偿效果, 从而极大地提高了算法的效率。但是, 在这些文献中, 往往只对一种低通滤波器进行补偿效果分析, 并没有系统地分析不同滤波器和不同参数下 DBP 算法的补偿效果。本文在前期研究的基础上, 基于实验系统, 研究贝塞尔、高斯和巴特沃斯这 3 种常用低通滤波器对 DBP 算法的影响。

收稿日期: 2020-12-21。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(合同号: SGZB0000TGJS1901930)资助。

作者简介: 邓黎(1985—), 男, 湖北武汉人, 通信工程硕士, 高级工程师, 现任职于国家电网公司信息通信分公司, 主要从事电力特高压及跨区电网配套通信工程建设管理工作, 先后参与青藏联网、哈郑直流、张北柔性直流和雅江直流等多项国家重点工程, 曾获得国家电网公司科技进步一等奖。

* 通信作者: 龙函(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事超长距光传输系统的研究工作。



1 低通滤波器在 DBP 算法中的工作原理

根据文献[6]可知, DBP 算法的基本思路如图 1 所示, 其主要原理是通过分布补偿色散和非线性的过程实现对信号的恢复。DBP 算法基于简化的非线性薛定谔方程, 可以实现信号在光纤中数字反向传输的效果, 补偿精度较高(每一步补偿的距离即为步长), 但是由于色散和非线性分别在频域和时域内补偿, 导致该算法需要频繁进行傅里叶变换/逆傅里叶变换(FFT/IFFT), 复杂度较高。如果能够增大步长, 即可减少算法进行 FFT/IFFT 的次数, 从而降低算法的复杂度。图 1 中, 在补偿非线性时, 首先求得输入信号的功率 P (此处“*”表示共轭), 得到 P 值后, 通过 γPL 计算本段光纤引起的自相位调制量(γ 表示非线性系数, L 表示步长), D_1 表示补偿二分之一步长的色散, D_2 表示补偿另外二分之一步长的色散, $N[]$ 表示非线性补偿。对于 DBP 算法而言, 增大步长将直接导致自相位调制量变大。由于 P 与输入信号有关, 因此 P 的高频分量将会很大程度上影响 γPL 的值, 导致对非线性的过补偿。基于这一原理, 文献[9]提出了加入低通滤波器(图 1 中橙色部分)的方法以抑制非线性的过补偿, 更新后的非线性补偿过程如式(1)所示。

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}} \cdot \exp[j\gamma PL \cdot H(f)] \quad (1)$$

其中, E_{in} 和 E_{out} 分别表示非线性补偿前后的信号, $H(f)$ 为低通滤波器的表达式。从式(1)可以看出, $H(f)$ 的选择将直接影响 DBP 算法的补偿效果。基于以上分析, 本文对贝塞尔、高斯和巴特沃斯这 3 种常用的低通滤波器进行分析, 其对应的数学表达如式(2)所示。

$$\begin{cases} H(f)_{\text{Be}} = \frac{b_0}{\sum_{k=1}^n b_k (f/f_{3\text{dB}})^k}, b_k = \frac{(2n-k)!}{2n-k! (n-k)!} \\ H(f)_{\text{Ga}} = e^{-\ln \sqrt{2} (f/f_{3\text{dB}})^{2n}} \\ H(f)_{\text{Bu}} = \sqrt{\frac{1}{1+(f/f_{3\text{dB}})^{2n}}} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $H(f)_{\text{Be}}$ 、 $H(f)_{\text{Ga}}$ 和 $H(f)_{\text{Bu}}$ 分别为贝塞尔、高斯和巴特沃斯低通滤波器的数学表述, b_0 、 b_k 分别是由反向贝

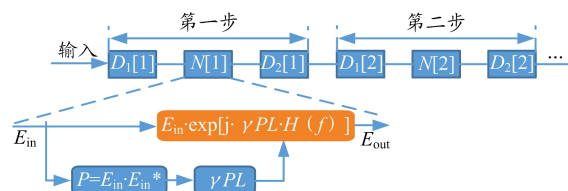


图 1 低通滤波器在 DBP 算法中的应用原理

塞尔多项式求得的系数, n 为滤波器阶数, f 为频率, $f_{3\text{dB}}$ 为 3 dB 截止频率, k 为整数并取 $1, 2, \dots, n$ 。

2 实验装置

为了验证低通滤波器在 DBP 算法中对非线性效应的补偿效果, 本文构建了实验系统, 如图 2 所示。在发送端, 激光载波由线宽 <100 kHz 的外腔可调谐半导体激光器产生, 其工作波长为 1550 nm, 输出功率为 12 dBm, 光信号首先由耦合器分为 2 路信号注入 IQ 调制器中: 一路经过调制后直接进入偏振合束器的一端, 另一路经过偏振旋转器(PR)将偏振态旋转 90°后进入偏振合束器的另一端。最后, 合束器输出偏振复用(PDM)的调制信号。本实验中, 电信号由四通道任意波形发生器(AWG)产生, 分别为 X 偏振态的 I、Q 信号和 Y 偏振态的 I、Q 信号。电信号的波特率为 32 GBaud, 数据长度为 $2^{15}-1$, 每路信号为四电平信号。4 路电信号经过电放大器 1~4 放大后注入到调制器中, 最后产生 256 Gb/s 的 PDM-16 阶正交振幅调制(16QAM)光信号。由于在调制过程中, 偏振复用同相/正交(PDM-IQ)调制器插入损耗较大, 在注入传输链路之前需要一个掺铒光纤放大器(EDFA1)进行放大。EDFA1 为固定输出放大器, 在其后接一个光学可调谐衰减器(VOA)以控制注入传输链路的功率。实验中光纤链路由 13 段 80 km 标准单模光纤(SSMF)和 12 个固定增益掺铒光纤放大器(EDFA2)构成, 整个传输链路长度为 1040 km。其中, SSMF 的主要参数为: 色散系数为 16 ps/(km·nm²), 非线性系数为 1/(W·km), 衰减系数为 0.2 dB/km; EDFA2 的增益为 16 dB, 噪声指数小于

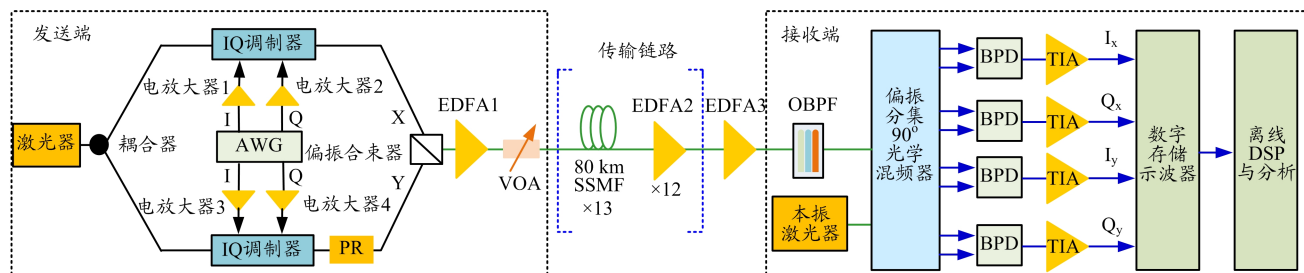


图 2 256 Gb/s PDM-16QAM 传输实验装置图

5.5 dB。由于从传输链路出来的光信号最后一段无EDFA,因此在注入接收机前加入一个固定输出的EDFA(EDFA3)以控制注入相干接收机的光功率和一个中心波长为1550 nm、3 dB带宽为0.8 nm的光学带通滤波器(OBPF)用于滤出传输过程中引入的噪声。在接收端,主要利用本振光源和相干接收机将光信号转化为电信号。其中,本振光源工作波长也为1550 nm,输出功率约为10 dBm,线宽<100 kHz。相干接收机主要由1个90°光学混频器、4个平衡探测器(BPD)和4个跨阻放大器(TIA)构成。最后,电信号由采样率为80 GSa/s的数字存储示波器接收,将信号存储下来并做相应的离线数字信号处理(DSP)与分析。所采用的离线DSP算法主要包括:①DBP算法;②将信号重采样到4倍采样;③利用根升余弦滤波器做匹配滤波;④Gardner算法做时钟恢复并将信号下采样到一倍;⑤恒模算法(CMA)和多模算法(MMA)实现偏振解复用;⑥DDLMS对信号进行均衡;⑦误码及 Q 因子计算。

3 实验结果及讨论

3.1 贝塞尔低通滤波器的传输性能

首先,本文研究贝塞尔低通滤波器在不同步长情况下不同参量的传输性能。步长为5 km、20 km和40 km时,在采用不同贝塞尔低通滤波器阶数情况下,3 dB带宽与非线性补偿后的 Q 因子关系如图3所示。此时,在实验中将注入光纤的功率固定为5 dBm。由

图3可以看出,当步长较小时(如5 km),3 dB带宽大于14 GHz后,不同阶数的贝塞尔滤波器对应的 Q 因子基本趋于一致;当步长较大时(如40 km),滤波器阶数越大,其性能越好。因此,在同时考虑算法复杂度和补偿性能且步长为20 km时,其效果最佳。这主要是因为采用大步长时,高阶频率分量对非线性补偿的影响较大,容易导致过补偿。

3.2 高斯、巴特沃斯低通滤波器的传输性能

以贝塞尔低通滤波器结果为基础,采用相同参数情况下,本文对高斯和巴特沃斯低通滤波器分别进行了研究,结果如图4、图5所示。对比图3~图5可以看出,3种不同低通滤波器的整体趋势基本一致,且最终补偿后的 Q 因子也较接近。主要区别在于不同步长下,随着3 dB带宽的增加,高斯和巴特沃斯低通滤波器对应的 Q 因子劣化更明显;同时,从图4(c)和图5(c)可以看出,不同阶数的补偿性能差异较小。但是,相对于贝塞尔低通滤波器而言,高斯和巴特沃斯低通滤波器在大步长(40 km)情况下,随着滤波器的阶数越大,其 Q 因子差异越大,这主要是由于DBP算法在大步长时更容易造成过补偿或者欠补偿,因此滤波器的参数对最终的补偿性能影响较大。由此可知,DBP算法在用大步长补偿非线性时,高阶的贝塞尔低通滤波器性能更佳。图3~图5是在固定注入光纤功率情况下获得的结果,当注入功率变化时,由于非线性效应存在差异,导致最终得到的结果也会有所不同。

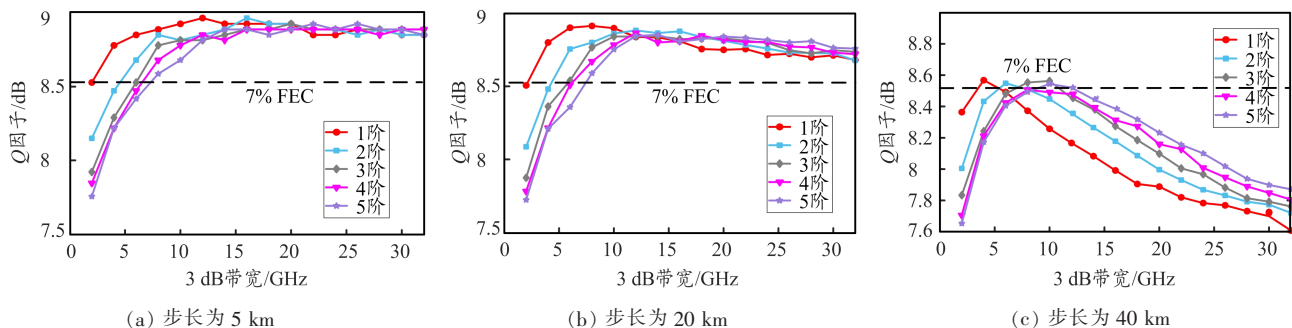


图3 不同步长情况下,贝塞尔低通滤波器的传输性能

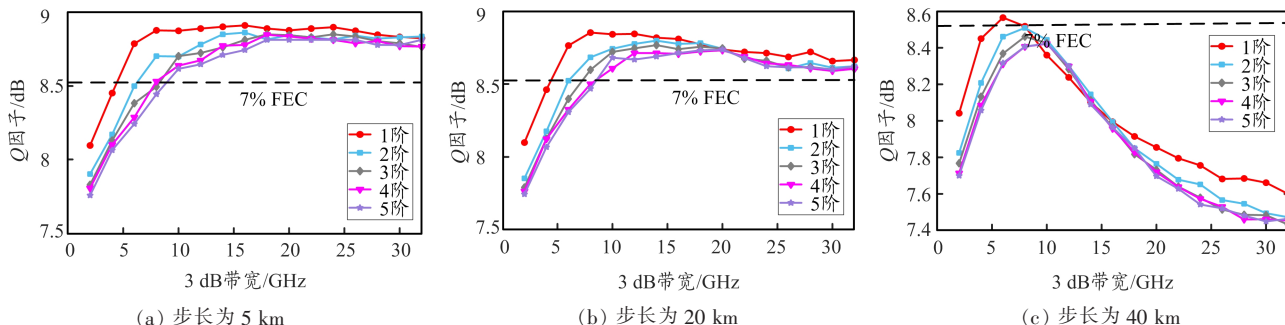


图4 不同步长情况下,高斯低通滤波器的传输性能

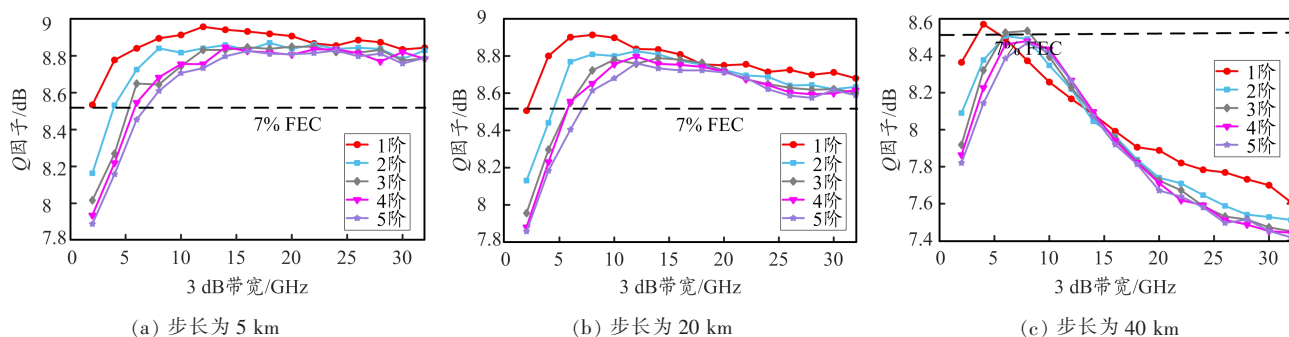


图5 不同步长情况下,巴特沃斯低通滤波器的传输性能

3.3 3种低通滤波器性能对比

本文对3种低通滤波器进行了对比分析后,通过固定滤波器阶数为1、3 dB带宽为8 GHz,研究不同低通滤波器的非线性补偿性能,其结果如图6所示。

从图6(a)可以看出,3种低通滤波器的性能差异基本可以忽略;从图6(b)可以看出,当步长<20 km时,各低通滤波器对DBP算法的影响基本可以忽略;当步长>20 km时,随着步长增大, Q 因子成指数降低;同时,对应7% FEC阈值,3种滤波器的步长可最大设置到30 km,且3种滤波器的性能非常接近。当步长>40 km后,在此参数下,高斯低通滤波器比其它2种低通滤波器的 Q 因子高约0.1 dB。

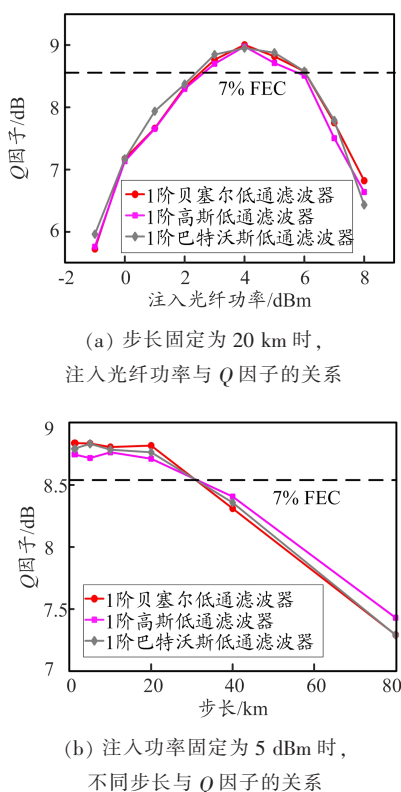


图6 不同低通滤波器的非线性补偿对比

果表明:3种低通滤波器对抑制非线性过补偿都有明显效果,在增大DBP算法步长情况下,其非线性补偿性能差异较小;注入光纤功率、步长、3 dB带宽以及滤波器阶数对DBP的补偿性能都有一定影响。此外,除本文分析的3种低通滤波器之外,还有其它低通滤波器(如切比雪夫滤波器)也值得做进一步的研究与探讨。

参考文献:

- [1] DU L B, MORSHED M M, LOWERY A J. Fiber nonlinearity compensation for OFDM superchannels using optical phase conjugation [J]. Optics express, 2012, 20(18): 19921–19927.
- [2] LIU X, CHRAPLYVY A R, WINZER P J. Phaseconjugated twin waves for communication beyond the Kerr nonlinearity limit[J]. Nature Photonics, 2013, 7(7): 560–568.
- [3] DONG Z, HARI S, GUI T, et al. Nonlinear frequency division multiplexed transmissions based on NFT[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(15): 1621–1623.
- [4] KUMAR O S S, AMARI A, DOBRE O A, et al. Enhanced regular perturbationbased nonlinearity compensation technique for optical transmission systems [EB/OL]. [2020-12-21]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8738807>.
- [5] FAN Q, ZHOU G, GUI T, et al. Advancing theoretical understanding and practical performance of signal processing for nonlinear optical communications through machine learning [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1–11.
- [6] IP E, KAHN J M. Compensation of dispersion and nonlinear impairments using digital back propagation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(20): 3416–3425.
- [7] GAO Y, KE J H, ZHONG K P, et al. Assessment of intrachannel nonlinear compensation for 112 Gb/s dualpolarization 16QAM systems[J]. Journal of lightwave technology, 2012, 30(24): 3902–3910.
- [8] RAFIQUE D, MUSSOLIN M, FORZATI M, et al. Compensation of intrachannel nonlinear fibre impairments using simplified digital backpropagation algorithm [J]. Optics express, 2011, 19(10): 9453–9460.
- [9] DU L B, LOWERY A J. Improved single channel backpropagation for intrachannel fiber nonlinearity compensation in longhaul optical communication systems [J]. Optics express, 2010, 18(16): 17075–17088.

4 结束语

本文利用实验系统分析了在光纤非线性补偿中低通滤波器对DBP算法的补偿性能影响。基于256 Gb/s PDM-16QAM信号传输1040 km SSMF实验数据,分析了贝塞尔、高斯以及巴特沃斯这3种常用低通滤波器在不同参数下对DBP算法的影响。实验结