

收发机噪声对非线性补偿光纤通信系统的影响

王轩力*

山西工程技术学院信息工程与大数据科学系, 山西 阳泉 045000

摘要 近年发展起来的数字后向传输(DBP)算法能够明显地消除相干光纤通信系统中的非线性损伤。然而,作为一类固有的噪声源,光收发机噪声和光信号会在光纤的传输过程中经由光纤克尔效应发生有害的非线性信号-噪声间相互作用(NSNI)。NSNI效应会显著降低DBP算法的有效性。针对三类传输光纤(纯石英光纤、单模光纤和非零色散位移光纤),研究了奈奎斯特-波分复用相干光传输系统中,收发机噪声引起的光纤通信系统的传输代价。结果表明,尽管纯石英光纤在无收发机噪声影响的情况下表现出最好的通信性能,但是它对收发机噪声的影响最为敏感。

关键词 相干光通信; 数字后向传输算法; 收发机噪声; 光纤克尔效应; 非线性信号-噪声间相互作用

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2306010

Influence of Transceiver Noise on Nonlinearity-Compensated Optical Transmission Systems

Wang Xuanli*

Department of information engineering and big data science, Shanxi Institute of technology,
Yangquan, Shanxi 045000, China

Abstract In recent years, the developed digital back-propagation (DBP) algorithm can mitigate the fiber nonlinearities significantly. However, as a noise source, the transceiver noise will remarkably degrade the effectiveness of DBP algorithm. In this paper, we investigate the transmission penalty induced by the transceiver noise in Nyquist-spaced coherent optical transmission systems over different fiber types. We show that although the pure silica core fiber exhibits the best performance without transceiver noise, it is most sensitive to the transceiver noise.

Key words coherent optical communication; digital back-propagation; transceiver noise; Kerr effect; nonlinear signal-noise interaction

OCIS codes 060.1660; 190.3270

1 引言

近年来,由于相干光通信系统的巨大潜力,它已成为光通信领域的研究热点。和传统的强度调

制及直接检测光传输系统相比,相干光传输系统能够在接收端恢复出传输光场的全部信息,包括光场的幅度、相位及偏振态。这一优势使得相干光传输系统能够传输更高阶调制信号、更高的符号速率及

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-07-27; 录用日期: 2021-08-05

基金项目: 全国大学生创新创业实践项目(一种人工智能硬件实验平台的设计)(202014527010)、山西工程技术学院校级课题(智慧城市下的智能路灯控制系统)(2019012)

通信作者: *wangxuanli198026@sohu.com

更远的传输距离^[1-3]。

另一方面,由光纤非线性引起的信号非线性损伤是目前相干光传输系统中主要的信号损伤源。为了尽可能地消除或抑制这些非线性损伤源,研究者们提出了各种光域或电域的非线性损伤补偿技术^[4-8]。由于补偿效果明显且原理易于理解,E. Ip 等^[9]提出的数字后向传输(DBP)算法是目前研究较多且较常用的一种方法。然而,已有的很多研究表明^[9-12],光纤传输系统中的一些固有的统计型效应—如信号和自发辐射噪声间非线性相互作用(NSNI)和偏振模色散(PMD)会明显地降低DBP算法的补偿效果。

光传输链路中的在线光放大器(如EDFA)是产生自发辐射噪声的一类主要噪声源。另一方面,目前商用的光收发机中也存在有一些固有的本底噪声源。比如发射/接收机内的模/数(数/模)转换器产生的量化噪声、电子放大器产生的噪声以及光电检测器产生的噪声等。文献[13]研究了单模光纤链路中收发机噪声对DBP传输系统性能的影响。结果表明,收发机噪声会引起明显的系统性能代

价。本文在此基础上进行了扩展,研究了纯石英光纤(PSCF)、标准单模光纤(SSMF)和非零色散位移光纤(NZDSF)三种类型的光传输链路中,收发机噪声对光传输系统性能的影响。

2 建模与仿真

图1给出了所研究的9信道奈奎斯特相干光纤通信系统的传输模型。调制信号是速率256 Gb/s的偏振复用16阶正交幅度调制(PM-16QAM)信号^[14],符号速率为32 Gbaud。用于调制光载波的电脉冲形状为根升余弦脉冲(RRC),滚降因子为0.01。相邻光信道间隔为32 GHz,每个信道用4列不相关的伪随机码(PRBS)编码,PRBS在不同信道之间亦不相关。每个信道的调制光信号采用每符号16个采样点进行仿真。以光收发机信噪比 SNR_{TRX} 来衡量发射/接收机处的噪声强度,并且把发射机噪声 σ_T^2 和接收机噪声 σ_R^2 均作为加性高斯白噪声处理。此外,假定发射机和接收机处的本底噪声强度相等,即光发射机和接收机的信噪比满足 $R_{TX}=R_{RX}=2 \times R_{TRX}$ 。

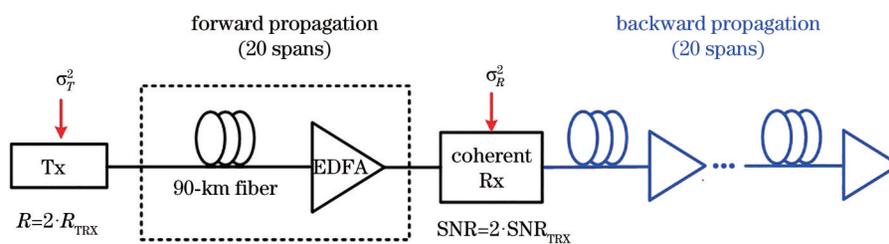


图1 用于研究收发机噪声对DBP系统影响的传输模型

Fig. 1 Transmission model used for investigating the impact of transceiver noise on DBP systems, where the transceiver noise is divided equally in transmitter and receiver

光纤传输链路由20个无色散管理的跨段组成,每跨段包含有一段90 km长的传输光纤和一只噪声系数6 dB的掺铒光纤放大器(EDFA)。考虑三种不同类型的传输光纤:纯石英光纤(PSCF)、标准单模光纤(SSMF)和非零色散位移光纤(NZDSF)。它们的参数如表1所列。在模拟中,信号在光纤中的传输使用分步傅里叶算法求解Manokov-PMD方程来模拟,其步长分布由常数相位法^[15]决定,每一

步的最大非线性相移为 3×10^{-3} 弧度。

在接收端采用相干检测法检测信号,用每符号2个采样点的采样率得到基带电信号。随后对基带信号做电色散补偿(EDC)。为了实现信号在电域的后向传输过程,随后对基带信号进行重采样,采样率依然为每符号16个采样点,然后由每个信道的同向和正交分量来重建光场,并将所有9个信道合波后进行反向传输进而实现全场DBP过程。该

表1 三种类型光纤的参数

Table 1 Parameters of three types of fiber

Fiber type	Loss (dB/km)	Dispersion (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹ , @1550nm)	Nonlinear coefficient (km ² /W)
PSCF	0.18	20.1	0.9
SSMF	0.22	16.7	1.31
NZDSF	0.22	4.5	1.5

DBP 过程同样使用分步傅里叶算法解反向 Manakov-PMD 方程,其步长分布为对数型^[16]。最终接收到的信号使用 15 抽头的有限冲激响应(FIR)蝶形滤波器进行二级均衡处理,其加权系数通过最小均方(LMS)算法进行调整。最后,计算中间信道(设置在 1550 nm 处)经传输后得到的信噪比 SNR 来衡量整个系统的性能。

3 结果和讨论

图 2 给出了所研究的 Nyquist-WDM 系统经 20×90 km 传输后,系统的 SNR 与入纤功率的关系。图 2(a)~(c) 分别对应于传输光纤为 PSCF、

SSMF 和 NZDSF 的情况。图中的绿线代表线性情况下的系统 SNR 值。即只考虑光纤衰减和色散,不考虑非线性效应的情况。如图 2 所示,所有的曲线均呈现先上升后下降的趋势。这来自于系统中光信噪比(OSNR)和光纤非线性损伤两个因素综合影响的结果。在曲线的初始段,OSNR 对系统性能的影响占主导地位,因而随着入纤功率的增大,OSNR 越大,系统的性能呈上升趋势。另一方面,入纤功率的增大意味着系统中的非线性损伤越来越严重。当功率增大到一定的程度,相比于 OSNR,光纤非线性损伤对系统性能的影响开始占主导地位。这个时候,光功率越大,非线性损伤越明显,系统性能开始下降。

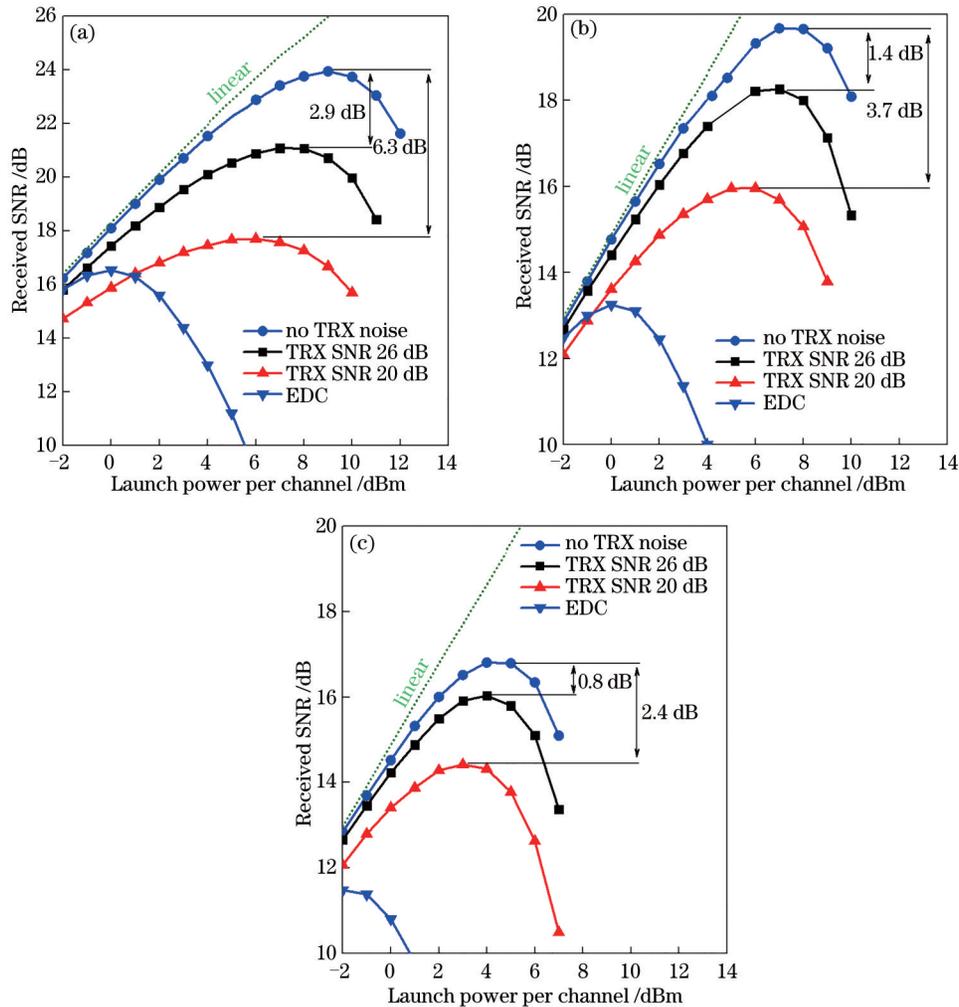


图 2 经过 20×90 km 传输后,系统的 SNR 和入纤功率的关系。(a) PSCF 链路;(b)SSMF 链路;(c)NZDSF 链路

Fig. 2 Received SNR versus optical signal power per channel after 20×90 km transmission for (a) PSCF link; (b) SSMF link; (c) NZDSF link

考虑 DBP 算法对系统的影响。由于全场 DBP 算法能够大幅消除信道间和信道内非线性损伤,故而和仅做电色散补偿(EDC)的情况(蓝色空心圆

点)相比,应用了 DBP 算法后(蓝色实心圆点)的系统性能得到了明显改善。对于 PSCF 链路,系统的 SNR 由 EDC 情况下的 16.5 dB 提升至 24 dB,这有

高达 7.5 dB 的性能增益。对于 SSMF 和 NZDSF 光纤, DBP 算法带来的性能增益分别为 6.4 dB 和 5.3 dB。除此之外, 值得注意的是, 即使在应用了全场 DBP 算法后, 系统性能和线性情况(绿色虚线)相比仍然存在有残留代价。这部分残留代价即来自于在线 EDFA 产生的 ASE 噪声与信号在光纤传输过程中产生的 NSNI 效应。文献[10]表明, NSNI 效应的大小和入纤功率及传输光纤的特性有关。由于 PSCF 光纤具有最小的衰减和非线性系数以及最大的色散系数, 故而在相同的入纤功率下, PSCF 链路表现出最小的 NSNI 损伤。

另一方面, 当考虑到收发机噪声时, PSCF 链路受到最严重的 NSNI 损伤。如图 2 中的红色和黑色

实线所示, 当收发机信噪比为 26 和 20 dB 时, PSCF 链路的最大 SNR 分别下降了 2.9 dB 和 6.3 dB。对于 SSMF 和 NZDSF 链路, 收发机噪声引起的代价为 1.4 dB 和 3.7 dB 以及 0.8 dB 和 2.4 dB。

图 3 则直观地显示出了收发机噪声劣化系统性能的情况。在这里, 给出了在 SSMF 链路上, 信号经 20×90 km 传输后得到的星座图。三种情况下的入纤功率均设置为各自的最优功率。如图 3 所示, 和仅做色散补偿相比, 信号经 DBP 算法处理后其星座图更加清晰, 系统 SNR 也由 13.3 dB 提升至 19.7 dB。然而, 收发机噪声则会显著地劣化系统性能。在收发机 SNR 为 20 dB 时, 如图 3(c) 所示, 系统 SNR 劣化至 16 dB, 这产生了 3.7 dB 的性能降低。

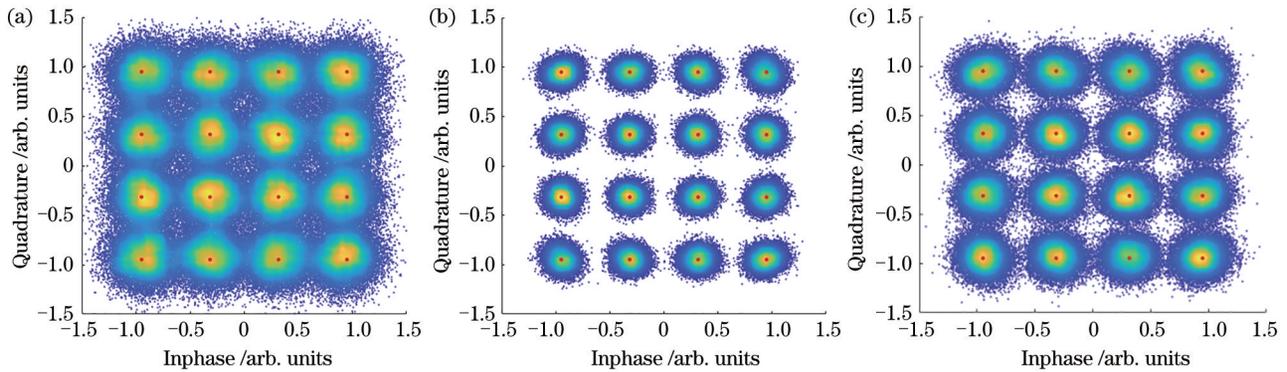


图 3 在 SSMF 链路上, 信号经 20×90 km 传输后得到的星座图。(a) 仅做色散补偿; (b) 经 DBP 算法处理后且无收发机噪声; (c) 经 DBP 算法处理且收发机信噪比为 20 dB

Fig. 3 Constellation maps after EDC and FF-DBP for Nyquist 9-channel WDM 256 Gbit/s PM-16QAM over SSMF link.

(a) With EDC only; (b) with FF-DBP and no TRX noise included; (c) with FF-DBP and TRX noise, transceiver SNR of 20 dB

最后, 通过改变光收发机处的噪声强度来寻找三种类型传输光纤对收发机噪声的容忍度。图 4 给出了当收发机信噪比在 16~40 dB 范围内时, 所研究的光传输系统所能达到的最好性能(以最大信噪

比表示)。作为对比, 图中也给出了没有收发机噪声时系统所能获得的最大信噪比(图中标有 SNR limit 的虚线所示)。显而易见, 随着光收发机噪声强度的减弱, 系统的最大 SNR 逐渐上升。同时应该注意到, 如果收发机信噪比优于 40 dB, 三种光纤链路的性能几乎和无收发机噪声情况一致, 并趋近于一个饱和值。这是由于当收发机信噪比很高时, 收发机噪声很弱, 以至于它们和信号间的 NSNI 效应可忽略不计。此时的系统性能不再和收发机信噪比有关, 转而受限于链路中 EDFA 产生的自发辐射噪声与信号间的 NSNI 效应。

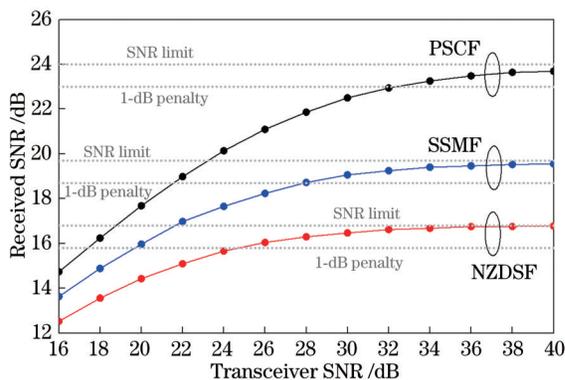


图 4 不同强度的收发机噪声影响下系统的最佳 SNR

Fig. 4 Optimal SNR of the system under the influence of different intensities of transceiver noise

更为重要的是, 从图中可直观地看出, 如果要保证收发机噪声造成的系统性能下降不超过 1 dB, 那么对于 PSCF 链路, 收发机信噪比不能差于 32 dB; 对于 SSMF 和 NZDSF 链路, 收发机信噪比则不能差于 28 dB 和 24 dB。

4 结 论

针对三种类型的传输光纤,以速率 256 Gbit/s、调制格式为 PM-16QAM 的奈奎斯特相干光传输系统为例,研究了收发机噪声对 DBP 算法补偿效果的影响。结果表明,尽管 PSCF 链路在无收发机噪声影响下能够获得最好的系统性能,但是它对收发机噪声最敏感。当收发机信噪比为 20 dB 时,PSCF 链路的性能下降了 6.3 dB。对于 SSMF 和 NZDSF 链路,收发机噪声引起的传输代价分别为 3.7 dB 和 2.4 dB。另一方面,为了保证收发机噪声引起的传输代价不超过 1 dB,对于 PSCF 传输链路,收发机信噪比不能差于 32 dB;对于 SSMF 和 NZDSF 链路,收发机信噪比则不能差于 28 dB 和 24 dB。

参 考 文 献

- [1] Charlet G, Renaudier J, Mardoyan H, et al. Transmission of 16.4-bit/s capacity over 2550 km using PDM QPSK modulation format and coherent receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 153-157.
- [2] Renaudier J, Charlet G, Salsi M, et al. Linear fiber impairments mitigation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK by digital processing in a coherent receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(1): 36-42.
- [3] Xia C M, da Silva Pina J F, Striegler A, et al. PMD-induced nonlinear penalty reduction in coherent polarization-multiplexed QPSK transmission[C]// 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 19-23, 2010, Turin, Italy. New York: IEEE Press, 2010: 1-3.
- [4] Liu X, Chraplyvy A R, Winzer P J, et al. Phase-conjugated twin waves for communication beyond the Kerr nonlinearity limit[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(7): 560-568.
- [5] Huang B, Zhang L J, Li X, et al. Fiber nonlinearity compensation algorithm based on spectrum compressing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 230601.
黄斌, 张黎杰, 李霞, 等. 基于频谱压缩的光纤非线性补偿算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 230601.
- [6] Liu L, Li L C, Huang Y D, et al. Intrachannel nonlinearity compensation by inverse Volterra series transfer function[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(3): 310-316.
- [7] Aldaya I, Giacoumidis E, de Oliveira G, et al. Histogram based clustering for nonlinear compensation in long reach coherent passive optical networks[J]. *Applied Sciences*, 2019, 10(1): 152.
- [8] Wu J D, Lu J, Ren H L, et al. Nonlinear equalizer based on general regression neural network in coherent optical OFDM system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0906002.
吴金达, 卢瑾, 任宏亮, 等. 基于广义回归神经网络的 CO-OFDM 系统非线性均衡[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0906002.
- [9] Ip E. Nonlinear compensation using backpropagation for polarization-multiplexed transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(6): 939-951.
- [10] Rafique D, Ellis A D. Impact of signal-ASE four-wave mixing on the effectiveness of digital backpropagation in 112 Gb/s PM-QPSK systems[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3449-3454.
- [11] Serena P. Nonlinear signal-noise interaction in optical links with nonlinear equalization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(6): 1476-1483.
- [12] Ghazisaeidi A. A theory of nonlinear interactions between signal and amplified spontaneous emission noise in coherent wavelength division multiplexed systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(23): 5150-5175.
- [13] Semrau D, Lavery D, Galdino L, et al. The impact of transceiver noise on digital nonlinearity compensation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(3): 695-702.
- [14] Li W P, Kong M, Yu J J. Generation of PDM-16QAM radio frequency signal based on a polarization multiplexing optical modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2306002.
李韦萍, 孔淼, 余建军. 基于偏振复用光调制器产生 PDM-16QAM 射频信号[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2306002.
- [15] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 3rd ed. New York: Academic Press, 2001.
- [16] Bosco G, Carena A, Curri V, et al. Suppression of spurious tones induced by the split-step method in fiber systems simulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(5): 489-491.