

偏振复用系统中 FIR-BP 算法有效补偿非线性损伤的实验研究

李春蕾 张晓光 席丽霞 翁 轩 赵东鹤

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 反向传输(BP)算法是实现高速光纤系统非线性补偿的一种常用且有效的方法,在此算法基础上加入高斯滤波器,可进一步提高接收系统性能,同时大大降低计算复杂度。然而高斯滤波器是一种理想化滤波器,其设计实现难度大且结构复杂。提出一种基于窗函数有限脉冲响应(FIR)滤波器和 BP 算法结合实现非线性补偿的方案,详细分析了滤波器的参数选取对补偿性能的影响,并在 224 Gb/s 双偏振 16 进制正交幅度调制(DP-16QAM)640 km 无色散补偿光纤传输系统中比较了不同补偿方案的补偿效果。结果表明,汉宁窗 FIR 滤波器的频域特性类似于高斯函数,利用 9 个抽头就能够有效补偿非线性损伤,提高系统性能。与线性补偿算法相比,FIR-BP 算法能够将误码率(BER)降至 10^{-3} 以下,将最佳入纤功率提高至少 3 dB。

关键词 光通信;反向传输算法;最佳入纤功率;偏振复用 16 进制正交幅度调制;非线性损伤

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1205001

Experimental Validation of Effective Nonlinearity Compensation by FIR-BP Algorithm in Polarization Multiplexing System

Li Chunlei Zhang Xiaoguang Xi Lixia Weng Xuan Zhao Donghe

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Back propagation (BP) algorithm is a common effective method for nonlinearity compensation in high-speed fiber optic system. System performance can be improved a lot while the computational complexity can be reduced in the same time if a Gaussian filter is added to BP. However, the Gaussian filter is an ideal filter and it's hard to be designed with its complex structure. The scheme that the window finite impulse response (FIR) filter is combined with BP algorithm is proposed. The compensation performance influenced by the filter parameters selection is analyzed in detail, and the performances of different schemes in the 640 km non-dispersion compensation fiber transmission system with 224 Gb/s dual-polarization 16 quadrature amplitude modulation (DP-16QAM) signal are compared. The results prove that the frequency domain characteristics of Hanning FIR filter are similar to the Gaussian function, which can compensate the nonlinearity damage and improve the system performance effectively with only 9 taps. Results of the experimental system show that the proposed FIR-BP algorithm can reduce the bit error rate (BER) to 10^{-3} or less and can increase the optimum fiber input power at least 3 dB compared to the linear compensation algorithms.

Key words optical communications; back propagation algorithm; optimum input power; dual-polarization 16 quadrature amplitude modulation; nonlinearity damage

OCIS codes 060.2330; 060.1660; 060.4370

收稿日期: 2013-06-07; 收到修改稿日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(61205065)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110005110014)

作者简介: 李春蕾(1987—),男,硕士研究生,主要从事高速光纤通信系统中补偿算法方面的研究。

E-mail: chunlei_2010@sina.com

导师简介: 张晓光(1961—),男,博士,教授,主要从事高速光通信系统方面的研究。

E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

不断增长的数据业务需求对波分复用(WDM)系统光纤链路的传输容量和频谱利用率提出了新的挑战。高阶调制格式和相干接收技术结合是未来提高频谱利用率、增加传输容量的主要方法之一,双偏振 16 进制正交幅度调制(DP-16QAM)是 400 Gb/s 及以上速率相干光纤传输系统中采用的重要调制格式^[1]。然而 DP-16QAM 信号更容易受到光纤信道中非线性效应的影响,使得光信噪比(OSNR)代价进一步增加。有效地消除或补偿非线性损伤是提高 DP-16QAM 系统性能的必要手段。

非线性损伤的补偿方法有多种,比如光相位共轭(OPC)^[2],沃特拉(Volterra)级数^[3],反向传输(BP)^[4-7]等,其中 BP 算法是一种较为有效且常用的方法,但是其计算复杂度要远远大于线性均衡算法。为了降低计算复杂度,人们提出了一些改进的方案,如文献[5]提出了对数步长 BP 算法(L-BP),通过减少迭代次数以降低算法复杂度;文献[6]依据自相位调制(SPM)引起符号间的相互串扰理论提出了关联 BP 算法(C-BP),这样可以在一个光纤跨段中进行一两次迭代即可;文献[7]提出在 BP 算法中加入低通滤波器(LPF)来滤除非线性损伤引入的高频噪声,这样可以在一段光纤中进行一次迭代就可以达到很好的性能提升效果。文献[6]和[7]在本质上均可视为加入低通滤波器,由此可见加入滤波器的 BP 算法是消除符号间的相互串扰、补偿信道间非线性损伤的有效算法。

本文提出了应用窗函数有限脉冲响应(FIR)滤波器的 BP 算法,并在 224 Gb/s DP-16QAM 单信道和 3 信道波分复用 640 km 传输系统实验中对其有效性进行了验证;对比了四种结构简单的窗函数 FIR 滤波器误码率(BER, R_{BE})性能,并与标准 BP 算法进行比较。

2 FIR-BP 算法

为了显示提出的 FIR-BP 算法的优势,先简单回顾一下标准 BP 算法。如图 1 所示,原始电场 E_{in} 经过光纤后出射的电场矢量为 E_{out} ,在相干接收机端,信号 E_{out} 经过一段色散和非线性参数与真实光纤符号相反的光纤,输出为 E'_{in} ,其补偿原理为^[8]

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial s} = (-\hat{D} - \hat{N})\mathbf{E}, \quad (1)$$

式中电场矢量 $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$, $E_{x(y)}$ 表示 $x(y)$ 偏振方向

上的电场强度, s 表示传输距离, \hat{D} 表示线性运算符, \hat{N} 表示非线性运算符,图 1 中 α 表示衰减系数, β_2 表示群速度色散, γ 表示非线性系数。求解(1)式可以采用对称分布傅里叶变换法(SSFM),如图 2 所示,其中 L 为迭代步长, n 为迭代次数,传输总长度则为 nL 。标准 BP 算法中,以一段光纤跨段为一个步长,迭代次数为光纤跨段数。

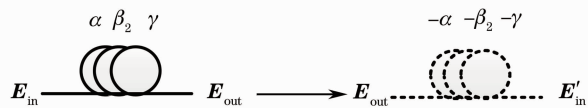


图 1 BP 算法补偿非线性原理图

Fig. 1 Schematic diagram of BP algorithm

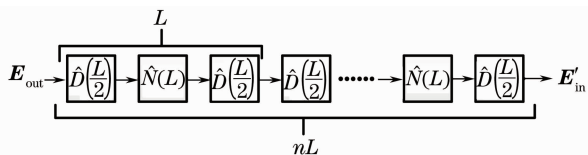


图 2 SSFM-BP 结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SSFM-BP

然而,标准 BP 算法没有考虑到链路中放大器的放大自发辐射(ASE)噪声与非线性损伤相互作用的影响,这种相互作用会影响补偿效果。依据文献[7]中的 Filter-BP 算法理论,每进行一步 BP 算法的迭代,带外噪声强度都会加强。如果在其中加入一个低通滤波器用来限制信号的带宽,不仅可以抑制高频分量的噪声,也可以降低由信号采样引入的计算复杂度^[7]。如图 3 所示,在不加滤波器只进行非线性补偿的情况下,输入信号带宽为 B_{signal} ,输出信号带宽则变为 $3B_{signal}$,噪声急剧积累;加上滤波器后,输出信号带宽则变为 $B_{signal} + 2B_{filter}$,这样就将没用的噪声滤除,系统性能自然就提高了。

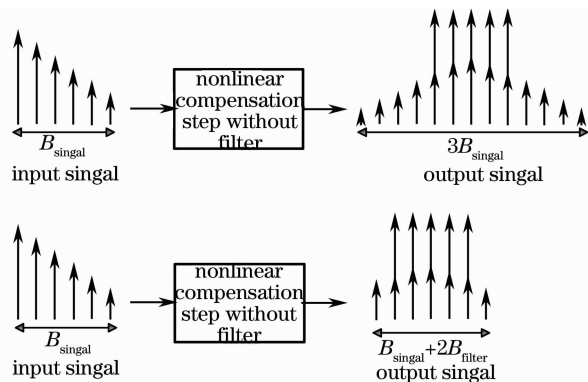


图 3 Filter-BP 补偿非线性损伤原理

Fig. 3 Principle of nonlinear impairments compensation by Filter-BP

文献[7,9-10]等均默认使用高斯滤波器,它是一种时间带宽积最小的理想滤波器,有优良的特性,但高斯滤波器尚无完善的设计理论,硬件实现难度较大,且其结构较为复杂^[11]。一般设计的高斯滤波器可以用3级或以上的均值滤波器级联替代实现,其中均值滤波器为一种FIR滤波器。一般地,FIR滤波器结构如图4所示,其中 $c_0, c_1, c_2, c_3, \dots, c_{N_t-1}$ 为滤波器的抽头系数, z^{-1} 表示 z 变换域的移位, N_t 为滤波器的长度,其需要处理 N_t 次乘法, N_t-1 次加法和 N_t-1 次移位。当3个或以上的这种滤波器级联的时候,复杂度直接翻倍。而对于窗函数FIR滤波器的复杂度与单个FIR滤波器相当,且容易设计并实现。所以本文尝试使用简单的窗函数FIR滤波器。在选择合适的带宽和较少的抽头个数条件下,寻找频域响应函数类似于高斯函数的窗函数FIR滤波器,这样就可以有效补偿非线性损伤,提高系统性能,本文称之为FIR-BP算法。

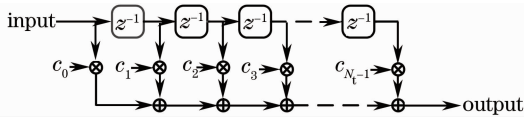


图4 直接型 FIR 滤波器结构
Fig. 4 Direct-form FIR filter

基于此,提出了一种应用简单的窗函数FIR滤波器的BP算法,其结构如图5所示,其中虚线框内为非线性处理模块,包含窗函数FIR滤波器。考虑到实际的偏振复用系统中,两个偏振方向的功率分布不均,因此要对 \hat{N} 做一个细微的调整,将其在两个偏振方向分解为 \hat{N}_x, \hat{N}_y ,即

$$\begin{cases} \hat{N}_x = i \frac{8}{9} \gamma [aF(E_x^2) + bF(E_y^2)] P_{in} \\ \hat{N}_y = i \frac{8}{9} \gamma [bF(E_x^2) + aF(E_y^2)] P_{in} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 i 为虚数单位, a, b 为权重因子, $0 < a < 1, 0 < b < 1, P_{in}$ 为发射机端入射到光纤中的光功率值, $F(\cdot)$ 表示经过FIR滤波。正如图5虚线框中所描述,信号进入非线性处理模块后,被分为 x, y 两个偏振方向的数据流,求出两路的功率后进行FIR滤波,然后与权重因子相乘,最后进行相位计算。为了减少色散补偿时傅里叶变换次数,将图2中所示的第一个和最后一个色散补偿模块的步长设为 $L/2$,其他色散补偿模块步长设为 L ,即将两个串联的色散补偿模块合二为一。

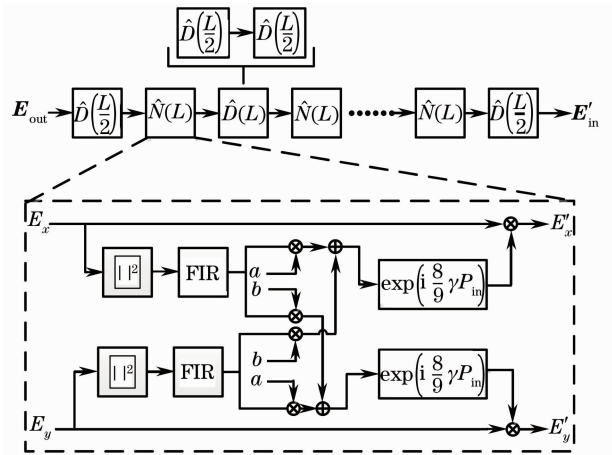


图5 FIR-BP 算法结构示意图
Fig. 5 Schematic diagram of FIR-BP

3 实验系统

图6为搭建的3个信道DP-16QAM传输640 km实验系统框图。在发射端Tx,3信道的光源分别采用中心波长为1550.12 nm的外腔激光器(ECL)和波长分别为1550.52 nm和1549.72 nm的两个分布式反馈激光器(DFB),3个光源经过复用器(mux.)后将光载波输入到双驱I/Q调制器中。将产生的长度为 $2^{15}-1$ 的伪随机比特序列(PRBS)加载到4电平的电信号上,将电信号加载到I/Q调制器上,产生波特率 $R_B=28$ Gb/t的非归零16进制正交幅度调制(NRZ-16QAM)光信号^[12]。经过偏振分束器(PBS)后,光信号被分为两束,其中一路进行适量的时延。两束信号再经过偏振合束器(PBC),成为了偏振复用16QAM(DP-16QAM)信号。信号经过掺铒光纤放大器(EDFA),使得入射光纤功率可以变化。传输链路由8个80 km标准单模光纤(SSMF)和EDFA连接而成,共计640 km。经过光纤链路的信号经由解复用器(De-Mux.)与本地振荡源一起进入一个集成的相干接收机中。相干检测到的信号数据存储在实时示波器中,进行离线处理。发射端激光器和本振激光器线宽分别为150 kHz,100 kHz,频偏为1 GHz,链路中所用的EDFA的增益为16 dB,噪声指数(NF)为4.5 dB。所用标准单模光纤相关参数为: $\alpha = 0.2$ dB/km, $\beta_2 = -2.0 \times 10^{-2}$ s²/m, $\gamma = 1.3$ (km·W)⁻¹。实验分别进行了只有ECL激光光源时的单信道传输实验,以及3个激光光源都用上时的波分复用传输实验。

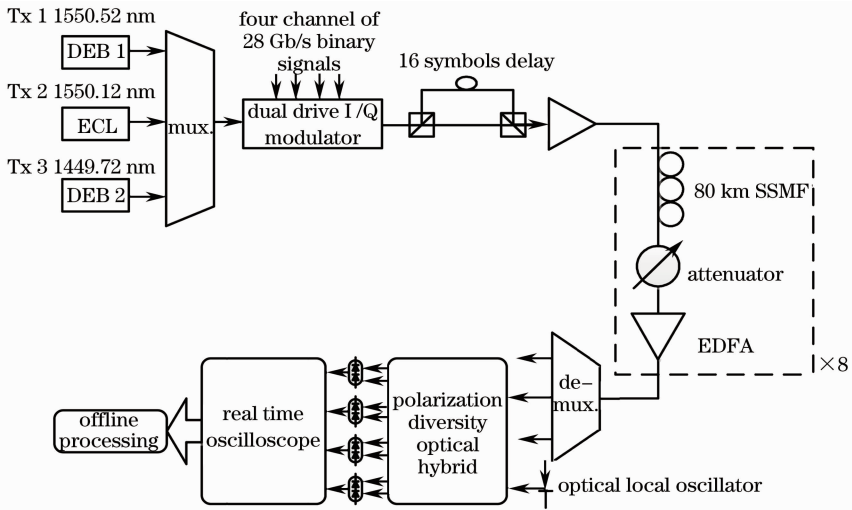


图 6 每信道 224 Gb/s DP-16QAM 实验传输系统框图

Fig. 6 224 Gb/s DP-16QAM experimental system block diagram

数字信号处理(DSP)算法结构如图 7 所示,分别进行了: 1) 对采样得到的信号 I_x 、 Q_x 、 I_y 、 Q_y 进行归一化与重采样,达到每个符号两个采样点; 2) 应用固定抽头的 FIR 滤波器进行色散补偿(即线性补偿)^[13],或应用标准 BP 算法及本文提出的窗函数 FIR-BP 算法进行色散和非线性损伤的联合补偿; 3) 应用 13 个抽头 FIR 滤波器的恒模算法^[14](CMA)自适应补偿剩余色散、偏振模色散(PMD)以及进行偏振解复用; 4) 频偏估计; 5) 应用正交相移键控(QPSK)分级联合最大似然的两级算法^[15]进行载波相位估计; 6) 符号判决,解码,计算 BER。

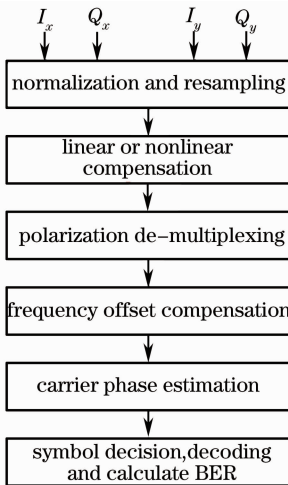


图 7 数字信号处理流程图

Fig. 7 Flow chart of digital signal processing

4 补偿参数优化和实验结果讨论

4.1 非线性补偿模块权重因子 a 、 b 的优化

在不加 FIR 滤波器条件下,对(2)式中的权重

因子 a 、 b 的选取进行优化。图 8 为单信道 DP-16QAM 经过 640 km 传输,在入纤功率 3 dBm 条件下,不同 a 、 b 取值所得 BER 的分布图。从图中可以看出,在 $a=0.45$ 、 $b=0.45$ 时, $R_{BE} \approx 0.0033$,为极小值。多次实验研究发现,随着入纤功率的增加, a 、 b 优化值也要相应增加,但这些数值差异不大,因此为简化处理,选取 $a=0.45$ 、 $b=0.45$,计算处理实验数据。

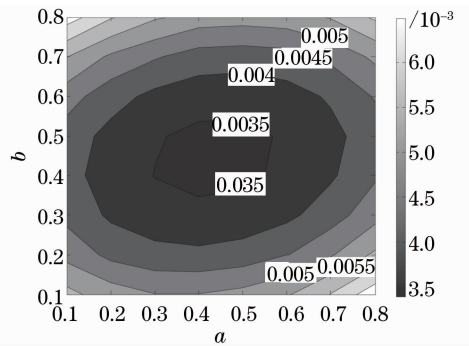


图 8 BER 随不同权重因子 a 、 b 的变化情况

Fig. 8 BER distribution with different weighting

factors a , b

4.2 FIR-BP 算法中窗函数滤波器参数的选取

下面研究不同 FIR 滤波器窗口形状、不同滤波器带宽、不同抽头个数对系统性能的影响。图 9 为单信道 DP-16QAM 经过 640 km 传输,在入纤功率 $P_{in} = 3$ dBm,分别使用汉宁(Hanning)窗、高斯(Gauss)窗、巴特利特(Bartlett)窗和布莱克曼哈里斯(Blackmanharris)窗 FIR 滤波器条件下,BER 随带宽以及抽头个数的分布图。

对比图 9 的 4 幅图可以看出, Hanning 窗和 Gauss 窗的 BER 情况明显优于 Bartlett 窗和

Blackmanharris 窗的情况。通过观察 4 种窗的频域特性(见图 10)可知,Hanning 窗和 Gauss 窗的频域特性类似于高斯函数,而其他两种窗的频域特性与

高斯函数相差较大。结合上面两点分析表明,选取频域特性为类高斯函数的窗函数 FIR 滤波器才能更加有效滤除非线性损伤引起的噪声。

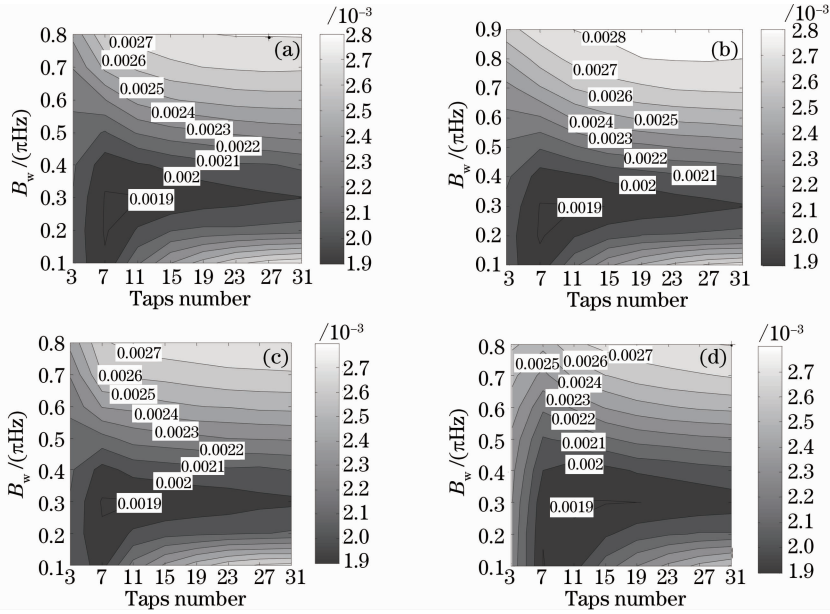


图 9 不同抽头个数和带宽条件下 BER 变化情况。(a) Hanning 窗；(b) Gauss 窗；(c) Bartlett 窗；(d) Blackmanharris 窗
Fig. 9 BER distributions with different number of taps and bandwidth conditions. (a) Hanning window; (b) Gauss window; (c) Bartlett window; (d) Blackmanharris window

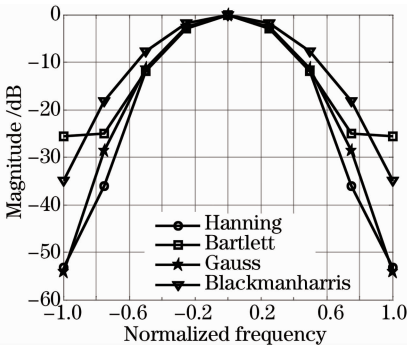


图 10 各种 FIR 滤波器窗频域响应

Fig. 10 Different FIR filter windows frequency responses

从图 9(a)中可以看出,当滤波器带宽 $B_w \approx 0.3 R_B$,抽头个数为 9 时, $R_{BE} \approx 0.00185$ 为极小值;滤波器带宽对算法性能影响很大,而抽头个数对算法性能影响相对较小。多次实验研究发现,随着入纤功率的提高,优化所得的滤波器带宽相应有所减小,这是由于高功率下非线性损伤增强,减小滤波器带宽可以滤除更多的噪声。但为简化计算,采用固定的滤波器带宽 $B_w \approx 0.3 R_B$,9 个抽头的 Hanning 窗 FIR 滤波器来计算处理实验数据。

4.3 FIR-BP 补偿算法与线性补偿算法以及标准补偿 BP 算法的比较

为检验 FIR-BP 算法补偿信道内与信道间非线性

损伤的性能,绘制对比了单信道和 3 信道条件下 224 Gb/s DP-16QAM 实验系统传输 640 km 后,应用 3 种算法补偿,其 BER 随入纤功率变化的曲线,如图 11 所示。其中 Sch LC 表示单信道线性补偿算法,Sch NLC 表示单信道标准 BP 补偿算法,Sch FIR-NLC 表示单信道 FIR-BP 补偿算法,WDM LC 表示 WDM 线性补偿算法,WDM NLC 表示 WDM 标准 BP 补偿算法,WDM FIR-NLC 表示 WDM FIR-BP 补偿算法。

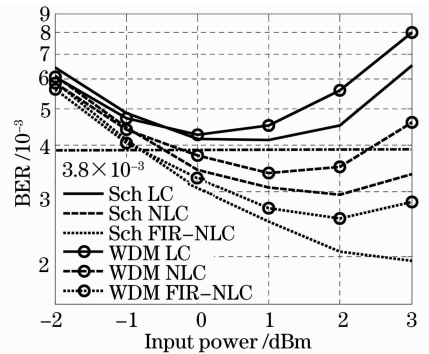


图 11 BER 随入纤功率 P_{in} 变化曲线

Fig. 11 BER performance with different input powers

对比单信道时的 3 条曲线可以看出,线性补偿的最佳入纤功率为 1 dBm,FIR-BP 算法将最佳入纤功率至少提高了 2 dB。在功率为 3 dBm 时,FIR-

BP 算法能够将 BER 降低至 3.8×10^{-3} 以下[软判决前向纠错(SD-FEC)阈值], 补偿效果明显好于标准 BP 算法。

对比 WDM 时的 3 条曲线可以看出, 线性补偿的最佳入纤功率为 0 dBm; 标准 BP 补偿算法将最佳入纤功率提高了 1 dB, 为 1 dBm; FIR-BP 算法将入纤功率相较线性算法提高了 2 dB, 为 2 dBm, 且能够有效地将 BER 降低至 3.8×10^{-3} 以下。但 3 种补偿方法下的系统性能与单信道条件相比均有所恶

化, 说明 3 信道波分复用条件下, 不仅存在信道内的 SPM, 还存在信道间非线性损伤, 包括交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)等。而 FIR-BP 算法不能完全补偿这些因素造成的损伤。但是 FIR-BP 仍然是 3 种算法中最优的。

图 12 中给出入纤功率为 3 dBm 时, 单信道传输条件下 3 种算法补偿后所对应的 3 个星座图, 可见 FIR-BP 算法是最好的。

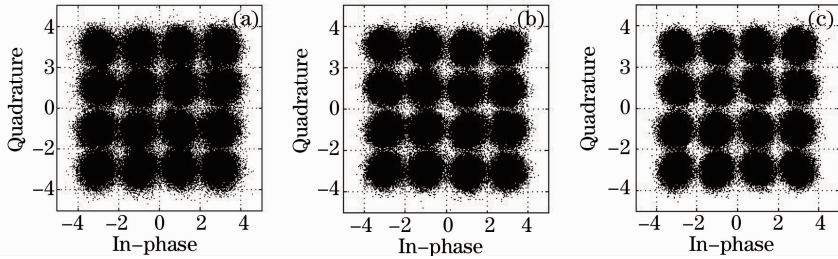


图 12 $P_{in}=3$ dBm 单信道时 3 种算法得到的星座图。(a) Sch LC; (b) Sch NLC; (c) Sch FIR-NLC

Fig. 12 Constellations of 3 algorithms in single channel when $P_{in}=3$ dBm. (a) Sch LC; (b) Sch NLC; (c) Sch FIR-NLC

为研究链路中的损耗对算法的影响, 实验更换了链路中的部分连接器件, 使原来的链路的总损耗从 22 dB 降至 18 dB, 再次重复了上述实验。实验数据处理结果如图 13 所示。

可能将搭建的实验系统中的链路损耗降低, 可以大大降低 BER。

单信道传输情况下, 线性补偿的最佳入纤功率为 -2 dBm, FIR-BP 算法将最佳入纤功率至少提高 3 dB。FIR-BP 算法能够将 BER 从线性补偿的 2×10^{-3} 降至 7×10^{-4} , 远远低于硬判决 FEC 的阈值 1×10^{-3} 。因此减少链路损耗, 可以提高系统对于非线性损伤的容忍。

对于 3 信道 WDM 传输情况, 线性补偿的最佳入纤功率为 -2 dBm; 标准 BP 补偿算法相较线性算法几乎提高不大; FIR-BP 算法将入纤功率相较线性算法提高了 1 dB, 为 -1 dBm, 且能够将 BER 降低接近硬判决 FEC 阈值。

图 14 中给出功率为 1 dBm 时的单信道时 3 种算法所对应的 3 个星座图。可见 FIR-BP 算法[见图 14(c)]仍然是最好的, 且好过系统损耗稍高的情况[见图 12(c)]。

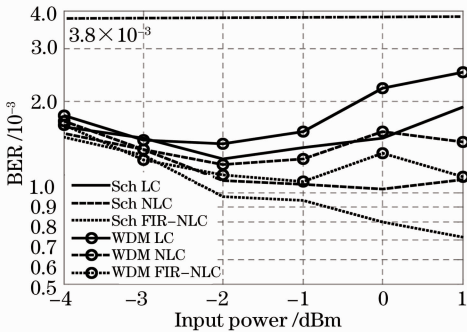


图 13 BER 随入纤功率 P_{in} 变化曲线(链路总损耗 18 dB)

Fig. 13 BER performance with different input powers (total loss: 18 dB)

整体上看, 图 13 与图 10 相比, BER 有了明显的降低, 说明链路损耗会对系统性能有很大影响, 尽

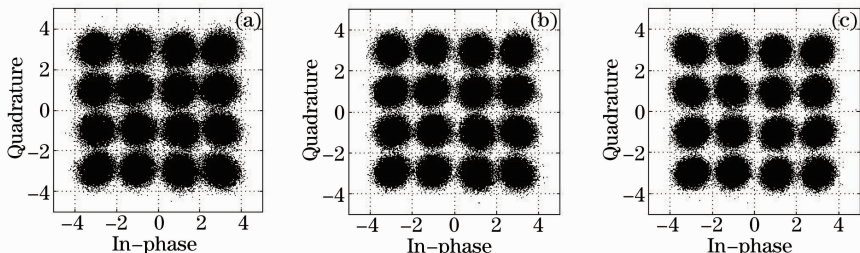


图 14 $P_{in}=1$ dBm 时单信道时 3 种算法得到的星座图。(a) Sch LC; (b) Sch NLC; (c) Sch FIR-NLC

Fig. 14 Constellations of 3 algorithms in single channel when $P_{in}=1$ dBm. (a) Sch LC; (b) Sch NLC; (c) Sch FIR-NLC

5 结 论

提出一种基于窗函数 FIR 滤波器和 BP 算法结合实现非线性补偿的方案,并通过单信道和 3 信道 224 Gb/s(28 Gbaud)DP-16QAM 传输 640 km 系统实验,对该算法的有效性进行了验证。结果表明, Hanning 窗和 Gauss 窗 FIR 滤波器的频域特性类似于高斯函数,9 个抽头时就能够有效补偿非线性损伤,然而其计算复杂度要比高斯滤波器小得多。单信道与 3 信道传输实验结果均表明, FIR-BP 算法能够较好地补偿信道内与信道间的非线性损伤。与线性补偿算法相比, FIR-BP 算法能够将 BER 降低至软判决 3.8×10^{-3} 以下。单信道传输时, FIR-BP 算法能提高最佳入纤功率至少 3 dB;而对于 3 信道传输, FIR-BP 算法能提高最佳入纤功率 2 dB。减少光纤链路中的总的链接损耗,可以提升系统对于非线性损伤的容限,借助 FIR-BP 算法,可以使系统 BER 接近硬判决的阈值 1×10^{-3} 。本文的研究结果对实际中进行非线性补偿的设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 P J Winzer, A H Gnauck, C R Doerr, *et al.*. Spectrally efficient long-haul optical networking using 112-Gb/s polarization-multiplexed 16-QAM[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(4): 547–556.
- 2 Cao Wenhua, Wang Yong, Liu Songhao. Dispersion and nonlinearity compensation in optical fiber communication systems by optical phase conjugation incorporated pulse prechirp[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0906005.
曹文华, 王 勇, 刘颂豪. 光纤通信系统中基于光学相位共轭和预啭啾的色散及非线性补偿研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0906005.
- 3 F P Guiomar, J D Reis, A L Teixeira, *et al.*. Mitigation of intra-channel nonlinearities using a frequency-domain Volterra series equalizer[J]. *Opt Express*, 2012, 20(2): 1360–1369.
- 4 P Boffi, P Martelli, M Cirigliano, *et al.*. PDM-16QAM transmission performance over uncompensated fiberlinks[J]. *Opt Express*, 2011, 19(22): 21898–21903.
- 5 R Asif, C Y Lin, B Schmauss. Logarithmic versus modified

- digital backward propagation algorithm in 224 Gbit/s DP-16QAM transmission over dispersion uncompensated fiber links[J]. *Opt Eng*, 2012, 51(4): 045007.
- 6 D Rafique, M Mussolin, M Forzati, *et al.*. Compensation of intra-channel nonlinear fibre impairments using simplified digital back-propagation algorithm[J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9453–9460.
- 7 L B Du, A J Lowery. Improved single channel backpropagation for intra-channel fiber nonlinearity compensation in long-haul optical communication systems[J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 17075–17088.
- 8 G P Agrawal. *Applications of Nonlinear Fiber Optics* (2th Edition) [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
G P Agrawal. 非线性光纤光学原理与应用(第二版)[M]. 贾东方, 余震虹 译. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- 9 Gao Ying, Ke Hongjian, Zhong Kangping, *et al.*. Assessment of intra-channel nonlinear compensation for 112 Gb/s dual polarization 16QAM systems[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(24): 3902–3910.
- 10 Y Gao, J C Cartledge, J D Downie, *et al.*. Nonlinearity compensation of 224 Gb/s dual-polarization 16-QAM transmission over 2700 km[J]. *Photon Technol Lett*, 2013, 25(1): 14–17.
- 11 Xu Jingbo. Study on Approximation Theory and Application of Gaussian Filter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. 14–49.
许景波. 高斯滤波器逼近理论与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. 14–49.
- 12 Yan Shuangyi, Wang Dawei, Gao Yuliang, *et al.*. Generation of square or hexagonal 16-QAM signals using a single dual drive IQ modulator driven by binary signals[J]. *Opt Express*, 2012, 20(27): 29023–29034.
- 13 Xu Xia, Xi Lixia, Zhang Xiaoguang, *et al.*. Design and optimization of chromatic dispersion compensation block in digital coherent optical receiver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1106001.
徐 霞, 席丽霞, 张晓光, 等. 光数字相干接收机中色散补偿模块设计与优化[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1106001.
- 14 Zeng Xiangye, Liu Jianfei, Zhao Qida. Study on dispersion equalizer and algorithm for polarization multiplexed fiber optics communication systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0206003.
曾祥烨, 刘剑飞, 赵启大. 偏振复用光纤通信系统色散均衡器及算法的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0206003.
- 15 Yuliang Gao, A P T Lau, Chao Lu, *et al.*. Low-complexity two-stage carrier phase estimation for 16-QAM systems using QPSK partitioning and maximum likelihood detection [C]. *LOS Angeles: Optical Fiber Communication Conference*, 2011.

栏目编辑: 王晓琰