

光纤通信中的克尔非线性补偿技术

谢连妮^{1*}, 曹蕾², 张璐³, 余玉揆⁴

¹黑龙江省气象数据中心, 黑龙江 哈尔滨 150030;

²哈尔滨市气象台, 黑龙江 哈尔滨 150028;

³西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

⁴哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 随着传输容量和传输距离的增大, 光纤克尔非线性效应越来越明显, 已成为目前限制光纤通信系统性能的主要因素。详细介绍了数字向后传播算法、微扰法等光纤通信中克尔非线性补偿技术的基本原理, 分析了这些技术的发展现状, 比较和总结了各算法的优缺点, 对各技术的应用前景进行了展望。

关键词 光通信; 光纤克尔效应; 非线性补偿技术; 相干通信

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.060002

Techniques for Kerr Nonlinearity Compensation in Fiber Communication Systems

Xie Lianni^{1*}, Cao Lei², Zhang Lu³, Yu Yukui⁴

¹Heilongjiang Meteorology Data Center, Harbin, Heilongjiang 150030, China;

²Harbin Meteorological Station, Harbin, Heilongjiang 150028, China;

³School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

⁴College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract As the transmission capacity and distance increase, Kerr nonlinearity becomes more and more obvious, which is currently becoming a major factor limiting the fiber transmission performances. The basic principles of some techniques for fiber Kerr nonlinearity compensation in fiber communications are introduced in detail, such as the digital backward propagation algorithm and the perturbation-based nonlinear compensation method. The development status of these technologies is reviewed. The advantages and disadvantages of each algorithm are also presented. Furthermore, the trend and potential applications of these technologies are prospected.

Key words optical communications; fiber Kerr effects; nonlinearity compensation technology; coherent communication

OCIS codes 060.4510; 060.1660

1 引言

近年来, 处于大数据时代的全球通信需求容量呈指数倍增长^[1]。根据 2017 年度 Cisco Visual Networking Index(VNI)的预测报告^[2], 2016 年, 全球 IP 数据业务为每月 96 Exabytes, 而到 2021 年, 这一数据将增长近 3 倍, 达到 278 Exabytes。驱动

这一增长的背后力量主要是云计算、在线高清视频、物联网、3/4/5G 和虚拟现实等大带宽应用的快速发展。光纤介质因具有高带宽及低损耗的特点, 已成为高速网络传输的最佳介质。基于光纤传输的光纤通信系统承载了整个网络带宽需求, 构成了现代通信系统的主干网络。

波分复用(WDM)技术、相干接收技术、高阶调

收稿日期: 2018-08-31; 修回日期: 2018-10-05; 录用日期: 2018-10-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61605149)

* E-mail: xielianni@163.com

制格式和偏振复用(PDM)技术等^[3-6]的结合使得骨干光纤传输网的容量在过去十几年中快速增长,从最开始的 $2.5 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 到 $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$,再到现在的几十 $\text{Tb}\cdot\text{s}^{-1}$ 。根据香农定理,对于线性传输系统,其理论通信容量上限由香农极限决定,随着通信系统容量的增加,为满足信噪比的要求,信号的功率也随之增加。然而,光纤为非线性信道,光功率的增加会导致严重的光纤克尔非线性(Kerr nonlinearity)损伤,这限制了容量的继续增加。因此,光纤克尔非线性损伤决定了光纤传输网络的最大容量^[7-8]。

针对克尔非线性损伤问题,国内外学者进行了大量的研究并提出了各种解决方案,其主要区别在于技术实现的复杂度、补偿信道内还是信道间的非线性损伤等方面。本文对现有的主流克尔非线性补偿算法基本原理和优缺点进行了综述,并对技术发展趋势进行了展望。

2 克尔非线性效应概述

光纤非线性效应种类很多且机理非常复杂,目前通常认为,克尔非线性效应是限制光纤传输系统性能的主要因素^[9]。波分复用(WDM)系统中的克尔非线性效应如图 1 所示,克尔效应可分为信道内非线性效应和信道间非线性效应。其中,信道内非

线性效应包括:自相位调制(SPM),信道内交叉相位调制(intra-channel XPM)和信道内四波混频(intra-channel FWM)。信道间非线性效应包括:信道间交叉相位调制(inter-channel XPM)和信道间四波混频(inter-channel FWM)。信道间的 XPM 和 FWM 一般直接称为 XPM 和 FWM,而信道内的 FWM 和 XPM 分别称为 IFWM 和 IXPM。

SPM 是光脉冲自身强度变化引起的相位调制, XPM 和 IXPM 分别是信道内和信道间相邻光脉冲功率变化引起的相位调制。IFWM 是由同一信道内 3 个不同时刻的脉冲相互作用而产生新脉冲的过程,而 FWM 是由位于 3 个不同频率的脉冲相互作用产生第 4 个频率脉冲的过程。与 SPM 和 XPM 引起的光脉冲非线性相移不同, FWM 和 IFWM 会引起光信号的功率波动。

根据上述非线性克尔效应原理,克尔非线性效应与比特率和信道间隔之间的关系如表 1 所示。光纤传输系统可通过增加比特率和减少信道间隔两种方式增加传输容量。然而,随着比特率的增大,信道内非线性克尔效应和 XPM 也将加剧,从而严重降低光纤传输性能。另一方面,为了进一步提高频谱效率,下一代 WDM 系统的信道间隔将越来越窄,这也会加剧 XPM 和 FWM 的非线性效应。

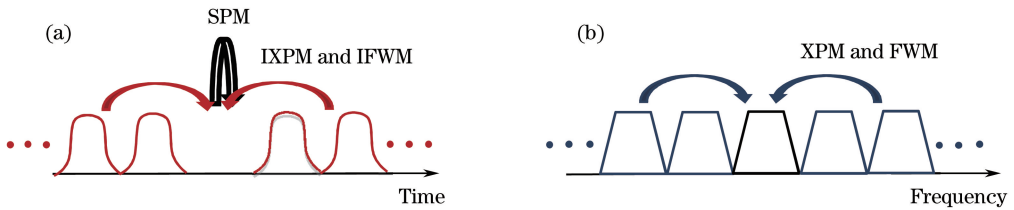


图 1 WDM 系统中的克尔非线性效应。(a)信道内; (b)信道间

Fig. 1 Kerr nonlinear effect within WDM system. (a) Intra-channel; (b) inter-channel

表 1 克尔非线性效应与信号比特率和信道间隔之间的关系

Table 1 Kerr nonlinear effect versus bit rate and channel spacing

Kerr nonlinearity	Intra-channel Kerr nonlinearity	XPM	FWM
Bit rate	↗	↗	No impacts
Channel spacing ↘	No impacts	↗	↗

Note: ↗ markers indicate increasing, whereas ↘ markers indicate reduction

3 克尔非线性效应补偿技术

信道内和信道间克尔非线性效应是光纤传输进一步扩容的瓶颈,故克尔非线性损伤的补偿抑制技术是下一代光纤传输系统的关键技术。目前,克尔非线性补偿技术可分为光域补偿技术和数字域补偿技术。本节将对现有主流非线性补偿算法的基本原理进行介绍,并分析其优缺点,包括:数字向后传播

补偿(DBP)算法、Volterra 级数非线性均衡器(VNLE)、相位共轭算法(PC)、微扰算法(PPD)和先进调制格式(Advance modulation)算法等。

3.1 数字反向传播 DBP 补偿算法

数字向后传播算法(DBP)^[10-11]是一种最基本的非线性补偿算法。信号在光纤中的传输可根据非线性薛定谔方程(NLSE)建模,表示为

$$\frac{\partial E_{x/y}}{\partial z} + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E_{x/y}}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} E_{x/y} = j\gamma'(|E_x|^2 + |E_y|^2)E_{x/y}, \quad (1)$$

式中: $E = [E_x, E_y]$ 为传输的光信号; 下标 x 和 y 分别为 X 偏振态和 Y 偏振态; t 为时间; α 为光纤衰减系数; β_2 为二阶色散系数; γ 为光纤非线性系数; $\gamma' = 8/9 \times \gamma$ 为双偏振态非线性系数。DBP 的基本思想是通过反演 NLSE 方程建立一段虚拟光纤, 来补偿实际光纤传输过程中的线性和非线性损伤, 其中虚拟光纤的参数与真实传输光纤参数绝对值相等, 方向相反, 而反演 NLSE 方程可通过分步傅里叶方法 (SSFM)^[9] 实现。

SSFM 算法将光纤传输链路分为许多长度为 h 的小段光纤并进行反演, h 为仿真步长。当 h 足够小时, 可认为信号损伤由线性和非线性损伤构成, 并

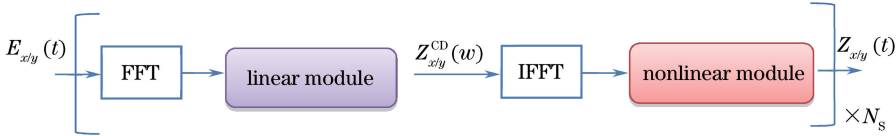


图 2 DBP 算法示意图

Fig. 2 Schematic of DBP algorithm

仿真步长 h 决定了 SSFM 算法的精度和复杂度, 且当仿真步长 h 较小时精度较高。因此, 为获得较好的非线性补偿性能, DBP 算法中的仿真步长 h 需设置得比较小, 但这会导致算法的实现复杂度较高, 同时, 该算法也需要事先知道传输光纤的长度, 色散等各种参数; DBP 算法对信道内非线性损伤补偿效果较好, 但对信道间非线性损伤和放大的自发辐射 (ASE) 噪声与信号之间相互作用产生的非线性损伤补偿效果较差。现阶段主要研究如何降低 DBP 算法的复杂度和提升 DBP 补偿 WDM 信道非线性损伤性能。

为降低传统 DBP 的复杂度, Secondini 等^[12] 提出了基于单步长结构的 E-SSFM (Enhance SSFM) 的 DBP 方案, 相比较于标准 SSFM, E-SSFM 的实现复杂度降低了一个数量级, 且不损失补偿效果。而 Guiomar 等^[13] 提出了一种基于并行 SSFM 的易于硬件实现的 DBP 算法, 并通过 $224 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ PDM-16QAM 系统验证了该算法。Zhang 等^[14] 则提出了一种适用于子载波复用调制系统低复杂度的 DBP 算法。Wahls 等^[15] 在非线性傅里叶域 (NFD) 中实现了 DBP 算法, 对于 D 个采样数据, 仅需要 $O(D \ln D)$ 的运算量, 复杂度得到极大降低。但对

可分别通过线性 (Linear module) 和非线性 (Nonlinear module) 补偿模块进行补偿。图 2 为 DBP 算法示意图, 给出了 DBP 在接收机端补偿过程 (N_s 为仿真步数), 其中 FFT 为傅里叶变换, IFFT 为逆傅里叶变换。线性损伤补偿模块一般在频域中实现, 可表示为

$$Z_{x/y}^{CD}(w, z) = E_{x/y} \exp \left[-j h \left(\frac{\alpha}{2} + j \frac{\beta_2}{2} \right) \right], \quad (2)$$

式中: $Z_{x/y}^{CD}$ 为线性损失补偿模块输出。由 (2) 式可以看出, 线性补偿模块补偿了光纤损耗和光纤色散。经过频域时域转换, 非线性补偿模块将补偿克尔非线性损伤, 这一过程可表示为

$$Z_{x/y}(w, z) =$$

$$Z_{x/y}^{CD} \exp [-j \varphi \gamma' h (|Z_x^{CD}|^2 + |Z_y^{CD}|^2)], \quad (3)$$

式中: $Z_{x/y}$ 为非线性补偿模块输出, $0 < \varphi < 1$ 为优化参数。(3) 式中指数部分代表了非线性克尔相移。

于实际系统而言, 这些算法的复杂度仍然过高。

为改善 DBP 算法补偿信道间非线性损伤的能力, 各国科研工作者们也提出了大量适用于 WDM 信道的 DBP 算法, 如多信道 DBP 算法等^[16-17], 但这些算法比单信道需更小的仿真步长, 导致复杂度急剧上升。为降低复杂度, 提出了 Couple-equation DBP^[18] 和 Advanced-DBP^[19] 等技术。而针对 DBP 算法在 WDM 信道的补偿性能下降的问题, Alic 等^[20-21] 指出, 不同 WDM 信道的激光器频率波动的不一致性会影响 DBP 算法性能, 并利用频率栅使得 WDM 各信道的光源相同, 保证了频率波动的一致性, 提升了传统 DBP 算法对 WDM 信道非线性损伤的补偿性能, 但并未降低算法的复杂度。

综上所述, 目前 DBP 算法的高复杂度使得其无法适用于实际系统, 同时, 该算法对 WDM 信道的补偿效果也不够理想。

3.2 相位共轭法

相位共轭法 (PC) 可分为光域和数字域两种, 相位共轭法原理如图 3 所示。光域相位共轭 (OPC) 将光纤链路对称分为两段, 利用相位共轭器件使信号在第二段链路的非线性损伤与第一段链路的非线性损伤相反, 进而消除非线性影响^[22-23]。但这种光域技术

需采用如相位共轭器等额外的光学器件,且有需要精确安放在光纤传输线路的中间等的特殊要求。同时,

光器件也将引入额外非线性损伤。文献[24]也提出了在光纤链路中放置多个相位共轭器的技术。

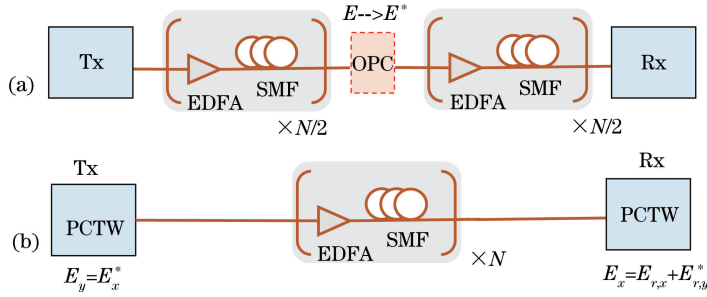


图3 相位共轭法原理图。(a) OPC;(b) PCTW

Fig. 3 Schematic of phase conjugation method. (a) OPC; (b) PCTW

相位共轭双波(PCTW)算法是2013年Liu等^[25-26]提出的一种基于DSP的相位共轭非线性解决方案,其在光纤线路中传输相位共轭的两组数据,一般为偏正方向上的两组数据。当光纤线路为色散对称时,从薛定谔非线性方程(NLSE)可知,相互共轭的数据受到的非线性损伤 δE_y 和 δE_x 也为相位共轭,即

$$\delta E_y = -\delta E_y^*, \quad (4)$$

式中: $(\cdot)^*$ 为埃尔米特转置符号。在接收端可以利用此共轭关系,将非线性损伤从接收信号 $E_{r,x}$ 和 $E_{r,y}$ 中剥离出来,恢复原始信号 E_x ,即

$$E_x = E_{r,x} + E_{r,y}^*. \quad (5)$$

Liu等^[26]也讨论了PCTW在WDM信道中的应用,并研究了偏振模色散对算法的影响。PCTW方案性能良好,算法结构简单,计算复杂度极低,但牺牲了一半频谱效率。为解决此问题,Yoshida等^[27]提出了一种采用正交脉冲整形的双PCTW方案,该算法本质上是通过升高信号调制阶数实现同频谱效率传输,例如,该算法通过发送9QAM信号实现QPSK信息传输,其频谱利用率实际只有 $2/\ln 9$ 。该算法改变了原有收发机设置,很难应用于更高阶调制格式如8QAM等。文献[28]提出了一种高频谱效率的改进PCTW算法,可将频谱效率提升至80%以上,但仍然无法达到100%的频谱效率。

科研工作者们也将PCTW算法推广至多载波OFDM系统。Yi等^[29]利用密尔矩阵的对称性,将PCTW应用到实值OFDM中,但实值OFDM本身已经牺牲了一半的频谱效率,因此本质上并未提升PCTW的频谱效率。OFDM子载波间隔小,两相邻子载波受到的非线性损伤可以近似认为相同,利用此特点,Le等^[30]用非线性损伤估计结果补偿周边子载波,进而提高了整体频谱效率,但随着频谱效率

的提升,此算法性能急剧下降。

综上,PCTW方案性能良好,算法结构简单,能够很好地应用于实际系统,但牺牲了一半的频谱效率。研究如何在保持传统PCTW性能优势的同时提升系统频谱效率仍然为一个主要课题。需要注意的是,PCTW性能增益主要适用于QPSK、8QAM等信号,对16QAM及以上的高阶信号并不适用。

3.3 微扰PPD算法

Mecozzi等^[31]指出,光纤非线性损伤可以看成是一个微扰量,并给出了基于微扰理论的PPD算法。文献[32-33]提出了PPD算法精准时域模型。根据一阶扰动方程,有

$$E_{x/y} = E_{x/y,0} + \gamma \delta E_{x/y}, \quad (6)$$

式中: $E_{x/y,0}$ 为NLSE方程部分线性解; $\delta E_{x/y}$ 为一阶扰动量。在频率域内, $\delta E_{x/y}$ 具有以下形式

$$\begin{aligned} \delta E_{x/y}(\omega, L) = & h_{cd}(\omega) \int_0^L F_{x/y}(\omega, z) \exp\left(-\frac{j\omega^2 z}{2}\right) dz, \quad (7) \\ F_{x/y}(\omega, z) = & j \frac{8}{9} \int \exp(-j\omega t) \delta E_{x/y,0}(t, z) \times \\ & [E_{x,0}(t, z) E_{x,0}^*(t, z) + \\ & E_{y,0}(t, z) E_{y,0}^*(t, z)] dz, \quad (8) \end{aligned}$$

式中: h_{cd} 为色散的频率响应; $E_{x/y,0}$ 为发射端的发射信号。

PPD算法的优点在于能够单步求出非线性损伤,相较于VNLE和DBP算法,复杂度得到一定程度的降低,但其非线性扰动系数数目非常庞大,复杂度仍然较高。为降低算法复杂度,文献[34]提出,对于QPSK信号,信号相乘运算可转换为信号旋转操作,基于此,可减少PPD算法中乘法器数目,进而一定程度上降低复杂度。对于高阶信号如16QAM,Peng等^[35]提出将16QAM拆分成两个独立的QPSK,

进而将 16QAM 中信号相乘项也转化为信号旋转,复杂度得到一定的降低。Gao 等^[36]提出,当 PPD 采用色散对称链路时,算法的计算量将得到较大幅度的降低。Ghazisaeidi 等^[37]通过发送端的脉冲整形降低算法的复杂度。Li 等^[38]将整个扰动系数曲线量化成有限点,并基于有限的扰动系数点将非线性损伤计算出来,这样虽然会损失一定的精度,但计算量得到极大降低。Liang 等^[39]总结了 PPD 算法的发展并指出 PPD 比 DBP 算法的复杂度低。Peng 等^[40]提出了一种利用训练序列计算微扰项的方法,并可应用于任意整形波形、色散分布和功率分布的光纤传输系统,扩大了 PPD 算法应用领域。根据现有报道可以看出,复杂度仍然是 PPD 算法实用化的瓶颈,尤其对于应用于 16QAM 等高阶调制格式的情况。

3.4 先进调制格式

信号的调制格式不但决定了系统的理论线性 OSNR 性能,而且还影响系统的非线性容忍度,如高阶调制格式 16QAM 比低阶调制格式 BPSK 更易受到非线性损伤,因此,通过精心设计调制格式可提升系统的非线性容忍度,缓解非线性损伤,进而提升传输性能。

针对单载波调制格式,提升非线性容忍度的先进调制技术主要包括两种类型^[41]:星座几何整形(GS)和星座概率整形(PS)。

GS 法通过改变标准星座图的星座点分布位置,最大化星座点间的最小欧氏距离,其星座点仍然为等概率分布。文献^[42]首次将星座几何整形思想引入光纤传输系统。图 4 为信噪比(SNR)为 25 dB 时的星座示意图。图 4(a)为标准的 256QAM 星座图,而图 4(b)为采用星座几何整形的星座点,是一

种环形 256QAM 星座点,每个圆环半径均进行了优化,以降低信号的峰均功率比(PAPR)。文献^[43]表明,传输 400 km 后,与传统 256QAM 调制格式相比,该环形 256QAM 的传输性能可提升 1 dB。但这种环形星座图对收发机有相应的改变,目前无法和现有系统结合,因此限制了其实际应用价值。另一方面,星座几何整形可在时隙、波长和偏振态等维度构成的空间中优化星座点分布,如偏振切换正交相移键控(PS-QPSK)和 4D-128QAM 等多维调制格式^[44-45]都可认为是通过星座几何整形获得的。这些报道优化了星座点间的欧几里德距离,提升了线性 SNR 性能,但这些调制格式未考虑光纤非线性效应的影响,当存在非线性损伤时,传输性能有一定下降^[45]。并且随着维度和频谱效率的增加,接收端 DSP 的复杂度也急剧上升。文献^[46]结合偏振态平衡原理提出了 8D-QPSK 调制格式,其具有和二进制相移键控(BPSK)相同的频谱效率,非线性性能得到很大的提高,并被加拿大 Ciena 公司应用于长距离海底传输网络。

星座概率整形法通过改变星座点的分布概率而获得适合非线性信道传输的星座图,缓解了光纤非线性损伤^[47-49]。图 4(c)为采用了星座概率整形的 256QAM 星座图,其星座点概率分布为 Max-well-Boltzmann 分布。由于星座图为非均匀分布概率,收发机需要进行概率整形映射(DM)和反 DM 操作,完成二进制数据的映射和反映射,这增加了复杂度,且复杂度随着采用高阶高频谱星座图而急剧上升。

鉴于几何星座整形和星座概率整形的优缺点,综合考虑几何和概率优化的调制格式在未来具有很大的应用前景。

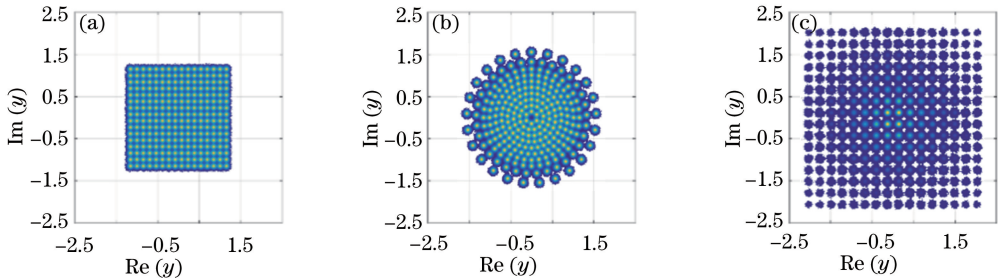


图 4 信噪比为 25 dB 时的星座示意图^[41]。(a)标准 256QAM;(b)采用几何星座整形的 star-256QAM;(c)采用星座概率整形的 256QAM

Fig. 4 Constellation diagrams for 25 dB SNR^[41]. (a) Standard 256QAM; (b) geometrically shaped star-256 polar modulation; (c) probabilistically shaped 256QAM

3.5 一些其他的克尔非线性损伤补偿方案

非线性傅里叶变换(NFT)算法为一种在非线

性傅里叶域(Nonlinear Fourier Domain)内传输信息的方法^[50-52],其对非线性损伤的抑制效果较好。

Bülow 等^[53]将该算法应用于相干接收的离散谱系统。Le 等^[54]将该算法应用于如 16QAM 和 64QAM 等高阶调制方式。但 NFT 算法复杂度极高,实时性差。针对实时性较差的问题,Wahls 等^[55]提出了快速非线性傅里叶变换(Fast inverse Nonlinear Fourier Transform)。

Volterra 级数是非线性物理现象^[56]的数值仿真方法。文献^[57]首次将 Volterra 级数用于光纤传输系统的建模。通过频率域内解非线性薛定谔方程,得到一组 p 阶非线性传递函数,即为 Volterra 级数传递函数。基于反 Volterra 级数传递函数,可建立 Volterra 级数非线性均衡器(VNLE),反向模拟信号在光纤中的传输,用于补偿非线性损伤和光纤色散。VNLE 能有效地补偿信道内的非线性损伤,并可采用并行结构,采用并行结构时仅需 DBP 一半的计算时间^[58-59]。但其复杂度较高这也是 VNLE 无法实际应用的原因。为了降低 VNLE 均衡器的复杂度,变权重 VNLE 方案^[60-61]等一些新技术被提出。除了复杂度的问题,VNLE 应用于 WDM 信道时,受到旁边信道干扰,补偿效果也会下降。

其他非线性损伤补偿抑制算法也不断被提出,如基于支持向量机(SVM)的机器学习^[62-63]和最大后验概率(MAP)^[64]等。但这些算法的复杂度都较高,不适合实际应用。例如 SVM 算法利用训练序列训练 SVM 分类器,对接收到的信号进行非线性判决,提升了系统抗非线性损伤性能,但机器学习复杂度较高,

且信道发生变化时,需重新训练,计算量大。

3.6 克尔非线性损伤补偿方案总结

上述补偿抑制技术的主要区别在于复杂度的不同和补偿信道内或信道间的非线性损伤的能力不同^[65-66]。光纤克尔非线性补偿方案的特点如表 2 所示。数字向后传播 DBP 算法可有效地补偿信道内非线性损伤,但其以极高的实现复杂度为代价,难以实际应用。VNLE 非线性均衡器具有并行实现结构,其复杂度较 DBP 低,但对于实际应用而言其复杂度仍过高。DBP 和 VNLE 对信道内克尔非线性损伤补偿效果较好,但对信道间克尔效应(如 XPM 和 FWM)的作用不大,故未来应致力于降低这两种方案的复杂度,同时发展其补偿信道间克尔非线性损伤的能力。OPC 和 PCTW 实现简单,但 OPC 需要额外的光器件,且需要精确地置于传输链路中间位置,这降低了光纤传输链路的灵活度。PCTW 算法的复杂度低且性能较好,但牺牲了一半的频谱效率。微扰 PPD 算法需要大量的微扰因子,复杂度对于实际系统过高。机器学习技术也由于其高复杂度而未能被实际系统采用。先进调制格式的复杂度适中,综合考虑几何和概率优化的调制格式在未来具有很大的应用前景。而这几种方案相对于 DBP 和 VNLE 方案,加强了对信道间 XPM 的补偿能力,但对信道内克尔非线性损伤补偿性能下降。非线性傅里叶变换 NFT 方案的实现复杂度极高,但其对信道间 FWM 损伤补偿性能较好。

表 2 光纤克尔非线性补偿方案的特点

Table 2 Characteristics of Kerr nonlinearity compensation technologies

Technology	Implementation	Intra channel Kerr effect	XPM	FWM	Complexity
DBP	Digital	++	--	--	Very high
Refs. [11-21]					
PC	Digital /optical	+	+	-	Low
Refs. [22-30]					
PPD	Digital	+	+	-	High
Refs. [31-40]					
Advance modulation	Digital	+	+	-	Medium
Refs. [41-49]					
NFT	Digital	+	+	+	Very high
Refs. [50-55]					
VNLE	Digital	++	--	--	High
Refs. [56-61]					
Machine Learning	Digital	+	+	-	Very high
Refs. [62-64]					

Note: Plus markers indicate the potential of full(++) or partial(+) mitigation, whereas minus markers indicate cases in which the technique has no(--) or typically very small(-) impact on the nonlinearities.

4 结束语

简要地介绍了光纤克尔非线性效应,并分析得出:随着波特率的增大和信道间隔的变窄,克尔效应也愈加明显。而下一代光纤通信系统的主要特点是高波特率和窄信道间隔,这说明光纤克尔非线性损伤将严重影响光纤传输系统的性能。

随后介绍了几种克尔非线性补偿技术的基本原理,分析了补偿信道内和信道间克尔非线性损伤的能力以及实现复杂度,并分析了其在下一代光纤通信系统中的应用前景。广义上讲,非线性补偿技术主要可分为两种:直接计算并补偿非线性损伤和设计具有高非线性容忍度的系统补偿抑制非线性损伤。直接计算并补偿非线性损伤的技术包括 DBP、VNLE 和 PPD 等,这些方案的复杂度高限制了其实时应用性。设计高非线性容忍度的系统进行补偿抑制非线性损伤的方案包括先进调制格式、NFT、机器学习 和 PCTW 等,其中先进调制格式技术的复杂度适中,PCTW 算法的复杂度低,这使得其有望在下一代光纤传输系统中得到应用。

参 考 文 献

- [1] Winzer P J, Neilson D T. From scaling disparities to integrated parallelism: A decathlon for a decade[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(5): 1099-1115.
- [2] CISCO visual networking index forecast highlights tool: 2016-2021 [EB/OL]. (2018-02-06) [2018-08-30]. https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights.html.
- [3] Brackett C A. Dense wavelength division multiplexing networks: Principles and applications [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1990, 8(6): 948-964.
- [4] Liu X, Chandrasekhar S, Winzer P J. Digital signal processing techniques enabling multi-Tb/s superchannel transmission: An overview of recent advances in DSP-enabled superchannels [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(2): 16-24.
- [5] Yang S J, Ke X Z. Carrier frequency stability control in coherent optical communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 040601.
杨尚君, 柯熙政. 相干光通信中载波频率稳定控制 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 040601.
- [6] Cao W H. Performance comparison of different

chromatic dispersion compensation schemes in quasi-linear fiber-optic transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0406002.

曹文华. 准线性光纤传输系统中几种色散补偿方案的性能比较 [J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0406002.

- [7] Dar R, Shttaif M, Feder M. New bounds on the capacity of the nonlinear fiber-optic channel [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 398-401.
- [8] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, *et al.* Capacity limits of optical fiber networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 662-701.
- [9] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. 5th ed. Massachusetts: Academic Press, 2012.
- [10] Rafique D. Fiber nonlinearity compensation: Commercial applications and complexity analysis [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 544-553.
- [11] Ip E, Kahn J M. Compensation of dispersion and nonlinear impairments using digital backpropagation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(20): 3416-3425.
- [12] Secondini M, Marsella D, Forestieri E. Enhanced split-step Fourier method for digital backpropagation [C] // 2014 The European Conference on Optical Communication, September 21-25, Cannes, France. New York: IEEE, 2014: 1-3.
- [13] Guiomar F P, Amado S B, Martins C S, *et al.* Parallel split-step method for digital backpropagation [C] // 2015 Optical Fiber Communications Conference & Exhibition, March 22-26, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2015: Th2A.28.
- [14] Zhang F Y, Zhuge Q B, Qiu M, *et al.* Advanced and low complexity digital back propagation for subcarrier multiplexing systems [C] // 2015 Optical Fiber Communications Conference & Exhibition, March 22-26, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2015: Th3D.4.
- [15] Wahls S, Le S T, Prilepski J E, *et al.* Digital backpropagation in the nonlinear Fourier domain [C] // Proceedings of the 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), June 28-July 1, Stockholm, Sweden. New York: IEEE, 2015: 445-449.
- [16] Liga G, Xu T H, Alvarado A, *et al.* On the performance of multichannel digital backpropagation in high-capacity long-haul optical transmission [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 30053-30062.

- [17] Maher R, Lavery D, Millar D, *et al.* Reach enhancement of 100 percent for a DP-64QAM superchannel using MC-DBP [C] // 2015 Optical Fiber Communications Conference & Exhibition, March 22-26, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2015: Th4D.5.
- [18] Guiomar F P, Amado S B, Ferreira R M, *et al.* Multicarrier digital backpropagation for 400G optical superchannels[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(8): 1896-1907.
- [19] Zhang F Y, Zhuge Q B, Qiu M, *et al.* XPM model-based digital backpropagation for subcarrier-multiplexing systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(24): 5140-5150.
- [20] Alic N. Frequency-referenced nonlinearity compensation: The enabler for reach extension and capacity increase[C] // 2015 European Conference on Optical Communication, September 27-October 1, Valencia, Spain. New York: IEEE, 2015: 1-3.
- [21] Alic N, Myslivets E, Temprana E, *et al.* Nonlinearity cancellation in fiber optic links based on frequency referenced carriers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(15): 2690-2698.
- [22] Jansen S L, van den Borne D, Spinnler B, *et al.* Optical phase conjugation for ultra long-haul phase-shift-keyed transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 54-64.
- [23] Cao W H, Wang Y, Liu S H. 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啁啾的色散及非线性补偿研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0906005.
- [24] Ellis A D, McCarthy M E, Al-Khateeb M A Z, *et al.* Capacity limits of systems employing multiple optical phase conjugators[J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20381-20393.
- [25] 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.
- [26] Liu X, Hu H, Chandrasekhar S, *et al.* Generation of 1.024-Tb/s Nyquist-WDM phase-conjugated twin vector waves by a polarization-insensitive optical parametric amplifier for fiber-nonlinearity-tolerant transmission [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6478-6485.
- [27] Yoshida T, Sugihara T, Ishida K, *et al.* Spectrally-efficient dual phase-conjugate twin waves with orthogonally multiplexed quadrature pulse-shaped signals [C] // 2014 Optical Fiber Communication Conference, March 9-13, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2014: M3C. 6.
- [28] Yu Y K, Wang W, Townsend P D, *et al.* Modified phase-conjugate twin wave schemes for spectral efficiency enhancement [C] // 2015 European Conference on Optical Communication, September 27-October 1, Valencia, Spain. New York: IEEE, 2015: 1-3.
- [29] Yi X W, Chen X M, Sharma D, *et al.* Digital coherent superposition of optical OFDM subcarrier pairs with Hermitian symmetry for phase noise mitigation [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13454-13459.
- [30] Le S T, McCarthy M E, Suibhne N M, *et al.* Phase-conjugated pilots for fibre nonlinearity compensation in CO-OFDM transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(7): 1308-1314.
- [31] Mecozzi A, Clausen C B, Shtaif M. Analysis of intrachannel nonlinear effects in highly dispersed optical pulse transmission [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(4): 392-394.
- [32] Tao Z N, Dou L, Yan W Z, *et al.* Multiplier-free intrachannel nonlinearity compensating algorithm operating at symbol rate[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(17): 2570-2576.
- [33] Dou L, Tao Z, Li L, *et al.* A low complexity pre-distortion method for intra-channel nonlinearity[C] // 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2011: OThF5.
- [34] Tao Z N, Zhao Y, Fan Y Y, *et al.* Analytical intrachannel nonlinear models to predict the nonlinear noise waveform [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 2111-2119.
- [35] Peng W R, Li Z H, Zhu F, *et al.* Extending perturbative nonlinearity mitigation to PDM-16QAM [C] // 2014 The European Conference on Optical Communication, September 21-25, Cannes, France. New York: IEEE, 2014: 1-3.
- [36] Gao Y, Cartledge J C, Karar A S, *et al.* Reducing the complexity of perturbation based nonlinearity pre-compensation using symmetric EDC and pulse

- shaping[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1209-1219.
- [37] Ghazisaeidi, A, Charlet G, Renaudier J, *et al.* Perturbative nonlinear pre-compensation in presence of optical filtering [C] // 2015 Optical Fiber Communications Conference & Exhibition, March 22-26, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2015: Th3D.3.
- [38] Li Z H, Peng W R, Zhu F, *et al.* Optimum quantization of perturbation coefficients for perturbative fiber nonlinearity mitigation [C] // 2014 The European Conference on Optical Communication, September 21-25, Cannes, France. New York: IEEE, 2014: 1-3.
- [39] Liang D. Advanced digital nonlinear distortion compensation [C] // 2015 Optical Fiber Communications Conference & Exhibition, March 22-26, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2015: Th3G.3.
- [40] Peng W R. Training based determination of perturbation coefficients for fiber nonlinearity mitigation [C] // 2015 Optical Fiber Communications Conference & Exhibition, March 22-26, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2015: Th3D.2.
- [41] Cartledge J C, Guiomar F P, Kschischang F R, *et al.* Digital signal processing for fiber nonlinearities [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 1916-1936.
- [42] Freckmann T, Essiambre R J, Winzer P J, *et al.* Fiber capacity limits with optimized ring constellations [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(20): 1496-1498.
- [43] Lotz T H, Liu X, Chandrasekhar S, *et al.* Coded PDM-OFDM transmission with shaped 256-iterative-polar-modulation achieving 11.15-b/s/Hz intrachannel spectral efficiency and 800-km reach [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 538-545.
- [44] Karlsson M, Agrell E. Which is the most power-efficient modulation format in optical links? [J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 10814-10819.
- [45] Millar D S, Koike-Akino T, Arif S Ö, *et al.* High-dimensional modulation for coherent optical communications systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8798-8812.
- [46] Shiner A D, Reimer M, Borowiec A, *et al.* Demonstration of an 8-dimensional modulation format with reduced inter-channel nonlinearities in a polarization multiplexed coherent system [J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20366-20374.
- [47] Buchali F, Steiner F, Böcherer G, *et al.* Rate adaptation and reach increase by probabilistically shaped 64-QAM: An experimental demonstration [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(7): 1599-1609.
- [48] Ghazisaeidi A, Ruiz I D J, Müller R R, *et al.* 65 Tb/s transoceanic transmission using probabilistically-shaped PDM-64QAM [C] // European Conference on Optical Communication, September 18-22, Dusseldorf, Germany. New York: IEEE, 2016: Th3C4.
- [49] Yankov M P, da Ros F, da Silva E P, *et al.* Constellation shaping for WDM systems using 256QAM/1024QAM with probabilistic optimization [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(22): 5146-5156.
- [50] Yousefi M I, Kschischang F R. Information transmission using the nonlinear Fourier transform, part I: Mathematical tools [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(7): 4312-4328.
- [51] Yousefi M I, Kschischang F R. Information transmission using the nonlinear Fourier transform, part II: Numerical methods [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(7): 4329-4345.
- [52] Yousefi M I, Kschischang F R. Information transmission using the nonlinear Fourier transform, part III: Spectrum modulation [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(7): 4346-4369.
- [53] Bülow H. Experimental demonstration of optical signal detection using nonlinear Fourier transform [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(7): 1433-1439.
- [54] Le S T, Aref V, Bülow H. Nonlinear signal multiplexing for communication beyond the Kerr nonlinearity limit [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(9): 570-576.
- [55] Wahls S, Poor H V. Fast inverse nonlinear Fourier transform for generating multi-solitons in optical fiber [C] // IEEE International Symposium on Information Theory, 2015: 1676-1680.
- [56] Peddanarappagari K V, Brandt-Pearce M. Volterra series transfer function of single-mode fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(12): 2232-2241.

- [57] 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.
- [58] Amado S B, Guiomar F P, Muga N J, *et al.* Experimental demonstration of the parallel split-step method in ultra-long-haul 400G transmission [C] // 2015 European Conference on Optical Communication, June 14-19, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2015: 1-3.
- [59] Bakhshali A, Chan W Y, Cartledge J C, *et al.* Frequency-domain Volterra-based equalization structures for efficient mitigation of intrachannel Kerr nonlinearities[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(8): 1770-1777.
- [60] Guiomar F P, Pinto A N. Simplified Volterra series nonlinear equalizer for polarization-multiplexed coherent optical systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3879-3891.
- [61] Amari A, Dobre O A, Venkatesan R. Fifth-order Volterra-based equalizer for fiber nonlinearity compensation in Nyquist WDM superchannel system [C] // 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 2-6, Girona, Spain. New York: IEEE, 2017: 1-4.
- [62] Nguyen T, Mhatli S, Giacoumidis E, *et al.* Fiber nonlinearity equalizer based on support vector classification for coherent optical OFDM [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 1-9.
- [63] Li M L, Yu S, Yang J, *et al.* Nonparameter nonlinear phase noise mitigation by using M -ary support vector machine for coherent optical systems [J]. *Photonics Journal*, 2013, 5(6): 7800312.
- [64] Marsella D, Secondini M, Forestieri E. Maximum likelihood sequence detection for mitigating nonlinear effects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(5): 908-916.
- [65] Amari A, Dobre O A, Venkatesan R, *et al.* A survey on fiber nonlinearity compensation for 400 Gb/s and beyond optical communication systems [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 3097-3113.
- [66] Dar R, Winzer P. Nonlinear interference mitigation: Methods and potential gain[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 35(4): 903-930.