

光纤通信系统中非线性损伤补偿技术的研究

徐梦然^{1,2}, 崔晟^{1,2}, 李俊^{1,2}

(1. 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:随着传输容量和传输距离的增加, 光纤传输中信号的非线性损伤(NLD)已经成为限制光纤通信系统性能的主要因素之一。文章系统地总结了光域和电域 NLC(非线性补偿)技术的最新发展动态, 对各种 NLC 技术的机制、特点及其实用性进行了分析比较, 并重点介绍了数字相干光通信系统中基于 DSP(数字信号处理)的 NLC 技术, 探讨了其未来的发展方向。

关键词: 光纤通信; 非线性补偿; 数字信号处理; 数字相干系统

中图分类号: TN915 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2013)05-0012-03

Advances of research on nonlinear distortion compensation technologies for fiber-optic communication systems

Xu Mengran^{1,2}, Cui Sheng^{1,2}, Li Jun^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Wuhan 430074, China;
2. School of Optical and Electronic Information, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: Along with the increase of transmission capacity and distance driven by broadband applications, the Non-Linear Distortion (NLD) of signals in fiber-optic transmissions has become one of the major limiting factors to fiber-optic communication systems. This paper summarizes the latest developments of Non-Linear Compensation (NLC) technologies in the optical and electrical domains, analyzes and compares their mechanisms, characteristics and practical applications with the focus on Digital Signal Processing (DSP)-based NLC for digital coherent optical communication systems and the trend of their future development.

Key words: fiber-optic communication; nonlinear compensation; DSP; digital coherent system

0 引言

下一代骨干光纤通信系统正朝着超高速率、超大容量和超长距离的方向发展, 而随着传输容量和传输距离的增加, 信号的输入功率不断提高, NLD(非线性损伤)积累也愈加严重。相对于线性损伤, 如 CD(群速度色散)和 PMD(偏振模色散), NLD 具有动态适变性强和变化速率快的特点, 其大小与信号输入功率、调制格式、CD 分布等诸多系统配置参数有关, 因此 NLC(非线性补偿)的技术难度更大, 是目前限制光纤通信系统性能的主要因素。NLD 包括信道内和信道间两类, 前者由 SPM(自相位调制)造成, 后者由 XPM(交叉相位调制)和 FWM(四波混频)效应引起。近年来随着数字相干接收技术的发展, 信号光全场信息都可以得到恢复并转化为电域数字信号, 这使得基于 DSP(数字信号处理)的 NLC 技术迅猛发展。

1 各种 NLC 技术

目前提出的 NLC 技术从信号处理方式看可以分为光域补偿和电域补偿两大类。光域补偿具有带宽高、对调制速率和格式无限制的优点, 并可以实现实时处理; 电域补偿具有灵活、可靠和功能强大的优点, 但对 ADC(模数转换)和 DSP 器件有较高的要求。下面分别介绍。

1.1 基于光相位调制器的补偿技术

由于 SPM/XPM 效应导致的非线性相移与信号功率有关, 信号自身和周围信道功率的瞬时变化都会造成信号相位抖动, 因此有学者提出在接收机前加入用于 NLC 的 PM(相位调制器)和光探测器, PM 对信号相位的调制幅度与光探测器探测到的信号瞬时功率成正比, 调制系数则与光纤的非线性系数异号, 从而抵消非线性相移^[1]。图 1 所示为基于 PM 的 SPM 补偿原理图, 该方法采用 10 GHz 带宽

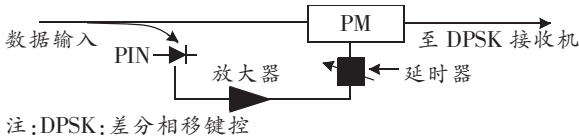
收稿日期: 2013-05-06

基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2011AA01A110); 国家“九七三”计划资助项目(2010CB328305); 国家自然科学基金资助项目(61007043)

作者简介: 徐梦然(1990-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信。

通讯作者: 崔晟, 副教授。E-mail: cuisheng@mail.hust.edu.cn

的 PIN(光电二极管)在接收端探测被补偿信道功率的实时变化,输出 RF(射频)信号经放大后驱动 PM 工作,再经延时器以确保对应同一脉冲的光电信号同时到达 PM。数值仿真表明,对于 10 Gbit/s 色散管理系统,当传输距离在 3 500 km 以上时,用该方法补偿 SPM 可以提高系统 Q 值 3 dB 以上。

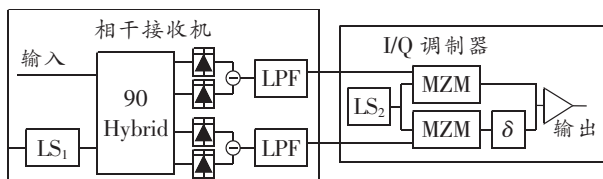


注:DPSK:差分相移键控
图1 基于PM的SPM补偿原理图

对 XPM 补偿采用类似方法,用一个光探测器探测多个相邻信道功率的变化,并用其输出信号驱动 PM 在解复用前同时对多信道进行 XPM 补偿,SPM 则在解复用后用前面介绍的方法进行补偿。由于 XPM 效应的非线性相移为 $\Delta\varphi$, 而 $\Delta\varphi \propto \frac{\gamma PL_{\text{eff}}}{\omega D \Delta\lambda_{12}}$, 式中, $\Delta\varphi$ 与信号功率频率 ω 、色散 D 、信道间隔 $\Delta\lambda$ 成反比,因此只需监测相邻信道功率的变化,无需采用高速光探测器,并可对探测器输出的电信号进行低通滤波。且 XPM 补偿 PM 器件带宽要低于 SPM 补偿。数值仿真表明,对传输距离为 1 200 km 的 40 Gbit/s QPSK(正交相移键控)系统进行补偿,可以使最大 Q 值提高 1.3 dB。但由于信号波形在光纤传输中会由于 CD 逐渐积累而不断改变,因此此方法只适于色散管理系统。

1.2 OPC/EPC(光域/电域相位共轭)技术

OPC 技术利用非线性介质中 FWM 效应在链路中点处对信号的相位和频谱进行反转,使得前后两段光纤中 SPM/XPM 产生的非线性相移大小相同、符号相反,从而互相抵消。该方法可以在多信道并行下同时补偿 SPM 和 XPM,具有效率高、对信号速率和调制格式透明的优点。但是由于 FWM 频谱反转需要占用两倍带宽,且会改变信号波长,因此实用性不强。进而有学者提出 EPC 技术,利用相干探测模块和 I/Q 调制器取代 OPC 模块(如图 2 所示)。在恢复出 I/Q 电信号后再利用 I/Q 重新调制同一波长的激光产生相位共轭信号。相比 OPC, EPC 补



注:LPF:低通滤波器;MZM:马赫-曾德调制器;LS:激光发射源

图2 EPC补偿原理图

偿技术更加可靠,不占用额外的频谱资源,同时输出信号波长保持不变。

OPC 技术存在的另一个问题是为保证前后两段光链路非线性相移恰好抵消,OPC 处理必须位于链路中点使信号功率关于补偿模块对称分布,因此要求对链路长度进行精准测量。进而又有学者提出利用 OPC 技术补偿链路大部分 NLD,利用数字 BP(后向传输)技术补偿 OPC 模块定位误差后残余的 NLD,这种方法充分结合光电补偿的优点,降低了对 OPC 模块定位的要求^[2]。此外在 OPC 模块输入端加入预色散补偿模块,还可以在集中放大的条件下使得前后两段链路的非线性相移尽可能相互抵消。数值仿真表明,对于 28 Gbaud 的 PM-16QAM(16 进制正交幅度调制)多信道传输系统,该方法补偿 SPM 和 XPM 后,最大 Q 值提高了 4 dB,最大传输距离可以提高到两倍以上。

1.3 BP 技术

BP 技术包括 DBP(数字后向传输)补偿技术和 OBP(光后向传输)技术。两者机理完全相同,不同的是前者基于 DSP 技术,而后者基于全光处理技术。下面分别介绍。

DBP 技术是通过各种数值算法,如 SSF(分步傅里叶)和 VSTF(沃尔特拉传输函数)法求解 NLSE(非线性薛定谔方程),从而模拟输出光信号经过同样长度但 NL(非线性)、色散相反的传输光纤,以实现 CD 和 NLD 的补偿,如图 3 所示。在步长足够小时可以假定色散和非线性效应是分别作用于信号的,进而采用图 4 的算法流程图在频域和

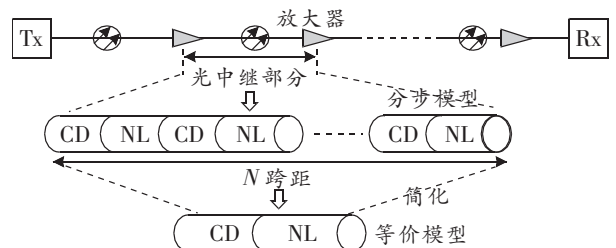
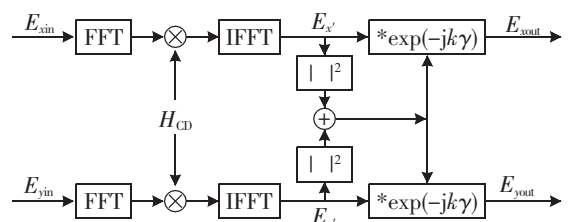


图3 SSF-DBP示意图



注:k 为非线性补偿因子;gamma 为光纤非线性系数

图4 完整算法流程图

时域进行补偿。其中 $H_{CD} = \exp(-j\pi cDL\omega^2/\omega_c^2)$ 。但是 DBP 算法每步都需要 FFT/IFFT(快速傅里叶变换/快速傅里叶逆变换)运算,导致计算量远远超过了目前 DSP 的处理能力,因此各国学者提出了不同的改进方法,以下将分别进行介绍。

1.3.1 基于 DBP 的信道内非线性补偿

目前的光传输系统可以分为 DM(色散管理)和 NDM(非色散管理)系统。对 DM 系统采用折叠 DBP 算法^[3]。在最优信号输入功率下,传输系统中整个链路的信号非线性相移不会超过 1 个弧度。因此每个跨距内非线性效应造成的信号波形畸变较弱,色散则是波形畸变的主要影响因素。因此可以近似认为相邻 K 个跨距内光信号波形变化是周期性的,而每段的非线性相移则是大小相同,即将 K 个跨距色散和非线性折叠到 1 个跨距内补偿,从而使计算量减少到原来的 $1/K$ 。数值仿真表明,对 56 Gbit/s 的 QPSK 单信道 DM 系统进行补偿,当折叠系数为 60 时, Q 值相比 SSF-DBP 只降低了 0.28 dB,因此该方法可以在计算量和性能间取得较好的折中。

对 NDM 系统采用 LPF-DBP(低通滤波 DBP)^[4]提高步长,一般 DBP 补偿技术中模拟对多段光纤中 NLC 都集中在某一点,忽略了传输中 CD 引起的波形畸变对 NLD 的影响。所以通过引入 LPF 滤除信号高频部分,减少 CD 畸变的影响。该方法不仅能提高步长,还一定程度地降低了对 ADC 采样率的要求并减少了 DSP 的计算量。图 5 所示为 LPF-DBP 算法示意图,无滤波时要求 ADC 采样频率至少为信号速率的 3 倍,才能避免 FFT 后信号频域混叠。而滤波后输出信号带宽仅为原来带宽加两倍 LPF 带宽。数值仿真表明,对 58 Gbit/s QPSK 单信道 NDM 系统,传输距离为 3 200 km 时,4 步的 LPF-DBP 补偿效果与 40 步 SSF-DBP 相同, Q 值提高了 1.6 dB 以上,这大大减少了 DSP 的计算负荷。此外在步长大于跨距长度时,通过调节前后色散补偿的大小比例,优化非线性模块的位置

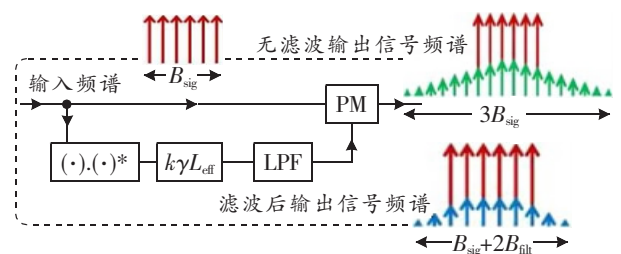


图 5 LPF-DBP 算法示意图 ($k\gamma L_{eff}$ 是非线性相移)

在步长正中中间处,还可以进一步提高补偿效果。

1.3.2 基于 DBP 的信道间非线性补偿

在 WDM(波分复用)系统中信道间 XPM 和 FWM 效应尤为显著,此时仅依靠 SPM 补偿对于提高系统非线性容限作用有限。为实现信道间 NLC,可以采用所谓全场 NLSE,即将 N 个 WDM 信道看作单个信道进而采用和 SPM 相同的方法进行补偿,这种方法可以同时补偿 SPM、XPM 和 FWM,但是要求使用 N 个并行相干接收机,接收机中的 LO(本地振荡器)还需进行锁相,这就增加了计算复杂度。考虑到在光纤色散较大时 WDM 系统中 FWM 损伤远小于 XPM,因此有学者提出了耦合 NLSE^[5]:将 N 个并行接收机恢复的每个信道光谱片断看作是受非线性相互耦合在一起的 N 个独立信号,通过耦合 NLSE 只补偿 XPM,这样相干接收机间不需要锁相,步长也只需小于相距最远的信道间的“走离长度”。

DBP 技术虽然近年来发展很快,但是由于 DSP 速率“瓶颈”的问题目前很难实时在线处理,因而有学者提出基于光信号处理技术实现反向传输。图 6 所示为 OBP 补偿原理图,其基本原理与 DBP 完全相同,在光域使用相位共轭模拟负非线性和色散系数光纤,通过多个 HDF+HNLF(高色散光纤+高非线性光纤)组合叠加模拟多步 DBP 运算进行色散和非线性补偿。仿真结果表明,该方法的效果超过链路中点 OPC 技术和同样步长的 DBP 算法。但该技术仍处于早期发展阶段,且 OBP 系统结构复杂、成本高,其中大量光纤及无源器件会带来附加信号损伤和功率损耗。

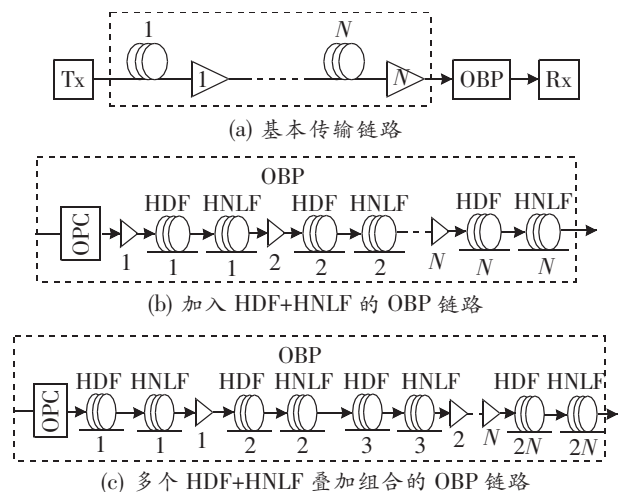


图 6 OBP 补偿原理图

4 结束语

从高斯光斑和矩形光斑的混频出发,分析了准直性和参考光能量对相干光探测效率的影响,为后续相干光通信系统的构建提供了一些有益的参考。理论分析与实验结果表明,激光光束的准直性、均匀性以及参考光的能量直接影响相干光探测性能,采用能量分布均匀的光斑有利于光束对准和匹配。在实际应用中,相干光探测效率还与探测器的特性参数和光敏面尺寸的利用率有关,在空间相干光探测系统应用中,应综合考虑各种因素,根据光电探测器的有效光孔,设计与之相匹配的光学系统,提高系统光斑重叠的准直性,充分利用有效的光斑能量,使系统性能达到最优。

(上接第14页)

1.4 射频导频(RFP)补偿技术

为解决 WDM DM 系统中基于 DBP 的 XPM 补偿算法计算量过大的问题,有学者提出插入 RFP 信号,以辅助相位恢复补偿 XPM 损伤,这种方法无需解 NLSE,且由于 RFP 自始至终伴随信号传输,因此适用于动态光网络,图 7 所示为 RFP 补偿原理图。首先在发射机端插入导频,信号传输时导频将受到与信号相似的 XPM 相移,在接收端通过相干接收机恢复光场信息,并通过 BPF(带通滤波器)将导频提取出来。数值仿真结果表明,对单信道 224 Gbit/s PM-16QAM WDM 系统而言,在 DM 系统中采用 RFP 技术补偿时效果与 DBP 接近,而在 NDM 系统中其性能则优于 DBP 算法。

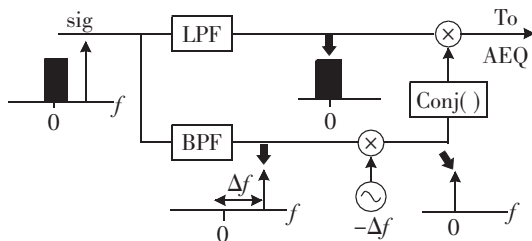


图 7 RFP 补偿原理图

2 总结和展望

本文系统地总结了 NLC 技术最新发展动态。对几种典型 NLC 技术的机制、特点及其实现方法进行了分析比较。可以看出,光域 NLC 技术虽然可以实现实时处理,但一般系统结构复杂,且会带来

参考文献:

- [1] 王春晖,高龙,庞亚军,等. 光束分束比对 $2\ \mu\text{m}$ 平衡式相干探测系统信噪比影响的实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1104002-1-1104002-6.
- [2] Das Kamal K, Khan M, Iftekharruddin. Heterodyne detection using Hexagonal Detector: Effects of beam profiles and phase front misalignment [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, (1): 476-478.
- [3] 梁乔春,王英,陈培锋,等. 激光外差探测中的空间失配问题研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 43-50.
- [4] 王琪,王春晖,尚铁梁. 高斯本振光和爱里斑信号光相干探测的外差效率[J]. 中国激光, 2003, 30(增刊): 183-186.
- [5] 刘宏展,纪越峰,许楠,等. 信号与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1006001-1-1006001-6.
- [6] 李小纳,何宁,邓德迎. 声光偏转多频信号同时探测互调现象研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2504-2507.

额外信号损伤或功率损耗;电域 NLC 技术性能可靠,易于集成,但受 DSP 处理速率限制,其实时性问题和复杂计算度尚有待解决。而随着 DSP 器件处理速度的提高,以及 NLD 机理研究的深入和补偿算法的优化,我们相信基于 DSP 的 NLC 技术在未来终将发挥重要的作用。

参考文献:

- [1] Xu Chris, Liu Xiang. Postnonlinearity compensation with data-driven phase modulators in phase-shift keying transmission [J]. OPTICS LETTERS, 2002, 27(18): 1619-1621.
- [2] Jansen S L. Long-Haul DWDM Transmission Systems Employing Optical Phase Conjugation [J]. IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, 2006, 12(4): 505-520.
- [3] Zhu Likai, Li Guifang. Nonlinearity compensation using dispersionfolded digital backward propagation[J]. OPTICS EXPRESS, 2012, 20(13): 14362-14370.
- [4] Du L B, Lowery A J. Improved single channel back-propagation for intra-channel fiber nonlinearity compensation in long-haul optical communication systems [J]. OPTICS EXPRESS, 2010, 18(16): 17075-17088.
- [5] Ip Ezra, Ji Philip, Mateo Eduardo. 100 G and Beyond Transmission Technologies for Evolving Optical Networks and Relevant Physical-Layer Issues [A]. Proceedings of the IEEE 2012 [C]. Denver, CO, USA: IEEE, 2012. 1065-1078.

光纤通信系统中非线性损伤补偿技术的研究

作者: 徐梦然, 崔晟, 李俊, Xu Mengran, Cui Sheng, Li Jun

作者单位: 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074; 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉430074

刊名: 光通信研究

PKU

英文刊名: Study on Optical Communications

年, 卷(期): 2013(5)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gtxyj201305004.aspx