

doi:10.13756/j.gtxyj.2018.04.004

光通信系统与网络技术

采用非线性补偿算法的超长跨距系统

周文婷¹, 崔力民¹, 王鑫¹, 陈建新¹, 张海波¹, 徐健², 龙函², 郑强³

(1. 国网新疆电力公司 信息通信公司, 乌鲁木齐 830000; 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205;
3. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 搭建一个双向拉曼放大超长跨距光纤传输系统, 在接收端采用非线性补偿算法来补偿因传输距离长和入纤光功率高所带来的光纤非线性效应, 并通过实验成功实现了 10 Gbaud/s 16 正交幅度调制(QAM)信号的传输, 传输距离为 300 km。仿真和实验结果表明, 通过采用非线性补偿算法, 接收端信号的性能相比未使用非线性补偿算法时提高了 2 dB。证明了非线性补偿技术在超长跨距光纤传输系统中是非常有效且必要的。

关键词: 双向拉曼放大; 超长跨距; 非线性补偿算法; 相干光通信

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2018)04-0014-04

Ultra-long Span Unrepeated Fiber Optical Communication System with Nonlinear Compensation Algorithm

ZHOU Wen-ting¹, CUI Li-min¹, WANG Xin¹, CHEN Jian-xin¹, ZHANG Hai-bo¹, XU Jian², LONG Han², ZHENG Qiang³

(1. State Grid Xinjiang Information & Telecommunication Company, Urumqi 830000, China;
2. Accelink Technology Co., Ltd., Wuhan 430205, China;
3. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, a bi-directional Raman amplified unrepeated system is established, and the nonlinearity compensation algorithm is applied at the receiver side. A 300 km unrepeated system is experimental demonstrated at 10 Gbaud/s with 16 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) format. The simulation and experimental results show that the performance of the system can be improved by 2 dB after nonlinearity compensation. The experiment indicates that the nonlinear compensation algorithm is effective and necessary for the unrepeated system.

Key words: bi-directional Raman amplification; ultra-long span; nonlinear compensation algorithm; coherent optical communication

0 引言

超长单跨距无中继传输系统一直以来是光纤传输系统中一个重要的分支, 在一些特殊情况下有着重要的应用, 如海底通信、我国西北和西南部分的电力通信等^[1-2]。随着光纤通信技术的迅速发展, 目前超长跨距系统一般采用双向分布式拉曼和遥泵等放大方式, 并采用更高级的调制格式, 如正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM), 这方面现已有大量相关报道^[3-5]。

超长跨距无中继系统面临的一个重要问题就是光纤的非线性效应。由于链路损耗太大, 即使采用了先进的光放大技术, 也需要提高系统的入纤功率以保证能传输足够长的距离, 而高的入纤功率又会带来光纤的非线性效应, 限制系统的性能。要延长系统的传输距离, 必须考虑对非线性的抑制或补偿。对于光纤中的非线性效应, 近几年新提出的数字背

向传输(Digital Background Propagation, DBP)算法是一种有效的数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)算法, 其可以在接收端同时补偿信号在光纤中传输带来的色散和非线性效应^[6-7]。

本文针对双向拉曼系统的特点, 对 DBP 算法进行了优化, 降低了算法的复杂度, 使之能够更好地应用于双向拉曼放大的超长单跨距系统中, 并搭建 10 Gbaud/s 16QAM 双向拉曼放大超长跨距系统进行验证, 实验证明, DBP 算法能够有效地补偿传输过程中的非线性效应。

1 非线性补偿算法

1.1 信号在光纤中的传输模型

当一串加载了信号的光脉冲在光纤中传输时, 会受到光纤损耗、色散和非线性等因素的影响, 导致脉冲展宽变形, 这一过程可以用非线性薛定谔方程来描述^[8]:

收稿日期: 2017-10-23

基金项目: 国家电网新疆电力有限公司科技项目

作者简介: 周文婷(1974—), 女, 江西南昌人。高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力信息通信运行管理、OTN 光传输系统。

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A(z, T) - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2} + i\gamma |A(z, T)|^2 A(z, T), \quad (1)$$

式中： A 为光脉冲的光场； $T = t - z/v_g$ ， v_g 为信号的群速度； α 为光纤的损耗； β_2 为二阶色散系数； γ 为非线性系数； $-\frac{\alpha}{2} A(z, T)$ 表示光纤对信号的损耗； $-\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2}$ 表示光纤的色散（只写出了二阶色散，更高阶的色散没有写出）； $i\gamma |A(z, T)|^2 A(z, T)$ 则体现了光纤的非线性效应。

式(1)可以比较精确地描述脉宽在 ps 以上量级的光脉冲在光纤中的传输情况，但想得到式(1)的精确解比较困难，因此一般采用数值方法求一个近似解。分步傅里叶方法 (Split Step Fourier Method, SSFM) 是一种常见且有效的方法。为便于理解 SSFM，将式(1)改写成以下形式：

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A(z, T), \quad (2)$$

式中： $\hat{D}$ 为线性算符； $\hat{N}$ 为非线性算符。在不考虑高阶色散时， $\hat{D}$ 和 $\hat{N}$ 可以分别表示为

$$\hat{D} = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2}, \hat{N} = -\frac{\alpha}{2} + i\gamma |A|^2. \quad (3)$$

式(2)的一个正式的精确解为

$$A(z+h, T) = \exp[h(\hat{D} + \hat{N})]A(z, T), \quad (4)$$

式中， h 为算法迭代过程中的步长。当 h 足够小时，式(4)可以近似为^[6]

$$A(z+h, T) \approx \exp(h\hat{D})\exp(h\hat{N})A(z, T), \quad (5)$$

式(5)即为 SSFM 的递推公式，其精度可以精确到 h^2 。利用式(5)求解式(1)的数值解时，先将光纤分为若干长度为 h 的小段，然后从发射端开始，将信号代入式(5)，从 $z=0$ 处的光场，逐步递推出 $z=h$ ， $z=2h$ ， $\dots$ 处的光场，直到光纤末端。在利用式(5)进行计算时，色散项的计算一般是在频域完成的。在进行每一步递推时，都会进行一次傅里叶变换和反变换。正因如此，该方法才被称为 SSFM。

1.2 用于双向拉曼系统的 DBP 算法

上一节中建立的光信号在光纤中传输的模型可以很好地模拟光脉冲在光纤中的传输。如果将该模型倒过来用，即在已知光纤末端经过光纤传输后的光信号时，从光纤末端倒推回信号发射端，即可得到入射端的信号，这就是 DBP 算法的基本思想，如图 1 所示。

图中，实际光纤传输部分为光信号沿着实际光纤链路的传输。在信号经过接收机接收后，通过建

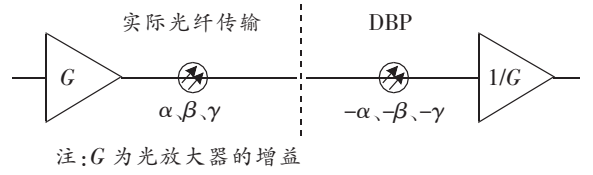


图 1 DBP 算法原理框图

立的光纤传输模型在电域里建立一个虚拟光纤的传输链路，并且实际链路的光纤与虚拟光纤的参数数值相同但符号相反，这样信号相当于从接收端到发射端倒着传输了一次，在虚拟光纤中传输的过程受到的色散和非线性效应正好与实际链路中的相反，从而抵消了实际光纤中的色散和非线性效应对信号的影响，实现了对色散和非线性的同时补偿。

这种 DBP 算法只适用于经掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 放大的系统。因为 EDFA 的增益可视为在链路上一点对信号进行放大，在 DBP 中进行处理时，只需要对信号做一个除法即可；但对于经拉曼放大器放大的系统，由于拉曼增益的存在，放大器的增益分布在整条光纤中，无法通过简单的除法进行处理。图 2 所示为一个典型的双向拉曼放大的超长跨距系统中信号功率的分布曲线，从图中可以看到，由于拉曼增益的作用，信号功率呈现先放大再减小然后再放大的分布。为了在双向拉曼系统中应用 DBP 算法，引入随距离变化的广义损耗系数 $\alpha(z)$ 。 $\alpha(z)$ 反映了光纤的衰减和拉曼增益对信号的共同作用。这样，可将传统 DBP 算法要解的反非线性薛定谔方程变为

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = -\frac{\alpha(z)}{2} A(z, T) - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2} + i\gamma |A(z, T)|^2 A(z, T). \quad (6)$$

式(6)的求解可以分为两步：(1)先根据光纤参数和拉曼放大器的参数求出光纤中信号的功率分布曲线，然后做微分运算求出 $\alpha(z)$ ；(2)同传统的 DBP 算法一样，采用 SSFM 求解式(6)。

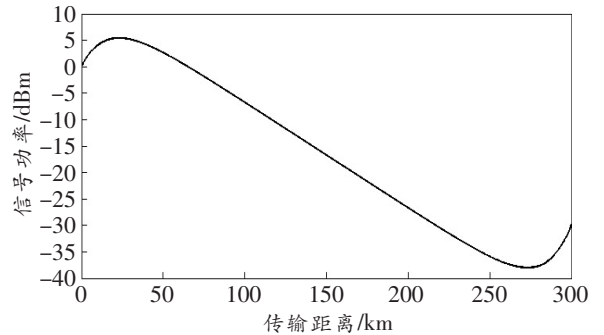
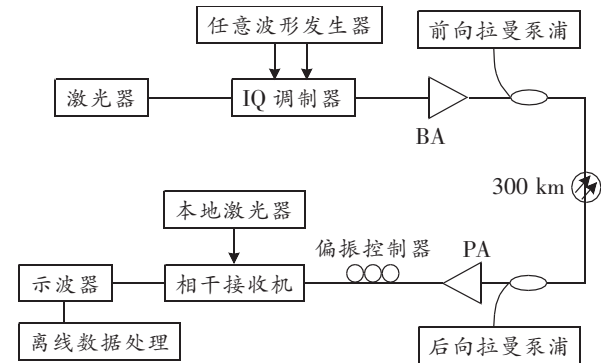


图 2 双向拉曼传输实验中信号功率分布曲线

2 仿真分析

为验证本文所提算法的性能,利用 VPItransmission Maker 8.3 软件搭建了一个双向拉曼超长跨距系统,系统结构如图 3 所示,仿真参数设置如表 1 所示。



注:BA 为功率放大器; PA 为前置放大器。

图 3 双向拉曼超长跨距系统结构图

表 1 仿真参数设置

参数名称	参数值
工作波长/nm	1 550
激光器线宽/kHz	100
信号调制速率/GBaud/s	10
信号调制格式	16QAM
EDFA 噪声系数/dB	4.5
拉曼泵浦波长/nm	1 455
拉曼泵浦功率(前向/后向)/mW	400/600
光纤类型	标准单模光纤

在仿真中,接收端分别采用传统的均衡算法补偿色散和本文提出的 DBP 算法同时补偿色散和非线性,比较信号经两种算法处理后的性能。信号的性能评估参数采用 Q^2 值,其与误码率(Bit Error Ratio,BER)的对应关系为

$$Q^2\text{ (dB)} = 20\lg[\sqrt{2}\text{erfc}^{-1}(2BER)]$$
, (7)

式中:BER 为接收端信号的平均误码率; erfc^{-1} 为互补误差函数的逆函数。采用 Q^2 值可以更好地与信号的光信噪比对应起来,可以近似地认为,当 Q^2 值提升 1 dB 时,接收端的光信噪比也提高 1 dB。改变信号的入纤功率,找出色散补偿和 DBP 算法对应的最佳入纤功率,仿真结果如图 4 所示。

从图中可以看到,采用色散补偿算法对信号进行处理时,信号的最佳入纤功率为-2 dBm,当信号入纤功率再提高时,由于非线性的增强,信号的性能反而会下降;而采用 DBP 算法时,信号的最佳入纤功率达到了 1 dBm,信号的最佳性能相较于于色散补

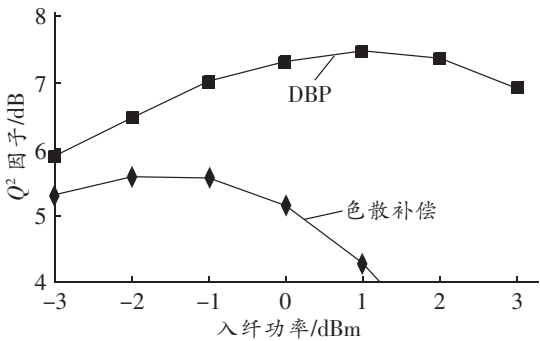


图 4 信号经色散补偿和 DBP 算法处理后的 Q^2 值与入纤功率的关系

偿提高了 2 dB 左右。仿真结果表明,DBP 算法能够有效补偿光纤传输中的非线性效应,提高信号的性能和延长系统传输距离。

3 实验结果及分析

本次实验的系统结构如图 3 所示,激光器的线宽为 100 kHz,工作波长为 1 550.12 nm;激光器产生的激光经过一台 IQ 调制器被调制上信号,调制格式为 16QAM,调制速率为 10 Gbaud/s。发射机产生的信号经过一台 EDFA(对应图中的 BA)放大后注入光纤,并通过一个可调光衰减器来控制信号的入纤功率。实验中采用的拉曼放大器为光迅科技生产的拉曼放大模块(前向拉曼放大模块为 FRA-1550.12-10-FC/UPC-AA-UL42,后向拉曼放大模块为 FRA-1550.12-20-FC/UPC-AA-UL42)。双向拉曼放大器在这个系统中能提供约 20 dB 的增益。信号经过 300 km 普通单模光纤传输后被一台 EDFA(对应图中的 PA)放大,然后由相干接收机接收,并由一台数字采样示波器采集数据后进行离线处理,数字示波器的采样率为 50 GS/s。

图 5 为对信号进行离线处理的流程图。在对信号进行处理前,数字示波器采集的数据要进行下采样,使数字信号变成 2 bit/symbol,这样做是为了减少后面 DSP 算法的计算量。在一系列的 DSP 算法中,首先要对信号进行 IQ 正交化处理,这是为了纠正 IQ 调制器以及相干接收机 I 路和 Q 路的不平衡性,算法采用的是 Gram-Schmidt 正交化算法;然后进行色散补偿或 DBP 算法,色散补偿是为了与 DBP 算法进行对照而设置的;紧接着是自适应信道均衡算法,本文采用的均衡算法为恒模算法,主要是为了补偿残余色散和光器件的带宽限制带来的码间串扰;最后是载波恢复算法,包括频偏估计和相位估计,目的是解决发射端载波和接收端本地光频率和

相位的不一致问题,本文采用的是改进的基于快速傅里叶变换的方法和维特比-维特比(Viterbi-Viterbi,V&V)算法^[9-10]。经过 DSP 后,最后进行信号判决和 BER 计算。

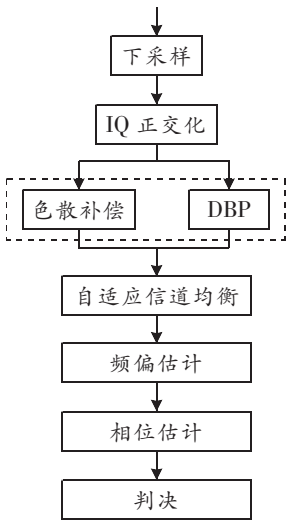


图 5 数据离线处理流程

实验中我们改变入射信号功率,并在接收端测量信号的性能,测量结果如图 6~7 所示。

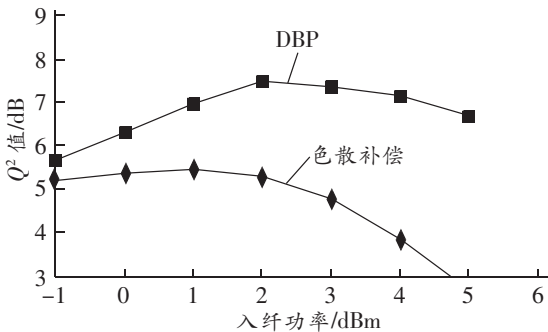


图 6 实验测得的信号 Q^2 值与入纤功率的关系

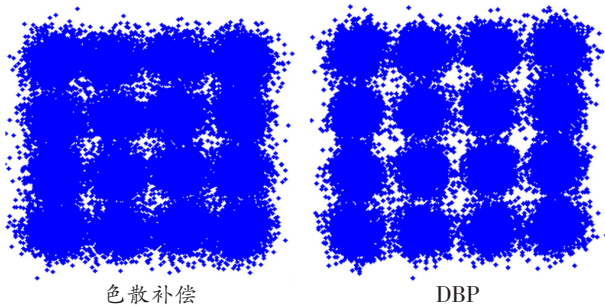


图 7 采用色散补偿和 DBP 算法时最佳入纤功率点处信号的星座图

从图 6 中可以看到,在采用色散补偿算法时,信号的最佳入纤功率约为 1 dBm,当信号入纤功率再提高时,由于非线性的作用接收端的信号性能反而下降;而采用 DBP 算法时,由于对线性效应的补偿

作用,对应的最佳入纤功率提高了 1 dBm,信号的最佳 Q^2 值提高了 2 dB。与仿真结果对比,实验中 DBP 算法对信号带来的性能提升相同,但是实验中信号的最佳入纤功率要高一些,这是由于实验中入纤功率是在拉曼泵浦模块之前测量的,没有将拉曼模块的插损考虑在内。

从图 7 中可以看到,采用色散补偿算法时,信号处于最佳功率点时星座图外圈相对于内圈发生了旋转,外圈的星座点比较弥散,已经有较明显的非线性效应;而采用 DBP 算法时,由于非线性带来的操作被补偿,信号的最佳入纤功率更高,接收端信号的信噪比也更高,星座图明显比色散补偿的情况要好。

4 结束语

本文通过仿真和实验验证了非线性补偿算法在双向拉曼放大超长跨距系统中的可行性。仿真和实验中搭建了一个 300 km 的双向拉曼超长跨距系统,并传输了一个 10 Gbaud/s 的 16QAM 信号,通过对比采用非线性补偿算法和只补偿色散的算法时的情况,发现采用非线性补偿算法时,接收端的信号性能提高了 2 dB,这体现了非线性补偿在此类系统中的重要性,并且对进一步提高超长跨距系统的传输距离有着重要意义。

参考文献:

[1] 夏江珍,谢同林. 大跨距无中继光纤通信系统——西部电力通信系统的一种技术选择[J]. 电力系统通信, 2005,26(5):32—35.

[2] 袁卫国,李垠韬,项旻,等. 基于双向拉曼的电力超长距传输方案研究[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(4):108—111.

[3] Syuaib I, Asvial M, Rahardjo E T. Ultra-Long Span Optical Transmission Using Bidirectional Raman Amplification[C]// International Conference on Quality in Research. Lombok, Indonesia: IEEE, 2016:86—89.

[4] Chang D I, Pelouch W S, Burtsev S, et al. Unrepeated High-Speed Transmission Systems[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2015:1—3.

[5] Chang Do-il, Perrier Philippe, Fevrier Herve, et al. Unrepeated 100 G Transmission over 520.6 km of G.652 Fiber and 556.7 km of G.654 Fiber with Commercial Raman DWDM System and Enhanced ROPA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(3): 631—638.