

基于 Darboux 变换的 NFDM 通信系统多特征值传输性能

任 新,梁 猛

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710121)

摘要:非线性效应严重影响光纤通信中信号的传输,导致波形或频谱中包含的信号失真。采用特征值通信的方式来克服非线性效应,即在发送端用 Darboux 变换合成孤子信号承载信息,接收端用非线性傅里叶变换解调特征值恢复信号。通过对算法的改进,降低了非线性频分复用(NFDM)通信系统的计算复杂度,仿真结果表明 NFDM 通信系统能够有效抑制非线性效应。

关键词:非线性频分复用;傅里叶变换;多特征值;Darboux 变换

中图分类号:TN929.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)12-0016-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.12.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-eigenvalues transmission performance of NFDM communication system based on Darboux transform

REN Xin, LIANG Meng

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Nonlinear effect seriously affects the signal transmission in optical fiber communication, resulting in signal distortion in waveform or spectrum. In order to overcome the nonlinear effect, Darboux transform is used to synthesize the information of the soliton signal at the transmitter, and the nonlinear Fourier transform is used to demodulate the eigenvalue recovery signal at the receiver. Through the improvement of the algorithm, the computational complexity of the nonlinear frequency division multiplexing (NFDM) communication system is reduced. The simulation results show that the NFDM communication system can effectively suppress the nonlinear effect.

Key words: nonlinear frequency division multiplexing; Fourier transform; multi-eigenvalues; Darboux transformation

0 引言

信号在光纤中传输,会受到衰减、色散和非线性效应的影响,最终限制了传输容量。其中,非线性是限制光通信容量的主要因素。针对这一点,许多非线性补偿技术相继提出,但是都不能完全解决此问题^[1]。非线性频分复用(NFDM)传输可以有效代替传统的补偿方法^[2-4],解决光纤非线性问题,提高光通信容量。2019年,王佳等人^[5]将偏振复用(PDM)技术与 NFDM 技术相结合,通过增加复用非线性信道的数目,实现了 1200 km 的高速率传输。同年,牟炯之等人^[6]结合正交相移键控

(QPSK),对基于非线性傅里叶变换(NFT)的 NFDM 通信系统进行了研究,结果表明了该方法可以有效缓解光纤的非线性效应。然而,前人均没有对 NFDM 的影响因素和长距离下多特征值的传输性能进行深入研究。本文在文献[6]的基础上,对 NFDM 中多特征值通信的影响因素和传输性能进行研究。

1 NFDM 通信系统构成

NFDM 通信系统框图如图 1 所示。通过对信号非线性谱进行调制,将信息编码在连续谱和离散谱中进行传输,再通过解调非线性谱恢复出信号。具体原理见文献[6]。

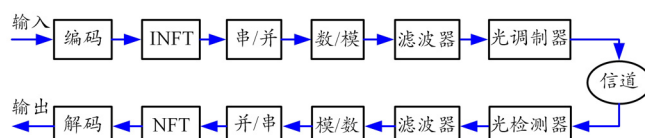


图 1 NFDM 多特征值通信系统框图

收稿日期:2020-04-16。

作者简介:任新(1993—),男,甘肃成县人,硕士生,现就读于西安邮电大学电子工程学院光学工程专业,主要从事光信息传输技术方面的研究工作,重点研究 NFDM 通信系统中算法的优化、特征值取值的优化和多特征值的传输性能。



2 基于 Darboux 变换的 NFD 通信系统信号变换

NFT 理论解决的是已知任意波形求解特征值,该过程的逆过程为已知特征值合成波形的过程。合成波形有 2 种方法:一种是基于非线性傅里叶逆变换(INFT)的方法,INFT 能够从给出的非线性连续谱和离散谱中得到信号 $q(t,z)$,通过求解 Riemann-Hilbert 系统^[3]可以得到 INFT 的表达式,该方法计算复杂度高且不易控制光谱域中的自由度;另一种是基于 Darboux 变换的方法。本文采用 Darboux 变换方法合成时域波形,该方法实际上解决了 NFT 的逆变换过程。相比于传统的 INFT, Darboux 变换使合成波形的过程更加简便,降低了运算复杂度。

2.1 基于 Darboux 变换的搜索算法

发送端用 Darboux 变换合成信号后,接收端用 NFT 的方法求解特征值。2014 年, Youssefi 等人^[3]首次提出了 NFT 理论中基于搜索算法的求解特征值,该算法为了搜索出所有的特征值,采用了一种求迹的公式,即要达到时域上连续谱和离散谱守恒。求迹公式是根据量守恒和误差更新的方法搜索特征值,当搜索到一个特征值时,误差更新并重新搜索下一个特征值。当搜索发散时,停止搜索,重新随机选取初始值进行重复搜索,直到搜索出所有的特征值。这种方法主要是针对特征值及其个数未知的情况,具有一般性。但由于搜索范围不容易确定,导致搜索范围较大,计算过程复杂,算法花费时间较多。

Darboux 变换方法根据不同的特征值合成波形,即选择的特征值是已知的。由于特征值在传输前后几乎不变,通过计算这类特征值脉冲,可以确定搜索初始值在以合成脉冲的特征值为中心的一个小区域内,在确定好搜索初始值的基础上,取消文献^[3]中求迹公式的限制条件,只运用搜索算法搜索。本文研究发现,当选取合适的初始值后,搜索不存在发散的现象,可以将总搜索次数定为 5 次。因为搜索范围的缩小和搜索总次数的限定,使得搜索次数大幅减少,且能够搜索出所有特征值,不影响系统的整体性能。通过获取已知特征值范围内的搜索初始值,减少了搜索次数,提高了算法效率。

2.2 2 种算法性能对比

以 2 个特征值为例,特征值虚部分别选取为 0.5 和 1,图 2 和图 3 显示了传统和基于 Darboux 变换的搜索算法的搜索轨迹,线条展示的是每次搜索的具体轨迹。当搜索发散时,用蓝色线条表示;当搜索到特征

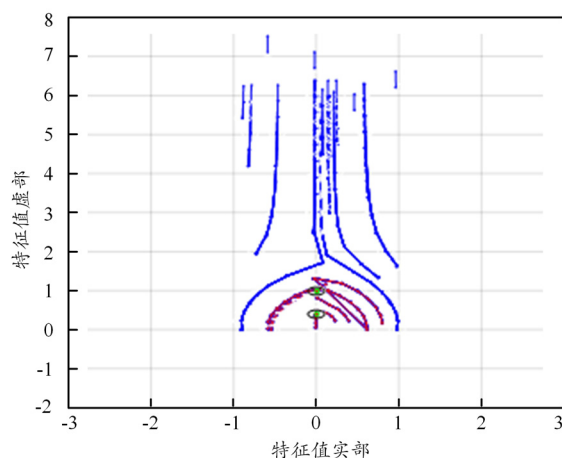


图 2 传统搜索算法轨迹

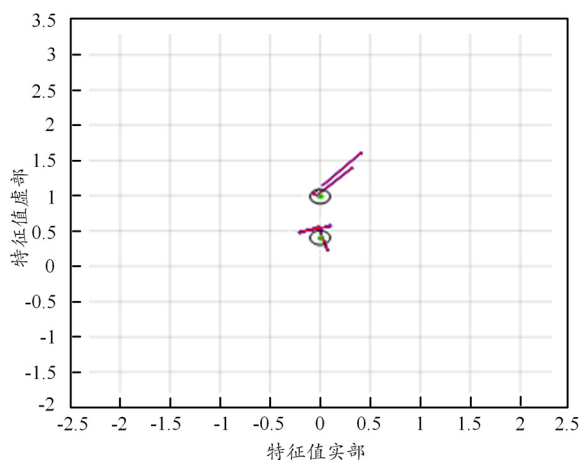


图 3 基于 Darboux 变换的搜索算法轨迹

值时,终点用圆圈表示。由图 2 可知,搜索总次数较多,搜索出 2 个特征值需要 19 次搜索;由图 3 可知,搜索出 2 个特征值仅需要 3 次搜索。由于搜索算法的初值特征值具有随机性,所以 2 种方法的搜索次数也不唯一。传统的方法需要搜索 15~25 次,基于 Darboux 变换的搜索算法仅需要搜索 5 次以内。

3 实验仿真

3.1 影响因素分析

特征值在传输过程中大小基本不变,但原始特征值和解调特征值的数值大小存在一定的误差。在不经过信道的情况下,本文首先研究影响特征值的因素,从采样点数、脉冲持续时间和特征值虚部取值的大小入手,各影响因素对误差造成的影响如图 4 和图 5 所示。可以看出,为了减小误差,特征值虚部的取值应大于 0.5,脉冲持续时间控制在 10~20 ns 之间,采样点数取值在 256 个点以上(考虑到硬件实现的复杂度,采样点控制在 256~1024 之间)。

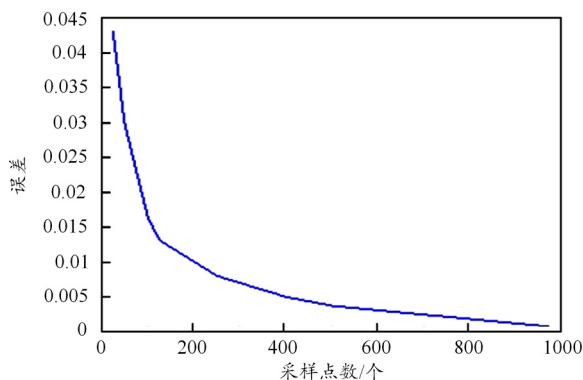


图4 采样点数对误差的影响

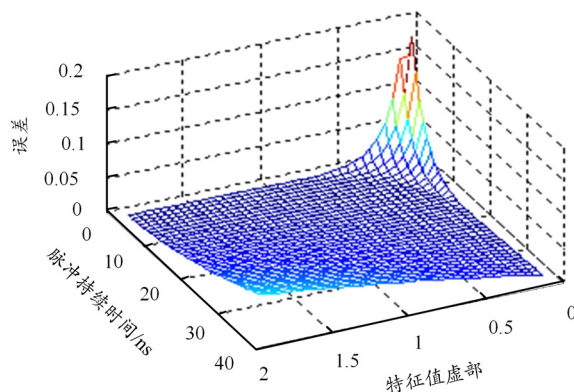


图5 脉冲持续时间和特征值对误差的影响

采样点满足要求后,还要设置合适的滤波器带宽。当带宽过小时,采样信号有信息缺失,导致含有某一特征值的分量被滤除,从而不能搜索出所有的特征值;当滤波器带宽过大时,滤波器对滤波作用不明显,导致噪声的影响过大。以 2-特征值为例,发送端发送码元为 00 01 10 11,滤波器带宽 B 设置为 10 bit。为了确保采样点不影响结果,选取 512 个采样点,背靠背传输前、后的波形变化如图 6 所示,左下子图为局部放大图。可以看出,由于单特征值传输前后幅度大小始终为负,所以不影响传输结果,而多特征值传输中幅度有

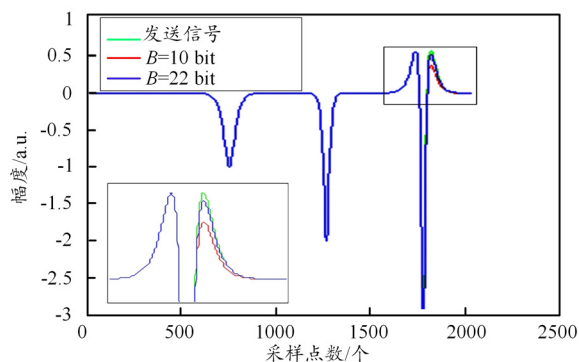


图6 背靠背信号传输对比

两处对称的正值分量,滤波器带宽较小时,会滤除一部分右半边正值分量。在仿真多特征值时,不同条件下,滤波器的带宽应考虑选取合适的大小。

3.2 仿真流程及结果分析

实验采用 Matlab 和 Optisystem 软件仿真。参数设置为:二阶色散系数 $\beta_2=20 \text{ ps}^2/\text{km}$,非线性系数 $\gamma=3 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$,光纤线性衰减系数 $\alpha=0.2 \text{ dB/km}$,噪声为高斯白噪声。传输链路中每段光纤长为 50 km,即信号每经过 50 km 光纤连接一个掺铒光纤放大器(EDFA),放大器增益为 10 dB、噪声指数为 5 dB。信号通过光纤滤波后用基于 Darboux 变换的搜索算法解调出对应的特征值,还原出相对应的码元。在 Optisystem 软件仿真中,发送端发送电信号,Matlab 运用 Darboux 变换将电信号合成传输信号进行编码,编码后的信号经光调制器转换为光信号,经过一段距离的单模光纤传输后,用 EDFA 将衰减后的信号放大。

本文首先分析 2-特征值不同系统速率和采样点数下的传输误码率。系统采样点数分别为 256、512 和 1024,传输距离为 2000 km 时速率对误码率的影响如图 7 所示。可以看出,在相同速率下,1024 采样点对应的误码率最小,3 种不同采样点数的采样方法都可以将误码率控制在 10^{-2} 以内。图 8 为不同系统速率下采

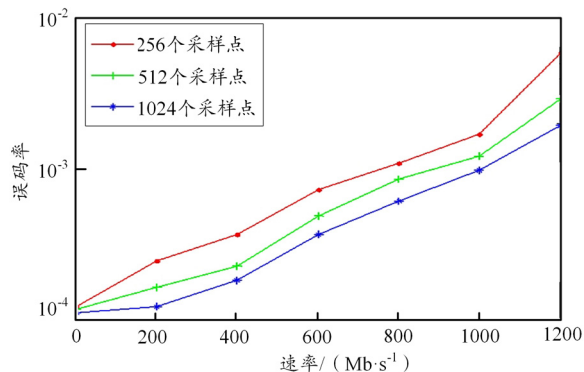


图7 传输速率对误码率的影响

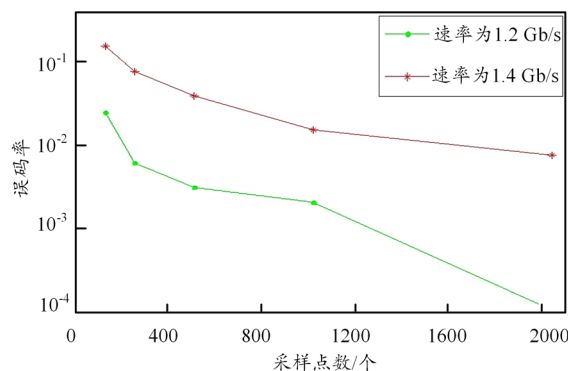


图8 采样点数对误码率的影响

样点数对特征值的影响情况,当速率为 1.2 Gb/s 时,误码率很小,基本保持在 10^{-2} 以下。当采样点数为 128 时,各系统速率误码率均为最高。理论上,采样点数越多,误码率越小,但是从硬件角度出发,采样点数越多,实现越困难,所以采样点数的选择必须考虑实际情况。

本文选用相同的仿真参数,发送码元为 000 001 010 100 011 101 110 111, 仿真发送端为 3-特征值的传输波形如图 9 所示。与图 6 的 2-特征值相比,可以发现合成波形更复杂,后 4 个码元幅度正数部分的差

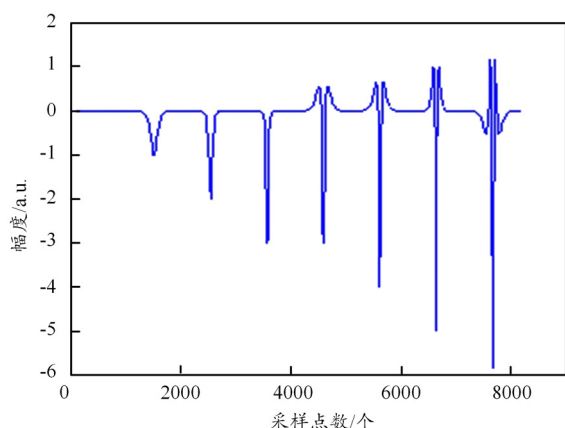


图 9 发送信号

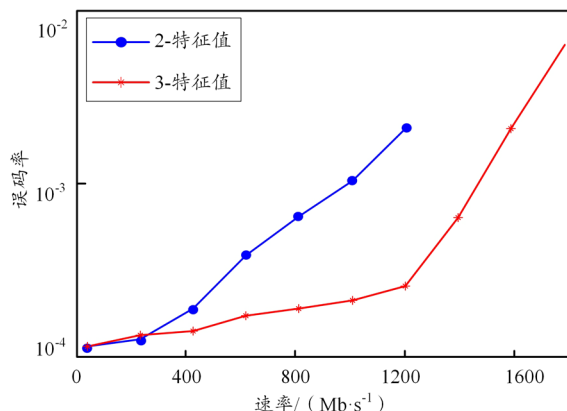


图 10 不同特征值传输性能对比

异性较小,使得解调特征值复杂度增大。当传输距离为 2000 km 时,仿真了 3-特征值的传输性能和 2-特征值传输性能,对比情况如图 10 所示。可以看出,速率越大,误码率越大;3-特征值的误码率在 10^{-2} 内,传输速率可以达到 1.8 Gb/s。

4 结束语

本文根据 NFT 理论和 Darboux 变换对特征值进行调制/解调,首先分析了 NFDm 通信系统的影响因素,选取合适的参数后进行仿真实验。实验通过改进的搜索算法,实现了长传输距离下的 NFDm 通信,有效抑制了非线性效应。实验结果表明:NFDm 中随着特征值个数的增多,传输速率增大,误码率也随之增大;在 10^{-2} 误码率下,单特征值传输速率为 1 Gb/s,2-特征值传输速率为 1.2 Gb/s,3-特征值传输速率为 1.8 Gb/s。本文仅在特征值取纯虚数的情况下对特征值进行了研究,下一步延伸到整个实数部分研究特征值。

参考文献:

- [1] EZRA I P, JOSEPH M K. Compensation of dispersion and nonlinear impairments using digital backpropagation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(20): 3416–3425.
- [2] YOUSEFI M I, KSCHISCHANG F R. Information transmission using the nonlinear fourier transform, part I: mathematical tools [J]. Information Theory IEEE Transactions on, 2014, 60(7): 4312–4328.
- [3] YOUSEFI M I, KSCHISCHANG F R. Information transmission using the nonlinear fourier transform, part II: numerical methods [J]. Information Theory IEEE Transactions on, 2014, 60(7): 4329–4345.
- [4] YOUSEFI M I, KSCHISCHANG F R. Information transmission using the nonlinear fourier transform, part III: spectrum modulation [J]. Information Theory IEEE Transactions on, 2014, 60(7): 4346–4369.
- [5] WANG J, ZHAO Y L, HUANG X, et al. High speed polarization-division multiplexing transmissions based on the nonlinear fourier transform[J]. ZTE Communications, 2019, 17(3): 50–55, 62.
- [6] 牟炯之,梁猛. 基于特征值调制的 NFDm 通信系统性能分析[J]. 光通信技术, 2019, 43(6): 34–37.