

基于特征值调制的 NFDm 通信系统性能分析

牟炯之, 梁 猛

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

摘要: 为降低光纤通信系统中非线性效应对信号的影响, 对基于非线性傅里叶变换(NFT)的非线性频分复用(NFDm)通信系统进行研究, 结合正交相移键控(QPSK), 利用一种特征值调制的方法对信道非线性补偿。理论和仿真结果表明了该方法可以有效缓解光纤的非线性效应。

关键词: 非线性傅里叶变换; 非线性频分复用; 特征值; 光纤通信; 非线性效应

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)06-0034-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Performance analysis of NFDm communication system based on eigenvalue modulation

MU Jiongzhi, LIANG Meng

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

Abstract: In order to reduce the influence of nonlinearity on the signal in optical fiber communication system, the non-linear frequency division multiplexing(NFDm) communication system based on non-linear Fourier transform(NFT) is studied. In combination with orthogonal phase shift keying(QPSK), an eigenvalue modulation method is used to compensate the channel nonlinearity. The theoretical and simulation results show that the method can effectively alleviate the non-linear effect of optical fibers.

Key words: NFT; NFDm; eigenvalue; optical fiber communication; nonlinear effect

0 引言

光纤通信系统中, 信号衰减、色散以及非线性效应是影响通信质量的重要因素。近年来, 随着掺铒光纤放大器(EDFA)和数字信号处理(DSP)等方面取得的进展, 已经可以有效应对衰减和色散问题, 极大地提高了传输能力。若要进一步提高传输容量, 非线性成为主要的限制因素。现有对抗非线性的技术, 例如差错控制编码、数字反向传播等, 但其性能增益都受到噪声-非线性相互作用和交叉相位调制(XPM)效应的限制^[1]。

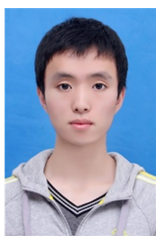
信号在光纤中传播可以用非线性薛定谔方程

(NLSE)进行描述。Yousefi 和 KschisChang 在 2014 年提出了一种用于光纤通信的非线性傅里叶变换(NFT)的方法来求解 NLSE, 并在此基础上提出非线性频分复用(NFDm)技术^[2]。NFT 是逆散射变换(IST)的一种改进型, 它用连续和离散的非线性傅里叶谱来表示信号; 根据非线性傅里叶谱在传输过程中某些参量不变的特性, NFT 可以将独立信息流编码在并行子载波(连续谱)或 Lax 算子控制的理想 NLSE 特征值 λ (离散谱)中。2017 年, Ivan T. Lima 等人通过实验验证了连续谱调制的可行性^[3]。S. T. Le 和 Henning Buelow 的研究表明了利用 NFDm 方法在传输 488km 后, 系统的 Q 因子比传统正交频分复用 (OFDM) 技术提高了 1.5dB^[4]。以上这些都是针对连续谱调制进行通信, 而对于离散特征值调制方面的研究较少。

本文介绍 NFT 的理论推导和 NFDm 系统模型, 在此基础上利用正交相移键控(QPSK)调制方式实现通信, 并对其性能进行仿真分析。

收稿日期: 2019-02-25。

作者简介: 牟炯之(1992-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 现就读于西安邮电大学电子工程学院(电子与通信工程专业), 主要研究方向为光信息传输技术。参与西安邮电大学研究生创新基金项目, 项目内容主要涉及室内可见光定位算法研究。



1 理论基础

1.1 信道模型和 NFT 理论

信号在无损耗单模光纤正常色散区域的标准 NLSE 形式如下:

$$j\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} - 2|q|^2 q \quad (1)$$

其中, $q(t, z)$ 为在光纤中传输的信号。 j 为虚数单位, ∂ 为偏导。令 $q = Q/\sqrt{P_0}$ 、 $t = \tau/T_0$ 和 $z = l/L_D$ 分别为信号、时间和距离的归一化系数, L_D 为色散长度。 $T_0 = \sqrt{|\beta_2| L_D/2}$ 、 $P_0 = 2/\gamma L_D$ 分别为关于色散和非线性的归一化系数。 $Q(\tau, l)$ 为信号的包络, τ 为时间, l 为传输距离, β_2 为色散系数, γ 为非线性参数。

求解标准 NLSE 时, 本文使用 Zakharov-Shabat 散射问题所定义的非线性谱:

$$v_t(t, \lambda) = \begin{pmatrix} -j\lambda & q(t, z) \\ -q^*(t, z) & j\lambda \end{pmatrix} v(t, \lambda) \quad (2)$$

其中, q^* 为信号 q 关于特征值 λ 的共轭对称信号, v 为关于 NLSE 的特征向量。

设 $u(t, \lambda) = [u_1(t, \lambda), u_2(t, \lambda)]^T$ 是式 (2) 在边界条件 $\lim_{t \rightarrow \infty} v(t, \lambda) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-j\lambda t}$ 下的一组解; 令 $\alpha(\lambda) = \lim_{t \rightarrow \infty} u_1(t, \lambda) e^{j\lambda t}$ 、 $b(\lambda) = \lim_{t \rightarrow \infty} u_2(t, \lambda) e^{-j\lambda t}$ 为非线性傅里叶系数, 就可以得出信号 $q(t, z)$ 的 NFT 表达式:

$$\begin{cases} \hat{q}(\lambda) = \frac{b(\lambda)}{\alpha(\lambda)} \\ \tilde{q}(\lambda_j) = \frac{b(\lambda_j)}{\alpha'(\lambda_j)}, j=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

NFT 由 2 部分组成: 信号的连续谱 $\hat{q}(\lambda)$ 和信号的离散谱振幅 $\tilde{q}(\lambda_j)$ 。 $\alpha(\lambda)$ 和 $b(\lambda)$ 是关于信号 $q(t, z)$ 的非线性傅里叶系数。 λ_j 是 $\alpha(\lambda)$ 在上半复平面的零点, 表示离散特征值, 每个特征值代表了脉冲的一个独立分量。

对矩形脉冲 $q(t) = \begin{cases} A, t \in [-1, 1] \\ 0, \text{other} \end{cases}$ 进行 NFT, 其中

A 表示信号幅值。 $A=1$ 和 $A=6$ 的 NFT 连续谱和离散特征值如图 1 所示 (图中子图为信号离散谱中对应的特征值, 即 $a(\lambda)$ 在上半复平面的零点)。可以看出, 不同的信号具有不同的连续谱和离散特征值。

当图 1 中的脉冲在不考虑噪声的情况下, 传输 50km 后的非线性谱如图 2 所示。可以看出, 连续谱没有展宽并且离散特征值保持不变, 说明其受信道中色散和非线性效应的影响较小。

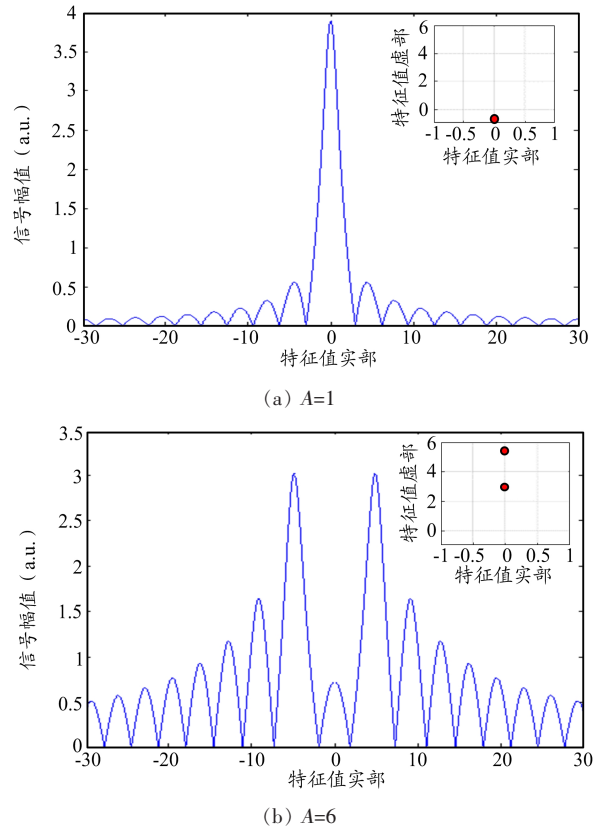


图 1 $A=1$ 和 $A=6$ 的矩形脉冲非线性谱

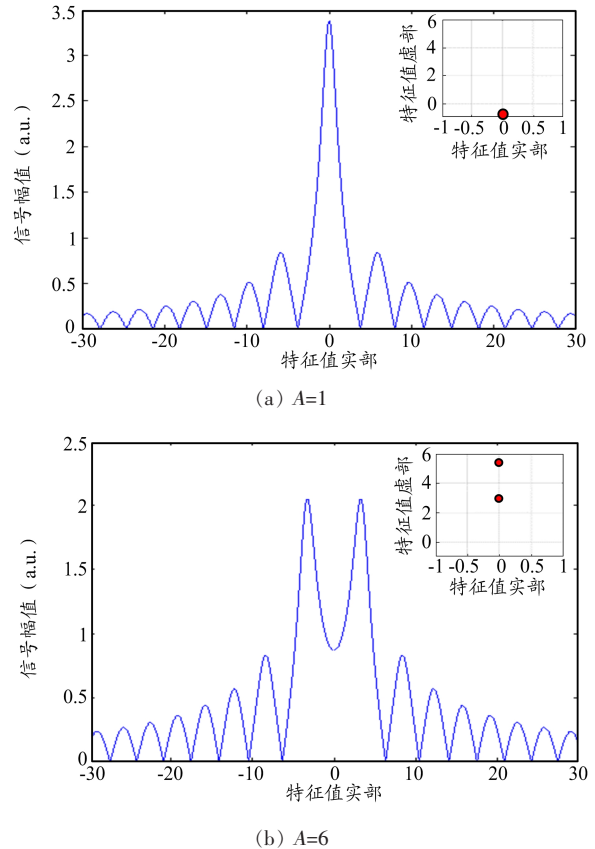


图 2 $A=1$ 和 $A=6$ 的矩形脉冲传输 50km 的非线性谱

1.2 非线性傅里叶逆变换 (INFT)

INFT 能够从给出的非线性连续谱和离散谱中得到信号 $q(t, z)$, 本文通过求解 Riemann-Hilbert 系统可以得到 INFT 的表达式^[2]:

$$q^*(t) = 2j \sum_{i=1}^N \tilde{q}(\lambda_i) e^{2j\lambda_i t} v_2^{-1}(t, \lambda_i) - \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{q}(\lambda) e^{2j\lambda t} v_2^{-1}(t, \lambda) d\lambda \quad (4)$$

其中, v_2^{-1} 是式(2)在边界条件 $\lim_{t \rightarrow -\infty} v(t, \lambda) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-j\lambda t}$ 下的一个解; λ_i 是 $a(\lambda)$ 在上半复平面的零点。式(4)表明: 通过给定的特征值和连续谱函数, 在发送端可以合成时域信号。

理论上, 信号 NFT 中连续谱、离散谱和特征值都可以通过编码调制携带信息, 但是考虑到计算复杂度, 本文只对特征值进行调制, 令连续谱 $\hat{q}(\lambda) = 0$ 。由于特征值是一个复数, 通常选取纯虚数来构造信号, 因此我们利用纯虚特征值的优点是合成的时域信号在传输过程中不会发生脉冲展宽^[5]。

在发送端选取合适的特征值, 并建立与发送比特之间的映射关系, 就能够通过对特征值的调制进行通信。假设发送 01 和 10 这 2 个数据, 可以将其分别与不同的特征值对应。本文分别选取特征值 $0.5j$ 和 $1j$ 合成的 01 和 10 信号如图 3 所示。为计算简便, 在边界条件 $t \rightarrow -\infty$ 下令初始解 $q=0$ 。

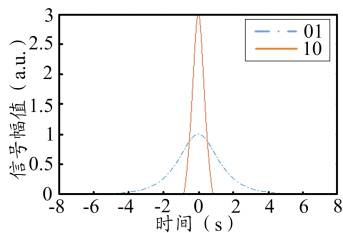


图 3 由 INFT 变换合成的时域信号

2 系统模型

基于 NFT 方法, 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, 这样的通信系统称为 NFDM 通信系统, 其系统模型如图 4 所示。通信方案概述如下:

- ①在发射端编码器选取合适的特征值, 建立信号序列与特征值之间的映射关系;
- ②通过 INFT 模块产生在光纤中传输的信号, 此时信号已经经过调制, 其特征值未受非线性效应影响;
- ③经电光调制将电信号转换为光信号进行发送;
- ④在接收端的 NFT 模块中分析接收到的信号, 并计算信号特征值;

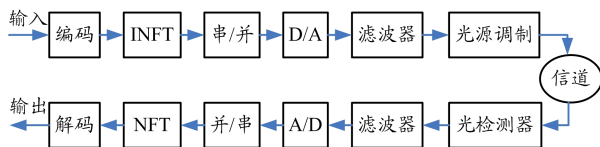


图 4 NFDM 通信系统模型

⑤解码器根据映射关系将接收信号的特征值与发射星座图进行比较, 对发送的比特进行恢复。

由于本文只对特征值进行编码调制, 通过 NFT 可以直接产生满足需要的信号, 因此可以简化系统模型, 不需要进行串/并和 D/A 转换。

在发射端, INFT 模块采用 Darboux 变换, 这种方法提供了从一个已知解构造另一个解的可能性, 适用于数值实现^[6]。例如可以从 NLSE 的初始解 $q=0$ 开始, 递归地得到所有高阶 N 孤子解。

在接收端, NFT 只有在少数情况下可以进行解析计算, 对于任意信号, 可以使用 Newton-Raphson 等方法定位一个 $\alpha(\lambda)$ 的零点, 以找到特征值。然而, 在 NFT 通信系统中, 发送信号是从接收机已知的信号集中提取的, 可以使用一种搜索算法求解^[7]。因此, 可以简化 NFT 谱估计的问题。此外也不需要估计离散谱幅值或连续谱, 因为它们中没有编码信息。

3 仿真结果与分析

为了验证 NFDM 通信系统对光纤中非线性的抑制效果, 本文使用 Matlab 软件对 QPSK 信号进行仿真, 通过星座图对比和误码率对系统性能进行分析。

3.1 仿真流程

①首先建立信号

表 1 信号比特与特征值 λ 之间映射关系

信号	比特组合	特征值
S_1	00	$q(\lambda=0)$
S_2	01	$q(\lambda=0.25j)$
S_3	10	$q(\lambda=0.5j)$
S_4	11	$q(\lambda_1=0.25j, \lambda_2=0.5j)$

比特与特征值 λ 之间映射关系如表 1 所示; 然后利用 QPSK 将特征值映射到合适的星座图中, 第一、二、三、四象限分别对应 S_1, S_2, S_4, S_3 信号。

②在发射端构造传输速率为 28Gb/s 的仿真系统并发送 2^{16} 个信号, 信号进入 NFT 模块中利用 Darboux 变换的方法, 构造方程的一系列孤子解。该调制器的输出是一系列光孤子脉冲, 信号频率为 1GHz。

③将产生的脉冲信号放大并发射到光纤线路中。光纤线性衰减系数为 0.2dB/km, 二阶色散系数 $\beta_2 = 16\text{ps}^2/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 非线性系数 $\gamma = 1.2\text{W}^{-1}/\text{km}$, 光纤链路由一个每经 50km 光纤进行一次放大的回路组成。EDFA 的增益与光纤损耗相抵消, 高斯白噪声为 3dB。

④在接收端对接收到的信号进行滤波处理之后进入 NFT 模块,计算出信号的非线性谱并利用搜索法求得信号特征值。

3.2 仿真结果分析

图 5 为信号传输 500km、1000km 和 1500km 时,在接收端得到的星座图。可以看出,随着传输距离的增加,星座图变得杂乱,误码率增加;但从总体来说星座点的位置还是比较集中,没有发生偏移。因此,本文所提方法对光纤中的非线性效应有较好的抑制。

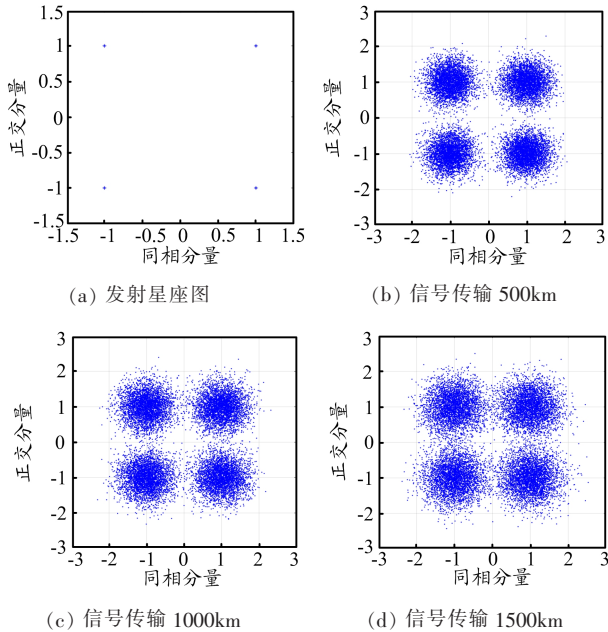
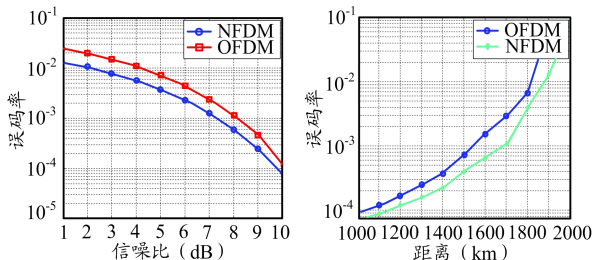


图 5 发射星座图与传输 500km、1000km 和 1500km 时的星座图

由于 NFDM 系统与 OFDM 系统类似,都是将独立的信息流编码在并行的子载波中,且这些子载波在理想的无噪声和无损光纤信道中传播时相互独立。因此,我们对 NFDM 和 OFDM 这 2 种方法的误码率进行了对比,OFDM 系统采用 QPSK 对输入信号进行调制,信道参数设置不变。2 种方法都未做均衡处理,其仿真结果如图 6 所示。当传输距离为 1100km 时,2 个系统随着光信噪比增加,误码率都相应减少。光信噪比为



(a) 发射信噪比对误码率的影响 (b) 传输距离对误码率的影响

图 6 OFDM 与 NFDM 系统性能比较

5dB 与 10dB 时,NFDM 误码率分别为 3.8×10^{-3} 和 9.5×10^{-5} ,而 OFDM 误码率为 7.5×10^{-3} 和 1.9×10^{-4} ,可以看出 NFDM 的误码率整体小于 OFDM,平均减少 53%。当光信噪比为 10dB 时,随着传输距离由 1000km 逐步增加到 2000km,色散和非线性效应加重,系统误码率整体上升,在 1800km 时 NFDM 和 OFDM 系统误码率分别为 3.1×10^{-3} 和 5.9×10^{-3} ,可以看出 NFDM 系统性能优于 OFDM。

4 结束语

本文根据 NFT 理论对信号非线性谱中特征值进行单独编码调制,选取了 2 个特征值采用 QPSK 调制;在发送端利用 Darboux 变换生成孤子脉冲,在接收端使用搜索算法得到信号 NFT 的数值解,并从中提取出特征值从而恢复原始信号。通过仿真给出了误码率根据信噪比和距离的变化情况,说明在相同条件下 NFDM 的性能优于 OFDM。

本文仅在 Matlab 中对理论模型进行仿真实验,忽略了实际传输过程中放大器噪声等因素的影响,在今后的工作中可以进一步考虑信道的实际因素,利用 Optisystem11 等仿真软件对整个系统进行全面分析。

参考文献:

- [1] DONG Z, HARI S, GUI T, et al. Nonlinear frequency division multiplexed transmissions based on NFT [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(15): 1621–1623.
- [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] IVAN T LIMA, THIAGO D S DEMENEZES, VLADIMIR S, et al. Nonlinear Compensation in Optical Communications Systems With Normal Dispersion Fibers Using the Nonlinear Fourier Transform [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(23): 5056–5068.
- [4] LE S T, HENNING BUELOW. Nonlinear frequency division multiplexed transmissions with 64QAM [C]// 2017 Opto-Electronics and Communications Conference(OECC) and Photonics Global Conference (PGC). July 31–Aug 4, 2017, Singapore. Singapore: IEEE, 2017.
- [5] HARI S, KSCHISCHANG F, YOUSEFI M. Multi-eigenvalue communication via the nonlinear Fourier transform [C]// 2014 27th Biennial Symposium on Communications(QBSC), June 1–4, 2014, Kingston, New Zealand. Canada: IEEE, 2014: 92–95.
- [6] 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.
- [7] 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.