

基于四维非线性串扰模型的单跨无中继 光传输多维调制设计

梁志伟, 陈斌*, 凌未, 雷艺
(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230009)

摘要: 随着光通信速率需求的不断提高, 光纤中的非线性效应成为了限制信道容量增长的主要因素。针对该问题, 本文基于四维(Four-Dimensional, 4D)非线性串扰模型和几何整形, 提出了抗非线性4D调制设计方法。通过在加性高斯白噪声信道(Additive White Gaussian Noise, AWGN)和单跨无中继光纤传输系统中的仿真, 详细比较了四类不同调制格式(包括分别针对AWGN信道和光纤信道设计的2D和4D调制格式)的传输性能。数值仿真结果表明, 基于4D非线性串扰模型和4D空间联合优化的调制格式不仅有较高的线性整形增益还具有较好的非线性容忍性。以5通道的波分复用传输系统为例, 优化得到的NL-4D-1024调制与传统正交幅度调制(QAM)和2D整形调制相比, 可以分别减少0.8 dB和0.4 dB的发射功率。

关键词: 多维度调制格式; 几何整形; 非线性串扰模型; 光纤信道; 相位噪声

基金项目: 国家自然科学基金(No.62171175, No.62001151)

中图分类号: TN92; U285.49

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)08-2563-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230087

Multi-Dimensional Modulation Designing Based on Four-Dimensional Nonlinear Interference Model for Single-Span Optical Transmission System

LIANG Zhi-wei, CHEN Bin*, LING Wei, LEI Yi

(School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: With the increasing demand of optical communication data rate, the nonlinear effect in optical fiber has become the main factor limiting the growth of channel capacity. To solve this problem, this paper proposed a nonlinearity-tolerant geometrically-shaped (GS) four-dimensional (4D) modulation optimization method is proposed based on the 4D nonlinear interference (NLI) model. The transmission performance of four different modulation formats (including the 2D and 4D modulation formats designed for additive white Gaussian noise (AWGN) channel and optical fiber channel, respectively) are compared in detail via the simulation in the AWGN channel and single-span optical fiber transmission systems. The numerical results show that the constellation shaping based on the joint optimization of 4D NLI model and 4D space can not only achieve higher linear shaping gain but also provide better nonlinear tolerance. Taking the 5-channel wavelength division multiplexing transmission system as an example, the optimized NL-4D-1024 format can reduce the transmitted power by 0.8 dB and 0.4 dB compared with the traditional quadrature amplitude modulation (QAM) and 2D-GS modulation, respectively.

Key words: multi-dimensional modulation formats; geometric shaping; nonlinear interference model; optical fiber channel; phase noise

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62171175, No.62001151)

1 引言

现如今,全球数据通信容量呈指数倍增长,并且随着5G通信技术的推广和演进,各种新兴业务的快速增长带来的数据流量需求与日俱增,因此有效利用现有的网络资源是光通信系统中的主要挑战之一^[1].为了提高网络传输的效率,通常可以使用更复杂的调制方案,即增加频谱效率(Spectral Efficiency, SE),或者增加波特率(即每秒处理更多的符号)这两种方式来提高系统容量.为了实现高频谱效率、高灵敏度的光传输,通过将相干检测技术和数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)相结合,同时使用高阶调制和新型调制方案增大传输容量,并在接收端采用数字信号补偿算法^[2].例如,400ZR标准定义了一个互通、可插拔400 G相干DSP模块,适用于80~120 km传输距离.该DSP模块可支持偏振复用的十六进制正交幅度调制(Polarization-Multiplexed 16-ary Quadrature Amplitude Modulation, PM-16QAM)和59.84 GBaud相结合的传输方案^[3,4].最近,有关单波800 G的传输解决方案被广泛讨论,其中32 QAM和96 GBaud收发器方案受到相当大的关注^[5,6].除此之外,Matsushita等人^[7]于2022年提出通过在96 GBaud的系统中使用概率整形(Probabilistic Shaping, PS)优化256 QAM,从而达到了41 Tbps的传输速率和10 bps/Hz的SE.

概率整形^[8]是通过麦克斯韦-玻尔兹曼(Maxwell-Boltzmann, MB)分布调整星座点的概率分布.在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道中,概率整形已被证明可以达到最佳性能,但是对于实际信道(如:光纤非线性信道)而言,无法获得最佳性能.相比于概率整形,星座整形的另一种方法是几何整形(Geometric Shaping, GS)^[9],其核心思想是调整星座点的几何分布.该方法已被证明不仅可以实现整形线性增益,还可以减轻光纤信道中的非线性损伤^[10].此外,优化调制不仅仅局限于对星座点二维空间上进行概率分布和几何分布的优化,也可以对星座图在偏振、频率、时间、空间等多个调制维度上进行联合设计,从而减小各个维度间的串扰.在此背景下,在多维空间中进行星座整形引起了光通信领域的高度关注^[11,12].

为了实现高速率传输要求,通过增加调制的维数可以使星座点间的最小欧式距离处于一个合理的水平,从而实现更高的频谱效率.除此之外,当星座点的边界更加接近超球面并分布更密集时,多维调制不仅可以带来更高的整形增益,还可以带来编码增益^[9,13].因此,多维调制相比于传统的二维调制有更高的频谱效率以及更好的噪声容限^[14].另一方面,针对AWGN信道进行星座整形虽然方便且增益客观,但是光纤信道中的克尔非线性会对不同调制造成不同程度的信噪

比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)恶化.因此,在光纤信道中,设计具有高非线性容忍度和低实现复杂度的调制格式仍然是一个具有挑战性的问题.

为了提高多维调制的非线性容忍度并减少优化复杂度,恒定模量(Constant modulus)^[15,16]、象限对称(Orthant-Symmetry, OS)约束^[17]及shell shaping^[11]等启发式的思想相继被提出.比如,Kojima和Chen等人相继于2017年和2019年通过恒定模量设计了具有优异非线性容忍度的四维(Four-Dimensional, 4D)调制2A8PSK和4D-64PRS^[15,16];2020年Chen等人^[17]又通过OS约束来降低优化复杂度设计了4D-OS128等调制格式.然而,在光纤信道中,由于缺少多维调制格式相关的非线性串扰(NonLinear Interference, NLI)模型,具有恒定模量的调制格式设计并不能最大化其在光纤信道中的线性整形增益和抗非线性增益.

为了提升多维调制在光纤信道下的性能,业界提出多种方案去模拟NLI的影响.其中,最直接的方法是通过分布式傅里叶方法(Split-Step Fourier Method, SSFM)估计调制相关的非线性串扰,并在优化时考虑该影响,从而使调制格式具有更好的非线性容忍性^[18].但是该方案的代价是耗时耗力且计算复杂度高.因此,有研究提出使用非线性串扰模型估计光纤信道的非线性效应,从而取代耗时的SSFM仿真.例如,Sillekens等人^[19]于2022年使用增强高斯噪声(Enhanced Gaussian Noise, EGN)模型^[20]设计2D调制格式,并基于高斯信道设计4D调制格式;同年Liga等人借助4D非线性串扰模型^[21],通过减少NLI并最大化多跨单通道系统中的互信息(Mutual Information, MI)的方法设计了不同几何形状的双偏振(Dual-Polarization, DP)四维调制^[22].然而,在光纤信道中针对单波800 Gbps设计最佳DP-4D调制的问题仍悬而未决.

本文基于4D非线性串扰模型设计优化得到具有良好非线性容忍性4D调制设计方法.以最大化广义互信息(Generalized Mutual Information, GMI)为目标,使用端到端学习网络和OS约束来优化星座图,设计了一种频谱效率为10 bit/4D-sym并容忍非线性的4D调制格式(NL-4D-1024).通过在AWGN信道和单跨无中继光纤传输系统中仿真,详细比较了四类不同调制格式(包括分别针对AWGN信道和光纤信道设计的2D和4D调制格式)的传输性能.数值结果表明,基于4D非线性串扰模型和4D空间联合优化的调制格式不仅有较高的整形增益还具有较好的非线性容忍性.在净速率600~800 Gbps范围内,单跨传输系统中NL-4D-1024调制优于其他调制格式,且与PM-32QAM相比可减少0.8 dB的发射功率或延长1.5%的传输距离.

2 光纤通信系统模型

图 1 所示为本文考虑的基于软信息译码(Bit Interleaved Coded Modulation, BICM)的光纤传输系统模型. 在发送端,在二进制比特序列 b 经过四维符号映射器实现比特到符号 X 的一一映射. 其中, $b \rightarrow X$ 映射关系由设计的星座图坐标 χ 和对应的二进制比特映射 \mathcal{L} 所决定,并采用格雷编码映射关系. 然后,符号 X 经过发射端(Tx)数字信号处理生成连续的信号,其中发端 DSP 主要包括上采样、根升余弦(Root Raised Cosine, RRC)滤波器以及功率设置. 信号经过光纤信道传输后,由接

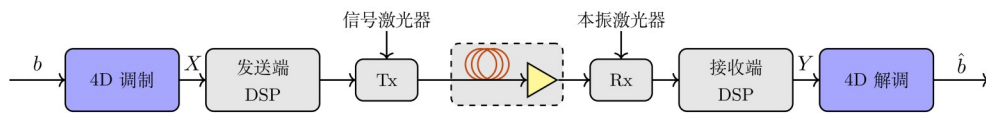


图 1 系统模型

在 BICM 系统中, GMI 作为常用的性能指标, 其表达式如下^[24]:

$$\text{GMI} = \sum_{k=1}^m I(B_k; Y) = \sum_{k=1}^m E \left[\log_2 \frac{f_{Y|B_k}(Y|B_k)}{f_Y(Y)} \right] \quad (2)$$

其中, m 表示 M 进制调制格式每个符号所映射的二进制比特数目 ($m = \log_2 M$); $I(B_k; Y)$ 代表互信息, 其中 B_k 是二进制比特序列 b 的第 k 位, 该二进制比特序列 b 映射为符号 X 和 Y 是经过接收端 DSP 处理后的接受符号; $f_{Y|B_k}(Y|B_k)$ 表示信道转移概率.

这里值得注意的是, 本文在 4.3 节将会分析不同相位噪声对调制格式的影响, 这里的相位噪声不仅包括信号在传输链路中的相位偏移, 还包括接收端硬件以及激光器相位噪声 (见图 1 中的信号激光器和本振激光器), 而在优化过程中, 本文暂未考虑激光器线宽对相位噪声的影响.

3 几何整形调制格式设计

信号的调制格式不仅表征着系统的线性整形增益, 而且反映着系统的非线性容忍度, 如高阶调制格式有着高频谱效率, 但是抗非线性能力差. 本文主要关注四维几何整形, 其核心思想是通过调整星座点在双偏振、正交/同相四个维度的几何分布, 优化星座结构和比特映射关系, 使相邻星座点之间的最小欧式距离增大, 从而降低系统误码率, 进一步地逼近香农信道容量极限. 除此之外, 在几何整形的基础上优化调制格式的抗非线性能力, 可以进一步提高调制格式的传输性能. 接下来, 将介绍四类不同的优化方法, 寻找可以提高调制的传输性能和抗非线性能力的最优方法.

第一类和第二类方法分别是基于 AWGN 信道优化 2D 或 4D 调制, 这里称为 Lin-2DGS 或 Lin-4DGS. 第

收端 DSP 对接收信号进行色散补偿、匹配滤波、采样和相位补偿等处理得到符号 Y , 最后由四维符号解映射恢复成二进制比特 \hat{b} . 其中, 光传输链路可以用马纳科夫方程来描述信号在光纤中传输的过程, 其表达式为^[23]

$$\frac{\partial E(t, z)}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} E(t, z) - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E(t, z)}{\partial t^2} + i \frac{8}{9} \gamma |E(t, z)|^2 E(t, z) \quad (1)$$

其中, $E(t, z)$ 表示 t 时刻在传输距离 z 处的复杂光场信号; α, β_2 和 γ 分别表示信号衰落、群速度色散参量和非线性系数.

三类和第四类方法是基于光纤信道优化 2D 或 4D 调制, 这里称为 NLI-2DGS 或 NLI-4DGS. 表 1 综合比较了四类方法的优化复杂度、潜在线性整形增益以及抗非线性能力.

从表 1 中可以看出, 针对不同的信道模型, 基于 AWGN 信道优化调制格式线性整形增益更高, 基于光纤信道优化的调制格式抗非线性能力更高; 针对不同优化空间, 4D 空间优化的 DP-4D 调制格式比 2D 空间优化的 PM-2D 调制格式有更好的线性整形增益和抗非线性能力.

表 1 整形方法总结 (++) 表示最高或最好)

信道模型	Lin-MDGS	NLI-MDGS		
	AWGN	SSFM	EGN	4D NLI
优化空间	2D/4D	2D/4D	PM-2D	DP-4D
复杂度	--	++	-	+
线性增益	++	+	-	++
抗非线性	--	++	+	++

3.1 基于 AWGN 信道的四维调制优化

基于 AWGN 信道的调制格式设计, 旨在通过信号整形 (概率整形或几何整形) 使得调制格式在符号概率或形状上趋近于高斯分布, 从而减少信道容量与调制格式可达信息速率之间的差距, 提升系统传输速率. 而调制设计可以通过迭代优化, 获取性能最优的调制格式, 使其实现星座整形增益^[25]. 本文采用基于 GMI 的端到端机器学习方法优化二维和四维调制格式. 从式 (2) 中可以看到, GMI 计算依赖于星座点的坐标, 二进制比特映射和传输信道参数. 因此, 基于 GMI 找到优化的星座点坐标 χ^* 和二进制比特映射 \mathcal{L}^* 是在给定信道条件下, 对星座点 χ 的坐标和二进制比特映射 \mathcal{L} 联合优化,

可以表示为

$$\{\chi^*, \mathcal{L}^*\} = \underset{\chi, \mathcal{L}: E[\|\chi\|^2] \leq \sigma_x^2}{\operatorname{argmax}} \{ \operatorname{GMI}(\chi, \mathcal{L}, \operatorname{SNR}) \} \quad (3)$$

其中, σ_x^2 代表信号传输功率; χ^* 和 \mathcal{L}^* 分别是经过神经网络优化后得到的最优星座图坐标和二进制比特映射; $E[\cdot]$ 表示求数学期望. 基于 AWGN 信道假设, 式(3)中的 SNR 是发射端星座符号的归一化功率比高斯噪声方差得到的, 其定义为 $\operatorname{SNR} = \frac{E_{\text{Tx}}}{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2}$, 式中发送信号经过归一化, $E_{\text{Tx}} = 1$; σ^2 是高斯噪声方差.

上述方法已被证明可以提升系统的线性整形增益. 但是, 由于没有考虑光纤非线性的影响, 导致该类调制格式在光纤非线性信道传输中的性能有一定损失. 因此, 学者们开始在优化过程考虑非线性效应的影响, 进一步提升调制格式的非线性容忍性.

3.2 基于非线性串扰模型的四维调制优化

针对光纤信道, 非线性串扰假设为加性高斯噪声, 并且噪声功率取决于光纤链路参数, 因此式(3)中的 SNR 可以用接收端 DSP 后的等效 SNR ($\operatorname{SNR}_{\text{eff}}$) 代替, 即

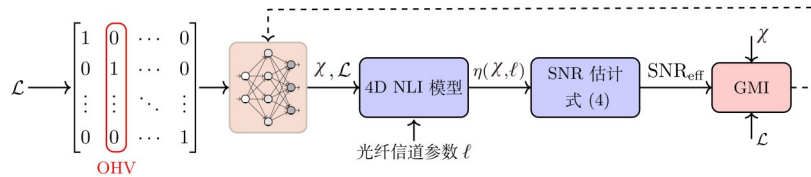


图2 基于4D非线性串扰模型的四维调制优化系统

在发送端, 通过大小为 $M \times M$ 的 one-hot 向量矩阵 \mathbf{V}^{OH} (One-Hot Vector, OHV), 将 M 个长度为 m 的二进制比特序列与 M 个星座点坐标一一对应. 星座点坐标 χ 由 Adam 优化器的端到端学习神经网络 $f_{\theta}(\cdot)$ (没有隐藏层和激活函数) 使用 one-hot 向量矩阵作为输入生成, 其表达式如下:

$$\chi = f_{\theta}(\mathbf{V}^{\text{OH}}) = \mathbf{W}^T \mathbf{V}^{\text{OH}} + b \quad (5)$$

其中, θ 表示神经网络的参数, 包括权重 \mathbf{W} , 偏置 b . 值得注意的是, 权重和偏置已在预处理阶段初始化, 因此第一次的星座点坐标即为初始化的星座点坐标. 在网络优化的过程中, 本文在优化中加入了 OS 约束条件, 可以实现仅需要优化第一象限的坐标来降低优化复杂度.

神经网络输出的星座点坐标 χ 和给定系统链路参数 ℓ 作为 4D 非线性串扰模型的输入, 可计算得到非线性功率系数 $\eta(\chi, \ell)$. 通过该系数估计优化的调制格式经过所考虑光纤链路传播和匹配滤波后的等效 SNR (见式(4)). 最后根据式(2)计算目标函数 GMI, 并反馈到神经网络, 对神经网络参数 θ 进行更新, 再通过式(5)得到新一代的星座点坐标, 重复上述步骤, 直到收敛. 其

$$\operatorname{SNR}_{\text{eff}} = \frac{P}{\sigma_{\text{ASE}}^2 + \sigma_{\text{NLI}}^2} = \frac{P}{\sigma_{\text{ASE}}^2 + \eta(\chi, \ell) P^3} \quad (4)$$

其中, P 表示发射功率; σ_{ASE}^2 表示放大器自发辐射噪声 (Amplified Spontaneous Emission noise, ASE) 功率; σ_{NLI}^2 表示非线性噪声功率, 且 $\eta(\chi, \ell)$ 表示非线性功率系数, 是根据光纤链路参数 ℓ 和星座点坐标 χ 由非线性串扰模型计算而来.

为了更加快速准确估计 $\operatorname{SNR}_{\text{eff}}$, 学术界开始使用非线性串扰模型来计算非线性噪声功率^[20,21], 其中 EGN 模型^[20]和 4D 非线性串扰模型^[21]在近年来受到广泛关注. 本文所提出的 4D 调制格式优化方法, 采用了考虑 4D 调制格式影响的 4D 非线性串扰模型来估计非线性噪声功率.

图2为本文基于 4D 非线性串扰模型设计 DP-4D 调制格式的系统图. 从整体上看, 该系统是在给定光纤信道参数下, 通过联合优化星座点坐标 χ 和二进制比特映射 \mathcal{L} , 达到最大化 GMI 的目标. 预处理阶段, 根据目标频谱效率设置初始的星座点坐标 χ 和二进制比特映射 \mathcal{L} , 通过最小化 MSE 初始化神经网络的权重 \mathbf{W} 和偏置 b .

优化过程可以表示为

$$\{\chi^*, \mathcal{L}^*\} = \underset{\chi, \mathcal{L}: E[\|\chi\|^2] \leq \sigma_x^2}{\operatorname{argmax}} \{ \operatorname{GMI}(\chi, \mathcal{L}, \operatorname{SNR}_{\text{eff}}^{\text{opt}}) \} \quad (6)$$

其中, $\operatorname{SNR}_{\text{eff}}^{\text{opt}}$ 表示最优发射功率 $P^{\text{opt}} = \frac{\partial \operatorname{SNR}_{\text{eff}}}{\partial P}$ 的等效信噪比. 值得注意的是每次优化后的 $\operatorname{SNR}_{\text{eff}}$ 是变化的 (不同于 AWGN 信道中的 SNR 是不变的), 因此本文提出的方法在优化过程中考虑了 $\operatorname{SNR}_{\text{eff}}^{\text{opt}}$ 的梯度变化, 以此来最大化 GMI.

4 仿真结果及分析

在本节中, 通过仿真对光通信背靠背 (Back-to-Back, B2B) 系统和单跨无中继传输系统的性能进行了数值评估, 并且分析了相位噪声对调制格式性能的影响. 本文考虑比较 10 bit/4D-sym 频谱效率的调制格式, 分别是传统的 PM-32QAM 调制, 针对 AWGN 信道优化的 2D 星座图 GS-2D32-AWGN 和 4D 星座图 GS-4D1024-AWGN, 基于 EGN 模型优化的 2D 星座图 GS-2D32-NLI (其具体的优化方法参数可参照文献[19]), 以及通过本文提出的基于 4D 非线性串扰模型优化得到的 4D 星座图 NL-4D-1024. 该 NL-4D-1024 调制格式是以单跨

220 km, 800 G 传输为优化目标, 频谱效率为 10 bit/4D-sym、具有抗非线性的 4D 调制格式. 采用的优化方法如图 2 所示, 网络中 Adam 优化器的学习速率为 0.1. 光纤

传输模块使用掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)和标准单模光纤, 具体光纤链路系统参数见表 2.

表 2 系统和仿真参数

系统参数	参数取值	系统参数	参数取值
波特率	96 GBaud	色散	$17 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$
RRC 滚降系数	0.01	衰落	0.2 dB/km
信道间隔	100 GHz	非线性系数	$1.3 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$
通道数	5	噪声系数	5 dB
过采样倍数	16	仿真步长	0.1 km

图 3 展示了不同调制格式在 16 dB 信噪比下的星座图. 图中, 星座点的亮度越高, 代表调制格式投射到该星座点的概率越大. 如图 3 所示, 优化得到的 2D 调制格式每个星座点的亮度几乎相同, 这是因为 2D 调制格式投射到 2D 平面的每个星座点都是等概分布; 而 4D 调制格式 NL-4D-1024 中存在不同亮度的星座点是因为该调制格式虽然在 4D 空间上是等概分布, 但其投射到 2D 平面上会呈现更加趋于高斯分布的不等概分布, 从而实现更高整形增益.

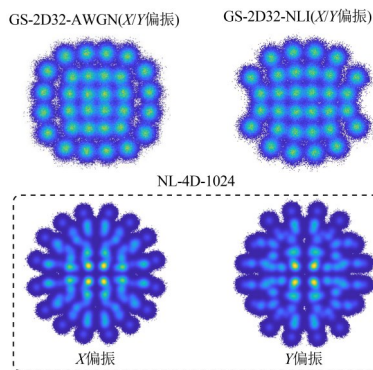


图 3 不同调制格式在 X 偏振和 Y 偏振的二维投影(SNR=16 dB)

4.1 光通信背靠背系统下的性能分析

为了量化所考虑调制格式在高斯噪声下的整形性能区别, 在光通信 B2B 系统下进行了仿真验证并分析了所考虑的五种调制格式的性能差异. 除光纤参数色散和非线性系数设置为 0 以外, 系统的具体配置参数见表 2.

在 B2B 系统中, 图 4 所示为所考虑调制格式在不同等效信噪比(在光纤传播和接收数字信号处理之后)下的 GMI 变化曲线. 由图可知, 当 GMI 为 8 bit/4D-sym 时, 在 2D 空间下优化的 GS-2D32-AWGN 和 GS-2D32-NLI 的等效 SNR 相较于 PM-32QAM 有约 0.34 dB 的增益, 但是 4D 空间下优化的 GS-4D1024-AWGN 和 NL-4D-1024 相较于 PM-32QAM 可以提供更高的等效 SNR 增益(约 0.49 dB). 由图可知, 在 7.7 bit/4D-sym 和 7.8 bit/4D-sym 之间的 GMI 范围内, 可以观察到在 4D 空

间下优化的 GS-4D1024-AWGN 和 NL-4D-1024 调制优于在 2D 空间下优化的 GS-2D32-AWGN 和 GS-2D32-NLI 调制. 因此, 在线性信道中, 基于 4D 空间优化星座点相比于 2D 空间有更大的整形空间, 从而可以更好地优化星座点之间的欧几里得距离, 提升线性整形增益.

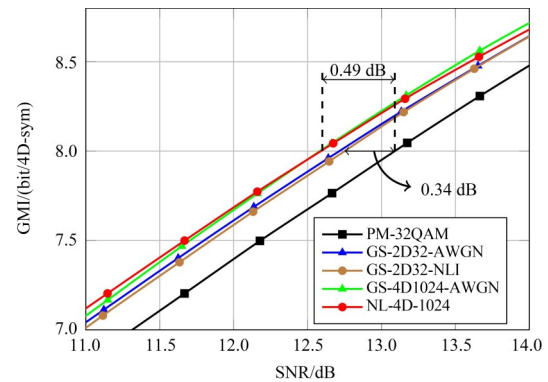


图 4 高斯信道下, 不同调制格式在不同信噪比下的 GMI 性能

4.2 光纤非线性信道下的性能分析

为了探索在光纤传输系统中所考虑调制格式的性能, 本文进一步在单跨 5 通道的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)信道上进行了基于 SSFM 的仿真验证. 光纤通道采用标准单模光纤, 光纤传输系统仿真参数见表 2.

图 5 是在固定传输距离 200 km 的光纤链路中, 系统等效 SNR 关于不同传输功率的变化曲线. 从图中可以看出 AWGN 信道下设计的 GS-4D1024-AWGN 和 GS-2D32-AWGN 调制的等效 SNR 相较于 PM-32QAM 差距最大(约 0.29 dB 和 0.22 dB), 原因在于非线性效应在一定程度上抑制了整形增益. 从该图中还可以看出基于非线性串扰模型优化的星座图比基于 AWGN 信道优化的星座图有更好的非线性容忍性, 例如基于 4D 模型优化的 NL-4D-1024 相较于 PM-32QAM 仅相差 0.09 dB, 这是因为整形过程中考虑了非线性因素, 从而调制格式呈现出更好的性能. 由此可知, 以 AWGN 信道为目标的星座整形方法虽然简单且增益可观, 但由于假定信

道为高斯噪声,忽略了光纤信道的非线性损伤带来的影响,导致了信噪比的恶化.

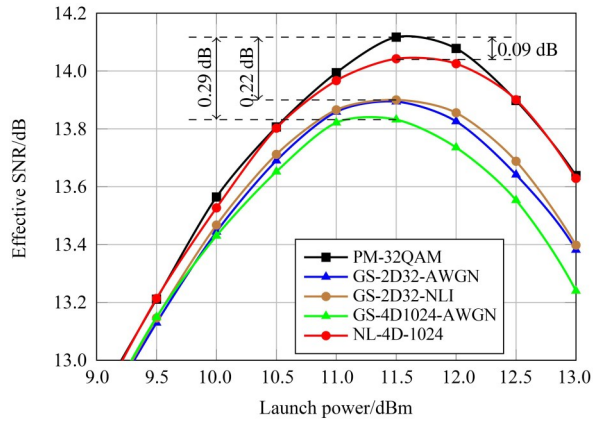


图5 传输距离为200 km的单跨5通道WDM信道下,不同调制格式的等效SNR性能对比

除此之外,从图5中可看出同样考虑光纤信道非线性的影响,基于4D空间优化的NL-4D-1024调制相较于基于2D空间优化的GS-2D32-NLI调制有更大的信噪比提升.这表明在光纤信道下设计多维调制可以更好地抑制非线性带来的性能恶化.因此,当多维星座整形使用非线性分析模型来模拟信道的非线性损伤(主要包括自信道干扰、交叉信道干扰以及多信道干扰)时,可以有效提升调制格式的非线性容忍性.

图6所示是在固定传输距离下,非线性信道系统GMI随传输功率的变化.图中实线和虚线分别是200 km和205 km的传输链路的仿真结果.从图中可以看出,当传输距离为200 km时,基于4D空间并考虑非线性信道优化的NL-4D-1024调制比基于其他优化方法得到的星座有更好的性能,相较于PM-32QAM有0.16 bit/4D-sym的GMI增益.当传输距离增加到205 km时,NL-2D-1024相较于PM-32QAM可以达到0.2 bit/4D-sym的GMI增益.这里值得注意的是,GS-4D1024-AWGN调制虽然其非线性容忍性较差(见图2),但是从图3中可以看出,它有近似于NL-4D-1024调制的系统性能,这是因为GMI不仅和SNR有关,还和星座点的位置和labelling有关,即多维星座整形的总增益是非线性整形增益和线性整形增益之和.而从图1可以看出GS-4D1024-AWGN调制的线性增益较高,弥补了改调制非线性容忍性差的负面效应.

图7比较了所考虑调制的误码率(Bit-Error Rate, BER)性能.其中图7(a)是200 km传输距离下,不同传输功率的等效SNR变化曲线.从图中可以看到,基于4D空间并考虑非线性信道优化的NL-4D-1024调制的BER性能最优,其次是基于4D空间并考虑AWGN信道优化的GS-4D1024-AWGN调制,再次是基于2D空间优

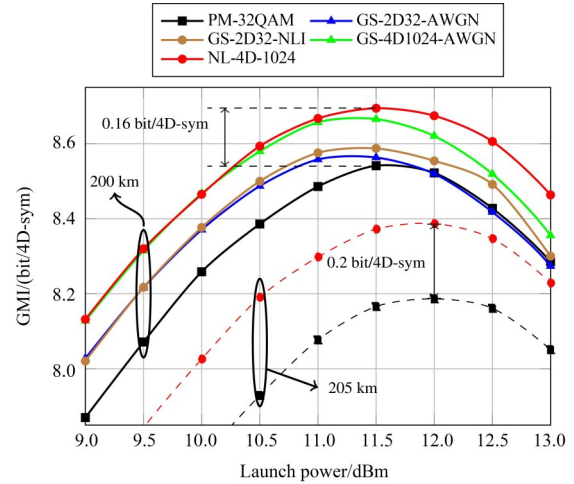
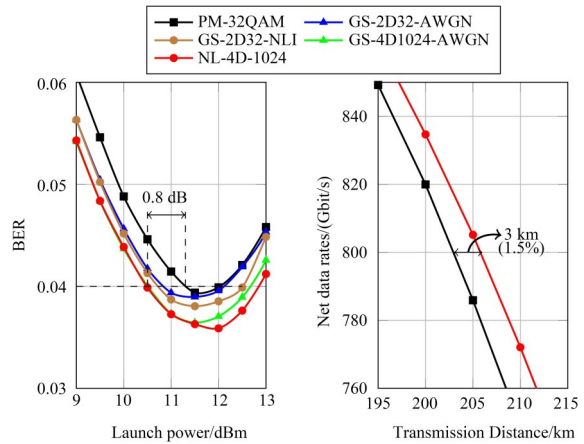


图6 在单跨5通道WDM信道下,不同调制格式的GMI性能对比,其中实线:200 km,虚线:205 km

化的GS-2D32-NLI和GS-2D32-AWGN调制,PM-32QAM相较于整形星座而言性能最差.当达到相同BER= 4×10^{-2} 时,NL-4D-1024调制比PM-32QAM可以节省0.8 dB的传输功率.图7(b)是NL-4D-1024和PM-32QAM调制在不同传输距离下的最优发射功率对应的BER的变化曲线.可以看出,当BER= 4×10^{-2} 时,基于4D模型优化的NL-4D-1024可实现202 km的传输距离,相较于PM-32QAM有2 km的距离增益.



(a) 不同调制格式的BER性能对比 (b) 不同净速率下的可达传输距离

图7 单跨5通道WDM信道

4.3 相位噪声对性能的影响分析

通过上文的仿真结果可以看到,从高斯假设到考虑非线性效应设计的调制格式,可以在一定程度上提升传输性能.但这还是一种理想情况,如果要设计在实际光纤传输中还能保持如此的传输性能,必须考虑通信信道中的所有噪声源(包括克尔非线性,激光器相位噪声,收发端硬件损伤等).因此,在本小节中,进一步分析相位

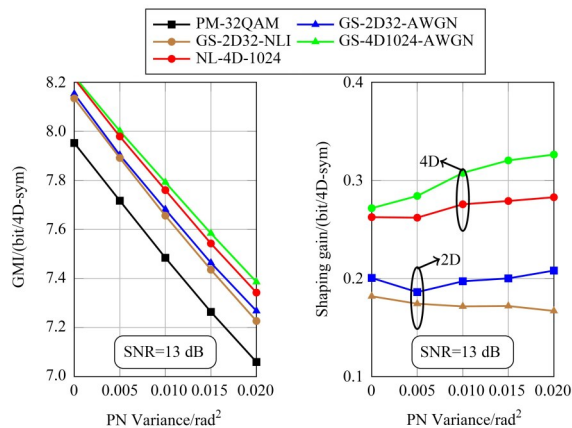
噪声(Phase Noise, PN)对调制格式性能的影响。

通过在 AWGN 信道的基础上,考虑系统中的经过 DSP 处理后的残余相位噪声,则信号在该信道中传输表达式可以表示为

$$Y_k = X_k e^{j\theta_{PN}^{(k)}} + \mathcal{N}_k, k=1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

其中, Y_k, X_k 分别是接收端和发送端的符号序列; $e^{j\theta_{PN}^{(k)}}$ 是均值为零、方差为 θ_{PN}^2 的高斯随机变量,表示系统中的残余相位噪声; \mathcal{N}_k 是零均值高斯随机复变量,表示 AWGN 信道的高斯噪声。

图 8 比较了在固定高斯噪声 SNR 为 13 dB 下,所考虑调制格式的 GMI 性能相对于相位噪声方差的变化。其中图 8(a) 是五类调制格式的 GMI 随相位噪声方差增大的变化曲线,从图中可以看出当相位噪声增大,所有调制格式的性能都会有不同程度的恶化。图 8(b) 所示为优化的四类调制格式相对于 PM-32QAM 在不同相位噪声方差下的 GMI 增益。从图 8(b) 可以看出,当相位噪声增加,所有调制格式仍然保持一定的整形增益。其中在 4D 空间优化的两个调制格式增益(约 0.3 bit/4D-sym)明显大于 2D 空间优化调制格式的增益(约 0.2 bit/4D-sym)。值得注意的是,四维调制的 GMI 增益随相位噪声增加还有上升的趋势,这表明四维调制相比于 PM-32QAM 有更好的相位噪声容忍性。



(a) 不同 PN 方差的 GMI 性能变化 (b) 不同调制格式的整形增益变化(相较于 PM-32QAM)

图 8 高斯噪声 SNR 为 13 dB

5 结论

在本文中,为了实现更高的整形增益,本文提出了一种基于 4D 非线性串扰模型设计具有良好非线性容忍性 4D 调制格式的优化方法。在单跨光纤系统中使用端到端学习网络,基于四维几何整形,设计了一种频谱效率为 10 bit/4D-sym 的 4D 调制格式(NL-4D-1024)。除此之外,本文还介绍了另外三类不同调制格式优化思路(包括分别针对 AWGN 信道和光纤信道设计的 2D 和

4D 调制格式),并详细比较了四类调制格式的传输性能。数值仿真结果表明,所提出的调制格式在可达信息速率上不仅优于传统的 PM-32QAM,而且在 5 通道 WDM 传输系统中比针对高斯信道设计的 2D 和 4D 调制具有更大的非线性容忍度。这也验证了基于 4D 非线性串扰模型设计 DP-4D 调制格式能够有效实现抗非线性串扰和整形增益的联合最优。

参考文献

- [1] 许辰人, 马翔天, 徐昊天, 等. 5G 抗干扰技术综述[J]. 电子学报, 2023, 51(3): 765-778.
- [2] XU C R, MA X T, XU H T, et al. A survey of 5G anti-interference technology[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(3): 765-778. (in Chinese)
- [3] ZHONG K P, ZHOU X, HUO J H, et al. Digital signal processing for short-reach optical communications: A review of current technologies and future trends[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 377-400.
- [4] FORUM O I. Implementation Agreement 400ZR: OIF-400ZR-01.0[S]. Fremont: OIF, 2020.
- [5] 冯振华, 方瑜, 施鹤. 大容量、智能化光传输系统:机遇、挑战与应对策略[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(1): 62-69.
- [6] FENG Z H, FANG Y, SHI H. Towards large-capacity and intelligent optical transmission systems: Opportunities, challenges, and solutions[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(1): 62-69. (in Chinese)
- [7] ZHENG Q, YANG H, WANG L B, et al. Single-carrier 800 Gbit/s and 1.2 Tbit/s transmission using 96 GBaud commercial optoelectronic components[C]//2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Piscataway: IEEE, 2021: 1-3.
- [8] PITTALÀ F, SCHAEGLER M, BLUEMM C, et al. 800ZR+ DWDM demonstration over 600km G.654D fiber enabled by adaptive nonlinear TripleX equalization[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE, 2020: 1-3.
- [9] MATSUSHITA A, NAKAMURA M, HAMAOKA F, et al. 41-Tbps C-band transmission with 10-bps/Hz spectral efficiency using 1-Tbps 96-GBd PS-256QAM for DCI[C]//45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). London: IET, 2019: 1-3.
- [10] KSCHISCHANG F R, PASUPATHY S. Optimal nonuniform signaling for Gaussian channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1993, 39(3): 913-929.
- [11] FORNEY G, GALLAGER R, LANG G, et al. Efficient modulation for band-limited channels[J]. IEEE Journal on

- Selected Areas in Communications, 1984, 2(5): 632-647.
- [10] 余建军, 迟楠. 高速光纤通信中数字信号处理算法和原理(第二卷): 多载波调制和人工智能新技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018: 60-61.
- YU J J, CHI N. Digital Signal Processing in High-Speed Optical Fiber Communication Principle and Application (II): Multi-Carrier Modulation and Artificial Intelligence [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018: 60-61. (in Chinese)
- [11] GOOSSENS S, GÜLTEKIN Y C, VASSILIEVA O, et al. Introducing 4D geometric shell shaping for mitigating nonlinear interference noise[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(2): 599-609.
- [12] LI S, MIRANI A, KARLSSON M, et al. Power-efficient voronoi constellations for fiber-optic communication systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(5): 1298-1308.
- [13] BEYGI L, AGRELL E, KAHN J M, et al. Coded modulation for fiber-optic networks: Toward better tradeoff between signal processing complexity and optical transparent reach[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(2): 93-103.
- [14] ARABACI M, BATHSON H G, DJORDJEVIC I B, et al. Three-dimensional nonbinary-LDPC-coded modulation schemes for high speed optical fiber transmission[C]// 2010 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society. Piscataway: IEEE, 2010: 154-155.
- [15] KOJIMA K, YOSHIDA T, KOIKE-AKINO T, et al. Non-linearity-tolerant four-dimensional 2A8PSK family for 5-7 bits/symbol spectral efficiency[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(8): 1383-1391.
- [16] CHEN B, OKONKWO C, HAFERMANN H, et al. Polarization-ring-switching for nonlinearity-tolerant geometrically shaped four-dimensional formats maximizing generalized mutual information[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3579-3591.
- [17] CHEN B, ALVARADO A, VAN DER HEIDE S, et al. Analysis and experimental demonstration of orthant-symmetric four-dimensional 7 bit/4D-sym modulation for optical fiber communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(9): 2737-2753.
- [18] YANKOV M P, DA ROS F, SILVA E P DA, et al. Constellation shaping for WDM systems using 256QAM/1024QAM with probabilistic optimization[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(22): 5146-5156.
- [19] SILLEKENS E, LIGA G, LAVERY D, et al. High-cardinality geometrical constellation shaping for the nonlinear fibre channel[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(19): 6374-6387.
- [20] CARENA A, BOSCO G, CURRI V, et al. EGN model of non-linear fiber propagation[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 16335-16362.
- [21] LIGA G, BARREIRO A, RABBANI H, et al. Extending fibre nonlinear interference power modelling to account for general dual-polarisation 4D modulation formats[J]. Entropy, 2020, 22(11): 1324.
- [22] LIGA G, CHEN B, ALVARADO A. Model-aided geometrical shaping of dual-polarization 4D formats in the nonlinear fiber channel[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE, 2022: 1-3.
- [23] WAI P K, MENYUK C R, CHEN H H. Stability of solitons in randomly varying birefringent fibers[J]. Optics Letters, 1991, 16(16): 1231-1233.
- [24] ALVARADO A, FEHENBERGER T, CHEN B, et al. Achievable information rates for fiber optics: Applications and computations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 424-439.
- [25] LI S, MIRANI A, KARLSSON M, et al. Low-complexity voronoi shaping for the Gaussian channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(2): 865-873.

作者简介



梁志伟 男, 1999年生, 安徽合肥人. 硕士研究生. 主要研究方向为光通信、信道建模等.
E-mail: hfut2021029@163.com



陈斌 男, 1989年生, 安徽合肥人. 副教授. 研究方向新型编码调制技术、光纤通信传输技术等.
E-mail: bin.chen@hfut.edu.cn