

一种用于 IMDD 光系统的低复杂度非线性均衡器

余玉揆

(华为技术有限公司,广东 深圳 518129)

摘要:色散导致的信号相位变化经平方律检测后转化为非线性损伤,限制了 C 波段强度调制直接检测(IMDD)光系统性能。传统 Volterra 非线性均衡器(VNLE)可以补偿此类非线性损伤,但实现复杂度极高,不适合低成本、短距离传输系统。Neighbor-grouped Volterra 非线性均衡器(NG-VNLE)通过简并具有相同系数的 Volterra 项从而大幅降低了实现复杂度,但简并操作也使得 Volterra 非线性项之间的差异被忽略,均衡性能有所下降。提出了一种用于 IMDD 光系统的低复杂度非线性均衡器,通过引入基于绝对值的非线性项,补偿了被忽略的 Volterra 项之间的差异;基于直调激光器(DML)的 IMDD 光系统的 107 Gb/s 四电平脉冲幅度调制(PAM4) C 波段传输,测试了新提出的非线性均衡器性能,实验结果表明其性能与传统 VNLE 相近,且实现复杂度降低了 28%。

关键词:强度调制直接检测;非线性损伤;均衡器;低复杂度

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)01-0035-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Low complexity nonlinear equalizer for IMDD optical system

YU Yukui

(Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518129, China)

Abstract: The signal phase change caused by dispersion is transformed into nonlinear damage after square law detection, which limits the performance of C-band intensity modulated direct detection (IMDD) optical system. Traditional Volterra nonlinear equalizer (VNLE) can compensate such nonlinear damage, but its implementation complexity is very high, so it is not suitable for low-cost and short-distance transmission systems. Neighbor grouped Volterra nonlinear equalizer(NG-VNLE) greatly reduces the implementation complexity by degenerating Volterra terms with the same coefficients, but the degeneracy operation also ignores the differences between Volterra nonlinear terms and reduces the equalization performance. A low complexity nonlinear equalizer for IMDD optical system is proposed. By introducing the nonlinear term based on absolute value, the difference between the neglected Volterra term is compensated. A 107 Gb/s four-level pulse amplitude modulation (PAM4) C-band transmission of IMDD optical system based on directly modulated laser (DML) was carried out to test the performance of the proposed nonlinear equalizer. The experimental results show that it can achieve the performance similar to that of traditional VNLE, and the implementation complexity is reduced by 28%.

Key words: intensity-modulation direct-detection, nonlinear distortions, equalizer, low complexity

0 引言

由于强度调制直接检测(IMDD)技术具有结构简单和低成本的特性,被广泛应用于短、中距离光传输

系统^[1-3]。近些年,虽然相干光通信技术有从长距传输场景下沉到短距离传输场景的趋势,但是 IMDD 仍然是低成本应用场景的首选方案。与外调制器马赫-曾德尔调制器(MZM)相比,直调激光器(DML)具有更小的尺寸、更高的光功率和更低的成本^[4],因而基于 DML 的 IMDD 系统受到了工业界和学术界的广泛关注。

然而,高速短距离 IMDD 光系统(每个波长传输速率>50 Gb/s)中,当传输距离大于一定长度时,DML 的频率啁啾会加剧色散引入的信号光场相位变化,该相位变化在平方律探测下会转化为系统非线性损伤^[4-5]。

收稿日期:2021-07-28。

作者简介:余玉揆(1989—),男,博士,2018年毕业于哈尔滨工程大学,2018—2021年在韩国 KAIST 攻读博士后,2021年4月加入华为技术有限公司,现任主任工程师。主要从事光纤通信技术研究工作,曾荣获“2020年电子学会优博”称号,在行业主流期刊 JLT、OE、PTL 和会议 OFC、ECOC 等共发表论文 20 余篇。



这是因为光探测器的平方律检测仅能获取强度信息而无法探测相位变化,光信号经直检接收机后丢失了相位信息,色散和 DML 的频率啁啾相互作用导致的相位变化将转化为系统非线性损伤^[4-8]。因此,高速 IMDD 光系统,尤其是 C 波段系统的最大传输距离受限于光纤色散。尽管色散可以通过色散补偿光纤进行补偿,但这将导致成本上升和灵活性下降。

Volterra 级数可广义地描述系统的非线性,因而基于 Volterra 级数的 Volterra 非线性均衡器(VNLE)被广泛应用于非线性损伤补偿。2017 年,华为在 O 波段四电平脉冲幅度调制(PAM4)系统上对比了 Volterra 和 Wiener 均衡器^[7]。但 VNLE 因其大量的非线性项,复杂度极高,并不适合直接应用于低成本需求场所。因此,如何降低 Volterra 复杂度成为了工业界和学术界的研究热点^[7-12]。2019 年,日本 NTT^[9]将裁剪型二阶 VNLE (pruned-VNLE) 应用于基于 MZM 的光系统;韩国 KAIST^[10-11]将简化版的 VNLE 应用于基于 DML 的光传输系统,其中 Neighbor-grouped VNLE (NG-VNLE) 通过简并二阶 Volterra 项而大幅减少了系统所需的 Volterra 项^[5],但简并操作也使得原本 Volterra 项之间的轻微差异被忽略。因此,在特定情况下,pruned-VNLE、NG-VNLE 与传统 VNLE 的性能均有一定的差距。另外,基于绝对值的非线性均衡(A-NLE)通过避免 Volterra 项中的乘法器而大幅降低了系统实现复杂度^[10-11],但损失了一定的性能。

本文提出一种低复杂度的新型非线性均衡器(NNLE),其通过引入基于绝对值的非线性项,补偿 NG-VNLE 中未能补偿的非线性损伤,达到与传统 VNLE 几乎相同的性能。

1 NNLE

Volterra 级数是一种广义非线性模型,提供了一种非线性均衡器设计的通用方案,其中二阶裁剪型 VNLE 表达式^[5]可写成如下形式。

$$y_n = \sum_{k=0}^{Q-1} h_k^{(1)} x_{n-k} + \underbrace{\sum_{k=0}^{W-1} \sum_{w=0}^{L_2-1-w} h_{k,w}^{(2)} x_{n-k} x_{n-k-w}}_{\text{Volterra 非线性项}} \quad (1)$$

其中, x_n 为 n 时刻接收信号, w, k 为与 n 相隔的时刻值, y_n 和 x_n 分别为 n 时刻接收和均衡后的信号, L_1, L_2 分别为一阶和二阶均衡器的抽头数, Q 为简并数 ($2 \leq Q \leq L_2$), $h_k^{(1)}, h_{k,w}^{(2)}$ 分别为一阶和二阶均衡器系数, W 为裁剪数, 式(1)右侧第一项为线性向前均衡器(FFE), 第二项为二阶 Volterra 非线性项。但当信道非线性记

忆长度较长时, VNLE 需要大量的二阶 Volterra 项, 实现时的复杂度极高, 不适合低成本短距离传输系统。

在小信号模型下, 文献[5]通过分析基于 DML 的 IMDD 光系统的二阶 Volterra 时域模型, 发现 DML 的频率啁啾与色散相互作用会使得一些二阶 Volterra 项具有相似的系数。因此, 本文通过简并这些具有相似系数的二阶项, 大幅减少系统所需的二阶 Volterra 项, 从而降低系统复杂度, 并得到了 NG-VNLE 表达式如下:

$$y_n = \sum_{k=0}^{L_1-1} h_k^{(1)} x_{n-k} + \underbrace{\sum_{k=0}^{L_2-1} h_k^{(2)} x_{n-k} \left\{ \sum_{w=0}^{Q-1} x_{n-k-w} \right\}}_{\text{NG-VNLE 非线性项}} \quad (2)$$

简并操作使得二阶 Volterra 项之间的差异被忽略, 因此在特定情况下 NG-VNLE 性能与传统 VNLE 有一定的差距。本文以 NG-VNLE 为基础, 通过引入基于绝对值的非线性项^[10-11], 补偿 NG-VNLE 中被忽略且未被补偿的非线性损伤, 得到 NNLE 的表达式如下:

$$y_n = \sum_{k=0}^{L_1-1} h_k^{(1)} x_{n-k} + \underbrace{\sum_{k=0}^{W-1} \sum_{l=0}^k g_{k,l} |x_{n-k} + x_{n-l}|}_{\text{基于绝对值的非线性项 A-NLE}} + \underbrace{\sum_{k=0}^{L_2-1} h_k^{(2)} x_{n-k} \left\{ \sum_{w=0}^{Q-1} x_{n-k-w} \right\}}_{\text{NG-VNLE 非线性项}} \quad (3)$$

其中, g 为基于绝对值的非线性项的系数, 式(3)右侧第二项为基于绝对值的非线性项, 本文简称其为 A-NLE。通过对 $x=a$ 处的绝对值进行泰勒展开, $|x| \approx |a| + (x^2-a)/2 - (x^2-a)^2/8$, 绝对值项 $|x_{n-k} + x_{n-l}|$ 一定程度上包含二阶 Volterra 项 $x_{n-k} \cdot x_{n-l}$, 因此其能补偿一定的非线性损伤。由于绝对值项引入的一阶线性项 (如 $|a|$) 能被式(3)右侧第一项 (即线性 FFE 模块) 消除, 因此绝对值项的系数理论上是由系统所需的非线性补偿量决定的, 反映了其包含的二阶 Volterra 项大小。因为绝对值运算的实现复杂度远低于乘法器, 而基于绝对值非线性项避免了二阶 Volterra 项中的乘法器^[12], 因此 NNLE 实现复杂度并未大幅增加, 依然保持着对传统 VNLE 的低复杂度优势。

2 实验装置

本文基于 DML 的 IMDD 光系统 C 波段的 107 Gb/s PAM4 传输实验验证 NNLE 性能, 实验系统如图 1 所示。PAM4 信号通过具有 6 bit 分辨率的 3 bit 数/模转换器(DAC)转换为模拟信号, 经放大后驱动 DML, 其中 DAC 工作在 1 sample/symbol 模式。DML 的波长为 1549 nm, 光输出功率为 8.1 dBm。图 2 为 DML 的频响图, 其 3 dB 带宽为 25.9 GHz。经标准单模光纤(SSMF)

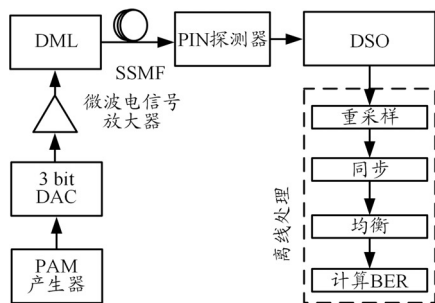


图1 实验装置和步骤

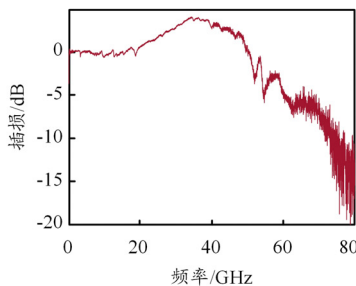


图2 DML 频响图

传输后,PAM4 信号被 PIN 型光电探测器(带宽为 33 GHz)转换为电信号,并被 80 GSample/s 的数字存储示波器(DSO)采集,然后进行离线数据处理(包括重采样、同步和均衡),最后通过直接计算误码个数得到误码率(BER)。本文采用最小均方(LMS)算法自适应均衡器系数,在无说明的情况下,均衡器参数 L_1 、 L_2 和 W 值已优化并分别设置为 67、25 和 9。

3 实验结果与分析

图3为10 km处VNLE通过LMS算法自适应得到的二阶系数图,其中位于索引 w 处的彩带为2个时域相隔 w 的2个信号组成的二阶 Volterra 项的系数(即 $x_k x_{k-w}$ 项系数),如平方 Volterra 项(即 $x_k x_k$)的系数位于 $w=0$ 处。可以看出, $w=0,1,2,3,4$ 的 Volterra 项具

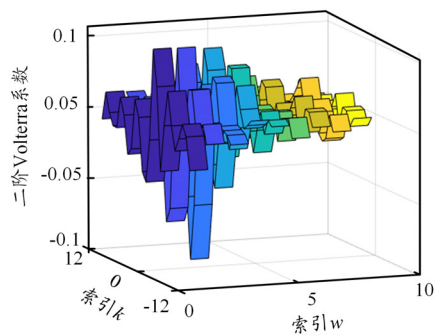
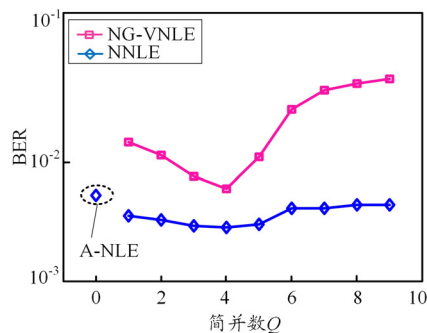
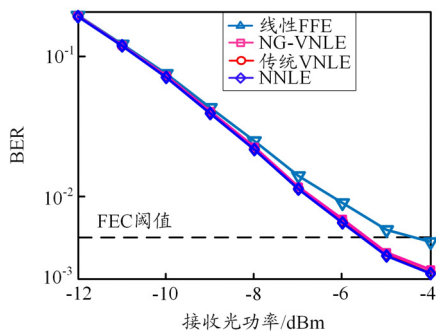
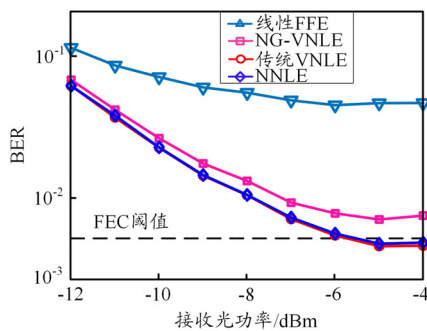


图3 Volterra二阶系数与索引关系图

图4 BER与简并数 Q 关系图

(a) 0 km



(b) 10 km

图5 传输一定距离后 BER 与接收光功率的关系

有相似的系数,因此这些项可以被简并从而减少系统所需的二阶 Volterra 项,降低了系统复杂度。图4为简并数 Q 与 BER 的关系图。可以看出,NG-VNLE 的性能与 Q 值相关,最优值为 4。另一方面,本文提出的 NNLE 性能大幅优于 NG-VNLE,且与 Q 值的相关性有一定程度的下降。这是因为 NG-VNLE 中的简并操作使得二阶

Volterra 项之间的轻微差异被忽略^[5]。此外,NNLE 的性能远好于仅利用基于绝对值的非线性项的均衡器 A-NLE^[12]。

图5为107 Gb/s PAM4 信号传输 0 km 和 10 km 后各均衡器的性能对比图。可以看出,线性 FFE 在 0 km 处 BER 在纠错码(FEC)阈值(3.8×10^{-3})之上,但当 PAM4 信号传输 10 km 后,线性 FFE 的性能急剧下降,如在接收功率为 -4 dBm 时的 BER 仅为 5.5×10^{-2} 。这是因为经过光纤传输后,色散和 DML 的频率啁啾相互作用,导致了严重的非线性损伤,而线性 FFE 无法均衡非线性损伤。Volterra 级数可以很好地描述这些非线性损伤,因此 VNLE 能够补偿这些非线性损伤。从图 5(b) 可以看出,相对线性 FFE,当接收功率 > -5.5 dBm 时,传统 VNLE 能够将 BER 降到 FEC 阈值之下,例如

在 -4 dBm 处将 BER 从 5.5×10^{-2} 降低到了 3.2×10^{-3} 。NG-VNLE 相对于线性 FFE 也有较大的性能提升,但简并操作忽略了二阶 Volterra 项之间差异,导致了一些非线性损伤未能被补偿,性能相对传统 VNLE 有所下降。本文提出的 NNLE 显示出与传统 VNLE 几乎相同的性能,这是因为新引入的基于绝对值的非线性项能够补偿那些未被 NG-VNLE 补偿的非线性损伤,从而大幅提高均衡性能。

BER 与二阶非线性抽头数 L_2 之间的关系如图 6(a)所示。可以看出,NNLE 在 $L_2 < 17$ 时误码性能优于传统 VNLE,这是因为 NG-VNLE 相比传统 VNLE,在 L_2 值小时,可覆盖并补偿更强的非线性记忆效应^[5]。当 $L_2 > 17$ 时,NNLE 误码能稍微低于传统 VNLE,但性能差距极小(如在 $L_2 = 40$

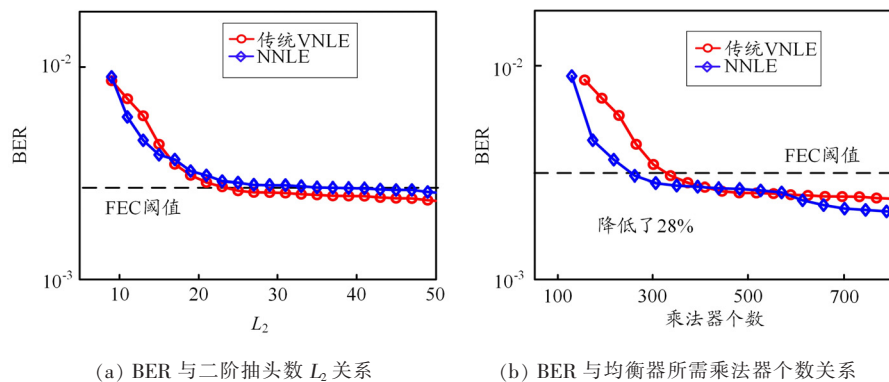


图6 BER与二阶抽头数、乘法器数间的关系

时,传统 VNLE 的 BER 为 2.8×10^{-3} ,而 NNLE 的 BER 为 3.0×10^{-3} 。BER 性能损失可能是由于绝对值项中引入了一些高阶项如三阶、四阶项,而这些高阶项可能对系统性能造成一定的损伤。算法实现的复杂度可由其所需的实数乘法器个数表征^[12],为对比复杂度,不同均衡器 BER 与其所需乘法器数的关系如图 6 (b)所示。可以看出,在相同的乘法器数情况下,本文提出的 NNLE 性能优于传统 VNLE,尤其是当乘法器个数少于 300 时,例如当乘法器个数为 262 时,NNLE 能够将 VNLE 的 BER 从 4.8×10^{-3} 提升到 3.5×10^{-3} 。另一方面,在 FEC 阈值处,相对于传统 VNLE,NNLE 所需的乘法器个数降低了 28%。

最后,本文验证了 NNLE 在不同比特率下的误码性能,如图 7 所示。可以看出,随着比特率的增加,系统 BER 增大。新非线性均衡器在所有测试的比特率下具有和传统 VNLE 相似的性能,都优于 NG-VNLE,且成功地将 107 Gb/s PAM4 信号传输了 10 km。

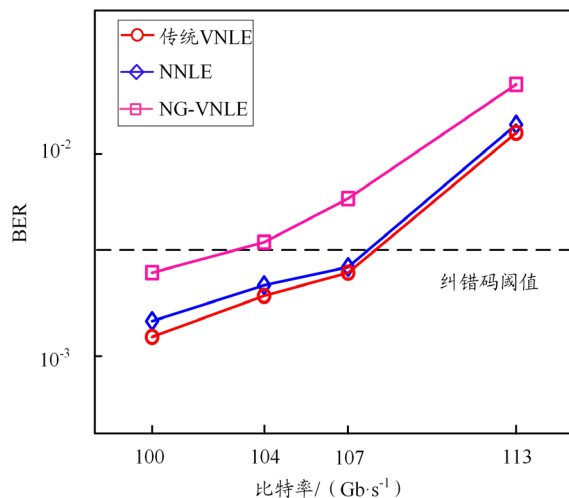


图7 BER与比特率关系图

4 结束语

针对短距离 IMDD 光系统中色散引起的非线性损伤,本文提出了一种低成本、低复杂度的 NNLE。在 NG-VNLE 的基础上,引入了基于绝对值的非线性项。新引入的基于绝对值的非线性项补偿了 NG-VNLE 未能补偿的非线性损伤,成功地将 107 Gb/s PAM4 信号在基于 DML 的 IMDD 光系统上传输了 10 km。实验结果表明:本文提出的 NNLE 能够达到与传统 VNLE 相似的性能,且实现复杂度降低了 28%。

参考文献:

- [1] 谈仲伟, 吕超. 光纤通信技术发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 100-107.
- [2] CARTLEDGE J, KARAR A. 100 Gb/s intensity modulation and direct detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(16): 2809-2814.
- [3] ZHU N, SHI Z, ZHANG Z, et al. Directly modulated semiconductor laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 657-664.
- [4] BERGMANN E, KUO C, HUANG S. Dispersion-induced composite second-order distortion at 1.5 μm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(1): 59-61.
- [5] YU Y, CHOI M R, BO T, et al. Low-complexity 2nd order Volterra equalizer for DML-based IM/DD transmission system [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(7): 1735-1746.
- [6] 胡庆, 李万里. 10Gb/s 光通信系统中 EDC 均衡器的性能研究[J]. 光通信技术, 2000, 34(4): 42-48.
- [7] STOJANOVIC N, KARINOU F, ZHANGQ, et al. Volterra and Wiener equalizers for short-reach 100G PAM4 applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(21): 4583-4594.
- [8] ANDRE N, HABEL K, LOUCHET H, et al. Adaptive nonlinear Volterra equalizer for mitigation of chirp-induced distortions in cost effective IMDD OFDM systems [J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26527-26532.
- [9] DIAMANTOPOULOS N P, NISHI H, KOBAYASHI W, et al. On the complexity reduction of the second-order Volterra nonlinear equalizer for IM/DD systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1214-1224.
- [10] YU Y, CHOI M R, BO T, et al. Nonlinear equalizer based on absolute operation for IM/DD system using DML [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(7): 426-429.
- [11] YU Y, CHOI M R, BO T, et al. Low-complexity nonlinear equalizer based on absolute operation for C-band IM/DD systems [J]. Optics Express, 2020, 28(13): 19617-19628.
- [12] RAZ G, VEEN B. Baseband Volterra filter for implementing carrier-based nonlinearities[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1998, 46(1): 103-114.