

## 短距光纤通信系统中基于神经网络的非线性均衡器

赵晗祺 李娜 吴斌 吴桂龙 陈一童 冯晓芳 何沛礼 李蔚

### Nonlinear equalizer based on neural network in high-speed optical fiber communication systems

ZHAO Han-qi, LI Na, WU Bin, WU Gui-long, CHEN Yi-tong, FENG Xiao-fang, HE Pei-li, LI Wei

引用本文:

赵晗祺, 李娜, 吴斌, 吴桂龙, 陈一童, 冯晓芳, 何沛礼, 李蔚. 短距光纤通信系统中基于神经网络的非线性均衡器[J]. *中国光学*, 2025, 18(1): 1-7. doi: 10.37188/CO.2024-0114

ZHAO Han-qi, LI Na, WU Bin, WU Gui-long, CHEN Yi-tong, FENG Xiao-fang, HE Pei-li, LI Wei. Nonlinear equalizer based on neural network in high-speed optical fiber communication systems[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 1-7. doi: 10.37188/CO.2024-0114

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0114>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 融合遗传算法和BP神经网络的光斑定位方法

Positioning algorithm for laser spot center based on BP neural network and genetic algorithm

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 407 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0084>

#### 基于异构光子神经网络的多模态特征融合

Multimodal feature fusion based on heterogeneous optical neural networks

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1343 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0036>

#### 运动探测及可见光通信一体化氮化物光电子芯片

Integrated Nitride optoelectronic chip for motion detection and visible light communication

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1257 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0028>

#### 基于深度学习的Fano共振超材料设计

Fano resonances design of metamaterials based on deep learning

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 816 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0208>

#### 单波长激光通信终端的隔离度

Isolation of single wavelength laser communication terminals

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1137 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0253>

#### 非线性系统中双频光栅相位测量

Phase measurement with dual-frequency grating in a nonlinear system

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 726 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0013>

文章编号 2097-1842(2025)01-0001-07

## 短距光纤通信系统中基于神经网络的 非线性均衡器

赵晗祺<sup>1</sup>, 李娜<sup>2</sup>, 吴斌<sup>1</sup>, 吴桂龙<sup>1</sup>, 陈一童<sup>1</sup>, 冯晓芳<sup>1</sup>, 何沛礼<sup>2</sup>, 李蔚<sup>2\*</sup>

(1. 中国南方电网电力调度控制中心通信处, 广东广州 510663;

2. 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 为了实现对短距光纤数据通信系统接收端非线性损伤的低复杂度均衡, 提出了一种基于全连接神经网络的接收端均衡算法。这是一种引入判决反馈结构的判决反馈神经网络。非线性畸变是由线性工作区与实验系统不匹配的光电探测器引入的, 在此基础上实现了基于 C 波段直接调制激光器的 56 Gbit/s PAM4 信号的 20 km 传输验证实验, 并对判决反馈神经网络和其他均衡方案的均衡性能进行了对比实验。实验结果表明, 相比全连接神经网络, 改进方案在传输距离为 20 km 时灵敏度提升 2 dB。改进方案可以很好地均衡光电器件的非线性, 且计算复杂度更低, 具有很好的应用意义。

**关键词:** 短距光通信; 光电器件非线性畸变; 信号均衡; 神经网络; 判决反馈

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0114 CSTR: 32171.14.CO.2024-0114

## Nonlinear equalizer based on neural network in high-speed optical fiber communication systems

ZHAO Han-qi<sup>1</sup>, LI Na<sup>2</sup>, WU Bin<sup>1</sup>, WU Gui-long<sup>1</sup>, CHEN Yi-tong<sup>1</sup>, FENG Xiao-fang<sup>1</sup>, HE Pei-li<sup>2</sup>, LI Wei<sup>2\*</sup>

(1. CSG Power Dispatching and Control Center, China Southern Power

Grid Company, Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of

Science and Technology, Wuhan 430074, China)

\* Corresponding author, E-mail: weilee@hust.edu.cn

**Abstract:** In order to achieve low complexity balancing of nonlinear damage at the receiver of short-range fiber optic data communication systems, we propose an equalization structure named Decision Feedback Neural Network which introduce the Decision Feedback Structure into the Fully Connected Neural Network. The nonlinear distortion is introduced by using a photodetector with a linear working area that does not match the experimental system. The experimental system is built based on a 56 Gbit/s PAM4 with a C-band

收稿日期: 2024-06-21; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 南方电网科技项目面向新型电力系统的骨干通信承载网关键技术研究及示范应用资助 (No. CG0000022001594227)

Supported by Southern Power Grid Technology Project Funding for Key Technology Research and Demonstration Application of Backbone Communication Carrier Network for New Power Systems (No. CG0000022001594227)

direct-modulated laser, and we compare the equalization performance of decision feedback neural network with other equalization schemes. Experimental results show that compared with the fully connected neural network, the improved scheme achieves a sensitivity improvement of 2 dB at 20 km transmission, and the equalization performance is close to the convolutional neural network with lower complexity. This paper has great significance for the rate and capacity upgrade of short-distance optical fiber communication system, and can be used as a reference for further scientific research and industrial application.

**Key words:** short-reach optical communication; nonlinear distortion of optoelectronic devices; signal equalization; neural network; decision feedback

## 1 引言

近年来,随着 5G 和其他相关业务的蓬勃发展,数据流量急剧增加,导致市场对高速、大容量传输的需求不断增大<sup>[1-5]</sup>。光通信以其高速大容量引起人们的注意其包括无线通信(空间光通信)和有线通信(光纤通信)<sup>[6-7]</sup>。考虑到实现成本、功耗和物理占用空间等因素,光纤通信中直调直检(IM/DD)系统被认为是最有前途的解决方案之一<sup>[8-10]</sup>。为了控制成本,需要用低带宽器件完成高速率信号传输,因此不可避免地会遇到系统传输带宽受限的问题。另外,激光器的非线性调制、系统中相关器件引入的线性和非线性损伤都会使信号产生进一步失真<sup>[11]</sup>。这些损伤的叠加导致信号出现较为严重的失真。神经网络具有很强的非线性拟合能力,可用于对一些传输场景中的非线性损耗进行补偿获得较好的效果。传统的均衡算法有前馈均衡算法(FFE)<sup>[12-13]</sup>、判决反馈均衡算法(DFE)<sup>[14]</sup>、Volterra 非线性均衡算法(VNLE)<sup>[15-18]</sup>等。不同类型的神经网络已经被广泛用于各种短距光纤通信场景,并且被证明能够有效处理信号失真问题。

在补偿光通信领域的传输损耗方面,全连接神经网络(FCNN)是最简单、应用最广泛的一种,在许多研究中,基于 FCNN 的均衡器比一些传统均衡算法表现更好。Estaran J 等人在 IM/DD 传输系统中引入 FCNN 对信号进行均衡,并在基于 C 波段 84 Gbaud PAM4 的 1.5 km 传输实验中证明了 FCNN 的均衡性能较 FFE 提升了 10 倍<sup>[19]</sup>。同时,也有许多工作尝试使用更加先进的神经网络模型来提高神经网络均衡器的性能,比如卷积神经网络(CNN)和递归神经网络(RNN)。Li P X 等人提出基于 CNN 的均衡技术,并通过实验

验证了利用该方案的性能,基于 10 G 级直接调制激光器(DML)的 56 Gbit/s PAM4 在 25 km 传输距离下的功率预算可以到达 29 dB<sup>[20]</sup>。Ye CH H 等人使用 RNN 对信号进行非线性均衡,在 7% HD-FEC 开销下实现了基于 25 GHz DML 的 50 Gbit/s NRZ PON,功率预算为 29 dB<sup>[21]</sup>。Xu ZH P 等人提出了一种针对短距离光链路的级联 RNN 均衡器,并在 C 波段实现了基于 16 GHz DML 的 100 Gbit/s PAM4 信号 15 km 传输<sup>[22]</sup>。与 FCNN 相比,CNN 和 RNN 具有更好的性能,但它们结构更加复杂,实现难度更高。为了确保结构简单的前提下,获得更为优良的均衡性能,可以从引入更多数据特征入手。

基于以上分析,本文提出了一种判决反馈神经网络(DFNN)均衡器。该均衡器在 FCNN 中引入判决反馈结构来增强数据特征,以提升均衡器性能。在基于 C 波段 DML 的 56 Gbit/s PAM4 信号传输实验中,在传输距离为 20 km 时,相比 FCNN,DFNN 的接收灵敏度提升了 2 dB。

## 2 神经网络均衡器原理

### 2.1 全连接神经网络均衡器原理

神经网络由输入层、隐藏层和输出层组成。为了处理非线性问题,可以引入非线性函数来管理每个隐藏层节点,也即上一隐藏层中每个节点的值在传递到下一个隐藏层之前,通过非线性函数进行转换。这个非线性函数就是激活函数。隐藏层和非线性激活函数增强了神经网络表达非线性的能力,这也使得神经网络在进行信号均衡时表现出比传统均衡算法更好的性能。

如图 1(a)所示是一个 FCNN 均衡器示意图。该均衡器由 1 个输入层、2 个隐藏层以及 1 个输出层构成。输入层接收待处理的数据,送入隐藏

层中, 隐藏层对输入数据进行特征提取, 最后在输出层中对比分析网络设定的标签值  $Y$  和输出结果  $X$ 。

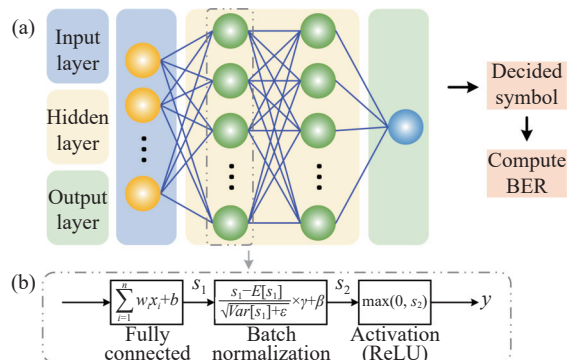


图 1 全连接神经网络均衡器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a fully connected neural network equalizer

通过设定的损失函数  $loss = \sum (Y - X)^2$  计算损失值, 然后根据损失值调整网络中的权重参数, 直至将损失值降到最小。在全连接神经网络中, 上一层节点的输出值将会作为下一层节点的输入值。在隐藏层中, 每个节点先对上一层的输出进行加权求和, 然后用非线性函数对该结果进行处理。使用非线性函数的目的是解决线性模型表达能力不足的问题。每个节点的输出可以表示为:

$$y = f\left(\sum_{i=1}^N w_i x_i + b\right), \quad (1)$$

其中,  $x_i$  表示上层第  $i$  个节点的输出,  $w_i$  表示该值对应的权重系数,  $b$  表示偏置,  $f(\cdot)$  表示非线性函数, 通常称作激活函数。隐藏层常用的激活函数包括 ReLU、Sigmoid、tanh 等。

隐藏层的结构如图 1(b) 所示, 全连接层对上一层的输入进行加权求和后进行批归一化操作, 然后使用激活函数处理。批归一化操作是为了使输入数据的各个特征分布相近, 从而大大提高模型的训练速度及网络的泛化能力。该模型中使用的激活函数为 ReLU 函数, 用  $x$  代表自变量, 其表达式如下:

$$ReLU(x) = \max(0, x) \quad (2)$$

## 2.2 判决反馈神经网络均衡器原理

因为 DFE 在 FFE 的基础上多了判决反馈结构, 因此相比于 FFE, DFE 多了处理非线性损伤的能力, 从而使均衡性能得到了提升。受此启

发, 本论文在 FCNN 中引入判决反馈结构, 提出了判决反馈神经网络 (DFNN), 其结构示意图如图 2 (彩图见期刊电子版) 所示。从结构上看, DFNN 与 FCNN 的网络结构相同, 二者的区别在于 DFNN 的输入向量是由接收信号的采样序列和判决反馈序列两部分组成的, 其中, 判决反馈序列由前  $k$  个时刻均衡后的码元经过判决得到, 而 FCNN 的输入向量仅由采样序列组成。

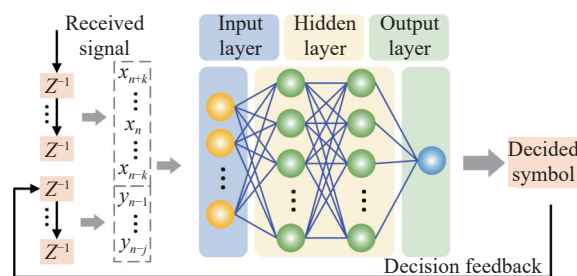


图 2 判决反馈神经网络均衡器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of decision feedback neural network equalizer

DFNN 基本的神经网络结构仍是全连接网络, 包含 1 个输入层、2 个隐藏层和 1 个输出层。该结构采用回归模型, 输出层输出的是当前码元的估计值。 $Z^{-1}$  代表信号的延时, 代指不同时刻的信号。对于 FCNN 结构, 输入向量为接收信号的采样序列, 即:

$$\mathbf{X}_n = (x_{n-k}, \dots, x_n, \dots, x_{n+k}), \quad (3)$$

式中  $\mathbf{X}_n$  是长度为  $2k+1$  的向量, 对应的均衡目标码元是  $x_n$ , 其中  $x_i$  是第  $i$  时刻的采样值。与其不同的是, DFNN 的输入向量还包含判决反馈部分, 即:

$$\mathbf{X}'_n = (x_{n-k}, \dots, x_n, \dots, x_{n+k}, y_{n-1}, \dots, y_{n-j}), \quad (4)$$

其中式 (4) 比式 (3) 增加的部分  $y_{n-1}, \dots, y_{n-j}$  表示当前符号前  $j$  个时刻的信号经过均衡后判决得到的结果。

由于 DFNN 的输入向量包含之前时刻均衡得到的结果, 其训练和测试阶段与 FCNN 也有区别。训练时, 因为无法提前获知之前时刻的判决结果, 即  $y_{n-1}, \dots, y_{n-j}$ , 故使用对应的原始发射符号进行替换。这些原始符号可以用  $\hat{y}_{n-1}, \dots, \hat{y}_{n-j}$  表示。本节实验采用 PAM4 信号, 故  $\hat{y}_i$  属于集合  $\{-3, -1, 1, 3\}$ 。故而 DFNN 训练阶段的输入向量可以表示为:

$$\mathbf{X}'_n = (x_{n-k}, \dots, x_n, \dots, x_{n+k}, \hat{y}_{n-1}, \dots, \hat{y}_{n-j}) \quad (5)$$

到测试阶段时,DFNN 接收到的前  $j$  个时刻的判决结果组成下一时刻的均衡输入向量,如式 (4) 所示。

### 3 实验装置及结果分析

本研究基于 56 Gbit/s PAM4 的 IM/DD 光纤通信系统展开,实验装置如图 3 所示。PAM4 信号经过上采样与脉冲成型后,重采样后送入任意波形发生器(AWG)转化为电信号,脉冲成型使用的是滚降因子为 0.5 的根升余弦(RRC)滤波器。实验中采用的 AWG 型号为 Keysight M8196A,采样率是 92 GSa/s。AWG 输出的电信号经过一个增益为 16 dB 的电放大器(EA)放大后驱动 DML,该 DML 的 3 dB 带宽为 15 GHz。DML 输出的光信号经过 10/20/30 km 标准单模光纤(SSMF)传输后,通过可调光衰减器(VOA)调节光功率后被光电探测器(PD)接收转化为电信号。该 PD 的带宽为 40 GHz,探测灵敏度为 0.6 A/W。最后信号通过示波器采样。该示波器型号为 LabMaster 10 Zi-A,带宽为 36 GHz,采样率为 80 GSa/s。

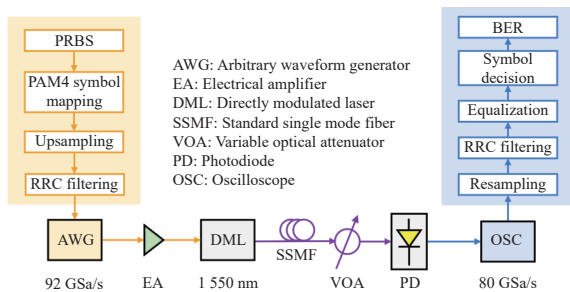


图 3 56 Gbit/s PAM4 IM/DD 系统实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup of 56 Gbit/s PAM4 IM/DD system

为了验证本文提出的判决反馈神经网络均衡器的性能,采用 VNLE、CNN 和 FCNN 分别对信号进行均衡处理,并将四者的均衡性能进行对比分析。对于各算法参数,分别进行仿真并取最优值。VNLE 基于二阶 Volterra 级数,一阶、二阶抽头数分别为 41 和 9。CNN 均衡器由 1 个输入层、2 个卷积层、2 个全连接层和 1 个输出层组成。输入层的输入向量是长度为 41 的一维向量,2 个卷积层的卷积核数目分别为 16 和 32,卷积核均是一维的,大小都为 (9, 1),2 个全连接层分别包含 32 个和 16 个神经元,输出层输出的是单个

数字,代表均衡后得到的码元。此结构中卷积层和全连接层采用的激活函数均为 ReLU。训练神经网络采用的是 Adam 优化器,训练的批大小为 128,训练次数为 100 次,学习率为 0.01,训练 50 次后降低为 0.005。FCNN 的训练次数,学习率与 CNN 保持一致。FCNN 均衡器和 DFNN 均衡器均包含 1 个输入层、2 个全连接层和 1 个输出层,各层的节点数依次为 41/128/128/1。激活函数均为 ReLU 函数,训练优化器为 Adam。3 种神经网络模型的训练集长度都为 77772,测试集长度都为 33332。

背靠背传输下各算法的均衡性能曲线如图 4 (彩图见期刊电子版)所示,可以看出 VNLE、CNN、FCNN 和 DFNN 4 种算法均衡性能十分接近。这是由于背靠背传输下,信号受到来自于器件带宽限制和器件中的噪声的影响。此时接收光功率较小,也没有引入 PD 探测导致的非线性,因此传统均衡算法 VNLE 能从噪声中较好地恢复信号。CNN、FCNN 和 DFNN 降到 7% KP4-FEC 误码率阈值(BER= $2.4 \times 10^{-4}$ )时的接收光功率分别为 -6 dBm, -6 dBm, -6.3 dBm,对于 DFNN,这一值为 -6.3 dBm。可见, CNN 具有更强大的数据特征提取能力,但与其与 FCNN 的均衡误码率曲线基本重合,因此有理由认为,神经网络已经充分提取作为输入序列的连续采样子序列中包含的特征,而且引入判决反馈结构后,接收灵敏度提升了 0.3 dB。

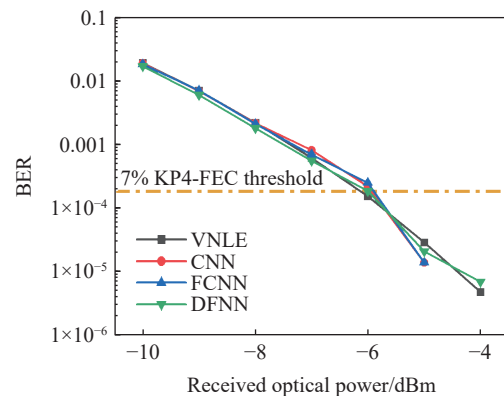


图 4 背靠背传输下均衡器性能对比

Fig. 4 Performance comparison of the equalizer under back-to-back transmission

神经网络对于具有较大非线性损伤的失真信号的均衡恢复更有优势。为了更好地探究神经网络算法在非线性场景下的表现,本节搭建了由 PD 引入非线性的实验系统。由于该 PD 原本用于接

收 OOK 信号, 因此用来接收 PAM4 信号时可能会由于峰值功率超出 PD 工作的线性区导致接收信号发生非线性失真, 从而导致在高功率接收信号时误码率上升。

将信号分别进行 10 km、20 km、30 km 光纤传输后采用 4 种均衡算法进行处理, 得到的误码率曲线如图 5(彩图见期刊电子版)所示。由图 5 可知, 在 3 种传输距离下, 接收光功率分别超过  $-3$  dBm、 $-5$  dBm 和  $-6$  dBm 时信号误码率开始上升, 误码率上升是因为 PAM4 信号的峰值功率超过了 PD 的线性工作区, 探测信号时引入了非线性。另外, 可以看到, 在引入 PD 的非线性后, 各个场景下的神经网络均衡性能均优于传统均衡算法, 这说明在非线性的场景下, 神经网络均衡具有优势。3 种传输距离下, VNLE 算法的性能都远远落后于其他 3 种算法, 这是因为经过光纤传输后,

信号经过了色散、频率选择性衰减以及高接收光功率下 PD 引入了非线性失真等损伤。10 km 传输时, 误码率劣化拐点之前, VNLE 与 2 种神经网络的性能十分接近, 而 20 km 和 30 km 传输时, VNLE 的性能始终比 3 种神经网络的性能差, 且随着传输距离增大性能差异增大。这是由于当传输距离较短以及系统中的非线性较小时, 信道特征相对比较简单, VNLE 已经可以满足这种情况下的信号均衡需求。同样的道理, 背靠背和 10 km 传输时, FCNN 和 CNN 的性能十分接近, 这是因为此时没有经过光纤传输, 几乎没有非线性损伤, FCNN 已经能够充分估计信道特征, 能够满足均衡需求。但是在 20 km 和 30 km 传输时, 系统非线性增加, 此时数据特征提取能力更强的 CNN 的优势就开始显现。然而 CNN 的结构复杂、计算量大, 因此从实用性角度来看存在劣势。

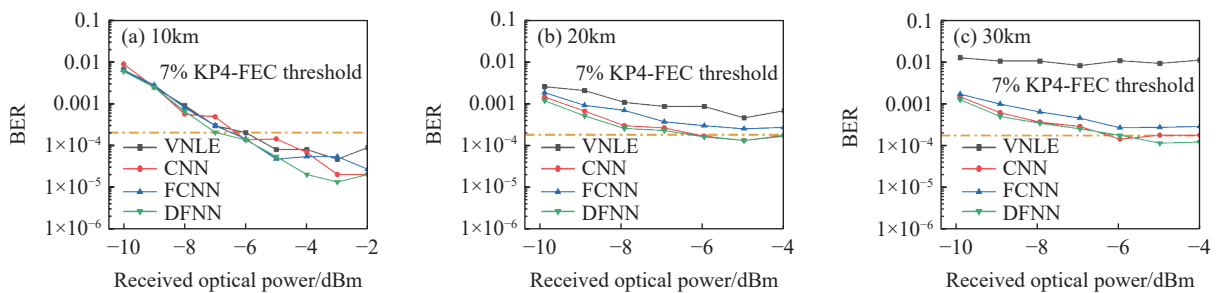


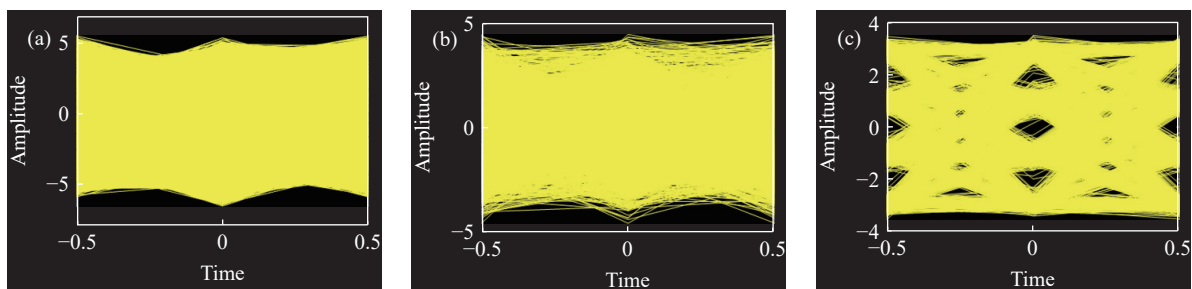
图 5 各均衡器性能对比

Fig. 5 Performance comparison of various equalizers at different transmission distances

传输距离为 30 km、接收光功率为  $-5$  dBm 时使用各算法均衡得到的眼图如图 6(彩图见期刊电子版)所示。由图 6 可知, 无算法均衡和采用 VNLE 时结果最差, 眼图完全闭合, 三种神经网络均衡算法中, DFNN 的眼图最好, 其次是 CNN, 最后是 FCNN, 这与图 5(b)所示内容一致。

对比 FCNN 与本文提出的 DFNN 的性能发现, 在 3 种传输距离下, DFNN 的均衡性能均优于 FCNN, 以优化效果体现最明显的 20 km 的结果为例, 当误码率 FEC 门限设置为 7% 时, DFNN

和 FCNN 的接收灵敏度分别为  $-7$  dBm 和  $-5$  dBm, 相比 FCNN, DFNN 实现了 2 dB 的灵敏度提升。这说明引入判决反馈能够使神经网络提取更多信道特征, 从而更好地消除非线性损伤, 从而使均衡达到更好的效果。总体来看, DFNN 的均衡性能与 CNN 的均衡性能接近, 甚至优于 CNN。由此可以得出, 在全连接神经网络的基础上引入判决反馈结构, 可以通过简单的结构实现较为理想的均衡效果。



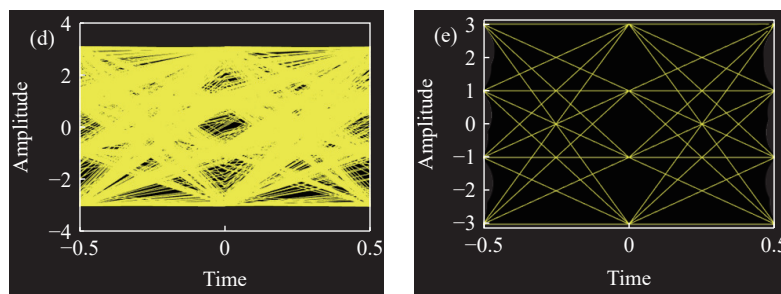


图 6 眼图。(a)无均衡;(b)VNLE;(c)CNN;(d)FCNN;(e)DFNN

Fig. 6 Eye diagram. (a) Without Equalization; (b) VNLE; (c) CNN; (d) FCNN; (e) DFNN

## 4 结 论

卷积神经网络比结构更简单的全连接神经网络具有更加优越的均衡性能,但其结构复杂、计算量大,实际应用难度大。针对这一问题本文搭建了基于 DML 的 56 Gbit/s PAM4 传输系统,并利用 PD 引入了非线性损伤。实验结果表明: 10 km 传输时,两种神经网络的均衡性能接近; 20 km 和 30 km 传输时,卷积神经网络性能优于全连接神经网络。分析认为: 传输距离较短时, IM/DD 系

统的信道特征简单,全连接神经网络可以充分表达其非线性特征,满足均衡需求;而传输距离增加时,非线性增加,此时具有更强大的数据特征提取能力的卷积神经网络更具有优势。由此考虑引入更多能够表明信道特征的数据以提升均衡能力,结合传统均衡算法 DFE,本文提出将全连接神经网络与判决反馈相结合。实验结果表明判决反馈神经网络可以达到与卷积神经网络一样的性能,并且与全连接神经网络相比, 20 km 传输时其灵敏度提升 2 dB。

### 参考文献:

- [1] CHAGNON M. Optical communications for short reach[C]. *Proceedings of 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, IEEE, 2018: 1-3.
- [2] LI D, DENG L, YE Y, *et al.*. 4×96 Gbit/s PAM8 for short-reach applications employing low-cost DML without pre-equalization[C]. *Proceedings of 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, IEEE, 2019: 1-3.
- [3] ZHANG F, FANG X S, CHEN X Y. Neural network-based fiber nonlinearity mitigation in high-speed coherent optical transmission systems[C]. *Proceedings of 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, IEEE, 2022: 1-3.
- [4] ALMUFTI A M, MOROZOV O G. 1Tbit/s per lambda high order quadrature amplitude modulation (128-256QAM) coherent optical transmission system design to support (5G+)[C]. *Proceedings of 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, IEEE, 2023: 1-4.
- [5] HARSTEAD E, VAN VEEN D, HOUTSMA V, *et al.*. Technology roadmap for time-division multiplexed passive optical networks (TDM PONs)[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 657-664.
- [6] 王振宇, 付秀华, 林兆文, 等. 星间通信系统高精度分光镜的研制[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(2): 334-341.
- [7] WANG ZH Y, FU X H, LIN ZH W, *et al.*. Development of high-precision beam splitter for inter-satellite communication system[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 334-341. (in Chinese).
- [8] 杨秀清, 陈海燕. 光通信技术在物联网中的应用[J]. *中国光学(中英文)*, 2014, 7(6): 889-896.
- [9] YANG X Q, CHEN H Y. Application of optical communication technique in the Internet of Things[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 889-896. (in Chinese).
- [10] ZHOU X, URATA R, LIU H. Beyond 1 Tb/s intra-data center interconnect technology: IM-DD OR coherent?[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 475-484.
- [11] MANILOFF E, GAREAU S, MOYER M. 400 G and beyond: coherent evolution to high-capacity inter data center links[C]. *Proceedings of 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, IEEE, 2019: 1-3.

- [10] PANG X D, UDALCOVS A, SCHATZ R, *et al.*. High-speed short reach optical communications: technological options and challenges[C]. *Proceedings of 2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC)*, IEEE, 2020: 1-3.
- [11] 张帆, 朱逸萧. 面向数据中心光互连的高速光传输技术[J]. *中兴通讯技术*, 2019, 25(5): 17-24.  
ZHANG F, ZHU Y X. High-speed transmission technologies for data center optical interconnection[J]. *ZTE Technology Journal*, 2019, 25(5): 17-24. (in Chinese).
- [12] ZHONG K P, ZHOU X, GAO Y L, *et al.*. 140-Gb/s 20-km transmission of PAM-4 signal at 1.3  $\mu\text{m}$  for short reach communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1757-1760.
- [13] YANG CH, HU R, LUO M, *et al.*. IM/DD-based 112-Gb/s/lambda PAM-4 transmission using 18-Gbps DML[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 7903907.
- [14] MATSUMOTO K, YOSHIDA Y, MARUTA A, *et al.*. On the impact of Tomlinson-Harashima precoding in optical PAM transmissions for intra-DCN communication[C]. *Proceedings of 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, IEEE, 2017: 1-3.
- [15] GAO F, ZHOU SH W, LI X, *et al.*.  $2 \times 64$  Gb/s PAM-4 transmission over 70 km SSMF using O-band 18G-class directly modulated lasers (DMLs)[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7230-7237.
- [16] YU Y K, BO T W, CHE Y, *et al.*. Low-complexity nonlinear equalizer based on absolute operation for C-band PAM signal generated by using directly modulated laser[C]. *Proceedings of 2020 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, IEEE, 2020: 1-3.
- [17] ZHANG J W, LIN ZH R, WU X, *et al.*. Low-complexity sparse absolute-term based nonlinear equalizer for C-band IM/DD systems[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21891-21901.
- [18] CHEN Y B, WANG Y, LI W, *et al.*. 106 Gbit/s PAM4 transmission employing a 15 GHz directly modulated laser[C]. *Proceedings of 2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, IEEE, 2021: 1-3.
- [19] ESTARAN J, RIOS-MUELLER R, MESTRE M A, *et al.*. Artificial neural networks for linear and non-linear impairment mitigation in high-baudrate IM/DD systems[C]. *Proceedings of the ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication*, IEEE, 2016: 1-3.
- [20] LI P X, YI L L, XUE L, *et al.*. 56 Gbps IM/DD PON based on 10G-class optical devices with 29 dB loss budget enabled by machine learning[C]. *Proceedings of 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, IEEE, 2018: 1-3.
- [21] YE CH H, ZHANG D X, HU X F, *et al.*. Recurrent Neural Network (RNN) based end-to-end nonlinear management for symmetrical 50Gbps NRZ PON with 29dB+ loss budget[C]. *Proceedings of 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, IEEE, 2018: 1-3.
- [22] XU ZH P, SUN CH B W, JI T H, *et al.*. Cascade recurrent neural network enabled 100-Gb/s PAM4 short-reach optical link based on DML[C]. *Proceedings of 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, IEEE, 2020: 1-3.

#### 作者简介:



赵晗祺(1973—),女,广东广州人,中国南方电网电力调度控制中心通信处高级主管,从事电力光通信专业管理、工程建设、安全运行、科技研究、标准化、通信运行评价等工作二十余年,曾获南方电网科技进步奖、成果转化奖、专利奖、技术标准创新贡献奖等 10 余项奖励。主持完成南网电网 OTN、ASON 等多个网级光通信网建设。  
E-mail: [zhaohq@csg.cn](mailto:zhaohq@csg.cn)



李 蔚(1968—),女,湖北武汉人,教授,博士,博士生导师,长期从事光纤通信技术和光电子技术方面的研究和教学工作。为第一负责人先后多项国家自然科学基金,国家“973”项目子课题,国家“863”项目等多项国家级项目。