

基于 MIMO 神经网络均衡的 16QAM 模分-波分复用相干传输系统

张尧, 王晨, 桑博涵, 张宇, 王心怡, 周雯, 余建军*

复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433

摘要 提出了一种基于神经网络的多输入多输出(MIMO)均衡器,并在大容量模分-波分复用通信系统中进行了实验验证。该系统基于 6 模掺铒光纤放大器实现了 16 通道波分复用双极化 48 Gbaud 16 阶正交振幅调制(16QAM),在 LP01、LP02、LP11a、LP11b、LP21a、LP21b 六种模式上传输了 100 km 少模光纤(FMF)。为降低非线性的影响,在接收端数字信号处理中,采用基于多标签技术的 MIMO 神经网络均衡器,能够显著提升系统性能。实验结果表明,经 100 km 的 FMF 传输,MIMO 神经网络均衡器的强大性能使得系统的比特误码率能满足 15% 软判决前项纠错阈值要求。

关键词 光纤光学; 光纤通信; 模分复用; 波分复用; 神经网络均衡

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231576

1 引言

光纤通信相关的新技术、新应用的不断涌现,推动着全球通信业务量的爆发式增长,这也要求研究者不断扩充光纤通信的信息容量。在器件带宽有限、硬件更新成本高的背景下,典型的扩容方法包括多种复用技术和高阶调制技术等。与此同时,为解决器件和光纤信道造成的光信号损伤问题,实现高速光纤通信,发展先进的数字信号处理(DSP)技术至关重要。随着通信对带宽的要求越来越高,如何集成和提高 DSP 算法的性能已成为当今的研究热点^[1-2]。

为了使光纤通信适应数据流量的爆炸性增长,许多研究的重点都集中在最大化单一光纤的数据速率上。近年来,波分复用(WDM)^[3-6]和模分复用(MDM)^[7-11]技术成为公认的提高光传输系统容量的热门技术。结合两种复用方法可以最大限度地扩充光纤的容量^[12]。然而,高速相干光通信中的一个关键限制因素就是信号损伤。通常情况下,光通信传输信道的非线性损伤主要包括光纤的非线性和器件的非线性两部分。其中,光纤中的克尔非线性效应会导致自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)等问题;而器件的非线性效应主要是由光电调制器的饱和效应以及光放大器中自发辐射噪声引起的随机非线性损伤导致的。因此,使用多输入多输出(MIMO)DSP 技术来恢复多路复用和偏振信号很必要^[10]。

现有的用于 MDM 系统的传统 MIMO 均衡技术主要是线性的,包括最小均方(LMS)误差和递归最小二乘(RLS)线性算法^[10-11]。2011 年, Koebele 等^[13]首次用 LMS 算法代替传统的恒模算法,提高了少模光纤(FMF)传输的均衡性能。2013 年, Bai 等^[14]在频域中使用 LMS 算法(FD-LMS),实现了 FMF 与 6×6 相干 MIMO 传输系统中算法复杂度较低的自适应频域均衡。这些线性算法结构简单且复杂度低,但无法对系统中各种器件以及长距离光纤传输带来的非线性损伤进行补偿。因此,当传输过程中非线性损伤占据主导时,传统的线性均衡器无法很好地补偿系统非线性损伤。于是,一些非线性 MIMO 均衡技术涌现出来,其中最具有代表性的是基于 Volterra 的非线性均衡化技术^[5]。2019 年, Vgenopoulou 等^[15]利用 Volterra 级数展开并在原有的线性回归架构里引入了非线性核,通过展开和遍历 Volterra 函数中的各阶非线性项来实现非线性损伤补偿。然而在模式复用信道较多和偏振复用的场景中,这种算法本身具有较高的复杂性,多通道的输入也增大了其收敛难度。随着深度学习的出现和发展,基于机器学习的均衡成为光通信领域的研究热点。MIMO 神经网络均衡器(MIMO-NNE)利用各隐藏层的非线性激活函数能够很好地解决以上问题,并且能更加精确地描述和逼近非线性。2014 年, Tu 等^[16]在由决策反馈递归神经网络支持的仿真实验中实现了 MIMO 均衡。2017 年, Kobayashi 等^[17]在弱耦合 FMF 上传输了差分正交相移键控波分复用信号,使用

收稿日期: 2023-09-18; 修回日期: 2023-10-30; 录用日期: 2023-11-17; 网络首发日期: 2023-12-12

通信作者: *jianjun@fudan.edu.cn

MIMO 均衡器,降低了接收机 DSP 的复杂度。2018 年,吴金达等^[18]提出了一种基于广义回归神经网络 (GRNN) 的非线性均衡算法,促进了相干光正交频复用 (CO-OFDM) 系统在中长距离光纤传输中的应用。2019 年,Poudel 团队^[19]演示了通过基于深度学习神经网络 (DLNN) 的均衡器进行低速 MDM 传输的过程。2021 年,朱子岳等^[8]在强度调制-直接检测场景中引入基于神经网络的 MIMO 均衡技术,实现传输速率为 200 Gbit/s 的模分复用传输。在训练过程中,神经网络可以自适应地调整权重和偏置使误差最小化,从而实现更好的均衡效果。这种特性使得 MIMO-NNE 收敛更快,同时能处理更高阶的非线性失真。该方法为实现灵活、低成本、高容量的 MDM 系统提供了一种新的思路。

本文利用先进的基于神经网络的 MIMO 均衡方法,演示了一个 6 模式 16 波长的双偏振零差相干传输系统。该系统结合 WDM 和 MDM 技术,基于 6 模掺铒光纤放大器 (6-mode EDFA) 在 LP01、LP02、LP11a、LP11b、LP21a、LP21b 六种模式上传输 100 km 的 FMF 后均衡 16 通道的 48 Gbaud 16 阶正交振幅调制 (16QAM) 信号。使用多标签 (Multi-label) 技术^[20]来同

时实现 12 组信号 (2 偏振 \times 6 模式) 的均衡。实验结果表明,本文提出的 MIMO 神经网络均衡方法能够有效地适应多模式、多偏振态复用以及高阶 QAM 调制格式,比传统的多输入多输出最小均方 (MIMO-LMS) 误差算法有一定的误码性能增益,比已有的只用均衡单个信道来设计的神经网络均衡器更加科学合理,对于提升 MIMO 均衡器的训练效率与非线性能力有重要价值。在 MIMO-NNE 的帮助下,MDM-WDM 系统误码率 (BER) 能满足 1×10^{-2} 的 15% 软判决前向纠错 (SD-FEC) 阈值^[21]要求,传输 100 km 时系统总速率达到了 36.864 Tbit/s。

2 MIMO 神经网络均衡算法

基于多标签技术的 MIMO-NNE 算法是一种可同时训练多目标的方法。传统均衡算法需要在每两个通道之间建立线性滤波器再进行联合训练,而 MIMO-NNE 可以集成多路信号并输入神经网络模型然后同时输出均衡后的多路信号。所提 MIMO-NNE 结构如图 1 所示,其中 $x_n(t)$ 为 t 时刻的时域信号 ($n=1, 2, 3, \dots, 12$), $\hat{y}_n(t)$ 是均衡器输出信号, $y_n(t)$ 为输出信号, n_{taps} 为滑窗窗长, n_{hidden} 为隐藏层大小。

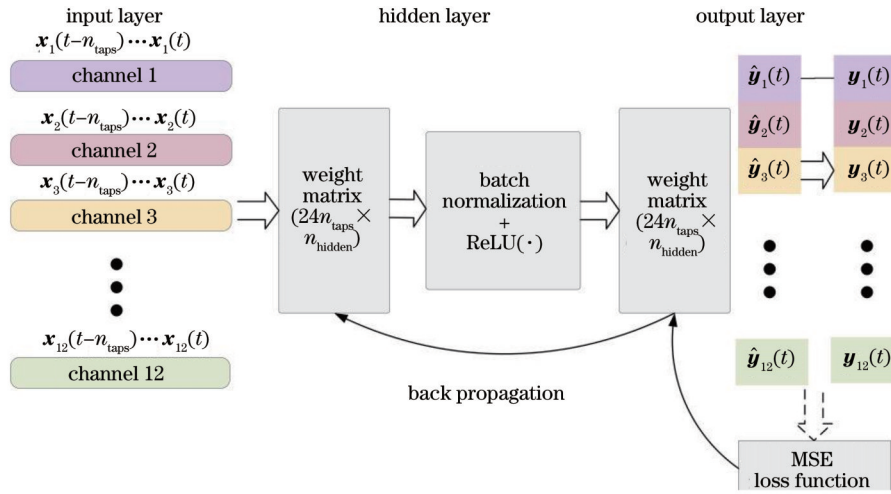


图 1 MIMO-NNE 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of MIMO-NNE

MIMO 神经网络均衡算法在时域工作,采用原始信号的滑动窗口切片作为输入数据。神经网络主要处理 12 个子通道 (6 模式 \times 2 极化), 对应图 1 中的通道 1~通道 12 (channel 1~channel 12)。在输入层,首先将接收到的数据进行预处理,以便于训练集和测试集数据的准备。预处理的操作包括数据的标准化、实虚部分离,以及滑窗切片。其中,切片操作将数据分割成长度为 401 的滑动窗口,然后将这些数据条缝合起来,形成神经网络的输入向量。输入数据可记为 $x_1 \sim x_{12}$, 拼合的过程可用式 (1) 表示。整合后的输入向量首先与隐藏层处的权值矩阵 W_1 相乘,进一步引入非线性

激活函数 ReLU,最后再与输出层中的权值矩阵 W_2 相乘。这些权值矩阵中的权重控制了非线性激活函数的加权累积,从而实现非线性均衡。由于输入向量包含来自所有信道的数据,通过加权累积可以建立每个信道之间的连接,从而实现 MIMO 非线性均衡。最后,将数据通过输出层传递,得到大小为 24 的输出向量,其中包含来自 12 个通道的 I/Q (In-phase / quadrature) 数据。输入输出信号的实部和虚部均是分离的,输入信号向量和输出信号向量的定义分别为

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}], \quad (1)$$

$$\hat{Y}_{\text{MIMO-NNE}} = \left[\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{y}_3, \hat{y}_4, \hat{y}_5, \hat{y}_6, \hat{y}_7, \hat{y}_8, \hat{y}_9, \hat{y}_{10}, \hat{y}_{11}, \hat{y}_{12} \right] = \max(X \cdot W_1, 0) \cdot W_2, \quad (2)$$

式中： x_n 是 NNE 的输入向量， $n=1, 2, 3, \dots, 12$ ； X 是由 12 个通道拼接成的矩阵； \hat{y}_n 是均衡器输出向量； $\hat{Y}_{\text{MIMO-NNE}}$ 是均衡器输出信号矩阵。非线性激活函数采用 $\text{ReLU}(\cdot)$ 。与传统的 MIMO 均衡一样，使用发送序列与 NNE 均衡后的信号来计算均方误差 (MSE)，并利用均方误差损失进行反向传播，采用 Adam 优化器对权重矩阵进行优化。均方误差损失可表示为

$$L_{\text{MSE}} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m (Y_n - \hat{Y}_n)^2, \quad (3)$$

式中： m 是计算中涉及的样本数量； Y_n 和 \hat{Y}_n 分别对应均衡后的信号矢量和输出信号矢量。采用神经网络均衡器训练时，使用批训练的方式使梯度计算更加准确，即每输入一批数据，得到一批输出并计算平均误差用于反向传播，这样能够有效避免数据中的噪声对训练的影响，提升收敛速度。实验中 MIMO-NNE 的参数设置如下：滑窗窗长 $n_{\text{taps}} = 401$ ；输入特征层大小 $n_{\text{feature}} = 9624$ ；隐藏层大小 $n_{\text{hidden}} = 200$ ；梯度下降算法采用 Adam，初始学习率设置为 1×10^{-3} ，批大小设置为 256。

3 高速光纤传输实验系统

3.1 实验系统

所提高速光信号传输系统如图 2 所示。在发送端产生间隔为 50 GHz 的 16 通道信号。信道按奇偶分为两组，每组使用 8 个间隔为 100 GHz 的外腔激光器 (ECLs) 将信道耦合为光学载波，对应于 ITU (International telecommunications union) 标准中的 C50~C57 和 H50~H57。高速光信号经过发送端数字

信号处理 (tx-DSP) 后，通过采样率为 64 GSa/s 的任意波形发生器 (AWG) 加载到 I/Q 调制器 (I/Q MOD) 上，其中任意波形发生器的带宽为 40 GHz，I/Q 调制器的 3 dB 带宽为 29 GHz。根据已有的研究^[12,22-23]，利用延迟线将单个调制器调制的光信号划分为多通道进行多路复用。奇偶两路信号分别由 1×2 的光耦合器 (OC) 一分为二，并经延时线进行去相关后送入偏振多路复用器 (PM)，由 1×2 的光耦合器耦合为一组信号。该信号经掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后，由 1×6 的光耦合器分为 6 束，并再次利用延时线对 LP01、LP02、LP11a、LP11b、LP21a、LP21b 进行去相关处理。再经模式耦合器 (Mode multiplexer) 多路复用后，波分波复用信号在 100 km 的 FMF 上传输。实验中采用了 6 模 EDFA 对各通道模式信号同时放大并进行补偿，在降低成本的同时简化了系统架构，避免了重新转换为单模信号的插入损耗。

少模掺铒光纤放大器 (FM-EDFA) 是长距离 MDM 系统中实现功率补偿的关键器件，6 模 EDFA 便是其中一种。为了实现扁平增益特性，FM-EDFA 使用特殊的光纤掺杂和光纤长度控制技术，使得整个光谱范围内增益分配均匀，提供更加稳定的信号放大。图 3 给出了 6 模 EDFA 的结构示意图。多个信号模式耦合为一组光后作为 6 模 EDFA 的输入。使用专用的光纤 WDM 将泵浦激光 (Pump laser) 输出耦合到掺铒光纤中。泵浦激光器的电流和温度由电子驱动且由微处理器 (Microcontroller) 控制，以响应实验定义的输入值稳定激光器。在 6 模 EDFA 内部，输入光信号先与泵浦激光合为一束再传入一段有源少模光纤 (Active FMF) 中，经过放大后的信号作为 6 模 EDFA 的输出信号光，进入实验系统中的 100 km FMF 中传输。其

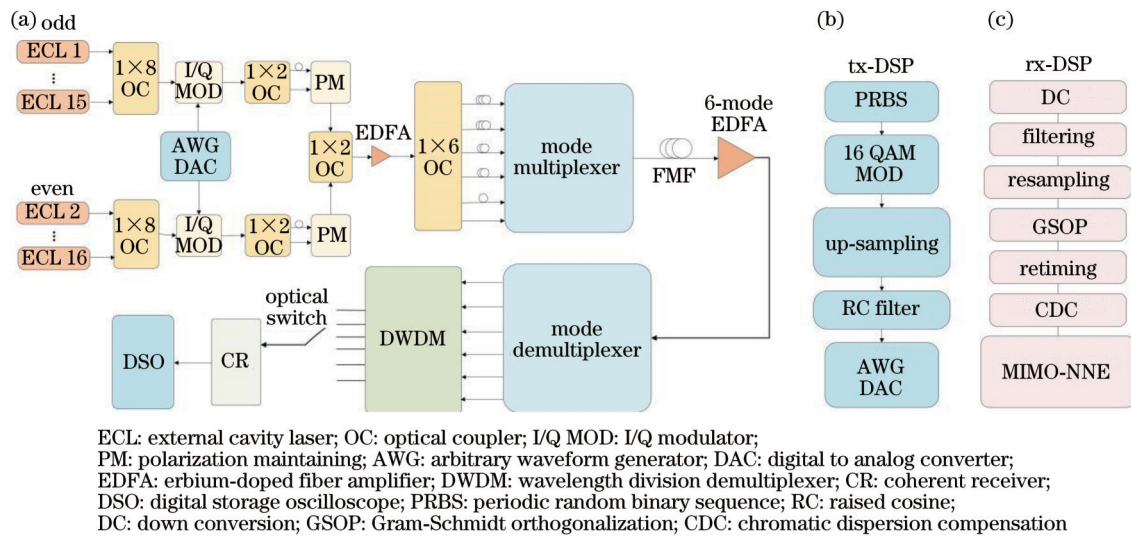


图 2 传输系统框图及信号处理流程。(a) 6 模式 16 信道双偏振零差相干传输实验装置图；(b) 发送端 DSP (tx-DSP)；(c) 接收端 DSP (rx-DSP)

Fig. 2 Transmission system block diagram and signal processing flow. (a) 6-mode 16-channel dual polarization homodyne coherent transmission experimental device; (b) transmitter side DSP (tx-DSP); (c) receiver side DSP (rx-DSP)

中,隔离器(Isolator)用于控制和减少光信号的反射和反馈,保护泵浦光源,确保放大器的稳定性和性能。由于6模EDFA对不同模式的增益有细微的差别,最大差值为2.5 dB左右。在实验传输距离较短的条件下,该差值可以忽略。图4给出了6模EDFA在0 dBm和-5 dBm入射光功率下6种模式的平均增益曲线。

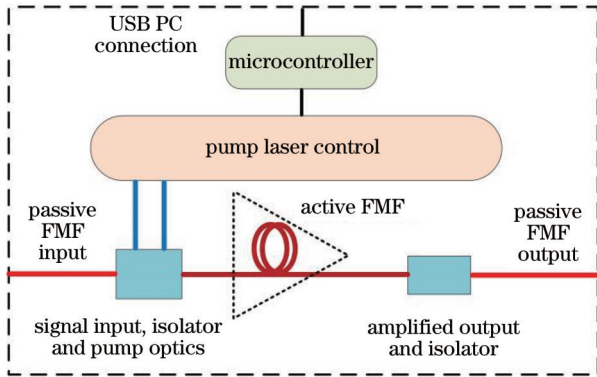


图3 6模掺铒光纤放大器示意图

Fig. 3 Schematic of 6-mode EDFA

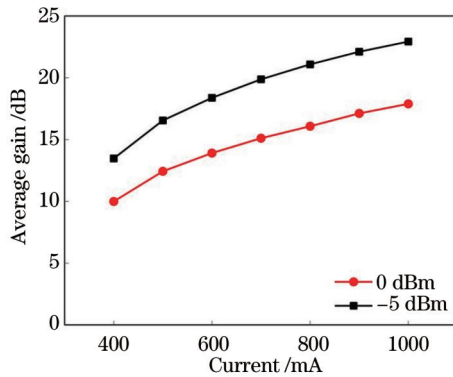


图4 6模掺铒光纤放大器在不同入射光功率下的平均增益

Fig. 4 Average gain of 6-mode EDFA under different incident optical powers

在实验接收端,经模式解耦合器(Mode demultiplexer)解耦合后,6个通道的信号通过一个波分解复用器(DWDM),并用一个光开关分别选通6路波长信号。最后由相干接收机(CR)进行偏振解复用和零差相干接收(接受功率控制在-5 dBm左右,以控制非线性)。利用采样率为80 GSa/s的实时数字存储示波器(DSO)捕获基带电信号,进行离线DSP,示波器的带宽为33 GHz。

3.2 DSP模块

发送端和接收端数字信号处理DSP流程分别如图2(b)和图2(c)所示。在tx-DSP中,信号源由一个周期为73728的周期随机二进制序列(PRBS)组成。比特流通过QAM调制器(QAM MOD)映射到16个周期为12288的QAM符号,经两倍上采样和升余弦滤波(RC filter)后送入任意波形发生器,并以32 Gbaud的波特率进行传输。

在接收端数字信号处理(rx-DSP)中,首先,在频域内对接收信号进行精确下变频(DC)来补偿系统的频偏。其次,信号经过贝塞尔滤波、重采样,采用施密特正交化(GSOP)解决IQ不平衡的问题。再次,进行时钟恢复(Retiming)以消除定时误差,再进行色散补偿(CDC)。最后采用MIMO-NNE算法进行信道非线性均衡并补偿非线性损伤^[24-25]。

4 实验结果

在波分复用实验系统中,由于传输波长范围中心处的子信道所受串扰较大,系统的误码性能一般由波长范围中心处的子信道代为衡量^[5];在所提系统中,使用C43(波长为1542.94 nm)子信道的误码性能来衡量系统的性能。首先比较了在不同6模EDFA光电流下传统MIMO-LMS算法和MIMO-NNE算法的误码性能。考虑到通道数过多,先使用16组通道的平均误码率用于对比,结果如图5所示。

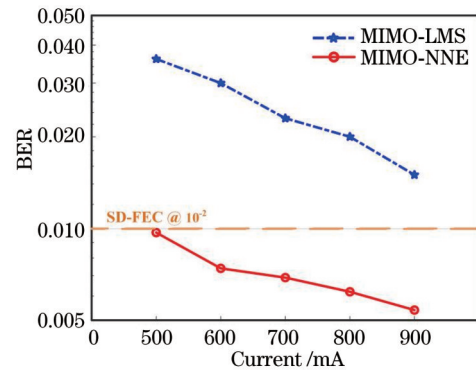


图5 不同6模EDFA电流下MIMO-LMS算法与MIMO-NNE算法的性能对比

Fig. 5 Performance comparison of MIMO-LMS algorithm and MIMO-NNE algorithm under different 6-mode EDFA currents

可以看出,MIMO-NNE算法相比MIMO-LMS算法误码率降低了大约0.02,同时MIMO-NNE算法可使得100 km的16QAM传输误码率低于 1.0×10^{-2} 软判决前向纠错(SD-FEC)门限。实验中,随着6模EDFA电流的增加,EDFA增益也相应提高,FMF传输过程中的损耗被放大器所补偿,系统的误码率显著下降。

性能的增益不仅仅来源于非线性补偿的引入,还来源于更加高效的训练过程。在迭代数据量大小近似的情况下,对比了两种均衡方式中均方误差的收敛过程,如图6所示。其中,MIMO-LMS算法的均方误差为所有信道均方误差之和。

从图6中可以看出,相比于MIMO-LMS算法,MIMO-NNE算法在收敛上有着更加优秀的表现。在权重的初始化、收敛方式和学习率的优化这三个方面均能够说明MIMO-NNE算法表现更优。在权重的初始化上,神经网络采用Kaiming初始化确保权重初始

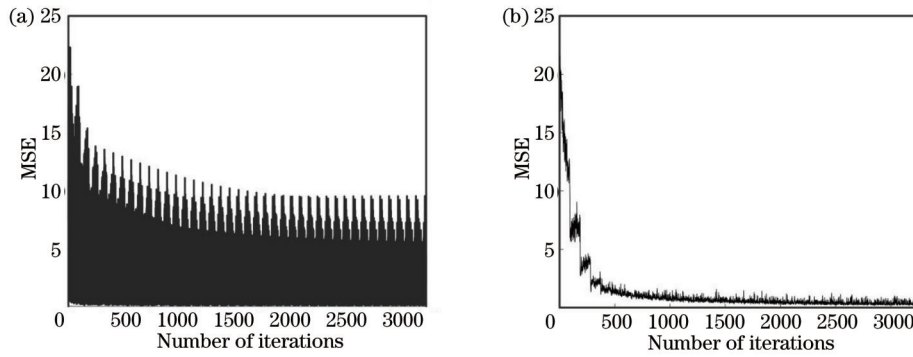


图 6 MIMO-NNE算法与MIMO-LMS算法训练时均方误差下降过程。(a) MIMO-NNE算法;(b) MIMO-LMS算法

Fig. 6 Mean square error reduction process during MIMO-NNE algorithm and MIMO-LMS algorithm training. (a) MIMO-NNE algorithm; (b) MIMO-LMS algorithm

值适当,有助于梯度的传播从而减少梯度消失或梯度爆炸问题;而MIMO-LMS算法的初始滤波器系数则是一个随机值。在收敛方式上,MIMO-NNE算法以批量方式训练,在整个训练集上计算梯度并更新参数,加快了收敛速度;而MIMO-LMS算法则在每个时刻根据当前输入和误差信号来更新滤波器的权重。在学习率的优化方面,MIMO-NNE算法采用Adam优化器结合了动量和自适应学习率的优点,能够更快地收敛到最优解;而MIMO-LMS算法通常需要手动选择学

习率,这可能需要更多的调试和试验。这些优点使得MIMO-NNE算法能够在较少的迭代次数下就能达到较低的一个均方误差损失。

进一步地,详细对比了FMF传输场景中MIMO-NNE均衡下各个模式的误码性能,如图7所示。从图7中可以看出,各个模式下的误码性能差异不显著,同时,在100 km传输中,每一个通道的误码性能均低于软判决门限,100 km传输经过MIMO-NNE均衡后LP01对应的星座图如图7中右侧放大图所示。

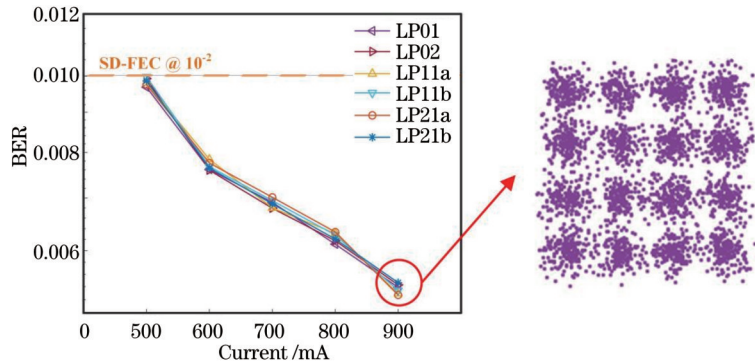


图 7 在不同模式子信道测量得到的误码率

Fig. 7 Measured bit error rate under different mode subchannels

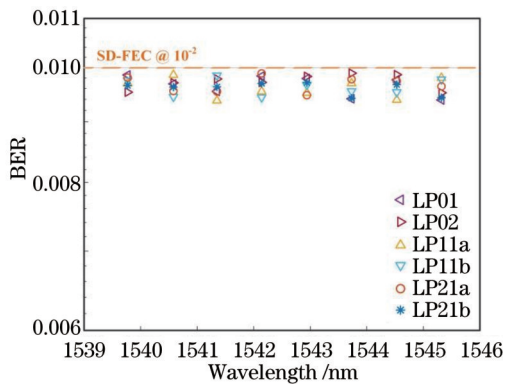


图 8 在不同波长子信道测量得到的误码率

Fig. 8 Measured bit error rate under different wavelength subchannels

最后,讨论了不同波长子信道(C50~C57)在500 mA的6模EDFA光电流下100 km FMF传输场景中的误码性能,结果如图8所示。从图8可以看出,每个子信道在100 km FMF传输中每个模式以及偏振态的误码率均小于软判决门限,且差异性不大。由此可以得到,所提实验系统结合基于神经网络的MIMO均衡算法成功实现了16波分复用子信道、6种模分复用模式、双偏振的48 Gbaud 16QAM 100 km 相干传输,总速率达到了36.864 Tbit/s。

5 结 论

结合了波分复用、模式复用和偏振复用等3种复用技术,并在接收端采用高性能的MIMO神经网络均衡算法,最终实现了16通道6模式双偏振48 Gbaud

16QAM 信号的 100 km 相干传输, 系统总速率达到了 36.864 Tbit/s。实验误码率满足 15% 的软判决前项纠错阈值要求, 证实了 MIMO 神经网络均衡算法在大容量多复用传输系统中的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 余建军, 迟楠. 高速光纤通信中数字信号处理算法原理与应用. 第一卷. 单载波调制技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018. Yu J J. Digital signal processing in high-speed optical fiber communication: principle and application. I. Single carrier modulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [2] Yu J J, Wu Y. High-speed optical fiber communication in China [J]. ACS Photonics, 2023, 10(7): 2128-2148.
- [3] 李博, 薛艳荣, 孔维成, 等. 基于波分复用的高精度光纤时频传递方法[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 0706001. Li B, Xue Y R, Kong W C, et al. High-precision optical fiber time and frequency transfer method based on wavelength division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(7): 0706001.
- [4] Sang B H, Kong M, Tan Y X, et al. 800-Gbit/s/carrier TPS-64QAM WDM coherent transmission over 2, 400 km utilizing low-complexity separated pruning DNN-based nonlinear equalization[C]//2022 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 18-22, 2022, Basel, Switzerland. New York: IEEE Press, 2022.
- [5] Kong M, Shi J T, Sang B H, et al. 800-Gb/s/carrier WDM coherent transmission over 2000 km based on truncated PS-64QAM utilizing MIMO Volterra equalizer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 2830-2839.
- [6] Landero S E, de Jauregui Ruiz I F, Ferrari A, et al. Link power optimization for S+C+L multi-band WDM coherent transmission systems[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 6-10, 2022, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2022.
- [7] 胡贵军, 常玉鑫, 韩悦羽, 等. 基于少模光纤布拉格光栅的模分复用系统实验研究[J]. 电子学报, 2017, 45(3): 626-631. Hu G J, Chang Y X, Han Y Y, et al. Experimental research of mode division multiplexing system based on few-mode FBG[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(3): 626-631.
- [8] 朱子岳, 赵梦鑫, 张一尘, 等. 高速 IM-DD 模分复用通信系统中基于神经网络的 MIMO 均衡技术[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406003. Zhu Z Y, Zhao M X, Zhang Y C, et al. MIMO equalization technology based on neural network in high-speed IM-DD mode division multiplexing transmission system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406003.
- [9] Soma D, Beppu S, Wakayama Y, et al. 257-Tbit/s weakly coupled 10-mode C L-band WDM transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(6): 1375-1381.
- [10] Shibahara K, Mizuno T, Miyamoto Y. Long-haul mode multiplexing transmission enhanced by interference cancellation techniques based on fast MIMO affine projection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(18): 4969-4977.
- [11] Beppu S, Igarashi K, Kikuta M, et al. Real-time MIMO-DSP technologies for SDM systems[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021, June 6-11, 2021, Washington, DC. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2021: W7D.4.
- [12] Beppu S, Soma D, Sumita S, et al. 402.7-Tb/s MDM-WDM transmission over weakly coupled 10-mode fiber using rate-adaptive PS-16QAM signals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(10): 2835-2841.
- [13] Koebele C, Salsi M, Sperti D, et al. Two mode transmission at 2×100 Gb/s, over 40 km-long prototype few-mode fiber, using LCOS-based programmable mode multiplexer and demultiplexer [J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16593-16600.
- [14] Bai N, Ip E, Li M J, et al. Experimental demonstration of adaptive frequency-domain equalization for mode-division multiplexed transmission[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, March 17-21, 2013, Anaheim, California. Washington, DC: OSA, 2013: OM2C.5.
- [15] Vgenopoulou V, Diamantopoulos N P, Roudas I, et al. MIMO nonlinear equalizer based on inverse Volterra series transfer function for coherent SDM systems[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [16] Tu C R, Li Y, Du W T, et al. Adaptive blind equalization algorithm using a decision feedback recurrent neural network in mode-division multiplex systems[C]//2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology, July 6-10, 2014, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE Press, 2014: 699-701.
- [17] Kobayashi T, Nakamura M, Hamaoka F, et al. 1-Pb/s (32 SDM/46 WDM/768 Gb/s) C-band dense SDM transmission over 205.6-km of single-mode heterogeneous multi-core fiber using 96-Gbaud PDM-16QAM channels[C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, DC: OSA, 2017: Th5B.1.
- [18] 吴金达, 卢瑾, 任宏亮, 等. 基于广义回归神经网络的 CO-OFDM 系统非线性均衡[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0906002. Wu J D, Lu J, Ren H L, et al. Nonlinear equalizer based on general regression neural network in coherent optical OFDM system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0906002.
- [19] Poudel B, Oshima J, Kobayashi H, et al. MIMO detection using a deep learning neural network in a mode division multiplexing optical transmission system[J]. Optics Communications, 2019, 440: 41-48.
- [20] Sang B H, Zhou W, Tan Y X, et al. Low complexity neural network equalization based on multi-symbol output technique for 200 gbps IM/DD short reach optical system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 2890-2900.
- [21] Zhang J, Yu J J, Wey J S, et al. SOA pre-amplified 100 Gb/s/ λ PAM-4 TDM-PON downstream transmission using 10 gbps O-band transmitters[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 185-193.
- [22] Zhang J W, Wen Y H, Tan H Y, et al. 80-channel WDM-MDM transmission over 50-km ring-core fiber using a compact OAM DEMUX and modular 4×4 MIMO equalization[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [23] 龚思雨, 张建勇. 具有模式依赖损耗的模分复用系统的动态信道补偿特性[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2306006. Gong S Y, Zhang J Y. Dynamic channel-compensation characteristics of MDM system with mode-dependent loss[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2306006.
- [24] 余建军, 迟楠. 高速光纤通信中数字信号处理算法原理与应用. 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. 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.
- [25] 余建军, 迟楠, 陈林. 基于数字信号处理的相干光通信技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013. Yu J J, Chi N, Chen L. Coherent optical communication technology based on digital signal processing[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013.

16QAM Mode-Wavelength Division Multiplexing Coherent Transmission System Based on MIMO Neural Network Equalization

Zhang Yao, Wang Chen, Sang Bohan, Zhang Yu, Wang Xinyi, Zhou Wen, Yu Jianjun*

School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract

Objective With the rapid growth of internet traffic, the demand for large transmission capacities from all walks of life has grown dramatically. In the context of limited device bandwidth and high hardware update costs, typical expansion methods include wavelength division multiplexing (WDM) and mode division multiplexing (MDM). At the same time, optical signal impairments caused by devices and fiber optic channels make advanced digital signal processing technology crucial to achieving high-speed fiber optic communications. With the emergence and development of deep learning, equalization based on machine learning has become a hot topic in the field of optical communications. At present, the MDM field mainly uses the intensity modulation direct detection (IMDD) method for experiments and most use a single-channel single-model traditional linear equalizer for channel compensation. However, in scenarios with many mode multiplexing channels and polarization multiplexing, the requirements for nonlinear equalization capabilities are gradually increasing. We adopt WDM, MDM, polarization multiplexing, and advanced digital signal processing technology to construct a homodyne coherent transmission system based on multiple input-multiple output neural network equalizer (MIMO-NNE). We successfully achieve the equalization of 16 channels of 48 Gbaud 16QAM signals after transmitting 100 km of few-mode fiber (FMF) on six modes: LP01, LP02, LP11a, LP11b, LP21a, and LP21b. The bit error rate (BER) of the MDM-WDM system can meet the 15% soft decision forward error correction (SD-FEC) threshold of 1×10^{-2} .

Methods A 16-channel signal with 50 GHz spacing is generated at the transmitter. The channels are divided into two groups according to odd and even, and each group uses 8 external cavity lasers (ECLs) to couple into optical carriers. After the high-speed signal undergoes the transmitting side digital signal processing (tx-DSP), it is loaded onto the in-phase/quadrature modulator (I/Q MOD) through the arbitrary waveform generator (AWG). A delay line is adopted to divide the optical signal modulated by a single modulator into multiple channels for multiplexing. The odd and even signals are divided into two by a 1×2 optical coupler (OC) respectively and are sent to the polarization multiplexer (PM) after being decorrelated by a delay line, and coupled by a 1×2 optical coupler. After the signal is amplified by an erbium-doped fiber amplifier (EDFA), it is divided into 6 beams by a 1×6 optical coupler, and a delay line is again used to decorrelate LP01, LP02, LP11a, LP11b, LP21a, and LP21b. After being multiplexed by a mode multiplexer, the wavelength division multiplexed signal is transmitted on a 100 km FMF. We use 6-mode EDFA to simultaneously amplify and compensate for each channel mode signal. At the experimental receiving end, after decoupling by the mode demultiplexer, the 6-channel signals pass through a dense wavelength division demultiplexer (DWDM), and an optical switch is applied to gate the 6 wavelengths respectively. Finally, the coherent receiver (CR) performs polarization demultiplexing and homodyne coherent reception. We adopt a real-time digital storage oscilloscope (DSO) to capture the baseband electrical signal and perform offline DSP. In the receiving side digital signal processing (rx-DSP), the precise down conversion (DC) is conducted on signals to compensate for the frequency offset of the system. Then the signals undergo Bessel filtering, resampling, and Gram-Schmidt orthogonalization (GSOP) to solve the problem of IQ imbalance. Additionally, we perform clock recovery (Retiming) to eliminate timing errors and perform chromatic dispersion compensation (CDC). Finally, we adopt the MIMO-NNE to perform channel nonlinear equalization to compensate for nonlinear damage and calculate BER.

Results and Discussions Figure 5 shows the BER of the traditional MIMO-LMS algorithm and the proposed MIMO-NNE algorithm under different 6-mode EDFA current. MIMO-NNE algorithm has an average bit error gain of about 0.02 compared to MIMO-LMS algorithm. At the same time, MIMO-NNE algorithm can make the BER of 16QAM transmitted over 100 km lower than the 1.0×10^{-2} SD-FEC threshold. Fig. 6 shows the convergence process of the mean square error (MSE) of MIMO-NNE algorithm and MIMO-LMS algorithm under an approximate iteration data amount. MIMO-NNE algorithm has better convergence performance than MIMO-LMS algorithm. As shown in Figs. 7 and 8, the

difference in BER of each mode and different wavelength sub-channels is not significant. At the same time, the BER of each channel in 100 km transmission is lower than the 1.0×10^{-2} SD-FEC threshold.

Conclusions In this study, we experimentally build a 6-mode 16-wavelength dual-polarization homodyne coherent transmission system. At the receiving end, the MIMO-NNE based on multi-label technology is used for channel equalization. When transmitting 100 km, the total system rate reaches 36.864 Tbit/s. With the help of MIMO-NNE, the MDM-WDM system BER can meet the 15% SD-FEC threshold of 1×10^{-2} . The experimental results confirm the nonlinear equalization potential of MIMO-NNE in future high-capacity long-distance transmission systems.

Key words fiber optics; fiber communication; mode division multiplexing; wavelength division multiplexing; neural network equalization