

激光与光电子学进展

面向等效时间采样的人工智能均衡器

景宁, 赵俊鹏, 张敏娟*

中北大学信息与通信工程学院山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051

摘要 等效时间采样是高速光波形测试及质量评估领域的重要技术,其利用较低的实际采样率换取较高的带宽与垂直分辨率,导致测量具有随机、不连续等特征信号时,无法使用滤波、均值等方法进行均衡处理。为此,提出一种基于递归神经网络的等效时间采样信号均衡方法,通过训练递归网络模型建立等效时间均衡器,通过对光数字通信及激光雷达波形的等效时间采样信号进行处理验证该方法。结果表明:与输入波形相比,表征光通信质量的眼图相关参数,如眼高、眼宽、抖动得到明显提升,对于线性调频激光雷达信号改善了其波形幅值频谱响应,解决了等效时间采样信号的均衡处理难题。

关键词 等效时间采样; 均衡器; 递归神经网络; 眼图

中图分类号 TH73 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP231804

Artificial Intelligence Equalizer for Equivalent Time Sampling

Jing Ning, Zhang Junpeng, Zhang Minjuan*

*Shanxi Provincial Research Center for Opto-Electronic Information and Instrument Engineering Technology,
School of Information and Communication, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China*

Abstract Equivalent time sampling is an important technology in the field of high-speed optical waveform testing and quality evaluation. It uses low actual sampling rates for exchanging higher bandwidth and vertical resolution; hence, it is incapable of using filtering, averaging, and other methods for equalization when measuring signals with random and discontinuous characteristics. Therefore, herein, a recursive neural network-based equivalent time sampling signal equalization method is proposed. By training the recursive network model, an equivalent time equalizer is established, and the method is validated by processing equivalent time sampling signals of optical digital communication and light detection and ranging (LiDAR) waveforms. The results show that compared with the input waveform, the eye graph related parameters that characterize the quality of optical communication, i. e., eye height, eye width, and jitter, exhibit considerable improvements. For linear frequency modulation LiDAR signals, enhancing the waveform amplitude spectrum response solves the problem of equalization processing for equivalent time sampling signals.

Key words equivalent time sampling; equalizer; recurrent network; eye diagram

1 引言

在高速长距离光传输系统中,受光传输信道损耗、色散、非线性效应等因素影响,光脉冲波形会产生畸变,一般表现为高频分量损耗相对较大,信号失真,导致系统响应失真及错误率增加^[1-2]。通常,对于固定信道传输,这种失真是已知且稳定的,为了在不显著增加传输通道设计成本的情况下提高系统准确率,会在发送端和接收端有选择地使用一些信号调理技术以补偿高频分量损失对信号形状的影响,如发送端的预加重

或去加重、接收端的均衡^[3-6]等。这些技术的运用,可以一定程度上消除信道对信号传输的影响。现有均衡器,一般有连续时间线性均衡器(CTLE)、前向反馈均衡器(FFE)、判决反馈均衡器(DFE)等^[7-8]。均衡器是较为高端的光信号测试或分析仪器中的重要器件,这些基于滤波器原理的数字信号均衡器,均要求所处理信号为连续时间采样所得。

目前,Keysight、Tek等公司掌握最先进的高速光波形采集技术,如86100、N1000、TSO820系列等,可以通过较低采样率对几十GHz信号进行等效时间采

收稿日期: 2023-07-31; 修回日期: 2023-09-27; 录用日期: 2023-10-17; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(62105305)、山西省基础研究计划资助项目(202203021221114)

通信作者: *zmj7745@163.com

样。此类型仪器常用于光传输领域的高速波形测试及质量评估,也被称为“光取样示波器”“数字通信分析仪”等。本实验组^[9]在等效时间采样技术方面进行了研究,取得了一定的进展。其中,存在的问题之一是等效时间采样数据在时间上具有不连续^[10-13]的特点,无法通过傅里叶分析等传统频谱分析手段得到信号高低频成分。因此,对于具有随机特性的数字信号,目前国内基于等效时间采样的相关仪器均无法直接进行均衡处理,而缺乏均衡处理波形会导致系统阈值、电平判断错误,误码率升高。

为解决等效时间采样信号均衡问题,本文利用递归网络算法建立等效时间均衡器,设计等效时间均衡器训练及工作流程,最终仅需一维矩阵即可实现信号均衡处理,并以常用光通信伪随机非归零(PRBS-NRZ)编码与激光雷达线性调频(LFM)波形均衡进行了测试。结果表明,与连续时间均衡器作用于连续时间采样信号相比,所提方法具有较好的均衡功能,可应用于取样示波器等设备的高频波形补偿、波形/眼图质量改善中。

2 基本原理

2.1 等效时间采样

等效时间采样原理如图 1 所示,以一定时间周期为采样间隔,每个周期依次递进增加精细延迟,触发采样系统采集输入信号,当采样周期与输入信号同步时,获取被测信号的抽样数据,以达到分析及评估波形的目的。其特点是可以以较低的实际采样率换取较高的带宽及垂直分辨率。对于数字通信信号输入,等效时间采样过程对输入数字信号不同 bit 周期内分别进行采样,其采样时间点分别位于不同的 bit 周期,存在一定的随机性,采集结果形成的眼图如图 2 所示,相邻数据点之间并不连续,即每点左右极限值不相等且不同时刻眼图之间也不相关,不能通过傅里叶分析其高低频成分,因此无法进行均值、滤波、均衡等依靠相邻数据点的处理方法。

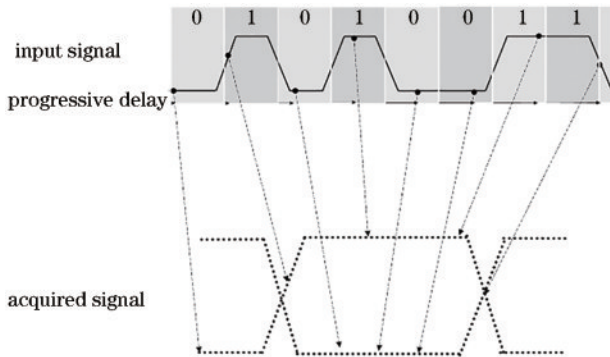


图 1 数字信号等效时间采样眼图形成过程

Fig.1 Digital signal equivalent time sampling eye pattern formation process

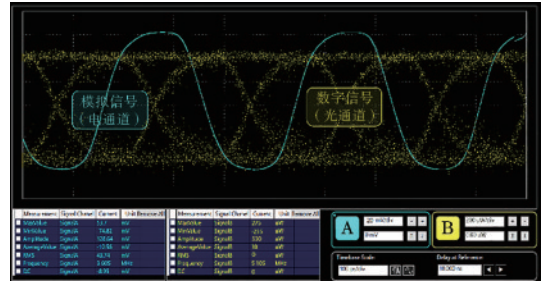


图 2 等效时间采样获取波形测试曲线

Fig. 2 Sampling oscilloscope waveform testing curve

2.2 等效时间均衡

近年来,人工智能赋能常被用于光学信号及波形处理^[13],其中,递归神经网络^[14]由于可实现“硬件神经网络”得到人们的重新关注,且由于运算过程中采用了前一时间的反馈信息,适用于一维时间信号处理,如时序信号、波形识别与预测等^[15-18],研究成果频频发表于《Nature》《Science》等顶级刊物。其基本原理是将低维空间难以处理的信号映射到高维空间进行识别、提取和处理。

递归神经网络原理如图 3 所示,设置网络的输入及目标,如将 PRBS-NRZ、LFM 的原始波形设置为目标,即 $y(t)$,经信道影响后的波形进行等效时间采样并设置为输入,即 $u(t)$ 。

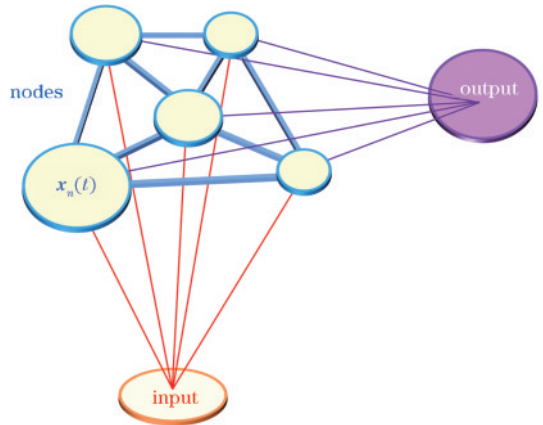


图 3 递归神经网络结构

Fig. 3 Recurrent neural network structure

这里, $u(t)$ 为一维时域信号,通过输入矩阵将其映射到高维空间递归网络中,其中, n 维空间节点值为

$$\mathbf{x}_n(t) = \mathbf{A}^{1 \times n} \mathbf{u}(t), \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}^{1 \times n}$ 为 1 行 n 列矩阵,其作用是将一维信号 $u(t)$ 映射到 n 维空间的递归网络中,并在递归网络中对节点值进行时间迭代。

$$\mathbf{x}_n(t+1) = \mathbf{A}^{1 \times n} \mathbf{u}(t+1) + \alpha \mathbf{B}^{n \times n} \mathbf{x}_n(t), \quad (2)$$

式中: α 为反馈比例系数; \mathbf{B} 为 n 维节点间信息交换矩阵。网络输出为

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}_{out} \mathbf{x}_n(t), \quad (3)$$

式中: \mathbf{W}_{out} 为 n 维节点的输出权重。可见,递归神经网络

网络的输出结果与输入、网络节点交换无关, 仅与 t 时刻节点状态和输出权重矩阵相关, 即仅需对输出权重进行训练。

3 分析与讨论

为验证上述方法, 使用 PRBS-NRZ、LFM 等光通信、激光雷达中常用的信号形式进行验证, 并以 PRBS-NRZ 为例进行详细说明。

3.1 PRBS-NRZ 编码眼图处理测试

运行流程如图 4 所示, 具体步骤如下:

- 1) 信号产生, 设置发射信号为 NRZ 编码 PRBS10 序列、比特数为 $2^{10}-1$ 、幅值范围为 ± 0.5 , 设目标值为 $y(t)$;
- 2) 设置相关信道参量, 建立已知损耗、直流增益、峰值增益等参数的信道, 进行等效时间采样 (1 Ga/bit, 递进延迟 1/1000 bit);
- 3) 建立网络并训练, 建立节点规模为 200 的递归网络, 求解式 (3) 中的 W_{out} ;
- 4) 将 W_{out} 作为等效时间采样均衡器系数得到均衡结果。

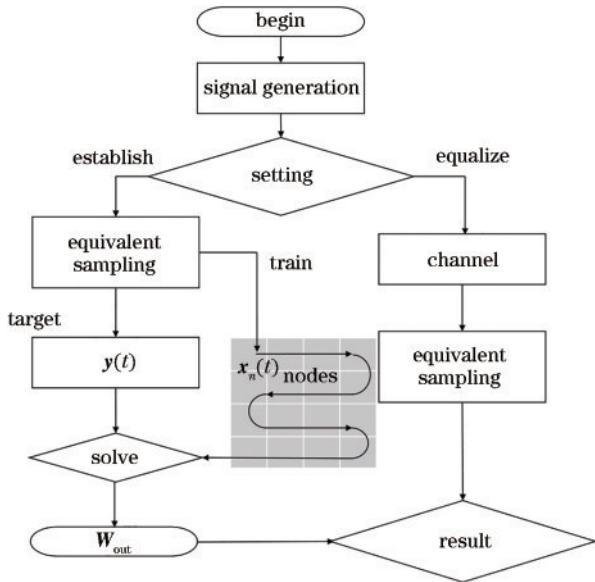


图 4 等效时间均衡器建立流程及输出矩阵求解流程

Fig. 4 Process of establishing equivalent time equalizer and solving output matrix

根据以上工作流程, 对 NRZ 数据的等效时间采样结果如图 5 所示。可以看出, 由于信道损耗、响应等因素影响, 输入信号的眼图质量表现很差, 表现为“眼睛”张开度小、眼高/低加宽、相邻数据间交叉点分布较广等, 在通信上则表现为判断阈值难以确定、误码率提高、通信质量下降。

处理后眼图质量明显改善, 如“眼睛”张开度增大、眼高/低线重叠变细、相邻数据间交叉点分布更加集中等, 在通信上则表现为阈值可以准确判断、误码率降

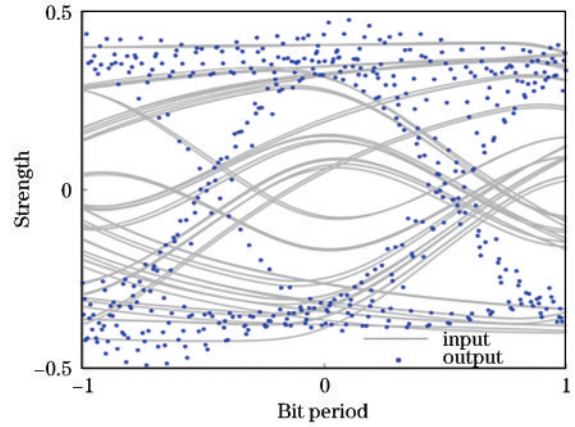


图 5 等效时间均衡器处理结果

Fig. 5 The process result of equivalent time equalizer

低、通信质量提升。结果表明, 通过递归神经网络可以对等效时间采样信号进行信号均衡处理, 用于标准波形质量的眼图相关参数得到明显改善, 如眼高、眼宽分别提升约 7、1.6。经过均衡器处理后波形质量明显提升, 便于后续系统进行阈值分析、电平判断等操作。

由于 PRBS 序列是随机性周期序列, 其周期为 2^n-1 , 其中, n 为 PRBS 序列阶数, n 值越大, 其随机性越显著, 测试 PRBS 阶数对均衡器处理结果的影响, 如图 6 所示, 随着 PRBS 阶数提升, 等效时间均衡器处理的准确率随之下降, 原因在于用于训练和测试数据量之间的比例减小。但在 $n=17$ 时, 仍可以保证 90% 以上的准确率, 此时, 数字信号序列长度已超过 131 Mbit, 远超一般通信序列 bit 流长度, 表明该方法适用于数字通信序列。

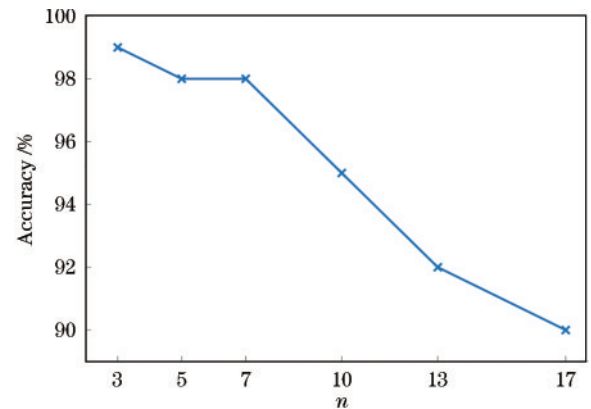


图 6 等效时间均衡器在处理不同阶数 PRBS 序列的准确度
Fig. 6 The accuracy of equivalent time equalizer in processing PRBS sequences of different orders

3.2 线性调频信号处理

LFM 信号频率线性变化, 受信道带宽限制, 接收端呈现幅值随瞬态频率逐步降低特性, 如图 7 蓝色虚线所示, 每脉冲周期内幅值下降约 50%, 经均衡处理后不同瞬态频率成分幅值较为接近, 如图 7 红色虚线所示, 几乎为水平直线, 其均衡处理流程与参数设置与

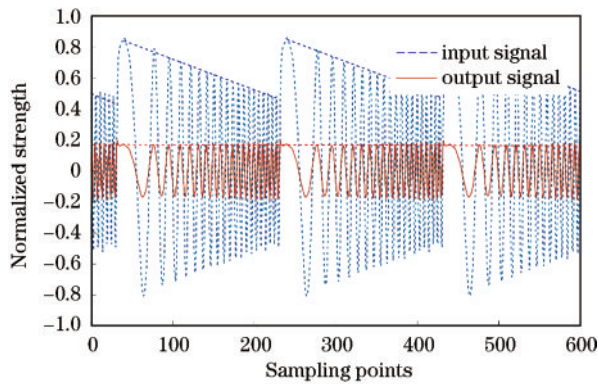


图7 等效时间采样 LFM 信号

Fig. 7 Equivalent time sampling LFM signal

第 3.1 节一致,这里不再赘述。但在相邻脉冲连接处信号会产生一定的抖动和突变,这是每个 LFM 脉冲开始段不可避免地引入上一脉冲结束段相关信息导致的运算误差。

4 结 论

对于等效时间采样信号,现有均衡方法无法适用的问题,提出一种基于递归神经网络的等效时间均衡器,并使用光通信、激光雷达中常用的 PRBS-NRZ、LFM 信号测试其均衡效果。结果表明,该均衡器可实现通信眼图质量改善、通信质量提高、眼图表征参数(眼高、眼宽、抖动)提升。

参 考 文 献

- [1] Sueyoshi A, Mishina K, Hisano D, et al. Multi-stage adaptive equalization for all-optical-aggregated 16QAM signal[J]. *IEICE Communications Express*, 2022, 11(5): 183-188.
- [2] Howard S, Esslinger J, Wang R H W, et al. Hyperspectral compressive wavefront sensing[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2023, 11: e32.
- [3] Zhang J F, Chen W, Gao M Y, et al. K-means-clustering-based fiber nonlinearity equalization techniques for 64-QAM coherent optical communication system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27570-27580.
- [4] Hassan S, Tariq N, Naqvi R A, et al. Performance evaluation of machine learning-based channel equalization techniques: new trends and challenges[J]. *Journal of Sensors*, 2022, 2022: 1-14.
- [5] Staffoli E, Mancinelli M, Bettotti P, et al. Equalization of a 10 Gbps IMDD signal by a small silicon photonics time delayed neural network[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(5): 878-886.
- [6] Wang F, Wang Y Y, Li W P, et al. Echo state network based nonlinear equalization for 4.6 km 135 GHz D-band wireless transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(5): 1278-1285.
- [7] 王和明, 王正, 吕方旭, 等. 基于 DB-PAM4 的高速 SerDes 自适应均衡器设计[J]. *电子元件与材料*, 2022, 41(8): 871-879.
Wang H M, Wang Z, Lü F X, et al. Design of high-speed SerDes adaptive equalizer based on DB-PAM4[J]. *Electronic Components and Materials*, 2022, 41(8): 871-879.
- [8] 景宁, 姚鼎一, 王志斌, 等. 等效时间采样压缩感知高频信号重建[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(10): 1240-1245.
Jing N, Yao D Y, Wang Z B, et al. High frequency signal reconstruction based on compressive sensing and equivalent-time sampling[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(10): 1240-1245.
- [9] Zang X X, Zhao J T, Lu Y F, et al. Precision measurement system of high-frequency signal based on equivalent-time sampling[J]. *Electronics*, 2022, 11(13): 2098.
- [10] Balestrieri E, De Vito L, Lamonaca F, et al. The jitter measurement ways: the instrumentation[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2022, 25(1): 76-82.
- [11] Yamamoto S, Sasaki Y, Zhao Y J, et al. Metallic ratio equivalent-time sampling and application to TDC linearity calibration[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2022, 22(2): 142-153.
- [12] Li H T, Li B K, Lü Z J, et al. Research on a step delay method in sequential equivalent time sampling (ETS)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(11): 114708.
- [13] Wu F Y, Yang X H, Ma Y Y, et al. Machine-learning guided optimization of laser pulses for direct-drive implosions[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10: e12.
- [14] Jaeger H, Haas H. Harnessing nonlinearity: predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication[J]. *Science*, 2004, 304(5667): 78-80.
- [15] Tanaka G, Yamane T, Héroux J B, et al. Recent advances in physical reservoir computing: a review[J]. *Neural Networks*, 2019, 115: 100-123.
- [16] Larger L, Soriano M C, Brunner D, et al. Photonic information processing beyond Turing: an optoelectronic implementation of reservoir computing[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3241-3249.
- [17] Budhiraja R, Kumar M, Das M K, et al. A reservoir computing approach for forecasting and regenerating both dynamical and time-delay controlled financial system behavior[J]. *PLoS One*, 2021, 16(2): e0246737.
- [18] Büsing L, Schrauwen B, Legenstein R. Connectivity, dynamics, and memory in reservoir computing with binary and analog neurons[J]. *Neural Computation*, 2010, 22(5): 1272-1311.