

一种基于 LSTM 的 OFDM-VLC 后失真补偿方法

许俊翔^{1,2}, 林邦姜¹, 汤璇^{1*}, 申晓欢^{1,2}, 赖奇伟^{1,2}

(1.中国科学院海西研究 泉州装备制造研究所,福建 泉州 362000;2.中北大学 大数据学院,太原 030051)

摘要:非线性是限制可见光通信(VLC)系统传输性能的一个重要因素。正交频分复用(OFDM)技术虽然可以有效提升 VLC 的频谱效率,但其较高的峰均值比使得系统受到更多非线性损伤的影响。提出了一种基于长短期记忆网络(LSTM)的后失真补偿方法,建立局部信号的联系,补偿 VLC 系统中的线性与非线性传输损伤。仿真表明:视距传输下,相比于基于线性递推最小二乘法、基于沃尔泰拉级数和基于记忆多项式的后失真补偿方法,基于 LSTM 的后失真补偿方法改善了信号的前向误差幅度性能,在达到相同误码率条件下提高了信号的偏置电压和动态范围,降低了约 4 dB 的信噪比需求。

关键词:可见光通信;非线性补偿;长短期记忆网络

中图分类号:TN929.12 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)01-0054-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Post distortion compensation of OFDM-VLC based on LSTM

XU Junxiang^{1,2}, LIN Bangjiang¹, TANG Xuan^{1*}, SHEN Xiaohuan^{1,2}, LAI Qiwei^{1,2}

(1. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou Fujian 362000, China;

2. School of Big Data, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Nonlinearity is an important factor limiting the transmission performance of visible light communication (VLC) systems. Although orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology can effectively improve the spectral efficiency of VLC, it also makes systems more sensible to nonlinearity due to its high peak-to-average power ratio. This paper proposes a post distortion method based on long short term memory (LSTM) network, which takes the local correlation of signals into account and can effectively compensate linear and nonlinear transmission impairments in VLC systems. In the case of line-of-sight transmission, compared with the post-distortion based on linear recursive least square, simulation results show that Volterra series and memory polynomials, the post distortion method based on LSTM not only can improve the performance of error vector magnitude, but also can increase signal bias voltage and dynamic range and decrease the demand for signal and noise ratio by about 4 dB with the same bit error rate.

Key words: visible light communication; nonlinear compensation; long short term memory network

0 引言

可见光通信(VLC)由于其丰富的频谱资源、绿色低碳和安全性高等优点^[1]在无线通信领域引起极大关注。但是,发光二极管(LED)本身的电光转换非线性和

收稿日期:2019-06-28。

基金项目:中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20170052)资助;福建省科技计划对外合作项目(2017Y01010012)资助;国家自然科学基金(61601439)资助。

作者简介:许俊翔(1995-),男,研究生,现就读于中国科学院海西研究院泉州装备制造研究所物联网通信技术实验室,主要从事可见光通信系统中的信道均衡算法研究。

*通信作者:汤璇(E-mail:xtang@fjirm.ac.cn)。



有限带宽带来的记忆效应制约了信号的传输质量^[2-4]。在满足 VLC 传输实数非负信号的要求下,为了提高系统的传输速率,高级的调制方式如直流偏置光-正交频分复用(DCO-OFDM)被广泛使用。但是,DCO-OFDM 信号具有较高的峰均功率比,这使得信号在传输过程中更容易受到 LED 非线性特性的影响,恶化系统的性能。为了补偿系统的非线性失真,考虑到 LED 的记忆效应,它将信号构建为具有前后依赖性的时间序列。而长短期记忆网络(LSTM)已经被证明具有处理时间序列的优越性^[5],同时,它利用权值共享的策略,大大降低了计算的复杂度。因此,针对 LED 器件所存在的非线性特性和记忆特性,本文提出一种基于 LSTM 的 OFDM-VLC 后失真补偿方法。

1 包含后失真补偿方法的 OFDM-VLC 系统

1.1 LED 模型

在 VLC 系统中,LED 是非线性的主要来源。商用 LED 的载流子密度响应与频率有关,表现出非线性的记忆效应。本文考虑非线性的电压电流转换和线性的电流光功率转换,借助维纳模型^[3]将 LED 灯的非线性变换分为线性时不变模块和无记忆非线性模块。其中,线性时不变模块的表达式为:

$$r(n) = \sum_{i=0}^Q b_i x(n-i) \quad (1)$$

其中, $x(n)$ 表示加载到 LED 灯两端的电压, Q 表示最大延迟抽头个数, b_i 表示时延权重, $r(n)$ 表示线性时不变模块的输出信号。

无记忆非线性模块首先利用线性关系 $I=aU-b$,拟合实际测得的 LED 灯电流电压的线性部分。其中, a 和 b 分别是拟合直线的斜率和截距;接着借鉴功率放大器的 Rapps 模型建立双端饱和模型,表达式为:

$$y(n) = \begin{cases} (a \times r(n) - b) / (1 + (\frac{a \times r(n) - b}{I_{\max}})^{2k})^{1/2k}, & r(n) \geq \frac{b}{a} \\ 0, & r(n) < \frac{b}{a} \end{cases} \quad (2)$$

其中, k 表示曲线的平滑程度, b/a 表示启动电压的大小(当 $U=b/a$,由 $I=aU-b$ 可知, $I=0$), n 表示某个采样时刻, $I_{\max}$ 表示最大允许通过电流。

1.2 非线性补偿方法

基于沃尔泰拉级数的后失真补偿方法是一种适用于解决非线性失真的方法,然而,随着阶数 m 和记忆深度 Q (即最大延迟抽头个数)的增加,沃尔泰拉均衡器的计算复杂度呈指数增长^[6]。为了降低权值更新所需要的计算资源,常采用记忆多项式简化沃尔泰拉级数^[7]。随着人工智能领域的兴起,众多的机器学习算法^[8,9]也被应用到信道均衡中。考虑到 LED 的记忆效应,将接收端当前时刻期望获得的码元值和其之前 Q 个采样时刻实际获得的码元值建立联系,利用 LSTM 对系统进行时域建模,拟合符合系统变化的非线性曲线。同时,LSTM 的权重在每一个时间步长上共享,减少了需要更新的权值系数。通过记忆细胞,克服信号的长期依赖问题。基于 LSTM 的后置补偿原理框图如图 1 所示。接收端信号通过移位寄存器转换为满足 LSTM 输入形式的样本集。其中,训练样本集已知其对应发送端信号值。将训练集样本随机打乱,分成小批次数据集处理。网络的目标函数定义为均方误差,表达式为:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^g (\hat{x}_i - x_i)^2 \quad (3)$$

其中, $\hat{x}_i$ 为第 i 个样本的期望输出, x_i 为第 i 个样本的预测输出, g 表示每一次批处理的总样本数。利用时间反向传播算法和 Adam 优化算法最小化均方误差,更新权值。通过多轮学习,得到满足阈值要求的训练模型。将实际传输的测试样本集导入模型,得到信号的预测值。

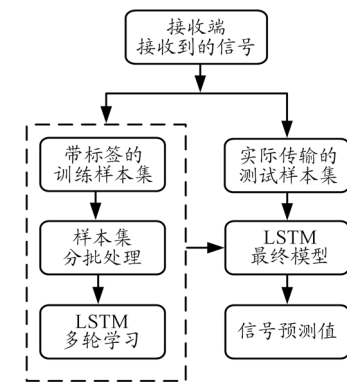


图 1 基于 LSTM 的后置补偿原理框图

1.3 OFDM-VLC 系统的仿真框图

本文借助 Matlab 仿真软件和 TensorFlow 框架搭建的 DCO-OFDM 系统仿真框图如图 2 所示。

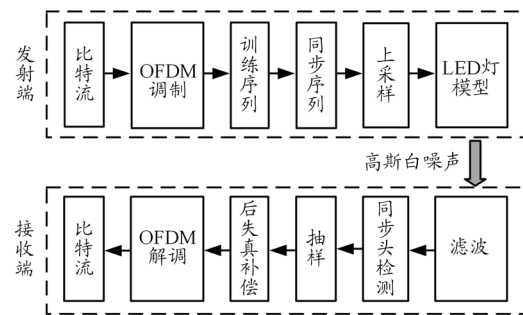


图 2 DCO-OFDM 系统的仿真框图

在发射端,原始二进制比特流经过基带调制、串/并转换分配到 N 个正子载波上,而 N 个负子载波上的数据是正子载波上数据的复共轭。接着,对 $2N$ 路信号进行逆傅里叶变换(IFFT)、并/串转换处理和循环前缀的插入,得到串行的实值离散 OFDM 信号。然后,添加训练序列与同步头。其中,训练序列为一串已知数据的 OFDM 信号,同步头为具有优良自相关性和低互相关性的 ZC(Zadoff-Chu)序列。最后对序列进行上采样和滤波处理。

LED 灯模型的构建包括对原信号幅值进行等比例缩放、增加直流偏置和维纳模型形式的电/光转换。后续利用加性高斯白噪声信道模拟信号的视距传输。

在接收端,信号经过低通滤波、同步头检测和抽样后,提取训练序列对非线性失真补偿器的权值系数进行更新。待模型训练完毕,将后续的 OFDM 信号导入后置均衡器中,得到对应时刻 OFDM 信号的预测值。再通过相应的解调过程,将信号重新转化为二进制比特流。

2 仿真设置和结果

DCO-OFDM 调制和 LED 灯模型的参数如表 1 所示。其中,二进制比特流通过 16QAM 调制形成复数信号。OFDM 调制的 IFFT 长度为 256,循环前缀的长度为 8。LED 灯模型的线性时不变模块参数借鉴文献[9], b_0 、 b_1 和 b_2 分别表示不同延迟时刻的权重。而对于非线性模块,

表 1 系统参数

类型	参数	值
DCO-OFDM 调制	基带调制	16QAM
	傅里叶逆变换长度	256
	携带信息的子载波个数	118
	循环前缀长度	8
LED 灯模型	b_0	1
	b_1	0.15
	b_2	0.1
	a	0.4189
	b	1.116
	k	5
	$I_{\max}$	1 A

本文测量了实验室常见 1 W 白灯的伏安关系,得到了相应的线性参数值 a 、 b 和表征曲线平滑程度的 k 及表征信号允许通过最大电流 $I_{\max}$ 。LED 灯的伏安特性曲线如图 3 所示。可以清楚地发现,LED 正向电流与偏置电压并非非线性关系。影响非线性效应的主要因素有 2 个:直流偏置电压(V_{dc})和输入信号电压的动态范围(V_{pp})。为验证提出方法的有效性,本文比较了基于 LSTM、基于线性-递推最小二乘法估计(Linear-RLS)、基于沃尔泰拉级数(Volterra-RLS)和基于记忆多项式(Memory-RLS)的后失真补偿法的误差向量幅度(EVM)和误码率(BER)性能。不同补偿方法的最大延迟抽头数均为 4 且后 3 种补偿方法采用 RLS 算法更新权值。其中,基

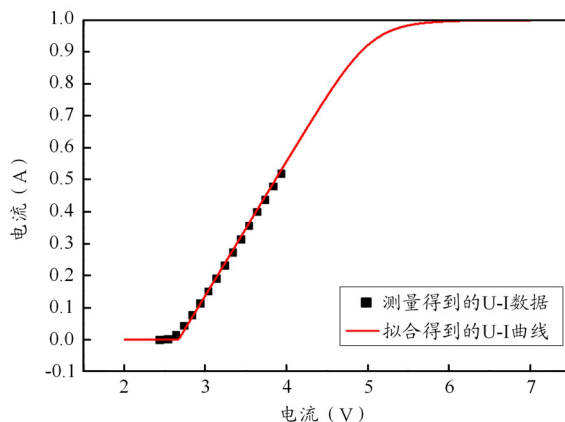


图 3 LED 灯的伏安特性曲线

于 LSTM 的后失真补偿方法隐含层大小为 8, 批量处理大小为 64; 基于沃尔泰拉级数和基于记忆多项式的后失真补偿法多项式最高阶数分别为 2 和 4。信号的总长度为 100 个 OFDM 信号, 其中 20 个为训练序列。

信号的误差向量幅度表示接收机实际接收到的信号与理想信号的接近程度, 是衡量调制信号质量的一种指标。误差向量幅度和偏置电压的关系如图 4 所示, 信号的误差向量幅度随偏置电压的增加先下降后上升, 这对应信号由截止失真到饱和失真的过程。当信号设为偏置电压 (V_{dc})、动态范围 (V_{pp}) 和信噪比 (SNR) 分别为 4 V、2 V 和 20 dB 时, 此时由图 4 中 a~d 点对应的星座图可知, 存在非线性均衡器的信号星座图明显清晰于基于线性均衡器的星座图。仿真结果表明: 只有当信号处于一一对应的非线性映射关系时, 本文提出的基于 LSTM 的后置均衡器才能够有效地改善信号的误差向量幅度性能。

偏置电压对系统误码率的影响如图 5 所示。随着

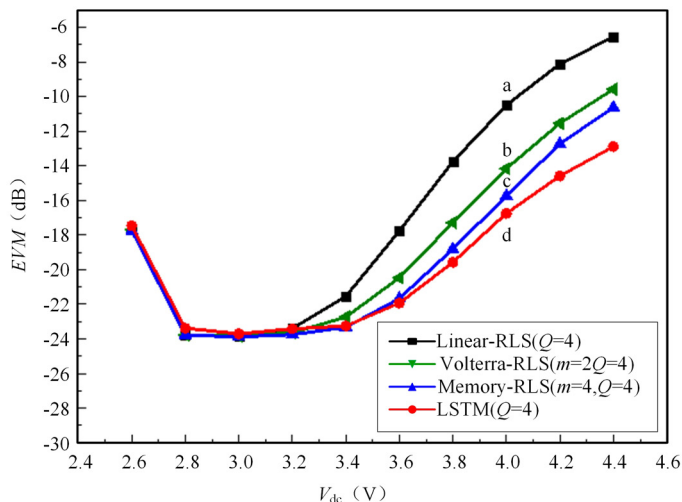
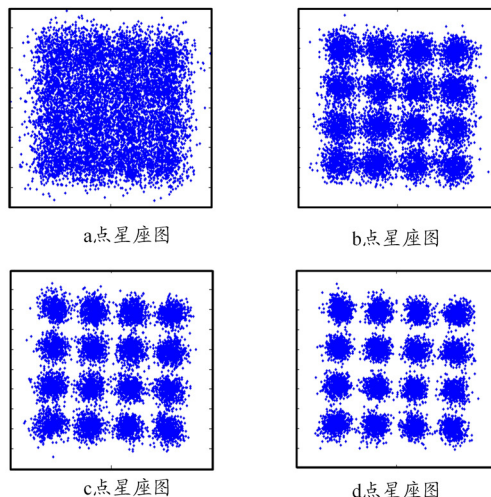
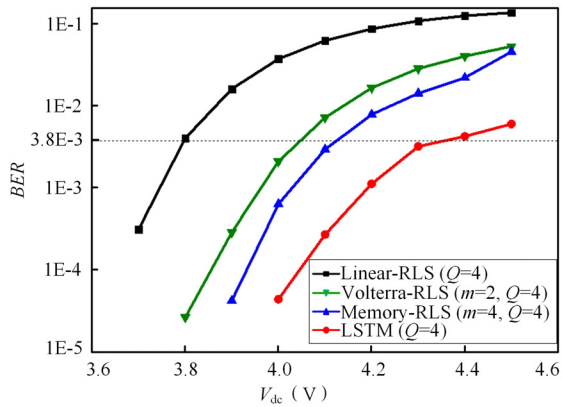
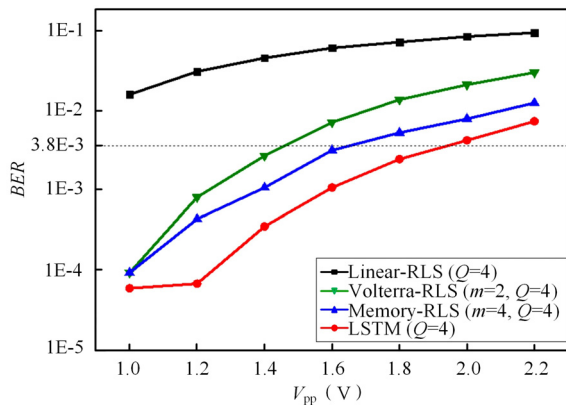
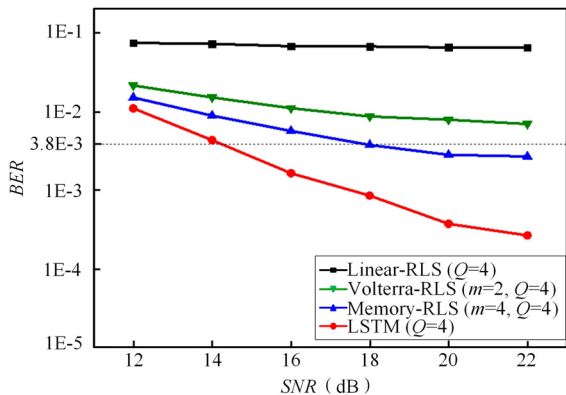


图 4 误差向量幅度和偏置电压的关系 (SNR=20 dB, V_{pp} =2 V)



图5 V_{dc} 与 BER 的关系 ($SNR=20$ dB, $V_{dc}=4.1$ V)图6 信号动态范围与 BER 的关系 ($SNR=20$ dB, $V_{pp}=1.6$ V)图7 SNR 与 BER 的关系 ($V_{dc}=4.1$ V, $V_{pp}=1.6$ V)

偏置电压的增加,4种补偿方法的BER性能逐渐下降。在低于前向纠错码($3.8E-3$)的阈值条件下,基于LSTM的后置均衡器增大了信号允许通过的最大偏置电压。在相同偏置电压下,基于LSTM的后失真补偿法BER性能比其它3种方法高约0.8个量级。

图6显示了信号动态范围和BER的关系,在信号动态范围大于1.6 V时,只有基于LSTM的后置均衡器的BER性能满足前向纠错码的要求。仿真结果证明

基于LSTM的后失真补偿方法提高了信号的振幅范围。

SNR与BER的关系如图7所示,随着SNR的增加,基于LSTM后置均衡器的BER下降明显快于其它3种方法。当4种方法的BER性能均等于 $3.8E-3$ 时,LSTM的SNR需求比其它3种方法小4 dB以上。因此,LSTM较其它方法具有更优的传输性能。

3 结束语

本文首次采用基于LSTM的后失真均衡器对OFDM-VLC系统中的线性与非线性传输损伤进行补偿。仿真结果表明:与基于线性递推最小二乘估计、基于沃尔泰拉级数和基于记忆多项式的后失真补偿方法相比,基于LSTM的后置均衡器提高了系统所允许的偏置电压和信号动态范围,降低了信号的误差向量幅度和所需的SNR。随着SNR的增加,基于LSTM后失真均衡器的信号BER下降趋势更快。这表明基于LSTM的后失真补偿方法能够有效提高信号处于非线性区域时的传输性能。

参考文献:

- [1] LIN B J, TANG X, GHASSEMLOOY Z, et al. Experimental demonstration of an indoor VLC positioning system based on OFDMA [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1–9.
- [2] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Non-linearity effects predistortion in optical OFDM wireless transmission using LEDs [J]. International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems, 2009, 1(2): 143–150.
- [3] 张俊. 可见光通信非线性特性及补偿技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [4] 李翔宇. 可见光通信中非线性失真抑制关键技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [5] MARCELLA C, LORENZO B, GIUSEPPE S, et al. Predicting Human Eye Fixations via an LSTM-based Saliency Attentive Model [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(10): 5142–5154.
- [6] WANG Y, TAO L, HUANG X, et al. Enhanced Performance of a High-Speed WDM CAP64 VLC System Employing Volterra Series-Based Nonlinear Equalizer [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1–7.
- [7] QIAN H, YAO S J, CAI S Z, et al. Adaptive Post-Distortion for Nonlinear LEDs in Visible Light Communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 1–8.
- [8] HAIGH P A, GHASSEMLOOY Z, RAJBHANDARI S, et al. Visible light communications: 170 Mb/s using an artificial neural network equalizer in a low bandwidth white light configuration [J]. Journal of lightwave technology, 2014, 32(9): 1807–1813.
- [9] 徐旭东. 可见光通信中LED的非线性失真补偿技术研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.