

# VLC-LDPC 系统校验矩阵的研究与实现

钟 菲<sup>1</sup>, 曹军胜<sup>2</sup>, 陈云飞<sup>1</sup>, 佟 浩<sup>1</sup>, 刘 慧<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春工程学院电气与信息工程学院, 长春 130021;

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033

**摘要:**可见光信道的噪声来源比较复杂,极大地影响信道中 LDPC 码的抗干扰性能,因此,根据可见光信道的典型特征,选择适合的 LDPC 编码是十分必要的。根据 VLC-LDPC 系统的特点,提出了一种选择构造 LDPC 校验矩阵的方法,通过对校验矩阵的稳定性和稀疏度进行量化计算和对比,构造在可见光条件下,抗干扰性最强的 LDPC 编码,并搭建了基于 FPGA 的 VLC-LDPC 硬件测试系统。仿真和实测结果都表明,用设计的方法选取的校验矩阵构造的 LDPC 码在 VLC 通信系统中抗干扰能力更强,误码率可以达到  $10^{-6}$  dB,此外,还研究了码长、码率和迭代次数对 VLC-LDPC 系统的影响。本研究对于有效降低 VLC-LDPC 系统的误码率,提高通信效率,可以起到良好的辅助作用。

**关键词:**可见光通信;信道编码;校验矩阵;稀疏度

**中图分类号:**TN911.22 **文献标识码:**A **doi:**10.14016/j.cnki.jgzz.2023.08.139

## Research and implementation of VLC-LDPC check matrix

ZHONG Fei<sup>1</sup>, CAO Junsheng<sup>2</sup>, CHEN Yunfei<sup>1</sup>, TONG Hao<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Technology, School of Electronics and Information Engineering, Changchun 130021, China;

<sup>2</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

**Abstract:** The noise sources of the visible light channel is relatively complex, which greatly affect the anti-interference performance of LDPC codes in the channel, therefore, it is necessary to select the suitable LDPC code according to the typical characteristics of the visible channel. According to the characteristics of VLC-LDPC system, a method of selecting and constructing LDPC check matrix is proposed in this paper. By quantizing and comparing the stability and sparsity of the check matrix, LDPC coding with the strongest anti-interference performance under visible light conditions is constructed, and a LDPC-VLC hardware test system based on FPGA is built. Both simulation and actual measurement results show that the LDPC code constructed with the check matrix selected by the method designed in this paper has stronger anti-interference ability in the VLC communication system, and the BER (bit error rate) can reach  $10^{-6}$  dB. In addition, the impact of code length, code rate and iteration times on the LDPC-VLC system is also studied in this paper. This research can effectively reduce the BER of the LDPC-VLC system and improve the communication efficiency, which can play a good auxiliary role.

**Key words:** visible light communication; channel coding; parity check matrix; sparsity

## 1 引言

可见光通信 (Visible Light Communication, VLC) 是一种在发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 提供照明的同时,实现数据通信的技术,具有频带广阔、安全环保、信息保护等优势,已经成为通信领域极受关

收稿日期:2022-12-07

基金项目:国家科技部重点发展计划项目 (No. 2021YFE0107600)、吉林省教育厅科学研究资助项目 (No. JJKH20191240KJ)、吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20200403052SF)

作者简介:钟菲 (1983-),女,博士,讲师,主要研究方向:可见光通信、激光通信。E-mail:zhonf12@qq.com

<http://www.laserjournal.cn>

注的研究方向。但可见光传输的过程中受到的干扰和噪声也更为复杂,为了解决可见光通信传输过程中稳定性与可靠性等问题,研究人员引入信道编码来提升 VLC 系统的抗干扰能力。2017 年 RS 码被用于可见光通信<sup>[1]</sup>;2018 年,Trubo 码也被成功用于提升可见光通信的传输效果<sup>[2]</sup>;但对于无线通信来说,RS 码和 Turbo 码并不是性能最好的编码。目前移动通信标准下 LDPC 码成为 5G 长码的信道编码方案<sup>[3]</sup>。因此,研究人员又将 LDPC 码引入可见光通信<sup>[4,11-12]</sup>,实验证明,加入 LDPC 编码可以有效提高可见光通信系统的编码效率<sup>[14-15]</sup>。

LDPC 码的结构决定了 LDPC 码的性能,而 LDPC 码的结构主要取决于奇偶校验矩阵的构造方法。不同方式构造的校验矩阵在不同的信道传输环境下的适应性也有所不同。可见光信道的信道特点与无线信道大不相同<sup>[5]</sup>,光信道的传输不仅会受到自然背景光、人造光的影响;还有可能会接收到来自通信环境对光源反射的影响;通信系统中接收机的光电传感器产生的散粒噪声和热噪声也会影响系统通信过程的可靠性。所以选择适合可见光通信信道特点的 LDPC 奇偶校验矩阵是十分必要的。

基于此,根据 VLC 系统的特点,提出了一种基于可见光通信系统的 LDPC 奇偶校验矩阵选取方法,通过对校验矩阵的稳定性和稀疏性进行量化计算和对比,选择 Mackay 法构造的矩阵作为 VLC 系统中 LDPC 码的校验矩阵。通过仿真实验,并搭建了基于 FPGA 的可见光通信系统对 VLC-LDPC 系统进行实测,仿真和实测结果可以证明,用设计的方法选取的校验矩阵和 LDPC 码在 VLC 通信系统中抗干扰能力更强,可以减少编码信号在 VLC 信道中受到噪声和码间串扰的影响,有效降低基于 VLC-LDPC 系统的误码率(Bit Error Ratio, BER),提高通信效率,无论从理论还是实际上,对于可见光通信系统都可以起到良好的辅助作用。

## 2 基于 LDPC 的可见光通信系统

### 2.1 基于 LDPC 的可见光通信系统结构

基于 LDPC 的可见光通信系统结构如图 1 所示:信号在发射机部分进行采样和保持,经过量化、A/D 变换、LDPC 编码、调制等处理再通过驱动 LED 转换为光信号发射。在接收机部分通过光电传感器(Photo Detector, PD)来探测到光信号,继续经过解调、解码

和滤波等处理最终得到接收信号。由于 VLC 通信系统的噪声来源更加复杂,并且存在较强的码间串扰和波前畸变,使 LDPC 编码的抗干扰能力在 VLC 信道下被削弱。所以有必要对适合 VLC 信道的 LDPC 码做进一步的研究分析。

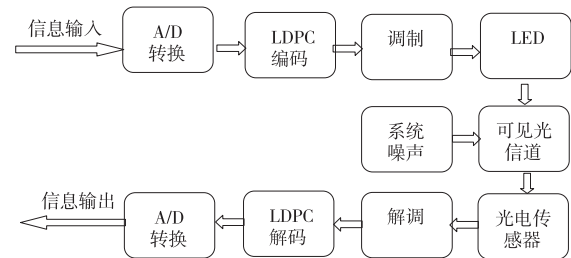


图 1 基于 LDPC 的可见光通信系统结构框图

### 2.2 可见光信道模型

对于一个可见光通信系统<sup>[6]</sup>,可见光信道的脉冲响应  $h(t)$  一般由信道的时延和 LED、PD 的视场角(FOV)决定,用公式可以表示为

$$h(t) = \frac{2t_0}{t^3 \sin^2(FOV)}, t_0 \leq t \leq \frac{t}{\cos(FOV)} \quad (1)$$

这里  $t$  是时延,  $t_0$  是最小时延;一般不考虑无时延即时延为 0 的情况;  $FOV$  为视场角,即为光电转换器的有效接收角度。

图 2 为可见光通信信噪比的空间分布。从图中可以看出 PD 距离房屋墙面越近,信噪比越低。产生这种情况的原因是 PD 距离墙面越近,接收到的来自墙面的折射光的噪声信号也越大,这些折射信号使可见光通信受到很大影响。LED 和 PD 距离越远,环境对光信道的影响越大,传感器散粒噪声和热噪声也越大。这些因素都削弱了 LDPC 码的抗干扰能力。

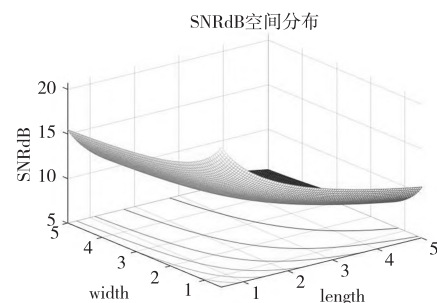


图 2 可见光通信室内 SNR 分布

## 3 VLC-LDPC 系统校验矩阵的稀疏性和稳定性分析

### 3.1 LDPC 码

LDPC 码是一种线性分组码,用符号  $[n, k]$  来表

示<sup>[7,13]</sup>。 $k$  为信息位又称为  $k$  个码元,  $n$  为码长。LDPC 码的奇偶校验矩阵即  $H$  矩阵, 在二元有限域中, 先使用高斯消除法处理计算机随机构造的  $H$  矩阵, 然后对  $H$  矩阵进行列置换, 以得到生成矩阵  $G$ 。生成矩阵  $G$  和校验矩阵  $H$  遵循  $HG^T=0$ , 最后根据公式  $c=sG$ ,  $s$  为待编码信息。可以得出 LDPC 码编码后的码字  $c$ <sup>[8]</sup>。

### 3.2 校验矩阵的稀疏度和稳定性

LDPC 码采用不同的校验矩阵  $H$ , 得到不同的生成矩阵  $G$ , 原始信号投影到伽罗华域的稀疏系数则不同, 从而对整个编码信号的稀疏性和稳定性产生影响。稀疏矩阵去除了大量冗余变量, 仅仅保留与响应变量相关性最强的变量, 所以当生成矩阵  $G$  越稀疏, 编码后的传输信号也就越稀疏, 码字的稳定性越强, 在 VLC 信道的传输过程中, 受到 LED 光散射和折射串扰的影响也就越小。为了对比生成矩阵  $G$  的抗干扰程度, 引入稀疏度和稳定性两个概念来对矩阵进行量化对比。生成矩阵  $G$  由校验矩阵  $H$  决定, 由于  $HG^T=0$ , 因此, 生成矩阵  $G$  和校验矩阵  $H$  的稀疏度反相关, 而生成矩阵  $G$  和校验矩阵  $H$  的稳定性正相关, 因此, 需要选择一种相对稀疏程度较低, 但稳定性较高的校验矩阵  $H$ , 作为 VLC 信道中 LDPC 编码的校验矩阵。

LDPC 码校验矩阵构造方法分为随机化构造和结构化构造<sup>[9]</sup>。结构化构造方法其优点是有固定的结构, 可以基本避免 4 环, 但译码效果整体不如随机化构造方法, 而且正是因为构造的规则固定, 得到的校验矩阵  $H$  行列数常常受限于一些固定的参数, 无法自由选择码率和码长; 而在 VLC 系统中, 传输速率受发射端 LED 的数量变化影响, 对于校验矩阵  $H$  的行和列经常需要动态调整, 因此, 在这里主要研究适合可见光通信环境的随机化的校验矩阵构造方法。

随机化构造方法包括 Gallager 法、Mackay 法、半随机方法等, 在这里分别选择 Gallager 法、Mackay 法以及半随机法三种方法分别构造的校验矩阵  $H$  作为对比, 下面采用量化的方法分别来分析其稀疏性和稳定性。

采用  $\alpha$  和  $\beta$  这两个指标来量化矩阵的稀疏度。其中  $\alpha$  表示矩阵中非零元素的个数;  $\beta$  表示非 0 元素占整个矩阵元素的比例。量化矩阵的稳定性用  $\gamma$ 、 $\Delta$ 、 $\sigma$  表示, 计算步骤如下:

1) 获取校验矩阵  $H_{m \times n}$ ,  $m$  代表矩阵行数,  $n$  代表矩阵列数;

2) 计算  $H$  矩阵的每一列的列重  $\gamma_j = \sum_{i=1}^m \gamma_{i,j}$ , 其中,  $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。  $\gamma_{i,j}$  为矩阵第  $i$  行第  $j$  列的元素。列重  $\gamma_j$  代表每一列非零元素的和, 因为校验矩阵  $H$  为二元矩阵, 因此,  $\gamma_j$  也代表每一列非零元素的个数;

3) 找出  $H$  矩阵的列重最大值  $\gamma_{\max}$  和列重最小值  $\gamma_{\min}$ , 并计算校验矩阵  $H$  整体列重的均值  $\bar{\gamma} = \text{mean}\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j}\right)$ ;

4) 计算校验矩阵  $H$  第  $j$  列列重与平均列重的

误差  $\Delta_j = \gamma_j - \bar{\gamma} = \gamma_j - \text{mean}\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j}\right)$ ;

5) 计算校验矩阵  $H$  第  $j$  列列重与平均列重的样本方差如下式:

$$\sigma_j = (\gamma_j - \bar{\gamma})^2 = \left[ \gamma_j - \text{mean}\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j}\right) \right]^2 \quad (2)$$

$\Delta_j$  和  $\sigma_j$  即可反映每一列列重对比均值的波动程度, 数值越小, 波动越小;

6) 计算校验矩阵  $H$  的整体误差  $\Delta$ 、方差  $\sigma$  以及方差均值  $\bar{\sigma}$ , 进一步描述  $H$  矩阵的稳定性, 验证  $\sigma_j$  的结论。

$$\Delta = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \left[ \gamma_j - \text{mean}\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j}\right) \right] \quad (3)$$

$$\sigma = \sum_{j=1}^n \left[ \gamma_j - \text{mean}\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j}\right) \right]^2 \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n-1} \left\{ \sum_{j=1}^n \left[ \gamma_j - \text{mean}\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j}\right) \right]^2 \right\} \quad (5)$$

通过以上步骤, 可以分别计算出校验矩阵  $H$  的整体误差  $\Delta$  和方差  $\sigma$  以及方差均值  $\bar{\sigma}$ , 以此来描述矩阵  $H$  的稳定性, 矩阵  $H$  的稳定性越强, 编码信息的抗干扰性越强。分别通过 Gallager 法、Mackay 法、半随机方法构造的校验矩阵, 其稀疏性和稳定性参数如表 1、表 2 所示。

表 1 不同构造方法得到  $H$  矩阵的稀疏性量化参数对比

$H$ 矩阵构造方法	MacKay	Gallager	半随机方法
非 0 元素个数 $\alpha$	768	771	639
非 0 元素占比 $\beta$	2.34%	2.35%	1.95%

由表格数据分析可知, 从构造的校验矩阵  $H$  的稀疏程度来看, 半随机方法 > Gallager 法 > Mackay 法, 从内部数据波动程度来看: Mackay 法 > Gallager 法 > 半随机方法。在 AWGN 信道中, 采用半随机矩

阵的 LDPC 码性能比另外两者更好<sup>[10]</sup>,但在 LDPC 码用于可见光信道时,由于 VLC 的信道特点,则需要更加稳定且更加稀疏的生成矩阵。根据生成矩阵  $G$  与校验矩阵  $H$  的稀疏性负相关,稳定性正相关,因此,在 VLC 信道中,选择 Mackay 法来构造 LDPC 码的校验矩阵更为合适, Mackay 法以固定列重为构造基础,数据的波动性最小,因此,构造的生成矩阵鲁棒性更强,在 VLC 系统中的抗干扰能力也最强。

表 2 不同构造方法得到 H 矩阵的稳定量化参数对比

H 矩阵构造方法	Mackay	Gallager	半随机方法
列重均值 $\gamma$	3	3.011	2.496
整体误差 $\Delta$	0	0.023	0.504
最大值 $\gamma_{\max}$	3	4	3
最小值 $\gamma_{\min}$	3	3	1
整体方差 $\sigma$	0	2.965	65.996
均方差 $\sigma$	0	0.012	0.259

## 4 仿真结果分析

### 4.1 不同 H 构造方法下 VLC-LDPC 系统的性能

为了验证按照量化计算选择的校验矩阵在 VLC-LDPC 系统的优势,接下来对 VLC-LDPC 系统进行仿真验证。实验采用 LDPC 编码, BPSK 调制,通信信道为 VLC, LDPC 编码的校验矩阵构造分别为 Mackay 法、Gallager 法、半随机方法,码率为  $1/2$ ,码长  $N = 256$ ,迭代次数  $t = 30$ 。图 3 为 VLC-LDPC 系统在不同 H 校验矩阵下的误码率,可以看出,在信噪比  $E_b/N_0 < 4$  dB 时,三种构造方法的 VLC-LDPC 系统误码率几乎相同,但随着  $E_b/N_0$  不断增大,系统误码率 Mackay 法  $<$  Gallager 法  $<$  半随机方法,验证了上一章的分析结论。

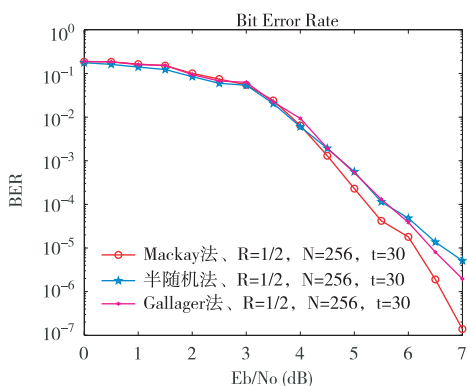


图 3 不同 H 构造方法下 VLC-LDPC 系统的 BER

### 4.2 不同码率对 VLC-LDPC 系统的影响

接下来再进一步分析当校验矩阵  $H$  一定的情况

下,不同的码率对 VLC-LDPC 系统性能的影响。选择 IEEE820.11 协议中规定的四种 LDPC 码率,分别是  $R = 1/2, R_2 = 5/8, R_3 = 3/4, R_4 = 13/16$ 。校验矩阵  $H$  采用 Mackay 法构造,迭代次数  $t = 30$  次。在相同信息为  $k = 128$  时,观察 VLC-LDPC 系统的误码率,仿真结果如图 4 所示。由仿真结果可以看出,在 VLC-LDPC 系统中,校验矩阵  $H$  采用 Mackay 法构造, LDPC 码的四种码率关系为:  $R_1 < R_2 < R_3 < R_4$ ,对应的系统误码率为  $BER(R_1) < BER(R_2) < BER(R_3) < BER(R_4)$ ,即在信息位相同的情况下,随着 VLC-LDPC 系统的码率提高,系统的译码性能下降,反之,随着码率降低,系统的译码性能则越来越好。这是由于 VLC 系统根据光的频闪来接收数据,系统的码率越高,接收信息的敏感度要求越高,在接收端光敏 PIN 检测性能不变的情况下,误码率随之升高。

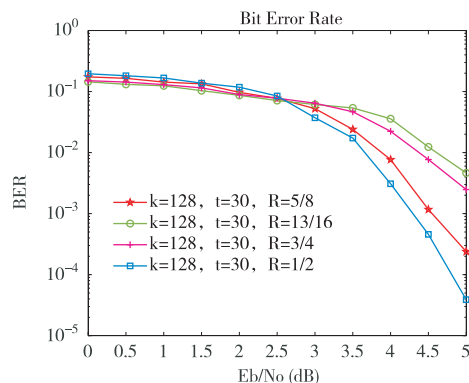


图 4 不同码率下 VLC-LDPC 系统的 BER

### 4.3 不同码长对 VLC-LDPC 系统的影响

为了对比不同码长对 VLC-LDPC 系统的影响,进一步进行实验,码率选择  $R = 13/16$ ,迭代次数  $t = 30$  次, VLC-LDPC 的码长分别为  $N_1 = 256, N_2 = 480, N_3 = 720$ ,仿真结果如图 5 所示。可以看出,在相同码率,相同迭代次数的条件下,在信噪比  $< 3$  的时候,码长增加对误码率几乎没有影响,当信噪比  $> 3$  时, VLC-LDPC 系统的误码率随着码长的增加而降低。在  $E_b/N_0 = 7$  dB 时,码长增加一倍,误码率由  $3.9 \times 10^{-6}$  降低到  $5.51 \times 10^{-7}$ ;码长增加两倍,误码率由  $3.9 \times 10^{-6}$  降低到  $7.67 \times 10^{-8}$ ,基本上码长每增加一倍,误码率降低约一个数量级。

### 4.4 不同迭代次数对 VLC-LDPC 系统的影响

为了对比不同迭代次数对 VLC-LDPC 系统的影响,修改实验参数,校验矩阵  $H$  采用 Mackay 法构造,码率选择  $R = 1/2$ ,码长  $N = 256$ ,信息位  $k = 128$ , LDPC 译码的迭代次数分别为  $t_1 = 30, t_2 = 50, t_3 = 100, t_4 =$

500。由图 6 仿真结果可以看出,对 VLC-LDPC 系统中的 LDPC 码,采用不同的迭代次数,在信噪比 $<3$ 的时候,迭代次数对误码率几乎没有影响,当信噪比 $>3$ 时,VLC-LDPC 系统的误码率随着迭代次数的升高而降低。

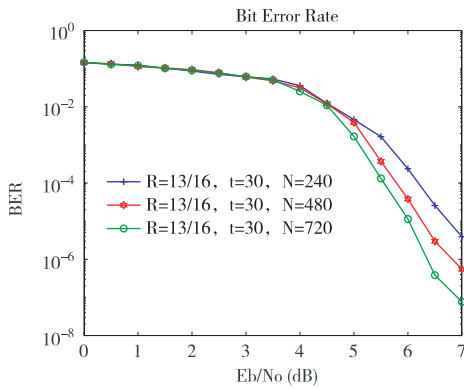


图 5 不同码长下 VLC-LDPC 系统的 BER

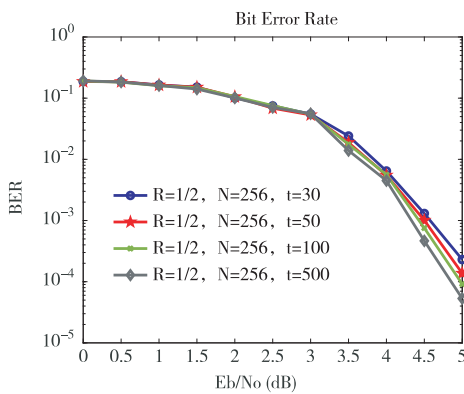


图 6 不同迭代次数下 VLC-LDPC 系统的 BER

## 5 基于 FPGA 搭建的 VLC-LDPC 系统实测

为了进一步验证选择的校验矩阵在 VLC 信道中的传输效果,搭建了基于 FPGA 的 VLC-LDPC 系统平台,如图 7 所示:

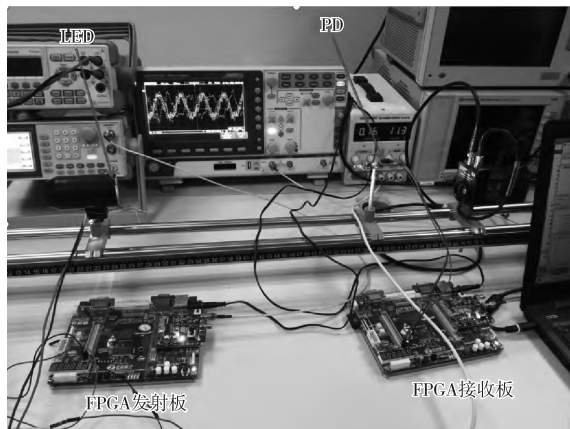


图 7 基于 FPGA 的 VLC-LDPC 实验平台

VLC-LDPC 系统中 LDPC 校验矩阵采用 Mackay 法生成的矩阵,其编码解码,调制解调均采用 FPGA 模块实现,通信信道采用白光 LED 的光信道,发送信号,接收信号及位同步信号的示波器显示如下:

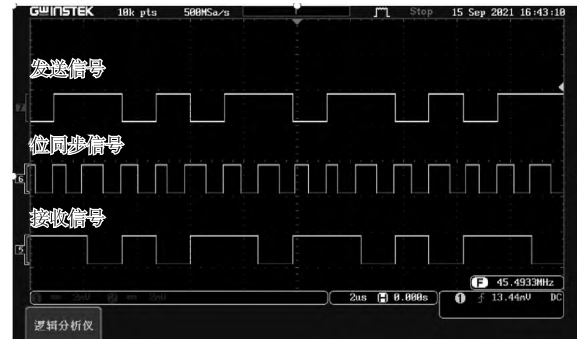


图 8 逻辑分析仪实测发送信号接收信号对比

由上图可以看出,在实际应用中,虽然 VLC 系统存在各种干扰,但由于选取了适合 VLC 信道的校验矩阵,LDPC 码的抗干扰性能在 VLC 系统中得到了很好的发挥,信号传输几乎无失真。接收信号和发送信号存在一定的延时,这是由于系统加入了编码解码及调制解调,但由于 LED 频繁闪烁的频率较高,这样的延时在实际应用中几乎感知不到。

## 6 结论

可见光信道的噪声来源比较复杂,不仅会受到自然背景光、人造光以及散粒噪声和热噪声的影响,还有可能会接收到来自通信环境对光源反射的影响。基于 VLC 的信道环境,提出了一种选择构造 LDPC 校验矩阵的方法,通过对校验矩阵的稳定性和稀疏度进行量化计算和对比,构造可见光条件下,抗干扰性最强的 LDPC 编码,并搭建了基于 FPGA 的 VLC-LDPC 硬件测试系统。仿真和实测结果都表明,用设计的方法选取的校验矩阵构造的 LDPC 码在 VLC 通信系统中抗干扰能力更强,误码率可以达到  $10^{-6}$  dB,且随着码率降低、码长增加、迭代次数增加,系统的误码率逐渐降低。最后,利用 FPGA 模块搭建了 VLC-LDPC 平台,实际检测了系统的传输效果。在未来的工作中,会进一步研究加快 LDPC 的译码速度,缩短系统的运行时间。

## 参考文献

- [1] 胡晓莉,王丽雪,钱永杰,等.基于 H-PPM 的可见光通信系统 RS 编码性能分析[J].应用光学,2017,38(05):751-757.

- [2] Sabitha Gauni, C. T. Manimegalai, K. Kalimuthu. Optical Channel Analysis of Turbo Coded MIMO-OFDM System for Visible Light Communication [J]. *Optical and Microwave Technologies*, 2018, 38(7):161-174.
- [3] 孙楠. LDPC 码校验矩阵构造与译码优化算法研究 [D]. 济南:山东大学, 2019.
- [4] Arslan Khalid, Mehmood Ahmad, Nesruminallah Khan. Enhancement of Visible Light Communication Transceiver using LDPC codes [C]//International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT), 2018, 94-98.
- [5] Zixiong Wang, Changyuan Yu, Wenzhong. Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems [J]. *Optics Express*. 2012, 20(4):4564-4573
- [6] Heng Zhang, Yongjun Li, Weipeng Guan, Jingyi Li, JieHeng Zheng, Xinjie Zhang. The optical fringe code modulation and recognition algorithm based on visible light communication using convolutional neural network [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2019, 75(7): 128-140
- [7] Ritu Gupta, Tara Singh Kamal, Preeti Singh. Concatenated LDPC-TCM codes for better performance of OFDM-FSO system using Gamma Gamma fading model [J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 106: 2247-2260.
- [8] 王秋悦. LDPC 编码在星地光通信中的性能仿真研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2020.
- [9] 张建斌, 卢丹, 陆剑. 基于 PEG-QC 算法的 LDPC 码校验矩阵的构造 [J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(06):730-736.
- [10] 冯云飞, 李建平, 赵力帆. 一种构造低密度奇偶校验码校验矩阵的方法 [J]. *中国传媒大学学报(自然科学版)*, 2008, 15(04):52-56.
- [11] Ezmin Abdullah, Azlina Idris. Comparison between LDPC codes and QC-LDPC codes in term of PAPR in OFDM system with different encoding techniques [C]//2015 Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 2015, 23-26,
- [12] Yishuo Chen, Yanyong Su, Dong Xue, Chao Dong, Research on Performance of Visible Light Communication Based on LDPC Code [C]//International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015, 1461-1465.
- [13] Gupta, Ritu, Tara Singh Kamal, Preeti Singh. Performance of OFDM: FSO Communication System with Hybrid Channel Codes during Weak Turbulence [J]. *Comput. Networks Commun.* 2019. 1306491:1-1306491:6.
- [14] Wang Zhong Xun, Wang Peng Xiang. On Application of LDPC Coded Modulation in Optical Fiber Communication [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 605(12): 1980-1983.
- [15] Khati, Sachin Singh, Pradeepti Bisht, Shiladitya Pujari. Improved decoder design for LDPC codes based on selective node processing [C]//2012 World Congress on Information and Communication Technologies (2012): 413-418.