

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.04.009

基于频域预补偿的 PAM 可见光通信系统

陈桐新, 文 鸿, 陈青辉, 刘克雄

(湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 在可见光通信 (VLC) 系统中, 脉冲幅度调制 (PAM) 由于其原理简单、功率损耗率较低等优势而受到了人们的广泛关注。然而, 光电器件的带宽受限以及非线性效应会导致信号的高频功率衰减, 从而降低信号传输的有效带宽和系统性能。因此, 提出了一种基于频域预补偿的 PAM8-VLC 系统, 通过对 PAM8 信号的 S21 响应曲线进行频域预补偿, 以抑制高频功率衰减对信号传输性能的影响。实验结果表明, 经过 3.5 m 的自由空间可见光链路传输, 相比于未补偿的 PAM8 信号, 采用所提出的预补偿 PAM8 信号, 在误码率低于硬判决前向纠错 (HD-FEC) 门限下, 可以提高 2 dB 的接收灵敏度, 同时, 实现了 1.8 Gbit/s 的系统传输速率。

关键词: 可见光通信; 脉冲幅度调制; 预补偿; 数字信号处理

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)04-0056-07

引文格式: 陈桐新, 文 鸿, 陈青辉, 等. 基于频域预补偿的 PAM 可见光通信系统 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(4): 56-62.

A Frequency-Domain Pre-Compensation Scheme for Pulse Amplitude Modulation Visible Light Communication System

CHEN Tongxin, WEN Hong, CHEN Qinghui, LIU Kexiong

(College of Computing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Pulse amplitude modulation (PAM) signal has attracted wide attention due to its simple application principle and low power consumption in the visible light communication (VLC) system. However, a high-frequency power attenuation of signals may result from the bandwidth limitation and nonlinear effects of optoelectronic devices, which reduces the effective bandwidth and system performance of signal transmission. Therefore, a PAM8-VLC system has thus been proposed based on frequency domain precompensation, which suppresses the impact of high-frequency power attenuation on signal transmission performance by performing a frequency domain precompensation on the S21 response curves of the PAM8 signals. The experimental results show that after a 3.5 m free space visible light link, the pre-compensated PAM8 signals, compared with non-pre-compensated PAM8 signals, can improve the reception sensitivity by 2 dB with an error rate lower than the hard decision forward error correction (HD-FEC) threshold, meanwhile achieving a system transmission rate as high as 1.8 Gbit/s.

收稿日期: 2023-01-18

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2018YFB1801503); 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ6087, 2022JJ5006); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (20c0609, 22A0418)

作者简介: 陈桐新 (1997-), 男, 湖南永州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为可见光通信技术,

E-mail: 1009017843@qq.com

通信作者: 陈青辉 (1978-), 女, 湖南湘乡人, 湖南工业大学高级工程师, 博士, 主要研究方向为光通信与数字信号处理,

E-mail: qhchen@hut.edu.cn

Keywords: visible light communication (VLC); pulse amplitude modulation (PAM); pre-compensation; digital signal processing (DSP)

1 研究背景

可见光通信 (visible light communication, VLC) 基于发光二极管 (light emitting diode, LED) 或者激光二极管 (laser diode, LD) 光源进行无线数据的传输, 解决了传统无线通信的频谱资源匮乏等问题, 具有低成本、无电磁干扰和高保密性等优势^[1]。可见光通信现已经被广泛地应用于室内定位、智能交通和 underwater 探测等领域中^[2]。近年来, 随着正交频分多路复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)、无载波幅度相位调制 (carrierless amplitude/phase modulation, CAP) 和脉冲幅度调制 (pulse amplitude modulation, PAM) 等高阶调制系统的发展, 可见光通信的传输速率被不断提高^[3-5]。其中, PAM 调制与其他调制方式不同的是, 作为一种面向强度调制的单载波调制技术, 其调制/解调结构较为简单、易于实现, 并且无需 OFDM 系统的复杂数字信号处理流程, 具有低功耗和低峰均功率的优点。因此, PAM 调制逐渐成为光通信中被广泛应用的技术之一, 并且已经被标准化为电气与电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) IEEE P802.3bs。

自由空间信道的高频衰落以及器件的非线性效应, 将会导致 PAM 信号的符号间干扰 (symbol interference, ISI), 从而降低系统的传输性能。因此, 文献 [6] 针对信道特性, 提出了一种基于最小均方差 (minimum mean-square error, MMSE) 判决反馈的后置均衡方法。文献 [7] 将波形设计与均衡算法结合, 提出了一种优化脉冲成型和接收滤波的改进方案。文献 [8] 通过引入 k -Means 聚类算法, 以提高接收机的判决准确度。文献 [9] 提出了以独立于信道的预编码克服高频衰落, 但是其计算复杂度较高, 不适用于高阶 PAM-VLC 系统。此外, 文献 [10] 针对 PAM-VLC 系统, 提出了一种基于高斯特征输入和贝叶斯学习的模式量化方法的时域均衡方案, 且其实验结果表明所提方案优于传统的时域均衡方法。文献 [11] 设计了一种内存控制的深度长短期记忆神经网络后均衡器, 以补偿 PAM 的信号失真, 与传统的非线性混合 Volterra 均衡器相比, 其具有显著的复杂性和系统性能优势。

上述均衡方案均仅针对可见光信道的传输特性进行补偿, 而未考虑系统发射/接收机的光电器件非线性所引起的信号失真。由于在可见光通信传输系统中, 传输信号的高频分量会由于光电器件的带宽限制而造成严重损伤, 从而导致系统性能下降。在考虑发射端的信号处理方面, 文献 [12] 设计了一种基于纠错码在有限带宽内的编码方案, 以提高 PAM 信号的传输性能, 但是同时引入了编码开销。而文献 [13] 提出了一种基于神经网络前向均衡结合后均衡的 PAM8 方案, 试验结果证明该方案优于后均衡方案, 但是神经网络结构带来了额外的训练开销和复杂度。基于此, 本文拟提出一种基于正向增益 (S21) 预补偿的 PAM8-VLC 系统, 以提高 PAM8 可见光通信系统在自由空间传输的性能, 并且将其与无补偿的 PAM8-VLC 系统进行了对比实验验证。实验结果表明, 所提出的预补偿方案可以有效地减轻传输过程中的衰减效应, 经过 3.5 m 自由空间传输, 系统传输速率为 1.8 Gbit/s 下, 提出的方案误码性能和传输性能均优于传统 PAM8-VLC 的系统性能。

2 PAM 信号的预补偿原理

2.1 可见光通信系统

本研究中选用的可见光通信系统模型具体如图 1 所示。

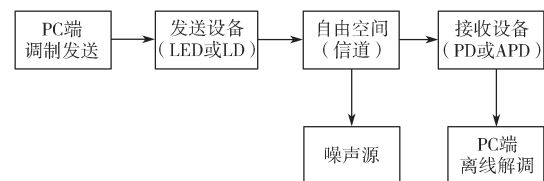


图 1 可见光通信系统模型

Fig. 1 Visible light communication system model

如图 1 所示, 在电脑 (personal computer, PC) 端, 通过离线的数字信号处理 (digital signal processing, DSP) 产生需要传输的调制信号, 再直接调制到作为发射设备的 LED/LD 光源上, 经调制的可见光信号通过自由空间后, 在接收端被光电二极管 (photodiode, PD) 或者雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD) 接收。在这个过程中, 发射端通常采用以光强为基础的调制方案, 接收端一般使用直接检测方法。最后, 将接收端捕获的光电信号转换之后的

数据下载到 PC 端进行离线解调处理, 恢复出原始调制信号。

自由空间光信道作为无线通信的一种, 在传输过程中会受到光衰减效应的影响, 从而造成信号功率损失。同时, 其作为可见光信号, 受到自由空间中灰尘、水蒸气、光源等外界因素的影响较为严重。自由空间光信道模型如下:

$$\mathbf{R}(n) = \mathbf{T}(n) \otimes \mathbf{h}(n) + \mathbf{v}(n). \quad (1)$$

式中: $\mathbf{T}(n)$ 为发射信号;

$\mathbf{R}(n)$ 为 APD 在接收端进行光电转换之后的信号;

$\mathbf{h}(n)$ 为信道响应;

$\mathbf{v}(n)$ 为均值为 0、方差为 2 的高斯白噪声。

2.2 S21 预补偿的 PAM 调制

在可见光通信系统的发射端, 首先生成一串连续的二进制伪随机序列。通过串并转化, 将 K 比特的二进制序列映射为 2^K 种不同的 PAM 符号。每个 PAM 符号对应不同的脉冲输出。本实验中, 采用 8 阶 PAM 调制, PAM 符号对应产生的 8 种 PAM 调制信号分别为 $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7$ 。PAM 映射之后的信号, 还需要通过滤波、限幅、数模转换等操作, 最后进入自由信道传输。

首先, 在接收端进行模数转换, 将模拟信号转换为数字信号。由于实际过程中, 发射端和接收端的工作时钟不可能高度保持一致, 故还需要对接收到的 PAM 信号进行时钟恢复操作。然后, 利用均衡器对时钟恢复后的信号进行均衡操作, 以解决发射信号在通过信道时受到的信道损伤问题。最后, 通过与发射端相反的逆操作以及门限判决, 恢复出 PAM 调制信号, 并进行解映射, 解映射后的比特数据通过并串转换得到原始的二进制伪随机序列。

PAM 调制作为强度调制信号, 可以被直接用于 VLC 系统, 但是由于发射端/接收端的光调制器、光放大器等光电器件的带宽受限, 接收端通常会采用盲均衡算法。在发射端, 假设传输的 PAM 信号为 $\mathbf{T}(n)$, 则在接收端接收的信号 $\mathbf{R}(n)$ 可以表示为如式(2)所示的形式。

$$\mathbf{R}(n) = \sum_{i=0}^{k-1} h_i \mathbf{T}(n-i) + \mathbf{v}(n). \quad (2)$$

式中 h_i 为 i 频点上的信道冲击响应。

一般情况下, 为了通过 $\mathbf{R}(n)$ 反估计 $\mathbf{T}(n)$, 通过设计抽头数为 N 的均衡器对 $\mathbf{R}(n)$ 进行均衡操作。假设均衡器的输入信号分量和均衡器 N 抽头权分量分别如下:

$$\mathbf{R}(n) = [\mathbf{R}_0(n), \mathbf{R}_1(n-1), \dots, \mathbf{R}_{N-1}(n-N+1)]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{W}(n) = [\mathbf{W}_0(n), \mathbf{W}_1(n), \dots, \mathbf{W}_{N-1}(n)]^T, \quad (4)$$

则通过均衡器的输出为 $\mathbf{y}(n) = \mathbf{W}^T(n) \mathbf{R}(n)$ 。在盲均衡算法中, 通过自适应算法对均衡器的抽头系数 $\mathbf{W}(n)$ 进行调节, 从而使 $\mathbf{y}(n)$ 的取值对 $\mathbf{T}(n)$ 星座符号取值慢慢逼近, 实现对 $\mathbf{T}(n)$ 的估计。

在恒模盲均衡算法中, 利用式(5)对 $\mathbf{W}(n)$ 进行调节。

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \mu \mathbf{y}(n) (R - |\mathbf{Z}(n)|^2) \mathbf{R}(n). \quad (5)$$

式中: μ 为步长, 是一个可以自由设置的常数, 其数值通常较小, 其作用在于调节收敛速度;

R 可以表示为

$$R = E(|\mathbf{T}(n)|^4 / |\mathbf{T}(n)|^2), \quad (6)$$

其中 $E(\cdot)$ 为求期望值;

$\mathbf{Z}(n)$ 为均衡器的输出值, 且

$$\mathbf{Z}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{y}(n-i) \mathbf{W}(i). \quad (7)$$

恒模盲均衡算法是基于随机梯度下降的原理完成自适应盲均衡过程。可以参考文献[14]了解其原理与流程。

PAM 信号经过数模转换 (digital-to-analog converter, DAC)、低通滤波、LD 调制和自由空间传输过程, 众多光电器件的信号处理会导致 PAM 信号的高频衰落效应。采用上方提到的后均衡方法可以一定程度地补偿失真的信号, 但是不能改善发射端光源带宽受限的影响。因此, 本文提出了一种基于频域的预补偿方案, 其与后均衡方法相结合, 以进一步提高 PAM8-VLC 系统的传输容量和误码率性能。该方案无需额外的编码开销和硬件成本, 提出的 S21 补偿是在发射端进行预处理, 以补偿 PAM 信号的高频衰落, 从而降低信号失真对系统传输性能的影响。S21 补偿后的 PAM 信号降低了系统的器件带宽要求, 提高了系统的传输速率和传输性能。该补偿方案主要包括以下步骤:

第一步, 在发射端产生 PAM 测试信号, 该测试信号经过可见光通信链路的一系列光电处理后, 在接收端通过光电探测器进行接收;

第二步, 对 PAM 测试信号和接收信号的频域进行计算, 得到 k 频点的 S21 补偿系数 $\mathbf{S}_{21}(k) = \hat{\mathbf{R}}(k) / \hat{\mathbf{T}}(k)$, 式中 $\hat{\mathbf{T}}(k)$ 和 $\hat{\mathbf{R}}(k)$ 分别为 PAM 测试信号及接收信号 k 频点的频域表达式;

第三步, 对需要传送的 PAM 数据信号 $\mathbf{T}_{\text{data}}(n)$ 在发射端进行预补偿, 因此 S21 预补偿后发射端的 PAM 数据信号可表示为 $\mathbf{T}_{\text{data}}(n) = \mathbf{T}(n) / \mathbf{S}_{21}(n)$ 。

3 实验装置和步骤

图2、3为基于预补偿的PAM8-VLC系统结构图

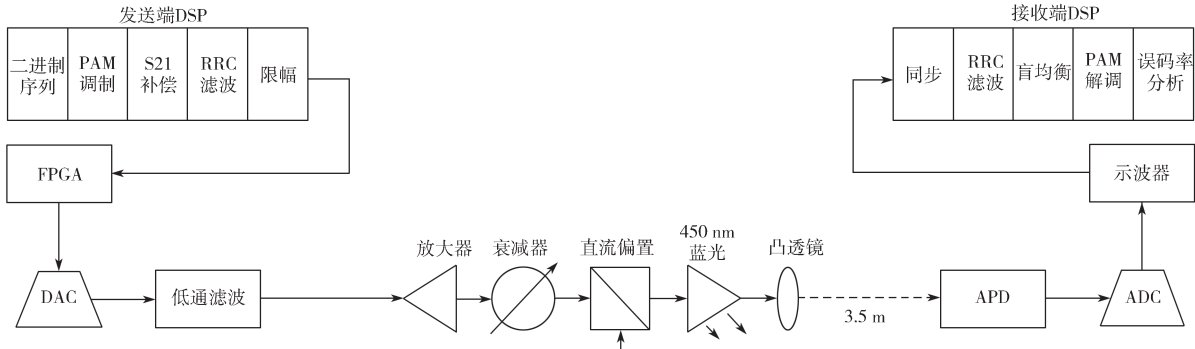
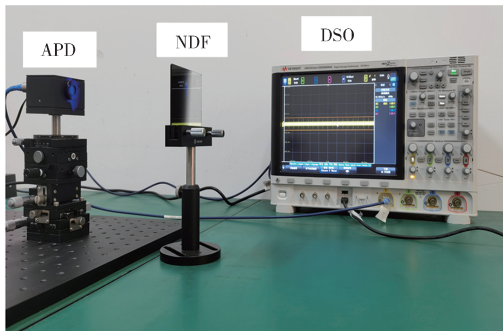
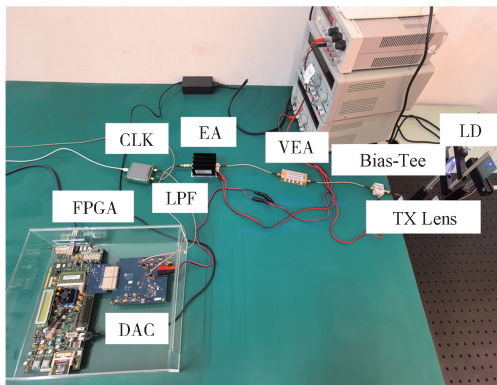


图2 基于预补偿的PAM8-VLC系统结构图

Fig. 2 PAM8-VLC system structure diagram based on pre-compensation



a) PAM8-VLC系统接收端



b) PAM8-VLC系统发射端

图3 可见光通信实验装置实物图

Fig. 3 Physical picture of visible light communication experimental device

如图2和3所示，在发射端，PAM8数字信号处理流程在Matlab平台实现。首先，生成伪随机二进制序列（pseudo random binary sequence, PRBS），再映射成PAM8符号，对生成的信号进行频域S21预补偿，接着对预补偿的信号采用根升余弦（root raised cosine, RRC）滤波器和数字限幅。其中，RRC滤波器的滚降因子为0.2，数字限幅为12 dB。所产生的PAM8信号被加载到可编程逻辑器件（field programmable gate array, FPGA）的只读存储器中，

和其对应的实验装置实物图，图中CLK为时钟信号，NDF（neutral density filter）为中性密度遮光片。

并通过14位、2.5 GSa/s的数字模拟转换器（DAC），以产生PAM8模拟信号。模拟信号经过低通滤波（low-pass filter, LPF）以抑制高阶谐波和噪声，随后通过偏置三通与直流（direct current, DC）偏置级联，用于驱动450 nm蓝光LD实现光电转换，生成PAM8可见光信号。此外，通过电放大器（electrical amplifier, EA）与可变电衰减器（variable electrical attenuator, VEA）对PAM8调制信号的峰峰电压值进行调谐，使其在LD的线性调制范围内。

PAM8可见光信号通过双凸透镜（Lens）聚集后，在自由空间进行3.5 m距离的传输。在接收端，交流耦合雪崩光电二极管APD将通过中性密度遮光片NDF的PAM8可见光信号进行光电转换，得到的PAM8电信号送入带有10位模数转换器（analog-to-digital convertor, ADC）的型号为Keysight DSOX6004A的数字存储示波器（digital serial oscilloscope, DSO），进行接收和DSP处理，其采样速率为10 GSa/s。接收端的DSP处理流程如下：首先，对接收信号进行符号同步，再经过RRC匹配滤波以及信道盲均衡得到恢复的PAM8符号，接着对符号进行解映射，并将得到的比特流进行误码率（bit error rate, BER）计算和分析。

4 实验结果与讨论

无预补偿情况下，实验所得发射端和接收端的PAM8信号频谱分别如图4a和图4c所示。由图4不难看出，PAM8信号的低频点幅度较为平坦，随着频率增加，高频点幅度衰减严重，由衰减公式 $dB = dB_{m1} - dB_{m2}$ 可知，高频点的相对衰减达25 dB。这无疑降低了PAM8信号的有效传输带宽，且高频点的信号被噪声淹没，误码率随之急剧增加。

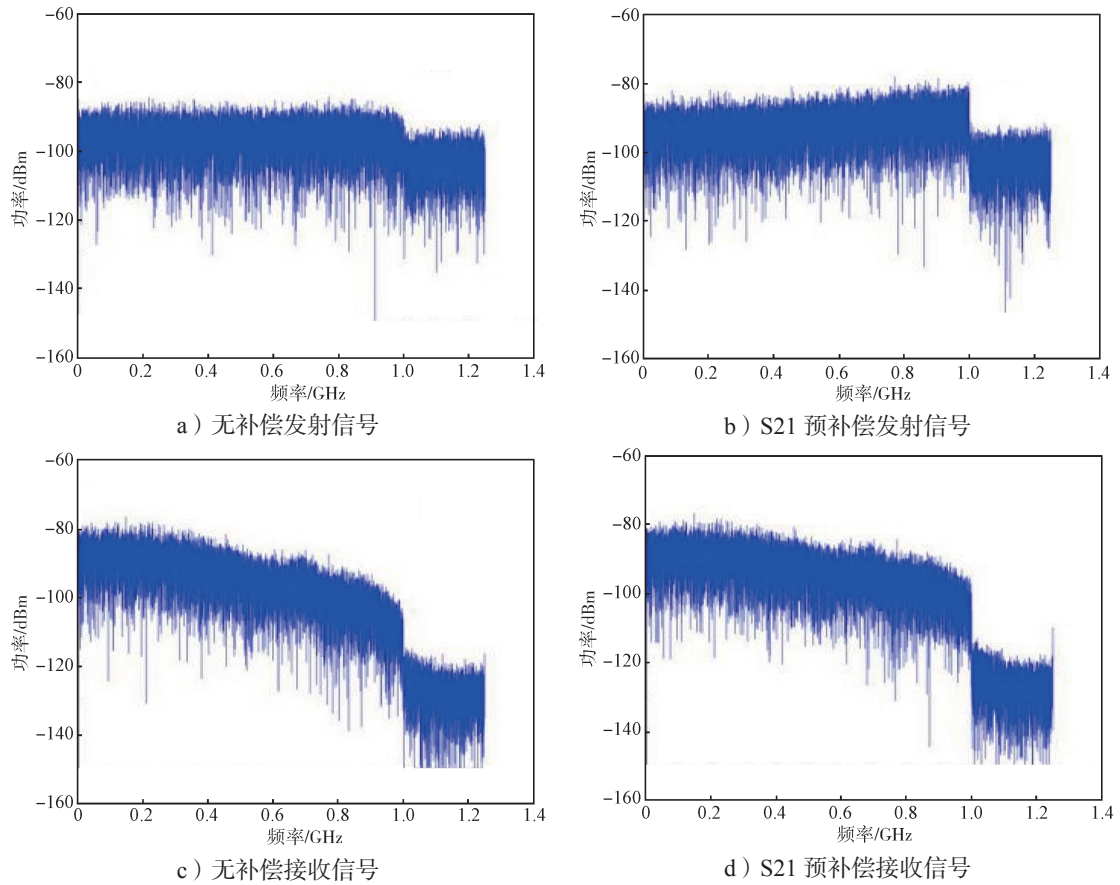


图4 发射/接收端 PAM8 信号频谱

Fig. 4 PAM8 signal spectrum at transmit/receiving terminals

图 5a 所示为测量所得的 S21 预补偿响应曲线，图 5b 所示为发射端的 S21 预补偿因子曲线。由图 5b 可以看到，所需的补偿因子随着频率的增加而变大。在预补偿情况下，发射端和接收端的 PAM8 信号频谱分别如图 4b 和 4d 所示。对比预补偿前后的 PAM8

信号频谱，不难发现预补偿后的发射信号幅度呈现出缓慢上升的变化趋势，预补偿后接收信号的幅度相对较为平坦，高频衰减降低到了 13 dB，缓解了系统器件对 PAM8 信号的高频衰减效应，从而验证了 S21 预补偿方案的有效性。

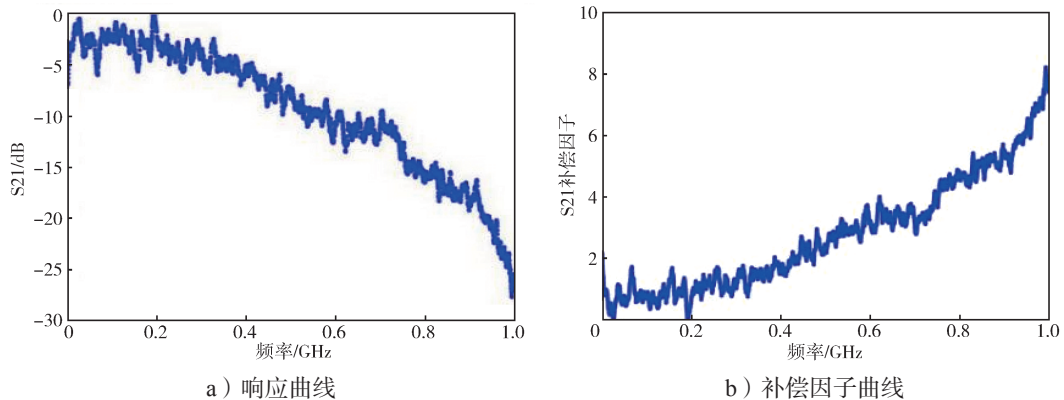


图5 S21 预补偿的响应曲线与补偿因子曲线

Fig. 5 Response curve and compensation factor curve of S21 pre-compensation

在无补偿及 S21 预补偿情况下，实验比较了其不同接收光功率对应的 PAM8-VLC 系统误码率，所得结果见图 6。实验中，电衰减器固定为 12 dB，直

流偏置电压设置为 4.4 V，自由空间传输距离为 3.5 m。接收光功率通过调谐 APD 前置中性密度遮光片的透光率来实现。

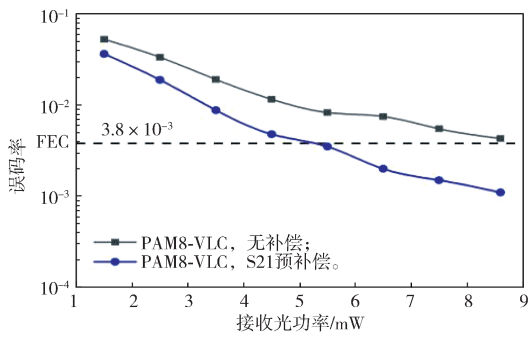
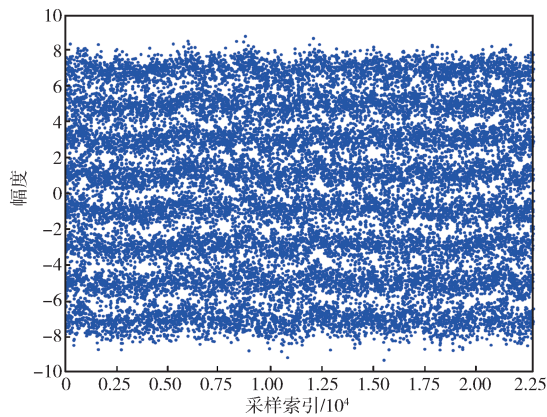


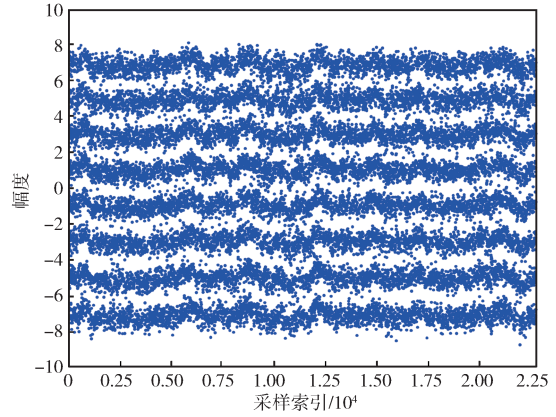
图 6 无补偿和 S21 预补偿的接收光功率 - 误码率曲线

Fig. 6 Received optical power-error rate curves without a compensation and S21 pre-compensation

由图 6 所示接收光功率 - 误码率曲线可以看出, 随着接收光功率的增加, 无补偿及 S21 预补偿情况下



a) 无补偿



b) S21 预补偿

图 7 接收端的 PAM8 信号星座图

Fig. 7 PAM8 signal constellation diagram at the receiving terminal

观察图 7 可以发现, 无补偿情况下的星座较为模糊, 噪声干扰严重, 其原因在于前文分析的高频点信号被噪声所淹没; 而采用 S21 预补偿后, 由于减轻了高频衰减效应, PAM8 信号的星座更为清晰, 更易于判决解调。

对 PAM8-VLC 系统的误码性能随 DAC 采样率的变化关系进行分析, 所得结果如图 8 所示。由图可知, 总体来说, 系统的误码性能随着采样速率的增加而降低。无补偿情况下, 采样速率低于 925 MSa/s 才能达到 HD-FEC 门限要求, 而 S21 预补偿后采样速率低于 970 MSa/s 也能满足 HD-FEC 的门限要求。由于调制速率与采样速率、调制阶数正相关, 采用 PAM8 调制, 对应的调制速率约可以提高 165 Mbit/s。意味着 S21 预补偿后的 PAM8 信号与未补偿的 PAM8 信号相比, 在有限带宽的可见光信道中可以实现更高

的误码率均降低, 这表明系统的误码性能逐渐变好。与无补偿相比, 若接收光功率为 5.5 mW, 则 S21 预补偿后的误码率从 8.3×10^{-3} 降低至 3.6×10^{-3} ; 若接收光功率为 8.5 mW, 则 S21 预补偿后的误码率从 3.9×10^{-3} 降低至 1.1×10^{-3} 。这说明无补偿时, PAM8-VLC 系统的误码率很难达到硬判决 (hard decision forward error correction, HD-FEC) 门限误码率要求 (即误码率为 3.8×10^{-3})。若误码率达到 HD-FEC 门限条件, 则无补偿情况下的接收光功率需要 8.6 mW, 而采用 S21 预补偿后的接收光功率仅需要 5.2 mW, 提高了约 2 dB 的接收灵敏度, 可见预补偿处理有效地提升了系统的能量效率。

固定接收光功率为 5.5 mW, 测试无补偿和 S21 预补偿情况下, 接收端的 PAM8 信号星座图, 分别如图 7a 和 7b 所示。

的传输速率。具体来看, 采样率为 900 MSa/s 时, 与无补偿相比, S21 补偿方案的误码率从 3.4×10^{-3} 降到 1.2×10^{-3} ; 采样率为 950 MSa/s 时, 误码率则从 4.6×10^{-3} 降低至 2.6×10^{-3} 。

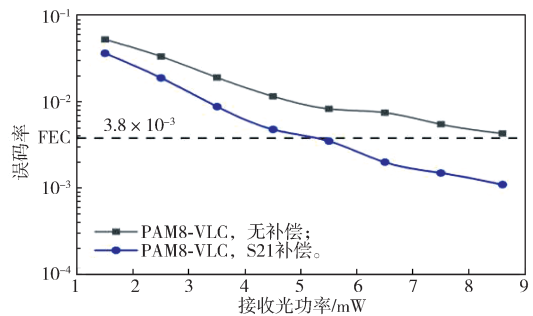


图 8 无补偿和 S21 预补偿的采样速率 - 误码率曲线

Fig. 8 Sampling rate-error rate curves without a compensation and S21 pre-compensation

5 结语

为提高可见光通信系统在有限带宽下的传输速率和性能,本文提出了一种基于S21预补偿的PAM可见光信号传输方案。通过对PAM信号经VLC系统的S21频域响应曲线进行分析与预补偿,降低了光电器件和传输链路所导致的PAM信号高频衰减效应,实现了1.8 Gbit/s的系统传输速率。实验结果表明,经过3.5 m的自由空间传输,与未补偿的PAM8信号相比,采用提出的S21预补偿方案在满足HD-FEC门限下提高了2 dB的接收灵敏度,同时达到了更高的采样率,意味着在有限带宽的系统中,可以实现更高的系统传输速率。

参考文献:

- [1] 迟楠, 陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 6-17.
CHI Nan, CHEN Hui. Progress and Prospect of High-Speed Visible Light Communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(3): 6-17.
- [2] CĂILEAN A M, DIMIAN M H. Current Challenges for Visible Light Communications Usage in Vehicle Applications: a Survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2681-2703.
- [3] 徐宪莹, 岳殿武. 可见光通信中正交频分复用调制技术[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 516-527.
XU Xianying, YUE Dianwu. Orthogonal Frequency Division Multiplexing Modulation Techniques in Visible Light Communication[J]. Chinese Optics, 2021, 14(3): 516-527.
- [4] 聂云桂, 陈晨, 简鑫, 等. 基于PWC编码的mCAP可见光通信系统实验[J]. 光通信技术, 2022, 46(2): 41-44.
NIE Yungui, CHEN Chen, JIAN Xin, et al. mCAP Visible Light Communication System Experimental Based on PWC[J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(2): 41-44.
- [5] SAIED O, LI X W, RABIE K M. DFT Spread-Optical Pulse Amplitude Modulation for Visible Light Communication Systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 15956-15967.
- [6] SHEN H, XU W, ZHAO K L, et al. Non-Alternating Globally Optimal MMSE Precoding for Multiuser VLC Downlinks[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 608-611.
- [7] MONTEIRO F, COSTA W, NEVES J, et al. Experimental Evaluation of Pulse Shaping Based 5 G Multicarrier Modulation Formats in Visible Light Communication Systems[J]. Optics Communications, 2020, 457: 124693.
- [8] MA J, HE J, SHI J, et al. Nonlinear Compensation Based on K-Means Clustering Algorithm for Nyquist PAM-4 VLC System[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(12): 935-938.
- [9] WEN H, CHEN H, CHEN Q, et al. Performance Enhanced Dual-Mode Index Modulation OFDM with OCT Precoding in VLC Systems[J]. Optics Communications, 2023, 530: 129191.
- [10] LU Xingyu, LIU Yuanyuan, CHEN Junjie, et al. Patterns Quantization with Noise Using Gaussian Features and Bayesian Learning in VLC Systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(12): 3777-3785.
- [11] LU X Y, LU C, YU W X, et al. Memory-Controlled Deep LSTM Neural Network Post-Equalizer Used in High-Speed PAM VLC System[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7822-7833.
- [12] BELLI R, RUNGE C, PORTUGHEIS J, et al. A Capacity-Approaching Coding Scheme for M-PAM VLC Systems with Dimming Control[J]. Optics Communications, 2022, 509: 127891.
- [13] BO Xu, MIN Tianxin, YUE Chik Patrick. Design of PAM-8 VLC Transceiver System Employing Neural Network-Based FFE and Post-Equalization[J]. Electronics, 2022, 11(23): 3908.
- [14] WANG H D, ZHOU W, YU J J. PAM-4 Signal Delivery in one Radio-over-Fiber System[J]. Optical Engineering, 2017, 56(10): 56-61.

(责任编辑: 廖友媛)