

引用本文: 卢美霞, 郭心悦. 基于非线性编码的叠加概率整形 20QAM 星座方案[J]. 光通信技术, 2024, 48(2): 56-61.

基于非线性编码的叠加概率整形 20QAM 星座方案

卢美霞, 郭心悦*

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对多输入多输出可见光通信系统计算复杂度高、相邻星座点容易相互交叠的问题, 提出一种基于非线性编码的叠加概率整形(PS)20 阶正交幅度调制(20QAM)星座方案。首先, 基于提出的非线性编码方程, 将等概率的 4 级电平信号编码为 PS 5 级电平信号。然后, 将 PS 5 级电平信号映射为梯形形状的 PS 5QAM 信号以最大化叠加星座的欧氏距离。最后, 将 PS 5QAM 信号与等概率的 4QAM 信号进行翻转叠加得到 PS 20QAM 信号。实验结果证明: 所提出的叠加 20QAM 星座方案对系统的非线性失真有较强的鲁棒性, 比叠加 16QAM、叠加 24QAM 星座方案的误码率性能更优。

关键词: 可见光通信; 非线性编码; 多输入多输出; 概率整形; 叠加星座

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)02-0056-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Superposed probabilistic shaping 20QAM constellation scheme based on nonlinear coding

LU Meixia, GUO Xinyue*

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problems of high computational complexity and easy overlap of adjacent constellation points in multi-input multi-output visible light communication systems, a superposed probabilistically shaped (PS) 20-level quadrature amplitude modulation(20QAM) constellation scheme based on nonlinear coding is proposed. Firstly, based on the proposed nonlinear coding equation, a 4-level signal with equal probability is encoded into a PS 5-level signal. Then, the PS 5-level signal is mapped into a trapezoid-shaped PS 5QAM signal to maximize the Euclidean distance of the superposed constellation. Finally, the PS 5QAM signal is superposed with an equal-probability 4QAM signal to obtain a PS 20QAM signal. The experimental results prove that the proposed superposed 20QAM constellation scheme has strong robustness to nonlinear distortion of the system and better bit error rate performance than superposed 16QAM and superposed 24QAM constellation schemes.

Key words: visible light communication, nonlinear coding, multiple-input multiple-output, probabilistic shaping, superposed constellation

0 引言

现有的研究显示, 可见光通信(VLC)系统的数据传输速率主要受到商用发光二极管(LED)调制带宽的限制。为了提升数据传输速率, 利用多输入多输出(MIMO)技术实现多个数据流的同时传输是一种直接

收稿日期: 2023-12-19。

作者简介: 卢美霞(1998—), 女, 广西来宾人, 硕士研究生, 本科毕业于中南民族大学电子信息工程专业, 目前就读于上海理工大学光电信息与计算机工程学院信息与通信工程专业, 主要研究方向为可见光通信中的信号处理技术。

* **通信作者:** 郭心悦(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线通信技术。



而有效的方法^[1]。然而, 由于 VLC 系统采用的是强度调制和直接探测方式, 导致 MIMO VLC 信道之间的相关性较高^[2]。当信道高度相关时, 接收端难以分离多个数据流, 从而无法获得复用增益。为了解决这一问题, 研究者提出了一种结合叠加星座技术的 MIMO VLC 系统。这种技术通过识别叠加星座图来实现 MIMO 检测, 因此不受信道相关性的影响。文献[3]首次提出了叠加星座的概念, 通过 2 个 LED 分别发送 4 阶正交幅度调制(4QAM)和 16QAM 信号, 并在接收端叠加形成 64QAM 信号。然而, 由于不平衡的功率分配, LED 产生的光信号质量受到影响, 从而导致误码率(BER)性能下降。为了解决这一问题, 文献[4]提出了一种基于 2×

2 MIMO VLC 系统的翻转叠加星座方案。该方案保证了 2 个发射信号以等功率叠加,同时采用了格雷编码技术,提高了接收信噪比(SNR),使 BER 性能得到了进一步提升。为了补偿 LED 的非线性失真,文献[5]研究了结合概率整形(PS)技术的叠加星座方案。通过实验验证,该方案能有效补偿 LED 的非线性失真,提高系统对非线性效应的鲁棒性。然而,该方案中的 PS 信号是通过常量分布匹配器(CCDM)获得的,增加了系统的冗余比特量和计算复杂度^[6-7]。文献[8]提出了一种基于非线性编码的叠加 PS 36QAM 星座方案。该方案采用非线性编码技术,将均匀分布的 4 阶脉冲幅度调制(PAM4)信号转换为具有概率整形特性的 PAM6 信号^[9]。然而,由于采用 PAM 信号进行叠加,接收端的叠加星座中的相邻点容易发生交叠现象。

为此,本文提出一种基于非线性叠加 PS 20QAM 星座方案,该方案通过将等概率的 4QAM 信号和非线性编码的 PS 5QAM 信号以翻转叠加的方式在接收端合成 PS 20QAM 信号,从而提高系统的抗噪声能力和接收 SNR。

1 叠加 PS 20QAM 星座方案原理

本文提出的基于非线性编码的叠加 PS 20QAM 星座方案原理图如图 1 所示。基本原理如下:首先,将等概率的 4 级电平信号转换为 PS 5 级电平信号;然后,将 5 级电平信号映射为梯形形状的 PS 5QAM 信号;最后,将梯形形状的 PS 5QAM 信号与均匀分布的 4QAM 信号以翻转叠加方式进行叠加,在接收端可以得到 PS 20QAM 信号。其中,PS 5QAM 信号由以下 2 个步骤产生。

第一步,基于非线性编码方程,将均匀分布的 4 级电平信号转换为非均匀分布的 5 级电平信号。非线性编码方程表达式为

$$v_n = u_n + \left\lfloor \frac{v_{n-1}}{3} \right\rfloor \quad (1)$$

其中, n 表示时间索引,非线性算子 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整函数。 u_n 表示原始的 4 级电平信号, $u_n \in (0, 1, 2, 3)$; v_n 表示编码后的 5 级电平信号, $v_n \in (0, 1, 2, 3, 4)$ 。

式(1)表明,编码后的信号 v_n 与上一时刻的信号 v_{n-1} 和当前输入的信号 u_n 有关。因此, v_n 的状态构成了一个记忆长度为 1 的马尔可夫链。

定义由式(1)所给出的马尔可夫链的一步转移概率为

$$P_{z,j} = P(v_n = j | v_{n-1} = z) \quad (2)$$

其中, z 和 j 表示编码后的 5 级电平信号,它们的取值范围是 $[0, 4]$ 。

于是,得到概率转移矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 0 \\ 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 0 \\ 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 0 \\ 0 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \\ 0 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(3),可得到状态概率向量 $w^{(0)}$ 为

$$w = [1/6 \ 1/4 \ 1/4 \ 1/4 \ 1/12] \quad (4)$$

5 级电平信号的概率即由式(4)中的状态概率向量 w 给出。

第二步,为实现 QAM 叠加,将 PS 5 级电平信号进一步映射为 PS 5QAM 信号。本文设计了一个梯形形状的 5QAM 星座,以尽可能增大接收 20QAM 星座的最小欧氏距离(MED),提升系统的抗噪声性能。

添加偏置和翻转叠加过程如图 2 所示。借鉴文献[4]中的翻转叠加思想,将生成的 PS 5QAM 信号与等概率 4QAM 信号进行叠加。首先,求取 PS 5QAM 信号的最优偏置值,以实现 2 个发射机信号的等功率叠加;然后,对信号进行功率归一化;最后,根据 4QAM 信号的值对 PS 5QAM 信号进行翻转叠加。与文献[4]

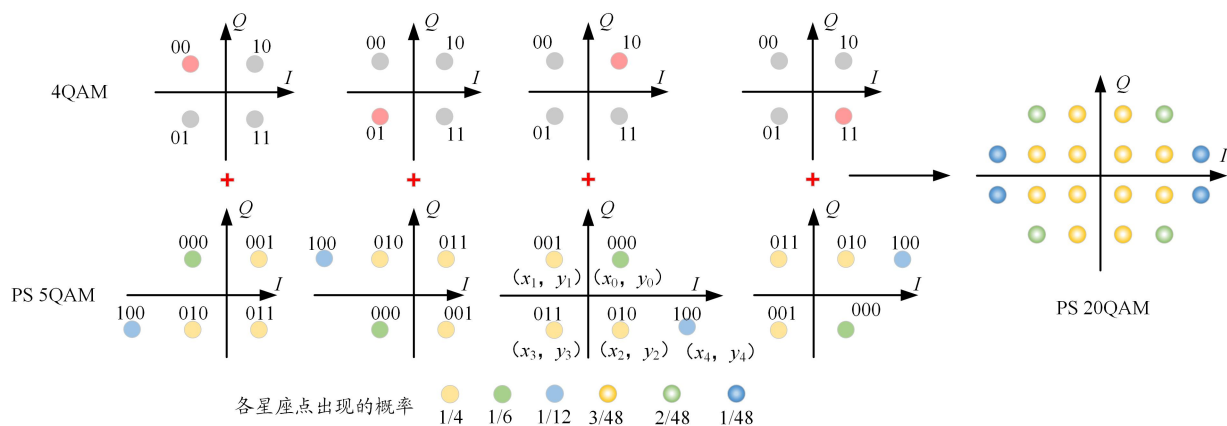


图 1 基于非线性叠加 PS 20QAM 星座方案原理

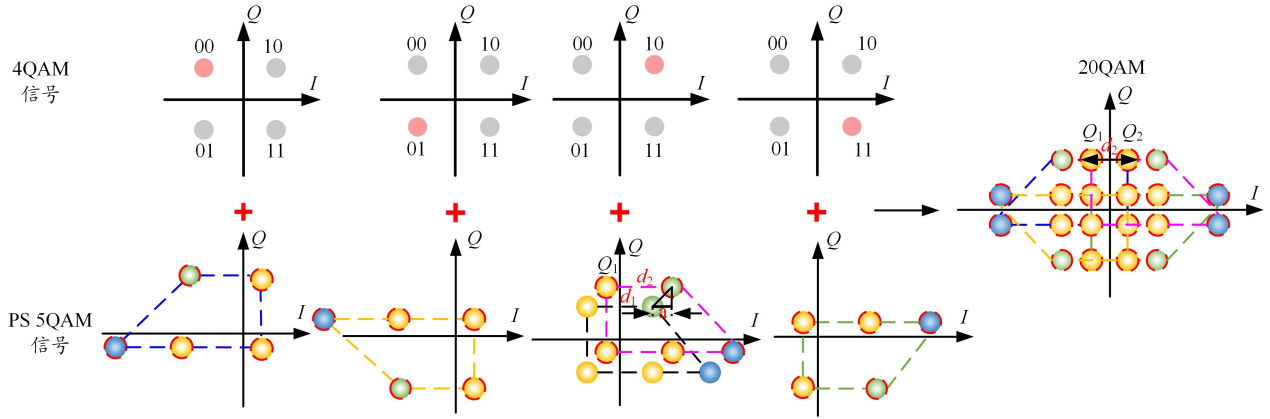


图2 添加偏置和翻转叠加过程

不同的是,由于 5QAM 信号是 PS 信号,因此,本文重新推导了最优偏置值,推导过程如下:

由于最优偏置可以使得 4QAM 和 PS 5QAM 星座以相等功率翻转叠加,得到星座点均匀分布的 20QAM 星座。因此,图 2 中 20QAM 星座图的 Q_1 、 Q_2 这 2 个星座点应满足

$$|Q_2 - Q_1| = d_2 \quad (5)$$

其中, d_2 是 5QAM 星座的 MED, 也是叠加 20QAM 星座的 MED。假设添加最优偏置前 5QAM 星座图中的 Q_1 可以用一个复数 Q_{5QAM} 表示为

$$Q_{5QAM} = x_1 + y_1 i \quad (6)$$

其中, i 表示虚数单位, x_1 和 y_1 分别表示 Q_1 的实部和虚部。添加最优偏置后, Q_1 的坐标可以表示为

$$Q'_{5QAM} = (x_1 + a) + (y_1 + a)i \quad (7)$$

其中, a 是最优偏置值。

因为添加偏置后的 5QAM 信号功率增加了,所以 5QAM 星座需要再次进行功率归一化,其 MED 将减小为 d_2 。 d_2 的表达式为

$$d_2 = \frac{d_1}{\sqrt{P_{av}}} \quad (8)$$

其中, d_1 表示归一化 5QAM 星座的 MED。 P_{av} 是添加偏置后 5QAM 星座的平均功率,可以表示为

$$P_{av} = \sum_{k=0}^4 P_k \times [(x_k + a)^2 + (y_k + a)^2] \quad (9)$$

其中, $k=0, 1, \dots, 4$, P_k 是 5QAM 星座中的星座点 Q_k 出现的概率, x_k 和 y_k 分别表示图 1 中 5QAM 星座点的实部和虚部。因此,此时 Q_1 的坐标可以表示为

$$Q'_{5QAM} = \frac{(x_1 + a) + (y_1 + a)i}{\sqrt{\sum_{k=0}^4 P_k \times [(x_k + a)^2 + (y_k + a)^2]}} \quad (10)$$

根据翻转叠加规则^[4], 20QAM 星座中的 Q_1 、 Q_2 的

坐标可以表示为

$$\begin{cases} Q_1 : Q_{20QAM} = \frac{(x_1 + a) + (y_1 + a)i}{\sqrt{\sum_{k=0}^4 P_k \times [(x_k + a)^2 + (y_k + a)^2]}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}i \\ Q_2 : Q_{20QAM} = \frac{-(x_1 + a) + (y_1 + a)i}{\sqrt{\sum_{k=0}^4 P_k \times [(x_k + a)^2 + (y_k + a)^2]}} - \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}i \end{cases} \quad (11)$$

将 Q_1 、 Q_2 和式(8)代入式(5)、式(9)就可以解出 a 。

$$a = \frac{2C_2 - 4x_1 + 4x_1 d_1 - d_1^2}{8x_1 - 4d_1 - 2C_1} \quad (12)$$

其中, 相关系数 C_1 和 C_2 由式(13)和式(14)计算得到

$$C_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 (x_k + y_k) + \frac{1}{3} (x_0 + y_0) + \frac{1}{6} (x_4 + y_4) \quad (13)$$

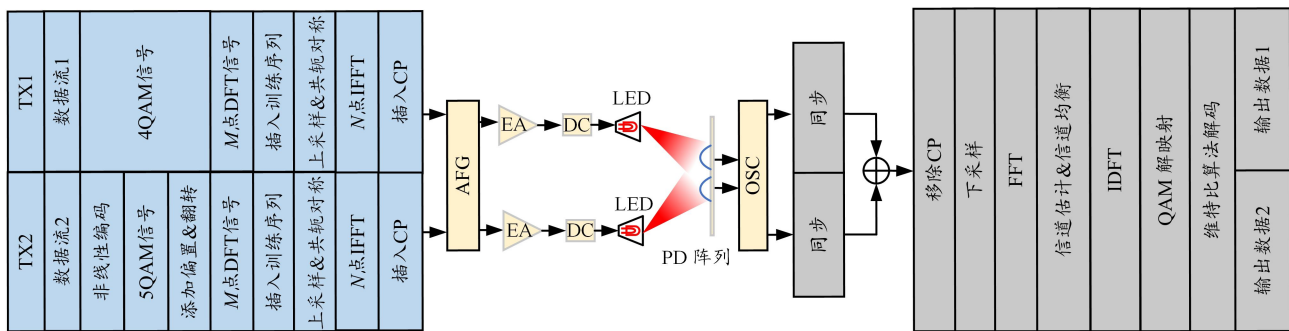
$$C_2 = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^3 (x_k^2 + y_k^2) + \frac{1}{6} (x_0^2 + y_0^2) + \frac{1}{12} (x_4^2 + y_4^2) \quad (14)$$

2 实验结果与分析

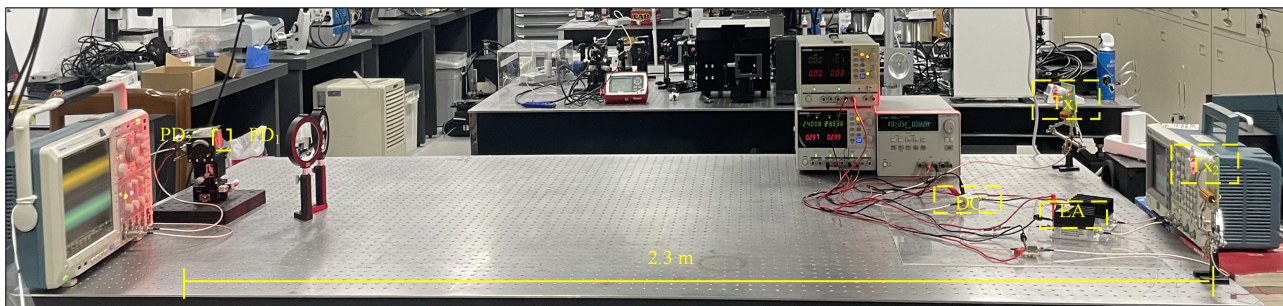
2.1 实验装置

本文搭建了 2×2 MIMO VLC 实验演示系统如图 3 所示,以验证所提方案的优越性。实验参数如下:由于电放大器(EA)响应较差,低频的 6 个子载波不用于数据传输;任意波形发生器(AFG)的采样率为 100 MHz,上采样率为 4 倍;DFT 点数为 122,OFDM 子载波数为 256,因此,实验中的净数据速率达到了 48 Mb/s;直流偏置(DC)的输入为 100 mA。

该系统通过引入离散傅里叶变换扩频正交频分复



(a) 系统框图



(b) 实物图

图 3 系统框图和实验装置

用(DFT-S-OFDM)技术,以降低发射信号的峰均功率比^[9]。具体而言,发送端(TX1、TX2)首先生成 2 个独立的二进制数据流。其中,一个数据流被映射为 4QAM 信号,而另一个数据流则经过非线性编码后映射为 5QAM 信号。随后,通过添加最优偏置并进行归一化处理,根据 4QAM 信号的值得对 5QAM 信号进行翻转操作。接着,生成 M 点 DFT 信号,并在频域中插入训练序列,以便于接收端进行同步和信道估计。然后,进行上采样和厄米特对称处理,并通过逆快速傅里叶变换(IFFT)生成实值的 DFT-S-OFDM 符号。最后,在发送序列中插入循环前缀(CP),以解决多径传播引起的符号间干扰问题。

在实验系统中,AFG 产生发射信号,产生的信号接着由 EA 进行放大,经过 DC 后得到的电信号驱动 LED 发光。信号在自由空间传输约 2.3 m 后,接收端的 2 个雪崩光电二极管(APD)将光信号转换为电信号。这 2 个 APD 紧密放置,大约相隔 1.5 cm,模拟集成 PD 阵列,使 MIMO 信道具有高度相关性。由于光的扩散和 APD 的紧密放置,每个 APD 都能接收到来自多个发射器的叠加光强。最后,使用示波器(OSC)观察电信号后续的离线解调结果。

接收端的解调过程是发送端信号处理的逆过程。首先,进行帧同步以检测每个数据流的起始位置,并将

2 个数据流合并。在移除 CP 和下采样后,通过快速傅里叶变换(FFT)实现 OFDM 解调,将信号从时域转换到频域。然后,在频域进行信道估计和均衡,以补偿信道失真。最后,经过 M 点逆离散傅里叶变换(IDFT)和 QAM 解映射,恢复原始二进制数据流。

2.2 实验结果分析

本文将提出的叠加 20QAM 星座方案与 2 种现有方案进行比较:一种是叠加 24QAM 星座方案,由 PS 6QAM 信号和等概率 4QAM 信号翻转叠加而成;另一种是叠加 16QAM 星座方案,由 2 个等概率的 4QAM 信号翻转叠加得到。在这 3 种方案中,2 路原始信号的调制阶数均为 4,因此它们的净数据速率是相同的。在实验中,LED₁ 的驱动峰-峰电压值 V_{pp1} 和 LED₂ 的驱动峰-峰电压值 V_{pp2} 都设为 0.7 V。3 种方案中的 4QAM 信号都由 LED₁ 发送,而 PS 5QAM、PS 6QAM 和叠加 16QAM 星座方案的 4QAM 信号则根据不同方案由 LED₂ 发送。不同方案的接收信号的星座点概率分布情况如图 4~图 6 所示。可以看出,叠加 16QAM 信号所有星座点的概率几乎相同,而叠加的 20QAM 和 24QAM 信号星座点概率不同,且星座点出现的概率接近理论值。

不同 V_{pp2} 情况下 3 种方案的 BER 性能如图 7 所示。在实验中, V_{pp1} 被设定为 0.7 V,其它实验条件与图 6 实验保持一致。可以看出,3 条 BER 曲线均呈现出先下

卢美霞, 郭心悦: 基于非线性编码的叠加概率整形 20QAM 星座方案

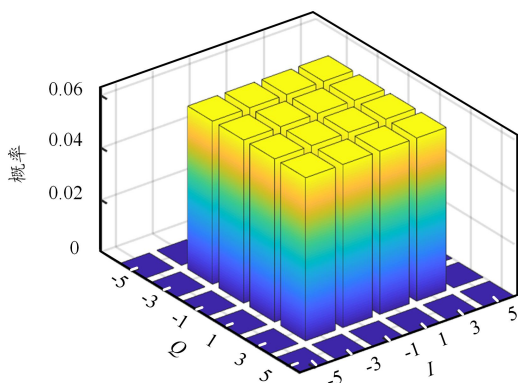


图4 16QAM 接收信号的星座点概率分布

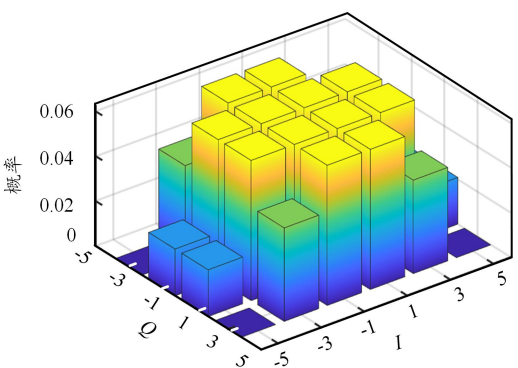


图5 20QAM 接收信号的星座点概率分布

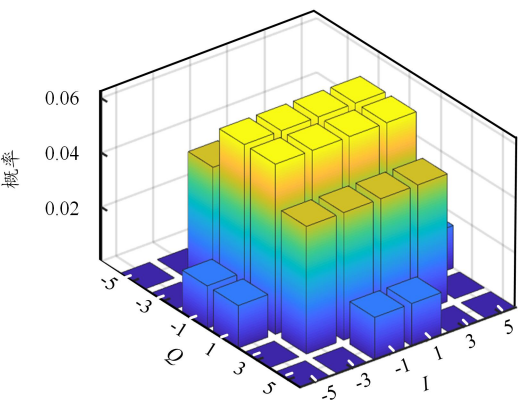


图6 24QAM 接收信号的星座点概率分布

降后上升的相似趋势。特别地,当 $V_{pp2}=0.7$ V 时,所有方案均达到各自的 BER 性能最优状态。这是因为当 $V_{pp1}=V_{pp2}$ 时,2 路信号的叠加能够形成星座点均匀分布的叠加星座,此时 MED 达到最大值,从而 BER 性能达到最优。随着 V_{pp2} 偏离 0.7 V, MED 逐渐减小,导致 BER 上升。在 V_{pp2} 小于 0.8 V 的条件下,对比 3 种方案,发现叠加 16QAM 星座方案的初始性能最为出色。这是因为当 V_{pp2} 较低时,LED 不会发生非线性失真,因此 BER 性能主要

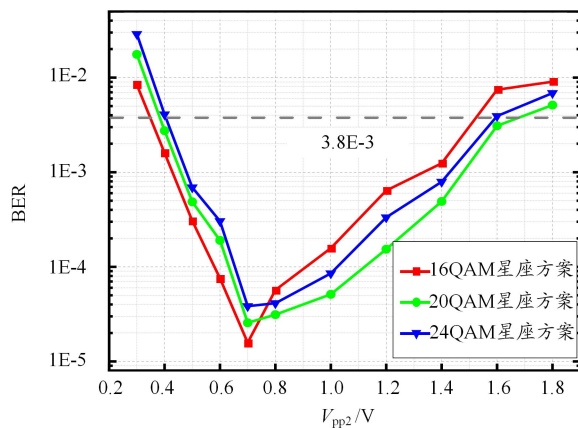


图7 当 $V_{pp1}=0.7$ V 时,不同 V_{pp2} 情况下 3 种方案的 BER 性能比较

受 MED 影响。在 3 种方案中,16QAM 星座的 MED 最大,20QAM 星座的 MED 略小于 16QAM 星座,24QAM 星座的 MED 最小。尽管 20QAM 和 24QAM 星座经过 PS,但由于调制阶数的增加,其 MED 值仍然有所降低。

然而,当 $V_{pp2} \geq 0.8$ V 时,实验结果发生了变化。此时,本文提出的叠加 20QAM 星座方案的 BER 性能最佳,而传统的叠加 16QAM 星座方案 BER 性能最差。这一结果表明,在 $V_{pp2} \geq 0.8$ V 的条件下,LED 出现了非线性失真。而 20QAM 和 24QAM 星座方案由于 PS 对非线性具有更强的鲁棒性。与 24QAM 星座方案相比,本文提出的叠加 20QAM 星座方案的 BER 性能更优越,这是因为 20QAM 星座的 MED 比 24QAM 星座的大。

当 $V_{pp1}=V_{pp2}$ 时,不同方案的 BER 性能比较如图 8 所示。可以看出,与图 7 的结果相似,随着 V_{pp1} 和 V_{pp2} 的增大,BER 先减小后增大。具体而言,当 V_{pp1} 和 V_{pp2} 均不超过 0.7 V 时,叠加 16QAM 星座方案的性能最为优越,因为其 MED 最大,从而具有更好的抗干扰能力。然而,当 V_{pp1} 和 V_{pp2} 超过 0.7 V 时,所有方案的 BER 均有所上升。这是因为随着 V_{pp1} 和 V_{pp2} 的增大,

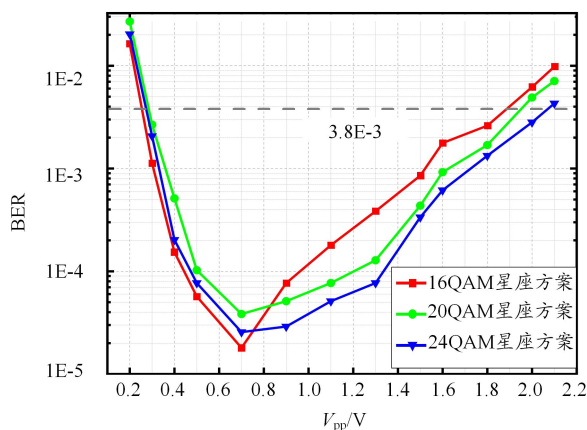


图8 当 $V_{pp1}=V_{pp2}$ 时,不同方案的 BER 性能比较

LED 出现了非线性失真,导致了 BER 性能的下降。此外,在 V_{pp1} 和 V_{pp2} 大于 0.7 V 的条件下,叠加 20QAM 和 24QAM 星座方案的 BER 性能优于叠加 16QAM 星座方案。这说明了 PS 技术可以有效提高系统对非线性失真的鲁棒性。特别是在 V_{pp1} 为 1.0~1.3 V 时,叠加 20QAM 星座方案的 BER 相较于叠加 16QAM 星座方案降低了近一个数量级。同时,与叠加 24QAM 星座方案相比,叠加 20QAM 星座方案的 BER 性能也更好。

4 结束语

在 MIMO VLC 系统中,本文提出了一种基于非线性编码的叠加 PS 20QAM 星座方案,并通过实验验证了其性能。与现有的非线性编码方案相比,该方案能够生成调制阶数更低的 PS 信号,增大了叠加星座的 MED,从而提高了系统的性能。同时,与叠加 16QAM、24QAM 星座方案相比,由于 PS 对系统非线性有更好的鲁棒性,本文所提出的方案在 LED 出现非线性失真时展现了最佳的误码率性能。此外,实验结果也证明了本文所提方案的优越性,这为大功率 LED 应用场景下的 VLC 系统通信提供了有效的解决方案。

参考文献:

- [1] BAO J J, CHEN I, PENG C M. Data transmission scheme based on the DC-QOSTBC in indoor MIMO-VLC systems [J]. Applied Optics, 2021, 60 (18): 5365–5375.
- [2] FATH T, HAAS H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(2): 733–742.
- [3] QIAO L, LU X, LIANG S, et al. Performance analysis of space multiplexing by superposed signal in multi-dimensional VLC system [J]. Optics Express, 2018, 26(16): 19762–19772.
- [4] GUO X, YUAN Y, ZHAO Y, et al. Flipped superposed constellation design for MIMO visible-light communication systems [J]. Optics Express, 2022, 30(7): 11588–11603.
- [5] ZOU P, ZHANG J, LI G, et al. Optimizations of probabilistic constellation shaping superposition schemes for the MISO visible light communication system [C]//OSA. Proceedings of 2021 Optical Fiber Communication Conference (OFC). San Francisco: OSA, 2021: F1A.8-1–F1A.8-3.
- [6] DONG Z, CHEN Y, ZOU D, et al. DMT transmission in short-reach optical interconnection employing a novel bit-class probabilistic shaping scheme[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(1): 98–104.
- [7] DING J, ZHANG J, WEI Y, et al. Comparison of geometrically shaped 32-QAM and probabilistically shaped 32-QAM in a bandwidth-limited IM-DD system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(16): 4352–4358.
- [8] XU Z, NIU W, SHI J, et al. Nonlinear coded nonuniform superposition QAM by trellis-coding for MISO system in visible light communication[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(4): 042501-1–042501-6.
- [9] YAMAMOTO S, TANIGUCHI H, MATSUSHITA A, et al. Spectral-shaping technique based on nonlinear-coded-modulation for short-reach optical transmission [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 466–474.
- [10] CHI N, SHI M. Advanced modulation formats for underwater visible light communications [Invited][J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(12): 12063-1–12063-10.