

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260053.

专题:面向6G的无线光通信

郭心悦,王玥,杨宇帆. 可见光通信中的概率整形螺旋星座研究[J]. 光通信研究, 2026(2): 260053.

Guo X Y, Wang Y, Yang Y F. Research on Probabilistic Shaping of Spiral Constellations in Visible Light Communication [J]. Study on Optical Communications, 2026(2):260053.

可见光通信中的概率整形螺旋星座研究(特邀)

郭心悦,王玥,杨宇帆

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要:【目的】可见光通信(VLC)作为一种利用可见光波段实现信息传输的无线通信技术,兼具照明与通信双重功能,具有频谱资源丰富、无电磁干扰、安全性高和成本低等优势,被认为是第六代移动通信技术(6G)时代射频通信的重要补充。在VLC系统中,发光二极管(LED)的非线性失真是限制系统性能的关键因素。【方法】螺旋星座是一种近似圆形的星座结构,具有非常优越的抗非线性性能,在与概率整形(PS)技术结合后,其性能可得到进一步提升。然而,螺旋星座中各个星座点的幅值互不相同,使得遵循麦克斯韦-玻尔兹曼(MB)分布的PS信号所对应的概率类型过多,PS信号生成的复杂度极高。为此,文章针对64阶螺旋星座提出了一种PS螺旋星座方案。该方案依据螺旋星座结构对星座点进行分组,同一组内星座点被赋予相同的幅值,因此对应的星座点概率也相同。【结果】文章所提方案不仅大幅降低了PS信号生成的复杂度,同时因具有更低的峰均功率比(PAPR),抗非线性性能也更优。实验结果表明,与传统的方形PS 64正交振幅调制(QAM)和采用64种概率的PS螺旋星座方案相比,当LED工作在非线性区域时,文章所提PS螺旋星座的归一化广义互信息(NGMI)性能优势明显,且电压缩放(V_{pp})的动态工作范围也更大。【结论】该研究结果对工作于大功率工况下的VLC系统具有重要意义,可为其性能优化与实际应用提供理论参考与技术支撑。

关键词:可见光通信;几何整形;螺旋星座;概率整形

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Research on Probabilistic Shaping of Spiral Constellations in Visible Light Communication

GUO Xinyue, WANG Yue, YANG Yufan

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

Abstract: 【Objective】Visible Light Communication (VLC) is a wireless communication technology that uses the visible light band for signal transmission, integrating both lighting and communication functions. It has advantages such as abundant spectrum resources, freedom from electromagnetic interference, high security, and low cost. It is regarded as an important supplement to radio frequency communication in the 6th Generation Mobile Communication Technology (6G) era. In VLC systems, the nonlinear distortion of Light-Emitting Diode (LED) is a key factor limiting system performance. 【Methods】The spiral constellation is an approximately circular constellation structure with excellent nonlinear resistance. Its performance can be further improved when combined with Probabilistic Shaping (PS) technology. However, the amplitudes of each constellation point in the spiral constellation are different, resulting in an excessive number of probability types for PS signals following the Maxwell-Boltzmann (MB) distribution, which leads to extremely high complexity in PS signal generation. To address this issue, a PS spiral constellation scheme for the 64-order spiral constellation is proposed in this paper. The scheme groups constellation points according to the spiral constellation structure. The constellation points in the same group are assigned the same amplitude, thus corresponding to the same probability. 【Results】The proposed scheme not only significantly reduces the complexity of PS signal generation but also achieves better nonlinear resistance due to a lower Peak-to-Average Power Ratio (PAPR). Experimental results show that, compared with the conventional square PS 64 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) and the PS spiral constellation scheme using 64 probabilities, when the LED operates in the nonlinear region, the proposed PS spiral constellation exhibits obvious advantages in Normalized Generalized Mutual Information (NGMI) performance and also has a wider dynamic operating range of Peak-to-Peak Voltage (V_{pp}) value. 【Conclusion】The results are of great significance for visible light communication systems operating under high-power conditions, and can provide theoretical references and technical support for their performance optimization and practical applications.

Key words: VLC; geometric shaping; spiral constellation; PS

收稿日期:2026-02-14; 修回日期:2026-03-02; 纸质出版日期:2026-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61501296)

作者简介:郭心悦(1981-),女,江苏常熟人。副教授,博士,主要研究方向为无线光通信技术。

通信作者:郭心悦。E-mail: xinyueguo@usst.edu.cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

0 引言

随着全球无线数据流量呈指数级爆发式增长,射频频谱资源枯竭问题愈发突出,传统射频通信已难以满足未来无线通信的需求。在此背景下,以可见光波段为信息载体的可见光通信(Visible Light Communication, VLC)技术受到广泛关注。VLC具有频谱资源丰富、无需授权、抗电磁干扰和保密性强等优势,可有效弥补射频通信的技术短板^[1-2]。

制约VLC系统性能的瓶颈主要来自发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的固有属性。商用LED的调制带宽较窄,且存在明显的非线性效应^[3]。高阶星座调制是提升数据速率的有效手段,但是更高的调制技术不仅降低了系统抗噪声能力,非线性失真也变得更加严重。为此,几何整形(Geometrical Shaping, GS)^[4-5]和概率整形(Probabilistic Shaping, PS)^[6-7]技术被广泛应用于VLC系统。GS通过优化星座点的几何分布来增大星座的最小欧氏距离(Minimum Euclidean Distance, MED),降低发射信号的峰值均值功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR);PS则通过优化星座点的概率分布逼近香农容量,降低高功率星座点的概率,来缓解LED的非线性失真。

现有研究表明,圆形星座因其优越的PAPR性能非常适合于VLC系统^[5]。然而,圆形星座的设计和优化依旧存在较大挑战。作为近似圆形结构,螺旋星座很好地解决了这个问题。其由螺旋表达式生成,可以借助表达式实现星座的构建与优化。文献[8]提出用螺旋星座来克服数字视频广播系统中的相位噪声问题;文献[9]通过优化螺旋星座星座点在角向与径向的间距来缓解放大器引起的非线性失真;文献[10]首次将螺旋星座应用于VLC系统,所提出的64阶螺旋星座具有更大的MED和更低的PAPR。

为进一步提升性能,本文将PS技术与螺旋星座相结合,提出了一种64阶PS螺旋星座。与传统圆形星座不同,螺旋星座是一种近似圆形的结构,每个星座点的幅度均不相同。因此,若遵循麦克斯韦-玻尔兹曼(Maxwell-Boltzmann, MB)分布,64个星座点对应于64种不同的概率,PS信号生成的复杂度非常高^[11]。为此,本文提出了一种简化的PS螺旋星座方案。依据螺旋星座结构对星座点进行分组,组内星座点被赋予相同的幅值,因此对应的星座点概率也相同。所提PS螺旋星座不仅降低了信号

生成的复杂度,同时PAPR也更低。实验结果表明,系统的归一化广义互信息(Normalized Generalized Mutual Information, NGMI)性能得到显著提升。

1 原理

1.1 螺旋星座生成

螺旋星座的生成包含两个步骤:首先生成螺旋线,然后在生成的螺旋线上选择合适的星座点。通用的螺旋线可以由以下表达式给出:

$$s(t) = f(t)e^{jt}, \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为螺旋星座点的坐标值; $f(t)$ 为幅值函数; t 为相位参数; j 为虚数单位。螺旋线通过在不同 t 值下获得的离散值来进行构建。一条螺旋线可由多个圈构成,圈数量对螺旋星座的生成影响不大,但必须保证圈数量足够多,以确保能够容纳螺旋线上排布的全部星座点。在本文中,设定圈数为6。对于第1圈, $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \frac{2\pi t}{J}, t = 1, \dots, J, \quad (2)$$

式中, J 为每圈中所取的离散点数量,本文设定 $J=19$ 。

对于螺旋线上的第 l 圈而言, $f(t)$ 可以根据前一圈的值以及两圈之间的径向距离 $g(t)$ 来计算:

$$f(2\pi l + t) = f[2\pi(l-1) + t] + g(2\pi l + t). \quad (3)$$

为尽可能保证星座的MED性能,在本文方案中, $g(t)$ 的值固定为常数 2π ,即两圈螺旋线之间的径向距离是相同的。

受LED非线性特性的影响,振幅较大的星座点更容易受到噪声的影响。因此,在沿螺旋线方向选择星座点时,星座点之间的间隔随着星座点幅度的增大而增大,因而相邻星座点之间的距离 $d(m)$ 可表示为

$$d(m) = |s(t_{m+1}) - s(t_m)| = \alpha_0 + \alpha_1 |s(t_m)| + \alpha_2 |s(t_m)|^2, \quad (4)$$

式中: $s(t_m)$ 为第 m 个星座点的值; t_m 为第 m 个星座点对应的相位参数; α_0 、 α_1 和 α_2 均为控制相邻星座点之间距离变化的系数。

根据式(4), t_{m+1} 的递推表达式可表示为^[10]

$$t_{m+1} = t_m + \frac{\alpha_0}{f(t_m)} + \alpha_1 + \alpha_2 f(t_m). \quad (5)$$

在本文中,将 t_1 的初始值设为2.5, α_0 、 α_1 和 α_2 分别设为2.0和0.006。由于螺旋线是由离散点构建而成的,当确定 t_m 以后,还需要通过对可用离散

点进行插值来得到 $f(t_m)$, 最终得到 64 个星座点的值, 如图 1 所示。

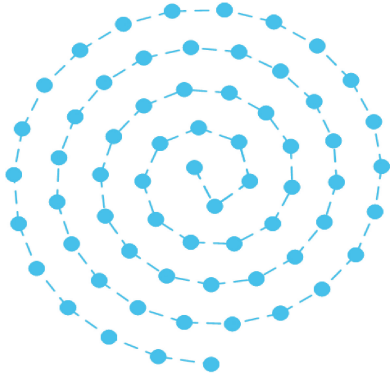


图 1 螺旋星座图

Figure 1 Spiral constellation diagram

1.2 螺旋星座的 PS 优化

PS 技术通过调整星座点的传输概率实现信号概率分布与传输信道的最佳匹配, 从而最大化系统容量、获得整形增益和降低信号平均发射功率。由香农容量公式可知, 对高斯白噪声信道而言, 使信源符号的概率分布服从离散高斯分布, 即 MB 分布, 可以最大化信道容量, 二维星座的 MB 分布 $P_s(s_i)$ 可表示为

$$P_s(s_i) = \frac{\exp(-v|s_i|^2)}{\sum_{k=1}^M \exp(-v|s_k|^2)}, \quad (6)$$

式中: S 为星座点集合; s_i 为第 i 个星座点; M 为调制阶数; v 为控制熵的整形因子, 取值介于 0 和 1 之间。可以通过改变 v 值得到不同的概率分布, 从而得到不同的信源熵。 v 与信源熵之间存在一一对应关系。当 v 增大时, 需向传输数据中加入更多冗余, 进而导致信源熵降低。

由式(6)可知, 星座点的幅度不同, 对应星座点的概率就会不同。螺旋星座是一种近似圆形结构的

星座点。严格来说, 其每个星座点对应的幅度都是不同的。因此, 若严格按照 MB 分布, 64 个星座点对应 64 个不同的概率。恒定组成分布匹配(Constant Composition Distribution Matching, CCDM)是生成 PS 信号的主流方法, 其通过把输入比特映射到固定组成和符合目标概率分布的符号序列来实现 PS^[12]。CCDM 本质上是查表加组合映射的过程, 概率种类越多, 需要支持的符号组合、序列样式和码本数量就会呈指数级增长。因此, 星座点概率种类的增加会显著提升映射算法、码本存储与系统实现的复杂度。

如图 1 所示, 本文设计的螺旋星座大致有 5 圈, 为此, 本文将螺旋星座点分为 5 组, 组内的星座点视为幅度相同、取值为组内幅度最小的星座点的幅值。然后, 根据选定的 5 个幅值, 由式(6)得到对应的 5 个不同的概率值, 这 5 个概率值从大到小分别为 0.025 5、0.022 6、0.017 8、0.011 9 和 0.007 1。相比于 64 种概率的标准 MB 分布而言, 尽管得到的 5 种概率的简化 MB 分布不是理论上逼近香农容量的最优方案, 但是, 基于 5 种概率的简化 MB 分布产生 PS 信号的复杂度大大降低。此外, VLC 信道也不是理想的加性高斯白噪声信道, 其还具有非线性效应, 因此, 基于该设计生成的 PS 螺旋星座反而具有更优的 PAPR 性能。

为了论证本文所提 PS 螺旋星座的优越性, 本文引入传统 PS 方形 64 正交振幅调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)星座和基于 64 种概率生成的 PS 螺旋星座进行对比。下文中, 为便于说明, 本文所提 PS 螺旋星座和两种对比星座分别简称为 PS-Spiral-5P、PS-64QAM 和 PS-Spiral-64P。图 2 所示为 3 种方案的 PS 星座图以及对应星座点的概率分布情况。

鉴于螺旋星座是非均匀星座, 即每个星座点与

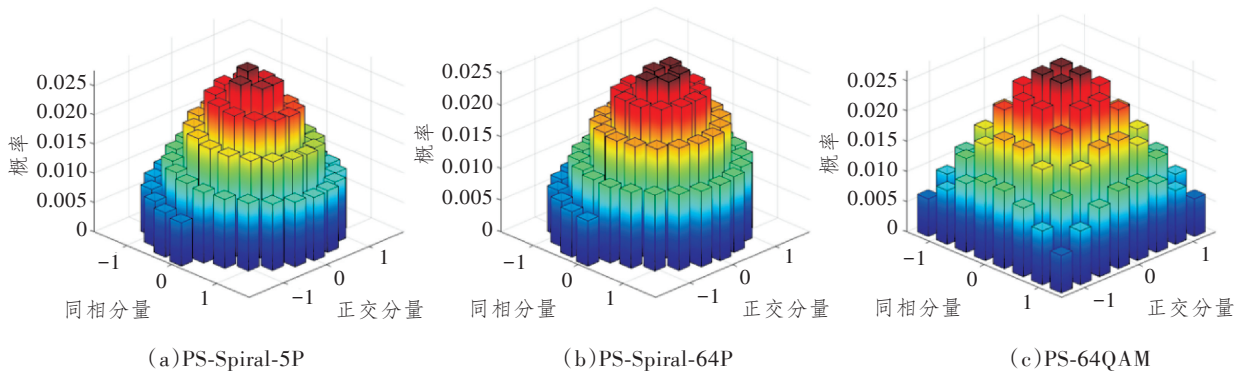


图 2 不同方案的 PS 星座图

Figure 2 PS constellation diagrams of different schemes

其相邻星座点的MED各不相同,因此引入平均MED值以更好地度量其抗噪声性能,平均MED定义为所有星座点MED值的平均值,可表示为

$$MED_{avg} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \min_{j=1, \dots, 64, j \neq i} |x_i - x_j| \quad (7)$$

表1所示为3种方案的主要性能指标,表中的所有参数都是在星座功率归一化的情况下得到的。3种方案的信源熵均为5.9比特/符号。星座PAPR为星座中星座点的最高功率与平均功率的比值。可以看到,3种方案的平均MED非常接近,PS-Spiral-64P略高。PS-Spiral-5P方案和PS-Spiral-64P方案的星座PAPR均明显低于PS-64QAM方案,说明螺旋星座的抗非线性能力远远优于传统方形64QAM星座。与PS-Spiral-64P方案相比,本文所提PS-Spiral-5P方案的PAPR甚至更低。

表1 不同方案PS的参数

Table 1 The parameters for PS of different schemes

	PS-Spiral-5P	PS-Spiral-64P	PS-64QAM
v	0.015 4	0.013 5	0.015 2
H /bit/符号	5.9	5.9	5.9
星座			
PAPR/dB	3.747	3.766	4.780
平均MED	0.349 3	0.351 2	0.350 3

注: H 为信源熵。

2 实验装置及结果

2.1 实验装置及参数设置

为验证本文所提PS-Spiral-5P方案的优越性,

尤其是信道非线性对星座性能的影响,本文搭建了VLC实验演示系统,实验装置和系统框图如图3所示。在VLC系统中,本文采用了离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)-扩频(Spread, S)-正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术以进一步降低发射信号的PAPR。发射端信号处理流程如下:输入的二进制比特流首先进行星座映射,经DFT后插入训练序列,进行上采样,并经过共轭对称后对信号进行快速傅里叶逆变换以生成实值DFT-S-OFDM信号,最后添加循环前缀。接收端的信号处理为发射端信号处理的逆过程:经过帧同步后,依次执行下采样、去除循环前缀、快速傅里叶变换、信道估计与均衡和离散傅里叶逆变换来实现DFT-S-OFDM信号的解调,最后经过星座解映射恢复二进制比特流。以上信号调制和解调过程均在电脑端离线处理,由Matlab软件完成。

Matlab软件产生的调制信号加载到任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)(Tektronix AWG520)并输出,由电功率放大器(Electric Power Amplifier, EA)(Mini-Circuit ZHL-6A-S+)放大,并通过直流偏置器(Mini-Circuits ZFBT-4R2GW-FT+)耦合直流偏置共同驱动LED光源(Cree XLamp XP-E)。光信号经过自由空间传输后,由雪崩光电二极管(Avalanche Photon Diode, APD)(Hamamatsu C12702-11)接收并转换为电信号,并由高速示波器(Oscilloscope, OSC)(Tek-

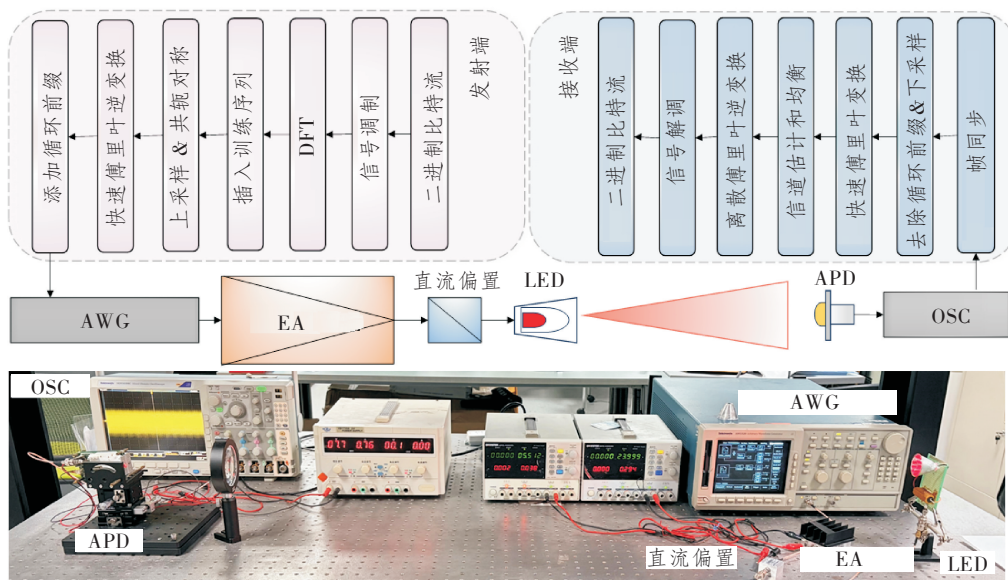


图3 实验装置与系统框图

Figure 3 Experimental setup and system block diagram

tronix MDO4104C) 捕获后进行离线处理和后续性能分析。

实验参数设置如下: DFT 点数为 128, 快速傅里叶变换点数为 256, 循环前缀长度为 8。由于 EA 在低频处的频率响应较差, 低频处的 6 个子载波不用于数据传输。LED 与 APD 之间的距离为 0.8 m。若无特别说明, AWG 的采样率设置为 100 MSa/s, 上采样率设置为 4 倍, 因此, 信号占用带宽为 25 MHz, 数据传输的净发射速率约为 71.5 Mbit/s。

2.2 实验结果及讨论

由于本文主要解决 LED 非线性失真问题, 首先测试了 LED 非线性失真特性。图 4 所示为不同输入信号电压峰值 (Peak-to-Peak Voltage, V_{pp}) 情况下的输出信号 V_{pp} 值, 其中输入信号 V_{pp} 为 AWG 设定的 V_{pp} 值, 而输出信号 V_{pp} 为 OSC 采集的 APD 端的输出信号 V_{pp} 值。图中两条曲线分别对应了直流偏置电流为 40 和 45 mA 情况下的实验结果。由图可知, 当输入信号 $V_{pp} < 600$ mV 时, 输出信号与输入信号基本呈线性关系, 而当输入信号 $V_{pp} \geq 600$ mV 时, LED 开始出现明显的非线性失真, 输入信号与输出信号不再呈线性关系。

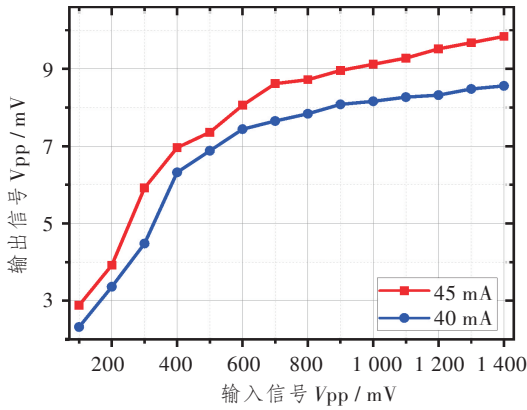


图 4 输入信号与输出信号 V_{pp} 的关系

Figure 4 Relationship between the V_{pp} values of the input signals and the output signals

本文进一步通过 PAPR 的互补累积分布函数 (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF) 来评估不同方案发射信号的 PAPR。PAPR 的 CCDF 值定义为 DFT-S-OFDM 符号块的 PAPR 超过某一给定阈值的概率, 其中 DFT-S-OFDM 符号块的 PAPR 值定义为 DFT-S-OFDM 符号块的最大信号功率与平均功率的比值。图 5 所示为 3 种方案 PAPR 的 CCDF 曲线。由图可知, 3 种方案 PAPR 的 CCDF 值与表 1 中星座 PAPR 值的大小关系一致。这是因为, DFT-S-OFDM 本质上

是一种单载波调制, DFT-S-OFDM 信号可视为若干个输入星座信号的线性组合。因此, 星座 PAPR 越高, 那么其对应 DFT-S-OFDM 信号的 PAPR 也越高。PS-Spiral-5P 和 PS-Spiral-64P 方案的 CCDF 值均大幅度低于 PS-64QAM 方案, 说明螺旋星座在抗非线性失真方面优势明显。PS-Spiral-5P 方案的 CCDF 值略低于 PS-Spiral-64P 方案, 且随着阈值的增加逐渐明显。当 PAPR 阈值 = 13 dB 时, PS-Spiral-5P 方案的 CCDF 值在 10^{-6} 数量级, 而 PS-Spiral-64P 方案的 CCDF 值在 10^{-5} 数量级。

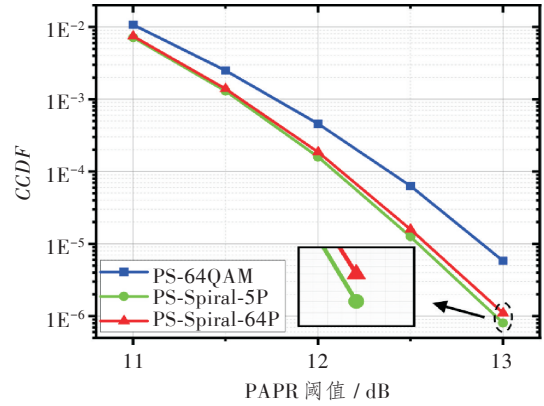


图 5 不同方案的 CCDF

Figure 5 CCDFs of different schemes

本文引入 NGMI 和可达信息速率 (Achievable Information Rate, AIR) 来衡量 PS 信号的性能^[11]。NGMI 可精准预测前向纠错译码后的误码率性能, 而 AIR 用于评估收发机所能实现的净数据速率。NGMI 由广义互信息 (Generalized Mutual Information, GMI) 进行归一化得到, GMI 可以通过下式估算:

$$GMI \approx - \sum_{x \in \mathcal{X}} P_X(x) \log_2 P_X(x) +$$

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^L \log_2 \left(\frac{\sum_{x \in \mathcal{X}_{b_{k,i}}} q_{Y|X}(y_k|x) P_X(x)}{\sum_{x \in \mathcal{X}} q_{Y|X}(y_k|x) P_X(x)} \right), \quad (8)$$

式中: $b_{k,i} \in \{0, 1\}$ 为第 k 个发送符号的第 i 个比特; $\mathcal{X}_{b_{k,i}}$ 为第 i 个比特是 $b_{k,i}$ 的符号集合; \mathcal{X} 为调制信号的符号集合; $L = \log_2 M$; X 为随机变量, Y 为长度为 N 的接收序列, 给定传输的符号 x , 接收符号 y 的概率分布 $q_{Y|X}(y|x)$ 可表示为

$$q_{Y|X}(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|y-x|^2}{2\sigma^2}}, \quad (9)$$

式中, σ^2 为噪声方差。

对于 PS 信号, NGMI 和 AIR 可分别根据 GMI

由下式得到:

$$NGMI = 1 - \frac{H - GMI}{L}, \quad (10)$$

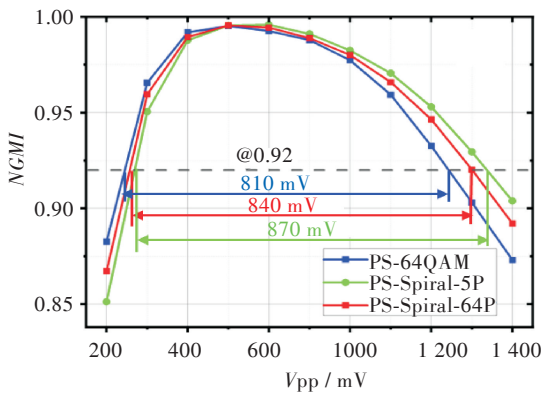
$$AIR = GMI \times B, \quad (11)$$

式中, B 为信号调制带宽。

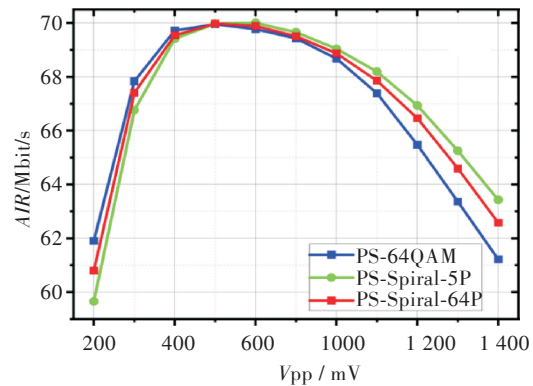
图6所示为直流偏置电流固定在40 mA情况下,不同驱动 V_{pp} 的 NGMI 和 AIR 性能。一开始,信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)随着 V_{pp} 的增加而升高,因此,所有方案的 NGMI 性能都有所提升。但当 $V_{pp} > 500$ mV 时,LED 开始出现非线性失真,且非线性失真逐渐占据主导作用,故而所有方案的 NGMI 性能开始下降。比较3种不同方案,当 $V_{pp} < 500$ mV, 即 LED 主要工作在线性工作区域时,PS-64QAM 性能略优,这是由于螺旋星座不能实现完全的格雷编码而损失的编码增益。但是当 $V_{pp} \geq 500$ mV 以后,两个 PS 螺旋星座的性能都超越了 PS-64QAM,且随着 V_{pp} 的增大,性能差距逐渐增大,这说明 PS 螺旋星座在抗非线性方面的性

能非常优越。考虑 0.92 的 NGMI 阈值^[13], PS-Spiral-5P 方案的 V_{pp} 工作范围较 PS-Spiral-64P 和 PS-64QAM 方案分别提升了 30 和 60 mV。AIR 曲线的性能趋势与 NGMI 类似,当 $V_{pp} = 600$ mV 时, PS-Spiral-5P 方案的 AIR 达到最大值 70.0 Mbit/s。

图7进一步评估了直流偏置为45 mA时,不同方案的 NGMI 和 AIR 性能。当直流偏置增大到45 mA 后,系统整体 SNR 上升了,因此当 LED 工作于线性区域时,所有方案的 NGMI 和 AIR 性能都有所提高。但是随着 V_{pp} 的增大,直流偏置的增大也导致 LED 非线性效应更为明显。因此,与图6中的实验结果相比,本文所提 PS-Spiral-5P 方案相对于 PS-Spiral-64P 和 PS-64QAM 方案的性能提升更为显著。同样考虑 0.92 的 NGMI 阈值, PS-Spiral-5P 方案的 V_{pp} 动态工作范围较 PS-Spiral-64P 和 PS-64QAM 方案分别提升了 70 和 140 mV, 相比图5中的实验结果大约翻了一番。



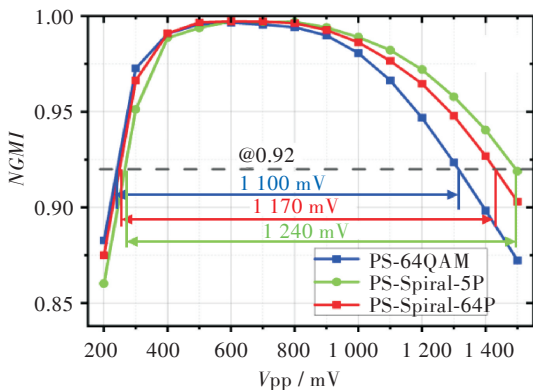
(a) NGMI 性能
(a) NGMI performance



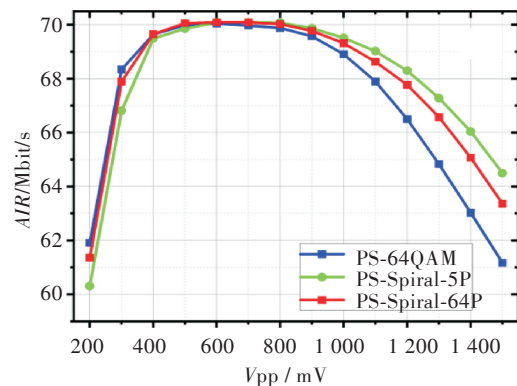
(b) AIR 性能
(b) AIR performance

图6 直流偏置为40 mA 时不同方案的性能比较

Figure 6 Performance comparison of different schemes at a direct current bias of 40 mA



(a) NGMI 性能
(a) NGMI performance



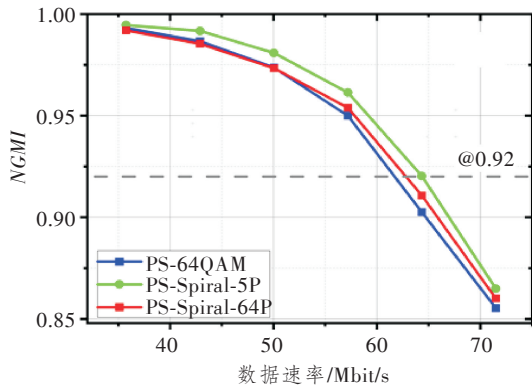
(b) AIR 性能
(b) AIR performance

图7 直流偏置为45 mA 时不同方案的性能比较

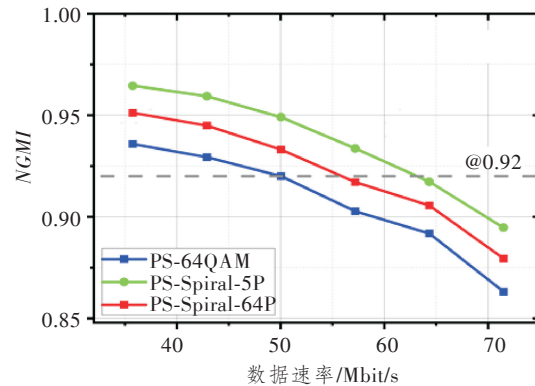
Figure 7 Performance comparison of different schemes at a direct current bias of 45 mA

图 8 所示为在不同发射数据速率下 3 种方案的 NGMI 性能。实验中,直流偏置固定为 45 mA,图 8(a)中 V_{pp} 固定为 800 mV,图 8(b)中 V_{pp} 固定为 1 200 mV。实验结果表明,NGMI 性能随着数据速率的增加呈现下降的趋势,这是因为,LED 的频率响应随着频率的增大呈指数衰减。图 8(c)和图 8(d)分别给出了当 AWG 采样率分别为 50 和 100 MSa/s 时的接收信号频谱。由图可知,图 8(c)中接收信号的频谱较为平坦,但是当 AWG 采样率

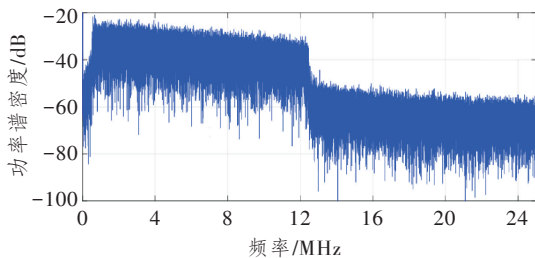
增加到 100 MSa/s 时,即信号调制带宽增加到 25 MHz 时,图 8(d)中接收信号频谱的衰减更为厉害。当 $V_{pp}=1\ 200\text{ mV}$ 时,LED 非线性失真更为严重,因此,PS-Spiral-5P 方案的性能优势更明显。考虑 0.92 的 NGMI 阈值,PS-Spiral-5P 方案的最大数据速率达到 64 Mbit/s,与 PS-Spiral-64P 和 PS-64QAM 方案的最大数据速率(分别为 57 和 50 Mbit/s)相比,分别提升了 12.3% 和 28.0%。



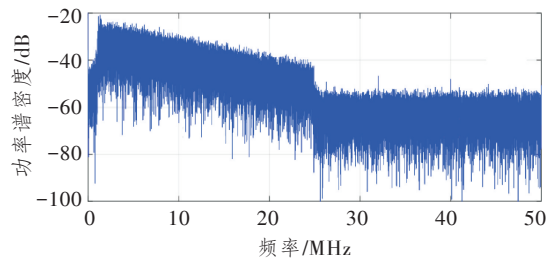
(a) $V_{pp}=800\text{ mV}$ 时的 NGMI 性能
(a) NGMI performance at $V_{pp} = 800\text{ mV}$



(b) $V_{pp} = 1\ 200\text{ mV}$ 时的 NGMI 性能
(b) NGMI performance at $V_{pp} = 1\ 200\text{ mV}$



(c) 信号带宽为 12.5 MHz 时的接收信号频谱
(c) Received signal spectrum at a signal bandwidth of 12.5 MHz



(d) 信号带宽为 25 MHz 时的接收信号频谱
(d) Received signal spectrum at a signal bandwidth of 25 MHz

图 8 不同数据速率下的性能比较

Figure 8 Performance comparison at different data rates

3 结束语

作为一种圆形星座,螺旋星座具有优越的抗非线性性能,在结合 PS 技术后性能更优。然而,基于传统 MB 分布生成 PS 螺旋星座信号的复杂度较高。为此,本文提出了一种简化的 PS 螺旋星座,根据螺旋星座的结构对星座点进行分组,同一组内的星座点被赋予相同的幅值,从而对应相同的概率,显著降低了 PS 信号的实现复杂度。与此同时,该方案还降低了 PS 螺旋星座的 PAPR,提升了其抗非线性性能。实验结果证实了理论分析结果,当 LED 工作在非线性区域时,PS-Spiral-5P 的 NGMI 和 AIR 性能相较于 PS-64QAM 和 PS-Spiral-64P 方案均有明显优势。以 0.92 作为 NGMI 的阈值,当

直流偏置电流为 45 mA, V_{pp} 为 1 200 mV 时,相较于 PS-64QAM 和 PS-Spiral-64P 方案,本文所提 PS-Spiral-5P 方案将数据速率分别提升了 12.3% 和 28.0%。为满足照明需求,LED 通常需要工作在高功率状态,因此,这一结果对于大功率 VLC 系统而言具有重要意义。

参考文献:

- [1] Chow C W. Optical Wireless Communication - Recent Progresses and Future Perspectives [J]. Journal of Lightwave Technology, 2026, 44(3): 806-820.
- [2] 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): 190687.
Chi N, Chen H. Progress and Prospect of High-Speed

- Visible Light Communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(3): 190687.
- [3] Niu W, Xu Z, Liu Y, et al. Key Technologies for High-Speed Si-Substrate LED based Visible Light Communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(11): 3316–3331.
- [4] 梁家熙, 牛泽坤, 胡卫生, 等. 基于互信息量估计的几何与概率联合整形技术[J]. 光通信研究, 2022(3): 1–6.
Liang J X, Niu Z K, Hu W S, et al. Joint Shaping of Geometry and Probability based on Mutual Information Neural Estimation[J]. Study on Optical Communications, 2022(3): 1–6.
- [5] 林显浩, 迟楠. 水下可见光通信星座几何整形和人工智能技术[J]. 光通信研究, 2023(4): 21–27.
Lin X H, Chi N. Constellation Geometrically-Shaping and Artificial Intelligence Technology in Underwater Visible Light Communication[J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 21–27.
- [6] Guo X, Xu R. Probabilistically Shaped 3D-32QAM Constellation Design for Visible Light Communication[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2025, 37(10): 583–586.
- [7] 郭心悦, 杨宇帆. 可见光通信系统中基于星座点裂变的非等概率星座研究[J]. 通信学报, 2025, 46(11): 322–331.
Guo X Y, Yang Y F. Research on Non-Equal Probability Constellation based on Constellation Point Fission in Visible Light Communication System[J]. Journal on Communications, 2025, 46(11): 322–331.
- [8] Ugolini A, Piemontese A, Eriksson T. Spiral Constellations for Phase Noise Channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(11): 7799–7810.
- [9] Piemontese A, Ugolini A, Morini M, et al. Spiral Constellations for Nonlinear Channels[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(9): 2016–2020.
- [10] Guo X, Wang Y, Yang Y. Investigation on the Performance of Spiral Constellation in Visible Light Communication[J/OL]. IEEE Photonics Technology Letters. (2026-01-06)[2026-02-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11333265>.
- [11] Guo X, Chu T, Lu M, et al. Optimization of Three-Dimensional Superposed Constellation with Probabilistic Shaping for MIMO Visible Light Communication Systems[J]. Optics Express, 2024, 32(13): 22634–22646.
- [12] Schulte P, Böcherer G. Constant Composition Distribution Matching[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(1): 430–434.
- [13] Chu T, Ye J, Chen C, et al. Rate-Adaptive MISO VLC Systems Utilizing Superposition Coded Modulation with Hybrid Geometric-Probabilistic Shaping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(8): 3643–3654.