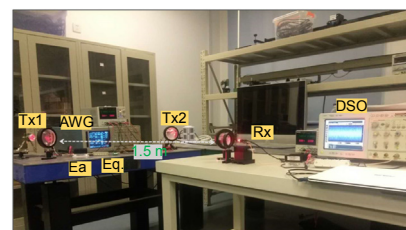




DOI: 10.12086/oe.2019.180306

基于脉冲幅度调制的两发一收 可见光通信系统

石蒙, 张梦洁, 迟楠*

复旦大学通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室,
上海 200433

摘要: 为了提高传统点对点单输入单输出(SISO)可见光系统的传输速率, 提出了多输入多输出(MIMO)的可见光系统。考虑到接收端系统复杂度的问题, 多输入单输出(MISO)可见光通信系统则更受关注。本文研究了基于脉冲幅度调制(PAM)的MISO可见光通信系统, 并通过实验证明该系统在特定场景中的运用优势。此外, 针对可见光通信系统中LED光源、功率放大器等关键器件存在非线性效应, 本文基于两发一收的 2×1 MISO可见光通信系统, 设计了两路低阶PAM信号在光域叠加产生高阶PAM信号的新型的等概率编码映射方案, 并通过RGB-LED的红灯完成净比特速率700 Mb/s的传输实验系统验证, 证明了此方案在实际中的可行性及优越性。

关键词: 光通信; 可见光通信; 多输入单输出; 等概率编码; 脉冲幅度调制

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

引用格式: 石蒙, 张梦洁, 迟楠. 基于脉冲幅度调制的两发一收可见光通信系统[J]. 光电工程, 2019, 46(5): 180306

Two input one output visible light communication system based on pulse amplitude modulation

Shi Meng, Zhang Mengjie, Chi Nan*

Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Science, Ministry of Education, Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: To improve the data transmission rate of the conventional point-to-point single input single output (SISO) visible light communication system, a multiple input multiple output (MIMO) visible light communication system is proposed. Considering the complexity of the receiver system, multiple input single output (MISO) visible light communication systems have attracted attention. This paper studies the MISO visible light communication system based on pulse amplitude modulation (PAM), and experimentally proves the advantages of this system in specific scenes. In addition, there are non-linear effects for key devices such as LED light sources and power amplifiers in visible light communication systems. Based on 2×1 MISO visible light communication system, this paper reports a novel equal probability coding mapping scheme for high-order PAM signals with two low-order PAM signals superposition in the optical domain. The system verification is performed through a net data-rate of 700 Mb/s transmission experiment through a red chip of RGB-LED, which proves the feasibility and superiority of this scheme in practice.

Keywords: optical communications; visible light communication; multiple input single output (MISO); equal

收稿日期: 2018-06-05; 收到修改稿日期: 2018-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61571133); 国家重点研究发展计划项目 (2017YFB0403603)

作者简介: 石蒙(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事可见光通信系统方面的研究。E-mail: mshi17@fudan.edu.cn

通信作者: 迟楠(1974-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信系统方面的研究。E-mail: nanchi@fudan.edu.cn

probability coding; pulse amplitude modulation (PAM)

Citation: Shi M, Zhang M J, Chi N. Two input one output visible light communication system based on pulse amplitude modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180306

1 引言

近年来,为了实现更高的传输速率,多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术被运用于可见光通信中^[1-2]。在 MIMO 可见光通信系统中,发射端使用多个光源传输信号,接收端使用接收机阵列进行接收。但光学 MIMO 信道并不是像射频 MIMO 信道那样是去相关的。因此接收机阵列必须足够大才能确保信道矩阵是满秩的^[1]。但实际运用中,室内可见光通信场景的面积有限,多接收机阵列会占用较大面积。而只需要一个接收机的多输入单输出(multiple input single output, MISO)技术比 MIMO 所需的占地面积少得多,更适用于室内可见光通信^[3]。

此外,在可见光通信系统中,LED 光源、功率放大器等一系列关键器件都存在非线性效应,系统的非线性失真会损伤信号质量。LED 调制曲线的非线性特性是可见光系统非线性的主要来源^[4-5]。可见光信号主要调制在 LED 工作的线性区以减轻非线性失真带来的信号损伤。但此时 LED 的发光效率较低,照明亮度一般也不能满足实际运用场景的照明需求。此外,对于高阶调制信号,由于信号电平数增多,信号的峰均功率比(peak to average power ratio, PAPR)较高,更容易受到系统非线性的影响。因此,在 MISO 系统中,可以利用多个 LED 灯同时传输信号的优势,在每个灯上调制低阶信号,通过光信号叠加生成高阶信号以抵

抗发射端 LED 的非线性失真,并且多个 LED 灯同时发光也可提升照明亮度,满足实际照明需求。

本文研究了基于脉冲幅度调制(pulse amplitude modulation, PAM)的 MISO 可见光通信系统。针对系统中 LED 的非线性效应,我们基于两发一收的可见光通信系统,设计了低阶 PAM 信号在光域叠加产生高阶 PAM 信号的新型编码映射方案,并通过净比特速率 700 Mb/s 的传输实验进行了验证。下面将介绍两发一收可见光通信系统中两路低阶 PAM4 信号叠加生成 PAM7 信号的编码方案,系统结构及实验结果。

2 两发一收可见光通信系统中光生 PAM7 信号的编码映射方案

以两发一收的 PAM 可见光通信系统为例,在两个 LED 上分别调制 PAM4 信号,在传输过程中通过光信号叠加产生 PAM7 信号。图 1(a)是两路 PAM4 信号叠加生成不等概率 PAM7 信号的示意图。PAM4 信号具有 4 个电平,两路信号叠加可产生新的 7 电平信号。理论上,每路 PAM4 信号发送 2 bit 信息,两路信号共可传 4 bit 信息,共 16 种映射方式。由于光信号在传输过程中,不同的电平叠加方案可能生成一样的新电平,故两路 PAM4 信号叠加产生的新信号只有 7 个电平,即 PAM7 信号。由于 PAM7 信号只需 3 个 bit 就可表示,将两路信号叠加的 4 bit 信息映射到 3 bit 表示,

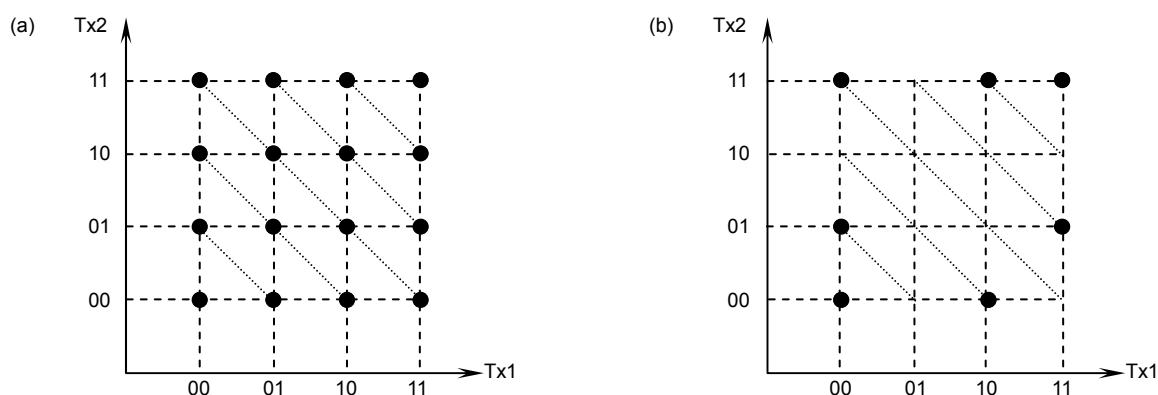


图 1 两路 PAM4 信号叠加生成 PAM7 信号的编码示意图。(a) 不等概率 PAM7 信号; (b) 等概率 PAM7 信号
Fig. 1 The schematic diagram of PAM7 signals generated by two PAM4 signals superposition. (a) Unequal probability PAM7 signals; (b) Equal probability PAM7 signals

以提高编码效率。生成的 PAM7 信号中各符号的概率不相等。其中,符号 0 出现的概率最大,为 1/4;符号 +2 和 -2 的概率是 3/16;符号 +4 和 -4 的概率是 1/8;符号 +6 和 -6 出现的概率最小,为 1/16。

该信号在低电平符号的出现概率大,高电平符号出现的概率低,故平均功率降低,相应的 PAPR 增大。而接收端的功率放大器等器件也具有非线性特性,对于 PAPR 大的信号容易受到器件非线性的影响,产生畸变失真。故我们希望在接收端生成的 PAM7 信号是等概率的。为此,需要对发射端的两路 PAM4 信号进行反编码映射,调整两路 PAM4 信号各符号出现的概率以得到叠加后等概率的 PAM7 信号。

从 16 个交点中选取 7 个点作为生成等概率 PAM7 信号的反映射点。如图 1(b)所示,选取了相互间隔距离最大的七个点作为 PAM7 信号的映射,这样发射端各符号间的平均欧氏距离最大,从而减轻信号码间干扰。7 个电平的概率相等,为 1/7。反推回去,则两个发射端发射符号的概率不相等,每个发射端只需发送三个不同电平的符号就可在接收端产生等概率的 PAM7 符号。由图 1(b)可知,三电平信号中,相邻符号间隔较小的两个电平符号出现概率较小且相等,为 2/7。出现概率最大的电平符号与相邻符号的间隔较大,概率为 3/7。因此,这种编码方式可有效降低信号的码间干扰。

此外,信号的峰值平均功率比(peak to average power ratio, PAPR)与系统遭受非线性失真的严重程度有关。降低信号的 PAPR,可有效减轻系统的非线性失真。因此,我们比较了编码映射方案中四种 PAM 信号的 PAPR 值,如表 1 所示。这四种信号分别是等概率 PAM4 信号,不等概率 PAM4 信号,等概率 PAM7 信号和不等概率 PAM7 信号。从表中可看到,不等概率 PAM4 信号的 PAPR 最小。这是由于符号映射方式和符号数的不同导致的。不等概率的 PAM4 信号中高电平符号出现的概率增大,信号平均功率增大,相对应的 PAPR 降低。因此,在发射端传输不等概率的 PAM4 信号还可有效抵抗 LED 的非线性失真。

3 基于 PAM 调制的两发一收可见光通信系统结构

基于 PAM 调制的两发一收可见光通信系统框图和实验装置图如图 2 所示。发射端,首先在 MATLAB 中将二进制比特流根据编码映射规则映射为 PAM4 符号。然后将 PAM 符号进行 PS-Manchester 编码^[6]以进行频谱整形,使得 PAM 信号可以直接在基带传输。再将编码后的 PAM 符号进行 4 倍上采样,并通过一个 Nyquist 滤波器进行脉冲整形,压缩频谱带宽,减轻带外功率泄露。实验中,将两路 PAM4 数据分别输入到任意波形发生器(arbitrary waveform generator, AWG, Tektronix AWG520)的两个通道中产生电信号。然后,将 AWG 输出的两路 PAM 信号分别通过预均衡电路补偿信道的高频衰减,并将均衡后的信号经过电功率放大器(electric power amplifier, EA, 25 dB 增益)放大。放大后的电信号和直流偏置电压通过交直流耦合器耦合加载到 RGB-LED 灯(LZ4-00MA00)的红外芯片上驱动 LED 发光,产生光信号。实验中,两个发射端的 LED 灯相距 1.3 m。

经过 1.5 m 的自由空间传输后,两路光信号叠加产生 PAM7 信号,并汇聚到接收端。在接收端,用一个光电二极管(PIN, Hamamatsu 10784)探测接收光信号。为了将两路光信号更好地汇聚到 PIN 探测器上,在接收机前配有两个透镜(直径 70 mm,焦距 100 mm)用以聚焦每路光线。接收到的光信号通过 PIN 转换为电信号,然后通过 EA 放大并使用数字存储示波器(digital storage oscilloscope, DSO, Agilent DSO54855A)进行采样量化,以便将采集到的数据进行离线处理。

在离线信号处理中,依次进行信号同步,功率归一化,下采样及差分解码,得到标准化的 PAM7 信号。然后将 PAM7 信号通过基于标量改进的级联多模(scalar-modified cascaded multi-modulus algorithm, S-MCMMMA)的自适应后均衡器以消除符号间干扰。最后,根据编码映射规则,对 PAM7 信号解调以获得原始比特序列并计算系统误码率(bit error rate, BER)。对

表 1 四种 PAM 信号的 PAPR
Table 1 The PAPR of four PAM signals

Signal	Equal probability PAM4	Unequal probability PAM4	Equal probability PAM7	Unequal probability PAM7
PAPR	1.80	1.34	2.25	3.6

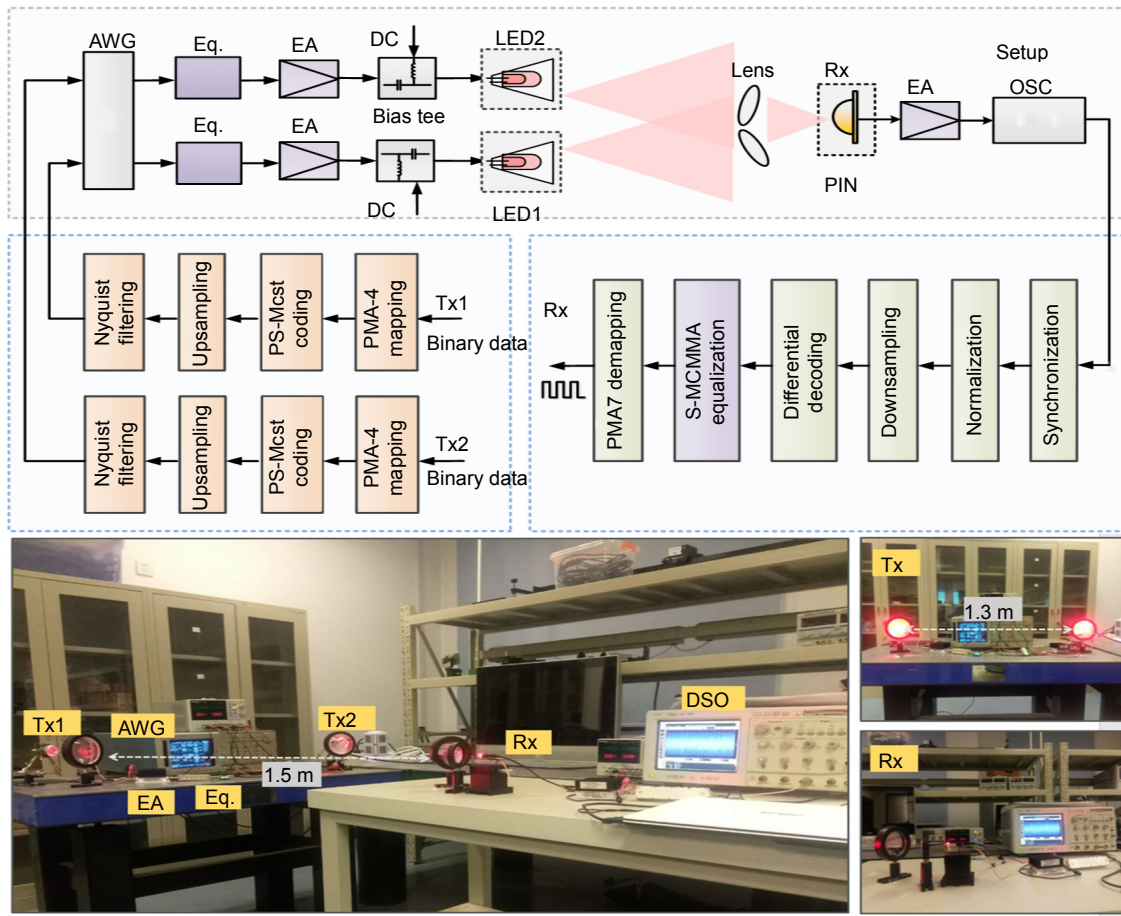


图 2 基于 PAM 调制的两发一收可见光通信系统框图及实验装置图

Fig. 2 The block diagram and experimental setup of two input one output visible light communication system based on PAM modulation

于单发单收的系统，则直接在 MATLAB 中生成两路 PAM4 信号叠加产生 PAM7 信号，然后将其加载到单个 LED 上进行传输。剩下步骤与多发单收的系统类似。

4 单发单收和两发一收 PAM7 系统实验结果比较

为了比较基于 PAM 调制的单发单收和两发一收系统的性能，根据 PAM7 生成方式的不同进行了四种不同系统的实验研究。实验中信号的传输距离为 1.5 m。由于实验条件有限，使用的 AWG520 最高可发送 1 G baud 的信号，信号进行 4 倍上采样，故单路信号的调制带宽为 250 MHz。实验系统采用的是 RGB-LED 灯的红灯，发射端两个灯，每个灯的带宽是 250 MHz，每个灯传输 PAM4/PAM3 信号，调制阶数为 2 阶，故原始速率按 250 MHz×2×2=1 Gb/s 计算，为 1 Gb/s。但严格来说，净比特速率需要先计算信息熵，信息熵公式如下：

$$H(x) = H = -\sum_{x \in \chi} P_X(x) \log_2 P_X(x) \quad (1)$$

其中： χ 代表 PAM 星座点， $P_X(x)$ 是每个电平的概率。以 PAM4 为例， $P_X(x)=1/4$ ，所以 $H(x)=2$ 。然而对于等概率 PAM7 信号来说，各电平概率是 1/7，则 $H(x) = \log_2 7 \approx 2.8$ 。按此信息熵计算，净比特速率为 250 MHz×2.8=700 Mb/s。

4.1 单发单收发射端生成不等概率 PAM7 电信号

$$s(t) = \text{Re}[A_m g(t) e^{j2\pi f_c t}] = A_m g(t) \cos 2\pi f_c t \quad (2)$$

$$s_{Tx1}(t) + s_{Tx2}(t) = (A_{m1} + A_{m2}) g(t) \cos 2\pi f_c t \quad (3)$$

$$P(A_{m1}) = P(A_{m2}) = 1/4 \quad (4)$$

其中： $A_m = (2m-1-M)d$ ， $m=1,2,\dots,M$ ， $s(t)$ 是进行 PAM 调制后的信号， $M=2^k$ ， $k=2$ ， M 是编码电平数，此时 $M=4$ ； A_m 是编码后的符号， $g(t)$ 是脉冲响应函数； $s_{Tx1}(t) + s_{Tx2}(t)$ 是两路信号叠加后的结果。 $P(A_m)$ 表示每路 PAM4 符号各电平的概率，此时各电平概率均为 1/4。当两路等概率 PAM4 信号叠加之后会生成不等概率的 7 电平信号。此时用单灯发射叠加

后不等概率的 7 电平, 在接收端使用 PIN 进行光信号探测接收, 如式(5)所示:

$$r(t) = [s_{Tx1}(t) + s_{Tx2}(t)] + n_0(t) = (A_{m1} + A_{m2})g(t)\cos 2\pi f_c t + n_0(t) \quad (5)$$

接收信号为 $r(t)$, 其加性高斯白噪声为 $n_0(t)$, 接收端用平方律探测, 故表达式如式(6)。其中, $n_r(t)$ 是由接收端引起的噪声。

$$I(t) = |r(t)|^2 + n_r(t) = [(A_{m1} + A_{m2})g(t)\cos 2\pi f_c t]^2 + n_0^2(t) + 2n_0(t)(A_{m1} + A_{m2})g(t)\cos 2\pi f_c t + n_r(t) \quad (6)$$

实验测量了在不同偏置电压 V_{led} 和不同输入信号峰值 V_{pp} 下系统的 BER, 如图 3(a)所示。从图中可看出当 V_{led} 一定时, BER 会随 V_{pp} 的增大先下降后上升, 即系统存在一个最佳 V_{pp} 范围使得系统误码性能最佳。且随着 V_{led} 的增大, V_{pp} 的最佳工作范围会逐渐左移。当输入信号 V_{pp} 超过最佳工作范围的上界时, 随着 V_{led} 的增大, BER 性能恶化越严重。这是因为随着 V_{led} 的增大, 系统将进入 LED 的非线性工作区, 此时信号会产生非线性失真, 使得系统 BER 增大。而当 V_{led} 过小时, LED 的发光效率较低, 光信号强度较弱, 信号 SNR 降低, 也会使系统 BER 升高。此时, 可适当提高信号幅度 V_{pp} 以提升系统 SNR, 改善 BER 性能。同时, 图 3(b)显示了当 LED 偏置电压 V_{led} 固定为 2.0 V 时, 不同 V_{pp} 下的信号星座图。从图中可看出不同符号电平上星座点的密集程度不一样。中间 0 电平处星座点较为密集, 越往两边, 星座点越稀疏, 和符号的出现概率相对应。随着 V_{pp} 的增大, 信号星座图将先变清晰, 后变模糊, 对应系统的 BER 先下降后升高。特别是对于

大幅度 V_{pp} 下的星座点, 高电平星座点混杂在一起, 甚至无法分辨相邻的两条电平线。这是因为当 V_{pp} 过大时, 信号受 LED 非线性影响严重, 信号将产生削顶失真, 使得高电平信号质量严重恶化。

4.2 单发单收发端生成等概率 PAM7 电信号

在 MATLAB 中将两路编码后不等概率 PAM4 信号叠加产生 PAM7 信号, 然后将生成的 PAM7 电信号加载到单个 LED 上进行传输, 在接收端使用 PIN 进行光信号探测接收。此时, 锁定接收端概率相等, 如式(7)所示, 为 1/7。其余叠加之后的接收信号和噪声与 4.1 中式(5), 式(6)同。

$$P(A_{mi} + A_{mj}) = 1/7 \quad (7)$$

接收信号在不同 V_{led} 和 V_{pp} 下的 BER 性能图如图 4(a)所示。从图中可看到, 当 V_{led} 一定时, BER 也会随 V_{pp} 的增大先下降后上升。但和图 3 中不等概率 PAM7 系统的测量结果相比, V_{pp} 的最佳工作范围上界右移, 使得系统的动态工作范围有所增大。这是因为等概率 PAM7 信号的 PAPR 相对较小, 其抵抗非线性的能力较强。因此, 在较高的 V_{pp} 下, 系统仍可工作在误码门限下。同样地, 我们测量了当 LED 偏置电压 V_{led} 固定为 2.0 V 时, 不同 V_{pp} 下的信号星座图, 如图 4(b)所示。可看到, 与图 3(b)中同等条件下的不等概率 PAM7 信号星座点相比, 随着 V_{pp} 的增大, 等概率 PAM7 信号的高电平星座点恶化程度降低。即使在较高的 V_{pp} 下, 接收星座图仍可较清晰地分辨出 7 个电平线。

4.3 两发一收接收端生成不等概率 PAM7 光信号

将两路标准 PAM4 信号分别调制到两个 LED 上,

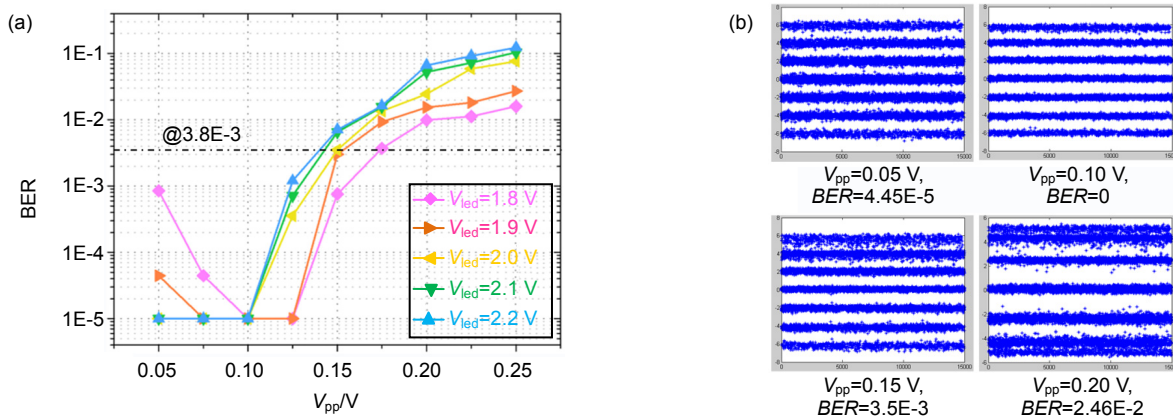


图 3 单发单收发端不等概率 PAM7 信号情况下。(a) BER 随 V_{led} 和 V_{pp} 变化关系; (b) 不同 V_{pp} 下不等概率 PAM7 信号星座点和 BER

Fig. 3 Unequal probability PAM7 signal at transmitter in single input single output system. (a) The BER performance with V_{led} and V_{pp} ; (b) The constellation points and BER performance under different V_{pp}

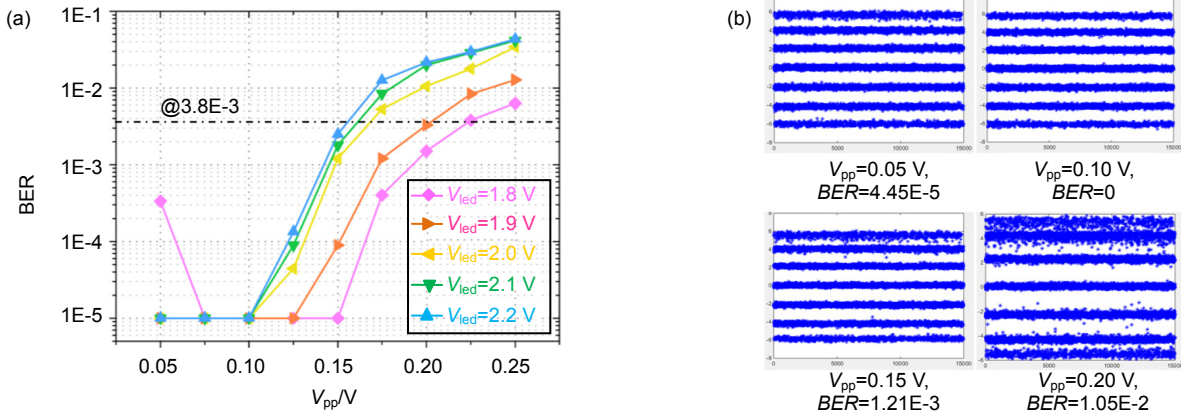


图 4 单发单收发射端等概率 PAM7 信号情况下。(a) BER 随 \$V_{led}\$ 和 \$V_{pp}\$ 变化关系; (b) 不同 \$V_{pp}\$ 下等概率 PAM7 信号星座点和 BER

Fig. 4 Equal probability PAM7 signal at transmitter in single input single output system. (a) The BER performance with \$V_{led}\$ and \$V_{pp}\$; (b) The constellation points and BER performance under different \$V_{pp}\$

通过两路光信号在自由空间传输时光域的叠加产生 PAM7 信号。发射信号表达式如式(2)至式(4)，接收信号表达式如下所示：

$$\begin{aligned}
 r(t) &= s_{Tx1}(t) + n_{0_{Tx1}}(t) + s_{Tx2}(t) + n_{0_{Tx2}}(t) \\
 &= (A_{m1} + A_{m2})g(t)\cos 2\pi f_c t + n_{0_{Tx1}}(t) + n_{0_{Tx2}}(t), \quad (8) \\
 I(t) &= |r(t)|^2 + n_r(t) \\
 &= [(A_{m1} + A_{m2})g(t)\cos 2\pi f_c t]^2 \\
 &\quad + [n_{0_{Tx1}}(t) + n_{0_{Tx2}}(t)]^2 \\
 &\quad + 2[n_{0_{Tx1}}(t) + n_{0_{Tx2}}(t)](A_{m1} + A_{m2})g(t)\cos 2\pi f_c t \\
 &= [(A_{m1} + A_{m2})g(t)\cos 2\pi f_c t]^2 \\
 &\quad + n_{0_{Tx1}}^2(t) + n_{0_{Tx2}}^2(t) + 2n_{0_{Tx1}}(t)n_{0_{Tx2}}(t) \\
 &\quad + 2[n_{0_{Tx1}}(t) + n_{0_{Tx2}}(t)] \\
 &\quad \cdot (A_{m1} + A_{m2})g(t)\cos 2\pi f_c t + n_r(t). \quad (9)
 \end{aligned}$$

在接收端通过一个 PIN 接收探测光信号。实验测量了接收信号在不同 \$V_{led}\$ 和 \$V_{pp}\$ 下的 BER 性能图，如图 5(a)所示。可以看到，当 \$V_{led}\$ 一定时 BER 也随 \$V_{pp}\$ 的增大先下降后上升。和单发单收的 PAM7 系统相比，虽然该系统出现无误码的动工作区间变小。但 BER 低于 \$3.8 \times 10^{-3}\$ 误码门限的动态工作范围却有所增大。特别是当 \$V_{led}\$ 较低时，系统在很大的输入信号 \$V_{pp}\$ 下仍可保持较好的误码性能，BER 低于误码门限。这是因为在每路发射端只需发送 4 电平的 PAM4 信号，即使在较大的 \$V_{pp}\$ 或 \$V_{led}\$ 下，发射信号受 LED 非线性失真的影响也较小。此外，图 5(b)显示了 \$V_{led}\$ 固定为 2.0 V 时，不同 \$V_{pp}\$ 下的 PAM7 信号星座图。从星座图中可明显看出不同电平星座点的密集程度不一致。高电平星座

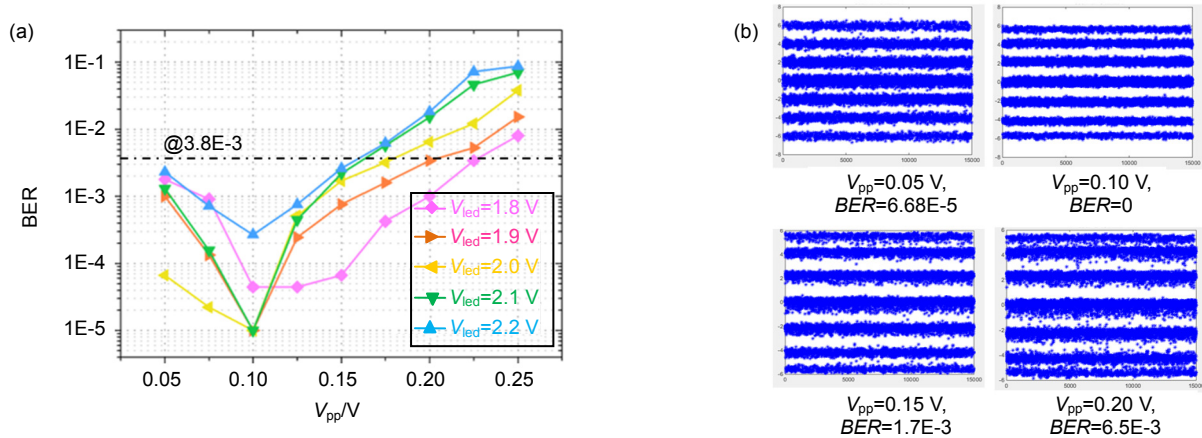


图 5 两发一收接收端不等概率 PAM7 信号情况下。(a) BER 随 \$V_{led}\$ 和 \$V_{pp}\$ 变化关系; (b) 不同 \$V_{pp}\$ 下不等概率 PAM7 信号星座点和 BER

Fig. 5 Unequal probability PAM7 signal at receiver in two input one output system. (a) The BER performance with \$V_{led}\$ and \$V_{pp}\$; (b) The constellation points and BER performance under different \$V_{pp}\$

点由于存在非线性失真,星座点也有所发散模糊,但仍可分辨出相邻的高电平星座带。

4.4 两发一收接收端生成等概率 PAM7 光信号

在两发一收的等概率 PMA7 系统中,先将两路标准 PAM4 信号进行编码以生成不等概率的 PAM4 信号,然后将其分别调制到两个 LED 上。发射信号限制条件如式(7)。两路光信号经过自由空间的传输在光域叠加,从而在接收端生成等概率的 PAM7 信号。测量了接收信号在不同 V_{led} 和 V_{pp} 下的 BER 性能,如图 6(a) 所示。可看到相比于单发单收 PAM7 系统和两发一收生成不等概率 PAM7 信号的系,该系统在较高 V_{led} 和 V_{pp} 电压下,仍可保持较低的 BER。当输入信号 $V_{pp}=0.225\text{ V}$ 时, V_{led} 在小于 2.2 V 的情况下,系统 BER 都可保持在误码门限之下。这是因为在两个 LED 上分别传输符号概率不等的低阶 PAM4 信号,可以有效抵抗 LED 非线性效应带来的信号失真,并减轻信号的码间干扰,从而使系统可工作在较大的偏置电压和输入信号 V_{pp} 下。此外,图 6(b)显示了当 LED 偏置电压 V_{led} 固定为 2.0 V 时,不同 V_{pp} 下的信号星座图。与单发单收系统中接收 PAM7 信号的星座点相比,两发一收等概率 PAM7 信号的星座点扩散度较小,星座点基本收敛在电平线附近。因此,即使在较大的 V_{pp} 下,仍然以可清晰分辨出星座图中的 7 条电平线。接收信号星座图也进一步表明了该系统具有较好的抗 LED 非线性性能。

最后,图 7 绘制了四种系统的动态工作范围二维图。横坐标是 LED 的偏置电压,纵坐标是输入信号

V_{pp} 。图中颜色的深浅表示 BER 的大小,颜色越暖表示 BER 越小,颜色越蓝表示 BER 越大。从图中可看出,两发一收等概率 PAM7 系统具有最大的动态工作范围,单发单收不等概率 PAM7 系统的动态工作范围最小。而单发单收等概率 PAM7 系统和两发一收不等概率 PAM7 系统的工作范围相近。两发一收等概率 PAM7 系统可实现系统动态工作范围的扩大,主要有两点原因:1) 两个发射端分别发送低阶 PAM4 信号,可减小码间干扰;2) 特殊编码的不等概率 PAM4 信号 PAPR 显著降低,增强了系统抗非线性失真的能力。因此,该系统在较高的偏置电压和较大的输入信号 V_{pp} 下,仍能保持较好的误码性能。

5 结 论

本文中,主要研究了基于 PAM 调制的 MISO 可见光通信系统。针对可见光通信系统中 LED 的非线性效应,基于两发一收的可见光系统,设计了两路低阶 PAM4 信号在光域叠加产生高阶等概率 PAM7 信号的新型编码映射方案。该方案可有效抵抗 LED 的非线性失真,并减轻信号的码间干扰。此外,通过 RGB-LED 的红灯完成净比特速率 700 Mb/s 的传输实验系统验证。实验中,比较了单发单收生成等概率/不等概率 PAM7 信号,两发一收生成等概率/不等概率 PAM7 信号这四种系统在不同 LED 偏置电压和输入信号 V_{pp} 下的 BER 性能。实验结果表明,两发一收生成等概率 PAM7 信号的方案,由于具有较大的符号间平均欧氏距离和较低的 PAPR,可有效抵抗信号的码间干扰和

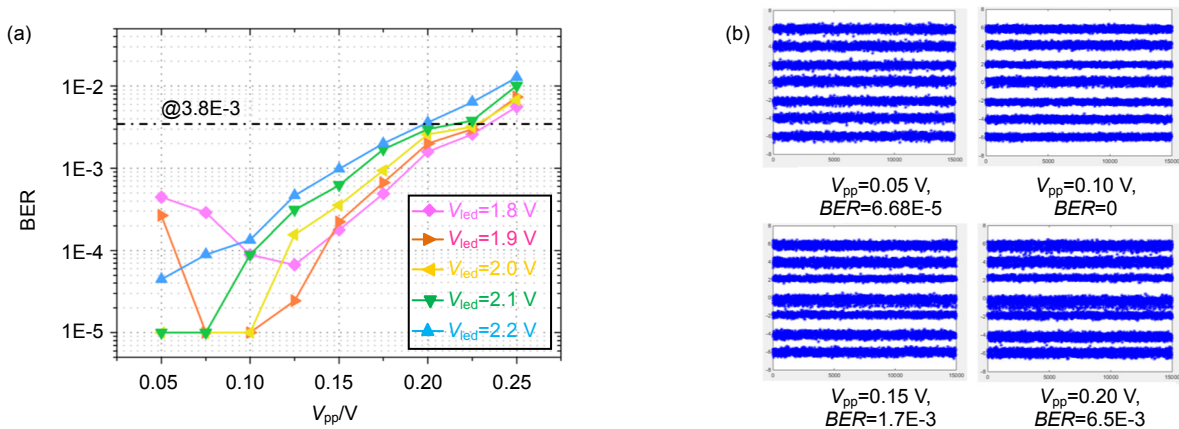


图 6 两发一收接收端等概率 PAM7 信号情况下。(a) BER 随 V_{led} 和 V_{pp} 变化关系; (b) 不同 V_{pp} 下等概率 PAM7 信号星座点和 BER

Fig. 6 Equal probability PAM7 signal at receiver in two input one output system. (a) The BER performance with V_{led} and V_{pp} ; (b) The constellation points and BER performance under different V_{pp}

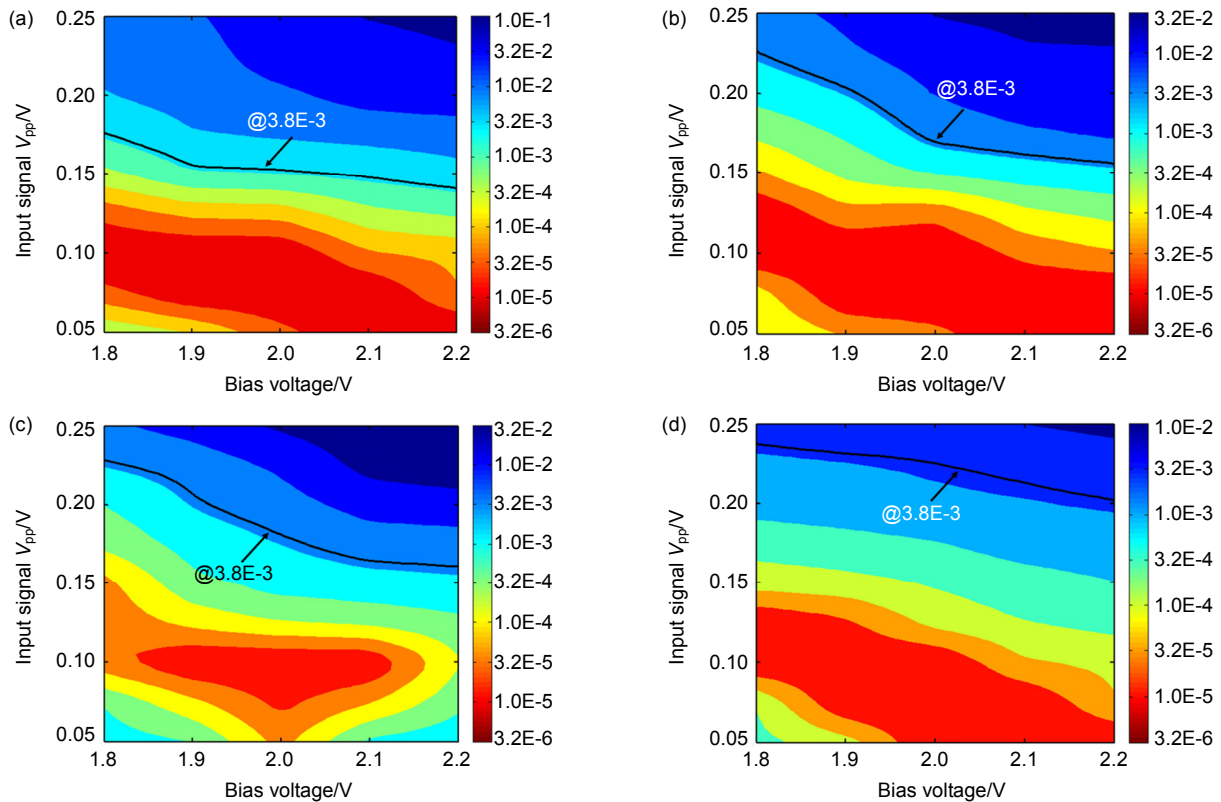


图 7 系统动态工作范围比较。(a) 单发单收发端生成不等概率 PAM7; (b) 单发单收发端生成等概率 PAM7; (c) 两发一收接收端生成接收不等概率 PAM7; (d) 两发一收接收端接收生成等概率 PAM7
 Fig. 7 The comparison of system's dynamic working area. (a) Unequal probability PAM7 signal at transmitter in SISO system; (b) Equal probability PAM7 signal at transmitter in SISO system; (c) Unequal probability PAM7 signal at receiver in two input one output system; (d) Equal probability PAM7 signal at receiver in two input one output system

LED 的非线性失真, 增大系统的动态工作范围。因此, 该方案在 LED 偏置电压或输入信号 V_{pp} 较大的可见光通信系统中具有一定的优势。

参考文献

[1] Zeng L B, O'Brien D C, Le Minh H, et al. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1654–1662.

[2] Mesleh R, Mehmood R, Elgala H, et al. Indoor MIMO optical wireless communication using spatial modulation[C]//*Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications*, 2010: 1–5.

[3] Yu Z H, Baxley R J, Zhou G T. Multi-user MISO broadcasting for indoor visible light communication[C]//*Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2013: 4849–4853.

[4] Qian H, Yao S J, Cai S Z, et al. Adaptive postdistortion for nonlinear LEDs in visible light communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 7901508.

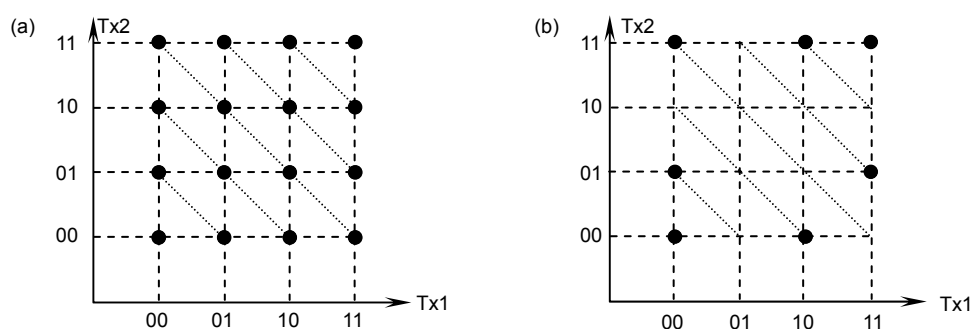
[5] Wang C, Zhou Y J, Chi N. Research of LED's nonlinear distortion compensation algorithm in visible light communications[J]. *China Light & Lighting*, 2017(7): 9–15, 26. 王灿, 周盈君, 迟楠. 可见光通信中抗非线性方法的比较研究[J]. *中国照明电器*, 2017(7): 9–15, 26.

[6] Zhang M J, Shi M, Wang F M, et al. 4.05-Gb/s RGB LED-based VLC system utilizing PS-Manchester coded Nyquist PAM-8 modulation and hybrid time-frequency domain equalization[C]//*Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference*, 2017: 1–3.

Two input one output visible light communication system based on pulse amplitude modulation

Shi Meng, Zhang Mengjie, Chi Nan*

Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Science, Ministry of Education, Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China



The schematic diagram of PAM7 signals generated by two PAM4 signals superposition.

(a) Unequal probability PAM7 signals; (b) Equal probability signals

Overview: To improve the data transmission rate of the conventional point-to-point single input single output (SISO) visible light communication system, a multiple input multiple output (MIMO) visible light communication system is proposed. Considering the complexity of the receiver system, multiple input single output (MISO) visible light communication systems have attracted attention.

In addition, in the VLC system, a series of key devices such as LED light sources and power amplifiers have nonlinear effects, and the nonlinear distortion of the system would damage the system performance. The nonlinearity of the LED modulation curve is the main source of nonlinearity in the VLC system. The visible light signal is mainly modulated in the linear region of the LED to reduce the signal damage caused by nonlinear distortion. However, at this time, the luminous efficiency of the LED is low, and the illumination brightness generally cannot meet the lighting requirements of the actual application scene. What's more, for high-order modulation signals, the peak-to-average power ratio (PAPR) of the signal is higher due to an increase in the number of signal levels, and is more susceptible to system nonlinearity. Therefore, in the MISO system, multiple LED lights can be used to transmit signals at the same time, low-order signals are modulated on each lamp, and high-order signals are generated by superposition of optical signals to resist nonlinear distortion of the LED at the transmitter. The simultaneous light emission of multiple LED lights can also increase the brightness of the lighting to meet the actual lighting requirements.

This paper studies the MISO visible light communication system based on pulse amplitude modulation (PAM), and proves the advantages of using this system in specific scenes by experiment. Based on 2×1 MISO visible light communication system, a novel equal probability coding mapping scheme for high-order PAM signals with two low-order PAM signals superposition in the optical domain is designed. In the experiment, we investigated and compared the BER performance under different bias tee voltage and V_{pp} for four systems which are single-input-single-output generation PAM7 signals with equal probability and unequal probability, two-input-one-output generation PAM7 signals with equal probability and unequal probability, respectively. The experimental results show that the scheme we proposed, for generating equal-probability PAM7 signals in 2×1 MISO system with the large average Euclidean distance between symbols and a lower PAPR, can effectively resist the inter-symbol interference and the nonlinear distortion of LEDs and enlarge the dynamic working area of the system. Finally, the system verification is performed through a net data-rate of 700 Mb/s transmission experiment utilizing a red chip of RGB-LED, which proves the feasibility and superiority of this scheme in practice.

Citation: Shi M, Zhang M J, Chi N. Two input one output visible light communication system based on pulse amplitude modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180306

Supported by National Natural Science Foundation of China Project (61571133) and National Key Research and Development Program of China (2017YFB0403603)

* E-mail: nanchi@fudan.edu.cn