

文章编号 1004-924X(2014)07-1760-06

## 可见光通信的间隔多脉冲位置调制

郭树旭\*, 臧玲玲, 韩明珠, 陈海鹏, 钟 菲

(吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**根据室内可见光通信(VLC)的信道传输特性,建立了一种可见光通信系统的链路模型,提出了用于 VLC 系统的间隔多脉冲位置调制(IMPPM)方案。介绍了 IMPPM 方案的符号结构,并将该方案与 VLC 系统的另外两种调制方式,脉冲位置调制(PPM)和多脉冲位置调制(multi-PPM, MPPM)在带宽、功率需求,比特误差率(BER)等方面进行了比较。结果显示:MPPM 和 IMPPM 在信源( $M$ 为 3,4,5 bit 时的带宽需求和功率需求取得了比较好的平衡。当 BER 达到  $10^{-3}$  时,IMPPM 接收的光功率比 PPM 低 4 dB,比 MPPM 低 2 dB;由于 IMPPM 中相邻两脉冲有时间间隔,所以,其 BER 性能要优于 MPPM。IMPPM 用于可见光通信时,其功率需求低于 MPPM,抗多径及码间干扰的能力优于 PPM 和 MPPM。

**关键词:**可见光通信;链路模型;间隔多脉冲位置调制;带宽;功率;误码率

**中图分类号:** TN919.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1760

### Interval pulse position modulation in visible light communication

GUO Shu-xu\*, ZANG Ling-ling, HAN Ming-zhu, CHEN Hai-peng, ZHONG Fei

(College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding author, E-mail: guosx@jlu.edu.cn

**Abstract:** Based on channel transmission properties of the indoor Visible Light Communication (VLC) systems, a link model for VLC systems was described. Then the Interval Pulse Position Modulation (IMPPM) scheme applied in VLC systems was proposed by using the link model. The symbolic structure of the IMPPM scheme was introduced, then the scheme was compared with the other two modulation schemes, Pulse Position Modulation(PPM) and Multi-PPM(MPPM), on the bandwidths, power requirements and Bit Error Rates(BERs). Simulation results indicate that IMPPM applied in VLC systems can make a better balance in bandwidths and power requirements when the source bit ( $M$ ) is 3, 4, 5. As the BER reaches  $10^{-3}$ , the received optical power of IMPPM is 2 dB and 4 dB lower than those of the MPPM and PPM respectively. Moreover, the BER of IMPPM is superior to that of the MPPM because the pulses of IMPPM has intervals. Obtained results demonstrate that the IMPPM has low power requirements and better performance on anti-multipath and inter-symbol interference compared with that of PPM and MPPM.

**Key words:** Visible Light Communication (VLC); link model; Interval Pulse Position Modulation (IMPPM); bandwidth; power; bit error rate

收稿日期:2013-08-30;修订日期:2013-10-24.

基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(No. 20090505)

## 1 引言

一直以来,无线数据通信在人们的生活中占有非常重要的位置<sup>[1]</sup>,在机场、车站、家庭和办公室中,人们对无线链路的需求也越来越大。近年来,随着固态照明的日益普及,发光二极管(LED)的应用也越来越广泛。LED不仅具有低功耗、节能、环保等优点,还拥有切换快、灵敏度高和调制性能好等特点,因此它可用于可见光通信(Visible Light Communication, VLC)中传输信号<sup>[2]</sup>。2004年, Toshihiko Komine 和 Masao Nagawa 提出了白光 LED 室内无线网络的无线光通信系统,在此系统中,LED 被同时用于照明和数据传输<sup>[3]</sup>。

在可见光通信系统中,通信的同时要兼顾照明,因此需要减轻闪烁和调光支持。目前,已有多种可见光通信的调制方案被提出。Jelena Vucic 等人提出了基于正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)的离散多音频调制(Discrete Multitone, DMT)方案,并采用位-功率装载和对称限幅,通过使用量子噪声限制的低噪声光检测,有效地利用调制带宽与所使用的 LED 发射的高信噪比(SNR),实现了速率为 513 Mbit/s 的数据传输<sup>[4]</sup>。该 DMT 系统的优点是多径传播环境下的鲁棒性,能容忍信道的延时扩展;使用保护间隔能减少码间干扰(ISI);由于使用许多子载波,其均衡化相对于单载波更简单,并且对衰落有较好的抵抗性。但该系统过于复杂,不易实现。Hidemitsu Sugiyama 等人提出了倒置脉冲位置调制(I-PPM)和子载波倒置脉冲位置调制(SC-I-PPM)两种方案,这两种调制方案可为可见光通信提供卓越的 LED 亮度,表明了副载波调制能抑制背景光的影响<sup>[5]</sup>。Xiaoxue Ma 比较了脉冲位置调制(PPM)、重叠脉冲位置调制(OPPM)和 I-PPM,并用网格编码调制(TCM)来提高误码率(BER)性能,调光等级在 37.5%~62.5%时,TCM-8OPPM 方案相比于其他方案表现出更好的性能<sup>[6]</sup>。

本文提出了用于可见光通信的间隔多脉冲位置调制(Interval MPPM, IMPPM)方案,并对

PPM、MPPM 和 IMPPM 方案在可见光通信中的带宽、功率需求和误码率特性进行了分析和比较。

## 2 可见光通信系统的链接方式

室内可见光通信从发射到接收的链接方式有多种,而室内的白光 LED 灯一般安装在天花板上,所以大体上有直射视距链路(Line of Sight, LOS)和漫反射链路两种类型。本文选用的传输链路属于 LOS,即接收机接收到的光大部分是发射机发射过来的未经反射的光,少部分是经墙面和地面反射后的光。由于直射信号的强度远大于反射信号的强度,所以接收信号可以忽略漫反射的部分,只考虑 LOS 的情况。

本文做了如下假设:(1)主要的散粒噪声是在高斯白噪声(AWGN)信道;(2)信号传输接收时具有完美的同步性;(3)光路不受阻。另外,忽略信号引起的散粒噪声,模拟仿真环境光引起的散粒噪声。因此,接收的光信号可表示为<sup>[3]</sup>:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) + n(t), \quad (1)$$

其中: $y(t)$ 表示接收的光信号; $x(t)$ 表示瞬时发射器的光功率, $x(t) \geq 0$ ; $h(t)$ 表示信道脉冲响应; $n(t)$ 是加性高斯白噪声, $\otimes$ 表示卷积。

信道的直流增益为:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c, \\ 0, & \psi > \psi_c. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $A$ 是光电探测器的接收面积, $m$ 是光源的辐射模式, $d$ 是发射端与接收端之间的距离, $\varphi$ 是发射角, $\psi$ 是入射角, $T_s(\psi)$ 是光学滤波器的增益, $g(\psi)$ 是光学集中器的增益, $\psi_c$ 为光电探测器的视场。

因系统的链路为 LOS 链路,故信道的直流增益  $H(0)$  等于信道的脉冲响应,即:

$$H(0) = \int_0^T h(t) dt. \quad (3)$$

接收光功率可表示为:

$$P_r = H(0) P_t, \quad (4)$$

其中:  $P_t$  为发送端的瞬时传输光功率,  $P_r$  为接收光功率。

### 3 IMPPM 调制方案与仿真分析

在可见光通信中, 二进制启闭键控 (On-off Keying, OOK) 方式实现起来比较简单, 优点很多, 其缺点是功率效率不高。PPM 接收端需要时隙同步与符号同步, 且数据速率受限, 系统不灵活。它的特点是低能量传输, 若想进行高能量传输, 带宽需求将以指数形式增长, 对系统的要求大大增加, 实现起来比较困难<sup>[7-8]</sup>。而 MPPM 相比于 PPM 既不需要高频率的子载波来传送数据, 也不需要 PWM 信令来调光。光线从不同的路径经反射到达接收端的光电检测器上, 并伴有延迟, 即多径效应。该效应会引起不同光信号之间在时

间上的重叠, 即引起码间干扰 (ISI, Inter-Symbol Interference), 并造成接收端的误判<sup>[9]</sup>。也就是说, 当路径 2 中传输的信号相对于路径 1 有一定的延迟时, 若延迟大于脉冲信号的发射间隔, 这两个相邻的脉冲信号在到达接收端时会产生混叠, 从而导致误码。MPPM 相比于 PPM 更容易产生这种多径传输造成的混叠。故本文提出 MPPM 的改进形式, 并与二脉冲的脉冲位置调制进行对比。

图 1 是调制方案的 VLC 系统框图, E/O 为电光信号的转换。首先, 信源产生随机序列, 经调制后转换为光信号发射出去, 接收端进行聚光和光滤波后到达光电检测器。信号经光电转换后, 通过滤波放大等操作恢复调制码流, 最后解调。把解调后的序列与信源产生的原始序列进行对比计算, 得出误码率。



图 1 调制方案的 VLC 系统框图

Fig. 1 Block diagram of VLC systems for modulation scheme

#### 3.1 IMPPM 的符号结构

1988 年, Herro 和 Hu 两人首先提出 MPPM。它是 PPM 的一个推广<sup>[10-11]</sup>, 允许在一个符号中放置多个脉冲。例如将 Mbit 信息对应的时间间隔划分为长度相等的  $n$  个时隙, 然后在  $n$  个时隙上的不同位置放  $w$  个脉冲。因此, MPPM 相比 PPM 有更多“1”脉冲相连的情形, 即脉冲信号间无发射间隔, 接收端更易发生混叠, 使误码率提高。

由于 ISI 影响变大时, OOK-RZ 的误码率特性比 OOK-NRZ 好, 因此在 MPPM 的基础上改进脉冲信号, 在其脉冲前加入“保护时间”, 只要延迟时间小于保护间隔, 就不会有码间干扰。首先在每个符号前加一保护时隙, 保证任意两个符号间有时间间隔; 其次在编码映射时, 去除掉脉冲相连的情况, 这样就能保证每两个脉冲间均有“保护时间”。当  $M=3, W=2$  时, MPPM 每个码字长度至少取 5, IMPPM 的码字长度至少取 7 才能产生这样的组

合。表 1 是 4 种调制方式的符号结构。

表 1 4 种调制方式符号结构的对比

Tab. 1 Comparison of symbolic structures among several modulation schemes

信源比特	OOK	PPM	MPPM( $w=2$ )	IMPPM
000	000	10000000	00110	0101000
001	001	01000000	01001	0100100
010	010	00100000	00101	0100010
011	011	00010000	00011	0100001
100	100	00001000	11000	0010100
101	101	00000100	10100	0010010
110	110	00000010	10010	0010001
111	111	00000001	01100	0001001

#### 3.2 仿真结果分析

图 2 是 3 种调制方式的规范化功率需求。此处的规范化是为了便于比较, 将几种调制方式的带宽、功率相对于 OOK 进行规范化, 例如 PPM 的规范化带宽需求为  $B_{L-PPM}/B_{OOK}$ 。由图 3 可见, PPM 的功率需求下降速度比较快, 而 MPPM 与 IMPPM 的功率需求变化较为缓慢, 并且二者比较接近。图 3 显示了 3 种调制方式相对于 OOK 的归一化带宽需求, 可以看出, PPM 的带宽需求

是最高的,并且呈上升趋势,上升速度较快;MPPM 与 IMPPM 的带宽需求呈下降趋势。比较图 2 和图 3 可以看出,IMPPM 在信源  $M=4, 5, 6, 7$  bit 时,功率与带宽需求均取值较低,在带宽需求和功率需求上取得了较好的平衡。

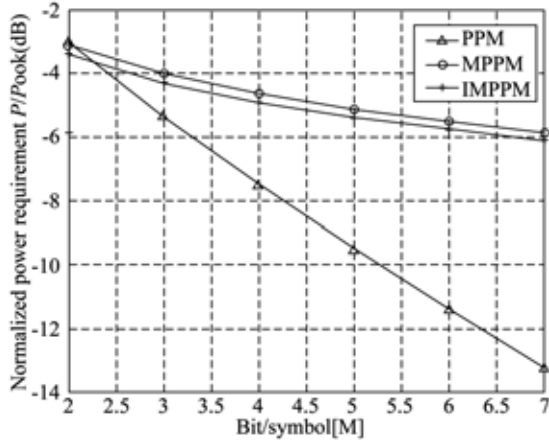


图 2 功率需求

Fig. 2 Power requirements

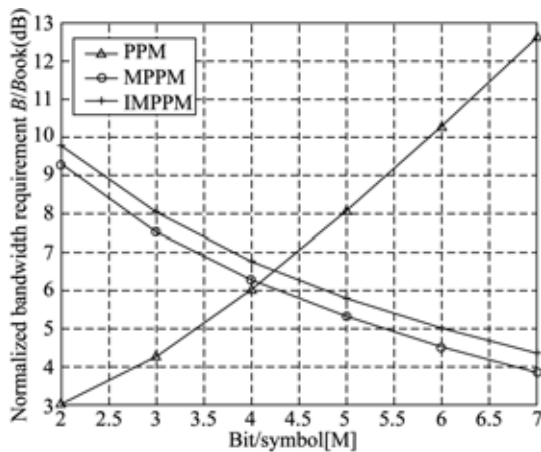
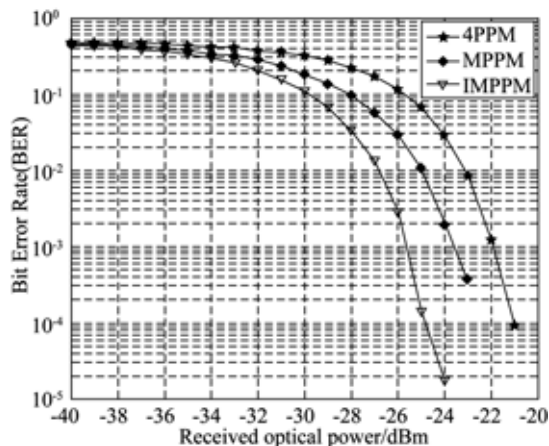
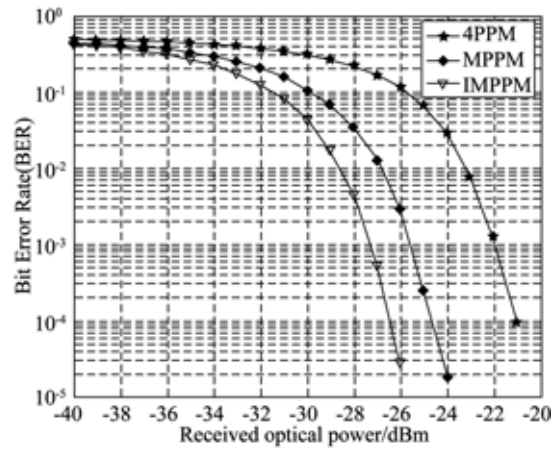


图 3 带宽需求

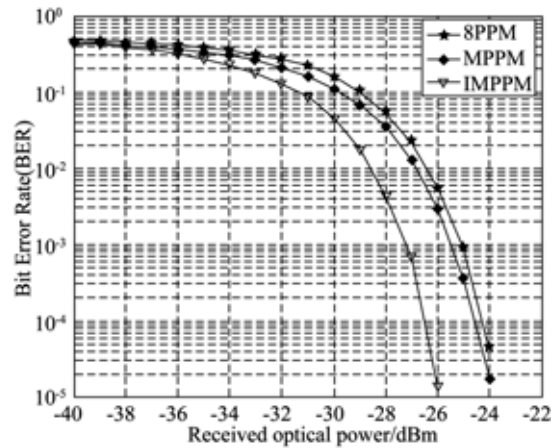
Fig. 3 Bandwidth requirements



(a) PPM ( $M=2$ ), MPPM, IMPPM ( $M=3$ )



(b) PPM ( $M=2$ ), MPPM, IMPPM ( $M=4$ )



(c) PPM ( $M=3$ ), MPPM, IMPPM ( $M=4$ )

图 4 PPM, MPPM, IMPPM 可见光通信系统的 BER 仿真

Fig. 4 BER of VLC system with PPM, MPPM and IMPPM

图 4 显示了 PPM、MPPM 和 IMPPM 3 种调制方式的可见光通信的总接收光功率 (dBm) 的误码性能。图 4(a) 中 PPM 的  $M$  为 2 bit, MPPM 和 IMPPM 的  $M$  为 3 bit, 图 4(b) 中 MPPM 和 IMPPM 的  $M$  为 4 bit 时, 图 4(c) 中 PPM 的  $M$  为 3 bit, MPPM 和 IMPPM 的  $M$  为 4 bit。由图可以看出, IMPPM 由于加大了相邻脉冲的发射间隔, 其误码性能要明显优于 PPM 和 MPPM, 也就是说“保护时间”的加入在一定程度上减弱了 ISI 的影响。

表 2 列出了当误码率达到  $10^{-3}$  时, 各调制方式所接收的光功率的比较。可以看出, 当误码率

达到  $10^{-3}$  时,改进的 IMPPM 调制方法接收到的光功率比 MPPM 低 2 dB,也就是低 2 个数量级。这意味着在可见光通信系统中,要达到相同的误

码率,IMPPM 调制方案的接收光功率比 MPPM 少 2 个数量级,不仅大大降低了对可见光通信系统发射接收端的要求,也使系统更易实现。

表 2 BER $\leq 10^{-3}$  时接收光功率 ( $P_{rPPM}$ ,  $P_{rIMPPM}$ ,  $P_{rMPPM}$ ) 的对比

Tab. 2 Comparison of received optical powers when BER =  $10^{-3}$

	$P_{rPPM} - P_{rIMPPM}/\text{dB}$	$P_{rMPPM} - P_{rIMPPM}/\text{dB}$
图 4(b) PPM (M=2), MPPM, IMPPM (M=4)	6	2
图 4(a) PPM (M=2), MPPM, IMPPM (M=3)	4	2

## 4 结 论

本文研究了用在 VLC 系统的间隔多脉冲位置调制 (IMPPM), 并将它与其他几种调制方式在带宽、功率需求, BER 性能等方面进行了比较。结果发现, MPPM 和 IMPPM 在  $M=3, 4, 5$  bit 时的带宽需求和功率需求取得了比较好的平衡。从 MPPM 和 IMPPM 符号结构来看, 两者都存在冗

余, 这些冗余有助于降低误码性能, 提高系统的抗干扰性能。仿真结果显示, 当误码率达到  $10^{-3}$  时, 接收光功率 IMPPM 比 PPM 低 6 dB, 比 MPPM 低 2 dB, BER 性能好于 MPPM 和 PPM。另外, 由于 IMPPM 中相邻两脉冲有时间间隔, 所以其 BER 性能要优于 MPPM。上述结果表明, IMPPM 用于可见光通信时, 其功率需求低于 MPPM, 抗多径干扰的能力更好。

## 参考文献:

- [1] 赵丽丽, 王挺峰, 孙文涛, 等. 无线激光通信协议的设计[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 639-647.  
ZHAO L L, WANG T F, SUN W T, *et al.*. Protocol design for free space optical communication [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 639-647. (in Chinese)
- [2] 王俊波, 谢秀秀, 曹玲玲, 等. 室内可见光通信中的分数间隔均衡技术[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(1): 24-30.  
WANG J B, XIE X X, CAO L L, *et al.*. Fractionally spaced equalizer for indoor visible light communication system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 24-30. (in Chinese)
- [3] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.
- [4] VUCIC J, KOTTKE C, NERRTER S, *et al.*. 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(24): 3512-3518.
- [5] SUGIYAMA H, HURUYAMA S, NAKAGAWA M. Experimental investigation of modulation method for visible-light communications [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2006, E89-B(12): 3393-3400.
- [6] MA X U, LEE K. Appropriate modulation scheme for visible light communication systems considering illumination [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(18): 1137-1139.
- [7] RAJAGOPAL S, ROBERTS R D. Visible light communication; modulation schemes and dimming support [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(3): 72-82.
- [8] GHASSEMLOOY Z, RAJBHANDARI S. *Optical*

*Wireless Communications* [M]. Taylor & Francis Group, CRC Press, 2013.

- [9] 莫晨晓,陈长缨. 高速白光 LED 光通信系统中的码间干扰及其抑制[J]. 光通信技术, 2012, 1:59-61.

MO CH X, CHEN CH Y. The inter-symbol interference of high-speed white light LED communication system and its restraining [J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 1:59-61. (in Chinese)

- [10] PARK H, BARRY J R. Trellis-coded multiple-

pulse-position modulation for wireless infrared communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2004, 52(4):643-651.

- [11] 秦岭,柯熙政. 一种二脉冲的 MPPM 编码映射方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(3): 269-272.

QIN L, KE X ZH. A study of mapping scheme for dual-pulse MPPM [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2007, 23(3): 269-272. (in Chinese)

#### 通讯作者:



郭树旭(1959—),男,黑龙江虎林人,教授,博士生导师,主要从事信息和信号处理、光电信息检测与分析的研究。E-mail: guosx@jlu.edu.cn

#### 作者简介:



臧玲玲(1987—),女,河南漯河人,硕士研究生,2011年于吉林大学获得学士学位,主要从事信号处理及可见光通信的研究。E-mail: zangll20101907@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)