

文章编号: 0258-7025(2010)07-1750-06

# 无线光通信双脉冲间隔调制方法

程 刚 王红星 孙晓明 张铁英

(海军航空工程学院电子工程系, 山东 烟台 264001)

**摘要** 针对脉冲位置调制(PPM)和数字脉冲间隔调制(DPIM),以及定长数字脉冲间隔调制(FDPIM)等方法存在的问题,提出了一种新的双脉冲间隔调制(DP-PIM)。在给出其符号结构的基础上,分析了带宽需求、传输容量和平均发射功率,推导出了弱湍流信道下的误包率模型,并与 PPM,DPIM,FDPIM 和开关键控(OOK)调制等方法进行了比较。结果表明,DP-PIM 不仅比 FDPIM 和 PPM 显著缩短了符号长度,提高了带宽效率和传输容量,而且与 DPIM,双头脉冲间隔调制(DH-PIM)和双幅度脉冲间隔调制(DAPIM)一样具有内置符号同步能力,同时通过固定符号长度,克服了缓存器可能出现的冗位或溢位等问题,因而在无线光通信系统中将具有一定的应用前景。

**关键词** 无线光通信;调制方式;双脉冲间隔调制;内置同步;定长符号

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1750

## Dual Pulse-Pulse Interval Modulation for Optical Wireless Communications

Cheng Gang Wang Hongxing Sun Xiaoming Zhang Tieying

(Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute,  
Yantai, Shandong 264001, China)

**Abstract** A new modulation scheme called dual pulse-pulse interval modulation (DP-PIM) is proposed for optical wireless communication systems by resolving the problems which exist in fixed-length digital pulse interval modulation (FDPIM), pulse position modulation (PPM), and digital pulse interval modulation (DPIM). Based on given symbol structure, bandwidth requirement, average transmission power and capacity are studied. Meanwhile, the packet error rate is derived based on weak turbulence channel model. After compared with on-off keying (OOK), PPM, DPIM and FDPIM, the theoretical and simulation results show that DP-PIM has no problem such as overflow and underflow in the buffer by fixing the symbol length. DP-PIM also has built-in symbol synchronization as same as DPIM and FDPIM, meanwhile offers higher bandwidth efficiency and transmission capacity by reducing the average symbol duration for the given parameters. Hence, DP-PIM is superior in optical wireless communication systems.

**Key words** optical wireless communications; modulation scheme; dual pulse-pulse interval modulation; built-in synchronization; fixed symbol length

## 1 引 言

无线光通信不仅同时具有光纤通信和移动通信的优势,而且无需频率申请、保密性好、功耗小和组网便捷,尤其是能够满足当前高速率大容量的数据传输要求,因而近年来备受关注<sup>[1~10]</sup>。由于目前使用的光源所发出光载波的单色性和相干性都无法和电载波相媲美,因此在商用无线光通信系统中广泛

采用强度调制/直接检测(IM/DD)系统。其中可用的调制方式很多<sup>[11,12]</sup>,比较典型的有开关键控(OOK)调制、脉冲位置调制(PPM)和数字脉冲间隔调制(DPIM)。三者比较<sup>[13]</sup>,OOK方式实现简单,但功率利用率太低,而且抗干扰能力差;PPM的功率利用率最高,抗干扰能力也强,但同时增加了带宽需求和需要符号同步;DPIM不需要符号同步,带宽

收稿日期:2009-08-12;收到修改稿日期:2009-11-17

作者简介:程 刚(1962—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事无线光通信调制编码技术方面的研究。

E-mail: cnchengg@sina.com; cnchengg@yahoo.com.cn

导师简介:王红星(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信技术、现代通信新技术等方面的研究。

E-mail: emailofzty@126.com

效率高,功率效率也比 OOK 高。基于 DPIM, N. M. Aldibbiat 等<sup>[14]</sup>提出了双头脉冲间隔调制(DH-PIM),张凯<sup>[13]</sup>提出了双幅度脉冲间隔调制(DAPIM)。DH-PIM 和 DAPIM 进一步缩短了符号长度,提高了带宽效率和传输容量,但仍存在着符号长度随机变化的情况,连续多个符号都为短符号或长符号的情况将以一定的概率发生,解调时容易出现缓存器的冗位(underflow)或溢位(overflow)等问题<sup>[14]</sup>。2007 年张铁英等<sup>[3]</sup>提出了定长数字脉冲间隔调制(FDPIM),该方法克服了缓冲器的冗位或溢位等问题,且功率需求较小和具有内置符号同步能力,但仍存在符号长度过长,带宽需求和传输容量不够理想等不足。

针对以上情况,基于取长补短的思路,充分考虑缓存器可能出现的冗位或溢位、符号同步以及带宽效率(传递信息速率比带宽)与功率效率[给定误码率下所需的平均功率或达到的信噪比(SNR)]平衡等问题,本文提出了一种新的双脉冲间隔调制(DP-PIM)。在给出符号结构的基础上,分析了功率需求、带宽需求、传输容量和误码率等方面的性能,并将其与其他几种调制方式进行了比较。

## 2 DP-PIM 的符号结构及性能分析

不同调制方法因符号结构的不同而具有不同的性能特点,研究各种调制方法的性能必须首先熟悉其符号结构。以  $M=4$  为例,分别给出了 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 等方法的调制符

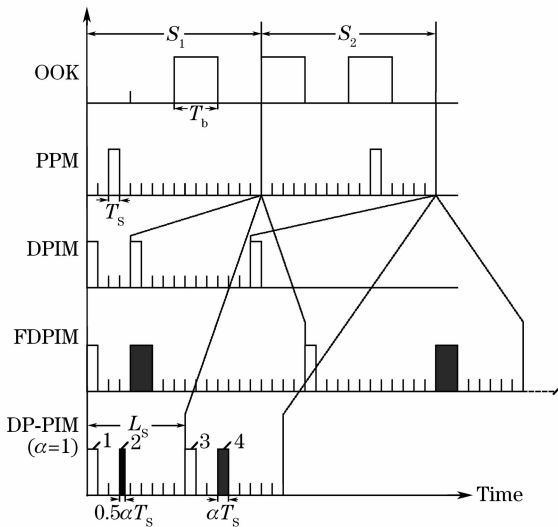


图 1  $M=4$  时 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 的符号结构

Fig. 1 Symbol structures for OOK, PPM, DPIM, FDPIM, and DP-PIM when  $M=4$

号波形,如图 1 所示。

### 2.1 DP-PIM 的符号结构

DP-PIM 方法是一种基于脉冲间隔传输信息的无线光通信调制方法,其符号结构特征是利用一个固定的起始脉冲和一个变化的标识脉冲,以及起始脉冲与标识脉冲之间的时间间隔变化来表示传输信息的不同。

如果设  $M$  位二进制信息比特数组所对应的十进制值用  $k$  表示,每符号长度用  $L_s$  表示,每时隙的长度用  $T_s$  表示,OOK 的脉冲宽度  $T_b = 2^M T_s$ ,则 DP-PIM 的符号结构具体定义为:每符号长度固定为  $L_s = (2^{M-1} + \alpha) T_s$ 。其中起始脉冲固定始于第一个时隙,幅度与标识脉冲的幅度相同,宽度为 1 个时隙;标识脉冲的宽度及位置需按以下规律变化:1) 当  $k < 2^{M-1}$  时,标识脉冲的宽度为  $0.5\alpha$  个时隙,标识脉冲与起始脉冲的间隔为  $k$  个时隙;2) 当  $k \geq 2^{M-1}$  时,标识脉冲的宽度为  $\alpha$  个时隙,标识脉冲与起始脉冲的间隔为  $(k - 2^{M-1})$  个时隙。当然,相反设定对应的方式也可以。若设标识脉冲的起始位置为第  $m$  个时隙,标识脉冲宽度为  $D_p$ ,则

$$\begin{cases} m = k + 2, & D_p = 0.5\alpha T_s \text{ or } \alpha T_s \\ & k < 2^{M-1} \\ m = k + 2 - 2^{M-1}, & D_p = \alpha T_s \text{ or } 0.5\alpha T_s \\ & k \geq 2^{M-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为正整数,一般取  $0 < \alpha \leq 2$ ,  $M$  为 OOK 每符号所包含的时隙数,称作调制阶数或比特分辨率。最后,在标识脉冲之后再补充若干空时隙,以保持每个 DP-PIM 符号的长度固定不变。另外,如果考虑脉冲可能发生粘连导致码间串扰,还可在起始脉冲和标识脉冲之后加若干空时隙作为保护时隙。相应地,DP-PIM 的符号长度也将随之增加。

由以上分析可见,DP-PIM 采用固定的起始脉冲和符号长度,不仅具有了内置的符号同步能力,而且克服了 DPIM 和 DH-PIM 等可能出现的缓存器冗位或溢位等问题;另外通过采用变化的标识脉冲及其与起始脉冲的间隔,较 PPM 和 FDPIM 显著缩短了符号长度。

### 2.2 平均发射功率

调制方式的开关特性简化了它们的功率特性分析。由于发射“0”时不用功率,因此,对于给定发射功率  $P_t$ ,平均光脉冲发射功率可简单地确定为发射“1”的概率  $p_1$  乘以该功率,即  $P_{ave} = p_1 \cdot P_t$ 。下面在发射功率相同的条件下,比较发射一个相同符号时

各调制方式的平均发射功率。假设 OOK 的平均发射功率为  $P_{\text{OOK}}$ , 二进制信息比特“0”和“1”等概率出现, 由于每个 DP-PIM 符号中有两个脉冲, 其中的标识脉冲宽度有  $0.5\alpha T_s$  和  $\alpha T_s$  两种, 假设这两种标识

脉冲等概率出现, 则 DP-PIM 的平均发射功率为  $\frac{4+3\alpha}{2^M+2\alpha}P_{\text{OOK}}$ 。同理, 其余各方法的平均发射功率如表 1 所示。

表 1 给定发射功率  $P_i$  时 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 的平均发射功率及符号长度

Table 1 Average symbol lengths and transmit powers of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and DP-PIM for a given value of  $P_i$

Modulation scheme	OOK	PPM	DPIM	FDPIM	DP-PIM
Average slot numbers/symbol	$M$	$2^M$	$\frac{2^M+3}{2}$	$2^M+4$	$2^{M-1}+\alpha$
Average transmit power	$\bar{P}_{\text{OOK}} = \frac{P_i}{2}$	$\frac{2}{2^M}\bar{P}_{\text{OOK}}$	$\frac{4}{2^M+3}\bar{P}_{\text{OOK}}$	$\frac{6}{2^M+4}\bar{P}_{\text{OOK}}$	$\frac{4+3\alpha}{2^M+2\alpha}\bar{P}_{\text{OOK}}$

利用表 1 仿真可得 DP-PIM 的平均功率需求随  $M$  的变化曲线及其与其他方法的比较结果, 如图 2 所示。如果以下 DP-PIM 针对不同的  $\alpha$  值用 DP-PIM $_{\alpha}$  表示, 则比较可以看出, 当  $M=4$  时 DP-PIM $_2$  对 OOK 归一化的功率需求分别比 DP-PIM $_1$ , FDPIM, DPIM 和 PPM 高出约 1.1, 2.25, 3.8 和

6 dB, 比 OOK 节省了约 3 dB。这说明 DP-PIM 在功率需求性能方面并没有优势, 但后面将介绍它是以降低功率效率为代价换取了带宽效率和传输容量的提高。

### 2.3 带宽需求

带宽需求通常用功率谱密度的主瓣宽度来估计, 是 sinc 函数。由于光脉冲信号的时隙宽度较窄, 因此可用其时隙宽度的倒数来近似求得信号带宽。下面在传输信息比特率相同的条件下, 进行 DP-PIM 和 OOK, PPM 等典型调制方式的带宽需求比较。若设各调制方式的调制阶数均为  $M$ , OOK 的时隙宽度为  $\tau_{\text{OOK}}$ , 则 OOK 带宽需求  $B_{\text{OOK}} = \frac{1}{\tau_{\text{OOK}}} = R_b$ , 其中  $R_b$  为 OOK 的传输比特率。同理可得, 其余调制方式的平均时隙宽度和带宽需求如表 2 所示。需要说明的是, 对于 DP-PIM 来说, 标识脉冲的宽度有两种, 显然, 其带宽需求应由  $\frac{\alpha}{2} T_s$  的脉宽决定, 即为  $\frac{2^M+2\alpha}{\alpha M}B_{\text{OOK}}$ 。

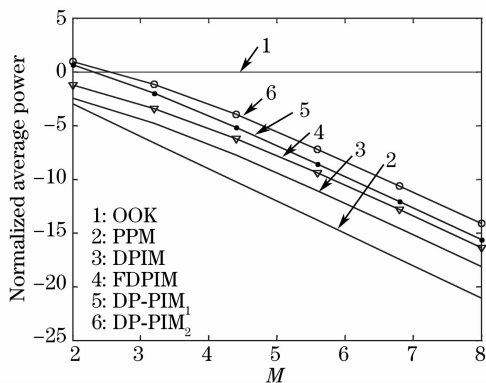


图 2 归一化的 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 平均发射功率比较

Fig. 2 Normalized average transmit power comparisons of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and DP-PIM

表 2  $R_b$  给定时 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 的平均时隙宽度与带宽需求

Table 2 Average slot durations and bandwidths of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and DP-PIM for a given value of  $R_b$

Modulation scheme	OOK	PPM	DPIM	FDPIM	DP-PIM
Average slot duration	$\tau_{\text{OOK}}$	$\frac{M}{2^M}\tau_{\text{OOK}}$	$\frac{2M}{2^M+3}\tau_{\text{OOK}}$	$\frac{M}{2^M+4}\tau_{\text{OOK}}$	$\frac{M}{2^{M-1}+\alpha}\tau_{\text{OOK}}$
Average bandwidth	$B_{\text{OOK}} = \frac{1}{\tau_{\text{OOK}}} = R_b$	$\frac{2^M}{M}B_{\text{OOK}}$	$\frac{2^M+3}{2M}B_{\text{OOK}}$	$\frac{2^M+4}{M}B_{\text{OOK}}$	$\frac{2^M+2\alpha}{\alpha M}B_{\text{OOK}}$

图 3 给出了在传递信息比特率相同的条件下, DP-PIM 等调制方式分别对 OOK 归一化的带宽需求与  $M$  之间的关系曲线。比较可看出, FDPIM 最高, OOK 最低, DP-PIM $_2$  介于二者之间。当  $\alpha=1$  时, DP-PIM 所占带宽略高于 PPM, 但稍低于 FDPIM, 并且随着  $M$  的增大三者的差距越来越小; 但是当  $\alpha=2$  时 DP-PIM 带宽需求要远低于 PPM, 很接近 DPIM, 甚至随着  $M$  的增大基本趋于一致,

换句话说, 随着  $\alpha$  的增加, DP-PIM 的带宽需求明显变小。例如, 当  $M=4$  时 DP-PIM $_2$  带宽约等于 DPIM, 大约是 DP-PIM $_1$  的一半和 OOK 的 2.5 倍。另外, 随着  $M$  的增加, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 等带宽需求均逐渐增大。

### 2.4 传输容量

这里用比特率来衡量系统的传输容量, 而且在时隙宽度相同条件下比较 DP-PIM 与 OOK, PPM,

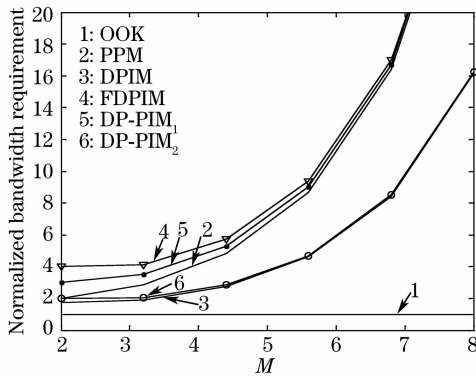


图 3 归一化的 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 带宽需求比较

Fig. 3 Normalized bandwidth requirement comparisons of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and DP-PIM

DPIM 和 FDPIM 等调制方式的传输容量。如果设时隙宽度为  $\tau$ , 则 OOK 的传输容量为  $1/\tau$ 。若其余

表 3  $R_b$  给定 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 的平均符号长度与传输容量

Table 3 Average symbol lengths and transmit capacities of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and DP-PIM for a given value of  $R_b$

Modulation scheme	OOK	PPM	DPIM	FDPIM	DP-PIM
Average symbol length	$M\tau$	$2^M\tau$	$\frac{2^M+3}{2}\tau$	$(2^M+4)\tau$	$(2^{M-1}+\alpha)\tau$
Average capacity / (bits/s)	$R_{\text{OOK}} = \frac{1}{\tau}$	$\frac{M}{2^M}R_{\text{OOK}}$	$\frac{2M}{2^M+3}R_{\text{OOK}}$	$\frac{M}{2^M+4}R_{\text{OOK}}$	$\frac{M}{2^{M-1}+\alpha}R_{\text{OOK}}$

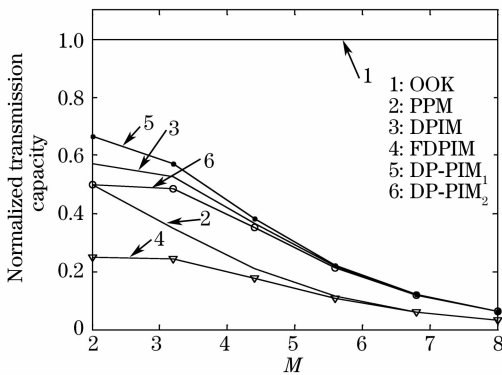


图 4 归一化的 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 传输容量比较

Fig. 4 Normalized transmit capacity comparisons of OOK, PPM, DPIM, FDPIM and DP-PIM

### 3 DP-PIM 的差错性能

#### 3.1 信道模型

当信道条件比较恶劣时, 比如在强湍流情况下, 采用无线光通信系统很难实现可靠的通信, 因此主要考虑弱湍流的情况。大气闪烁是影响无线光通信系统性能的主要因素, 常用闪烁指数来描述。一般说来, 闪烁指数是关于光参数、传输距离以及折射指数波动的复杂函数。在弱湍流情况下, 闪烁指数小

调制方式的调制阶数均设为  $M$ , 则 PPM 的符号长度为  $2^M\tau$ , 由于一个符号对应  $M$  个二进制信息比特, 因此 PPM 的传输容量为  $\frac{M}{2^M\tau}$ , 同理, 其余各调制方式的平均符号长度和传输容量如表 3 所示。

图 4 分别给出了在相同时隙宽度条件下, 各调制方式对 OOK 归一化的传输容量与  $M$  之间的关系曲线。可以看出, 随着  $M$  的增加, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 等调制方式的传输容量越来越小。其中 FDPIM 的传输容量最低, OOK 最高, 在  $\alpha=1$  时 DP-PIM 的传输容量要高于  $\alpha=2$  时的传输容量, 而且随着  $M$  的增加, DP-PIM 的传输容量与 DPIM 基本趋于一致。当  $M=4$  时, DP-PIM<sub>1</sub> 的传输容量虽然不到 OOK 的一半, 但大约是 FDPIM 的 2.23 倍和 PPM 的 1.78 倍。这说明在传输容量方面 DP-PIM 比 FDPIM 和 PPM 有了较大的提高。

于 0.75, 信号强度服从对数正态分布, 若用  $I$  表示接收光场的强度, 则  $I$  的概率密度函数为<sup>[10]</sup>

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2} I} \exp\left\{-\frac{[\ln(I) - m]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad I \geq 0 \quad (2)$$

式中  $m$  和  $\sigma$  分别为  $\ln(I)$  的均值和标准差。闪烁指数定义为

$$\sigma_{\text{sc}}^2 = \frac{E(I^2)}{E^2(I)} - 1, \quad (3)$$

其范围为  $[0, 0.75]$ 。

#### 3.2 理论推导

考虑系统工作在弱湍流下, 接收端采用雪崩光电二极管 (APD) 光检测器, 通过一个光学前端对光脉冲进行接收, 然后聚焦到检测器上, 则系统的误比特率可表示为<sup>[15]</sup>

$$P_b = \int_{\sqrt{\Gamma(i_s)}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = Q[\sqrt{\Gamma(i_s)}], \quad (4)$$

式中  $i_s$  表示信号电流, 近似为  $ge \frac{\eta S_y}{h} P$ ,  $\Gamma(i_s)$  表示光检测等价信噪比, 即<sup>[16]</sup>

$$\Gamma(i_s) = \frac{g^2 i_s^2 R_L}{g^{2+x} 2e(i_s + i_d) R_L B + 4kTB}, \quad (5)$$

式中  $g$  为 APD 平均增益,  $e$  为电子电量,  $\eta$  为接收机的量子效率,  $S$  为探测器有效面积,  $\nu$  为光波长,  $P$  为瞬时接收光功率,  $h$  为普朗克常数,  $x$  为倍增噪声系数,  $i_d$  为暗电流,  $R_L$  为 APD 负载电阻,  $B$  为接收机带宽,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为接收机绝对温度。

由于  $i_s$  与瞬时接收光功率成正比, 所以  $i_s$  也服从对数正态分布, 根据(2)式其概率密度函数可表示为

$$f(i_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}i_s} \exp\left[-\frac{(\ln i_s - m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (6)$$

式中  $m_i$  和  $\sigma_i^2$  分别为  $\ln i_s$  的均值和方差, 则  $i_s$  的均值和二阶矩分别为

$$E\{i_s\} = \exp\left\{\frac{\sigma_i^2}{2} + m_i\right\}, \quad (7)$$

$$E\{i_s^2\} = \exp\{2\sigma_i^2 + 2m_i\}. \quad (8)$$

由(3)式可得闪烁指数为

$$\sigma_{sc}^2 = \frac{E\{I^2\}}{E^2\{I\}} - 1 = \frac{E\{i_s^2\}}{E^2\{i_s\}} - 1 = \exp(\sigma_i^2) - 1. \quad (9)$$

根据(4),(6)式, 可得弱湍流下无线光通信系统的平均误比特率公式为

$$\bar{P}_b = \int_0^\infty Q[\sqrt{\Gamma(i_s)}]f(i_s)di_s. \quad (10)$$

系统的误包率可表示为

$$P_p = 1 - (1 - \bar{P}_b)^{NY} = 1 - \left\{1 - \int_0^\infty Q[\sqrt{\Gamma(i_s)}]f(i_s)di_s\right\}^{NY}, \quad (11)$$

式中  $N$  和  $Y$  分别为一个符号所包含的时隙个数和一个数据包所包含的符号个数,  $NY$  表示一个数据包所包含的时隙个数。针对 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DH-PIM, 由表 1 可得, 它们的  $N$  值分别为  $M, 2^M, \frac{2^M+3}{2}, (2^M+4)$  和  $(2^{M-1}+\alpha)$ 。

### 3.3 仿真分析

图 5 给出了在平均接收光功率相同的条件下,  $M=4$  时 DP-PIM 和 OOK, PPM 等典型调制方法的误包率与平均接收光功率的关系曲线比较。在仿真系统中, 信道模型采用对数正态分布模型, 闪烁指数取 0.25,  $Y$  取 500, 其他参数设置为: 比特率 2.4 Gb/s, APD 平均增益 150, 探测器量子效率 80%, 探测器有效面积 0.2 mm<sup>2</sup>, 光波长 1550 nm, 暗电流 20 nA, 接收机绝对温度 300 K, APD 负载电阻 50  $\Omega$ , 倍增噪声系数 0.5, 接收机带宽 800 MHz。由图 5 可知, 无线光通信系统的误包率随平均接收光功率的升高而下降, 其中 PPM 的误包率最小, OOK

最大。  $\alpha=1$  时 DP-PIM 的误包率要小于  $\alpha=2$  时的误包率, 但比 PPM, PIM 和 FDPIM 要高。一般来讲, 要保证无线光通信系统的可靠性, 误包率不能大于  $10^{-6}$ , 所以, 如图 5 所示, 只有当平均接收光功率分别大于 -49.82 和 -48.62 dBm/cm<sup>2</sup> 时, 才能保证 DP-PIM 在  $\alpha=1$  与  $\alpha=2$  时可靠地传输信息, 同理, PPM, DPIM, FDPIM 和 OOK 等调制方式所需的最小平均接收光功率分别为 -54.1, -52.1, -50.2 和 -45.72 dBm/cm<sup>2</sup>。

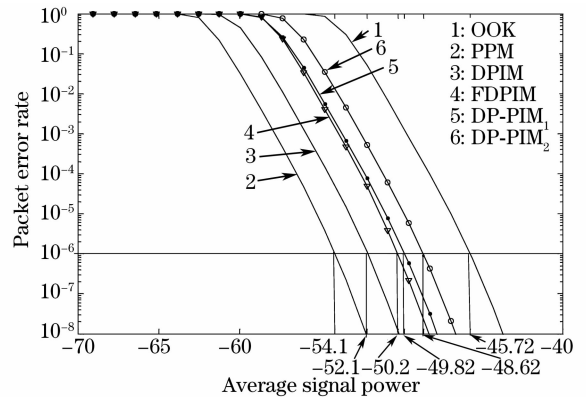


图 5 OOK, PPM, DPIM, FDPIM 和 DP-PIM 的误包率与平均接收光功率曲线

Fig. 5 Packet error rate of OOK, PPM, DPIM and DP-PIM versus average received signal power for  $M=4$

## 4 结 论

理论和仿真分析结果表明, DP-PIM 的符号结构设计, 既继承了 DPIM, DH-PIM 和 DAPIM 所具有的内置符号同步能力, 又解决了 DPIM, DH-PIM 和 DAPIM 解调时所存在的缓存器冗位和溢位等问题; 既继承了 PPM 和 FDPIM 固定符号长度带来的优势, 又比 PPM 和 FDPIM 显著提高了带宽效率和传输容量; 此外, 与 OOK 和 PPM 相比, 不仅显著提高了符号同步能力, 而且缩短了符号长度; 尽管 DP-PIM 方式在提高带宽利用率的同时带来了功率利用率和系统差错性能的降低, 但是较 DPIM 更易工程实现, 带宽效率和传输容量也接近 DPIM, 甚至在传输容量方面有时还优于 DPIM, 故推广应用于无线光通信系统中将具有一定的优势。

### 参 考 文 献

- 1 Cheng Gang, Wang Hongxing, Sun Xiaoming *et al.*. A new modulation scheme of optical wireless communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12):1914~1918  
程 刚, 王红星, 孙晓明 等. 一种新型的无线光通信调制方法 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12):1914~1918
- 2 Fan Yangyu, Bai Bo, Huang Aiping *et al.*. Pulse-position-

- width modulation scheme in wireless optical communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12):1883~1887
- 樊养余,白 勃,黄爱萍等. 无线光通信中的脉冲位置宽度调制技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12):1883~1887
- 3 Zhang Tieying, Wang Hongxing, Cheng Gang *et al.*. A novel fixed length digital pulse interval modulation for optical wireless communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1655~1659
- 张铁英,王红星,程 刚等. 无线光通信中的定长数字脉冲间隔调制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1655~1659
- 4 Hu Zongmin, Tang Junxiong. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communications [J]. *Journal on Communications*, 2005, 26 (3): 75~79
- 胡宗敏,汤俊雄. 大气无线光通信系统中数字脉冲间隔调制研究[J]. *通信学报*, 2005, **26**(3):75~79
- 5 Wang Hongxing, Sun Xiaoming, Sun Xiaoyan *et al.*. Performance of current digital pulse modulation schemes for optical wireless communications [C]. *The IET International Conference on Wireless Mobile & Multimedia Networks Proceedings*, 2006. 656~659
- 6 Zhang Jinlong. Modulation analysis for outdoors applications of optical wireless communications [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2000, **32**(7):1483~1487
- 7 Z. Ghassemlooy, A. R. Hayes, N. L. Seed *et al.*. Digital pulse interval modulation for optical communications [J]. *IEEE Commun. Mag.*, 1998, **36**(12):95~99
- 8 Z. Ghassemlooy, A. R. Hayes, B. Wilson. Reducing the effects of intersymbol interference in diffuse DPIM optical wireless communications [J]. *IEE Proc. Optoelectron*, 2003, **150**(5):445~452
- 9 Ke Xizheng, Xi Xiaojuan. Outline for Optical Wireless Communications [M]. Beijing: High Education Press, 1998. 148~157
- 柯熙政,席晓娟. 无线激光通信概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 148~157
- 10 Kamran Kiasaleh. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2005, **53**(9):1455~1461
- 11 Cheng Gang, Wang Hongxing, Sun Xiaoming *et al.*. Structure study of modulation waveforms in optical wireless communication [J]. *J. Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2007, **20**(1):31~34
- 程 刚,王红星,孙晓明等. FSO 数字脉冲调制方法的符号结构分析[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2007, **20**(1):31~34
- 12 U. Sethakaset, T. A. Gulliver. Differential amplitude pulse-position modulation for indoor wireless optical communications [J]. *J. Appl. Signal Process.*, 2005, **1**:3~11
- 13 Zhang Kai. Dual-amplitude pulse interval modulation for optical wireless communications and optical ETC prototype [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. 21~27
- 张 凯. 无线光通信双幅度脉冲间隔调制研究及其在光波 ETC 中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2004. 21~47
- 14 N. M. Aldibbiat, Z. Ghassemlooy, R. Mclaughlin. Performance of dual header-pulse interval modulation (DH-PIM) for optical wireless communication systems [C]. *SPIE*, 2001, **4214**:144~152
- 15 Daotian Zhenjin. Chrestomathy for Optical Communications [M]. Zhao Lingji, Feng Peizhen, Li Xianyuan transl.. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 1982. 194
- 岛田禎晋. 光通信技术读本[M]. 赵灵基,冯佩珍,李先源译. 北京: 人民邮电出版社, 1982. 194
- 16 Mucun Pangen. Optical and Wireless Communication System [M]. Yang Mingjun, Sun Xiaodong, Guo Xueqing transl.. Beijing: Science Press, 2001. 90~91
- 木村磐根. 光通信与无线通信系统[M]. 杨明君,孙晓东,郭雪清译. 北京: 科学出版社, 2001. 90~91