

无线光通信新型组合脉冲调制性能分析

刘宏展¹ 廖仁波¹ 孙建锋² 刘立人²

¹华南师范大学广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

摘要 调制技术是影响无线光通信质量的重要因素之一,探索合适的调制方式是无线光通信的内在需要,为此,全面深入分析不同新型组合脉冲调制的性能。详细地分析了脉冲位置调制(PPM)和数字脉冲间隔调制(DPIM)等传统调制方式,以及脉冲位置宽度调制(PPWM)、差分脉冲位置宽度调制(DPPWM)、双幅度脉冲位置调制(DAPPM)和双幅度脉冲间隔调制(DAPIM)等新型组合调制方式的符号结构;全面比较了以上调制方式的平均发射功率和带宽需求;在给定模型下分析了它们的差错性能。数值结果表明:DAPPM的功率利用率最好,DPPWM的功率效率最低。当二进制比特位 M 取一定值时,PPM的带宽利用率最低,DPPWM的带宽利用率最高;随着 M 的增加,DAPPM的带宽效率与DPIM的带宽效率非常接近。而从差错性能看,在相同的信噪比 R_{SN} 条件下,当 M 取值一定时,DAPPM的误包率与PPM接近,均优于其他组合调制方式,随着 M 或 R_{SN} 增大,系统误包率逐渐减少;同时,通过增大PPWM的 r 参数、减少DAPPM的 α 参数,可适当改善差错性能。因此,要根据实际系统的要求选择合适的调制方式。

关键字 无线光通信;调制方式;平均发射功率;带宽需求;误包率

中图分类号 TN929.13

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0706004

Performance Analysis of New Hybrid Pulse Modulation Scheme in Optical Wireless System

Liu Hongzhan¹ Liao Renbo¹ Sun Jianfeng² Liu Liren²

¹Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

²Key Laboratory Space Laser Communication and Detection Technique, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The modulation technique is one of the important factors affected the quality of optical wireless communication. It need to find the appropriate modulation scheme, and it is necessary to analyze the performances of different pulse modulation schemes completely and deeply. The symbol structures of not only traditional modulation scheme like pulse position modulation (PPM) and digital pulse interval modulation (DPIM) but also new hybrid modulation scheme such as pulse position width modulation (PPWM), differential pulse position width modulation (DPPWM), dual-amplitude pulse position modulation and dual-amplitude pulse interval modulation (DAPIM) are analyzed in detail. The average transmission power and bandwidth efficiency for these above modulation schemes are also analyzed. At last, the error performances of these different modulation schemes are derived in detail. The numerical results show that the power utilization of DAPPM is the best and DPPWM's is the worst; when the value of binary bits M is given, the bandwidth utilization of DPPWM is the best, but PPM's is the worst. With the increase of M , the bandwidth utilization of DAPPM is near to DPIM's. When the values of M and signal to noise ratio R_{SN} are given, the packet error rate of DAPPM is near to PPM's, but they are better than the others. The packet error rate is gradually reduced with the increase of M and R_{SN} . At the same time, through the enlargement of r or the decrease of α , the

收稿日期: 2015-01-29; 收到修改稿日期: 2015-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61475049)

作者简介: 刘宏展(1975—),男,博士,副教授,主要从事大气光通信方面的研究。E-mail: lhzscnu@163.com.

error performances of PPWM and DAPPM are partly improved. Consequently, the appropriate modulation scheme is need to be selected according to the system's demand.

Key words optical wireless communication; modulation scheme; average transmission power; bandwidth requirement; packet error rate

OCIS codes 060.2605; 060.4080; 060.4510

1 引 言

无线光通信是利用激光载波在大气中进行信息双向传输的一种通信模式,具有高传输速率、抗电磁干扰、高可靠性等优点,在解决“最后一公里”问题、应急通信、卫星(星地)通信等方面具有良好的应用前景^[1-3]。但是,激光光束经过大气信道传输时,由于大气衰减以及大气湍流等各种因素会降低实际光通信系统的差错控制性能,为了保证通信的质量,研究人员采取了一系列措施,其中最为重要关键技术之一就是调制技术^[4-6]。

无线光通信系统中的调制技术是为了选择合适的调制格式以及相应的解调技术以保证高传输速率和低误码率,从而较好地降低大气环境对通信系统的干扰。目前无线光通信主要采用强度调制/直接检测(IM/DD)系统,例如传统典型的调制方式包括开关键控(OOK)^[1-2]、脉冲位置调制(PPM)^[2-3]和数字脉冲间隔调制(DPIM)^[7-8]等。其中,OOK是一种最简单的调制方式,容易实现,但功率效率很低;PPM具有较好的功率效率以及抗干扰性能,但带宽效率不高,并且需要严格的符号同步才能保证正确解调;DPIM带宽效率较高且不需要符号同步,但它的调制符号长度不固定,容易造成无关空时隙加入或者调制器缓存溢出,影响解调结果的正确性。针对以上典型调制方式存在的不足,研究者们提出了几种新型组合脉冲调制方式。其中,樊养余等^[9]提出了脉冲位置宽度调制(PPWM)以及黄爱萍等^[10]提出了差分脉冲位置宽度调制(DPPWM),并且都分析了各自调制方式的带宽效率、功率效率以及差错性能。另外,张铁英等^[11]提出了双幅度脉冲位置调制(DAPPM),该调制方式比DPIM具有较高的带宽效率;张凯等^[12]提出了双幅度脉冲间隔调制(DAPIM),该调制方式不需要同步,可以获得较高的带宽效率。

针对实际的无线光通信系统,为了选择出合适的调制方式,西安理工大学柯熙政课题组对类脉冲位置调制进行了系统的分析^[13]。丁德强等^[14]分析了PPM的性能并通过硬件进行了实现,赵黎^[15]研究了差分脉冲位置调制(DPPM)并对其性能进行了分析,秦岭等^[16]对多脉冲位置调制(MPPM)的符号结构、星座图进行了研究,并通过硬件实现了MPPM。孙长梅^[17]对DAPPM的符号结构、功率谱密度、带宽需求等进行了分析,贾超^[18]对双头脉冲间隔调制(DHPIM)的性能进行了分析,柳美平^[19]对类脉冲位置调制的符号结构、功率谱密度、误码率等进行了系统研究。但是关于PPWM或DPPWM等新型组合调制方式性能的比较还未见报道,受文献[14-19]等的启发,本文尝试比较分析新型组合脉冲调制与传统脉冲调制的性能。基于此,在简短介绍传统脉冲调制及新型组合脉冲调制等符号结构的基础上,从功率利用率、带宽需求、差错性能等三方面系统地分析了不同脉冲调制的性能,并进行了详细的数值计算、比较,结果表明,不同调制方式各有优缺点,必须根据系统的实际需要,综合考虑后选择比较合适的调制方式。

2 调制方式的符号结构

为了全面深入分析不同新型组合脉冲调制的性能,选择了6种调制方式来进行各方面性能的综合比较,其中包括PPWM、DPPWM、DAPPM和DAPIM等新型组合调制方式,以及PPM和DPIM等传统调制方式。为了方便分析问题,必须弄清楚不同调制方式的符号结构,它是进行调制性能分析的基础。

PPM是将一个二进制的 M 位比特数据序列映射为 $L=2^M$ 个时隙组成的时间段上的某一个时隙处的单个脉冲信号^[1],且 L 表示为符号长度。在DPIM方式中,每个符号都以一个脉冲信号开始,后加 $k+1$ (k 为符号所表示的十进制数,1为一个保护时隙)个空时隙代表所传输的二进制信息,并且可分为无保护时隙和有保护时隙两种^[7]。在这些传统调制方式的基础上,接下来简单地阐述近些年提出的几种新型组合调制方式的符号结构。

所谓新型组合调制方式就是两种或者多种简单的传统调制方式同时对二进制比特信息流进行调制的一种调制方式。例如,PPWM是先将一组二进制的 M 位数据序列中的前 r ($0 \leq r \leq M$)个比特按照PPM方式进行一一映射,即映射为 $L_0=2^r$ 个时隙组成的时隙段上的某一个时隙处的单个脉冲信号;然后继续将这个

单脉冲信号按照脉冲幅度调制(PWM)方式映射为 $L_w = 2^{M-r}$ 个时隙,组成时隙段上的起始位置与上面单脉冲信号相同、宽度为某几个时隙的连续脉冲信号,则连续脉冲信号可能的时隙数为 $1, 2, 3, \dots, L_w$ ^[9]。依此类比, DPPWM 是先将一组二进制的 M 位数据序列中的前 r 个比特按照 DPPM 方式进行一一映射^[10],后面映射过程与 PPWM 类似。DAPPM 采用两种幅度的起始脉冲,结合了脉冲幅度调制(PAM)与 PPM 这两种调制方式的优点,减少了空时隙的个数和平均符号长度,从而比 PPM 进一步改善了带宽效率^[11]。DAPIIM 亦采用两种幅度的起始脉冲,且结合了 PAM 与 DPIM 这两种调制方式的优点,减少了空时隙的个数和平均符号长度,与 DPIM 方式相比进一步改善了带宽效率;由于 DAPIIM 符号以脉冲开始,所以不需要符号同步^[12]。各种调制方式的符号结构比较如表 1 所示,其表中参数 α 表示脉冲幅度比例($0 < \alpha < 1$)。

表 1 不同调制方式一一映射的符号结构

Table 1 Corresponding relationship between different modulation schemes and their symbol structures

Source bits	PPM	DPIM	PPWM	DPPWM	DAPPM	DAPIIM
000	10000000	10	10000000	10	1000	10
001	01000000	100	11000000	11	0100	100
010	00100000	1000	00100000	0010	0010	1000
011	00010000	10000	00110000	0011	0001	10000
100	00001000	100000	00001000	000010	α 000	α 0
101	00000100	1000000	00001100	000011	0 α 00	α 00
110	00000010	10000000	00000010	00000010	00 α 0	α 000
111	00000001	100000000	00000011	00000011	000 α	α 0000

3 调制性能理论分析

采用强度调制/直接检测方式的无线激光通信系统如图 1 所示。假设整个接收机中主要噪声为加性高斯白噪声(AGWN),它与信号光是独立的。

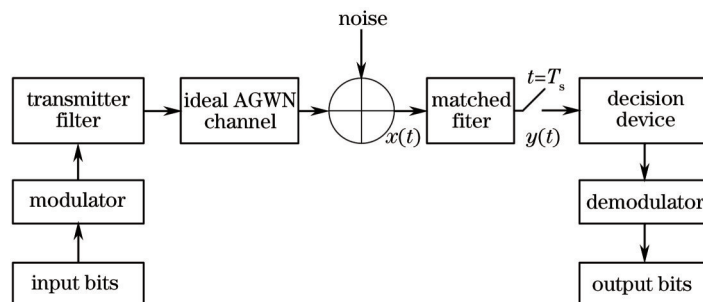


图 1 理想高斯白噪声信道光通信系统模型

Fig.1 Model for the optical wireless communication system with an ideal white Gaussian noise channel

为了分析比较不同调制方式性能的优劣,一般是通过比较各调制方式的特征参数(平均发射功率、带宽需求、差错性能等)来实现。就无线光通信而言,其发射功率受限,这就要求尽可能降低平均发射功率,提高功率利用率;另外,为了保证通信质量,一种好的无线光通信调制方式应尽可能减小误包率以及提高系统差错控制性能。下面将从平均发射功率、带宽需求、差错性能等三方面理论分析不同调制方式的调制性能。

3.1 平均发射功率

在相同的峰值发射功率下,为了比较不同调制方式的平均发射功率,考虑发送一个相同的二进制 M 位比特数据。假设峰值发射功率为 P_1 ,二进制比特“0”和“1”以相等的概率出现,且发送光脉冲“0”序列不需要任何功率,发送光脉冲“1”序列需要峰值功率 P_1 ^[20]。对于 PPM,因一帧符号结构上只有一个时隙上存在光脉冲,则其平均发射功率为 $P_{PPM} = P_1/2^M$;对于 DPIM,因其符号结构长度是变化的,需先求其平均符号长度继而求其平均发射功率为 $P_{DPIM} = 2P_1/(2^M + 3)$ 。同理,可求得 PPWM、DPPWM、DAPPM 以及 DAPIIM 等调制方式的平均发射功率,如下所示:

$$P_{PPWM} = \frac{(1 + L_w)}{2L} \cdot P_1 = \frac{(1 + 2^{M-r})}{2^{M+1}} \cdot P_1, \quad (1)$$

$$P_{\text{DPPWM}} = \frac{(1+L_w)}{L_w(1+L_d)} \cdot P_t = \frac{(1+2^{M-r})}{2^{M-r}(1+2^r)} \cdot P_t, \quad (2)$$

$$P_{\text{DAPPM}} = \frac{1+\alpha}{2^M} \cdot P_t, \quad (3)$$

$$P_{\text{DAPIM}} = \frac{1+\alpha}{2^{M-1}+3} \cdot P_t. \quad (4)$$

3.2 带宽需求

在无线光通信系统中,带宽通常用功率谱密度的主瓣宽度来估计,由于光信号脉冲时隙的宽度比较窄,因此一般情况下信号带宽是利用脉冲时隙宽度的倒数来近似求得^[21]。假设发射器以比特速率 R_b 发送信息比特,且 R_b 的单位为 bit/s,则对于 PPM 的已调信号,所占带宽约为脉冲持续时隙的倒数,即 $B_{\text{PPM}} = 2^M \cdot R_b / M$; 对于 DPIM,可得 $B_{\text{DPIM}} = (2^M + 3) \cdot R_b / (2M)$ 。同理,可求得 PPWM、DPPWM、DAPPM 以及 DAPIM 等调制方式的带宽需求,依次如下所示:

$$B_{\text{PPWM}} = \frac{2^{M+1}}{(1+L_w)M} \cdot R_b = \frac{2^{M+1}}{(1+2^{M-r})M} \cdot R_b, \quad (5)$$

$$B_{\text{DPPWM}} = \frac{L_w(1+L_d)}{(1+L_w)M} \cdot R_b = \frac{2^{M-r}(1+2^r)}{(1+2^{M-r})M} \cdot R_b, \quad (6)$$

$$B_{\text{DAPPM}} = \frac{2^{M-1}}{M} \cdot R_b, \quad (7)$$

$$B_{\text{DAPIM}} = \frac{2^{M-1}+3}{2M} \cdot R_b. \quad (8)$$

3.3 差错性能

为了计算方便,假设信道为理想的加性高斯白噪声信道,不考虑多径散射,信道传输路径衰减因子为 g ^[22]。在接收端,信号经过理想的匹配滤波器、抽样及判决处理之后,被送至译码器译码,再输出信息比特。当匹配滤波器的输入在有光脉冲时为 $I_p + n(t)$,在无光脉冲时为 $n(t)$,高斯白噪声 $n(t)$ 的均值为 U ($U > 0$),方差 $\sigma_n^2 = N_0 B$ (N_0 表示双边带噪声功率谱密度, B 为系统带宽)^[13]。其中峰值光电流 $I_p = gRP_t$, R 代表探测器的响应度。那么匹配滤波器在抽样时刻 $t = T_s$ 时,在有光脉冲时,输出的脉冲能量为 $E_p + n_0(T_s)$; 而无光脉冲时,输出能量为 $n_0(T_s)$ 。其中 $E_p = I_p^2 T_s$,高斯白噪声 $n_0(T_s)$ 的均值为 U ($U > 0$),且此时的均方差 $\sigma = \sigma_n I_p T_s$ ^[13]。

若设判决器的门限为 kE_p ($0 < k < 1$),则当发射端发射“0”时检测为“1”的概率为 p_{e0} ,发射“1”检测为“0”的概率为 p_{e1} ,即

$$p_{e0} = \int_{kE_p}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) dy = Q\left(\frac{kE_p}{\sigma}\right) = Q\left(\frac{kI_p}{\sigma_n}\right), \quad (9)$$

$$p_{e1} = \int_{-\infty}^{kE_p} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(y-I_p)^2}{2\sigma^2}\right] dy = Q\left[\frac{(1-k)E_p}{\sigma}\right] = Q\left[\frac{(1-k)I_p}{\sigma_n}\right], \quad (10)$$

式中 $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$, 则误时隙率为

$$p_{\text{sc}} = p_0 p_{e0} + p_1 p_{e1}, \quad (11)$$

式中 p_0 与 p_1 分别表示发送“0”和“1”的概率。

因 DPIM、DAPIM 与 DPPWM 等解调时不需要符号同步,也就意味着如果前一个符号判决发生错误,就会影响后续符号的判决,所以常用误包率来比较不同调制方式的差错性能^[15]。给定一个数据包中有 N 个比特数,经过调制后数据包的时隙个数为 NL_{ave}/M ,那么相应的误包率可以表示为^[13]

$$p_{\text{pc}} = 1 - (1 - p_{\text{sc}})^{\frac{NL_{\text{ave}}}{M}} \approx \frac{N}{M} L_{\text{ave}} p_{\text{sc}}, \quad (12)$$

式中 L_{ave} 为每符号所包含的平均时隙数目。

假设不同调制方式具有相同的平均发射功率 P_{ave} , 在脉冲时隙处于开或者关的等概率条件下, 根据文中 3.1 节平均发射功率 $P_{ppm} = P_i/2^M$ 与 3.2 节的带宽需求 $B_{ppm} = 2^M \cdot R_b/M$, 并且利用(9)~(12)式可以计算得出 PPM 的误包率为

$$P_{pe,PPM} = \frac{N}{M} \left\{ (2^M - 1)Q \left(gRk \sqrt{M \cdot 2^M \cdot R_{SN}} \right) + Q \left[gR(1-k) \sqrt{M \cdot 2^M \cdot R_{SN}} \right] \right\}, \quad (13)$$

式中 $R_{SN} = (gRP_{ave})^2 / N_0 R_b$ 为接收机信噪比(SNR)。

依此类比, 可得出 DPIM、PPWM、DPPWM、DAPPM 以及 DAPIM 等调制方式的误包率, 依次如下所示:

$$P_{pe,DPIM} = \frac{N}{2M} \left\{ (2^M + 1)Q \left[gRk \sqrt{\frac{M \cdot (2^M + 3) \cdot R_{SN}}{2}} \right] + 2Q \left[gR(1-k) \sqrt{\frac{M \cdot (2^M + 3) \cdot R_{SN}}{2}} \right] \right\}, \quad (14)$$

$$P_{pe,PPWM} = \frac{N}{2M} \left\{ (2L - L_w - 1)Q \left(gRk \sqrt{\frac{M \cdot 2^{M+1} \cdot R_{SN}}{2^{M-r} + 1}} \right) + (L_w + 1)Q \left[gR(1-k) \sqrt{\frac{M \cdot 2^{M+1} \cdot R_{SN}}{2^{M-r} + 1}} \right] \right\}, \quad (15)$$

$$P_{pe,DPPWM} = \frac{N}{2M} \left\{ (L-1)Q \left[gRk \sqrt{\frac{M \cdot (2^r + 1) \cdot 2^{M-r} \cdot R_{SN}}{2^{M-r} + 1}} \right] + (L_w + 1)Q \left[gR(1-k) \sqrt{\frac{M \cdot (2^r + 1) \cdot 2^{M-r} \cdot R_{SN}}{2^{M-r} + 1}} \right] \right\}, \quad (16)$$

$$P_{pe,DAPPM} = \frac{N}{M} \left\{ (2^{M-1} - 1)Q \left(\frac{2gRk}{1+\alpha} \sqrt{M \cdot 2^{M-1} \cdot R_{SN}} \right) + Q \left[\frac{2gR(1-k)}{1+\alpha} \sqrt{M \cdot 2^{M-1} \cdot R_{SN}} \right] \right\}, \quad (17)$$

$$P_{pe,DAPIM} = \frac{N}{2M} \left\{ (2^{M-1} + 1)Q \left[\frac{2gRk}{1+\alpha} \sqrt{\frac{M \cdot (2^{M-1} + 3) \cdot R_{SN}}{2}} \right] + 2Q \left[\frac{2gR(1-k)}{1+\alpha} \sqrt{\frac{M \cdot (2^{M-1} + 3) \cdot R_{SN}}{2}} \right] \right\}. \quad (18)$$

4 调制性能数值分析

对不同脉冲调制方式的性能, 已经从平均发射功率、带宽需求、差错性能等三方面进行了全面的理论分析, 为了能更直观地明确不同脉冲调制性能的优劣, 进行相应的数值分析不失为一种经济、有效的方案。基于此, 数值分析将从平均发射功率、带宽需求、差错性能等方面分别展开。

4.1 平均发射功率数值分析

设定参数 $r = M/2$, $\alpha = 0.5$, 利用(1)~(4)式, 可得到如图 2 所示在不同调制位数下不同调制方式的平均发射功率。

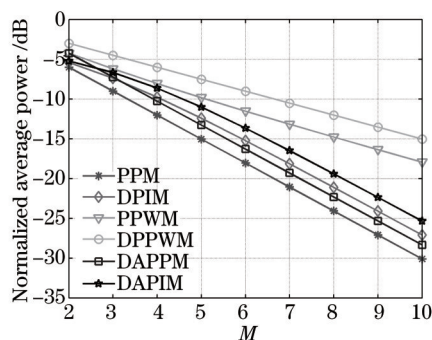


图2 不同脉冲调制方式的平均发射功率比较

Fig.2 Average transmission power changes with M for different modulation schemes

显然, 随着比特数 M 的增加, PPM、DPIM、PPWM、DPPWM、DAPPM 以及 DAPIM 的平均发射功率都明显减小, 即功率效率随之增大。当 M 取一定值时, PPM 所需要的平均发射功率最低, 即具有最高的功率效率, 其余各种调制方式的功率效率由高到低的顺序依次为 DAPPM、DPIM、DAPIM、PPWM 及 DPPWM。在 4 种新型组合脉冲调制方式中, DAPPM 的功率利用率最好, DPPWM 的功率效率最低, 其主要原因是: DAPPM 是基于 PPM 的一种改进, 其符号结构长度缩短为 PPM 的一半, 因其峰值功率的变化其平均发射功率比 PPM 的平均功率高, 但

是非常接近于 PPM 的平均发射功率;而从 PPWM 与 DPPWM 调制方式看,因其 PWM 的功率利用率较低导致两者的功率效率都减小,且 PPWM 的功率效率优于 DPPWM 的功率效率,所以 DPPWM 的功率利用率最低。

4.2 带宽需求数值分析

根据 3.2 推导得到的理论结果,即利用(5)~(8)式,取参数 $r = M/2$, $\alpha = 0.5$,进行数值仿真,即可得到如图 3 所示在相同比特率的条件下,不同调制方式相对 M 的归一化带宽需求。

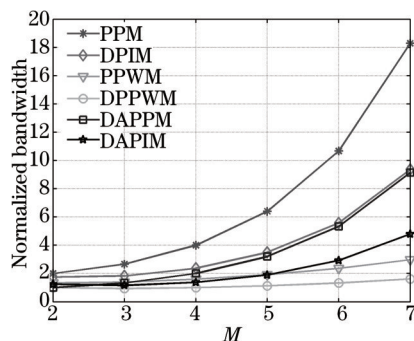


图 3 不同脉冲调制方式的带宽需求

Fig.3 Bandwidth requirements changes with M for different modulation schemes

由图 3 可以看到,随着比特数 M 的增加,PPM、DPIM、PPWM、DPPWM、DAPPM 以及 DAPIM 的带宽需求增大,即带宽效率随之减小。当 M 取一定值时,PPM 的带宽利用率最低,其余各种调制方式的带宽利用率由低到高的顺序依次为 DPIM、DAPPM、DAPIM、PPWM 及 DPPWM,即 DPPWM 的带宽利用率最高。与图 2 相比,平均发射功率和带宽需求为一对矛盾体。另外,随着 M 的增加,DAPPM 的带宽效率与 DPIM 的带宽效率非常接近。在 4 种新型组合脉冲调制方式中,DPPWM 的功率利用率最好,DAPPM 的功率效率最低。这主要是由不同调制方式的平均符号长度以及脉冲持续时隙长短共同决定的。

4.3 差错性能数值分析

根据 3.3 的理论分析,即利用(13)~(18)式,仿真时参数 $N = 1024$, $g = 1$, $R = 1$ 以及 $k = 0.5$,得到不同调制方式的误包率比较曲线如图 4 所示。

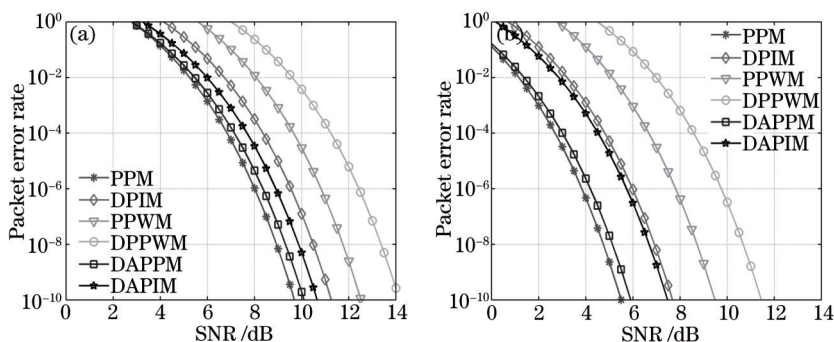


图 4 不同调制方式的误包率比较。(a) $M=3$; (b) $M=4$

Fig. 4 Packet error rate changes with the SNR for the specified M in different modulation schemes. (a) $M=3$; (b) $M=4$

由图 4 可知, M 取一定值时,在相同的信噪比条件下,各种调制方式的误包率由小到大的顺序是 $P_{pe,PPM} < P_{pe,DAPPM} < P_{pe,DAPIM} < P_{pe,DPIM} < P_{pe,PPWM} < P_{pe,DPPWM}$,故 PPM 的误包率最小,即系统差错性能最好;同时 DAPIM 的误包率略小于 DPIM 的误包率,且随着 M 的增大,两者的误包率趋于相等。 M 取一定值时,随着信噪比的增大,各种调制方式的误包率逐渐减小。在实际系统中,可以通过适当增加调制阶数 M 或者提高信噪比来减小误包率,提升系统的差错性能。在 4 种新型组合脉冲调制方式中,DAPPM 的差错性能最好,DPPWM 的差错性能最差。可能的原因是:当调制阶数 M 恒定时,由表 1 可知,DAPPM 符号结构长度是固定的,而 DPPWM 的符号结构长度是变化的,在接收判决时,固定长度的符号结构判决不会影响后续数据包的判决,而对于变化长度的符号结构,因前数据帧结构的误判会影响后续数据帧的判决,这就恰恰增大了误包率的可能性。

图 5 为调制阶数 M 取某一值时($M = 6$),PPWM 的误包率随参数 r 变化的仿真图。由图 5 可以看出,在信

噪比取一定值时,参数 r 越大,其相应的误包率就越小,其主要的原因是:在 PPWM 的符号结构中,随参数 r 的增加,二进制比特信息中按照 PPM 方式进行调制的位数增多,所以其符号结构的特征与 PPM 的接近,故其误包率随之减小。因此,可根据实际的无线光通信系统要求,选择合适的参数 r ,以确保系统能满足误包率的要求。

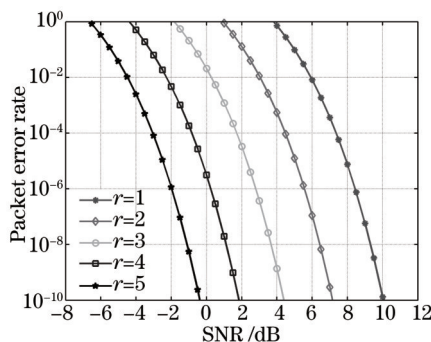


图5 具有不同 r 取值的 PPWM 其误包率随信噪比的变化图

Fig.5 Packet error rate changes with the SNR for the PPWM with different values of r

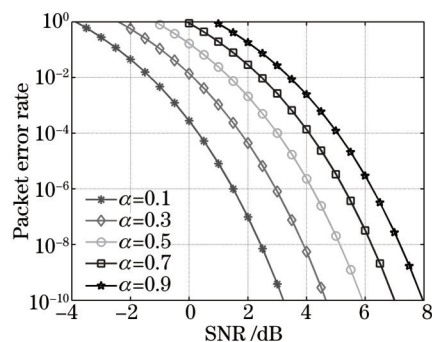


图6 具有不同 α 取值的 DAPPM 其误包率随信噪比的变化图

Fig.6 Packet error rate changes with the SNR for the DAPPM with different values of α

图6是调制阶数 M 取某一定值时(如 $M=4$),DAPPM的误包率随参数 α 变化的仿真图。由图6可知,信噪比一定时,参数 α 越小,其相应的误包率越小。主要的原因是:在 DAPPM 调制方式中,在相同平均发射功率的条件下,随着参数 α 的减小,其对应的峰值功率随之增大,故相应地减小了误包率,提高了系统差错控制性能。

5 结 论

从符号结构、平均发射功率、带宽需求和差错性能等方面对新型组合脉冲调制方式进行了全面、详细的分析。通过仿真分析可知,传统调制方式 PPM 的平均发射功率和误包率都很小,但带宽效率最差,解调时需要严格的时钟同步和符号同步。在4种新型组合脉冲调制方式中,DAPPM的平均发射功率和误包率接近于 PPM,均优于其他组合调制方式,其带宽效率则明显优于 PPM。另外,通过增大 PPWM 的 r 参数、减少 DAPPM 的 α 参数,可适当改善差错性能,且综合看来,DAPPM 和 PPWM 更具有优势,适合于未来无线光通信系统。因此,必须根据系统的实际要求构建合适的脉冲调制方式。

参 考 文 献

- 1 S Karp, R M Gagliardi. The design of a pulse-position modulated optical communication system[J]. IEEE Trans Commun Technol, 1969, 17(6): 670-676.
- 2 M Rouissat, R A Borsali, M E Chikh-Bled. A new modified MPPM for high-speed wireless optical communication systems[J]. ETRI J, 2013, 35(2): 188-192.
- 3 Renbo Liao, Hongzhan Liu, Yaojun Qiao. New hybrid reverse differential pulse position width modulation scheme for wireless optical communication[J]. Opt Eng, 2014, 53(5): 056112.
- 4 Wu Yunyun, Li Xinyang, Rao Changhui. Effect of atmospheric turbulence aberration on the bit-error performance of homodyne binary phase shift keying coherent optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0606002.
武云云, 李新阳, 饶长辉. 大气湍流像差对空间零差二进制相移键控相干光通信误码性能的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0606002.
- 5 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.*. Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706017.
马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK 调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706017.
- 6 Deng Lijun, Ke Xizheng, Shi Weijian. Performance research on the non-clipped QPSK sine-like modulation of atmospheric laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205001.
邓莉君, 柯熙政, 史炜坚. 非限幅 QPSK 类正弦调制大气激光通信系统的性能研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205001.
- 7 Z Ghassemlooy, A R Hayes, N L Seed, *et al.*. Digital pulse interval modulation for optical communications[J]. IEEE Comm Mag, 2000, 38(10): 40-45.

- 1998, 36(12): 95-99.
- 8 Chao Liu, Yong Yao, Jiajun Tian, *et al.*. Packet error rate analysis of DPIM for free-space optical links with turbulence and pointing errors[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(s1): S10101.
- 9 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. 无线光通信中脉冲位置宽度调制技术[J]. *中国激光*, 2008, 35(12): 1883-1887.
- 10 Hang Aiping, Fan Yangyu, Bai Bo, *et al.*. Differential pulse position width modulation for optical communication [J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(12): 103-106.
黄爱萍, 樊养余, 白 勃, 等. 光通信中一种有效的差分脉冲位置宽度调制[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(12): 103-106.
- 11 Zhang Tieying, Wang Hongxing, Zhu Yinbing, *et al.*. Dual-amplitude pulse position modulation for optical wireless communication[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 28(6): 71-73.
张铁英, 王红星, 朱银兵, 等. 无线光通信双幅度脉冲位置调制[J]. *中国激光*, 2007, 28(6): 71-73.
- 12 Zhang Kai. Dual-Amplitude Pulse Interval Modulation for Optical Wireless Communications and Optical ETC Prototype[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
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.
- 13 Ke Xizheng, Chen Jinni. Performance comparison of various pulse position modulation in wireless laser communication[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 67-76.
柯熙政, 陈锦妮. 无线激光通信类脉冲位置调制性能比较[J]. *激光技术*, 2012, 36(1): 67-76.
- 14 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Design of PPM for laser communication in atmosphere[J]. *Optical Communication Technology*, 2005, (1): 50-52.
丁德强, 柯熙政. 大气激光通信 PPM 调制解调系统设计与仿真研究[J]. *光通信技术*, 2005, (1): 50-52.
- 15 Zhao Li. Research of DPPM for Laser Communication in Atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006: 13-28.
赵 黎. 大气激光通信 DPPM 调制解调技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006: 13-28.
- 16 Qin Ling, Ke Xizheng. Analysis of optical MPPM channel capacity without background noise[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(7): 107-110.
秦 岭, 柯熙政. 无背景噪声下的光 MPPM 信道容量分析[J]. *光电工程*, 2007, 34(7): 107-110.
- 17 Sun Changmei. Simulation and Research of DAPPM System for Laser Communication in Atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011: 9-20.
孙长梅. 大气激光通信 DAPPM 调制解调系统仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011: 9-20.
- 18 Jia Chao. Research on DHPIM Modulation and Demodulation for Atmospheric Laser Communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011: 14-30.
贾 超. 大气激光通信 DHPIM 调制解调技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011: 14-30.
- 19 Liu Meiping. Performances Analysis of PPMs' in Wireless Optical Communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013: 13-33.
柳美平. 无线光通信中类脉冲位置调制性能分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2013: 13-33.
- 20 D S Shiu, J M Kahn. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication[J]. *IEEE Trans Commun*, 1999, 47(8): 1201-1210.
- 21 Liu Yang, Zhang Guoan. Study on modulation scheme of visible light communications and its performance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 090601.
刘 洋, 章国安. 可见光通信调制方式及其性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 090601.
- 22 Xu Quan, Zhou Chun, Peng Jinhua, *et al.*. Performance research of modulation schemes for indoor wireless optical communication[J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2012, 29(5): 622-628.
徐 荃, 周 春, 彭金花, 等. 室内无线光通信调制方式的性能研究[J]. *量子电子学报*, 2012, 29(5): 622-628.

栏目编辑: 王晓琰