

基于脉冲激光器特性的调制方案性能研究

裴伟程 徐智勇 汪井源* 赵继勇

中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

摘要 针对脉冲激光器峰值功率大、重复频率低和占空比受限等特性,对现有的无线光通信调制方案进行分析和改进,给出改进后调制方案的符号结构,在功率效率、带宽需求和传输容量等方面对其性能进行分析比较,并在理想的加性高斯白噪声干扰下分析其误包率。理论分析和仿真验证表明:脉冲宽度调制方案具有最大的传输容量,能在适应脉冲激光器特性限制的同时,获得较好的调制性能,在无线光通信系统中有一定的应用前景。

关键词 光通信;无线光通信;脉冲激光器;调制方案;加性高斯白噪声信道;误包率

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s105001

Study of Modulation Scheme Performance Based on Characteristics of Pulse Laser

Pei Weicheng Xu Zhiyong Wang Jingyuan Zhao Jiyong

*Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China*

Abstract Aiming at the characteristics of pulse laser such as high peak power, low repetition frequency, limited duty cycle and so on, the existing optical wireless communication modulation schemes are analyzed and improved, symbol structure of the improved modulation schemes are given, their performance of average transmission power, bandwidth requirement, and transmission capacity are analyze and compared. Deduce the packet error rate based on the ideal additive white Gaussian noise channel model. Theoretic analysis and simulation show that pulse width modulation has the largest transmission capacity. If it is used to modulate pulse laser, it can not only overcome the limitations of pulse laser, but also achieve good performance, so it has application mospect in optical wireless communication system to some extent.

Key words optical communications; optical wireless communication; pulse laser; modulation scheme; additive white Gaussian noise channel; packet error rate

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 010.3310

1 引 言

在长距离无线光通信中,由于大气信道路径损耗较大而导致接收端信噪比较低,从而无法正确判决解调。选用脉冲激光器可以增大发送端的峰值功率^[1],在一定程度上提升接收信噪比。无线激光通信普遍采用强度调制/直接检测(IM/DD)系统^[1-3],现有的调制方案有开关键控(OOK)、数字脉冲间隔调制(DPIM)、脉冲位置调制(PPM)、脉冲宽度调制(PWM)以及脉冲宽度间隔调制(PWIM)等^[3-6,12]。但是由于脉冲激光器重复频率低和占空比受限,以上调制方案无法直接应用。本文以 OSTECH 半导体激光器为例,针对其特性在现有调制方案的编码中插入保护时隙,并从平均发射功率、带宽需求和传输容量以及理想加性高斯白噪

收稿日期: 2015-01-10; **收到修改稿日期:** 2015-03-01

基金项目: 江苏省科技支撑计划(BE2011177)、江苏省自然科学基金(BK2011114)、江苏省自然科学基金(BK2012509)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2013GZKF031304)

作者简介: 裴伟程(1990—),男,硕士研究生,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail:623652082@qq.com

导师简介: 徐智勇(1972—),男,副教授,硕士生导师,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail:njzxy123@163.com

***通信联系人。** E-mail:wjywjy2011@163.com

声干扰下的误包率等方面对改进后的调制方案性能进行理论分析与仿真验证,最终得出脉冲宽度调制方案能够在适应脉冲激光器特性的同时获得较优调制性能的结论。

2 符号结构

2.1 经典调制方案简介

OOK 是实现难度最低的调制方案,用激光器的开、关来表示信号“1”、“0”,并没有因功率利用率低而被人们放弃使用。PPM 用脉冲时隙在符号时隙中的位置来表示 M 比特信号,尽管提高了功率利用率,但较低的带宽效率以及解调时所需的严格时钟同步和符号同步限制了其使用范围。PWM 则由于功率需求较大而较少被提及。DPIM 的带宽效率得到了提升而且不需要符号同步,文献[4]提出的 PWIM 调制方案将脉冲宽度调制和脉冲间隔调制联合起来,在降低带宽需求的同时提升了传输容量。此外,还有由上述调制方案衍生出的差分脉冲位置调制(DPPM)、双幅度脉冲位置调制(DAPPM)、双头脉冲间隔调制(DHPIM)、定长数字脉冲间隔调制(FDPIM)、多幅度脉冲间隔调制(MDPIM)以及脉冲位置宽度调制(PPWM)等^[5-11],本文不再赘述。

2.2 脉冲激光器简介

按照其抽运方式,可以将激光器分为连续激光器和脉冲激光器两大类。抽运速率的时间决定了激光器的工作方式,当时间无限延伸时,抽运速率原则上不为 0,激光器以连续方式工作。若抽运速率只在某一(些)时段取非 0 值,那么激光器以脉冲方式工作。而脉冲方式又可以分为两种情况:单脉冲工作方式和以相同周期重复工作方式。无线光通信所用大功率脉冲激光器工作方式为后者,即单个脉冲宽度小于 0.25 s、每隔一定时间工作一次、具有较大输出功率的脉冲激光器。脉冲激光通常可以通过调 Q 和锁模技术来获取,比较常见的脉冲激光器有固体激光器中的钕铝石榴石(YAG)激光器、红宝石激光器、钕玻璃激光器以及气体激光器中的氮分子激光器和准分子激光器等^[13]。

本文以德国 OSTECH 半导体激光器为例对大功率脉冲激光器调制方案进行分析,其性能测试参数如表 1 所示, T_{room} 与 T_{target} 分别为室温和目标温度, t_{rise} 表示激光能量上升峰值 90%所需的时间。

表 1 OSTECH 半导体激光器性能测试参数

Table 1 Performance test parameter of OSTECH semiconductor laser

Type	JOLD-120-QPXF-2P
Laser wavelength	808 nm
Peak power	120 W
Rise time	<1~20 μs
T_{room}	25.5 $^{\circ}\text{C}$
Duty cycle max	20%
Pulse length range	100~300 μs
Fall time	70%~100% of t_{rise}
T_{target}	25 $^{\circ}\text{C}$

2.3 改进后的调制编码方案

经典调制方案的编码设计并没有考虑到脉冲激光器占空比的限制。因此,为了达到 OSTECH 半导体激光器最高 20%占空比的要求,需对经典调制编码方案进行相应的改进——加入若干保护时隙,使其脉冲占空比最高不超过 20%。具体来说就是:二进制启用键控(OOK)编码需在“1”和“0”后分别加入 4 个“0”时隙作为保护时隙,PPM 编码需要在每 2^M 时隙后加入 4 个“0”时隙,PWM 编码需在每组“1”后加入若干“0”时隙,且以“1”时隙最大长度的 5 倍作为 PWM 符号的固定长度,DPIM 编码需在“1”时隙后加入 4 个“0”时隙。PWIM 编码比较复杂——将 M bit 中前 r bit 用 2^r 种脉冲宽度来表示,后 $M-r$ bit 用 2^{M-r} 种脉冲间隔来表示,同时为保证占空比最高不超过 20%,在脉冲后还需设置长度为脉冲宽度 4 倍的“0”时隙作为保护时隙,因此 PWIM 编码长度并不固定。

以调制阶数 $M=2$ 为例,各调制方案的映射编码如表 1 所示(下文所指均为改进后的对应调制方案)。

表 2 改进后的 OOK、PPM、PWM、DPIM 和 PWIM ($r=1$)映射方案

Table 2 Mapping scheme of improved OOK、PPM、PWM、DPIM and PWIM($r=1$)

Bit	OOK	PPM	PWM	DPIM	PWIM($r=1$)
0 0	00000 00000	1 0 0 0 0 0 0 0	1000 0000 0000 0000 0000	1 0000	1 0000
0 1	00000 10000	0 1 0 0 0 0 0 0	1100 00000000 0000 0000	1 0000 0	1 0000 0
1 0	10000 00000	0 0 1 0 0 0 0 0	1110 0000 0000 0000 0000	1 0000 00	11 00 00 00 00
1 1	10000 10000	0 0 0 1 0 0 0 0	1111 0000 0000 0000 0000	1 0000 000	11 00 00 00 00 0

根据 OSTECH 半导体激光器的性能特点,表 1 中针对脉冲宽度进行调制的 PWM 和 PWIM 两种方案的宽度在激光器最小脉宽和最大脉宽范围内变化,其“1”时隙与“0”时隙的宽度可以取不同值,时隙宽度定义为单个时隙所占用的时间,时隙长度定义为若干时隙的总宽度。

3 性能分析

3.1 平均发射功率

在发射峰值功率相同的条件下比较各调制方案的平均发射功率,平均发射功率越低,调制方案的功率效率越高^[3-5]。

设发送峰值功率为 P_s ,二进制信息比特中“0”和“1”以相同概率出现以及 OOK 的平均发射功率为 P_{OOK} 。由于发射“0”不用功率,平均发射功率可以用脉冲激光器发射“1”的概率乘以发送峰值功率来表示,

$$P_{OOK} = 0.1P_s; P_{PPM} = \frac{P_s}{2^M+4} = \frac{10}{2^M+4}P_{OOK}; P_{DPIM} = \frac{P_s}{2^M+9} = \frac{20}{2^M+9}P_{OOK}。$$

对于涉及宽度的调制,假设调制所用最大脉冲宽度为 t_{max} ($100 \mu s < t_{max} \leq 300 \mu s$),最小脉宽为 $100 \mu s$,则“1”时隙以及保护“0”时隙的宽度(也即相邻脉宽之间变化的步长,把最小脉宽也映射为信息,设激光器脉宽能按此步长在 $100 \sim 300 \mu s$ 范围内增减)为 $\frac{t_{max}-100}{2^M-1}$, $P_{PWM} = \frac{(100+t_{max})/2}{5 \times t_{max}} \times P_s = \frac{100+t_{max}}{t_{max}} P_{OOK}$ 。对于

PWIM,假设跟在保护“0”时隙后的信息“0”时隙的宽度 $t_{width} < \frac{t_{max}-100}{2x-1}$ (这样可以使 PWIM 符号长度尽可能短),由于长度不固定,其脉冲部分的平均长度为 $\frac{t_{max}+100}{2}$,保护时隙平均长度为 $4 \times \frac{t_{max}+100}{2}$,信息时隙

平均长度为 $t_{width} \times \frac{2^{M-r}-1}{2}$,PWIM 的符号平均长度为 $5 \times \frac{t_{max}+100}{2} + t_{width} \times \frac{2^{M-r}-1}{2}$,则 PWIM 的平均发射

$$P_{PWIM} = \frac{t_{max}+100}{2} \times \frac{P_s}{5 \times \frac{t_{max}+100}{2} + t_{width} \times \frac{2^{M-r}-1}{2}} = \frac{10 \times (t_{max}+100)}{5 \times (t_{max}+100) + t_{width} \times (2^{M-r}-1)} P_{OOK}。$$

在 $t_{max} = 200 \mu s$,PWIM($r=1$)的信息“0”时隙宽度 $t_{width} = 0.8 \times \frac{t_{max}-100}{2x-1}$ 时,对各调制方案的平均发射功率进行仿真比较。从图 1 可明显看出 PWM 的平均发射功率远大于 OOK,而随着 M 的增加,PPM、DPIM 和 PWIM($r=1$)的平均发射功率逐渐下降至远低于 OOK,且由高至低依次为 PWIM($r=1$)、DPIM、PPM,PPM 具有最低的平均发射功率。在 M 固定的条件下,如图 2 所示, $r=1$ 时,PWIM 具有最低的平均发射功率,PWIM 的平均发射功率随着 r 的增大而先增大后趋于稳定值。

3.2 传输容量

传输容量可用同一时间内调制方案的比特率大小来衡量。对于改进后的调制方案,由于加入保护时隙的缘故,传输 M bit 所用时隙数增多,比特率相对改进前有所下降。当时隙宽度为 τ (取脉冲激光器所能稳定发出的最窄脉冲宽度 $100 \mu s$)时,OOK 的传输容量为 $C_{OOK} = \frac{1}{5\tau}$ 。令 M 为调制阶数,则 PPM 的符号长度为

$(2^M+4)\tau$, PWM 的符号长度为 $5 \times t_{\max}$, DPIM 的符号平均长度为 $\frac{2^M+9}{2}\tau$, PWIM 的符号平均长度为 $5 \times \frac{t_{\max}+100}{2} + t_{\text{width}} \times \frac{2^{M-r}-1}{2}$, 则 PPM、PWM、DPIM 和 PWIM 的传输容量分别为 $\frac{M}{(2^M+4)\tau}$, $\frac{M}{5 \times t_{\max}}$, $\frac{2M}{(2^M+9)\tau}$ 和 $\frac{M}{5 \times \frac{t_{\max}+100}{2} + t_{\text{width}} \times \frac{2^{M-r}-1}{2}}$ 。

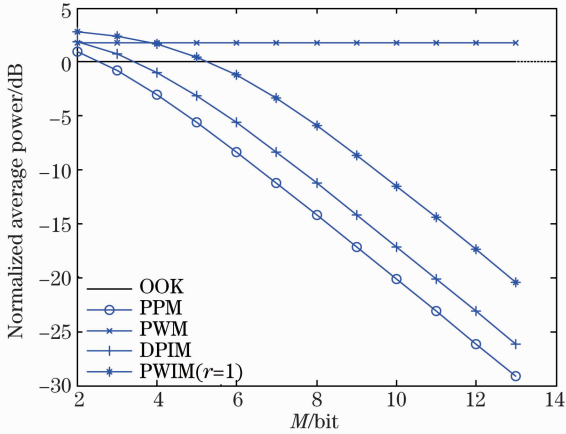


图 1 OOK、PPM、PWM、DPIM 和 PWIM($r=1$) 平均发射功率比较

Fig. 1 Normalized average transmit power comparisons of OOK, PPM, PWM, DPIM and PWIM ($r=1$)

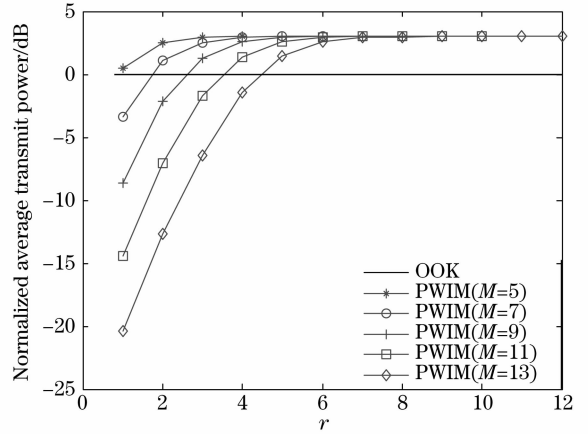


图 2 不同 r 取值下, OOK 和 PWIM 归一化平均发射功率比较

Fig. 2 Normalized average transmit power comparisons of OOK and PWIM versus different r

如图 3 所示, 随着 M 的增加, PWM 的传输容量迅速上升至远大于 C_{OOK} , 而 PWIM($r=1$)、DPIM 和 PPM 的传输容量则先上升后下降, 最终低于 OOK。由图 4 可知, 在 M 固定时, PWIM 的传输容量随着 r 的增大而先增大后趋于不变。

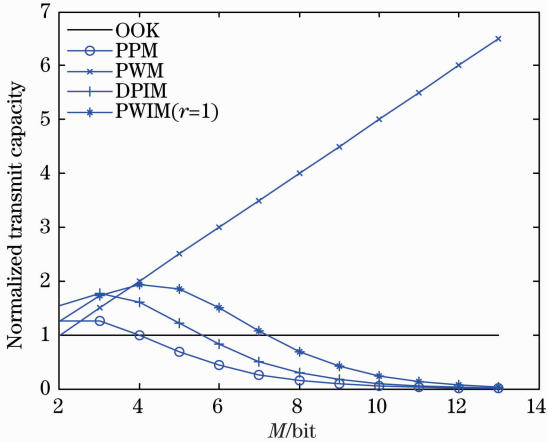


图 3 OOK、PPM、PWM、DPIM 和 PWIM($r=1$) 传输容量比较

Fig. 3 Normalized transmit capacity comparisons of OOK, PPM, PWM, DPIM and PWIM ($r=1$)

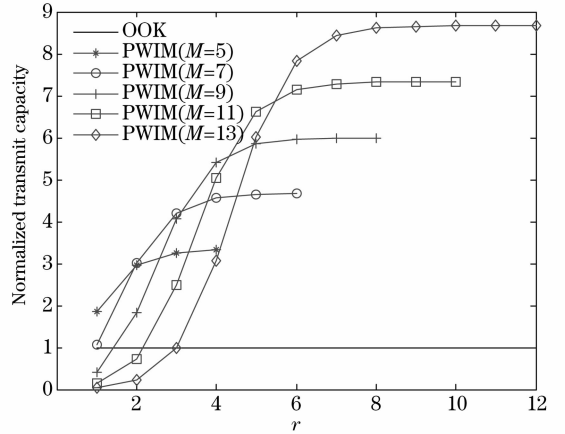


图 4 不同 r 取值下, OOK 和 PWIM 归一化传输容量比较

Fig. 4 Normalized transmit capacity comparisons of OOK and PWIM with different r

3.3 带宽需求

带宽需求是评判一种调制方案性能优劣的重要指标, 而光脉冲宽度较窄, 在相同传信率的条件下, 用脉冲时隙宽度的倒数来近似描述脉冲宽度不变的信号带宽需求^[4-6]。至于宽度在变化的 PWM 和 PWIM, 取最小脉冲宽度的倒数(即最大带宽需求)来表示其带宽需求。

相同传信率条件, 即在相同的时间内传输相同的比特数。假定在时间 $T=5 \times \tau \times M$ ($\tau=100 \mu\text{s}$) 内传输

Mbit,当脉冲调制方案满足占空比最大(即为 20%)且能完整传递 Mbit 信息时,取其脉冲时隙宽度的最小值,得到其最大带宽需求。此时,OOK 所需的最小脉冲时隙宽度为 $\frac{T}{5 \times M} = \tau$,PPM 所需的最小脉冲时隙宽度为 $\frac{T}{2^M + 4}$ ($2 < M \leq 4$);DPIM 所需的最小脉冲时隙宽度为 $\frac{T}{2^M + 4}$ ($2 < M \leq 4$)。而对于 PWM 和 PWIM,当最大脉冲宽度一定时,可以通过减小脉冲宽度变化步进的办法来调整其最小脉冲宽度,且 M 取值对该最小脉冲宽度的影响大大减小。

由上述分析可知,在给定传信率条件下,PWIM 以及 PWM 的最小脉冲宽度不仅具有可调性,而且可以减轻 M 取值带来的影响,因此,PWM 和 PWIM 的带宽需求可比 OOK、PPM 以及 DPIM 更低。

4 差错性能

4.1 理论分析

对于上述各调制方案,一个时隙发生错误往往会导致至少一个符号的传输错误。为此,通过误包率来比较不同调制方案之间的差错性能会更加贴近实际^[3-5]。

在理想的加性高斯白噪声干扰下,假设信号没有多径散射,不会造成码间串扰,信道传输路径衰减因子为 g 。经过调制编码和前置滤波器,待传输的比特被放大到峰值功率 P_t ,然后过信道、加噪声,再经过接收端的理想匹配滤波、抽样以及判决处理,最后被送往解码器解码,输出信息比特。 $\sqrt{gP_t} + n_0(t)$ 为有脉冲时匹配滤波器的输入,无脉冲时的输入为 $n_0(t)$,其中 P_t 为发射脉冲峰值功率, $n_0(t)$ 是均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯白噪声。 $T = T_s$ 时刻,匹配滤波器输出分别为 $E_p = gP_t T_s + n(T_s)$ 和 $n(T_s)$, $n(T_s)$ 是均值为 0、方差为 $\sigma^2 = gP_0 T_s^2 \sigma_n^2$ 的高斯白噪声。设判决门限为 α ,则无脉冲时隙和有脉冲时隙的脉冲出错概率可以表示为^[3-5,9-12]

$$\begin{cases} p_{e1} = Q\left[(1 - \alpha)\sqrt{\frac{gP_t}{\sigma_n^2}}\right] \\ p_{e0} = Q\left[\alpha\sqrt{\frac{gP_t}{\sigma_n^2}}\right] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ 表示由硬判决门限 x 带来的错误概率。设脉冲时隙(即“1”时隙)和零时隙(即“0”时隙)出现的概率为 p_1 和 p_0 ,则平均误时隙率为^[3-5]

$$p_{se} = p_1 Q\left[(1 - \alpha)\sqrt{\frac{gP_t}{\sigma_n^2}}\right] + p_0 Q\left[\alpha\sqrt{\frac{gP_t}{\sigma_n^2}}\right]. \quad (2)$$

设一个数据包由 N bit 组成,经调制,其时隙个数变为 NL/M ,那么误包率^[3-5]如(3)式所示:

$$p_{pe} = 1 - (1 - p_{se})^{NL/M} \approx \frac{NL}{M} p_{se}. \quad (3)$$

可见误包率与 L 成正比, L 越大,调制方案的误包性能越差。由于映射方案不同,各调制方案的有效时隙长度(即每个符号中参与判决的时隙个数)如下: $L_{OOK} = 5M$, $L_{PPM} = 2^M + 4$, $L_{DPIM} = \frac{2^M + 9}{2}$ 。在 PWM 以及 PWIM 方案中,调制可利用的脉宽范围为 $100 \mu s \sim t_{max}$,在不考虑多径效应的情况下,接收到的脉冲宽度也在 $100 \mu s \sim t_{max}$ 范围内,只需将该范围内的时隙正确判决出来,即可准确的得到信号,则 $L_{PWM} = 2^M - 1$, $L_{PWIM} = \frac{2^r - 1}{2} + \frac{2^{M-r} - 1}{2}$ 。

4.2 仿真分析

在相同的峰值功率 P_s 下比较误包率,各调制方案发“1”和“0”的概率如表 3 所示。PWIM 发送“1”和

“0”的概率分别为 $p^1 = \frac{t_{max} + 100}{5 \times (t_{max} + 100) + t_{width} \times (2^{M-r} - 1)}$ 和 $p^0 = \frac{4 \times (t_{max} + 100) + t_{width} \times (2^{M-r} - 1)}{5 \times (t_{max} + 100) + t_{width} \times (2^{M-r} - 1)}$ 。

表 3 OOK、PPM、PWM、DPIM 和 PWIM($r=1$)发“1”和“0”概率

Table 3 Probability of transmitting “1” and “0” of OOK, PPM, PWM, DPIM and PWIM($r=1$)

Probability	OOK	PPM	PWM	DPIM
p^0	9/10	$\frac{2^M+3}{2^M+4}$	$\frac{9 \times t_{\max} - 100}{10 \times t_{\max}}$	$\frac{2^M+7}{2^M+9}$
p^1	1/10	$\frac{1}{2^M+4}$	$\frac{t_{\max} + 100}{10 \times t_{\max}}$	$\frac{2}{2^M+9}$

图 5 所示为当 $M=4$ 时,各种调制方案随信噪比变化的误包率曲线。仿真参数如下: $\alpha=0.5, g=5 \times 10^{-6}, \sigma_n^2=1 \times 10^{-8}, N=1024^{[5]}$ 。从图中可以看出,在发送脉冲峰值功率相同的情况下,PWIM($r=1$)的误包率明显优于其他调制方案。当误包率为 10^{-8} 时,PWIM($r=1$)信号的信噪比比 OOK、PPM 信号小 0.309 dB,比 PWIM($r=2$)信号大 0.053 dB,比 DPIM 信号小 0.219 dB,比 PWM 信号小 0.255 dB,可见各调制方案的误包性能相差并不明显。从图 6 可以看出,当 M 以及信噪比一定($R_{SN}=23$ dB)时,PWIM 的误包率随着 r 的增大先减小后变大,而通过对 L 的计算发现,随着 M 的增大,各调制方案的有效时隙长度 L 均会不同程度增大至远大于 L_{OOK} ,从大到小依次为 $L_{PPM} > L_{PWM} > L_{DPIM} > L_{PWIM} > L_{OOK}$ 。因此,可以根据需要设置合适的 M 以及 r 。

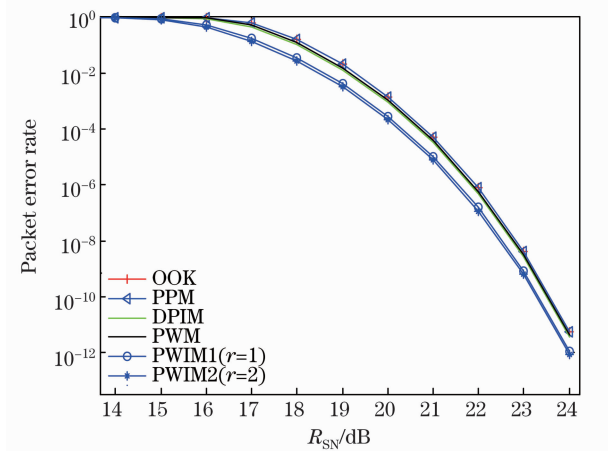


图 5 $M=4$ 时,OOK、PPM、PWM、DPIM、PWIM($r=1$)和 PWIM($r=2$)误包率比较

Fig. 5 Packet error rate of OOK, PPM, PWM, PWIM, DPIM and PWIM versus R_{SN} when $M=4$

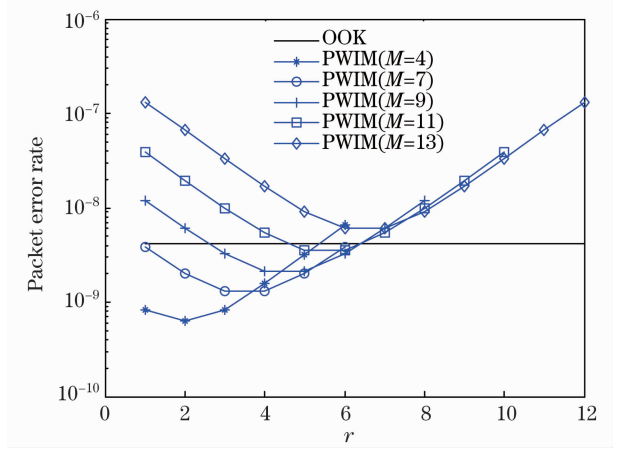


图 6 $R_{SN}=23$ dB 时,不同 r 取值下 OOK 和 PWIM 误包率比较

Fig. 6 Packet error rate of OOK and versus different r when $R_{SN}=23$ dB

5 结 论

从平均发射功率、传输容量、带宽需求以及理想加性高斯白噪声干扰下的误包率等 4 个方面对改进后的 OOK、PPM、PWM、DPIM 以及 PWIM 调制方案性能进行比较。通过理论分析与仿真验证可以得出,PWM 以及 PWIM 在参与比较的调制方案中具有较优性能,其中 PWM 具有最大的传输容量,而 PWIM 的差错性能在 r 较小时具有优势。在实际通信中,希望在脉冲激光器重复频率较低的情况下获得更高的传输速率以及更低的误包率。而经分析认为,PWM 解调时应首先通过能量门限进行判决恢复出“0”,“1”时隙,再通过宽度门限对“1”时隙个数进行判决进而恢复出信息比特,在文中的硬判决方案下,相当于只将判决后连续的“1”时隙直接解调为对应的信息比特、其他的判为误码,从而带来一定的误判概率,导致 PWM 方案差错性能劣化。因此,若能加入脉冲宽度门限进行二次判决,则 PWM 的差错性能应能得到较大程度的提升。综合考虑,认为 PWM 因其传输容量大、带宽需求小、差错性能好而成为基于大功率脉冲激光器的首选调制方案。

参 考 文 献

1 Li Yang. Research on Modulation Technology of High Power Semiconductor Laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and

- Technology, 2013; 6—20.
- 李 洋. 大功率半导体激光器调制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013; 6—20.
- 2 Hu Zongmin, Tang Junxiang. 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.
- 3 Zhang Tiejun, 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 Pei Weicheng, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, *et al.*. Pulse width interval modulation scheme in wireless optical communication system[J]. Optical Communication Technology, 2014, 38(11): 46—49.
- 裴伟程, 徐智勇, 汪井源, 等. 无线光通信中的脉冲宽度间隔调制方案[J]. 光通信技术, 2014, 38(11): 46—49 .
- 5 Cheng Gang, Wang Hongxing, Sun Xiaoming, *et al.*. A new modulation scheme of optical wireless communication[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.
- 6 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, 10: 656—659.
- 7 Wang Jingyuan, Zhang Zhengxian. PPM in wireless infrared communication[J]. Telecommunication Technology, 2000, 40(5): 81—84.
- 汪井源, 张正线. 无线光通信中的 PPM 调制[J]. 电讯技术, 2000, 40(5): 81—84.
- 8 Z Ghassemlooy, A R Haye, N L Seed, *et al.*. Digital pulse interval modulation for optical communications[J]. IEEE Communications Magazine, 1998, 36(12): 95—99.
- 9 Fan Yangyu, R J Green. Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications[J]. Opt Eng, 2007, 46(6): 1—8.
- 10 Fan Y, Bai B, Green R J. PPMPWM: a new modulation format for wireless optical communications[C]. Communication Systems Networks and Digital Signaling, International Symposium on IEEE, 2010: 604—609.
- 11 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.
- 12 K Kiasaleh. Performance of APD-based PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(9): 1455—1461.
- 13 Chen Heming, Zhao Xinyan. Laser Principles and Application[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 139—141.
- 陈鹤鸣, 赵新彦. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 139—141.

栏目编辑: 宋梅梅