

# 脉冲位置调制对脉冲式光纤激光器调制速率的影响

任 鑫 李洪祚 王 岩 郝子强

(长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要** 脉冲式光纤激光器受到其重复频率的限制, 导致其数据传输速率较低, 严重影响了其在通信领域的应用。为了改善其性能并使其能更好地应用到通信领域, 针对脉冲式光纤激光器的这种缺点, 通过三种脉冲位置调制(PPM)调制方式对其进行调制并对其性能的影响进行了实验研究。通过改变三种 PPM 调制的调制位数脉冲时隙宽度对脉冲式光纤激光器的调制速率的影响以及三种 PPM 调制方式对脉冲式光纤激光器的输出功率误码率的影响进行了仿真研究。分析结果表明, 单脉冲位置调制(L-PPM)调制方式最适合脉冲式光纤激光器, 可以将重复频率为 200 kHz 的脉冲式光纤激光器的调制速率提高到 1.387 Mbit/s, 该结果有利于脉冲式光纤激光器在通信中的应用。

**关键词** 光通信; 脉冲式光纤激光器; 调制速率; 脉冲位置调制

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0706002

## Effect for Modulation Rate of Pulsed Fiber Laser on Pulse Position Modulation

Ren Xin Li Hongzuo Wang Yan Hao Ziqiang

(Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** The limitation of low repetition rate for pulsed fiber laser makes data transmission rate lower, which has a serious impact on its application in the field of communications. In order to improve its performance and make it better applied to the field of communications, the pulsed fiber laser is modulated by three pulse position modulation (PPM) modulations and its impact on performance are studied experimentally. By changing the modulation digits of three PPM modulations method, the influence of time slot width on modulation rate of pulsed fiber laser system is investigated, and the effect of the modulations on output power bit error rate is researched. The results show that the level pulse position modulation (L-PPM) modulation method is most suitable for pulsed fiber lasers and the modulation rate can be enhanced to 1.387 Mbit/s under the repetition rate of 200 kHz. The findings will be benefit for pulsed fiber laser applications in communications.

**Key words** optical communications; pulsed fiber lasers; modulation rate; pulse position modulation

**OCIS codes** 060.2330; 060.2605; 060.2380

## 1 引 言

为了满足深空光通信的远距离数据传输要求, 需要提高发射光源的发射功率和转换效率<sup>[1]</sup>。光纤激光器具有峰值功率高、输出光束质量好、线宽窄等特点, 这些特点都是深空光通信中十分宝贵的资源。但是由于其重复频率较低, 因此难以达到高速率通信的要求<sup>[2]</sup>。脉冲位置调制(PPM)调制方式可以在给

定的光平均功率下, 用较小的激光脉冲重复频率达到很高的数据传输率, 正好可以弥补光纤激光器的缺点。另外, 光纤激光器因其具有功率利用率高、传输效率高和抗干扰能力强等优点在激光通信领域中被广泛应用<sup>[3]</sup>。因而基于光纤激光器的 PPM 调制技术研究成为了空间光通信的研究热点<sup>[4]</sup>。

脉冲光纤激光器具有高功率、窄线宽的特点, 但

收稿日期: 2013-12-05; 收到修改稿日期: 2014-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(60977052)、国家 711 项目(2011AA7117046)

作者简介: 任 鑫(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: renxin911@126.com

导师简介: 李洪祚(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: lihongzuo@sohu.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

其调制速率较低因而无法应用在深空光通信中。而 PPM 调制方式相对于其他调制方式则可以在最大程度上将脉冲式光纤激光器的调制速率进行提高<sup>[5]</sup>。美国航空航天局(NASA)采用 PPM 调制方式与半导体激光器进行了火星激光通信演示系统(MLCD)研究,建立了火星到地球下行激光通信链路,该链路的通信速率为 100 Mbit/s<sup>[6-7]</sup>。欧洲空间局(ESA)研制了 STLEX 系统,在卫星与卫星间建立的通信链路采用的也是 PPM 调制方式,其通信速率为 50 Mbit/s<sup>[8]</sup>。但是上述通信链路中所用的激光器都是半导体激光器,发射峰值功率在 130 W 以下,这种峰值功率已经无法满足深空光通信高发射功率的要求,因而制约了深空光通信发展。本文将大功率脉冲式光纤激光器与 PPM 调制技术结合,提高了调制速率,实现了脉冲式光纤激光器在通信中的应用。

## 2 三种脉冲位置调制方式调制速率比较

脉冲式光纤激光器的重复频率低,很难做到高速传输,因而在实际光通信应用中需要提高脉冲式光纤激光器的调制速率。下面就对重复频率为 200 kHz,脉冲宽度为 3 ns 的脉冲式光纤激光器在调制速率为 1 Mbit/s 时的 PPM 调制进行研究。调制速率即每秒所传输信息数据的位数。由于其重复频率为 200 kHz,所以保护时段  $T_D = 5 \mu\text{s}$ ,那么提高脉冲式光纤激光器的调制速率需要缩短信息段长度,增加调制位数。

### 2.1 单脉冲位置调制(L-PPM)调制速率

设调制系统 PPM 调制的进制数为  $L = 2^n$ ,要发送的  $n$  位数据为  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ ,一个 PPM 帧周期分为信息段和保护段,其中信息段一共有  $L_n$  个时隙,时隙宽度记为  $\tau$ ,保护时段记为  $T_D$ ,则可以得到系统的帧周期  $T_{\text{PPM}}$  为

$$T_{\text{PPM}} = L_n \times \tau + T_D, \quad (1)$$

系统的帧频  $f_{\text{PPM}}$  为

$$f_{\text{PPM}} = (L_n \times \tau + T_D)^{-1}, \quad (2)$$

系统的传信率  $R$  为

$$R = (\text{lb } L_n) / (L_n \times \tau + T_D), \quad (3)$$

式中  $T_D = 5 \mu\text{s}$ ,  $\text{lb } L_n$  为调制位数,想要提高调制速率必须要加大  $\text{lb } L_n$ , 以及减小  $L_n \times \tau$ 。若把发送的每组数据对应的时隙位置记为  $L_m$ ,则数据与时隙位置  $L_m$  的映射编码关系为

$$L_m = q_1 + 2 \times q_2 + \dots + 2^{n-1} \times q_n. \quad (4)$$

### 2.2 差分脉冲位置调制调制速率

由于差分脉冲位置调制(D-PPM)调制是在 L-PPM基础上改进的,且信息段长度不固定。要么每一帧中信息段最长即为连续发出两个脉冲都在一帧时间的最后一个时隙中;要么就和 L-PPM 没有差别,信息段最短的情况即为连续两个脉冲都在每一帧时间的第一个时隙中<sup>[1]</sup>。假设传输的数据为随机数据,则在一帧时间内每一个时隙上的脉冲数是相等的,那么在每一个时隙上的脉冲数是固定的,所以在理想情况下,传输量足够大时帧周期中信息段长度应满足

$$T = T_{S_1} + T_D + T_{S_2} + T_D + T_{S_3} + T_D + \dots + T_{S_n} + T_D, \quad (5)$$

式中  $T_{S_n} = n \times \tau$  表示信息段长度,因而有

$$T = \tau + T_D + 2\tau + T_D + 3\tau + T_D + 4\tau + T_D + \dots + 2^n \tau + T_D, \quad (6)$$

对(6)式化简可得

$$T_S = \tau \times (1 + 2 + 3 + 4 + \dots + 2^n) + 2^n \times T_D = \left[ \frac{(1 + 2^n)}{2} 2^n \right] \times \tau + 2^n T_D, \quad (7)$$

因为(7)式是在  $n$  次传输理想状态下得到的时间公式,所以数据量为  $n^2$ ,由此可得到 D-PPM 调制速率为

$$R_{\text{D-PPM}} = \frac{n \times 2^n}{5 \times 10^{-6} \times 2^n + \tau \times \left( \frac{2^n + 1}{2} \right) 2^n}. \quad (8)$$

### 2.3 多脉冲位置调制调制速率

对于多脉冲位置调制(M-PPM)而言,假设一帧时隙内存在  $M$  个脉冲,调制位数为  $L$ ,一帧时隙长度为  $\tau$ ,PPM 调制速率为  $R_{\text{PPM}} = \frac{N}{T_S + T_D}$ ,其中  $N$  为一帧时间内传输数据量<sup>[2]</sup>,  $T_S$  为信息段长度,  $T_D$  为保护段长度,若一帧时隙内存在  $M$  个脉冲则表明此可以传输  $N = M \times n$  个数据,其中信息段长度  $T_S = 2^n \times \tau$ ,代入公式可得出 M-PPM 调制速率为

$$R_{\text{M-PPM}} = \frac{M \times n}{2^n \times \tau + M T_D}. \quad (9)$$

相比于 L-PPM 调制,当调制位数与时隙长度一定时可以看出,

$$R_{\text{M-PPM}} = \frac{n}{\frac{2^n}{M} \times \tau + T_D}. \quad (10)$$

从(9)式可以看出当  $T_D$  足够大时,即  $2^n \times \tau$  可以忽略时,M-PPM 调制速率与 L-PPM 调制速率关系为  $R_{\text{M-PPM}} \approx R_{\text{L-PPM}}$ 。

## 2.4 不同参数下的三种 PPM 调制方式调制速率

综上所述,三种 PPM 调制速率为

$$R_{L-PPM} = \frac{n}{2^n \times \tau + T_D} = \frac{n}{2^n \times \tau + 5 \times 10^{-6}}, \quad (11)$$

$$R_{D-PPM} = \frac{n \times 2^n}{T_D \times 2^n + \tau \times \left[ \left( \frac{2^n + 1}{2} \right) 2^n \right]} = \frac{n}{5 \times 10^{-6} + \frac{2^n + 1}{2} \times \tau}, \quad (12)$$

$$R_{M-PPM} = \frac{M \times n}{2^n \times \tau + M T_D} = \frac{n}{\frac{2^n}{M} \times \tau + 5 \times 10^{-6}}, \quad (13)$$

式中  $n$  为调制位数,  $\tau$  为时隙宽度,  $M$  为 M-PPM 调制中一个周期中脉冲的个数,  $T_D$  为脉冲式光纤激光器所规定的保护段长度  $T_D = 5 \mu\text{s}$ 。现分别取  $n = 6, 7, 8, 9, 10, \tau = 3, 6, 9, 12, 15 \text{ ns}, M = 2$  得出调制速率如表 1 所示。三种 PPM 调制速率与脉冲宽度及调制位数之间的关系如图 1~3 所示。

表 1 不同  $\tau$  下的 L-PPM 调制速率表(单位: Mbit/s)

Table 1 Modulation rates of L-PPM under different  $\tau$  (unit: Mbit/s)

$n / \text{ns}$	$\tau$				
	6	7	8	9	10
3	1.155	1.299	1.387	1.377	1.239
6	1.114	1.214	1.387	1.224	0.9
9	1.076	1.138	1.095	0.937	0.703
12	1.041	1.071	0.991	0.808	0.578
15	1.011	1.012	0.901	0.709	0.491

表 2 不同  $\tau$  下 D-PPM 调制速率表(单位: Mbit/s)

Table 2 Modulation rates of D-PPM under different  $\tau$  (unit: Mbit/s)

$n / \text{ns}$	$\tau$				
	6	7	8	9	10
3	1.121	1.397	1.596	1.795	1.993
6	1.194	1.393	1.591	1.789	1.987
9	1.192	1.389	1.587	1.784	1.981
12	1.190	1.387	1.583	1.779	1.974
15	1.187	1.383	1.579	1.773	1.968

表 3 不同  $\tau$  下 M-PPM 调制速率表(单位: Mbit/s)

Table 3 Modulation rates of M-PPM under different  $\tau$  (unit: Mbit/s)

$n / \text{ns}$	$\tau$				
	6	7	8	9	10
3	1.177	1.348	1.486	1.561	1.530
6	1.156	1.309	1.387	1.377	1.239
9	1.135	1.255	1.300	1.232	1.040
12	1.114	1.214	1.224	1.145	0.897
15	1.095	1.174	1.156	1.018	0.789

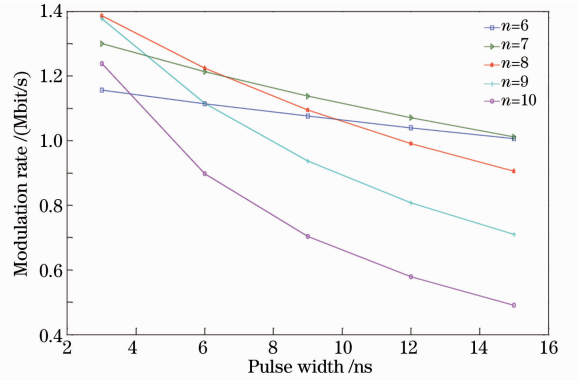


图 1 L-PPM 调制速率与脉冲宽度以及调制位数之间的关系

Fig. 1 Relationship between the L-PPM rate and pulse width

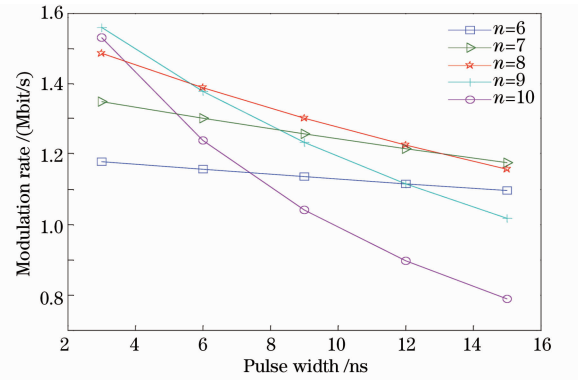


图 2 D-PPM 调制速率与脉冲宽度以及调制位数之间的关系

Fig. 2 Relationship between the D-PPM rate and pulse width

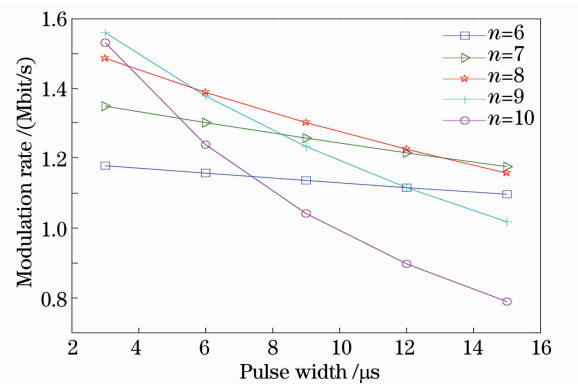


图 3 M-PPM 调制速率与脉冲宽度以及调制位数之间的关系

Fig. 3 Relationship between the M-PPM rate and pulse width

## 3 最佳 PPM 调制方式的选取

由以上分析可知,影响 PPM 的因素主要为调制位数、时隙宽度与保护段长度,其中保护的长度是

由激光器重复频率决定的,而调制位数和时隙宽度决定了激光器输出脉冲的性质<sup>[3]</sup>,也决定了接收端接收信号的性能,所以可以通过选择一组最佳的PPM调制参数使得脉冲式光纤激光器的调制性能最佳。

### 3.1 时隙宽度与保护段长度之间的关系

若一个数字基带信号的码元速率为 $R_b = 1/T_b$ ,它所要求的理想低通信道带宽为 $B = R_b/2$ ,其中 $T_b$ 表示传输一个数据的周期。若开关键控(OOK)信号和L-PPM信号的码元速率分别为 $R_b = 1/T_b, R'_b = 1/T'_b$ ,要求传信率相同,则 $T'_b L_D = T_b \text{lb } L_D, B/B' = \text{lb } L/L$ ,其中 $L_D = 2^n$ 表示调制数据的位数, $n$ 为整数。可见PPM调制对带宽的要求比较大<sup>[4]</sup>。

单位传信率是一个重要参数,即每秒每赫兹传输比特数

$$\gamma_p = R_c/B, \quad (14)$$

式中 $R_c$ 为调制速率, $B$ 为信号带宽,单位分别是bit/s和Hz。如果光通信系统使用脉冲式激光器<sup>[5]</sup>,脉冲持续时间为 $\tau_p$ ,则信号带宽近似为

$$B = \frac{1}{\tau_p}. \quad (15)$$

若OOK调制码元的占空比为 $\tau'$ ,则它的单位传信率为<sup>[6]</sup>

$$\gamma_{\text{OOK}} = (1/T_b)/(1/\tau) = \tau'. \quad (16)$$

单脉冲位置调制的传信时隙数为 $L = 2^n$ ,占空比与OOK调制方式相同,则 $2^n$ 个时隙的宽度为 $T_{\text{PPM}} = 2^n \times \tau_p/\tau'$ 。由此可得单位传信率为<sup>[7]</sup>

$$\gamma_{\text{PPM}} = n \times \tau'/2^n. \quad (17)$$

由以上分析可知,在相同传信率时,与OOK调制相比,L-PPM调制占用的带宽增加,要求的传输码率也增大<sup>[8]</sup>。

在一个 $L$ 元PPM信号中,决定它的结构参数有时隙宽度 $\tau_c$ ,传信时隙数 $L_n$ 和保护时隙数 $D$ 。根据(3)式可知,

$$R_c = (\text{lb } L_n)/(L_n \times \tau_c + T_D) = (\text{lb } L_n)/(L_n + D)\tau_c, \quad (18)$$

PPM每时隙的传信量为 $C_p$ 为

$$C_p = R_c \times \tau_c = (\text{lb } L_n)/(L_n + D), \quad (19)$$

L-PPM的平均功率 $P_{\text{ave}}$ 和脉冲峰值功率 $P_{\text{max}}$ 的关系为

$$P_{\text{ave}} = \tau \times P_{\text{max}}/(L_n + D), \quad (20)$$

式中 $\tau'$ 为脉冲的占空比,因此如果保持脉冲峰值功率 $P_{\text{max}}$ 不变,PPM发射系统的平均功率 $P_{\text{ave}}$ 随着 $L_n$ 的增加而减小<sup>[9]</sup>。

对于OOK调制,一帧中的传信时段仅一个时隙,它利用该时隙有无脉冲来表示所传递信息,其一帧的传信量为2 bit,每时隙的传信量

$$C_0 = 2/(1 + D). \quad (21)$$

在开关等概率的情况下,OOK的平均功率 $P_0$ 与脉冲峰值功率 $P_{\text{max}}$ 的关系为

$$P_0 = \tau' P_{\text{max}}/2(1 + D), \quad (22)$$

所以,PPM和OOK的带宽利用率之比 $C'_p/C_0$ 和能量利用率之比为

$$C'_p P_0/C_0 P_{\text{ave}} = \text{lb } L_n/4, \quad (23)$$

式中 $C'_p$ 为时隙的最大传信量<sup>[10]</sup>。

在占空比 $\tau' = 1$ 时,表4列出了在保护时隙数 $D$ 不同时,PPM最佳传信时隙数 $L_n$ 和能量利用率之比的数值。

表4 PPM与OOK的带宽利用率和能量利用率之比

Table 4 Energy rate and width rate between PPM and OOK

$D$	$L_n$	$C'_p$ /bit	$C'_p/C_0$	$\text{lb } L_n/4$
0	3	$5.28 \times 10^{-1}$	0.264	0.396
4	6	$5.28 \times 10^{-1}$	0.646	0.646
12	10	$1.51 \times 10^{-1}$	1	0.83
16	11	$1.28 \times 10^{-1}$	1.089	0.865
32	17	$8.34 \times 10^{-2}$	1.376	1.022
64	28	$5.23 \times 10^{-2}$	1.698	1.202
256	78	$1.88 \times 10^{-2}$	2.418	1.571
1024	232	$6.26 \times 10^{-3}$	3.026	1.9645
1280	256	$6.25 \times 10^{-3}$	3.203	2

由表4可见当 $D > 32$ 时,PPM的功率利用率和带宽利用率都比OOK的高。当 $L > 16$ 时,PPM的能量利用率仍可比OOK的高。因为OOK调制方式相对于PPM来讲,频带利用率高是它的主要特点,所以,当选择PPM调制位数时,只需要选择的调制位数使PPM的频带利用率比OOK的高即可,但是当 $D$ 和 $L_n$ 继续增大时,又会增加PPM的时隙宽度,进而增加了PPM系统的调制带宽,使频带利用率降低。所以需要综合优化 $D$ 和 $L_n$ 的取值,增加PPM系统的调制带宽,降低频带利用率。如表4所示,这里取 $D = 1280, L_n = 256$ 。

当脉冲式光纤激光器的重复周期为 $5 \mu\text{s}$ 时,传信周期长度为 $1 \mu\text{s}$ ,此时的能量利用率高于OOK调制方式,且达到了3倍以上。

### 3.2 最佳调制位数与调制速率的关系

根据PPM调制速率公式

$$R_c = (\text{lb } L_n)/(L_n \times \tau_c + T_D) = (\text{lb } L_n)/(L_n + D)\tau_c, \quad (24)$$

可以看出调制速率  $R_c$  与时隙宽度  $\tau_c$  成反比,所以要使得  $R_c$  取到最大值即使得  $\tau_c$  取到理论最小值即可<sup>[11]</sup>,实验中选用的脉冲式光纤激光器要求脉冲的最小宽度为 3 ns,所以  $\tau_c$  取值范围为  $\tau_c \geq 3$  ns。

### 3.2.1 L-PPM 中最佳调制位数

根据第 2 节结论可知,对于传信周期长度为  $1 \mu\text{s}$ ,信息段长度为  $T_s$  情况下,可得出在 L-PPM 中

$$\tau_c = \frac{T_s}{2^n}, \quad (25)$$

$$n = \text{lb}(T_s/\tau_c), \quad (26)$$

式中  $\tau_c \approx 3$  ns,  $T_s = 10^3$  ns。可得出  $n \approx 8.4$ ,取  $n=8$  时有  $2^n=256$ ,  $\tau_c=3.90625$  ns,此时 L-PPM 的调制速率最接近于最大值,所以最佳时隙宽度为  $\tau_c=3.90625$  ns时,最佳调制位数为 256 位 PPM 调制<sup>[12]</sup>。

### 3.2.2 D-PPM 中最佳调制位数

根据 D-PPM 调制速率公式

$$R_{\text{D-PPM}} = \frac{n \times 2^n}{T_D \times 2^n + \tau_c \times \left[ \left( \frac{2^n + 1}{2} \right) 2^n \right]}, \quad (27)$$

式中  $T_D = 5 \times 10^{-6}$  s,  $\tau_c = 3 \times 10^{-9}$  s。式中平均传信周期  $T_s = \tau_c \times \frac{2^n + 1}{2}$ ,当所选的脉冲式光纤激光器最佳传信周期为  $T_s = 1 \mu\text{s}$ ,  $\tau_c = 3$  ns 时,可以得出最佳调制位数为  $n \approx 9.4$ ,取  $n=9$  时,  $\tau_c \approx 3.9$  ns 时, D-PPM 的调制速率最接近于最大值,所以最佳时隙宽度为  $\tau_c \approx 3.9$  ns,最佳调制位数为 512 位 PPM 调制。

### 3.3 最佳调制参数下三种调制方式调制速率比较

综上所述,当  $T_s = 1 \mu\text{s}$  相对于 L-PPM 最佳时隙宽度  $\tau = 3.90625$  ns,调制位数为 8 位时,脉冲式光纤激光器的时隙频率分量以及带宽利用率等诸多性能达到最佳,此时的  $R_{\text{L-PPM}} = 1.387$  Mbit/s;相对于 D-PPM 最佳时隙宽度  $\tau_c \approx 3.9$  ns,调制位数为 9

位时脉冲式光纤激光器的时隙频率分量以及带宽利用率等诸多性能达到最佳,  $R_{\text{D-PPM}} = 1.795$  Mbit/s,调制速率提高了 29%。

## 4 PPM 调制系统误码率的比较

对于脉冲式光纤激光器 PPM 调制中性能调制速率最好的为 L-PPM 以及 D-PPM,以下主要讨论此两种 PPM 调制的误码率(BER)性能。

为方便讨论,假设在传输信道中只存在噪声  $N(t)$  均值为 0、方差为  $\sigma_n^2$  的高斯白噪声(AGWN),同时假设接收端带宽足够宽这样抽样判决器输入端得到的  $x(t)$  在发送脉冲“1”时为  $\sqrt{S_i} + n(t)$ ,无脉冲发送时为  $N(t)$ ,式中  $S_i$  为判决器接收信号的峰值功率<sup>[13]</sup>。若令判决门限为  $b$ ,则“1”误判为“0”的概率  $P_{01}$ ,“0”误判为“1”的概率  $P_{10}$ ,分别为

$$P_{01} = (1/2) \{1 + \text{erf}[(b - \sqrt{S_i}) / \sqrt{2\sigma_n^2}]\}, \quad (28)$$

$$P_{10} = (1/2) [1 - \text{erf}(b / \sqrt{2\sigma_n^2})], \quad (29)$$

其中

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du = 1 - \text{erfc}(x). \quad (30)$$

总误差概率为

$$P = P_1 P_{01} + P_0 P_{10}, \quad (31)$$

式中  $P_1$  为发送“1”的概率,  $P_0$  为发送“0”的概率,且  $P_1 + P_0 = 1$ 。在理想传输过程中出现“1”与“0”的概率相等,在 256 位 D-LPPM 中  $P_1 = \frac{1}{255}$ ,则  $P_0 = \frac{254}{255}$ 。对

于 512 位 D-PPM 中  $P_1 = \frac{512}{1+2+3+\dots+512} = \frac{4}{513}$ ,则  $P_0 = \frac{509}{513}$ 。

L-PPM 的总误差为

$$P_{\text{L-PPM}} = \frac{1}{255} P_{01} + \frac{254}{255} P_{10} = \frac{255 + \text{erf}[(b - \sqrt{S_i}) / \sqrt{2\sigma_n^2}] - \text{erf}(b / \sqrt{2\sigma_n^2})}{510}. \quad (32)$$

D-PPM 的总误差为

$$P_{\text{D-PPM}} = \frac{4}{513} P_{01} + \frac{509}{513} P_{10} = \frac{513 + 4\text{erf}[(b - \sqrt{S_i}) / \sqrt{2\sigma_n^2}] - 509\text{erf}(b / \sqrt{2\sigma_n^2})}{1026}. \quad (33)$$

在最佳门限条件下,信噪比(SNR)为  $S_i / (2\sigma_n^2)$ ,则 L-PPM 调制方式与 D-PPM 调制方式误码率与信噪比关系如图 4 所示。由图 4 可见,信噪比一定时,误码率随  $M$  的增大而减小,所以在对 L-PPM 与

D-PPM 选择中 L-PPM 较好<sup>[15]</sup>。

## 5 光纤激光器的 PPM 调制性能

调制特性就是激光器输出激光信号随调制信号

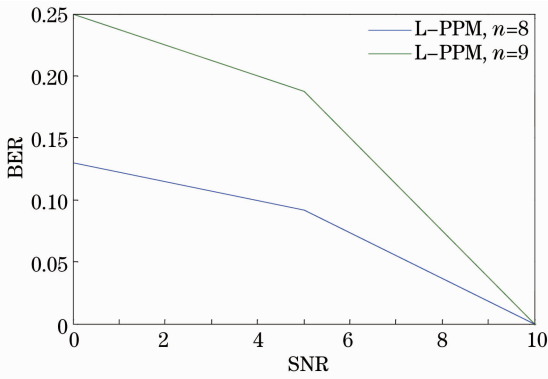


图 4 不同 L-PPM 和 D-PPM 下, 误码率和信噪比关系曲线

Fig. 4 Relationship between SNR and BER for different L-PPM and D-PPM cases

变化的关系。通过研究激光器输出功率  $P_{out}$  随 L-PPM 信号调制速率的变化关系来分析光纤激光器 PPM 的调制特性<sup>[16]</sup>。

由公式  $P_{out} = P_{max} \cdot \tau'_0$  与  $E_p = P_{max} \cdot \tau_c$  可知,

$$P_{out} = P_{max} \cdot \tau'_0 = P_{max} \cdot \frac{\tau}{(L+D)\tau_c} = E_p \cdot \frac{1}{(L+D)\tau_c} \quad (34)$$

由于  $R_c = (\ln L) / ((L+D)\tau_c)$ , 有

$$P_{out} = \frac{E_p \cdot R_c}{\ln L} \quad (35)$$

图 5 为当光纤激光器的脉冲宽度  $\tau = 3$  ns 时 256 位 PPM 调制系统中调制速率与输出功率的关系

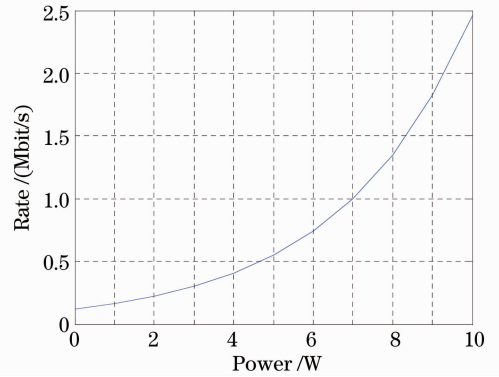


图 5 PPM 调制速率与输出功率的关系

Fig. 5 Relationship between the rate of PPM and output power

系<sup>[17]</sup>, 由图中可以看出 L-PPM 调制不但没有影响脉冲式光纤激光器的输出功率, 相反激光器的输出功率随着 PPM 调制速率的增加而增大<sup>[18]</sup>, 在 1 Mbit/s 时输出功率近似达到 7 W, 所以 L-PPM 在调制速率以及输出功率等方面最适合脉冲式光纤激光器<sup>[14]</sup>。

## 6 仿真结果

由于不同的调制参数对脉冲式光纤激光器的调制性能影响很大, 所以需要三种 PPM 调制的不同参数下的脉冲式光纤激光器的调制性能进行分析, 最终选取三组最佳参数作为三种 PPM 调制的最佳调制方案。通过分析得出最佳 PPM 调制参数如表 5 所示。

表 5 PPM 调制中最佳参数  
Table 5 Optical parameters for PPM

Ratio of information and protection	Width of times slot /ns	Number of modulation
0.2	3.90625	8

实验中设计的光纤激光器 PPM 调制系统, 主要目的是分析光纤激光器的 PPM 调制特性。采用直接调制方法, 利用现场可编程门阵列 (FPGA) 控制实现。实验系统包括: 计算机、FPGA 逻辑控制板、5 V 直流开关稳压电源、基于主控振荡器的功率放大器 (MOFA) 的光纤激光器、光电探测器 (PD)、示

波器, 实验系统图如图 6 所示。其中实验时所用的示波器采用 Tektronix DPO7104, 它具有 1 GHz 三种带宽型号, 在 4 条通道上实现 10 GS/s 的实时采样率, 能够观察瞬态现象, 利用示波器可以观测到发送数据的波形、时宽调制 (PWM) 波形以及 PPM 波形<sup>[18]</sup>。



图 6 光纤激光器 PPM 调制系统框图

Fig. 6 PPM of fiber laser system

图 7 为测试方案, 计算机通过串口给 FPGA 系统板传输二进制数据, FPGA 将输入的脉冲信号转换为 PPM 信号, 再经过触发整形产生与光纤激光

器相适应的 PPM 脉冲信号, 再将 PPM 信号直接调制到光纤激光器上, 再由光电探测器探测输出的激光脉冲, 最后利用示波器查看调制信号的波形。

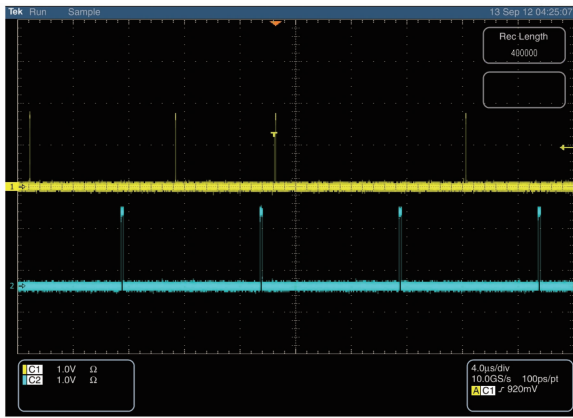


图 7 L-PPM 调制波形图

Fig. 7 Oscillogram of modulation L-PPM

如图 8 所示,图中下方蓝色信号部分为帧信号,两个蓝色脉冲之间的距离构成一个时隙段;图中上方黄色部分代表 PPM 的脉冲信号,即一个黄色脉冲代表一个 PPM 脉冲。从图中可以看出,每个黄色脉冲的位置都在相应的两个蓝色脉冲之间,并且各个黄色信号所在的蓝色脉冲之间的位置各不相同。所以,在一个固定的帧周期内有且只有一个时隙位置上有信号,且脉冲所处的位置与传送的信息一一对应,PPM 调制通过处于不同位置的脉冲来传输数据<sup>[20]</sup>。

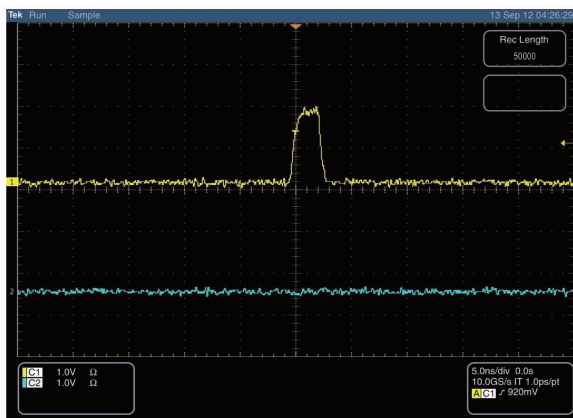


图 8 L-PPM 波形图

Fig. 8 Oscillogram of L-PPM

图 8 为一个 PPM 脉冲信号的波形显示。从图中可以看出,PPM 信号的脉宽为 3.90625 ns。对于实验上采用的 256 位 PPM 调制系统,一次发送 8 bit 的数据,帧周期为 6  $\mu$ s,经推算数据调制速率可以达到 1.387 Mbit/s。

## 7 结 论

针对脉冲式光纤激光器重复频率低的问题,提出了一种在不影响脉冲式光纤激光器输出功率的前

提下可以提高其调制速率的 PPM 调制方式。为脉冲式光纤激光器在深空光通信中的应用奠定了基础,通过改变三种 PPM 调制参数对脉冲式光纤激光器性能的影响进行了分析。采用一组最优的 PPM 调制参数对脉冲式光纤激光器进行了调制,实验结果表明在此调制参数下可将重复频率为 200 kHz 的脉冲式光纤激光器的调制速率提高到 1.387 Mbit/s。并使得脉冲式光纤激光器的时隙频率分量以及带宽利用率等诸多性能达到最佳,因而对脉冲式光纤激光器高功率高速率发射技术有着重要意义。

## 参 考 文 献

- Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technologies and System of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 9-21.
- 姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防科技出版社, 2010. 9-21.
- Huali Lu, Ming Wang, Xiajuan Dai, *et al.*. All-fiber self-mixing interferometer based on DFB laser and phase modulating technique [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 23(4): 221-223.
- Gao Kun. Analysis and Applications of High-Power Fiber Lasers [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2009. 4-5.
- 高 昆. 高功率光纤激光器特性分析及应用研究[D]. 北京: 中国科技大学, 2009. 4-5.
- Lou Qihong, Zhou Jun, Zhang Haibo, *et al.*. Recent progress of large core fiber lasers [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2235-2241.
- 楼祺洪, 周 军, 张海波, 等. 大芯径光纤激光器的新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2235-2241.
- Ning Jiping, Zhang Weiyi, Shang Lianju, *et al.*. All-fiber Q-switched ytterbium-doped double-clad laser [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(4): 483-487.
- 宁继平, 张伟毅, 尚连聚, 等. 掺镱包层光纤激光器的全光纤调 Q 技术[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 483-487.
- J J Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 1989, 25(2): 214-220.
- Cao Qing. Research on High-Rate and High-Power Laser Technology in Deep Space Optical Communication [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. 10-12.
- 曹 青. 深空光通信高速率、高功率激光发射技术的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012. 10-12.
- Fu Xinglong. The Design and Research of Deep-Space Optical Communication PPM Modulation System [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013. 7-9.
- 傅兴隆. 深空光通信 PPM 调制系统设计与研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013. 7-9.
- A G Zambrana, A P Notario. Improving PPM schemes in wireless infrared links at high bit rates [J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(3): 95-97.
- J M H Elmighrani. On the spectral estimation and synchronization of the cyclostationary optical fiber PPM process [J]. IEEE Trans Communications, 1995, 234(43): 1001-1012.
- M K Simon, V A Vilenrotter. Multi-pulse pulse-position modulation signaling for optical communication with direct detection [J]. The Interplant tarry Network Progress Report,

- 2003, 155(42): 1–22.
- 12 Zhang Huawei, Jia Honghui. The analysis of L-PPM modulation for ultraviolet laser communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 34(5): 56–58.  
张华伟, 贾红辉. 紫外激光通信 L-PPM 调制分析[J]. *光通信技术*, 2012, 34(5): 56–58.
- 13 O Rob, Leo P de J, Arthur H Mvan R. Slot synchronization by reducing the PPM pulse width in wireless optical systems [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1998, 45(7): 901–903.
- 14 Fan Yangyu, Bai Bo, Huang Aiping, *et al.*. Pulse-position-width modulation scheme in wireless optical communication system [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 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*, 2009, 35(12): 1883–1887.
- 15 Li Fei, Hou Zaihong, Wu Yi. Error performance for free space optical communication systems in a real turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0906003.  
李 菲, 侯再红, 吴 毅. 实际大气中无线光通信的系统差错性能[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0906003.
- 16 Malik D Audeh, Joseph M Kahn, John R Barry. Performance of pulse-position modulation on measured non-directed indoor infrared channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1996, 44(6): 654–659.
- 17 Wu Jili, Zhao Shanghong, Xu Jie, *et al.*. Study of capacity of coherent pulse-position modulation channel and maximization of information transmitting rate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 643–647.  
吴继礼, 赵尚弘, 胥 杰, 等. 相干光脉冲位置调制信道容量及传信率最大化研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 643–647.
- 18 An Junge, Wu Baojian, Li Zhi, *et al.*. Influence of fiber loss on optical parametric process with pump depletion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0619001.  
安俊鸽, 武宝剑, 李 智, 等. 光纤损耗对抽运消耗光纤参变过程的影响分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0619001.
- 19 Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihong. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0606002.  
李 菲, 吴 毅, 侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0606002.
- 20 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. 1.5 kW near single-mode all-fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0702001.  
代守军, 何 兵, 周 军, 等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0702001.

栏目编辑: 王晓球