

空间光通信光纤激光器脉冲位置调制特性研究

王 岩¹ 李洪祚² 张 猛¹ 郝子强²

¹长春大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

²长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 将激光器和脉冲位置调制(PPM)技术作为一个整体分析研究,提出了基于光纤激光器的PPM特性方面的概念。对脉冲调Q光纤激光器单脉冲能量、峰值功率、脉冲宽度进行了理论研究,通过仿真得出了脉冲调Q光纤激光器峰值功率与激光器震荡参数之间的特性曲线,再结合3种PPM信号模型分析了光纤激光器的震荡参数 N 与3种PPM方式的传输速率、所需功率以及所需带宽之间的关系。并通过实验仿真,得出了光纤激光器的抽运功率、初始通过率及腔长对3种PPM方式的传输速率以及所需带宽的影响。

关键词 光通信; 脉冲位置调制特性; 光纤激光器; 调Q

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0805001

Research of Pulse Position Modulation Modulation Characteristics of Fiber Laser in Space Optical Communications

Wang Yan¹ Li Hongzuo² Zhang Meng¹ Hao Ziqiang²

¹School of Electronic and Information Engineering, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China

²School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The laser and pulse position modulation (PPM) modulation technology as a whole is studied. The concept based on PPM characteristics of fiber laser is proposed. Theoretical research of single pulse energy, peak power, pulse width of the Q-switched fiber laser is studied, and characteristic curves between the pulse peak power of Q-switched fiber laser and the laser parameters are obtained through simulation. Combined with three PPM signal model analyses, the relationships between the transmission rate, the required power, the required bandwidth of the three PPM modes and laser parameters N are obtained. From the experiment modulation, the influences of the pumped current, the initial transmittance and the cavity length of the optical laser on the transmission rate and required bandwidth of the three PPM modes are concluded.

Key words optical communications; pulse position modulation characteristics; fiber laser; Q-switch

OCIS codes 060.2330; 060.2605; 060.2380

1 引 言

为了满足空间光通信的远距离数据传输要求,就要尽量提高发射光源的发射功率和转换效率^[1]。光纤激光器具有峰值功率高、输出光束质量好、窄线宽等特点,这都是空间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^[2-3]。脉冲位置调制(PPM)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,正好可以将光纤激光器的缺点弥补,而且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。所以,基于光纤激光器的PPM调制技术研究,必将成为空间光通信的热点。

本文选择脉冲式调Q光纤激光器,从激光器自身的性质特点出发,结合PPM的信号表达式,将光纤激光

收稿日期: 2015-01-07; 收到修改稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(60977052)

作者简介: 王 岩(1985—),男,博士研究生,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: juvener1985@163.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

器与 PPM 调制技术作为一个整体来分析, 得出了光纤激光器 PPM 的调制特性。

2 调 Q 光纤激光器

调 Q 技术的出现和应用是激光发展史上的一个重要突破。其技术理论已经相当成熟, 并由于其脉宽窄、脉冲能量和峰值功率高等特点, 广泛应用于激光通信、光精密测距、激光雷达和高速摄影等领域^[4]。

调 Q 技术是通过改变激光器的 Q 值, 将激光器发出的能量压缩到宽度很窄的脉冲中输出, 从而大大提高了激光峰值功率^[5]。一般调 Q 激光器输出的脉冲宽度在纳秒量级, 峰值功率在兆瓦量级。所采用的声光调 Q 光纤激光器的结构如图 1 所示, 其中工作物质选用 Cr⁴⁺:YAG 晶体。

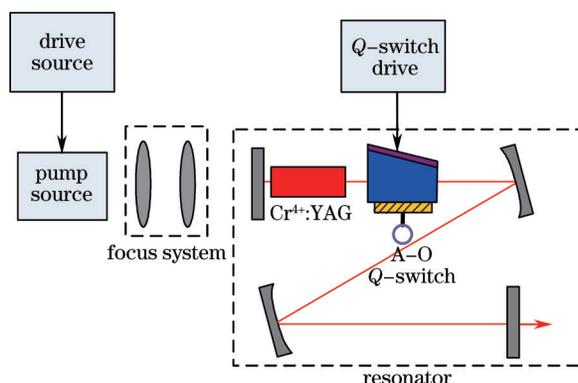


图 1 声光调 Q 光纤激光器机构图

Fig.1 Setup of acoustic-optic (A-O) Q-switched laser

由于所采用的调制方式为 PPM 调制, 所以当分析光纤激光器时, 就要分析光纤激光器输出的单脉冲信号的相关特性, 如单脉冲能量 E_p 和峰值功率 P_{\max} 。

根据文献[6]可得, 耦合输出的瞬时功率 $P(t)$ 为

$$P(t) = -hvAl' \frac{d\Phi}{dt} \Big|_R = \frac{hvAl' \frac{d\Phi}{dt} \ln(1/R)}{t_r} \Phi(t), \quad (1)$$

$$\Phi(n) = -\frac{l}{\gamma l'} \left\{ n_i - n - \frac{\beta \ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L'}{2\sigma l} \ln\left(\frac{n_i}{n}\right) - \frac{(1-\beta)\ln(1/T_0^2)}{2\sigma l} \cdot \frac{1}{\alpha} \left[1 - \ln\left(\frac{n}{n_i}\right)^\alpha \right] \right\}. \quad (2)$$

所以, 单脉冲能量 E_p 的表达式为

$$E_p = \int_0^\infty P(t) dt = \frac{hvAl \ln(1/R)}{t_r} \int_0^\infty \Phi(t) dt = \frac{hvAl \ln(1/R)}{\gamma \sigma c t_r} \int_{n_i}^{n_1} \frac{dn}{n} = \frac{hvA}{2\gamma \sigma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_1}\right). \quad (3)$$

由声光调 Q 激光器基本公式^[7-9], 可以推出:

$$P_{\max} = \frac{hvAl \ln(1/R)}{t_r} \Phi_{\max} = \frac{hvAl}{\gamma t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) n_i \left\{ 1 - \frac{n_1}{n_i} + N \ln\left(\frac{n_i}{n_1}\right) - \frac{1}{\alpha} (1-N) \left[1 - \left(\frac{n_1}{n_i}\right)^\alpha \right] \right\}, \quad (4)$$

$$t_r = \frac{2l'}{c}. \quad (5)$$

设 α 是被动调 Q 激光器所特有的参量, 即表示为可饱和吸收体漂白的难易程度, 其中 α 越大, 则说明可饱和吸收体越容易被漂白(越容易实现好的调 Q 运转), 其表达式为

$$\alpha = \frac{\sigma_{gs}}{\gamma \sigma}. \quad (6)$$

N 可以看成是调 Q 光纤激光器的震荡参数, 即: 当 N 为 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, Q 开关打开后的阈值反转粒子数密度与 Q 开关打开前瞬间的初始反转粒子数密度的比值, 它由可饱和吸收体和谐振腔参量确定, 其表达式为

$$N = \frac{n_{i0}}{n_i} = \frac{\beta \ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L'}{\ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L'}, \quad (7)$$

式中:

$$\beta = \frac{\sigma_{es}}{\sigma_{gs}}. \quad (8)$$

令 n 为当 Q 开关打开时激光工作物质中的初始反转粒子数的密度。令 n_i 为被动 Q 开关打开时激光工作物质中的初始反转粒子数密度, Q 开关打开后阈值反转粒子数密度由 Q 开关打开前的较大值变为一个较低的值 n_t , n_t 即为调 Q 脉冲形成过程中的阈值反转粒子数密度, n_f 为当调 Q 脉冲结束时反转粒子数密度。

$$n_i = \frac{\ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L'}{2\sigma l}. \quad (9)$$

当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 记调 Q 脉冲形成过程中的阈值反转粒子数密度 $n_t|_{\alpha \rightarrow \infty}$ 为 n_{t0} 。

$$n_t|_{\alpha \rightarrow \infty} = \frac{\beta \ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L'}{2\sigma l} = n_{t0}, \quad (10)$$

$$\frac{n_t}{n_i} = N + (1 - N) \left(\frac{n_t}{n_i} \right)^\alpha, \quad (11)$$

$$\frac{n_t}{n_i} = 1 + N \left(\frac{n_t}{n_i} \right) - \frac{1}{\alpha} (1 - N) \left[1 - \left(\frac{n_t}{n_i} \right)^\alpha \right]. \quad (12)$$

采用调 Q 激光器的工作物质是 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, 设定对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体相关物理参量(如饱和吸收介质的基态/激发态吸收横截面积、损耗系数、激光介质的受激发射截面等, 见表 1), 并假设抽运过程的激光器光-光转换效率为 20%、由抽运过程中自发辐射所引起的幅值峰峰抖动为 4%、频率稳定性为 1%。在此条件下对(4)式进行数值模拟, 其中相关参数见表 1, 可得峰值功率 P_{\max} 与 N 之间的关系, 如图 2 所示。

表 1 用于数值模拟的调 Q 光纤激光器的相关参数

Table 1 Related parameters of Q -switched fiber laser used in numerical simulations

Parameter	Meaning	Value
σ_{gs}	Groundstate cross section of saturated absorbing medium	$8.7 \times 10^{-18} / \text{cm}^2$
σ_{es}	Excitedstate cross section of saturated absorbing medium	$2.2 \times 10^{-18} / \text{cm}^2$
$h\nu$	Laser photon energy	$1.86 \times 10^{-19} / \text{J}$
A	Effective beam cross-sectional area	$0.04\pi / \text{cm}^2$
l	Laser rod length	0.04 / cm
R	Output mirror reflectivity	20%
σ	Stimulated emission cross section	$2.8 \times 10^{-19} / \text{cm}^2$
l'	Resonator length	170 / mm
γ	Inversion reduction factor	1
T_0	Initial transmissivity of laser crystal	30%
L'	Dissipative optical loss	$0.02 / \text{cm}^{-1}$
c	Speed of light	$3 \times 10^8 / (\text{m/s})$

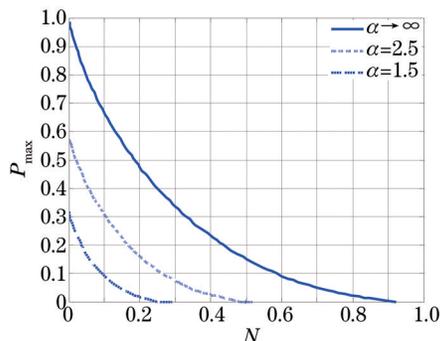


图 2 α 取不同值时, 峰值功率 P_{\max} 与 N 的关系

Fig.2 Relationship between peak power P_{\max} and N with different values of α

脉冲宽度 τ 可近似由脉冲能量除以峰值功率得到, 即 $\tau = E_p / P_{\max}$, 根据(3)式和(4)式, 则有:

$$\tau = \frac{E_p}{P_{\max}} = \frac{t_r}{\beta \ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L'} \cdot \left\{ \frac{1 - (n_i/n_i) - (1/\alpha)(1-N)[1 - (n_i/n_i)^\alpha]}{1 - (n_i/n_i) + N \ln(n_i/n_i) - (1/\alpha)(1-N)[1 - (n_i/n_i)^\alpha]} \right\}. \quad (13)$$

由于所选用的光纤激光器的脉冲宽度为 $\tau=3$ ns,最大脉冲宽度为 $\tau_m=10$ ns,所以根据(13)式进行数值模拟(其中相关参数见表1)。得出了当脉冲宽度在0~10 ns的变化范围内脉冲宽度 τ 与 N 的关系,如图3所示。

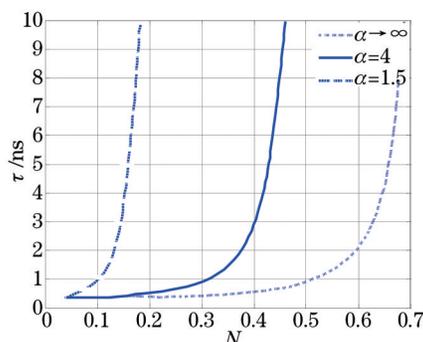


图3 α 取不同值时,脉冲宽度 τ 与 N 的关系

Fig.3 Relationship between pulse width τ and N with different values of α

由图2和图3可以看出,调 Q 脉冲的峰值功率和脉冲宽度都直接或者间接地依赖于两个参量 N 和 α 。

3 光纤激光器 PPM 调制特性分析

所谓调制特性就是激光器输出激光信号以及振荡参数随调制信号变化的关系^[15]。下面分别从激光器的振荡参数 N 以及激光器重复频率 f 随单脉冲位置调制(L-PPM)信号传输速率的变化关系来分析光纤激光器 PPM 的调制特性。

设L-PPM调制方式的进制数为 L ,要发送的 n 位数据为 $M=(m_1, m_2, \dots, m_n)$,同时在一个L-PPM帧周期中分为信息段和保护段,信息段一共有 L 个时隙,每个时隙的宽度记为 τ_c ,保护时段记为 T_D ,则可以得到系统的帧周期为^[10]

$$T_{\text{PPM}} = L\tau_c + T_D. \quad (14)$$

系统的帧频为

$$f_R = (L\tau_c + T_D)^{-1}. \quad (15)$$

系统的传信率为

$$R_c = (\text{lb } L) / (L\tau_c + T_D). \quad (16)$$

根据(16)式可得:

$$R_c = \frac{\text{lb } L}{T_s + T_D} = \frac{\text{lb } L}{\tau_c \cdot 2^n + T_D} = \frac{\text{lb } L}{\tau_c \cdot (L + D)} = \frac{\mu \text{ lb } L}{\tau \cdot (L + D)}. \quad (17)$$

由文献[11-13]可以得出3种PPM方式的传输速率、所需功率以及所需带宽的表达式。

若时隙数为 2^n ,则 2^n 个时隙宽度为 $T_{\text{LPPM}} = 2^n \cdot \tau / r_p$,其中 r_p 为码元占空比,则相应的传输速率为

$$R_{\text{LPPM}} = \frac{n}{T_{\text{LPPM}}} = \frac{n \cdot r_p}{2^n \cdot \tau}. \quad (18)$$

则相应的传输速率为

$$R_{\text{DPPM}} = \frac{2nr_p}{(2^n + 1)\tau}. \quad (19)$$

在 (n, k) 多脉冲位置调制(MPPM)方式中,假定 Q 种脉冲组合出现的概率都是相同的,则MPPM的传输速率为^[13]

$$R_{\text{MPPM}} = \frac{r_p \cdot \text{lb } Q}{2^n \tau}, \quad (20)$$

式中 $Q = \frac{2^n!}{k!(2^n - k)!}$ 。

因为3种PPM方式都是只发射“0”和“1”脉冲,则设 P_1 为发送光脉冲“1”时的脉冲功率,且在“0”和“1”出现的概率相同,则有

$$P_{LPPM} = \frac{1}{2^n} P_1 \quad (21)$$

则差分脉冲位置调制(DPPM)所需要的平均功率为

$$P_{DPPM} = \frac{2}{2^n + 1} P_1 \quad (22)$$

同理

$$P_{MPPM} = \frac{\text{lb} Q}{2^n} P_1 \quad (23)$$

假设发射机固定以 R_b bit/s 的传输速率发送信号,则3种PPM方式对带宽的需求是其时隙间隔的倒数:

$$B_{LPPM} = \frac{1}{T} = R_b \cdot \frac{2^n}{n} \quad (24)$$

$$B_{DPPM} = R_b \cdot \frac{2^n + 1}{2n} \quad (25)$$

$$B_{MPPM} = R_b \cdot \frac{2^n}{\text{lb} Q} \quad (26)$$

根据(13)式和(17)式,有

$$R_c = \frac{\text{lb} L}{\mu(L+D)} \cdot \frac{\beta \ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L'}{t_r} \cdot \left\{ \frac{1 - \frac{n_i}{n_i} + N \ln\left(\frac{n_i}{n_i}\right) - \frac{1}{\alpha}(1-N) \left[1 - \left(\frac{n_i}{n_i}\right)^\alpha\right]}{1 - \frac{n_i}{n_i} - \frac{1}{\alpha}(1-N) \left[1 - \left(\frac{n_i}{n_i}\right)^\alpha\right]} \right\} \quad (27)$$

由(27)式可得传输速率 R_c 与 N 之间的关系(其中相关参数见表1),如图4所示。令 L 为传信时隙个数, D 为保护时隙个数。图4为当 $L=256$ 、 $D=1176$ 、 $L:D=256:1176 \approx 1:4.6$, α 分别取 1.5、4 和 ∞ 时, 256-PPM 调制系统传输速率 R_c 与 N 间的关系。

根据(13)式和(18)~(20)式(3种PPM方式的传输速率公式)可以得出3种PPM方式的传输速率与激光器震荡参数 N 之间的关系。如图5所示。需要指出的是,PPM对带宽的需求是其时隙间隔的倒数;所需功率就是激光器每发送光脉冲“1”时所需要的功率;传输速率即为每秒传送信息的比特数。

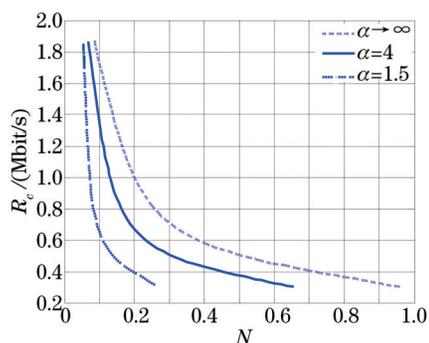


图4 α 取不同值时,传输速率 R_c 与 N 的关系

Fig.4 Relationship between transmission rates R_c and N with different values of α

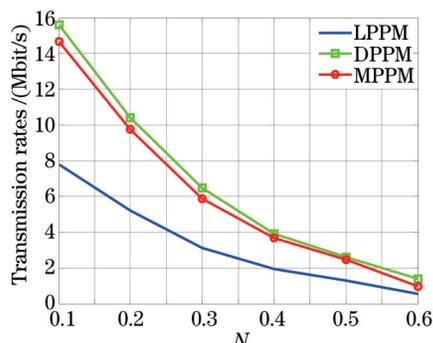


图5 3种PPM方式传输速率与 N 之间的关系($\alpha=4$)

Fig.5 Relationship between transmission rates of three PPM modes and N ($\alpha=4$)

根据(13)式和(21)~(23)式(3种PPM方式的所需功率公式)可以得出3种PPM方式的所需功率与激光器震荡参数 N 之间的关系,如图6所示。

同样,根据(13)式和(25)~(26)式(3种PPM方式的所需带宽公式)可以得出3种PPM方式的所需带宽与激光器震荡参数 N 之间的关系,如图7所示。

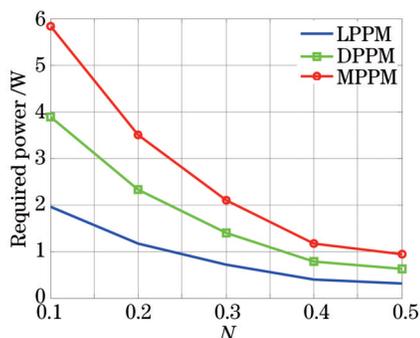


图6 3种PPM方所需功率与N之间的关系($\alpha=4$)

Fig.6 Relationship between required power of three PPM modes and N ($\alpha=4$)

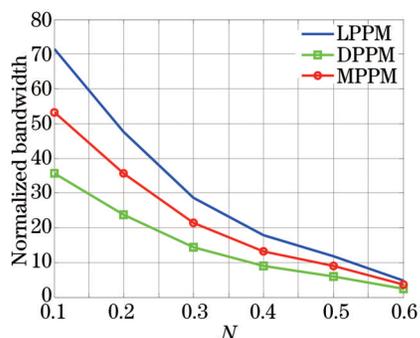


图7 3种PPM方所需带宽与N之间的关系($\alpha=4$)

Fig.7 Relationship between required bandwidth of three PPM modes and N ($\alpha=4$)

从上述分析中可以看出,激光器的脉冲宽度无限小时,PPM的传输速率可以无限大,但是实际情况下,激光器的脉冲宽度不可能无限小,但是这仍然给提高调制速率提出了理论依据,即尽可能地使激光器窄脉宽输出,这也是选择光纤激光器作为PPM调制发射源的原因之一。从图7中可以看出,无论 α 取任何值,都存在某些N值,能使LPPM的传输速率达到1.3 Mbit/s以上,这就说明使用脉冲光纤激光器可以有效地提高L-PPM系统的传输速率。另外,可以看出PPM的所需功率和所需带宽随N的增加而减小,但是传输速率也随N的增加而减小。所以,在实际工程中应根据实际情况选择合适的N以平衡三者之间的关系。

4 实验仿真

4.1 调Q光纤激光器实验平台搭建

搭建的脉冲光纤激光器实验平台(见图8)工作的原理是:种子源为激光二极管抽运Cr⁺:YAG晶体声光调Q激光器,其抽运源采用中心波长850 nm、最大输出功率20 W的激光二极管,通过光纤耦合输出对Cr⁺:YAG晶体进行端面抽运。激光从种子源输出后,先后经过光耦合器、扩束器以及光隔离器,最后经光学耦合系统进入双包层掺镱光纤中。抽运光由光学耦合系统耦合进双包层光纤中的内包层,耦合系统中的20°双色镜可以对850 nm的抽运光高透,并对1064 nm的激光高反。在测量时,用光纤分束器将输出的激光分为两束,一束连接光谱分析仪或者光功率计,另一束连接光衰减器以防过强的激光对光电探测器(APD)产生破坏,通过光衰减器后使用APD对激光进行转换,将探测到的光信号转换为电信号,然后将电信号传给频率计。

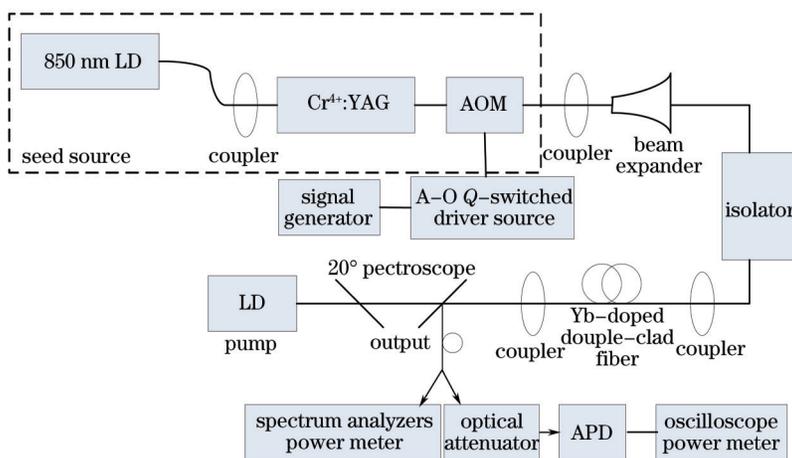


图8 基于调Q脉冲光纤激光器结构搭建的实验平台

Fig.8 Experimental platform based on Q-switched fiber laser

图9和图10为激光脉冲的光谱图和脉冲序列图,其中所测得的脉冲宽度最小可达到3.09 ns,再用功率计测量其功率可知其平均功率 P_{out} 对应的为603 mW,所以通过公式 $P_{out} = P_{max} \tau / T$ (T 为周期,重复频率的倒数, τ 为脉宽)^[14]以及调制信号的重复频率,可以算出脉冲光纤激光器的峰值功率 P_{max} 接近1000 W,而峰值功率等于一个脉冲的能量除以脉冲宽度,可以得到一个脉冲的能量为3 μ J。如果在50~200 kHz的重复频率范围内进行改变

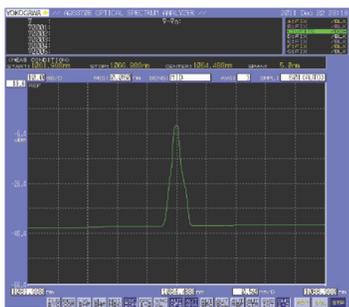


图9 调Q型脉冲光纤激光器的输出光谱
Fig.9 Output spectra of Q-switched fiber laser

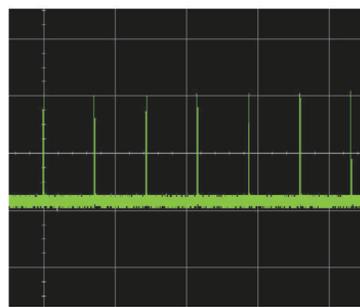


图10 调Q脉冲光纤激光器的脉冲序列
Fig.10 Pulse sequence of Q-switched fiber laser

和调制,会发现在调制频率所对应的周期下,脉冲波形非常稳定,脉冲宽度也能达到要求的范围。

4.2 激光器 PPM 调制特性实验分析

设计光纤激光器 PPM 调制系统,主要目的是研究 PPM 系统的传输速率和所需带宽随光纤激光器抽运电流、腔长和初始透过率的变化关系,以达到分析光纤激光器 PPM 调制特性的目的。需要说明的是在(7)式中 L' 表示损耗系数,并且 L' 分别与腔长以及抽运功率成正比^[6], T_0 表示初始通过率。所以通过(7)式就可以知道 N 与抽运功率、初始通过率以及腔长之间的关系。

采用直接调制方法,利用现场可编程门阵列(FPGA)控制实现。实验的设备包括:计算机(PC)一台,FPGA 逻辑控制板一块,脉冲调 Q 光纤激光器一台,光电探测器一台,示波器一台,功率计一台,其连接方法如图 11 所示。其中实验时所用调 Q 光纤激光器如 4.1 节所述,示波器采用 Tektronix DPO7104,它具有 1 GHz 带宽,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,利用示波器观测发送的数据的波形、PPM 波形以及 PPM 信号的速率、带宽等信息。

图 11 为测试方案,计算机把二进制数据传给 FPGA 系统板,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,从而将 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。

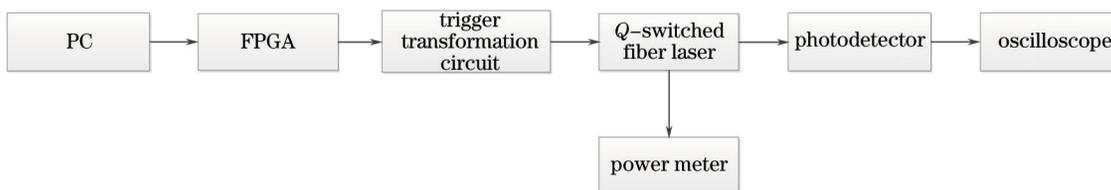


图 11 光纤激光器 PPM 调制系统框图

Fig.11 Diagram of the system with fiber laser and PPM modulation

按照图 11 所搭建的光纤激光器实验平台,即如图 8 所示的实验装置,改变抽运电流,得出抽运电流的变化对于输出脉冲序列的传输速率以及所需带宽的变化曲线,如图 12 所示。从图中可以看出,随着抽运电流的增加,输出脉冲序列的传输速率和所需带宽随之明显增加。

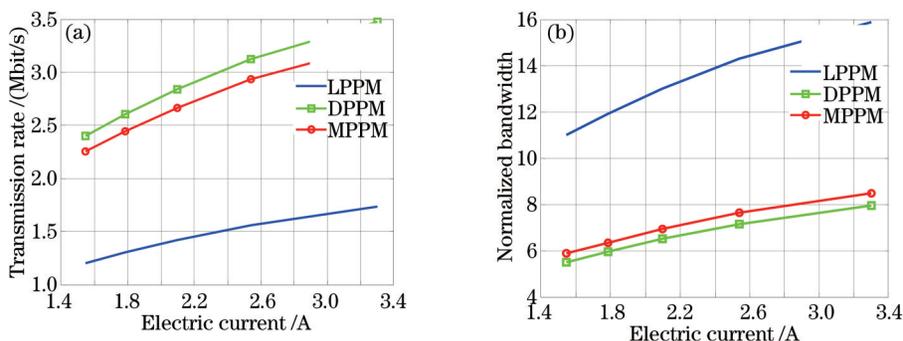


图 12 3 种 PPM 方式的调制特性与激光器抽运电流的关系

Fig.12 Relationship between modulation characteristics of three PPM modes and pumped current of fiber laser

同样地,按照图8的实验装置改变初始透过率,得出初始透过率的变化对输出脉冲序列的传输速率以及所需带宽的变化曲线,如图13所示。从图中可以看出,随着初始透过率的增加,输出脉冲序列的传输速率以及所需带宽随之减小。

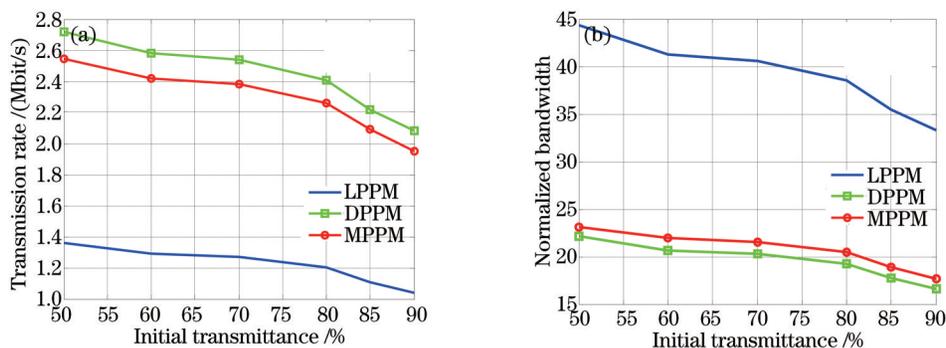


图13 3种PPM方式的调制特性与激光器初始透过率的关系

Fig.13 Relationship between modulation characteristics of three PPM modes and initial transmittance of fiber laser

同理,按照图8的实验装置改变腔长,得出腔长的变化对于输出脉冲序列的传输速率以及所需带宽的变化曲线,如图14所示。从图中可以看出,随着腔长的增加,输出脉冲序列的传输速率以及所需带宽随之减小。

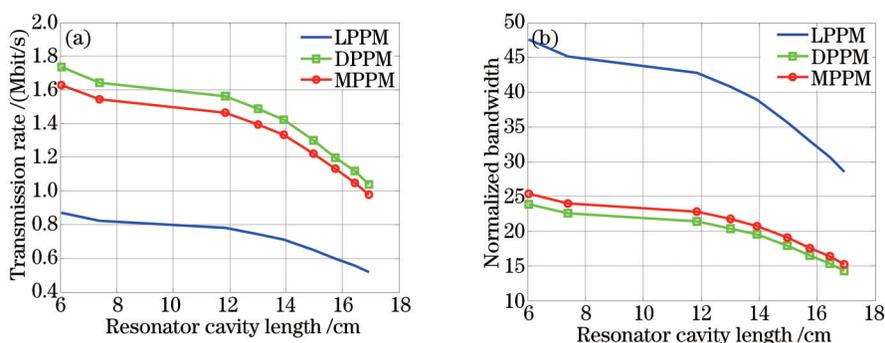


图14 3种PPM方式的调制特性与激光器腔长的关系

Fig.14 Relationship between modulation characteristics of three PPM modes and cavity length of fiber laser

5 结 论

从激光通信发射领域的进展来看,调制方式主要选用PPM调制,而在发射源方面主要采用的是半导体激光器。半导体激光器虽然有结构简单、脉冲宽度及脉冲重复频率均可独立调谐等特点,但是其信号的光功率不大,需要额外的放大才能达到高功率的输出,在峰值功率方面更是跟光纤激光器不是一个数量级的,而且光纤激光器还可以较容易地实现窄脉宽输出。研究表明,激光器的脉冲宽度无限小时,PPM的调制速率可以无限大,但是实际情况下,激光器的脉冲宽度不可能无限小,但这仍然为提高调制速率提出了理论依据,即尽可能地使激光器窄脉宽输出,这也是选择光纤激光器作为PPM调制发射源的原因之一。另外,可以看出PPM的所需功率和所需带宽随震荡参数 N 的增加而减小,但是传输速率也随 N 的增加而减小。所以,在实际工程中应根据实际情况选择合适的 N 以平衡三者之间的关系。

参 考 文 献

- 1 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: 国防工业出版社, 2010: 9-21.
- 2 Liang J B, Gao X D, You D Y, et al.. Detection of seam offset based on molten pool characteristics during high-power fiber laser welding[J]. Advanced Materials Research, 2012, 549: 1064-1068
- 3 Liu Jiang, Liu Kun, Shi Hongxing, et al.. High-power all-fiber mid-infrared supercontinuum laser source[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41 (9): 0902004.

- 刘 江, 刘 昆, 师红星, 等. 高功率全光纤中红外超连续谱激光源[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902004.
- 4 Yang Xiaodong, Hou Xinhua. Investigation on the output characteristics of LD end-pumped Cr^{4+} : YAG passively Q -switched laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(10): 1145-1148.
- 杨晓冬, 侯新华. LD端面抽运 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 激光器输出特性研究[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1145-1148.
- 5 Dai Qibiao, Yi Hongying, Tian Xueping, *et al.*. Experimental study on passively Q -switched laser with Yb: GdCOB crystal[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0802002.
- 代启彪, 易红英, 田雪萍, 等. Yb: GdCOB 晶体被动调 Q 脉冲激光器实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802002.
- 6 Cao Zongying. Output Characteristic for Cr^{4+} : YAG Passively Q -Switched Laser by LD Pumped[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 26-29.
- 曹宗英. LD抽运的 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 激光输出特性的研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2008: 26-29.
- 7 Degnan J J. Theory of the optimally coupled Q -switched laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(2): 214-220.
- 8 Xu Tao, Jin Guangyong, Yu Yongji, *et al.*. Study on the pulse interval of passively Q -switched laser pumped by diode laser pulse [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 061401.
- 许 韬, 金光勇, 于永吉, 等. 脉冲抽运被动调 Q 激光器脉冲间隔特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 061401.
- 9 Wang Zhimin, Xu Jianqiu, Chen Weibiao. High-power passively Q -switch ultra-thin slab lasers[J]. Chin Opt Lett, 2007, 5(S1): 36-38.
- 10 Zhang Huawei, Jia Honghui, Yin Hongwei, *et al.*. The analysis of L-PPM modulation for ultraviolet laser communication[J]. Optical Communication Technology, 2010, 34(5): 56-58.
- 张华伟, 贾红辉, 尹红伟, 等. 紫外激光通信 L-PPM 调制分析[J]. 光通信技术, 2010, 34(5): 56-58
- 11 Ren Xin, Li Hongzuo, Wang Yan, *et al.*. Effect for modulation rate of pulsed fiber laser on pulse position modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0706002.
- 任 鑫, 李洪祚, 王 岩, 等. 脉冲位置调制对脉冲式光纤激光器调制速率的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0706002.
- 12 Stevens M L, Boroson D M. A simple delay-line 4-PPM demodulator with near-optimum performance[J]. Opt Express, 2012, 20(5): 5270-5280.
- 13 A Kwiecień, P Gaj, P Stera. Two-pulses position modulation for synchronized wireless optical communications[J]. Computer Networks, 2013, 370: 252-257.
- 14 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.

栏目编辑: 张 雁