

doi:10.3788/gzxb20184709.0914006

# 抑制幅频调制的时间功率曲线的远程精确测量

黄家鹏<sup>1,2</sup>, 范薇<sup>2</sup>, 石志东<sup>1</sup>, 潘雪<sup>2</sup>, 李烧<sup>2</sup>, 卢兴华<sup>2</sup>, 汪小超<sup>2</sup>, 张生佳<sup>2</sup>

(1 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室 上海 201800)

**摘 要:**采用单偏振光纤远程传输待测光,结合上升沿与顶端波形分离处理的时域恢复算法,提出一种远程精确测量激光时间功率曲线的方法,并对高功率激光驱动器前端系统中 1 053 nm 脉冲光的时间功率曲线进行了远程测量实验.结果表明,该方法有效避免了幅频调制对激光脉冲时间功率曲线测量的影响,获得了高保真的远程传输时间波形,引入的误差在每 1 ns 范围内小于 0.8%,可用于高功率激光系统的时间功率曲线远程集中测量.

**关键词:**光纤光学;非线性光学;信号处理;单偏振光纤;时间功率曲线;色散;幅频调制

中图分类号:TN29

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)09-0914006-9

## Temporal Power Profiles Remote Precise Measurement of Suppressing Frequency Modulation to Amplitude Modulation Conversion

HUANG Jia-peng<sup>1,2</sup>, FAN Wei<sup>2</sup>, SHI Zhi-dong<sup>1</sup>, PAN Xue<sup>2</sup>, LI Rao<sup>2</sup>, LU Xing-hua<sup>2</sup>,  
WANG Xiao-chao<sup>2</sup>, ZHANG Sheng-jia<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(2 National Laboratory on High Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** A method of remote precise measurement of laser temporal power profiles was proposed. This method used the single polarization optical fiber for laser remote transmission and combined with temporal power profile recovery algorithm where the rising edge and the top profiles of laser pulses were separated and processed respectively. The experiment of temporal power profiles remote measurement of 1 053 nm laser pulses in the front end of high power laser facility was carried out. The results show that the method effectively avoids the influence of frequency modulation to amplitude modulation on the temporal power profiles measurement, and undistorted temporal waveform after remote transmission is obtained. The calculated error introduced by this measurement method is less than 0.8% per nanosecond. The proposed method can be applied to temporal waveform remote centralized measurement in high power laser facility.

**Key words:** Fiber optics; Nonlinear optics; Signal processing; Single polarization fiber; Temporal power profiles; Dispersion; FM-to-AM modulation

**OCIS Codes:** 140.3510; 140.3425; 060.2310; 060.4370; 070.4340; 060.5530

## 0 引言

惯性约束核聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)实验要求高功率激光驱动器对激光脉冲的时间功

基金项目:国家自然科学基金(No. 11604350)资助

第一作者:黄家鹏(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤应用与光电子技术. Email: kapeng2819@hotmail.com

导师(通讯作者):范薇(1975-),女,研究员,博士,主要研究方向为高功率激光驱动器前端-预放种子源发生和放大技术以及频域、时域、空域控制关键技术. Email: fanweil@siom.ac.cn

收稿日期:2018-03-14;录用日期:2018-06-19

<http://www.photon.ac.cn>

率曲线有精确的控制能力<sup>[1-3]</sup>.前端系统采用单纵模激光器结合波导强度调制器以及任意电脉冲发生器实现时间功率曲线的精确控制,并建立了高功率激光驱动器时间功率曲线闭环控制系统,在预放毫焦耳级重频(1 Hz)系统输出的激光信号分光取样后,利用高速光电转换单元和示波器采集,得到脉冲时间波形.该波形反馈给任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG),AWG处理反馈信号,修改电信号发生参数,经过电路放大系统驱动波导强度调制器,从而产生所需时间波形,如此形成一个闭环控制系统,以实现激光脉冲时间功率曲线的精确控制.

为了避免多模激光的拍频引起时间调制,前端种子源采用的是单频激光源<sup>[4]</sup>,但是单频激光源输出的线宽较窄(一般小于100 kHz),窄线宽激光源经过放大之后,大口径光学元件容易产生横向受激布里渊散射(Transverse Stimulated Brillouin Scattering, TSBS),从而造成对大口径光学元件的损伤<sup>[5-7]</sup>.为了抑制TSBS的产生,需要将激光进行光谱展宽,提高TSBS的阈值<sup>[1-3,8-9]</sup>.其次为了得到一定时间尺度内平滑焦斑,高功率激光装置采用谱色散平滑技术,这需要更高频率的相位调制<sup>[10-14]</sup>.美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)采用3 GHz的相位调制提高激光展宽SBS的阈值;第二级相位调制采用17 GHz来配合光谱束平滑技术<sup>[1]</sup>.在高功率激光装置的各级系统中,由于不同的光学元件对展宽之后的激光脉冲的各光谱成分的振幅或者相位的传输具有差异性,在脉冲时域波形上会出现幅度调制.这种因为频率调制而产生的幅度调制现象称为幅频调制(Frequency Modulation to Amplitude Modulation, FM-AM)<sup>[14-21]</sup>.幅频调制会影响物理实验结果,易造成光学元件的损伤,且由于激光在光纤中传输,偏振模色散和群速色散都会带来幅频调制,因此给时间功率曲线的远程精确测量带来了技术上的难度,而时间功率曲线的精确测量直接影响了时间闭环控制系统反馈控制的精准性.

目前,为了实现精确的时间功率曲线测量,一般采用将示波器放在现场就近进行测量,但是会带来两个问题:一是示波器容易受到现场的电磁干扰;二是在光路比较多的情况下,测量成本将非常高.而时间功率曲线的远程测量主要的问题在于,如果采用光电转换之后进行长程传输,时间波形的高频和低频部分经过电缆长程传输后传输损耗不一致,会带来时间波形畸变;如果利用光纤进行长程传输后再进行光电转换,激光脉冲在经过单模光纤或保偏光纤传输之后,由于群速度色散和偏振模式色散,会使幅频调制量进一步增加<sup>[20-22]</sup>,尤其是单模光纤或者保偏光纤的偏振模式色散<sup>[17]</sup>,由于其偏振模耦合受温度和应力的影响在传输过程中是随机的,所以引入的幅频调制也具有随机性,使得所测得的时间功率曲线不能反映真实的时间波形,因而导致时间闭环控制系统无法准确地得到脉冲波形的上升沿时间、归一化幅值大小、脉冲宽度信息.

针对这种情况,本文提出了一种基于单偏振光纤(Single Polarization, PZ)传输激光脉冲,采用时域恢复算法实现远程测量脉冲时间功率曲线的方法.由于单偏振光纤快轴的损耗远大于慢轴,可以有效地抑制偏振模式色散,将各点采集到的激光脉冲信号通过合束器合束,采用时分复用的方法以区分不同路的信号,仅通过一个光电管和一台示波器即可进行多路的时间功率曲线的测量.由于传输距离是一个固定值,光纤长程传输所引入的群速色散可以通过时域恢复的方法获得传输之前的时间脉冲功率曲线,最终可为时间波形闭环控制系统提供准确的反馈信号.

## 1 单偏振传输光纤在时间功率曲线上附加的调制

在神光II(Shenguang II, SGII)系列装置中,一般采用3 GHz(展宽到0.1 nm)正弦相位调制和22 GHz(展宽到0.3 nm)的正弦相位调制来实现不同的光谱展宽.前者的作用是降低功率谱密度,从而降低横向受激布里渊散射对大口径光学元件的损伤风险;后者的作用是结合后续的体光栅实现一定时间尺度范围的谱色散平滑.

纳秒脉冲由于相位被正弦调制后,在中心波长的两侧出现新的光谱成分,以1 053 nm激光为中心,调制频率为频率间隔.相位调制之后的光谱宽度与调制系数 $m$ 和调制频率 $f_m$ 有关,根据Carson公式,光谱宽度为<sup>[21]</sup>

$$\Delta f = 2(m+1)f_m \quad (1)$$

由于不同的光谱成分在光纤中的传输速度不一致,因此会产生时间波形上的调制.从非线性薛定谔方程出发,对于激光脉冲在普通传输光纤中传输的表达式为(忽略非线性)

$$i \frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{i\alpha}{2} E + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} \quad (2)$$

式中,  $E$  表示激光脉冲的慢变振幅,  $\alpha$  表示光纤损耗,  $\beta_2$  表示群速色散效应,  $T$  为在群速度  $v_g$  ( $T = t - z/v_g$ ) 下的时间. 为了简化, 注入到光纤中的时间脉冲可以表示为

$$E_1(t) = E_0(t) \cdot \exp(i\omega_0 t) = \sqrt{P_{in}(t)} \exp[i\varphi(t)] \exp(i\omega_0 t) \quad (3)$$

式中,  $\varphi(t) = m_1 \sin(2\pi f_{m_1} t) + m_2 \sin(2\pi f_{m_2} t)$ ,  $\omega_0$  是初始频率. 把式(3)带入到式(2), 忽略损耗, 从光纤中输出的信号可以表示为<sup>[22]</sup>

$$E_{out}(t) = \exp\left[i(\beta_2/2)L \cdot \frac{d^2}{dt^2} E_0(T)\right] \exp(i\omega_0 t - i\beta_0 L) \quad (4)$$

式中,  $\beta_0$  为传输常数,  $L$  为光纤长度. 通常, 在高功率激光装置里, 传输光纤不会超过 1 km, 因此  $(\beta_2/2)L$  是小量, 可以忽略. 因而, 式(4)可以展开为

$$E_{out}(t) = \left\{ \left[ 1 + i(\beta_2/2)L \cdot \frac{d^2}{dt^2} \right] E_0(T) \right\} \cdot \exp(i\omega_0 t - i\beta_0 L) \quad (5)$$

由式(3)和式(5), 输出功率可以表示为

$$P_{out}(t) = P_{in}(t) \left| \left[ 1 + i(\beta_2/2)L \cdot \frac{d^2}{dt^2} \right] \exp[i\varphi(T)] \right|^2 \quad (6)$$

展开  $\exp[i\varphi(T)]$ , 忽略  $(\beta_2/2)L$  和  $\left[ \frac{d\varphi(T)}{dt} \right]^2$ , 式(6)可以写为

$$P_{out}(t) \approx P_{in}(t) \left[ 1 + \beta_2 L \frac{d^2 \varphi(T)}{dt^2} \right] \quad (7)$$

将  $\varphi(t) = m_1 \sin(2\pi f_{m_1} t) + m_2 \sin(2\pi f_{m_2} t)$  带入式(7), 且引入  $\omega = 2\pi f$ , 则

$$P_{out}(t) = P_{in}(t) \{ 1 - \beta_2 L [m_1 \omega_1^2 \sin(\omega_1 T) + m_2 \omega_2^2 \sin(\omega_2 T)] \} \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 相位调制会引起时间功率曲线上周期性的振幅调制, 定义由于 FM-AM 转换引起的幅频调制量  $\rho$  为

$$\rho = \frac{P_{max} - P_{min}}{(P_{max} + P_{min})/2} \quad (9)$$

式中,  $P_{max}$  和  $P_{min}$  分别是最大和最小的功率值. 如果只考虑单一的调制频率, 则由群速色散引起的幅频调制量  $\rho$  为

$$\rho = 2 \cdot \beta_2 \cdot L \cdot m \cdot (2\pi f)^2 \quad (10)$$

群速色散引起的幅频调制来源于非均匀的相位传输, 如图 1 所示, 传输函数可以写为

$$H(f) = \exp(-i\beta_2 L \omega^2) \quad (11)$$

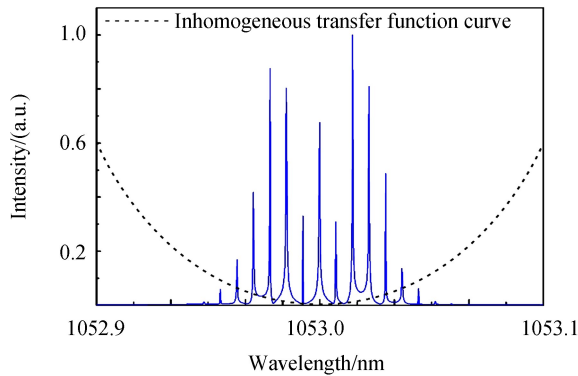


图 1 1053 nm 激光经过 3 GHz 相位调制之后光谱图 ( $m=3.5$ )

Fig.1 Spectrum of 1053 nm narrow linewidth laser after 3 GHz phase modulation ( $m=3.5$ )

一个脉冲包络光滑的激光脉冲经过相位调制之后, 如果忽略色散的影响, 光谱展宽的同时时间功率曲线不会发生变化. 但是由于激光脉冲在保偏光纤或者单模光纤中传输时, 偏振模色散和群速色散会引起时间功率曲线上的幅频调制, 调制周期是相位调制频率的整数倍. 而单偏振光纤在其包层中有两个掺杂的应力轴,

由于光纤纤芯附近  $X$  轴与  $Y$  轴的折射率不对称,激光在光纤中传输时快轴的损耗要远远大于慢轴,如图 2.采用单偏振光纤传输,由于快轴截止,在快轴上传输的光被抑制掉,只存在慢轴上传输的激光,因此,不存在两个模式之间的耦合而形成的干涉所带来的幅频调制.但是,不同光谱成分激光经过光纤长程传输,由于传输速度的不一致(即群速色散),也会产生幅频调制效应.

实验采用的单偏振光纤为领结形单偏振光纤,快慢轴的消光大于 30 dB,损耗小于 0.01 dB/m.通过单偏振光纤进行脉冲时间波形的传递,理论上可以有效抑制传输过程中正交偏振模式之间的耦合,同时提高传输激光的偏振度.

如图 3(a),采用超高斯型脉冲来表示相位调制后激光脉冲的时间波形.单偏振光纤的色散系数为  $18.7 \text{ ps}^2/\text{km}$ , 3 GHz 相位调制的调制系数  $m=3.5$ ,

展宽到 0.1 nm; 22 GHz 相位调制系数  $m=1$ , 展宽到 0.3 nm.通过模拟可知,当只有 3 GHz 的相位调制加载在激光上,经过 340 m 单偏振光纤传输之后,群速色散产生的调制深度为 1.58% 的幅频调制,调制周期为 3 GHz,如图 3(b);若 3 GHz 与 22 GHz 相位调制同时作用在脉冲上,经过 340 m 单偏振光纤传输后,幅频调制深度为 25.84%,如图 3(c).

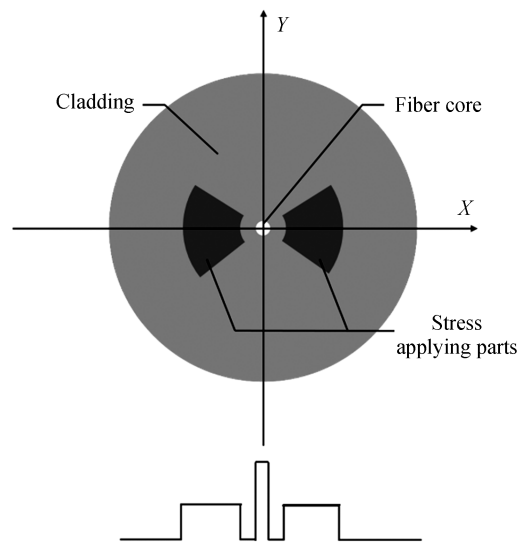


图 2 领结形单偏振光纤结构与折射率分布

Fig.2 Structure and refractive index distribution of bow-tie-shaped PZ fiber

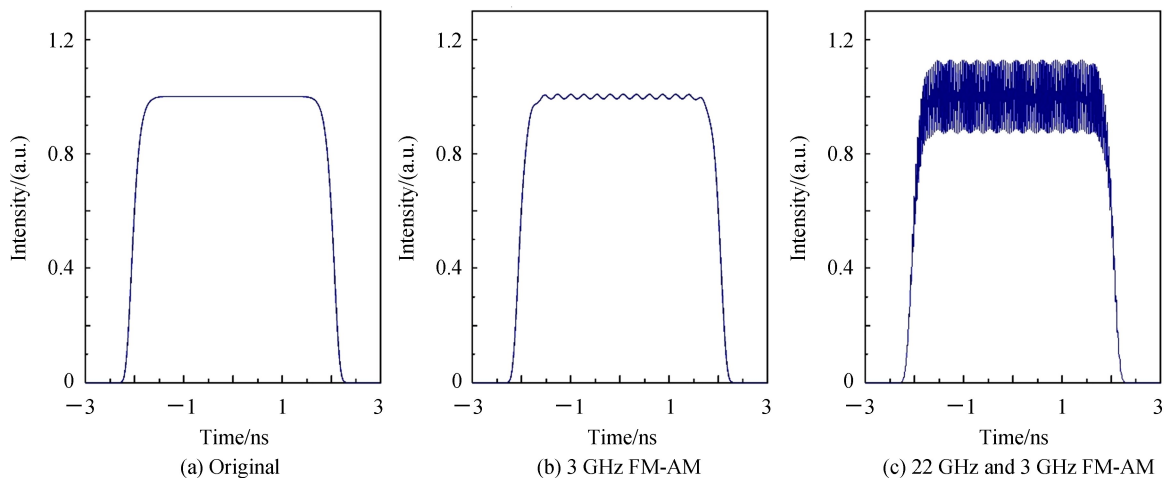


图 3 经过相位调制后,脉冲波形通过 340 m 单偏振光纤后的模拟结果

Fig.3 Simulation results of waveform passed through 340 m PZ fiber after phase modulation

对于 1 053 nm 的激光,由于群速度色散与偏振模式色散,调制深度的大小会随着激光在光纤中传播距离的增加而增大.对于单模光纤与保偏光纤,偏振模式色散量是随机的,所以经过长距离传输之后,原始波形会发生随机的畸变,给激光时间功率曲线的远程保真测量带来了困难.而通过单偏振光纤可以很好地避免偏振模式色散<sup>[20]</sup>.

虽然单偏振传输光纤可以避免由偏振模式色散带来的幅频调制对时间功率曲线的影响,然而群速色散引起的幅频调制量难以避免.由于在测量系统中,光纤的长度是固定的,因此,单偏振光纤所带来的群速色散量是固定的,即群速色散所带来的幅频调制量也是固定的,因此,可以对传输后的时间波形进行恢复计算,以得到在测量点的精确的时间功率曲线.

## 2 时间包络恢复与误差测量

从式(8)可知,带有幅频调制的信号可以看作是一个基本脉冲信号与一个加载在相位调制频率上的基本

脉冲信号的叠加.若  $P_{in}(t)$  中不包含调制频率的频率成分,则可以通过对频谱滤波的方法来去除幅频调制信号.所以进行曲线拟合的基本思路是滤除相位调制高频成分,平滑曲线,保证上升下降沿的宽度不变.由于脉冲的上升沿包含大量的高频成分,若直接对整个脉冲信号段进行高频滤波处理,则会导致上升沿信息失真.所以可以先截取脉冲的顶部信号,通过一个低通滤波器,去除加载的高频信号,实现信号的平滑.随后将平滑后的顶部曲线与上升沿重新拼合在一起得到完整的时间功率曲线,如图 4.

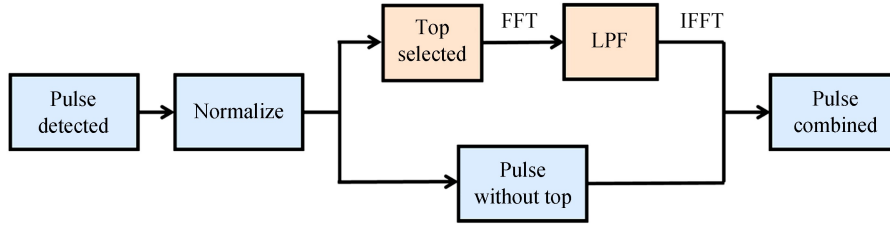


图 4 时间功率曲线恢复流程  
Fig.4 Process of temporal power profiles recovery

将传输前与传输后的时间功率曲线放在同一张图内,采用一个 1 ns 的选择窗口,窗口的前沿在波形时间包络顶端的前沿.求这一个窗口内传输前后时间包络的误差值,随后将选择窗口向后移动 20 ps,求这一个窗口内的误差值.这样一直到选择窗口的末端到达脉冲时间波形顶端的后沿,得到一条关于脉冲波形顶端位置的误差曲线,将误差曲线的最大值作为时间波形远程传输的误差值.

将图 3(c)所示的带有幅频调制的波形通过时域恢复算法处理,得到模拟的幅频调制波形时间包络恢复,如图 5,通过算法对模拟波形恢复,并与初始的时间波形图 3(a)对比,两者的最大幅值误差为 0.4%.

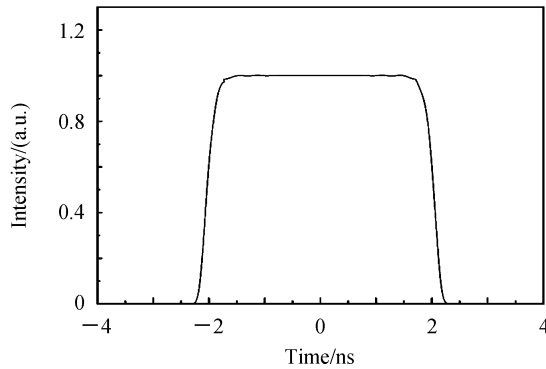


图 5 时间功率曲线恢复模拟结果  
Fig.5 Simulation results of temporal power profile recovery

### 3 实验验证

为了验证采用单偏振光纤结合脉冲恢复算法的远程时间功率曲线的测量技术,将单偏振前端系统输出的激光通过一个带有保偏光纤尾纤的起偏器.由于保偏尾纤光纤的偏振模耦合的影响,激光脉冲经过这段起偏器后会产生一定的幅频调制.随后将带有幅频调制的脉冲光通过 340 m 单偏振光纤传输,并与初始注入的脉冲时间功率曲线作对比,如图 6.

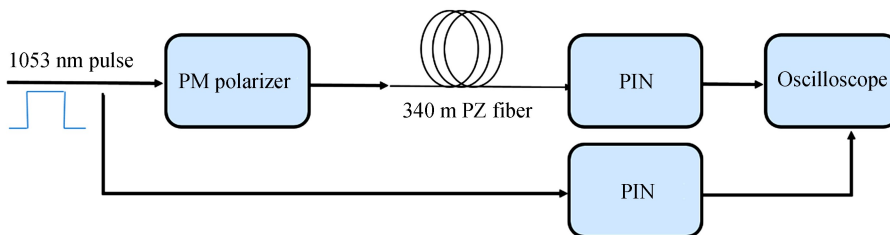


图 6 单偏振光纤时间功率曲线远程传输测量系统  
Fig.6 Temporal power profiles remote measurement system with PZ fiber

脉冲波形中含有 3 GHz 和 22.7 GHz 的幅频调制量,采集经过单偏振光纤传输前与传输后的波形,将其归一化之后进行对比,并对前后两种波形作傅里叶变换,以观察其频谱.图 7(a)为经 340 m 光纤传输前的时间波形,图 7(b)为传输后的时间波形,图 7(c)为两者在 3 GHz 频率附近的频谱对比,图 7(d)为 22 GHz 频率附近的频谱对比.可以观察到经过 340 m 单偏振光纤传输之后幅频调制量有一个明显的增大,但是分析频谱可以看到,在 3 GHz 调制分量上,两者并没有明显的变化,但在 22.7 GHz 频率分量上,有一个显著的变化,幅频调制量的变化正是由于 22.7 GHz 的频率分量的变化引起的.由于 3 GHz 的相位调制之后激光的光谱宽度为 0.1 nm,因此经过 340 m 单偏振光纤传输后由于群速色散所引起的幅频调制量为小量(根据理论分析,所引入的调制为 1.58%).而经过 22.7 GHz 的相位调制之后,光谱宽度为 0.3 nm,因此由于群速色散所引起的幅频调制量是大量.

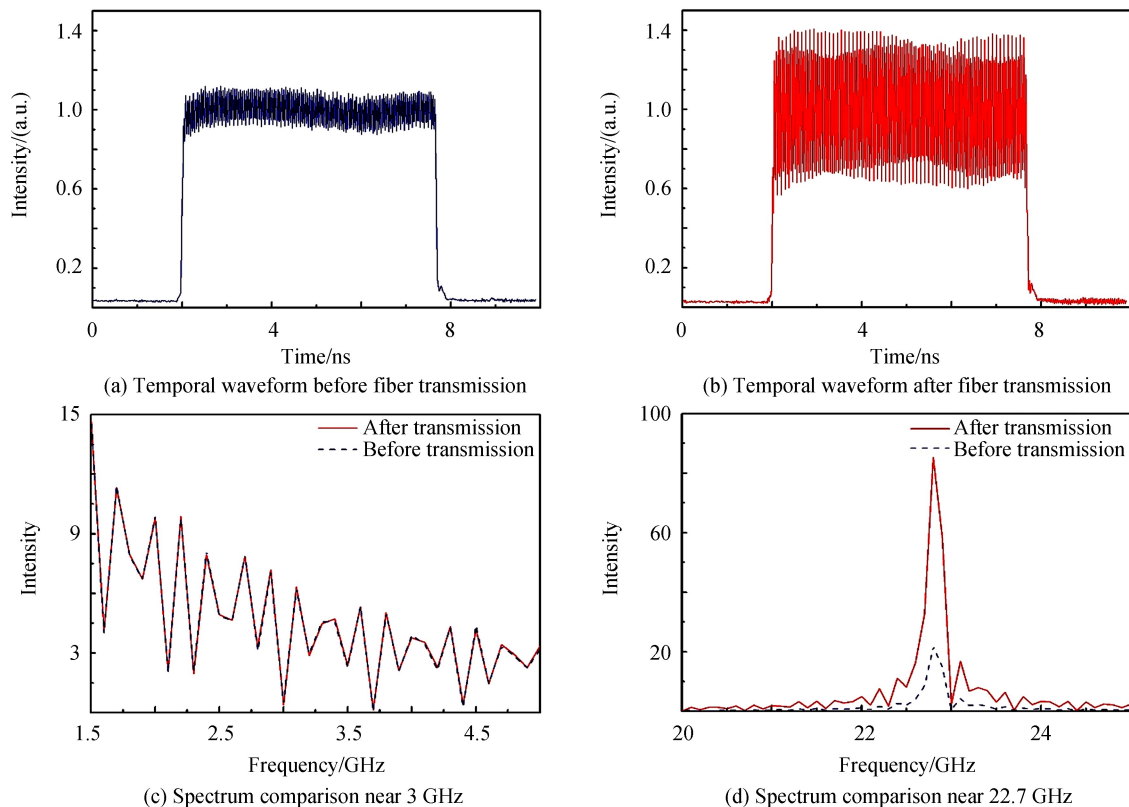


图 7 1 053 nm 激光脉冲经单偏振光纤传输前后的时间波形以及其频谱在 3 GHz 与 22.7 GHz 附近的对比  
Fig.7 Comparison between 1 053 nm laser pulse before and after transmission in PZ fiber, and comparison of the spectrums near 3 GHz and 22.7 GHz of the two waveforms

截取顶端去除高频成分,便可得到激光脉冲时间功率曲线.通过对比传输前后的脉冲时间功率曲线,计算得到的时间功率曲线远程测量误差值约为 0.65%,如图 8.在用时域恢复算法处理了多组数据后,得到的时间功率曲线远程测量的误差小于 0.8%.

由于在时间波形闭环控制的时间功率曲线的实际检测中,一般采用带宽为 4~12 GHz 的示波器,相当于对高频成分例如 22 GHz 的频率成分有一个滤波作用,所测得的时间波形中将不含有 22 GHz 的高频成分.根据理论和实验结果,340 m 单偏振光纤的传输并不加剧 3 GHz 的幅频调制,所以单偏振光纤可以很好地将时间功率曲线远程无畸变地传递.

使用神光 II 升级装置前端系统输出脉冲来进行远程时间功率曲线测量方案验证.实验只使用了 3 GHz 的相位调制,现场的传输距离实际小于 100 m.这次实验采用 280 m 的单偏振光纤,虽较之前模拟与实验所用的 340 m 光纤短,但是长度已经满足实际使用需求.所用的示波器带宽为 12 GHz,用以检测时间波形经单偏振光纤远程传输之后,3 GHz 幅频调制量的变化情况.为了便于观察幅频调制现象,在脉冲输出端增加了

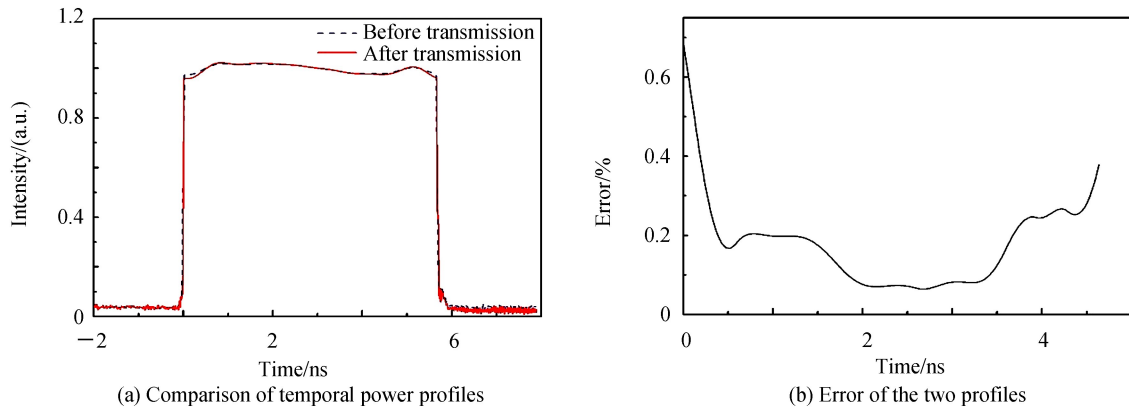


图 8 时域恢复算法得到的传输前后的时间功率曲线对比以及脉冲时间功率曲线误差

Fig.8 Temporal power profiles obtained by waveform recovery algorithm and error of the two temporal power profiles

一截保偏光纤,增加了幅频调制量.实验对脉宽为 1 ns 和 2 ns 的两种波形脉冲进行了测量,如图 9.经过单偏振光纤传输之后,脉冲强度会有衰减,为了便于对比,将传输后的脉冲时间波形进行等比例放大,时间波形的 3 GHz 幅频调制深度在传输前后的大小与相位都没有明显的变化.通过计算,1 ns 脉冲经单偏振光纤传输前的幅频调制深度为 14.4%,传输后为 13.31%.2 ns 脉冲传输前的幅频调制深度为 18.28%,传输后为 17.69%.采集实验数据的时候采用了平均处理,提高了信噪比.所以在传输前后,3 GHz 幅频调制量没有明显变化,甚至还略有下降,这是因为信号经过 280 m 单偏振光纤后会有损耗,光电管对于较低强度信号的响应是非线性的,时间功率曲线的部分细节不能很好地还原,导致了幅频调制量的降低.结果显示单偏振光纤对 3 GHz 幅频调制影响很小,验证了单偏振光纤中由于群速度色散引入的 3 GHz 幅频调制量较小的模拟结果.

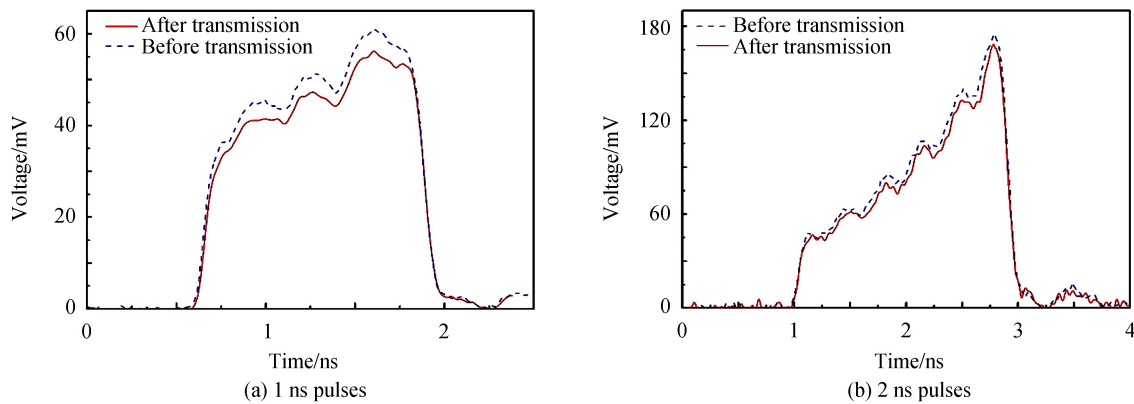


图 9 1 ns 与 2 ns 脉冲波形经 280 m 单偏振光纤传输前后的时间波形对比

Fig.9 Comparison of 1 ns pulses and 2 ns pulses before and after transmission in 280 m PZ fiber

在神光 II 系列装置中,前端系统共有五台再生放大器位于装置的不同位置,为了实现时间波形闭环控制,需要在每个再生放大器后设置输出时间功率曲线监测点.传统的时间波形闭环控制系统需要使用示波器在监测点就近测量,若要组成一个完整的时间波形闭环控制系统,需要数台示波器分别放置在现场,成本非常高.因此,在后续的时间波形闭环控制系统中,将采用单偏振光纤传输每个监测点的时间波形,不同的单偏振光纤光路具有不同的时延以避免不同光路间脉冲发生混叠.各路光脉冲经合束器合束,由一台示波器即可远程完成所有监测点的时间功率曲线测量,如图 10.图中的时间功率曲线测量系统包括单偏振光纤合束器、光电转换器、示波器与计算机.根据时延的不同,可以辨别激光脉冲的采集点.将测量系统集中在远端,可避免现场干扰,并降低装置运行成本.

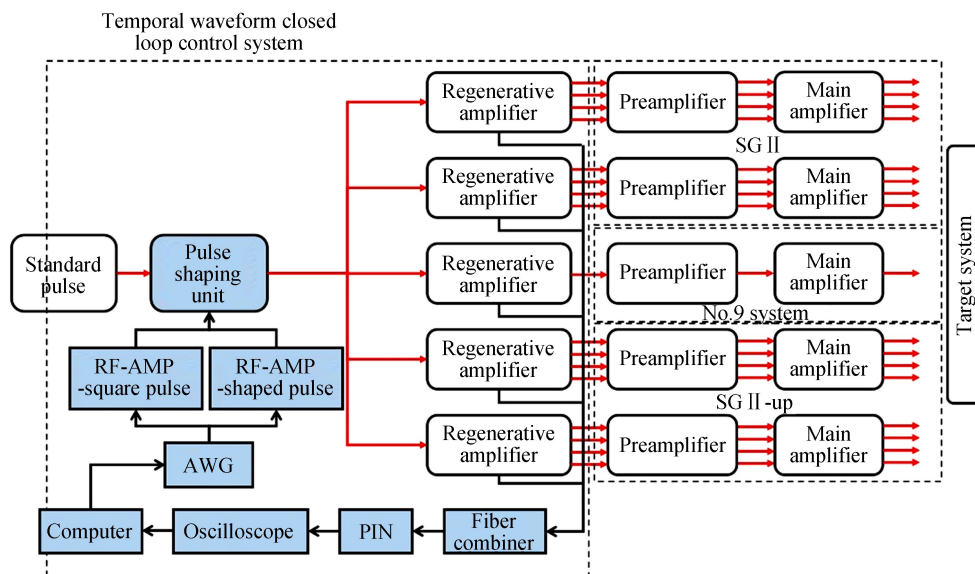


图 10 神光 II 高功率激光装置中的时间波形闭环控制系统

Fig.10 Temporal waveform closed loop control system in SGII high power laser facility

## 4 结论

单偏振光纤对偏振模色散具有很好的抑制作用,在神光 II 装置前端系统中,采用单偏振光纤进行远程传输并结合时域恢复算法实现了时间功率曲线的远程集中测量方案验证,结果表明,该时间功率曲线测量方法的误差在每 1 ns 范围内小于 0.8%。该方案可有效地避免现场对示波器的干扰,提高测试可靠性,并降低运行成本,有望实现神光 II 系列装置的时间波形的集中远程精确测控。

### 参考文献

- [1] SPAETH M L, MANERS K R, KALANTAR D H, *et al.* Description of the NIF Laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, **69**(1): 25-145.
- [2] ZHENG Wan-guo, WEI Xiao-feng, ZHU Qi-hua, *et al.* Laser performance of the SG-III laser facility[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, **4**(3): e21.
- [3] LI X, FAN W, WEI H, *et al.* The progress of the front-end source of the SG-II high power laser system[J]. *The Review of Laser Engineering*, 2008, **36**(APLS): 1168-1171.
- [4] FAN Wei, YANG Xiang-tong, LI Xue-chun, *et al.* Stable single frequency and single polarization DFB fiber lasers operated at 1053 nm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(6): 1189-1192.
- [5] MURRAY J R, SMITH J R, EHRLICH R B, *et al.* Experimental observation and suppression of transverse stimulated Brillouin scattering in large optical components[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1989, **6**(12): 2402-2411.
- [6] KYRAZIS D T, WEILAND T L. Determination of SBS-induced damage limits in large fused silica optics for intense, time-varying laser pulses[C]. Boulder-DL tentative, 1991: 469-477.
- [7] GUO Shao-feng, LU Qi-sheng, CHENG Xiang-ai, *et al.* Theoretical study on damage induced by stimulated Brillouin scattering process[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2003, **15**(9): 850-854.
- [8] GLEYZE J F. Recent advances in the front-end sources of the LMJ fusion laser[C]. SPIE, 2011, **7916**(6): 79160I.
- [9] JOLLY A, GLEYZE J F, LUCE J, *et al.* Front-end sources of the LIL-LMJ fusion lasers: progress report and prospects [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(5): 1427-1438.
- [10] GARNIER J, VIDEAU L, GOUÉDARD C, *et al.* Statistical analysis for beam smoothing and some applications[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(8): 1928-1937.
- [11] ZHANG Rui, SU Jing-qin, WANG Jian-jun, *et al.* Experimental research on the influences of smoothing by spectral dispersion on the Technical Integration Line.[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(5): 687-695.
- [12] ZHANG Rui, ZHANG Xiao-min, SUI Zhan, *et al.* Research on target uniform irradiation method using linearly modulated light and special grating dispersion[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**(7): 1073-1077.
- [13] DORRER C, OKISHEV A V, BALONEK G, *et al.* Commissioning of a multiple-frequency modulation smoothing by spectral dispersion demonstration system on OMEGA EP[C]. SPIE, 2013, **8602**(3): 86020E.
- [14] ROTHENBERG J E, BROWNING D F, WILCOX R B. Issue of FM to AM conversion on the National Ignition Facility



- [C]. Third International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, International Society for Optics and Photonics, 1999, **3492**: 51-62.
- [15] PENNINCKX D, BECK N, GLEYZE J F, *et al.* Signal propagation over polarization-maintaining fibers: problem and solutions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(11):4197-4207.
- [16] CRAXTON R S. University of rochester laboratory for laser energetics annual report[R]. Washington; Rochester University, 1992.
- [17] GORDON J P, KOGELNIK H. PMD fundamentals: polarization mode dispersion in optical fibers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, **97**(9):4541.
- [18] HOCQUET S, PENNINCKX D, BORDENAVE E, *et al.* FM-to-AM conversion in high-power lasers[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(18): 3338-3349.
- [19] XU Dang-peng, ZHANG Rui, TIAN Xiao-cheng, *et al.* Progress on FM-to-AM effect and its suppression in high power laser driver[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **54**(2):020005.
- [20] QIAO Zhi. Investigation on the key technologies of front-end in high power laser facility[D]. Shanghai; Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2017.  
乔治. 高功率激光驱动器前端系统关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2017.
- [21] CARSON J R. Notes on the theory of modulation[J]. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1922, **10**(1): 57-64.
- [22] LI Rao, FAN Wei, JIANG You-en, *et al.* Tunable compensation of GVD-induced FM - AM conversion in the front end of high-power lasers[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(4): 993-998.

---

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 11604350)

引用格式: HUANG Jia-peng, FAN Wei, SHI Zhi-dong, *et al.* Temporal Power Profiles Remote Precise Measurement of Suppressing Frequency Modulation to Amplitude Modulation Conversion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9):0914006  
黄家鹏, 范薇, 石志东, 等. 抑制幅频调制的时间功率曲线的远程精确测量[J]. 光子学报, 2018, **47**(9):0914006