

利用脉冲复制环提高纳秒脉冲单次测量的动态范围

潘雪 李学春 李国扬 陈宇 王江峰 姜有恩 张鹏 卢兴华

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要 提出了一种提高纳秒光脉冲单次测量动态范围的方法,其中光纤脉冲复制环用来产生时域上幅度呈指数递减的脉冲复制串,有效环增益为 0.955。经软件补偿脉冲复制串使其具有相同的幅度,然后累加平均前 18 个脉冲,能够将注入的单发纳秒光脉冲动态范围提高 2.74 倍,这样就可以实现利用光电探测管和示波器对 100:1 高对比度的惯性约束核聚变(ICF)脉冲测量。

关键词 测量;纳秒光脉冲测量;动态范围;光纤脉冲复制环;对比度

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0408005

Enhanced-Dynamic-Range Single-Shot Measurement of Nanosecond Optical Pulses Based on Fiber Pulse Replication Loop

Pan Xue Li Xuechun Li Guoyang Chen Yu Wang Jiangfeng Jiang You'en
Zhang Peng Lu Xinghua

(National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A new method is proposed to enhance dynamic range single-shot measurement of nanosecond optical pulses. A fiber pulse replication loop system is developed to generate temporal replicated pulse train with an exponential decay curve, and the effective loop gain is 0.955. By compensating each pulse to the same amplitude and averaging 18 pulses in the front of the replicated pulse train, the dynamic range can be improved more than 2.74 times. It can meet the need of 100:1 high dynamic range inertial confinement fusion pulse measurement by combination PIN diode in conjunction with oscilloscopes.

Key words measurement; nanosecond optical pulses measurement; dynamic range; fiber pulse replication loop; contrast

OCIS codes 040.1880; 040.5160; 140.3280

1 引言

纳秒脉冲激光普遍应用于激光测距与遥感探测,尤其是在惯性约束核聚变(ICF)激光系统中,需要稳定、高对比度、特殊波形的脉冲从而最大限度地压缩靶丸。所以激光脉冲波形的精确测量对于这些特殊的应用十分关键^[1~4]。

虽然非线性技术能够测量对比度为 10^7 的脉冲波形,但是对于纳秒级脉宽来说,只有使用条纹相机或者光电探测(PIN)管和示波器两种测量手段^[5,6]。条纹相机能够提供 700:1 高动态范围多通道测量,其时间分辨率能达到 2 ps,然而上升速率相对较慢

的单束高动态范围的条纹相机,不能用来实时探测脉冲宽度或对一些间歇问题的诊断^[7]。尽管示波器采样率在不断地提高,垂直分辨率已经可以达到 8 bit,但由于内部噪声有效字节只有 5.5 bit,所以利用光电探测管与示波器探测纳秒脉冲主要限制因素就是示波器的动态范围,最大只有 45:1。这样的对比度对于探测 100:1 的高对比度 ICF 脉冲来说是不够的,动态范围至少要提高 2.3 倍。

消除周期信号的随机噪声,提高信噪比的常规方法为多次采样累加平均。但是对于单次脉冲大能量发射却无法提供多次采样数据。目前有分束器

收稿日期: 2011-11-14; 收到修改稿日期: 2011-12-19

作者简介: 潘雪(1984—),女,博士,助理研究员,主要从事固体放大器及其应用等方面的研究。

E-mail: pxll33@siom.ac.cn

法^[8]和光纤复制环法^[9]两种光脉冲复制方法。分束器的优点是可以产生幅度相等的脉冲串,但是结构比较复杂,而且要求分束器的分束比精度高,每两路的精确延时难于控制。所以本文采用脉冲复制的方法使单次脉冲变为脉冲序列,由示波器探测光脉冲序列,再经过软件处理,把序列切割成不同多个光脉冲,最后进行累加平均,可起到扩大测量动态范围的作用。

2 光纤脉冲复制环

如图1所示,波长1053 nm的单次纳秒光脉冲从左边经过3 dB光纤耦合器,一束注入复制环内,另一束输出环外,进入环内的光束沿逆时针方向依次经过光衰减器、1053 nm光纤隔离器(ISO)1、波分复用器(WDM)(是将980 nm抽运光与1053 nm注入光耦合到掺镱增益光纤中进行放大)、长3 m的掺镱增益光纤、1053 nm ISO 2、1 nm带宽放大自发辐射(ASE)滤波器以及9:1光纤耦合器,最后经过3 dB光纤耦合器后一部分输出环外,其余的仍然留在环内每走一圈就有一部分输出,最后形成脉冲复制串。其中980 nm抽运光注入端使用980 nm ISO来防止环内后向反射光耦合进抽运源而造成破坏,两个1053 nm ISO既能保证注入1053 nm光脉冲在复制环中沿逆时针方向传输,同时也可以有效地抑制反向ASE传输。1 nm带宽ASE滤波器可以控制环内累加的ASE噪声,避免更多地提取增益光纤中的上能级粒子数,从而影响放大器对注入光的放大能力。为了避免环内产生激光振荡,环内通过9:1光纤耦合器的10%端口对环内传输光脉冲的光谱进行监测,从而控制注入的抽运光功率,来调整光纤放大器的增益,使整个环内净增益小于但接近于1。

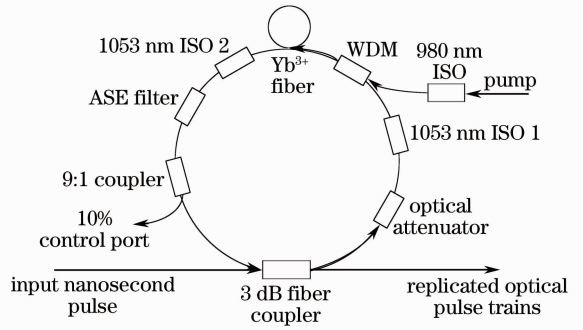


图1 1053 nm波长脉冲复制环示意图

Fig.1 Schematic of the fiber pulse replication loop at 1053 nm

调整光纤衰减器以及注入抽运功率,在无注入光时使脉冲复制环处于刚好无自激振荡的状态,即环内净增益小于接近于1的状态,此时环内光谱图由图1中10%端接入ANDO AQ6370B型光谱分析仪(OSA)进行监测,图2(a)为带宽1 nm的平顶ASE噪声光谱,当环内净增益大于1时,产生激光振荡,光谱如图2(b)所示,平顶上的尖脉冲就是环内产生的连续激光信号,它会大量消耗增益光纤的上能级粒子数,使注入光脉冲不能在环内得到有效的放大。此时注入脉冲宽度为3.6 ns的单次脉冲,在刚好不产生自激振荡时脉冲复制环输出的脉冲序列串时域图如图3所示,由图可知相邻脉冲的时间间隔为134 ns,所以脉冲复制环长度为27.6 m。输出第一个脉冲幅度为195 mV,对于标定的带宽14 GHz的高速光电探测管来说,其对应的第一个脉冲的光功率为10 mW,所以可以推断注入脉冲光功率约为20 mW;此时增益环内的注入抽运功率为200 mW,抽运电流为300 mA,对脉冲复制串中前36个进行计算,得到的复制环内脉冲净增益为0.955,从图中能够分辨出60个脉冲。

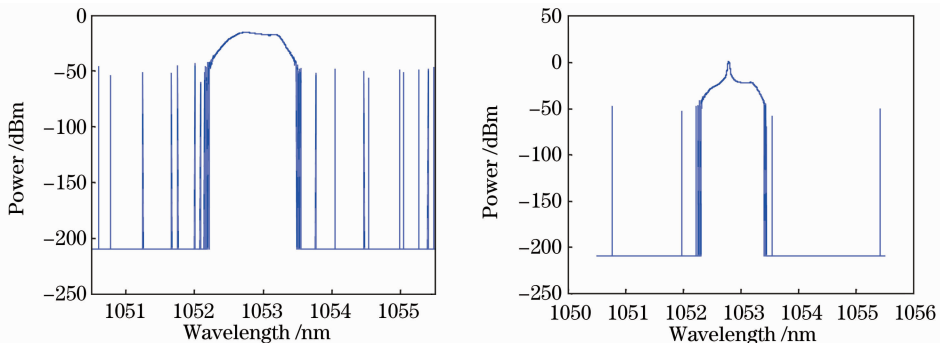


图2 环内光谱图。(a)接近激光振荡阈值;(b)超过激光振荡阈值

Fig.2 Spectra in the loop. (a) Close to oscillation threshold; (b) exceed the oscillation threshold

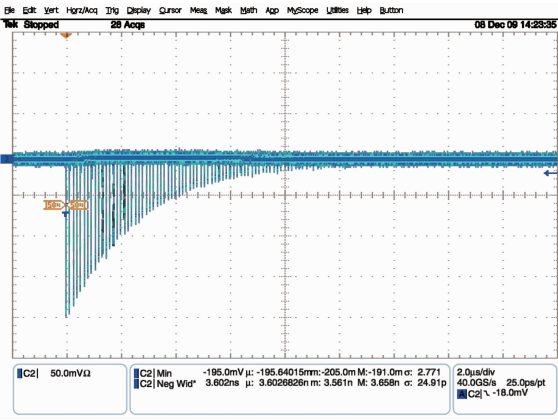


图 3 14 GHz 光电探测管与 12 GHz 泰克示波器探测的光脉冲复制串的时域波形

Fig. 3 Temporal replicated optical pulse train detected by the 14 GHz high-speed PIN diode in conjunction with the 12 GHz Tektronix oscilloscope

3 实验结果处理步骤

提高单次脉冲测量动态范围的传统方法是累加平均,但是单次脉冲经过光纤复制环后输出的是幅度呈指数衰减的脉冲序列,无法直接累加平均,而且光纤复制环长度确定后,理论上相邻脉冲的时间间隔应该是固定的。环境对脉冲复制环的影响造成了相邻脉冲时间间隔的抖动,所以不仅要补偿脉冲串的幅度使其一致,而且要找出脉冲之间的精确时间间隔,其方法是:1) 以第一个脉冲为模板,前后各取 500 个采样点,再以这 500 个点为模板,对后面的数据做互相关,认为互相关函数的峰值位置是某个脉冲的峰值位置。计算峰值之间的间隔,每两个脉冲峰值之间的间隔有微小差异,取间隔的众数作为真实间隔。2) 从第一个脉冲峰值前面 250 个点开始计算时间基准,第一个脉冲峰值前后加起来取 500~1000 个点(软件可调整),根据脉冲间隔,将原始脉冲分段。每段包含一个脉冲,并且脉冲是同相位的。3) 把上一步得到的脉冲归一化,每个脉冲段均乘一个权重系数,使每段脉冲峰值相同,但是同时对每一段的白噪声也进行了相应的放大,所以使后面复制的幅度小的脉冲信噪比变差。4) 累加平均归一化后的同相位脉冲。

观察原信号中的噪声,是一个白噪声,在整个范围内都是一样的,按照修正方法,相当于在不同部分,按照第一个脉冲的幅值对后面幅度递减的脉冲串进行补偿,补偿的方式相当于对不同区域的幅度递减的脉冲乘以不同的权重系数,相对幅值越小的脉冲,权重系数就越大,这样在通过平均脉冲串降低

噪声的同时,又因为补偿而增大了噪声。对这个问题的优化就是先求出噪声大小和平均次数关系函数的极点,然后选择最佳平均脉冲个数,从而最大限度地提高测量的动态范围。图 4 所示为通过 Matlab 软件拟合的前 36 个复制脉冲曲线,拟合函数 $f(x) = a \times b^x$,其中系数为 $a = -0.3893$; $b = -8.95 \times 10^{-6}$,测量数据与拟合曲线的置信率为 95%。然后根据第一个脉冲幅值得到相应的补偿曲线,如图 5 所示,在曲线上找到脉冲串相应的加权系数,使脉冲串峰值相同。

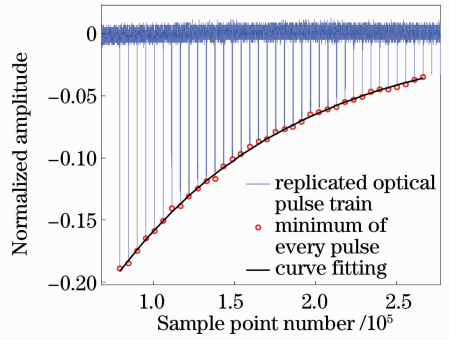


图 4 36 个复制脉冲的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of 36 pulses in the replicated train

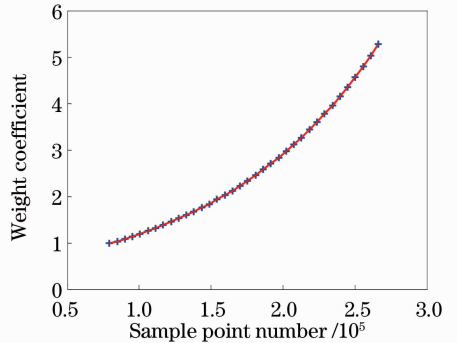


图 5 36 个复制脉冲的补偿曲线

Fig. 5 Compensating curve of 36 pulses in the replicated train

由于噪声 α_n 值和平均次数 n 的平方根成反比,当每次叠加的噪声的 α 值相同时,有

$$\alpha_n = \sum_1^n \alpha / (n\sqrt{n}), \quad (1)$$

可以通过递推法得到,当每次叠加的噪声 α 值不同时,有

$$\alpha_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i / (n\sqrt{n}),$$

$$\alpha_i = f(i) \times \alpha_1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

如图 6 所示,取 18 个脉冲累加平均效果最优,即噪声值最小,达到原来的 0.365。这是由于脉冲复制串中的脉冲序列幅度是呈指数衰减的,累加平

均前,越靠后的脉冲乘的系数越大,同时白噪声也被放大,与第一个脉冲相比,后面的单个脉冲信噪比越低。当脉冲个数累加平均后提高的信噪比不足以抵消脉冲本身信噪比降低的影响时,脉冲个数增加会降低最后的信噪比。计算结果显示,只能取脉冲峰值功率衰减到第一个脉冲峰值功率 1/2 以前的光脉冲进行累加平均。目前的实验结果是第 18 个脉冲的幅度衰减为第一个脉冲的 1/2。

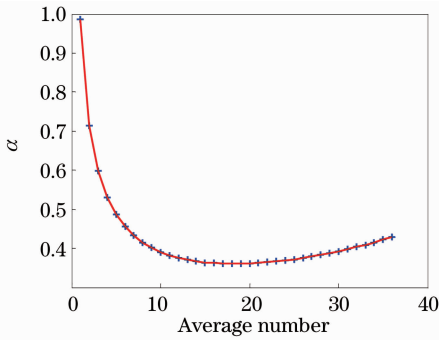


图 6 噪声与脉冲平均个数的关系图

Fig. 6 Relation between the noise reduction and the average pulse number

为了更明显地观察到动态范围的提高,采用

VB 语言编写数据处理窗口,捕捉上面判断的最佳脉冲串个数,乘以相应的加权系数使幅度相同,图 7 所示为补偿后的前 18 个脉冲序列,从图中可以明显看到后面脉冲补偿的加权系数越大,补偿后的白噪声越明显,相对后面的脉冲信噪比就越差,然后根据上面的数据处理步骤,累加平均得到如图 8(b)所示的高动态范围的纳秒脉冲,与图 8(a)所示的注入光脉冲进行对比,白噪声得到了明显的抑制,测量动态范围得到了相应的提高。

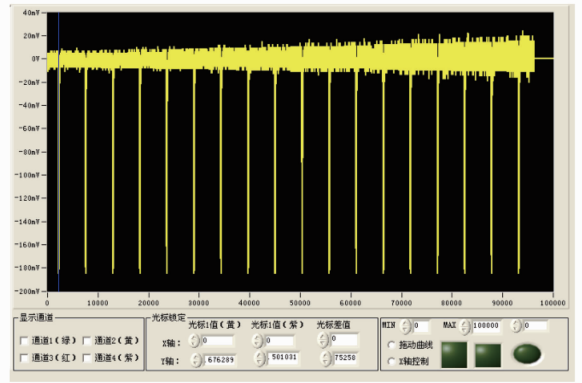


图 7 补偿后的前 18 个脉冲复制串

Fig. 7 18 replicated pulses train after compensation

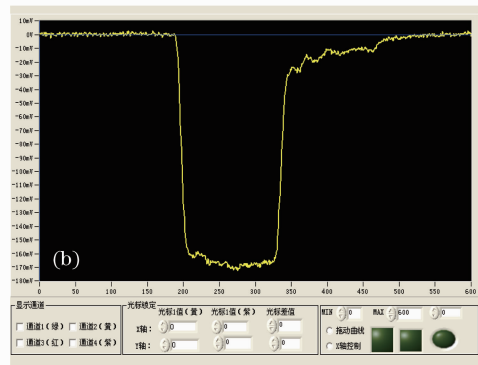
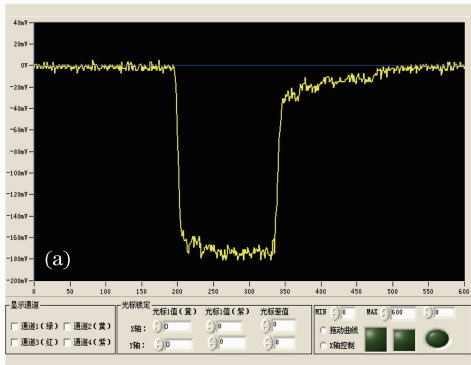


图 8 (a)初始脉冲;(b)图 7 中 18 个脉冲累加平均后的脉冲

Fig. 8 (a) Initial pulse; (b) pulse after average 18 pulses in Fig. 7

4 结 论

采用复制脉冲串累加平均的方法可以有效地提高纳秒脉冲单次测量的动态范围,实验结果在脉冲复制环净增益为 0.955 的情况下,取前 18 个脉冲进行加权平均可以得到最大 2.74 倍的动态范围提高,满足利用光电探测管与示波器来实现 100:1 的高信噪比 ICF 脉冲探测的需要。如果在脉冲复制环内加入调制器控制复制环的 ASE 初始状态或者采用更高精度的抽运源,即可有效地将净增益提高到 0.99 以上,累加平均的最佳脉冲串个数会大大增加,动态范围也可以进一步提高到 10 倍以上。

参 考 文 献

- 1 M. Tabak, J. Hammer, M. E. Glinsky *et al.*. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers[J]. *Plasma Phys.*, 1994, **1**(5): 1626~1634
- 2 Ouyang Xiaoping, Zhu Qingchun, Zhu Baoqiang *et al.*: Analysis about affection of lens array on energy measurement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1110~1112
 欧阳小平, 竺庆春, 朱宝强 等. 阵列透镜对能量测量影响的分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1110~1112
- 3 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zhang Panzheng *et al.*. Second order autocorrelation applied to femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 742~745
 欧阳小平, 张福领, 张攀政 等. 短脉冲激光的二阶自相关[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 742~745
- 4 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Tang Shunxing *et al.*. Calibration of pulse signal-to-noise ratio measurement for

- femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 945~948
欧阳小平, 张福领, 唐顺兴等. 短脉冲激光信噪比测量的标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 945~948
- 5 Zhang Fuling, Ouyang Xiaoping, Xie Xinglong *et al.*. Contrast measurement of ultrashort laser pulse with third order correlation technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1171~1174
张福领, 欧阳小平, 谢兴龙等. 超短激光脉冲对比度的三阶互相关测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1171~1174
- 6 Fuling Zhang, Xiaoping Ouyang, Meizhi Sun *et al.*. Diffraction grating single-shot correlation system for measurement of picosecond laser pulses[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1053~1056
- 7 Xiaoping Ouyang, Xiaoyan Li, Yanli Zhang *et al.*. A method to obtain pulse contrast on a single shot[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(11): 1001~1003
- 8 J. R. Marciante, W. R. Donaldson, R. G. Roides. Averaging of replicated pulses for enhanced-dynamic-range single-shot measurement of nanosecond optical pulses [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(18): 1344~1346
- 9 A. Jolly, J. F. Gleyze, J. C. Jolly. Static and synchronized switching noise management of replicated optical pulse trains[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **264**(1): 89~96

栏目编辑:何卓铭