纳秒脉冲控制精度对多光束组束的影响

石会财,曹劭文,张蓉竹,孙年春

(四川大学 电子信息学院,四川 成都 610064)

摘　要:在多束脉冲激光叠加过程中,脉冲的同步延时控制精度和脉宽控制精度对叠加光束能量分布具有重要影响。基于光束叠加理论,建立了四束脉冲激光能量叠加模型,以四束整形脉冲为入射光源,分别针对同步延时控制精度和脉宽控制精度变化情况下叠加脉冲能量分布进行了定量计算。结果表明,随着同步延时控制精度和脉宽控制精度的降低,叠加脉冲的脉宽增加,峰值降低。多束脉冲的同步延时控制精度和脉宽控制精度的变化对激光组束的影响比单束脉冲的影响更大。四束激光合成系统中,在其他参数不变的情况下,叠加光束激光脉冲峰值光强变化率小于 5%时,单束激光脉冲延时变化率和脉宽变化率保持在 3.2%和 10.9%以内。因此,脉冲延时对叠加光强影响更大。

关键词:光束叠加;　同步延时控制精度;　脉宽控制精度;　多脉冲组束

中图分类号:O436.1　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201746.1206003

Effect of nanosecond pulse control precision on multi-beam beams

Shi Huicai, Cao Shaowen, Zhang Rongzhu, Sun Nianchun

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In the process of multi-beams pulse laser synthesis, the synchronization time delay control precision and the pulse width control precision have important influence on the final distribution of the superposition beam energy. Based on the beam superposition theory, four beam pulsed laser light energy superposition model was established. Four beam shaping pulse as the incident light source, respectively, the superposition pulse energy distribution was calculated by the synchronization time delay control precision and the pulse width control precision. The results show that, with the decrease of the synchronization control precision and the pulse width control precision, pulse width of the superimposed pulse increase and the peak intensity reduce. The multi-beam beams will have greater influence on synthesis beam than single beam. In four laser synthesis system, when other pulse parameters remain unchanged and if the laser pulse peak intensity change rate is less than 5%, the single beam laser pulse time delay and pulse width change rate are kept within 3.2% and 10.9%. Therefore, the effect of pulse time delay on the synthesis intensity is even greater.

Key words: synthesis beam;　synchronous time delay control precision;　pulse width control precision;　multi-pulse beams

收稿日期:2017-04-05;　**修订日期**:2017-05-03

基金项目:国家高技术发展计划(2012AA8042038);四川省教育厅创新团队资助项目(13TD0048)

作者简介:石会财(1990-),男,硕士生,主要从事激光传输方面的研究。Email:shcsdau@163.com

导师简介:孙年春(1961-),男,教授,硕士生导师,主要从事高功率固体激光技术等方面的研究。Email:8178137@163.com

0 引 言

惯性约束核聚变 (ICF) 系统实现点火需要高功率、高质量[1]的激光脉冲。然而,由于大口径光学元件加工[2]难度大以及激光器的热效应[3]、非线性效应等因素导致单束激光输出能量受限[4],因此,获取高功率激光主要通过多个小口径激光光束叠加实现。光束合成过程主要为初始激光光源经过分离器得到激光阵列,激光阵列经过相位调制、激光放大、光束叠加等过程[5]得到高质量、高功率的激光。虽然,光束叠加能够有效解决相关问题,但同时,多束激光脉冲叠加过程中脉冲同步问题亟待解决。

目前,依据 ICF 打靶相关应用背景,影响脉冲叠加的因素很多,无论空间特性、偏振特性[6]以及频域特性等都非常重要, 依托对叠加脉冲的均方根值(RMS)和功率谱宽度(PSD)参数对叠加脉冲的空间分布[7]分析很多。但目前有关多束脉冲间脉冲不同步从而对叠加脉冲光强分布所产生的影响很少涉及, 文中建立了一个脉冲控制精度对叠加光束光强分布影响的分析模型, 具体计算了四束整形脉冲控制参数对于叠加光强的影响, 并对两参数对于叠加光强的影响大小进行了对比,希望对于实际的工程项目提供一定的理论指导。

1 物理模型与基本理论

ICF 原型装置实验中通过脉冲波形预测[8]、脉冲整形[9]、频率转化以及激光发射数据的反复迭代得到具体的打靶脉冲[10]。根据相应脉冲参数建立三台阶矩形脉冲模型表达式为:

$$E(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 10t & 0\ \text{ns}<t<0.1\ \text{ns}\\ 1 & 0.1\ \text{ns}<t<1.4\ \text{ns}\\ 10t-13 & 1.4\ \text{ns}<t<1.5\ \text{ns}\\ 4 & 1.5\ \text{ns}<t<2.4\ \text{ns}\\ 10t-20 & 2.4\ \text{ns}<t<2.5\ \text{ns}\\ 16 & 2.5\ \text{ns}<t<3\ \text{ns}\\ -10t+46 & 3\ \text{ns}<t<3.1\ \text{ns}\\ 0 & t>3.1\ \text{ns}\end{cases} \tag{1}$$

式中:t 为传输时间;$E(t)$为矩形脉冲的电场强度。三台阶矩形脉冲的波形如图 1 所示。图中,横轴 t 为脉冲时间,纵轴 E 为电场强度。根据光强与电场强度的表达式为:

$$I=E^2 \tag{2}$$

式中:I 为光强强度;E 为电场强度。

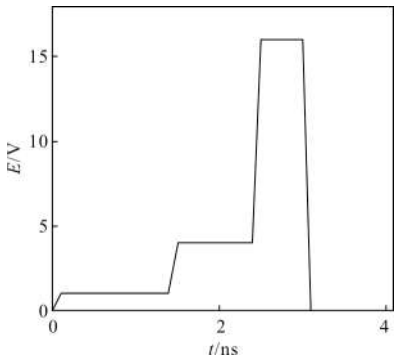

图 1 三台阶矩形脉冲

Fig.1 Three order rectangular pulse

由公式(1)、(2)得到光强表达式为:

$$I(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 100t^2 & 0\ \text{ns}<t<0.1\ \text{ns}\\ 1 & 0.1\ \text{ns}<t<1.4\ \text{ns}\\ 100t^2-260t+169 & 1.4\ \text{ns}<t<1.5\ \text{ns}\\ 16 & 1.5\ \text{ns}<t<2.4\ \text{ns}\\ 100t^2-400t+400 & 2.4\ \text{ns}<t<2.5\ \text{ns}\\ 256 & 2.5\ \text{ns}<t<3\ \text{ns}\\ 100t^2-920t+2\,116 & 3\ \text{ns}<t<3.1\ \text{ns}\\ 0 & t>3.1\ \text{ns}\end{cases} \tag{3}$$

式中:$I(t)$为光强强度。

对上面的三台阶矩形脉冲进行三次多项式差值法拟合得到整型脉冲,如图 2 所示。图中,横轴 t 为脉冲时间,纵轴 E 为电场强度。

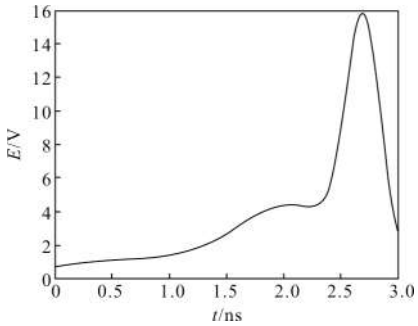

图 2 三阶矩形脉冲拟合得到整型脉冲

Fig.2 Synthetic pulse fitted by three order rectangular pulse

图 3 为靶面能量叠加系统的基本光路, 前端系

统有四束激光整形脉冲作为入射光源，经过透镜聚焦到 P 点。通过改变入射整形脉冲的脉冲参数控制精度分析 P 点的叠加光强变化情况。

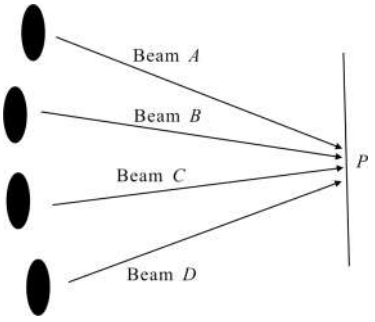

图 3 系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of system structure

四束激光脉冲叠加过程中，多脉冲之间存在脉宽和延时之间的偏差。因此单个脉冲的光强表达式为：

$$I_i(t)=\begin{cases} h_{i1} & t-\Delta t_i<\Delta\tau_1 \\ 100t^2+h_{i2} & 0\,\text{ns}<t-\Delta t_i<0.1\,\text{ns}+\Delta\tau_2 \\ 1+h_{i3} & 0.1\,\text{ns}<t-\Delta t_i<1.4\,\text{ns}+\Delta\tau_3 \\ 100t^2-260t+169+h_{i4} & 1.4\,\text{ns}<t-\Delta t_i<1.5\,\text{ns}+\Delta\tau_4 \\ 16+h_{i5} & 1.5\,\text{ns}<t-\Delta t_i<2.4\,\text{ns}+\Delta\tau_5 \\ 100t^2-400t+400+h_{i6} & 2.4\,\text{ns}<t-\Delta t_i<2.5\,\text{ns}+\Delta\tau_6 \\ 256+h_{i7} & 2.5\,\text{ns}<t-\Delta t_i<3\,\text{ns}+\Delta\tau_7 \\ 100t^2-920t+2\,116+h_{i8} & 3\,\text{ns}<t-\Delta t_i<3.1\,\text{ns}+\Delta\tau_8 \\ h_{i9} & t-\Delta t_i>3.1\,\text{ns}+\Delta\tau_9 \end{cases} \quad (4)$$

式中：$I_i(t)(1\leqslant i\leqslant 4)$为光束 i 光强强度；Δt_i 为脉冲延时；$\Delta\tau_j(1\leqslant j\leqslant 9)$为脉宽大小变化；$h_{ij}(1\leqslant j\leqslant 9)$分别为在脉宽 $\Delta\tau_j$ 变化情况下，三台阶矩形脉冲每个区域的光强变化。

文中建立的模型并未涉及到叠加后光束进一步的传输特性，只适用于高功率激光传输终端能量分布的分析。鉴于此，文中 n 束脉冲能量在靶面的线性叠加的叠加光强表达式为：

$$I(t)=\sum_{i=1}^{n} I_i(t) \quad (5)$$

在 ICF 系统中，对能量密度及辐照对称性的要求极高，因此，必须对入射光束进行精确的控制。入射光束的控制主要分为同步精度控制和脉宽精度控制。在同步精度控制对叠加光组束的影响分析中，分别改变四束整形脉冲延时的方式，得到在不同延时情况下叠加光强的变化情况。单束整形脉冲延时的改变是通过对三台阶矩形脉冲的每个矩形脉冲分别延时相同值得到的总体延时。此时，整形脉冲的波形不变，整体得到了延时。

在脉宽控制精度对叠加光组束的影响分析中，单束光整形脉冲脉宽的改变是通过对三台阶矩形脉冲的各个矩形脉冲按 1.5:1:0.5 比例分别减小或增加，同时，矩形高度按比例作相应的改变，从而保证单个整形脉冲能量保持不变。

2 数值模拟与分析

2.1 同步延时控制对叠加光强的影响

为了分析同步延时控制精度对叠加光强的影响，设计四束激光入射的系统，通过改变激光脉冲延时分析叠加脉冲光强分布。

设四束光的脉宽相同且为 τ=3 ns，整形脉冲1，2，3的脉冲延时为 0 ns，脉冲 4 的脉冲延时分别取 0、0.1、0.2、0.3 ns 时，通过对公式(5)模拟仿真，得到叠加光束相对光强能量分布，如图 4 所示。图中，横轴 t 为脉冲时间，纵轴为叠加光束归一化光强。

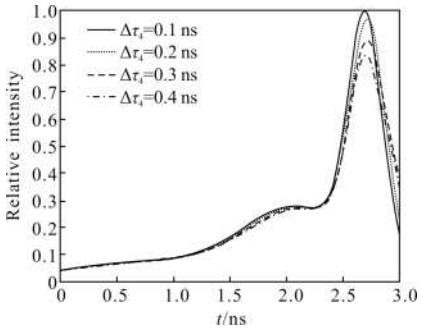

图 4 单束光延时不同情况下的远场叠加光强示意图

Fig.4 Schematic diagram of far field synthesis intensity under different conditions of single beam optical time delay

下面，取整形脉冲 1，2 的脉冲延时为 0 ns，整形脉冲 3，4 的脉冲延时相同，且同时取 0、0.1、0.2、0.3 ns 时，通过对公式(5)进行模拟仿真，得到叠加光束相对光强能量分布，如图 5 所示。图中，横轴 t 为脉冲时间，纵轴为叠加光束归一化光强。

从图 4、5 对比可以看出，在单束或两束激光脉冲延时不大的情况下，叠加脉冲形状仍然是上升沿比较缓慢，下降沿比较陡峭的整形脉冲。但叠加脉冲峰值光强和脉宽随着单束激光脉冲延时的变化而改变。

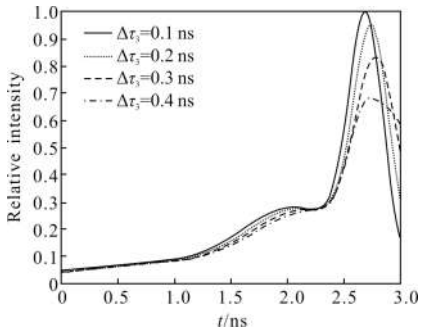

图 5 两束光延时不同情况下的运场叠加光强示意图

Fig.5 Schematic diagram of far-field synthesis intensity under different conditions of two beam optical time delay

图 6 为脉冲延时对叠加脉冲峰值光强的影响。横轴 Δt 为脉冲延时时间,纵轴为叠加脉冲归一化峰值光强。随着脉冲延时增加,叠加脉冲峰值下降速度由快变慢。这是由于三台阶整形脉冲上升沿先缓慢后陡峭的特点决定的。

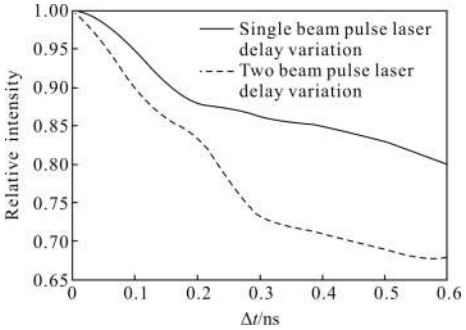

图 6 脉冲延时对叠加脉冲峰值光强的影响

Fig.6 Effect of pulse time delay on peak intensity of superimposed pulse

表 1 中, Δt 为脉冲延时时间,$A1$,$A2$ 分别为单束或两束激光脉冲延时变化 Δt 时,叠加脉冲归一化峰值光强。当脉冲延时为 0.3 ns,$A1$,$A2$ 分别为 86.27%和 73.4%。两束脉冲延时变化对叠加脉冲的影响比单束脉冲延时变化更强。

表 1 叠加脉冲的归一化峰值光强随脉冲延时变化表

Tab.1 Table of normalized peak intensity of the superimposed pulse varies with pulse time delay

Δt/ns	0	0.1	0.2	0.3
$A1$	1	97.44%	91.67%	86.27%
$A2$	1	95.55%	83.94%	73.4%

单激光脉冲延时变化对四束激光叠加脉冲频谱分布的影响如图 7 所示。

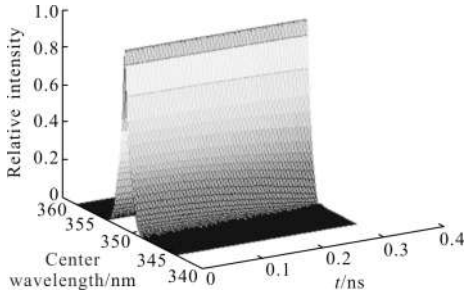

图 7 频谱相对强度随频率及脉冲延时变化示意图

Fig.7 Schematic diagram of relative intensity of frequency spectrum with frequency and pulse time delay variation

图 7 中,纵轴为归一化峰值光强,两个横轴分别为中心波长和脉冲延时。当脉冲延时固定时,频谱以中心频率为 $f\approx 8.55\times 10^{14}$ Hz(中心波长 λ_c=351 nm)对称分布,当脉冲延时为 0.1、0.2、0.3 ns 时,频谱峰值相应增加 0.82%、1.44%、2.52%。

2.2 脉宽控制对叠加光强的影响

为了分析脉宽控制精度对叠加光强的影响,设计四束激光入射的系统, 通过改变激光脉宽精度分析叠加脉冲光强分布。

在保持四束整形脉冲延时相同, 整形脉冲1,2,3 的脉宽为 3 ns,整形脉冲 4 的脉宽分别取 3、3.1、3.2、3.3 ns 时,通过对公式(5)进行模拟仿真,得到叠加光束相对光强能量分布,如图 8 所示。图中,横轴 t 为脉冲时间,纵轴为叠加光强相对大小。

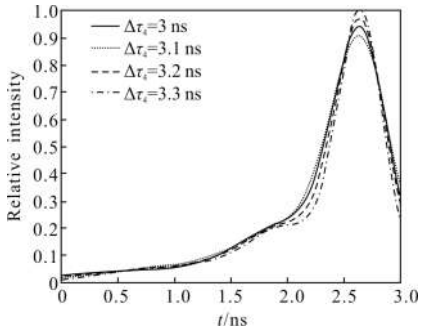

图 8 单束光脉宽变化情况下的叠加光强分布示意图

Fig.8 Schematic diagram of synthesis intensity distribution with single beam light pulse width variation

下面, 在脉冲延时相同的情况下, 设整形脉冲 1,2 的脉宽为 3 ns,整形脉冲 3,4 的脉宽相同,且分别取 3、3.1、3.2、3.3 ns 时,通过对公式(5)进行模拟

仿真,得到光束相对光强能量分布,如图 9 所示。图中,横轴 t 为脉冲时间,纵轴为叠加光强相对大小。

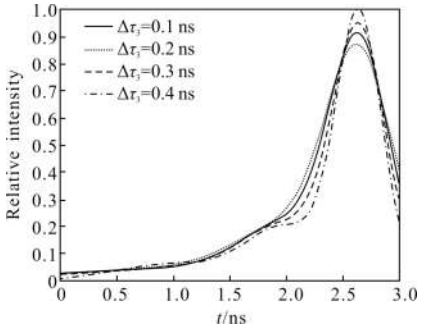

图 9 两束光脉宽变化的叠加光强示意图

Fig.9 Schematic diagram of synthesis intensity distribution with two beam of light pulse width varing

图 10 为脉宽对叠加脉冲峰值光强的影响。横轴为脉宽大小,纵轴为叠加脉冲归一化峰值光强。随着脉宽增加,叠加脉冲峰值光强降低,峰值光强下降比较平稳。

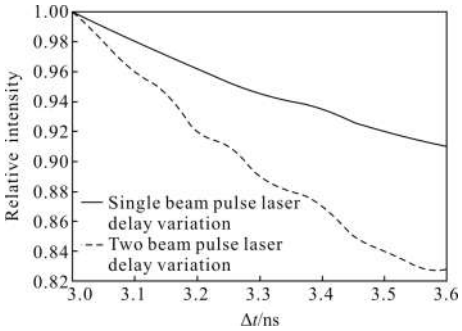

图 10 脉宽对叠加脉冲峰值光强的影响

Fig.10 Effect of pulse width on peak intensity of superimposed pulse

表 2 中,τ 为脉宽大小,$A1$,$A2$ 分别为单束或两束激光脉宽为 τ 时,叠加脉冲归一化峰值光强。当脉宽为 3.3 ns 时,$A1$,$A2$ 分别为 94.3%和 89.38%。两束脉宽对叠加脉冲的影响比单束脉冲延时变化更强。

表 2 叠加脉冲的归一化峰值光强随脉宽变化表

Tab.2 Table of normalized peak intensity of the superimposed pulse varies with pulse width

Δt/ns	3.0	3.1	3.2	3.3
$A1$	1	98.83%	96.14%	94.43%
$A2$	1	97.19%	92.2%	89.38%

通过对单激光脉冲脉宽变化得到的四束叠加脉冲频谱分布如图 11 所示。

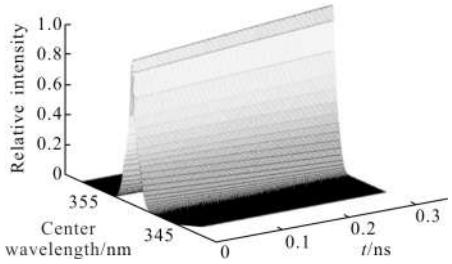

图 11 频谱相对强度随频率及脉宽变化示意图

Fig.11 Schematic diagram of relative intensity of frequency spectrum with frequency and pulse width variation

图 11 中,纵轴为归一化峰值光强,两个横轴分别为中心波长和脉宽。当脉宽固定时,频谱以中心频率为 $f\approx 8.55\times 10^{14}$ Hz(中心波长 λ_c=351 nm)为对称分布,当脉宽增加 0.1、0.2、0.3 ns 时,频谱峰值相应增加 0.79%、1.29.%、1.15%。

2.3 脉宽精度和延时精度对叠加光强的比较

在多光束叠加中, 影响光束叠加的因素主要有脉宽精度和脉冲延时精度。通过仿真分析单束光脉冲与其他光束脉冲的脉宽差以及延时差从 0 ns 变化至 0.6 ns 时, 叠加光束峰值光强变化对比情况如图12所示。

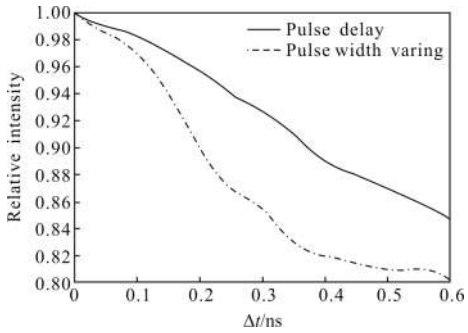

图 12 单束光延时精度和脉宽精度变化对四束叠加光束峰值光强的影响对比

Fig.12 Four beam synthetic light intensity influenced by single beam light variation of pulse width or time delay

图 12 中,横轴为单个脉冲与其他脉冲脉宽或脉冲延时的差,纵轴为叠加光束相对峰值光强。可以得知,脉冲延时比脉宽对叠加脉冲的影响更大。

激光阵列多束激光叠加时, 激光脉冲相对峰值光强随脉宽及光束数量变化。表 3 为 n 束叠加脉冲

的归一化峰值光强随单束激光脉宽或脉冲变化表。

表 3 中,n 为激光阵列光路数量,τ 为脉宽或脉冲延时大小。在单束激光脉宽或脉冲延时的情况下,随着激光阵列光束 n 增加,叠加脉冲相对光强增加,脉宽或脉冲延时对叠加光强的影响越来越小。

表 3 n 束叠加脉冲的归一化峰值光强随单束激光脉宽或脉冲延时变化表

Tab.3 Table of normalized peak intensity of n beam superimposed pulse varies with single beam pulse width or pulse time delay

τ/ ns	n			
	6	8	10	12
3.1	98.88%	99.05%	99.12%	99.23%
0.1	97.90%	98.03%	98.85%	99.22%
3.2	96.67%	97.04%	97.23%	98.04%
0.2	92.77%	93.21%	95.48%	96.02%
3.3	94.85%	95.11%	96.77%	97.62%
0.3	88.44%	90.20%	93.03%	94.66%

在其他三束激光脉宽和延时不变的情况下,单束光的延时和脉冲宽度误差分别为 3.3%、6.7%、10%时,叠加光束峰值光强随延时变化分别下降为 97.44%、91.67%、86.27%,随脉宽变化分别下降为 98.83%、96.14%、94.43%。因此,在整型脉冲光束叠加过程中,应当更加注重多光束之间的同步延时精度的控制。

2.4 脉冲畸变对叠加脉冲频谱特性影响

单倍频激光脉冲经过功率放大及三倍频过程得到三台阶高斯脉冲的过程中,由于设备精度不够及三倍频过程能量输出偏差等问题,三台阶激光脉冲出现畸变[10],从而对叠加脉冲频谱产生影响。

三台阶整形脉冲畸变主要发生在第一台阶处功率不稳定以及脉冲下降沿出现斜率缓慢。

下面分析整形脉冲第一台阶处功率不稳定对于叠加脉冲频谱的影响。如果在叠加时由于功率不稳定导致叠加激光脉冲第一台阶处光强幅值过低,从而与正常光强之间出现一定的夹角 θ,如图 13 所示。

图 13 中横轴 t 为脉冲时间,纵轴为拟合整形脉冲相对峰值光强。其中,实线为正常三台阶整形脉冲拟合曲线,虚线为三台阶矩形脉冲第一台阶出现畸变所对应的时域脉冲曲线。

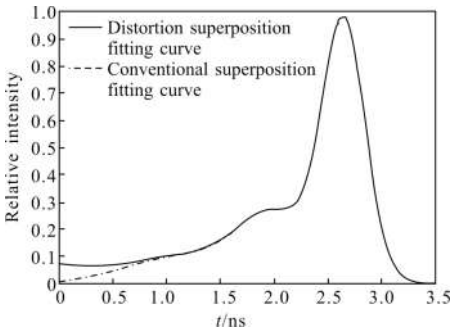

图 13 四束整形脉冲时域叠加归一化光强

Fig.13 Normalized light intensity of four beam shaping pulse time domain superposition

图 13 第一台阶叠加脉冲畸变情况下频谱分布如图 14 所示。

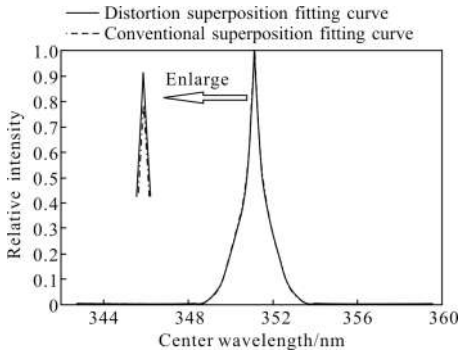

图 14 叠加脉冲第一台阶畸变对叠加脉冲频谱的影响

Fig.14 Influence of the first step distortion of the superimposed pulse on its frequency spectrum

图 14 横轴为中心波长,纵轴为归一化光强。当整形脉冲第一台阶由于功率不稳定而出现畸变时,叠加脉冲频谱中心频率降低,频谱变宽。

下面分析整形脉冲下降沿变缓对叠加脉冲频谱的影响。由于功率不稳定从而导致畸变,叠加脉冲与常规叠加脉冲之间出现夹角 θ,如图 15 所示。

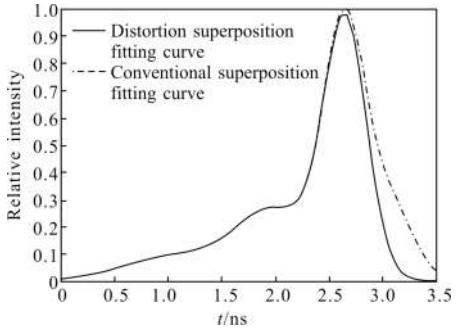

图 15 四束整形脉冲时域叠加归一化光强

Fig.15 Normalized light intensity of four beam shaping pulse time domain superposition

图 15 横轴 t 为脉冲时间,纵轴为整形脉冲归一化光强。整形脉冲下降沿畸变,导致下降沿缓慢。

图 15 叠加脉冲下降沿畸变情况下,相应频谱分布如图 16 所示。

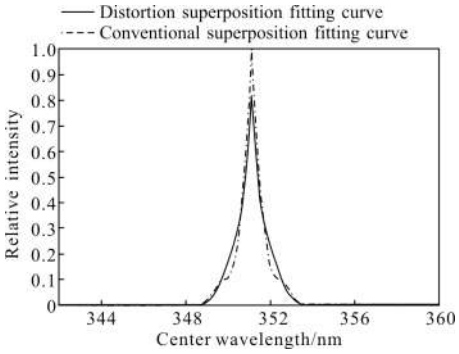

图 16 叠加脉冲下降沿畸变对频谱的影响

Fig.16 Influence of superimposed pulse falling edge distortion on frequency spectrum

图 16 横轴为中心波长,纵轴为相应频率上的归一化光强。当整形脉冲下降沿畸变时,中心频率处光强增加,但谱宽变窄,频域波形出现变化。

表 4 中, 夹角 θ 为脉冲第一阶梯或脉冲下降沿畸变与正常脉冲曲线夹角的变化。当第一阶梯或下降沿畸变 15%时, 频谱峰值改变了 4.3%及 20.8%,可见,整形脉冲下降沿畸变对频谱影响更大。

表 4 叠加脉冲频谱峰值随第一阶梯或脉冲下降沿畸变而产生的变化情况

Tab.4 Variation of the peak value of superimposed pulse frequency spectrum with the distortion of the first step or pulse falling edge

θ/(°)	0	5	10	15
The first step distortion	1	98.2%	97.5%	95.7%
Distortion of falling edge	79.2%	86.1%	92.6%	1

3 结 论

文中通过相关文献得到 ICF 实验需求的三台阶矩形脉冲的具体形状以及通过理论分析得到叠加光强和脉冲的同步延时时间以及脉宽大小时间的解析式。通过模拟仿真表明,随着多路脉冲间同步延时精度和脉宽精度的变差,叠加光强脉宽增大,峰值光强降低。随着激光阵列光束 n 增加,脉冲精度变化对叠加光强分布影响越来越小。叠加光束激光脉冲峰值光强变化率小于 5%时, 在其他参数不变的情况下,单束脉冲延时变化率和脉宽变化率保持在 3.2%和 10.9%以内。因此,脉冲延时变化对叠加脉冲的影响更大, 在实际的工程试验中应当加强脉冲延时在光束叠加中的控制。

在脉冲整形过程中, 虽然叠加脉冲下降沿畸变对脉冲频谱影响更大, 但三台阶整形脉冲第一阶梯下降沿容易出现畸变,因此,对于两种常见畸变都应得到重视。

当单束脉冲延时和脉宽增加 10%时, 叠加脉冲时域峰值强度分别降低 13.73%和 5.57%, 频域峰值分别增加 2.52%和 1.15%, 脉冲精度变化对于时域脉冲影响比对频域影响更大。原因是虽然叠加脉冲时域形状随脉宽和延时发生了很大变化, 但其脉冲形状并未发生本质变化, 因此其傅里叶频谱分布变化很小。

由于脉冲精度不够从而导致叠加脉冲出现偏离理想波形,对于系统产生很大危害。为此,针对脉冲畸变补偿进行了大量研究, 提出了脉冲时空畸变的评价标准以及利用几何光学方法, 结合色差原理的菲涅耳波带片的色差补偿方案[11-12]等。

由于超短脉冲脉宽窄,因此,实际控制中对于脉冲前后延陡峭程度、抖动大小、延时调节精确等比普通脉冲要求更高[13]。文中依据 ICF 原型装置实验中采用纳秒整形脉冲为背景, 讨论脉冲精度降低程度对叠加脉冲能量分布的影响, 提出的分析模型对不同宽度的脉冲都适用, 而且可以通过计算得出满足远场能量分布所需的控制参数。

参考文献:

[1] Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2009, 36(4): 773-778. (in Chinese)
刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 773-778.

[2] Jiao Xiang, Zhu Jianqiang, Fan Quantang, et al. Temperature difference analysis and control methods in precision Finishing of large-aperture optical component [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2014, 41(11): 1116001. (in Chinese)
焦翔, 朱健强, 樊全堂, 等. 大口径光学元件精密加工温差

分析及控制方法[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1116001.

[3] Sun Yi, Gao Yunguo, Shao Shuai. Influence of high power laser thermal effect on beam combination system [J]. ***Optical and Precision Engineering***, 2015, 23(11): 3097-3106. (in Chinese)
孙毅, 高云国, 邵帅. 高功率激光热效应对合束系统的影响[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(11): 3097-3106.

[4] Liu Jing. Theoretical analysis of high power pulse propagation and amplification in optical fibers [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
刘静. 高功率脉冲在光纤中的传输与放大研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.

[5] Injeyan H, Goodno G D. High Power Laser Handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2011: 533-571.

[6] Jiang Maohua, Su Yi, Lu Fei. Influence of polarization on laser beam coherent combining [J]. ***High Power Laser and Partical Beams***, 2013, 25(3): 611-614. (in Chinese)
蒋茂华, 苏毅, 卢飞. 偏振态对激光相干合成的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 611-614.

[7] Wu Chao, Zhao Yahui, Zhang Rongzhu, et al. Irradiance superposition charact eristic of distorted beams in far field [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(8): 2437-2441. (in Chinese)
吴超, 赵雅慧, 张蓉竹, 等. 畸变光束远场光强叠加特性研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2437-2441.

[8] Wang Wenyi, Zhao Runchang, Su Jingqin, et al. High-power solid-state laser performance simulation model [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2008, 28(S1): 23-27. (in Chinese)
王文义, 赵润昌, 粟敬钦, 等. 高功率固体激光性能仿真模型[J]. 光学学报, 2008, 28(S1): 23-27.

[9] Li Hai, Liang Yue, Zhao Runchang, et al. Waveform control technique of high power laser pulse shaping[J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2011, 23(9): 2377-2380. (in Chinese)
李海, 梁樾, 赵润昌, 等. 高功率激光整形脉冲波形控制技术[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2377-2380.

[10] Wang Wenyi, Zhao Runchang, Su Jingqin, et al. Preliminary laser-pulse-shaping experiment on technical integration line [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2010, 30(4): 1051-1054. (in Chinese)
王文义, 赵润昌, 粟敬钦, 等. 神光-Ⅲ 原型装置初步的激光脉冲整形实验[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1051-1054.

[11] Guo Guangyan, Fan Zhongwei, Yu Jin, et al. Solid-state laser distortion wave-front adaptive correction technology and it′s research progress [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2014, 51(3): 030001. (in Chinese)
郭广妍, 樊仲维, 余锦, 等. 固体激光器波前畸变自适应校正技术及研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 030001.

[12] Zhou Song. Study on the measurement and compensation technology of ultra short pulse space time distortion [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012. (in Chinese)
周松. 超短脉冲时空畸变测量及补偿技术研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012.

[13] Guo Liangfu, Zhang Shukui, Wang Xiaodong, et al. High precision multpass synchronously delay triggering controly system[J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 1999, 11(6): 715-719. (in Chinese)
郭良福, 张树葵, 王晓东, 等. 高精度超短脉冲激光多路同步延时触发控制系统 [J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(6): 715-719.