

doi:10.3788/gzxb20144308.0819003

# 基于交叉相位调制的堆积脉冲非线性传输

王文龙, 谭超, 傅喜泉

(湖南大学 信息科学与工程学院 微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 长沙 410082)

**摘 要:** 基于子脉冲交叉相位调制的非线性相互作用, 利用耦合非线性传输模型, 对堆积脉冲的非线性传输和峰均比进行了研究. 研究发现, 当堆积脉冲的子脉冲间存在重叠时, 在传输过程中时间相干会导致子脉冲间发生相互作用从而改变其脉冲质量. 在不同的子脉冲延迟情况下, 堆积脉冲的强度和峰均比随传输距离的变化而改变, 且变化幅度均随子脉冲延迟的增大而减小. 对于高斯型堆积脉冲, 当归一化子脉冲延迟大约为 3 时其在非线性传输过程中保持脉冲形状基本不变; 而对于超高斯型的堆积脉冲, 归一化子脉冲延迟则约为 2.2.

**关键词:** 非线性传输; 堆积脉冲; 啁啾脉冲; 峰均比; 脉冲相互作用; 交叉相位调制; 惯性约束聚变

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)08-0819003-6

## Nonlinear Propagation for Stacked Pulses by Cross-phase Modulation

WANG Wen-long, TAN Chao, FU Xi-quan

(Key Laboratory for Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The nonlinear propagation model was used to research the nonlinear propagation and Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) of the stacked pulses based on cross-phase modulation between the sub-pulses. It is found that when the sub-pulses of the stacked pulse all overlapped, time-coherent will lead to interaction between the sub-pulses and change the quality of sub-pulses in the process of propagation. Under the condition of different sub-pulses delay, the intensity and PAPR of the stacked pulse occur different degrees of change during the propagation, and their variation amplitude decreases with the sub-pulses delay. For the Gaussian stacked pulse, the pulse shape can basically remain unchanged in the process of nonlinear propagation when the sub-pulses delay is about 3; while the super-Gaussian stacked pulse is about 2.2.

**Key words:** Nonlinear propagation; Stacked pulses; Chirped pulses; Peak-to-average power ratio; Pulses interaction; Cross-phase modulation; Inertial confinement fusion

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.4370; 190.0190; 190.4370

## 0 引言

在激光驱动的惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)系统中, 激光压缩脉冲的形状非常关键<sup>[1-3]</sup>, 要求 ICF 激光驱动器的前端系统能够输出任意整形的光脉冲以预补偿放大过程造成的波形畸变. ICF 激光驱动器的前端系统最初多采用电脉冲整形的方法<sup>[4]</sup>, 由于电子电路的限制, 无法产生任意形状的具有

快上升沿(小于 100 ps)的脉冲, 也无法提供时间上零同步的可整形压缩脉冲和超短脉冲. 利用并联可编程单模光纤延迟线进行啁啾光脉冲堆积整形, 可获得结构紧凑的任意形状整形脉冲<sup>[5-9]</sup>, 目前啁啾脉冲堆积是产生 ns 量级宽带整形激光脉冲的重要方法<sup>[10]</sup>. 啁啾脉冲堆积是将掺 Yb<sup>3+</sup> 锁模光纤激光器输出的脉冲序列选单、进行线性啁啾展宽后通过光谱滤波得到所需的宽度, 然后分束, 各分束脉冲延时并按一定比例进行衰

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20110161110012)和湖南省科学技术厅科技计划资助项目(No. 2013TP4026)资助

第一作者: 王文龙(1989-), 男, 研究生, 主要研究方向为光相互作用与控制研究. Email: 13262096225@163.com

导师(通讯作者): 傅喜泉(1977-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为高功率激光传输与控制. Email: fuxiquan@gmail.com

收稿日期: 2013-12-06; 录用日期: 2014-02-25

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

减,最后把各分束的脉冲合束堆积形成任意形状的整形脉冲.对于这种啁啾脉冲堆积产生的光束,刘兰琴等研究了堆积啁啾脉冲时间调制和强度演化规律以及小宽带堆积啁啾脉冲传输放大特性<sup>[11-12]</sup>;夏彦文等研究了啁啾堆积脉冲在线性介质中的传输特性<sup>[13]</sup>;周晓军等研究了堆积啁啾脉冲在单模光纤中的非线性传输特性<sup>[7]</sup>;黄小东等研究了堆积啁啾脉冲的非线性传输放大特性<sup>[14]</sup>;张颖等研究了啁啾堆积脉冲在非线性传输过程中的小尺度自聚焦效应<sup>[15]</sup>;王友文等研究了啁啾脉冲堆积宽带激光非线性传输的时域和空间调制特性<sup>[16-17]</sup>.

目前对啁啾堆积脉冲非线性传输特性的研究大多是基于非线性薛定谔方程,把堆积脉冲看作一个脉冲整体进行传输<sup>[7,14-17]</sup>.但是在子脉冲传输过程中,子脉冲间的相互叠加必然使其存在非线性相互作用.为了更好地体现堆积脉冲传输过程中的非线性相互作用及考察每个子脉冲的变化规律,需要利用基于子脉冲非线性相互作用的传输模型对堆积脉冲的传输特性进行研究.本文基于子脉冲交叉相位调制的非线性相互作用,利用非线性传输模型,研究了不同类型堆积脉冲的非线性传输及其峰均比的演化,并给出了能够使不同类型堆积脉冲在非线性传输过程中保持形状不变的归一化子脉冲延迟的大致取值.

## 1 堆积脉冲非线性传输模型

设具有线性初始啁啾的单子脉冲初始光场分布为

$$E_j(t) = A_j \exp \left[ -\frac{t^{2m}}{2T_0^{2m}} - \frac{iCt^2}{2T_0^2} - i\omega_0 t \right] \quad (1)$$

式中  $A_j$  为脉冲的振幅,  $m$  为高斯或超高斯堆积脉冲的阶数,  $C$  为啁啾参量,  $T_0$  为  $1/e$  强度脉冲宽度,  $\omega_0$  为中心频率.

将该啁啾脉冲经光纤分束器分成若干子脉冲,各子脉冲进入不同路光纤,利用 PZT 控制光纤长度以使各路脉冲之间存在一定的延迟,用可调光衰减器 (Variable Optical Attenuator, VOA) 控制各路脉冲的振幅大小,再将各路光纤中的脉冲叠加,于是,由高斯型或超高斯型啁啾脉冲堆积法获得的光脉冲电场分布  $E(t)$  可表示为<sup>[17]</sup>

$$E(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A_k \exp \left[ -(t - krT_{\text{FWHM}})^{2m} / (2T_0^{2m}) - iC(t - krT_{\text{FWHM}})^2 / (2T_0^2) - i\omega_0(t - krT_{\text{FWHM}}) \right] \quad (2)$$

式中指数第一项描述脉冲的形状,第二项为脉冲的啁啾项,最后一项中的  $k\omega_0 rT_{\text{FWHM}}$  是由于不同路径长度传输后引起的脉冲之间的相对位相延迟差,  $T_{\text{FWHM}} = 2\sqrt{\ln 2} T_0$  为每个子脉冲的半高全宽,  $r$  表示脉冲间延迟相对于脉宽的比例,即相邻子脉冲的重叠因子,  $r$  越小则表明子脉冲间的重叠部分越多,  $N$  为组成堆积脉

冲的基元脉冲个数,  $k$  为脉冲序列数.

通过交叉相位调制 (Cross-phase Modulation, XPM), 子脉冲均独立存在但子脉冲间存在非线性相互作用.通过分析堆积脉冲的特性<sup>[7,11-17]</sup>并借鉴多个脉冲相互作用模型<sup>[18]</sup>,  $N$  个子脉冲相互重叠组成的堆积脉冲的非线性传输模型为式(3)所示的耦合非线性薛定谔方程组

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_j + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} = i\gamma \sum_{k=1, k \neq j}^N (|A_k|^2 + 2|A_k|^2) A_j \quad (3)$$

式中  $A_j$  是脉冲的慢变振幅,  $z$  为脉冲在非线性介质中的传输距离,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为传输常量,  $\lambda$  为真空中的波长,  $\alpha$  是损耗参量,  $\beta_2$  是群速度色散参量,  $T = t - z/v_g$  为随脉冲以群速度移动  $v_g$  的参考系中的时间量度,  $\gamma$  为非线性参量.

## 2 堆积脉冲非线性传输

对于五个子脉冲(对应于式(3)中的  $N=5$ , 此时已经可以完全表现出子脉冲间的非线性相互作用)在反常色散区非线性传输的情形,考虑子脉冲波形分别为高斯和 5 阶超高斯,同时考虑子脉冲是否有初始啁啾(有初始啁啾时,式(2)中的  $C=25.5$ ;无初始啁啾时,  $C=0$ ),利用分步傅里叶算法对式(3)进行仿真,仿真中均取归一化参量,其中,光纤损耗  $\alpha=0$ ,归一化振幅均为  $A_k=1$ .

对于由子脉冲相互交叉叠加组成的堆积脉冲,子脉冲延迟越小,脉冲间的重叠部分越多,传输过程中的相互作用越大;反之,子脉冲延迟越大,脉冲间的重叠部分越少,传输过程中的相互作用也越小.当子脉冲间有重叠时,子脉冲在反常色散区传输过程中既受到线性作用使其形状展宽,又通过交叉相位调制受到非线性作用使其通过调整自身形状而尽可能抵消线性作用导致的展宽,其形状随线性作用和非线性作用的强弱而发生变化.当子脉冲受到的线性作用和非线性作用可以相互均衡时,其形状在传输过程中可以保持不变.子脉冲间重叠部分较大时,非线性作用占主导地位;反之,子脉冲间重叠部分较小时,线性作用占主导地位.于是,在理论上存在某个子脉冲延迟使子脉冲受到的线性作用和非线性作用可以相互均衡.

为确定使子脉冲受到的线性作用和非线性作用可以相互均衡的子脉冲延迟的大致范围,考虑重叠因子  $r$  分别等于  $1/T_{\text{FWHM}}$ 、 $2/T_{\text{FWHM}}$ 、 $3/T_{\text{FWHM}}$  和  $4/T_{\text{FWHM}}$  四种情况(对应于归一化后的子脉冲延迟  $rT_{\text{FWHM}}$  分别为 1、2、3 和 4,在这四种情况下,子脉冲间的重叠部分由大到小逐渐减小并减小到 0),子脉冲分别为 5 阶无初始啁啾超高斯 ( $m=5$ )、5 阶有初始啁啾超高斯 ( $m=5$ )、无初始啁啾高斯 ( $m=1$ ) 和有初始啁啾高斯 ( $m=1$ ) 四

种类型,由以上四种类型子脉冲相互交叉叠加形成的堆积脉冲分别称之为 A-D 型堆积脉冲.

研究发现,子脉冲间的不同延迟极大地影响了堆积脉冲的非线性传输.子脉冲延迟为 1 时,子脉冲间的重叠部分较大,四种不同类型堆积脉冲在传输过程中表现出很强的非线性 XPM 效应或相干叠加效应;子脉冲延迟为 3 时,子脉冲间的重叠部分很小,四种不同类型堆积脉冲在传输过程中表现出较弱的非线性 XPM 效应或相干叠加效应;子脉冲延迟为 4 时,子脉冲间的没有重叠部分,此时组合成 A-D 四种类型堆积脉冲的子脉冲随  $z$  相互独立传输.图 1 给出了组成四种不同类型堆积脉冲的子脉冲延迟为 2 时随  $z$  非线性传输的

脉冲强度演化图,图 1(a)~(d)分别为 A-D 型堆积脉冲强度演化图.

从图 1 中可以看出,A、B 型堆积脉冲在子脉冲延迟为 2 时子脉冲间的重叠部分已经很少,而 C、D 型堆积脉冲在子脉冲延迟为 2 时子脉冲间尚有较大的重叠部分.另外,B、D 型堆积脉冲由于时间的交叉叠加导致其表现出明显的相干叠加效应.相对于 A 型堆积脉冲,由于高斯子脉冲间有更多的重叠部分,所以在传输过程中 C 型堆积脉冲表现出更强的非线性 XPM 效应,其脉冲强度随  $z$  的变化也更为明显.同样地,相对于 B 型堆积脉冲,D 型堆积脉冲表现出更强的相干叠加效应.

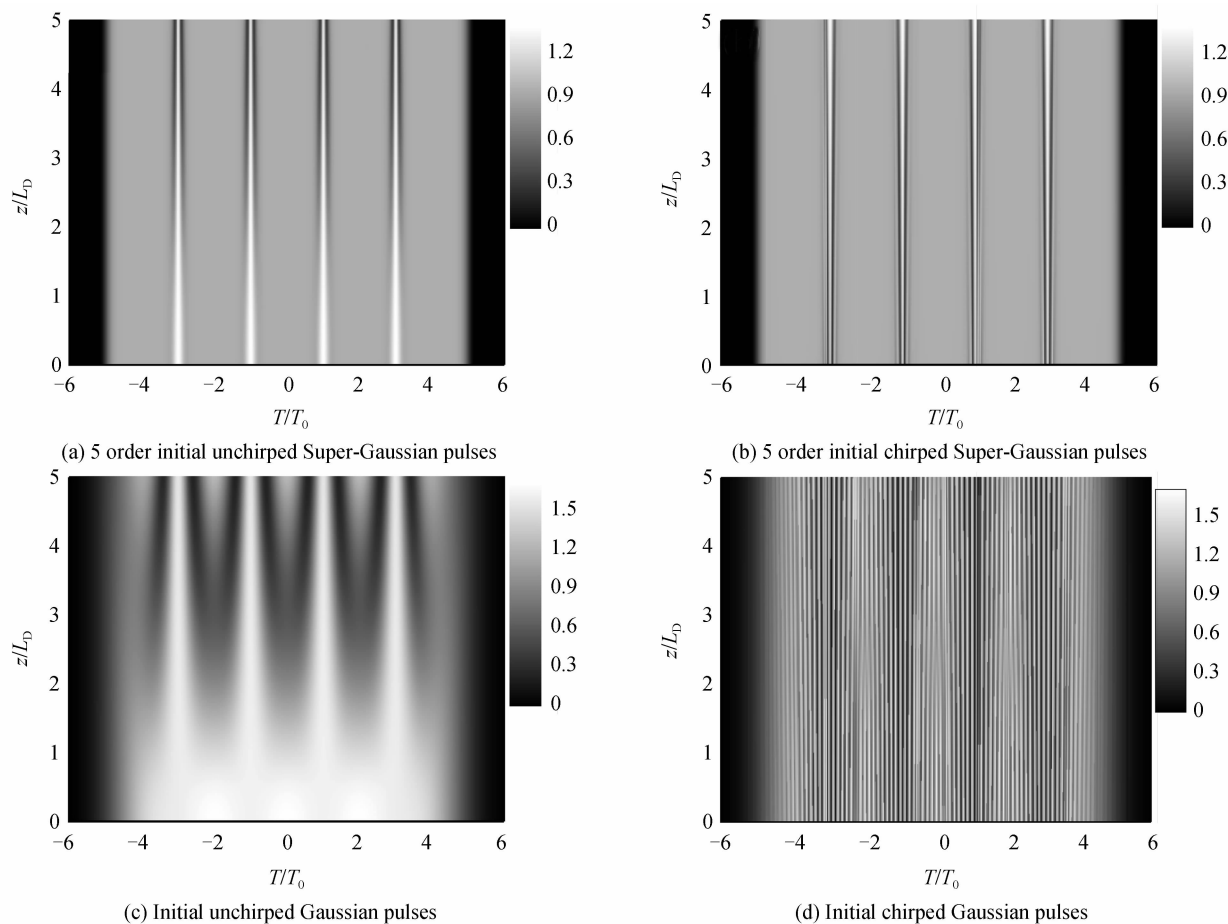


图 1 子脉冲延迟为 2 时堆积脉冲非线性传输的强度演化

Fig. 1 Nonlinear propagation intensity evolution of the stacked pulses when sub-pulses delay is 2

脉冲延迟为 2 时,A-D 四种不同类型的堆积脉冲在非线形传输过程中的脉冲强度均随  $z$  发生不同程度的变化.为了研究四种不同类型堆积脉冲在非线形传输过程中脉冲强度变化的细节,图 2 给出了子脉冲延迟为 2 且  $z$  分别等于 0、2 和 4 时四种不同类型堆积

脉冲的脉冲强度分布,图 2(a)~2(d)分别为 A-D 型堆积脉冲的脉冲强度分布图.显然,四种不同类型堆积脉冲在非线形传输过程中的脉冲强度分布随  $z$  在不断变化.

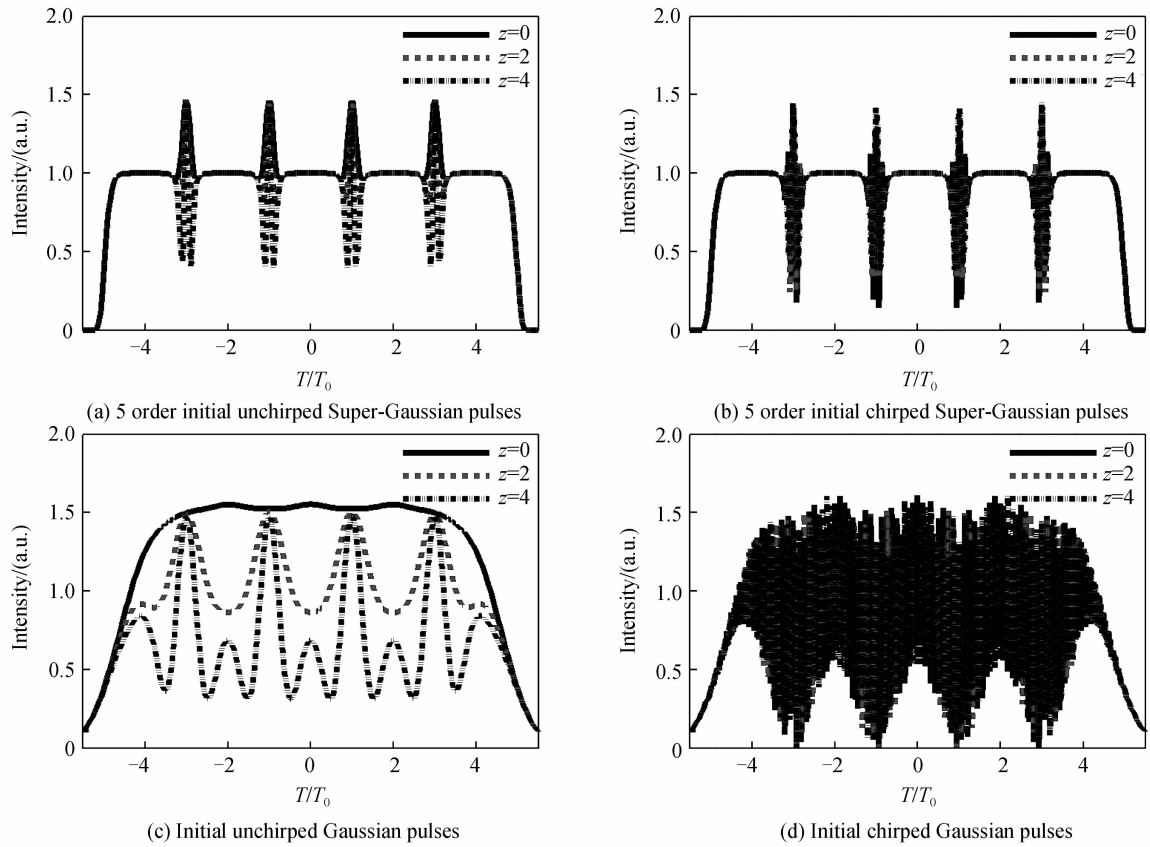


图2 子脉冲延迟为2时堆积脉冲在 $z=0, 2, 4$ 处的脉冲强度分布

Fig. 2 Pulse intensity distribution of the stacked pulses when sub-pulses delay is 2 and  $z=0, 2, 4$

相对于A型堆积脉冲,C型堆积脉冲的脉冲强度分布在初始时刻更平坦,但在传输过程中其脉冲强度的幅度变化更为剧烈;相对于B型堆积脉冲,D型堆积脉冲的脉冲强度分布表现出了更为强烈的相干叠加效应(几乎呈现在整个堆积脉冲内),在传输过程中其脉冲强度的幅度变化也更为剧烈.相对于B、D型堆积脉冲,A、C型堆积脉冲的脉冲强度分布变化更大,原因在于前者是相干叠加效应对堆积脉冲传输起主要作用,而后者是非线性XPM效应对堆积脉冲传输起主要作用.相对于图2来说,子脉冲延迟为1时,四种不同类型堆积脉冲在传输过程中表现出更强的非线性XPM效应或相干叠加效应,其脉冲强度的分布和幅度变化都更为剧烈;子脉冲延迟为3时,四种不同类型堆积脉冲在传输过程中表现出更弱的非线性XPM效应或相干叠加效应,其脉冲强度的分布和幅度变化都更弱;子脉冲延迟为4时,四种不同类型堆积脉冲在传输过程中其脉冲强度的分布和幅度均不发生变化.

从理论上讲,对于A-D四种不同类型的堆积脉冲而言,分别以使其子脉冲受到的线性作用和非线性

作用可以相互均衡的某个子脉冲延迟进行相互交叉叠加组合成堆积脉冲时,四种不同类型堆积脉冲在非线性传输过程中的脉冲强度分布和幅度随几乎保持不变.

### 3 堆积脉冲的峰均比演化研究

峰均功率比(Peak-to-average Power Ratio, PAPR,简称峰均比)间接体现了脉冲强度的分布,峰均比的演化可以方便地表现出脉冲强度分布的变化.四种不同类型堆积脉冲在子脉冲延迟分别为1、2、3、4的情况下随 $z$ 非线性传输的峰均比演化如图3所示.A、B型堆积脉冲的峰均比在四种子脉冲延迟情况下随 $z$ 变化几乎保持一致,且当子脉冲间无重叠时在峰均比为1处保持不变;C型堆积脉冲的峰均比在子脉冲延迟较小时一直减小到峰均比为1,而D型堆积脉冲的峰均比在子脉冲延迟较小时先减小后增大,在子脉冲延迟大于2以后,C、D型堆积脉冲的峰均比在不同子脉冲延迟处随变化几乎保持一致且变化很小,当子脉冲间无重叠时在峰均比为1处保持不变.

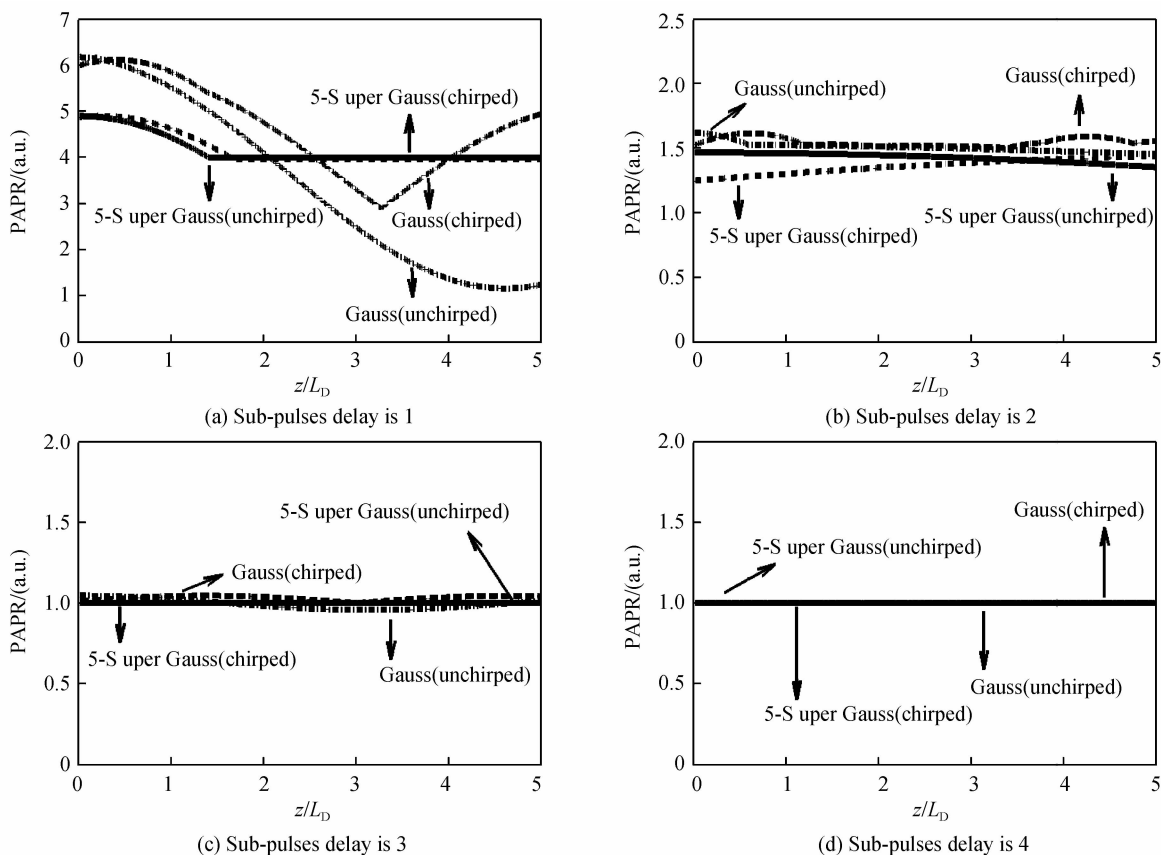


图 3 不同类型堆积脉冲非线性传输的峰均比演化

Fig. 3 Nonlinear propagation PAPR evolution of the different types of stacked pulses

由 5 阶超高斯脉冲和高斯脉冲的归一化脉冲形状可以知道,5 阶超高斯子脉冲间的重叠范围在子脉冲延迟为 3 以内,且在子脉冲延迟为 2 时子脉冲间的重叠部分已经很少;高斯子脉冲在子脉冲延迟为 3 时子脉冲间的重叠部分也已经很小。从四种不同类型堆积脉冲的强度分布可知,需要考虑的 5 阶超高斯子脉冲间的重叠范围和高斯子脉冲间的重叠范围均在子脉冲延迟为 1~3 范围内。当子脉冲延迟小于 1 时,四种不同类型堆积脉冲的峰均比随  $z$  的变化较大;当子脉冲延迟大于 3 时,四种不同类型堆积脉冲的峰均比随  $z$  在峰均比为 1 附近基本保持不变。

为了更清楚地看出四种不同类型堆积脉冲的峰均比随子脉冲延迟变化的细节,把子脉冲延迟细分,图 4 给出了四种不同类型堆积脉冲在不同子脉冲延迟处对应的初始峰均比演化图。A、B 型的初始峰均比随子脉冲延迟变化基本保持一致,C、D 型的初始峰均比随子脉冲延迟变化基本保持一致。无论哪种类型的堆积脉冲,初始峰均比均在五个子脉冲延迟比较小时达到最大值,然后随子脉冲延迟的增大而逐渐减小,A、B 型堆积脉冲均在子脉冲延迟为 2 附近(大约为 2.2)达到初始峰均比最小值 1,而 C、D 型堆积脉冲均在子脉冲延迟为 3 附近(大约为 3)达到初始峰均比最小值 1。

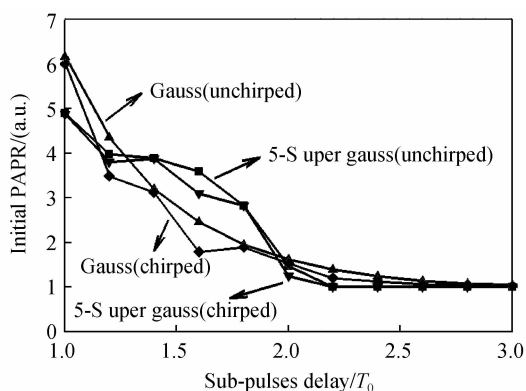


图 4 不同类型堆积脉冲随子脉冲延迟的初始峰均比演化

Fig. 4 Initial PAPR evolution of the different types of stacked pulses along with the sub-pulses delay

综合图 1~4,峰均比的变化表征了四种不同类型堆积脉冲随传输过程中脉冲内部非线性 XPM 效应或相干叠加效应的变化,即表征了传输过程中堆积脉冲形状相对于其初始形状的变化。由四种不同类型子脉冲组合成的堆积脉冲的非线性 XPM 效应或相干叠加效应均随着子脉冲延迟的增大而减小,其堆积脉冲形状的变化程度也均随着子脉冲延迟的增大而减小。

## 4 结论

通过分析堆积脉冲的特性并借鉴多个脉冲相互作用

用模型,本文基于  $N$  个子脉冲通过交叉相位调制相互叠加组成堆积脉冲的非线性传输模型,在  $N=5$  且归一化子脉冲间延迟  $rT_{\text{FWHM}}$  分别为 1、2、3、4 四种情况下,分析了四种不同类型子脉冲(5 阶超高斯无初始啁啾、5 阶超高斯有初始啁啾、高斯无初始啁啾和高斯有初始啁啾)相互叠加组合成的堆积脉冲的非线性传输特性。结果表明,如果子脉冲间有时间叠加,时间相干会导致脉冲出现相干叠加效应或非线性 XPM 效应,子脉冲在反常色散区传输时既受到线性作用又受到非线性相互作用。当子脉冲延迟较小时,子脉冲间的重叠部分较大,相干叠加效应或非线性 XPM 效应比较强,峰均比变化也较大;当子脉冲延迟较大时,子脉冲间的重叠部分较小,相干叠加效应或非线性 XPM 效应比较弱,峰均比变化也较小;当子脉冲延迟大到以致子脉冲间无重叠时,堆积脉冲的子脉冲相互独立传输,峰均比保持为 1 不变。对于超高斯型堆积脉冲,在归一化子脉冲延迟大约为 2.2 时可以在传输过程中的形状基本保持不变;对于高斯型堆积脉冲,使其在传输过程中的形状基本保持不变的归一化子脉冲延迟大约为 3。此外,基于子脉冲交叉相位调制的非线性传输模型很容易分析子脉冲间的相互作用和单个脉冲的传输变化规律,同时,可以推广到时空情形。

## 参考文献

- [1] CHUANG Y H, KESSLER T J, SKUPSKY S. Laser-beam pulse shaping using dispersive spectral filtering[C]. SPIE, 1993, **1870**: 34-46.
- [2] LAWSON J K, SPECK D R, BIBEAU C, *et al.* Temporal shaping of third-harmonic pulses on the Nova laser system[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(24): 5061-5068.
- [3] LINDL J D, MEAD W C. Two dimensional simulation of fluid instability in laser-fusion pellets[J]. *Physical Review Letters*, 1995, **34**(20): 1273-1276.
- [4] SKUPSKY S, SHORT R W, KESSLER T J, *et al.* Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, **66**(8): 3456-3462.
- [5] SUI Zhan, LIN Hong-huan, WANG Jian-jun, *et al.* A compact nanosecond-pulse shaping system based on pulse stacking in fibers[J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23**(8): 2074-2076.
- [6] WANG Jian-jun, LIN Hong-huan, SUI Zhan, *et al.* Temporal pulse shaping by chirped pulse stacking in fiber time delay lines [C], SPIE, 2006, **6287**: 62870G-628712G.
- [7] ZHOU Xiao-jun, ZHANG Zhi-yao, SUI Zhan, *et al.* Characteristics of nonlinear transmission of stacking chirped pulses in single-mode fiber. [J] *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(sl): 159-163.  
周晓军, 张智遥, 隋展, 等. 堆积啁啾脉冲在单模光纤中的非线性传输特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(sl): 159-163.
- [8] HU Zheng-liang, HU Yong-ming, ZHAO Ming-hui, *et al.* Analysis and simulation of optic fiber pulse stacker[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 966-969.  
胡正良, 胡永明, 赵明辉, 等. 光纤脉冲堆积器的模拟分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 966-969.
- [9] LI Xiao-li, SHI Shun-xiang, ZHAO Wei, *et al.* Stacking pulse optical parametric chirped pulse amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1235-1238.  
李晓莉, 石顺祥, 赵卫, 等. 堆积脉冲光参量啁啾脉冲放大器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1235-1238.
- [10] WANG You-wen, CHEN Lie-zun, YOU Kai-ming, *et al.* Characteristic of temporal wave-form and frequency spectrum of broad-band laser pulse stacked by chirped pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 1070-1077.  
王友文, 陈列尊, 游开明, 等. 啁啾脉冲堆积宽带激光的时间与频谱特性分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(6): 1070-1077.
- [11] LIU Lan-qin, LIN Hong-huan, PENG Zhi-tao, *et al.* Evolutionary rules of time modulation and intensity of stacked chirped pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1305-1309.  
刘兰琴, 林宏奂, 彭志涛, 等. 堆积脉冲时间调制及强度演化规律[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1305-1309.
- [12] LIU Lan-qin, LIN Hong-huan, SU Jing-qin, *et al.* Characteristics of amplification transmission of stacked chirped pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12): 2006-2010.  
刘兰琴, 林宏奂, 粟敬钦, 等. 小宽带堆积啁啾脉冲传输放大特性[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(12): 2006-2010.
- [13] XIA Yan-wen, SUN Zhi-hong, TANG Jun, *et al.* Research on pulse evolutionary of chirped pulse stacking in linear medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3286-3290.  
夏彦文, 孙志红, 唐军, 等. 啁啾堆积脉冲在线性介质中传输特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3286-3290.
- [14] HUANG Xiao-dong, ZHANG Xiao-min, LI Gui-qiu, *et al.* Characteristic and amplification of stacked chirped pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(1): 71-75.  
黄小东, 张小民, 李桂秋, 等. 啁啾脉冲堆积及其放大特性[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(1): 71-75.
- [15] ZHANG Ying, ZHU Qi-hua, ZENG Xiao-ming, *et al.* Small scale self-focusing effect of stacked chirped pulse propagation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(1): 45-48.  
张颖, 朱启华, 曾小明, 等. 啁啾堆积脉冲传输过程中的小尺度自聚焦效应[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(1): 45-48.
- [16] WANG You-wen, TANG Yi-qun, CHEN Lie-zun, *et al.* Characteristics of spatial modulation in nonlinear propagation of broad-band lasers stacked by chirped pulses [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(5): 1220-1224.  
王友文, 唐益群, 陈列尊, 等. 啁啾脉冲堆积宽带激光非线性传输空间调制特性[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(5): 1220-1224.
- [17] WANG You-wen, CHEN Lie-zun, ZHANG Li-fu, *et al.* Characteristics of temporal modulation in nonlinear propagation of broad-band lasers stacked by chirped pulses [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1823-1828.  
王友文, 陈列尊, 章礼富, 等. 啁啾脉冲堆积宽带激光非线性传输时域调制特性[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(8): 1823-1828.
- [18] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics and application of nonlinear fiber optics [M]. 3rd ed. New York: Academic Press, 2001.