

脉冲堆积方式产生整形脉冲的逆问题

曾曙光 张彬

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 在利用光纤脉冲堆积器进行脉冲时间整形时, 存在如何确定光纤脉冲堆积器各路的延时、衰减等参数以产生所需脉冲波形的问题。为此分非相干脉冲堆积和部分相干脉冲堆积两种情况, 定量分析了堆积脉冲的特性。在此基础上, 提出了一种逆算方法, 使得在任意给定时间波形情况下, 均可以通过该逆算方法, 简单而准确地计算出光纤脉冲堆积器参数。研究表明, 非相干堆积而成的脉冲波形较为平滑, 而部分相干堆积而成的脉冲波形则存在一定的调制; 按逆算结果堆积而成的脉冲波形与给定波形符合很好。

关键词 光纤与导波光学; 脉冲整形; 脉冲堆积; 逆问题; 惯性约束核聚变

中图分类号 TN245 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2272

Inverse Problem of Pulse Shaping by Pulse Stacking

Zeng Shuguang Zhang Bin

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

Abstract For the case of pulse shaping by optical fiber pulse stacker, there exists a problem that how to determine the parameters of optical fiber pulse stacker, such as time delay, attenuation, etc, to generate the temporal pulse shapes required in physical experiments. To solve this problem, the characteristics of incoherent and partially coherent pulse stacking have been analyzed quantitatively. Consequently, an inverse calculation method has been proposed, by which the parameters of optical fiber pulse stacker can be calculated simply and exactly for arbitrary temporal pulse shapes. The results show that the pulses stacked by incoherent pulse stacking are quite smooth, whereas the pulses stacked by partially coherent pulse stacking exhibit slight modulation. Furthermore, the stacked pulse shapes using the proposed inverse calculation method fit the given pulse shapes nicely.

Key words fiber and guided-wave optics; pulse shaping; pulse stacking; inverse problem; inertial confined fusion

1 引 言

在惯性约束核聚变(ICF)系统中, 为了实现对聚变靶丸的压缩和点火、抑制压缩过程中产生的不稳定性^[1]、提高压缩比和能量耦合效率、降低对激光能量的要求, 激光脉冲的精确时间脉冲整形^[2]已成为 ICF 前端系统的关键技术。现有的时间整形方案主要有泡克尔斯盒削波^[3]、集成光学调制器^[4]、光纤脉冲堆积器^[5~8]等。

迄今, 已有不少文献对利用光纤脉冲堆积器进行脉冲时间整形的原理及相关技术进行了理论和实验研究^[5~8]。然而, 在实际工作中, 人们关心的一

个问题是如何根据物理实验要求的整形脉冲时间波形, 简单而准确地确定光纤脉冲堆积器各路的延时及衰减系数等参数^[9], 以获得所要求的时间波形, 即利用脉冲堆积方式产生整形脉冲的逆问题。大多数文献只是讨论了如何利用光纤脉冲堆积器产生诸如平顶分布这样的具有特殊分布的时间脉冲, 或通过尝试性地设置光纤脉冲堆积器相关参数的方式来产生具有特定分布的时间波形^[5~8]。本文在定量分析光纤脉冲堆积器的原理及脉冲堆积特性的基础上, 提出了一种解决脉冲堆积方式产生整形脉冲逆问题的方法。对于任意给定时间波形, 可利用该逆

收稿日期: 2008-04-08; 收到修改稿日期: 2008-05-17

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0784)和四川省青年科技基金(05ZQ026-013)资助课题。

作者简介: 曾曙光(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事超短脉冲传输和放大研究。E-mail: zsg0519999@163.com

导师简介: 张彬(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光物理和技术的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com (通信联系人)

算方法, 简单而准确地计算出光纤脉冲堆积器相关参数, 以便地利用光纤脉冲堆积器实现任意时间波形的脉冲整形。

2 模 型

本文主要讨论啁啾脉冲经过光纤脉冲堆积器的叠加, 啁啾的引入可降低脉冲之间的相干性^[6~8]。啁啾脉冲堆积原理如图 1 所示^[5], 将一个百皮秒级的啁啾脉冲经光纤分束器分成若干子脉冲, 各子脉

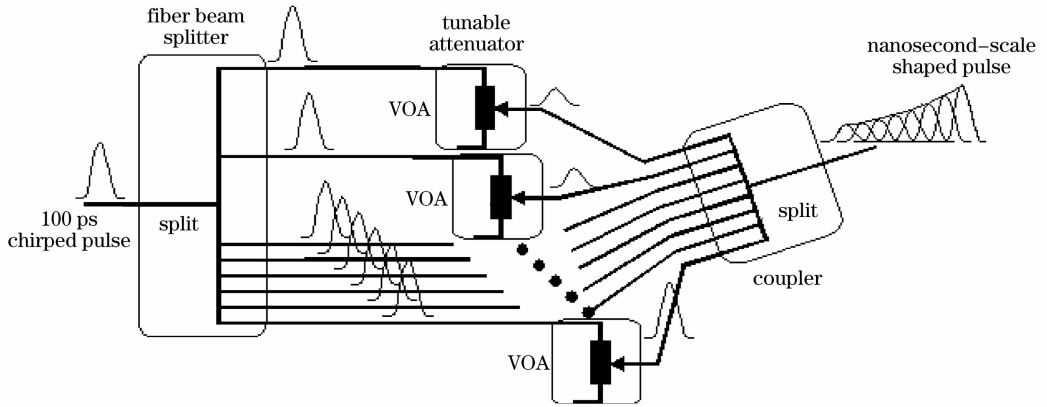


图 1 脉冲堆积示意图

Fig. 1 Schematic of pulse stacking

假定脉冲分束后的路数为 32, 中心频率为 1.79×10^{15} Hz(相应中心波长 1053 nm), 啁啾参量 C 为 61.5(相应脉冲谱宽为 1 nm)。

按相邻子脉冲之间的关联程度, 分非相干叠加和部分相干叠加两种情况讨论如何在给定输出波形的情况下, 确定光纤脉冲堆积器的延时系数、各路衰减系数等参数。

3 非相干叠加

子脉冲经脉冲堆积器非相干叠加后合成光强可表示为

$$I_{\text{sum}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n^2 \exp\left(-4 \ln 2 \frac{(t - nkT_w)^2}{T_w^2}\right), \quad (2)$$

式中 N 为脉冲总路数, α_n 为各路脉冲的振幅衰减系数, T_w 为子脉冲的半峰全宽(FWHM), k 为延时参数, kT_w 为相邻子脉冲的时间间隔。

采用不均匀度 η 来衡量叠加后脉冲的均匀性^[10], 即

$$\eta = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (3)$$

式中, I_{max} 、 I_{min} 分别为叠加后脉冲的最大和最小光强。

冲进入不同路光纤, 利用 PZT 控制光纤长度使各路脉冲之间存在一定的延时, 用可调光衰减器(VOA)控制各路脉冲的振幅大小, 再将各路光纤中的脉冲叠加产生所需的纳秒级整形脉冲。

假设单个子脉冲的归一化光场分布为

$$E(t) = \exp\{-[(1 + iC)/2](t/\tau)^2 - i\omega_0 t\}, \quad (1)$$

式中, τ 为光脉冲的 $1/e$ 半宽度, ω_0 为中心频率, C 为啁啾参量。

叠加后脉冲的脉宽 σ 可表示为

$$\sigma \cong NkT_w. \quad (4)$$

图 2 为延时参数 k 取不同值时, 经非相干叠加后的光强分布。计算中假定各路脉冲无衰减, 子脉冲宽度 $T_w = 100$ ps。可以看出, k 值越大, 光强不均匀度越大。这是因为当 k 较大时, 相邻脉冲分离得较开, 彼此交叠较少的缘故。经计算, 当 $k = 0.6$ 时, 光强不均匀度 $\eta = 0.01\%$; 当 $k = 0.7$ 时, 光强不均匀度 $\eta = 0.14\%$; 当 $k = 0.8$ 时, 光强不均匀度 $\eta = 0.77\%$; 当 $k = 0.9$ 时, 不均匀度 $\eta = 2.47\%$ 。

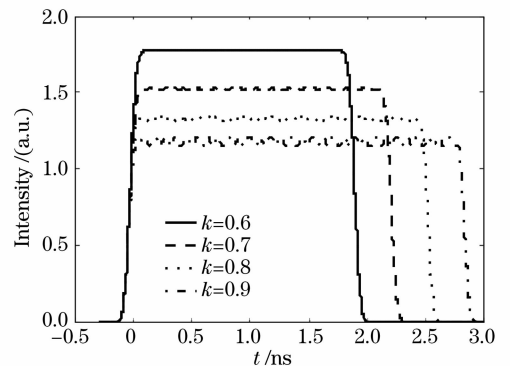


图 2 非相干叠加后的光强分布

Fig. 2 Intensity distributions of the stacked pulses by incoherent stacking

同时,还可以看出,当 k 值越大时,叠加后脉冲越宽。计算结果表明,在非相干叠加情况下,堆积脉冲的光强不均匀度与子脉冲的脉宽无关。对于非相干叠加情况, k 值在 0.6 到 0.9 之间取值较为适宜。

按照上述方法大致确定了各路延时参数 k 的取值后,可进一步根据所要求的整形脉冲波形,逐一确定各路脉冲的衰减系数 α_n 以及子脉冲的脉宽 T_w ,具体方法如下:

1) 确定各路衰减系数。将给定时间波形等分成 N 个区间, N 为光纤脉冲堆积器路数;分别计算出每个区间的“面积”,即时间积分 $S_i (i = 0, 1, 2, \dots, N-1)$,并找出其中的最大值 S_{\max} ;将各路振幅衰减系数取为 $\alpha_i = (S_i/S_{\max})^{1/2} (i = 0, 1, 2, \dots, N-1)$;

2) 由给定整形波形的时间范围 σ ,利用(4)式,可根据 k 值确定子脉冲脉宽或由子脉冲脉宽确定 k 的取值(若子脉冲的宽度固定时,其宽度要使得延时参数 k 在适宜区间内)。

引入平均偏差 δ 来衡量堆积所得到的波形 $I'(t)$ 与目标波形 $I_0(t)$ 之间的符合程度:

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^{N_t} |I'(j) - I_0(j)|}{N_t}, \quad (5)$$

式中 N_t 为时域采样点。

图 3 中实线为给定的整形脉冲波形,根据所给定的整形脉冲波形来确定脉冲堆积器相关参数。首先,在给出整形脉冲波形以及脉冲堆积器路数的情况下,根据步骤 1),可计算出各路衰减系数 α_i ;当延时参数 k 取为 0.7 时,根据给出的整形脉冲波形可得到时间范围 σ ,再按照步骤 2) 计算出子脉冲脉宽 $T_w = 223.2$ ps。为了验证逆算方法的有效性,图 3 中还给出了利用上述方法确定的延时参数 k 、

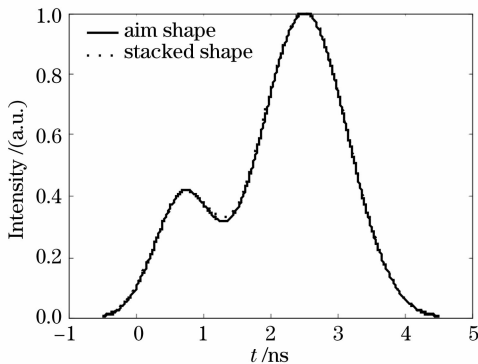


图 3 非相干叠加得到脉冲波形与目标波形的对比
Fig. 3 Comparison of the stacked pulse shape by incoherent stacking and the aimed pulse shape

各路衰减系数 α_i 以及子脉冲脉宽 T_w ,经脉冲堆积器叠加后的计算结果用虚线表示。可以看出,根据逆算得到脉冲堆积器相关参数后,经堆积所得到的波形与目标波形符合很好,经计算,其平均偏差 $\delta = 0.58\%$ 。还可以看出,曲线斜率变化较快部分尚存在较小的差别,这主要因为堆积路数有限。

4 部分相干叠加

子脉冲经脉冲堆积器叠加后脉冲场分布可表示为

$$E_n(t) = \sum_0^{N-1} \alpha_n \exp\{-[(1+iC)/2] \times [(t-n\Delta t)/\tau]^2 - i\omega_0(t-n\Delta t)\}, \quad (6)$$

式中, α_n 为各路脉冲的衰减系数, τ 为脉冲的 $1/e$ 半宽度, Δt 为延迟时间($\Delta t = kT_w$, k 为延时参数, T_w 为单个脉冲半高全宽), N 为子脉冲个数。

单个脉冲瞬时频率为

$$\omega(t) = \omega_0 + C(t-n\Delta t)/\tau^2. \quad (7)$$

由于相邻脉冲之间相互交叠,且各路脉冲均来自相同的光源,因此,脉冲堆积方式存在着各路脉冲之间相互干涉的问题。但对于单个啁啾激光脉冲来说,根据(7)式可知,脉冲在不同时刻所对应的频率不同。因此,在叠加时,相邻脉冲之间的干涉效应将减弱。然而,由于相邻脉冲重叠部分的频率差恒定且初始相位相同,叠加后的脉冲会出现“拍频”的现象,从而导致叠加后的脉冲时间波形出现周期性“调制”(高低起伏)。

调制周期可表示为

$$T = 2\pi\tau^2/C\Delta t. \quad (8)$$

由(8)式可知,单个脉冲脉宽越窄,啁啾参数 C 越大,时延 Δt 越大,则调制周期越小,调制频率越高。例如,当 $T_w = 100$ ps, $C = 61.5$, $\Delta t = 80$ ps 时,调制周期为 4.6 ps。在实际工作中,由于受光脉冲检测仪器响应时间的限制,如此高频率的光强调制一般不能被检测出来。此外,由于激光与等离子体相互作用时,等离子体的热化时间为 10 ps 量级,因此,只要脉冲叠加后形成的光强高频调制周期小于 10 ps 左右,则光强高频调制对激光-等离子体相互作用没有明显影响。此时,叠加后的光强分布可等效于瞬时光强在一定时间范围内平均后的光强分布。

图 4(a) 给出了部分相干叠加后光强的瞬时分布,图 4(b) 为 32.8 ps 间隔内取平均后(相当于探测器的时间分辨率为 32.8 ps)的光强分布。计算所用参数: $k = 0.8$, $T_w = 100$ ps,此时不考虑衰减系

数。从图4可以看出, 叠加后的光强瞬时分布是一系列的周期仅为4.6 ps的“峰”, “峰高”约为2.2, 这是“拍频”效应的结果。当间隔时间为32.8 ps时, 得到的“平均”光强分布较为平坦, 仅有细微“起伏”, 不均匀度 $\eta = 1.39\%$ 。计算结果表明, 当 $k > 1.0$ 时, 光强分布不均匀度均较大。这是因为当 $k > 1.0$ 时, 相邻脉冲分离得太过开, 彼此交叠太少

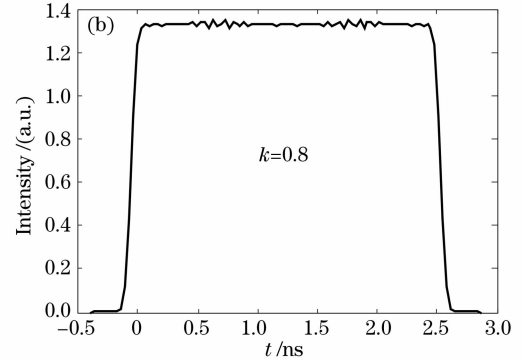
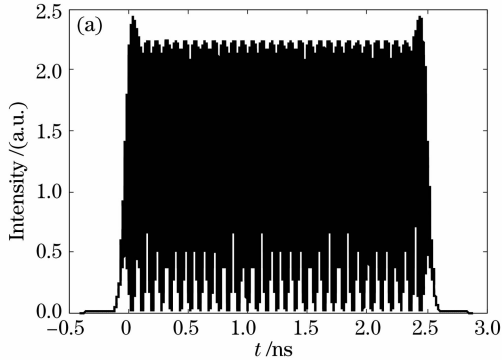


图4 部分相干叠加后的光强分布

Fig. 4 Intensity distributions of the pulse by partially coherent stacking

部分相干叠加时光纤脉冲堆积器的逆算法如下:

1) 确定各路衰减系数: 将给定时间波形等分成 N 个区间, N 为光纤脉冲堆积器路数; 分别计算出每个区间的“面积”, 即时间积分 $S_i (i = 1, 2, \dots, N-1)$, 并找出其中的最大值 S_{\max} ; 将各路振幅衰减系数取为 $\alpha_i = (S_i/S_{\max})^{1/2} (i = 0, 1, 2, \dots, N-1)$;

2) 由给定整形波形的时间范围 σ , 利用(4)式, 可根据 k 值确定子脉冲脉宽或由子脉冲脉宽确定 k 的大致取值(若子脉冲的宽度固定时, 其宽度要使得延时参数 k 在适宜区间内);

3) 适当调整 k 的值或子脉冲的宽度使得堆积出来的脉冲与目标波形之间的偏差尽可能的小(通过一计算程序可找到 k 的最佳值)。

以图5中给定的整形脉冲波形实线为例, 根据所给定的整形脉冲波形来确定脉冲堆积器相关参数。首先, 在给出的整形脉冲波形以及脉冲堆积器路数情况下, 根据步骤1), 可计算出各路衰减系数 α_i ; 当子脉冲脉宽取为100 ps时, 根据整形脉冲波形可得到时间范围 σ , 再按照步骤2) 计算出延时参数 $k \approx 0.8$; 根据步骤3), 微调 k 的值, 当 $k = 0.794$ 时, 堆积出来的脉冲与目标波形之间的偏差较小。为了验证逆算方法的有效性, 图5中还给出了利用上述方法确定的延时参数 k 、各路衰减系数 α_i 以及子脉冲脉宽 T_w , 经脉冲堆积器叠加后的计算结果, 在图中用虚线表示。由图5可看出, 根据逆算得到

的缘故。而当 k 太小时, 叠加后脉冲宽度不够。本文计算表明, 部分相干叠加时, k 在0.6到1.0之间时较为适宜。另外, 分析(8)式可知, 调制周期与延时参数以及子脉冲脉宽有关, 从而导致部分相干叠加后光强分布敏感地依赖于延时参数和子脉冲脉宽。因此, 为达到较好的堆积结果, 需要调整好延时参数和子脉冲脉宽。

脉冲堆积器相关参数后, 经脉冲堆积所得到的波形与目标波形符合较好, 经计算, 其平均偏差 $\delta = 1.54\%$ 。由于部分相干叠加时存在“拍频效应”, 导致光强有一定的调制, 故部分相干叠加后波形的偏差要比完全非相叠加时的稍大。

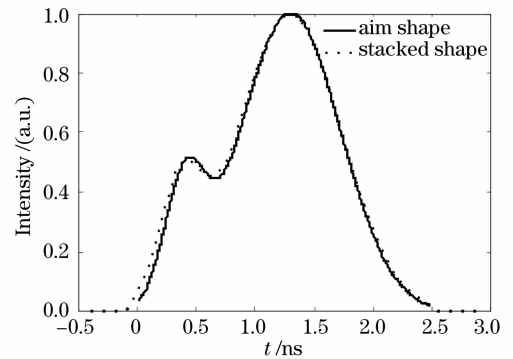


图5 部分相干叠得到脉冲波形与目标波形的对比

Fig. 5 Comparison of the stacked pulse shape by partially coherent stacking and the aimed pulse shape

5 结 论

从完全非相干叠加和部分相干叠加两种情况, 讨论了啁啾脉冲经过光纤脉冲堆积器堆积后的光强分布特性。研究结果表明, 对于非相干叠加时, 叠加后的脉冲较为平滑, 且不均匀度仅与延时参数有关, 而与子脉冲宽度无关。对于部分相干叠加情况, 叠加后的脉冲则存在一定的调制, 且光强不均

匀度与延时参数和子脉冲宽度均有关。在此基础上,本文提出了一种逆算方法,可用于解决光纤脉冲堆积器的逆问题。该逆算方法原理简单,计算方便,且按该方法堆积出来的脉冲波形与目标波形符合很好。

参 考 文 献

- 1 Nuckolls J, Wood L *et al.*. Laser compression of matter to super-high densities: thermonuclear (CTR) application [J]. *Nature*, 1972, **239**(15): 139~142
- 2 Okishev A, Skeldon M D, Letzring S A *et al.*. The pulse-shaping system for the 60-beam, 30-kJ OMEGA laser [C]. *Proc. of SPIE*, 1996, **2770**: 10~18
- 3 Lu Xiuquan, Chen Shaoh. A system for arbitrary shaping of Q switch laser pulses using KTP pockels cell and microstrip transmission lines[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **26**(8): 691~695
卢秀权, 陈绍和. 用低压 KTP 普克尔盒和微带传输线进行调 Q 长脉冲的任意整形[J]. *中国激光*, 1999, **26**(8): 691~695
- 4 Wang Chun, Chen Shaoh, Ma Zhonglin *et al.*. The realization of the arbitrary shaping of the laser pulse by the integrated optical modulator in the ICF solid-state laser driver II. The integrated optical modulator[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2001, **18**(6): 530~534
王 春, 陈绍和, 马忠林 等. 利用集成光学调制器实现 ICF 固体激光驱动器中激光脉冲任意整形 II. 集成光学调制器[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(6): 530~534
- 5 Ji Fan, Sui Zhan, Li Feng *et al.*. Analysis of pulse smoothing by multi-pulse interference in time domain[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(3): 401~404
纪 帆, 隋 展, 李 锋 等. 时域延时多脉冲叠加平滑过程的分析[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(3): 401~404
- 6 Matsuoka S, Miyayama N, Ando A *et al.*. Flexible pulse shaping of partially coherent light on GEKKO XII [C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2633**: 627~633
- 7 Hu Zhengliang, Hu Yongming, Zhao Minghui *et al.*. Analysis and simulation of optical 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
- 8 Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 466~470
林宏奂, 隋 展, 王建军 等. 啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 466~470
- 9 Lü Baida. Propagation and control of high-power lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995, 323~324
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995, 323~324
- 10 Lü Baida. *Laser Optics (Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003, 84~85
吕百达. 激光光学(光束描述、传输变换与光腔技术物理)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003, 84~85