

不同波形脉冲激光的时域误差对相干合成的影响

粟荣涛 周朴 王小林 冀翔 许晓军[†]

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011年7月18日收到; 2011年12月16日收到修改稿)

相干合成技术是实现高功率、高亮度光纤激光系统的重要技术途径. 然而, 脉冲激光阵列中常常存在时域误差, 这将影响脉冲激光的相干合成效果. 建立了脉冲激光存在时域误差时的相干合成理论模型, 并在不同波形(方波、三角波、正弦波)的脉冲激光存在时域误差时, 对相干合成光束在远场的脉冲波形、峰值功率、光强分布和桶中功率(PIB)等特性进行了数值计算和对比分析. 计算结果表明: 方波脉冲激光相干合成光束的脉冲波形受时域误差影响严重, 光强分布和 PIB 随着时域误差的增大发生线性变化; 三角波脉冲激光相干合成光束的脉冲波形和峰值功率受时域误差影响严重, 光强分布和 PIB 在时域误差较大时随着时域误差的增大发生较为剧烈的变化; 正弦波脉冲激光相干合成光束具有较好的输出特性, 在两路正弦波脉冲激光相干合成中, 将两脉冲之间的时延控制在脉冲持续时间的 10% 以内, 就能取得良好的合成效果.

关键词: 高能激光, 脉冲激光, 相干合成

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Jf, 42.81.Qb

1 引言

高功率脉冲激光在材料处理、激光加工、遥感、激光雷达和非线性光频转换等领域有着广泛的应用. 光纤激光器具有散热性能好、系统结构紧凑、光束质量高等特点, 在高功率激光应用领域比传统的固体激光器更具优势^[1]. 然而, 由于受到掺杂光纤的非线性效应、热损伤等影响, 单根光纤的输出功率受到限制. 相干合成能够在提高输出功率的同时保持良好的光束质量, 达到近衍射极限输出, 因而相干合成有着广阔的应用前景. 由于脉冲激光的相位检测和控制、各路脉冲时域同步等难度较大, 因而光束合成的研究主要集中于连续光领域^[2-6]. 随着连续光纤激光相干合成技术的成熟以及工业、科研等领域对高功率脉冲激光需求的不断提升, 脉冲激光相干合成已成为研究热点^[7-12]. 连续激光的相干合成效果受阵列形状、占空比、倾斜误差、相位误差、偏振误差和单路光束质量等影响^[13-16]. 脉冲激光的相干合成除了受上述因素影响之外, 另一个非常重要的因素就是脉冲间的时域误差, 即各路脉冲激光在时域上不同步. 为了

得到理想的合成效果, 需要各路脉冲激光在时域上保持一致^[17]. 切割熔接光纤和空间光路调节能够粗略地对各路激光的光程进行调节, 采用电子延迟线^[18]和光纤延迟线^[19]等方法可以对各路激光的光程进行更高精度的调节, 但也不可能使各路激光的光程差达到完全一致. 因此, 时域误差是脉冲激光相干合成中必须考虑的重要因素. 本文作者至今尚未见到关于脉冲激光时域误差对相干合成影响的详细报道. 本文的目的在于建立脉冲激光存在时域误差时的相干合成理论模型, 通过数值计算研究不同波形的脉冲激光存在不同时间域误差时对相干合成的影响程度, 为脉冲激光的相干合成提供有价值的参考.

2 理论模型

假设相干合成光束发射端位于 $z = 0$ 平面, 所有子光束沿 z 轴传输. $E_n(x, y, z, t)$ 为光束中心位置在 (a_n, b_n) 处的光束在 t 时刻的光波复振幅. 由于光纤激光器容易实现单横模输出, 假设子光束复振幅均服从高斯分布. 当各光束相位差

[†] E-mail: xuxj@21cn.com

为零时, 阵列光束就能实现相干合成, 省略指数项 $\exp[-i\omega t + \phi]$, $E_n(x, y, z, t)$ 可以表示为

$$E_n(x, y, z, t) = A_n(t) \frac{1}{\omega(z)} \exp \left[-\frac{r_n^2}{\omega^2(z)} \right] \times \exp \left\{ -i \left[k \left(z + \frac{r_n^2}{2R(z)} \right) - \arctan \frac{z}{f} \right] \right\}, \quad (1)$$

$$r_n^2 = (x_n - a_n)^2 + (y_n - b_n)^2, \quad (2)$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}, \quad (3)$$

$$R(z) = z + f^2/z, \quad (4)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢量, $f = \pi\omega_0^2/\lambda$ 为高斯光束的共焦参数, $A_n(t)$ 为随时间变化的振幅, 该项决定了脉冲波形. 在传输距离 L 后, 接收面 ($z = L$) 处的合成光束的复振幅可以表示为

$$E(x, y, L, t) = \sum_n^N E_n(x, y, L, t), \quad (5)$$

合成光束的光强可以表示为

$$I(x, y, L, t) = E(x, y, L, t)E^*(x, y, L, t). \quad (6)$$

在脉冲激光的相干合成中, 各路激光之间通常会存在时域误差, 如图 1 所示.

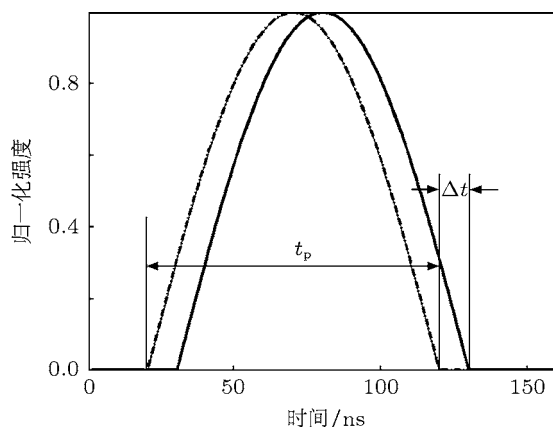


图 1 两脉冲激光时域误差示意图

图 1 中 Δt 表示两脉冲间的时间差, t_p 表示一个脉冲持续的时间. 脉冲激光合成光束的脉冲波形和远场光强分布可分别表示为

$$I(t) = \iint_s E(x, y, L, t)E^*(x, y, L, t)dx dy, \quad (7)$$

$$I(x, y, z) = \int_{t_1}^{t_2} E(x, y, L, t)E^*(x, y, L, t)dt. \quad (8)$$

合成光束的脉冲波形和远场光强分布将会受到脉冲激光之间的时域误差的影响.

3 数值计算及讨论

根据给出的数学模型, 对相干合成光束在不同时域误差和不同波形条件下的合成效果进行数值计算. 为了便于讨论, 本文研究如图 2 所示的两束激光的相干合成, 并设基模高斯光束的腰斑半径 ω_0 为 1 cm, 两光斑中心的间距为 3 cm, 传输距离 L 为 10 km. 以最常见的方波、三角波、正弦波为例, 计算两脉冲的时域误差对远场合成光束的脉冲波形、峰值功率、光强分布和 PIB 的影响.

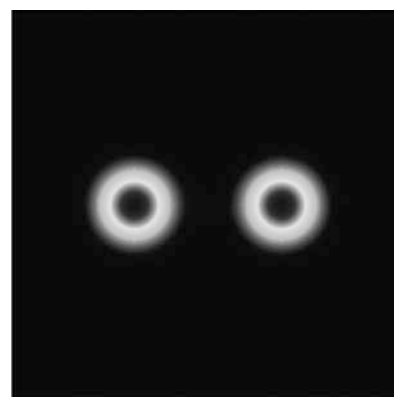


图 2 相干合成激光阵列分布

3.1 脉冲波形和峰值功率

图 3、图 4 和图 5 为相干合成光束存在不同的时域误差 (以 $\Delta t/t_p$ 表示) 时的脉冲波形. 由图 3 和图 4 可以看出, 方波和三角波脉冲激光的合成光束的脉冲波形由于脉冲时延 Δt 的存在而发生严重畸变. 由图 5 可以看出, 正弦波脉冲激光合成光束的脉冲波形在 $\Delta t/t_p < 0.3$ 时能够较好地保持正弦波形状. 此外, 三角波脉冲激光合成光束的峰值功率将会由于时延 Δt 的存在而大幅度减小. 方波和正弦波脉冲激光的合成光束的峰值功率受时域误差的影响相对较小, 方波脉冲激光合成光束的峰值功率只有当两路脉冲激光在时域上完全错位时才会发生变化, 正弦波脉冲激光合成光束在 $\Delta t/t_p$ 为 0.1 和 0.2 时的峰值功率分别是不存在时域误差时峰值功率的 97.5% 和 90.3%. 由此可知, 当时域误差 $\Delta t/t_p < 0.2$ 时, 正弦波脉冲激光合成光束具有较好的脉冲波形和较高的峰值功率.

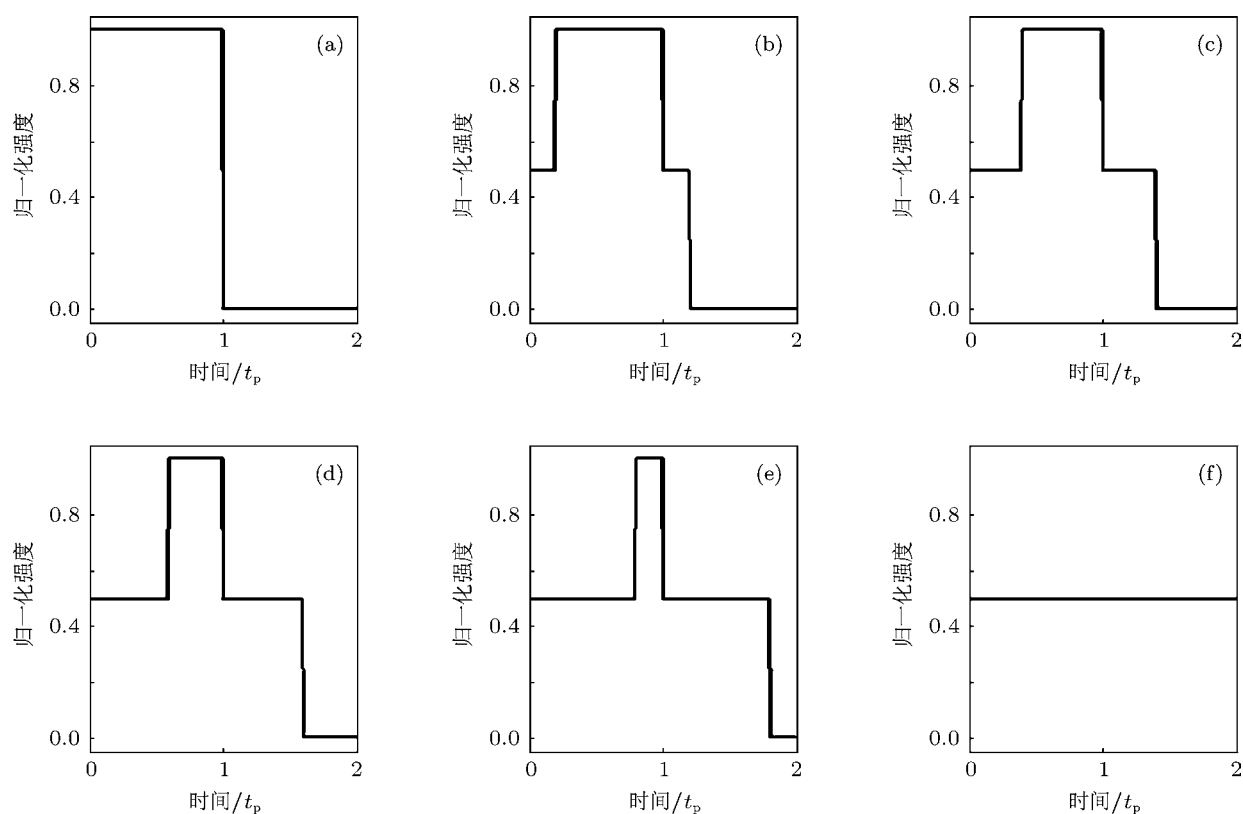


图3 方波脉冲激光合成光束在不同时域误差时的脉冲波形 (a) $\Delta t/t_p = 0$; (b) $\Delta t/t_p = 0.2$; (c) $\Delta t/t_p = 0.4$; (d) $\Delta t/t_p = 0.6$; (e) $\Delta t/t_p = 0.8$; (f) $\Delta t/t_p = 1$

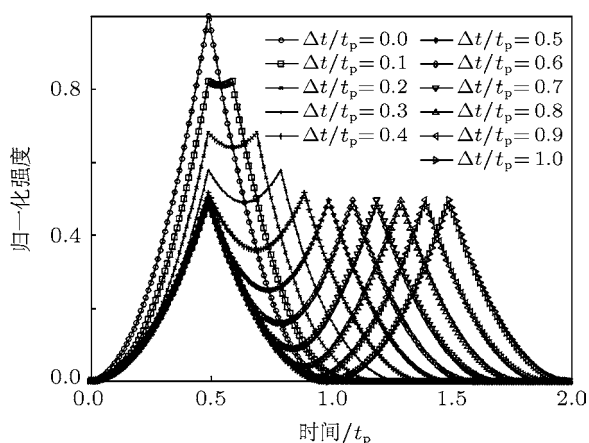


图4 三角波脉冲激光合成光束在不同时域误差时的脉冲波形

3.2 光强分布

脉冲激光相干合成光束在远场的长曝光光强分布(以正弦波为例)如图6所示.由图6可以看出:当时域误差较小(如 $\Delta t/t_p = 0.2$)时,远场光斑基本保持不变,能够观察到明显的干涉条纹;随着时域误差的增大,合成光束的光强分布发生显著变化;当时域误差进一步增大,干涉条纹逐渐消失,其

效果相当于非相干合成.

在不同时域误差时合成光束在 x 轴上的光强分布如图7所示.从图7可以看出,不同波形脉冲激光的合成光束光强分布受时域误差的影响程度不同,方波脉冲激光合成光束的光强分布随着时域误差的增大而发生较为平稳的变化,三角波和正弦波脉冲激光的合成光束的光强分布在 $\Delta t/t_p > 0.2$ 后,将随着时域误差的增加发生较为剧烈的变化.

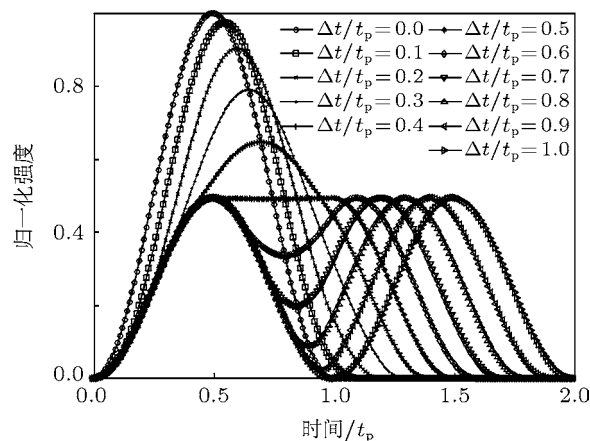


图5 正弦波脉冲激光合成光束在不同时域误差时的脉冲波形

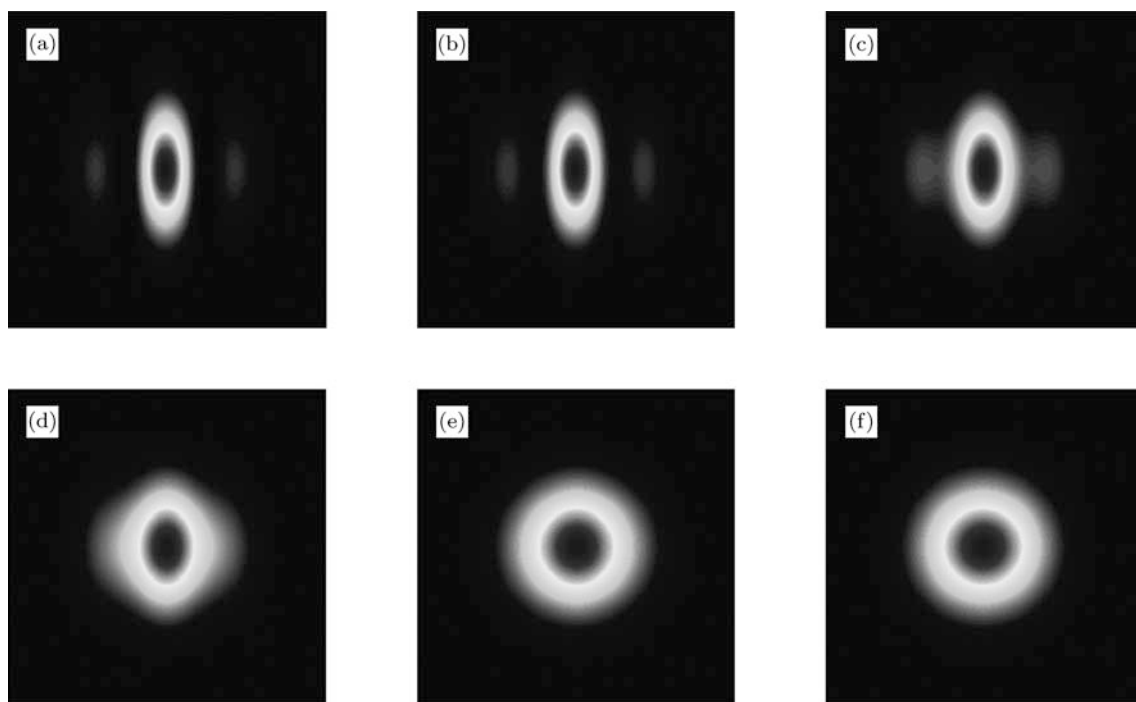


图6 正弦波脉冲激光合成光束在不同时域误差时的长曝光光强分布 (a) $\Delta t/t_p = 0$; (b) $\Delta t/t_p = 0.2$; (c) $\Delta t/t_p = 0.4$; (d) $\Delta t/t_p = 0.6$; (e) $\Delta t/t_p = 0.8$; (f) $\Delta t/t_p = 1$

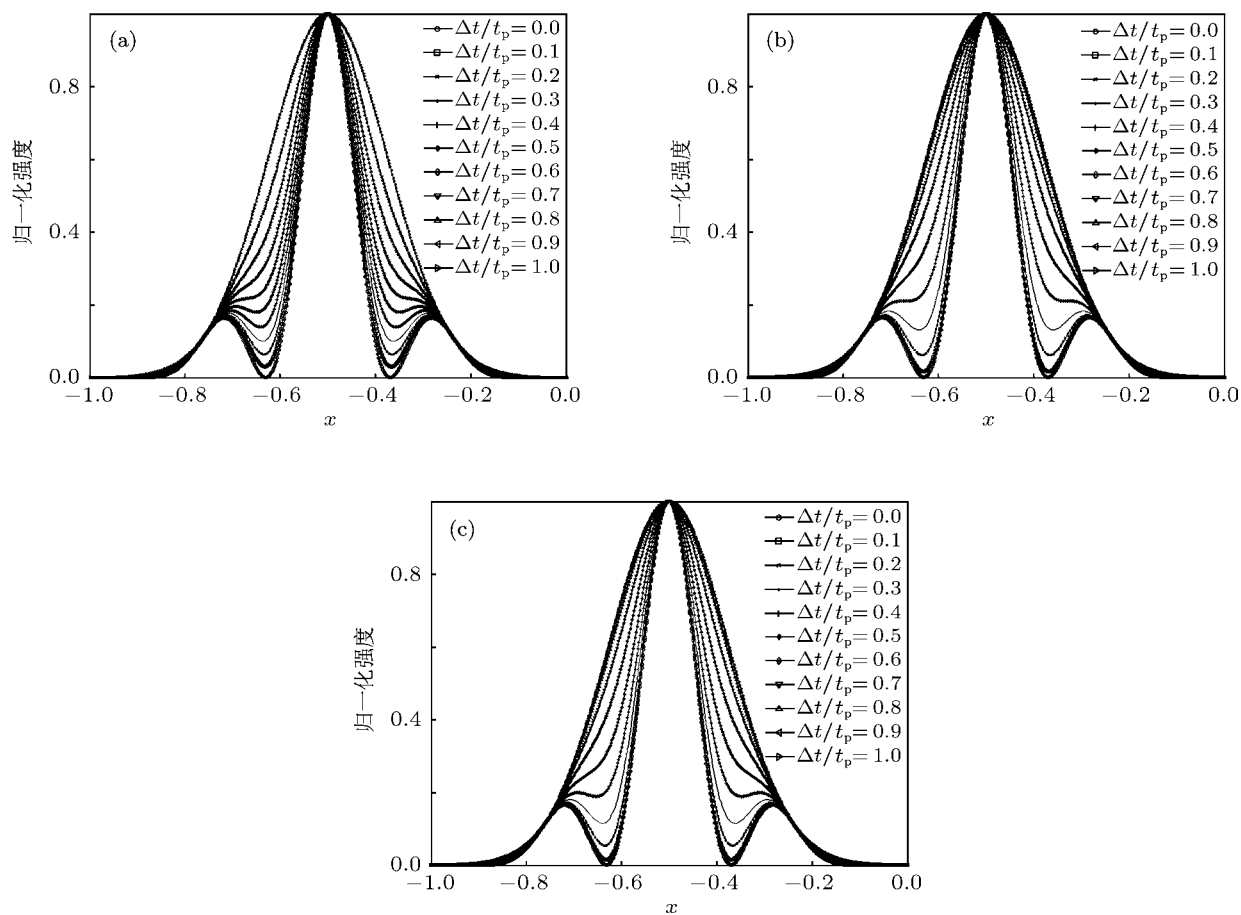


图7 合成光束在不同时域误差时的长曝光光斑图样的 x 轴光强分布 (a) 方波; (b) 三角波; (c) 正弦波

计算得到的远场条纹可见度 $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 如图 8 所示, I_{\max} 和 I_{\min} 分别表示远场干涉条纹中心亮条纹相邻条纹的光强极大值和极小值. 当 $\Delta t/t_p < 0.2$ 时, 正弦波脉冲激光的合成光束具有最好的条纹可见度, 只要满足 $\Delta t/t_p = 0.1$, 其条纹可见度就高达 0.97.

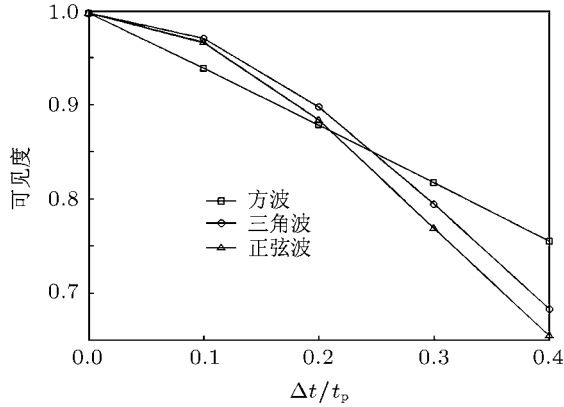


图 8 合成光束在不同时域误差时的条纹可见度

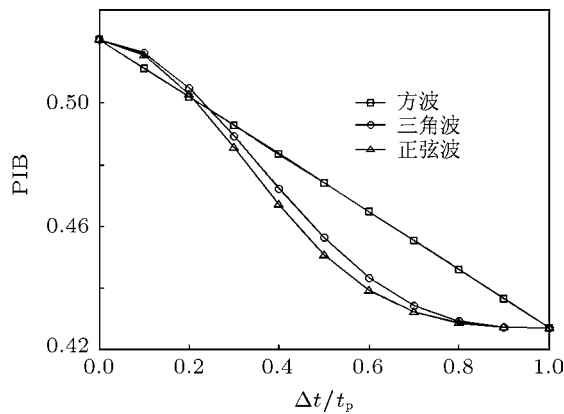


图 9 合成光束在不同时域误差时的 PIB

3.3 桶中功率 (PIB)

PIB P_{in} 定义为远场给定尺寸的“桶”中包含的激光能量与总能量之比, PIB 曲线是衡量激光光束质量的重要指标, 此处用于对相干合成效果的评

价. P_{in} 可表示为

$$P_{in} = \frac{\iint I(x, y, L, t) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, L, t) dx dy}, \quad (9)$$

其中 s 为给定尺寸“桶”的横截面面积. 以时域误差为零时远场光斑的亮条纹为圆心, 以该圆心与它相邻的光强具有极小值的暗条纹之间的距离为半径, 定义一个圆形的“桶”, 计算得到的 PIB 与时域误差的关系如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 当 $\Delta t/t_p < 0.2$ 时, 正弦波脉冲激光的合成光束具有较高的 PIB; 当 $\Delta t/t_p = 0.1$ 时, 正弦波脉冲激光的合成光束的 PIB 仅从 0.5204 降低到 0.5160.

4 结论

对脉冲时域误差和脉冲波形对脉冲激光相干合成效果的影响进行了理论分析和模拟仿真. 通过对比分析两路脉冲激光在不同波形 (方波、三角波、正弦波) 和不同时域误差的情况下, 远场合成光束的脉冲波形、峰值功率、光强分布和 PIB 的变化情况, 研究了不同波形脉冲激光的时域误差对相干合成的影响程度. 计算结果表明: 方波脉冲激光相干合成光束的脉冲波形受时域误差影响严重, 光强分布和 PIB 随着时域误差的增加发生线性变化, 只有当两路脉冲激光在时域上完全错位时峰值功率才会发生变化; 三角波脉冲激光相干合成光束的脉冲波形和峰值功率受时域误差影响严重, 光强分布和 PIB 在时域误差较大时随着时域误差的增大而发生较为剧烈的变化; 正弦波脉冲激光相干合成光束具有较好的输出特性, 当 $\Delta t/t_p < 0.2$ 时, 其合成光束具有较高的条纹可见度和 PIB. 研究表明, 以正弦波为脉冲波形的两路脉冲激光相干合成中, 没有必要使两路激光在时域上严格同步, 将脉冲时延控制在 10% 以内就能使合成光束具有较好的脉冲波形、峰值功率、光强分布和 PIB 等特性. 本文的计算结果可为脉冲激光的相干合成提供有价值的参考.

[1] Zhao H M, Lou Q H, Zhou J, Dong J X, Wei Y R, Wang Z J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3525 (in Chinese) [赵宏明, 楼祺洪, 周军, 董景星, 魏运荣, 王之江 2008 物理学报 **57** 3525]
 [2] Liu Y, Cheng Y, Xu L X, Zheng R, Wang X B, Wang H S, Lu C

Y, Sun B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3929 (in Chinese) [刘洋, 程勇, 许立新, 郑睿, 王小兵, 王会升, 卢常勇, 孙斌 2009 物理学报 **58** 3929]
 [3] Wang J M, Duan K L, Wang Y S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5627 (in

- Chinese) [王建明, 段开棕, 王屹山 2008 物理学报 **57** 5627]
- [4] Yang R F, Yang P, Shen F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8297 (in Chinese) [杨若夫, 杨平, 沈锋 2009 物理学报 **58** 8297]
- [5] Xue Y H, Zhou J, He B, Li Z, Qi Y F, Liu C, Lou Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7869 (in Chinese) [薛宇豪, 周军, 何兵, 李震, 漆云凤, 刘驰, 楼祺洪 2010 物理学报 **59** 7869]
- [6] Fan X Y, Liu J J, Liu J S, Wu J L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2462 (in Chinese) [范馨燕, 刘京郊, 刘金生, 武敬力 2010 物理学报 **59** 2462]
- [7] Paurisse M, Hanna M, Druon F, Georges P 2010 *Opt. Lett.* **35** 1428
- [8] Zhou P, Chen Z L, Wang X L, Li X, Liu Z J, Xu X J, Hou J, Jiang Z F 2008 *Chin. Opt. Lett.* **6** 523
- [9] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Xu X J, Liu Z J, Zhao Y J 2010 *Laser Phys.* **20** 1453
- [10] Lombard L, Azarian A, Cadoret K, Bourdon P, Goulard D, Canat G, Jolivet V, Jaouën Y, Vasseur O 2011 *Opt. Lett.* **36** 523
- [11] Daniault L, Hanna M, Lombard L, Zaouter Y, Mottay E, Goulard D, Bourdon P, Druon F, Georges P 2011 *Opt. Lett.* **36** 621
- [12] Zhang M, Kelleher E J R, Pozharov A S, Obraztsova E D, Popov S V, Taylor J R 2011 *Opt. Lett.* **36** 3984
- [13] Lü B, Ma H 2000 *Appl. Opt.* **39** 1279
- [14] Zhou P, Liu Z, Xu X J, Chen Z L 2008 *Appl. Opt.* **47** 3350
- [15] Xiao R, Zhou P, Hou J, Jiang Z F, Liu M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 819 (in Chinese) [肖瑞, 周朴, 侯静, 姜宗福, 刘明 2007 物理学报 **56** 819]
- [16] Zhou P, Chen Z L, Wang X L, Li X, Liu Z J, Xu X 2009 *Chin. Opt. Lett.* **7** 39
- [17] Seise E, Klenke A, Limpert J, Tünnermann A 2010 *Opt. Express* **18** 27828
- [18] Schmidt O, Andersen T V, Limpert J, Tünnermann A 2009 *Opt. Lett.* **34** 226
- [19] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, Goldizen K C, Murphy D V, Sanchez A, Fan T Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 2686

Influence of temporal error with different pulse shapes on coherent beam combination system

Su Rong-Tao Zhou Pu Wang Xiao-Lin Ji Xiang Xu Xiao-Jun[†]

(College of Optic-electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 18 July 2011; revised manuscript received 16 December 2011)

Abstract

Coherent beam combination of fiber laser array is an important technology for high-power output fiber laser systems. However, the coherent beam combination is influenced by temporal error, which always exists in the laser array. The coherent beam combination of pulse fiber lasers in the presence of temporal error is investigated in theory in this paper. The effects of pulse shape and temporal error on the coherently combined beam are studied. The characteristics of combined beam, i.e. pulse shape, peak power, far-field pattern and power in barrel (PIB) are calculated and analyzed when the pulse shapes (including square, triangle and sine) and temporal errors are different. It is revealed that for coherently combining square pulse lasers, the pulse shape of the combined beam changes acutely because of temporal error, and the far-field pattern and PIB change proportionally with temporal error increasing; for coherently combining triangle pulse lasers, the pulse shape and the peak power of the combined beam are acutely influenced by temporal error, and the far-field pattern and the PIB change acutely when temporal error is large. It is revealed that coherently combined beam of sinusoidal pulse lasers has good characteristics when two pulse laser with sinusoidal pulse shapes are coherently combined and the time delay between the two pulses is less than 10% of pulse duration.

Keywords: high power laser, pulse laser, coherent beam combination

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Jf, 42.81.Qb

[†] E-mail: xuxj@21cn.com