

高功率激光装置中调频小宽带脉冲的时间波形与光谱的关联特性

李磊^{1,2,3}, 张波¹, 夏彦文¹, 彭志涛¹, 董军¹, 孙志红¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900;

³中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 针对调频小宽带脉冲传输过程中调频到调幅(FM-to-AM)效应的演化规律, 结合理论模拟与实验验证, 研究了不同线宽下不同级次光谱缺失或损耗所引起的脉冲的时间波形变化量及变化特征, 结果表明波形调制与光谱成分缺失量成线性增长关系, 波形调制的轮廓与缺失光谱成分在光谱中的位置相关。这些结果为 FM-to-AM 效应的预补偿和抑制提供了依据, 对激光器安全运行和改善物理实验效果具有一定意义。

关键词 激光器; 调频到调幅效应; 调频脉冲; 脉冲光谱; 高功率激光

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.101405

Correlation of Temporal Profile and Spectrum for Small Broadband Frequency Modulation Pulse in High Power Laser Facility

Li Lei^{1,2,3}, Zhang Bo¹, Xia Yanwen¹, Peng Zhitao¹, Dong Jun¹, Sun Zhihong¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Mianyang, Sichuan 621900, China;

³Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract In allusion to the frequency modulation to amplitude modulation (FM-to-AM) effect in the transmission process of small broadband frequency modulation pulse, variation of pulse waveform and characteristics caused by loss of different orders in the spectrum is studied, combining theoretical simulation with experimental validation. The results show that the waveform modulation increases linearly with the loss of spectral component, and the outline of waveform modulation is associated with the positions of the missing spectral components in the spectrum. The results provide the basis of precompensation and inhibition of FM-to-AM effect, and make a certain significance for safe operation of laser facility and improvement of physical experiment results.

Key words lasers; amplitude modulation to frequency modulation effect; frequency modulation pulse; pulse spectrum; high power laser

OCIS codes 140.3295; 140.3510; 060.2300

1 引言

在高功率激光装置中,为了抑制受激布里渊散射(SBS)效应和改善束匀滑效果^[1-3],前端通常采用调频小宽带脉冲作为注入种子源^[4]。调频脉冲在传输放大和频率转换的过程中,受增益窄化、色散、频率转换器带宽有限^[5-9]、光束传输^[10]和液晶等光学元件^[11]的影响,各频率成分强度和相位的改变不一致,产生脉冲时

收稿日期: 2017-04-08; 收到修改稿日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61377102,61605185)

作者简介: 李磊(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤取样测量方面的研究。E-mail: lilei201213@sina.cn

导师简介: 彭志涛(1972—),男,博士,研究员,主要从事高功率激光装置损伤在线检测方面的研究。

E-mail: peng_zhitao@163.com(通信联系人)

间波形调制,即调频到调幅(FM-to-AM)效应^[12]。波形调制引起的波形瞬时功率变化会增加光学元件的损伤风险并导致束间辐照不均匀,放大等离子体不稳定性,对激光器自身安全和物理实验效果造成不良影响,应加以补偿和抑制。

本文针对调频小宽带脉冲 FM-to-AM 效应转化过程进行了定性理论分析和定量模拟计算,结合理论模拟与实验验证,研究了在一定线宽下不同级次光谱缺失或损耗所引起的脉冲波形变化量及变化特征。所获得的相关结果为 FM-to-AM 效应预补偿和抑制提供了依据,对激光器安全运行和改善物理实验效果具有一定意义。

2 理论仿真

高功率激光装置中通常采用正弦相位调制的调频小宽带脉冲作为注入种子源,时间波形为

$$E(t) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2m}\right] \exp[i2\pi\nu_0 t + iM\sin(2\pi\nu_m t)], \quad (1)$$

由(1)式傅里叶变换得脉冲光谱为

$$\tilde{E}(\nu) = \tilde{E}_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} A(k, M) \cdot \delta(\nu - k\nu_m - 2\pi\nu_0), \quad (2)$$

式中 m 为超高斯阶数, t_0 为脉冲 $1/e$ 脉宽, ν_m 为相位调制频率, M 为相位调制深度, ν_0 为中心频率, k 为光谱级次, $A(k, M)$ 为光谱幅度包络。

结合高功率激光装置光谱色散匀滑技术以及抑制受激布里渊散射的要求,模拟选取的脉冲函数参数如文献[13]。不考虑光谱相位变化,采用傅里叶逆变换对调频小宽带脉冲不同级次光谱缺失所引起的 FM-to-AM 效应进行仿真计算。波形强度调制度为

$$M_i = 2 \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

式中 I_{\max} 为波形强度的波峰值, I_{\min} 为波形强度的波谷值。

模拟结果显示,中心频率(k_0 级次)缺失量由 1% 增大到 60%,波形强度调制度由 0.56% 近似线性增大到 61.43%,斜率为 1.050。边缘频率(k_8 级次)缺失量由 1% 增大到 60%,波形强度调制度由 0.37% 近似线性增大到 41.72%,斜率为 0.7150。为了进一步研究波形强度调制度与光谱成分缺失量的关系,图 1 给出了中间级次 $k_1 \sim k_7$ 光谱缺失对波形的影响曲线图。表 1 所示为光谱成分的相对能量和波形强度调制度与光谱成分缺失量关系曲线的斜率。光谱成分的相对能量从大到小依次为 $k_6, k_0, k_5, k_2, k_7, k_3, k_8$ 和 k_1 ; 曲线的斜率代表光谱成分缺失量对脉冲波形强度调制度的影响力,从大到小依次为 $k_6, k_5, k_7, k_0, k_3, k_2, k_8$ 和 k_1 。模拟结果表明,随脉冲光谱成分缺失量增大,波形强度调制度近似线性增大;光谱成分缺失量对脉冲波形强度调制度的影响力不仅与光谱成分的能量有关,还与光谱成分在光谱中的位置(级次)有关。

表 1 光谱成分的相对能量和波形强度调制度与光谱成分缺失量关系曲线的斜率

Table 1 Relative energy of spectral components and the relationship curve gradient of waveform intensity modulation and loss of spectral components

| Spectral component | k_0 | k_1 | k_2 | k_3 | k_5 | k_6 | k_7 | k_8 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Relative energy | 0.5379 | 0.0820 | 0.3947 | 0.3171 | 0.4426 | 0.7676 | 0.3626 | 0.1730 |
| Gradient | 1.050 | 0.5025 | 0.9221 | 0.9909 | 1.1507 | 1.3603 | 1.1124 | 0.7150 |

光谱缺失导致波形调制,图 2(a)、(b)为频率 k_0 缺失量为 30%、频率 k_7 缺失量为 50% 时对应的脉冲波形轮廓图。如图 2(a)、(b)所示,输出波形强度调制轮廓由 7 个周期性调制轮廓组成。频率 k_0 部分缺失对应的周期性调制轮廓为两个底宽 50 ps 高尖峰与一个底宽 100 ps 矮尖峰,组成一个 1/2 周期,一个调制周期包含两个 1/2 周期;频率 k_7 部分缺失对应的周期性调制轮廓为两个底宽 100 ps 的尖峰中间夹有 7 个底宽 50 ps 的尖峰,组成一个周期。

由于光谱成分数量较多,本文选取光谱中两个光谱成分的混合缺失的情形用于研究波形调制轮廓与混合光谱缺失的关系。在只考虑光谱成分能量缺失而不考虑光谱相位变化的情况下,根据已知光谱缺失状况,

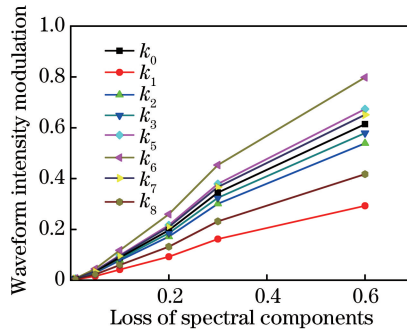


图 1 波形强度调制与光谱缺失的关系

Fig. 1 Relationship between waveform intensity modulation and loss of spectral components

可通过傅里叶逆变换求得脉冲波形调制轮廓。

图 2(c)、(d)为频率 k_0 、 k_7 缺失量分别为 10%、30%以及频率成分 k_0 、 k_7 缺失量分别为 30%、10%时的脉冲时间波形图。如图 2(c)、(d)所示,输出波形强度调制轮廓由 7 个周期性调制组成。 k_0 、 k_7 缺失量分别为 10%、30%对应周期性调制轮廓总体与 k_7 部分缺失对应周期性调制轮廓特征相似,但中间部分的底宽 100 ps 尖峰和底宽 50 ps 尖峰的幅度发生改变,与频率 k_0 部分缺失对应的特征相似; k_0 、 k_7 缺失量分别为 30%、10%对应周期性调制轮廓总体与 k_0 部分缺失对应周期性调制轮廓特征相似,但中间部分的底宽 100 ps 尖峰和底宽 50 ps 尖峰的幅度也发生改变,与频率 k_7 部分缺失对应的特征相似。

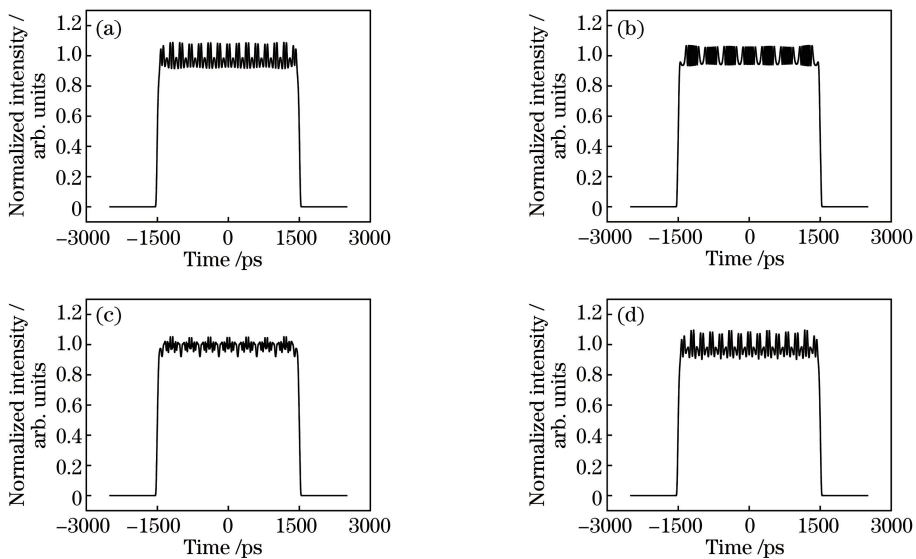


图 2 频率部分缺失对应的输出波形。(a) k_0 缺失量为 30%;(b) k_7 缺失量为 50%;(c) k_0 、 k_7 缺失量分别为 10%、30%;(d) k_0 、 k_7 缺失量分别为 30%、10%

Fig. 2 Output waveforms corresponding to loss of frequency. (a) 30% loss of k_0 ; (b) 50% loss of k_7 ; (c) 10%, 30% loss of k_0 , k_7 ; (d) 30%, 10% loss of k_0 , k_7

模拟结果表明,脉冲轮廓特征与缺失光谱在光谱中的位置(级次)有关,不同级次光谱成分缺失量引起的波形调制轮廓并不相同,具有特异性;频率 k_0 、 k_7 部分缺失对应的轮廓特征是频率 k_0 、 k_7 分别缺失所带来的波形调制轮廓特性的综合作用结果,且脉冲轮廓与缺失光谱位置(级次)和缺失能量相关。

3 实验结果与分析

为验证调频脉冲时谱特性的理论模拟结果,搭建了如图 3 所示的实验装置,调频脉冲光束经分光镜,一部分能量进入测量系统,再经过分光镜一半进入真空光电管(VPD),输出电信号由高速示波器检测,另一半进入光谱仪。实验中,通过改变前端光路中调制控制波片,可改变输出脉冲光谱和波形调制。

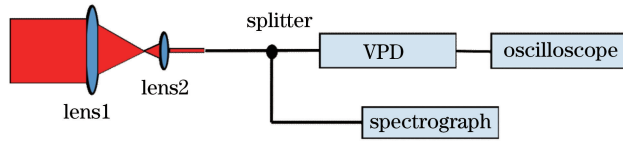


图3 光纤取样测量脉冲波形和光谱的实验示意图

Fig. 3 Experimental schematic of the pulse waveform and spectrum measured with fiber sampling

选取两次实验结果。实验1中测量得到的脉冲光谱如图4所示,脉冲光谱各成分缺失量如表2所示,根据脉冲光谱反演出的波形如图5(a)所示,考虑VPD的上升时间(40 ps),模拟得到的VPD输出波形如图5(a)中的红线所示,模拟结果与实验测量结果基本一致,如图5(b)中黑线所示。

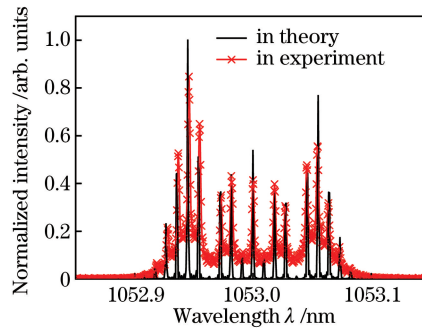


图4 实验1中测量得到的脉冲光谱

Fig. 4 Pulse spectrum measured in experiment 1

表2 实验1的光谱成分缺失量

Table 2 Loss of spectral components in experiment 1

| Spectral component | k_{-6} | k_0 | k_6 | k_7 | k_8 |
|--------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Loss /% | 15.24 | 23 | 27.51 | 12.24 | 22.44 |

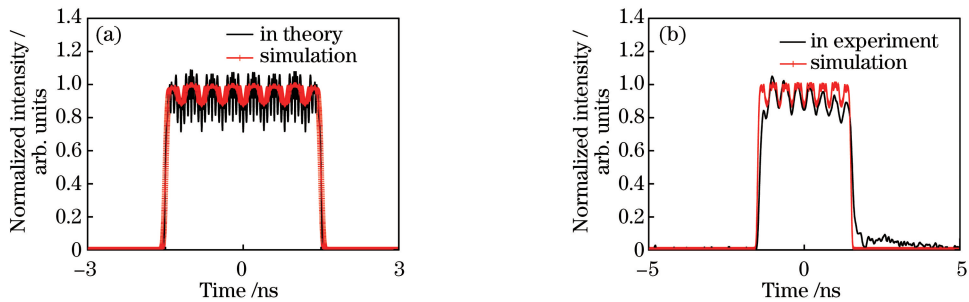


图5 实验1结果。(a)理论波形;(b)模拟结果与实验结果对比

Fig. 5 Results in experiment 1. (a) Waveforms in theory; (b) comparison between simulation and experimental results

实验2中测量得到的脉冲光谱如图6所示,脉冲光谱各成分缺失量如表3所示,根据脉冲光谱反演出的波形如图7(a)所示,考虑VPD的上升时间(40 ps),模拟得到的VPD输出波形如图7(a)中的红线所示,模拟结果与实验测量结果[图7(b)中的黑线]基本一致。

表3 实验2的光谱成分缺失量

Table 3 Loss of spectral components in experiment 2

| Spectral component | k_{-6} | k_{-3} | k_{-2} | k_0 | k_2 | k_3 | k_6 |
|--------------------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Loss /% | 9.09 | 19.78 | 8.20 | 27.72 | 4.94 | 7.41 | 23.47 |

实验中根据脉冲光谱反演出的理论波形与实测结果均符合得很好,说明调频脉冲具有很强的时谱关联特性;实验1中脉冲波形相比于理想超高斯脉冲波形的变化是中心频率 k_0 和边缘频率 $k_{\pm 6}$ 、 k_8 缺失引起的FM-to-AM效应的综合结果;实验2中脉冲波形相比于理想超高斯脉冲波形的变化是中心频率 k_0 和边缘频

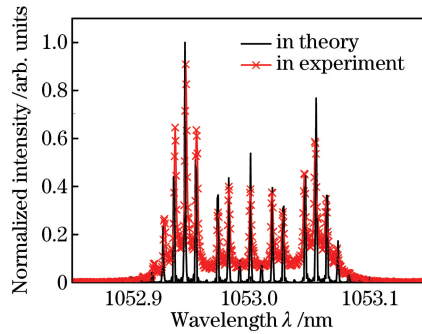


图 6 实验 2 中测量得到的脉冲光谱

Fig. 6 Pulse spectrum measured in experiment 2

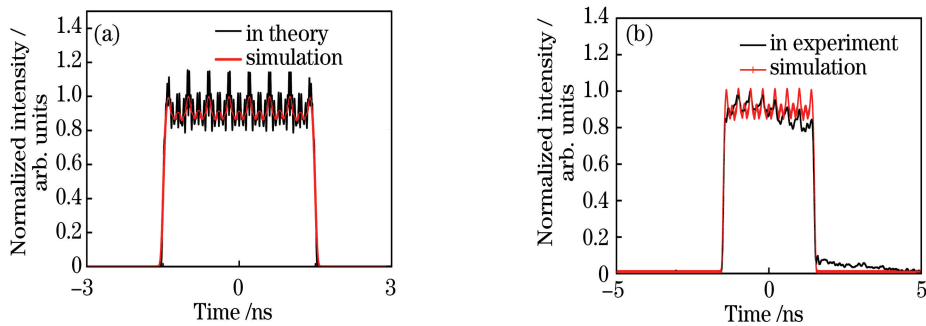


图 7 实验 2 结果。(a)理论波形;(b)模拟结果与实验结果对比

Fig. 7 Results in experiment 2. (a) Waveforms in theory; (b) comparison of simulation and experimental results

率 k_{-3} 、 $k_{\pm 6}$ 缺失共同带来的综合效应,多个光谱成分缺失时引起的脉冲波形轮廓变化与单个光谱成分缺失带来的波形轮廓相关。同时,多次实验都发现中心频率 k_0 和边缘频率 $k_{\pm 6}$ 的部分缺失,且缺失比例相似,其他频率成分随机部分缺失。

4 结 论

通过对调频小宽带脉冲光谱成分缺失量与波形强度调制度之间的关系进行数值仿真分析,表明调频小宽带脉冲具有时谱关联特性。多个频率成分缺失引起的波形强度调制度的轮廓特性是多个强度调制轮廓特性的综合。实验上,多次测量结果表明,由测量得到的脉冲光谱推导出的脉冲波形与理论预期和实验结果基本一致。实验中对测量系统的光谱透过率进行研究发现,测量系统对光谱中 k_0 和 $k_{\pm 6}$ 级光谱具有稳定的调制作用,为后续调频小宽带脉冲测量系统的 FM-to-AM 效应抑制和补偿提供了前提条件。

参 考 文 献

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, *et al.* The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [2] Rose H A, Mounaix P. Diffraction-controlled backscattering threshold and application to Raman gap[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(4): 042109.
- [3] Hüller S, Porzio A, Robiche J. Order statistics of high-intensity speckles in stimulated Brillouin scattering and plasma-induced laser beam smoothing[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(2): 025003.
- [4] Tian Xiaocheng, Zhang Kun, Zhu Na, *et al.* Research on linear chirped pulse generated by direct phase modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0302002.
田小程, 张崑, 朱娜, 等. 直接相位调制产生线性啁啾脉冲特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0302002.
- [5] Rothenberg J E, Browning D F, Wilcox R B. The issue of FM to AM conversion on the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 1999, 3492: 51-61.

- [6] Lu Xinghua, Wang Jiangfeng, Jiang Youen, *et al.* Theoretical study of FM to AM effect of broadband pulsed laser in a regenerative amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502012.
卢兴华, 王江峰, 姜有恩, 等. 宽带光再生放大幅度调制效应的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502012.
- [7] Hocquet S, Penninckx D, Bordenave E, *et al.* FM to AM conversion in high-power lasers[J]. Applied Optics, 2008, 47(18): 3338-3349.
- [8] Wang Fang, Feng Bin, Li Fuquan, *et al.* Formation and suppression of amplitude modulation in frequency conversion [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302014.
王芳, 冯斌, 李富全, 等. 频率转换过程中强度调制的形成机制及抑制方法[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302014.
- [9] Sun Zhihong, Dong Jun, Xia Yanwen, *et al.* Temporal profile measurement of frequency modulation beams for high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102009.
孙志红, 董军, 夏彦文, 等. 高功率激光装置调频脉冲时间波形测试技术研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102009.
- [10] Cao Tingfen, Xiong Zhao, Li Keyu, *et al.* Research on precise alignment for transport system installation of Shenguang-III laser driver[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 112201.
曹庭分, 熊召, 李恪宇, 等. 神光-III 主机装置光传输系统安装精度准直技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 112201.
- [11] Lei Yu, Tong Qing, Zhang Xinyu. Liquid crystal microlens array for dual model imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0511004.
雷宇, 佟庆, 张新宇. 基于双模成像的液晶微透镜阵列[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0511004.
- [12] Liao Bo. Theoretical study of FM to AM issue on ICF facility[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006: 50-51.
廖波. 高功率激光装置中幅度调制效应的研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2006: 50-51.
- [13] Li Lei, Zhang Bo, Xia Yanwen, *et al.* Temporal profile measurement research based on the self-focusing lens combined with optical fiber sampling for high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(5): 0504002.
李磊, 张波, 夏彦文, 等. 基于自聚焦透镜耦合光纤取样的高功率激光装置调频脉冲波形测量技术研究[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0504002.