

## 基于时域剪切的纳秒脉冲在线测量算法

潘良泽<sup>1,2</sup>, 刘诚<sup>1\*</sup>, 朱健强<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了从单幅时域剪切干涉图中重建出纳秒激光脉冲的振幅分布, 提出了一种基于自参考时域剪切的纳秒脉冲在线测量算法。首先, 在对振幅重建原理进行系统分析的基础上, 通过数值模拟验证了该振幅重建算法的可行性。然后, 给出了实验中各参数的选取原则, 并通过实验验证该振幅重建算法的可行性。实验结果表明, 该算法不需要额外增加测量光路就能实现脉冲时间强度分布的重建, 具有测量原理简单、适用范围广等特点, 为纳秒激光脉冲全域特性的测量提供了一种新思路。

**关键词** 测量与计量; 振幅重建; 时域剪切; 纳秒脉冲; 测量

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2404004

### 1 引言

随着激光技术的迅猛发展, 现阶段的激光器能够产生从阿秒<sup>[1-2]</sup>到纳秒<sup>[3-4]</sup>的脉冲激光, 与其对应的一系列脉冲复振幅测量技术也得到了不断发展, 以用于激光器输出脉冲时间特性的测量。阿秒脉冲等超短脉冲的持续时间比现有光电探测器的响应时间短得多, 很难直接通过光电探测器测量其时间特性。但其通常具有较宽的光谱分布, 因此, 一般在光谱域对这类脉冲进行测量。测量时首先测量出光谱的强度和相位分布, 然后利用时域和光谱域的傅里叶关系得到待测脉冲的时间特性, 如频率分辨光学开关法(FROG)<sup>[5-8]</sup>、光谱位相相干直接电场重建(SPIDER)法<sup>[9-11]</sup>、双盲全息测量技术<sup>[12]</sup>。

对于纳秒激光脉冲, 其强度分布可通过光电探测器和示波器直接记录。在相位测量上, Gangopadhyay 等<sup>[13-14]</sup>提出了一种测量纳秒激光脉冲时间相位分布的光外差法, 该方法需要一束频率和待测激光脉冲中心频率接近的连续光作为参考光, 以获得时域剪切干涉条纹。但在实际应用中, 脉

冲激光器输出波长的抖动导致获得与待测激光脉冲波长相匹配的连续光难度较大。Bowlan 等<sup>[15]</sup>提出了一种纳秒量级的 FROG, 但纳秒激光脉冲的峰值功率密度往往比超短脉冲低得多, 在非线性晶体后很难得到较强的相关信号, 因此, 该测量方法的信噪比(SNR)较低。基于自参考时域剪切的脉冲测量技术虽然可以很好地用于纳秒激光脉冲时间相位的测量, 但要获得纳秒激光脉冲完整的复振幅分布, 还需额外增加一路光束对纳秒激光脉冲的时间强度进行测量。同时, 需要将强度分布和相位分布的中心时间对齐, 以获得完整的脉冲复振幅分布, 但中心时间的对准误差也会影响最终的测量结果, 而目前还没有通过单次测量同时获得纳秒激光脉冲强度分布和相位分布的方法。

为了能同时获得纳秒激光脉冲的振幅分布和相位分布, 本文提出了一种基于自参考时域剪切的纳秒脉冲在线测量算法。该算法不需要额外增加光路单独测量待测脉冲的强度分布, 而是直接从单幅剪切干涉图中同时重建待测纳秒脉冲的强度分布和相位分布, 真正意义上实现了对待测纳秒脉冲复振幅

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-05-28; 录用日期: 2021-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(61827816, 11875308, 61675215)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20180024)、上海市“科技创新行动计划”项目(19142202600)

通信作者: \*chengliu@siom.ac.cn; \*\*jqzhu@siom.ac.cn

分布的单次测量。通过数值模拟和仿真计算验证了该振幅重建算法的可行性,并分析了条纹信噪比、脉冲相对时延、脉冲强度比、光电探测器频谱响应等多种因素对测量结果的影响,同时在实验平台上验证了该算法的可行性。

## 2 基本原理

自参考时域剪切纳秒脉冲在线测量算法的基本原理如图 1 所示。首先,将待测激光脉冲  $E(t) =$

$A(t)\exp[i\omega_0 t + i\varphi(t)]$  分成两束,其中,  $A(t)$  为待测脉冲随时间变化的振幅分布,  $\omega_0$  为待测脉冲的载频频率,  $t$  为时间轴,  $\varphi(t)$  为待测脉冲随时间变化的相位分布。一束脉冲光通过移频晶体产生一定频率的偏移,记为  $E(t)\exp[i\delta(\omega)t]$ , 其中,  $\delta(\omega)$  为移频量的大小;另一束脉冲光不通过移频晶体,但相对于移频光束有一定延迟时间,记为  $E(t-\tau)$ , 其中,  $\tau$  为时延大小。最后,将两束脉冲光合束后由光电探测器记录其时域剪切干涉场,可表示为

$$S(t) = A(t)^2 + A(t-\tau)^2 + 2A(t)A(t-\tau)\cos[\Delta\phi_\tau(t) + \delta(\omega) \cdot t + \omega_0\tau], \quad (1)$$

式中,  $\Delta\phi_\tau(t) = \varphi(t) - \varphi(t-\tau)$ 。

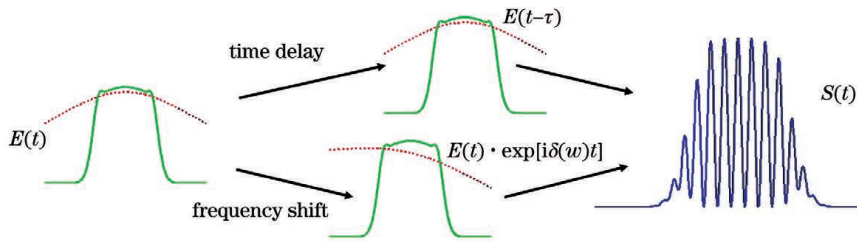


图 1 基于自参考时域剪切的纳秒脉冲测量算法原理

Fig. 1 Principle of nanosecond pulse measurement algorithm based on self-referencing time-domain shearing

相位重建算法和 SPIDER 技术中的光谱相位重建算法<sup>[10,16]</sup>原理类似,因此,主要对振幅重建算法进行讨论。

对(1)式中的  $S(t)$  进行傅里叶变换后,其强度分布在傅里叶频谱上存在三个峰值,分别为零阶分量  $\mathcal{F}[A^2(t) + A^2(t-\tau)]$ 、正一阶分量  $\mathcal{F}\{A(t)A(t-\tau)\exp[i\delta(\omega) \cdot t + i\Delta\phi_\tau(t)]\}$  以及负一阶分量  $\mathcal{F}\{A(t)A(t-\tau)\exp[-i\delta(\omega) \cdot t - i\Delta\phi_\tau(t)]\}$ 。其中,  $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换函数。在傅里叶频谱面上,取出零阶分量和正一阶分量并对

其进行傅里叶逆变换,得到其振幅,对应的强度分布可表示为

$$I_0(t) = A^2(t) + A^2(t-\tau), \quad (2)$$

$$\hat{I}(t) = A(t)A(t-\tau), \quad (3)$$

式中,  $I_0(t)$  为零阶分量的强度分布,  $\hat{I}(t)$  为正一阶分量的强度分布。由于脉冲振幅分布是一个非负函数,即  $A(t) \geq 0$ , 则根据平方和公式可得到

$$B(t) = A(t) + A(t-\tau) = \sqrt{I_0(t) + 2\hat{I}(t)}, \quad (4)$$

对  $B(t)$  进行傅里叶变换,得到

$$\mathcal{F}[A(t) + A(t-\tau)] = [\cos(\omega\tau) + 1]\mathcal{F}[A(t)] - j\sin(\omega\tau)\mathcal{F}[A(t)]. \quad (5)$$

当  $\mathcal{F}[A(t)]$  为实数时,可用(5)式的虚部获得待测激光脉冲振幅的傅里叶变换  $\mathcal{F}[A(t)]$ 。

根据信号傅里叶变换的性质可知,当信号为一个实偶函数时,其频谱函数是一个实函数。即当且仅当  $A(t)$  为一个实偶函数时,其傅里叶变换后的频谱函数  $\mathcal{F}[A(t)]$  为实数。但在一般情况下,  $A(t)$  不

是一个实偶函数。因此,构造一个实偶函数

$$X_{\text{temp}}(t) = A(t-\Delta) + A(-t-\Delta), \quad (6)$$

式中,  $\Delta$  为时间上的一个平移量,  $A(t-\Delta)$  和  $A(-t-\Delta)$  关于  $t=0$  对称,合理选取  $\Delta$  可使  $A(t-\Delta)$  和  $A(-t-\Delta)$  之间没有重叠。实偶函数的延时函数可表示为

$$X_{\text{temp}}(t-\tau) = A(t-\Delta-\tau) + A(-t+\tau-\Delta). \quad (7)$$

将构造的实偶函数及其延时函数相加,得到

$$X_{\text{temp}}(t) + X_{\text{temp}}(t - \tau) = B(t - \Delta) + B(-t - \Delta + \tau), \quad (8)$$

对(8)式进行傅里叶变换,得到

$$\mathcal{F}[X_{\text{temp}}(t) + X_{\text{temp}}(t - \tau)] = [\cos(\omega\tau) + 1]\mathcal{F}[X_{\text{temp}}(t)] - j\sin(\omega\tau)\mathcal{F}[X_{\text{temp}}(t)]. \quad (9)$$

取(9)式等号右侧的虚部,得到  $\sin(\omega\tau) \times \mathcal{F}[X_{\text{temp}}(t)]$ ,然后通过简单的运算得到  $X_{\text{temp}}(t)$ 并滤出其中  $t > 0$  的部分,再将其向左平移  $\Delta$  个单位,就能得到待测脉冲的振幅分布  $A(t)$ 。振幅重建的具体流程如图 2 所示。振幅重建算法的基本原理如下。

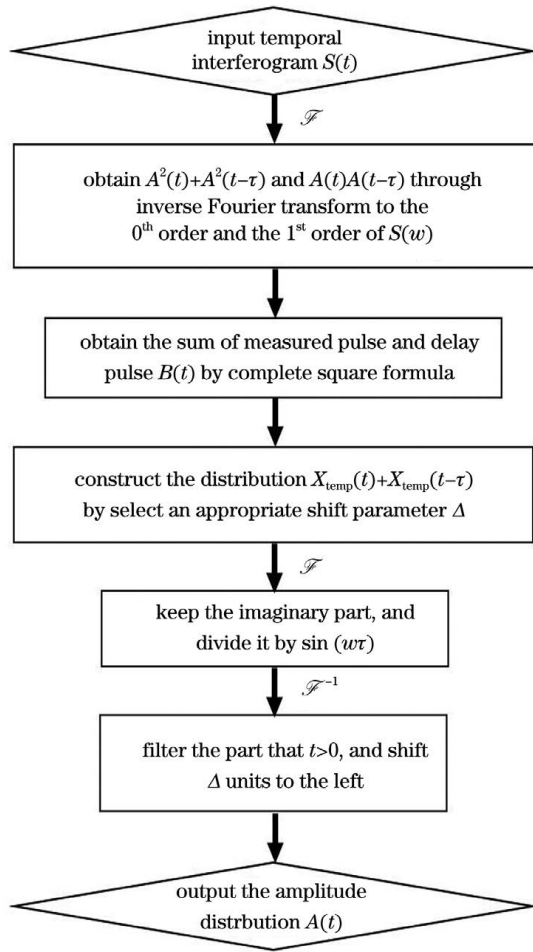


图 2 振幅重建算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of the amplitude reconstruction algorithm

1) 对实验中记录的剪切干涉条纹  $S(t)$  进行傅里叶变换,并保留其中零级分量的振幅分布  $I_0(t)$  和正一级分量的振幅分布  $\hat{I}(t)$ 。

2) 根据(4)式生成待测激光脉冲的振幅分布及其时延脉冲的振幅分布和  $B(t)$ 。

3) 选取合适的平移量  $\Delta$ ,构造(8)式中的函数。

4) 对(8)式进行傅里叶变换,对其虚部除以

$\sin(\omega\tau)$ 后进行傅里叶逆变换。

5) 保留式(6)中  $t$  大于 0 的部分,并将其向左平移  $\Delta$  个单位,得到待测激光脉冲的振幅分布  $A(t)$ 。

为了定量评价重建的振幅质量,将重建的脉冲振幅分布和理论脉冲振幅分布之间的相似度角度定义为

$$E_r[A(t), \hat{A}(t)] = \arccos \left[ \frac{|\langle A(t) | \hat{A}(t) \rangle|}{\sqrt{\langle \hat{A}(t) | \hat{A}(t) \rangle \langle A(t) | A(t) \rangle}} \right], \quad (10)$$

式中,  $A(t)$  为待测脉冲的真实振幅分布,  $\hat{A}(t)$  为重建待测脉冲的振幅分布,  $\langle A(t) | \hat{A}(t) \rangle$  为真实振幅分布和重建振幅分布的内积。

### 3 数值仿真

模拟得到中心波长为 640 nm 时,单高斯分布、随机啁啾单高斯分布、台阶分布、双高斯分布四类脉冲的重建结果,以验证该振幅重建算法的可行性。所有脉冲的采样点个数  $N = 1024$ ,采样间隔  $d = 125$  ps,移频量为 1.5 GHz,两脉冲之间的时延  $\tau = 250$  ps,脉冲之间的强度比为 1,光电探测器不同频段的响应值相同。四类脉冲的时域剪切干涉图如图 3(a)所示,四类脉冲真实的时间强度及重建的时间强度如图 3(b)所示。可以发现,重建得到的待测激光脉冲时间强度分布与其真实时间强度分布相匹配,验证了该振幅重建算法重建待测激光脉冲时间强度分布的可行性。

为了进一步验证振幅重建算法在噪声情况下的重建精度,在得到的时域剪切干涉图上添加了不同程度的噪声。图 4(a)为在图 3(a)的时域剪切干涉图上添加不同信噪比噪声时重建误差随信噪比的变化曲线,图 4(b)~图 4(d)的虚线为在图 3(a2)的时域剪切干涉图中分别添加信噪比为 10 dB, 20 dB, 40 dB 噪声时重建得到的待测激光脉冲振幅分布。可以发现,用该振幅重建算法对自参考移频剪切测量算法得到的时域剪切干涉图进行脉冲振幅重建时具有良好的抗噪性能。对于上述四类脉冲来说,在不考虑其他因素影响的前提下,当时域剪切干涉图的信噪比不低于 30 dB 时,脉冲的振幅重建相似度均小于 0.05,这表明本算法重建脉冲的时间强度分布接近真实的脉冲时间强度分布。

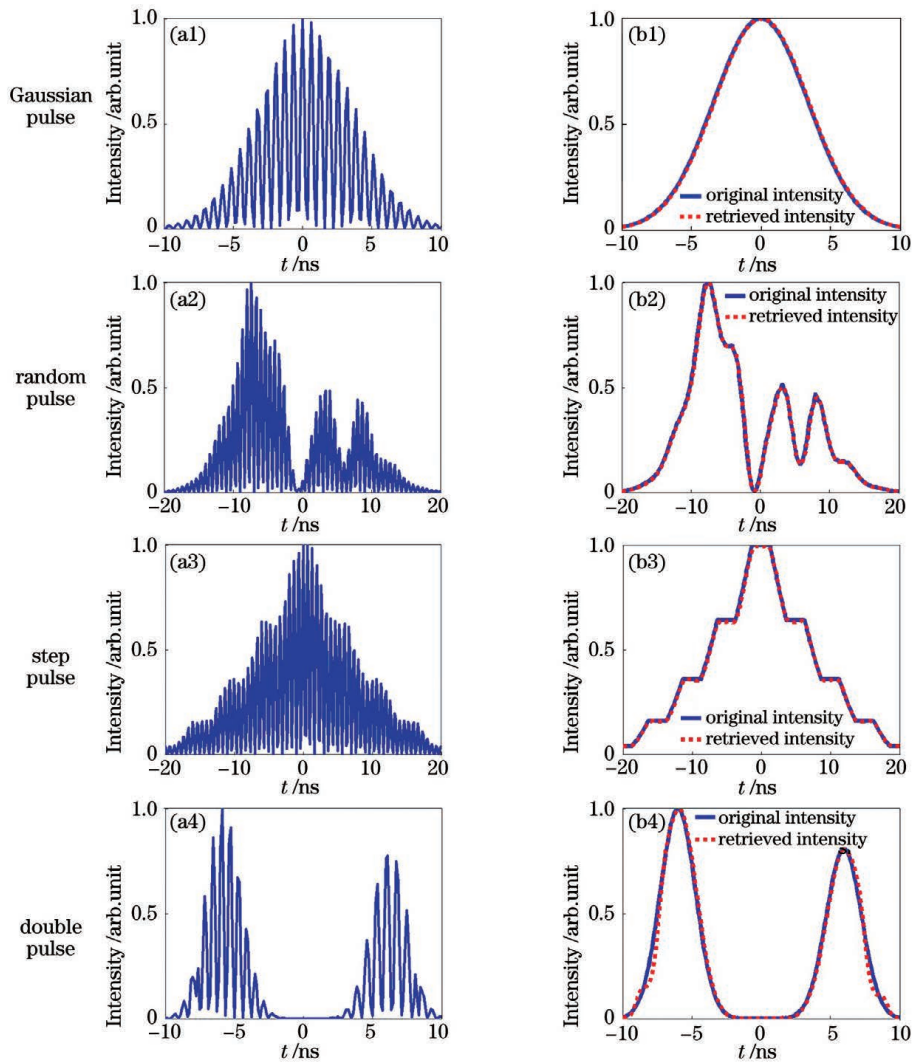


图 3 四类纳秒脉冲振幅的重建结果。(a)时域剪切干涉图;(b)原始时间强度及重建的时间强度

Fig. 3 Reconstruction results of four types of nanosecond pulse amplitudes. (a) Time-domain shearing interferogram; (b) original time intensity and reconstructed time intensity

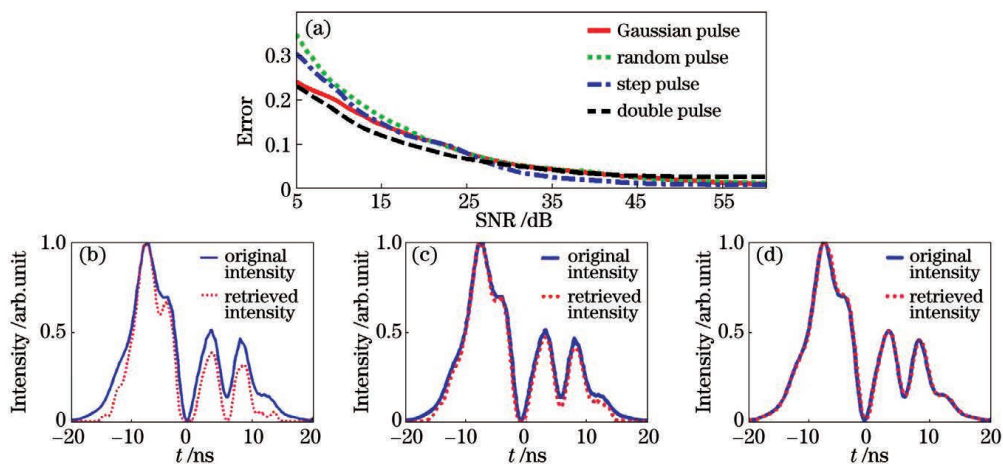


图 4 振幅重建算法对噪声的鲁棒性。(a)振幅重建误差随剪切干涉图 SNR 的变化曲线;(b)SNR 为 10 dB 时的重建结果;(c)SNR 为 20 dB 时的重建结果;(d)SNR 为 40 dB 时的重建结果

Fig. 4 Robustness of the amplitude reconstruction algorithm to noise. (a) Variation curve of amplitude reconstruction error with SNR of shearing interferogram; (b) reconstruction result when SNR is 10 dB; (c) reconstruction result when SNR is 20 dB; (d) reconstruction result when SNR is 40 dB

用振幅重建算法重建待测激光脉冲的振幅时,影响重建精度的因素主要有移频量、脉冲之间的相对时延、脉冲之间的相对强度以及光电探测器的频率响应特性。其中,移频量的选取与重建时间相位分布一致。可通过仿真模拟选取脉冲之间的相对时延、相对强度以及光电探测器的频率响应特性,使待测激光脉冲振幅重建的精度尽可能高。图 5(a)为图 3(b1)~图 3(b3)中三类不同脉冲振幅重建误差随相对时延的变化曲线(时延脉冲和移频脉冲的相对强度为 1,移频量为 1.5 GHz,时域剪切干涉条纹的信噪比为 30 dB)。观察振幅重建误差曲线可以发现,在脉冲的相干时间范围内,当两脉冲的相对时延在 0.002~0.6 时,本算法对待测激光脉冲振幅的重建结果较好。

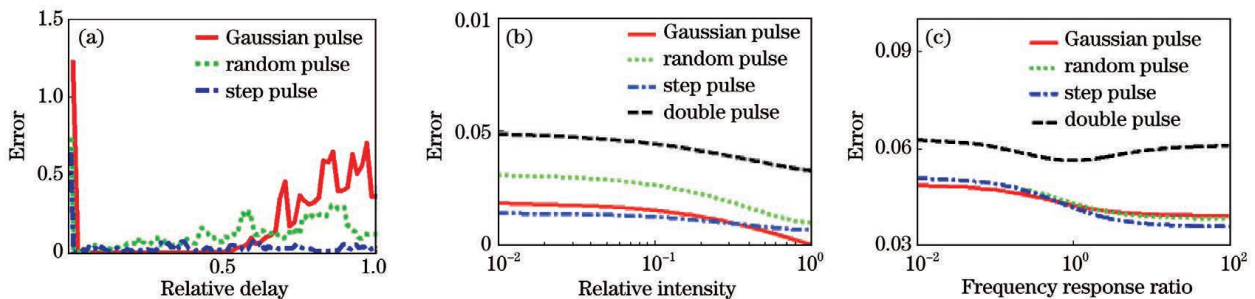


图 5 不同参数对重建算法的影响。(a)相对时延;(b)相对强度;(c)光电探测器的频谱响应比

Fig. 5 Influence of different parameters on the reconstruction algorithm. (a) Relative time delay; (b) relative intensity; (c) spectral response ratio of photodetector

## 4 实验验证

实际实验中用中心波长为 640 nm 的纳秒脉冲激光器(Thorlab NPL64B)验证该振幅重建算法的可行性。该纳秒激光器可提供重复频率从 1~10 MHz,最高峰值功率密度为 50 mW,脉冲宽度为 24~36 ns 的激光脉冲。待测激光脉冲通过一块型号为 KG-1500-640-0.1-PB 的声光晶体产生 1.16 GHz 的移频量,实现待测脉冲中心频率的偏移,然后与另一束时延  $\tau=200$  ps 的时延脉冲合束后,由带宽为 2.5 GHz,型号为 PDA2.5GA3KSFA 的光电探测器和一台最大采样率为 20 GSa/s,型号为 Lecroy WaveRunner 640Zi 的示波器记录剪切干涉条纹。记录的时域剪切干涉条纹由 2048 个采样点组成,采样间隔为 50 ps。图 6(a)为记录的理论输出脉冲宽度分别为 24,28,32,36 ns 的脉冲时域剪切干涉图,振幅重建算法重建得到的脉冲时间强度分布以及用示波器直接记录的待测脉冲时间强度分布如图 6(b)所示。对比发现,示波器记录的时间强

度分布和重建算法重建得到的时间强度分布基本重合,这表明用重建得到的脉冲振幅分布表示真实的脉冲振幅分布是可靠的。

图 5(b)为图 3(b)中四类不同脉冲振幅重建误差随脉冲相对强度的变化曲线(时延脉冲和移频脉冲的相对时延为 1,移频量为 1.5 GHz,时域剪切干涉条纹的信噪比为 30 dB)。可以发现,两脉冲之间的强度比基本不会影响该振幅重建算法的重建精度。图 5(c)为图 3(b)中四类不同脉冲振幅重建误差随光电探测器频率响应特性的变化曲线(横坐标为光电探测器在移频频率处频率响应值与直流频率处频率响应值的比值,时延脉冲和移频脉冲的相对时延为 1,相对强度比为 1,移频量为 1.5 GHz,条纹信噪比为 30 dB)。可以发现,光电探测器中移频频率处的频率响应值与直流频率处响应值的比值基本不会影响该振幅重建算法的重建精度。

度分布和重建算法重建得到的时间强度分布基本重合,这表明用重建得到的脉冲振幅分布表示真实的脉冲振幅分布是可靠的。

## 5 结 论

提出了一种基于时域剪切的纳秒脉冲在线测量技术,基于自参考时域剪切的纳秒脉冲测量技术对脉冲进行时间特性诊断时,不再需要额外测量待测激光脉冲的时间强度分布,真正意义上实现了对纳秒激光脉冲复振幅分布的单次测量。通过数值模拟探讨了各关键参量包括时间干涉条纹信噪比、脉冲强度比、脉冲相对时延以及光电探测器的频谱响应对待测脉冲振幅重建质量的影响,为后续实验参数的选取提供了一定参考。用该振幅重建算法从记录的时域剪切干涉条纹中重建待测脉冲的强度分布,并将重建结果与示波器直接测量的结果进行对比,可以发现,二者的曲线基本吻合,进一步验证了该振幅重建算法的可行性。该振幅重建算法的原理简单且能达到实时测量,可以广泛应用于各类纳秒激光

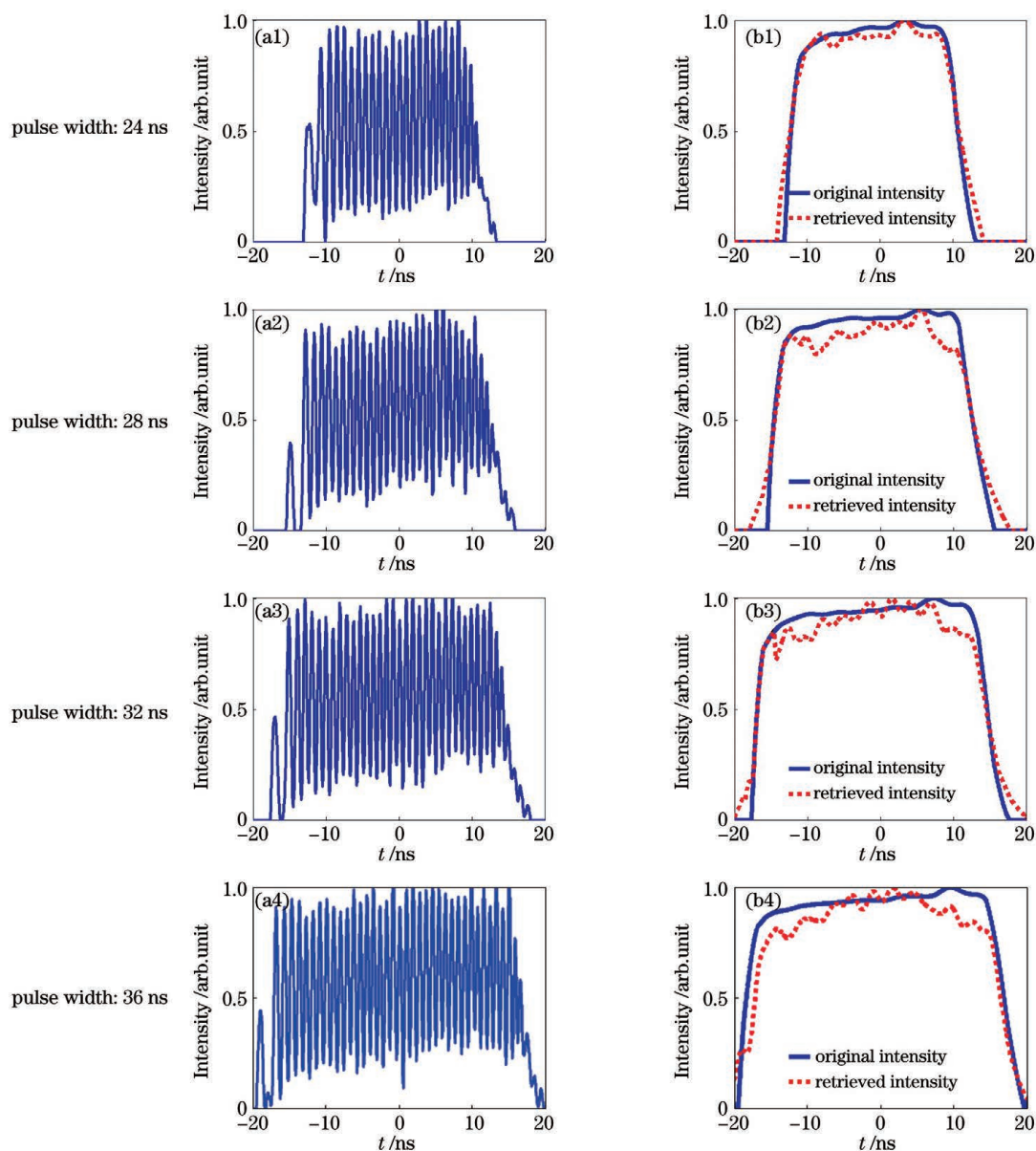


图 6 振幅重建算法的实验结果。(a)实验记录的时域剪切干涉图;(b)重建的时间强度分布和示波器记录的时间强度分布

Fig. 6 Experimental results of the amplitude reconstruction algorithm. (a) Time-domain shearing interferogram recorded by experiment; (b) reconstructed time intensity distribution and the time intensity distribution recorded by the oscilloscope

脉冲的复振幅重建中,也可以用于 SPIDER 测量技术中对飞秒激光脉冲光谱振幅的重建。

### 参 考 文 献

- [1] Krausz F, Ivanov M. Attosecond physics[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(1): 163-234.
- [2] Hentschel M, Kienberger R, Spielmann C, et al. Attosecond metrology[J]. Nature, 2001, 414(6863): 509-513.
- [3] Stuart B C, Feit M D, Rubenchik A M, et al. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(12): 2248-2251.
- [4] Stuart B C, Feit M D, Herman S, et al. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. Physical Review B, 1996, 53(4): 1749-1761.
- [5] Trebino R, Kane D J. Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1993, 10(5): 1101-1111.
- [6] Trebino R, DeLong K W, Fittinghoff D N, et al.

- Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(9): 3277-3295.
- [7] Trebino R, Zeek E. Ultrashort laser pulses [M] // *Frequency-resolved optical gating: the measurement of ultrashort laser pulses*. Boston: Springer, 2000: 11-35.
- [8] Ren W X. Research on the femtosecond pulse retrieval technology of GRENOUILLE [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014. 任伟新. 单发频率分辨光学开关法中的飞秒脉冲解调技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [9] Iaconis C, Walmsley I A. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(4): 501-509.
- [10] Iaconis C, Walmsley I A. Spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction of ultrashort optical pulses [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(10): 792-794.
- [11] He T Y. Theoretical and experimental study on spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- 何铁英. 光谱位相干涉测量仪 (SPIDER) 的理论与实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [12] Pedatzur O, Trabatttoni A, Leshem B, et al. Double-blind holography of attosecond pulses [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(2): 91-95.
- [13] Gangopadhyay S, Melikechi N, Eyler E E. Optical phase perturbations in nanosecond pulsed amplification and second-harmonic generation [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1994, 11(11): 2314.
- [14] Fee M S, Danzmann K, Chu S. Optical heterodyne measurement of pulsed lasers: toward high-precision pulsed spectroscopy [J]. *Physical Review A*, 1992, 45(7): 4911-4924.
- [15] Bowlan P, Trebino R. Complete single-shot measurement of arbitrary nanosecond laser pulses in time [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1367-1377.
- [16] Freischlad K R, Koliopoulos C L. Modal estimation of a wave front from difference measurements using the discrete Fourier transform [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(11): 1852-1861.

## Online Measurement Algorithm of Nanosecond Pulses Based on Temporal Shearing

Pan Liangze<sup>1,2</sup>, Liu Cheng<sup>1\*</sup>, Zhu Jianqiang<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> *National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

<sup>2</sup> *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*

### Abstract

**Objective** Current developments in pulsed lasers have accelerated developments in fields, such as inertial confinement fusion, plasma emission, and high-energy-density physics. Fully characterizing these laser pulses is critical for its wide applications. Currently, many useful techniques exist, such as frequency-resolved optical gating, spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction (SPIDER), and double-blind holography for fully characterizing ultrashort laser pulses. However, these techniques are either incapable or ineffective for nanosecond laser pulse diagnostics because its narrow spectral width is always beyond most spectrometers' resolution capability. For the nanosecond laser pulse diagnostic technique, the temporal intensity distribution can be obtained using a photodetector and oscilloscope, and the temporal phase distribution can be obtained using a heterodyne measurement approach. However, no applicable technique can provide the temporal intensity and phase distributions using a single detector.

**Methods** In the proposed technique, the measured pulse is divided into two, with a delay of hundreds of picoseconds. One replica received a proper amount of frequency shift using an acousto-optic frequency shifter. The temporal shearing interferogram is recorded using a normal photodiode and oscilloscope after combining the delayed and frequency-shifted pulses. The measured pulse's temporal phase distribution is reconstructed using the Fourier transform method, like that used in the SPIDER technique. In this paper, an amplitude reconstruction algorithm

based on Fourier transform is proposed to reconstruct the measured pulse's temporal amplitude distribution using the recorded temporal interferogram. Fig. 2 shows a flowchart of the detailed amplitude reconstruction algorithm. Thus, the proposed amplitude reconstruction algorithm can fully characterize the nanosecond laser pulse with a single photodiode.

**Results and Discussions** From the systematic analysis of the amplitude reconstruction algorithm principle, four nanosecond laser pulses with different intensity distributions are simulated to evaluate the feasibility algorithm (Fig. 3). The numerical simulation results show that the temporal intensity distribution of nanosecond pulses could be reconstructed from the temporal interferogram using the proposed amplitude reconstruction algorithm. Figs. 4 and 5 show the influence of signal-noise ratio (SNR) of the recorded interferogram, relative time delay, the relative intensity between delayed and frequency-shifted pulses, and relative frequency response ratio of photodiodes on the reconstructed results. When SNR of the recorded interferogram, the relative time delay between two pulses, is between 0.002 and 0.6, the algorithm can well reconstruct the temporal intensity distribution. Furthermore, the experiment verifies the algorithm's feasibility. In the experiment, a nanosecond-pulsed laser diode with a central wavelength of 640 nm generates laser pulses with time durations varying from 5 ns to 39 ns at a repetition rate from 1 MHz to 10 MHz, with a peak power of 50 mW. An acousto-optic frequency shifter is used to obtain a frequency shift of 1.16 GHz. A fast photodiode (PDA2.5GA3KSFA) with a bandwidth of 2.5 GHz and a 20 GSa/s oscilloscope (LeCroy WaveRunner 620Zi) are used to record the temporal heterodyne signal intensity  $S(t)$  (Fig. 6). The results show that the reconstructed temporal intensity of the measured pulses correlated well with those recorded directly using a photodiode.

**Conclusions** In this paper, online measurement technology based on self-referencing temporal shearing interferometry is proposed to reconstruct the complex amplitude distribution of nanosecond pulses from the interferogram. In this proposed scheme, a temporal amplitude reconstruction algorithm is proposed to reconstruct the measured pulse's temporal intensity using the recorded temporal interferogram. Simulation is conducted to determine the influence of SNR, relative time delay, the relative intensity between two pulses, and the relative frequency response ratio of photodiode on the reconstructed results. Furthermore, an experiment is conducted to evaluate the reliability of the proposed algorithm. An additional measurement is conducted to record the temporal intensity distribution of measured pulses using a photodiode as a comparison to the reconstructed intensity distribution. The results show that the measured and reconstructed temporal intensity distributions of the measured pulses matched well. The proposed amplitude reconstruction algorithm simplifies the experimental setup and fully characterizes nanosecond laser pulses within a single shot. The proposed algorithm is simple and has wide applications. It provides a new measurement method for fully characterizing nanosecond laser pulses. Furthermore, the proposed amplitude reconstruction algorithm could reconstruct the amplitude distribution in the SPIDER technique.

**Key words** measurement and metrology; amplitude reconstruction; temporal shearing; nanosecond pulse; measurements

**OCIS codes** 120.1880; 120.3940; 120.5050