

大量程扫描频谱激光干涉仪的方案设计

范 伟^{1,2} 朱 斌¹ 吴玉迟¹ 董克攻¹ 张学如² 王玉晓² 谷渝秋^{1,2*}

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900

²哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 啁啾脉冲频谱干涉仪是一种常用的高时间分辨连续测试仪器,但是时间分辨能力和测试量程之间的相互制约关系限制了其在超快变化、大时间尺度物理过程研究中的应用。利用线性啁啾脉冲序列和耦合光谱仪的条纹相机记录系统,设计了一种扫描频谱激光干涉仪。通过理论分析和数值模拟研究了扫描频谱激光干涉仪的工作原理,论证了其可行性,该干涉仪可以实现相位扰动信号的精确测量,且具有相当于啁啾脉冲频谱干涉仪的高时间分辨能力和数倍的测试量程。数值模拟分析了条纹相机采样时间对扫描频谱激光干涉仪测量结果的影响,发现在无噪声情况下,采样时间对测量结果的影响可以忽略,但是当存在数据噪声时,测量误差会随着采样时间的减小而增大。

关键词 超快光学; 干涉仪; 啁啾脉冲; 频谱干涉; 时间分辨

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0212001

Project Design of Large Range Scanning Spectrum Laser Interferometer

Fan Wei^{1,2} Zhu Bin¹ Wu Yuchi¹ Dong Kegong¹ Zhang Xueru²
Wang Yuxiao² Gu Yuqiu^{1,2}

¹*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

²*Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China*

Abstract Chirped pulse spectral interferometry is a commonly used continuous and high time-resolved diagnostic instrument, however, its applications in the fields of ultrafast and large timescales physics are constrained by the relationship between time resolution and test range. Utilizing linearly-chirped pulse series and a recording system of a spectrometer coupled streak camera, a scanning spectrum laser interferometer is designed. To demonstrate the feasibility, principle of the interferometer is studied theoretically and numerically. It is concluded that the scanning spectrum laser interferometer could measure phase perturbation signal accurately, and possesses the same time resolution and several times test range compared to chirped pulse spectral interferometry. Additionally, in the recording system, the influence of sampling intervals on the measurement results of the scanning spectrum laser interferometer is numerically analyzed. The results show that the influence could be ignored while raw data are clean, but if noise is contained, the measurement errors would increase gradually with the sampling intervals decreasing.

Key words ultrafast optics; interferometer; chirped pulse; spectral interference; time-resolved

OCIS codes 120.3180; 120.5050; 320.1590; 320.2250; 320.7100; 320.7150

1 引 言

随着激光技术的发展,超快超强激光与物质相互作用的研究引起了人们越来越多的关注,Chien等^[1]于2000年设计的啁啾脉冲频谱干涉仪(CPSI)为相关物理过程的实验研究提供了一种重要实验仪器。目前,

收稿日期: 2015-5-4; 收到修改稿日期: 2015-9-13

基金项目: 国家自然科学基金(10902101)

作者简介: 范 伟(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事超快光学测量技术方面的研究。E-mail: fanwei_2009@163.com

*通信联系人。 E-mail: yqgu@caep.ac.cn

CPSI 因具有超快时间分辨和连续测试能力已被广泛应用在超快激光-物质相互作用实验当中,如短脉冲激光驱动冲击波^[2,3]、飞秒激光等离子体^[4-5]、飞秒激光电离动力学以及飞秒激光尾场等实验^[11,6-8]。然而,CPSI 也存在一定的局限性即高时间分辨(最高数十飞秒)对应的测试量程(皮秒量级)非常有限^[9-10],当待测过程属于超快变化的大时间尺度物理现象时,CPSI 将不能在单发实验内完成有效测试,从而失去其固有优势。

在 CPSI 中,干涉光束是一对线性啁啾脉冲,记录系统采用普通的光谱仪,CPSI 利用线性啁啾脉冲的啁啾特性和光谱仪的色散能力实现了时间分辨测量。设想干涉光束以一定的频率重复出现,同时光谱仪记录系统增加一项时间扫描功能,则可以实现 CPSI 测试量程的扩展。本文即开展了这样的方案设计工作,干涉光束采用一对周期性的线性啁啾脉冲序列,记录系统采用耦合光谱仪的条纹相机,这种新型的干涉测量仪器被称为扫描频谱激光干涉仪。通过理论分析和数值模拟研究了扫描频谱激光干涉仪的工作原理,论证了其可行性并明确了其时间分辨能力和测量范围;最后,数值模拟研究了记录系统采样时间对干涉仪测量相位扰动信号结果的影响。

2 扫描频谱激光干涉仪

一束高斯型飞秒脉冲传播通过一个线性光学色散元件,将被展宽为线性啁啾脉冲(脉冲频率随时间线性变化),相应的电场分布为

$$E(t) = E_0 \exp(-at^2) \exp[i(\omega_0 + bt)t], \quad (1)$$

式中 $a = 21n2/\tau_c^2$, τ_c 为啁啾脉冲脉宽, ω_0 为脉冲载频, b 为啁啾系数的一半。当这样一束啁啾脉冲进入耦合光谱仪的条纹相机记录系统时,将产生如图 1 所示的图像。在固定光频 ω 处,图像沿时间轴方向具有一定的分布宽度 $A_0 A'_0 = A_1 A'_1 = T_0$, 这是由光谱仪对超短脉冲的时间展宽和条纹相机的时间扫描产生的, $T_0 = Nm\lambda/c$ 为光谱仪对超短脉冲的时间展宽量, N 为光谱仪中被照明的光栅线对数, m 为光栅的衍射级次, λ 为入射光波长, c 为光速。

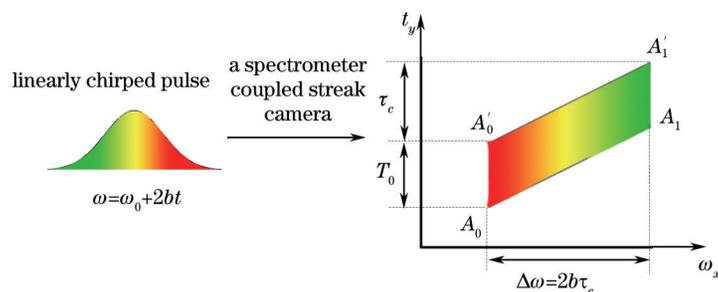


图 1 线性啁啾脉冲在耦合光谱仪的条纹相机上产生的图像。 $\Delta\omega$ 为啁啾脉冲光谱的半峰全宽(FWHM)

Fig.1 Image of linearly chirped pulse is produced by the spectrometer-streak camera system.

$\Delta\omega$ is full width at half maximum of spectral distribution of the chirped pulse(FWHM)

当两束具有延迟时间差 T 的线性啁啾脉冲以共轴传输的方式进入成像型光谱仪记录系统时,会得到如图 2(a)所示的频谱干涉条纹,图中条纹沿光谱轴方向周期性分布,纵轴表示空间分布,意味着一维空

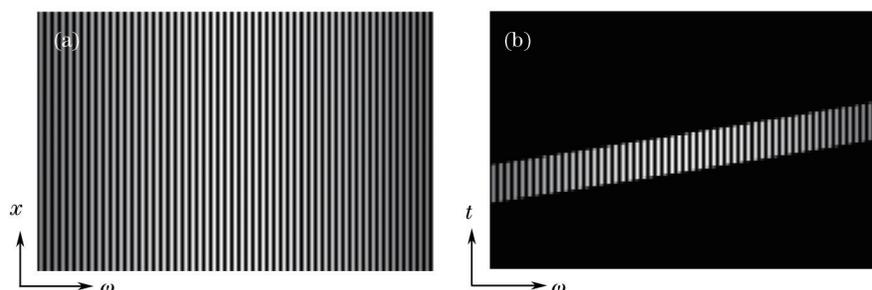


图 2 线性啁啾脉冲对之间的频谱干涉条纹。(a) 成像型光谱仪记录的频谱条纹;(b) 耦合光谱仪的条纹相机记录的频谱条纹

Fig.2 Spectral interference fringe of two linearly chirped pulses. (a) Recorded by an imaging spectrometer;

(b) recorded by the spectrometer-streak camera system

间分辨^[11]。如果将记录系统替换为耦合光谱仪的条纹相机,记录的频谱干涉条纹将如图2(b)所示(模拟参数见表1),条纹沿光谱轴方向仍然是周期性分布,但是纵轴代表时间分布,这是因为条纹相机具有时间扫描功能。假设干涉的两束线性啁啾脉冲分别为参考脉冲和探测脉冲。如果探测脉冲因受到外界加载的相位扰动产生了相移,根据图2(a)所示频谱条纹的变化,可以重建出时间分辨的相位扰动信号(此即CPSI工作原理)。下面将以数值模拟的方式研究利用图2(b)进行类似信号重建的可行性。

表1 模拟光谱仪-条纹相机系统记录啁啾脉冲频谱干涉条纹的参数

Table 1 Simulation parameters of the spectrometer-streak camera system for recording spectral interference fringe of linearly chirped pulses

Linearly chirped pulse				Streak camera		Spectrometer	
Center wavelength λ_c /nm	Bandwidth $\Delta\lambda$ /nm	Pulse width τ_c /ps	Time delay T /ps	Sample interval δ_t /ps	Spectral resolution δ_λ /nm	Recording surface size 1000 pixel×100 pixel	Amount of stretching T_0 /ps
800	40	250	3	10	0.04		150

令探测脉冲受到如图3(a)中蓝色实线所示的时域相位扰动,在光谱仪-条纹相机记录系统内,它与另一束未受扰动的参考脉冲之间形成的频谱干涉条纹如图3(b)所示,称为动态频谱条纹;对应地,图2(b)是探测脉冲未加载相位扰动时的干涉条纹,称为静态频谱条纹。动态条纹相对于静态条纹发生了移动,这是由探测脉冲的相位变化引起,下面要做的就是从动态频谱条纹中重建这个相位变化。首先,沿频谱条纹的纵轴方向进行积分,得到一维条纹分布,如图3(c)所示,相对于静态频谱条纹,动态条纹发生了明显移动。此时,采取傅里叶变换解谱方法对一维条纹进行处理即可得到探测脉冲的时域相移^[12],结果如图3(a)中的红色虚线。由于图2(a)和2(b)的光谱宽度相同,这里所得重建信号的时间分辨和范围都将与相应的CPSI的测量结果一致,分别为 $\sqrt{\tau_0\tau_c}$ 和 τ_c (τ_c 为啁啾探测脉冲脉宽, τ_0 为对应的傅里叶变换极限脉宽)^[13-14]。图3(d)是重建相移信号的误差,除两端外,重建信号与给定值符合的很好,而两端处出现较大误差的原因是滤波不完整。图2(b)类型的频谱干涉条纹仍然可以用于待测信号的有效重建,相对于图2(a)所示的频谱条纹,它仅仅缺少了一维空间分辨能力。

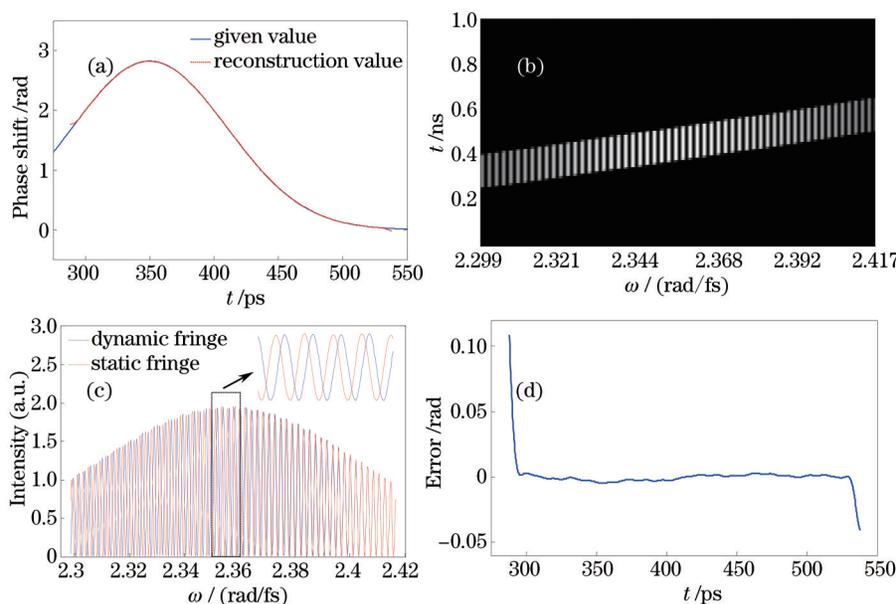


图3 扫描频谱激光干涉仪测量探测脉冲时域相位扰动的数值模拟。(a) 相位扰动信号;(b) 动态频谱干涉条纹;(c) 一维频谱条纹;(d) 重建误差

Fig.3 Simulation of scanning spectrum laser interferometer measured the time-domain phase of the probe pulse. (a) Phase perturbation signal; (b) two-dimensional dynamic spectral interference fringe; (c) one-dimensional spectral interference fringe; (d) reconstruction error

光谱仪-条纹相机记录系统的啁啾脉冲频谱干涉装置被称为扫描频谱激光干涉仪,显然,该仪器可以对时域相位扰动信号进行精确的测量。至此看来,与CPSI相比,扫描频谱激光干涉仪具有相同的时间分辨和测量

范围,但缺少了空间分辨能力。在扫描频谱激光干涉仪中,通过利用条纹相机的时间扫描功能,光谱仪记录系统的空间分布转化成了光谱仪-条纹相机记录系统的时间分布,此时,如果采用啁啾脉冲序列作为探测脉冲,可以数倍地增加信号测量的时间范围,这正是扫描频谱激光干涉仪的设计思想。

以扫描频谱激光干涉仪测量运动物体产生的多普勒相移为例,干涉测量部分的光路如图4所示。一束线性啁啾脉冲序列(含 N_1 个脉冲,单脉冲宽度 τ_c ,相邻脉冲间隔 T_1)进入不等臂迈克尔孙干涉仪,干涉仪的一臂由表面反光的运动物体充当。进入干涉仪的脉冲序列首先被分束片分成两束,其中透射部分称为参考光,反射部分称为探测光,探测光因经历运动样品表面将产生多普勒相移[如图5(a)中的蓝色实线]。参考光、探测光从不等臂迈克尔孙干涉仪输出时,具有一定的延迟时间差 T 且共轴传输,当它们先后进入光谱仪-条纹相机记录系统后,形成如图5(b)所示的频谱干涉条纹,这里取 $N_1=4, T_1=200$ ps,记录面尺寸为 $1000 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$,其余参数同表1。图5(b)包含四套相互平行的频谱条纹,每套条纹由参考光和探测光中对应脉冲之间的频谱干涉产生,相邻两套条纹沿纵轴方向的间隔等于脉冲间隔 T_1 。采用上面介绍的数据处理方法分别从每套频谱条纹中重建探测脉冲的时域相移,然后根据时间关系将重建结果排列起来,结果见图5(a)中的四段彩色虚线。图5(c)是重建相移的误差,对于每段重建信号,除两端外,误差均处于较低水平,而相邻两段重建信号的交叠消除了端点处的信号重建畸变。

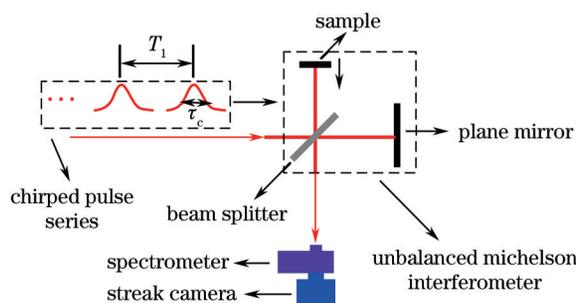


图4 扫描频谱激光干涉仪测量多普勒相移的光路排布示意图

Fig. 4 Schematic of the scanning spectrum laser interferometer for measuring Doppler phase shift

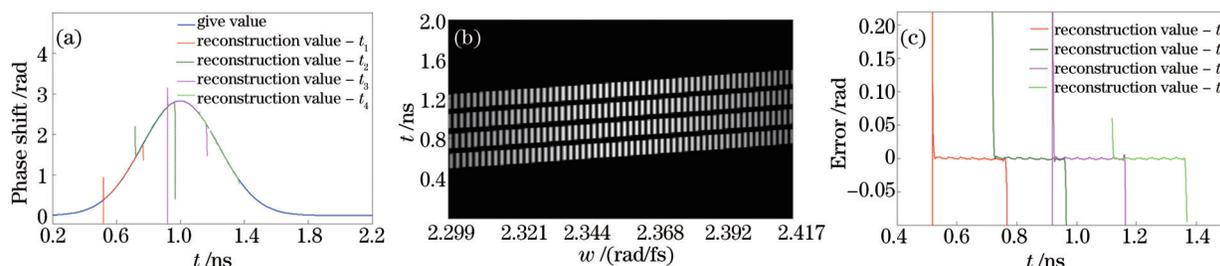


图5 扫描频谱激光干涉仪测量探测脉冲多普勒频移的数值模拟。(a) 多普勒相移信号; (b) 动态频谱干涉条纹; (c) 重建误差

Fig.5 Numerical simulation of scanning spectrum laser interferometer measured Doppler phase shift of the probe pulse.

(a) Doppler phase shift signal; (b) dynamic spectral interference fringe; (d) reconstruction errors

这里每段彩线的时间长度等于啁啾脉冲脉宽 τ_c (250 ps),相邻两段彩线的重叠长度为 50 ps,因此,本例中扫描频谱激光干涉仪的测量范围等于 850 ps,相应的时间分辨为 $\sqrt{\tau_0 \tau_c} \approx 2.4$ ps。对于脉冲参数相同的 CPSI,其测量范围和时间分辨分别为 250 ps、2.4 ps。相对于 CPSI,扫描频谱激光干涉仪在保持时间分辨能力不变的同时获得了更宽的测量范围,而且通过增加脉冲序列中的脉冲个数 N_1 ,还可以进一步增大扫描频谱激光干涉仪的量程。

3 条纹相机采样时间的影响

在扫描频谱激光干涉仪中,当条纹相机使用不同的采样时间档位(对应不同的时间分辨和量程)时,其记录到的频谱干涉条纹分布存在一定的差异。图6是同一对啁啾脉冲之间的频谱干涉条纹($N_1=1$),其中条纹相机的采样时间分别为 10、50、100、500 ps。频谱条纹存在明显的分布差异:当条纹相机的采样时间减小时,固有长度的线性啁啾脉冲及其包含的单频光成分(被展宽到 T_0)都被扫描记录到更多的像素上。这种差异将

会给信号重建带来影响。

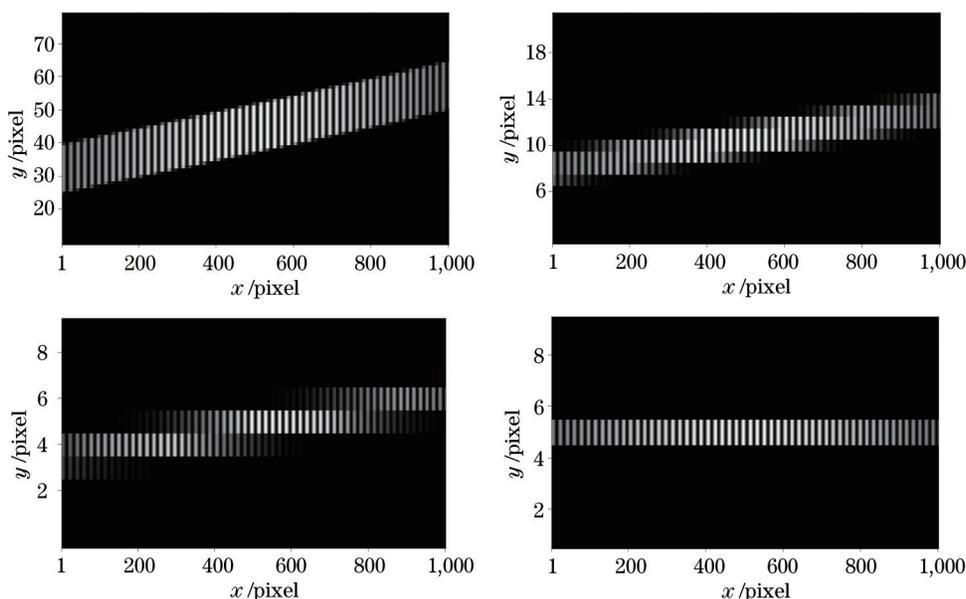


图6 无噪声时,光谱仪-条纹相机记录的频谱干涉条纹。(a) 采样时间 10 ps; (b) 采样时间 50 ps; (c) 采样时间 100 ps; (d) 采样时间 500 ps

Fig.6 Spectral interference fringe is recorded by the spectrometer-streak camera system without noise. (a) Sampling interval of 10 ps; (b) sampling interval of 50 ps; (c) sampling interval of 100 ps; (d) sampling interval of 500 ps

首先考虑频谱条纹不含噪声时的理想情况,将图7(a)中蓝色实线所示的相位扰动信号加载到探测脉冲上,然后采用数值模拟的方式研究扫描频谱激光干涉仪的测量结果。图7(a)中虚线是条纹相机采样时间分别为10、50、100、500 ps时的相位扰动信号测量结果,图7(b)是相应的测量误差。除两端外,扫描频谱激光干涉仪的测量结果都和给定值符合的很好,与条纹相机的采样时间无关。这是因为干涉记录发生在同时到达记录介质的光束之间,而条纹相机的时间扫描记录只是将不同时刻的干涉结果进行了分离记录,对不同的分离记录结果进行积分求和(即上文所述光谱条纹沿纵轴方向的积分),干涉条纹的相对光强分布将保持一致,因此,理论上来说,分离记录的间隔(对应条纹相机的采样时间)不会影响待测信号的重建。然而,根据图7(b)所示的重建误差,条纹相机的采样时间对信号重建产生了一定程度的影响,这主要是因为通过数值模拟方式产生频谱条纹且条纹沿纵向上分布的像素数大于1时,边缘像素上的条纹强度处理并不能完全正确地反映真实情况[当频谱条纹沿纵向的分布只占据一个像素时,认为不存在此类问题,如图6(d)所示],从而导致积分得到的一维条纹分布相对真实值出现了些许偏离,进一步使由此重建的探测脉冲相位扰动信号产生了波动,对于不同的条纹相机采样时间,由于偏离的情况有所不同,所以产生了如图7(b)所示的误差波动差异。其实,这些误差及其波动是非常微小的,因此在数值模拟结果中可以将其忽略。

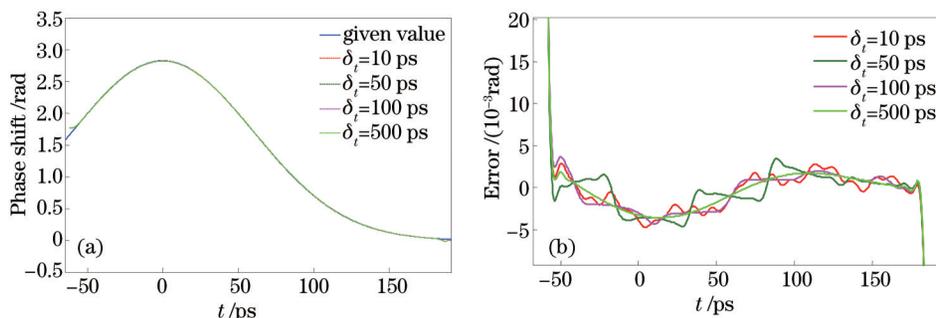


图7 无噪声时,扫描频谱激光干涉仪测量相位扰动信号的数值模拟。(a) 相位扰动信号; (b) 重建误差

Fig.7 Numerical simulation of the scanning spectrum laser interferometer measures phase perturbations without adding noise. (a) Phase perturbation signal; (b) reconstruction errors

一般来说,实验获得的数据都带有噪声,信号的提取重建结果将受其影响。在扫描频谱激光干涉仪中,当条纹相机以不同的采样时间工作时,单套频谱干涉条纹分布占据的有效像素数目存在差异。因此,如果数据带有噪声,沿时间轴方向对频谱条纹积分求和之后,所得一维条纹的信噪比将是不同的(信号强度相同,但噪声累积强度不同),由此重建的信号也必将受到不同程度的影响,具体地可以通过下面的数值模拟说明这个问题。

考虑在如图6所示的频谱干涉条纹中加入均匀分布的随机白噪声。令模拟频谱条纹沿时间轴积分后的结果为归一化分布(即保持积分得到的一维条纹的相对分布不变,将条纹的强度最大值归一化为1),噪声强度在区间(0, I_n)内均匀分布, I_n 为相对于最大条纹强度的噪声幅度值。图8是根据噪声频谱条纹重建的探测脉冲相位扰动信号及其误差,与图7比较可以发现,数据噪声增强了重建信号的振荡,且振荡幅度随着条纹相机采样时间的减小而增加。均方根误差(R_e)可以用来描述相位扰动信号的重建值相对真实值的偏离,均方根误差 $R_e = \sqrt{\sum_{i=1}^M [\phi(t_i) - \varphi(t_i)]^2} / M$, 式中 $\varphi(t_i)$ 为给定的相位扰动信号值, $\phi(t_i)$ 为相位扰动信号的重建值, M 为图8(b)中两条虚线之间的数据点数,这里截去了虚线外侧的端点数据,主要是因为两端处的重建值发生了畸变,不适合用均方根误差进行评价。图9为不同噪声水平下相位扰动信号重建值的均方根误差,从图中可以看出,随着噪声水平的增加重建值的均方根误差在逐渐增大,此外,在相同噪声水平下,减小条纹相机采样时间也导致了误差增大。这说明采样时间的减小降低了条纹信噪比,其原因就是频谱条纹被扫描记录到了更多的像素上,沿时间轴方向积分处理之后,累积噪声强度变得更大,在信号强度不变的情况下,信噪比变差。

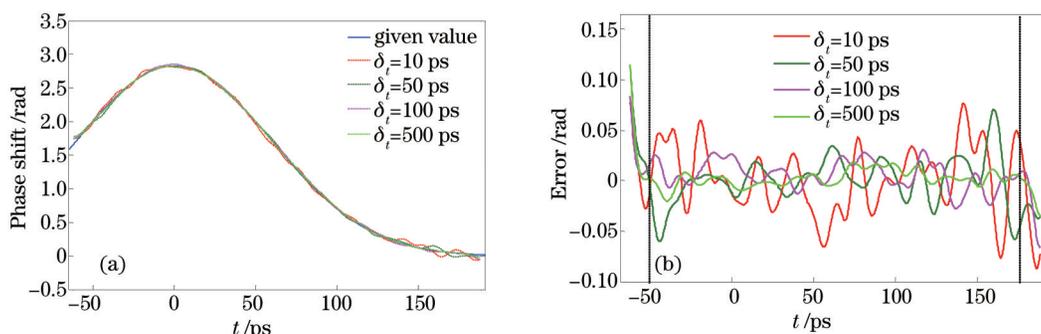


图8 $I_n = 0.06$ 时,扫描频谱激光干涉仪测量相位扰动信号的数值模拟。(a) 相位扰动信号;(b) 重建误差

Fig.8 Numerical simulation of the scanning spectrum laser interferometer measures phase perturbations while $I_n = 0.06$.

(a) Phase perturbation signal; (b) reconstruction errors

对于实际应用中的扫描频谱激光干涉仪,为了降低数据噪声对信号重建的影响,条纹相机不应选择太大的采样时间。太大的采样时间也不合适,因为当采样时间大于啁啾脉冲脉宽 τ_c 时,扫描频谱激光干涉仪便不能对大时间尺度的待测信号进行高时间分辨连续测试。所以合理地选取条纹相机的采样时间是非常重要的。

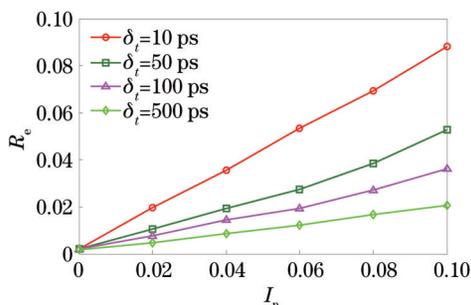


图9 重建信号的均方根误差随噪声水平的分布

Fig.9 Root mean square error of reconstruction signal versus noise level

总体来说,扫描频谱激光干涉仪同时具有皮秒甚至亚皮秒量级的高时间分辨能力和纳秒量级的大范围

测试量程,因此在激光驱动冲击波等快速变化的大时间尺度物理过程研究中具有很好的应用前景。目前,扫描频谱激光干涉仪尚处于理论设计和数值模拟验证阶段,它对于开展进一步的实验验证具有重要的指导和参考意义。

4 结 论

采用周期性的线性啁啾脉冲序列和光谱仪-条纹相机记录系统,设计了一种大量程的扫描频谱激光干涉仪。理论和数值模拟研究表明,扫描频谱激光干涉仪可以通过单发实验实现大时间尺度信号的高时间分辨精确测量。相对于CPSI,该干涉仪具有相同的时间分辨能力,但是实现了测试量程的数倍增加。尽管扫描频谱激光干涉仪记录的频谱条纹分布与采样时间有关,在无噪声情况下,其并不影响信号的精确重建;但是当频谱条纹带有噪声时,信号的重建误差则会随采样时间变化。扫描频谱激光干涉仪的方案设计为超快变化的大时间尺度物理现象研究提供了一种潜在实验技术。

参 考 文 献

- 1 Chien C Y, La Fontaine B, Desparois A, *et al.*. Single-shot chirped-pulse spectral interferometry used to measure the femtosecond ionization dynamics of air[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(8): 578-580.
- 2 Crowhurst J C, Armstrong M R, Knight K B, *et al.*. Invariance of the dissipative action at ultrahigh strain rates above the strong shock threshold[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(14): 144302.
- 3 Ashitkov S I, Komapov P S, Agranat M B, *et al.*. Measurements of strength of metals in a picosecond time range[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(11): 112006.
- 4 Wahlstrand J K, Cheng Y H, and Milchberg H M. Absolute measurement of the transient optical nonlinearity in N₂, O₂, N₂O, and Ar[J]. *Physical Review A*, 2012, 85(4): 043820.
- 5 Churina I V, Cho B I, Bernstein A, *et al.*. Single-shot optical conductivity measurement of dense aluminum plasmas[J]. *Physical Review E*, 2009, 80(1): 015401.
- 6 Matlis N H, Reed S, Bulanov S S, *et al.*. Snapshots of laser wakefields[J]. *Nature Physics*, 2006, 2(11): 749-753.
- 7 Zgadaj R, Downer M C, Muggli P, *et al.*. Optical frequency domain visualization of electron beam driven plasma wakefields[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1299: 505-509.
- 8 Kim K, Alexeev I, and Milchberg H. Single-shot measurement of laser-induced double step ionization of helium[J]. *Optics Express*, 2002, 10(26): 1563-1572.
- 9 Chen Y H, Varma S, Alexeev I, *et al.*. Measurement of transient nonlinear refractive index in gases using xenon supercontinuum single-shot spectral interferometry[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7458-7467.
- 10 Kim K Y, Alexeev I, and Milchberg H M. Single-shot supercontinuum spectral interferometry[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(22): 4124-4126.
- 11 Geindre J P, Audebert P, Rousse A, *et al.*. Frequency-domain interferometer for measuring the phase and amplitude of a femtosecond pulse probing a laser-produced plasma[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(23): 1997-1999.
- 12 Dong Jun, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng, *et al.*. Analysis for phase shifts transformation of chirped pulse from frequency-domain to time-domain based on Fourier transform[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(1): 315-320.
董 军, 彭翰生, 魏晓峰, 等. 基于傅里叶变换模式的啁啾脉冲频域-时域相移转换的研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(1): 315-320.
- 13 Prasad Y B S R, Barnwal S, Naik P A, *et al.*. Chirped pulse interferometry for time resolved density and velocity measurements of laser produced plasmas[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(2): 023305.
- 14 Kim K Y, Yellampalle B, Rodriguez G, *et al.*. Single-shot, interferometric, high-resolution, terahertz field diagnostic[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(4): 041123.

栏目编辑: 刘丰瑞