

文章编号: 1001-3806(2009)03-0232-04

线性啁啾脉冲频谱干涉特性的模拟研究

董军, 彭翰生*, 魏晓峰, 胡东霞, 周维, 赵军普, 程文雍, 刘兰琴
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究宽带脉冲因受外界瞬态扰动而引起的相移随频谱变化的规律, 利用啁啾脉冲与扰动在频域上的卷积特性, 采取将频谱干涉技术和线性啁啾脉冲相结合, 当两束线性啁啾脉冲在频率域相遇时, 相同的频谱成分产生干涉, 从其干涉图中得到随脉冲频谱变化的相对相移。根据傅里叶变换的频谱干涉技术, 对从两束线性啁啾脉冲的频谱干涉图中提取相移进行了数值模拟。结果表明, 对假设具有不同类型的相移进行重构, 还原出随频谱变化的相位扰动。这一结果对超快光学中的瞬态测量是有帮助的。

关键词: 超快光学; 频域相移; 频谱干涉; 啁啾脉冲; 滤波; 时间延迟

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Numerical simulation for the characteristics of spectral interferometry between two linear chirped pulses

DONG Jun, PENG Han-sheng, WEI Xiao-feng, HU Dong-xia, ZHOU Wei,
ZHAO Jun-pu, CHENG Wen-yong, LIU Lan-qin

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The spectral phase shift of broadband pulse caused by transient random disturbance was investigated, based on the combination of the characteristics of linear chirped pulse and the spectral interferometry of two pulses. When the same component of both the pulse spectra meet on the frequency domain, the spectral interference is generated. Extracting spectral phase difference between both the linear chirped pulses from the spectral interferogram, it was simulated based on Fourier transform spectral interferometry (FTSI). The results show that reconstructed phase shift of chirped pulses is characteristic of spectral change, and this reconstruction algorithm is effective. This method is helpful to transient measurement of some physical quantity in ultrafast optics.

Key words: ultrafast optics; spectral phase shifts; spectral interferometry; chirped pulse; filter; time delay

引言

随着飞秒激光脉冲技术的飞速发展, 超强超短脉冲激光与等离子体的相互作用提供了崭新的研究课题^[1-3], 而频域干涉技术在各种瞬态物理量的测量中也得到了越来越广泛的应用。例如基于频域干涉技术探测激光诱导的等离子体^[4], 光纤自相位调制的测量^[5], 光纤中飞秒脉冲群延迟的测量^[6], 对高功率超短脉冲激光诱导产生的等离子体波(尾场)的测量^[7-9]等。但是在频域干涉技术中, 通常采用的是一对飞秒级的变换极限脉冲作为探测脉冲对, 在光谱仪的输出

面发生干涉, 形成干涉条纹, 通过外界扰动前后条纹峰值的移动得到脉冲对之间的频谱相位差, 但是这种方法得到的相位差是与频谱无关的常量, 不能反映相位差随频谱变化的特性, 也就不能反映相位差随时间的变化, 为了对待测物理量的瞬态特性进行测量, 只能通过使用具有不同时间延迟的多脉冲序列对待测量的不同时刻进行采样测量, 最后通过数据拟合来达到瞬态的测量目的。这极大地限制了时间分辨能力, 且难以实现单脉冲的实时测量。因此, 为了改进这种测量方法, 提出了基于啁啾脉冲的频谱干涉技术^[10-12], 所测得的频谱相位差反映了随频谱变化的特性。

作者阐述了线性啁啾脉冲频域干涉测量技术的特性和基本原理, 制定了重构频谱相位差的算法流程, 通过数值模拟和分析显示这种算法是可行的。

1 频谱干涉的基本原理

图1是两束脉冲频谱干涉示意图。两束中心频率相同、有一定时间延迟 τ 的啁啾脉冲, 具有相同光强和

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室资助项目(9140C6803020804)

作者简介: 董军(1968-), 男, 博士研究生, 主要从事飞秒激光尾场测量技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: penghsh@caep.ac.cn

收稿日期: 2008-04-01; 收到修改稿日期: 2008-05-07

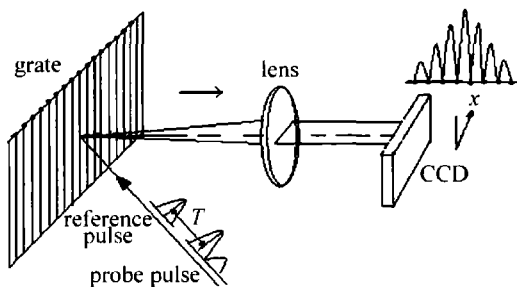


Fig. 1 Schematic of spectral interferometry

位相,当其中一个脉冲相位受到外界扰动而被调制(探测脉冲)而另一个未受调制(参考脉冲),经光栅色散,两束光在透镜焦平面发生干涉。在焦平面上,脉冲频谱坐标系与 x 轴空间坐标系重合,即频谱干涉条纹以空间干涉条纹的形式体现出来,通过 CCD 记录并送入计算机,将空间坐标转换为脉冲频率坐标^[13],对干涉条纹进行分析可得到两束脉冲间的频谱相位差。

为此,首先将 CCD 空间坐标转换为脉冲频率坐标:

$$\omega = \frac{2\pi cf}{d(x_0 - x)} \quad (1)$$

式中, c 为光速, ω 为脉冲频率, f, d 分别为透镜焦距和光栅周期。 $x_0 = f\sin\theta_1, x = f\sin\theta_2, \theta_1, \theta_2$ 分别为脉冲在光栅上的入射角和衍射角,只考虑 $x < x_0$ 的值。可以看出,空间坐标上的每一点唯一对应一个脉冲频率成分,因此,对谱干涉条纹的分析可以参照空间干涉条纹的分析方法来处理。

考虑一束高斯脉冲,经分束后,成为两束时频特性相同且同轴传输的具有相对时间延迟 τ 的高斯脉冲对,分别作为参考脉冲 $E_r(t)$ 和探测脉冲 $E_p(t)$ 。其中参考脉冲的光谱表示 $E_r(\omega) = E_{r0}(\omega) \exp[i\varphi_r(\omega)]$ 。当探测脉冲受到外界扰动时 $E_p(t)$ 变为 $E_p'(t)$,其光谱表示为 $E_p'(\omega) = E_{p0}'(\omega) \exp[i\varphi_p'(\omega)]$ 。则谱干涉条纹由下式表示:

$$I(\omega) = |E_{r0}(\omega)|^2 + |E_{p0}'(\omega)|^2 + 2|E_{r0}(\omega) E_{p0}'(\omega)| \cos[\Delta\varphi(\omega) + \omega\tau] \quad (2)$$

式中, $\Delta\varphi(\omega) = \varphi_p(\omega) - \varphi_r(\omega)$ 为两个脉冲之间的谱相移。 τ 为两个脉冲之间的时间延迟。频谱干涉图的条纹间隔为 $2\pi/\tau$ 。(2)式中前两项为干涉图的直流分量,最后一项包含了两个交流分量, $\omega\tau$ 为干涉图中的快变部分,是线性项。 $\Delta\varphi(\omega)$ 是信号慢变部分,是从干涉图中所需要得到的部分。

2 线性啁啾脉冲频谱干涉的特性

探测脉冲受到微小扰动后, $E_p'(t) = E_p(t)\varepsilon(t)$,其频谱 $E_p'(\omega) = E_p(\omega) * \varepsilon(\omega)$,符号“*”表示卷积, $\varepsilon(t)$ 为外界扰动场, $\varepsilon(\omega)$ 为 $\varepsilon(t)$ 的傅里叶频谱。当参考脉冲和探测脉冲均为变换极限脉冲时,由于变换

极限脉冲的频谱位相为 0,卷积的结果使得受扰动探测脉冲 $E_p'(\omega)$ 的谱位相不再为 0,而是一个以 $|E_p'(\omega)|$ 为权重的相位均值,无法反映频域相移随频谱的变化。

当参考-探测脉冲对是线性啁啾脉冲时,由于啁啾脉冲的谱位相不为 0,而且频谱是沿脉冲时间轴展开的,其与时间有着对应的线性函数关系,则未受扰动的探测脉冲谱与扰动信号频谱的卷积结果使得 $E_p'(\omega)$ 的谱位相不在是以脉冲振幅为权重的均值,而是受到了未受扰动探测脉冲谱相位的调制。因此,通过线性啁啾脉冲对之间的频谱干涉提取的频谱相位差 $\Delta\varphi(\omega)$ 反映了频域相移随脉冲频谱的变化,也同时反映了相移随时间的变化。因此,利用啁啾脉冲谱干涉的这一特性可实现某些超快现象中的瞬态测量。

3 啁啾脉冲频域相移的数值模拟

根据以上两个同轴传输的啁啾脉冲对之间的谱干涉原理,重构频域相移的算法流程图如图 2 所示,获得

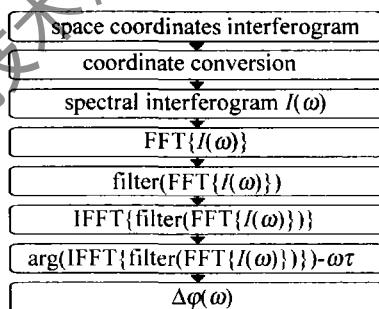


Fig. 2 Flow diagram of the reconstruction of spectral phase shift

脉冲对之间的谱相移分为以下几步:(1)对干涉图进行傅里叶变换,将干涉信号中的直流成分和两个交流成分分离;(2)利用滤波技术将(2)式中的一个交流分量提取出来;(3)对提取出的交流分量进行逆傅里叶变换,从得到的位相中减去线性相 $\omega\tau$,即为重构的啁啾脉冲频域相移 $\Delta\varphi(\omega)$ 。

在数值模拟计算中,假定参考脉冲和探测脉冲均为脉冲宽度(半峰全宽) $\rho = 1000\text{fs}$ 的线性啁啾高斯脉冲,中心波长为 800nm ,带宽为 40nm 。在满足采样定理和最大分离干涉条纹中交直流信号的两个原则下,由成像光谱仪的最小频谱分辨来确定频谱干涉条纹的宽度,而条纹宽度又确定了参考-探测脉冲对之间的时间延迟,假定两脉冲间的时间延迟 $\tau = 3\text{ps}$ 。参考脉冲频域电场表示为:

$$E_r(\omega) = E_0 \exp\left[-\frac{a/4}{a^2 + b^2}(\omega - \omega_0)^2\right] \times \exp\left[-i\frac{b/4}{a^2 + b^2}(\omega - \omega_0)^2\right] \quad (3)$$

式中, $a = 2\ln 2 \times \rho^{-2}$, b 为线性啁啾系数。由假定参量可得 $b = 42.5a$, 脉冲频谱宽度 (半峰全宽) $\Delta\omega = 11.781 \times 10^{13} \text{ rad/s}$ 。

当探测脉冲受到外界扰动时, 引起时域相移 $\Delta\phi(t)$, 对应的频域相移为 $\Delta\varphi(\omega)$ 。则探测脉冲频域电场为:

$$E_p(\omega) = E_0 \exp\left[-\frac{a/4}{a^2 + b^2}(\omega - \omega_0)^2\right] \times \exp\left[-i\frac{b/4}{a^2 + b^2}(\omega - \omega_0)^2 - i\Delta\varphi(\omega)\right] \quad (4)$$

3.1 仅有 2 次时域相移下的数值模拟和分析

当时域相移中只包含时间的 2 次项时, 即 $\Delta\phi(t) = ct^2$ 。随机假定扰动参量 $c = 17.5a$ 。由设定的参量根据(2)式对两个啁啾脉冲的频谱干涉以及探测脉冲的谱相移进行数值模拟, 结果分别如图 3a 和图 3b 所示。

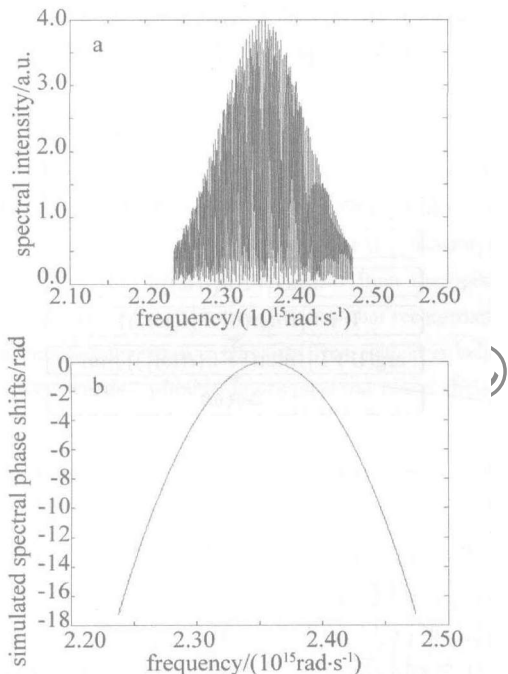


Fig. 3 Simulated spectral interferogram and spectral phase shifts with given pulse parameters

为了更好地模拟频域相移的重构过程, 对图 3a 中的谱干涉图加了矩形窗, 并在矩形窗外增加了零采样点。根据图 2 所示频域相移的重构算法流程, 从图 3a 中重构出探测脉冲的谱相移, 如图 4a 所示; 并将重构的谱相移与由设定参量模拟的谱相移图 3b 进行比较, 得到重构误差, 如图 4b 所示。

从图 3 和图 4 中可以看出, 在频谱区间内除区间端点附近有微小的差别外, 重构的谱相移与模拟的结果图有完好的吻合, 而这种端点处的差别是由于滤波的不完整性引起的。不同的滤波方法所带来的重构误差不同, 采取恰当的滤波参量可使的这种误差最小。

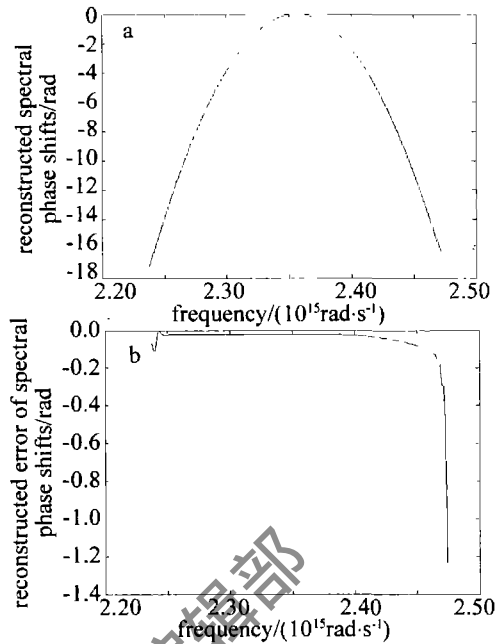


Fig. 4 Reconstructed spectral phase shifts from spectral interferogram and reconstruction error

3.2 外界扰动引入的谱相移为正弦信号时的数值模拟和分析

当探测脉冲频域受到正弦信号形式的扰动时, 设脉冲频谱坐标为 ω , 单位为 rad/s , 即 $\Delta\varphi(\omega) = \sin(m\omega)$ 。假定脉冲扰动参量 $m = 10^{-13} \text{ s}$, 由(2)式对两个啁啾脉冲的频谱干涉以及谱相移进行数字模拟, 结果分别如图 5a 和图 5b 所示。

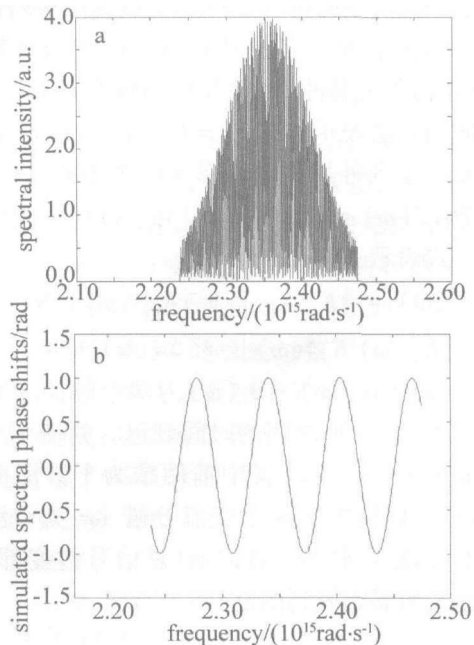


Fig. 5 Simulated spectral interferogram and spectral phase shifts with given pulse parameters

对频谱干涉图图 5a 加窗补零后, 根据图 2 所示频域相移的重构算法流程, 从图 5a 中重构出探测脉冲的谱相移, 如图 6a 所示; 并将重构的结果与图 5b 中的结果进行比对得到重构误差, 如图 6b 所示。

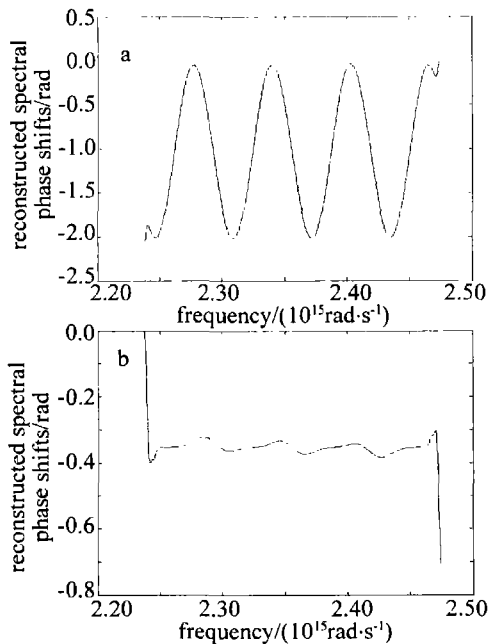


Fig. 6 Reconstructed spectral phase shifts from spectral interferogram and reconstruction error

从图 6b 可以看出,重构的谱相移除了在区间端处有较大的误差外,与图 4b 相比,在区间中间部分也有不同程度的误差,这是因为从图 5a 中提取相移的过程中采用的滤波窗口比图 4 中采用的窗口要大,滤波过程中零频噪音的影响更大造成的。

从图 3 ~ 图 6 可以看出,从频谱干涉图中重构出的频谱相移不是常量,而是随脉冲频谱的变化而变化。这反映了外界扰动的变化规律。

4 结论

通过对两束同轴传输的线性啁啾脉冲频谱干涉技术进行分析可以得出:啁啾脉冲与脉冲频谱干涉技术结合起来可以有效地提取出啁啾脉冲因受到外界扰动而引起的频域相移,且这种相移反映了随频谱的变化规律,也就客观地反映出外界扰动随时间的动态变化。这对于超快瞬态物理量的测量具有重要的意义。数值模拟和分析显示,制定的频域相移的重构算法是有效

的,可获得随脉冲频谱变化的频域相移。

参考文献

- [1] TAJIMA T, DAWSON J M. Laser electron accelerator [J]. *Phys Rev Lett*, 1979, 43(4): 267-270.
- [2] ZHAO Sh H, SHI L, LI Y J, *et al.* Filamentation of femtosecond laser pulse in atmosphere and its application [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3): 256-258 (in Chinese).
- [3] CHEN L M, NAKAJIMA K, HONG W, *et al.* Elongation of plasma channel for electron acceleration [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(s1): 133-135.
- [4] 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]. *Opt Lett*, 1994, 19(23): 1997-1999.
- [5] REYNAUD F, SALIN F, BARTHELEMY A. Measurement of phase shifts introduced by nonlinear optical phenomena on subpicosecond pulses [J]. *Opt Lett*, 1989, 14(5): 275-277.
- [6] WAYNE H K, NATHANIEL M P, KATHRYN D L, *et al.* Interferometric measurements of femtosecond group delay in optical components [J]. *Opt Lett*, 1988, 13(7): 574-576.
- [7] MARQUES J R, GEINDRE J P, AMIRANOFF F, *et al.* Temporal and spatial measurements of the electron density perturbation produced in the wake of an ultrashort laser pulse [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 76(19): 3566-3569.
- [8] SIDERS C W, le BLANC S P, FISHER D, *et al.* Laser wakefield excitation and measurement by femtosecond longitudinal interferometry [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 76(19): 3570-3573.
- [9] KOTAKI H, KANDO M, OKETA T, *et al.* Direct measurement of coherent ultrahigh wakefields excited by intense ultrashort laser pulses in a gas-jet plasma [J]. *Physics of Plasmas*, 2002, 9(4): 1392-1400.
- [10] 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]. *Opt Lett*, 2000, 25(8): 578-580.
- [11] RICHARDSON C J K, SPICER J B, HUBER R D, *et al.* Direct detection of ultrafast thermal transients by use of a chirped, supercontinuum white-light pulse [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(14): 1105-1107.
- [12] KIM K, ALEXEEV I, MILCHBERG H. Single-shot measurement of laser-induced double step ionization of helium [J]. *Optics Express*, 2002, 10(26): 1563-1572.
- [13] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 357-360 (in Chinese).