

文章编号: 0253-2239(2009)06-1557-06

用干涉自相关导数谱图明确超短脉冲啾啾方向

陈碧芳¹ 刘天夫² 杨 琴¹

(¹ 嘉兴学院机电工程学院, 浙江 嘉兴 314001; ² 中国计量学院信息工程学院, 浙江 杭州 310034)

摘要 提出了新型的确定超短激光脉冲啾啾方向的方法, 采用对二次干涉自相关(IAC)中的基频信号求一阶导数, 得到干涉自相关导数谱图(D-IAC), 利用该导数谱图对啾啾方向有很高灵敏度的特性, 通过对高斯型强度分布的线性啾啾、平方啾啾及立方啾啾脉冲进行数值计算与模拟, 得到导数谱图的峰与谷分别对应啾啾的负与正。找到了判定啾啾正负的方向因子, 即正弦函数因子, 并通过实验证实干涉自相关导数谱图可明确超短激光脉冲啾啾方向, 且干涉自相关导数谱图能用于超短激光脉冲啾啾方向的检测。

关键词 超快光学; 超短激光脉冲测量; 啾啾方向; 干涉自相关导数谱图; 干涉自相关

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1557

Determination of Chirp Direction in Ultrashort Laser Pulses Using Derivative Interference Autocorrelation

Chen Bifang¹ Liu Tianfu² Yang Qin¹

(¹ School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China)
(² Department of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310034, China)

Abstract A new method is presented for detection of chirp direction in ultrashort laser pulses. Based on interference autocorrelation (IAC) of the fundamental frequency signal for a first derivative, the derivative interference autocorrelation (D-IAC) is obtained. This method is highly sensitive to chirp direction. The linear chirp, square and cubic chirp pulses with Gaussian intensity are numerically calculated and simulated, and the derivative interference autocorrelation peak and the valley correspond negative and positive chirp separately. It is found the sine function factor can determine the direction of chirp. Experiments prove the chirp direction in ultrashort laser pulses can be determined by the derivative interference autocorrelation.

Key words ultrafast optics; ultrashort laser pulse measurement; chirp direction; derivative interference autocorrelation; interference autocorrelation

1 引 言

用二次干涉自相关(IAC)可以测量飞秒脉冲宽度,也可以检测啾啾,但其检测啾啾时灵敏度较低^[1]。对二次干涉自相关作频谱修正可精确地测量啾啾,这种技术,称为干涉自相关修正光谱(MOSAIC),与标准的干涉自相关啾啾测量相比较,灵敏度有显著提高^[2]。用干涉自相关修正光谱可以估计在超短激光脉冲的高阶啾啾^[3];用干涉自相关修正光谱和脉冲光谱也可以明确啾啾特性^[4]。啾啾不仅有大小,而且还有方向,即正负的区别。二次干

涉自相关及干涉自相关修正光谱不能区分脉冲是正啾啾还是负啾啾,啾啾的方向无法确定^[5]。对二次干涉自相关作非平衡频谱修正可以观测超短激光脉冲时间不对称性^[6]。对二次干涉自相关作另一种频谱修正,即对二次干涉自相关信号的基频成分求一阶导数,得其导数频谱图,从导数频谱图(导数谱图)可明确超短激光脉冲的啾啾方向。

超短激光脉冲啾啾方向的测量,有利于分析脉冲光束的空间奇异性^[7],有利于飞秒脉冲激光器^[8]和飞秒脉冲激光放大技术的研究^[9]。

收稿日期: 2008-08-11; 收到修改稿日期: 2008-11-14

作者简介: 陈碧芳(1960-),女,高级讲师,主要从事激光测量技术和激光生物作用方面的研究。

E-mail: cccbffllll@Yahoo.com.cn

2 干涉自相关导数谱图的原理

激光脉冲含有不同的啁啾量,干涉自相关二次谐波的包络形状不同,因而干涉自相关二次谐波的包络含有啁啾信息。引入归一化的干涉自相关二次谐波的信号,其表达式^[3]为

$$S_1(\tau) = 1 + 2F_1(\tau) + F_2(\tau)\cos(2\omega\tau) + 2G(\tau)\cos(\omega\tau), \quad (1)$$

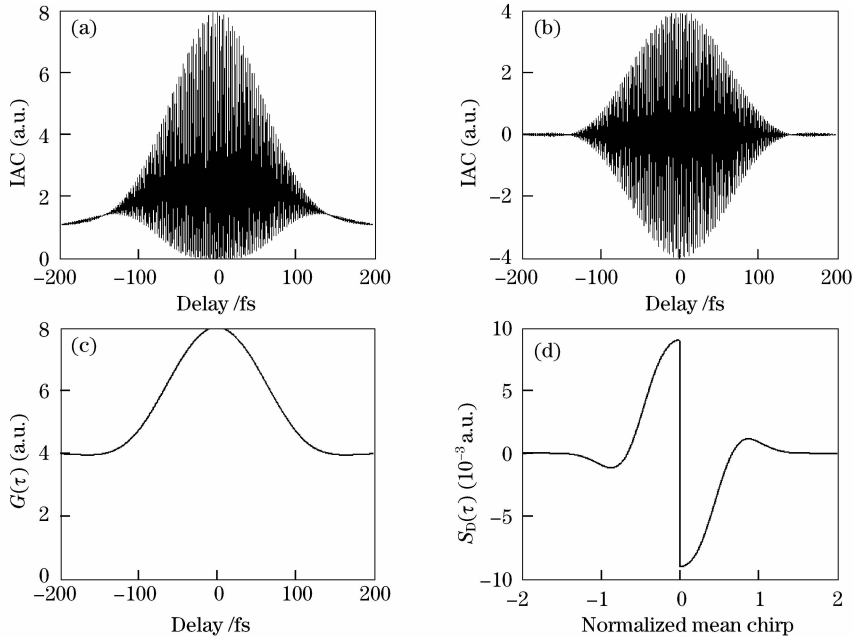
$$F_1(\tau) = \int I(t)I(t+\tau)dt,$$

$$F_2(\tau) = \int I(t)I(t+\tau)\cos(2\Delta\phi)dt, \quad (2)$$

$$G(\tau) = \int [I(t) + I(t+\tau)] \sqrt{I(t)} \times \sqrt{I(t+\tau)} \cos(\Delta\phi)dt, \quad (3)$$

$$I(t) = \int E(t)E^*(t)dt, \quad (4)$$

(1)式中 τ 为两束光之间的相对时延, ω 为光波频率, $\phi(t)$ 为光脉冲的相位, $\Delta\phi(t,\tau) = \phi(t+\tau) - \phi(t)$, $E(t)$ 为光电场,第1项 $1 = \int I^2(t)dt$,第2项是强度自相关项,第3,4项是包含脉冲啁啾信息的干涉项。从



1 不同的干涉自相关信号(a)干涉自相关信号;(b)干涉自相关的基频信号(ω);(c)基频信号的上包络曲线 $G(\tau)$;(d)以啁啾为自变量的上包络曲线导数 $S_D(\tau)$ 。

ig. 1 Various IAC signals (a) IAC signal (b) ω signal of IAC (c) $G(\tau)$ signal (d) $S_D(\tau)$ signal as a function of the normalized mean chirp

3 干涉自相关导数谱图表达式

3.1 线性啁啾脉冲导数谱图

为了便于得到导数谱图解析式,脉冲强度分布

干涉自相关的包络可以看出脉冲的啁啾。然而,其啁啾大小的估定是主观的,啁啾的正负也无法确定。

从干涉自相关变换到干涉自相关导数谱图(D-IAC)就能精确地反映啁啾的正负。(1)式揭示二次干涉自相关信号由3个主要频谱成分组成,即频率为0, ω 和 2ω 项组成。从二次干涉自相关中提取 ω 项,即提取基频成分,对其求一阶导数后给出了时间域的干涉自相关导数谱图信号

$$S_D(\tau) = \frac{\partial G(\tau)}{\partial \tau}. \quad (5)$$

干涉自相关中的基频成分的导数 $S_D(\tau)$,即干涉自相关导数谱图,对啁啾正负非常敏感。其对啁啾正负的确定主要是从干涉自相关变换到干涉自相关导数谱图后,以啁啾参数为自变量的偶函数变换为奇函数,即余弦函数因子变换为正弦函数因子,如图1(c),(d)所示。找到了判定啁啾正负的方向因子,即正弦函数因子。而二次干涉自相关信号对以啁啾参数为自变量的函数为偶函数,二次干涉自相关信号包含余弦函数因子,导致检测不到啁啾的正负。

函数采用高斯型。假设光脉冲是包含线性啁啾的高斯型脉冲^[10~12],其光电场可表示为

$$E_1(t) = A e^{-\frac{t^2}{2T^2}} e^{j(\omega t + \frac{a^2}{T^2} t^2)}, \quad (6)$$

其中 A 为脉冲电场的峰值, T 为脉冲 $1/e$ 强度点半宽, a 为啁啾参数。将(6)式代入(3)式得到干涉自相关中光谱频率为 ω 项的信号:

$$G_1(\tau) = 4e^{-\frac{(3+4a^2)\tau^2}{8T^2}} \cos\left(\frac{a\tau^2}{2T^2}\right). \quad (7)$$

再将(7)式代入(5)式得到干涉自相关导数谱图信号

$$S_{D1}(\tau) = \frac{1}{T^2} e^{-\frac{(3+4a^2)\tau^2}{8T^2}} [(3+4a^2)^2 \tau^2 + (4a\tau)^2]^{1/2} \times \sin\left(\frac{a\tau^2}{2T^2} + \arctan \frac{3+4a^2}{4a}\right). \quad (8)$$

当 $T=80$ fs, $\omega=3044$ THz($\lambda=619$ nm), $a=\pm 0.5$,

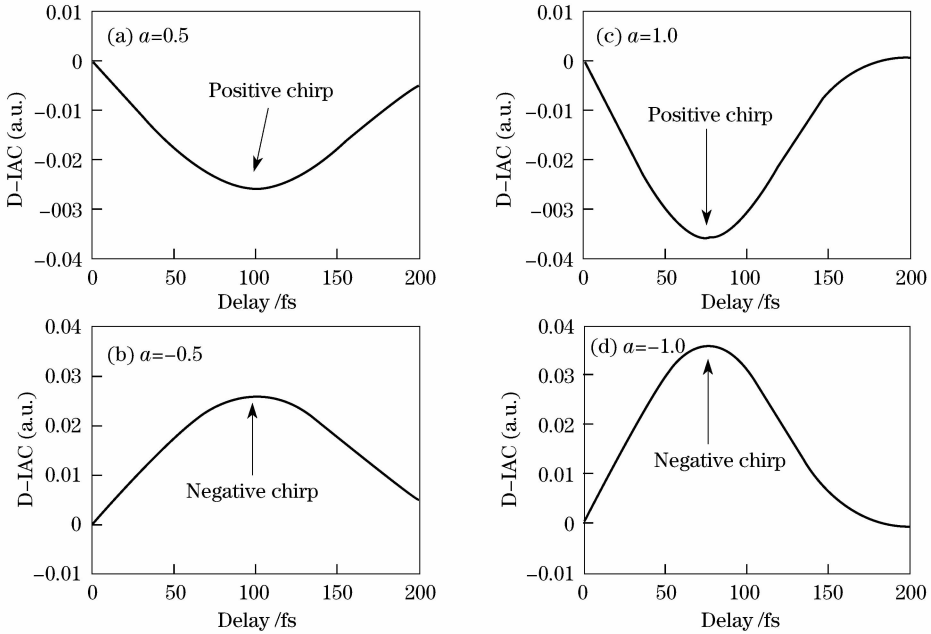


图2 线性啁啾干涉自相关导数谱图的理论曲线

Fig. 2 Calculated D-IAC traces for various degrees of linear chirp

3.2 平方啁啾脉冲导数谱图

假设光脉冲是包含平方啁啾的高斯型脉冲^[10~12], 其光电场可表示为

$$E_2(t) = Ae^{-\frac{t^2}{2T^2}} e^{i(\omega t + \frac{a^3}{T^3})}, \quad (9)$$

其中 A 为脉冲电场的峰值, T 为脉冲 $1/e$ 强度点半宽, a 为啁啾参数。将(9)式代入(3)式得到干涉自相关中光谱频率为 ω 项的信号:

$$G_2(\tau) = 4(1 + 9a^2 \tau^2 / 4T^2)^{-1/4} \times e^{-\frac{\tau^2 (3T^2 + 9a^2 \tau^2)}{2T^2 (4T^2 + 9a^2 \tau^2)}} \cos A, \quad (10)$$

$$A = \frac{a\tau^3}{2T^3} \frac{(7T^2 + 9a^2 \tau^2)}{(8T^2 + 18a^2 \tau^2)}. \quad (11)$$

再将(10)式代入(5)式得到干涉自相关导数谱图信号:

$$S_{D2}(\tau) = -(1 + 9a^2 \tau^2 / 4T^2)^{-1/4} e^{-\frac{\tau^2 (3T^2 + 9a^2 \tau^2)}{2T^2 (4T^2 + 9a^2 \tau^2)}} \times (B^2 + C^2)^{1/2} \sin(A + \theta), \quad (12)$$

$$B = \frac{36a^2 T^4 \tau + 81a^4 T^2 \tau^3 - 24T^4 \tau - 144a^2 T^2 \tau^3 - 162a^4 \tau^5}{2T^2 (4T^2 + 9a^2 \tau^2)^2}, \quad (13)$$

± 1.0 时, 计算出 $S_{D1}(\tau)$ 的迹线如图2所示, 图2分别为 $a=0.5, -0.5, 1.0, -1.0$ 时的情况, 其中箭头所指处曲线的峰与谷分别对应啁啾的负与正, 这主要是由于 $S_{D1}(\tau)$ 的迹线表达式中 $\sin\left(\frac{a\tau^2}{2T^2} + \arctan \frac{3+4a^2}{4a}\right)$ 作用。在啁啾参数 a 改变正负符号时, $\sin\left(\frac{a\tau^2}{2T^2} + \arctan \frac{3+4a^2}{4a}\right)$ 随着改变正负, 因此正弦函数 $\sin\left(\frac{a\tau^2}{2T^2} + \arctan \frac{3+4a^2}{4a}\right)$ 是判定啁啾正负的方向因子。

$$C = a \left[\frac{84T^4\tau^3 + 243a^2T^2\tau^5 + 243a^4\tau^7}{4T^3(4T^2 + 9a^2\tau^2)^2} \right], \quad (14)$$

$$\theta = \arctan \frac{B}{C}. \quad (15)$$

当 $T=80$ fs, $\omega=3044$ THz ($\lambda=619$ nm), $a=\pm 0.6, \pm 1.0$ 时, 计算出 $S_{D2}(\tau)$ 的迹线如图 3 所示. 图 3 分别为 $a=0.6, -0.6, 1.0, -1.0$ 时的情况,

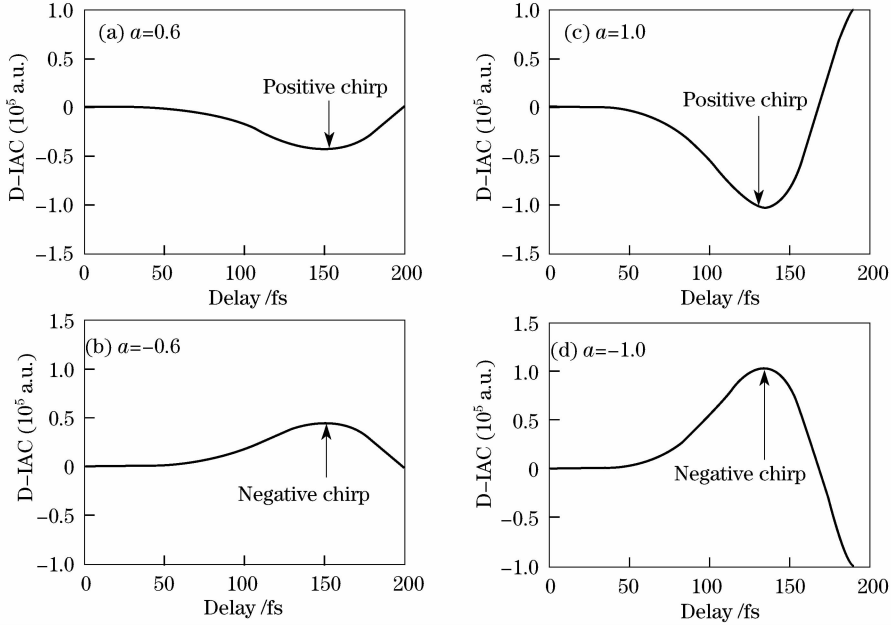


图 3 平方啁啾干涉自相关导数谱图的理论曲线

Fig. 3 Calculated D-IAC traces for various degrees of quadratic chirp

3.3 立方啁啾脉冲导数谱图

假设光脉冲是包含立方啁啾的高斯型脉冲^[10~12], 其光电场可表示为

$$E_3(t) = A e^{-\frac{t^2}{2T^2}} e^{i(\omega t + \frac{a^3}{T^4})}. \quad (16)$$

将(16)式代入(3)式得到干涉自相关中光谱频率为 ω 项的信号:

$$G_3(\tau) = (1+9a^2\tau^4/T^4)^{-1/4} \cdot e^{-\frac{\tau^2}{2T^2}} \{ [0.89\cos(\theta+\beta) + 0.30\cos(\theta+\beta) + \dots + 0.21\cos(\theta+\beta)] + e^{-\frac{\tau^2}{T^2}} [0.89\cos(\theta+\gamma) + 0.30\cos(\theta+\gamma) + \dots + 0.21\cos(\theta+\gamma)] \}, \quad (17)$$

$$\theta = \frac{4a\tau}{T^4} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2\tau^4}{T^8} \right)^{-3/4}, \quad (18)$$

$$\beta = a \left(\frac{\tau^2}{a^2 T^4} + \frac{16\tau^6}{T^8} \right)^{1/2} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2\tau^4}{T^8} \right)^{-1/4}, \quad (19)$$

$$\gamma = a \left(\frac{9\tau^2}{a^2 T^4} + \frac{16\tau^6}{T^8} \right)^{1/2} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2\tau^4}{T^8} \right)^{-1/4}. \quad (20)$$

再将(17)式代入(5)式得到干涉自相关导数谱图信号

其中箭头所指处曲线的峰与谷分别对应啁啾的负与正, 这同样是由于 $S_{D2}(\tau)$ 的迹线表达式中 $\sin(A+\theta)$ 作用. 在啁啾参数 a 改变正负符号时, 表达式 $A = \frac{a\tau^3}{2T^3} \frac{(7T^2+9a^2\tau^2)}{(8T^2+18a^2\tau^2)}$ 和 $\theta = \arctan \frac{B}{C}$ 值的正负相应发生改变, $\sin(A+\theta)$ 也随着改变正负, 因此正弦函数 $\sin(A+\theta)$ 是判定啁啾正负的方向因子.

$$S_{D3}(\tau) =$$

$$\begin{aligned} & - (0.89 \{ [C_1^2 + C^2(A_1 + B_1)^2]^{1/2} \sin(A+B+D) + \\ & [C_1^2 + C^2(A_1 - B_1)^2]^{1/2} \sin(A - B + E) + \\ & [F_1^2 + F^2(A_1 + G_1)^2]^{1/2} \sin(A + G + H) + \\ & [F_1^2 + F^2(A_1 - G_1)^2]^{1/2} \sin(A - G + I) \} + \dots + \\ & 0.21 \{ [C_1^2 + C^2(A_1 + B_1)^2]^{1/2} \sin(A+B+D) + \\ & [C_1^2 + C^2(A_1 - B_1)^2]^{1/2} \sin(A - B + E) + \\ & [F_1^2 + F^2(A_1 + G_1)^2]^{1/2} \sin(A + G + H) + \\ & [F_1^2 + F^2(A_1 - G_1)^2]^{1/2} \sin(A - G + I) \}), \end{aligned} \quad (21)$$

式中 $A = \frac{a\tau^3}{T^4}$, $B = a \left[\frac{4\tau}{T^4} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2\tau^4}{T^8} \right)^{-3/4} + \left(\frac{\tau^2}{a^2 T^4} + \frac{16\tau^6}{T^8} \right)^{1/2} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2\tau^4}{T^8} \right)^{-1/4} \right]$, $C = (1 + 9a^2\tau^4/T^4)^{-1/4} \cdot e^{-\tau^2/2T^2}$, $G = a \left[\frac{4\tau}{T^4} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2\tau^4}{T^8} \right)^{-3/4} + \left(\frac{9\tau^2}{a^2 T^4} + \frac{16\tau^6}{T^8} \right)^{1/2} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2\tau^4}{T^8} \right)^{-1/4} \right]$, $F = (1 + 9a^2\tau^4/T^4)^{-1/4} \cdot e^{-\frac{3\tau^2}{2T^2}}$, A_1, B_1, C_1, F_1, G_1 分别为 A, B, C, F, G 的导数,

$$D = \arctan \left\{ \frac{\tau}{T^2} \left(1 + \frac{9a^2 \tau^2 T^2}{T^4 + 9a^2 \tau^4} \right) / a \left\{ \frac{4\tau^3}{T^4} \pm \left[\frac{4}{T^4} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2 \tau^4}{T^8} \right)^{-3/4} + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau^2}{a^2 T^4} + \frac{16\tau^6}{T^8} \right)^{-1/2} \left(\frac{2\tau}{a^2 T^4} + \frac{96\tau^5}{T^8} \right) \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2 \tau^4}{T^8} \right)^{-1/4} - \frac{432a^2 \tau^4}{T^{12}} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2 \tau^4}{T^8} \right)^{-7/4} - \frac{36a^2 \tau^3}{T^8} \left(\frac{\tau^2}{a^2 T^4} + \frac{16\tau^6}{T^8} \right)^{1/2} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2 \tau^4}{T^8} \right)^{-5/4} \right] \right\} \right\}, \quad (22)$$

$$H = \arctan \left\{ \frac{\tau}{T^2} \left(1 + \frac{9a^2 \tau^2 T^2}{T^4 + 9a^2 \tau^4} \right) / a \left\{ \frac{4\tau^3}{T^4} \pm \left[\frac{4}{T^4} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2 \tau^4}{T^8} \right)^{-3/4} + \frac{1}{2} \left(\frac{9\tau^2}{a^2 T^4} + \frac{16\tau^6}{T^8} \right)^{-1/2} \left(\frac{2\tau}{a^2 T^4} + \frac{96\tau^5}{T^8} \right) \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2 \tau^4}{T^8} \right)^{-1/4} - \frac{432a^2 \tau^4}{T^{12}} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2 \tau^4}{T^8} \right)^{-7/4} - \frac{36a^2 \tau^3}{T^8} \left(\frac{9\tau^2}{a^2 T^4} + \frac{16\tau^6}{T^8} \right)^{1/2} \left(\frac{4}{T^4} + \frac{36a^2 \tau^4}{T^8} \right)^{-5/4} \right] \right\} \right\}. \quad (23)$$

(22)式的中括号前取负号时为 E , (23)式的中括号前取负号时为 I .

当 $T=80$ fs, $\omega=3044$ THz($\lambda=619$ nm), $a=\pm 0.004, \pm 0.006$ 时, 计算出 $S_{D3}(\tau)$ 的迹线如图 4 所示。图 4 分别为 $a=0.004, -0.004, 0.006, -0.006$ 时的情况, 其中箭头所指处曲线的峰与谷分别对应啁啾的负与正, 这主要也是由于 $S_{D3}(\tau)$ 的迹

线表达式中 $\sin(A+B+D), \sin(A-B+E), \sin(A+G+H)$ 和 $\sin(A-G+I)$ 作用。在啁啾参数 a 改变正负符号时, A, B, D, E, G, H, I 表达式值的正负相应发生改变, $\sin(A+B+D), \sin(A-B+E), \sin(A+G+H)$ 和 $\sin(A-G+I)$ 也随着改变正负, 因此正弦函数 $\sin(A+B+D), \sin(A-B+E), \sin(A+G+H)$ 和 $\sin(A-G+I)$ 是判定啁啾正负的方向因子。

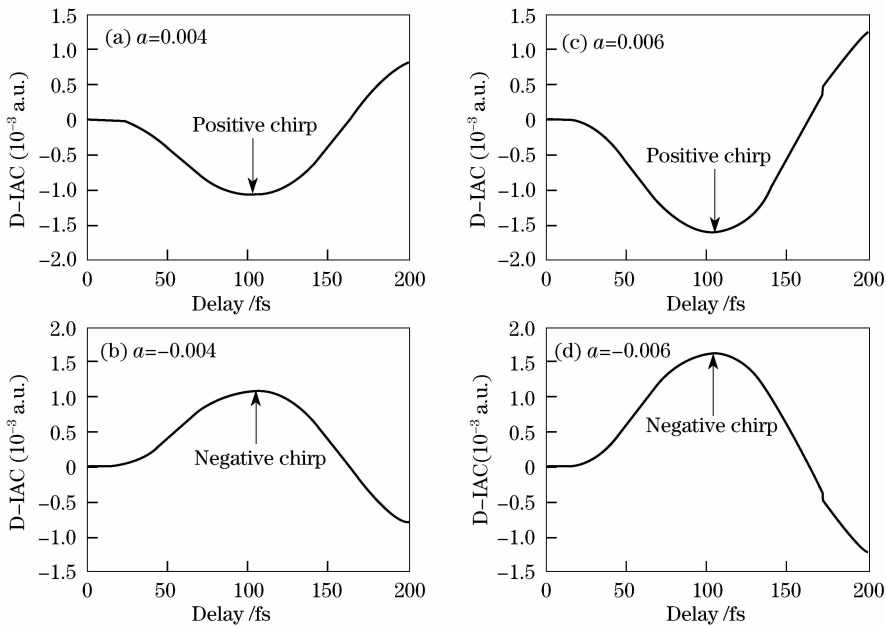


图 4 立方啁啾干涉自相关导数谱图的理论曲线

Fig. 4 Calculated D-IAC traces for various degrees of cube chirp

上述线性啁啾、平方啁啾及立方啁啾脉冲的干涉自相关导数谱图中均含有判定啁啾正负方向的正弦函数因子, 采用同样的方法, 可以进一步讨

论高次啁啾脉冲的干涉自相关导数谱图, 但分析相当繁琐。

4 实验结果

选用碰撞脉冲锁模(CPM)循环染料飞秒激光器,为了尽量突显脉冲所含啁啾现象,加浓激光器染料Rh6G浓度。图5是测到的飞秒脉冲干涉自相关二次谐波曲线数据分布情况。从图5可以看出,实测曲线的下包络两翼明显隆起,包络外形很不整齐,对称性较差,说明光脉冲明显含有啁啾。通过对干涉自相关信号滤波,得到二次干涉自相关中的基频信号,再对基频信号的上包络曲线求导,得到如图6所示的干涉自相关导数谱图。该曲线有一个谷值,表明碰撞脉冲锁模激光系统输出的激光脉冲啁啾是正啁啾。

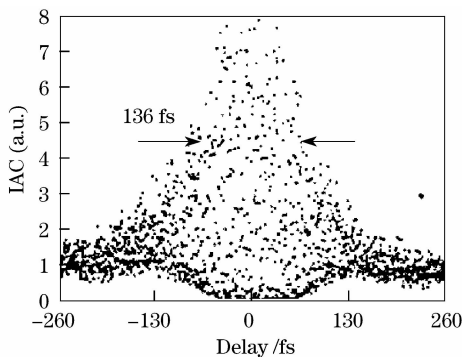


图5 CPM激光系统输出含有啁啾的干涉自相关二次谐波数据分布

Fig. 5 Interference autocorrelation second harmonic data distribution of CPM laser

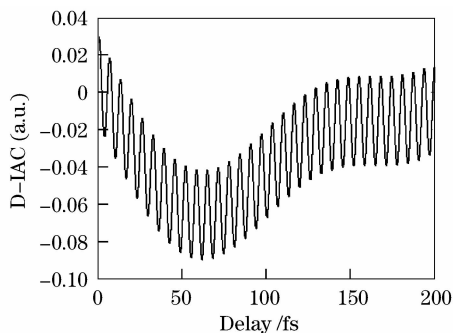


图6 含有正啁啾的干涉自相关导数谱图的测量曲线

Fig. 6 Experimentally obtained D-IAC signal of a positive chirped pulse

5 结 论

提出新型的灵敏的方法去观测超短激光脉冲的啁啾方向。这种方法是基于干涉自相关导数谱图,其对啁啾比干涉自相关更敏感,特别是能判定啁啾的方向。在干涉自相关导数谱图中含有判定啁啾正负的方向因子,通过对高斯型强度分布的线性啁啾、平方啁啾及立方啁啾脉冲进行数值计算与模拟,得到了导数谱图的峰与谷和啁啾负与正的对应关系,

找到了判定啁啾正负的方向因子,即正弦函数因子。从干涉自相关变换到干涉自相关导数谱图能判定啁啾的正负,其对啁啾正负的确定主要是从干涉自相关变换到干涉自相关导数谱图后,以啁啾参数为自变量的偶函数变换为奇函数,即余弦函数因子变换为正弦函数因子。在干涉自相关导数光谱中含有判定啁啾正负方向的正弦函数因子,因此干涉自相关导数谱图能用于超短激光脉冲啁啾方向的检测。

参 考 文 献

- 1 Toshiyuki Hirayama, Mansoor Sheik-Bahae. Real-time chirp diagnosis for ultrashort laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(10):860~862
- 2 Daniel A. Bender, Michael P. Hasselbeck, Mansoor Sheik-Bahae. Sensitive ultrashort pulse chirp measurement [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(1):122~124
- 3 A. K. Sharma, P. A. Naik, P. D. Gupta. Estimation of higher order chirp in ultrashort laser pulses using modified spectrum auto-interferometric correlation [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **233**:431~437
- 4 B. Yellampalle, R. D. Averitt, A. J. Taylor. Unambiguous chirp characterization using modified-spectrum auto-interferometric correlation and pulse spectrum [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(19):8890~8899
- 5 Daniel A. Bender, Mansoor Sheik-Bahae. Modified spectrum autointerferometric correlation (MOSAIC) for single-shot pulse characterization [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(19):2822~2824
- 6 A. K. Sharma, P. A. Naik, P. D. Gupta. Simple and sensitive method for visual detection of temporal asymmetry of ultrashort laser pulses [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(7):1389~1396
- 7 Yang Zhenfeng, Yang Zhenjun, Hu Wei. Influence of chirp on spatial intensity distribution of hyperbolic secant pulsed beams [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2):225~228
杨振峰,杨振军,胡巍.啁啾对双曲正割脉冲光束空间强度分布的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):225~228
- 8 Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):466~470
林宏奂,隋展,王建军等.啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(3):466~470
- 9 Wang Hongying, Liu Hongjun, Li Xiaoli *et al.*. Dispersion control in broadband optical parametric chirped-pulse amplification laser system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1338~1343
王红英,刘红军,李小莉等.宽带光学参变啁啾脉冲放大系统的色散控制 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1338~1343
- 10 Liu Tianfu, She Weilong, Qiu Zhiren *et al.*. Calibration method for the measurement of ultrashort pulsed lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1):111~114
刘天夫,余卫龙,丘志仁等.超短脉冲激光测量的标定方法 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):111~114
- 11 Chen Bifang, Liu Tianfu. Numerical simulation of femtosecond pulses measurement with SPIDER [J]. *Laser Technol.*, 2006, **30**(1):13~15
陈碧芳,刘天夫.基于SPIDER法测量飞秒脉冲的数值计算与模拟 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(1):13~15
- 12 Chen Bifang, Liu Tianfu. Chirp characteristics of modified spectrum autointerferometric correlation for femtosecond pulse [J]. *Laser Technol.*, 2007, **31**(6):587~589
陈碧芳,刘天夫.飞秒脉冲干涉自相关修正光谱的啁啾特性 [J]. *激光技术*, 2007, **31**(6):587~589