

小波变换提取放大超短脉冲载波-包络相位的研究*

邓玉强^{1)†} 曹士英^{2)‡} 于 靖¹⁾ 徐 涛¹⁾ 王清月²⁾ 张志刚^{2)‡}

1) 中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100013)

2) 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

3) 北京大学信息学院, 北京 100871)

(2007 年 12 月 5 日收到, 2008 年 6 月 10 日收到修改稿)

提出了一种新的超短放大脉冲的载波-包络相位还原方法, 应用小波变换从超短放大脉冲的光谱拍频干涉中直接提取载波-包络相位. 消除了传统的 Fourier 变换方法不同宽度的滤波窗口引入不同程度的相位噪声而产生不确定性的影响, 得到了更精确的载波-包络相位信息, 对于近单周期超短脉冲特性测量具有重要意义.

关键词: 超短脉冲, 载波-包络相位, 相位还原, 小波变换

PACC: 4280W, 0760L

1. 引 言

随着超短脉冲激光技术的发展, 目前的超短脉冲激光器已达到了近单周期机理运转^[1-5], 这样的激光脉冲具有极宽的光谱成分和极窄的脉冲包络, 也往往具有极高的峰值功率. 然而, 超短脉冲的载波是以相速度传播, 而波包是以群速度传播, 相速度与群速度之间的失配导致实际脉冲电场强度的峰值随时间变化, 只有载波的峰值与包络的峰值相重合时, 脉冲的电场强度才能达到最大值. 这样的超短脉冲用于对电场敏感的实验, 如高次谐波和 X 射线的产生^[6]、两激光脉冲的合成^[7-10]时, 电场峰值的变化会对实验结果产生重要的影响. 因此, 精确测量和控制超短脉冲载波和包络之间的相位关系对于近单周期超短脉冲的应用具有极其重要的意义.

超短脉冲电场峰值与超短脉冲强度包络之间的相位差称为超短脉冲的载波-包络相位, 两相邻脉冲之间的载波-包络相位之差称为载波-包络相位差, 时域的载波-包络相位差在频域上引起频率梳齿与整数倍脉冲重复频率之间的频移, 称为载波-包络频率差^[6, 7, 11, 12]. 利用飞秒脉冲的超精细梳齿结构作为新一代的频率标准为精确的时间频率计量提供了

有效工具^[11-13], 而测量载波-包络相位差或载波-包络频率差成为光学频率标准应用的关键^[11-13].

目前放大超短脉冲载波-包络相位的测量是利用单次非线性光谱相干法^[6, 14, 15], 用宽带检测光谱拍频干涉. 在产生了足够强的白光光谱之后, 用倍频晶体将脉冲倍频, 得到倍频后的电场^[5]

$$\begin{aligned} E_{\text{SHG}}(\omega) &\propto \exp(i2\varphi) \cdot \int \chi^{(2)}(\omega; \omega', \omega - \omega') \\ &\quad \times \sqrt{I_{\text{WL}}(\omega') \cdot I_{\text{WL}}(\omega - \omega')} \\ &\quad \times \exp\{i[\phi_{\text{WL}}(\omega') + \phi_{\text{WL}}(\omega - \omega')]\} d\omega' \\ &= \sqrt{I_{\text{SHG}}(\omega)} \cdot \exp\{i[\phi_{\text{SHG}}(\omega) + 2\varphi]\}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\phi_{\text{WL}}(\omega)$ 是白光的相位, $\chi^{(2)}$ 是二阶极化矢量. 白光与倍频脉冲的相干, 相距一个时间延迟, 可以写为^[5]

$$\begin{aligned} S(\omega) &= (1 - \alpha) I_{\text{WL}}(\omega) + \alpha I_{\text{SHG}}(\omega) \\ &\quad + 2\sqrt{\alpha(1 - \alpha) I_{\text{WL}}(\omega) I_{\text{SHG}}(\omega)} \\ &\quad \times \cos[\phi_{\text{SHG}}(\omega) - \phi_{\text{WL}}(\omega) + \omega\tau_0 + \varphi], \end{aligned} \quad (2)$$

其中系数 α 代表倍频光通过偏振片的透过率.

* 国家科技支撑计划 (批准号: 2006BAF06B05), 中国计量科学研究院基本业务 (批准号: AKY0748), 中国计量科学研究院博士专项科研启动基金 (批准号: TGQD05-12) 和科学技术部国际科技合作计划 (批准号: 2007DFA11430) 资助的课题.

† E-mail: yqdeng@nim.ac.cn

2. Fourier 变换还原放大脉冲载波-包络相位

传统的放大脉冲载波-包络相位还原是采用 Fourier 变换光谱相干法^[6, 14-16], 先把相干光谱变换到时域, 然后用数字带通滤波器滤出在 $t = \tau_0$ 或者 $t = -\tau_0$ 的交流分量, 再作一次反 Fourier 变换到频域, 从而得到光谱干涉的相位, 类似于脉冲相位测量的光谱相位相干法 (SPIDER)^[17, 18].

图 1 是 Kakehata 等测得的放大脉冲载波-包络相位的光谱干涉和从光谱干涉还原的载波-包络相位差^[14, 15]. 图中细实线和虚线分别为测得的相邻两发放大脉冲的基频与倍频的光谱干涉, 粗实线为根据测得的两次光谱干涉用 Fourier 变换方法还原的载波-包络相对相位差.

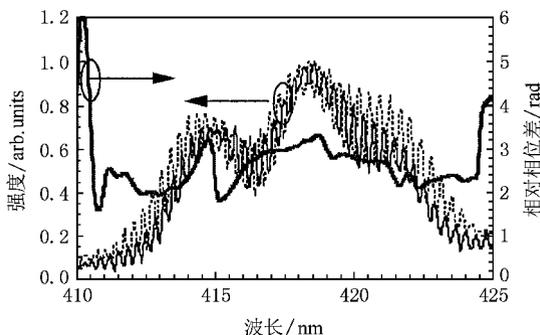


图 1 放大脉冲的拍频光谱干涉和载波-包络相对相位差

从图 1 中的光谱干涉中提取干涉数据, 并将获取的以波长 λ 为变量的光谱拍频干涉转换为以频率 ν 为变量, 得到的结果如图 2 所示. 图 2(a) 和 (b) 分别是取出的实线和虚线拍频干涉转换后的结果, 这里分别称为第一发光谱拍频干涉和第二发光谱拍频干涉.

用 Fourier 变换方法^[14-16]对图 2 中获取的光谱拍频干涉作载波-包络相位提取, 第一发光谱拍频的 Fourier 变换后的结果如图 3(a) 所示. 变换后的交流分量的峰值位于 $\tau_0 = \pm 1.6$ ps 附近. 选择滤波窗口取出 $\tau_0 = +1.6$ ps 处的交流分量, 再作一次反 Fourier 变换就得到光谱拍频干涉的相位. 用同样的方法可以得到第二发光谱拍频干涉的相位, 将两发光谱拍频的相位相减, 其结果即为放大脉冲的载波-包络相位差.

与传统 SPIDER 相位还原类似, 不同的滤波窗

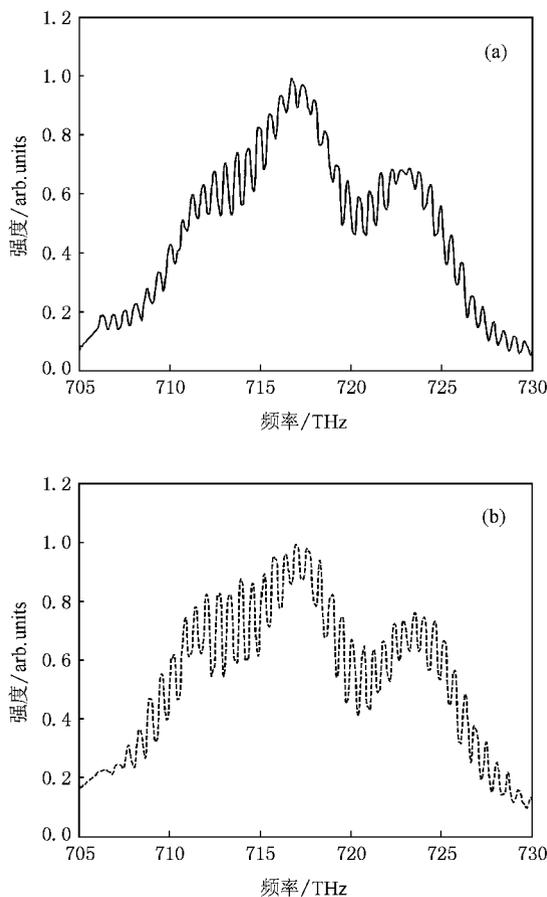


图 2 提取的光谱拍频干涉 (a) 第一发光谱拍频干涉 (b) 第二发光谱拍频干涉

口产生不同的相位结果^[19-21]. 选择图 3(a) 所示的三个不同宽度的矩形滤波窗口, 窗口的宽度分别是 $\tau = 0.8$ ps, $\tau = 1.8$ ps 和 $\tau = 2.4$ ps, 还原的载波-包络相位差如图 3(b) 所示, 为便于和图 1 的结果比较, 这里将载波-包络相位的坐标转换为波长.

图 3(b) 表明传统的 Fourier 变换方法还原载波-包络相位时产生了不确定性: 不同宽度的滤波窗口得到不同的相位还原结果. 这是因为如果选择的窗口宽度太大, 将会包含过多的噪声而导致还原的相位产生较大的误差; 如果选择的窗口宽度太小, 将会丢失光谱干涉的信息而导致还原的相位产生畸变, 也不能得到准确的相位还原结果. 到底该如何选择滤波窗口的宽度, 目前还没有标准和依据来判定.

3. 小波变换还原放大脉冲载波-包络相位

为了解决传统 Fourier 变换方法产生的不确定

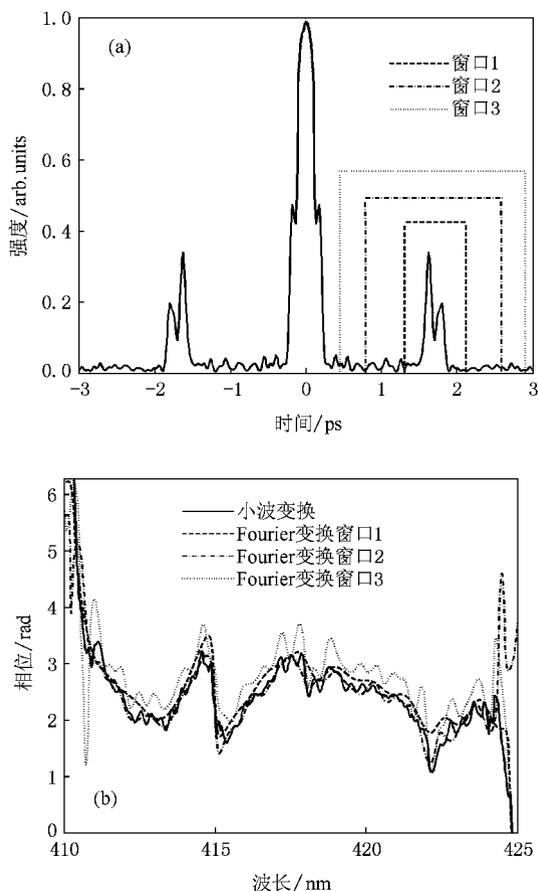


图3 (a) 光谱拍频的 Fourier 变换的结果及滤波窗口 (b) Fourier 变换不同滤波窗口还原的拍频光谱相位和小波变换还原结果的比较

性,我们引入小波变换^[19-24]还原放大脉冲载波-包络相位.对图2中的光谱干涉作小波变换,将光谱干涉 $f(\omega)$ 展开成二维的尺度-频率平面.公式如下:

$$W(a, \nu') = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\nu) \psi^* \left(\frac{\nu - \nu'}{a} \right) d\nu, \quad (3)$$

其中尺度因子 a 与光谱干涉的时间间隔(周期)相对应,频率 ν' 表示子小波函数沿以频率为变量的光谱拍频信号平移到 ν' 处的局域信息.

选用 Gabor 小波^[19, 20, 23]作为分析小波,根据(3)式第一发光谱拍频的小波变换,选择变换的尺度范围从 30 至 120,步长为 0.5,得到的结果如图4所示,图4(a)和(b)分别为小波变换的模和相位.

和小波变换还原 SPIDER 光谱相位^[19-23]一样,拍频信号在某一频率 ν' 处的局域时间间隔反映在小波变换 $W(a, \nu')$ 沿相应的频率点 ν' 的一列数组的极大值处,即小波变换的脊^[23, 24]处.从小波变换

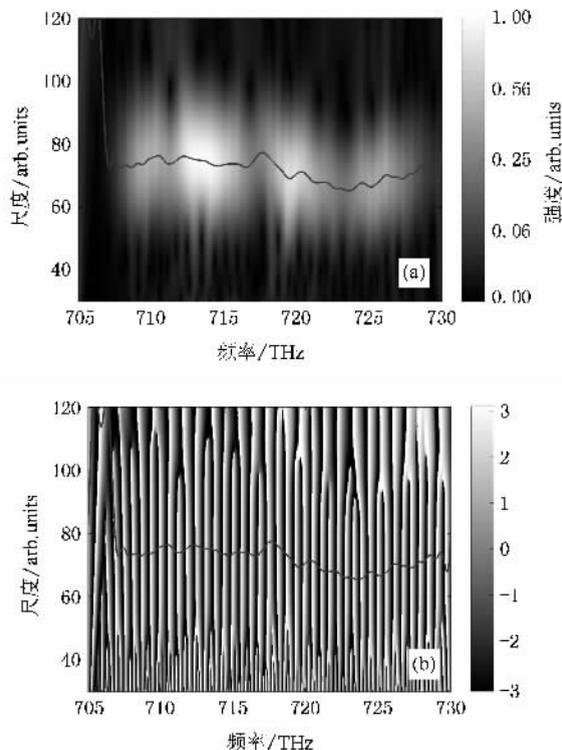


图4 光谱拍频干涉小波变换的结果 (a) 第一发光谱拍频干涉小波变换的模 (b) 第一发光谱拍频干涉小波变换的相位(图中的曲线标出了小波变换的脊的位置)

的强度图中探测每一列的极大值的位置,即小波变换的脊,如图4(a)中的曲线所示.然后将脊线位置投影到小波变换的相位图上,如图4(b).取出相位图上小波脊处的相位值,将折叠的相位展开,就得到光谱拍频干涉的相位.将两发拍频干涉的相位相减,就得到放大脉冲的载波-包络相对相位差.为了便于比较,将沿小波变换还原的载波-包络相位差和 Fourier 变换还原的相位差一起叠放在图3(b)中.

4. 两种方法的比较

从图3(b)中可见,小波变换还原的载波-包络相位和载波-包络相位差是确定的,而 Fourier 变换不同的滤波窗口产生不同的相位.小波变换得到的结果与 Fourier 变换某一个窗口得到的结果能够较好地符合,其他窗口得到的结果在这一结果附近波动.与传统的 Fourier 变换相比,小波变换还原放大脉冲光谱干涉的载波-包络相位具有以下特点:

1) 小波变换方法消除了 Fourier 变换方法中滤波窗口产生的相位不确定性. Fourier 变换方法不同的滤波窗口因引入不同程度的噪声而产生不同的结

果,而小波变换在变换的脊处选取相位信息,小波变换的脊是唯一的,因而得到的相位是确定的.

2)小波变换方法可以得到一个二维的时间-频率图,直观地反映出拍频干涉的时间-频率信息.

3)小波变换过程简单. Fourier 变换方法需要 Fourier 变换-滤波-反 Fourier 变换三个过程还原载波-包络相位,而小波变换只需要一步小波变换就可以实现相位还原,不需要滤波和反变换.

4)小波变换不需要人为的选择滤波窗口,更容易实现自动处理. Fourier 变换方法要找出交流分量的位置,然后选择合适的滤波窗口. 不合适的窗口会导致很大的误差产生错误的结果,有时信号的滤波窗口往往很难选取,而小波变换完全消除了这一过程.

5)小波变换的计算时间短、速度快. 小波变换虽然是一个二维的变换,但由于变换有强度和相位两个结果,其中强度图反映干涉的间隔信息(即时间-频率信息),而相位图反映干涉的相位. 因此小波变换不需要精细地选择尺度步长就可以还原精确的

相位. 本文基于 Matlab 软件,小波变换算法和 Fourier 变换算法都可以在 30 ms 内从光谱拍频干涉中提取载波-包络相位信息.

5. 结 论

传统的 Fourier 变换方法还原放大超短脉冲载波-包络相位时,不同的滤波窗口因为引入了不同的噪声而产生不同的相位结果. 本文将小波变换用于放大脉冲的载波-包络相位还原,超短脉冲的载波-包络相位从光谱干涉中直接读取,解决了传统 Fourier 变换方法还原相位的不确定性问题,为脉冲的载波-包络相位的测量提供了新的途径,且还原的相位更精确. 同时小波变换还原放大脉冲载波-包络相位步骤简单、速度快、容易实现计算机自动控制和处理. 小波变换还原脉冲载波-包络相位方法对于放大脉冲的载波-包络相位测量、近单周期超短脉冲特性测量及其他干涉条纹的相位识别具有重要意义.

- [1] Steinmeyer G , Sutter D , Gallmann L *et al* 1999 *Science* **286** 1507
- [2] Brabec T , and Krausz F 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 545
- [3] Baltuška A , Fuji T , Kobayashi T 2002 *Opt. Lett.* **27** 306
- [4] Schibli T R , Kuzucu O , Kim J W *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 990
- [5] Baltuška A , Uiberacker M , Goulielmakis E *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 972
- [6] Ye J , Schmatz H , Hollberg L W 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1041
- [7] Deng Y Q , Wang Q Y , Wu Z B *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 737 (in Chinese) [邓玉强、王清月、吴祖斌 等 2006 物理学报 **55** 737]
- [8] Seitz W , Ell R , Morgner U *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1093
- [9] Kobayashi Y , Wei Z , Kakehata M *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1011
- [10] Yoon T H , Park S T , Kim E B *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1025
- [11] Fortier T M , Jones D J , Ye J *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1002
- [12] Diddams S A , Bartels A , Ramond T M *et al* 2003 *IEEE J. Sel.*

Top. Quantum Electron. **9** 1072

- [13] Shelton R K , Ma L S , Kapteyn H C *et al* 2001 *Science* **293** 1286
- [14] Kakehata M , Fujihira Y , Takada H *et al* 2002 *Appl. Phys. B* **74** S43
- [15] Kakehata M , Takada H , Kobayashi Y *et al* 2004 *Opt. Express* **12** 2070
- [16] Takeda M , Ina H , Kobayashi S 1982 *J. Opt. Soc. Am.* **72** 156
- [17] Iaconis C , Walmsley I A 1998 *Opt. Lett.* **23** 792
- [18] Iaconis C , Walmsley I A 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 501
- [19] Deng Y , Wu Z , Chai L *et al* 2005 *Opt. Express* **13** 2120
- [20] Deng Y Q , Wu Z B , Chen S H *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3716 (in Chinese) [邓玉强、吴祖斌、陈盛华 等 2005 物理学报 **54** 3716]
- [21] Deng Y , Wu Z , Cao S *et al* 2006 *Opt. Commun.* **268** 1
- [22] Deng Y Q , Zhang Z G , Chai L *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4176 (in Chinese) [邓玉强、张志刚、柴路等 2005 物理学报 **54** 4176]
- [23] Deng Y , Wang C , Chai L *et al* 2005 *Appl. Phys. B* **81** 1107
- [24] Delprat N , Escudé B , Guillemain P *et al* 1992 *IEEE Trans. Info. Theory* **38** 644

Carrier-envelope phase extraction with wavelet-transform technique of amplified ultrashort optical pulses^{*}

Deng Yu-Qiang^{1,2)†} Cao Shi-Ying^{2,3)} Yu Jing¹⁾ Xu Tao¹⁾ Wang Qing-Yue²⁾ Zhang Zhi-Gang^{2,3)}

¹ *Division of Optics and Laser, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China*

² *School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

³ *School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China*

(Received 5 December 2007 ; revised manuscript received 10 June 2008)

Abstract

A novel technique, based on wavelet-transform analysis, was introduced for the carrier-envelope phase extraction in this paper. With wavelet analysis technique, the carrier-envelope phases of amplified ultrashort optical pulses were directly extracted from the spectral interferences. The technique need no Fourier-transform and filter procedure, therefore, the uncertainty introduced from the filter is avoided naturally. Wavelet-transform technique extracted accurate carrier-envelope phase, therefore we hope it can find applications in the measurements and characterizations of few- to mono-cycle femtosecond optical pulses.

Keywords : ultrafast lasers, carrier-envelope phase, phase retrieval, wavelet-transform

PACC : 4280W, 0760L

^{*} Project supported by the National Science and Technology Supporting Program of China (Grant No. 2006BAF06B05), Basic Research Foundation of National Institute of Metrology of China (Grant No. AKY0748), and Start-up Grant of National Institute of Metrology, China (Grant No. TQD05-12) and the International Scientific Cooperation Program of Ministry of Science and Technology, China (Grant No. 2007DFA11430).

[†] E-mail : yqdeng@nim.ac.cn