

基于平行相位调制算法的频谱相位测量和补偿

裴卓然^{1,2} 刘军¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 详细探究了平行相位调制(PPM)算法在飞秒激光脉冲的频谱相位测量与补偿中的应用。通过数值模拟讨论了调制频率选取和相位复原问题。基于该算法搭建了一套飞秒激光脉冲整形装置,使用自行编写的 LabVIEW 程序完成频谱相位的测量补偿过程,并使用多光子脉冲内干涉相位扫描(MIIPS)方法验证了实验结果的准确性。不同于 MIIPS 等已有超快激光脉冲测量方法,PPM 法无需测量非线性信号的光谱,只需测量信号强度即可快速确定频谱相位。

关键词 激光器; 超快光学; 脉冲整形; 平行相位调制; LabVIEW; 液晶空间光调制器

中图分类号 O437.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0901001

Parallel Phase Modulation Algorithm Based Spectral Phase Measurement and Compensation

Pei Zhuoran^{1,2} Liu Jun¹

¹State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The parallel phase modulation (PPM) algorithm is investigated for spectral phase measurement and compensation. Detailed theoretical analysis and a numerical simulation are carried out to find how to determine the modulation frequency and reconstruct the spectral phase. A femtosecond pulse shaper is set up based on the PPM algorithm. The shaper is driven by our home-developed LabVIEW program and can be used to measure and compensate spectral phase of femtosecond pulses. The experimental results are verified with the multi-photon intrapulse interference phase scan (MIIPS) method. Different from such existing ultrafast pulse measurement methods as MIIPS, the PPM method only needs to measure the signal intensity to determine the spectral phase quickly, and requires no spectrum measurements of nonlinear signals.

Key words lasers; ultrafast optics; pulse shaping; parallel phase modulation; LabVIEW; liquid crystal spatial light modulator

OCIS codes 140.7090; 140.3515; 140.3518; 140.3538

1 引言

近年来,飞秒激光脉冲在双光子光谱学、飞秒化学、非线性光学显微成像等方面得到广泛应用^[1-2]。自从 1981 年 Fork 等首次获得脉宽小于 100 fs 的激光脉冲以来,飞秒激光脉冲的光谱及其相位测量和整形技术一直受到广泛关注。目前较为成熟的测量方法有频率分辨光学开关(FROG)法^[3-4]、自参考光谱相干电场重建(SPIDER)法^[5]、自参考光谱干涉(SRSI)法^[6-8]和多光子脉冲内干涉相位扫描(MIIPS)法^[9-11]。其中,

收稿日期: 2016-03-10; 收到修改稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61521093,61527821,11274327)

作者简介: 裴卓然(1991—),男,硕士研究生,主要从事飞秒激光脉冲整形方面的研究。E-mail: peizhuoran@siom.ac.cn

导师简介: 刘军(1979—),男,博士,研究员,主要从事飞秒激光技术和非线性光学及应用等方面的研究。

E-mail: jliu@siom.ac.cn(通信联系人)

FROG、SPIDER 以及 SRSI 方法只是单纯的测量手段,而 MIIPS 方法不仅可以测量频谱相位,还可以根据测量结果对频谱相位进行整形补偿。

2011 年,Cui^[12]提出了一种全新的平行相位调制(PPM)算法,并首次将其应用于光束波前整形研究中。同年 Wu 等^[13]将 PPM 算法运用于飞秒激光脉冲频谱相位测量和整形中,即相位分辨相干光谱调制(PRISM)法。2015 年,Yoon 等利用 PPM 法成功测量了复杂介质中的光学传输矩阵^[14]。PPM 法与 MIIPS 法类似,兼具频谱相位测量和整形补偿两种功能,均使用一套基于液晶空间光调制器的 $4f$ 脉冲整形系统。FROG、SPIDER、SRSI、MIIPS 等方法测量待测脉冲的光谱信号,而 PPM 方法只需测量待测脉冲的信号强度,这对于光谱信号较难测量的中红外、红外等波段激光脉冲的相位测量和整形具有重要意义。更重要的是,PPM 方法可应用于光束的空间波前相位测量和整形研究,这是 MIIPS 等方法无法实现的。因此 PPM 法是一种适用范围更广的脉冲相位测量和整形技术。

本文对 PPM 算法进行了详细的理论分析,讨论了 PPM 算法中调制频率的选取和限制条件,以及如何从受调制信号中解调出相位信息等问题。搭建了一套 $4f$ 飞秒激光脉冲整形系统,并运用 PPM 算法测量并补偿飞秒激光脉冲的频谱相位。该实验装置同样适用于 MIIPS 法的探究,使用 MIIPS 法同步测量待测脉冲,验证 PPM 算法的可行性和准确性。

2 基本原理

考虑一个非傅里叶变换极限脉冲,在频域中脉冲的光谱和相位可表示为

$$E(\omega) = |A(\omega)| \exp[i\phi(\omega)], \quad \omega \in \left[\omega_0 - \frac{\Omega}{2}, \omega_0 + \frac{\Omega}{2} \right], \quad (1)$$

式中 $A(\omega)$ 为频率 ω 处的光谱振幅, $\phi(\omega)$ 为对应的相位, ω_0 为脉冲光谱的中心频率, Ω 为光谱谱宽。为便于分析,对频率 ω 进行离散化处理,将其均分为 N 个频率单元 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k, \dots, \omega_N$, 则飞秒激光脉冲的频域表达式为

$$E(\omega_k) = A(\omega_k) \exp[i\phi(\omega_k)]. \quad (2)$$

根据多光子脉冲内干涉(MII)理论^[11],使用调制器调节飞秒激光脉冲的频谱相位分布,可显著改变脉冲倍频(SHG)信号光谱。倍频光谱中频率为 $2\omega_k$ 的频率成分的强度为

$$I_{\text{SHG}}(2\omega_k) = \left| \sum_{\substack{\alpha, \beta=1 \\ \omega_\alpha + \omega_\beta = 2\omega_k}}^N A(\omega_\alpha) A(\omega_\beta) \exp\{i[\phi(\omega_\alpha) + \phi(\omega_\beta)]\} \right|^2. \quad (3)$$

在由 MII 理论^[15]衍生的 MIIPS 方法中,通过施加多次正弦相位调制,可得到大量调制光谱,从而计算出脉冲的频谱相位。加载的调制相位为 $f(\omega_k, \tau) = \alpha \cos[\gamma(\omega_k - \omega_0) - \delta\tau]$, 其中 α, γ, δ 均为常数, τ 表示第 τ 次相位扫描,此时脉冲的频域表达式为

$$E(\omega_k, \tau) = |A(\omega_k)| \exp\{i[\phi(\omega_k) + f(\omega_k, \tau)]\}. \quad (4)$$

对于特定的频率 ω_k ,存在一个 τ 可完美补偿 $E(\omega_k)$ 处的相位,使 $I_{\text{SHG}}(2\omega_k)$ 达到最大值。在调制光谱中进行最优值搜索可得到这个 τ 值,继而获得相位信息 $\phi(\omega_k)$ 。

MIIPS 方法需要精确测量大量受调制的脉冲倍频光谱,而在中红外、红外等波段,很难测量脉冲的光谱,限制了 MIIPS 方法的应用。与测量光谱相比,测量强度较易实现,使用光电倍增管(PMT)等器件即可完成。脉冲倍频信号总强度可表示为

$$I_{\text{SHG}} = \sum_{k=1}^N I_{\text{SHG}}(2\omega_k). \quad (5)$$

如果使用频率为 γ 的余弦信号对所有频率单元 ω_k ($k \in [1, N]$) 进行相位调制,将无法从强度信号中获取具体调制频率处的倍频光谱强度变化。这时需要对每个频率单元施加不同调频的相位调制信号,再结合经典的离散傅里叶变换方法在强度信号中分辨不同频率单元 ω_k 的信息,具体做法如下。

- 1) 将 N 个频谱单元分为 n 组,为简单起见,设 $n=4$,分组情况如图 1 所示。
- 2) 在调制过程中,1 组频率单元的相位受到调制,其他 3 组作为参考,相位保持不变(相当于调制频率为

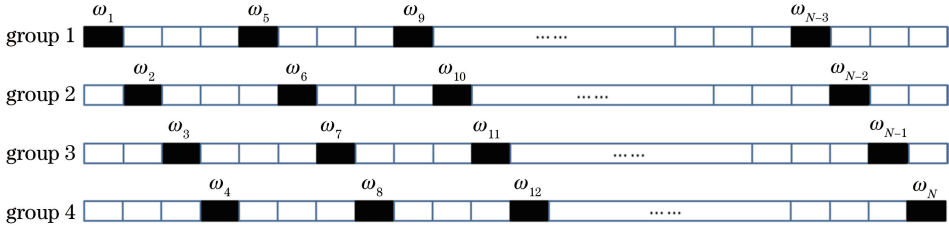


图 1 调制中的 4 组频率单元

Fig. 1 Four groups of frequency components in modulation

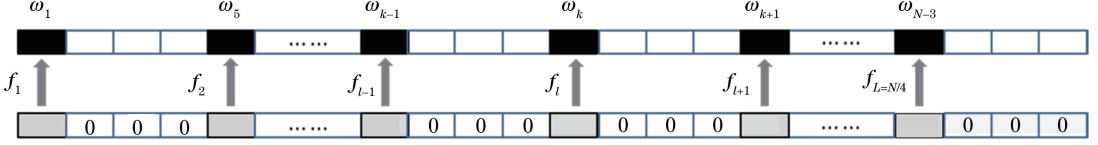


图 2 频率单元与调制频率的对应关系

Fig. 2 Relationship between frequency component and modulation frequency

零)。受调制的频率单元都对应特定的调制频率,设定调制频率为 $f_1, f_2, \dots, f_{L=N/4}$, 对应情况如图 2 所示。

3) 设调制频率满足如下关系:

$$f_1 < f_2 < \dots < f_l < \dots < f_{L=N/4}, \quad f_{l-1} + f_{l+1} = 2f_l, \quad (6)$$

根据 Nyquist 采样原理,需要进行 $2N$ 次调制才能恢复原信号。设第 τ 次调制时,对频率单元 $\omega_k (k=4l-3)$ 施加的相位调制量为 $f(\omega_k, \tau) = f_l \tau, \tau \in (1, 2, \dots, 2N)$, 倍频频率 $2\omega_k$ 处的光强为

$$I_{\text{SHG}}(2\omega_k, \tau) = \left| \sum_{\substack{\alpha, \beta=1, \dots, k, \dots, N-3 \\ \alpha+\beta=2k}}^N A(\omega_\alpha) B(\omega_\beta) \exp\{i[\phi(\omega_\alpha) + \phi(\omega_\beta)]\} + \sum_{\substack{\alpha, \beta=1, \dots, k, \dots, N-3 \\ \omega_\alpha + \omega_\beta = 2\omega_k}}^{N-3} A(\omega_\alpha) A(\omega_\beta) \exp\{i[\phi(\omega_\alpha) + \phi(\omega_\beta) + 2f_l \tau]\} \right|^2, \quad (7)$$

(7) 式可简化为

$$I_{\text{SHG}}(2\omega_k, \tau) = A_k^2 \left| 1 + (B_k/A_k) \exp[i(\phi_{\text{mod}}^k + 2f_l \tau - \phi_{\text{static}}^k)] \right|^2, \quad (8)$$

式中 ϕ_{mod}^k 为受调制的频率单元的合成相位, ϕ_{static}^k 为未调制频率单元处的合成相位。频率 $2\omega_{k+1}$ 处的倍频光强为

$$I_{\text{SHG}}(2\omega_{k+1}, \tau) = \left| \sum_{\substack{\alpha, \beta=1, \dots, k, \dots, N-3 \\ \omega_\alpha + \omega_\beta = 2\omega_{k+1}}}^N A(\omega_\alpha) A(\omega_\beta) \exp\{i[\phi(\omega_\alpha) + \phi(\omega_\beta)]\} + \sum_{\substack{\alpha, \beta=1, \dots, k, \dots, N-3 \\ \alpha+\beta=2k+2}}^{N-3} A(\omega_\alpha) A(\omega_\beta) \exp\{i[\phi(\omega_\alpha) + \phi(\omega_\beta) + f_l \tau]\} \right|^2, \quad (9)$$

(9) 式同样可以简化为

$$I_{\text{SHG}}(2\omega_{k+1}, \tau) = A_{k+1}^2 \left| 1 + \sum_{k=1.5, \dots, N-3}^{N-3} (B_{k+1}/A_{k+1}) \exp[i(\Delta\phi_k + f_l \tau)] \right|^2, \quad (10)$$

式中 $\Delta\phi_k = \phi(\omega_k) - \phi_{\text{static}}^{k+1}$ 是受调制的相位与参考相位之间的失配程度。可以看出, $I_{\text{SHG}}(2\omega_k, \tau)$ 中包含了 $f = 2f_l$ 的频率分量, $I_{\text{SHG}}(2\omega_{k+1}, \tau)$ 中包含了 $f = f_l$ 的调制基频分量。将(7)式和(9)式代入,第 τ 次调制时,测量到的倍频信号强度可表达为

$$I_{\text{SHG}}(\tau) = \sum_{k=1}^N I_{\text{SHG}}(2\omega_k, \tau) = \text{const} + \sum_{\substack{l=(k+3)/4 \\ k=1, 5, \dots, N-3}}^{L=N/4} B_k \cos(f_l \tau + \Delta\phi_l) + \sum_{\alpha, \beta=1}^{L=N/4} C_{\alpha\beta} \cos(f_\alpha \tau + f_\beta \tau + \phi_{\alpha+\beta}) + \sum_{\substack{\alpha, \beta=1 \\ \alpha > \beta}}^{L=N/4} D_{\alpha\beta} \cos(f_\alpha \tau - f_\beta \tau + \phi_{\alpha-\beta}). \quad (11)$$

4) 倍频信号强度中包含了 3 组频率分量,分别为

$$F_1 = \{f_1, f_2, \dots, f_l, \dots, f_{L=N/4}\}, \quad (12)$$

$$F_2 = \{(f_\alpha - f_\beta) \mid \alpha > \beta; \alpha, \beta \in [1, L=N/4]\}, \quad (13)$$

$$F_3 = \{(f_\alpha + f_\beta) \mid \alpha > \beta; \alpha, \beta \in [1, L=N/4]\}, \quad (14)$$

式中 F_1 是设定的调制频率,另外两组频率分量由二阶非线性效应衍生得到,对 $I_{\text{SHG}}(\tau)$ 作傅里叶变换,其中 $\tau \in [1, 2, \dots, 2N]$, 获取 $f = f_l$ 的相位 $\Delta\phi_l$, 即

$$\Phi = \{\Delta\phi_l \mid l \in [1, L=N/4]\}. \quad (15)$$

5) 利用 Φ 进行相位补偿,使频谱相位分布趋于一致,提高脉冲倍频信号光强度,同时,需要保证这 3 组频率分量之间没有串扰,因此 3 组频率应该满足如下条件:

$$\max(F_2) < \min(F_1) \Rightarrow (f_{L=N/4} - f_1) < f_1 \Rightarrow f_{L=N/4} < 2f_1, \quad (16)$$

$$\max(F_1) < \min(F_3) \Rightarrow f_{L=N/4} < (f_1 + f_1) \Rightarrow f_{L=N/4} < 2f_1. \quad (17)$$

综上所述,调制基频应该满足如下条件:

$$f_1 < f_2 < \dots < f_l < \dots < f_{L=N/4} < 2f_1. \quad (18)$$

连续完成数轮这样的相位测量和补偿(每一轮包含对 4 组频率单元的平行调制和相位提取)过程,可使脉冲频谱相位分布接近傅里叶变换极限脉冲水平。

PPM 算法使用离散傅里叶变换可获得脉冲的频谱相位信息,不同于 MIIPS 方法中使用的最优值搜索方法,因此 PPM 的相位解调方法更加简单直观。

3 模拟计算

利用数值模拟探究 PPM 法补偿脉冲相位的过程。首先考虑一个傅里叶变换极限脉冲,该脉冲的谱宽为 35 nm,中心波长为 800 nm。将脉冲光谱分为 $N=512$ 个等带宽的频率单元(将 N 设为 2 的 n 次方,有利于进行快速傅里叶变换),同时将这 512 个频率单元分为 4 组,分组方式与原理部分保持一致。

为了测试 PPM 算法的有效性,对脉冲施加随机相位调制。为保证调制效果明显,各频率单元与其对应的调制频率应有一定的差别。选取 128 个调制频率为

$$F_1 = \left\{ f_k \mid f_k = \pi \frac{k}{512}, k \in [128, 255] \right\}. \quad (19)$$

根据采样定律,要进行 $2 \times 512 = 1024$ 次调制,需要加载的相位数据如图 3 所示。在图 3 中,3 个坐标轴分别代表像素标号(像素和频率单元一一对应)、调制次数和对应的相位调制量。

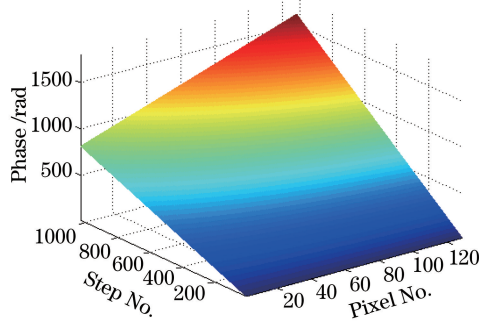


图 3 施加的相位调制数据

Fig. 3 Parallel phase modulation profile

对 1024 组强度信号进行傅里叶变换,衍生出以下两组新的频率:

$$F_2 = \left\{ f_k \mid f_k = \pi \frac{k}{512}, k \in [1, 127] \right\}, \quad (20)$$

$$F_3 = \left\{ f_k \mid f_k = \pi \frac{k}{512}, k \in [256, 510] \right\}. \quad (21)$$

需要注意的是,施加的调制信号也可以是类似于 MIIPS 方法的余弦调制信号,如 $f(\omega_k, \tau) = \alpha \cos [f_k(\omega_k - \omega_0) - \delta\tau]$, 只要保证不同频率单元对应相位调制频率即可。

按照 PPM 方法对脉冲的频谱相位进行 3 轮调制和补偿,对获得的强度数据作傅里叶变换,变换后的结果如图 4 所示,调制频率 F 处对应的相位分布情况如图 5 所示。

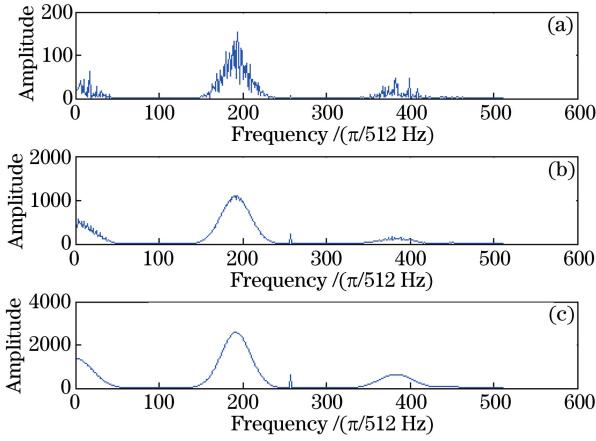


图 4 脉冲倍频信号强度的傅里叶变换结果。

(a) 第 1 轮调制后; (b) 第 2 轮调制后; (c) 第 3 轮调制后

Fig. 4 Fourier transform results of SHG intensity of modulated pulse. (a) After the 1st round modulation; (b) after the 2nd round modulation; (c) after the 3rd round modulation

图 4 中在 F_2 和 F_3 这两个频率区间出现了调制峰,证实了之前的理论分析。随着相位调制和补偿过程的推进,3 个频率区间的调制峰越来越平滑,调制频率 F_1 区间的相位分布越来越趋于一致,脉冲的频谱相位分布情况得到改善。

每完成一轮补偿过程(一轮完整的过程包含对 4 组频率单元的补偿),脉冲的频谱相位分布就会变得平滑一些,时域的脉冲强度也会随之提升。第 3 轮相位补偿结束后,脉冲频谱相位受到的随机扰动影响也基本消除,接近变换极限脉冲水平。待测脉冲时域和频域特性的演变情况如图 6 和图 7 所示,可见 PPM 法能够

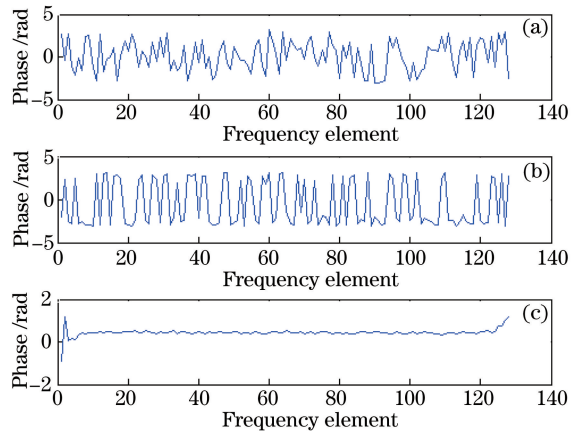


图 5 强度变换谱对应的相位分布情况。

(a) 第 1 轮调制后; (b) 第 2 轮调制后; (c) 第 3 轮调制后

Fig. 5 Phase distribution of the intensity spectrum. (a) After the 1st round modulation; (b) after the 2nd round modulation; (c) after the 3rd round modulation

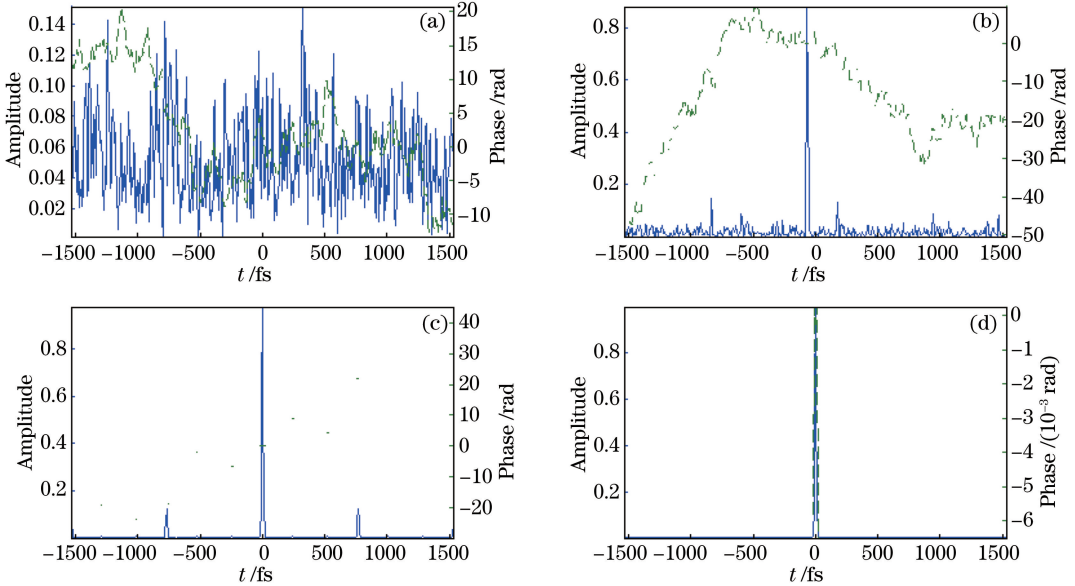


图 6 受调制脉冲时域特性的演变情况。(a) 受随机相位扰动后情况;

(b) 第 1 轮调制后; (c) 第 2 轮调制后; (d) 第 3 轮调制后

Fig. 6 Temporal domain properties of the modulated pulses. (a) After disturbance by random phase;

(b) after the 1st round modulation; (c) after the 2nd round modulation; (d) after the 3rd round modulation

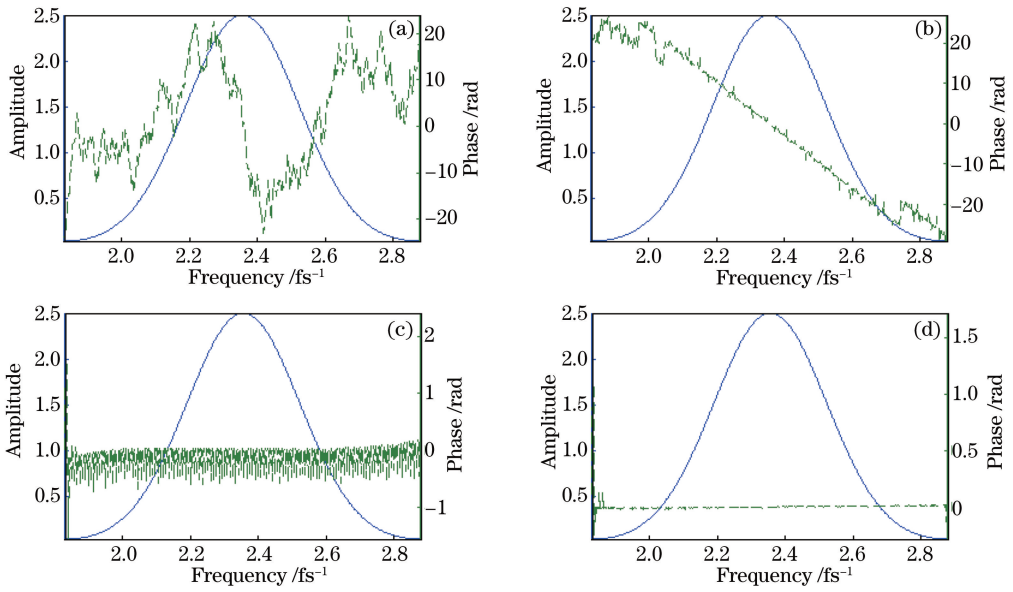


图 7 受调制脉冲频域特性的演变情况。(a) 受随机相位扰动后情况；
(b) 第 1 轮调制后；(c) 第 2 轮调制后；(d) 第 3 轮调制后

Fig. 7 Spectral domain properties of the modulated pulses. (a) After disturbance by random phase;

(b) after the 1st round modulation; (c) after the 2nd round modulation; (d) after the 3rd round modulation

测量和补偿受到严重扰动的频谱相位。

4 实验结果分析

实验装置如图 8 所示,实验采用的飞秒激光脉冲光源为 Mai-Tai SP 飞秒激光振荡器(Spectra-Physics 公司,美国),激光器输出的飞秒激光脉冲特性为 800 nm/84 MHz/60 nm。振荡器输出的脉冲先通过软边光阑和中性密度衰减片选出直径约为 8 mm 的飞秒激光脉冲进入 4f 整形系统;待测脉冲入射到镀膜闪耀光栅(刻线密度 600 line/mm),展宽后的光谱入射到焦距为 500 mm 的镀银膜柱面反射镜上;调节柱面镜使展宽光谱达到平行准直状态,并垂直入射到 SLM-640d 型空间光调制器(LC-SLM, JENOPTIK 公司,德国)的液晶像素板上。此过程中要保证光栅入射点到柱面镜中心的光程与柱面镜中心到液晶板中心的光程相等,且等于柱面镜焦距 500 mm。液晶像素板后装有一块平面反射镜,调节反射镜使线状光谱基本沿原光路返回,只要出射与入射激光脉冲在高度上略微错开即可。出射的飞秒激光脉冲入射至折叠反射镜,经过焦距为 75 mm 的透镜聚焦到 USB4000 光纤光谱仪(Ocean Optics 公司,美国)测量激光脉冲光谱,完成定标过程

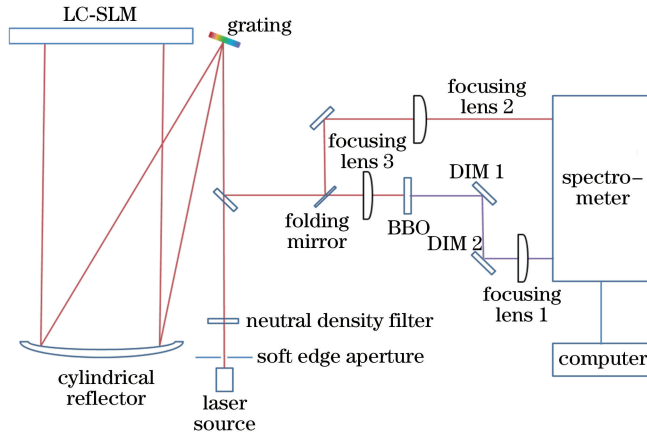


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental setup

(确定通过 SLM 的线状光谱与液晶板上各个像素的对应关系)。将折叠镜放下,出射激光脉冲沿原路入射到焦距为 50 mm 的透镜上聚焦,之后经过厚度为 100 μm 的偏硼酸钡(BBO)晶体进行倍频。倍频信号光经过两块双色镜(DIM,反射 400 nm,透射 800 nm)后,通过焦距为 75 mm 的透镜聚焦至光纤光谱仪完成光谱测量。实验中使用自主编写的 LabVIEW 程序完成数据的自动化采集。

利用 PPM 算法测量和补偿待测脉冲的频谱相位需要测量倍频信号强度,因此需要对倍频信号光谱进行强度积分。实验采用的光路结构同样适用于 MIIPS 方法,因此可直接使用经典 MIIPS 方法来验证 PPM 方法的准确性和可行性,这也是光路中使用光谱仪而未使用光电倍增管或光电二极管的原因。

像素定标结果显示,线状光谱并未占据整个液晶板(SLM-640d 液晶板上含有 640 pixel),为了与模拟部分保持一致,选取液晶板中心的 512 pixel 作为调制单元(另外 128 pixel 不施加调制相位)。根据 Nyquist 采样定律,需要采集至少 1024 组倍频信号强度才能获得频谱相位信息。将这 512 pixel 分为 4 组,分组方式以及调制频率的选取与原理部分保持一致。在实验中,第 τ 次调制时对频率单元 ω_k 施加的相位调制量为

$$f(\omega_k, \tau) = f_l \tau, \tau \in [1, 1024], k \in [1, 128], \quad (22)$$

$$f_l = \pi \frac{l}{512}, l \in [128, 255], \quad (23)$$

式中 f_l 为调制频率,但要注意 SLM-640d 在 800 nm 附近对单个像素施加的最大相位差只有 7π ,因此当 $f(\omega_k, \tau) > 7\pi$ 时要进行相位折叠处理。为了增强调制效果,实验中将所有的相位调制量降低到 4π 以下。

第 τ 次调制时,待测脉冲的频域表达式为

$$E(\omega_k, \tau) = |A(\omega_k)| \exp\{i[\phi(\omega_k) + f(\omega_k, \tau)]\}. \quad (24)$$

振荡器输出的飞秒激光脉冲可近似看作无啁啾,利用 MIIPS 方法进行正弦相位扫描,测量得到的轨迹图如图 9(a)所示。可以看出,MIIPS 轨迹几乎是等间隔的一系列线状轨迹,利用文献[16]提到的 MIIPS 算法可以获得待测脉冲的频谱相位,如图 9(b)所示。其中使用的 MIIPS 函数为^[12]

$$f(\omega_k, \tau) = \alpha \sin[\gamma(\omega_k - \omega_0) - \delta\tau], \quad (25)$$

式中 $\alpha = 1.5\pi, \gamma = 30 \text{ fs}, \delta\tau$ 参量取值为 $0 \sim 4\pi$,逐次扫描。实验完成一次 MIIPS 相位测量约进行 200 次扫描。

利用 PPM 法对 4 组频率单元进行连续调制,每组采集 1024 个倍频信号强度。对强度信号作傅里叶变换后得到强度谱,其中第 1 组频率单元的强度谱如图 9(c)所示。从 4 组强度谱中提取调制频率处的相位并重

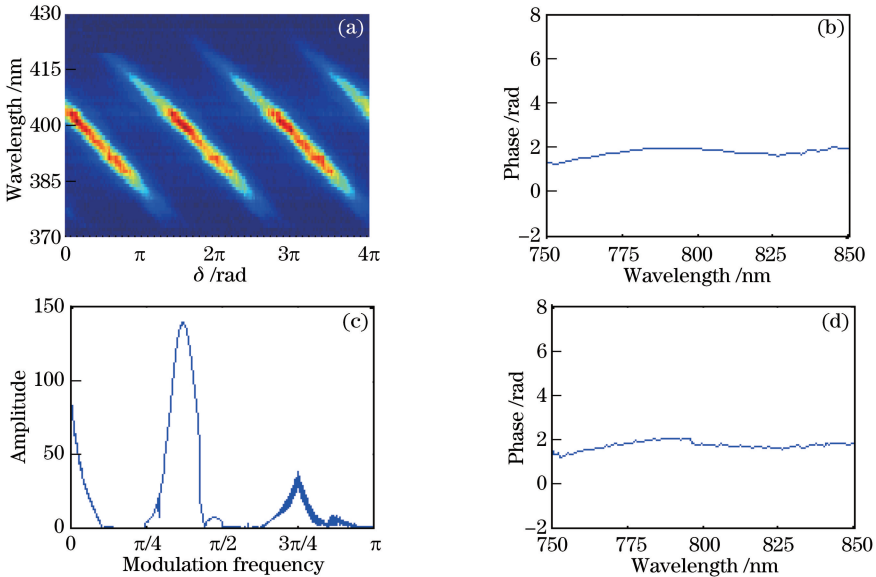


图 9 MIIPS 法和 PPM 法测量结果(原脉冲)。(a) MIIPS 轨迹图; (b) MIIPS 方法测量得到的飞秒脉冲频谱相位; (c) PPM 方法获得的倍频信号强度谱; (d) PPM 方法测量得到的飞秒脉冲频谱相位

Fig. 9 Measurement results by MIIPS and PPM methods (original pulse). (a) MIIPS trace;

(b) spectral phase of femtosecond pulse by MIIPS method; (c) power spectrum of SHG signal by PPM method;

(d) spectral phase of femtosecond pulse by PPM method

新整合,得到脉冲的频谱相位分布,如图 9(d)所示。对比图 9(b)、(d),两种方法的相位测量结果基本吻合。

利用啁啾镜对振荡器输出的飞秒激光脉冲引入啁啾相位调制。使用 MIIPS 方法得到的轨迹图和频谱相位 ϕ_1 分别如图 10(a)、(b)所示,此时线状轨迹相互靠近(远离)且变得非常模糊,说明频谱相位中存在较大啁啾。利用 PPM 方法测得的强度谱和频谱相位 ϕ_2 如图 10(c)、(d)所示,可以看出,强度谱中的调制峰分布状况变差,频谱相位中确实存在较大的二阶啁啾。

为了考察 PPM 方法的相位补偿功能,将 ϕ_2 反馈到 LC-SLM 上进行相位补偿。使用 MIIPS 方法和

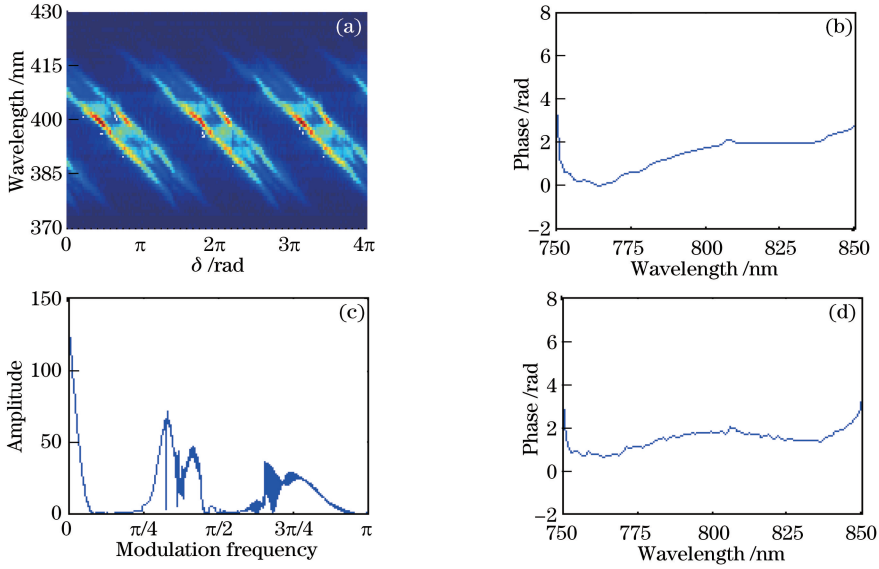


图 10 MIIPS 法和 PPM 法测量结果(受啁啾调制)。(a) MIIPS 轨迹图; (b) MIIPS 方法测量出的飞秒脉冲频谱相位; (c) PPM 方法获得的倍频信号强度谱; (d) PPM 方法测量出的飞秒脉冲频谱相位

Fig. 10 Measurement results by MIIPS and PPM methods (chirped modulation).

(a) MIIPS trace; (b) spectral phase ϕ_1 of femtosecond pulse by MIIPS method; (c) power spectrum of SHG signal by PPM method; (d) spectral phase ϕ_2 of femtosecond pulse by PPM method

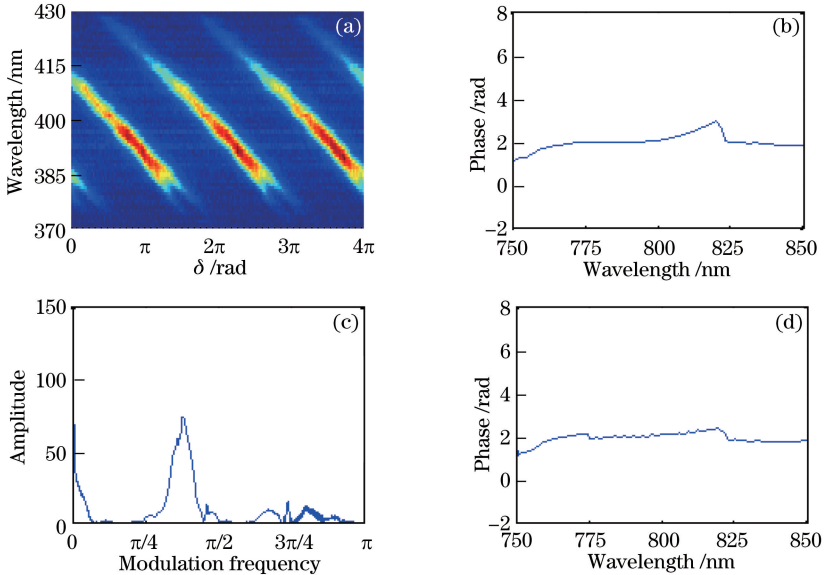


图 11 MIIPS 法和 PPM 法测量结果(经过相位补偿)。(a) MIIPS 轨迹图; (b) MIIPS 方法测量出的飞秒脉冲频谱相位; (c) PPM 方法获得的倍频信号强度谱; (d) PPM 方法测量出的飞秒脉冲频谱相位

Fig. 11 Measurement results by MIIPS and PPM methods (after spectral phase compensation).

(a) MIIPS trace; (b) spectral phase ϕ_3 of femtosecond pulse by MIIPS method; (c) power spectrum of SHG signal by PPM method; (d) spectral phase ϕ_4 of femtosecond pulse by PPM method

PPM方法获得的MIIPS轨迹图和PPM强度谱分别如图11(a)、(c)所示。此时轨迹图接近等间隔分布,说明脉冲频谱相位中的大部分啁啾得到补偿,同时强度谱中的调制峰分布情况得到改善,调制频率处的强度获得提升。两种方法得到的相位分别为 ϕ_3 和 ϕ_4 ,如图11(b)、(d)所示。

对比两种方法测量的结果,PPM法与MIIPS法得到的脉冲频谱相位大致吻合,仅在细节上存在一些误差。脉冲频谱相位受到的扰动越小,两种方法测量结果之间的误差越小。实验中为了兼顾MIIPS法和PPM法,使用光纤光谱仪而不是光电倍增管作为测量工具。在后续实验中可以直接测量倍频信号强度,而不是对倍频信号光谱做强度积分,这样可以进一步减小PPM方法测算频谱相位时的误差。

5 结 论

探究了PPM算法在脉冲频谱相位补偿过程中的应用,对比了PPM方法与其他方法之间的区别,得出了相位调制、解调方法以及调制频率的限制条件。基于PPM原理设计了一套飞秒激光脉冲相位补偿和整形装置,完成了中心波长约800 nm、重复频率84 MHz、谱宽约60 nm的飞秒激光脉冲频谱相位的测量和补偿。最后使用经典MIIPS方法验证了PPM方法的测量结果,两种方法得到的结果较为接近,证明PPM方法是一种行之有效的飞秒激光脉冲频谱相位测量和补偿方法。与FROG、SPIDER、MIIPS等方法相比,PPM方法无需测量脉冲的信号光谱,只需记录信号光强;此外,在理论上,PPM方法可以对任意频谱相位形状的脉冲进行相位补偿,是一种有效的方法。PPM方法为测量和补偿飞秒激光脉冲的频谱相位提供了新的手段,这对超快激光光谱学、飞秒化学、非线性显微成像等领域有一定意义。

参 考 文 献

- 1 Sibbett W, Lagatsky A A, Brown C T A. The development and application of femtosecond laser systems[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 6989-7001.
- 2 Ma Jianjun, Li Dehua, Zhou Wei, *et al.* Progress of terahertz pulse shaping techniques[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 090004.
马建军, 李德华, 周 薇, 等. 太赫兹脉冲整形技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 090004.
- 3 Delong K W, Trebino R. Frequency-resolved optical gating with the use of second-harmonic generation[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1994, 11(11): 2206-2215.
- 4 Lu Linlin, Jia Yudong, Zhang Xiaoqing. Research progress of frequency resolved optical gating femtosecond pulse width measurement technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 070005.
鲁琳琳, 贾豫东, 张晓青. 频率分辨光学开关法飞秒脉宽测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 070005.
- 5 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.
- 6 Liu J, Li F J, Jiang Y L, *et al.* Transient-grating self-referenced spectral interferometry for infrared femtosecond pulse characterization[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4829-4831.
- 7 Shen X, Liu J, Li F J, *et al.* Extended transient-grating self-referenced spectral interferometry for sub-100 nJ femtosecond pulse characterization[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(8): 081901.
- 8 Zhang Suxia, Li Fangjia, Liu Jun. Research progress of self-referenced spectral interferometry on the characterization of femtosecond pulses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010001.
张素侠, 李方家, 刘 军. 自参考光谱干涉法测量飞秒脉冲的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 010001.
- 9 Lozovoy V V, Pastirk I, Dantus M. Multiphoton intrapulse interference. IV. Ultrashort laser pulse spectral phase characterization and compensation[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(7): 775-777.
- 10 Xu B W, Gunn J M, Dela Cruz J M, *et al.* Quantitative investigation of the multiphoton intrapulse interference phase scan method for simultaneous phase measurement and compensation of femtosecond laser pulses[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, 23(4): 750-759.
- 11 Zhao Guankai, Liu Jun, Li Ruxin. Spectral phase measurement and compensation of femtosecond laser pulse based on multi-photon intra-pulse interference phase scan[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(16): 164207.
赵冠凯, 刘 军, 李儒新. 基于多光子脉冲内干涉相位扫描法对飞秒激光脉冲进行相位测量和补偿的研究[J]. *物理学*

报, 2014, 63(16): 164207.

- 12 Cui M. Parallel wavefront optimization method for focusing light through random scattering media[J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 870-872.
- 13 Wu T W, Tang J Y, Hajj B, *et al.* Phase resolved interferometric spectral modulation (PRISM) for ultrafast pulse measurement and compression[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 12961-12968.
- 14 Yoon J, Lee K R, Park J, *et al.* Measuring optical transmission matrices by wavefront shaping [J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10158-10167.
- 15 Meshulach D, Silberberg Y. Coherent quantum control of two-photon transitions by a femtosecond laser pulse [J]. Nature, 1998, 396(19): 239-242.
- 16 Zhao Guankai, Liu Jun, Li Ruxin. Research on optimization selection of phase modulation parameters in MIIPS [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0902001.

赵冠凯, 刘 军, 李儒新. 基于 MIIPS 的相位调制参量优化选择研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902001.