

用改进型空间编码 SPIDER 系统测量 复杂脉冲的准确性分析*

马志莲, 谢志鹏, 文锦辉, 胡 婷
(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 与现有多种 SPIDER 装置相比, 提出的改进型空间编码 SPIDER 系统在测量结构复杂的超短脉冲方面具有优势。借助数值模拟, 以两个不同结构的复杂脉冲为对象, 分析准单色辅助脉冲的带宽和频谱位置等因素对该系统测量复杂脉冲的准确度的影响。模拟结果表明, 两个复杂脉冲相位重构的误差都将随辅助脉冲准单色带宽的增大而增大, 但误差的增幅则有较大差别: 含有多种高阶色散但光谱分布和光谱相位曲线都较为平滑的复杂脉冲的误差增幅相对较小; 而光谱和相位曲线中存在陡变结构的复杂脉冲则会有较大误差增幅。尤其是当其中一个辅助脉冲的频率刚好选在待测脉冲相位陡变的位置附近时, 就容易出现明显的误差。采用多个剪切量测量同一复杂脉冲有助于发现并剔除这样的误差从而提高准确性。

关键词: 飞秒激光脉冲测量; 光谱相干直接电场重构法; 复杂脉冲; 准确度

中图分类号: TN247; TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2015) 05-0032-07

The Accuracy of Complex Pulse Measurement by a Modified Spatial Encoded Arrangement for SPIDER System

MA Zhilian, XIE Zhipeng, WEN Jinhui, HU Ting

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology, Sun Yat-sen University,
Guangzhou 510275, China)

Abstract: Compared to other SPIDER devices, the modified spatial-encoded-arrangement for SPIDER system (MSEA-SPIDER) are more advantageous for complex pulse measurement. Using two test pulses with different complex features as examples, the affects of the bandwidths and the spectral positions of the two quasi-monochromic auxiliary pulses on the accuracy of characterization of complex pulses are studied by means of numerical simulation. The simulation results show that both the errors of phase reconstruction for these complex pulses increase with the bandwidth enlargement of the auxiliary pulses, but their degrees of error increase are quite different. The error increases less for the complex pulse with multi-high-order dispersions but smooth profiles of spectral intensity and phase, while much larger for the complex pulse with abrupt variations in its spectral intensity and phase. Especially, when one of the frequencies of the auxiliary pulses is set near each spectral position of the abrupt variations in the pulse phase, the error of phase retrieval should be significantly large. Multi-shearing measurement for the same complex test pulse is helpful to find and remove this kind of error to reach higher accuracy.

Key words: measurement of femtosecond laser pulses; SPIDER; complex pulses; accuracy

* 收稿日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11274398)

作者简介: 马志莲 (1990年生), 女; 研究方向: 超短激光脉冲结构测量; 通讯作者: 文锦辉; E-mail: wenjh@mail.sysu.edu.cn

目前飞秒激光技术已成为很多研究和应用领域的重要工具^[1-2]。飞秒脉冲整形技术的持续发展,使得人们能够很方便地获得各种结构的超短脉冲,应用于相干控制化学反应、光通讯等领域^[3-4]。由于脉冲整形技术可以独立地调控飞秒脉冲各个光谱成分的振幅和相位,因而容易产生相位和光谱分布存在急剧变化的复杂脉冲。另外一些非线性光学过程也可能导致复杂的超短脉冲结构,如利用光子晶体光纤(PCF)产生超连续谱脉冲、飞秒脉冲在空心 PCF 中的传播等等^[5-6]。准确测量复杂脉冲的结构,将有助于分析这些过程里的物理机理。

光谱相干直接电场重构法(SPIDER)是目前主要的超短脉冲测量技术之一^[7-10],具有测量速度快等优点。但现有 SPIDER 系统因结构上的问题限制了它们在测量复杂脉冲方面的应用;而我们最近提出的改进型空间编码 SPIDER 系统(简称 MSEA-SPIDER)已证实可准确测量多种结构的复杂脉冲。

为了更深入地分析 MSEA-SPIDER 系统的适应性,本文借助数值模拟的方法,以两个不同结构的复杂脉冲为对象,分析准单色辅助脉冲的带宽和频谱位置等因素对该系统测量复杂脉冲准确度的影响,进而探讨减小测量误差和维持准确度的方案。

1 理论分析

根据 SPIDER 方法的工作原理^[7],待测的超短脉冲需要与两个准单色辅助脉冲片段发生和频作用,从而得到两个光谱剪切的和频脉冲,然后利用这两个和频脉冲的干涉谱图来重构出待测脉冲的相位结构。它要求两个准单色辅助脉冲片段的相位可以看作是常数,则它们与待测脉冲发生和频时所生成的两个和频脉冲的相位结构就会跟原有待测脉冲完全一致。由此通过两个和频脉冲的干涉谱来重构出和频脉冲的相位曲线,就等效于求出了待测脉冲的相位结构。但若两个准单色片段本身具有一定的带宽,因而存在一定的相位结构而不能看作一个常数,则会在和频作用时附加到和频脉冲的相位结构之上,这样和频脉冲与待测脉冲的相位之间将发生一定程度的偏离,最终导致测量误差。因此,为确保测量准确性,SPIDER 方法通常对参与和频的两个辅助脉冲片段的带宽设置有以下的要求^[8]:若待测脉冲的光谱带宽为 $\Delta\omega$,则准单色片段的带宽 $\delta\omega$ 应该满足单色性条件 $\delta\omega/\Delta\omega \leq 1\%$ 。

目前各种 SPIDER 装置一般都用分束片将待测脉冲分成两束:第一束用于生成 1-2 个待测脉冲

的复制品,第二束要经过特殊处理而形成 1-2 个辅助脉冲。而且现有 SPIDER 系统多采用色散展宽器(如长玻璃块或光栅对)将第二束脉冲光强烈展宽而形成强啁啾辅助脉冲,并使之与待测复制脉冲聚焦于非线性光学晶体的同一位置。在此情形下,参与和频作用的两个辅助脉冲片段的带宽 $\delta\omega$ 以及它们的中心频率差 Ω (称为光谱剪切量)就难免会跟待测脉冲的啁啾量和脉宽有关联。如果待测脉冲具有比较复杂的光谱和相位结构,则通常难以估计它的脉宽和啁啾量,这样 SPIDER 方法所要求的单色性条件就难以得到保证,而且会因待测脉冲本身啁啾的影响而使剪切量 Ω 偏离预先校正的数值,最终导致明显的测量误差详见文献 [11-12] 中的分析。

我们最近提出的 MSEA-SPIDER 系统采用“4f 零色散脉冲压缩器 + 双缝光阑”的方式来产生圆频率分别为 ω_1 和 ω_2 的两个准单色辅助脉冲^[12-13],使之与待测脉冲发生和频作用,由此生成的两个和频脉冲一高一低地聚焦入射到光栅光谱仪之中(见图 1),形成的 2 维干涉谱图由面阵 CCD 相机拍摄下来,进而通过特定的重构算法求出待测脉冲的相位曲线。由于两个准单色脉冲的带宽 $\delta\omega$ 和剪切量 $\Omega = \omega_2 - \omega_1$ 分别由挡板上双狭缝的宽度和间距所决定(在光栅和凹面镜已选定的情况下),与待测脉冲的脉宽和啁啾情况无关,因而能够避免 Ω 和 $\delta\omega$ 随待测脉冲的特性变化而改变,而且只需平移双缝挡板即可改变剪切量 Ω ,即能够很方便地

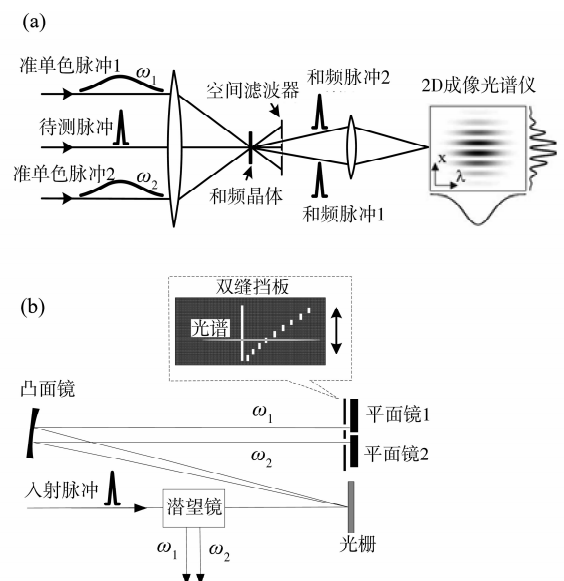


图 1 MSEA-SPIDER 装置的示意图

Fig. 1 Sketch of MSEA-SPIDER system

(b) 图是产生两个准单色辅助脉冲的 4f 结构

实现同一个脉冲的多剪切量测量, 从而可消除多种系统误差^[10], 因而具备准确测量各种特性复杂脉冲的必要条件。实际上, 只要根据待测脉冲的带宽 $\Delta\omega$ 换上合适缝宽的双缝挡板, 脉冲测量的准确性就基本上得到保证。

如上所述, SPIDER 方法对参与和频的两个辅助脉冲片段具有一定的准单色带宽限制, 但在实际使用中还需根据待测脉冲的能量来设定这个系统参数。在我们的 MSEA-SPIDER 系统中若选择过于窄小的双缝宽度, 虽可得到很小的 $\delta\omega$ 值来确保单色性条件的满足, 但也意味着两个准单色脉冲的能量很低, 它们与复制脉冲发生和频作用的效率就会很低, 从而导致很低的和频干涉谱的信噪比, 会引起脉冲重构准确度的明显下降。因此实际条件下 $\delta\omega$ 应有最优化的折衷值。另外, 对于相位曲线中存在跳变的复杂脉冲, 如果由双缝选取的准单色辅助脉冲的频率至少有一个刚好落在相位跳变的位置上, 也可能给和频脉冲引入附加相位而引起误差。为此, 本文将借助数值模拟的手段, 讨论上述情况对复杂脉冲测量准确度的影响。

实际上, 待测脉冲的时域和频域表示式分别为

$$\tilde{E}(t) = \sqrt{I(t)} \exp\{i[\omega_0 t - \varphi(t)]\} \quad (1)$$

$$\tilde{E}(\omega) = \sqrt{S(\omega)} \exp\{i[(\omega - \omega_0)t - \varphi(\omega)]\} \quad (2)$$

其中 $I(t)$, ω_0 和 $\varphi(t)$ 分别是脉冲的强度包络、中心圆频率和时域相位; 而 $S(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 分别是脉冲的光谱分布和光谱相位。 $\tilde{E}(t)$ 与 $\tilde{E}(\omega)$ 是互为傅里叶变换的关系, 实验中只要测出两者之一, 另一个就能直接推导出来。此外, 若脉冲的光谱相位曲线连续可微分, 则可用泰勒展开式来表示:

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) = & \varphi_0 + \varphi_1 \frac{(\omega - \omega_0)}{1!} + \varphi_2 \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2!} + \\ & \varphi_3 \frac{(\omega - \omega_0)^3}{3!} + \varphi_4 \frac{(\omega - \omega_0)^4}{4!} + \varphi_5 \frac{(\omega - \omega_0)^5}{5!} + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

其中常数项 φ_0 和一阶导数 φ_1 对脉冲的形状结构影响不大, 一般可设为 0; 而 φ_2 , φ_3 , φ_4 和 φ_5 分别称为 2-5 阶色散。

为简单起见, 假定我们系统中的 4f 结构处于理想状态, 在生成两个准单色辅助脉冲时不会引入额外的色散, 即由双缝选取出来的准单色成分能够保持原有待测脉冲的光谱片段内所对应的相位结构。这样就可利用公式 (1) 和 (2) 算出两个准单色脉冲的时域表示式 $\tilde{E}_{s1}(t)$ 和 $\tilde{E}_{s2}(t)$, 则准

单色辅助脉冲与待测脉冲和频而生成的两个和频脉冲的时域表示式分别为

$$\tilde{E}_{s1}(t) = \tilde{E}(t) \tilde{E}_{m1}(t) \quad (4)$$

$$\tilde{E}_{s2}(t) = \tilde{E}(t) \tilde{E}_{m2}(t) \quad (5)$$

这样, 只要分别对 $\tilde{E}_{s1}(t)$ 和 $\tilde{E}_{s2}(t)$ 作傅立叶变换然后求幅角, 即可得到两个和频脉冲的光谱相位曲线 $\varphi_{s1}(\omega)$ 和 $\varphi_{s2}(\omega)$ 。在此情形下, 即可直接比较它们与待测脉冲的相位曲线 $\varphi(\omega)$ 之间的差异来显示是否出现误差。另外也可仿照 SEA-SPIDER 标准的重构算法来评估测量的误差。也就是说, 我们假定两个和频脉冲进入光谱仪之中形成了 2 维干涉光谱并被面阵 CCD 相机记录下来, 而且按照 SEA-SPIDER 标准的相位重构算法对这个 2 维干涉光谱进行处理, 能够准确无误地得到两个和频脉冲的剪切相位差 $d\varphi(\omega) = \varphi_{s2}(\omega) - \varphi_{s1}(\omega)$, 接着将各个相位差以 Ω 为间隔串接起来从而得出待测脉冲的相位曲线 $\varphi_c(\omega)$, 再与待测脉冲实际相位曲线 $\varphi(\omega)$ 作对比, 即可得到相位偏差曲线 $\delta\varphi(\omega) = \varphi_c(\omega) - \varphi(\omega)$ 。

本文采用文献 [14] 中定义的均方根光场误差 ε 来表征 SPIDER 方法重构脉冲的准确度。若只讨论重构相位引起的误差, ε 可表示为

$$\varepsilon = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega (\delta\varphi(\omega))^2 |\tilde{E}(\omega)|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中 ε 的取值在 0~2 之间, $\varepsilon < 0.02$, $0.02 < \varepsilon < 0.1$ 和 $\varepsilon > 0.1$ 分别表示脉冲重构的准确性较高、一般和较差。

2 数值模拟结果分析

考察在系统参数 Ω 和 $\delta\omega$ 选取不同数值以及不同频率位置条件下 MSEA-SPIDER 系统对两种结构的复杂脉冲的重构准确度。假设两个待测脉冲的光谱强度分布 $S(\omega)$ 基本相同, 皆为双高斯峰分布、中心波长皆为 800 nm (对应于中心圆频率 $\omega_0 = 2\pi \times 375$ THz)、带宽皆为 42.7 nm (对应于频带宽度为 $\Delta\omega = 2\pi \times 20$ THz), 但具有不同的相位结构 $\varphi(\omega)$ 。如图 2 所示, 脉冲 A 含有多种高阶色散, 其中 $\varphi_2 = 600$ fs², $\varphi_3 = 35\ 000$ fs³, $\varphi_4 = 500\ 000$ fs⁴, $\varphi_5 = -4\ 000\ 000$ fs⁵; 脉冲 B 的相位结构更为复杂, 除了含有多种色散 $\varphi_2 = 400$ fs², $\varphi_3 = 10\ 000$ fs³, $\varphi_4 = 50\ 000$ fs⁴, $\varphi_5 = -100\ 000$ fs⁵ 之外, 还有一个幅度为 0.9π 的近似方波状的跳变。由于光谱干涉效应, 该脉冲的光谱强度分布曲线会在相位跳变位置上出现强烈的变化, 如图 2 (b)。为了保持较高的数值模拟精度, 两个待测脉冲的光

谱强度和相位曲线都用 2 048 个数据点表示，频率采样间隔为 0.04 THz；而脉冲的时域分布曲线用 6 000 ~ 10 000 个数据点表示，时间采样间隔为 0.25 fs。

假设通过切换 4f 结构中的双缝挡板和调节光栅转角，使得准单色辅助脉冲 1 的中心圆频率设定为 $\omega_1 = 2\pi \times 370$ THz，并且在平移双缝挡板时保持不变；而准单色辅助脉冲 2 的圆频率通过平移双缝挡板，依次选为 $\omega_2 = 2\pi \times 374, 2\pi \times 378, 2\pi \times 382$ 和 $2\pi \times 386$ THz，分别对应图 2 中的 a, b, c, d 四个位置。则剪切量 $\Omega = \omega_2 - \omega_1$ 依次取值为 $2\pi \times 4, 2\pi \times 8, 2\pi \times 12$ 和 $2\pi \times 16$ THz，由此实现对同一复杂脉冲的多剪切量测量。对应于每个 Ω ，可选择不同缝宽的狭缝来设置准单色带宽 $\delta\omega$ ，在这里双狭缝的宽度始终保持一致。由于双缝的特点自动形成了约束条件 $\delta\omega \leq \Omega$ ，因此带宽 $\delta\omega$ 分别取值 $2\pi \times 0.2, 2\pi \times 1, 2\pi \times 2$ 和 $2\pi \times 4$ THz，意味着单色性条件 $\delta\omega\Delta\omega$ 分别为 1%，5%，10% 和 20%。这里特别要注意 $\Omega = 2\pi \times 8$ THz 时第 2 个准单色辅助脉冲的频率刚好落在脉冲 B 相位跳变的边缘。

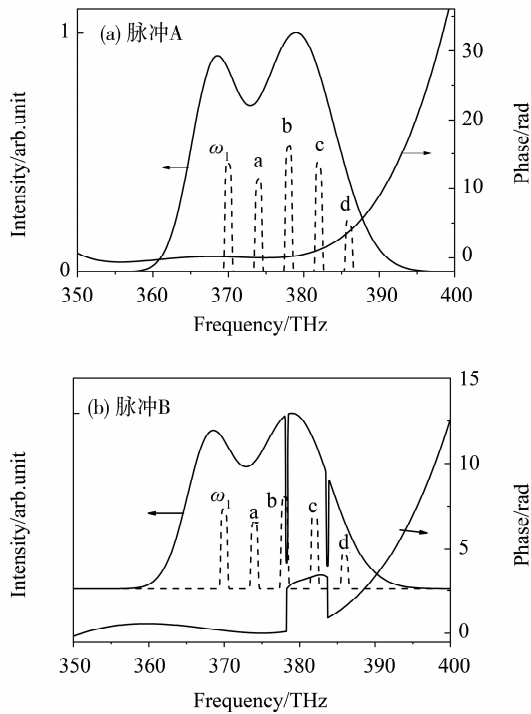


图 2 两个待测脉冲 A 和 B 的光谱强度分布和相位曲线，以及准单色辅助脉冲的频率位置
(图中准单色带宽以 $\delta\omega = 2\pi \times 1$ THz 为范例)

Fig. 2 The spectra and spectral phases of the complex test pulses A and B, as well as the spectral positions of the quasi-monochromatic auxiliary pulses

THz 以及带宽 $\delta\omega$ 分别取值 $2\pi \times 0.2, 2\pi \times 1, 2\pi \times 2$ 和 $2\pi \times 4$ THz 条件下，对应的两个和频脉冲的相位曲线与真实曲线的差异。可以看出， $\delta\omega = 2\pi \times 0.2$ THz 时由于单色性条件 $\delta\omega\Delta\omega \leq 1\%$ 得到满足，因而两个和频脉冲的相位曲线与实际曲线基本吻合；而随着 $\delta\omega$ 不断增大，和频脉冲的相位偏离实际曲线的程度将越来越大，说明辅助脉冲的相位信息附加到和频脉冲之上而引起了相位失真，从而导致明显的测量误差。

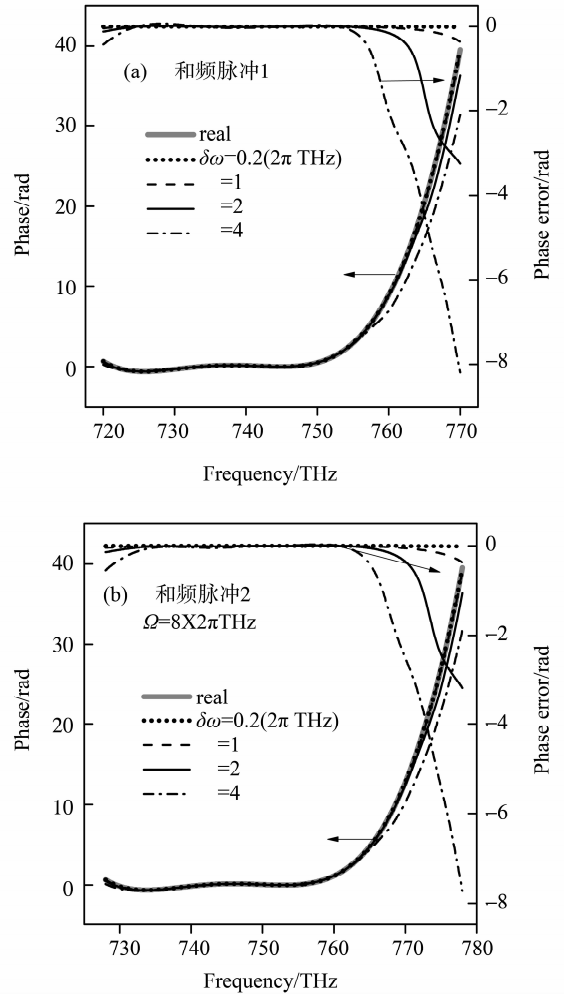


图 3 在 $\Omega = 2\pi \times 8$ THz 以及不同的准单色带宽 $\delta\omega$ 的条件下，待测脉冲 A 对应的两个和频脉冲的相位曲线及与实际曲线的偏差

Fig. 3 The calculated phase curves and phase errors for the corresponding upconverted pulses of the test pulse A with varied quasi-monochromatic bandwidths at $\Omega = 2\pi \times 8$ THz

图 4 为待测脉冲 B 在 $\Omega = 2\pi \times 8$ THz 以及带宽 $\delta\omega$ 分别取值 $2\pi \times 0.2, 2\pi \times 1, 2\pi \times 2$ 和 $2\pi \times 4$ THz 条件下的数值模拟结果。可以看出脉冲重构准确度的规律性与待测脉冲 A 基本相似，即随着 $\delta\omega$

图 3 给出了待测脉冲 A 在剪切量 $\Omega = 2\pi \times 8$

增大两个和频脉冲的相位偏差的程度将越来越大。特别之处是在方波跳变附近出现了明显的变化,即随着 $\delta\omega$ 不断增大,相位曲线中方波跳变的陡峭度不断下降,这是由和频作用时的频率混合现象所引起的。而且从图 4 (b) 可知,由于 $\Omega = 2\pi \times 8$

THz 时第 2 个辅助脉冲的频率刚好处于方波跳变的边缘,因而随着 $\delta\omega$ 的增大,辅助脉冲的相位结构也将含有该相位跳变信息,从而会附加到和频脉冲 2 的相位结构上从而导致更大的相位失真,而且在方波跳变范围内的失真尤为明显。

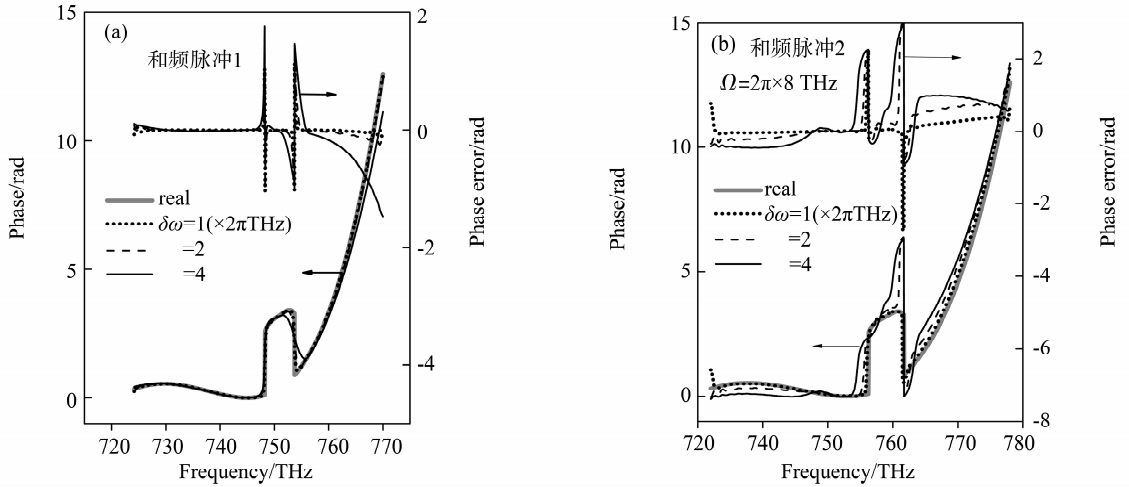


图 4 在 $\Omega = 2\pi \times 8$ THz 以及不同准单色带宽 $\delta\omega$ 条件下,待测脉冲 B 所对应的两个和频脉冲的相位曲线及与实际曲线的偏差

Fig. 4 The calculated phase curves and phase errors for the corresponding upconverted pulses of the test pulse B with different quasi-monochromatic bandwidths at $\Omega = 2\pi \times 8$ THz

我们仿照 SPIDER 标准的重构算法,分别计算出待测脉冲 A 和 B 在不同 Ω 和 $\delta\omega$ 条件下的两个和频脉冲的剪切相位差曲线 $d\varphi(\omega)$,接着将相应的各个相位差串接起来得到待测脉冲的相位曲线 $\varphi_c(\omega)$,再算出与待测脉冲实际相位的偏差曲线 $\delta\varphi(\omega)$ 。进而代入公式 (6) 计算均方根光场误差 ε 来表征 SPIDER 相位测量的准确度。

表 1 给出了不同剪切量 Ω 和带宽 $\delta\omega$ 条件下重构两个复杂脉冲的均方根光场误差 ε 的数值。可以看出,随着 $\delta\omega$ 增大脉冲重构的准确度不断下降;而相同 $\delta\omega$ 条件下 Ω 越大则基本上重构误差会有所减小。其主要原因是相位差串接的间隔增大而串接次数成比例地降低,因而误差的积累相应地减小

了。特殊之处是复杂脉冲 B 在 $\Omega = 2\pi \times 8$ THz 时的误差明显加大,其中的原因前面已经分析过了。

为了更好地展示脉冲重构准确性的影响,我们给出几种参数条件下重构出来的两个复杂脉冲的频域和时域的时间和相位结构。脉冲 A 在 $\Omega = 2\pi \times 8$ THz 以及带宽 $\delta\omega$ 分别取值 $2\pi \times 2$ 和 $2\pi \times 4$ THz 的条件下的结果如图 5 所示。可以看出该脉冲的频域相位、时域的包络和相位结构都不算太复杂,虽然脉冲重构的准确度随着辅助脉冲的带宽 $\delta\omega$ 增大而降低,但在 $\delta\omega$ 比较宽的条件(如 $\delta\omega = 2\pi \times 4$ THz)的重构结果与实际曲线的差别并不算很大。这意味着对该待测脉冲来说,重构脉冲相位时对辅助脉冲单色性的要求比较宽松。

表 1 不同剪切量 Ω 和带宽 $\delta\omega$ 条件下重构两个复杂脉冲相位的均方根光场误差 ε

Table 1 RMS field errors ε for phase retrieval of the two complex pulses in different cases of spectral shear Ω and bandwidth $\delta\omega$.

剪切量 $\Omega/(2\pi\text{THz})$	脉冲 A				脉冲 B				
	4	8	12	16	4	8	12	16	
0.2	0.000 43	0.000 31	0.000 20	0.000 38	0.013	0.012	0.012	0.012	
带宽 $\delta\omega /$ ($2\pi\text{THz}$)	1	0.011	0.007 3	0.005 3	0.000 10	0.070	0.26	0.065	0.060
2	0.083	0.064	0.043	0.046	0.14	0.60	0.13	0.11	
4	0.39	0.30	0.20	0.24	0.30	0.96	0.31	0.19	

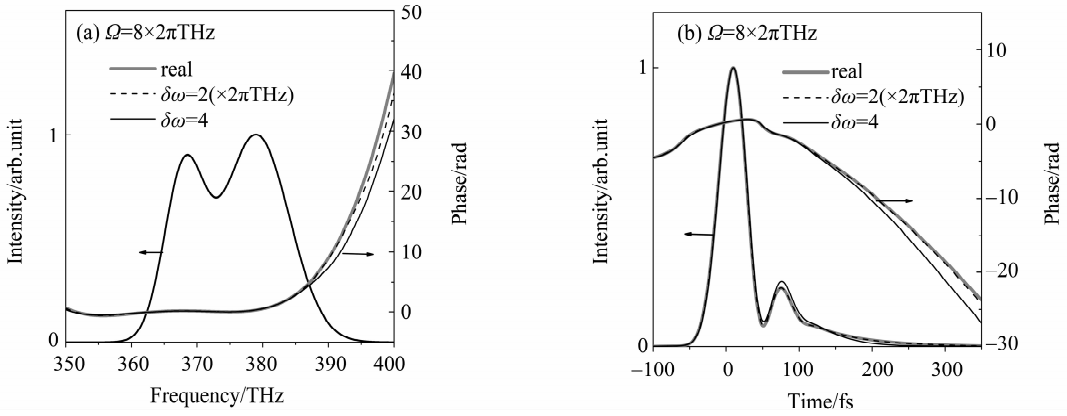


图 5 脉冲 A 在 $\Omega = 2\pi \times 8$ THz 及 $\delta\omega$ 不同取值条件下的模拟结果

Fig. 5 The simulated results of test pulse A at $\Omega = 2\pi \times 8$ THz under different bandwidth $\delta\omega$

(a) 频域; (b) 时域

图 6 显示了脉冲 B 分别在 $\Omega = 2\pi \times 4$ 和 $2\pi \times 8$ THz 以及 $\delta\omega$ 分别取值 $2\pi \times 2$ 和 $2\pi \times 4$ THz 条件下的模拟结果。可以看出，总体上的规律性与待测脉冲 A 的情况相似，即随着 $\delta\omega$ 增大重构误差会越来越大。而由于待测脉冲 B 的频域和时域结构都比较复杂（图中真实曲线用灰色粗实线表示）， $\delta\omega$ 较大时重构结果与实际曲线呈现很明显的差别。例如图 6 (a) 和 (b) 所对应的 $\Omega = 2\pi \times 4$ THz 条件下，随着 $\delta\omega$ 的增大，重构的相位曲线偏离真实曲线的幅度不断增大且方波跳变的陡峭度不断下降，但时域上的强度包络和相位的偏差仍都不算太大。 $\Omega = 2\pi \times 8$ THz 的情况就比较糟糕（如图 6 (c) 和 (d)），由于第 2 个辅助脉冲的频率刚好处于方

波跳变的边缘， $\delta\omega$ 较大时必然受到辅助脉冲附加相位的影响，使得重构出来的频域相位曲线出现较大偏差，从而导致时域包络和相位都严重地偏离真实的曲线。因此对该待测脉冲来说，脉冲重构过程中对辅助脉冲单色性的要求就比较高，不仅在信噪比容许的范围内 $\delta\omega$ 要尽量地小，而且要避免辅助脉冲的频率刚好选在待测脉冲相位瞬变的位置上，才能保证该复杂脉冲的测量具有较高的准确度。对于这种情况，实际上可以选择多个剪切量来测量同一脉冲，若发现个别剪切量下的重构结果跟其它情形相比差异很大，就将它们剔除，由此应该可以排除可能出现较大误差的情况。

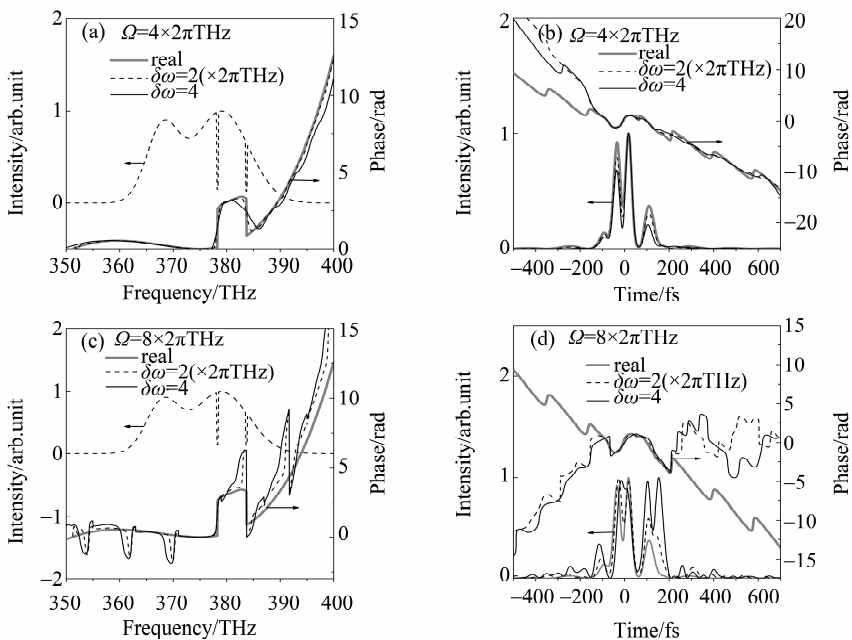


图 6 脉冲 B 分别在 $\Omega = 2\pi \times 4$ 和 $2\pi \times 8$ THz 以及不同 $\delta\omega$ 条件下的模拟结果

Fig. 6 The simulated results of test pulse B at $\Omega = 2\pi \times 4$ and $2\pi \times 8$ THz under different bandwidth $\delta\omega$

4 结 语

由于改进了产生辅助脉冲的方式,我们提出的 MSEA-SPIDER 系统在测量结构复杂的超短脉冲方面更具优势。本文借助数值模拟的手段,分析了准单色辅助脉冲的带宽和频谱位置等因素对该系统测量复杂脉冲的准确度的影响。选择两种不同结构的复杂脉冲作为研究对象,发现随着准单色带宽 $\delta\omega$ 的增大,辅助脉冲的相位信息将附加到和频脉冲之中而引起相位失真,从而导致明显的测量误差。另外不同结构的复杂脉冲对准单色性的要求有很大差别。对虽然含有多种高阶色散,但其光谱分布和光谱相位曲线都较为平滑的复杂脉冲,对单色性条件的宽容度大,即便 $\delta\omega/\Delta\omega = 10\%$ 以上也不会出现较大的重构误差。而对于光谱和相位曲线中存在陡变结构的复杂脉冲,其对辅助脉冲单色性的要求就比较高,不仅要求 $\delta\omega$ 尽量小,而且要避免辅助脉冲的频率刚好选在待测脉冲相位陡变的位置上,否则容易出现明显的测量误差。选择多个剪切量测量同一脉冲,将有利于提高测量的准确性,避免明显误差的出现。相关的实验研究工作正在开展中。

参考文献:

- [1] 王雪,封昌盛,何霜,等. 新型光敏剂 Corrole 激发态动力学研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2014,53: 63-66.
- [2] 徐初东,陈如麒,朱贵文,等. GdFeCo 磁光薄膜飞秒激光感应反常磁滞回线研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2013,52:103-106.
- [3] WEINER A. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators [J]. Rev Sci Instrum, 2000,71:1929-1960.
- [4] ZHANG S, WU M, LU C, et al. Coherent control of molecular rotational state populations by periodic phase-step modulation [J]. Phys Rev A, 2011,84:043419-1-5.
- [5] SCHENKEL B, BIEGERT J, KELLER U, et al. Generation of 3.8-fs pulses from adaptive compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum [J]. Opt Lett, 2003,28: 1987-1989.
- [6] BRABEC T, KRAUSZ F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics [J]. Rev Mod Phys, 2000,72:545-591.
- [7] IACONIS C, WALMSLEY I. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses [J]. Opt Lett, 1998,23:792-794.
- [8] IACONIS C, WALMSLEY I. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses [J]. IEEE J Quantum Electron, 1999,35:501-509.
- [9] KOSIK E, RADUNSKY A, WALMSLEY I, et al. Interferometric technique for measuring broadband ultrashort pulses at the sampling limit [J]. Opt Lett, 2005,30: 326-328.
- [10] AUSTIN D, WITTING T, WALMSLEY I. High precision self-referenced phase retrieval of complex pulses with multiple-shearing spectral interferometry [J]. J Opt Soc Am B, 2009,26:1818-1830.
- [11] 刘俊,文锦辉,张燕伟,等. 光谱相位相干直接电场重构法测量飞秒脉冲的适用性问题[J]. 中国激光, 2009,36:1175-1179.
- [12] 文锦辉,刘俊,张慧,等. 改进型零附加相位光谱相位相干电场重构系统对啁啾脉冲的测量[J]. 物理学报, 2010,59(1):370-375.
- [13] WEN J, ZHANG H, LU J, et al. Spectral shearing interferometer with broad applicability [J]. J Opt Soc Am B, 2011,28:1391-1395.
- [14] DORRER C, WALMSLEY I. Accuracy criterion for ultrashort pulse characterization techniques: Application to spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction [J]. J Opt Soc Am B, 2002,19:1019-1029.