

FROG 方法诊断飞秒脉冲的振幅与相位^{*}

雷 亮, 吴佳文, 邓 莉, 林位株

(中山大学光电子材料与技术国家重点实验室 // 物理学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 详细讨论了一种基于二次谐波—频谱分辨光闸法 (简称 SHG FROG 方法) 的矩阵迭代算法, 实现了对飞秒脉冲的振幅和相位的诊断, 得出其脉冲形状为双曲正割型、相位是时间的三次幂形式。

关键词: 飞秒脉冲; FROG 方法; 相位诊断

中图分类号: TN242; TN248.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 06-0128-03

在飞秒脉冲激光技术中, 如何正确地测出脉冲的振幅和相位信息已成为人们关心的问题。传统的测量脉冲宽度的自相关方法只能测量脉冲的宽度, 忽略了脉冲形状、相位等信息。而相位是描述激光的一个很重要的物理量。比如飞秒脉冲啁啾的产生就是激光器腔内增益介质的自相位调制和增益介质及各种色散元件的群速度色散对脉冲相位的影响。因此, 了解飞秒脉冲的振幅和相位信息, 可以对脉冲进行诊断并进行有效的补偿。近年来, 能全面测量脉冲振幅、相位的二次谐波—频谱分辨光闸 (SHG FROG) 方法^[1,2] 是一种有效的方法, 发展较快。

本文基于 FROG 方法的思想, 发展了一套矩阵迭代算法, 并用数值模拟的结果验证了算法的可行性。采用此法对本实验室的自锁模钛宝石激光器输出的飞秒脉冲进行振幅和初始相位的测量, 测得脉冲的宽度为 18 fs, 其包络的形状为双曲正割型, 初始相位近似为时间的三次幂形式。

1 原 理

飞秒脉冲时域的电场表示为:

$$E(t) = E(t) \exp[-i(\omega_0 t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (1)$$

其中, ω_0 为中心载波频率, $\mathbf{k}$ 是波矢, $E(t)$ 是脉冲时域的复包络,

$$E(t) = |E(t)| \exp[i\varphi(t)] \quad (2)$$

$\varphi(t)$ 为输出脉冲的初始相位。

飞秒脉冲的振幅 $|E(t)|$ 、初始相位 $\varphi(t)$ 可以利用本文描述的 SHG FROG 矩阵迭代算法进行测量。SHG FROG 实验测量系统是建立在传统自相关仪的基础上的。利用分束器将待测飞秒脉冲分成二束强度相同的脉冲, 经透镜会聚在倍频晶体中,

产生的脉冲强度自相关函数为:

$$\begin{aligned} G(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} I(t) I(t+\tau) dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} E(t) E^*(t) E(t+\tau) E^*(t+\tau) dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{sig}}(t, \tau) E_{\text{sig}}^*(t, \tau) dt \end{aligned} \quad (3)$$

其中,

$$E_{\text{sig}}(t, \tau) = E(t) E(t-\tau) \quad (4)$$

称为 SHG FROG 信号包络。通过单色仪可得到 FROG 频域迹线^[3], 即 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 的傅里叶变换的模的平方:

$$\begin{aligned} I_{\text{FROG}}(\omega, \tau) &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{sig}}(t, \tau) \exp(i\omega t) dt \right|^2 = \\ &= |E_{\text{sig}}(\omega, \tau)|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$I_{\text{FROG}}(\omega, \tau)$ 即为按不同延迟时刻测得的 FROG 迹线实验数据, 把这些数据输入算法程序中进行迭代运算, 即能获得脉冲振幅和相位信息。

2 算法描述与数值模拟

SHG FROG 方法的基本迭代思想如图 1。对脉冲先作一个初始猜测, 写出其电磁场的时域表示式, 可由 (4) 式得出不同延迟时刻 τ 在时间轴上的二次谐波信号 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$, 再对 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 作 t 的傅里叶变换 (FFT), 得到初始猜测脉冲的 $E_{\text{sig}}(\omega, \tau)$, $E_{\text{sig}}(\omega, \tau)$ 的模即为猜测脉冲的 FROG 迹线的方根值。保留其相位值, 以待测脉冲的实验 FROG 迹线方根值代替其振幅, 得到 $E'_{\text{sig}}(t, \tau)$, 此过程称为频域限制。再经反傅里叶变换 (IFFT) 得到一个新的二次谐波信号 $E'_{\text{sig}}(t, \tau)$, 此信号由于经过了频域限制,

^{*} 收稿日期: 2002-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60178020, 10274107); 广东省科技计划项目和自然科学基金资助项目 (2002B11601 和 011201)

作者简介: 雷亮 (1979 年生), 男, 硕士研究生; 通讯联系人: 林位株; E-mail: stslwz@zsu.edu.cn

显然更接近待测二次谐波信号。再通过时域限制过程, 满足(4) 式限制的新 $E(t)$ 作为下次迭代的初始脉冲。但因为不可能从一堆 $E_{sig}(t, \tau)$ 数据中找到一列 $E(t)$ 使(4) 式精确成立, 只能取在函数

$$Z = \sum_{t, \tau=1}^N |E'_{sig}(t, \tau) - E(t) E(t - \tau)|^2 \quad (6)$$

有最小值时的 $E(t)$ 作为下次迭代的初始值。

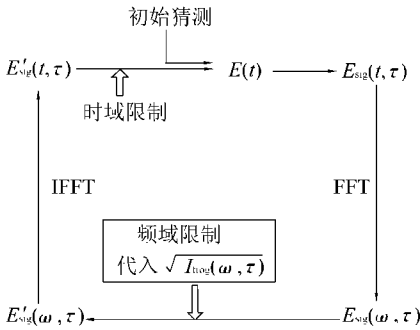


图 1 SHG-FROG 方法的迭代思想

Fig 1 Schematic of the FROG pulse retrieval algorithm

考虑到要通过计算机实现迭代, 必须采样分立的实验数据, 且 FROG 迹线是一个由频率 ω 与延迟时间 τ 组成的二维数据矩阵, 因此应该以矩阵方法处理此迭代问题。分别以等时间间隔 T 与等频率间隔 ω_n 构造得到 $N \times N$ 矩阵 $|E_{sig}(\omega, \tau)|^2$, 如图 2, 使得此矩阵的每一行表示在同一频率, 不同延迟时间下的相互作用, 每一列则表示在相同延迟时间, 不同采样频率下的相互作用。在实验中, 保留矩阵中每个元素的相位部分, 对实验测得的 FROG 迹线矩阵中的每个元素开方, 对应取代原矩阵元素的模, 可得 $E'_{sig}(\omega, \tau)$, 再对其作逆傅里叶变换得 $E'_{sig}(t, \tau)$ 。作反向行移动后的新矩阵代表经频域限制后 $E'_{sig}(t, \tau)$ 的外积矩阵 O_p 。

$$\begin{matrix} |E(\omega_{-N}, -NT)|^2 & \cdots & |E(\omega_{-N}, 0)|^2 & \cdots & |E(\omega_{-N}, NT)|^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |E(\omega_D, -NT)|^2 & \cdots & |E(\omega_D, 0)|^2 & \cdots & |E(\omega_D, NT)|^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |E(\omega_N, -NT)|^2 & \cdots & |E(\omega_N, 0)|^2 & \cdots & |E(\omega_N, NT)|^2 \end{matrix}$$

图 2 FROG 迹线矩阵略图

Fig 2 FROG trace using a matrix approach

每个迭代循环中都以小于误差函数^[2]

$$G = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N [I_{CALC}(\omega_i, \tau_j) - I_{FROG}(\omega_i, \tau_j)]^2} \quad (7)$$

判断是否停机。最后进行时域限制, 对 O_p 进行矩阵奇异值分解, 选取主对角元最大项为新的迭代矩

阵, 停机后此阵的列矢量便是待求的输出脉冲结果 $E(t)$ 。

图 3 是以线性啁啾脉冲

$$E(t) = \exp(-0.1t^2 + i0.01t^2) \quad (8)$$

构造得到的 FROG 迹线立体图(图 3(a)) 和由算法迭代得到的脉冲振幅与相位(图 3(d))。

由图可见, 迭代结果与理论的振幅相位吻合得非常好, 证明了此矩阵算法的可行性。频谱分辨率法是一种有效的飞秒激光脉冲的测量方法。

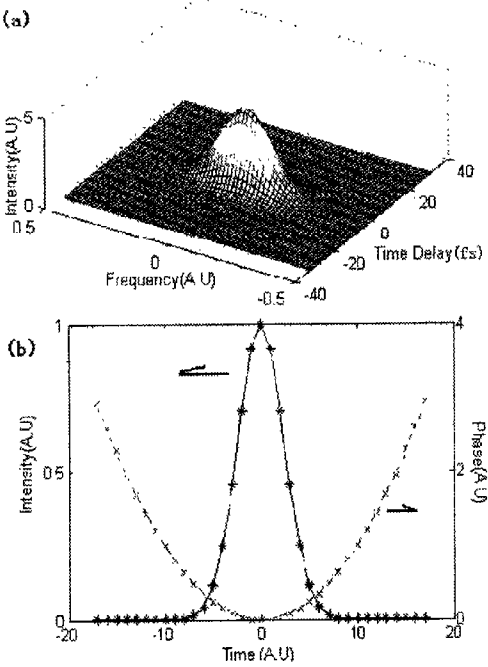


图 3 线性啁啾脉冲的 FROG 迹线立体图与数值模拟结果

Fig 3 Three dimensional plot of FROG trace for a linearly chirped Gaussian pulse and results of the FROG retrieval algorithm
实线: 振幅理论值; 虚线: 相位理论值;
*: 振幅迭代值; ×: 相位迭代值

3 实验结果与结论

实验中, 采用本实验室自行研制的 KIM 锁模钛宝石激光器输出的飞秒脉冲作为振幅相位诊断的对象。激光中心波长 770 nm, 频谱全高半宽 36 nm, 重复率 10^8 Hz, 平均功率 300 mW; 非线性光学晶体采用 KDP 晶体, 其厚度为 0.3 mm, 两光束偏振方向相同; 为了能使 SHG FROG 迹线准确反映基频光的性质, 倍频晶体的转换效率应小于 $3\%^{[2]}$ 。

实验结果如图 4 所示。利用 SHG FROG 实验测得脉冲的包络形状为双曲正割型, 如图中实线所示, 其全高半宽 (FWHM) 为 18 fs; 点划线为理论双曲正割曲线, 可见理论曲线与实验曲线吻合得较

好；而图中的点线为脉冲的相位曲线，在脉冲的中心部分近似为常数，说明脉冲的中心部分是无啁啾的，但脉冲的两翼却存在啁啾。脉冲强度包络的宽度基本上等于转换极限脉冲的强度宽度，这说明腔外的棱镜对较好地补偿了群速度色散，使脉冲压缩到最短。

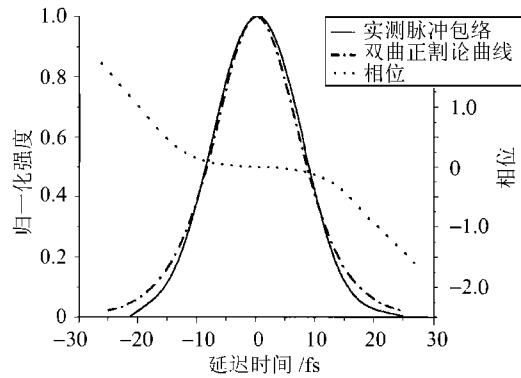


图 4 实线为利用 SHG-FROG 实验测得的脉冲的包络
Fig. 4 The intensity (solid curve) and the phase (dot curve)
of the femtosecond pulses measured by FROG technique
点划线为理论双曲正割线，点线为相位

参考文献:

[1] RICK T, DANIEL J K. Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses; frequency resolved optical gating[J] . J Opt Soc Am, 1993, A10: 1101.
[2] DELONG K W, RICK T, HUNTER J, et al. Frequency resolved optical gating with the use of second-harmonic generation[J] . J Opt Soc Am, 1994, B11: 2206.
[3] DANIEL J K, RICK T. Single-shot measurement of the intensity and phase of an arbitrary ultrashort pulse by using frequency resolved optical gating[J] . Opt Lett, 1993, 17: 823.
[4] MARCUSE D. Pulse distortion in single-mode fibers[J] . Appl Opt, 1980, 19(10): 1653.
[5] FORK R L, BRITO C H, BECKER P C, et al. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation[J] . Opt Lett, 1987, 12: 483.

Diagnosis of Intensity and Phase of Femtosecond Pulses
Using Frequency resolved Optical Gating

LEI Liang, WU Jia wen, DENG Li, LIN Wei zhu

(The State Key Laboratory of Photoelectronic Materials and Technologies,
Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The intensity and phase of femtosecond pulses generated from a home made KLM Ti: sapphire laser is diagnosed by using the frequency resolved optical gate technique. A sech^2 intensity and approximative cubic phase of the pulse are measured.

Key words: femtosecond pulse; FROG technique; diagnose of the phase