

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0050-03

用 FROG 法测量超短光脉冲的振幅和相位*

胡 婧 张贵忠 张百钢 向望华 李世忱

(天津大学精密仪器及光电子工程学院, 天津 300072)

摘要 介绍了一种先进的脉冲测量技术——SHG-FROG 技术。编程实现了利用计算机快速回归。列出该程序所获得的回归结果, 及对传统算法的改进, 并总结了实际运用相位恢复算法的经验和规律。结果表明, FROG 法实验装置简单, 而且算法实用, 计算快捷。

关键词 FROG 法, 超短脉冲, 强度, 相位

中图分类号 TN247 文献标识码 A

Using Frequency-Resolved Optical Gating (FROG) to Retrieve Amplitude and Phase of Ultrashort Laser Pulse

HU Jing ZHANG Gui-zhong ZHANG Bai-gang XIANG Wang-hua LI Shi-chen

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract The paper presents an advanced technique, SHG-FROG (second harmonic generation frequency-resolved optical gating) to measure an ultrashort laser pulse. The computer is programed to retrieve the amplitude and phase of the pulse. The retrieved results got by the program and the development of the traditional algorithm and experience and rule to use the algorithm practically are given. Not only was the FROG method tested to be easily built up but also the algorithm is handy and quick.

Key words FROG, ultrashort pulse, amplitude, phase

1 引 言

在过去的短短三十年间, 超短激光脉冲从产生到应用体现出日新月异的发展趋势^[1]。相应地, 也就对超短脉冲特性的测量提出了更高的要求。然而传统的测量方法^[2-4], 都存在着不能获得全部脉冲信息的缺陷, 而且有些实验装置过于复杂。可喜的是, 美国桑迪亚国家实验室的 Trebino 研究组于 1992 年成功实现了日本 NTT 的 Ishida 博士于 80 年代中期提出的频率分辨光学门技术^[5], 即 FROG 法。该方法解决了以上的所有问题, 其实验装置简单, 对传统强度自相关仪稍作改进即可进行 FROG 测量^[2,6]。

本研究主要针对倍频类 FROG, 即 SHG-FROG^[2]配置, 讨论其工作原理和实验装置, 利用我们独有的程度进行数值计算, 给出经过迭代回归后

得出的不同特性脉冲的振幅和相位, 并对计算结果进行讨论。针对 SHG-FROG 的算法可以很容易地推广至其他方法。

2 FROG 算法

FROG 技术包含两个主要部分: 第一, 用传统的强度自相关仪测量得出以时间延迟和频率为变量的函数图, 即所谓 FROG 谱图; 第二, 相位恢复运算, 利用实验获得的 FROG 图求出脉冲完整的强度和相位。

FROG 装置(如图 1)是强度自相关仪的变体^[2]; 任意一光脉冲经分束后的两束光(它们之间存在时间延迟)在非线性光学介质中相互叠加输出的倍频信号, 经光谱仪后被记录成三维图, 即得出 FROG 图(如图 2), 它是关于延迟时间和脉冲光谱的强度函数。在 SHG-FROG 情况下, 产生于倍频晶体的自相关信号是非线性信号。因而 SHG-FROG 信号在时域内的包络形式为:

* 教育部 G00042 项目、国家自然科学基金(19974029、69978015)资助课题。

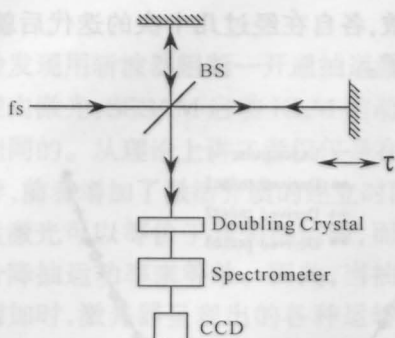


图1 FROG 技术实验装置. BS:分束器;fs:输入脉冲

Fig.1 layout of the FROG apparatus. BS: beam splitter; fs: input pulse

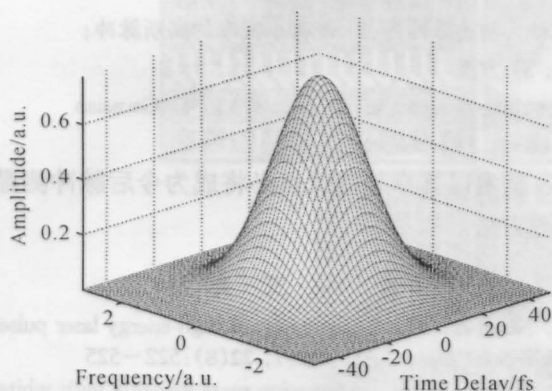


图2 一个典型的 FROG 图(宽度约为 40 fs)。Z 轴为 FROG 信号强度, X 轴为时间延迟, Y 轴为频率

Fig.2 A typical FROG image for a pulse of 40 fs wide.

The Z axis is the FROG signal intensity, the X axis is the time delay and Y axis is the frequency

$$E_{\text{sig}}(t, \tau) = E(t)E(t - \tau) \quad (1)$$

式中 $E(t)$ 表示被测脉冲的复包络(载波频率已被去掉), τ 是两束光间的延迟。然后信号输入一个光谱仪, 其强度由光电倍增管或 CCD 探测, 作出 FROG 图

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

其中 ω 是角频率。FROG 图是关于两变量的正实函数, 即频率和两束脉冲的时间延迟。由此 FROG 图出发, 通过编程计算, 可得到产生该 FROG 图的脉冲 $E(t)$ 。这个算法是基于相位恢复问题的迭代傅里叶变换。具体说来, 算法分析的全过程开始于一个电场的初始猜想值 $E(t)$, 将其代入(1)式, 可得出信号电场 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$, 经过傅里叶变换后得出频域函数 $E_{\text{sig}}(\omega, \tau)$ 。在 ω 域用实验结果的平方根来代替

新信号场的迭代绝对值, 即用测得的 FROG 图 $I_{\text{FROG}}(\omega, \tau)$ 的平方根代替 $E_{\text{sig}}^{(k)}(\omega, \tau)$ 的绝对值:

$$E'_{\text{sig}}(\omega, \tau) = \frac{E_{\text{sig}}(\omega, \tau)}{|E_{\text{sig}}(\omega, \tau)|} [I_{\text{FROG}}(\omega, \tau)]^{1/2} \quad (3)$$

接下来, 将 $E'_{\text{sig}}(\omega, \tau)$ 逆傅立叶变换回时域, 即生成 $E'_{\text{sig}}(t, \tau)$, 利用数学推导可反求出 $E'(t)$ 。将 $E'(t)$ 作为新的 $E(t)$ 值, 又可以开始新一轮迭代运算, 如此循环下去, 直到 $E(t)$ 收敛至一个稳定值。由此可见, FROG 算法的核心就在于利用实验结果来不断修正计算值, 使其逐步逼近实际值。

3 数值计算结果和讨论

我们以一束强度成高斯型的线性啁啾脉冲为例进行 FROG 计算。如前所述, FROG 算法就从这个作为实验的场开始, 写为:

$$E(t) = \exp(-at^2 + ibt^2) \quad (4)$$

按照(2)式, 我们对(4)式进行傅里叶变换至频域, 因而得出理论的 FROG 图应满足下式

$$I_{\text{FROG}}(\omega, \tau) \propto \exp\left[\frac{-4(a^3 + ab^2)\tau^2 - a\omega^2}{4(a^2 + b^2)}\right] \quad (5)$$

图2即为上式的图形表示, 其中 a 与脉宽有关, b 与脉冲啁啾有关。通过往理论的 FROG 图中添加噪声, 我们可以得到多个 FROG 图, 利用 FROG 算法对这些图进行迭代运算, 再将所得结果与式(4)的理论值进行比较, 我们得到了理想的结果。

我们对式(4)取几组不同的 a 值和 b 值进行计算。图3表示的是关于上述 a, b 值脉冲的迭代结果比较。由(4)式可见, 理论脉冲为抛物线型, 图3给出了三个迭代初始猜想值(带大啁啾的高斯脉冲、带小啁啾的高斯脉冲和方波脉冲) 经过迭代后所得结果的比较。显而易见, 由三个不同的迭代初始值所得的回归结果都与理论值十分吻合, 这也印证了实验与理论相吻合。实际上, 整个计算机程序的运行在 PC 机上只需要十几分钟的时间。

为了讨论算法的收敛性, 我们将回归的结果与理论值进行比较, 二者之间的差别称之为 FROG 误差^[6,7]

$$G_{\text{FROG}}^{(k)} = \left\{ \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [I_{\text{FROG}}^{(k)}(\omega_i, \tau_j) - I_{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_j)]^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

其中 $I_{\text{FROG}}^{(k)}$ 是 FROG 图的第 k 次迭代值, $I_{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_j)$ 是实际测得的 FROG 图的相关值, ω_i 和 τ_j 分别为第 i 个频率和第 j 个时间延迟。对应于图3, 图4给

出了由三个不同迭代初始猜想值所得结果与理论值的误差曲线。图 4 表明不同的初始值都在向一个值

的方向收敛,各自在经过几十次的迭代后就趋于一个稳定值了。

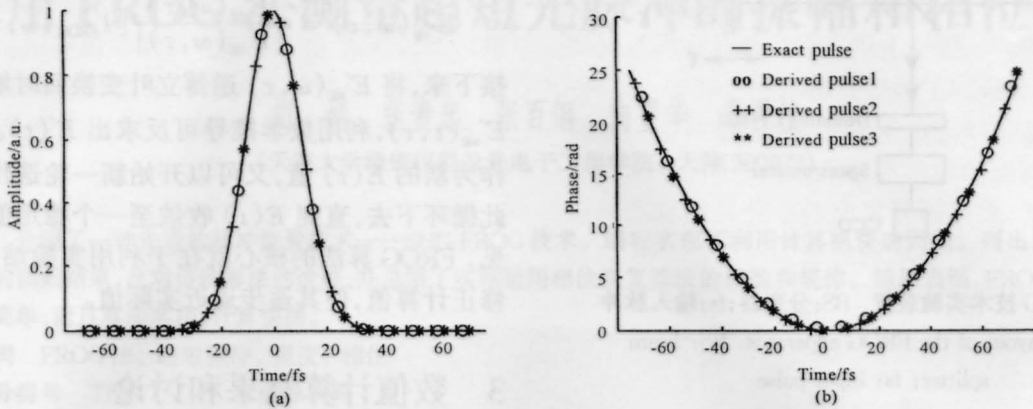


图 3 对比三种没初始猜想脉冲恢复所得脉冲的振幅(a)和相位(b),初始脉冲为:1) 带有小啁啾的高斯脉冲; 2) 带有大啁啾的高斯脉冲; 3) 方波

Fig.3 Comparison of the retrieved amplitude (a) and phase (b) for three different initial guess fields; 1) Gaussian with small chirp; 2) Gaussian with large chirp; 3) tophat shape

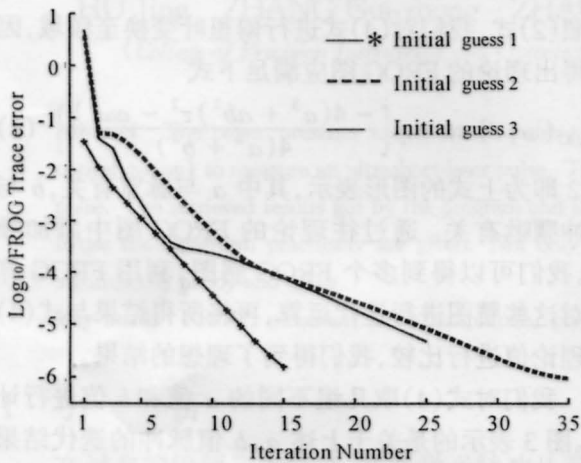


图 4 相关于迭代次数的误差值。其结果表明由完全不同的初始猜想脉冲确实恢复至同一个脉冲结果

Fig.4 Error factors versus roundtrip numbers. The retrievals show that quite deviating initial guess fields do converge to the same results

4 结 论

实验结果已经证实 FROG 技术克服了传统脉冲测量方法的种种局限,它可以测出任意一个超短单脉冲或多脉冲的包络线的振幅和相位。而且,它的实验设备简单,短时间内即可搭建出来。总之,

FROG 技术以其卓越的优点必将成为今后脉冲测量的关键方法。

参 考 文 献

- 1 M. Nisoli *et al.* Compression of high-energy laser pulses below 5 fs. *Opt. Lett.*, 1997, 22(8):522~525
- 2 S. Diddams *et al.* Dispersion measurements with white-light interferometry. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, 13(6):1120~1128
- 3 J. Diels, W. Rudolph. 1996 Ultrashort Laser Pulse Phenomenon: Fundamentals, techniques and applications on a femtosecond time scale (Academic Press, ISBN 0-12-215492-4, Boston)
- 4 Gong Zhenglie, Qian Shurong, Zhang Chen *et al.* Measurement of femtosecond pulse width with interference correlation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1989, 9(5): 467~472
- 5 Y. Ishida, K. Nagunama, T. Yajima *et al.* Ultrafast self-phase modulation in a colliding pulse mode-locked ring dye laser. In D. H. Auston, K. B. Eisenthal, editors, *Ultrafast Phenomena IV*, pages 69~71, Springer-Verlag, 1984
- 6 R. Trebino, D. J. Kane. Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, 10: 1101~1111
- 7 D. J. Kane *et al.* Convergence test for inversion of frequency-resolved optical gating spectrograms. *Opt. Lett.*, 2000, 25(16):1216~1219