

doi:10.13756/j.gtxyj.2017.01.016

光电器件研究与应用

基于光参量放大的任意波形测量技术

乔小正,李培丽,何 晨,曹 迪,王宸文姬,甘雨莹

(南京邮电大学 光电工程学院,南京 210003)

摘要:为了观察脉冲在时域上是否产生调制现象,从而判断其频谱情况,利用非线性晶体中的 OPA (光学参量放大)效应,提出了一种 OPA-FROG (基于光参量放大的频率分辨光学开关)法光学任意波形测量方案,该方案结构简单,易于实现。在 MATLAB 环境下利用 PCGP (主元素广义投影) 算法对测量波形进行恢复,结果表明,该方案能够准确地测量光学任意波形的幅度和相位。利用门脉冲选通过程含有增益放大的特点,可以实现对微弱信号的测量。

关键词:光学参量放大;频率分辨光学开关;光学任意波形测量;主元素广义投影算法

中图分类号:TN201 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2017)01-0051-03

Research on Measurement of Arbitrary Waveform Based on Optical Parametric Amplification

QIAO Xiao-zheng, LI Pei-li, HE Chen, CAO Di, WANGCHEN Wen-ji, GAN Yu-ying

(School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to investigate the modulation phenomenon of pulse in the time domain and determine its frequency spectrum, an Optical Parametric Amplification-Frequency-Resolved Optical Gating (OPA-FROG) measurement scheme for optical arbitrary waveforms based on optical parametric amplification of crystal is presented in this paper. The program structure is simple and easy to implement. In the MATLAB environment, we use the Principal Component Generalized Projects (PCGP) algorithm to recovery the waveform. The results show that the scheme can achieve an accurate measurement of the amplitude and phase of arbitrary optical waveform. The characteristics of gating process of the gate pulse with gain amplification can realize the measurement of weak signals.

Key words: OPA; FROG; optical arbitrary waveform measurement; PCGP algorithm

0 引 言

OAWG (光学任意波形产生器)是一种超快且具有多种功能的激光器^[1],可以产生任意波形的光脉冲,在微波光子学、高速光通信、超宽带射频信号的产生以及高质量光源产生等领域有着重要的应用。随着光学任意波形产生技术的不断发展,对于光学任意波形测量的研究也变得十分热门。目前常用的光学任意波形测量方法主要有双积分光谱剪切干涉分析法^[2-3]、双频率梳互相关技术^[4]和 FROG (频率分辨光学开关)法^[5]。FROG 是利用待测光学任意波形和具有一定相对延迟的门脉冲之间的非线性效应,对信号脉冲的行迹图进行二维相位重建,实现对光学任意波形幅度和相位的测量。从以往的应用来看,FROG 在幅度和相位的测量上性能要优于另外两种方法,是一种高效的测量方法。

本文利用 BBO (偏硼酸钡)晶体的 OPA (光学参量放大)^[6]效应,设计了一种基于 FROG 的光学任意波形测量方案,该方案的优点在于 OPA 效应

中包含增益放大,可以有效地测量极其微弱的信号,因此对一些脉冲信号不需要进行放大而直接测量。本文通过软件对简单光学波形和复杂的任意波形进行仿真,验证了系统的可行性。

1 工作原理

OPA-FROG (基于光参量放大的频率分辨光学开关)法的光学任意波形测量系统原理如图 1 所示。

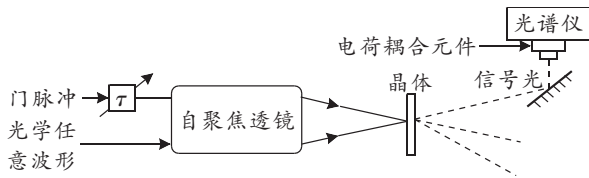


图 1 OPA-FROG 测量系统原理图

假设待测的任意波形光场为 $E(t)$, 门脉冲为 $E_{\text{gate}}(t)$, 门脉冲经过时间延迟 τ 后, 光场为 $E_{\text{gate}}(t - \tau)$ 。两个脉冲通过透镜聚焦到 BBO 晶体中, 发生 OPA 效应, 产生的信号脉冲的光场表达式为

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

收稿日期:2016-07-07

作者简介:乔小正(1989—),男,江苏徐州人。硕士,主要研究方向为光通信与光信息处理。

根据三波耦合理论^[7]在小信号情况下的近似解,并考虑到相位匹配良好,得到的 $E_{\text{gate}}^{\text{OPA}}(t-\tau)$ 为

$$E_{\text{gate}}^{\text{OPA}}(t,\tau)=\cosh\left\{\frac{8\pi^2d_{\text{eff}}^2|E_{\text{gate}}(t-\tau)|}{\epsilon_0\lambda_1\lambda_2n_1n_2n_3c}r\right\},$$

式中, d_{eff} 为有效非线性光学系数; r 为传播距离; ϵ_0

$$I_{\text{FROG}}^{\text{OPA}}(\omega,\tau)=\left|\int_{-\infty}^{+\infty}E(t)\cosh\left\{\frac{8\pi^2d_{\text{eff}}^2|E_{\text{gate}}(t-\tau)|}{\epsilon_0\lambda_1\lambda_2n_1n_2n_3c}r\right\}\exp(-i\omega t)\text{d}t\right|^2,$$

$I_{\text{FROG}}^{\text{OPA}}(\omega,\tau)$ 即为光谱仪和电耦合元件记录并生成的 OPA-FROG 迹线。

2 仿真结果与分析

在轨迹恢复上,使用 MATLAB 仿真软件编写 PCGP(主元素广义投影)算法,PCGP 算法是利用 SVD(奇异矩阵分解)取代 GP(遗传编程)算法中 Z 的最小值的过程。它具有稳定和快速的特点,对光学任意波形的实时测量更为精确。定义误差值 G 为判断 PCGP 算法是否收敛的依据:

$$G=\sqrt{\frac{1}{N^2}\sum_{i,j=1}^N|I_{\text{FROG}}(\omega_i,\tau_j)-I_{\text{FROG}}^{(k)}(\omega_i,\tau_j)|^2},$$

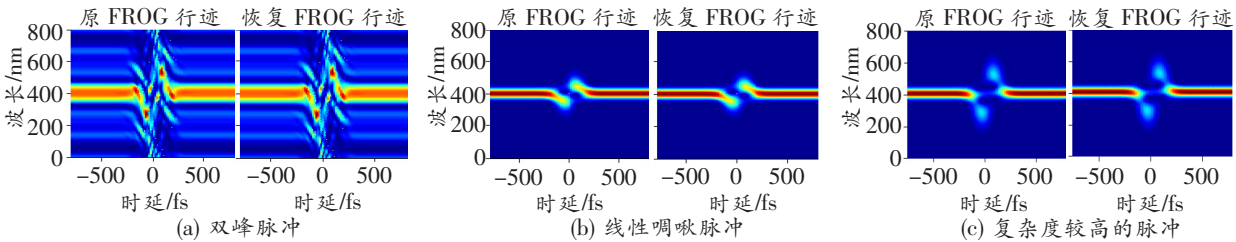


图 2 不同波形的恢复效果图

由图可以看出,通过测量系统均能很好地恢复原 FROG 行迹。图(a)的误差 G 、幅度均方差 A 和相位均方差 P 分别为 $6.439\ 6\times10^{-7}$ 、 $3.588\ 4\times10^{-11}$ 和 $4.568\ 3\times10^{-11}$;图(b)的 G 、 A 和 P 分别为 $6.059\ 5\times10^{-8}$ 、 $7.411\ 4\times10^{-14}$ 和 $9.681\ 2\times10^{-5}$;图(c)的 G 、 A 和 P 分别为 $8.601\ 9\times10^{-5}$ 、 $9.753\ 8\times10^{-6}$ 和 $3.127\ 4\times10^{-3}$,均达到了设计要求。

3 OPA-FROG 系统性能研究与分析

3.1 迭代次数对波形恢复的影响

在实际的迭代运算过程中,迭代次数既决定着该程序的运算速率,同时还影响着波形强度和相位恢复的准确性。这里以双峰脉冲作为待测波形,分析在只改变程序迭代次数的情况下,双峰脉冲的恢复效果。判断的依据就是脉冲恢复之后误差的大小。表 1 给出了不同迭代次数对误差的影响。

为真空中的绝对介电常数; λ_1 、 λ_2 分别为泵浦光和信号光波长; n_1 、 n_2 和 n_3 分别为泵浦光、信号光和闲频光在晶体中的折射率; c 为光速。

对式(1)进行傅里叶变换,得到信号脉冲的频谱为

式中, I_{FROG} 为通过系统测量的数据; $I_{\text{FROG}}^{(k)}$ 为第 k 次计算获得的信号强度值。

定义幅度均方差为 A ,相位均方差为 P ,且有

$$A=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N|abs[E(t_i)]-abs[E^{(k)}(t_i)]|^2},$$

$$P=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N|angle[E(t_i)]-angle[E^{(k)}(t_i)]|^2},$$

式中, E 为光学任意波形光场; $E^{(k)}$ 为第 k 次迭代后的光场。

本文分别对双峰脉冲、线性啁啾脉冲和复杂度较高的任意波形进行仿真,分析系统测量效果。图 2 所示为不同波形的恢复效果图。

表 1 不同迭代次数下的误差值

迭代 次数	FROG	脉冲强度 A	脉冲相位 P
	还原误差 G	还原误差	还原误差
30	76.643 9	6.424×10^{-4}	$0.628\ 8\times10^{-3}$
70	0.077 976	1.033×10^{-6}	$1.012\ 2\times10^{-6}$
110	$2.521\ 8\times10^{-5}$	$3.249\ 3\times10^{-10}$	$3.179\ 6\times10^{-10}$
150	$2.030\ 5\times10^{-7}$	$2.690\ 4\times10^{-12}$	$2.635\ 8\times10^{-12}$
200	$5.110\ 5\times10^{-10}$	$9.372\ 7\times10^{-16}$	$8.933\ 2\times10^{-16}$
300	3.382×10^{-10}	$2.264\ 6\times10^{-16}$	$1.720\ 2\times10^{-16}$

从表 1 可以看出,迭代次数在一定程度上决定误差值的大小,迭代次数太少时,不能有效地恢复出待测波形的振幅和位相,但是迭代次数过大时,恢复波形精度将不会有明显的提升,且会增加程序运行时间。在实际工作过程中,可以灵活改变迭代次数,从中做一个权衡。

3.2 门脉冲的选取

根据 FROG 的原理可知,参考脉冲的信息是已

知的,它的选择对算法没有实质性的影响。但是通过仿真分析发现,选择不同的门脉冲将直接影响待测波形恢复的准确度。在仿真过程中,以双峰脉冲为例,其他参数保持不变,研究了门脉冲形状不同时,对光学任意波形测量准确度的影响。图 3 给出了门脉冲为矩形和高斯波形时的仿真效果。

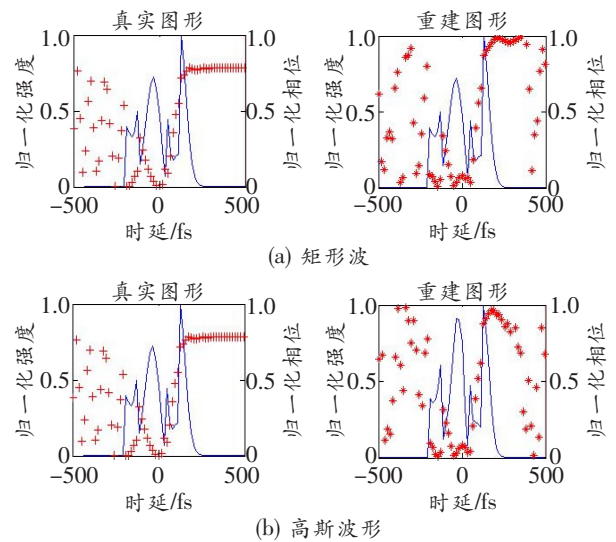


图 3 不同门脉冲波形时的恢复效果

从图中两种波形相位的恢复效果可以看出,矩形波的效果要好于高斯波形。另外,两种脉冲造成的误差 G 分别为 $3.225\ 5\times10^{-5}$ 和 $8.601\ 9\times10^{-5}$ 。在实际的应用中,由于产生矩形脉冲通常比较困难,因此综合考虑成本和对光学任意波形的测量效果,应选择高斯脉冲作为门脉冲。

3.3 OPA 倍数对波形恢复的影响

下面将以典型的双峰脉冲作为待测脉冲,分析信号经过晶体后不同放大倍数对波形恢复效果的影响。具体的方法是,在其他参量不变的情况下,改变光学放大倍数观察恢复波形的误差 G 值,以此判断波形的恢复效果。表 2 给出了不同放大倍数下双峰脉冲恢复误差值。

表 2 不同放大倍数下双峰脉冲恢复误差值

OPA 倍数	FROG 误差 G
3.762 2	$1.062\ 5\times10^{-12}$
74.209 9	$3.749\ 9\times10^{-10}$
$1.490\ 5\times10^3$	$3.723\ 7\times10^{-8}$
$1.101\ 3\times10^4$	$4.208\ 2\times10^{-6}$
$2.212\ 0\times10^5$	$3.347\ 5\times10^{-4}$

从表 2 可以看出,放大倍数在一定程度上会影响待测波形的恢复效果。尽管随着放大倍数的增

加,脉冲还原的误差 G 越来越大,但是当放大倍数达到 $2.212\ 0\times10^5$,即达到十万数量级时,误差 $G=3.347\ 5\times10^{-4}$ 满足收敛标准。实际上,针对特定的波形恢复精度的需求,其能达到百万级的放大倍数而又能有效地恢复出待测的脉冲。

4 结束语

本文利用 OPA 效应及其产生高增益的特性,提出了 OPA-FROG 法测量技术,设计了一套简单的 OPA-FROG 任意波形测量系统。而 OPA-FROG 法与以往的 FROG 法所不一样的是,门脉冲的选通过程包含增益,可以测量极其微弱的信号,并且对一些脉冲信号不需要进行放大而是直接进行测量,从而简化了实验装置。此外,本文还分析了几种复杂度不同的光学任意波形,通过行迹图、误差值及恢复的幅度和相位值,验证了系统的可行性。

参考文献:

[1] Pandiril Kanaka Raju, Suzukil Takayuki, Suda Akira, et al. Line-by-line control of 10-THz-frequency- spacing Raman sidebands [J]. Optics Express, 2010, 18 (2): 732—739.

[2] Miao Houxun, Leaird Danie E, Langrock Carsten, et al. Optical arbitrary waveform characterization via dual-quadrature spectral shearing interferometry [J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3381—3389.

[3] Ferdous F, Leaird D E, Huang C B. Dual-comb electric-field cross-correlation technique for optical arbitrary waveform characterization [J]. Optics Letters, 2009, 34(24): 3875—3877.

[4] Scott R P, Fontaine N K, Cao Jing, et al. High-fidelity line-by-line optical waveform generation and complete characterization using FROG [J]. Optics Express, 2007, 15(16): 9977—9988.

[5] Selm R, Krauss G, Leitenstorfer A, et al. Non-iterative characterization of few-cycle laser pulses using flat-top gates [J]. Optics Express, 2012, 20 (6): 5955—5961.

[6] 刘军,魏晓峰,黄小军,等. BBO, LBD, KDP 晶体光参量啁啾脉冲放大特性的比较研究 [J]. 强激光与离子束, 2003, 15(16): 555—558.

[7] Khanarian G, Norwood R. Optical parametric amplifier: U. S. Patent 5,064,265 [P]. 1991-11-12.