

文章编号: 0258-7025(2006)03-0330-05

不等间距达曼型滤波器的飞秒脉冲时空变换整形与识别技术

邹 华^{1,2}, 周常河¹, 戴恩文^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 研究了以不等间距达曼(Dammann)型滤波器为模板的飞秒激光时空变换与识别技术。优化设计出不同间距多脉冲达曼型滤波器,并在高斯光谱分布的模拟中讨论产生的超快时域多脉冲平均度和光谱平面上调制周期重复数的相关性。给出了频率分辨光开关法(FROG)技术识别超快时域两脉冲的实验结果。

关键词 超快光学; 时空变换; 达曼型滤波器; 频率分辨光开关

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Femtosecond Pulse Shaping of Unequally-Spaced Space-Time Conversion and Recognition Technique with Dammann-Type Filter

ZOU Hua^{1,2}, ZHOU Chang-he¹, DAI En-wen^{1,2}

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Ultrafast temporal unequally-spaced space-time conversion and recognition technique for Dammann-type filters is analyzed. The multiple pulse Dammann-type filter for specific unequally-spaced and equal-intensity filter were designed. With the simulation of a Gaussian spectral distribution, the correlation between the perfect uniformity of the generated multiple ultrafast temporal pulses and the repeated number of modulation periods of the mask in the spectral plane is discussed. Moreover, experimental result of recognizing the two ultrafast femtosecond pulses by the frequency-resolved optical gating (FROG) technique is also given.

Key words ultrafast optics; space-time conversion; Dammann-type filter; frequency-resolved optical gating

1 引言

运用飞秒技术的超快多脉冲模式的产生和识别在模式识别领域里是一个全新的概念,在学术研究和实际应用中有着深远的意义,特别在飞秒激光与物质飞秒动态控制等领域有重要的意义。超快模式的产生和识别是利用两项比较成熟的技术,即时空变换技术和超快脉冲测量技术实现的^[1~3]。自 A. M. Weiner 等^[4]介绍飞秒脉冲时空变换整形技术以来,这个领域已得到了迅速发展,现已成为一个重要前沿学科。时空变换就是将时域信息变换到空域,通过空域的处理再返回到时域以实现飞秒激光脉冲

整形、测量和控制。在应用方面,可产生各种所需要的波形,包括编码和解码信息的光纤通信系统中脉冲群的产生等^[4],原子系统相干控制的复杂脉冲结构的产生^[5]和飞秒化学中的有效反应物^[6,7]等。

飞秒脉冲整形中的滤波器可用许多优化算法实现^[8~10]。在时域中脉冲整形滤波器的设计类似于空域中光束整形和阵列产生的仅相位滤波器的设计。给定一个输入脉冲光谱和输出场目标光谱,则所需要的复杂滤波器就可优化出来。在比较典型的飞秒脉冲整形装置的输出上,电场由输入脉冲光谱和滤波器模板积的傅里叶变换给出,此模板是建立在调制 $4f$ 光栅-透镜装置的傅里叶平面的脉冲光谱

收稿日期:2005-09-05; 收到修改稿日期:2005-11-24

基金项目:国家杰出青年基金(60125512)资助项目。

作者简介:邹 华(1976—),女,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事飞秒脉冲时空变换整形的研究。E-mail: zouhua@siom.ac.cn

的相位和振幅模式。仅相位脉冲整形有效(能量损失最小)和比较容易实现^[11]。一个比较熟悉的仅相位滤波器的例子如达曼(Dammann)光栅,可用来产生数字光通信系统中的等强度阵列^[12]。对于间距不等强度相等的脉冲序列的飞秒脉冲整形在国内尚未见报道,本文主要讨论了此种滤波器的优化,并给出输出脉冲随光谱平面模板的调制周期数的变化。设计输出的模式用超快脉冲的检测技术频率分辨光开关(FROG)进行检测^[13]。各种各样的时间-频率技术对于超快模式的识别中频率分辨光开关技术是应用最广泛的,主要的优点是时间频率的分布给复杂信号的特性一个直接识别。

2 飞秒脉冲整形的原理

飞秒脉冲整形的原理是建立在线性、时间不变的滤波器上的。如图 1 所示,线性滤波可在时域描述,也可在频域描述。在时域中,滤波器可用脉冲响应函数 $h(t)$ 表示其特性,滤波器的输出 $e_{out}(t)$ 可由输入脉冲 $e_{in}(t)$ 和 $h(t)$ 的卷积表示

$$e_{out}(t) = e_{in}(t) * h(t) = \int dt' e_{in}(t') h(t-t'). \quad (1)$$

在频域,滤波器可由频率响应 $H(\omega)$ 表示其特性,线性滤波器的输出 $E_{out}(\omega)$ 是输入信号 $E_{in}(\omega)$ 和频率响应 $H(\omega)$ 的积,即

$$E_{out}(\omega) = E_{in}(\omega) H(\omega), \quad (2)$$

这里 $e_{in}(t)$, $e_{out}(t)$, $h(t)$ 和 $E_{in}(\omega)$, $E_{out}(\omega)$, $H(\omega)$ 分别是傅里叶变换对,即

$$H(\omega) = \int dt h(t) e^{-i\omega t}, \quad (3)$$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int d\omega H(\omega) e^{i\omega t}. \quad (4)$$

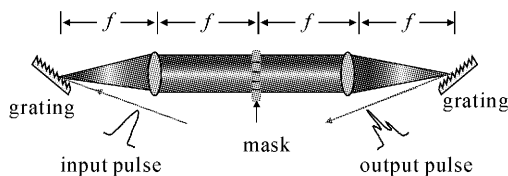


图 1 飞秒脉冲时空变换整形装置

Fig. 1 Apparatus of the femtosecond pulse time-space conversion shaping

对于一个 δ 函数的输入脉冲,输入光谱 $E_{in}(\omega)$ 是不变的,输出光谱等于滤波器的频率响应。因此,由于傅里叶变换关系,所希望的输出波形的产生可实现带有所希望的频率域的滤波器来完成,脉冲

整形的方法都是由这种频率域观点来描述的。

3 不等间距达曼型阵列滤波器的优化设计

不同轮廓的脉冲群可通过改变一个周期中的相位而产生。首先定义一个评价函数 C ,其提供一个由相位滤波器 $M(x)$ 产生的时间脉冲形状和目标脉冲函数 $e_{target}(t)$ 之间的度量。搜索产生的强度和目标强度之间偏差最大的最小值的评价函数。一系列的评价函数 C_i 可以用于控制产生波形的不同地方

$$C = \sum C_i = \sum |e(t)^2 - e_{target}^2|, \quad (5)$$

产生的场 $e(t)$ 可计算为

$$e(t) = \sum_{k=1}^N \frac{(-1)^k}{2t\pi} [(\sin\alpha_k - \sin\alpha_{k-1}) + i(\cos\alpha_k - \cos\alpha_{k-1})], \quad (6)$$

这里 $\alpha_k = 2t\pi x_k$ 。在模拟中,考虑由不同数目的像素组成的滤波器。光栅特性由 x_1 到 x_N 的 N 个转换点(在这里相位发生改变)完全描述。指定的目标强度轮廓为 $|e_{target}(t)|^2$;时间相位不受约束。这里利用 0 和 π 相位的二元相位滤波器,所以输出强度轮廓在时域是对称的。

目标脉冲群的形式为

$$e_{target}(t) = \sum_n a_n u(t - nT), \quad (7)$$

$u(t)$ 为中心在 $t = 0$ 的 75 fs 脉冲, T 为脉冲间距(此例中是 500 fs), a_n 为 0 或 1。所用相位板是建立在周期重复的 $a_n = \{1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1\}$ 序列上,即模板的每一个周期被分为由特别的 a_n 序列决定的 N 个像素。

典型的模拟结果如图 2 所示。图 2(a)为相应于序列 a_n 的目标脉冲群。由类高斯输入波形和相位滤波器优化产生的脉冲群图 2(b)和目标脉冲比较接近,特别对应于脉冲位置和脉冲高度的平均度。图 2(b)的强度比图 2(a)强度低,因为其由类高斯波形的输入脉冲优化所致。目标脉冲和输出脉冲之间的差别很明显,如图 2,各脉冲的宽度和形状有变换。原则上可以减少这种变换,只要在评价函数中把它们结合为一个约束。在脉冲和侧翼区域的各个脉冲间的能量损失也是很明显的,大约占输入脉冲能量的 30%。假设的输入光谱和优化的相位滤波器如图 2(c)和(d)所示。

4 周期重复数效应

在时域中平均度直接受相位转换点的影响,同

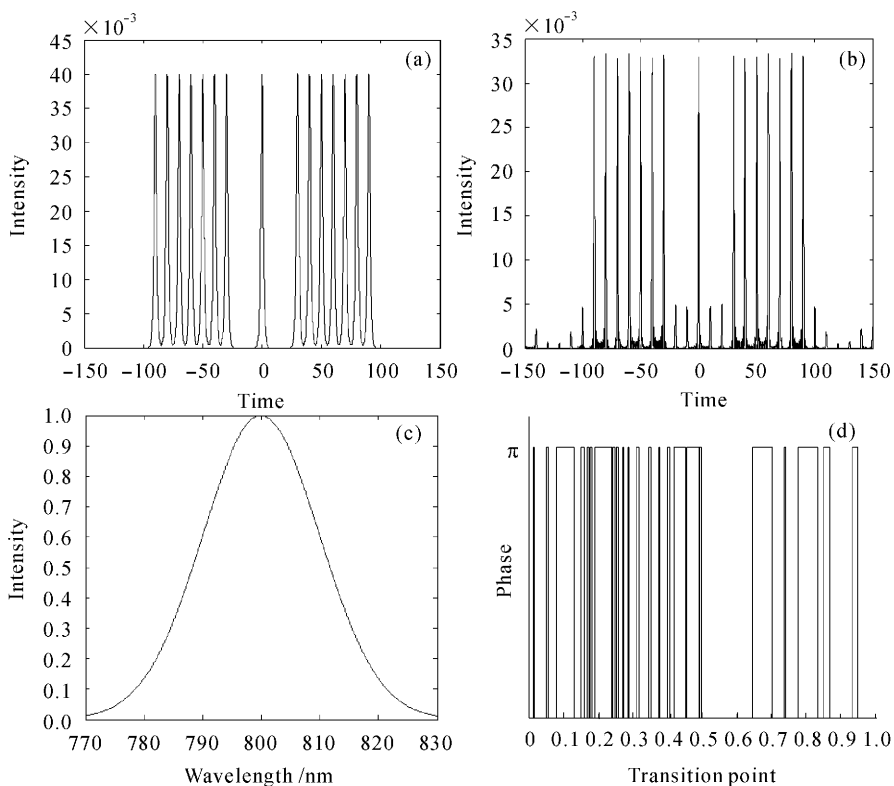


图 2 产生飞秒脉冲序列 $a_n = \{11111111001001111111\}$ 的滤波器的设计

(a) 目标脉冲; (b) 产生的脉冲序列; (c) 输入的脉冲; (d) 优化的相位滤波器的一个周期

Fig. 2 Design of a phase-only filter for producing a femtosecond pulse sequence

(a) target intensity profile corresponding to $a_n = \{11111111001001111111\}$; (b) calculated intensity profile resulting from the phase-only filter; (c) input power spectrum assumed designed by optimization; (d) one period for phase filter

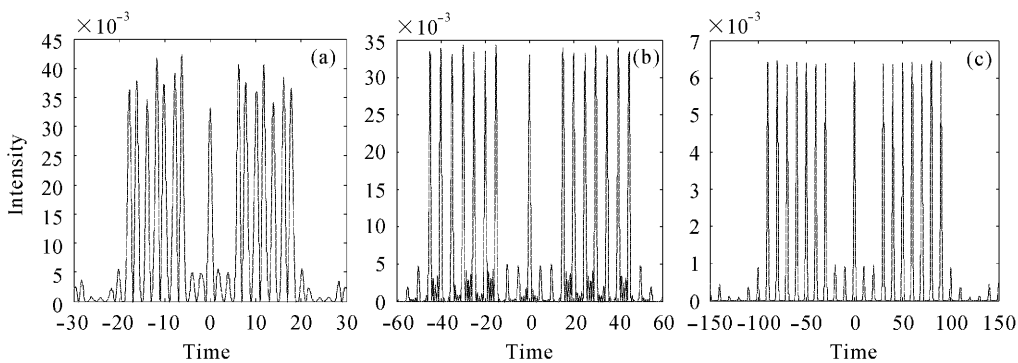


图 3 $a_n = \{11111111001001111111\}$ 输出脉冲阵列

周期重复数为 (a) 2, (b) 5, (c) 15

Fig. 3 Temporal output pulses of $a_n = \{11111111001001111111\}$ when

the periodic repetition number is two (a), five (b) and fifteen (c)

时,输出脉冲群的极好的平均度也受模板周期重复数的影响。我们希望发现衍射峰的强度随不同重复数的变换情况。这里选择 0 和 1 之间重复数是 2, 5, 15 来分析这个效应。周期重复数是 2 时,相应的时域输出脉冲不太平整,如图 3(a);周期重复数是 5 时,输出脉冲变得比较平整,如图 3(b);周期重复数

增加到 15 时,在时域中平整的脉冲群就能产生,如图 3(c)。随着周期重复数的增加,输出脉冲在时域慢慢展开。从图 3 可发现输出脉冲的时间间距和周期重复数密切相关,最终与输出脉冲的效率、平均度和周期重复数有关。由上面的分析可得到三点:1) 输出脉冲的平均度受周期重复数的影响,周期重复

数越多平均度越好。2) 当周期重复数多于 15 时平均度和效率是一致的, 相反当周期重复数少于 15 时平均度和效率是不稳定的, 即为了得到比较平整的输出脉冲, 应选择多于 15 的周期重复数。3) 在空域中模板的周期重复数增加, 时间输出脉冲展得越宽。

5 飞秒脉冲的测量

飞秒脉冲时空变换技术和飞秒脉冲识别技术是相互作用和密不可分的。整形脉冲需要利用超快脉冲测量技术来实现。各种各样的超短脉冲测量技术中频率分辨光开关法^[12]应用最为广泛, 已应用到变形镜的飞秒脉冲整形装置^[14]等领域。为测量飞秒脉冲的特性, 建立多发频率分辨光开关法测量系统, 给出两个脉冲的飞秒脉冲的实验结果。当然, 原理上也用于复杂脉冲的测量。

频率分辨光开关法装置如图 4 所示, 由分束镜、透镜、反射镜和光谱仪组成。作为飞秒脉冲源, 利用中心波长为 800 nm 的飞秒钛蓝宝石激光器。分束镜将入射光脉冲分两束, 一束作为探测光, 一束作为光开关, 两个脉冲所走的距离可由微移动平台来改变, 并且让作为开关的光束引入一个时间延迟 τ ,

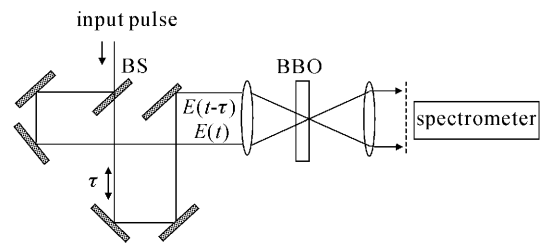


图 4 频率分辨光开关技术的实验装置图

Fig. 4 Schematic illustration of experimental setup for implementation of the FROG technique

然后再让两束光通过非线性介质 BBO 产生相互作用, 经光谱仪进行光谱展开后, 用 CCD 进行测量, 得到相互作用后的光强信息, 在实验中频率分辨光开关图相应 τ 是对称的, 如图 5(a) 所示。应用 Femtosoft Technologies 生产的商业软件 FROG3 处理数据得到两个脉冲的比较详细的振幅和相位信息, 如图 5(b)。在实验得到的轨迹图[图 5(a)]中沿延迟轴的调制表示一个强时间调制, 其在恢复的多脉冲强度轮廓可发现[如图 5(b)所示]。值得注意的是频率分辨光开关技术对于显示超快时间模式是很直观的方法。

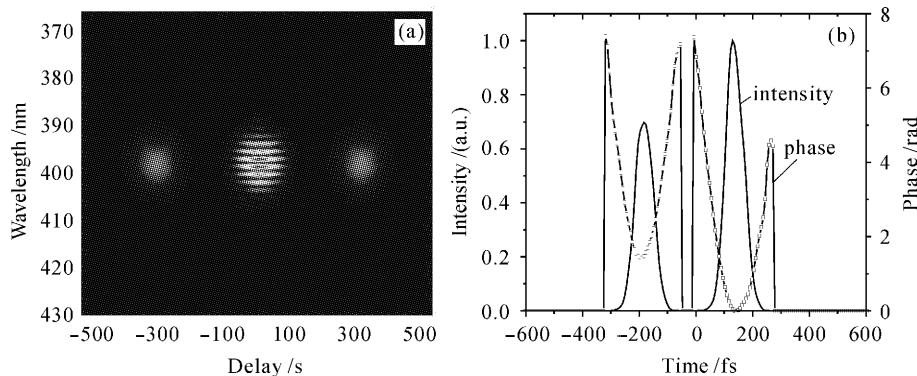


图 5 (a) 时间模式识别的实验频率分辨光开关轨迹;

(b) 从图 5(a) 的频率分辨光开关轨迹图恢复得到的脉冲的强度和相位

Fig. 5 (a) Experimental FROG trace of temporal pattern recognition for two pulses;

(b) Intensity and phase of the pulse retrieved from the FROG trace of Fig. 5(a)

6 结 论

研究了不等间距达曼型滤波器的飞秒激光时空变换与识别技术。运用不等间距多脉冲的达曼型滤波器, 在 Gaussian 光谱分布的模拟中发现产生的超快时域多脉冲的平均度和光谱平面上调制周期的重复数有关。用频率分辨光开关技术完成了超快时间脉冲的识别, 并得到两个脉冲的频率分辨光开关识别技

术的实验结果。飞秒激光时空变换与识别技术已应用到光谱相位编码和解码的 CDMA 通信研究和生物医学的图像处理中; 特别在飞秒激光与物质飞秒动态控制等领域有重要的意义^[7]。如 2003 年 *Science* 上报道的整形的飞秒脉冲作为新的反应物来改变分子分解和重排的过程^[6]等。

参 考 文 献

- 1 Hua Zou, Enwen Dai, Changhe Zhou *et al.*. Ultrafast temporal

- pattern generation and recognition [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(8):1874~1881
- 2 Zou Hua, Zhou Changhe. Femtosecond pulse shaping with space-time conversion technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(2):2~7
邹 华,周常河. 飞秒脉冲时空变换整形技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(2):2~7
- 3 Chen Yuting, Zhang Shian, Sun Zhenrong *et al.*. 4f-configure optical pulse shaping system pulse shaping misalignment [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(2):73~76
陈瑜婷,张诗按,孙真荣等. 4f结构脉冲整形器失调对光场空间分布的影响[J]. *量子光学学报*, 2004, **10**(2):73~76
- 4 A. M. Weiner, J. P. Heritage, J. A. Salehi. Encoding and decoding of femtosecond pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **13**(4):300~302
- 5 N. Dudovich, D. Oron, Y. Silberberg. Single-pulse coherently controlled nonlinear Raman spectroscopy and microscopy [J]. *Nature*, 2002, **418**(6897):512~514
- 6 A. Assion, T. Baumert, M. Bergt *et al.*. Control of chemical reactions by feedback-optimized phase-shaped femtosecond laser pulses [J]. *Science*, 1998, **282**(5390):919~922
- 7 H. Rabitz. Shaped laser pulses as reagents [J]. *Science*, 2003, **299**(5606):525~527
- 8 Changhe Zhou, Liren Liu. Numerical study of Dammann array illuminators [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(26):5961~5969
- 9 A. M. Weiner, S. Oudin, D. E. Leaird *et al.*. Shaping of femtosecond pulses using phase-only filters designed by simulated annealing [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(5):1112~1120
- 10 M. Hacker, G. Stobrawa, T. Feurer. Iterative Fourier transform algorithm for phase-only pulse shaping [J]. *Opt. Exp.*, 2001, **9**(4):191~199
- 11 A. M. Weiner. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(5):1929~1960
- 12 H. Dammann, K. Görtler. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms [J]. *Opt. Commun.*, 1971, **3**(5):312~315
- 13 R. Trebino. *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses* [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2000. 101~391
- 14 J. Garduño-Mejía, A. H. Greenaway, D. T. Reid. Designer femtosecond pulses using adaptive optics [J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(17):2030~2040