

利用飞秒脉冲光谱全息实现空域信息 向时域信息的转换

曹 澜 阎晓娜 戴 晔 杨希华

(上海大学理学院物理系超快光子实验室, 上海 200444)

摘要 在 Mazurenko 提出的时域超短脉冲光谱全息结构的基础上, 提出了改进型的飞秒脉冲光谱全息结构, 并推导了当输入脉冲光场中包含时、空分布时光谱全息的记录和再现。结果发现当在光谱全息记录和再现时, 如果频谱面上添加空间滤波器, 可以实现飞秒脉冲包含的空域信息向时域信息的转换。结论可以应用到超短脉冲整形, 超高速光通信和光信息处理等领域。

关键词 全息; 飞秒脉冲; 光谱全息; 记录; 再现; 空间滤波器; 空-时转换

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0609001

Space-to-Time Conversion by Femtosecond Spectrum Holography

Cao Lan Yan Xiaona Dai Ye Yang Xihua

(Laboratory of Ultrafast Photonics, Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract Based on spectrum holography structure proposed by Mazurenko, an improved femtosecond spectrum holography structure is proposed. The recording and readout of the spectrum holography by femtosecond pulses with both the spatial and temporal information is deduced, it shows if a filter is put on the spectrum plane of the modified structure, spatial information included in the femtosecond pulse can be converted in to temporal information and output. The results can be applied in many fields, such as ultrashort pulse shaping, ultrafast optical communication and optical information processing etc.

Key words holography; femtosecond pulse; spectrum holography; recording; readout; spatial filter; space-to-time conversion

OCIS codes 090.6186; 320.5550; 350.2460

1 引 言

为克服波包全息中干涉条纹对比度差的问题, 1990 年 Mazurenko^[1] 提出了时域超短脉冲光谱全息。经过 20 多年的发展, 目前光谱全息已广泛应用于超精细飞秒微加工^[2,3], 超大容量飞秒光通信^[4,5], 化学^[6], 生物医学和超高速光通信等领域, 展现了良好的发展前景。

超短脉冲光谱全息是用全息的方法记录和重现时域脉冲, 可以实现脉冲的反转、卷积、相关和匹配滤波等操作, 因此常用在超短脉冲整形领域^[7,8]。在光谱全息的频谱面上, 脉冲的时域和空域信息是

混合在一起的, 因此可以用来实现时域信息向空域的转换或空域信息向时域的转换等操作, 关于这方面的研究有很多文献讨论。如 Ding 等^[9] 利用多量子阱作为动态的全息记录介质, 从实验上实现了空间图像向飞秒时域图像的转换。Konishi 等^[10] 提出了二维的空-时转换系统, 将输入的二维空间图像转换成调制的超短脉冲序列。随后, Marom 等^[11] 在利用四波混频的方法实现了空间图像向时间波形的转换。另一方面, 将光谱全息与传统的空间傅里叶变换全息结合起来实现了时间信号和空间信号的相互转换, 即时-空变换。Nuss 等^[12] 在 1993 年使用

收稿日期: 2011-11-09; **收到修改稿日期**: 2012-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(60908007, 10974132)、上海市重点学科建设资助(S30105)和上海市教委科研创新项目(12YZ002)资助课题。

作者简介: 曹 澜(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学方面的研究。E-mail: caolan@shu.edu.cn

导师简介: 阎晓娜(1970—), 女, 博士, 副教授, 主要从事信息光学、光折变光学和体光栅的衍射等方面的研究。

E-mail: xnyan@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

多量子阱材料,利用连续波再现超短脉冲的光谱全息图,准确地将时间脉冲形状的信号转换成空间脉冲信号。1年之后,该研究小组又利用光谱全息实验装置完成了空间图像信息向时间信息的转换,从而真正实现了超短脉冲信号的空-时相互转换^[13]。早期时-空和空-时变换的响应时间依赖于材料的响应,多量子阱材料的非线性响应速度比较慢^[14],不适用于超高速光通信的应用,因此有人讨论用非线性晶体的瞬态响应来实现时-空转换。Sun等^[15]使用非线性光学晶体KNbO₃的二次谐波,将整形脉冲的时域信息直接编码成空域信息。近来,Tsunematsu等^[16]使用时空变换和二维滤波器建立了光学标记识别系统,可以通过计算机模拟识别8种不同的光学标记。

本文基于Mazurenko提出的时域光谱全息结构,通过在频谱面上加入狭缝空间滤波器实现包含时空信息的超短脉冲信号的空间分布向时间分布的转换。推导了包含时空分布的超短脉冲光谱全息的记录和再现,并提出利用包含狭缝滤波器的光谱全息结构实现飞秒脉冲的空间信息到时间信息的转换。对脉冲整形、时间脉冲信号的处理提供了一种替代的参考方案,相关的研究成果可以用于高速光通信和光信息处理领域。

2 包含时空分布的飞秒脉冲光谱全息的记录

2.1 单脉冲通过光谱全息记录结构的光场分布

在讨论双脉冲记录光谱全息前,首先讨论飞秒单脉冲通过光谱全息系统后的光场分布,实验结构如图1所示。其中光栅G放在透镜的前焦面上,用来实现输入脉冲中不同时域频谱分量在空间 x 轴方向的展开。透镜用来实现 x 轴方向展开信息的空域傅里叶变换,在透镜的后焦面得到前焦面上输

入脉冲的光谱分解波。

飞秒脉冲光场分布的空间项和时间项是相对独立的,因此可以假设入射飞秒脉冲的复振幅表达式为

$$e(x, t) = a(x)r(t)\exp(-i\omega_0 t), \quad (1)$$

式中 $a(x)$ 代表输入脉冲的空间分布函数, $r(t)$ 代表其时间包络,即脉冲分布随时间的变化, ω_0 是入射脉冲的载频。

光栅的作用是色散,它对输入脉冲中不同频率的分量具有不同的衍射作用,因此引入光场时间包络的频谱函数 $R(\omega)$,它与时间包络 $r(t)$ 是傅里叶变换对,可表示为

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t)\exp(-i\omega t)dt, \quad (2)$$

相应地,入射飞秒脉冲在空、频域的复振幅表达式可写为

$$E(x, \omega) = a(x)R(\omega), \quad (3)$$

当入射脉冲入射到光栅G上,由于光栅的衍射作用,输入脉冲中不同频谱成分将沿 x 方向色散。光栅对不同频谱分量的作用可表示为^[17]

$$G(\omega, x) = \exp(ik\beta\omega x), \quad (4)$$

式中 $k = \omega_0/c$ 为自由空间波数, c 为光速; $\beta = 2\pi c/(\omega_0^2 d \cos \gamma)$ 为光栅色散因子, d 为光栅周期, γ 为入射脉冲的中心波长分量 λ_0 (或中心频率分量 ω_0)对应的衍射角。根据光栅方程, γ 与入射角 θ 之间的关系为

$$\sin \theta - \sin \gamma = \lambda_0/d. \quad (5)$$

结合(3)、(4)式,得到此入射脉冲通过光栅后在光栅后表面的光场复振幅分布为

$$V(\omega, x) = a(\alpha x)R(\omega)\exp(ik\beta\omega x), \quad (6)$$

式中 $\alpha = \cos \theta/\cos \gamma$ 。

由于光栅放在透镜的前焦面上,根据傅里叶光学,透镜后焦面上的光场复振幅分布是透镜前焦面光场复振幅分布的傅里叶变换,即对 $V(\omega, x)$ 进行傅里叶变换,这时的傅里叶变换是对空间变量进行的,得到

$$u(\omega, f_x) = R(\omega)A\left(\frac{f_x}{\alpha}\right)\delta(f_x - k\beta\omega). \quad (7)$$

由于入射脉冲中不同频谱分量的入射角都相同,所以 α 是常数,讨论中忽略 $u(\omega, f_x)$ 表示式中的常系数。(7)式中 $A\left(\frac{f_x}{\alpha}\right)$ 是对飞秒脉冲中的空间成分 $a(\alpha x)$ 进行傅里叶变换的结果, f_x 是空频分量与频谱面空间坐标的关系为

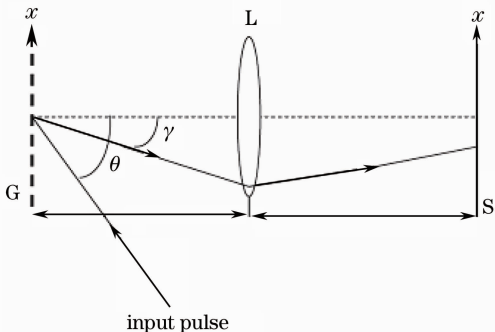


图1 单脉冲的空间频谱分解结构图

Fig. 1 Spatial spectral decomposition of a single pulse

$$f_x = \frac{x_2}{\lambda f}, \quad (8)$$

式中 λ 为读出波长, f 为透镜的焦距。

2.2 包含时空分布的飞秒脉冲光谱全息的记录

全息记录时,需要用到飞秒双脉冲。考虑二束飞秒脉冲同时入射到如图 1 所示的光栅上,入射脉冲的表达式分别为

$$e_1(x, t) = a_1(x)r_1(t)\exp(-i\omega_0 t), \quad (9)$$

$$e_2(x, t) = a_2(x)r_2(t)\exp(-i\omega_0 t). \quad (10)$$

两脉冲的载频都是 ω_0 , $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 分别是输入超短脉冲的时间包络。根据(6)、(7)式可以得到两个超短脉冲在透镜 L 后焦面上的场分布分别为

$$u_1(\omega, f_x) = R_1(\omega)A_1\left(\frac{f_x}{\alpha}\right)\delta(f_x - k\beta_a\omega), \quad (11)$$

$$u_2(\omega, f_x) = R_2(\omega)A_2\left(\frac{f_x}{\alpha}\right)\delta(f_x - k\beta_b\omega), \quad (12)$$

式中 β_a, β_b 表示两个脉冲通过光栅时透射率函数中的光栅色散因子。由(11)、(12)式可见,两输入脉冲在频谱面上的光场分布都是 δ 函数的形式,这说明两个输入脉冲中不同频谱分量只能分布在频谱面上某些特定位置附近的空间中,根据 δ 函数的性质,这个特定位置由下式决定:

$$\begin{cases} x_a = k\omega\beta_a\lambda f \\ x_b = k\omega\beta_b\lambda f \end{cases}, \quad (13)$$

为记录光谱全息,就必须使两个脉冲中相同的频谱分量在频谱面上要成像在同一位置处,即保证对频率为 ω_1 的分量,其位置 $x_{a,\omega_1} = x_{b,\omega_1}$, 代入(13)式得

$$\beta_a = \beta_b = \beta. \quad (14)$$

在光栅周期确定的情况下, β 是关于衍射角 γ

的函数,而衍射角是与脉冲的入射角有关的函数。因此(14)式表明要记录光谱全息,应该使两束记录的飞秒脉冲光平行入射到光栅上。

把(14)式代入(11)、(12)式得到

$$u_1(\omega, f_x) = R_1(\omega)A_1\left(\frac{f_x}{\alpha}\right)\delta(f_x - k\beta\omega), \quad (15)$$

$$u_2(\omega, f_x) = R_2(\omega)A_2\left(\frac{f_x}{\alpha}\right)\delta(f_x - k\beta\omega). \quad (16)$$

则透镜后焦面的总光场分布为

$$P(\omega, f_x) = u_1(\omega, f_x) + u_2(\omega, f_x), \quad (17)$$

如果在透镜的后焦面放置全息干版,则干版记录的干涉光强为

$$H(\omega, f_x) = P(\omega, f_x)P(\omega, f_x)^*, \quad (18)$$

至此,光谱全息的记录过程结束,通过显影和定影处理,得到了透射率函数正比于 $H(\omega, f_x)$ 的全息干版。

2.3 在频谱面加空间滤波器,飞秒脉冲光谱全息的记录

如果在光谱全息记录时,在透镜 L 的后焦面,即全息干版的前表面加一狭缝作为频谱面的空间滤波器。狭缝的作用起到了对入射的信号脉冲的频谱进行空间滤波的作用。

假定狭缝的空间位置是 $x_2 = x_0$, 且狭缝的宽度很窄,可以用函数 $\delta(x_2 - x_0)$ 表示,则透镜 L 频谱面上的光场表达(15)、(16)式现在通过狭缝后改变为

$$u_1(\omega) = R_1(\omega)A_1\left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha}\right], \quad (19)$$

$$u_2(\omega) = R_2(\omega)A_2\left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha}\right], \quad (20)$$

相应的全息干版的透射率函数改变为

$$H(\omega) = \left| R_1(\omega)A_1\left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha}\right] \right|^2 + \left| R_2(\omega)A_2\left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha}\right] \right|^2 + R_1(\omega)A_1\left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha}\right] \times R_2^*(\omega)A_2^*\left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha}\right] + R_1^*(\omega)A_1^*\left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha}\right] R_2(\omega)A_2\left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha}\right]. \quad (21)$$

由(21)式可见,当狭缝空间位置 x_0 确定,全息干版的透射率函数是关于时频变量 ω 的函数,且与两个记录脉冲的时间和空间分布都有关。

3 有狭缝滤波器情况下,包含时空分布的飞秒脉冲光谱全息再现

脉冲光谱全息记录过程结束后,用如图 2 所示的读出结构来读取记录的光谱全息。读出时在透镜 L1 的频谱面上放置记录了光谱全息的全息干版,并在干版前放置与记录时相同的空间狭缝滤波器。

设读出时探测脉冲 $e_3(x, t)$ 表达式为

$$e_3(x, t) = a_3(x)r_3(t)\exp(-i\omega_0 t). \quad (22)$$

由(19)、(20)式的推导可以得到探测脉冲在通过狭缝后的复振幅分布为

$$u_3(\omega) = R_3(\omega)A_3 \left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha} \right]. \quad (23)$$

透过狭缝的探测脉冲透过全息干版后的复振幅分布为

$$U(\omega) = R_3(\omega)A_3 \left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha} \right] \left\{ \left| R_1(\omega)A_1 \left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha} \right] \right|^2 + \left| R_2(\omega)A_2 \left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha} \right] \right|^2 + R_1(\omega)A_1 \left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha} \right] R_2^*(\omega)A_2^* \left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha} \right] + R_1^*(\omega)A_1^* \left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha} \right] \times R_2(\omega)A_2 \left[\frac{x_0/(\lambda f) - k\beta\omega}{\alpha} \right] \right\}. \quad (24)$$

傅里叶变换透镜 L2 和光栅 G2 的作用是对透镜 L2 前焦面的光场分布进行时间和空间的逆傅里叶变换,忽略变换后的常系数因子,则输出光场中相对于(24)式中后两个干涉项变换后的表达式为

$$e(t) = r_3(t) * \left[a_3 \left(-\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \exp \left(i \frac{x_0}{\lambda f k\beta}t \right) \right] * \left[r_1(t) * a_1 \left(-\frac{\alpha}{k\beta}t \right) * r_2(-t) * a_2 \left(\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \right] \exp(i\mathbf{K}_1 \mathbf{r}) + r_3(t) * \left[a_3 \left(-\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \exp \left(i \frac{x_0}{\lambda f k\beta}t \right) \right] * \left[r_1(-t) * a_1 \left(\frac{\alpha}{k\beta}t \right) * r_2(t) * a_2 \left(-\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \right] \exp(i\mathbf{K}_2 \mathbf{r}), \quad (25)$$

式中 * 代表卷积; $\mathbf{K}_1 = \mathbf{k}_c + \mathbf{k}_a - \mathbf{k}_b$; $\mathbf{K}_2 = \mathbf{k}_c - \mathbf{k}_a + \mathbf{k}_b$ 分别代表出射脉冲的波矢方向,其中 \mathbf{k}_a , \mathbf{k}_b 和 \mathbf{k}_c 分别代表信号,参考和读出脉冲的波矢量。

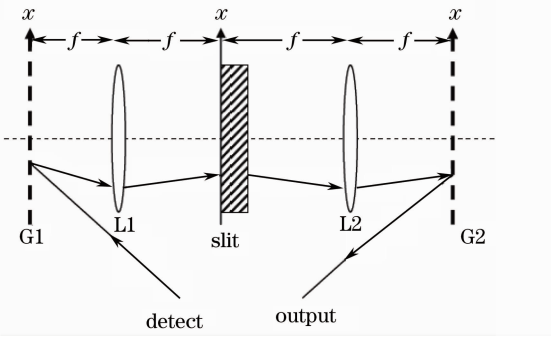


图 2 飞秒脉冲光谱全息的再现装置

Fig. 2 Readout structure of femtosecond spectrum holography

由(25)式可以看到,输出脉冲的复振幅分布 $e(t)$ 是由全息记录和读出时光场的空间分布 $a_1(x)$, $a_2(x)$ 和 $a_3(x)$ 和时间分布 $r_1(t)$, $r_2(t)$ 和 $r_3(t)$ 决定的。空间分布对输出的时间分布有影响,即实现了飞秒脉冲的空间分布对时间分布的调制,又实现了信息由空域到时域的转换。能实现空-时域信息转换的主要原因是因为通过透镜的作用,输入脉冲的时域信息和空域信息在透镜的频谱面上是混合在一起的,而狭缝的空间滤波作用又保证只取一种空域的频率分量。

4 再现光场分布的讨论及空-时变换的实现

对(25)式的结果进一步讨论:

1) 如果参考脉冲和探测脉冲在时间和空间上的宽度都很窄,可用 δ 函数表示,则在输出端可以得到

$$e(t) = \left[r_2(-t) * a_2 \left(\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \right] \exp(i\mathbf{K}_1 \mathbf{r}) + \left[r_2(t) * a_2 \left(-\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \right] \exp(i\mathbf{K}_2 \mathbf{r}), \quad (26)$$

即在输出端不同方向上分别得到原时间脉冲的真实再现及其时间反演分布。

2) 如果探测脉冲在时间和空间上的宽度都很窄,可用 δ 函数表示,则输出脉冲为

$$e(t) = \left[r_1(t) * a_1 \left(-\frac{\alpha}{k\beta}t \right) * r_2(-t) * a_2 \left(\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \right] \times \exp(i\mathbf{K}_1 \mathbf{r}) + \left[r_1(-t) * a_1 \left(\frac{\alpha}{k\beta}t \right) * r_2(t) * a_2 \left(-\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \right] \exp(i\mathbf{K}_2 \mathbf{r}). \quad (27)$$

如果限制(27)式中信号脉冲和参考脉冲在空间的分布,用 δ 函数表示,则(27)式变为

$$e(t) = [r_1(t) * r_2(-t)] \exp(i\mathbf{K}_1 \mathbf{r}) + [r_1(-t) * r_2(t)] \exp(i\mathbf{K}_2 \mathbf{r}). \quad (28)$$

(28)式表明在输出脉冲中实现了信号脉冲和参考脉冲的相关处理,这在信息的特征识别和通信中有一定的应用。

3) 如果全息记录时选用的参考脉冲在空域和时域上的宽度都很窄,可用 δ 函数表示。信号脉冲在时域分布用 δ 函数表示,探测脉冲在空域上用 δ 函数表示,则(25)式简化为

$$e(t) = r_3(t) * a_2 \left(\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \exp(i\mathbf{K}_1 \mathbf{r}) + r_3(t) * a_2 \left(-\frac{\alpha}{k\beta}t \right) \exp(i\mathbf{K}_2 \mathbf{r}). \quad (29)$$

由(29)式可见,输出的时域光场分布是由记录时信号脉冲的空域分布和探测脉冲的时域分布决定的,下面对(29)式进行数值模拟。

如果记录时信号脉冲在空域的分布是一个由字母 X 组成的图像,如图 3 所示。其空间分布在 x 轴上从 1~6 的区间内。假定探测脉冲在时域上具有高斯分布,宽度为 100 fs,参数 $\alpha/(k\beta)=1$ 。数值模拟(29)式中沿光矢量 \mathbf{K}_1 方向的输出光场分布如图 4 所示。从图 4 可以很清楚地看到,输出的时间图像模拟了输入的空间图像 X 的分布。不同的是原来图像 X 中的每个像素点都叠加了一个高斯分布的超短脉冲,且脉冲的宽度与探测脉冲的宽度相同。很显然,通过在频谱面上添加滤波器,实现了空域图像向时域图像的转换。

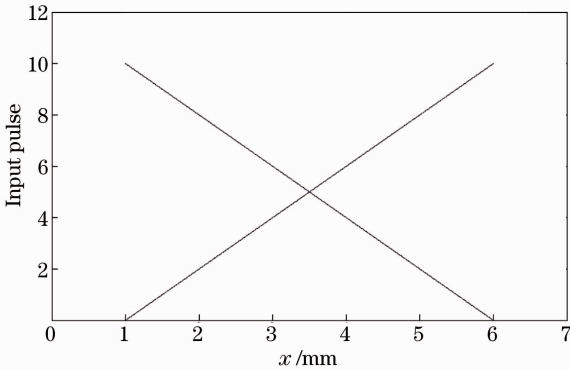


图 3 输入脉冲(字母“X”)的空间分布分布

Fig. 3 Diagram of the input spatial image (letter “X”)

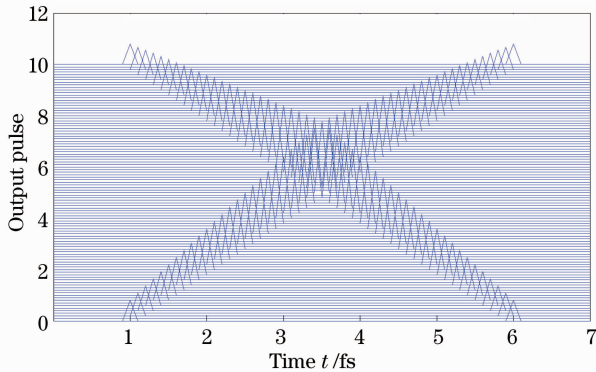


图 4 输入空间图像 X 时,光谱全息系统的时域输出分布

Fig. 4 Diagram of the readout temporal image when the input spatial image is letter “X”

如果减小探测脉冲在时域的宽度为 50 fs,对同样的输入图像,(29)式的数值模拟结果如图 5 所示。可以看到输出时间图像仍然反映了输入空域图像的空间分布,与图 4 变化趋势相同。图 5 中横轴上的高斯尖峰脉冲的时间半峰全宽比图 4 中的窄了一半,这是由于探测脉冲的宽度缩小一半引起的。另

外,图 5 中时间高斯脉冲图像之间的间隔也减小为图 4 中的一半,即图 5 中的高斯尖峰沿纵轴分布的密度比图 4 中的密度大。产生这种现象的主要原因是由卷积函数的性质决定的,一个宽的图像和一个很窄的图像卷积,结果相当于在宽图像的每个像素点叠加了一个窄的脉冲。窄脉冲间隔缩小一半,取样像素点增加 1 倍。随着探测脉冲时间宽度的变小,原图像 X 中每个像素点的时间高斯分布图像之间的间隔减小。可见图像的变化频率是与探测脉冲间隔有关的。

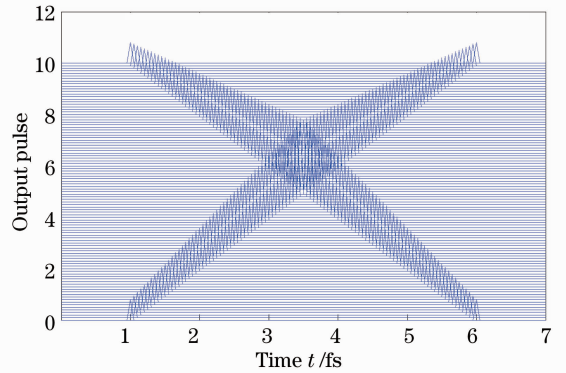


图 5 改变脉冲宽度时的输出图像

Fig. 5 Diagram of the readout temporal image when the duration of the input temporal pulse changes

对于同样的如图 3 所示的输入信号 X,如果改变参数项 $\alpha/(k\beta)$ 值从 1 变为 0.5,则输出图像如图 6 所示,相对于原来入射的空域图像展宽了 1 倍,但仍然实现了空域图像向时域图像分布的转换。每个空域图像的相应点都叠加了时域的超短脉冲。

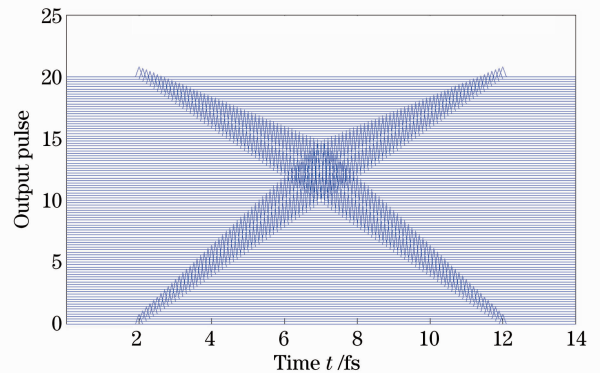


图 6 改变 $\alpha/(k\beta)$ 项时的输出图像

Fig. 6 Diagram of the readout temporal image when $\alpha/(k\beta)$ changes

由图 4~6 模拟的输出图像可见,通过频谱面添加空间狭缝滤波器,可以实现输入信号的空域图像向输出信号的时域图像的转换。通过改变结构参数

和入射脉冲的宽度,可以得到不同的输出结果。

5 结 论

基于传统的飞秒光谱全息结构,讨论了包含空间分布和时间分布的飞秒脉冲光谱全息的记录。为了实现图像的空间信息向时间信息的转换,提出了一种改进的光谱全息结构,即在频谱面上加狭缝空间滤波器,并推导了加入空间滤波器后光谱全息的记录和再现。数值模拟结果表明在输出脉冲中,原输入脉冲的空间分布被超短脉冲调制并以时间信息输出,实现了空间信息分布向时间信息分布的转换。为脉冲整形、时间脉冲信号的处理提供了新的参考,并可以在高速光通信,光网系统和光信息处理等领域,用于处理空域到时域的信息。

参 考 文 献

- 1 Y. T. Mazurenko. Holography of wave packets [J]. *Appl. Phys. B*, 1990, **50**(2): 101~114
- 2 A. M. Weiner, J. P. Heritage, J. A. Salehi. Encoding and decoding of femtosecond pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(4): 300~302
- 3 A. M. Weiner, D. E. Leaird, D. H. Reitze. Femtosecond spectral holography [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10): 2251~2261
- 4 T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis *et al.*. Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(6): 725~727
- 5 Y. Li, W. Watanabe, K. Yamada *et al.*. Holographic fabrication of multiple layers of grating inside soda-lime glass with femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **80**(9): 1508~1510
- 6 Lu Yunqing. Research development of femtochemistry [J]. *Laser*

- & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(9): 38~46
- 陆云清. 飞秒化学研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(9): 38~46
- 7 Zhu Huafeng, Chen Jianwen, Gao Hongyi *et al.*. Femtosecond holography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(5): 23~28
- 朱化凤, 陈建文, 高鸿奕 等. 飞秒全息术[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(5): 23~28
- 8 Zou Hua, Zhou Changhe. Femtosecond spectral holography and applications of femtosecond pulse shaping [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(5): 24~29
- 邹 华, 周常河. 飞秒光谱全息技术及飞秒整形技术的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(5): 24~29
- 9 Y. Ding, D. D. Nolte, M. R. Melloch. Time-domain image processing using dynamic holography [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1998, **4**(2): 332~340
- 10 T. Konishi, Y. Ichioka. Ultrafast image transmission by optical time-to-two-dimensional-space-to time-to-two-dimensional-space conversion [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(5): 1076~1088
- 11 D. M. Marom, D. Panasenko, P. C. Sun *et al.*. Spatial-temporal wave mixing for space-time conversion [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(8): 563~565
- 12 M. C. Nuss, M. Li, T. H. Chiu. Time-to-space mapping of femtosecond pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(9): 664~666
- 13 M. C. Nuss, R. L. Morrison. Time-domain images [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 740~742
- 14 P. C. Sun, Y. T. Mazurenko, W. S. C. Chang *et al.*. All-optical parallel-to-serial conversion by holographic spatial-to-temporal frequency encoding [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(16): 1728~1730
- 15 P. C. Sun, Y. T. Mazurenko, Y. Fainman. Femtosecond pulse imaging: ultrafast optical oscilloscope [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(5): 1159~1169
- 16 H. Tsunematsu, T. Arima, N. Goto. Photonic label recognition by time-space conversion and 2-D spatial filtering with delay compensation [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(14): 2698~2706
- 17 O. E. Martinez. Grating and prism compressors in the case of finite beam size [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(7): 929~934

栏目编辑: 何卓铭